

CHALMERS



Beräkningsgång för tvärspända GC-broar i limträ

PER ANDERSSON
ERIK JOHANSSON

EXAMENSARBETE

Högskoleingenjörsprogrammet Byggingenjör
Institutionen för bygg- och miljöteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2005

EXAMENSARBETE 2005:63

Beräkningsgång för tvärspända GC-broar i limträ

PER ANDERSSON, ERIK JOHANSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2005

Computing procedure of longitudinal stress-laminated timber bridges

PER ANDERSSON, 1983
ERIK JOHANSSON, 1982

© PER ANDERSSON, ERIK JOHANSSON

Department of Civil and Environmental Engineering
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Omslag:

Bilden visar en vägbro med tvärspädd träplatta, bilden återfinns i kapitel 3.2.2. Plattbroar. Där beskrivs även denna typ av bro mer ingående.

Chalmers
Göteborg, Sweden 2005

Sammandrag

Moelven Töreboda har sedan ca ett år tillverkat broar i limträ. Dimensioneringen är nu utledda till konsulter men företaget har ett behov av att lätt kunna sköta dimensioneringen på egen hand eftersom denna typ av broar blir allt vanligare.

Syftet med arbetet är att ta fram en beräkningsgång som kan användas vid dimensionering av en typ av bro som kallas tvärspäänd limträbro.

För att kunna komma fram till beräkningsgången har vi använt oss av en bok som heter ”*Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*” och är skriven av Michael A Ritter. Vi har anpassat hans beräkningsgång till de svenska standarderna d.v.s. bronormen bro 2004 och Boverkets konstruktionsregler. För att få en bättre förståelse så inleds arbetet med en del om limträ och en del om träbroar.

Arbetet resulterade sedan i en beräkningsgång i form av ett excelark med uträkningar och en bifogad förklaring av hur beräkningsgången är genomförd.

Nyckelord: beräkningsgång, tvärspäänd och limträ

Abstract

The aim for this work is to create a computing procedure of designing stress-laminated timber bridges. The computing procedure should be easy to use and it should be easy to change data in the procedure.

To create this computing procedure we have read the book "*Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*", written by the American author Michael A Ritter. In the book there is a computing procedure that is close to ours. We have used Ritter's procedure and modified it after Swedish standards.

The result of this work is the computing procedure.

The title of this work is "Computing procedure of longitudinal stress-laminated timber bridges"

Keywords: computing, procedure, timber-bridge, glue-lam, design

Förord

I detta förord vill vi passa på att tacka de personer som hjälpt oss med examensarbetet.

Först Roberto Crocetti, konstruktör på Moelven Töreboda som kom med idén till examensarbetet och ställt upp och svarat på frågor under arbetets gång.

Vår handledare Sören Lindgren vid Chalmers som även han alltid har ställt upp och varit tillgänglig när vi har haft funderingar om olika saker.

Termer och begrepp

BKR: Boverkets konstruktionsregler

BRO 2004: Vägverkets norm för brodimensionering.

Dymling: Kortare stag som borras in i träet.

Eurocode 5: Europeisk standard för dimensionering av brokonstruktioner.

Fingerskarv: Limmad längdskarv av virkesstycken, utformad med fingerliknande kilar. Fingerskarvning utförs industriellt under kontrollerade former, med olika limtyper beroende på användningsområde.

Flatsida: Den bredaste sidan på en planka eller bräda

Fukthalt: Används vid fuktdimensionering, definieras som kvoten mellan vattnets massa och virkesstyckets totala volym.

Fuktkvot: Fuktkvoten är kvoten av vattnets massa i fuktigt material och massan av det uttorkade materialet.

GC-bro: Gång och cykelbro, bro avsedd för gång och cykel trafikanter.

Höjdsida: Den vertikala sidan på den färdigmonterade balken.

Jämviktsfuktkvot: Trä som befinner sig i luft med konstant temperatur och konstant fuktighet antar så småningom en bestämd fuktkvot, jämviktsfuktkvot.

Klyvsida: Sågad yta

Kärnsida: Den sida som är närmast trädets kärna, dvs. mitten på trädet.

Tunghet: Materialets tyngd i Newton.

Ytfinish: Ytans utseende, dvs. hur väl hyvlad ytan är.

Innehållsförteckning

Sammandrag.....	I
Abstract.....	II
Förord.....	III
Termer och begrepp.....	IV
Innehållsförteckning.....	V
1. Inledning.....	1
1.1. Bakgrund.....	1
1.2. Syfte, avgränsningar.....	1
<i>Figur 1: Skiss av tvärspäänd limträbro</i> Metod.....	1
Metod.....	2
2. Materialet limträ.....	3
2.1. Tillverkningsprocessen.....	4
2.1.1. Kontroll och märkning.....	5
2.1.2. Limtyper.....	5
2.2. Tekniska egenskaper.....	6
2.2.1. Brandstabilitet.....	6
2.2.2. Styrka och styvhet.....	6
2.3. Hållfasthetsklasser.....	7
2.4. Fuktrörelser.....	7
2.5. Limträ genom livscykeln.....	8
3. Trä- och limträbroar genom historien.....	10
3.1. Kort historik om plattbroar.....	11
3.2. Olika typer av limträbroar.....	11
3.2.1. Balkbroar.....	11
3.2.2. Plattbroar.....	12
3.2.3. Fackverksbroar/gitterverk.....	13
3.2.4. Bågbroar.....	14
3.2.5. Hängbroar/snedkabelbroar.....	15
4. Beräkningsförfarande:.....	16
4.1. Indata.....	16
4.2. Egentyngder.....	16
4.3. Samverkan.....	16
4.4. Brottgränstillstånd.....	17
4.4.1. Längdled.....	17
4.4.2. Tvärled.....	17
4.4.3. Spännkraft.....	18
4.4.4. Spännstag.....	19
4.4.5. Stagbrickor.....	19
4.4.6. Sidolaster.....	19
4.4.7. Räckan.....	20
4.5. Bruksgränstillstånd.....	20
4.5.1. Nedböjning.....	20
4.5.2. Vibrationer.....	21
5. Avslutning.....	22
6. Referenser.....	23
6.1. Litteratur.....	23
6.2. Elektroniska källor.....	23
6.3. Muntliga källor.....	23
Bilagor	
Bilaga 1	

1. Inledning

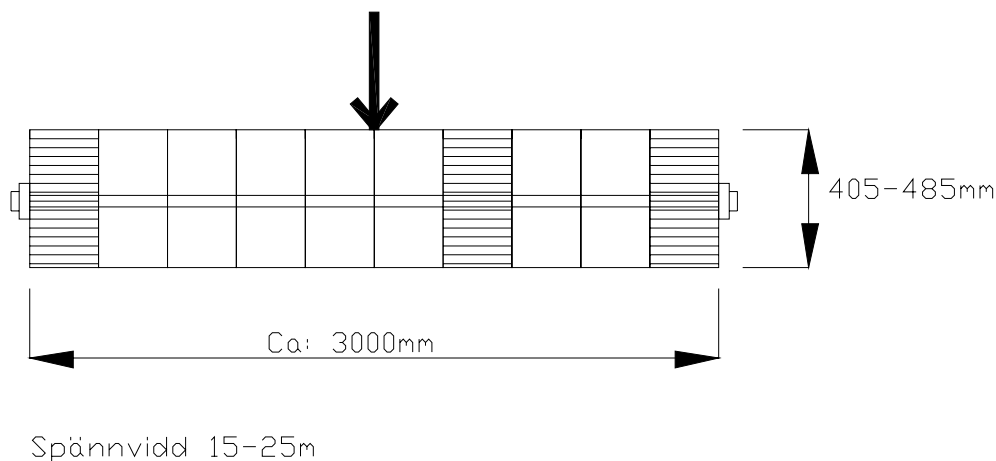
1.1. Bakgrund

Limträ är ett material som är lätt och flexibelt. Därför passar det bra till framförallt mindre brokonstruktioner som t.ex. gång och cykelbroar (GC-broar) men kan användas även till större broar. Limträbroar blir allt vanligare därmed behövs också ett beräkningsförfarande som lätt kan kontrolleras. Ett problem som kan uppstå är att när träet torkar och därmed krymper så kan det bli "glapp" mellan limträbalkarna och de järnstag som går tvärsigenom konstruktionen. Ett annat bekymmer är de vibrationer som uppstår i konstruktionen under belastning. Dessa vibrationer är ofta en dimensionerande faktor för konstruktionen.

1.2. Syfte, avgränsningar

Syftet med examensarbetet är att ta fram en användbar beräkningsgång för tvärsända limträbroar. Då arbetet började var det meningen att det skulle utgå från den Europeiska standarden Eurocode 5 (EC 5), men då inte alla delar som behövdes fanns i slutgiltig version så var det svårt att göra detta. Efter samråd med vår handledare så beslutade vi oss för att i istället utgå från de svenska standarderna i framtagandet av beräkningsgången.

Arbetet kommer främst att koncentreras kring mindre limträbroar som t.ex. GC-broar, enligt följande ungefärliga dimensioner. Brobredden är ca: 3m. Brons spännvidd är ungefär 15-25m. Limträbalkarna som används till konstruktionen är ofta mellan 405-485mm höga. Se även skissen nedan.



Figur 1: Skiss av tvärsänd limträbro

Metod

I boken ”*Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*” av Michael A Ritter finns en beräkningsgång för tvärsända träbroar. Denna har vi använt oss av och anpassat till svenska normer. Denna bok har vi även använt oss av för att fördjupa våra kunskaper om framförallt limträbroar. Vi har även varit på studiebesök på Moelven limträ i Töreboda, där vi fick lära oss hur det går till vid tillverkningen av limträelement och limträbroar. För att få en liten uppfattning om riktigheten i beräkningsgången så har vi jämfört de dimensioner på bland annat balkarna i bron vi fått fram, med dimensioner från ritningar över redan färdigställda broar. Den färdiga beräkningsgången presenteras i ett excelark.

2. Materialet limträ

Limträtekniken började utvecklas i Tyskland under slutet av 1800-talet och kom till Skandinavien i början på 1900-talet, då tekniken introducerades i Norge. Först 1918 tillverkades den första svenska limträ konstruktionen, vilket skedde på ett företag i Töreboda som idag är en av Europas största limträ tillverkare.

Limmade träkonstruktioner har använts länge men fick sitt kommersiella genombrott i början av 1900-talet.

1901 patenterade en tysk byggnadskonstruktör vid namn Otto Hetzer (1846-1911) sina limmade träkonstruktioner, under namnet Hetzer Binder. Han använde en speciell sammansättning av lim som han dock aldrig lyckas få patent på. Därför hålls limreceptet hemligt till långt in på 1950-talet. 1917 kommer limträkonstruktionerna till Norden genom en norsk byggnadskonstruktör vid namn Guttorm Brekke som köper patenträttigheterna till Hetzer-Binder. Han får då ensamrätt för konstruktionen i Norge, Sverige och Finland och startar tillverkningen i Norge. Efter två år startar ett dotterbolag till det norska bolaget. Bolaget fick namnet AB Träkonstruktioner och tillverkningen lokaliserades till orten Töreboda i Sverige. Anledningen till att det blev just Töreboda berodde på de goda transportmöjligheterna som Götakanal gav. En annan anledning var närheten till råmaterial. På den tiden gjordes limmet av mjölkprodukter vilket det fanns gott om i trakten. Det fanns även gott om träåvara.

De första träkonstruktionerna som tillverkades enligt Hetzers system var till en lokal biograf år 1921. Nu börjar även Statens Järnvägar få upp ögonen för limträ och beställer först konstruktioner till en gångbro utanför Göteborg. Därefter levererar AB Träkonstruktioner även Hetzer-konstruktioner till bl.a. Malmö central och Kungliga Lawn tennisklubben (KLTK) i Stockholm. Men företaget går dåligt och företaget försätts i konkurs 1924.

1925 bildas ett nytt bolag som får namnet AB Fribärande Träkonstruktioner. Deras första uppdrag blir konstruktionerna till Stockholms Centralstation. Det nya företaget går bättre och tillverkningen av limträkonstruktioner får från och med nu stor betydelse för framförallt perrongtak inom järnvägen och hallbyggnader.

På 1940-talet börjar fenol-recorcinol-lim användas, vilket är mycket mer väderbeständigt än det gamla limmet. På 1960-talet finns det tre etablerade limträ tillverkare i Sverige och dessa finns alla kvar än idag och ligger i Töreboda, Bygdsiljum och Långshyttan.

Först var limträkonstruktionerna inte speciellt genomslagskraftiga men sedan början på 1960-talet så har produktionen ökat stadigt. Idag ligger den totala produktionsvolymen i de nordiska länderna på drygt 200 000 m³, varav ungefär hälften exporteras. Den svenska konsumtionen har legat på ungefär 30 000 m³ under 1990-talet.

Limträ i Norden används framförallt inom husbyggnadssektorn, till exempelvis skolor, daghem, bostadshus och inte minst till industribyggnader. Limträ är ett så mångsidigt och användbart material så det har kommit att användas till väldigt många olika områden, allt ifrån ställningsbyggnad till kraftledningsstolpar.

2.1. Tillverkningsprocessen

Det skiljer inte speciellt mycket i limträ tillverkningen mellan olika länder och fabriker, utan den går till på ungefär samma sätt överallt. I Norden används mest gran i limträ tillverkningen.

Konstruktioner i väldigt fuktiga miljöer tillverkas av tryckimpregnerat furuvirke, detta för att förhindra angrepp av t.ex. röta vilket påverkar hållfastheten i träet negativt. Virket som används är nästan uteslutande torkat och hållfasthets sorterat när det levereras till limträfabriken. Fuktkvoten skall vara mellan 8-15% i träet när lamellerna limmas samman. Fuktkvoten får inte heller skilja mer än 4% i två intilliggande lameller i limträelementet. Detta ger den bästa hållfastheten i limfogen och sprickbildningen i det färdiga elementet blir då också minimal, då fuktkvoten ligger i närheten av jämviktshalt i konstruktionen. Det blir alltid en viss sprickbildning i konstruktionen, det går inte att undvika, men den lilla sprickbildning som uppkommer har oftast en försumbar inverkan på konstruktionen.

Limträ tvärsnittet kan se ut på två sätt, nämligen homogent limträ och kombinerat limträ. I tvärsnittet hos det homogena limträet har alla lamellerna ungefär samma hållfasthet, men tvärsnittet hos det kombinerade limträet är uppbyggt på så sätt att där används ett virke med högre kvalitet i de yttre delarna i tvärsnittet, där belastningarna på konstruktionen normalt är störst, detta för att kunna utnyttja träets hållfasthetsegenskaper på ett så effektivt sätt som möjligt.

När virket har torkats och sorterats efter hållfasthet, vilket ofta görs direkt på sågverket så fingerskarvas det, dvs. virket fogas samman till lameller. Lamellerna kapas i lämplig längd och staplas på varandra. Som tidigare nämnts så tas det här för kombinerat limträ hänsyn till den inbördes ordningen mellan de yttre och inre lamellerna. Lamellerna vänds så att kärnsidan ligger åt samma håll i hela tvärsnittet med undantag för ytterlamellerna. Det är viktigt att tänka på att de yttersta lamellerna alltid skall vara vända med kärnsidan utåt. Innan det går att hyvla lamellernas flatsidor och bestryka dessa med lim, så förs balkarna igenom vad som kan liknas med en stor mikrovågsgugn där limmet i fingerskarvarna härdas. Att använda sig av en sådan här ugn kortar avsevärt ned härdningstiden från ett par timmar till bara ett par minuter. Tiden för härdning är då inte heller så beroende av vilken sorts lim som används och vilken temperatur det är i lokalen.

Efter att lamellerna har bestrukits lyfts lamellpaketen över till s.k. limbänkar där de pressas samman till balkar med lämpligt presstryck. Här kan de också böjas till olika båg- eller ramformar eller ges önskad överhöjning. Lamellpaketen måste ha placerats på limbänkarna innan limmet som lamellerna blivit bestrukna med har börjat härdas. Limmet härdas under kontrollerade former där fukt och

temperaturförhållandena övervakas, eventuellt så tillförs ytterligare värme till härdningsprocessen. När limmet i fogarna har härdat klart så avlägsnas presstrycket och limträelementen lyfts över från limbänken till en planhyvel, där hyvlas höjdsidorna på balkarna så att de får önskad ytfinish. Sedan rensågas kanter och det görs även håltagning och förborring av förband.

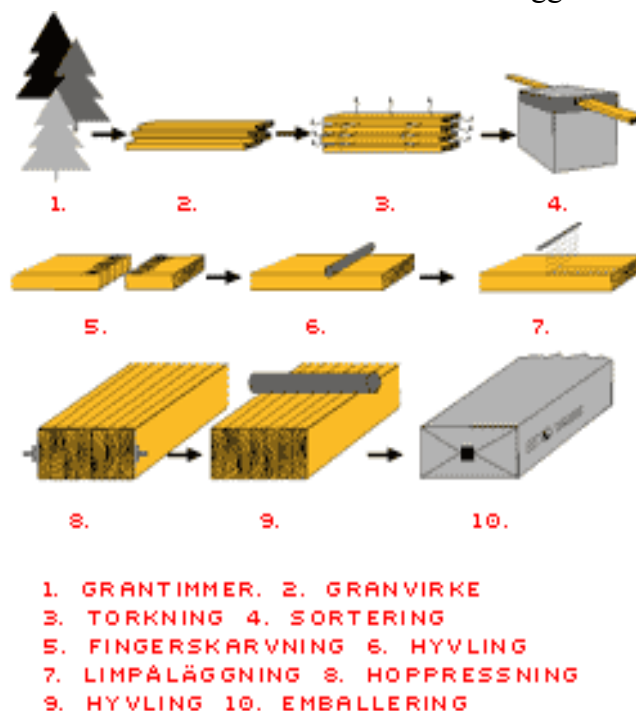


Bild 1: Tillverkningsschema för limträbalk

2.1.1. Kontroll och märkning

Det ställs hårda krav på noggrannheten vid limträ tillverkning, bl.a. vid tillverkning och bestrykning av limmet och vid bestämmande av presstrycket i limbänkarna. För att kunna garantera att limträelementen uppfyller gängse krav och normer och håller en jämn och hög kvalitet, så måste tillverkaren utföra och dokumentera täta och noggranna egenkontroller. Bland annat så kontrolleras lamellvirkets fuktkvot och limhallens temperatur och fukthalt. Kontrollerna innebär att det regelbundet tas ut prover på hela eller delar av element för kontroll av limfogarnas hållfasthet och beständighet. Tillverkarnas kvalitetssystem skall vara godkänt av ett särskilt certifieringsorgan, i Sverige är det Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut i Borås som utfärdar certifikaten. Den interna kontrollen övervakas av Svensk Limträkontroll som är det officiella kontrollorganet för limträ tillverkning i Sverige. De gör även oanmälda kontrollbesök för att se så att reglementet efterföljs.

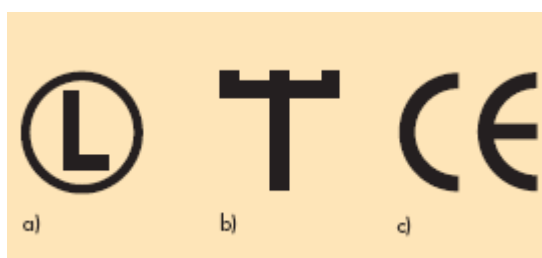
Inom Norden så är L-trä (L-märkt limträ) den rådande benämningen på limträ som är tillverkat av minst fyra lameller och kontrollerats och märkts enligt L-regler 1997:1 (*Regler för tillverkningskontroll av limträ och limmat konstruktionsvirke*), dessa är utgivna av Svensk Limträkontroll. Samordningen mellan de nordiska ländernas regelverk görs av Nordisk Limtränamnd som är ett samarbetsorgan för de nordiska ländernas tillverkningskontroller.

Utöver L-märkningen (se figur 3) så skall varje limträelement märkas med uppgifter om vem tillverkaren är, hållfasthetsklass (t.ex. L40), Limtyp (typ I eller II enligt EN 301), identifiering så att det går att se när det är tillverkat, tillverkningsstandard (EN 386) samt Boverkets inregistrerade varumärke. Den svenska märkningen kan i framtiden ersättas av, eller kompletteras med, CE-märket.

Det vanligaste är att limträelementen märks med en stämpel på ändytan men det förekommer också att det limmas eller spikas på märkskyltar. På följesedeln skall det också stå vilket organ det är som har utfärdat märkningsrätten och numret på certifikatet.



Figur 2: Märkskylt för limträ



Figur 3: a) L-märket b) Boverkets märke c) CE-märket

2.1.2. Limtyper

Det lim som används vid limträ tillverkning används enbart sådant lim som har använts länge inom limträindustrin. Limmets egenskaper skall vara dokumenterade sedan långtid och visa sig ha en hög hållfasthet och beständighet vid långvarigbelastning. Nordisk Limtränamnd ger ut en lista på de limtyper som är godkända att använda. I europastandarden EN 301 anges de krav som limmet skall uppfylla. Limmet delas i EN 301 in i två klasser, Limtyp I och Limtyp II efter klimatklass. Limtyp I

får användas i samtliga klimatklasser medan Limtyp II enbart får användas till konstruktioner i klimatklass 0-2. Exempel på typ I limmer är PRF och MUF-limner. PRF-lim är ett syntetiskt tvåkomponentslim som innehåller ämnena fenol, resorcinol och formaldehyd, därav namnet. Dessa PRF limmer används i alla klimatklasser både inomhus och utomhus. PRF-limfogarna är mörkt rödbruna. MUF-limmets (melamin – urea – formaldehyd) fogar är till en början ljusa men mörknar med tiden. Vid fingerskarvningen av lamellerna så används antingen PRF eller MUF limmer beroende på hurdana krav det ställs på skarvarnas synlighet. Används ett PRF-lim så framträder fingerskarvarna som mörka fläckar på balkens ytor. Om ett MUF-lim används blir det i stället en tunn zig-zag-linje vid fingerskarvarna. Skall limträelementen vara av mindre bredd än 90mm så klyvsågas dessa ofta från bredare balkar. Därför kan sågsnittet gå igenom antingen öppna eller limfyllda sprickor i träet, detta kan ge upphov till flisning, om det dessutom har använts ett fenol-resorcinollim mycket synliga limfläckar på elementets klyvsida. Därför bör klyvsågade element undvikas när det ställs höga krav på elementets utseende. Det skall framgå vid märkningen av limträelementen om de är limmade med ett typ I eller ett typ II lim. För att ett nytt lim skall godkännas av Nordisk Limtränämnd så måste det ha använts under lång tid i och med dokumenterat gott resultat vid normal produktion i limträfabriken.

2.2. Tekniska egenskaper

Limträets tekniska egenskaper är väldigt lika träets egenskaper eftersom det är det som är råmaterialet. Det som i huvudsak skiljer är att det är brandsäkrare eftersom det har större volym och att det är starkare eftersom det är utvalda lameller, som dessutom ger en gynnsam spridning av eventuella defekter.

2.2.1. Brandstabilitet

Trä är ett brännbart material, men med ett stort tvärsnitt så har träkonstruktioner en hög brandstabilitet. Detta beror på att inträngningshastigheten är långsam vid en brand, mindre än 1 mm per minut. Att inträngningshastigheten är så långsam beror på bl.a. på att det kolskikt som bildas av lågorna isolerar träet mot elden.

För att få en bra brandklass på en konstruktion så är det viktigt att förbindningarna mellan limträelementen är brandskyddade. Det vanligaste sättet att fälla in förbindningskonstruktionen i limträelementen, detta kan göras genom t.ex. inslitsade metallplattor, ståldymlingar och inlimmad skruv.

2.2.2. Styrka och styvhet

Limträ beter sig i stort sett som vanligt konstruktionsvirke dvs. hållfastheten varierar beroende på fiberriktning. Detta innebär att limträ är anisotropt, dvs. det är inhomogent vilket innebär stor variation i materialegenskaper och att det blir sämre hållfasthet när fuktigheten och belastningstiden ökar. Limträ har dock högre hållfasthet och mindre spridning i materialvariationerna eftersom lamellerna gör att risken för punkter med avsevärt försämrade hållfasthet minskas kraftigt.

När limträbalkar provas i laboratoriemiljö med korttidslast till brott så kännetecknas brottet av att det blir väldigt sprött. Anledningen till detta är att brottet nästan alltid sker vid en kvist eller en

fingerskarv. Att det blir ett sprött brott innebär bland annat att när spänningen i en viss punkt överskrider ett kritiskt värde kollapsar konstruktionen. Eftersom dessa punkter ökar när volymen på balken ökar så kommer hållfastheten att minska med ökad volym. Detta kallas volymeffekt och är viktigt att ta hänsyn till vid dimensioneringen av limträkonstruktioner

För att kunna dimensionera limträkonstruktioner behövs ett karakteristiskt hållfasthets- och styvhetsvärde som fås genom provning av ett stort antal provkroppar i ett laboratorium. När detta görs fås en spridning av hållfasthetsvärdet som sedan kan läggas in i ett frekvensdiagram som skapar en bild över hur brotthållfastheten är fördelad. Frekvensdiagrammet brukar sedan med acceptabel noggrannhet kunna anpassas till en statisk fördelning, vanligtvis normalfördelning.

Sedan kan ett karakteristiskt hållfasthetsvärde fås ut med hjälp av formeln: $f_k = f_m - c \cdot s$

Där f_m betecknar medelvärdet, s standardavvikelsen och c en koefficient vars värde beror av hur det karakteristiska värdet definieras. Då beror det karakteristiska hållfasthetsvärdet inte bara på medelvärdet utan också till stor del utav spridningen.

Normalt brukar nedre 5 % -fraktilen användas när det karakteristiska hållfasthetsvärdet bestäms, det innebär alltså statistiskt sett att i 5 fall av 100 så underskrivs värdet.

På motsvarande sätt bestäms de karakteristiska styvhetsvärdena med utgångspunkt från medelvärdet istället för 5 % -fraktilen.

2.3. Hållfasthetsklasser

Limträ brukar tillverkas enligt nationella eller europeiska normer, som håller sig till bestämda hållfasthetsklasser. Vad som tillhör vilken klass beror på virkets placering i tvärsnittet och dess hållfasthet. De olika hållfasthets- och styvhetsvärdena för de olika klasserna anges sedan i de olika normerna. Nordiskt limträ tillverkas normalt i Hållfasthetsklassen L40 som motsvaras av GL 32 i den Europeiska standarden Eurocode 5. Limträ som inte tillverkas enligt normerna får bara användas i konstruktioner om det är typgodkänt.

2.4. Fuktrörelser

Trä är ett levande material som ständigt ändrar form pga. dess fuktkvot. När fuktkvoten stiger i träet så sväller träet och när den minskar så krymper träet. Pga. de svängningar i klimatet som förekommer i Sverige under året så är fuktkvoten aldrig konstant i träet utan den förändras ständigt. Fuktkvoten varierar med ungefär 3-5 procentenheter för konstruktioner inomhus, detsamma gäller för konstruktioner utomhus som är placerade under tak. För oskyddade utomhuskonstruktioner är variationen 8-10 procentenheter. Konstruktioner som är uppförda inomhus är vanligen torrast på vintern medan utomhuskonstruktioner är torrast på sommaren. Träets fuktrörelser är betydligt större tvärs fiberriktningen än vad de är parallellt fibrerna; 0,2 % jämfört med 0,01 % för varje procent fuktkvoten ändras. De maximala fuktrörelserna hos limträelement kan antas vara:

- Vinkelrätt fiberriktningen ungefär 10mm/m
- Parallellt fibrerna ungefär 0,5mm/m

Detta under förutsättning att limträet är i klimatklass 1 eller 2.

Träet kan spricka eller stukas om fuktrörelserna i tvärriktningen förhindras med tvång, eftersom hållfastheten tvärs fiberriktningen kan överskridas. Konstruktionen bör därför utformas så att fuktrörelserna förhindras så lite som möjligt. Om skruvförband används bör dessa vara tillräckligt väl åtdragna så inte dess bärförmåga och styvhet minskar. Därför bör det vara möjligt att dra åt förbanden i efterhand när virket har fått möjlighet att torka. Detta gäller även tvärspänningsstagen i plattbroar. Minskningen i inspänningskraften beror på träs kryprörelser och variationer av träs fukthalt. Undersökningar gjorda i Ontario Kanada visar att krypningen i träet minskar med antalet gånger som stagen efterspanns. Om bron bara spänns vid konstruktionstillfället så försvinner 80 % av tryckspänningen pga. krypning. Efterspänns bron till maximal tryckspänning ungefär 1 vecka efter första inspänningstillfället så behålls ytterligare lite grand av spänningen i bron. Återspänns däremot bron ytterligare en gång inom 4-6 veckor så kan den totala minskningen av tryckspänning i bron begränsas till totalt 60 %. Är virket till bron torrt (fukthalt < 19 %) vid uppspänningstillfället så blir spänningsförlusterna pga. fuktrörelser så små att de kan försummas. Om fukthalten överstiger 19 % vid byggskedet så bör regelbundna återspänningar göras till det att jämviktsfuktkvoten i träet uppnås. Tryckspänningen i bron bör regelbundet kontrolleras som del i underhållet av bron.

2.5.Limträ genom livscykeln

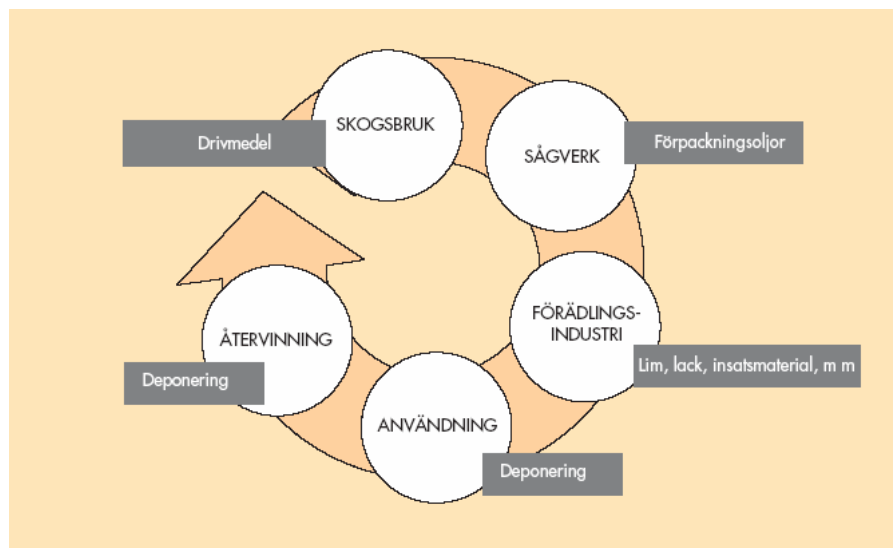
Eftersom limträ till allra största andelen består av trä som limmas ihop så har det väldigt liten belastning på miljön och kan återanvändas, återvinnas eller utnyttjas till energiåtervinning. Råvaran som används är barrträd som oftast är från trakten och syntetiskt lim. Limmet tillverkas av icke förnyelsebara råvaror vilket bidrar negativt till miljön men andelen lim i den färdiga varan är så liten så att den nästan är försumbar. Det förekommer dock visst utsläpp i tillverkningsprocessen i form av diskvatten från limutrustningen, härdat överskottslim och små mängder flyktiga ämnen som är oundvikligt vid härdningen.

Limträ brukar hålla en fuktkvot av 12 % när det tillverkas. För få ner fuktkvoten till det så måste träet torkas, det görs oftast med system som värms upp av träspån och andra biprodukter från träindustrin som påverkar miljön i liten utsträckning.

Eftersom limträ ofta är specialtillverkat beroende på objektet det skall levereras till så blir de heller inte mycket spill i

form av byggrester och det som blir kan gå till flisning och energiåtervinning. Energimässigt innehåller limträ lika mycket energi som massivt barrträ.

Även under brukstiden är limträ snällt mot miljön. Det underhålls med vanliga traditionella metoder och möjligheten att reparera och byta ut delar av limträelementen är stor. Det är även lätt att bearbeta och omarbota i efterhand, såsom t.ex. slipning.



Figur 4: Träproduktens kretslopp. Limträ är en förädlad träprodukt.

Om man känner hållfasthetsklass och belastningshistoria finns det också en god möjlighet att återanvända produkterna. Det är då viktigt att bedöma kondition och förutsättningar utifrån varje enskilt fall. Limträ kan, om det används fel eller konstrueras fel brytas ner biologiskt precis som annat trä.

För att kunna redovisa limträts miljöpåverkan under den tiden av livscykeln som kan kontrolleras av limträstillverkarna så behövs det en miljödeklaration som flertalet av limträ tillverkarna i Norden har utarbetat efter samma mall. Dessa miljödeklarationer kan beställas gratis hos limträstillverkarna.

3. Trä- och limträbroar genom historien

Människan har alltid haft behov att ta sig över vattendrag eller andra hinder. Från en början användes väldigt enkla konstruktioner som till exempel att det lades ut några extra stenar i vadställen. Dessa förbättrades sedan genom att man lade ut några timmerstockar på stenarna och fick då en primitiv träbro som vi idag brukar kalla spång. I takt med att behovet att förflytta sig ökade fördes utvecklingen av brokonstruktioner framåt. Ett exempel är att Julius Cesar lät uppföra en bro över floden Rhen, nära Koblenz, år 55 f Kr. Bron var gjord av pålar i trä och var 140 meter lång och 5 meter bred. Efterhand vill man ha större spännvidd mellan stöden och bättre hållbarhet vilket gör att man börjar konstruera stöden av sten så att träkonstruktionerna hamnar över vattenytan. Den längre spännvidden gjorde att det behövdes en mer avancerad bärighetskonstruktion vilket ledde till utnyttjandet av fackverksprincipen och underspända balkar.

Att man just valde trä som byggnadsmaterial hade sina naturliga förklaringar, de enda materialen som fanns tillgängliga var sten och trä. Detta gjorde att i skogrika trakter var valet självklart, det blev trä. Eftersom trä är känsligt mot fukt, så för att skydda själva brokonstruktionen och även dess trafikanter från nederbörd så byggdes en överbyggnad på bron. Dessa överbyggnader var vanligast i Mellaneuropa men det fanns också några i nord. Det är väldigt få som är bevarade men ett exempel är bron i Vaholm över ån Tidån i Västergötland. En annan som är bland de äldsta träbroarna i Sverige är Lejonströmsbron i Skellefteå och den är fortfarande i trafik efter vissa ombyggnader.



Bild 2: Täckt bro över ån Tidån i Västergötland, fotograf P Andersson

Det finns ett antal andra länder som har starkare tradition i att bygga broar i trä. Schweiz till exempel är ett land med stor tradition att bygga träbroar, där finns över 200 överbyggda broar, vissa med anor från medeltiden, som vårdas med ömhet. Även nuförtiden tillverkas mycket träbroar där, både för lätt och tung trafik, även fast det inte alltid är billigaste alternativet.

Nordamerika är också en kontinent med träbrotradition. Här byggdes det många träbroar parallellt med att järnvägsnätet byggdes ut under förra århundradet, det fanns under den tiden flera hundra kilometer träbroar avsedd för järnvägstrafik. Än idag så finns det många träbroar där bara i USA finns det 70 000 träbroar som är över 6 meter långa.

3.1. Kort historik om plattbroar

Idén med att tvärspanna plankor för att få en platta som kan användas som bro konstruktion föddes i Kanada. När timmer skulle forslas ut ur de stora skogarna så behövdes en lättkonstruerad tillfällig bro som kunde ta olika fordon över mindre och medelstora vattendrag och ojämnheter i terrängen. Då gjordes en platta av plankor som ställdes på högkant och sedan pressades dessa plankor ihop med ett antal stålstag. Tanken var att konstruktionen skulle bete sig som en platta och därmed få en bro som är lätt att flytta och att hantera. Sedan utvecklades denna konstruktion till en permanent typ av bro. För att kunna använda längre spännvidder behövdes ett sätt att utnyttja materialet bättre, då började limträ användas till broarna vilket gjorde att det kunde byggas längre broar.

I Sverige idag är limträ det vanligaste materialet till den här typen av bro. Utvecklingen av att skydda bron har också gått framåt, för att bron skall hålla så länge som möjligt täcks bron med ett tätskikt på ovansidan och ofta med någon panel eller liknade på sidorna. Detta gör att denna typ av bro idag bör kunna ha en livslängd på upp till 80 år.

3.2. Olika typer av limträbroar

Det finns tre huvudtyper av limträbroar, balkbroar, bågbroar och hängbroar. Till balkbroar kan också räknas fackverksbroar och plattbroar.

Det går inte att säga vilken typ av konstruktion som är bäst utan det beror helt och fullt på vilka förutsättningar som råder på den plats där bron skall byggas, t.ex. vilken den fria spännvidden är och hur stor den fria höjden skall vara. Valet av brotyp beror givetvis också på vad den skall användas till, om det är en gång och cykelbro eller om det är en vägbro. Vanligast är dock att träbroar används som GCM-broar. Vilka grundförutsättningarna är på platsen spelar också in. Även den estetiska biten spelar en stor roll i valet av bro, därför att en bro blir ofta ett dominerande inslag i landskapet. Även val av byggnadsmaterial och ekonomi är viktiga faktorer i val av brokonstruktion.

3.2.1. Balkbroar

Bärverket hos balkbroar är oftast konstruerat av två eller flera längsgående limträbalkar. Om belastningen på bron är liten och det är fråga om små spännvidder går det även att använda sig av sågat virke. Balkarna i bron kan sträcka sig över ett eller flera fack. Oftast så tillverkas brobanan av plank, ofta täcks brofarbanan även av en asfaltbeläggning för att bl.a. skydda bron från regn. När det inbördes avståndet mellan balkarna i bron är litet så kan brobanan placeras direkt på bronns huvudbalkar. Vid mindre brokonstruktioner fungerar brofarbanan som en skiva och tar därmed upp horisontala krafter som t.ex. vindkrafter. När spännvidderna blir större så måste speciella vindförband konstrueras, oftast så konstrueras dessa som horisontella fackverk som placeras mellan bronns huvudbalkar i höjd med deras under- eller översida. Då avstånden mellan balkarna blir så stora så att det inte längre går att placera brofarbanan direkt på dessa så läggs denna på tvärgående syllar som i sin tur är placerade direkt på bronns huvudbalkar. Syllarna leder då vidare de trafiklasten som belastar bron vidare ner i huvudbalkarna och ut i stöden. Om bron blir riktigt stor med långa spännvidder och tung trafik, så utformas brobanan som en förspänd platta, som statistiskt samverkar med brobalkarna i ett låd eller T-tvärsnitt. När plattan är förspänd och integrerar med huvudbalkarna är det inte nödvändigt att konstruera ett särskilt vindförband.



Bild 3: Bågbro i Lögarängshamnen, Västerås kommun

3.2.2. Plattbroar

Den alla enklaste formen av plattbro är spången, som är en kombination av både farbana och bärverk i samma konstruktion. En vidareutveckling av denna gamla teknik är den tvärsända träbron. Det var i Kanada som tekniken med tvärsända plattor först utvecklades. Brobaneplattan konstrueras av limträbalkar. Om spännvidderna är mindre går det även att använda plankor, som spänns ihop med stag av höghållfasthetsstål (liknande förspänd betong). Kraftöverföringen mellan balkarna i broplattan sker med hjälp utav tryck och friktion mellan limträbalkarna, så det är inte nödvändigt att t.ex. limma ihop balkarna eller använda sig utav andra typer av mekaniska fästdon. Friktionen mellan balkarna uppstår utav det tvärgående tryck som appliceras på plattan av de höghållfasthetsstål som spänner ihop den. Stålen placeras med jämna mellanrum i förborrade hål utefter plattans långsida och spänns upp med en hydraulisk domkraft (Bild 4).



Bild 4: Hydraulisk domkraft för tvärspanning av ståltag



Bild 5: Plattbro någonstans i Sverige

Plattan monteras oftast färdigt på fabrik innan den sedan körs på lastbil till byggplatsen, där den lyfts på plats med en kran. Plattbroar utnyttjar materialet på ett effektivt sätt eftersom trycket från hjulen fördelas på ett bra sätt i sidled. Den har också en stor brottsäkerhet. Eftersom plattan är styv i sidled så kan den användas som vindförband. När plattbron har getts en beläggning så fungerar den utmärkt som vägbro eller GCM-bro, beläggningen skyddar även konstruktionen från fukt uppifrån. Eftersom broplattan har en liten yta i förhållande till dess volym så blir variationen i träets fuktkvot liten, därför blir även träets svällning och krypning liten. En annan fördel med den tvärsända plattan är att alla balkar i plattan inte behöver vara kontinuerliga över bronns hela spännvidd. Detta till följd utav den kraftöverföring som uppkommer mellan balkarna pga. den friktion som skapas i och med uppspännandet av plattan. Kombinerar brobanan med andra typer av bärverk så går det att bygga brobanan kontinuerlig i flera fack.

3.2.3. Fackverksbroar/gitterverk

Konstruktionssystem som består av sammankopplade stänger som bildar ett stabilt bärverk kallas fackverk. Om stängernas tyngdpunktslinjer sammanstrålar i knutpunkterna och dessutom är ledat förbundna med varandra så överför stängerna endast tryck och dragkrafter. Det uppstår alltså inget moment i stängerna som det skulle göra om de var böjstyvt förbundna. Fackverksbroar används främst då spännvidderna blir så stora att massiva bärverk inte klarar av belastningarna. Fackverksbroar tillverkas på fabrik i lagom stora delar så att det skall gå lätt att frakta och montera bron.

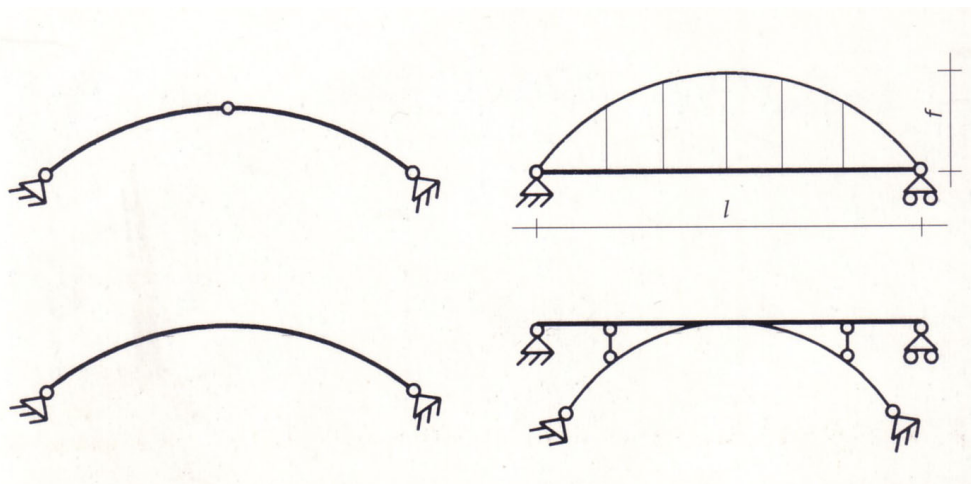


Bild 6: Fackverksbro någonstans i Sverige

Ett gitterverk är uppbyggt utav ett flerdelat fackverk inom vilket de korsande livstängerna bildar ett rut- eller nätmönster. Ett gitterverk är statiskt obestämt, men kan förenklat sägas vara konstruerat av flera statiskt bestämda fackverk. Stängerna fogas samman med bultar, mellanläggsbrickor och spikförband.

3.2.4. Bågbroar

Bågarna tillverkas oftast utav limträ, de sammanfogas och stabiliseras i tvärriktningen med t.ex. skivor eller förband. Vid stora spännvidder används oftast treledsbågar, detta pga. svårigheter med att tillverka så stora element, men kanske framförallt att det är väldigt krångligt att transportera element som är längre än 20m. En treledsbåge är även fördelaktig ur ett statiskt perspektiv. Då den är statiskt bestämd så klarar den av att hantera relativt stora sättningar i grundkonstruktionen. Om spännvidderna är mindre går det bra att tillverka ramen i ett stycke som en s.k. tvåledsbåge. Statiskt obestämda konstruktioner är ger dock större påkänningar av tvångskrafter vid stödförskjutningar. Brons överbyggnad konstrueras oftast med dubbla bågar och brobanan placeras antingen under, mellan eller ovanpå bågar (se figur 5).



Figur. 5: Olika bågkonstruktioner.

3.2.5. Hängbroar/snedkabelbroar

För att överbrygga större avstånd är hängbroar eller snedstagsbroar bra att använda sig av. Hängbron är uppbyggd av en förstyvad brobana som är upphängd med vertikala stag i bärkablar som sträcker sig mellan två pyloner.

Snedkabel bron är konstruerad av en balkbro som är upplagd på minst två fasta stöd. Mellan stöden så hängs bron upp av sneda kablar som sträcker sig från en eller flera pyloner. Huvudbalkarna, oftast brons långsidor, kan vara antingen raka eller böjda. Det är även möjligt att använda sig utav fackverksbalkar. Det vanligaste är att balkarna i bron är kontinuerliga.



Bild 7: Snedkabelsbro över Örekilsälven i Munkedal (Fotograf: P Andersson)

Vid hängbrokonstruktioner förs horisontalkrafterna i hängkabeln ner till ett ankare i marken. När en snedstagsbro används så tas horisontalkrafterna upp som tryckkrafter i antingen brobanan eller förstyvningbalkarna.

4. Beräkningsförfarande:

Vi ville ha en internationell standard som grund för beräkningsmodellen, så vi började med att gå igenom Eurocode del 5 och det som fanns om träbroar i den. Då inte alla Eurocode delar fanns i slutgiltig version så var det svårt att få tag i de internationella förutsättningarna. Så efter en tids arbete med Eurocode kom vi efter samråd med Roberto Crocetti på Moelven, fram till att vi skulle gå efter svenska standarder dvs. Bro 2004 och BKR för att inte blanda standarder från olika länder.

Vår tanke med beräkningsmodellen är att mata in indata och sedan få ut erforderlig dimension på limträbalkarna samt andra delar som ingår i konstruktionen. Det skall också finnas en stor flexibilitet, alla indata skall lätt kunna ändras utan att det ställer till med en massa strul.

4.1. Indata

För att få en logisk ordning på beräkningsgången börjar den med ett antal indata som brons dimensioner, limträts dimensioner och tunghet och samma sak för beläggningen. Tungheten är tagen från bronormen Bro 2004 och limträet är valt efter den svenska standarden med 45 mm tjocka lameller. Sedan kommer ett antal materialkonstanter, främst för limträ L40 som är det material som oftast används vid dimensionering av limträbroar. I denna del finns även definitioner av böjmomentet i olika led tillsammans med de koefficienter och faktorer som är nödvändiga för beräkningarna. Dock är materialkonstanterna för de olika stålsorterna placerade ihop med stålberäkningarna, detta för att skapa en lättare överblick. Beräkningarna är gjorda i säkerhetsklass 3. Alla materialkonstanter dimensionerande värden räknas ut enligt BKR.

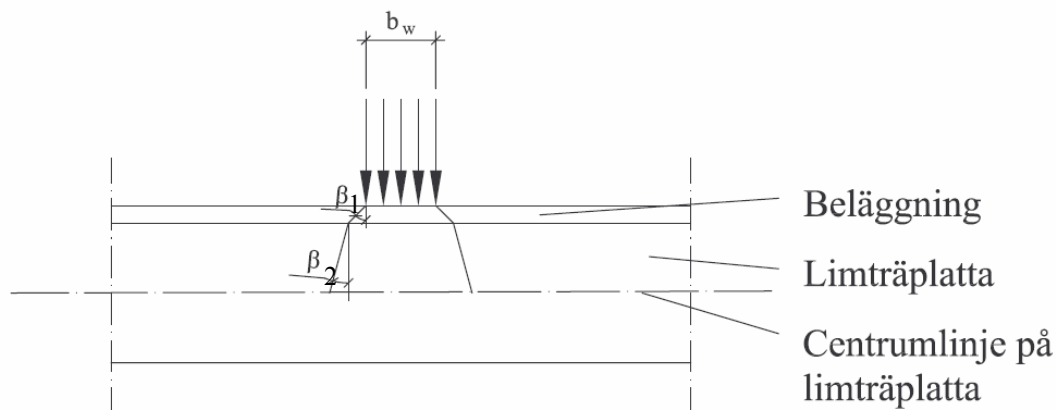
Enligt Bro 2004 skall gång- och cykelbroar dimensioneras utifrån en utbredd last motsvarande belastningen av fotgängare och cyklister, och en last av ett renhållningsfordon som består av fyra punktlaster motsvarande fyra däck på t.ex. en lastbil eller liknande. Enligt Bro 2004 behöver inte den utbredda lasten och punktlaster kombineras med varandra.

4.2. Egentyngder

För att få ordning på alla egentyngder så har de ställts upp och sammanställts i alla olika led samt för den effektiva bredd som kommer ur samverkansberäkningen. De är också uppdelade efter de olika materialen så att det är möjligt att få en överblick över hur tunga de olika materialen är i förhållande till varandra.

4.3. Samverkan

För att kunna behandla de 4 punktlaster som ingår i renhållningsfordonets lastgrupp så behövs en typ av samverkansberäkning som sprider belastningen på en bredare yta än punktlasten är för att få en rimlig belastningsmodell. I Eurocode 5 finns en beräkningsgång för samverkansberäkning som visar en belastningspridning i trämaterial som är lämplig att använda (se figur 6). Genom denna fås en effektiv bredd som kan antas ta upp punktlaster. Eftersom punktlaster är olika stora så har de förskjutits en bit för att få maximala momentet i mitten av bron.



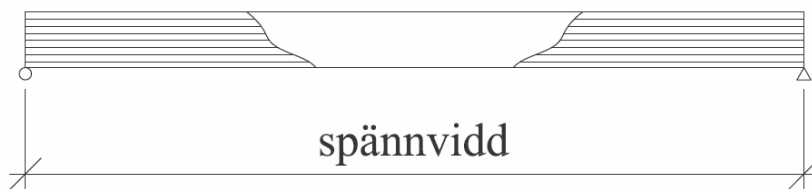
Figur 6: Skiss av samverkansprincipen.

4.4. Brottgränstillstånd

Dimensioneringen i brottgränstillstånd består av att dimensionera limträet i bron med hänsyn till böjning och tvärkraft i längdled, dimensionera spännstagen genom böjning och tvärkraft i tvärled, dimensionera stagbrickor, dimensionera styrplåtar genom sidolaster samt dimensionera räcket.

4.4.1. Längdled

Först betraktas punktlasternas belastning i längdled (se figur 7), då används den effektiva bredden till egentyngd- och böjmomentberäkningarna. Här görs sedan en jämförelse mellan maximalt moment och tillåten böjspänning, samt mellan maximal tvärkraft och tillåten skjuvspänning som sedan visas i utlåtanden längst ner i beräkningsgången. Eftersom de båda lastfallen inte behöver kombineras (enligt BRO 2004) så görs motsvarande förlopp med utbredd last, fast med brobredden istället för den effektiva bredden.

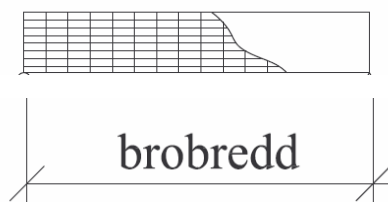


Figur 7: Sidovy av limträbro

4.4.2. Tvärled

För att kunna betrakta punktlasterna i tvärled (se figur 8) görs även en samverkansberäkning i tvärled. Då fås en annan effektiv bredd än den på längs, detta beroende på att fiberriktningen är annorlunda. Eftersom de båda lastfallen inte behöver kombineras så görs även här motsvarande

förlopp med den utbredda lasten. Från dessa beräkningar väljs sedan den största tvärkraften respektive det största momentet. Utifrån detta beräknas sedan den spännkraft som behövs i stagen.



Figur 8: Snitt av limträbro i tvärled.

4.4.3. Spännkraft

Michael A. Ritter skriver i sin bok ”*Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance*” kap 9.4 att när en tvärspänd platta belastas med hjultryck, uppför sig den tvärspända plattan som en ortotrop platta med olika egenskaper i längdled och tvärled. När en hjullast placeras på plattan så böjs hela plattan nedåt (undantaget områdena över stöden), detta resulterar i förskjutningar i både längdled och tvärled. Till följd av detta uppstår även böjmoment i de olika riktningarna. Storleken på dessa moment beror i första hand av fem olika saker:

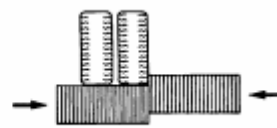
1. Storleken på lasten
2. Plattans spännvidd
3. Plattans bredd
4. Plattans styvhet i längdled
5. Plattans styvhet i tvärled

Det längsgående böjmomentet ger upphov till böjspänningar och nedböjning som är avgörande för höjden av balkarna som ingår i plattan. Det tvärgående momentet, som även det ger upphov till böjspänningar och nedböjning, avgör hur stor den hoppessande tryckspänningen mellan balkarna i plattan måste vara.

När plattan belastas med en hjullast från en lastbil så ger detta upphov till två olika typer av spänningar som klart försämrar den tvärspända plattans egenskaper. Den första spänningen som uppstår från det tvärgående momentet, gör så att balkarna vill glida ifrån varandra i underkant (se figur 9). Den andra spänningen som uppkommer pga. tvärgående skjuvning gör så att balkarna vill glida isär i vertikalled (se figur 10). Dessa två typer av spänningar uppkommer inte om den hoppessande förspänningen i plattan är tillräckligt stor. I fallet med tvärgående böjning så utjämnar tryckspänningen från stagen spänningen av den tvärgående böjningen i balkarnas underkant. I det andra fallet så förhindras den vertikala glidningen mellan balkarna av den friktion som uppstår mellan balkarna när stagen i plattan spänns. Att bibehålla så mycket som möjligt av förspänningskraften i stagen under brons livstid är en av de viktigaste sakerna vid dimensionering av tvärspända plattbroar.



Figur 9: Tvärgående böjning gör så att balkarna vill glida isär i underkant



Figur 10: Tvärgående skjuvning ger upphov till vertikal glidning mellan balkarna

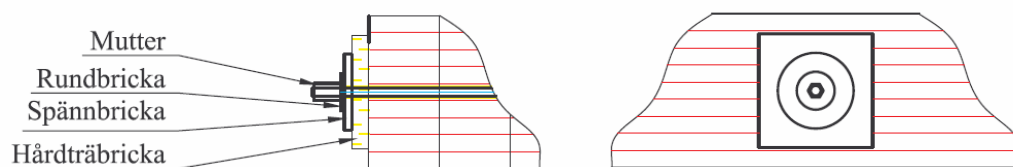
Storleken på förspänningen i bruksgränstillstånd representerar den minsta hoppresande förspänning som krävs för att inte något av de två fallen skall uppstå, detta förutsatt att alla tidsberoende spänningsförluster har upphört. Storleken på den initiella förspänningen är den storlek på förspänningen som krävs vid inspänningstillfället.

4.4.4. Spännstag

Spännkraften som behövs i plattans spännstag fås från tvärkraft- och momentberäkningarna i tvärled. Spänningen räknas ut enligt de formler som återfinns i ”*Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance*” av Michael A. Ritter, kap 9.4, formlerna är konstruerade att ta hänsyn till de spänningar som bildas i underkant på bron. De stag som används i detta fall är höghållfasthets stål som benämns dywidag GWS. Eftersom bron beläggs med ett tätskikt så tas ingen större hänsyn till träets fuktrörelser.

4.4.5. Stagbrickor

För att inte stagen skall trycka sönder limträet pga. inspänningskraften, så finns ett antal brickor som fördelar ut kraften på en större yta. Brickpaketet består av en mindre stålbricka längst ut, innanför den finns en större stålbricka som sprider kraften till en bricka av hårdträ, vilken i sin tur sprider ut kraften ännu mer mot limträytan (se figur 11). Brickorna dimensioneras genom dels tillåten tryckspänning mellan ytorna och dels tillåten böjspänning i brickorna.



Figur 11: Brickkonstruktion.

4.4.6. Sidolaster

Det finns även ett antal sidolaster att beakta, de krafter som har betraktats är vindlast och bromslast. Först måste vindlasten bestämmas, när det gäller gång- och cykelbroar antas vindlasten verka i form av en ytlast på bronns sidoyta plus en rektangulär yta med höjden 1,5 m, räknad från belägningens

överkant. Denna vindlast ger en sidokraft som tas upp av något som kallas styrplåtar. Dessa styrplåtar är plåtar som är ingjutna i brofästet och sticker upp i ett spår i bron och gör att bron ligger stilla både i sidled och längdled.

Bromslasten ger också upphov till en sidokraft men givetvis också även en kraft i längdled vilken också tas upp av styrplåtarna. Eftersom bron måste kunna röra sig i längdled så tas bromskraften som blir på det hållet bara upp av en styrplåt.

4.4.7. Räckten

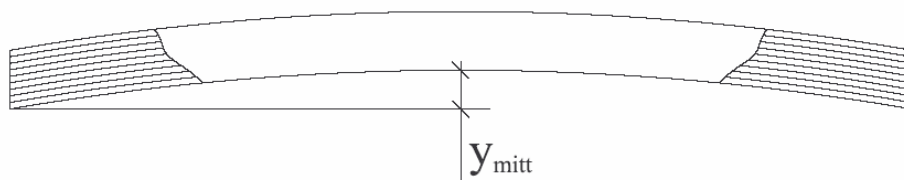
Den erforderliga kraften för dimensionering av räcke till gång- och cykelbroar är tagen ur bronormen Bro 2004. Räckets är konstruerat av limträ och även det beräknat för hållfasthetsklass L40. Beräkningen är baserad på en utbredd last vid räckets överkant och enligt Bro 2004 ska den ligga 1400 mm över beläggningens yta. Det är antaget att infästningarna ligger 63 mm in från över resp. underkant på yttersta limträbalken i bron. Infästningen är gjord med en gängstång som är dimensionerad efter drag- och skjuvspänningen i stången.

4.5. Bruksgränstillstånd

Beroende på att lika elasticitetsmoduler används vid olika typer av varighet av laster så behövs en uppställning av de olika modulerna. De används sedan till de olika nedböjningsberäkningarna.

4.5.1. Nedböjning

Först så beräknas hur stor nedböjning som egentyngheden av bron ger upphov till, den används till att bestämma hur stor överhöjning (se figur 12) balkarna i bron skall ges vid tillverkningen. När bron överhöjs så blir bron nästintill plan när den inte belastas vilket gör att det känns mer behaglig att gå på.



Figur 12: Schematisk bild av överhöjning.

Nedböjningen beräknas sedan enligt gällande beräkningsmetod, kravet enligt bronormen Bro 2004 är att nedböjningen skall vara mindre än brolängden dividerat med 400.

4.5.2. Vibrationer

Vibrationsberäkningarna är tagna från bronormen Bro 2004. Först beräknas egenfrekvensen som skall vara över 3,5 Hz. Uppfylls inte detta så finns det en möjlighet att vibrationsaccelerationen kan vara acceptabel, i sådant fall så skall vibrationsaccelerationen ligga under $0,5 \text{ m/s}^2$ och då kan det tillåtas att egenfrekvensen är för liten.

5. Avslutning

Det har varit väldigt givande att få tillämpa de kunskaper som vi införskaffat under våra studier på Chalmers. Vi har skaffat oss fördjupade kunskaper i Excel då beräkningsgången är gjord i form utav ett excelark.

Vi har främst haft problem med beräkningarna av spännkraften och dimensioneringen av stagbrickornas tjocklek. Precis som vi trodde så visade sig vibrationerna i bron och brons nedböjning vara dimensionerande.

6. Referenser

6.1.Litteratur

Abelsson, Björn, P Båge, L Westerlund (1998), *Träbroar Ett alternativ till stål och betong*. Katarina Tryck AB, Stockholm.

Carling, Olle (2001), *Limträhandbok*. Print och Media Center i Sunsvall AB, Sundsvall

Träinformation AB (1996), *Träbroar*. Tryckeriteknik i Malmö AB

6.2.Elektroniska källor

Martinssons trä, *Tillverkning av limträ*.

<http://www.martinsonstra.se/default.asp?id=1532&PTID=&refid=1072> (4 juni 2005)

Ritter, Michael A (1992), *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*.

<http://www.fs.fed.us/na/wit/WITPages/timberbridgespub.html> (4 juni 2005)

Skogsindustrierna, *Att välja trä*

<http://www.trainformation.se/Pub/valjatra/boken.pdf> (4 juni 2005)

Svenskt Limträ AB, *Historik*

<http://www.svensktlimtra.se/sv/> (4 juni 2005)

6.3.Muntliga källor

Roberto Crocetti, Konstruktör, Moelven Töreboda, Studiebesök 28 april 2005 på Moelvens limträfabrik i Töreboda

Bilaga 1

Beräkningsgång

Indata

Brodimensioner

Längd, l m

Bredd, $b = n_{balk} * b_{balk}$ m

Tunghet, $\gamma_{trä} = 6$ kN/m³

Bredd limträbalkar, b_{balk}

Lamelltjocklek, t m

Antal lameller, n

Höjd, $h = n * t$ m

Antal balkar, n_{balk}

Beläggning

Tjocklek, t m

Tunghet, $\gamma_{bel} = 23$ kN/m³

Materialkonstanter

Materialkonstanterna är hämtade från Boverkets Konstruktions Regler (BKR)

f_{mk} L40 parallellt med fibrerna, = 33 MPa

Partialkoefficient bruksgräns, $\gamma_m = 1$

Partialkoefficient brottgräns, $\gamma_m = 1,15$

Faktor korttidslast, L40, $\kappa_r = 0,85$

Faktor långtidslast, L40, $\kappa_r = 0,60$

SK3, $\gamma_n = 1,2$

Lastkonstant, $\Psi = 1,5$

Klimatklass 2

Dimensionerande spänning, $f_{md} = \frac{\kappa_h * \kappa_r * f_{mk}}{\gamma_m * \gamma_n}$ MPa

Korrektion för volymeffekt, $\kappa_h = \begin{cases} 1,15 & \text{för } h \leq 300 \\ (600/h)^{0,2} & \text{för } 300 < h < 600 \\ 1 & \text{för } h \geq 600 \end{cases}$

Längdskjuvning, L40, $f_{vk} = 4$ MPa

Friktionskoefficient, $\mu_{hvv} = 0,35$

Dimensionerande spänning, $f_{vd} = \frac{\kappa_r * f_{vk}}{\gamma_m * \gamma_n}$ MPa

Böjmotstånd

$$\text{Böjmotstånd, } W = \frac{b * h^2}{6} \text{ m}^3$$

$$\text{För punktlaster, samverkan, } b_{ef, längdled}, W = \frac{b_{ef, längdled} * h^2}{6} \text{ m}^3$$

$$\text{För utbreddlast på tvären, } W = \frac{l * h^2}{6} \text{ m}^3$$

$$\text{För punktlaster, samverkan } b_{ef, tvärlad}, W = \frac{b_{ef, tvärlad} * h^2}{6} \text{ m}^3$$

$$\text{För vindlast i sidled, } W = \frac{n_{balk} * h * \left(\frac{b_{balk}}{1000}\right)^2}{6} \text{ m}^3$$

Laster

Punktlaster enligt 21.2227 BRO 2004, utbredd last enligt 21.222 BRO 2004

$$\text{Punktlast1, } P_1 = 40 \text{ kN}$$

$$\text{Punktlast2, } P_2 = 20 \text{ kN}$$

$$\text{Utbredd last, } q = 4 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Utbredd last per längdmeter, } q_{lm} = q * b \text{ kN/m}$$

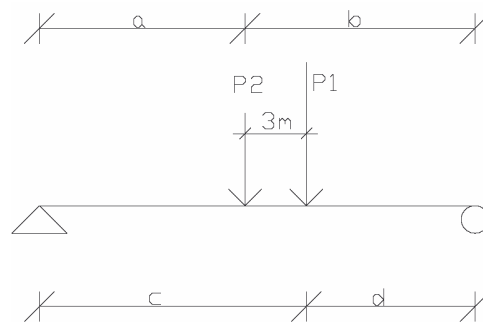
Punktlasternas läge

$$\text{Stöd A till P1, } c = \frac{l}{2} - 0,25 + 1,5 \text{ m}$$

$$\text{Stöd B till P1, } d = l - c \text{ m}$$

$$\text{Stöd A till P2, } a = \frac{l}{2} - 0,25 - 1,5 \text{ m}$$

$$\text{Stöd B till P2, } b = l - a \text{ m}$$



Figur: 1. Punktlasternas placering på bron
(OBS ej skalentlig)

Utbredd last

$$\text{Egentyngd trä, } g_{trä} = b * h * \gamma_{trä} \text{ kN/m}$$

$$\text{Egentyngd beläggning, } g_{bel} = b * t * \gamma_{bel} \text{ kN/m}$$

$$\text{Egentyngd räcke, } g_{räcke} = 2,5 \text{ kN/m}$$

$$\text{Total egentyngd, } g_{tot} = g_{trä} + g_{bel} + g_{räcke} \text{ kN/m}$$

$$\text{Total utbredd last, } q_{tot} = g_{tot} + q_{lm} * \Psi \text{ kN/m}$$

För punktlaster, samverkan $b_{ef, längs}$

$$\text{Egentyngd trä, } g_{trä} = b_{ef, längs} * h * \gamma_{trä} \text{ kN/m}$$

$$\text{Egentyngd beläggning, } g_{bel} = b_{ef, längs} * t * \gamma_{bel} \text{ kN/m}$$

$$\text{Total egentyngd, } g_{tot} = g_{trä} + g_{bel} \text{ kN/m}$$

För utbreddlast på tvären, ytlast

Egentyngd trä, $g_{trä} = h * \gamma_{trä}$ kN/m²

Egentyngd beläggning, $g_{bel} = t * \gamma_{bel}$ kN/m²

Total egentyngd, $g_{tot} = g_{trä} + g_{bel}$ kN/m²

Total utbredd last, $q_{tot} = g_{tot} + q * \psi$ kN/m²

För punktlaster, samverkan $b_{ef,tvårs}$

Egentyngd trä, $g_{trä} = b_{ef,tvårs} * h * \gamma_{trä}$ kN/m

Egentyngd beläggning, $g_{bel} = b_{ef,tvårs} * t * \gamma_{bel}$ kN/m

Total egentyngd, $g_{tot} = g_{trä} + g_{bel}$ kN/m

Samverkan

Samverkansberäkningarna är hämtade från Eurocode 5 (EC5) del 2: Bridges avsnitt 5.

Spridningsvinkel beläggning, β_1 °

Spridningsvinkel limträ, β_2 °

Samverkan längdled

Korrektionsvärde, $a = 0,3$

Bredd punktlast, $b_w = 0,2$ m

$$b_{w,mit} = b_w + 2 * t * \tan\left(\frac{\beta_1 * \pi}{180}\right) + h * \tan\left(\frac{\beta_2 * \pi}{180}\right) \text{ m}$$

$$b_{ef,längs} = b_{w,mit} + a \text{ m}$$

Samverkan tvärled

Korrektionsvärde, $a = 0,3$

Längd punktlast, $b_w = 0,2$ m

$$b_{w,mit,tvårs} = b_w + 2 * t * \tan\left(\frac{\beta_1 * \pi}{180}\right) + h * \tan\left(\frac{\beta_2 * \pi}{180}\right) \text{ m}$$

$$b_{ef,tvårs} = b_{w,mit,tvårs} + a \text{ m}$$

Brottgränstillstånd

Längdled

Punktlaster, effektiv bredd

$$R_A = \frac{P_2 * b}{l} + \frac{P_1 * d}{l} + q_{tot, b_{ef}, längs} * \frac{l}{2} \text{ kN}$$

$$V_{max} = P_1 + P_2 * \frac{l-3}{l} + q_{tot, b_{ef}, längs} * \frac{l}{2} \text{ kN}$$

$$M_{max} = R_A * \frac{l}{2} - P_2 * \left(\frac{l}{2} - a \right) - q_{tot, b_{ef}, längs} * \frac{l^2}{8} \text{ kNm}$$

Dimensionerande värden

$$\text{Tvärkraftskapacitet, } V_{md} = \frac{f_{vd} * b_{ef, längs} * h}{1,5 * 1000} \text{ kN}$$

$$\text{Momentkapacitet, } R_{md} = b_{ef, längs} * f_{md} * 1000 \text{ kNm}$$

Utbredd last

$$R_A = q_{tot} * \frac{l}{2} \text{ kN}$$

$$V_{max} = q_{tot} * \frac{l}{2} \text{ kN}$$

$$M_{max} = R_A * \frac{l}{2} - q_{tot} * \frac{l^2}{8} \text{ kNm}$$

Dimensionerande värden

$$\text{Tvärkraftskapacitet, } V_{md} = \frac{f_{vd} * b * h}{1,5 * 1000} \text{ kN}$$

$$\text{Momentkapacitet, } R_{md} = W * f_{md} * 1000 \text{ kNm}$$

Tvärled

Punktlaster, effektiv bredd

$$R_A = q_{tot, b_{ef}, tvärs} * \frac{b}{2} + P_1 \text{ kN}$$

$$V_{max} = \frac{q_{tot, b_{ef}, tvärs} * \frac{b}{2} + P_1 + P_1 * \frac{b-1,6}{b} + g_{räcke} * b_{ef, tvärs}}{b_{ef, tvärs}} \text{ kN/m}$$

$$M_{max} = \frac{R_A * \frac{b}{2} - P_1 * \frac{1,6}{2} - q_{tot, b_{ef}, tvärs} * \frac{b^2}{8}}{b_{ef, tvärs}} \text{ kNm/m}$$

Utbreddlast

$$R_A = q_{tot,breddm} * \frac{b}{2} + \frac{g_{rücke}}{1} \text{ kN/m}$$

$$V_{max} = q_{tot,breddm} * \frac{b}{2} + \frac{g_{rücke}}{1} \text{ kN/m}$$

$$M_{max} = R_A * \frac{b}{2} - q_{tot,breddm} \frac{b^2}{8} - g_{rücke} * \frac{b}{2} \text{ kNm/m}$$

Spännstag

Dimensionering spännkraft

Beräkningarna är hämtade från boken ”*Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance*” av Michael A. Ritter, kap 9.4

Avstånd mellan stag, S_p m

Brottgräns, dywidag GWS, f_{uk} MPa, hämtas från tabell

Från moment, $N_M = \frac{6 * M_T}{h^2}$, där M_T är det största värdet av M_{max} för utbredd last i tvärled eller M_{max} för punktlaster i tvärled.

Från tvärkraft, $N_V = \frac{1,5 * V_T}{h * \mu}$, där V_T är det största värdet av V_{max} för utbredd last i tvärled eller V_{max} för punktlaster i tvärled, μ beror av friktionen mellan balkarna.

Spännkraften, $N (< f_{c90,trä})$ är det största värdet av N_M och N_V

Tillåten stålspänning, $f_{ud} = \frac{f_{uk}}{1,2 * \gamma_n}$

Minsta stål area, $A_{s,till} = \frac{N * S_p * h}{f_{yd} * 1000} \text{ mm}^2$

Kontroll: $\frac{A_s}{S_p * h} < 0,0016$

Tillämpad stål area, $d_{min,stag} = 2 * \sqrt{\frac{A_{s,till}}{\pi}} * 1000 \text{ mm}$

Välj diameter efter standard, d_{stag} mm

Spänningskraft, $F_{spänn} = N * S_p * h \text{ kN}$

Håldiameter för staget, $d_{staghål} = d_{stag} + 6 \text{ mm}$

Stagbrickor

Dimensionering hårdträbricka

Böjspänning hårdträ D70 $f_{mk} = 70$ MPa, hämtas från tabell

Faktor kottidslast, $\kappa_{rL40} = 0,85$

Tillåten böjspänning i hårdträet, $f_{md} = \frac{\kappa_{rL40} * f_{mk}}{\gamma_m * \gamma_n}$ MPa

Tryckspänning limträ, $f_{c90k} = 8$ MPa, hämtas från tabell

Tillåten tryckspänning i limträet, $f_{c90d} = \frac{f_{c90k} * \kappa_{rL40}}{\gamma_m * \gamma_n}$ MPa

Minsta area, $A_{min,tbr} = \frac{F_{spänn}}{f_{c90d} * 1000}$ mm²

Minsta bredd, $b_{min,tbr} = \sqrt{A_{min,tbr} + \frac{\pi * d_{staghål}^2}{4}}$ mm

Välj bredd, b_{tpl} i mm

Dimensionerande moment, $M_{sd} = \frac{f_{c90d} * b_{tbl} * \left(\frac{b_{tpl} - d_{spb}}{2}\right)^2}{2 * 1000000}$ kNm

Minsta tjocklek, $t_{min,tbr} = \sqrt{\frac{6 * M_{sd}}{b_{tpl} * f_{md}} * 1000}$ mm

Dimensionering spännbricka, rund

Tryckspänning hårdträ D 70, $f_{c90k} = 13,5$ MPa, hämtas från tabell

Tillåten tryckspänning i hårdträet, $f_{c90d} = \frac{f_{c90k} * \kappa_{rL40}}{\gamma_m * \gamma_n}$ MPa

Stål s 355, sträckgräns, $f_{yk} = 355$ MPa, hämtas från tabell

Partialkoefficient brottgräns, stål, $\gamma_m = 1,0$

Tillåten spänning i stålet, $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m * \gamma_n}$ MPa

Minsta area, $A_{min,spb} = \frac{F_{spänn}}{f_{c90d} * 1000}$ mm²

Minsta diameter, $d_{min,spb} = 2 * \sqrt{\frac{A_{min,spb} + \frac{\pi * d_{staghål}^2}{4}}{\pi}}$ mm

Välj diameter spännbricka, d_{spb} i mm

Diameter rundbricka, d_{rdb} i mm

Dimensionerande moment, $M_{sd} = \frac{f_{c90d} * b_{tpl} * \left(\frac{b_{tpl} - d_{rdb}}{2}\right) * \left(\frac{b_{tpl} - d_{rdb}}{4}\right)}{1000000}$ kNm

Bredd snitt böjmoment, $b_{sb} = \sqrt{d_{spb}^2 - d_{rdb}^2}$ mm

$$\text{Minsta tjocklek, } t_{\min,spb} = \sqrt{\frac{6 * M_{sd}}{d_{spb} * f_{md}}} * 1000 \text{ mm}$$

Alt. spännbricka, kvadratisk

$$\text{Minsta bredd, } b_{\min,spb} = \sqrt{A_{\min,spb} + \pi * \frac{d_{staghål}^2}{4}} \text{ mm}$$

$$\text{Minsta tjocklek, } t_{\min,spb} = \sqrt{\frac{6 * M_{sd}}{b_{spb} * f_{md}}} * 1000 \text{ mm}$$

Horisontala laster

Vindlaster

Vindlastsberäkningarna är gjorda enligt 21.27 från BRO 2004
Bromskrafter enligt 21.223, BRO 2004

Vindlast under 10m, $q_{vind} = 1,8 \text{ kN/m}^2$

Antagen belastningshöjd enl. bro 2004 = 1,5 m

Last, $q_{vind} = (1,5 + h + t) * 1,8 \text{ kN/m}$

Tvärkraft vid varje stöd, $V_{vind,erf} = q_{vind} * \frac{l}{2} \text{ kN}$

Moment, $M_{vind,max} = q_{vind} * \frac{l^2}{8} \text{ kNm}$

Momentkapacitet, $M_{Rd,vind} = W_{vind} * f_{md} * 1000 \text{ kNm}$

Bromskraft

Bromskraft i längsled, $F_{b,längs} = 0,5 * (2 * P_1 + 2 * P_2) \text{ kN}$

Bromskraft i tvärlid, $F_{b,tvårs} = 0,25 * F_{b,längs} \text{ kN}$

Tvärprofil på styrplåt

Stål s355, brottgräns, f_{uk} MPa fås ur tabell

Svetselktrod, brottgräns, f_{euk} MPa fås ur tabell

Tillåten svetsspänning, $f_{wd} = \frac{0,75 * \sqrt{f_{uk} * f_{euk}}}{\gamma_n} \text{ MPa}$

A-mått, $a = 4 \text{ mm}$

Svetslängd (profilberdd), $l_s = 50 \text{ mm}$

Nyttig svetslängd, $l_{sn} = l_s - 2 * a \text{ mm}$

Svetskapacitet, $F_{Rd} = \frac{0,6 * a * 2 * l_{sn} * f_{wd} + \frac{2 * a * 2 * l_{sn} * f_{wd}}{\sqrt{2 + \cos\left(2 * 45 * \frac{\pi}{180}\right)}}}{1000}$

Dimensionering styrplåt

Stål s355, stäckgräns, f_{yk} MPa fås ur tabell

Tillåten spänning, $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m * \gamma_n}$

Bredd styrplåt, $b_s \text{ m}$

Tjocklek styrplåt, $t_s = \frac{F_{b,längs} + F_{b,tvårs} + V_{vind,erf}}{0,5 * f_{yd} * b_s} \text{ mm}$

Räcke

Räckesdimensionering enligt 21.295, 74.24, 74.62 Bro 2004

Dimensionerande kraft, $q_{räcke} = 1$ kN/m

Räckens höjd över beläggning, $h_{räcke}$ i m

Avstånd mellan stolpar, s_{stolpe} i m

Välj bredd stolpen, b_{stolpe} i mm

Välj håldiameter för gängstång, $d_{stolpe,gst}$ i mm

Dimensionering

Stolpens längd, $l_{stolpe} = h_{räcke} + t_{bel} + h - 0,06 + 0,01$ m

Kraft övre inspänningspunkt, $F_{\text{övre}} = \frac{q_{räcke} * (h_{räcke} + h + t_{bel} - 0,063)}{h - 2 * 0,063}$ kN/m

Kraft nedre inspänningspunkt, $F_{\text{nedre}} = F_{\text{övre}} - q_{räcke}$ kN/m

Maxmoment, $M_{\text{max}} = F_{\text{nedre}} * (h - 2 * 0,063)$ kNm/m

Maxmoment per stolpe, $M_{\text{max,/ stolpe}} = M_{\text{max}} * s_{stolpe}$ kNm

Erforderlig höjd stolpe av moment, $h_{stolpe,M} = \sqrt{\frac{M_{\text{max,/ stolpe}} * 6}{f_{md} * (b_{stolpe} - d_{stolpe,gst})}} * 10^6$ mm

Erforderlig höjd stolpe av tvärkraft, $h_{stolpe,V} = \frac{1,5 * F_{\text{nedre}} * s_{stolpe}}{(b_{stolpe} - d_{stolpe,gst}) * f_{vd}} * 1000$ mm

Välj största värde av $h_{stolpe,M}$ och $h_{stolpe,V}$

Gängstång

Dragkraft

Brottgräns karakteristisktvärde 8.8, $f_{buk} = 800$ MPa, hämtas ur tabell

Dimensionering

Brottgräns dimensionerande värde 8.8, $f_{bud} = \frac{f_{buk}}{1,2 * \gamma_n}$ MPa

Erforderlig area, $A_{gst,drag,erf} = \frac{F_{\text{övre}} * s_{stolpe}}{f_{bud}} * 1000$ mm²

Skjuvkraft

Sträckgräns dimensionerande värde 8.8, $f_{yd} = \frac{f_{buk} * 0,8}{1,2 * \gamma_n}$ MPa

Erforderlig area tvärkraft, $A_{gst,tvär,erf} = \frac{g_{räcke} * s_{stolpe}}{2 * 0,5 * f_{yd}} * 1000$ mm²

Erforderlig innerdiameter, $d_{gst,erf} = 2 * \sqrt{\frac{A_{gst,drag,erf} + A_{gst,tvär,erf}}{\pi}}$ mm

Bruksgränstillstånd

Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulerna är hämtade från BKR

$$E_k = 13000 \text{ MPa}$$

Faktor kortidslast, $\kappa_s = 0,9$

Faktor långtidslast, $\kappa_s = 0,45$

$$E_{k,kort} = \kappa_s * E_k \text{ MPa}$$

$$E_{k,lång} = \kappa_s * E_k \text{ MPa}$$

Tröghetsmoment

$$I = \frac{b * h^3}{12} \text{ m}^4$$

Nedböjning

Beräkningarna är hämtade från boken ”*Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance*” av Michael A. Ritter, kap 9.4

Korrektion skarvar, $C_B = 0,85$

Reducerad bredd, $b'_{ef,längs} = b_{ef,längs} * C_B \text{ m}$

Reducerat tröghetsmoment, $I_{mod} = \frac{b'_{ef,längs} * h^3}{12} \text{ m}^4$

Modifierad egentyngd, $g' = \frac{g_{tot} * b'_{ef,längs}}{b} \text{ kN/m}$

Modifierad utbredd last, $q' = q * b'_{ef,längs} \text{ kN/m}$

Hämtade från BKR

Överhöjning, $y_{mitt} = \frac{5 * g' * l^4}{384 * E_{k,långtidslast} * I_{mod}} \text{ mm}$

$y_{mitt,q} = \frac{5 * q' * l^4}{384 * E_{k,kortidslast} * I_{mod}} \text{ mm}$

$y_{mitt,p} = \frac{P_1 * d * (3 * l^2 - 4 * d^2) + P_2 * a * (3 * l^2 - 4 * a^2)}{48 * E_{dkort} * I'_{red}} \text{ mm}$

$y_{tillåten} = \frac{l}{400} \text{ mm}$

Vibrationer

Beräkningarna är hämtade från BRO 2004 del 1, stycke 12.432

Egenfrekvens, $f_n = \frac{\pi}{2 * l^2} \sqrt{\frac{E_{d,kort} * 1000 * I}{\frac{g_{tot}}{10}}} > 3,5 \text{ Hz}$

Vibrationsacceleration, $a_{RMS} = \frac{k_1 * k_2}{1,41 * l * \zeta_{träbro} * 1000 * \frac{g_{tot}}{10}} \leq 0,5 \text{ m/s}^2$

$$k_1 = \sqrt{0,1 * b * l}$$

$$k_2 = \begin{cases} 150 & (N) \text{ för } f_F \leq 2,5 \text{ Hz} \\ \frac{125}{f_F} & (N) \text{ för } 2,5 < f_F < 3,5 \text{ Hz} \end{cases}$$

$$\zeta_{träbro} = 0,006$$