

# STEEL CASES

## DR's nye koncerthus—ingeniørkunst i verdensklasse



Koncerthusprojektet indeholder mange innovative og banebrydende stålkonstruktioner.

*"Det krævede blot 400.000 ligninger med 400.000 ubekendte at få en koncertsal til at svæve frit i luften på slanke søjler i 15 meters højde."*

Sådan indledes en meget interessant beskrivelse af DR's kæmpe byggeprojekt på NIRAS hjemmeside. Artiklen fortsætter: "Det mest fantastiske ved det nye koncerthus er måske, at det overhovedet eksisterer. Da den franske arkitekt Jean Nouvel havde vundet arkitektkonkurrencen, satte adskillige arkitekter og ingeniører spørgsmålstegn ved, om det overhovedet var muligt at opføre den helt særegne konstruktion,

med koncertsalen frit svævende i luften på slanke søjler. I dag er koncertsalen en realitet, takket være en byggemæssig bedrift, som er helt enestående i Danmarks historien. Det er ingeniørfirmaet NIRAS, der har været projekterende ingeniør på hele byggeriet og dermed har været med til at realisere DR's og arkitekt Jean Nouvels visioner. Det har krævet gennemregning af mere end 400.000 ligninger med lige så mange ubekendte og udnyttelse af den nyeste it-teknologi at virkeliggøre arkitektens ideer". Projekteringen af koncerthuset har været én lang række af ingeniørmæssige udfordringer" fortæller Mikael Skouby, som er NIRAS'

projektchef på koncerthuset. "Det helt unikke ved dette byggeri er, at udfordringerne ikke er blevet løst med kompromisser. Det er de oprindelige visioner – hensynet til æstetikken og akustikken – som har fået det sidste ord igennem hele projektet. Til gengæld er slutresultatet uden sidestykke i dansk byggeri", slutter Mikael Skouby.

### Banebrydende stålkonstruktioner

Koncerthusprojektet indeholder mange innovative og banebrydende stålkonstruktioner og byggeriet er derfor næsten selvskrævet til at deltage i konkurrencen om den Europæiske Stålpriis 2009, og er naturligvis også indstillet.

I indstillingen til stålpriisen har man fra NIRAS side prioriteret en række hovedpunkter, som vi vil gengive på de følgende sider.

<b>Bygherre:</b>	<b>Danmarks Radio</b>
<b>Ingeniør:</b>	<b>NIRAS A/S</b>
<b>Arkitekt:</b>	<b>Ateliers Jean Nouvel</b>
<b>Akustiker:</b>	<b>Nagata Acoustics Inc.</b>
<b>Entreprenør:</b>	<b>MTHøjgaard, Waagner Biro</b>
<b>Stålentreprenør:</b>	<b>Promecon, Bladt m.fl</b>



Foto: DR/Niels F. Lund

## Indstilling til ECCS European Steel Design Award 2009

I NIRAS' indstilling til ovennævnt pris har man valgt at prioritere følgende hovedpunkter fra de mange innovative stålkonstruktioner, der indgik i projektet:

- Facadekonstruktionen, hvis stabilitet sikres ved vieren-deelvirkning.
- Søjlestabiliserende bjælker i facadekonstruktionen, udskiftes til fordel for et opspændt stangsystem, på grund af krav om minimalkonstruktion.
- Det dobbelttopspændte kabelsystem i foyerområdet, der bærer glasfacaden og modstår vindbelastningen på glasfacaden ved membranvirkning i det kombinerede glas/kabelsystem.
- Integration af donkrafte i de primære understøtninger under den 14.000 ton tunge koncertsal, der gør det muligt at justere variationer i reaktionsfordelingen fra differenssætninger og krybning.
- Dynamiske undersøgelser og målinger af slanke konstruktioner i koncertsalstribuner samt på trapper og gangbroer i foyer.
- Forberedelse og udførelse af tunede massedæmpere i slanke trapper.
- Geometrisk udfordrende stålkonstruktioner til opbygning af publikumstribuner, bølgevægge i koncertsal og understøtninger af skalkonstruktioner.
- Stålkonstruktionen som udgør hovedspændet over selve koncertsalen.
- Konstruktions- og montage metoder.
- Stålets opfyldelse af de næsten kompromisløse arkitektoniske og akustiske ønsker

Dertil påpeges sammenvirkningen mellem flere af ovenstående punkter i blandt andet stålfacaden, som værende unik.

Kravet om minimalkonstruktion i facaden gør, at de opsvejste profiler er meget kompakte og konstruktionen vil karakteriseres som værende relativt slap, hvorfor konstruktionen skal kunne håndtere de forholdsvis store deformationer, som blandt andet naturbelastningerne medfører.

Udover at stålfacaden benytter sig af de søjlestabiliserende forspændte trækstænger, danner stålfacaden understøtning for det diagonale kabelsystem, hvorfor facadekonstruktionen interagerer med de to opspændingssystemer, både under naturbelastninger og ikke mindst under opspændingen af trækstænger og kabler. Qua den slanke stålkonstruktion og interaktionen mellem de forskellige systemer, har det været nødvendigt at løse komplekse ulineære stabilitetseffekter, i alle tænkelige belastningssituationer. Samtidig virker facadekonstruktionen som understøtning for glastaget over foyeren, den skinne-bærende krankonstruktion til pudsegondol på toppen af stål-

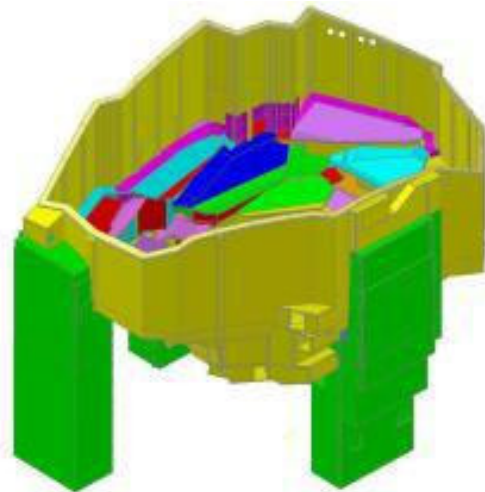
konstruktionen, nedhængte gangbroskonstruktioner, indskudte barområder og restaurantdæk.

Den overordnede målsætning for facadekonstruktionen, som for alle de andre konstruktionsdele i Koncerthuset, har fra starten været at indvirke i det arkitektoniske samt akustiske unikum, der efter åbningen den 17. januar 2009, skal kunne måle sig med de absolut største koncerthuse. Langt hen af vejen har denne næsten kompromisløse målsætning medført, at projektet har flyttet mange grænser for ingeniørfaget. For at kunne opfylde de krav som arkitektur og akustik stiller til konstruktionerne, har Koncerthuset krævet komplekse stålløsninger, med tilhørende statiske, dynamiske og udførelsmæssige udfordringer.

Alt i alt et banebrydende projekt, der vil øge forventningerne til hvad der er praktisk muligt og der vil være med til at sætte Danmark på det arkitektoniske og bygningstekniske verdenskort .

*(Ovenstående indstilling er formuleret af Henrik Bjørn Andersen på vegne af NIRAS projektstab.)*

## If Jean says it can fly – it can fly!



*Koncertsalen er kun understøttet af de tre trappetårne samt seks slanke søjler.*

Jean Nouvels højtflyvende arkitektoniske visioner var så overbevisende, at han vandt den arkitektkonkurrence, der var udskrevet om et nyt koncerthus til Danmarks Radio. Men umiddelbart efter var der adskillige byggesagkyndige, der satte spørgsmålstegn ved om arkitektens højtflyvende visioner overhovedet kunne realiseres: En koncertsal på 14.000 tons, med plads til 1800 tilhørere foruden orkester og orgel, svævende 15 meter over jorden alene båret af tre trappetårne og fem spinkle søjler.

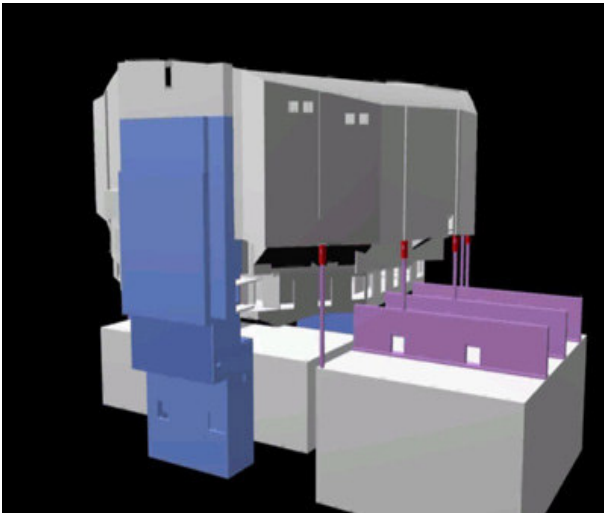
Også det franske arkitektfirma "Ateliers Jean Nouvel" blev konfronteret med spørgsmålet, om projektet overhovedet kunne realiseres. Svaret faldt prompte:

" If Jean says it can fly – it can fly!"

## Sådan svæver Koncertsalen

Her ses, hvorledes Koncerthuset understøttes:

- Tre trappetårne (blå)
- Tre øvesale i kælderen (hvid)
- Tre høje vægge (lilla)
- De seks donkrafte (rød)



Da Koncerthuset er funderet på meget uensartet jordbundsforhold, må man forvente at de tre primære understøtninger/trappetårne (blå), hen over tiden, sætter sig forskelligt. Udover de tre trappetårne er Koncerthuset understøttet på seks slanke søjler, hvor tre af dem skal udveksles henover Koncerthusets næststørste rum, nemlig Orkestersalen, via tre høje vægge (lilla).

For at kunne udligne de differenssætninger der vil ske mellem de forskelligartede understøtningsforhold, er der imellem søjlerne og koncertsalen installeret donkrafte (rød). Som billedet viser, er der i tilfældet med sætning af koncertsalen, mulighed for at aflaste søjlerne og de høje vægge (lilla), og dermed undgå overbelastning af disse bygningsdele. Herudover er der i tilfældet med sætning af Orkestersalen mulighed for at aflaste trappetårnet (blå).

## Klassisk musik på donkrafte

Undergrunden i Ørestaden, som hele DR-byggeriet hviler på, er mildest talt ustabil. For byggeriet af den nye koncertsal har det betydet en kæmpemæssig ingeniørmæssig udfordring at sikre, at koncertsalen, som alene er båret af tre trappetårne og seks spinkle søjler, ikke sætter sig.

Som de fleste ved, vil en træbenet stol altid stå stabilt. På samme måde ville koncerthuset, hvis det alene hvilede på det tre trappetårne stå stabilt uafhængigt af sætninger i undergrunden. Men da koncertsalen yderligere er understøttet af seks slanke søjler hvis bæreevne varierer med den grund de står på, har det ikke været muligt at gardere sig fuldstændig mod sætninger.

Ingeniørfirmaet NIRAS udtænkte en ganske utraditionel løsning på problemet. Mellem hver af de seks søjler og koncertsalen har man monteret hydrauliske donkrafte, som

giver hver af søjlerne en justeringsmulighed på nogle få centimeter. På den måde kan søjlernes længde løbende justeres, så de bærer som beregnet.

Donkraftene betjenes af sikkerhedsmæssige årsager manuelt. I praksis betyder det, at en enkelt mand med et halvt hundrede pumpe slag kan hæve eller sænke den 1400 tons tunge koncertsal de nødvendige millimeter. Det sker dog kun hver tredje måned. Bygningen er for længst faldet til ro, så nu kontrolleres tryk og belastning kun hver tredje måned.



I den nordlige ende hviler koncertsalen på seks slanke søjler, som hver kan bære 800 ton. For at sikre byggeriet mod sætninger er hver søjle udstyret med en hydraulisk donkraft, så trykket på hver enkelt søjle kan justeres.



De midlertidige tårnunderstøtninger ved koncertsalen blev taget ned, og koncertsalskonstruktionen fremstår nu som den svævende 14.000 ton meteor, som Jean Nouvel har tænkt den.

"If Jean says it can fly, it can fly." And now it does!

## Grænsebrydende facade

Et 50 meter højt stålskelet omslutter koncertsalen i DR's nye koncerthus i Ørestaden. For rigtigt at forstå dets funktion og konstruktion, skal man forestille sig, at den meteorlignende koncertsal svævende på tre trappetårne i princippet kunne have stået alene på grunden derude på Amager. Formålet med konstruktionen er først og fremmest at skabe en afgrænsning til de tomme vidder, der omgiver koncerthuset. Derfor er den transparent, så den på en gang skaber et rum omkring koncertsalen og samtidig gør selve koncertsalen synlig udefra.



Foto: DR/Niels F. Lund

På den indre facade er opspændt et diagonalt kabelnet, som bærer de ca. 1500 kvadratiske glasplader direkte på kablerne.

Facadekonstruktionen er et unikt bygningsværk i sig selv. Den består af en ydre og en indre facade med cirka 2 meters mellemrum. For at få konstruktionen til at fremstå så let som muligt, er den opbygget med spinkle materialer og uden brug af diagonale afstivninger. Uden på hele konstruktionen er trukket en transparent koboltblå dug. På denne dug er det muligt at projicere forskellige billeder og animationer. Således kan koncerthusets ydre skifte karakter afhængigt af begivenheden.

Området under koncertsalen udgør koncerthusets publikumsfoyer. Den er omsluttet af glas. En særlig stålkonstruktion bygget mellem de to facader bærer foyerens glastag mens den indre facade bærer foyerens glasvægge. Igen var kravet, af konstruktionen var transparent samtidig med at den skal kunne modstå vind og vejr.

"Løsningen blev en banebrydende konstruktion, hvor glasset monteres direkte på opspændte diagonale kabler, fortæller Henrik Bjørn Andersen fra Niras, som er konstruktionsingeniør på byggeriet. "Konstruktionen minder om en tennisketcher, hvor glaspladerne er monteret mellem strengene. Det giver en lethed i konstruktionen og ligesom i ketsjeren er fladen elastisk, så den kan give sig i forhold til vindtryk", slutter Henrik Bjørn Andersen.

## Fakta om Koncerthuset



I koncertsalen er der ingen parallelle linjer eller rette flader

- ◆ Grundareal 50 x 100 meter
- ◆ Hele bygningen rummer 200 rum
- ◆ Maksimal bygningshøjde 45 meter over terrænen og fem meter under
- ◆ Koncertsalen
  - Betonskallen måler 60 x 45 meter i plan og er 25 meter høj
  - Har et rumfang på 50.000 kubikmeter
  - Vejer 14.000 tons inkl. aptering
  - "Svæver" oppe i luften kun understøttet af 3 trappetårne og 6 mindre søjler
  - Omgivet af en facadekonstruktion der måler 100 x 60 x 45 meter
- ◆ Der er 4 sale/studier:
  - Koncertsalen med plads til 1.800 tilskuere
  - Studie 2 plads til 600 tilskuere
  - Studie 3 og 4 plads til 300 tilskuere
- ◆ Anvendelse af bygningsmaterialer:
  - 4.100 tons konstruktionsstål
  - 18.000 kubikmeter beton
  - 3.600 tons armeringsstål
  - 2.000 meter spændkabler
  - 312 jordankre med en gennemsnitslængde på 17 meter

Hvor andet ikke er angivet, har NIRAS ophavsret til fotos i denne folder.