

**STRAUMSBRUA - BETONG ELLER STÅL**  
**ERFARINGER FRA PROSJEKTERINGEN**

**JON SOLEMSLI**  
**NORCONSULT AS**

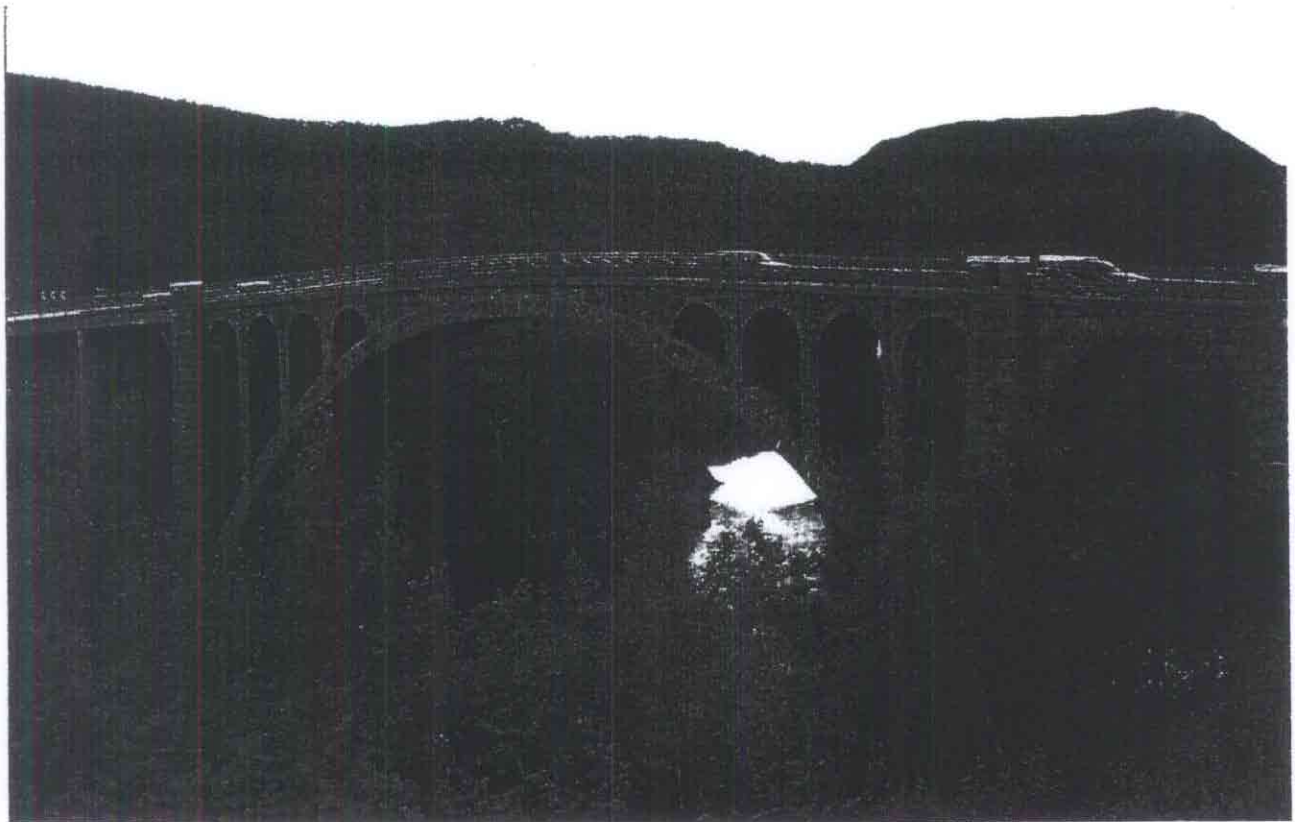
**Brukonferansen 2002**

## 1. Innledning

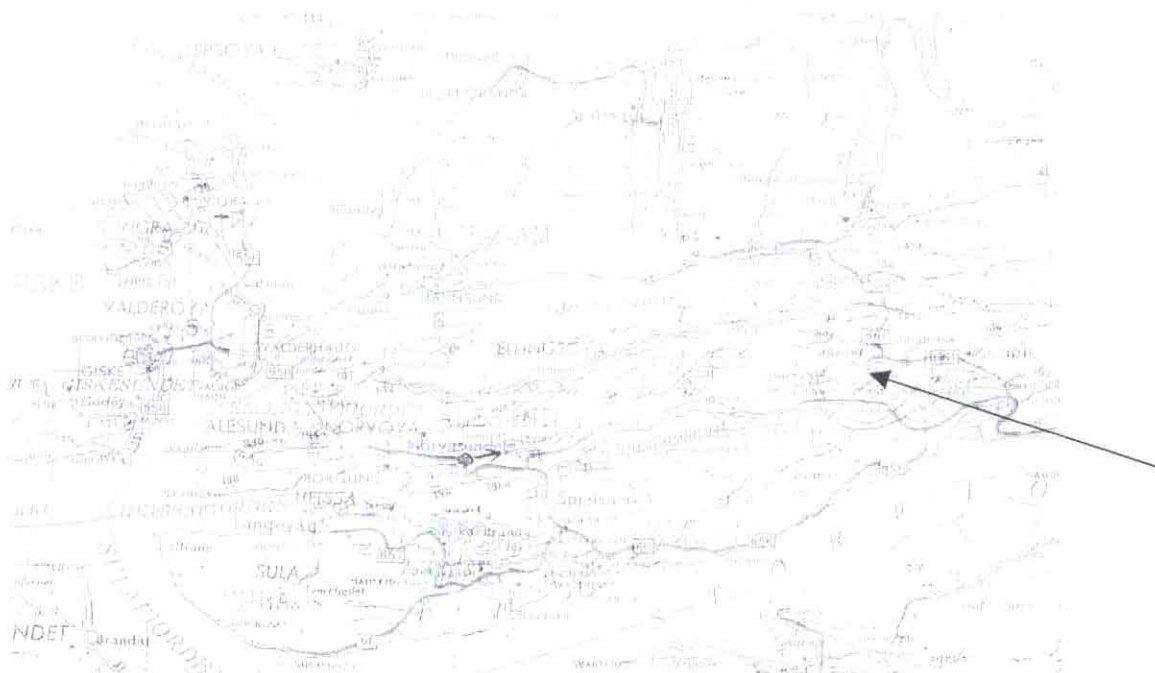
Norconsult AS ble i februar 2002 tildelt kontrakten for prosjektering av Straumsbrua med tilførselsveger av Statens vegvesen Møre og Romsdal. Brua skal erstatte de eksisterende Skodjebruene som er stengt for kjøretøy tyngre enn 3.5 tonn. Den nye brua er en del av ny riksveg 661 i Skodje kommune. Bru med veg er det første av i alt tre byggetrinn på Rv 661. I tillegg skal det bygges 370 meter tunnel og kryssomlegginger.

Det er utarbeidet konkurransegrunnlag for to alternativer. Den ene med underliggende bue i betong og den andre med underliggende bue i stål. Buespenn er hhv. 172 og 176 meter. Total brulengde er for begge alternativer 298 meter. Bruene er fundamentert på fjell.

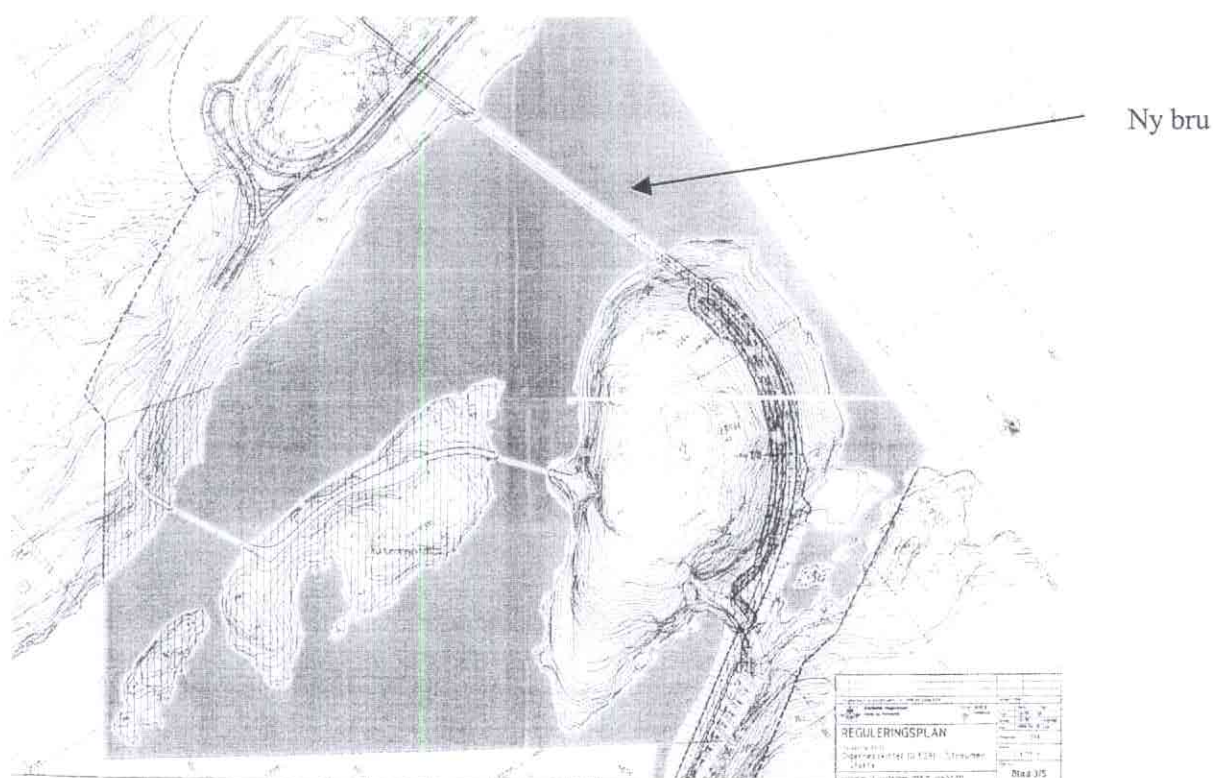
Grunnen til at en buebru ble valgt, som er dyrere enn andre brutyper som for eksempel en fritt frembygg bru, var at man ønsket en best mulig tilpasning til de eksisterende bevaringsverdige steinhvelvbruene fra 1922.



Figuren viser den gamle Skodjebrua fra 1922. Spennvidde 57 meter. Kan moderne brubygging måle seg med denne?



Straumsbrua inngår i ny Rv 661 i Skodje kommune



Utdrag av reguleringsplan. Kartet viser de eksisterende Skodjebruene og ny veg og bru øst for disse.

**Prosjektet har følgende nøkkeldata:**

Byggherre:	Statens vegvesen Møre og Romsdal
Total kostnadsramme:	<del>82 Mill NOK</del>
Prosjektering av bru og veg:	Norconsult AS
Prosjekterendes arkitekt:	Arkitektskap AS

Prosjektrammen for bru og tilførselsveger er kr. 143 mill. kr. hvorav 50% er bompengefinansiert.

Tilbudene på bygging av bruene ble åpnet i september. Det viste seg da at kun en tilbyder gav pris på bygging av betongbuen. Prisen på denne lå 25 % over laveste tilbud på stålbuen, og det ble raskt klart at stålbuen ville bli valgt. Detaljprosjekteringen av denne har nå startet og skal være ferdig innen utgangen av desember.

## 2. Prosjekteringsforutsetninger

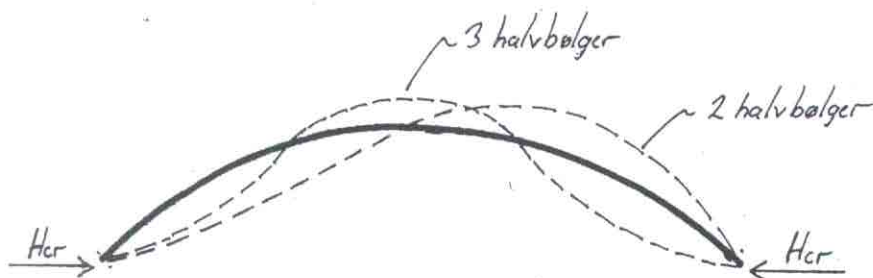
Prosjekteringsreglene samt NS3472 og NS3473 dekker i stor grad også prosjektering av buekonstruksjoner. På et punkt er det imidlertid nødvendig med tilpasninger til eksisterende regelverk.

Ved beregning av buens stabilitet både i og ut av bueplanet er standardens bestemmelser ikke dekkende. Standardenes bestemmelser gjelder mindre rette konstruksjonsdeler som eksempelvis søyler og staver i rammer og fagverk. Skulle man følge standardens krav til utilsiktede eksentrisiteter for betongbuen, ville man eksempelvis få verdier i størrelsesorden 22 cm og tilsvarende store 2. ordens utbøyninger. Dette er urimelige verdier sett i forhold til de toleransekrav som settes til konstruksjonene.

Knekningsberegninger for buen følger de samme prinsipper som standardens, men med modifikasjoner vedrørende utilsiktede eksentrisiteter, beregning av kritisk last/knekkklengde og beregning av 2. ordens tilleggsforskyvninger. Siden beregning av disse størrelser er av vesentlig betydning ved dimensjonering av buer, ble det i en innledende fase av prosjekteringen diskutert og fastsatt kriterier for beregning av dette.

- Maksimal formfeil, dvs. byggeavvik fra teoretisk linje fastsettes ut fra toleransekrav med en sikkerhetsfaktor. For Straumsbrua er toleransekrav til avvik både i og ut av bueplanet satt til 50 mm. Dimensjonerende formfeil er satt til 150 mm. Formfeilen antas å følge den aktuelle knekningsform som betraktes. Den valgte formfeil tilsvarer en beregningsmessig eksentrisitet tilnærmet  $l_k/400$  til  $l_k/450$ , noe som samsvarer godt med anbefalinger av A.Aas-Jakobsen, 1952 /1/

1. ordens tilleggsmomenter bestemmes ut fra den antatte formfeil. Disse momenter virker i tillegg til øvrige momenter bestemt på vanlig måte.



Figuren viser aktuelle knekkmønstre. Formfeil antas å følge det aktuelle knekkmønster som betraktes.

- 2. ordens forskyvninger og derved tilleggsmomenter bestemmes ut fra kritisk knekklast for den aktuelle knekkform. Kritisk knekklast kan f. eks. beregnes fra formler i litteraturen, eksempelvis BYGG /2/ eller den kan bestemmes ved hjelp av en elementanalyse. Ref /1/ viser at kritisk knekklast er tilnærmet uavhengig av buens form, kun av stivheten i buen og pilforholdet. Man kan derfor med tilstrekkelig nøyaktighet beregne kritisk knekklast for vilkårlig bueform ut fra formler for parabelformet bue.

Når kritisk knekklast er beregnet kan forstørrelsesfaktoren for momentet beregnes på vanlig

måte som  $\frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$  og dimensjonerende moment  $M = \frac{M_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$

Et annet og vesentlig punkt i prosjekteringsforutsetningene er fastsettelsen av dimensjonerende skipsstørrelse. En påkjørsel av større skip vil kunne ha store konsekvenser. De fleste husker Tjørnbron i Sverige som styrtet sammen etter skipspåkjørsel. Imidlertid er det i følge Kystverket kun spredt småbåttrafikk på brustedet. Dimensjonerende skipsstørrelse er derfor konservativt satt til 100 tonn. (Det nevnes her at skipets masse eller deplasement er bestemmende for skipsstøtets størrelse, ikke dødvekt som angitt i Prosjekteringsreglene. Dødvekt er skipets lasteevne, og er uinteressant i så henseende.)

En tredje vesentlig prosjekteringsforutsetning gjaldt hvorvidt det skulle tas hensyn til en spesiell byggemetode i analysene. For en bue vil det være slik at lastvirkningen fra egenvekt av buen i liten grad vil avhenge av byggemetoden, så lenge byggemetoden ikke introduserer store bøyemomenter i buen. Mindre innebygde momenter fra montasjen vil, på grunn av buens aksialdeformasjon etter montasje utjevnes. Det endelige moment vil tilnærmet være det samme som moment uten hensyn til byggemetode. For betongbuen vil dette være enda tydeligere pga krypdeformasjoner. For ikke å legge begrensninger på entreprenørene ble det derfor besluttet at byggemetode for buen ikke skulle beskrives.

For brubjelke derimot, var det nødvendig å sette visse kriterier for støp. Asymmetrisk belastning er ikke av det gode, og kriterier ble satt for å forhindre dette. Brubjelken skal dermed støpes symmetrisk om buens midtpunkt.

### 3. Analyseverktøy

I tidlig fase av prosjektet ble prosjekteringen basert på formler for buer gitt i blant annet ref /1/ og /2/. Disse formlene ble programmert inn i Mathcad regneark, noe som ga et effektivt verktøy for bestemmelse av hoveddimensjoner i buen. Samtidig som man har et effektivt verktøy for parameterstudier, får man også en god kontroll eller "følelse" med konstruksjonen. Dette er en fremgangsmåte som anbefales for alle typer konstruksjoner.

Etter innledende fase ble brua modellert i programmet STAAD-PRO. Her ble alle ordinære lastvirkninger fra egenvekt, trafikk, svinn, kryp, vind og temperatur beregnet. Tilleggsmomenter, som beskrevet i avsnitt 2, og selve dimensjoneringen ble utført i Mathcad.

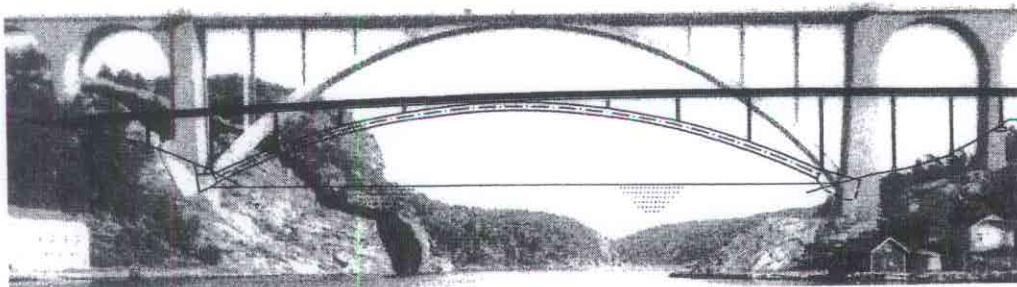
Det er også mulig å omregne de samlede virkninger av formfeil til ekvivalente tverrkrefter som så kan inngå direkte i den statiske analysen. Har beregningsprogrammet muligheter for spenningskontroll, kan hele dimensjoneringen utføres i analysen.

Bruavdelingen, som har kontrollen av prosjekteringen, gjorde uavhengige beregninger av begge alternativer ved hjelp av det ikke-lineære programmet DARC. Disse beregningene viser at det var god overensstemmelse mellom våre beregninger, og at bruene har et fornuftig sikkerhetsnivå. For så vidt ikke et oppsiktsvekkende resultat siden prosjekteringen er basert på klassiske metoder, men likevel en verdifull kontroll av at tingene er gjort riktig.

### 4. Spesielle forhold ved prosjekteringen

#### Flat bue

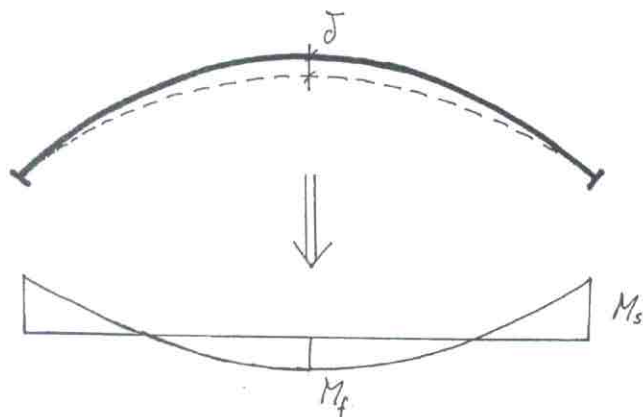
Det første som slår en når man studerer buen, er at den er svært flat i forhold til det som er vanlig. Pilforholdet som er forholdet mellom pilhøyden og lengden på buen er ca. 0.12. Sammenlignet med f. eks Svinesundsbrua som har et spenn på 155 meter, er pilforholdet omlag halvparten så stort.



Figuren viser Straumsbruas pilforhold i forhold til Svinesund. Straumsbrua er skalert ned.

Konsekvensen av dette er først og fremst at horisontalkraften blir større. Indirekte gir dette bøyemomenter fra spesielt egenvekt, fordi buen får relativt store aksialdeformasjoner. Buen blir dermed kortere, den deformeres vertikalt og det oppstår momenter i buen avhengig av

innspenningsforholdene. En bue som i utgangspunktet følger trykklinjen for egenlast, vil pga forkortning altså avvike fra denne linjen, noe som gir bøyemomenter.

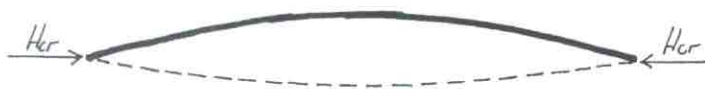


Figuren viser deformasjonsmønster på grunn av aksialdeformasjon med tilhørende momenter.

Pilforholdet har forøvrig ingen direkte effekt på bøyemomenter fra konsentrerte laster som f. eks. trafikk. Den har kun effekt pga eventuell horisontalkraft fra disse laster.

Den kritiske knekklasten for asymmetrisk knekning vil også øke med avtagende pilforhold. Ved svært lave buer, atskillig lavere enn Straumsbrua, vil kritisk knekklast for asymmetrisk knekning være større enn kritisk last for knekning etter en halvbølge, såkalt gjennomslag. Dette fenomen oppstår når en svært flat bue pga høyt aksialkraftnivå vil forkortes, noe som igjen gir økt aksialkraft. Tilslutt vil buen slå gjennom og i beste fall ble et hengeverk. Denne problemstillingen er ikke aktuell her, noe som kan illustreres ved å se på de kritiske knekklaster for stålalternativet:

- 1 halvbølge:  $H_{cr} = 1950000 \text{ kN}$  ( Gjennomslag )
- 2 halvbølger:  $H_{cr} = 202000 \text{ kN}$
- 3 halvbølger:  $H_{cr} = 337000 \text{ kN}$



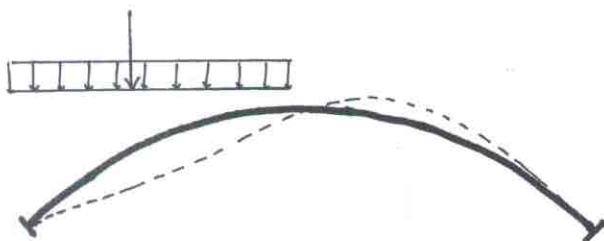
Figuren viser gjennomslag.

## Temperatur

Temperaturfall eller økning i buen vil ha en tilsvarende effekt som egenvekten. Buen forkortes pga temperaturfall og det oppstår relativt store bøyemomenter avhengig av buens innspenningsforhold. Disse effektene er vesentlig større for en bue enn for andre typer bruer, og gir et betydelig bidrag til totale momenter.

## Asymmetriske laster

Asymmetriske laster og da trafikk spesielt gir bøyemomenter i buen som grovt sett tilsvarer det moment man får i en bjelke med halve spennet og tilsvarende oppleggsbetingelser. Bøyemomentet i buen er med andre ord grovt regnet  $\frac{1}{4}$  del av bøyemomentet i en bjelke av samme spenn. Fordi deformasjonsmønsteret for asymmetrisk last er det samme som asymmetrisk knekningsform, forsterkes disse momenter ytterligere.



Figuren viser deformasjonsmønster på grunn av asymmetrisk last.

## Jordskjelv

Jordskjelv er for Straumsbrua så vel som for alle andre bruer i Norge ikke et reelt problem, snarere et beregningsmessig problem. Grunnen til dette er vel i første rekke valg av returperiodenivå for akselerasjonsnivået i grunnen, som er satt til 10000 år. Eksempelvis USA og Hellas, der jordskjelv påviselig er et reelt problem, er det valgt 475 års returperiode.

Heldigvis er det likevel slik at disse strenge kriteriene ikke gir dimensjonerende virkninger i brua. Årsaken ligger i at de vesentlige svingeformene ligger i et område av spekteret der akselerasjonsnivået er svært lavt. De fem første egenperiodene er:

1. 2.43 s
2. 1.59 s
3. 1.27 s
4. 1.06 s
5. 0.70 s



## 6. Beskrivelse av stålalternativet

### Kort beskrivelse

Bruas totale lengde er 289 meter. Den består av en overliggende brubjelke med søyler dels til bakken og dels på en underliggende bue.

Buen har et spenn på 176 meter. Det er valgt en innspent bue som har mindre momenter og mindre knekk lengde enn en 2-ledd bue.

Buen består av de rektangulære stålkasser forbundet med tverrigler omlag ved hver tiende meter. De to buehalvdelene har konstant fri avstand 2,55 meter. Denne avstanden er valgt for å få tilstrekkelig kapasitet for belastninger på tvers av brua.

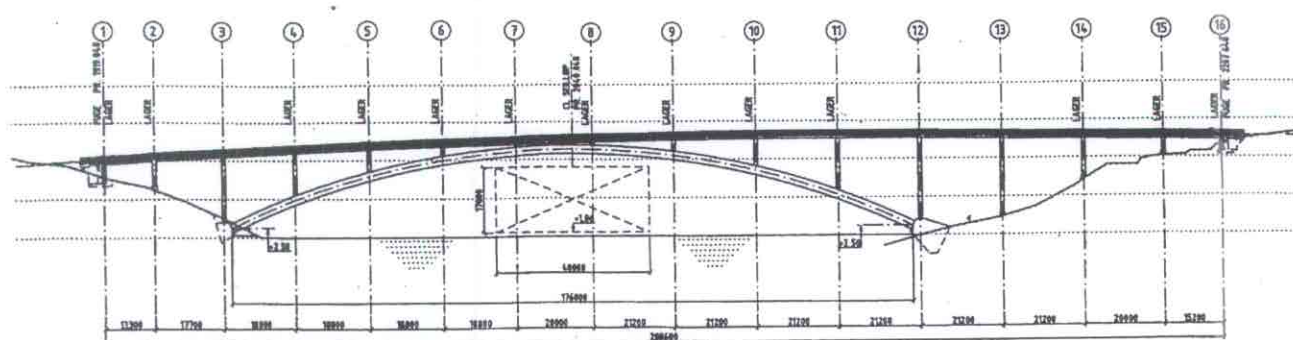
Hver halvdel har en bredde på 1,8 meter og en konstant høyde på 2,3 meter. Topp- og bunnplate i stålkassene er uavstivede. Stegplatene er avstivet med innvendig trapesprofiler. Tverriglene er rektangulære stålkasser som er lufttette. Forøvrig er det avfuktningssystem i hver buehalvdel.

Fra buen går det runde stålsøyler opp til brubjelken. Brubjelken er en 1,1 meter høy betongbjelke. Det er lagre på søyler mellom bue og brubjelke.

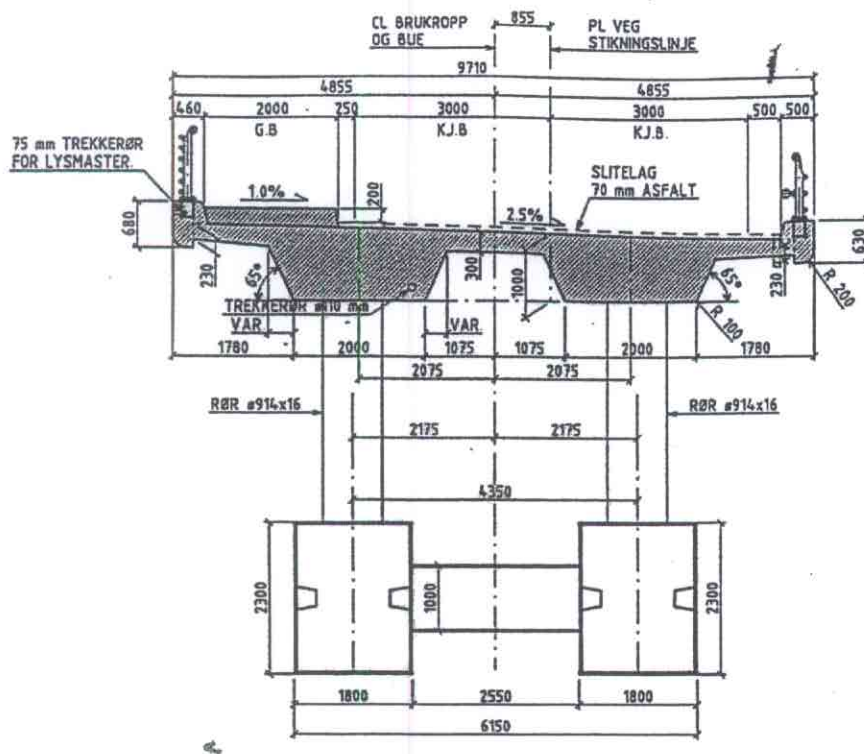
Det er benyttet stålsort S460 i buen og S355 i søyler.

Karakteristiske mengder:

Stålvakt i buen:	1068 tonn
Stålvakt i søyler:	85 tonn
Betong i brubjelken:	2030 m <sup>3</sup>
Betong i fundamenter:	900 m <sup>3</sup>
Slakkarmering:	225 tonn



Brua i oppriss



Brutverrsnitt

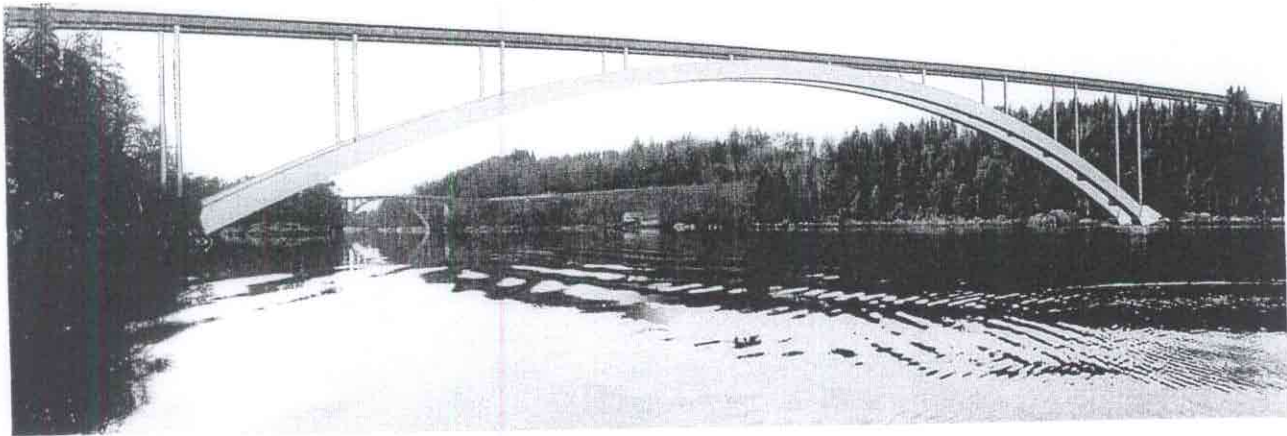
### Estetikk

For Straumsbrua var ønsket om god tilpasning til eksisterende bruer avgjørende ved valg av bueløsningen. Med en gitt linjeføring og valgt brutype er dermed det bare mindre, men likevel viktige justeringer som kan gjøres for å tilstrebe en estetisk vellykket konstruksjon.

Hvorvidt man har lykket vil alltid være gjenstand for subjektiv vurdering, men ved utformingen ble i alle fall følgende vektlagt:

- Det skal være en moderne konstruksjon. Man skal ikke forsøke å kopiere de gamle bruene. Brua skal ha sin egen identitet, men med gjenkjennende elementer fra de gamle bruene.
- Vegen har fall i lengderetningen av brua. Dette er i utgangspunktet uheldig. Den visuelle effekten minskes ved å variere søylerytmen langs buen. Høyre del av buen, der brubjelken er høyest, har større søyleavstand enn venstre del av buen.
- Buen har gjennomgående rektangulære elementer. Brubjelken har en noe mykere form på grunn av skrå sider og avrundinger på kantdragerne. Videre har fundamentene og landkarene en rektangulær form. Søylene er valgt runde. Denne formen gir det mest ryddige visuelle uttrykk, spesielt når det er mange like elementer. Den runde formen kan også forsvares ved at søylene skiller elementer av ulik form og materiale.

- Brubjelkens yttersider skal flukte med buens yttersider. Dette er vesentlig nær buens topp der klaringen mellom de to konstruksjonsdelene er minst.



Figuren viser fotomontasje av stålbuens. Eksisterende bru i bakgrunnen.

## Enkle tekniske løsninger

Ved utforming av stålbuens var det vesentlig å forsøke å lage enkle løsninger. Dette er viktig for utviklingen av dagens moderne stålbruer. Materialer er rimelig, arbeid er dyrt. Det kan være fornuftig å for eksempel sløyfe en stiver å heller benytte større platetykkelser. Dette ble gjort på topp- og bunnplaten i buens. Her er tykkelsen 50 mm og platen er uavstivet i lengderetningen. Avstivet og tynnere plate ble lenge vurdert, men komplisert detalj ved innføring av søyler gjorde at dette ble droppet.

Stegene derimot er avstivet med en trapesstiver. Forklaringen er at platen er vesentlig bredere, noe som ville ført til uforholdsmessig tykke plater dersom stiver skulle sløyfes. Stiveren kommer heller ikke i samme grad i konflikt med søyleinnføringen i kassen.

En annen faktor av betydning er valg av platebredder. Om det kan unngås bør man ikke velge plater så brede at disse må sveises på langs. Videre kan det være en fordel, om ikke avgjørende at platedimensjonene er mest mulig konstante. For denne brua har alle plater konstante dimensjoner langs buens. Det har liten hensikt å prøve å optimalisere dette, tildels på grunn av produksjonskostnadene og tildels på grunn av at man ved å redusere platedimensjoner i mindre belastede områder vil påvirke knekklasten og dermed dimensjoneringen av buens.

## Høyfast stål

Noen vil kanskje hevde at bru av høyfast stål har mindre for seg i en knekningsutsatt konstruksjon, og i forhold til rent strekk er dette riktig, men gevinsten er likevel betydelig. Dette kan illustreres i et enkelt eksempel:

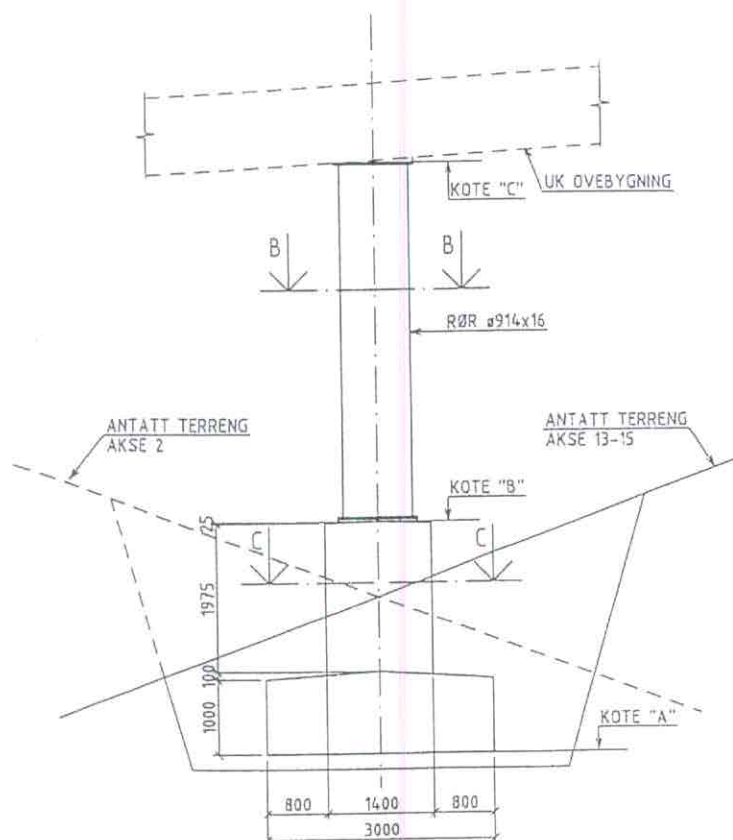


### Stål eller betong i brubjelken

Både stål og betong ble vurdert benyttet i brubjelken. Med korte spenn på rundt 20 meter, er nødvendig tverrsnittshøyde kun 1.0 - 1.1 meter. Det ble vurdert som mest økonomisk å utføre hele bjelken av slakkarmert betong fremfor å benytte stålkasser på 0.7 - 0.8 meter med betongdekke. Som nevnt over var det visuelt viktig at ytterside av bue og brubjelke flukter. For å unngå en for bred ribbe i brukroppen og dermed større vekt, ble det da valgt å benytte to smalere ribber i brubjelken.

### Stål eller betong i søyler

Valg av stålsøyler på buen er naturlig både fra et teknisk og estetisk synspunkt. Ut fra estetiske vurderinger var det også naturlig å fortsette disse søylene inn på land. Betong i søylene på land ville innføre et nytt element, og ville virke visuelt uheldig. Ved bruk av stålsøyler er det viktig at de løftes noe opp fra bakken for å unngå problemer med eksempelvis snø. Fundamentene har således en oppstikkende kvadratisk del som søylene er festet i.



OPPRISS A  
1:50

Stålsøyle med fundament

## 7. Tilbud på bygging

Tilbudene på bygging av brua ble åpnet 24. september. Prisene på stålalternativet varierte fra 60 - 80 millioner kroner. Det skilte drøyt 10 mill. fra laveste til nest laveste stålanbud. Kun en entreprenør gav tilbud på betongalternativet. Prisen på dette lå på 75 millioner.

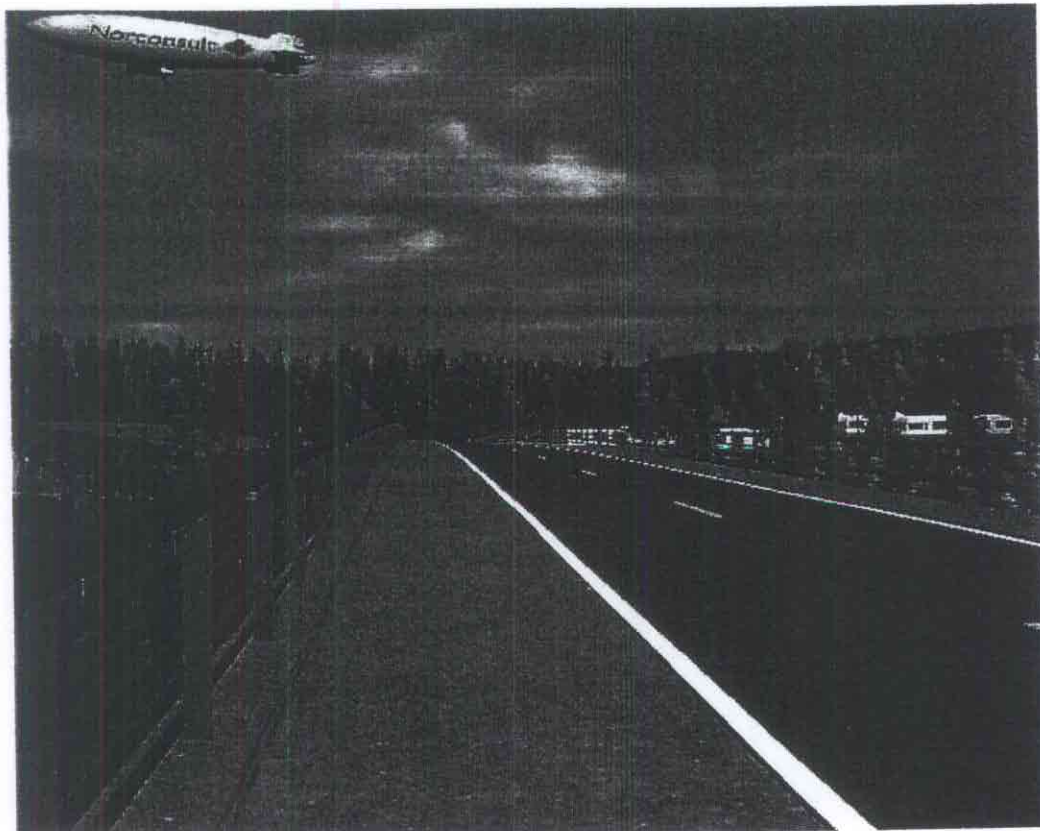
Dersom man ser på prisen på buen isolert er prisen på ferdig montert stål for billigste alternativ 28 mill som gir en pris på drøyt 26.000 kr/tonn. Riggposten er imidlertid høy, ca 24 % på totalen, og reell stålpris er dermed sannsynligvis noe høyere.

Laveste anbud var lavere enn forventet. En av årsakene kan være at entreprenøren er vesentlig kortere tid på brustedet enn konkurrentene. Forøvrig ser det ut til at alle entreprenørene har fått pris fra de samme to stålverkstedene.

Når det gjelder byggemetode er forslaget at buen kommer ferdig montert på lekter. På grunn av lav seilingshøyde under Skodjebraua, må buen ligge på lekterne og snus ved brustedet. Buen blir deretter senket ned på fundamentene.

Vedståelsesfristen er satt til 14. januar 2003 og byggestart er i begynnelsen av januar

Forventet bruåpning er oktober 2004, ...



...og slik vil en vandring over brua kunne arte seg.