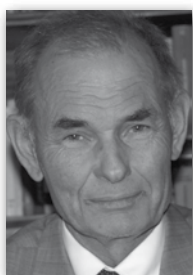


Sundsvall Broen

– krum horisontalt og vertikalt

Sundsvall er beliggende ca. 400 km nord for Stockholm på Sveriges østkyst ud til Den Botniske Bugt. Sundsvallbroen, der i øjeblikket er under bygning, vil krydse Sundsvallfjorden, og den er et meget savnet led i nord/syd motorvejen E4, der går fra Stockholm langs den Botniske Bugt helt op til Sveriges nordligste grænse. Sundsvallbroen har en totallængde på ca. 1,4 km mellem betonvederlagene. Den samlede bro-længde er 2 km. Fjordbroen er projekteret som en kontinuerlig bjælkebro med et moderne lukket kasseprofil som tværsnit. Et særligt forhold for Sundsvallbroen er, at den har en meget kompleks geometri, hvilket skyldes, at den er horisontal og vertikal krum. Endvidere varierer bredden af broen fra midten mod vederlagene, og selve tværsnittet af brodrageren varierer fra midten og ud mod vederlagene, og endelig så har broen et ensidigt fald.



Kjeld Thomsen,
Civ. ing. M.Sc.,
Dir. ISC Rådgivende Ingeniører A/S
kt@isc.dk



Hilmer Jung Larsen
Civ. ing. M.Sc., Chef Ing.
ISC Rådgivende Ingeniører A/S
hjl@isc.dk



Helge Skov Petersen,
Civ. Ing. M.Sc., Chef Ing.
ISC Rådgivende Ingeniører A/S
hsp@isc.dk



Flemming Nielsen,
Civ. Ing. M.Sc., Project chef,
projekteringschef - anlæg,
Pihl & Søn A/S

Indledning

Broen over Sundsvallfjorden – den fjord der leder ind til Sundsvall, som ligger ca. 400 km nord for Stockholm – er en vigtig del af motorvejsprojektet E4 Sundsvall. Det er en ny 20 km lang motorvej, som strækker sig syd om Sundsvall. Motorvejsstrækningen er en del af E4, der starter i nord ved Torneå, tæt på grænsen mellem Sverige og Finland og forløber langs den svenske østkyst helt ned til Stockholm og derfra tværs over Sverige til Helsingborg og videre ned i Europa som Europavej E55.

Den strækning af vejen, der skal etableres syd om Sundsvall, har for tiden den største trafikintensitet nord for Uppsala, men også et meget højt niveau af ulykker. Allerede siden 1950'erne har der været et stort ønske om dels forbedre kapaciteten af denne vej for at øge sikkerheden, og dels også for at forbedre de miljømæssige forhold. Endelig i 2011 var Trafikverket, under det svenske Transportministerium, i stand til at starte anlægget af denne strækning af projektet E4 Sundsvall, der hovedsagelig er konstrueret som en 4 spors motorvej.

Med hensyn til selve strømbroen – over fjorden – er det således, at der blev udskrevet en arkitektkonkurrence i 1995 for krydsningen, og vinderen var projektet kaldet ”dobbeltkrum”, hvilket betyder krum i to retninger. Og krum i to retninger er netop det broen virkelig er. Ved det sydlige vederlag for strømbroen er brokoten ca. 19,6 m, som stiger til omkring 39 m i midten af broens midterfag, for derefter at falde til ca. 24,6 m ved det nordlige vederlag.



Figur 1. Illustration af Sundsvallbroen.

I horisontalt plan beskriver bro-linjen en cirkel med radius på ca. 2000 m på den sydlige $\frac{2}{3}$ og former en overgangskurve, en klotoid, på den resterende nordlige $\frac{1}{3}$.

På hele længden af broen er der et tværfald på 2,5%, og ved begge endevederlag er der fra- og tilkørselsramper. Ved det nordlige endevederlag er disse ramper skåret ind i kassedragertværsnittet for broen.

Yderligere varierer højden af kassedrageren fra 6,5 m ved midten af broen til 3,5 m ved vederlagene. Bredden af broen varierer ydermere, fra 26,8 m ved midten af broen til 36,9 m og 38,2 m ved det sydlige endevederlag, respektive i det nordlige endevederlag. Dette betyder, at hver eneste af de 364 tværrammer i broen er forskellige i geometrien.

Broens totale længde er 1420 m, og den består af 11 fag med varierende spænd fra 88 m til 170 m i midten af broen. Det sydligste og nordligste fag er begge placeret over land, medens alle de øvrige fag er placeret over fjorden. Vanddybden varierer fra ca. 7,1 m til maksimalt 14,6 m på det dybeste sted ude i midten af fjorden.

Sejlrenden, der passerer i gennem det midterste brofag, har en bredde på ca. 90 m og et frirum på ca. 33 m, der tillader selv større sejlskibe at passere.

Den kontinuerlige kassedragerbjælke er understøttet på et V-formet viftesystem, der består af skrå rør, der understøtter kassedragerprofilen et stykke ude i fagene. Det bevirker, at man får en meget effektiv optagelse af den permanente last, idet de vifteformede understøtninger reducerer den effektive spændvidde. Denne udformning betyder, at den synlige del af kassedragerbroen består af tre elementer, som visuelt er i kontrast, men sammen former en unik og karakteristisk enhed.

Fra vandoverfladen rejser der sig massive betonpiller, der understøtter broen. Havbunden består af et tykt lag af organisk materiale, ca. 6 – 8 m tykt. Under dette findes der et endnu tykkere lag af sand på ca. 10 - 12 m, før fast klippe nås. Derfor er selve funderingspillen udført med en spunsvægsindfatning, i hvilken det bløde organiske lag er erstattet med sandfyld. Øverst lukkes der af med en 1 ½ m tyk betonplade, på hvilken selve betonpillen, der understøtter broen, er udstøbt.

Beregningsgrundlag

Broen er beregnet i overensstemmelse med den svenske TK Bro (Tekniske krav for broer) og de europæiske normer kombineret med de svenske nationale annex'er. Broen er beregnet for trafiklast, således som det er specificeret i Eurocodes, men også for specielle køretøjer i overensstemmelse med de svenske nationale annex'er. Broen er beregnet for trafikkategori 2 i overensstemmelse med EN 1991-2 og beregnet til at have en levetid på 120 år. Broen er derudover beregnet for skibsstød som ulykkeslast.

Stål overbygning

Broen er beregnet som en kontinuerlig bro med kassedragertværsnit, og den er helsvejst i sin fulde længde. Broens tværsnit er trapezformet og bjælkehøjden varierer mellem 6,5 m i midterfaget til 3,5 m i sidefagene. Tværsnittets sider er udformet aerodynamisk med skrånede kropplader for således at kunne modstå vindlasten bedre, end det havde været tilfældet med rektangulære kasseprofiler.

Kantdelen af kassedragerprofilen er affaset fra bunden og opad med en kontinuerlig bredde i hele broens længde på 7 m.

Variationen af geometrien af kassedrager tværsnittet langs med brolinjen er påvirket af, at broen både har variabel bredde og variabel højde på tværsnittet. Sammen med den horisontale krumning af broen og hældningen af topflangen opnås der en absolut



Figur 2. E4 motorvejen.



Figur 3. Sundsvallfjorden.

unik geometri. De tværgående afstivninger i kassedrager tværsnittet er placeret med indbyrdes afstand på ca. 4 m, og de varierer hele vejen langs broen. Ikke to tværafstivninger har ens geometri. Dette betyder, at broen totalt har 364 tværafstivninger på alle med forskellig geometri.

Udover de tværgående afstivninger placeret hver 4. m er der anordnet to langsgående pladeskot i afstande, der varierer fra 8,5 m i midten af broen til ca. 13,4 m ved endevæderlagene. Disse længdeskot er anordnet for at sikre en gunstig fordeling af de koncentrerede laste og overføring af disse laste til lejerne anordnet på piernes betonunderstøtninger.

Tværafstivningerne er udformet som gitterdragere med rørprofiler som gitterstænger. Over væderlagene er der anordnet fulde pladeskot. Et over den centrale søjle ved væderlagene og to i en afstand 4 m herfra på begge sider af understøtningen. Det samme er tilfældet, hvor de skrå rør i vifteunderstøtningen møder kassedrager tværsnittet. Her er der anordnet en tværafstivning, hvor røret rammer kassen, og tilsvarende er der anordnet et pladeskot 4 m herfra til begge sider.

Den detaljerede udformning af flangepaneler såvel som det orthotrope dæk og de tværgående gitterdragere er helt styret af udmattelseskriterierne i normerne og det krævede antal lastcykluser, der forventes optaget i løbet af broens krævede levetid på 120 år. Det orthotrope dæk har en dækpladetykkelse på 10 mm på cykelsti og 14 mm på kørebanen.

Brodækspladen er afstivet med trapezformede afstivninger bukket op af plade på 6-8 mm i tykkelse. Der er designet særlige udskæringer til disse trapeztrug, som er gennemgående igennem tværbjælkerne for at opnå en optimal udmattelseslevetid.

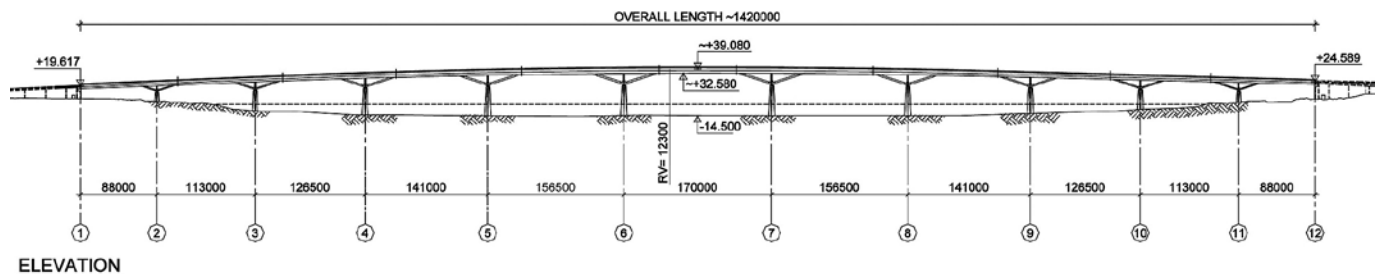
Der er også designet trapezformede afstivninger i de skrå flangeplader og i bundflangen for at opnå den krævede sikkerhed mod foldning.

Der er mandehuller i alle fulde pladeskot for at sikre, at der er mulighed for at inspicere alle indvendige flader. Der er også sikret nødvendige frirum i skottene til gennemføring af 2 stk. 400 mm fjernvarmeledninger og yderligere 5 kabelstiger med en bredde på 600 mm. Både kabelstiger og fjernvarmerør løber igennem hele broen fra den ene kyst til den anden.

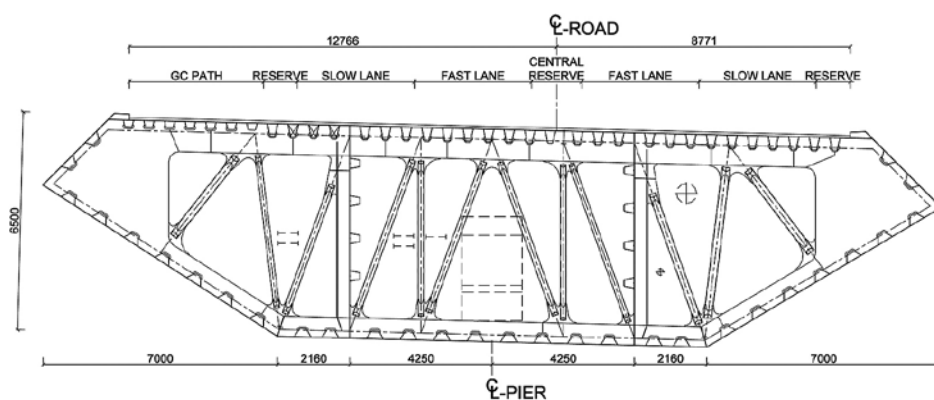
Der er udført vindtunnelforsøg for de enkelte brospænd med forskellig højde. Vindtunnelforsøgene viste, at der kan opstå kritiske svingninger med den nuværende dæmpning af konstruktionen. Broen er derfor forberedt for installation af tunede massesdæmpere i de kritiske fag. Vindtunnelfor-



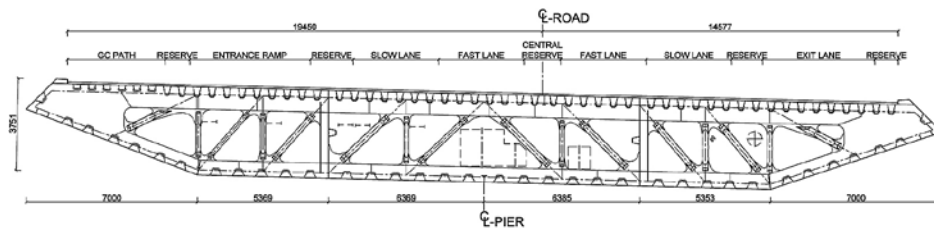
Figur 4. Plan.



Figur 5. Opstalt af bro.



Figur 6. Tværsnit ved midterspænd.



Figur 7. Tværsnit ved vederlag.

søgene viste også, at vindlasten for nogle af tværsnittene ville blive lidt større end det, der er krævet opfyldt i Eurocodes.

De V-formede understøtningsvifter er designet med cirkulære rør med diameter mellem 1219 mm og 1930 mm. De lodrette søjler over betonunderstøtningerne er afstivede på tværs af broretningen med X-formet gitter i rørprofiler til overførelse af den vandrette last fra bro til betonunderstøtningens top. Den V-formede understøtning er hel-

svejst, og rørene er svejst til brokassedragerens underside.

Den maksimale last i lejerne i brugstilstanden når op til 38 MN ved pier 6 og 7. I alle lejerne er der et forankringssystem, der sikrer den nødvendige sikkerhed mod løft i tilfælde af ulykkeslast fra skibsstød og ekstrem vindlast.

Alt stål i broen – ligesom rørprofilerne inde i broen og i de V-formede understøtningsvifter er klasse S355. Alt stål er leveret

i normaliseret kvalitet og minimum krav for sharpy-V notch værdien på 40 J og 27 J ved temperatur på hhv. -20°C og -50°C for at kunne modstå de særlige klimatiske forhold i Nordsverige. På grund af de lave temperaturer, der forekommer ved Sundsvall, er pladetykkelsen begrænset til 55 mm.

Alle primære samlinger med understøtninger og samlinger indvendigt i de tværgående skot er blevet analyseret ved hjælp af Finite element metoden for at sikre, at de korrekte spændingsspidser kommer til at indgå i udmattelsesberegningen for bestemmelse af broens levetid.

Lejer og ekspansionsfuger

Brodrageren er understøttet på pierskaf-

terne via de vifteformede rønderstøtninger på sfæriske lejer med særlig resistent glideflademateriale. Fra pier nr. 6 ekspanderer broen for temperaturpåvirkning til begge sider i broens længderetning. Dette medfører naturligvis en asymmetri i længdedeformationerne for brodrageren. Fastholdelse af brodrageren i tværretningen etableres ved fastholdelse i den østlige søjlelinje, hvorfra brodrageren så kan ekspandere mod den vestlige søjlelinje, hvor lejerne er frit bevægelige. Lejerne sidder omvendt for at sikre, at excentricitet fra den lodrette reaktion, der opstår ved længde- og tværdeformationer, påvirker pieren og ikke ståloverbygningen. Ekspansionsfugerne er designet som såkaldte lamelfuger og de er anbragt mellem brodragerenden og endevederlagene i beton. Ekspansionsfugerne skal være i stand til at optage længdebevægelser i broretningen på ± 480 mm ved linje 1 og ± 580 mm ved linje 12. Ekspansionsfugerne er designet, så de er vandtætte og tillader åbninger på op til 100 mm mellem de enkelte lameller. Ekspansionsfugerne er yderligere forsynet med en støjdæmpende overflade.

Piller

Mellemunderstøtningerne i fjorden er udformet som hule betonskafter, der på tværs af broen er trapezformede. Betonskafterne er indstøbt og indspændt i en 1,5 m tyk armeret betonplade, der danner den øverste del af undervandsfundamentet. Den faste klippe er overlejret af op til 24 m konsolideret sand og herover ca. 10 m løst organisk materiale.

For at opnå en stabil understøtning for betonskafterne er selve undervandsfundamentet udformet som en fangedæmning bygget med et rektangulært tværsnit og spunsindfatning af op til 50,5 m lange spunsprofiler.

Denne spunsindfatning går i byggefasen op over vandoverfladen, således at man kan udgrave det bløde organiske materiale og foretage en opfyldning af indpumpet sand, der danner underlag for betonpladen, som støbes tørt. Betonpladen forankres i spunsvæggene, der i øvrigt rammes ned til klippeperne.

Efter montage af betonskafterne, hvorpå de vifteformede understøtninger er anbragt, afskæres spunsvæggen i betonpladens overkant, der er placeret 3,3 m under normalvandstand. Ved den globale analyse af broen er der taget hensyn til den elastiske eftergivelse af pierkonstruktionen både i broens længderetning og i broens tværretning – specielt i forbindelse med analyse for ulykkeslast fra skibsstød.

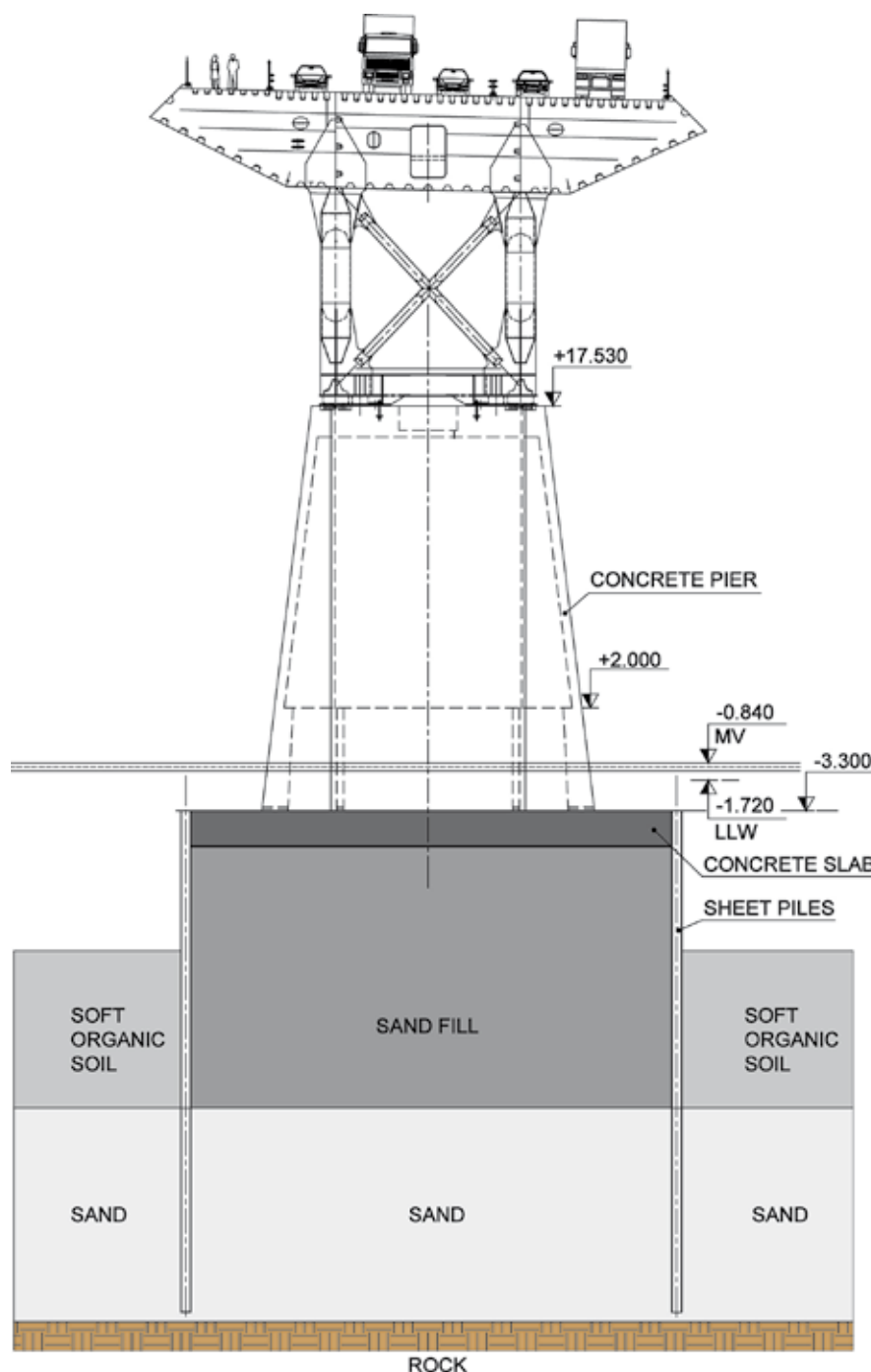
Det forhold, at Sundsvallfjorden er isdækket fra omkring oktober til marts måned, influerer naturligvis også på tidsplan-



Figur 9. V-formede understøtninger af brodrager.



Figur 10. Præfabrikeret element i Sengenthal.



CROSS SECTION BY PIER 9

Figur 8. Tværsnit ved pier.

lægningen for hele brokonstruktionen, da disse fangedæmnings udførelse kræver isfrit farvand.

Fremstilling

Fremstilling i Sengenthal i Tyskland

Fremstillingen af brooverbygningen kan inddeles i følgende enheder:

- Elementer
- Segmenter
- Sektioner.

Broens totale længde er opdelt i 11 sektioner svarende til de 11 fag. Hver sektion be-

står af 5-7 segmenter – afhængig af længden af sektionen. Totalt er der 64 segmenter til hele broen. Hvert segment består af 6-8 elementer afhængig af bredden af sektionen. Dette giver i alt 428 opsvejste elementer. Elementerne kan enten være volumenelementer eller plane elementer.

Præfabrikationen af delene i hvert element og selve elementerne er udført på Max Bögl's værksted i Sengenthal i Tyskland, tæt ved Neumarkt, der er ligger mellem München og Nürnberg. Fremstillingen af de enkelte dele og elementer er udført på en højautomatisk proceslinje, der som input



Figur 11. Samleværksted i Stettin.



Figur 12. Transport fra værksted til kanaltransport.

har arbejdstegninger udført ved separate 3D modeller for hver sektion. Det software, der anvendes til formålet, er NX Siemens software.

Efter præfabrikation af delene bliver elementerne fremstillet i følgende forløb med udbredt brug af svejseroboter:

- Svejsning af plader (bundplader, topflanger, bundflanger, kropplader og tværskot). Det typiske billede er, at der går 4 opsvejste plader pr. element.
- Automatsvejsning af afstivninger, både åbne og lukkede ribber til de opsvejste plader, med anvendelse af særligt udviklede svejseroboter, der er i stand at

holde afstivningerne i den nøjagtige geometriske position under svejsning. Hver afstivning har en længde på ca. 12 m, og grundet broens krumning opstår der en forskel mellem den teoretiske akse af afstivningen (den kurvede) og den aktuelle akse af afstivningen, der er en lige linje på ca. 10 mm. Afstivningerne får derved en krum form langs broen.

- Endvidere bevirker den variable bredde af broen, at antallet af afstivninger mindskes fra endevederlag og hen mod midten af broen. For at opnå, at den korrekte afstand mellem afstivningerne fastholdes i så stor udstrækning som muligt, er ud-

tyndingen af afstivningerne gennemført i særlige zoner i nærheden af broens centerlinje og ved broens kanter.

- På grund af variationen af brobredden falder antallet af afstivningerne fra midten af broen mod endevederlagene.
- Som helhed former afstivningsmønsteret et kompliceret system – dette for ikke at overskride den afstand mellem afstivningerne, der er tilladt af hensyn til foldningssikkerheden.
- Svejsning af tværskot og tværbjælker til pladepanelerne, som derefter udgør et fladt element.
- Sammensvejsning af planelementer til volumenelementer ved brug af paneler, langsgående kroppe, tværbjælker, tværskot samt gitterstængerne udført i rør.

Fremstilling i Stettin

Når plan- og volumenelementerne for sektion 1 og 11 er færdigfremstillet i Sengenthal, bliver disse transporteret til Sundsvall for her at blive monteret på stilladskonstruktioner. Herefter fremstilles plan- og volumenelementer for sektion 2 - 10 for herefter at blive transporteret til en samleplads i Stettin i Polen.

I Stettin bliver plan- og volumenelementerne for sektion 2-10 først samlet til segmenter og derefter til fuldstændige brofag i rækkefølgen 10, 2 og herefter 9, 3, 8, 4, 7, 5, og 6 svarende til forløbet af montagen af sektionerne på broen i Sundsvall.

Sektionerne bliver under opbygning understøttet af to glideskinner båret af betonbjælker med en indbyrdes afstand af 106 m. Længden af disse glideskinner muliggør, at 6 sektioner kan samles samtidigt.

Fra samlepladsen glides brospændene direkte ud på pramme for at blive transporteret til brostøt i Sundsvall.

Transport og montage

De præfabrikerede svejste elementer, der har en maksimal vægt på ca. 70 ton, bliver transporteret fra Max Bögl's værksted i Sengenthal i det sydlige Tyskland med lastbiler til en kaj i Bachausen ved Main-Donau kanalen. Her lastes sektionerne over på mindre skibe, der kan passere sluser og kanaler i Main og videre til Rhinen og op til Rotterdam.

I Rotterdam lastes alle elementerne over til søgående fartøjer, som sejler videre gennem Kieler kanalen og videre gennem Femern bælt til et værft i Stettin i Polen. Her samles de præfabrikerede, svejste elementer til segmenter i fuld bredde og til sektioner i fuld længde svarende til et brosfag. Disse fulde fag, der når en samlet længde på op til 170 m, lastes så på søgående pramme, som bliver bugseret op til Sundsvallfjorden.

Sidefagene spænd nr. 1 og spænd nr. 11

bliver dog monteret i mindre elementer på et stilladssystem, hvorefter alle de øvrige brospænd over vand løftes på plads ved hjælp af en særligt konstrueret flydekran, der lander dem på de allerede installerede betonunderstøtninger. Disse fag monteres successivt fra begge sider af fjorden.

Efter montage af brofagene på de lodrette søjler, der er understøttet på betonpillerne, bliver de V-formede rørunderstøtninger løftet i position, og samlingen til brodragerens underside bliver svejst. Derefter forspændes de rørformede skrå stænger. Forspændingen er kalibreret således, at det endelige færdigbyggede brodragersystem samlet er aktivt med hensyn til at optage lasten fra egenvægt. Med andre ord – egenvægten på konstruktionen bliver overført til broens permanente statiske system på denne måde.

En af komplikationerne for byggeriet og bromontagen i Sundsvall er, at vejrvinduet for Sundsvall for montage af broen er begrænset til at foregå i perioder, hvor fjorden er isfri. Normalt vil dette kun være tilfældet fra marts til november måned. Dette forhold har naturligvis en afgørende indflydelse på den planlægning og logistik, der skal til for montage af broen.

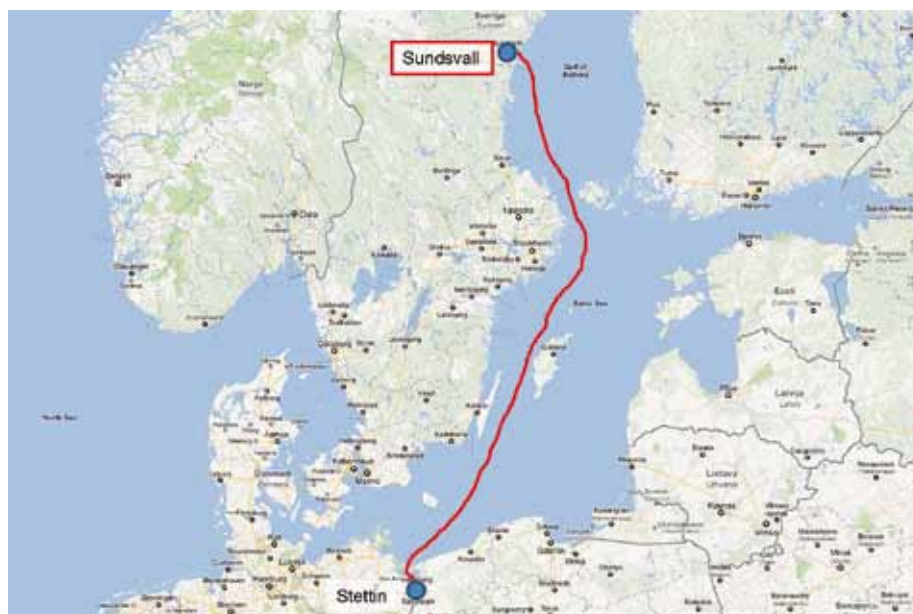
Konklusion

Sundsvallbroen, der krydser Sundsvallfjorden i Sverige har flere bemærkelsesværdige egenskaber, der bør fremhæves.

1. Den specielle geometri, der resulterer i et kontinuerligt variabelt tværsnit gennem hele broens længde.
2. Det længste spænd, efter Storebæltsbroen, for en kontinuerlig bjælkebro med lukkede kassetværsnit i Skandinavien.
3. Den specielle udformning af de V-formede understøtninger, der indgår i et effektivt system til optagelse af den permanente last.
4. Den første gang i verden en bro funderes på sandfyldte cellefangdæmninger.
5. De længst rammede spunsvægprofiler i et stykke. ■



Figur 13. Transportvej fra Sengenthal til Stettin.



Figur 14. Transportvej fra Stettin til Sundsvall.

Klient:

Trafikverket
(Sveriges Transport Administration)

Arkitekt:

KHR Arkitekter A/S, Danmark
Henrik Rundquist Arkitektkontor AB,
Sverige

Projektering:

ISC Rådgivende Ingeniører A/S
Pihl Design (piers, nordlige vederlag samt sydlige og nordlige broende)
Centerlöf og Holmberg (sydlige vederlag)
Svend Ole Hansen ApS (vindtunnelforsøg)

Konstruktioner:

JV Sundsvallsbron med følgende partnere
E. Pihl & Søn A/S, Danmark (betonarbejder og projektledelse)
Max Bögl, Tyskland (stålkonstruktioner, fremstilling og montage)
Josef Möbius AG, Tyskland (fundering, offshore)

Hovedtal:

Total længde inkl. vederlag – 2.000 m
Hovedbro længde – 1.420 m
Længste spænd – 170 m
Frihøjde – 33 m
Belagt areal – 35.900 m²

Konstruktionsperiode:

Fra 2011 til oktober 2014

Budget

Ca. 180 mill. Euro

Hovedmængder:

35.000 m³ beton
5.000 ton armering
22.000 ton stål
4.000 ton spunsprofiler