Erik Reitzel

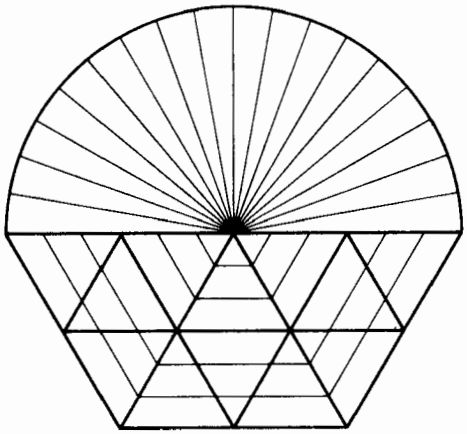
FRA BRUD TIL FORM

POLYTEKNISK FORLAG

Erik Reitzel

FRA BRUD TIL FORM

OM MINIMERING OG RESSOURCEØKONOMI



1979

POLYTEKNISK FORLAG

FRA BRUD TIL FORM
© Erik Reitzel
Tilrettelæggelse og omslag ved forfatteren
Trykt hos J.J. Trykteknik A/S
ISBN 87-502-0493-9

Udgivet med støtte fra
Dansk Ingeniørforenings Bygningsfaglige Fond.

INDHOLD

FORORD..... 5

INDLEDNING..... 6

Kapitel I:
OM BRUD OG FORM I TRYK..... 13
Introduktion..... 13
Bjælker og udkragede hvælv i sten..... 17
Rundbuen..... 27
Kuplen og Hagia Sophia..... 31
Spidsbuen..... 43

Kapitel II:
OM BRUD OG FORM I TRÆK..... 53
Trelleborgteltet..... 57
Trækkonstruktion og form..... 69

Kapitel III:
OM BRUD OG MINIMALKONSTRUKTIONER..... 79
Materialeforbruget og den statiske bestemthed..... 83
Om minimalkonstruktioner..... 89
Om minimalkonstruktioner og brudlinier.....107
Om minimalkonstruktioner og glidelinier.....123

Kapitel IV:
EGENSKABER VED MINIMALKONSTRUKTIONER.....125
Konstruktionssamlinger og knudepunkter.....127
Geometriske bindinger.....131
Veldefinerede belastninger.....133
Udnyttelse af træk og tryk.....135
Statisk bestemthed contra ubestemthed.....135
Matematisk veldefinerede kurver.....137
Stabilitet, 120°-net og gren-net.....141
Voluminøsitet.....147
Differentieret opbygning.....151

Kapitel V:
UDVALGTE MATERIALEBESPARENDE KONSTRUKTIONER.....155
Faneribbehvælv i engelsk gotik.....159
Store spændvidder.....171
Store kræfter.....177
Flytbare konstruktioner.....179
Om massefremstillede bygningskomponenter.....185

Kapitel VI:
ANDRE ASPEKTER VED BRUD OG MINIMERING.....193
Sikkerhedsgrad.....193
Materialevalg.....205
Genanvendelse.....219
Størrelsen.....225
Udkragningskonstruktioner.....235

AFSLUTNING.....243

LITTERATURLISTE.....249

FIGURLISTE.....259

SUMMARY.....265

FORORD

I de senere år har jeg ofte stået over for det problem at skulle formgive strukturer med mindst muligt materialeforbrug. Gennem arbejdet hermed har jeg gjort nogle opdagelser, hvoraf den vigtigste vel er, at materialeøkonomiske strukturer kan findes ud fra teoretiske eller eksperimentelle brudundersøgelser.

Resultatet heraf vil kunne få praktiske konsekvenser ved et formgivningsarbejde, men også erkendelsesmæssige konsekvenser, idet der i formgivningsfilosofien opstilles grundlaget for at forene den tilsyneladende modsætning mellem det destruktive og det skabende eller kort: mellem brud og form.

Den foreliggende bog sammenfatter en række delundersøgelser af materialebesparende strukturer, bundet sammen af det fælles tema, nemlig forbindelsen mellem brudfænomener og materialebesparende former for bærende konstruktioner.

En del af undersøgelserne åbner for metoder, som kan anvendes til formgivning af materialeøkonomiske konstruktioner.

En anden del af undersøgelserne viser, hvorledes nye erkendelser af sammenhænge mellem brud og form kan føre til ny erkendelse inden for andre felter, f.eks. i arkitekturhistorien eller studiet af kræfters natur.

Bogens behandling af ressourceøkonomi vedrører hovedsagelig de faste stoffer. Hvad energien angår, må jeg i et vist omfang henvise til tidligere publikationer herom.

For tilblivelsen af bogen er jeg tak skyldig til kolleger ved Danmarks tekniske Højskole og Kunstakademiets Arkitektskole. Denne tak gælder i særlig grad docent, civilingeniør Jørgen Nielsen, som især støttede mit arbejde i de første spæde forsøg i slutningen af 1960-erne.

Bogen er blevet maskinskrevet af assistent Hanne Hindsgaul Rasmussen, tegninger og opsætning af figurer er udført af teknisk tegner Mette Flagstad, for hvilket jeg udtrykker min bedste tak.

Statens teknisk-videnskabelige Forskningsråd har ydet støtte til færdiggørelse af undersøgelserne.

Instituttet for Husbygning,

Danmarks tekniske Højskole,

April 1979

Erik Reitzel

INDLEDNING

I bærende konstruktioner er der samhørighed mellem indre kræfter og form. Denne samhørighed er i ingeniørvidenskaben blevet benyttet til udvikling af beregningsmetoder til bestemmelse af deformationer og spændinger. Ved hjælp af beregningsmetoderne kan man man nu beregne givne konstruktioner, og med en vis sandsynlighed angive disse konstruktioners sikkerhed mod brud.

Et af de centrale arbejder fra nyere tid, der omhandler samhørigheden mellem indre kræfter og form, er K.W. Johansens afhandling, Brudlinieteorier fra 1943 [43.1]. Som indledning til denne skrev K.W. Johansen: "Da den naturlige Opgave ved bærende Konstruktioner er at sikre disse mod Brud, bliver Bestemmelsen af deres Styrke ved Beregning og Forsøg i første Række afgørende".

De her foretagne undersøgelser står i stor gæld til de tanker og metoder, som K.W. Johansen formidlede, - men i modsætning til K.W. Johansens arbejde beskæftiger det her foreliggende skrift sig ikke med, hvorledes man ved hjælp af brudteorier eller andre teorier kan beregne givne konstruktioner. Derimod drejer det her foreliggende skrift sig om at påvise, at brudteorier også kan anvendes til formgivning af materialeøkonomiske konstruktioner. Det drejer sig altså om, hvorledes man for bærende konstruktioner kan opnå styrke ved at fastlægge formen ud fra brudbetragtninger.

Dette sker ved, at der i det følgende påvises sammenhænge mellem materialeøkonomiske konstruktioner og brudfænomener, således som disse kan erkendes geometrisk i brudmekanismer.

Det påvises, at brudfigurer kan benyttes som grundlag for formgivning af konstruktioner, der sikrer en hensigtsmæssig kraftoptagelse, og det antydes, hvorledes en sådan formgivning kan udføres for bygningskonstruktioner.

Ved udførelsen af bærende bygningskonstruktioner har det til alle tider været et ønske at opnå en vis brudsikkerhed. I mange historiske konstruktioner ligger der nedfældet et righoldigt erfaringsmateriale, som altfor sjældent finder nutidig, teknisk anvendelse. Således er det oftest kunsthistorikerne, der beskæftiger sig med de historiske konstruktioner, og da under andre synsvinkler end de teknisk-naturvidenskabelige. En væsentlig side af denne afhandling er derfor også at påpege, hvorledes historiske konstruktioner kan indgå som del af en metode i analyse og undersøgelse af tekniske formproblemer.

Udvælgelse af det historiske materiale er foretaget således, at der er lagt særlig vægt på at fremdrage eksempler, hvor såvel materialebesparelser som brudbetragtninger under én eller anden form har været betydningsfuld.

Teoretiske brudbetragtninger til løsning af konstruktive problemer har især fået betydning efter at ekstremalprincippet blev formuleret af Gvozdev i 1936 [38.1] og uafhængigt heraf af de amerikanske plasticitetsteoretikere Drucker, Greenberg og Prager [52.1].

Ekstremalprincippet må dog i årtusinder mere eller mindre intuitivt have været benyttet af formgivere. Princippet udsiger, at "en brudfigur, som er kinematisk mulig (men ikke statisk mulig), altid vil resultere i en teoretisk bæreevne, der er på den usikre side af den rigtige, - medens en brudfigur som er statisk mulig (men ikke kinematisk mulig) vil give en teoretisk bæreevne, der er på den sikre side af den rigtige. Den korrekte løsning vil derfor ligge i intervallet mellem den kinematisk og den statisk mulige løsning".

Ud over K.W. Johansens arbejde er der herhjemme fremkommet flere andre væsentlige bidrag inden for emnekredsen til udviklingen af beregningsmetoder for konstruktioner. Her kan eksempelvis nævnes Lundgren [49.2] og Nielsen [69.7].

Forudsætningerne for og resultaterne i de oven nævnte arbejder behandles ikke her eller i det efterfølgende, - men forudsættes bekendt.

Ved formgivning af bærende konstruktioner spiller mange hensyn ind. Ligegyldigt hvor enkel en formgivningsopgave man arbejder med, må man ud over de rent logiske præmisser som omfatter naturkræfter og materialeegenskaber også beskæftige sig med de mere følelsesmæssige ønsker til funktion, æstetik og miljø. Ved fastlæggelsen af konstruktionsformer må man ofte sørge for at etablere en syntese af undertiden modstridende krav til materialer, form, konstruktion og fremstillingsmetoder. Derfor er en metodisk/analytisk behandling af emnet særdeles vanskelig og i visse tilfælde umulig. Alligevel er det forsøgt at påvise, hvorledes brudiagttagelser har haft og har betydning i bygningskonstruktionernes og arkitekturens udvikling.

Hvis man ved en opgave har valget mellem forskellige konstruktioner, vil man i praksis ofte foretrække den pengeøkonomisk billigste løsning, også selv om en sådan løsning eksempelvis har et urimeligt stort materialeforbrug.

I efterfølgende undersøgelser ses der imidlertid bort fra pengeøkonomiske hensyn, og der anvendes ved bedømmelsen af de undersøgte konstruktioner alene råstoføkonomiske måleenheder.

For en praktiker vil en sådan behandling måske virke verdensfjern, - men det må her påpeges, at råstoføkonomiske måleenheder for konstruktioner nok altid vil have naturvidenskabelig interesse, idet råstofbesparende konstruktioner kan opfattes som en materialiseret, geometrisk beskrivelse af naturkræfternes lovmæssighed.

Hertil kan yderligere føjes, at der rent samfundsmæssigt synes at være en voksende forståelse for nødvendigheden af en råstoføkonomisk konstruktionspraksis. Det foreliggende arbejde er et teoretisk bidrag til en sådan praksis.

Kapitel I er en introduktion til emnet. Efter omtale af et par nyere sammenstyrtningsulykker betragtes form- og brudproblemer i nogle udvalgte bygningskonstruktioner. Nogle af de valgte konstruktioner hører til bygningsværker, der normalt kun omtales i arkitekturhistorien for deres æstetiske kvaliteter. Det påvises, at nogle af disse æstetiske kvaliteter i den geometriske udformning medfører øget modstand mod brud (eller større spændvidder) end for tilsvarende konstruktioner, som blot ikke har disse æstetiske kvaliteter. Det er derfor en nærliggende antagelse, at man gennem den valgte geometri ud over de æstetiske kvaliteter har ønsket at opnå øget modstand mod brud.

Når stenkonstruktioner er valgt som introduktion til emnet, skyldes det dels, at bygningsmaterialet sten kun er velegnet til at modstå én veldefineret kraftmæssig belastning, nemlig tryk, og dels stenmaterialers bestandighed i forhold til mange andre kendte bygningsmaterialer.

Stenmaterialets bestandighed medfører, at stenkonstruktioner hører til de konstruktioner, hvor udviklingen kan erkendes længst tilbage i tiden. Dette gælder således de udkragede hvælv, som omtales først. Her er formen fremkaldt ud fra ønsket om at modvirke sammenbrud som følge af væltning.

Dernæst omtales, hvorledes brudforhold kan have spillet en rolle for de geometriske korrektioner i de græske stentempler.

Efter omtale af rundbuen fremdrages nogle eksempler på, hvorledes revne- og brudiagttagelser kan have medført visse materialeøkonomiske træk i Hagia Sophias konstruktioner, og der drages sammenligninger med en anden af oldtidens store stenkonstruktioner, nemlig Pantheon.

Kapitlet slutter med omtale af spidsbuen og det gotiske byggesystem, idet der påpeges nogle materiale-økonomiske træk, samt nogle ellers upåagtede forhold der viser, hvorledes nogle ofte brugte rumlige hvælvformer har sikret en gunstig kraftoptagelse.

I modsætning til foregående kapitel omtales i kapitel II hænge- og membrankonstruktioner, hvor konstruktionselementerne hovedsagelig kun er velegnede til optagelse af træk. Ligeledes i modsætning til foregående kapitel er konstruktionerne i kapitel 2 ofte let forgængelige. Som følge heraf kan de ældste trækkonstruktioner kun erkendes som svage arkæologiske rester, i tegninger, i relieffer eller i skriftlige beretninger.

I kapitlet omtales nogle arkæologiske rester af fuldstændig sammenbrudte konstruktioner, som stammer fra år ca. 1000 e.v.t. og som i dag kun kan erkendes som rester af jordgravne stolpehuller. Disse rester stammer fra bygningskonstruktioner, der har været opført på de danske vikingeborge Trelleborg, Nonnebakken, Fyrkat og Aggersborg. På baggrund af de fundne stolpehuller samt ud fra andre fund og skriftlige beretninger omtales en hypotese gående ud på, at bygningskonstruktionerne må have været teltoverdækkede. Teltkonstruktionen beskrives i tegning og tekst, ligesom der omtales et modelforsøg med konstruktionen udført i målestoksforhold 1:3.

Sluttelig omtales nogle nyere teltkonstruktioner, ligesom der angives nogle optimale pilhøjdeforhold for hængelinier.

Kapitel III omtaler konstruktioner velegnet til optagelse af såvel tryk som træk, hvilket i praksis drejer sig om forskellige former for gitre. Afsnittet er et rent teoretisk afsnit, som kun behandler kræfter og den til kræfterne hørende optimale konstruktionsgeometri.

Der omtales forskellige metoder til optimering af konstruktioner, heraf A. Ostenfelds udredning om materialeforbruget ved statisk bestemte contra statisk ubestemte konstruktioner, samt nogle nyere "fully-stressed" metoder.

Hovedvægten lægges dog på behandlingen af de såkaldte Michell-konstruktioner, som tager udgangspunkt i et arbejde udført af A.G.M. Michell i 1904 [04.1]. På baggrund heraf påvises en ny analogi mellem minimalkonstruktioner og brudlinier.

Denne analogi, som kan benyttes til fastlæggelse af gunstigste kraftvejsgeometri, er i overensstemmelse med Le Châteliers princip, som ellers ikke tidligere har fundet anvendelse på konstruktive problemer.

Der vises nogle enkelte eksempler på, hvorledes analogien kan benyttes til skitsering af materialebesparende konstruktioner ved fikserede belastninger.

Sluttelig omtales, hvorledes der også vil kunne opstilles en analogi mellem minimalkonstruktioner og glidelinier.

I kapitel IV gennemgås nogle karakteristiske egenskaber og problemer ved minimalkonstruktioner. Således fremdrages nogle enkelte forhold vedrørende samlingsproblematikken, indflydelsen fra geometriske bindinger og kravene til belastningernes præcision. Endvidere omtales, hvorledes minimalkonstruktioner er karakteristiske ved, at materialerne udnyttes til træk og tryk, at konstruktionerne er så lidt statisk ubestemte som muligt, samt at geometrien er opbygget efter matematisk veldefinerede kurver.

I de ovennævnte undersøgelser er der de fleste steder set bort fra foldningsstabilitetsproblemer. I kapitlet vises, hvorledes løsningen af minimalkonstruktioner for disse problemer kan ske ved inddragelse af 120°-net.

Således som formgivningspraksis er i dag, er det en ulempe, at minimalkonstruktioner har en stor geometrisk udstrækning, d.v.s. at de er voluminøse. Gennem nogle enkelte eksempler vises imidlertid, at voluminøsiteten ikke nødvendigvis behøver at være en gene, - men at den tværtimod kan medvirke til god integration af konstruktionsdele og installationsdele.

Sluttelig vises, hvorledes materialeøkonomisk konstruktionspraksis medfører en mere differentieret opbygning af konstruktionerne, end det er tilfældet ved de råstofforbrugende konstruktioner.

I kapitel V fremdrages nogle udvalgte eksempler på materialebesparende konstruktioner, idet det må fremhæves, at hovedparten af eksemplerne ikke tidligere har været anskuet under denne synsvinkel. Dette gælder således omtalen af faneribbehvælv i engelsk gotik og den mulige årsag til forskelle mellem fransk og engelsk gotik. I kapitlet omtales endvidere materialeøkonomiske konstruktioner i forbindelse med ønsket om etablering af store spændvidder, etablering af flytbare konstruktioner, overførsel af store kræfter eller øget industrialisering af byggeriet.

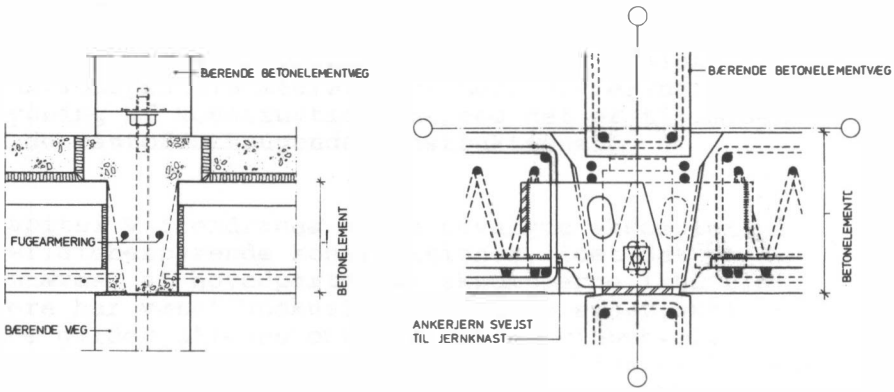
Den hidtidige behandling af emnet har drejet sig om sammenhængen mellem materialebesparende former og brud. I kapitel VI omtales herudover, hvorledes der er sammenhæng mellem materialebesparelser og brud under andre synsvinkler end det rene formvalg.

Dette gælder således fastsættelsen af sikkerhedsgraden, fastlæggelsen af konstruktionsmaterialerne, mulighederne for at etablere genanvendelse samt fastlæggelse af konstruktionsstørrelsen. Kapitlet slutter med nogle undersøgelser af sammenhæng mellem materialeforbrug og udkragninger i udkragningskonstruktioner.

:Ekskurs:

:Afsnit, som i det følgende mærkes med : som vist her,
:må betragtes som ekskurs-afsnit, d.v.s. at de afviger
:fra hovedtanken. Når sådanne afsnit alligevel er med-
:taget, skyldes det, at de kan præcisere eller uddybe
:hovedemnet i relation til tilgrænsende emner.

Figur 1.01
Ronan Point efter eksplosionen i 5. øverste etage.



(a) (b)

Figur 1.02
Samlingsdetaille mellem bærende betonelementvæg og -dæk. Samlingsdetaillen kaldes ofte for etagekrydset.

(a) viser et typisk etagekryds fra Ronan Point.

(b) viser et eksempel på forstærket etagekryds udviklet af Larsen & Nielsen. De sædvanlige betonknaster er her erstattet af jernknaster, som sammenboltes inden fugeudstøbningen. Forstærkningen kræver et øget jernforbrug.

Kapitel I

OM BRUD OG FORM I TRYK

Introduktion

En af den nyere konstruktionshistories kendteste sammenstyrtningsulykker indtraf den 16. maj 1968 som følge af en gaseksplosion i en lejlighed i den 5. øverste etage i et 22 etagers højt beboelseshus, Ronan Point i Canning Town, London. Huset var udført af betonelementer, og ulykkens omfang, som ses illustreret i fig. 1.01, afslørede en svaghed ved moderne byggeteknik, som formentlig kun få havde ventet.

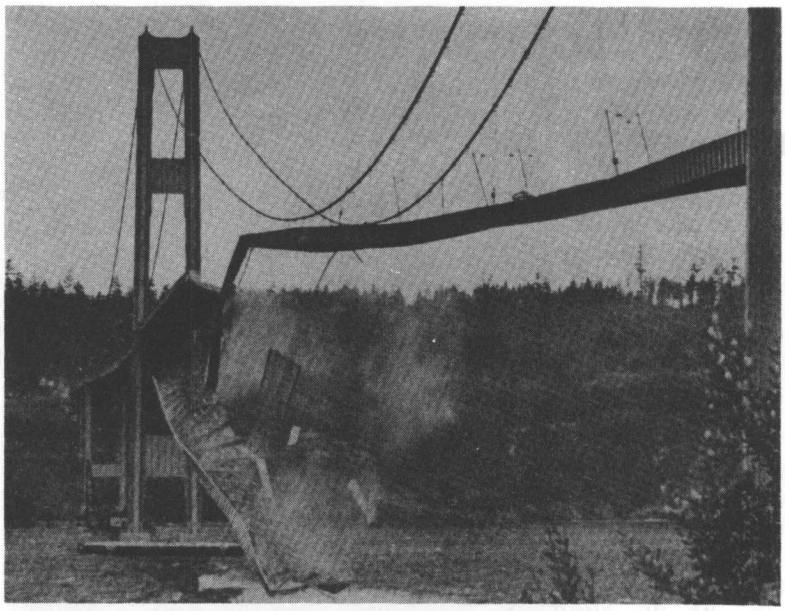
Ifølge [74.1] var eksplosionstrykket 30 - 40 kN/m^2. Ydervæggene var kun dimensioneret for vindlast på ca. 1 kN/m^2, og de omgivende vægge blev presset ud.

Sammenhængen i fugerne mellem vægge og dæk var ikke så stor, at de ovenover liggende etager kunne blive stående som udkraget konstruktion, og derfor faldt disse etager ned. Herved startede en "korthusvirkning" gennem samtlige hjørnelejligheder ned til jordoverfladen. Dette fænomen, hvor et lokalbrud forårsager en fremadskridende sammenstyrtning af flere dele af konstruktionen er siden blevet kendt under betegnelsen "progressiv kollaps". Udover den officielle undersøgelseskomités arbejde med problemet [68.1] igangsatte ulykken overvejelser i mange lande. Herhjemme blev der som følge af ulykken stillet særlige krav til bygninger med mere end 6 etager, jfr. [72.1]. Disse krav er medvirkende til at mindske risikoen for "progressiv kollaps" i det nyere byggeri.

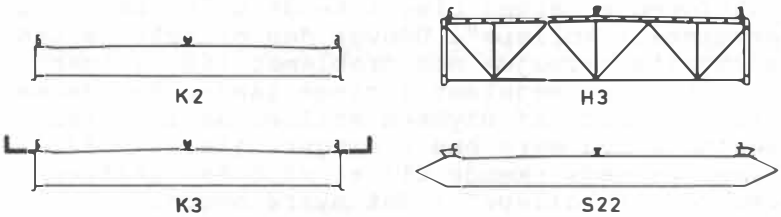
Dog har ulykken endnu ikke i dag medført egentlige konstruktive ændringer i det industrialiserede betonelementbyggeri, men blot en forstærkning af de eksisterende konstruktioner, hovedsagelig ved ekstra armering, jfr. fig. 1.02.

I fig. 1.03 ses et billede af en anden sammenstyrtningsulykke. Det er hængebroen The Tacoma Narrows Bridge, som blev færdiggjort i 1940, og som styrtede ned samme år som følge af, at den kom i resonans med vindpåvirkningen. Vindhastigheden var ikke overvældende stor, ca.19 m/sek., - men på grund af brobanens aerodynamisk uheldige udformning, sammenholdt med dens stivhed og længde, kom broen alt for let i svingninger.

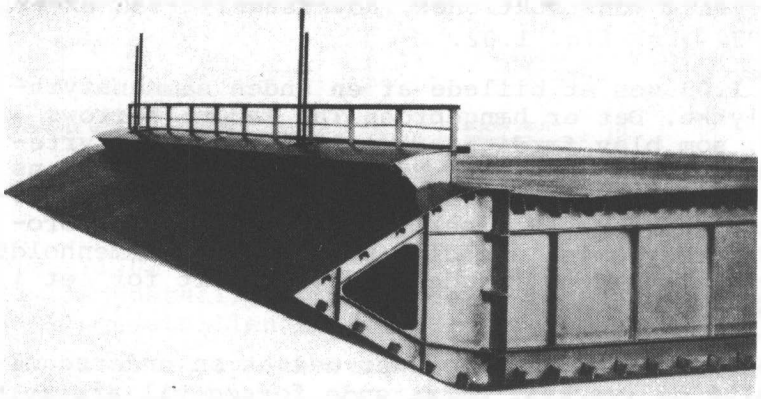
Som ved andre ulykker blev der nedsat en undersøgelseskomité og iværksat omfattende forsøg til afklaring af problemstillingen, jfr. bl.a. [64.1]. De forsøg, som ulykken affødte, satte sig snart spor i den senere formgivning af hængebroer.



Figur 1.03
Sammenstyrtning af The Tacoma Narrows Bridge, efter at brobanen var bragt i svingninger som følge af vindpåvirkning.



Figur 1.04
Hovedtyper af brobanetværsnit udvalgt til modelforsøg ved projekteringen af den nye Lillebæltsbro.



Figur 1.05
Det valgte brobanetværsnit til den nye Lillebæltsbro (svarer til tværsnit s 22 i figur 1.04).

Her i landet kender vi et smukt resultat af denne afklaring fra formgivningen af den nye Lillebæltsbro.

Gennem modelforsøg med bl.a. de fire i fig. 1.04 viste hovedtyper af tværsnit blev det påvist, at S22 havde de bedste aerodynamiske egenskaber. Modstandsevnen mod de uheldige resonansfænomener er ikke opnået ved øget materialeforbrug eller ved forstærkning af den eksisterende konstruktion, men derimod ved en hensigtsmæssig formgivning af brobanens tværsnit samt enkle aerodynamiske forholdsregler, som de ved rækværket anbragte "flaps". Rent formgivningsmæssigt gik man to forskellige veje efter de to ovenfor omtalte ulykker:

1. Efter Ronan Point-ulykken søgte man i fremtidigt byggeri at forstærke de kendte konstruktioner gennem øget materialeforbrug, eller sagt på anden måde, at opnå styrke gennem masse.

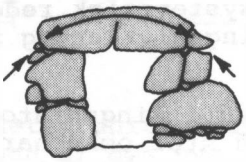
2. Efter Tacoma-ulykken søgte man frem til mere hensigtsmæssige former, som bedre var i stand til at modvirke de uheldige resonansfænomener. En sådan holdning til løsning af formgivningsmæssige problemer er i overensstemmelse med denne bogs grundholdning, som er at give idéer og teorier for, hvorledes man kan opnå modstandsevne og styrke gennem hensigtsmæssigt valg af form.

De to omtalte ulykker hører til de mere kendte i nutiden, men der kunne nævnes et utal af lignende eksempeler på, at studiet af en sammenstyrtning har givet vigtig viden om konstruktionsmæssige svagheder. I [74.01] er Sune Granström og Martin Carlsson fremkommet med en systematisk redegørelse for nogle nyere sammenstyrtningsulykker og for årsagerne dertil.

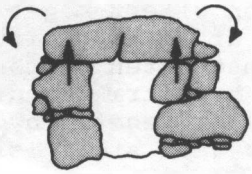
Konstruktionernes udviklingshistorie viser mange tegn på, at man ofte med stor omhu har søgt at uddrage, hvad der kunne læres om bruddet. Som eksempel herpå betragtes i det følgende først nogle enkelte træk fra stenkonstruktionernes udviklingshistorie, som på grund af stenenes relativt store holdbarhed går særlig langt tilbage i tiden.

Som bygningsmateriale har sten ofte relativt høje trykbrudstyrker, men oftest meget ringe trækbrudstyrker forårsaget af de naturligt forekommende revnetendenser. Hvis natursten derfor eksempelvis ønskes brugt til bjælker, hvor trækspændinger er uundgåelige, må materialet udvælges meget omhyggeligt, - og selv i så tilfælde vil der være stor risiko for revner i træksiden.

Figur 1.06
Mindre muråbning ved borgen i Tiryns, bredde ca. 1,10 m. Overliggeren er en simpelt oplagt bjælke i sten.



Figur 1.07a
Overliggeren i figur 1.06 kan alternativt virke som trykbuekonstruktion.



Figur 1.07b
Overliggeren i figur 1.06 kan alternativt virke som to udkragede stenbjælker.

Bjælker og udkragede hvælv i sten

Som eksempel på brug af naturstensbjælker kan i fig. 1.06 betragtes bjælken over en lille muråbning i ydermuren om borgen i Tiryns, Grækenland. Selve borgen er én af Europas ældste (ca. 1600-tallet f.v.t.), medens ydermurene i fæstningsanlægget er fra ca. 1300-tallet f.v.t. Undersiden af bjælken over den lille muråbning i ydermuren er som for en stor del andre stenbjælker revnet i undersiden. Størstedelen af sådanne revner kan være opstået under eller umiddelbart efter opførelsen og har således kunnet iagttages allerede af bygmestrene. Når en sådan bjælke, på trods af revnen, ikke styrter ned, kan årsagen være:

1. Overliggeren virker som trykbue (jfr. fig. 1.07a). For at konstruktionen skal kunne virke således, kræves et beskedent trykareal over revnen, samt endvidere at de udskridende kræfter skal kunne optages ved vederlaget.

2. Overliggeren virker rent konstruktionsmæssigt som to indspændte, udkragede bjælker (jfr. fig. 1.07b). Indspændingen er først virkningsfuld efter færdiggørelsen af den overliggende mur. I virkeligheden er de farlige bøjningstrækspændinger lige så store som ved den simpelt understøttede bjælke, - men de største bøjningstrækspændinger findes nu ikke ved bjælkemidtens underside, men ved vederlagets overside. En eventuel revne i oversiden har vanskeligere ved at udvikle sig på grund af friktion med de overliggende stenlag,

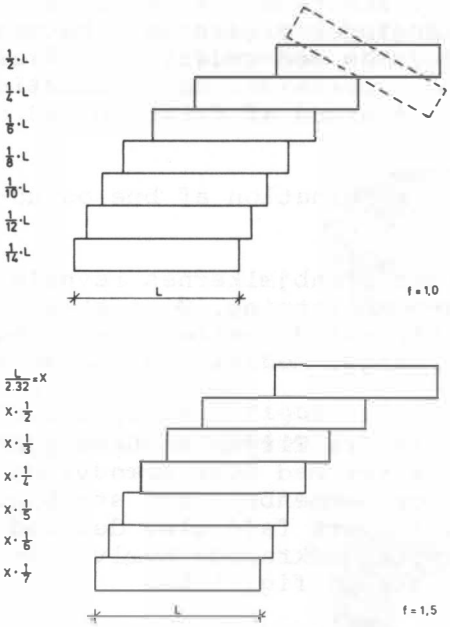
3. Overliggeren virker som kombination af bue og udkragning.

Når spændvidden øges, vokser stenbjælkernes revnefare og dermed risikoen for sammenstyrtning. Øges eksempelvis alle mål i en bjælke til det dobbelte, vokser egenvægtens bøjningsmoment 16 gange, medens modstandsmomentet kun vokser 8 gange.

Allerede de gamle stenmestre fra Tiryns må have gjort den iagttagelse, at stenbjælker med stor spændvidde frembød en større risiko for sammenbrud end stenbjælken med lille spændvidde. I hvert fald blev der ved de større spændvidder benyttet udkragede hvælv, således som det eksempelvis ses på fig. 1.08.

Ved de udkragede hvælv er det ikke bøjningstrækspændingerne, der er afgørende, men derimod modstandsevnen mod væltning.

Figur 1.08
Udkraget hvælv fra borgen i Tiryns.
Sikkerhed mod væltning er større end 1,5 jfr. figur 1.09.



Figur 1.09
Principtegning af udkragede hvælv.
(a) Hvælv med sikkerhed mod væltning = 1,0
(b) Hvælv med sikkerhed mod væltning = 1,5

Hvis en byggeblok, der ligger med vandret fuge ovenpå en anden byggeblok, ikke skal vælte, må resultanten af byggeblokkens vægt ligge over eller indenfor kanten af den underliggende. I fig. 1.09 ses eksempel på gunstigst mulige former for udkragede hvælv, med sikkerhedsgrader mod væltning på 1,0 og 1,5. Ved større udkragede konstruktioner vil trykspændingerne ved de indre kanter blive afgørende for den nødvendige geometri og medføre, at udkragningerne mindskes.

I og for sig er udkragede hvælv en konstruktiv god løsning i tilfælde, hvor der med stenblokke ønskes en overdækning. Der kræves ved udførelsen ingen stilladser eller midlertidige understøtninger, men i sammenligning med andre konstruktioner er de udkragede hvælv tunge og massive, med et stort forbrug af materialer.

Trods det relativt store materialeforbrug har de udkragede hvælv været i stand til at hævde sig og især i forhistorisk tid dannet en særlig arkitekturretning. Der findes flere kendte eksempler, hvoraf kan nævnes: Borgen i Mykene (ca. 1600-1100 f.v.t.) med udkragede hvælv bl.a. ved Løveporten, Atreus' skatkammer og, som det ses på fig. 1.10, ved Klytaimnestras grav.

I de rumlige kuppelkonstruktioner baseret på udkragningsprincippet, kan der opnås større udkragning end ved de cylindriske hvælv. Dette skyldes, at i de vandrette snit i de rumlige konstruktioner er ydre omkreds større end indre omkreds. Hvis byggeblokkene udfylder alle hulrum i konstruktionen vil for samme udkragning bagvægten i de udkragede kuppelkonstruktioner blive større end i de cylindriske. Hvis derfor eksempelvis fig. 1.09 illustrerede lodrette snit i udkragede kuppelkonstruktioner, ville sikkerhedsgraderne mod væltning være større end de angivne 1,0 og 1,5.

Udkragede hvælv i såvel plane som rumlige konstruktioner kendes også fra andre egne. De arkitektoniske muligheder, der ligger i en konsekvent brug af disse konstruktioner, ses tydeligt i byen Alberobello i Syditalien [67.1].

I en sådan by har udkragningsteknikken været en brugbar løsning til bygningskonstruktioner, da der var rigeligt med velegnede natursten på stedet. At arbejdet med opførelsen samtidig har været langvarigt og arbejdskraftkrævende, har ikke forhindret opførelsen. En fordel ved konstruktionsformen er, at den kan opføres helt uden midlertidige understøtninger og stilladser. Hvis udkragningen er udført således, at sikkerhed mod væltning er større end 1,0, jfr. fig. 1.09, har arbejdet uden fare for sammenstyrtninger kunnet ligge stille på et hvilket som helst stade og atter genoptages på et hvilket som helst tidspunkt. Opførelsen har derfor kunnet udstrækkes over en lang årrække.

Figur 1.12
Parthenon, Athen, 447-432 f.v.t.

ad.1. Søjlediameteren blev formindsket opefter med ca. 3/13 af basens diameter.

ad.2. Søjlehøjden fra basen til arkitravunderside blev valgt til 5,5 × basens diameter. Afstand c/c søjler = 2,25 × basens diameter, hvor basens diameter er henregnet til de indre søjler.

ad.3. Søjlerne fik entasis på ca. 1,75 cm. Kurveforløbet er tæt på en cirkelbue, og maksimum indtræder ca. 2/5 søjlehøjde over stylobatet.

ad.4. Hjørnesøjlernes diameter blev ca. 16/15 af de indre søjlers diameter.

ad.5. Hjørnesøjlernes hældning mod midten blev ca.7 cm.

ad.6. Den aksiale afstand mellem hjørnesøjlerne og deres nabosøjler blev valgt ca. 60 cm mindre end de øvrige aksiale søjleafstande.

ad.7. Stylobatet fik en pilhøjde, der er ca. 11,8 cm på langsiderne og ca. 6,5 cm på kortsiderne.

Oftest er korrektionerne sidenhen blevet anskuet, som om de var rent æstetiske fænomener. I Vitruvius' omtale (ca. år 0) af de to første korrektioner står i oversættelse fra [00.1], 3. bog, 3. kap., stk. 13: "Disse proportionale forstørrelser i søjlers tykkelse er udført på grund af de forskellige højder, som øjet må betragte. Thi øjet søger altid skønhed, og hvis vi ikke imødekommer dets ønske om skønhed gennem en proportionering af disse mål, og således kompenserer for øjenbedrag, vil en klodset og akavet fremtoning være synlig for betragteren.....".

I renaissancen blev teorierne for korrektionernes æstetiske værdier videreført, og siden er korrektionerne kun sjældent blevet anskuet under andre synsvinkler. Imidlertid kan alle de omtalte korrektioner også anskues som værende af praktisk og konstruktiv værdi:

Således øger korrektion 1. og 3. søjlernes bæreevne.

Sikkerheden mod væltning øges gennem korrektion 2.

Ved at gennemføre korrektion 4., 5. og 6. øges bæreevnen i de tilfælde, hvor arkitraver revner i undersiden, og i stedet må bære som bue (jfr. fig. 1.07 og [00.1], - en bæremåde som på grund af såvel stenmaterialet som spændvidderne må formodes ofte er trådt i funktion. I fig. 1.13 ses et eksempel på en meget tydelig revne i en arkitrav fra Zeus-templet, som ligger i Athen nedenfor Akropolis.

Figur 1.13
Zeus Olympieion, Athen, 174-132 e.v.t. med tydeligt revnet arkitrav.

Stylobatkrumningen, der er nævnt som korrektion nr. 7. medvirker bl.a. til at sikre en hensigtsmæssig afvanding. I [63.1] findes omtalt en plausibel teori på, hvorledes stylobatkrumningen naturligt fremkom som skæringskurverne mellem stylobatens lodrette sider og sigtelinierne til horisonten.

Da man ved tempelbyggeriet gik fra søjle/bjælke konstruktioner i træ til søjle/bjælke konstruktioner i sten, må det formodes, at der må være opstået generende revnedannelser, og i uheldige tilfælde muligvis sammenstyrtninger. Ved at indføre de seks førstnævnte korrektioner øges styrke og modstandsevne mod sammenbrud. Det er derfor ikke usandsynligt, at korrektionerne kan være fremkommet som modtræk mod stenkonstruktionernes ringere styrke og mere generende revnedannelser i forhold til de oprindelige trækonstruktioner.

Som følge af stenmaterialernes fysiske egenskaber (specielt den ringe trækstyrke og den store vægtfylde) forekommer de omtalte korrektioner at være naturlige forholdsregler for bygmestre med statisk/konstruktiv indlevelsesevne med henblik på at sikre større styrke og bedre materialeudnyttelse.

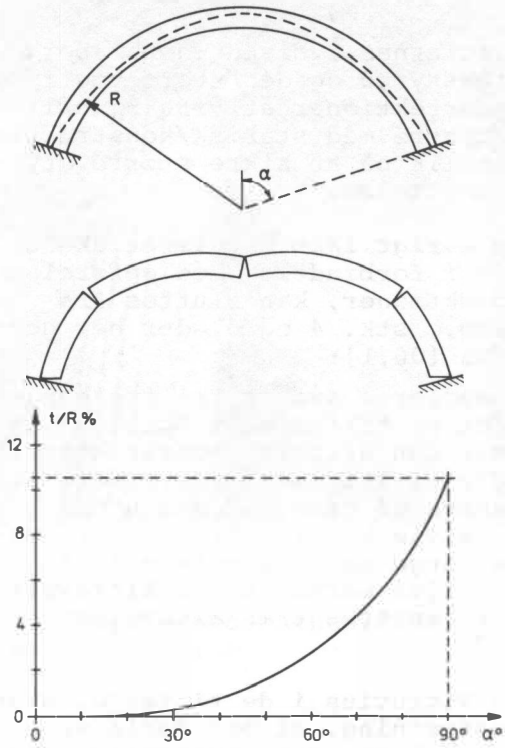
At sammenstyrtninger i øvrigt ikke har været ukendt for oldtidens bygmestre i forbindelse med opførelse af sådanne tempelkonstruktioner, kan sluttes fra Vitruvius 3. bog, 3. kap., stk. 4 og 5, der her gengives i oversættelse fra [00.1]:

"Når lysvidden mellem søjlerne svarer til tre gange søjlediameteren, som det er tilfældet i Apollon- og Dianatemplet, fremkommer den diastyle konstruktion. Denne konstruktion medfører imidlertid fare for, at arkitraverne bryder sammen på grund af den store spændvidde. I den araeostyle konstruktion (hvor lysvidden svarer til fire gange søjlediameteren), kan der ikke benyttes sten eller marmor til arkitraverne, men der må i stedet benyttes træbjælker lagt ovenpå søjlerne.....".

Som det ses, anbefaler Vitruvius i de tilfælde, hvor der er fare for sammenstyrtning, at man forlader stenmaterialerne til fordel for det oprindelige (og for søjle/bjælkebyggeriet konstruktivt mere naturlige) materiale nemlig træ.

De ovenfor anførte bemærkninger om korrektionernes praktiske og styrkemæssige værdi anfægter ikke samtidig opfattelsen af korrektionernes æstetiske værdi, men underbygger en tese om, at i god arkitektur mødes det konstruktive og det æstetiske på en naturlig måde.

Figur 1.14.
Bue fra Tell Asmar, ca. 2500 f.v.t.



Figur 1.15.
Egenvægtspåvirket cirkelbue.

(a) Tryklinien er vist punkteret.

(b) Brudmekanismen er illustreret. Oprindelig angivet af Coulomb i 1773.

(c) Diagram fra [67.5] der viser, hvorledes den nødvendige relative tykkelse for en cirkelbuekonstruktion afhænger af cirkelbuens åbningsvinkel (α).

Rundbuen

Selv om antikkens græske bygmestre også formgav tempelkonstruktionerne ud fra hensynet til en slags buevirkning i arkitraverne, blev buen først bevidst anvendt som egentlig konstruktion i Grækenland og det øvrige Europa efter Aleksander den Stores erobringer (ca. 330 f.v.t.). Buekonstruktionernes oprindelse fortoner sig langt tilbage til forhistorisk tid i de gamle kulturriger mellem Eufrat og Tigris. På fig. 1.14 ses hvælv fra paladset i Tell Asmar, jfr. [34.1] og [70.2] fra ca. 2500 f.v.t.. Først efter 300 f.v.t. blev buen stadig oftere anvendt som bærende konstruktion her i Europa. Buen, som bærer sin belastning i rent tryk, er en naturlig konstruktionsform i sten, og den er betydelig mere materialebesparende end et udkraget hvælv med samme spændvidde. Cirkelbuen blev oftest anvendt som geometrisk form til buekonstruktioner i oldtiden. Ved cirkelbuen afhænger materialeforbruget, ud over af spændvidden og størrelsen, også af buens åbningsvinkel.

I fig. 1.15a er der indtegnet den naturlige tryklinie for en cirkelbue belastet alene med sin egenvægt, - en konstruktion der ofte blev brugt som hvælv, således som det eksempelvis ses på figurerne 1.16-1.18. På buen i fig. 1.16 kan man iagttage et begyndende brud svarende til brudmekanismen i fig. 1.15b.

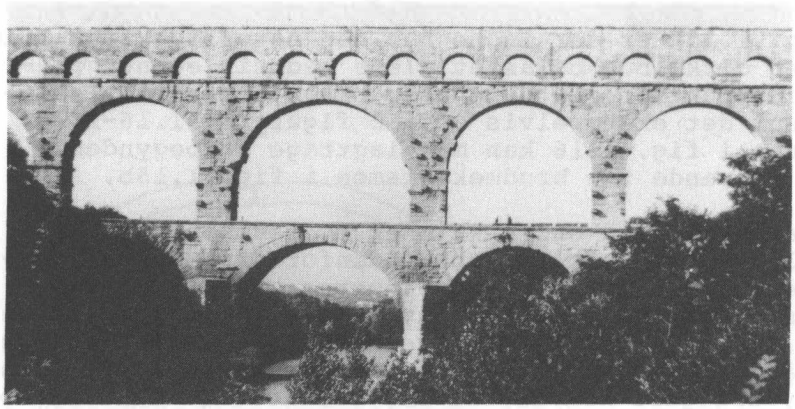
For at sikre buekonstruktioner mod sammenbrud bør tryklinien overalt forløbe indenfor cirkelbuen. Herudover kræves, at trykspændingerne overalt holdes indenfor det tilladelige, hvilket stiller yderligere krav til trykliniens beliggenhed om at være i en vis afstand fra konstruktionens ydre begrænsninger. Hvis det yderligere kræves, at der overhovedet ikke må optræde revner i buen, skal tryklinien holdes indenfor kernen, hvilket her vil sige indenfor tværsnittets midterste 1/3-del. Herudover skal buen sikres mod eventuelle stabilitetsfænomener.

En underdimensioneret cirkelbue vil bryde sammen for sin egen vægt efter en brudmekanisme, som vist i fig. 1.15b, og det indses umiddelbart ved hjælp af fig. 1.15a og b, at jo mindre åbningsvinklen α, desto bedre sikres trykliniens forløb indenfor cirkelbuens ydre begrænsninger.

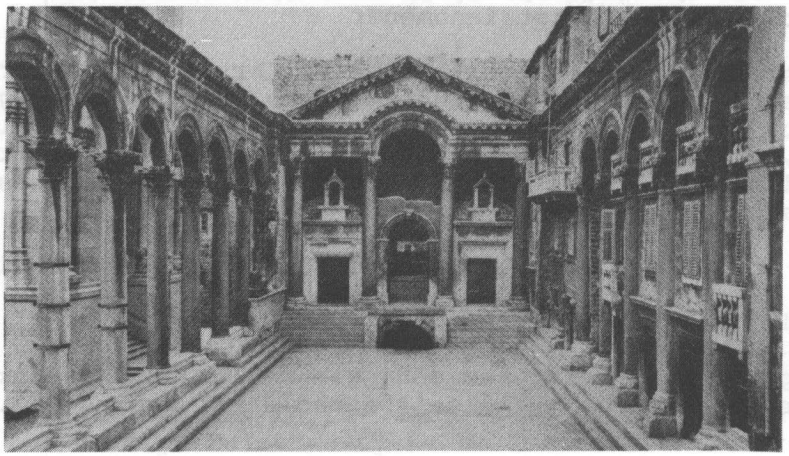
Blot for at sikre trykliniens forløb indenfor cirkelbuen kræves en vis konstruktionstykkelse, og dermed et vist materialeforbrug.

I fig. 1.15c er vist sammenhængen mellem åbningsvinkel og den nødvendige tykkelse i forhold til radius [67.5]

Figur 1.16.
Tempelanlæg i Korinth.
Apollontemplet (ca. 540 f.v.t.) t.v.
Buekonstruktionen t.h. hører til det senere romerske anlæg. På buen kan iagttages et begyndende brud svarende til figur 1.15.



Figur 1.17
Aquadukten Pont du Gard, ca 100 e.v.t.



Figur 1.18
Diocletians palads i Split, ca. 300 e.v.t.