

# Middelalderkirkens konstruktioner



Teknologisk Institut, Murværk  
Eduard Troelsgård Rådgivende Ingeniører A/S

## Forfattere

Teknologisk Institut, Murværk  
v/ Poul D. Christiansen, civ. ing

Eduard Troelsgård Rådgivende Ingeniører A/S  
v/ Jeppe Steen Andersen dipl. ing.  
Svend Jakobsen akademiingeniør, (ansvarshavende)

## Følgegruppe

Kirkeministeriet  
Marjun Egholm, chefkonsulent

Fogh og Følner Arkitektfirma A/S  
Johan Fogh, ark., Kgl. Bygningsinspektør

Murerbranchens oplysningsråd  
Søren Bøgh, ark., direktør

Statens Byggeforskningsinstitut  
Klavs Feilberg Hansen, ing. seniorforsker.

Rambøll Danmark  
Kaare B. Dahl, civ. ing. seniorprojektchef

Nationalmuseet  
Poul Klenz Larsen, civ. ing. seniorforsker

København 2012  
ISBN 978-87-991477-0-0

© Kirkeministeriet

Forsidebillede: Sankt Bendts kirke, Ringsted

## Indholdsfortegnelse

0.1. Forord.....	5
0.2. Indledning .....	7
0.3. Terminologi .....	10
1. Fra romansk til gotisk kirkearkitektur.....	12
2. Danske kirkebygningstyper .....	31
3. Materialer.....	42
3.1 Byggesten .....	42
3.2 Bindemidler.....	45
3.3 Tilslagsmaterialer.....	47
3.4 Mørtler .....	47
3.5 Bestemmelse af styrkeparametre .....	49
4. Byggeteknologi .....	54
4.1 Fundamenter.....	54
4.2 Mure .....	55
4.3 Hvælv .....	57
4.4 Tage.....	60
5. Typiske skader med konstruktiv betydning .....	62
5.1 Sætninger .....	62
5.2 Forvittringer .....	63
5.3 Fugtskader.....	63
5.4 Skader på murværket.....	64
5.5 Skader på tagværket.....	65
6. Forundersøgelser.....	68
6.1 Undersøgelse af bygningens geometri, anvendte byggeteknologi og materialer .....	68
6.2 Indledende undersøgelse og første besigtigelse .....	68
6.3 Bygningsundersøgelsen .....	70
6.4 Geotekniske undersøgelser.....	71
6.5 Undersøgelser af murværk.....	72
6.6 Kort omtale af tagværksundersøgelser .....	74
6.7 Opmålinger af tag, hvælv, mure og fundamenter .....	74
7. Statiske modeller .....	79
7.1 Indledning .....	79
7.2 En typisk konstruktion.....	83
7.3 Skjulte buer/ buelement .....	84
7.4 Fra 3D til 2D konstruktionselementer .....	84
7.5 Tryklinjer .....	85
7.6 Tværsnitsundersøgelse og styrkeparametre .....	88
7.7 Analyse af hvælv.....	89
7.8 Analyse af buer.....	97
7.9 Stabiliserende konstruktionsdele .....	97
8. Beregningsmetoder .....	101
8.1 Grafisk beregningsmetode. Pol-diagram.....	101
9. Beregningseksempler.....	109

9.1 Tryklinjekonstruktion.....	109
9.2 Eksempel på skæv belastning.....	112
9.3 Krydshvælv i Høje Tåstrup Kirke .....	118
9.4 Sorø Kirke.....	124
10. Principper for restaurering .....	132
10.1 Valg af bygningsstatisk indgreb .....	132
10.2 Fundament.....	135
10.3 Murværk .....	135
10.4 Tagværket.....	137
11. Begreber og bevaringsidealer .....	143
11.1 Bevaringsgrundlagets nøglebegreber .....	146
11.2 Originalitet. ....	146
11.3 Autenticitet .....	147
11.4 Identitet .....	147
11.5 Narrativitet.....	147
11.6 Reversibilitet .....	148
11.7 Grundlaget for bevaring af den historiske bygning.....	148
12. Myndighedsbehandling .....	152
Konklusioner .....	156
Litteraturliste .....	157
Billedliste.....	159
Indeks.....	160



## 0.1. Forord

Af vores ca. 2300 kirker er omkring 1770 fra middelalderen dvs. fra omkring 1100 til 1450. Det er naturligvis ikke ret mange set i forhold til Danmarks i alt omkring 2,5 mio. bygninger. Alligevel synes de at fylde mere i vores bevidsthed. Det er der flere grunde til. De imponerer med at eksistere på trods af deres høje alder. Det er godt kram, og derfor har vi passet på dem op igennem tiderne. Udover bygningerne som substans er de også vidne om kundskaber, viden og åndskultur.

Middelalderens bygningskultur er gennem udbredelsen af kristendommen præget af en betydelig international påvirkning. Dette gælder både bygningsformerne, arkitekturen, brugen af materialer og de tilknyttede bygmesterfag. Murede vægge, søjler, buer og hvælve er påvirkninger udefra, men de er blevet optaget i Danmark på en unik måde. F. eks. er hvælvinger i danske kirker betydeligt mere kuplede end i de franske, tyske og engelske forbilleder.

Størstedelen af Danmarks bygninger er opført i teglmur. Teglmuren kom til landet gennem denne internationale indflydelse, og i dag kan vi ikke tale om dansk bygningskultur uden at forstå denne påvirkning. Den dag i dag er murertraditionen næsten intakt i Danmark.

Før teglmuren kom til Danmark byggede vi i hovedsagen træbygninger, blok-huse, stavhuse og bulhuse. Disse bygningsmetoder havde to problemer. De havde begrænset holdbarhed i det danske klima med den teknik, der blev anvendt, og vi havde i stigende grad mangel på træressourcer.

Under Frederik den II (1534-1588) og Christian den IV (1577-1648) blev det forbudt at bygge blok-huse og bulhuse. Man skulle spare på tømmeret og i stedet for at udfylde bindingsværket med planker, skulle det udfyldes med lerklining og senere med tegl.

Vores tømrertradition har dog holdt sig stærk til i dag. Dette skyldes i høj grad kirkens tagkonstruktioner. I middelalderens romanske og gotiske tagværker er der udvist betydeligt mesterskab med hensyn til tømrertraditionen.

Det er et særligt forhold i Danmark, at disse håndværkstraditioner holdes i hævd i vores håndværksuddannelser. Det tager således ca. 3,5 år at uddanne sig til murer eller tømrer. I disse uddannelser undervises der stadig i de traditionelle byggeteknikker foruden i mere moderne konstruktionsmåder.

Der er en brist imellem disse kundskaber og den videns tilegnelse, der foregår på vores arkitekt- og ingeniørskoler. Det er kun i meget begrænset omfang, at der undervises i disse emner og gennemføres øvelser med et indhold, som relaterer sig til den traditionelle byggeskik.

Der er naturligvis en vis fællesmængde mellem den traditionelle byggemåde og den moderne. Men der er mulighed for, at denne fællesmængde kan øges ved, at der oprettes kurser i, hvordan man analyserer en kirkebygning med henblik på at identificere konstruktive problemers omfang og årsager samt at give en vejledning i, hvilke principper en afhjælpning af problemerne bør følge.

Nærværende arbejde er udført med dette mål for øje. Arbejdet blev igangsat ved, at kongelig bygningsinspektør Johan Fogh foreslog Kirkeministeriet, at der blev udarbejdet en sådan vejledning. Ministeriet har herefter bevilget midler til, at arbejdet har kunnet gennemføres.

Når det er de involverede parter, der er blevet kontaktet med henblik på at gennemføre en sådan vejledning, skyldes det et mangeårigt samarbejde mellem firmaet Eduard Troelsgård A/S og Dansk Teknologisk Instituts murværkscenter. Eduard Troelsgård gennemførte i sin aktive periode restaureringer af op mod 500 middelalder kirker, og firmaet har derfor opbygget særlig ekspertise på dette område, og arbejder stadig sammen med DTI om denne type opgaver.

I forbindelse med gennemførelsen af arbejdet blev der nedsat en følgegruppe med henblik på at overvåge, at vejledningen havde et relevant fokus og indhold, samt at komme med kommentarer til vejledningen under dens udarbejdelse.

Følgegruppens medlemmer og Eduard Troelsgård takkes for at have gennemlæst vejledningen i dens forskellige faser og for frugtbare og inspirerende kommentarer.

Svend Jakobsen

Christianshavn 1.02.2012

## 0.2. Indledning

Baggrunden for det aktuelle projekt er et ønske om en mere kvalificeret projektering af restaureringer på vores middelalderkirker.

Nærværende bog henvender sig til den kvalificerede ingeniør, der har fået en opgave med at restaurere en middelalder kirke, og som derfor har behov for vejledning i, hvorledes man analyserer disse bygningers konstruktioner statisk, og hvordan man vælger hensigtsmæssige materialer og teknologier ved den egentlige restaurering. Det er dog vores håb, at også arkitekter, bygherrer og andre interesserede, som har med denne type bygninger at gøre, kan have glæde af bogen.

Der er ikke almindeligt kendskab til traditionelle byggematerialer og de håndværksmæssige traditioner de er tilvirket efter. Forståelsen for middelalderkirkebygningernes konstruktioner er heller ikke alment kendt. Dette skyldes i hovedsagen, at der ikke undervises i disse emner på arkitekt- og ingeniørskolerne. På de tekniske skoler undervises der stadig i de traditionelle håndværksteknikker.

Det er hensigten at fremme forslag til restaurering, som tager udgangspunkt i en sikker og præcis analyse af middelalderkirkernes konstruktive virkemåde. Med denne analyse som baggrund foreslås det, at vedligeholdelse og restaurering tager udgangspunkt i de håndværksmæssige teknikker, der har været anvendt ved bygningens opførelse eller ved den aktuelle del af bygningens opførelse.

Det er også sigtet med projektet at opbygge en respekt for disse bygninger som udtryk for vores forankring i den europæiske kulturarv. Dette synspunkt skal forstås på den måde, at en middelalderkirke er et udtryk for, hvad man har kunnet, vidst og ønsket i middelalderen. Ved at studere dette og derefter kigge på hvad vi kan og ved i dag, kan vi skabe os et overblik over, hvad der er af overlap eller fællesmængde mellem disse to tidsepokers kundskaber og viden. Fællesmængden er det, vi vil kalde vores kulturarv.

Det er denne bogs tese, at vi bør udnytte denne fællesmængde maksimalt. Herigennem bliver det muligt at bevare vores middelalderkirker på et højt niveau. Men ikke kun substansen bliver bevaret på denne måde. Det er i lige så høj grad vores kundskaber og vores viden, der forbliver intakt.

Fremstillingen indeholder følgende kapitler:

### 1. Fra romansk til gotisk kirkearkitektur

Dette afsnit omhandler de centrale konstruktionselementers udvikling, dvs. murene, søjlerne og hvælvene i Europa. Desuden redegøres for den gængse opfattelse af, hvad der sker i skiftet fra den romanske til det, der senere blev

kaldt den gotiske stil. Det er udviklingen fra en vægarkitektur til en skeletarkitektur. Der peges desuden på den europæiske indflydelse på dansk byggetradition herunder især teglmurværkets indførelse til Danmark.

## **2. Danske kirkebygningstyper**

Her gives en oversigt over de romanske og gotiske kirkers udvikling i Danmark. Det gælder både med hensyn til brug af materialer og de enkelte konstruktionsdeles særlige danske former.

## **3. Materialer**

Byggematerialerne, dvs. stentyperne og mørteltyperne, gennemgås ganske kort. Desuden gives der, i det omfang det er muligt, oplysninger om styrkeparametre.

## **4. Byggeteknologi**

Kirkebygningens konstruktionslementer, opbygning og opførelse gennemgås kort. Det gælder fundamenter, mure, hvælv og tage samt sammenvirkning af de bærende dele.

## **5. Typiske skader med konstruktiv betydning**

Her redegøres for de skader, man oftest kommer ud for ved middelalderkirkebygningerne. Af statisk art er det især fundamentalsætninger, revner i mure og nedbrydninger i mure og tagværker, der giver anledning til problemer. Desuden kan der være tale om tidligere fejlindgreb i konstruktionerne.

## **6. Forundersøgelser**

Den nødvendige strategi for en systematisk gennemgang af en bygning for at afsløre, hvad der er den egentlige årsag til et observeret problem.

## **7. Statistiske modeller**

Dette og de næste to afsnit er en gennemgang af statikken som analyseredskab for disse bygningstyper. Indledningsvis behandles denne type bygningers tilhørsforhold til den statistiske hovedgruppe, ”geometrisk ubestemte og statisk overbestemte konstruktioner”. Hvælvingerne og buernes konstruktive virkemåde gennemgås kvalitativt. Der redegøres for bygningernes specielle gravitationelle stabilitetsforhold.

## **8. Beregningsmetoder**

Her gennemgås tryklinjemetoden til bestemmelse af kraftforløbet i en bue og en hvælving som grundlag for at vurdere eventuelle problemer med hvælvingerne.

## **9. Beregningseksempler**

Den praktiske gennemførelse af de specielle beregninger til analyse af kraftforløb i hvælv, buer, tage, mure og fundamenter gennemgås ved at gennemregne to typiske danske kirker.



## 10. Principper for restaurering

Hvis der er problemer med en kirkebygning vil forundersøgelserne og de statiske analyser sædvanligvis afsløre årsagen til disse problemer. Men der vil normalt være flere måder, hvorpå problemerne kan imødegås. De valg, man træffer blandt disse muligheder, bør høre hjemme i den fællesmængde, der er beskrevet i indledningen ovenfor. Hvorfor dette er tilfældet redegøres der for i afsnit 11.

## 11. Begreber og bevaringsidealer

De ældre internationale restaureringsholdninger fra slutningen af 1800 tallet berøres. Disse påvirkede i høj grad den samtidige danske restaurerings debat og praksis.

Begreber som en bygnings originalitet, autenticitet, identitet, fortælleverdi, konstruktiv virkemåde og reversibilitet introduceres som grundlag for en bevaringsstrategi.

Disse begreber ses herefter i en mere moderne sammenhæng der tager sit udgangspunkt i Venezia Chartret, som var en reaktion på en række uheldige restaureringer umiddelbart efter 2 verdenskrig.

Endelig henledes opmærksom heden på nyere diskussioner, der har givet sig udslag i fx Krakow Chartret.

## 12. Myndighedsbehandling

Ved en større istandsættelse af en kirkebygning er der en række myndigheder, der skal godkende projektet til istandsættelse. Disse, for en kirke, særlige myndighedsforhold behandles i dette kapitel.

## Litteraturliste

I litteraturlisten er angivet de hovedværker, der anvendt i de enkelte kapitler. Litteraturen er opdelt kapitel for kapitel. Derfor er visse bøger nævnt flere gange. Opslag på internettet er også anvendt ligesom forfatterens personlige erfaringer er grundlag for fremstillingen.

## 0.3. Terminologi

Middelalderkirkerne indeholder en række konstruktionselementer, som kan være fremmede for en del læsere. For at imødegå eventuelle forståelsesvanskeligheder er de mest anvendte udtryk illustreret ved hjælp af nedenstående figurer.

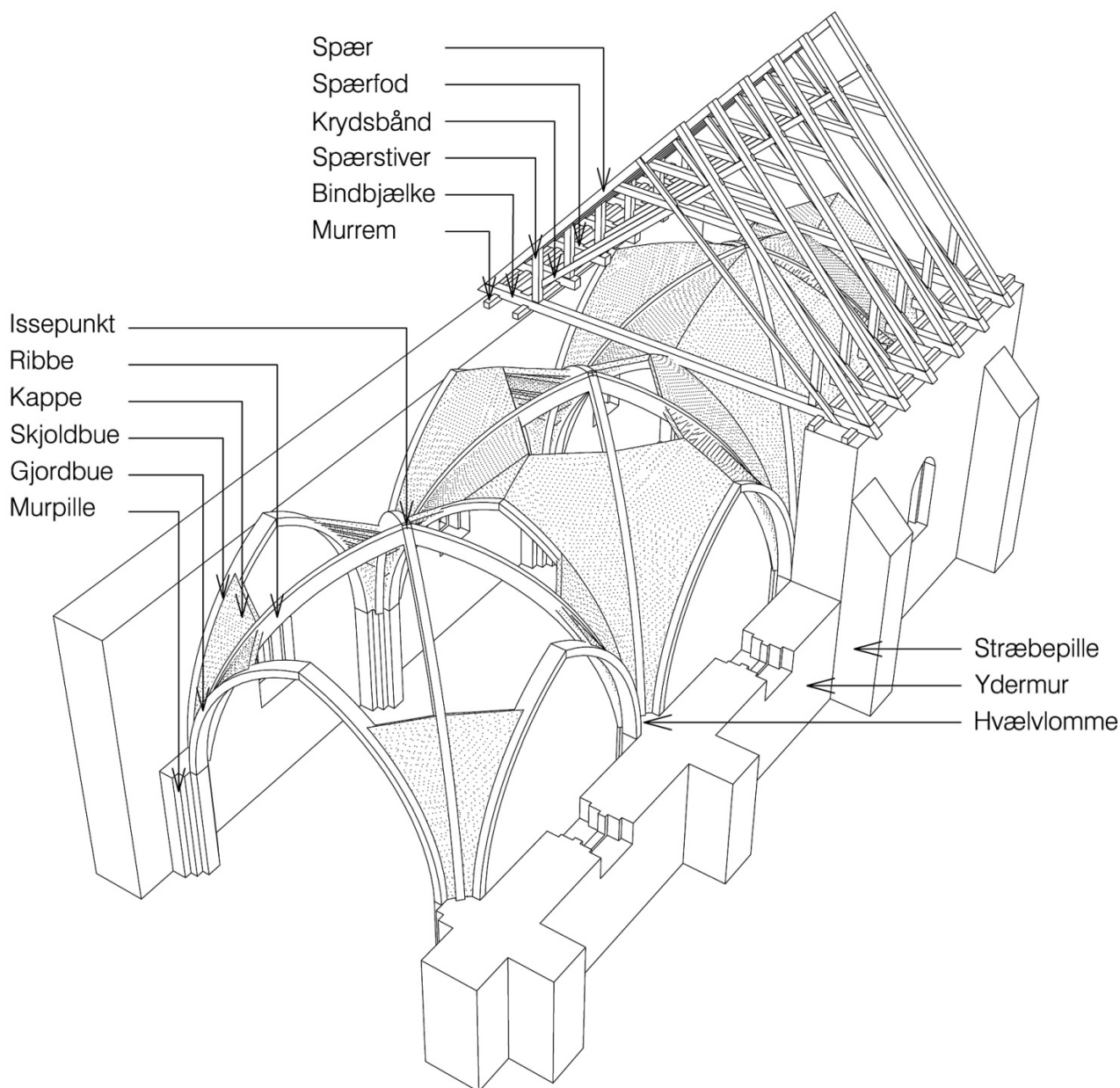


Fig. 0.3.1

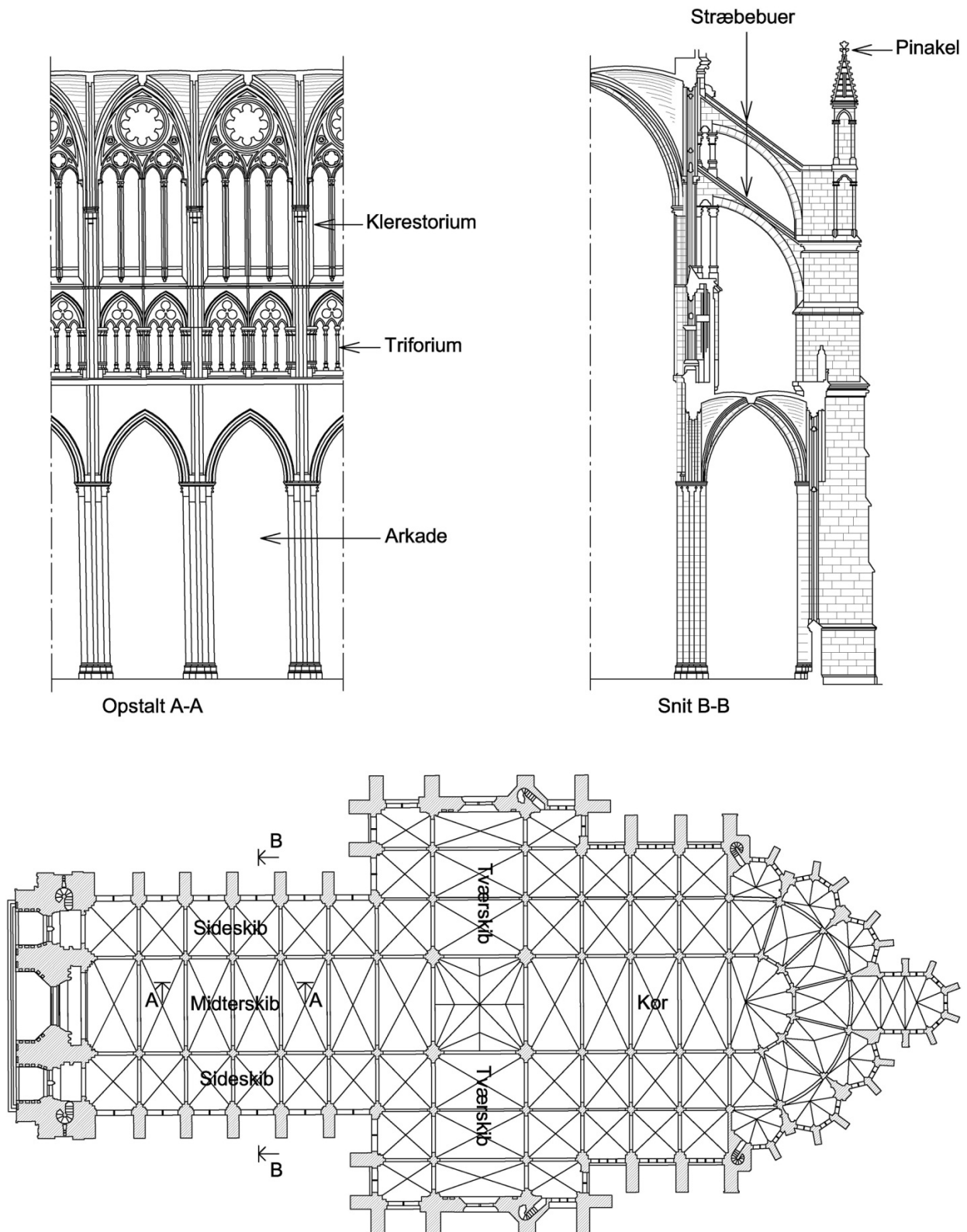


Fig. 0.3.2

# 1. Fra romansk til gotisk kirkearkitektur

Den kristne verdens kirkebyggerier fremviser mange bygningsformer. Herunder korskirker, rundkirker, centralkirker og processionskirker. Det er den sidste bygningsform vi først og fremmest vil behandle her. Dels er det den mest almindelige og dels er det i konstruktiv forstand den mest forbløffende kulmination, vi ser i disse bygninger.

Processionskirken består af to vigtige dele: koret og skibet. Koret er en betegnelse, som må føres tilbage til det græske *Choros*, som egentlig betyder danseplads eller ringdans. I latinsk sammenhæng menes ordet brugt første gang af Isidor af Sevilla, som skrev et latinsk leksikon omkring år 600. Måske skyldes betegnelsen, at celebranterne står i en rundkreds omkring alteret.

Den vigtigste tidlige tekst om arkitektur og byggeteknik er Vitruvius 10 bøger om arkitektur. Marcus Vitruvius Pollio (født ca. 80-70 f.kr. og død ca. 15 f.kr.) var arkitekt under Julius Cæsar og Augustus. Her kan man læse om alle de klassiske bygningstyper, der var almindelige i det gamle Rom.

Koret er det helligste sted i kirken. I sin enkleste form må vi antage, at bygningen, der har været hovedinspiration, er det romerske tempel. Om dette skriver Vitruvius i bog 4:

*”Det verdenshjørne et tempel, helliget de udødelige guder, skal vende mod øst er bestemt efter det princip, at hvis der ikke er noget til hinder og valget er frit, skal templet og den i cellen placerede statue vende mod vest. Dette gør det muligt for dem, som nærmer sig alteret med offergaver, at vende ansigtet mod øst, når de står frem for gudebilledet i templet. Og på denne måde ser de bedende mod det verdenshjørne, hvor solen kommer frem”.*

Om proportionerne skriver Vitruvius:

*”Et tempel skal have sådanne dimensioner, at dets bredde udgør halvdelen af dets længde. Rummet inklusiv den mur som dørene placeres i er en fjerdedel længere end templets bredde. De tilbageværende 3 fjerdedele er til forrummet, hvis mure afsluttes med murpiller. Disse murpiller skal have samme tykkelse som søjlerne. Hvis templet skal være bredere end 20 fod, placerer man mellem de to murpiller 2 søjler..... Hvis templets bredde skal være større end 40 fod, placerer man søjler indenfor og på linje med dem, som er mellem murpillerne. De skal have samme højde som søjlerne ved siden af, men deres tykkelse skal mindskes så deres tykkelse frem for at være en 8. del af sin højde er 10 del....”*

Et tempel må altså i plan se ud som vist her nedenfor.



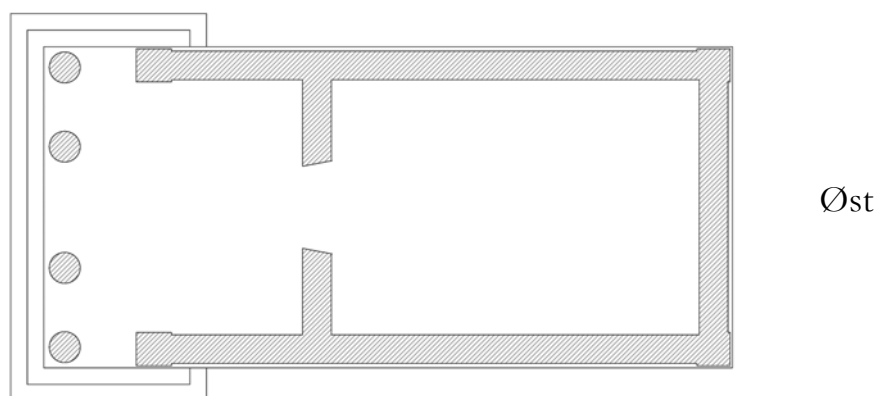


Fig. 1.1

Templerne kunne også være større, end det er antydnet ovenfor, og der har været en del variationer over temaet. Et af de bedst bevarede eksempler på denne tempeltype er Apollon, templet i Nîmes.



Fig. 1.2

Fra den ovennævnte brug af bygningen er der næppe nogen tvivl om, at de tidligste kirker, som er bygget af den romerske kejser Konstantin, har haft denne bygningstype og funktion som forbillede.

Denne bygningstype har dog især været egnet til, at få kunne bede ad gangen, og ikke været optimal til forsamling af en større menighed. Dette bringer os til den næste vigtige bygningstype.

Kirkeskibet formodes at have sin oprindelse i det latinske *navis*, som betyder skib og det er relateret til det græske *naus*, der betyder skib. Kirkeskibets funktion er at huse menigheden. Til denne funktion ser vi i hovedsagen den bygningstype, man kalder for en basilika.

Basilika er også oprindeligt et græsk fænomen, idet det refererer til magistratskongen Archon Basileus, som valgtes for 1 år ad gangen. Han havde en sådan stor forsamlingshal, hvor der er fundet mindst én. De arkæologiske udgravninger tyder på, at der har været tale om en 2-skibet bygning.

På græsk tid havde man dog allerede treskibede bygninger. Et berømt eksempel på dette er Philons Arsenalbygning i Piræus, som er beskrevet på en sten den såkaldte arsenalinskription, se også side 22.

På romersk tid er basilikaen en treskibet bygning. Den var placeret for enden af en bys Forum. Den anvendtes til forsamlinger, hvor der skulle indgås forskellige aftaler eller handler, som var af betydning for byen.



Fig. 1.3

Her ses et satellitfoto af Pompei's forum. Apollon templet ses for oven og for nedentil venstre ses basilikaen.

Også denne bygningstype beskriver Vitruvius. I bog 5 står der:

*"Basilikaer skal bygges på en grund, som grænser til forum og i varmest mulig placering, så forretningsmændene kan samles om vinteren uden at besværes af vejret. Deres bredde skal mindst være 1/3 del af deres længde eller højst halvdelen, om ikke grunden forhindrer dette og fremtvinger en ændring i disse proportioner.... Basilikaens søjler skal være lige så høje som sidegangene er brede. Sidegangen bør begrænses til 1/3 del af den bredde som midterrummet skal have."*

Denne beskrivelse betyder i praksis, at modulet for en basilika er søjletykkelsen, og den giver alle mål i planen. Er søjlen fx en korintisk søjle, hvis højde er 10 gange tykkelsen, så er sideskibet 10 gange søjletykkelsen og midterskibet 30 gange søjletykkelsen.

En sådan basilika må derfor se nogenlunde ud, som vist her nedenfor fig. 1.4.

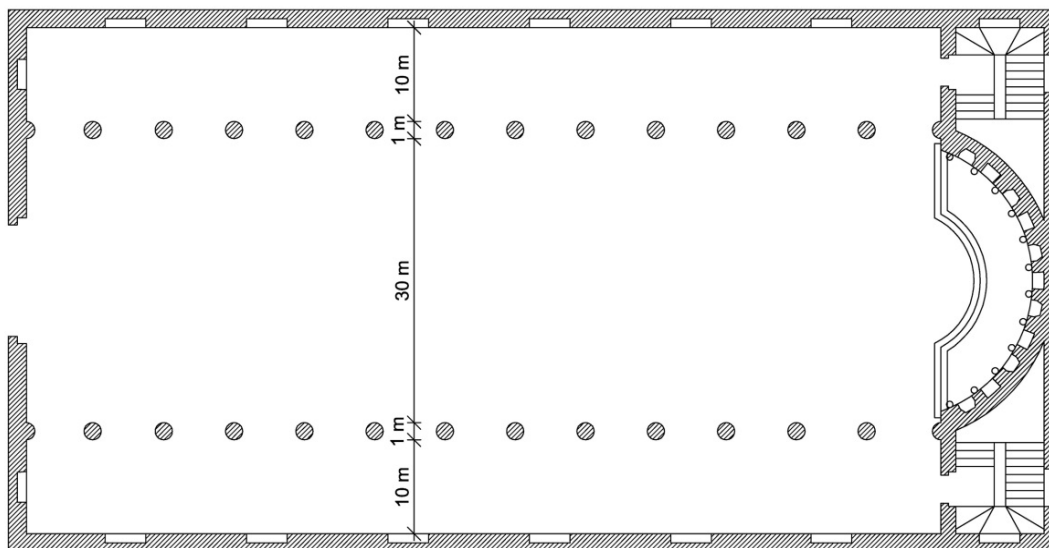


Fig. 1.4

Om søjletykkelserne siger Vitruvius i øvrigt følgende interessante. *”Søjlerne på anden etage skal være en fjerdedel kortere end dem på 1. etage, fordi de nedre, som jo bærer tyngden må være stærkere. Derved efterligner vi naturen, som kunsten skal nærme sig mest muligt. Alt skabt, som kommer op af jorden og rejser sig lodret fra marken, som fx et træ, blandt andet graner, cypresser og pinjer, er meget tykkere nede ved rødderne. Efterhånden som de vokser og rejser sig, smalner de naturligt mod toppen. I lighed hermed har arkitekten taget som regel, at de øvre partier i bygningen skal være mindre og smallere end de nedre.”*

Vitruvius refererer i øvrigt til en basilika, som er opført efter hans tegninger og under hans ledelse i den julianske koloni Fanum. I denne er der foruden basilikaen et Augustustempel bygget ind i langsiden. Se fig. 1.5.

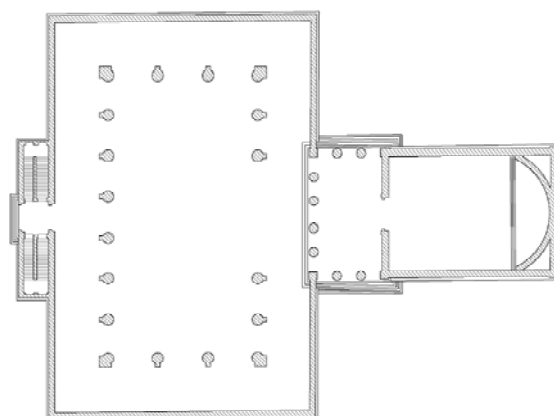


Fig. 1.5



Fanum er betegnelsen på en indviet helligdom. Hvis det skal forstås på denne måde, er Vitruvius måske den første, der har sammenbygget de to bygningsformer, der senere bliver normen for størstedelen af Europas kirker.

Der mangler nu kun ét element, for at de primære konstruktionselementer er på plads, nemlig hvælvet. Hvælvet har også sit udgangspunkt i Rom. Det er først og fremmest anvendt i de store romerske bade, termeanlæggene. Et særligt godt eksempel er Diocletians badeanlæg (år 236 – 316) fig. 1.6, 1.7 og 1.8.



Fig. 1.6



Fig. 1.8



Fig. 1.7

Rekonstruktionen til højre viser hele anlægget som var på 140.000 m<sup>2</sup>. Den centrale del er bevaret og er ombygget til kirke Santa Maria degli Angeli, som er vist til venstre. Udefra øverst og indefra nederst.



Disse grathvælv er egentlig et langsgående tøndehvælv med stikhvælv ind fra siden. Hvælvene er af romersk beton, som det fx kan ses i et termeanlæg fra Hadrians villa lidt udenfor Rom fig. 1.9.



Fig. 1.9

Det romerske riges sammenbrud begyndte med Marcus Aurelius' død 180 e. Kr. Herefter fulgte 125 år med 47 kejsere frem til kejser Konstantin ca. år 300 e.Kr. Konstantin fik opbygget et stærkt hof i øst, og Konstantinopel blev hovedstad i Romerriget i stedet for Rom. Konstantin syntes at have holdt den religiøse bold svævende i luften for at se hvor det bar hen. Kort før sin død lod han sig dog døbe.

Kristendommen har muligvis tiltalt ham på grund af deres tiltagende evne til at organisere sig. Han er således involveret i deres kirkemøde i Nikæa år 325. Han får bygget en del offentlige bygninger herunder templer. Berømt er også hans færdiggørelse af Maxentius basilikaen.

Blandt de offentlige bygninger han står som bygherre af, er også flere kirker. Der er til at begynde med tale om ret betydelige variationer i deres udformning, men grundformen var basilikaen. Den gamle 5 skibede Skt. Peters kirke i Rom var af Konstantin.

Det vestromerske rige var offer for talrige overfald af Teutoner, Goter og Longobarder og på længere sigt førte det til folkevandringstiden. Det, der til sidst så småt får kontrol over denne uorden, er samarbejdet mellem statsmagt og kirke. Det synes derfor uundgåeligt, at kirken må overtage visse af statsmagtens bygningsformer.

Et enkelt tidligt eksempel på dette skal fremdrages, nemlig den især indvendigt skønne Skt. Apollinare Nuovo i Ravenna fra begyndelsen af 500 tallet. Den er opført af den østgotiske Kong Theoderik i Norditalien fig. 1.10.



Fig. 1.10

Dette er lige før den Longobardiske invasion i området. De besatte i løbet af 500 tallet stort set hele Italien undtagen dele af kysterne og selve Rom.

Longobarderne overtog hurtigt den romerske byggeteknik. Og da de måtte underkaste sig Karl den store omkring slutningen af 700 tallet, trak de sig sammen på det område, vi i dag kalder Lombardiet i Norditalien. Longobarderne fik stor betydning som bygmestre i Europa. Dette er især synligt i den romanske arkitektur, hvor de er aktive i det omfattende klosterbyggeri.

Der er 2 kulminationer i klosterbyggeriet: dels ødselheden, som kulminerer i Europas største benediktinerkloster Cluny dels cisterciensernes modreaktion med deres strenge asketiske overholdelse af Benediktus' klosterregel.

Cistercienserne blev under ledelse af Bernhard af Clairvaux uhyre succesfulde, og der blev bygget over 300 klostre ud over hele Europa i Bernhards egen leve-



Fig. 1.11

tid. De havde 5 centrale moderklostre i Burgund: Citeaux, Clairvaux, Morimond, Pontigny og La Ferté fig.1.12.



Fig. 1.12

Dimensioneringsreglen var i princippet meget enkel. Bernhard sagde til sine munke, at de skulle bygge et kloster, der var magen til det, de kom fra.

2 eksempler fra Lombardiet kan tjene til illustration af, at der dog hele tiden foregik en udvikling inden for denne stramme ramme. Nedenfor på fig. 1.13 ses Chiaravalle Milanese ca. år 1150 i luftfoto samt vestgavlen og midterskibet mod øst. Desuden ses Chiaravalle della Columbas midterskib mod øst. Det er tydeligt, at der i Chiaravalle della Columba er et mere logisk hierarki i pilastrene i forhold til afviklingen af arkadebuen, skjoldbuen, krydsribben og gjordbuen.





*Chiaravalle Milanese, Luft foto.*



*Chiaravalle Milanese, vestgavl.*



Fig. 1.13 *Chiaravalle Milanese, skib*



*Chiaravalle della Columba*

Citeaux og Clairvaux er i dag stort set revet ned. Det skyldes den franske revolution, hvor det var nødvendigt for General Napoleon at bryde adelens magt for selv at få den, og fordi en stor del af adelens sønner var ledende inden for klostervæsenet.

Bernhards holdning er ikke særlig nyskabende. Det er derfor den del af de kristne samfund, som er udenfor de mere asketiske klostervæsen, der er drivkraften bag den udvikling, der starter omkring 1140. I hovedsagen er holdningen den modsatte af Bernhards, hvordan kan man med sin rigdom i arkitektur prise herren?

Bygherren udvikler et program, som arkitekten så må forsøge at opfylde. Hvis bygherren har usædvanlige og progressive krav, må han henvende sig til de arkitekter, der har opbygget den nyeste erfaring og ekspertise. De må have fuld tiltro til ham, idet de ikke kan regne med, at han vil afsløre detaljer overfor dem angående det byggetekniske.

Vi har skrevne kilder, der godtgør, at der har været knyttet kommitterer (betroede rådgivere) til alle større arbejder fx ved vi om Santiago de Compostela, at arbejdet påbegyndtes i 1071 af biskop Diego Peláez. Der var 2 kommitterer, én



var administrativ og bestod af 3 klerke, Wicart, kassereren Segered og abbeden Gundesund. På den tekniske side var den ”storslåede mester” Bernard og Robert ansvarlig for murerne, omkring 50 murere i alt.

Vi må antage, at det er fra disse kommitterer, at udviklingen kommer frem til arkitekturen. Men hvad påvirker kirkens ledere? Det er afgørende at forstå et uddannelsesmæssigt skift indenfor kirken, der specielt var knyttet til en radius på ca. 200 kilometer omkring Paris.

Monopolet på uddannelse gik fra at være tilknyttet klosterscholerne til institutioner knyttet til byerne. Det var en bevægelse fra landet til byen, fra det provinsielle til det kosmopolitiske.

Der er flere aspekter af denne udvikling. Et af dem er, at en del af de græske filosofers hovedværker, der var gået tabt i deres originalversion ved branden af biblioteket i Alexandria, havde overlevet i arabiske oversættelser. Nu blev disse værker oversat til latin.

Dette blev startskuddet til det, vi kalder Skolastikken. Skolastikken er en teologisk læreretning. Skolastikkerne forsøgte at skabe en indre logik eller klarhed ved at studere kirkefædrenes afhandlinger, og ved en dialektisk og logisk slutningsmåde at forbedre forståelsen af teologiske temaer.

Den skolastiske metode stod til at begynde med i skarp kontrast til den monastiske metode, som især byggede på erkendelse gennem meditation og kontemplation. Fx var der en meget kendt konflikt mellem Bernhard af Clairvaux og skolastikeren Peder Abelard (fader til begrebet teologi), som endte med at Abelard blev erklæret som kætter. Bernhard var på dette tidspunkt (ca. 1144) måske den mægtigste mand i Europa. Men efter Bernhards død 1153 gik skolastikken sin sejrsgang, og hele vores moderne uddannelsessystem bygger på skolastikkens principper.

De værker, der blev oversat, var værker af Pythagoræerne, Aristoteles, Archimedes og Euclid. Det blev især Aristoteles, der blev kontroversiel. Den parisiske synode i 1210 fordømte Aristoteles’ *Metaphysica* og *Naturalis*, bl.a. på grund af hans påstand om, at verden altid havde eksisteret og var uforanderlig.

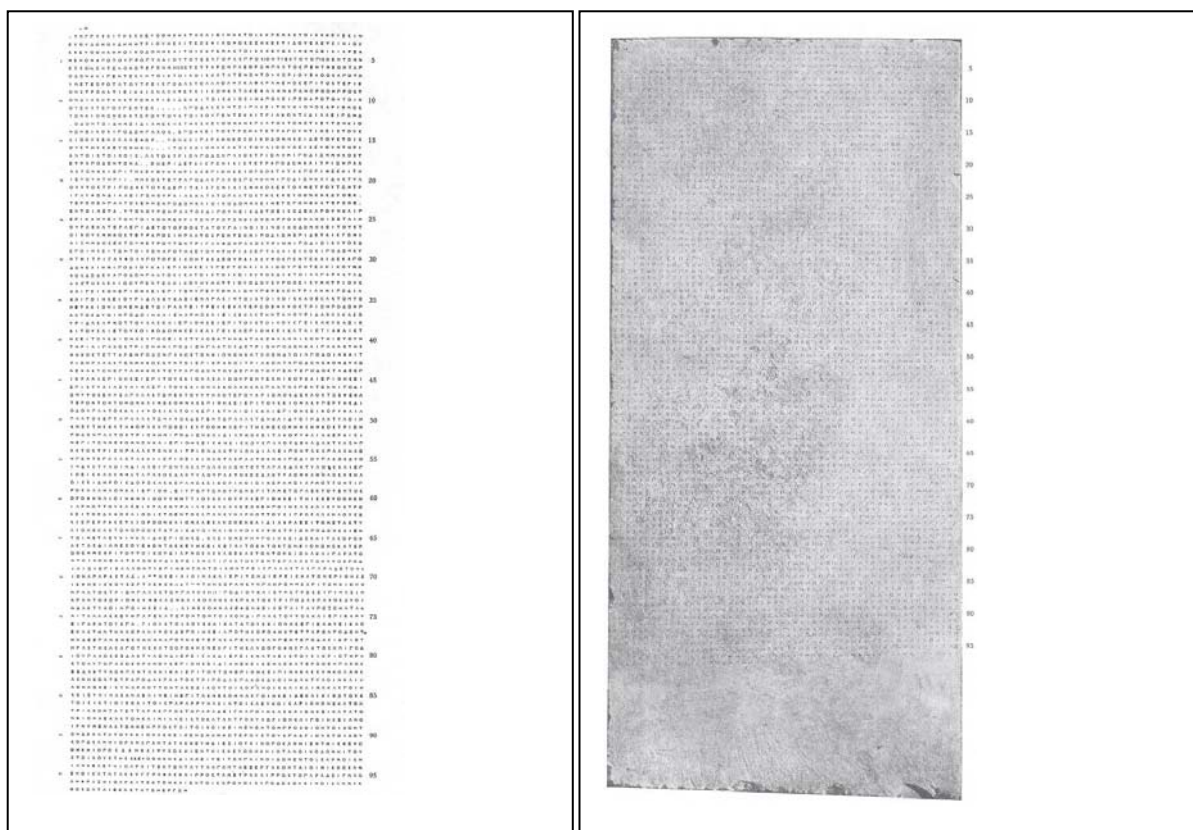
Aristoteles er en svær størrelse i forhold til de græske filosoffer, fordi han forsøger at dække størstedelen af filosofien, men eftertiden har vist, at han dels har misforstået en del af fagfilosofferne og dels har taget fejl i mange af sine betragtninger over naturen.

Han var dog sluppet fri og kunne ikke tilbagekaldes, og skolastikere som Thomas Aquinas argumenterede for, hvordan man kunne komme omkring hans opfattelse af verdens konstans.

Skolastikken blev også startskuddet til nye liturgiske og ikonografiske programmer. I dette forhold skal vi forstå kirkens stilling i samfundet på dette tidspunkt dvs. fra ca. 1150 til 1250. I romersk tid er magten i hovedsagen verdslig, men som allerede nævnt var Kejser Konstantin imponeret over de kristnes evne til at organisere sig. Det er denne organisering, som kulminerer i den gotiske tidsalder.

Det katolske, kirkelige hierarki er meget klart: Faderen, sønnen, helligånden, paven, kardinaler, ærkebiskopper, biskopper, kannikker, abbeder, præster, diakon, subdiakon, akolyt, lektor, munke, lægbrødre og menigheden. En anden hierarkisk opbygning er hele det feudale samfund: konge, adel, borger.

En noget overset, men yderst interessant udvikling gør sig gældende på det lærde område. Det er udformningen af bøger. Før skolastikken var en bog blot en brødtekst. Et eksempel kan være den ældste beskrivelse af en bygningskonstruktion vi kender, nemlig Arsenal inskriptionen fra ca. 340 f. kr. Nedenfor er vist et billede af den originale sten, en afskrift og et udsnit fig. 1.14.



Τ Ω Ι Μ Ε Τ Λ Ξ Υ Κ Ι Ν Κ Λ Ι Δ Α Ε Ρ Ι Θ Η Ξ Ε . Κ Λ Ε Ι Ο Μ Ε Ν Η Ν  
Λ Σ Τ Λ Ξ Δ Ι Λ Μ Ε Σ Ο Υ Ε Φ Ω Ν Τ Λ Ξ Κ Ε Υ Η Κ Ε Ι Σ Ε Τ Λ Ι Τ Ο Ε  
Ω Θ Ε Ν Μ Ε Χ Ρ Ι Τ Ο Υ Τ Ο Ι Χ Ο Υ Δ Ι Α Ρ Μ Ο Σ Λ Ξ Κ Λ Θ Ε Κ Λ Ξ Τ

Fig. 1.14

Som vi kan se, er der ikke nogen opdelinger i teksten, og mellem ordene er der en lodret streg i stedet for et mellemrum. Skolastikkens bøger betød et radikalt brud med denne praksis. I den tidlige middelalder var man begyndt at dele bøger op i kapitler. Kapitlerne repræsenterede ikke nødvendigvis nogen logisk opdeling.

Dette ændrede sig i 1200 tallets begyndelse. Det blev af betydning, at læseren blev ført frem skridt for skridt og hele tiden var underrettet om, hvor langt man var kommet i emnet.

Dette betød ikke, at man tænkte mere logisk eller velordnet end grækerne, men der blev en forpligtigelse på at tydeliggøre den tankemæssige orden. Som Erwin Panofsky skriver i "Gotisk arkitektur og skolastik" Et postulat om klarlægning for klarlægningens egen skyld.

Inden for skolastikken betød dette i stigende grad, at man så bort fra en naturlig opdeling til fordel for en kunstig opdeling og symmetri.

I forordet til sit hovedværk *Summa Theologiae* beklagede Thomas Aquinas sig over, at hans forgængere havde en tilbøjelighed til at "*udvide antallet af unyttige spørgsmål, artikler og argumenter*" og til at fremlægge et sagsområde "*ikke ud fra det pågældende fagområdes egen orden, men ud fra kravene til den litterære fremstilling*".

Denne lidenskab for "klarlægning" bredte sig på grund af skolastikkens uddannelsesmæssige monopol til stort set alle åndspersoner, der var optaget af kulturelle forehavender, og den blev en mental vane, et fælles tankesæt.

De første tre dele af Thomas Aquinas værk er et godt eksempel på denne trang til orden, idet den fremviser et sandt orgie af logik og treenighedssymbolik. Se eksemplet nedenfor fra Erwin Panofkys bog. Afsnittene er angivet med romertal, qu. står for spørgsmål, art. betyder artikulation.

Fig. 1.15.

Den hierarkiske orden blev en tidsånd. Denne tidsånd kom også til at gennemsyre de nye liturgiske og ikonografiske programmer for kirkearkitekturen.

I. Væren (qu. 2-26);

- a. Om guds eksistens (qu. 2);
  - 1. Om klarheden i antagelsen af Hans Eksistens' art (art. 1);
  - 2. Om påviseligheden heraf (art. 2);
  - 3. Om Hans eksistens (art. 3);
- b. Hvordan Han er til eller rettere ikke er til (qu. 3-13);
  - 4. Hvordan Han ikke er (qu. 3-11);
  - 5. Hvordan Han giver sig til kende (qu. 12);
  - 6. Hans navne (qu. 13)
- c. Hans virke (qu. 14-26);
  - 7. Hans viden (qu. 14-18);
  - 8. Hans vilje (qu. 19-24);
  - 9. Hans magt (qu. 25-26);

II. Om de guddommelige personers egenart (qu. 27-43);

- a. Om deres oprindelse (qu. 27);
- b. Om deres relationer (qu. 28);
- c. Om personerne som sådan (qu. 29-43);

III. Om skabelsen (qu. 44 og ud);

- a. Skabelsen af skabningerne (qu. 44-46);
- b. Forskelle mellem skabningerne (qu. 47-102);
- c. Styrelsen af skabningerne (qu. 103 og ud).

Fig. 1.15

Den ensartede takt vi kan se i S. Apollinare Nuovo, må ændres til en rytme, det vil sige en regelmæssig variation. En af de vigtigste nyskabelser til en rytmisering er udviklingen af krydsribbehvælvet. Det anses for at være en normannisk opfindelse. Romerne ville sikkert ikke have brudt sig om de synlige ribber, men for de kristne var symbolikken til gengæld klar.

Et af de tidligste eksempler er Saint Etienne i Caen fig. 1.16, som anses for et af de mest betydningsfulde tidlige normanniske bygværker. Det er Wilhelm erobrers (1027-1087) gravkirke, og skyldes en bod overfor paven på grund af hans giftermål med Matilde af Flandern.

Kirken er påbegyndt ca. 1060, og de høje hvælv i skibet påbegyndtes i 1120. Hvælvene i hovedskibet blev færdige i 1125. Det karakteristiske ved disse meget tidlige krydsribbehvælv er, at de er seksdelte. I sideskibene er de firedelte, og der er dobbelt så mange hvælv som i hovedskibet. Det er det samme system som i Sorø kirke (se kapitel 9). Der er senere tilføjet firedelte hvælv over koret.

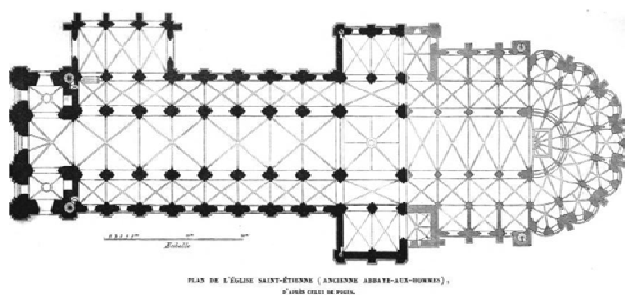
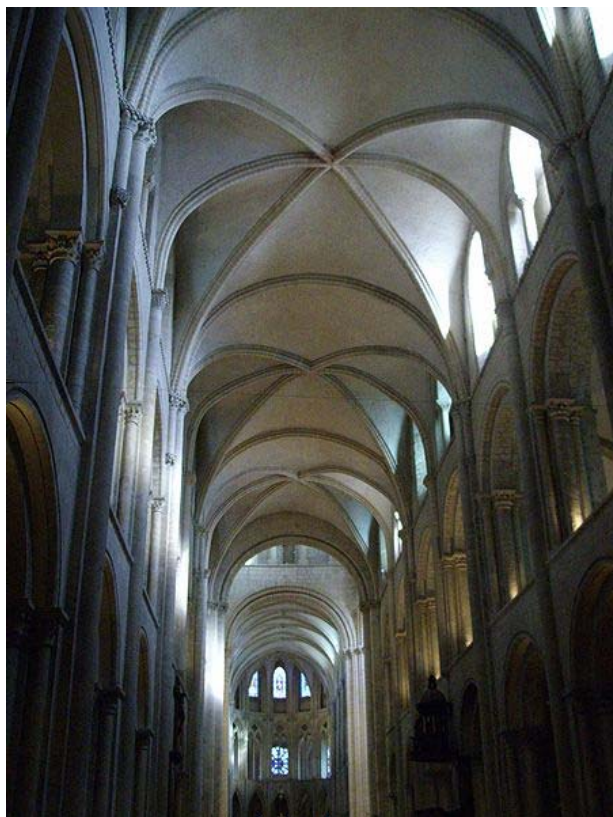


Fig. 1.16 Saint Étienne i Caen, Hvælv i hovedskib og plantegning.

Nu er det muligt at se på udviklingen fra romansk til gotisk kirkearkitektur. Som udgangspunkt kan vi tage afsæt i én af de cisterciensiske moderkirker, Saint Étienne.

Man kan se, at der er tale om en vægarkitektur uden noget fremtrædende hierarki. Over arkaden er "triforium" blot en væg ud for sideskibets tag, herover er der et vindue i klerestriet. Men vi ser, at der i denne romanske kirke allerede her er anvendt gotiske buer.





Fig. 1.17 Pontigny

Kigger vi derimod på de store kendte gotiske hovedværker ser forholdene anderledes ud. Den Gotiske udvikling anses at have sit udgangspunkt i Abbed Sügers Saint Denis i Paris 1144. Herefter bør nævnes 5 katedraler, som blev påbegyndt umiddelbart efter hinanden, hvilket kan ses i udviklingen af deres konstruktionsprincipper og højden på midterskibet. Det drejer sig om

Notre Dame i Paris	(1163 -1345. Skibets højde 34 m)
Chartres	(1194 -1220. Skibets højde 36,55 m)
Bourges	(1195 -1214. Skibets højde 37 m)
Reims	(1212 - ca. 1380. Skibets højde 37,95 m)
Amiens	(1220 - ca. 1266. Skibets højde 43 m)
Beauvais	(1225 -1272. Skibets højde 47 m, verdens højeste).

Der er tale om højdepunktet af murværkskunstens konstruktioner i verden. Amiens er omkring 43 m. Dette giver i det hele taget en større kirke, og det bliver ønskeligt med en større detaljeringsgrad.

Amiens er i øvrigt den højeste fuldt færdiggjorte kirke i verden. Dens indre volumen er ca. 200.000 m<sup>3</sup>. Til sammenligning har Vor Frelzers kirke i København et volumen på 23.000 m<sup>3</sup>.

Hvælvene over koret er almindelige firdelte krydsribbehvælv, og arealet, der udspringes mellem gjordbuer og skjoldbuer, er på 65 m<sup>2</sup>.

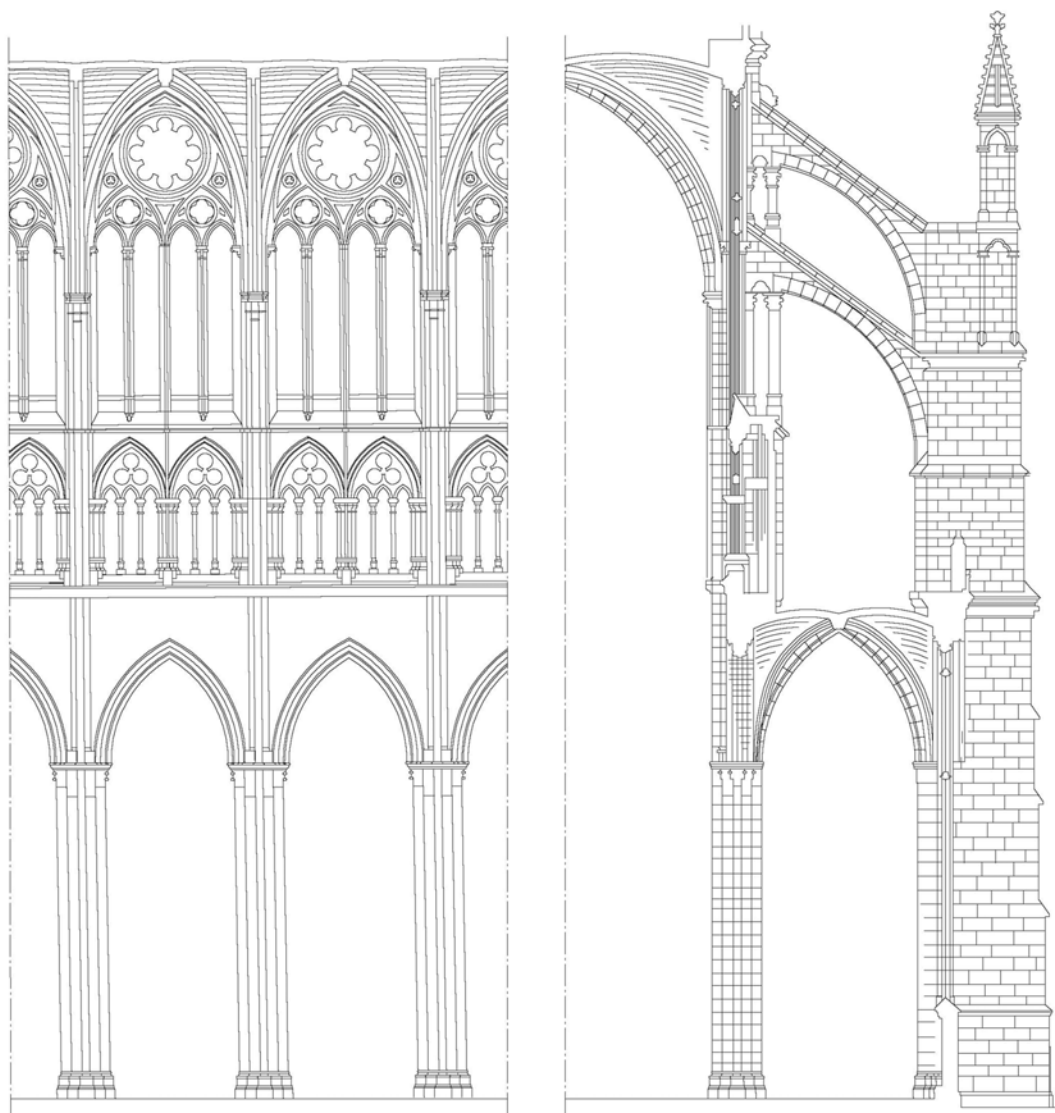


Fig. 1.18 Amiens, opstalt og snit

Amiens er som sagt påbegyndt 1220 og ses på figur 1.18 i opstalt og snit. Der er en del flere underdelinger i fladen, som nu næsten ikke længere er væg, men et hierarki af søjlebundter, søjler og sprosser.

Det hele kulminerer med Beauvais, påbegyndt år 1225 indviet i år 1272, og planlagt til at have et 47 m højt kor og skib. I dette tilfælde var det kun koret, der nåede at blive bygget. Hvælvingerne i koret faldt i øvrigt ned i 1284. Dette skyldes formentlig, at kapperne blev for store.



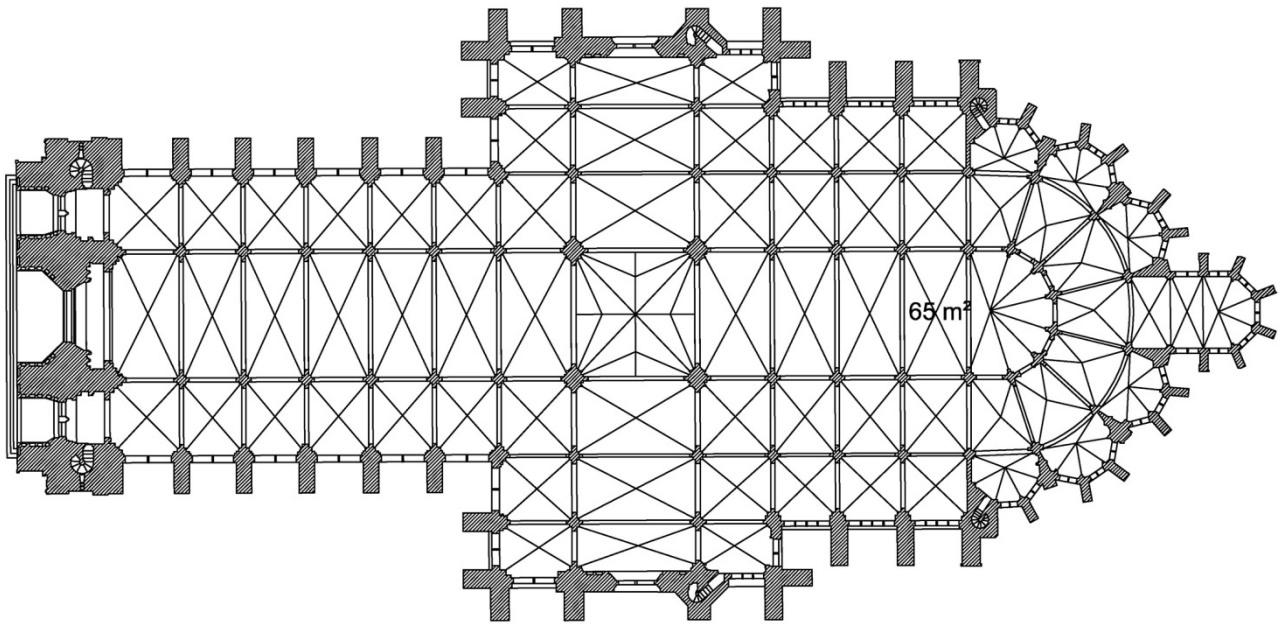


Fig. 1.19 Amiens, plan

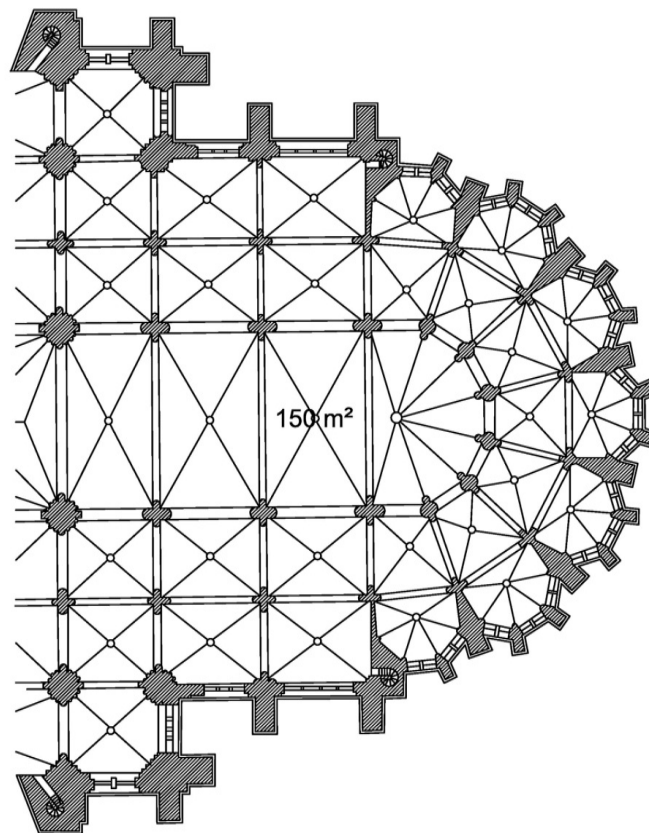


Fig. 1.20 Beauvais, plan (år 1272)



Fig.1.21 Beauvais, koret set indefra og udefra

Et firedelt hvælv i Amiens var på ca.  $65 \text{ m}^2$ , i Beauvais var de  $150 \text{ m}^2$ . Løsningen blev seksdelte hvælv, og der blev derfor introduceret en pille mellem de oprindelige.

Desuden tyder meget på, at svingninger af stræbebuerne har bidraget til revnedannelser i hvælvne. Derfor blev der udført smedjærnsforbindelser mellem stræbebuerne top. Disse blev af æstetiske grunde fjernet fra 1950 til 1980, fordi man havde glemt deres betydning. Men dette betød, at svingningerne kom igen og gav store revnedannelser. Disse forbindelser genskabte man omkring 1990, men denne gang i stålforbindelser, som er stivere end smedjærnsforbindelserne, og med nye problemer til følge.

Når man ser Beauvais indvendigt i dag er der midlertidige træafstivninger mellem arkadesøjlerne en del steder. Buen har tydeligvis været spændt for hårdt.

De franske, gotiske kirker som Notre Dame i Paris, Chartres, Bourges, Reims, Amiens, Beauvais, og der kan tilføjes Domkirken i Köln, som også blev startet af en fransk arkitekt, repræsenterer kulminationen af gotikken, det vi kalder højgotikken.

Som tidligere nævnt hed det ikke gotik i samtiden. Det er et slags skældsord, som blev hæftet på stilen i senrenæssancen. Byggestilen blev beskyldt for at være barbarisk ligesom goterne. Det er naturligvis meget uretfærdigt, da der netop er tale om en uhørt forfinet forståelse for stenbygningernes muligheder.

I samtiden mener kunsthistorikere som fx Poul Frankl, at stilen oftest blev kaldt for ribbestil, hvilket er en ret logisk benævnelse. Det giver også en klarere association til sengotikken. Denne afklingning af gotikken ses især i England, hvor ribberne i hvælvene antager helt ekstreme former.

## 2. Danske kirkebygningstyper

Arketypen blandt de almindelige danske kirker er den enskibede kirke bestående af skib, kor og evt. apsis. Skibet er stedet for menigheden, koret er der, hvor alteret er placeret. Hvis der er et apsis, er den oprindelige funktion det sted, hvor den kirkelige øvrighed som biskopper og præster holdt til.

De tidligste kirker var trækirker: Det ved vi fra arkæologiske fund, som fx udgravningerne i Hørning kirke. Der er på Moesgård ved Århus bygget en rekonstruktion af Hørning trækirke.



Fig. 2.1 Rekonstruktion af Hørning trækirke

Den har et kor, som er ret lille som et mindre romersk tempel og et skib, der er noget større, dog ikke helt så stort som en romersk basilika. Kirken er i alt på kun ca. 38 m<sup>2</sup>.

Der er nogen usikkerhed omkring, hvordan trækirkerne har været konstrueret. Men udgravninger tyder på, at der i nogle tilfælde har været anvendt jordgravede stolper. Dette har betydet, at trækirkerne ikke har haft lang levetid. Formodentlig ikke mere end 20-30 år.

De første stenkirker har haft en tilsvarende udformning. Et tidligt eksempel på en stenudgave af sådan en kirke fra England er Bradford on Avon fra ca. 700.



Fig. 2.2 Bradford on Avon

Fra kristendommens indføring under Harald Blåtand omkring 966 til Svend Estridsens død omkring 1074 antages kirkerne at have været trækirker. De ældste stenkirker anses at være fra 1075-85.

Vi har omkring 1770 middelalderkirker. Disse er alle stenkirker. De kan opdeles efter forskellige principper. I den efterfølgende fremstilling gennemgås de i nedenstående orden.

1. Romanske landsbykirker.
2. Gotiske landsbykirker.
3. De tidlige større teglstenskirker.

De første af disse kirker har været opført af de tilgængelige natursten som kildekalk, kalksten, kampesten og tuf.

### **Romanske landsbykirker**

Vores ældste stenkirker er bygget af frådsten (kildekalk). I Jylland drejer det sig om ca. 60 kirker i området fra Randers og ned til Grejsdalen. På Sjælland om en række kirker omkring Isefjorden og Roskilde fjord. Der kan fx nævnes Sonnerup kirke fra lidt før 1150. Svend Nordmanns kloster, hvor Roskilde domkirke nu ligger, var ligeledes af frådsten. Frådstenen er let at bearbejde og dette har muliggjort en større detaljering end fx kampesten.

Kridtsten (limsten) har været anvendt på Østsjælland især i et område fra Søllerød og ned til Falster. Det er et meget karakteristisk materiale, som dels er brugt til hele kirkebygninger og dels er brugt dekorativt sammen med tegl.

I Jylland er der et område fra Grenå og ind til Randers, hvor kridtsten også har været anvendt. Der er i hovedsagen tale om rullestenskalk, som isen har ført med sig fra saltholmkalken.

Af kalk må også Faksekalken (Fakse marmor) nævnes. Den har været anvendt i et antal kirker, der strækker sig fra Fakse og over mod Sorø.

Endelig må materialet tuf nævnes. Det er anvendt til omkring 30 kirker i et område fra Ringkøbing fjord og ned til Brede å syd for Brøns. Blandt tufstenskirkerne kan bl.a. nævnes den skønne Billum kirke som karakteristisk for denne type.





Fig. 2.3 Billum kirke

Det stenbyggemateriale der har været lettest tilgængeligt er kampesten, som istiden har bragt med sig og efterladt overalt i landet. Af vores ca. 1770 middelalderkirker er ca. 1250 opført i dette materiale.



Fig. 2.4 Rakkeby kirke

En del regionale forskelle gør sig gældende med hensyn til det tilgængelige materiale og med hensyn til den håndværksmæssige bearbejdning af stenene. I Jylland er kampesten klart dominerende. Ca. 90 % af kampestenskirkerne er i tilhugne kvadre. Der kan fx nævnes: Rakkeby kirke, Morsø, Sønder Herred,

Dragstrup kirke, Morsø, Nørre Herred og naturligvis vores og Nordens største



Fig. 2.5 Dragstrup kirke



Fig. 2.6 Vestervig kirke

landsbykirke Vestervig kirke ved Thisted.

Der er stadig en del eksempler på denne type kirker i deres oprindelige form især i det nordjyske område, hvor de fattige kår i sen middelalderen har betydet, at der ikke er foretaget omfattende om- eller udbygninger.

På Nordfyn er kamp ligeledes dominerende, men ikke på Sydfyn. Derimod er der en del på de sydfynske øer.



På Sjælland er kamp særlig udbredt mod vest og lidt i Nordsjælland. Der er i hovedsagen anvendt sten, der ikke er bearbejdet så fint som i Jylland. Der er i hovedsagen tale om kløvet kamp, dvs. de har én rimelig jævn flade, der vender udad.

Det storslåede eksempel er Tveje Merløse kirke ved Holbæk, hvor kor, apsis,



Fig. 2.7 Tveje Merløse kirke

tårne og store dele af skibet er af denne type. Der er også dele af skibet, der er af frådsten.

Teglstenskirkerne kan til dels anvendes til at datere naturstenskirkerne sådan at forstå, at efter teglet er indført, bliver det hurtigt det foretrukne materiale. Dvs. at naturstenskirkerne er fra før ca. 1152.

Af Jyllands ca. 900 romanske kirker er kun 26 af tegl. 10 af dem er samlet i Vendsyssel og er beslægtet med tufstenskirkerne på Ribegnen, som de har været knyttet til via kirkelige forbindelser.

Af Lolland-Falster og Møns ca. 85 romanske kirker er omkring 75 af tegl. Dette skyldes formentlig, at kirkebyggeriet kom senere i gang i dette område. Som følge af vendernes hærgen.



Som eksempel på en romansk kirke i munkesten kan nævnes Herritslev kirke. Den er i dag rødkalket (lyserød), men man fornemmer tydeligt stenene igennem den kalkede overflade.



Fig. 2.8 Herritslev kirke

På Sjælland er omkring 75 romanske kirker bygget af tegl fra starten. Et særligt skønt eksempel er den lille Uvelse kirke.



Fig. 2.9 Uvelse kirke

### Gotiske landsbykirker

Den gotiske stil er karakteriseret ved krydsribbehvælv, spidsbuen i vinduer, døre, gjordbuer og skjoldbuer og desuden de udvendige stræbepiller til at holde på hvælvets udadskydende virkning. Fra omkring 1400 er også kamtakkerne (trappegavle) et karakteristisk træk for perioden.

For bygningens overordnede disposition er det karakteristisk, at skib og kor er lige brede og lige høje. Bygningerne er generelt lidt højere end de romanske, og tagene er generelt lidt stejlere.

Vi har relativt få gotiske kirker, der er bygget som sådan fra starten - vel kun omkring 125. Gotikken er i hovedsagen ombygninger af romanske kirker eller tilbygninger.

Et eksempel på en kirke, der er bygget som gotisk fra begyndelsen er Nørre Vedby kirke på Nordfalster.



Fig. 2.10 Nørre Vedby kirke

Til at begynde med har der været en tilknytning mellem adelen og kirken, idet adelen i en del tilfælde har bekostet kirkebyggeriet. Det har også i hovedsagen været en begrænset ”menighed”, der har benyttet kirken.

Præsterne har efterhånden lykkedes med at omvende folket i bred forstand, det man kalder den pastorale udbredelse. Dette har betydet, at der ved beskatning



(tiende) har kunnet bygges flere kirker, ligesom det har været nødvendigt at udvide de eksisterende.

Da den pastorale indflydelse betød, at store dele af det almindelige folk begyndte at gå i kirke, var man reelt kommet ind i den gotiske periode, og kirkerne blev forlænget, forhøjet, fik tårn og våbenhus og efterhånden også sakristi og kapel.

Et eksempel på denne udvikling kan være den oprindeligt romanske kampestenkirke i Farum i Nordsjælland, som efterfølgende har fået en vestforlængelse, hvælv, tårn og våbenhus i tegl.

I forbindelse med forhøjelsen blev der indbygget hvælv, og tagværkerne blev



Fig. 2.11 Farum kirke

ofte genbrugt, men nu uden de bindbjælker, der udgjorde loftet i de romanske kirker. Heri ligger i øvrigt kimen til mange af de problemer, man har med facademure, der er ude af lod. De er simpelthen skubbet ud foroven af taget nok så meget som af hvælvene.

### **De tidlige større teglstenskirker**

Den almindelige antagelse er, at de første teglstenskirker har deres forbillede i klosterkirkerne i Esrom, Ringsted og Sorø. Disse er Cistercienser- og Benediktinerklosterkirker.

Der er historiske kilder, der godtgør, at cistercienserabbeden Bernhard af Clairveaux og ærkebiskop Eskild af Lund har mødt hinanden måske endda 2 gange, men i hvert fald i 1152.

Esrom får privilegiebrev af Pave Eugenius d. 3 den 29. december 1151. Det må antages, at byggeriet af Esrom kloster påbegyndes umiddelbart herefter. Der er ikke ret meget tilbage af Esrom kloster. Det er nedrevet efter reformationen og i vid udstrækning brugt af Chr. 4. til at bygge det nye Frederiksborg slot. Men arkæologiske udgravninger viser dog tydeligt et kampestensfundament med teglsten ovenpå.

Vi ved ikke så meget om, hvordan Esrom kloster har set ud, udover at man kender grundplanens udstrækning rimeligt godt. Der er tale om et meget stort kloster og en meget ambitiøs kirke, som i omfang skulle have været som Århus Domkirke.

Men vi kender alligevel lidt til kirkens udseende på grund af den praksis, at munkene skulle anlægge et nyt kloster, der var magen til det, de kom fra. Derfor må vi antage, at Esrom har lignet Sorø klosterkirke. Esrom var knyttet til klosteret i Clairveaux, men dette var bygget i natursten, og det har vi ikke meget af i Danmark. Derfor er det nærliggende at vende blikket mod cistercienser teglkirkerne i Lombardiet.

Valdemar den Store (1131-1182) blev konge i 1157, og han gjorde Absalon (1128-1201) til biskop i 1158. Det må være kort tid herefter, at Valdemar påbegynder Skt. Bendts kirke i Ringsted. Den var oprindeligt en del af et kloster, hvis øvrige længer er nedrevet efter reformationen.



Fig. 2.12 Sankt Bendts kirke Ringsted





Fig. 2.13 Skt. Bendts kirke, interiør

Kirken er i sit eksteriør en romansk kirke. Det er den til dels også i sit interiør, men her ses senere indbyggede gotiske gjordbuer og krydsribbehvælv.

Sorø kloster grundlagdes af Absalon den 13. juni 1161. Det er et cistercienser kloster som afløser et Benediktinerkloster, der var i nedgang. Ringsted blev derimod anlagt som Benediktinerkloster.

Sorø og Ringsted er forbilleder for en lang række af de store købstadskirker, og nu er det dominerende byggemateriale tegl. Til at begynde med er der tale om romanske kirker med fladt bjælkeloft. Det er først senere i gotisk tid, at der er indbygget hvælv i Sorø (efter 1247) og Ringsted (1241-1268 senere ommuret).

I Roskilde erstattes Svend Normands frådstenskloster omkring år 1200 af den nuværende Roskilde Domkirke. Til at begynde med er denne tænkt som det, vi i dag kalder en gotisk kirke. I datiden har den ikke været kaldt dette. Internationalt især i Frankrig har man kaldt stilen for ribbestil. Den er også kaldt spidsbuestil.

At der er tale om en ribbestil ses af, at alle ribber fra hvælvets krydsribber, gjordbuer, skjoldbuer og arkadebuer både i midterskibet og sideskibene er ført helt til terræn som i den franske højgotik.



Der har på dette tidlige tidspunkt været tale om en betydelig blanding af rundbue- og spidsbuestil. Det kan man fx se på koret med rundbuevinduerne. Ser man på toppen af tårnet er vinduerne derimod spidsbuede. Også i den indvendige arkitektur kan man se, at der i arkaderne mellem hovedskib og sideskibe er spidsbuer for neden, mens der er rundbuevinduer for oven.

De første hvælv i sideskibe og kor er romanske, men da man når til midterskibet, er der tale om gotiske ribbehvælv. Disse er samtidige med hvælvene i Sorø og Ringsted. Disse tre kirker er de første ambitiøse tiltag til at overhvelve, og hvælvkapperne er én sten tykke, og der er tale om en munkesten, dvs. 260-300 mm.

Nedenfor ses Roskilde Domkirkes midterskib set mod øst.



Fig. 2.14 Roskilde domkirke

I de mindre landsbykirker er hvælvkapperne sædvanligvis kun  $\frac{1}{2}$  sten tykke.

I mange af købstæderne er der 3-skibskirker med Sorø, Ringsted og Roskilde som forbilleder. Der kan nævnes: Århus domkirke og de noget yngre Maribo domkirke, Sankt Olai i Helsingør, Sankt Knud i Odense og en del flere.

## 3. Materialer

Dette kapitel omfatter de materialer, der oftest anvendes i forbindelse med re-staurering af middelalderkirkers murværk.

### 3.1 Byggesten

#### Mursten fremstillet af tegl

Mursten af tegl fremstilles af en bearbejdet lerblanding og brændes ved 900-1000 °C.

De leveres som massive sten i farverne rød, gul, brun, rosé, sort, blådæmpet og i forskellige farvenuancer.

De mest anvendte massive teglsten er fremstillet som blødstrogne sten.

I gammelt murværk er anvendt teglsten, som er håndstrøgne i forskellige for-mater som munkesten, flensborgsten og dansk normalformat.

Sten i dansk normalformat har størrelsen 55×108×228 mm.

#### Munkesten

Munkesten har gerne størrelsen 80×135×288 mm til 90×140×300 mm. De er altid massive, og længden svarer til to gange bredden + en fuge på 10-20 mm.

Munkesten er vanskelige at tørre og brænde, og de anvendes derfor kun til sær-lige bygværker, som man ønsker at give et gammeldags præg. De bør være håndstrøgne og kulbrændte. Og det er ønskeligt at de har en betydelig farve-



Fig. 3.1 Renoveret murværk i munkesten

mæssig variation. Desuden vil der ofte være forskellige formater i samme mur-værk. Dette skal der tages hensyn til ved bestilling af reparationssten.

Et typisk format kunne være:

- munkesten I    85×135×285 eller
- munkesten II    90×135×285

Flensborgsten er mursten med en særlig stor længde i forhold til tykkelsen. Me-dens sten i normalformat har en længde, der er 4 gange tykkelsen, er flensborg-

sten ca. 5 gange så lange, som de er tykke. De kan være helt ned til 3 cm i tykkelsen, men som regel er tykkelsen omkring 4 cm.

De flensborgsten, der er anvendt i nyere tid, har målene 40×108×228 mm, og de fremstilles nu normalt som blødstøgne facadesten.

I murværk med flensborgsten medgår der normalt 4 skifter pr. 20 cm i højden, medens der i murværk med mursten i dansk normalformat medgår 3 skifter pr. 20 cm.

Herudover fremstilles der mange typer formsten som standardvarer, og sten i andre formater kan normalt fremstilles på bestilling.

Teglmurstens trykstyrke kan variere fra 7 MPa til ca. 50 MPa, men de fleste stens trykstyrke er 10-30 MPa.

Minutsugning er for de fleste sten 1,5-3 kg/m<sup>2</sup> pr. minut.

Vandoptagelsen efter 2 døgn vandlagring er for de fleste sten 20-30 rum %.

## Natursten

### Granitsten

Granit er en eruptiv bjergart bestående af feldspat, kvarts, glimmer eller horn-



Fig. 3.2 Murværk af granitsten i kirke i Vendsyssel

blende. Den forekommer i mange farver og vejer ca. 2700 kg/m<sup>3</sup>. Den er meget slidstærk og bruges til fremstilling af brosten, trappesten, hussokler og bærende søjler mm, samt til udsmykning.

Granit findes i store mængder i Nordeuropa, hvoraf den skandinaviske regnes for den bedste. I Danmark har vi kun den bornholmske granit.

### Sandsten

Sandsten er en sedimentær bjergart, der består af kvartskorn, der er sammenkittede med et bindemiddel, kisel, kalk eller ler. Desuden kan der findes jernforbindelser i bindemidlet, i så fald vil stenen farves gul eller rød. Sandsten er mere eller mindre lagdelt. Kisel er langt det stærkeste bindemiddel, og sandsten, der anvendes herhjemme, er alle kiselsandsten.

Neksøsten er den eneste danske sandsten der anvendes til bygningssten. Fra Sverige importeredes gotlandsk sandsten.

Fra Tyskland er importeret Obernkirchener sandsten (Bremer sandsten) den er kiselbundet og finkornet. Desuden er der Cotta sandsten fra Dresden ligeledes kiselbundet og finkornet og Posta sandsten også fra Dresden. Posta sandsten er også kiselbundet men mere grovkornet, blødere at tildanne og dermed egnet til figurhugning, men tager let mod snavs.



Fig. 3.3 Nyrenoveret sandstensmurværk

### Kalksten

Kalksten består af calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) og er en meget almindeligt forekommende sten i naturen.

Kalksten er dannet af havdyrs skaller, der ved vands sivning gennem jorden er blevet kittet sammen til en mere eller mindre porøs sten. Kalksten er i ren tilstand hvid og anvendes til bygningssten og efter brænding til mørtler. Kalkens hårdhed er meget forskellig. Den kan være blød som skrivekridt og hård som marmor. I Danmark består hele undergrunden så at sige af kalk- eller kridtdannelser, men kun de hårdeste sten er egnet til byggesten.

En almindeligt forekommende kalksten er Ølandskalksten og Travertin.



Fig. 3.4 Afrensede ca. 100 år gamle kalkstensplader på ydervæg

### Frådsten

Frådsten, også kaldet kildekalk, er en kalkdannelse, der afsættes, hvor kalk og kulsyreholdigt vand træder frem fra undergrunden som kilder. Vore allerældste stenkirker er bygget af frådsten, og i alt findes der ikke mindre end 103 middelalderlige frådstenskirker.



### Tuf

Tuf er en lys bjergart, hovedsageligt sammensat af hærdet vulkansk aske og støv. Tuf er importeret i større mængder fra Nordtyskland og især anvendt i sydvestjyske kirker.

### Kridtsten

Kridtsten eller limsten (lim betyder kalk) er hvide som skrivekridt, men smitter dog ikke af. Den er porøs, men porerne er store og jævnt fordelte. Den ødelægges derfor ikke af frost og har vist sig meget vejrbestandig. Den findes især ved Stevns og omkring Limfjorden samt ved Bolbjerg, men er kun blevet brudt ved Stevns Klint. Da lagene er afbrudt af flintestenslag, fås den almindeligvis ikke i store blokke, men skæres ud i et format noget større end munkesten. I brudfugtig stand er den nemlig så blød, at den kan behandles med snedkerværktøj.



Fig. 3.5 Murværk af kridtsten. Som det ses er kridtsten bløde, så de kan ridses.

Bruddet ved Stevns er lukket for mange år siden på grund af fredning.

### Marmor

Alle kalksten, der kan poleres, kaldes marmor, selv om kun de krystallinsk kornede er egentlige marmorarter. Marmor findes i mangfoldige farver, og som regel er farverne blandet med hinanden i årer, pletter og flammer (marmoreret).

## **3.2 Bindemidler**

Betegnelsen kalk omfatter i daglig tale en række produkter, der leveres i forskellig form og kan have forskellig kemisk sammensætning, men alle er de fremstillet af kalksten som udgangsmateriale.

Denne kalksten består i hovedsagen af calciumkarbonat -  $\text{CaCO}_3$ . Ved høj temperatur afgiver kalken -  $\text{CO}_2$  - og den omdannes til calciumoxid -  $\text{CaO}$ . Dette kaldes i daglig tale brændt kalk eller ulæsket kalk.

Sættes der vand til den brændte kalk, læskes den, idet calciumoxid omdannes til calciumhydroxid -  $\text{Ca(OH)}_2$  - hvilket sker ved kraftig varmeudvikling.



### **Kulekalk**

Vådlæsket kalk eller kulekalk er calciumhydroxid i dejform fremkommet ved læskning af brændt kalk med overskud af vand. Den fremstilles af såvel stykkalk som pulveriseret stykkalk (pulverkalk), der ved læskningen omdannes til slam. Denne slam ledes over i åbne siloer eller i et hul i jorden - kuler - hvor en del af overskudsvandet udskilles eller siver bort samtidig med, at der sker en bundfældning og en efterlæskning. Kalkslammen ændres derved til en ret stiv pasta, som kaldes kulekalk eller hvidtekalk.

Den vådlæskede kalks densitet varierer naturligvis med vandindholdet, som altid er stort. Den ligger oftest omkring  $1300 \text{ kg/m}^3$ .

100 kg stykkalk eller pulverkalk regnes at give omtrent  $\frac{1}{4} \text{ m}^3$  vådlæsket kalk eller ca. 120 kg calciumhydroxid.

### **Jordlæsket kalk**

Jordlæsket kalk er calciumhydroxid i dejform fremkommet ved at brændt kalk lægges i en kule, hvorefter der lægges jord over. Herefter vil vand langsomt trænge ind i kulen og læske kalken. Den skal erfaringsmæssigt lagres i ca. 5 år. Det er en tradition, som stadig findes på Gotland, men det tyder på, at den har været meget udbredt i middelalderen. Fordelen ved metoden er, at den læskede kalk ikke indeholder nær så meget vand. Når den hærder og tørrer bliver den ikke nær så porøs som en vådlæsket kulekalksmørtel.

### **Hydraulisk kalk**

Fremstilles ved brænding af kalksten, der er lerholdige. Dette medfører, at mørtler med sådan kalk kan hærde uden tilgang af luft, men ved reaktion med vand. For at denne egenskab ikke skal forsvinde, må den brændte hydrauliske kalk kun tørlæses.

Denne type kalk vejer ofte ca.  $900 \text{ kg/m}^3$ , dog kan der være store variationer.

Der er ligeledes store variationer i hydraulisk kalks hydrauliske egenskaber afhængig af grundmaterialernes sammensætning og brændingstemperaturen.

Der findes ingen danske normer gældende for hydraulisk kalk, men der findes udenlandske normer herunder tyske DIN-normer.

### **Hydratkalk**

Hydratkalk er brændt kalk, der læsket med kun så meget vand som der behøver til at omdanne  $\text{CaO}$  til  $\text{CaCO}_3$ . Herved dannes der et pulver, som kan blandes med sand til en tørmørtel. Denne skal der tilsættes vand inden brug.

Den stampede kalk leveres også i spande som er tilsat ekstra vand og stampet eller dobbelt stampet. Den dobbeltstampede kalk brugtes tidligere til kalkning idet den først blev sat til opblødning i nogle dage inden brug.

### 3.3 Tilslagsmaterialer

#### Sand

Sand er betegnelsen for runde eller kantede stenkorn, hvis diameter er i området 0-4 mm.

Stenkornene er pulveriserede bjergarter, hovedsagelig kvarts, feldspat og glimmer.

I Danmark er der i bakkesand som regel iblandet kalkkorn fra undergrunden.

Sandet er gråligt, gulligt eller hvidligt.

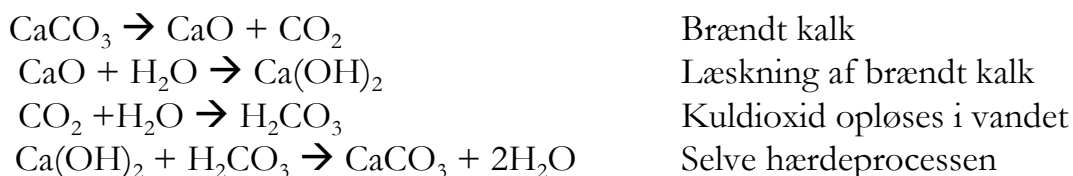
Der skelnes mellem bakkesand, der normalt er lerholdigt og gulligt og søsand/strandsand, der normalt er hvidgråt.

### 3.4 Mørtler

#### Kalkmørtel

Er mørtel med kalk som eneste bindemiddel, og hærdeningen kræver derfor, at der kan komme luft til, idet kalken hærdner ved at optage kuldioxid fra luften. Hærdeningen indledes med en udtørring, som gør mørtlen stivere og mere åben for luft. Først når vandindholdet er blevet tilstrækkeligt lille, og antallet af åbne porer tilstrækkeligt stort, begynder karboniseringen - den egentlige hærdening. Det dannede kalciumkarbonat udskilles som små krystaller på overfladen af sandskorn og uopløselige kalkhydratpartikler. Derved opnår mørtelmassen sin styrke. Atmosfærisk luft indeholder imidlertid kun meget små mængder af kuldioxid (ca. 0,03 %), og for at virke karbonatiserende skal kuldioxidet endda være opløst i mørtelvandet. Hærdeningen foregår derfor langsomt og i øvrigt kun, når mørtlens vandindhold ligger indenfor temmelig snævre grænser. Det skal helst ligge mellem 0,5 og 6 vægt %, og er mørtlen helt tør eller vandmættet, hærdner den ikke. Grænserne 0,5 og 6 vægt % svarer til mørtlens ligevægtsvandindhold i luft med en relativ fugtighed på omkring 50 og 80 %. Det gunstigste synes at være en fugtighedsgrad på 65-75 %.

Processen kan i princippet skrives på følgende måde.



Mørtlen får den største styrke, når karbonatiseringen foregår så hurtigt som muligt og indledes så tidligt som muligt. Der kan gå flere år, før kalken er gennemkarbonatiseret i en ydervæg.

Om blandingsforholdene skriver Vitruvius:

*"Når kalken er læsket, skal man blande den med sandet i følgende proportioner. Man tager 3 dele bakkesand til 1 del kalk, og hvis man har flod- eller havsand, 2 dele til 1 del kalk. Dette er de rette proportioner til blandingen. Den bliver endnu bedre, hvis man til hav- eller flodsandet tilsætter en tredjedel brændt tegl, som man har knust og siet".*

Den mest anvendte blanding har altså i over 2000 år været:

- 1 del kulekalk
- 3 dele bakkesand

### **Vådlæsket kulekalksmørtel**

Ovennævnte blandingsforhold vil give et kalkindhold på ca. 12 % og efter hærdet vægtforhold angives blandingen til K/Sa 100/750 (100 vægtdele tør kalkhydrat og 750 vægtdele tørt sand).

Det viser sig dog at visse middelaldermørtler har et meget større kalkindhold 30-40 % har man fundet. Så høje kalkprocenter kan sædvanligvis ikke opnås med vådlæsket kulekalk uden betydelige revnedannelser og porøsiteter.

### **Jordlæsket mørtel**

Kan udføres efter blandingsforholdet 1:3, Men kemiske analyser peger på, at der har været anvendt blandinger som snarere er 1:1. Dette vil give et kalkindhold på ca. 30 %, og efter hærdet vægtforhold angives blandingen til K/Sa 100/230 (100 vægtdele tør kalkhydrat og 230 vægtdele tørt sand). Vægtforholdet er noget usikkert, idet vandindholdet i kalken sædvanligvis ikke kan angives meget præcist.

Mørtler af denne type kan være noget stride at arbejde med, hvis ikke de aktiveres inden brug. Man siger, at de er tixotrope, dvs. de bliver stive, når de er i hvile, men flydende når de aktiveres. Stivheden stammer fra, at de læskede kalkkorn ved stilstand glider ind i hinanden og låser strukturen ved hjælp af forskydningspændinger, og det er disse forskydningspændinger, der brydes ved aktiveringen.

Fænomenet kendes også fra menneskets ledvæsker, som ligeledes er tixotrope. Når man har siddet længe stivner ledvæskerne, mens de bliver letflydende når man begynder at bevæge sig. Det er også derfor, at man også vrider sig, når man strækker sig, idet vridning i et medie giver ren forskydning.

I gamle dage foregik denne aktivering af mørtlen med et plejlignende instrument, som man slog i mørtlen med. Dette er muligvis oprindelsen til betegnelsen en kalkslager. I dag anvender man et piskeris på en boremaskine eller lignende.

### **Læskemørtel**

Hertil laves fremstilles en mørtel efter en anden tradition, hvor den brændte kalk blandes med sandet i forholdet 1:3, og derefter kommer der vand i blandingen. Herved læses kalken direkte i mørtlen under kraftig varmeudvikling. Efter mørtlen er kølet af, bør den lagres måske et par måneder inden brug.

Der gælder desuden, at der bør bruges relativt groft sand, som er rent kvarts ellers sker der en tidlig delvis hydraulisk afbinding med urenheder i sandet som fx ler. Dette gør mørtlen uegnet til lagring. Hvis man bruger lettere lerholdigt sand, bør mørtlen bruges mens den er under afkøling.

Efter hærdet vægtforhold angives blandingen til K/Sa 100/250 (100 vægtdele tør kalkhydrat og 250 vægtdele tørt sand). Dette svarer til 29 % kalkindhold.

### Hydraulisk kalkmørtel

Fremstilles af kulekalk eller hydratkalk, hydraulisk kalk og sand eller alene af hydraulisk kalk og sand.

De mest anvendte blandinger er:

- K/K<sub>h</sub>/Sa 35/65/500  
(efter rumfang ca. 1 del kulekalk, 1½ del hydraulisk kalk og 6 dele sand)
- K/K<sub>h</sub>/Sa 20/80/475  
(efter rumfang ca. 1 del kulekalk, 3 dele hydraulisk kalk og 9 dele sand)
- K<sub>h</sub>/Sa 100/400  
(efter rumfang ca. 1 del hydraulisk kalk og 2 dele sand).

De anførte blandingsforhold angiver blandingen som hærdet vægtforhold.

K står for kalkhydrat - kulekalk eller hydratkalk.

K<sub>h</sub> står for hydraulisk kalk.

Sa står for Bakkesand.

## 3.5 Bestemmelse af styrkeparametre

Såfremt der ikke foretages nogen form for materialeteknologiske undersøgelser, kan den regningsmæssige trykstyrke for intakt murværk normalt sættes til:

$$f_d = 1,0 \text{ MPa}$$

Ved intakt murværk forstås her murværk, hvor byggesten og specielt mørtelfuger ikke i nævneværdig grad er forvitret. Såfremt fugen er forvitret i en betragtelig dybde og område, må disse kortlægges, og konstruktionen skal i disse områder regnes som havende et reduceret tværsnit.

Forholdene omkring friktionskoefficienten er tillige beskrevet i kapitel 7.6, hvor følgende er angivet:

$$\mu_d = 0,46$$

Andre styrkeparametre er kun yderst sjældent relevante og berøres ikke her.

Trykstyrken af murværk.

Såfremt det i forbindelse med projekteringen viser sig nødvendigt med en højere trykstyrke for det aktuelle murværk, kan denne bestemmes. Ofte vil den reg-

ningsmæssige trykstyrke være højere end 1,0 MPa, idet værdien i sagens natur er konservativt ansat.

Bestemmelse af trykstyrken i ældre murværk kan foretages efter flere principper, som beskrives nedenfor.

For begge metoder gælder, at de udtagne prøver skal være repræsentative for det område, hvor styrken af murværket ønskes bestemt.

Normalt er det styrkerne langs yderkanten af facaden og/eller den indvendige væg, der er relevant, idet den kritiske situation er en tryklinie tæt på kanten af konstruktionen, hvor en væsentlig lodret kraft skal overføres i en relativ lille trykzone. Det kan således være for konservativt at bestemme trykstyrken af murværket langs facaden (hvor den ofte er størst) og længere inde i konstruktionen, og derefter bestemme en fælles gennemsnitlig trykstyrke. Ofte vil den mest korrekte fremgangsmåde være at skelne mellem de 2 værdier.

Der er i princippet to metoder:

Udtagning og trykprøvning af hele stykker murværk.

Beregning ud fra trykstyrken af byggesten og mørtel.

### **Prøvning i laboratoriet af udtagne hele stykker murværk**

Der udtages hele stykker murværk (byggesten og mørtelfuge) som fragtes samspændt til relevant laboratorium, hvor der foretages en trykprøvning ud fra den standardiserede metode (EN 1052-1).

Metoden giver som princip de aktuelle værdier direkte, men er tidkrævende og kostbar at udføre. Det er desuden ofte vanskeligt at udtage de nødvendige murstykker og fragte dem i hel tilstand til laboratoriet. Metodens omstændelighed vil ofte medføre, at der kun udtages ganske få prøver, og dermed fås kun ringe statistisk materiale for bestemmelse af styrkerne.

### **Beregning ud fra trykstyrken af byggesten og mørtel**

Trykstyrken af murværk kan bestemmes ud fra byggestenens og mørtlens trykstyrke. Dette gøres ud fra formeludtrykket i EN 1996-1-1 (3.2):

$$\begin{aligned} f_k &= K \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3} \\ f_d &= f_k / \gamma_m \end{aligned}$$

hvor:

$K$  er konstant afhængig af byggestenen ( $K=0,55$  for massive teglsten)

$f_b$  er middel trykstyrken af byggestenen (angives ved stenklasse)

$f_m$  er middel trykstyrken af mørtlen

$f_k$  er den karakteristiske trykstyrke af murværket

$f_d$  er den regningsmæssige trykstyrke af murværket

$\gamma_m$  er partialkoefficienten



### Trykstyrken af byggesten

Byggestenen udtages enkeltvis flere steder i det aktuelle område og trykprøves i laboratoriet. Metoden giver god viden om byggestenenes styrkeværdier på en enkel måde.

Ved udtagning af byggesten skal man være opmærksom på variationer af sten-kvaliteten i facaden og den indvendige del af muren. Byggestenen, der ikke er anvendt i facaden, har ofte en lavere trykstyrke end byggestenen anvendt i facaden.

### Trykstyrken af mørtel

Trykstyrken for mørtler er mere problematisk at fastlægge, idet der normalt ikke kan udtages intakte prøver til mekanisk prøvning. Derfor skal prøvning foretages via vikarierende egenskaber.

### Kemisk bestemmelse

Ved hjælp af vådkemisk analyse fastlægges mørtlens oprindelige blandingsforhold af kalk, eventuelt cement eller andre hydrauliske bindemidler og tilslag. Det er her nødvendigt at gøre en række forudsætninger om de oprindelige materialer baseret på viden om de historiske perioder. Dette indebærer i sagens natur en vis usikkerhed.

Mørtlens styrke bestemmes ud fra kendskab til forholdet mellem blandingsforholdet og erfaringsmæssige styrker.

For læskemørtler som typisk anvendtes i middelalderen findes der dog ingen erfaringer for styrkeparametre som funktion af kalkindholdet.

For kulekalksmørtler, som senere afløste læskemørtlerne, forefindes styrkeparametre, som er opsummeret i efterfølgende tabel.

Tabel 1. Mørtelfugens trykstyrke

Indhold i vægtprocent af kalkhydrat	Trykstyrke ( $f_m$ ) (MPa)
14,2	1,6
12,3	1,5
9,6	1,4
8,3	1,3
7,7	1,2
6,4	1,1
4,9	0,9

Tabellen er udarbejdet på baggrund af ”E. Suenson Byggematerialer III, 1911”. Værdierne er i overensstemmelse med erfaringer fra laboratorieforsøg på Teknologisk Institut, Byggeri.

Værdierne er 6 måneders styrkeparametre og er således kun gældende for eksisterende byggeri.

Ved nyt murværk kan mørtelstyrken bestemmes med en standardiseret metode. Herved findes en "laboratorium" middeltrykstyrke, som betegnes ML. I murværksnormen står der, at denne skal divideres med 2 for at få  $f_m$ .

### X-bor til bestemmelse af mørtelstyrke

X-boret (kryds-boret) måler trykstyrken ML af en mørtelfuge på stedet. Værktøjet er udviklet på Teknologisk Institut og er inspireret af vingeboret, som bruges til geotekniske undersøgelser.

Målingen foretages ved at banke X-boret ind i fugen i et forboret Ø6 hul og måle det maksimale drejningsmoment i brudøjeblikket. Dette drejningsmoment er proportionalt med trykstyrken i fugen.

Fordelen ved metoden er, at man ret hurtigt på stedet kan måle brudstyrken af mørtlen i flere punkter, hvorved der opnås et bredere kendskab til styrkeværdierne i det aktuelle murværk, som kan være mere eller mindre nedbrudt eller helt intakt.



Fig. 3.6

Eksempel:

Undersøger man stenstyrken af gamle eller nyleverede munkesten og får fx stenklasse 7.

Finder man dernæst trykstyrken af en kalkmørtel ved ovennævnte X-bor forsøg til  $ML = 3,5 \text{ MPa}$ , da er

$$f_m = \frac{1}{2} \times 3,5 = 1,75 \text{ MPa.}$$

Herefter kan den karakteristiske styrke af murværket findes ved:

$$f_k = 0,55 \times 7^{0,7} \times 1,75^{0,3} = 2,5 \text{ MPa}$$

Den regningsmæssige styrke er normalt afhængig af kontrolklassen. Ved normal kontrol er partialkoefficienten  $\gamma_m = 1,6$ . Dermed er den regningsmæssige styrke:

$$f_d = 2,5/1,6 = 1,6 \text{ MPa.}$$

## 4. Byggeteknologi

### 4.1 Fundamenter

I bog 3 kapitel IV ”Templets fundamenter og underbygninger” skriver Vitruvius.

*”Grunden til disse bygværker skal om muligt graves ned til fast bund og ned i denne, så meget som bygningens størrelse giver anledning til. Og hele underbygningen skal være så solid, som den overhovedet kan lægges. Når det er i niveau med marken bygger man de mure, som skal bære søjlerne, en halv gang så tykke som søjlerne skal være, for at dette nedre parti, som kaldes stereobat (Fundamentets faste overside) på grund af at det skal bære vægten, skal være stærkere end det øvre og søjlebaserne ikke skal glide ud over disse solide mure. Man følger samme metode, når det drejer sig om mure, som er ovenfor marken.....”*

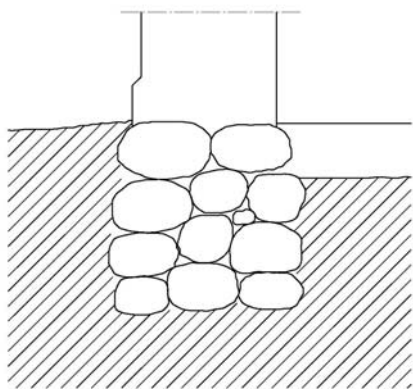


Fig. 4.1

Et typisk middelalderfundament er udført som en rende udgravet til fast bund. I renden er der herefter lagt kampesten evt. med mørtel imellem stenene. Kampestenene er derefter afrettet på oversiden, hvorefter opmuring kan begynde.

Vitruvius fortsætter:

*”.....Men om man ikke kan nå ned til fast bund, fordi jorden viser sig at bestå af løs jord eller morads, må der graves op og renses ud og forstærkes med pæle af forkullet elletræ, oliventræ eller eg, og disse må drives ned med maskiner meget tæt til hinanden, som bropper, og mellemrummet mellem dem fyldes med trækul. På disse pæle lægges endeligt grunden af meget fast murværk, og når den er ført op til vandret niveau lægges stylobaterne (underlag for søjlerække) på plads.....”*

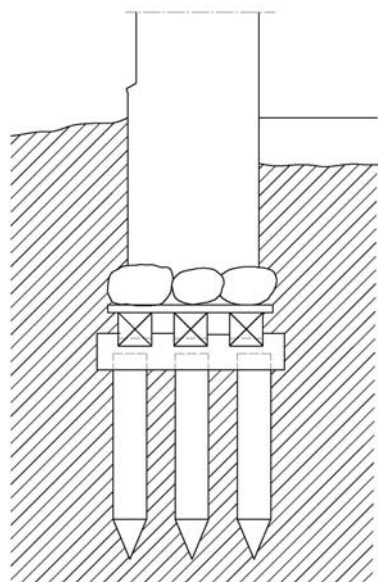


Fig. 4.2

Et ideelt pæleværk består af nedrammede pæle i rækker og kolonner. Ovenpå er lagt en såkaldt hammer, der forbinder kolonnerne, ovenpå igen er der lagt langsgående stræktømmer og øverst planker på tværs som en platform, hvorpå man har lagt en ikke sugende sten, herpå er opmuringen af fundamentet så udført. Desuden ser man ofte, at der er udlagt blåler omkring hammer, stræk og planker, for at holde på vandet i perioder med lav grundvandstand.

Ovennævnte citat af Vitruvius angiver, at det i over 2000 år været klart, hvor omhyggeligt et fundament bør udføres. Og både det grundmurede fundament og pælefunderingen har været kendt.

## 4.2 Mure

Naturstensmure er i Danmark oftest udført som kassemure. De kan være af frådsten, tuf, kalksten eller kampesten. Opbygningen er skematisk som vist nedenfor.

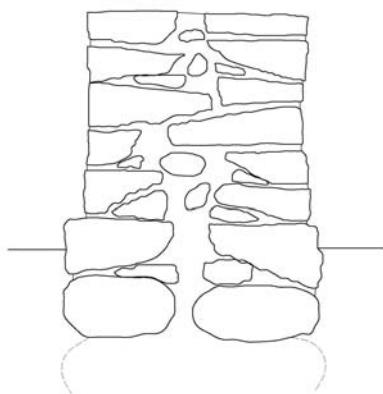


Fig. 4.3

Stenene skal i hovedsagen kunne stables med lidt mørtel imellem stenene. Derfor anvendes der kilesten som støtte for de uens formede bagsider. Hulrummet i kassen opfyldes løbende med overskudsten og mørtel. Desuden vil man forsøge af og til at indlægge længere bindersten, som går helt ind i murlivet.



Man kan blive klogere på gamle konstruktioner ved at studere ruiner. Nedenfor er vist et eksempel fra Gudhem kloster i Sverige. Det var et cistercienser nonnekloster grundlagt omkring 1160. Det er bygget af kalksten enten fra Kinnekulle bjerget eller fra Billingen. Når man kan se ind i kernen, er det fordi, at arkadepillen er forsvundet.

Indførelsen af teglmuren betød for en stor dels vedkommende, at murene blev



Fig. 4.4

massive til dels tyndere, men i stedet med stræbepiller. Nedenfor ses et eksempel på dette fra Vitskøl kloster i Nordjylland.



Fig. 4.5

### 4.3 Hvælv

Som nævnt i afsnittet om de danske kirker var de tidlige kirker, dvs. fra ca. 1075 til 1240, med fladt loft. I princippet som vist nedenfor.

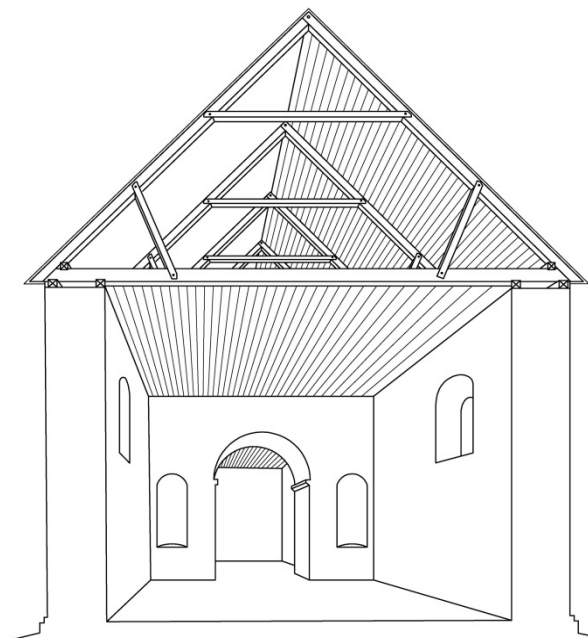


Fig. 4.6

Hvis en kirke blev bygget i gotisk tid og planlagt med hvælv fra starten vil der være udført anslag til hvælvkapperne i facademurene.

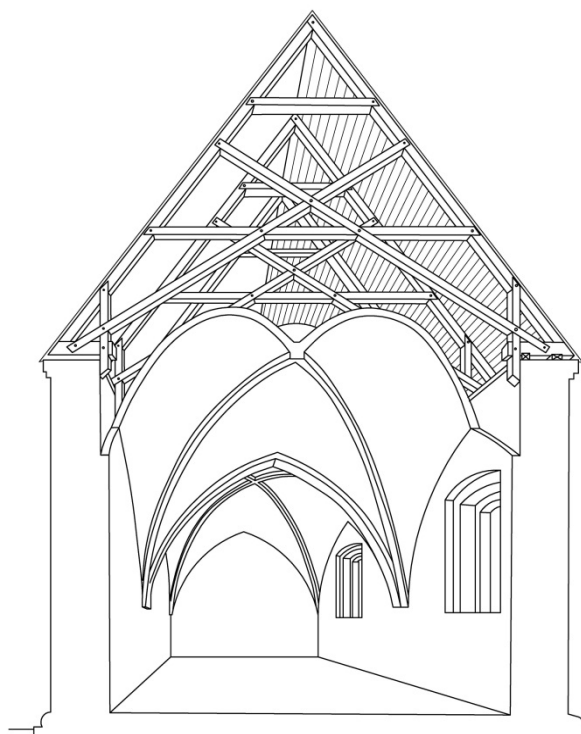


Fig. 4.7

Det er dog langt mere almindeligt, at der i gotisk tid er lagt hvælv ind i en romansk kirke. Dette nødvendiggør en række tiltag for at skabe en underbygning,

som kan bære hvælvet. Dette er baggrunden for de lave murpiller, der står fagvis ud for jordbuerne. Pillerne er sædvanligvis designet til at modtage jordbuer, skjoldbuer og krydsribber.

Når murpillerne, jordbuerne, skjoldbuerne og krydsribberne var opmuret med understøtning af såkaldte buestillinger, blev hvælvingskapperne opmuret samtidig på fri hånd efter svalehalen fra alle hjørner. På denne måde sikrede man sig, at der hele tiden var balance i konstruktionen.

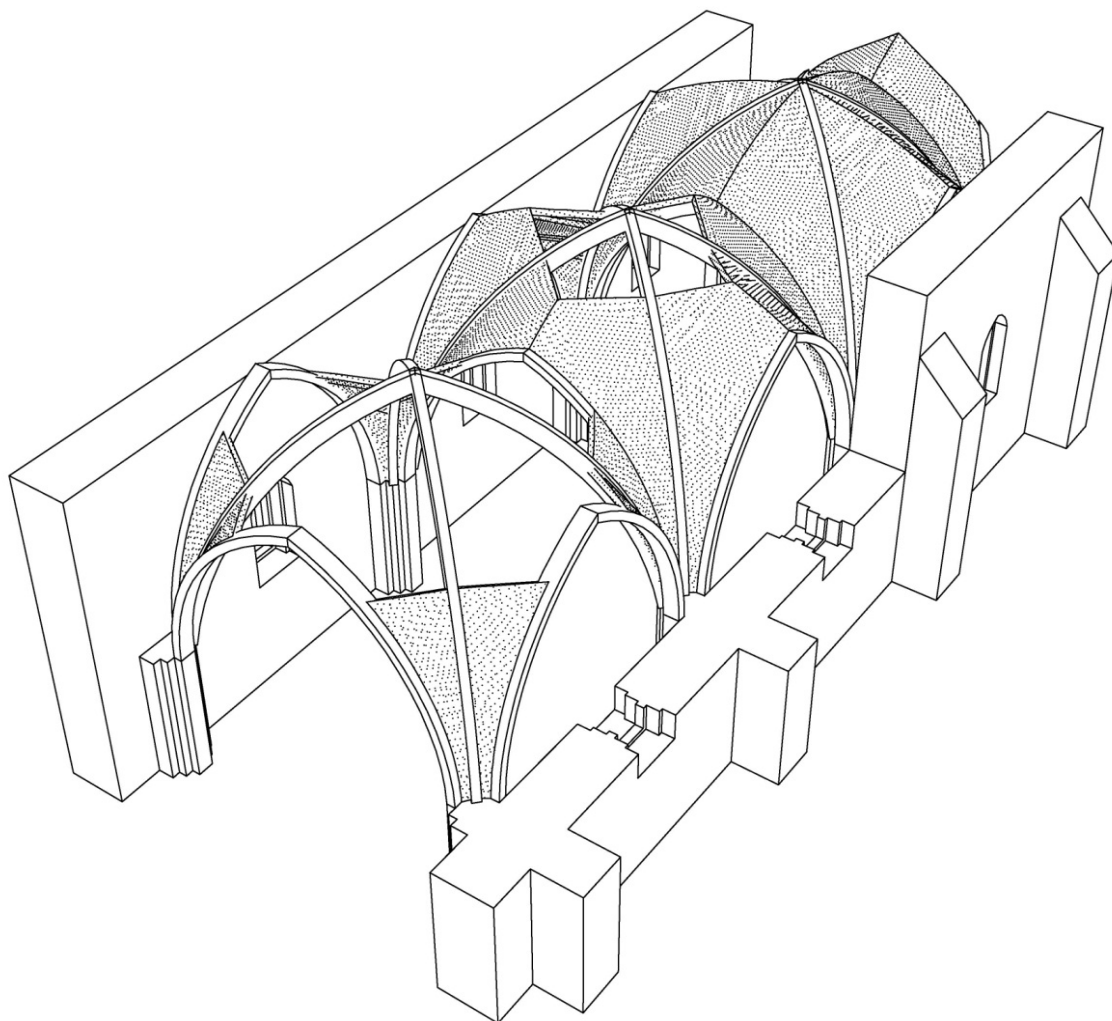
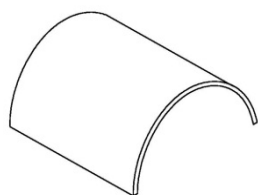


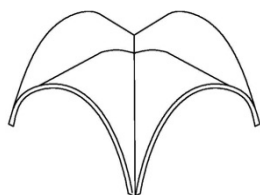
Fig. 4.8

Den mest almindelige hvælvingsform herhjemme er krydsribbehvælv, men der findes en del andre hvælvingsformer. På nær krydsribbehvælv med mellemribbe vil disse hvælvtyper ikke blive gennemgået i denne fremstilling. Men principperne for analyse er de samme som for simple krydsribbehvælv.

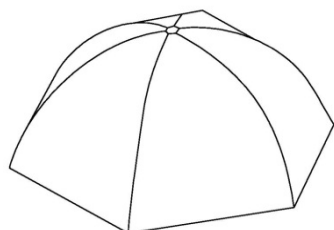
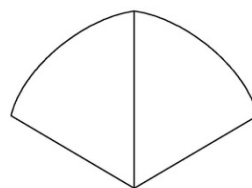
a: Tøndehvælv



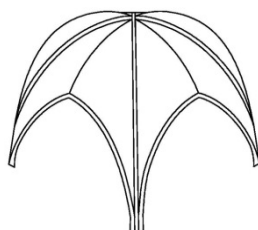
b: Grathvælv



c: Klosterhvælv



d: Kuppelhvælv



e: Krydsribbehvælv

f: Krydsribbehvælv  
med mellemribber

Fig. 4.9



Fig. 4.10 Underside af ribbehvælv



Fig. 4.11 Eksempler på ribbesten

Udover de her viste ribbesten brugte man også at opmure krydsribberne af almindelige munkesten som hvælvkapperne stod direkte ovenpå, herved bliver ribberne mere synlige inde i kirken. Til gengæld kan de ikke ses på oversiden af hvælvet.

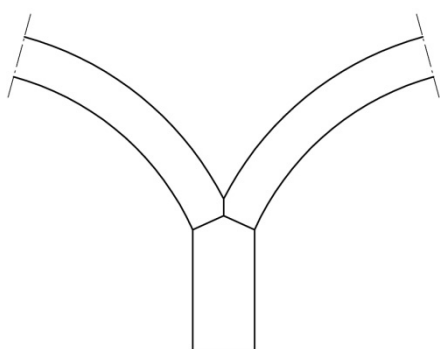


Fig. 4.12 Tværsnit i ribbe opmuret i almindelige munkesten

## 4.4 Tage

En del af de problemer, der er med kirkebygningernes stabilitet, skyldes ombygninger af tagværkerne i forbindelse med indbygning af hvælv.

De typiske romanske tagværker er som det, man finder i Roager kirke. Af denne grund kalder man dem for Roager typen. Princippet i denne spærtype er, at vægten fra tagbelægningen vil presse spærene (spærhovederne) indefter. Derfor er der sat et hanebånd i spænd for at forhindre dette. Den samme virkning har de skrå spærstivere. Spærstiverne kan desuden have en forankrende virkning ved sug på taget.

Hvis kirken er bredere som fx i Hygum kirke, bliver spærhovederne også længere, og derfor er det nødvendigt at afstive det yderligere. Dette giver spæret med 2 hanebånd spærstivere og krydsbånd. Disse spær kaldes sommetider for Hygum typen, men det er mere almindeligt at kalde dem krydsbåndtypen.

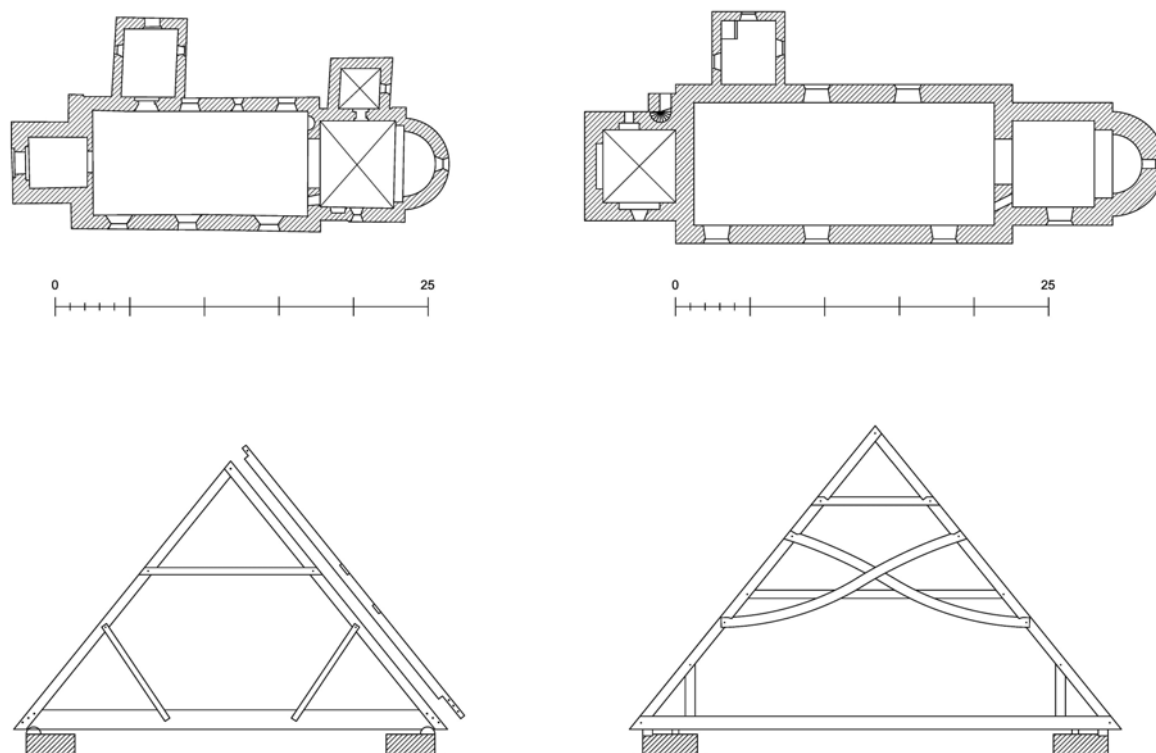


Fig. 4.13 Roager spærtypen

Hygum eller krydsbånd spærtypen

Ved indbygning af hvælv har det af højdemæssige grunde været nødvendigt at hæve hvælvne så meget, at de stak op i tagrummet, så spærenes bindbjælker ikke kunne gå igennem undtagen ud for jordbuerne.



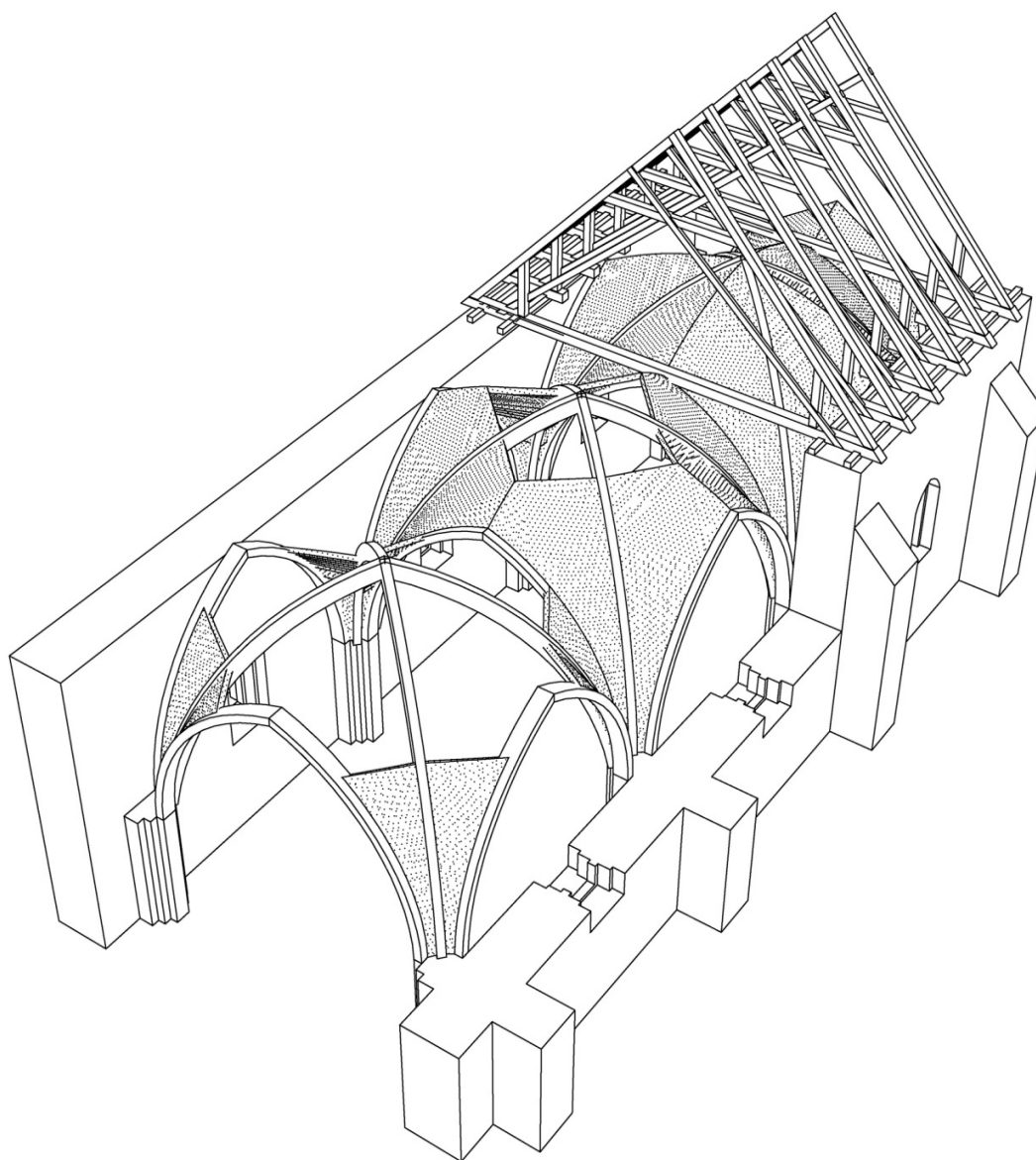


Fig. 4.14

Denne krydsbånd spærtype uden bindbjælker er det, vi kalder et gotisk spær. Ved bygningernes opførelse har det været almindeligt at mure ud mellem murremme og spærfod. Dette har givet en god sammenvirkning mellem mure og tag. Men som vi senere skal se, har dette på længere sigt givet anledning til en del problemer.

## 5. Typiske skader med konstruktiv betydning

Skader der gennemgås i dette afsnit er primært skader på murværket. Da disse skader ofte er forårsaget af flere faktorer, som for eksempel nedbrudte tagspær eller dårlig fundering, berøres disse forhold også. Omend kun i mindre omfang. Skaderne, der kan henføres til svækkelser i det statiske system, drejer sig om deformationer, revner i mure, revner i buer, revner i hvælv, åbninger mellem hvælv og mure og hældninger af mure.

Hvordan disse skader tegner et billede af bygningens virkemåde og antyder årsager til skader, behandles også her.

### 5.1 Sætninger

Sætningsskader kan konstateres ved nivellement af sokkelfremspring eller fuger, som man kan formode har været vandrette ved bygningens opførelse. Revnebilder i murværket kan indikere, at fundamentets bæreevne svigter.

Fundamentsskader kan opstå som følge af sætninger eller udskridninger eller som følge af frostsprængninger eller frosthævninger. De hyppigst forekom-

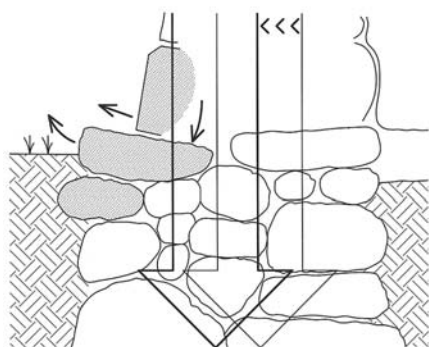


Fig. 5.1 Principsnit. Belastningsforskydning med hældning og udskridning i kampestenene

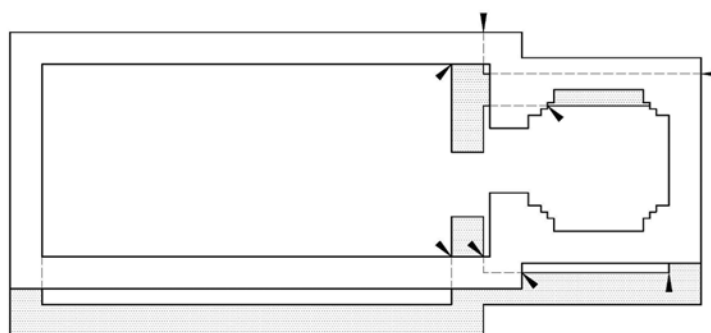


Fig. 5.2 Nørre Onsild kirke. Registreringer af sætningsrevner i eksisterende kirke. Kirken er placeret over et tidligere kirkefundament.

mende sætninger opstår som følge af bygningens komprimering af de underliggende fyldlag. Andre forhold, som fundering oven på tidligere fundamenter, eller at fundamentene er udført i forskellige perioder, kan på samme måde resultere i differenssætninger. Sætningen er gerne partiel, hvor fyldlagene er uensartede, eller belastningen på fundamentet er koncentreret i for eksempel mur-

piller eller murhjørner. Sætningsskader kan også være forårsaget af andre faktorer, for eksempel øget belastning på murværkets øvre del som følge af vandrette påvirkninger fra tagkonstruktion og fra hvælv.

Desuden kan der være tale om svækkelse af fundamenter ved gravning for afløbsledninger, drænledninger, ændringer i grundvandsspejlet og sammensyning af gamle begravelser langs med eller ind under fundamentet

## 5.2 Forvittringer

Det kan være puds som skaller af, eller det kan være mørtelfuger, der falder ud mellem hvælvenes sten eller andre steder. Det kan også være forvittringer der har fundet sted, og ikke er udbedret tilstrækkeligt. Især fugernes tilstand kan være af konstruktiv betydning. Hvis de er forvitrede mere end 50-100 mm i dybden, kan det give alvorlige stabilitetsproblemer. For eksempel kan vindlaster rykke tryklinien ud i murens yderside. Gavle og kamtakker er særligt udsatte for denne type skader.

## 5.3 Fugtskader

Mange bygningsskader skyldes indtrængende vand, opugning eller kondens på grund af fejlkonstruktioner og utilstrækkelig ventilationsmulighed. Fugten medfører dels et dårligt indeklima dels faren for alvorlige skader som for eksempel frostsprængninger eller nedbrydning ved angreb af svampe og borebiller.

Undersøgelse af bygningens mulige fugtproblemer er væsentlig. Eventuelle problemer og følgeskader efter fugt noteres, så disse vurderes sammen med øvrige skader. Fugtskader kan have årsagssammenhænge med andre skadetyper. Et eksempel på dette er indmurede ankre, der har rustsprængt murværket. Selv ret små sprækker i facademuren er tilstrækkelige til, at kondensvand og slagregn trænger ind og opfugter bjælkeender og medfører rådskader.

Tagbelægning og tagkonstruktion skal gås igennem med særlig opmærksomhed rettet mod de kritiske punkter: Skotrender, inddækninger ved taggennembrydninger, tagfod og overgang til eventuel tagrende.

Årsagen til fugtindtrængen gennem ydermure eller ved opugning nedefra kan være lidt vanskeligere at klarlægge. Det er imidlertid vigtigt at registrere eventuelle fugtproblemer. Årsagen til fugt i ydervægge kan være en forkert overfladebehandling. Overfladen kan være for tæt, og derved ophobes fugten i muren.

På middelalderkirker er der ikke altid tagrender, og bevaringsmyndighederne ønsker heller ikke, at der i disse tilfælde udføres synlige tagrender. Hvis terrænet tillige har hældning mod kirken, kan tagvandet ledes ind i muren. Dette kan imødegås med et særligt udformet omfangsdræn (skjult ”tagrende”).

Et andet vigtigt punkt i undersøgelsen af de ydre rammer er en gennemgang af de udvendige snedkerarbejder, vinduer og døre, ligesom man skal være opmærksom på revneforekomster og sætningsproblemer i væggene.

## 5.4 Skader på murværket

Skader på kirkens murværk skyldes oftest fugt eller mekaniske påvirkninger og i sjældnere tilfælde plantevækster og svampeangreb. Et opfugtet murværk kan medføre skader udløst af salte eller skader udløst af frostsprængninger. Skader, der opstår som følge af mekaniske påvirkninger, kan være tagkonstruktionens udskydende belastning på murkronen. Ved indførelsen af de murede hvælv, er

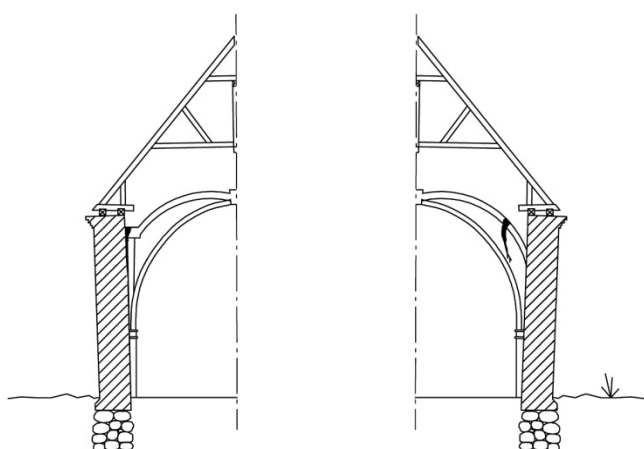


Fig. 5.3

Tv: Indbygget hvælv, der sammen med et for slapt tagværk overfører udskydende kræfter, der deformerer ydervæggen. Der opstår spalte ml. skjoldbue og ydervæg.

Th: Hvælvet er bygget ind ved kirkens opførelse. Også her resulterer udskydende kræfter fra tag og hvælv i deformationer og revner i hvælvet.

den oprindelige tagkonstruktion ofte blevet svækket af, at bindbjælker er blevet fjernet.

Tagværkets svækkelse ved tabet af bindbjælkerne er forsøgt afhjulpet på flere måder. I nogle tilfælde forlod man sig på de få loftsbjælker, der var plads til over gjordbuerne mellem hvælvfagene. I andre tilfælde blev de enkelte spærfag forstærket med skråbånd, som forhindrer spærfoden i at skride udad på murkronen. I begge tilfælde afhænger virkningen af, om samlingerne har tilstrækkelig trækstyrke og stivhed.

Hvælvets udskydende belastning på ydermurene er en anden væsentlig årsag til mekaniske påvirkninger, der resulterer i revneudvikling i facademurene. Hvis der ingenting er gjort for at forhindre de udskydende kræfter fra tagværket, kan det vise sig at det væltende moment fra de udskydende kræfter fra taget er af samme størrelsesorden som det væltende moment fra hvælvene idet hvælvene nok trykker med en større vandret kraft men den virker længere nede på facademuren.

Endelig kan murværket have sætningskader, som følge af bæreevnesvigt i fundamentet.

## 5.5 Skader på tagværket

Typiske skader på tagværket er rådskafer og skader som følge af brud i samlinger. Traditionelle tømmersamlinger holdes kun sammen med nagler af træ, og kan med tiden vrides skæve og miste deres styrke og stivhed. Begge typer af skader kan resultere i, at bindebjælker og skråstivere mister deres virkning og medfører, at tagets egenvægt giver en ekstra vandret belastning på murkronen.

Særligt udsatte områder er:

- Spærfødderne
- Tagenes sydsider
- Gavlspær
- Spær under inddækninger
- Skotrender (kelspær)

I spærene er store nedbøjninger ofte forårsaget af skred i spærfoden. I værste fald har nedbøjningen medført, at spæret er knækket, f.eks. ved hanebåndssamlingen.

Spærfoden og tagremmen er den del af tagværket, der oftest er angrebet af råd eller svamp, især fordi de er placeret, så de støder op mod murværket. Et svampeangreb trives særdeles godt i remme. På kort tid kan svampen brede sig langs remmen fra spær til spær. Ved reparation er det nødvendigt, at hele remmen eller dele af den skiftes. Eventuelt kan den lodrette bærefunktion overtages af en udmuring. Forbindelsen på langs fra spær til spær må da etableres med en ny rem, som kan lægges oven på bjælkelaget.

### Forankringer

Ved traditionelle tagformer og tunge tage som f.eks. vingetegl og munk og nonnetage, vil der i almindelighed ikke være brug for en lodret forankring mod sug. Dette forudsætter dog, at tagværket er effektivt forbundet med tagbjælkelaget. Tagbjælkelaget bør derimod være vandret fastholdt til murværket med ankre. De placeres som regel i bindbjælkerne ud for murpillerne.

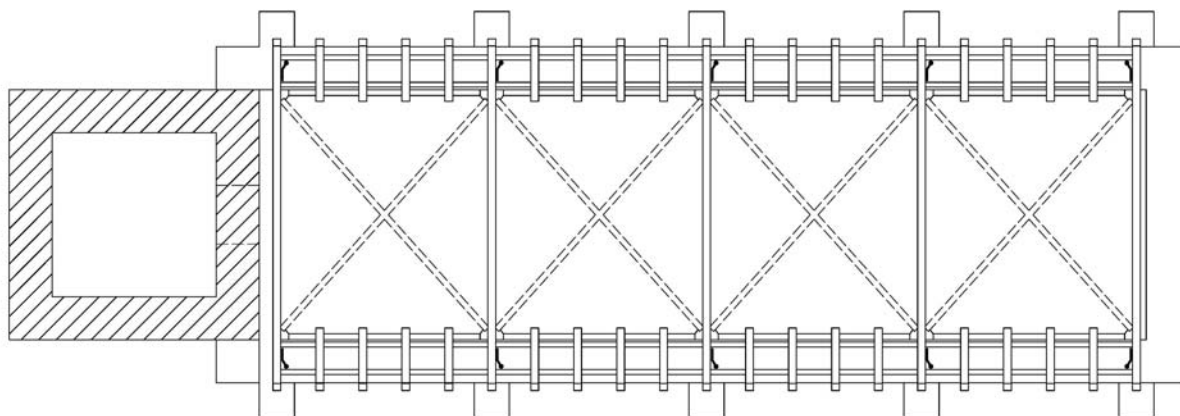


Fig. 5.4



I en række tilfælde skal tagværket med ankre også fastholde andre bygningsdele, f.eks. gesimser, gavltrekanter og bagmure.

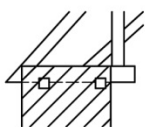
### Remme

Remmenes opgave er at fordele trykket fra spærene ned på muren og at fastholde spærene indbyrdes. Traditionelt er tagremmen muret inde i murkronen. Sammen med spærfødderne hører remmen til de mest udsatte dele af tagværket, især fordi de er placeret, så de støder op mod murværket. På kort tid kan svampen brede sig langs remmen fra spær til spær. I forbindelse med udbedringer af råd og svamp, fritlægges tagremmen derfor og sikres ventilering og adskillelse fra murværket med murpap.

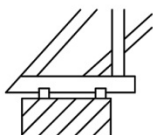
I en typisk tagfodskonstruktion hviler spærfoden på en indre og ydre murrem. Ved opførelsen har tømmeret været muret inde. Sædvanligvis er der kun bindbjælker på tværs af bygningen, hvor de kan komme over jordbuerne imellem hvælvene.

Så længe murremme og tagfødder er intakte, er denne konstruktion i stand til som et vandret liggende bindingsværk, hvor udmuringerne virker som trykdiagonaler, at spænde fra bindbjælke til bindbjælke.

Remme indmuret  
medfører gittervirkning  
i murkronen, men giver  
risiko for råd i  
tagfod ved utæt tag.



Remme blotlagt  
medfører gittervirkning  
forsvinder, men giver  
mindre risiko for råd.



Tryk ————  
Træk ————

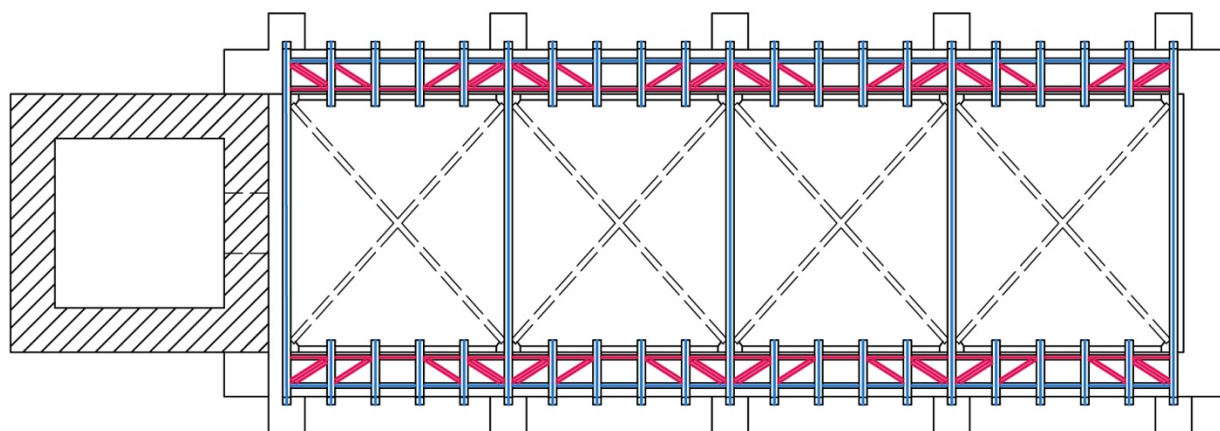


Fig. 5.5

Men når remmene angribes af svamp og råd, forsvinder denne virkning. Dette har betydet, at man mange steder har fjernet udmuringerne, og udført nødtørftige reparationer af murremmene. På denne måde sikrer man sig, at remmene ikke nedbrydes. Den uheldige konsekvens er, at den vigtige konstruktive funk-

tion er forsvundet, og tagværket begynder da at skubbe murværket mellem bindbjælkerne udefter.

Hvis man fjerner udmuringerne er det derfor vigtigt, at man etablerer den konstruktive sammenhæng mellem tagværk og murkrone på anden måde.

## 6. Forundersøgelser

Omfanget af nødvendige opmålinger og deres relevante præcision, for at danne grundlag for statistiske analyser, gennemgås. Her medtages også principper for geotekniske undersøgelser, herunder prøvegravninger til registrering af fundamenteres geometri og tilstand.

### 6.1 Undersøgelse af bygningens geometri, anvendte byggeteknologi og materialer

Det er helt centralt for bevaringsindgrebet at foretage en grundig undersøgelse af bygningen forud for et indgreb. Bygningsundersøgelsen adskiller arbejdet med den arkitektoniske kulturarv fra andre typer byggeopgaver. Grunden til dette er selve udgangspunktet, at noget bestående skal bevares i større eller mindre udstrækning. Afdækningen af det værdibærende ligger i undersøgelsen.

Undersøgelse skal forstås meget bredt som fastlæggelse af bygningens arkitektur, kulturelle betydning, historie, geometri, materialer, teknologi, statisk virkemåde, osv. Heri ligger også behovet for ikke kun at undersøge selve bygningen, men også samtiden for bygningens tilblivelse og senere omdannelser, filosofisk, kulturelt og ideologisk. Det siger sig selv, at ingeniøren ikke skal deltage i alle disse undersøgelser, men dog være sig bevidst om de forskelligartede iagttagelser, der skal gøres i forbindelse med bevaringsindgrebet.

Forudsætningen for ingeniørens udførelse af bygningsundersøgelsen er viden, systematik og analyse. Det kan være nyttigt at tage udgangspunkt i hvordan man forestiller sig, at bygningen oprindeligt blev opført.

Rådgiverens studie af den historiske byggelitteratur lægges til grund for undersøgelsen af den konkrete bygning. I forhold til middelalderen er der imidlertid meget få kilder, en af de væsentligste er Vitruvius (romersk arkitekt og ingeniør ca. 75 f.Kr.-15 f.Kr.). Der kan argumenteres for at anvende senere kilder (f. eks. Leon Battista Alberti (1404 – 72), Andrea Palladio (1508-80) eller senere endnu Johan Daniel Herholdt (1818-1902)). Kilder der nok er meget nyere, men bygger på ældre regler og traditioner. Metoden kan anvendes med forsigtighed i mangel af bedre.

### 6.2 Indledende undersøgelse og første besigtigelse

Besigtigelsen er en overordnet orienterende gennemgang, der har til formål at fastlægge omfanget af de nøjere bygningsundersøgelser, der skal foretages. Besigtigelsen kan bestyrkes ved en skitseopmåling som beskrevet i afsnittet om opmåling. Det kan eventuelt være nødvendigt at udbygge den første besigtigelse med mere detaljerede oplysninger og observationer:

- Kirkens historie.  
Undersøges igennem trykte kilder, som f.eks. Den Danske Kirkesamling,

Akademiets arkitektursamlinger (tegningsarkivet på Charlottenborg), Den Danske Vitruvius, Kommunale byggemyndigheders arkiv, lokalhistorisk arkiv og bygherren.

- En gennemgang af de observationer, der hidtil er gjort.  
Det afklares, om der er kendte observationer, og om der er kendte tidligere udbedringer. Kilder, der skal udspørges, er bygherren (menigheden / menighedsrådsformanden). Den lovpligtige kirkesynsprotokol fra provstesyn kan give gode oplysninger. Desuden stiftsøvrigheden, den tilknyttede Kgl. Bygningsinspektør og Nationalmuseet.
- Besigtigelse af kirken med henblik på umiddelbare byggetekniske iagttagelser:
  - Byggeteknisk tilstand (fugt, salte, afskalning m.v.)
  - Eskaleret nedbrydning/skader (revner, sætninger og hældninger m.v.)
  - Naturlig forvitring/patinerings
  - Ydre påvirkninger (brud, sætninger, slag, slid m.v.)
  - Konstruktive uhensigtsmæssigheder

Disse indledende undersøgelser lægges til grund for en foreløbig udtalelse og for en tilrettelægning af omfanget af den efterfølgende bygningsundersøgelse og bygningsopmåling.

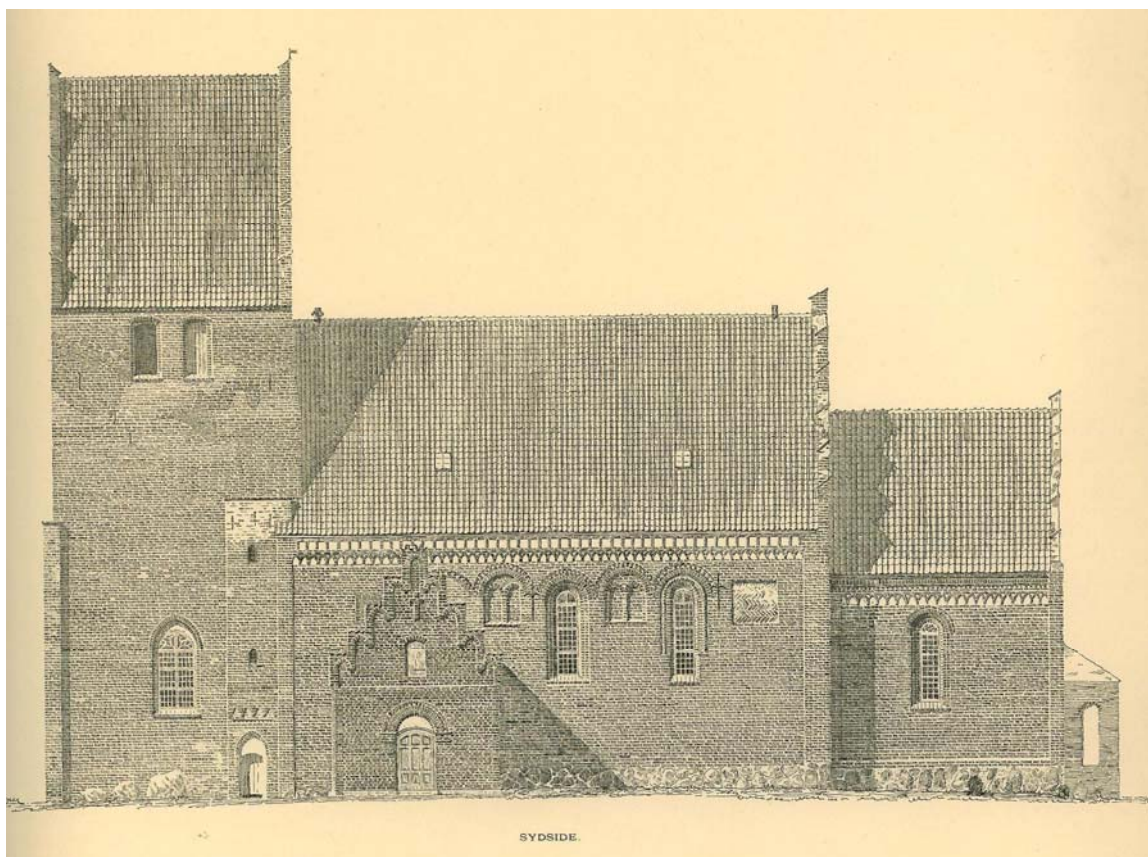


Fig. 6.1 Borre kirke, opstalt v/ark. Helge Møller, "Danske teglstenskirker" 1918



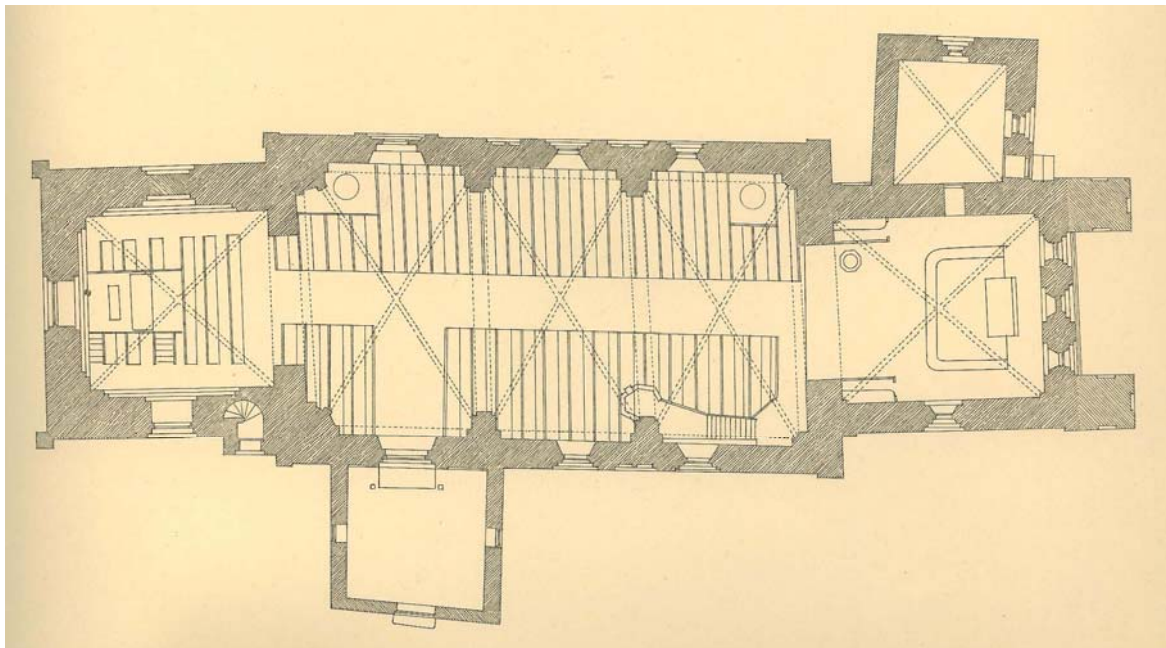


Fig. 6.2 Borre kirke, plan v/ark. Helge Møller, "Danske teglstenskirker" 1918

### 6.3 Bygningsundersøgelsen

For at vurdere fremtidig udvikling og risiko ved brud og deformationer på konstruktionen må følgende forhold undersøges:

- Registrering af samtlige bygningsdele, der er skadet.
- Opmåling, der fastlægger sætninger og deformationer i forhold til et lodret og vandret plan. Det indebærer måling af relative sætninger ved nivellement af bygningsdele, der med rimelig sikkerhed har været vandrette ved husets opførelse, f.eks. sokler, gesimser, vinduesoverligger, bjælkelag uden brædder.
- Måling af vægges hældninger ved hjælp af lodsno, vaterpas eller theodolit for at kunne målsætte hældningerne. Målingerne er væsentlige for at kunne afgøre bygningens stabilitet.
- Identifikation af de enkelte revner og deres forløb igennem de forskellige bygningsdele. Det vil sige en kortlægning af revnetopologien, der er så præcis at bygningsdelenes indbyrdes bevægelsesretning er kendt, se fig. 6.4.
- Måling af revnens bredde på udvalgte steder samt, om nødvendigt, en overvågning af revneudviklingen over tid.
- Statisk analyse: gennemregning af belastninger på de forskellige dele af fundamentet, eventuelt både i tidligere tid og med de konstaterede og opmålte deformationer.
- Bygningshistorisk undersøgelse herunder søgning i relevante historiske arkiver.
- Prøvegravninger for undersøgelser af fundament og jordbund.

- Geotekniske borer til bæredygtige lag.

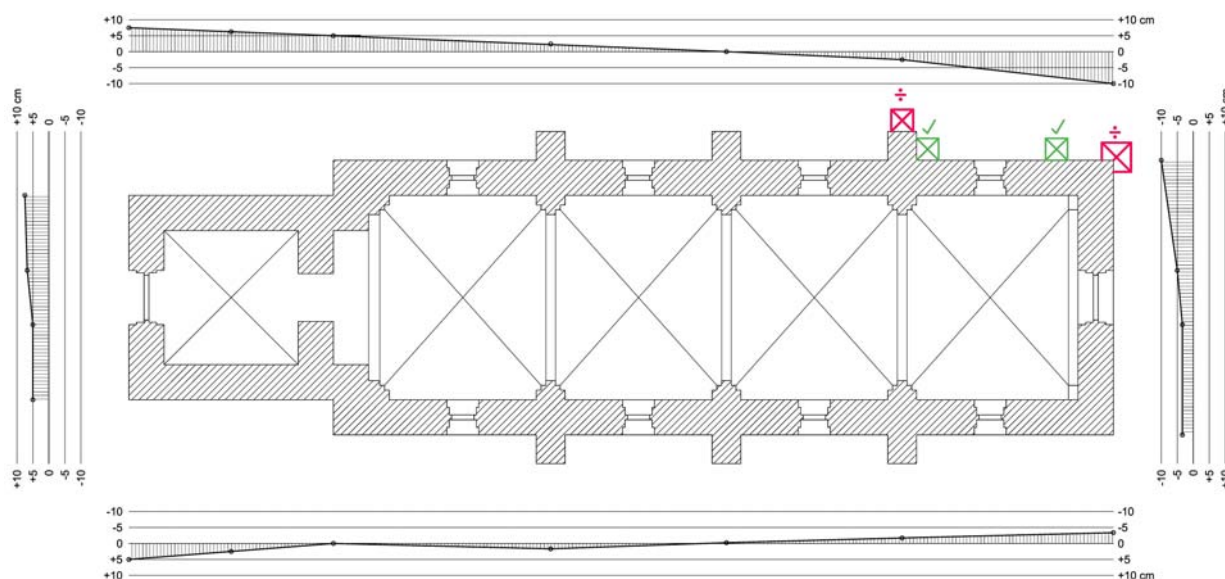


Fig. 6.3 Nivellement af skiftegang, for at kortlægge omfanget af sætninger. Denne undersøgelse forudsætter at det målte skifte har været vandret ved opførelsen.

Røde felter angiver katastrofal placering af prøvegravninger, grønne felter angiver korrekt placering med lille risiko for skader på bygningen.

Undersøgelsen lægges til grund for en samlet vurdering af årsag, fremtidig udvikling og risiko. En fyldestgørende undersøgelse vil ofte indebære prøvegravninger ved fundamentet for at fastslå fundamentets materialer, opbygning, beskaffenhed, geometri og samtidig at kunne vurdere jordbundsforholdene. Som for de øvrige bygningsdele udføres der en detaljeret registrering af samtlige informationer udgravningen frembringer på de ovennævnte områder.

## 6.4 Geotekniske undersøgelser

Ud over prøvegravninger foretages der en geoteknisk undersøgelse med en eller flere borer. Boringerne skal fastlægge jordlagenes styrke- og deformationsparametre og pejle grundvandsstanden. De geotekniske undersøgelser foretages af en geotekniker med det fornødne udstyr og laboratorium. Prøvegravningen foretages af for eksempel et murerfirma med relevant erfaring med historiske bygninger og under vejledning af den rådgivende ingeniør.

Det er vigtigt at prøvegravninger (og gravearbejde i al almindelighed) ikke udføres på konstruktivt kritiske steder, for eksempel på et hushjørne eller ud for en stræbepille (se fig. 6.3). Med henvisning til afsnittet om statiske modeller skal der ved gravning ikke kun tages højde for bygningens primære tryk på fundamentgrøftens bund, men også det sekundære tryk på grøftens sider. Hertil kommer, at mange kirker er relativt sparsomt funderet.

Inden prøvegravning og geotekniske undersøgelser iværksættes, skal der indhentes tilladelse hos stiftet og Nationalmuseet orienteres.

## 6.5 Undersøgelser af murværk

I undersøgelsen af murværket gennemgås konstruktionens enkeltd dele systematisk. Først og fremmest om bygningen har tegn på nuværende eller tidligere overbelastninger på konstruktionen, og om der er forvittringer af materialet.

Dernæst gennemgås konstruktionen nærmere for at afdække dens virkemåde. Konstruktionen kan have været udsat for påvirkninger eller sætninger, der giver utilsigtede, men stadig effektive lastgange.

Undersøgelsen opdeles i tre faser: En foreløbig undersøgelse, en detaljeret undersøgelse og en undersøgelsesevaluering. Baggrunden for at dele undersøgelsen i tre niveauer er at sikre, at der ikke drages forhastede og forkerte konklusioner. Skader i kirkens murværk kan i nogle tilfælde henføres til en bestemt skadeudløsende påvirkning, men oftest vil der være en række udløsende faktorer. Nedenstående faser kan gennemføres og gentages, hvis opdagelser eller nye erkendelser afslører et behov for det.

### 1. Foreløbig undersøgelse af murværket og de aktuelle påvirkninger.

I den foreløbige undersøgelse fastlægges om der er akut fare for kollaps, og skader er under udvikling, om konstruktionen er beskadiget eller skaderne er af kosmetisk betydning. Der foretages overslagsmæssige beregninger af konstruktionens sikkerhed mod brud.

Omfanget af undersøgelser og beregninger, der skal udføres på et detaljeret niveau, fastlægges.

### 2. Detaljerede undersøgelser, beregninger og analyser.

I denne fase foretages en nøje afklaring af murværket og de aktuelle påvirkninger. Der udføres en beregningsmæssig eftervisning af bygningens stabilitet eller eventuelle mangler på tilstrækkelig sikkerhed. Her vurderes behovet for udbedringer og forstærkninger.

### 3. Evaluering af undersøgelsen.

Her evalueres resultaterne af den detaljerede undersøgelse. Der foretages en kritisk gennemgang af den anvendte statiske model. Har undersøgelsen givet et betryggende beslutsningsgrundlag? Er vurderingen af konstruktionens kapacitet tilstrækkelig. Her afklares også om den anvendte analysemodel er for grov og kan give anledning til unødvendige indgreb. Desuden vurderes om materialeparametrene er ordentligt dokumenterede, og om de benyttede lasttilfælde er de dimensionsgivende.

#### Undersøgelse af revnebilledet

Forudsætningerne for korrekt fastsættelse af årsagen til revner kan afhænge af:

- at de rigtige detaljer i revnebilledet er observeret,
- at der er fremskaffet kendskab til det historiske forløb,
- at der er et solidt kendskab til revnemønstre affødt af de typiske årsager

Registrering af skader sker bedst ved at angive skaderne med tegningssignaturer på tegningskopier. For at følge en revneudvikling kan der monteres målepunkter på murværket.

En måde at konstatere om revner i murværket er aktive eller stabile, er at afsætte en klump våd gips over revnen. Nye bevægelser i konstruktionen vil kunne følges som revner i den størknede gips.

Endelig kan en revneregistrering præciseres og overvåges ved måltagning med revnemåler.

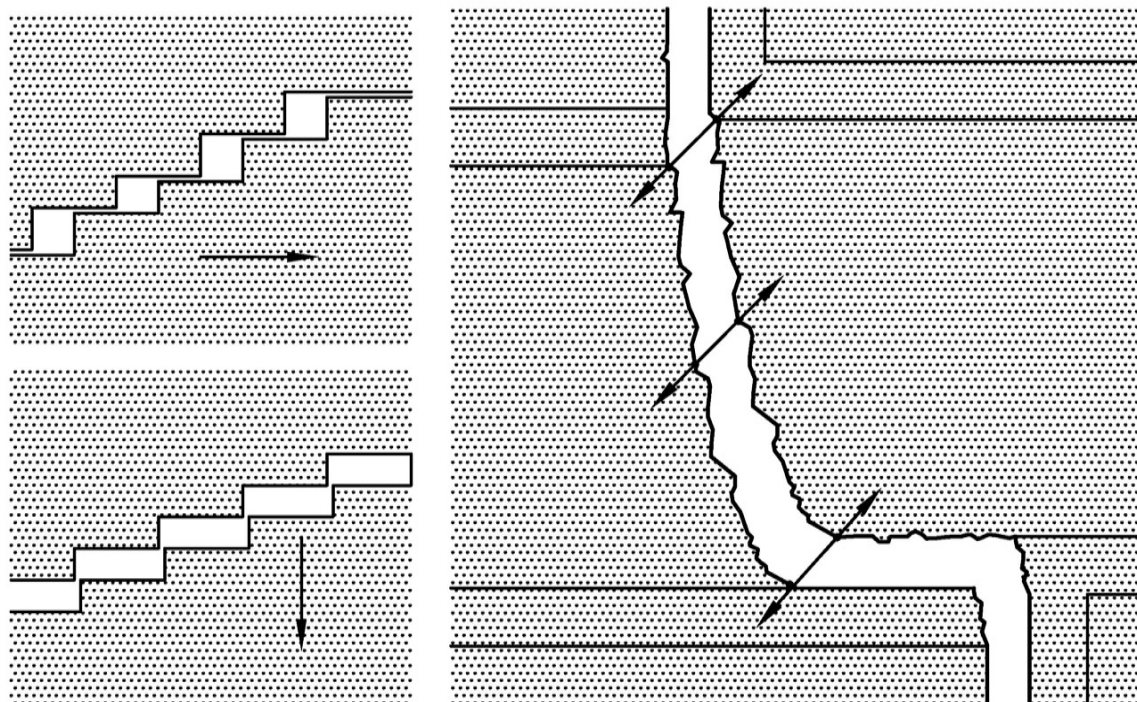


Fig. 6.4 eksempler på undersøgelse af bevægelsesretninger i revnebilleder

Analyse af revnebilledet omfatter:

- vurdering af om revnerne indgår i en „mekanisme“, dvs. om en del af bygningen bevæger sig som en sammenhængende blok i forhold til en anden del af bygningen
- fastlæggelse af de mulige årsager til revnerne
- vurdering af den fremtidige udvikling i revnebilledet
- vurdering af risikoen, der er forbundet med revnens tilstedeværelse.

Mekanisme.

De alvorligste revnebilleder viser ofte dannelse af en såkaldt „mekanisme“, dvs. at en del af bygningen har flyttet sig som en blok i forhold til den øvrige del. En mekanisme kendes på, at revnerne dels er gennemgående dels afskærer en del af bygningen med systematisk varierende revnevidder.

Revnerne følger ofte bygningens svage steder, for eksempel omkring vindues- og døråbninger. Mekanismedannelse vedrører ofte kun en komponent i den bærende konstruktion.

Den kan dog omfatte større dele af bygningen. Dannelse af mekanismer kan være tegn på bæreevnesvigt og må undersøges nærmere.

Et eksempel på en sådan undersøgelse er en beregning af hvælvets reaktion på understøtningen, for at afsløre, om tryklinien ligger for yderligt i murværket. Denne beregning gennemgås i kapitlerne 7, 8 og 9.

## 6.6 Kort omtale af tagværksundersøgelser

Tagværkets opbygning og svækkelser undersøges. Hvis der foreligger registreringstegninger af tagkonstruktionen, anvendes disse som grundlag for en systematisk gennemgang. Hvis dette ikke er tilfældet, udføres en spærplan, og spærfagernes variationer tegnes i opstalt. Er spærfagene forsynet med en indgraveret nummerering, overføres denne til tegningsmaterialet. Tagkonstruktionen gennemgås på følgende områder:

- Hvordan optager tagværket de belastninger, det udsættes for
- Hvilke påvirkninger (træk, tryk, bøjning eller kombinationer) udsættes de enkelte konstruktionsdele for
- Hvilke påvirkninger sker der på samlingerne
- Hvilke belastninger overfører tagværket til sine omgivelser (facader, bjælkelag), og hvor overføres de
- Spærfagernes stabilitet i husets længderetning skal kontrolleres med hensyn til om funktionen er intakt, og samlingernes stivhed er tilstrækkelig.

## 6.7 Opmålinger af tag, hvælv, mure og fundamenter

Omfanget af de nødvendige opmålinger og deres præcision gennemgås og tilrettelægges, så disse kan danne grundlag for statiske analyser. Landmåleren varetager ofte de mere avancerede opmålingsopgaver og har det mest avancerede udstyr. Men landmåleren besidder ikke den byggetekniske viden. Den praktiske opmåling kan varetages af andre, men kan ikke løsrives fra ingeniørens viden og analyse.

Registreringen er grundlaget for efterfølgende konklusioner og beslutninger. Ingeniøren skal ikke overtage arkitektens rolle i bygningsopmålingen, men ingeniøren er på den anden side nødt til at kunne se helheden i den historiske bygning for at kunne foretage en beregningsmæssig analyse. Et eksempel på denne nødvendighed er beregningen af tryklinjen i det murede hvælv. Bereg-



ningen af tryklinjen kræver den meget detaljerede opmålingstegning placeret i de bygningsudsnit, der bedst afdækker den givne problemstilling.

Det er vigtigt, at man under opmålingen er sig bevidst, at opmåling ikke skal rentegnes, men kunne bruges direkte, som den er. Derfor tegnes opmålingerne også i det rigtige størrelsesforhold frem for at lave en løs skitse og indføje målene på den. Tegninger med opmålingsresultater gøres færdige på stedet. Der ved sikres, at alle nødvendige mål er taget, og at eventuelle uoverensstemmelser bliver afklaret straks. Tegningsmæssigt kan opmålingen inddeles i tre kategorier af nøjagtigheder:

1. Skitseopmåling. Enkel opmåling og skitsering med støtte i nogle få hovedmål. Alle mål tages med målebånd eller optisk måleudstyr og afrundes til nærmeste cm. Denne opmåling er egnet til registrering af fundamenter ved prøveudgravninger eller til at danne sig et overblik over bygningsdele som eksempelvis et tagværk.
2. Skematisk opmåling. Enkel opmåling og skitsering som skitseopmålingen, men med alle nødvendige mål for at kunne udarbejde fyldestgørende arbejdstegninger.
3. Detaljeret opmåling. En meget grundig opmåling, der også registrerer skævheder og niveauforskelle nøjagtigt. Opmålingen anvendes til krævende projekteringsopgaver, for eksempel optegning af tryklinjen i et muret hvælv.

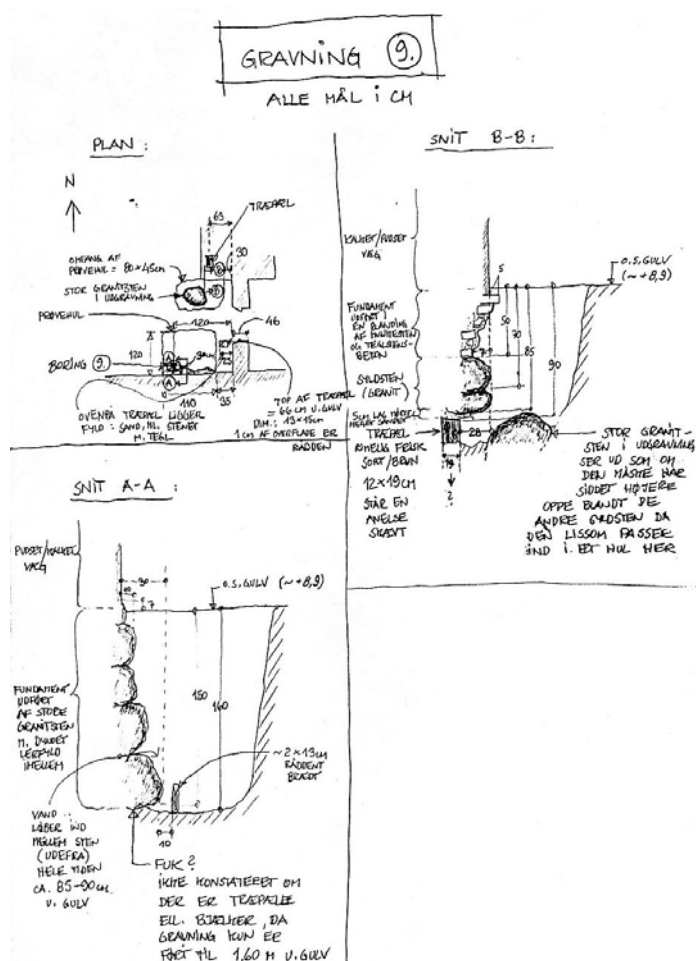


Fig. 6.5 Skitseopmålinger af prøveudgravninger ved fundament. Opmålingen skal ikke rentegnes, men skal kunne bruges direkte som den er. Opmålingerne tegnes ud i fast størrelsesforhold. Skitsen påføres bemærkninger om iagttagelser, der ikke lader sig tegne, for eksempel om jordtype eller fugernes beskaffenhed.

Skitseopmålinger kan anvendes til en afgrænset undersøgelse, eller til understøtning af den indledende besigtigelse.

Skematiske og detaljerede opmålinger indebærer typisk både planer og opstalter samt et eller flere tværsnit, længdesnit og diagonalsnit i bygningen. I snittegninger klarlægges rumhøjder, bygningens konstruktioner med fundamenter, ydermure, etageadskillelser og tagkonstruktion.

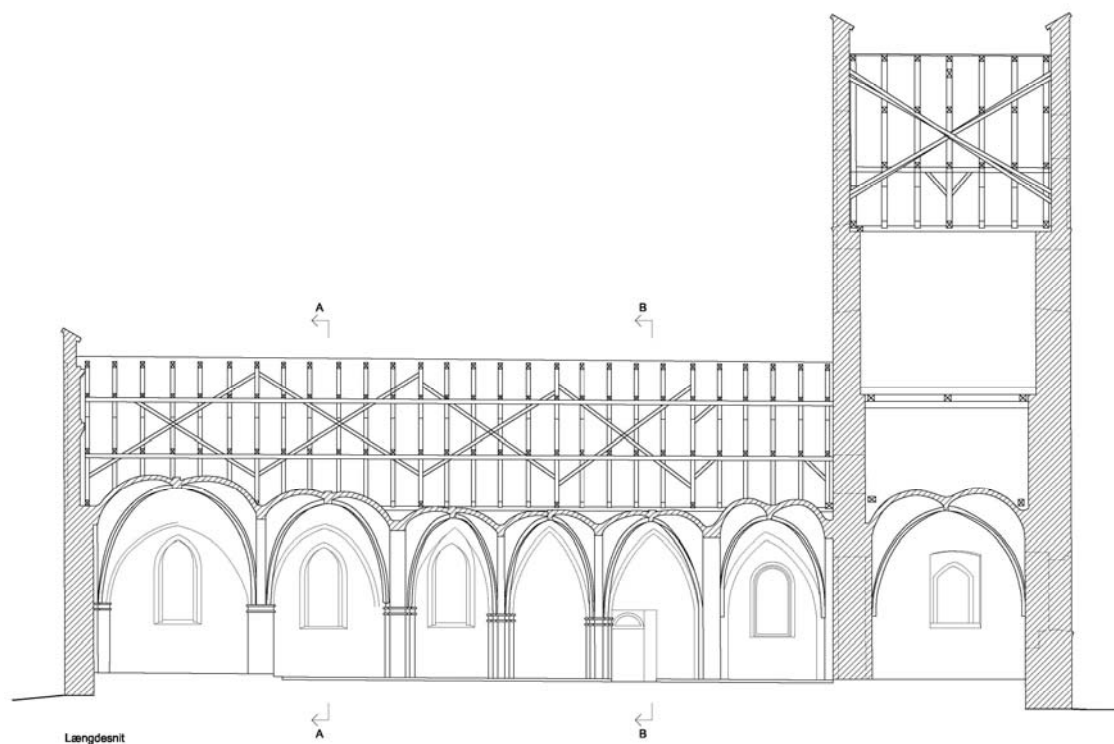


Fig. 6.7 Høje Tåstrup Kirke, længdesnit. Et eksempel på hvordan en nutidig opmålingstegning kan se ud, når den skal danne grundlag for statiske beregninger.

I almindelighed vil det være passende at anvende størrelsesforholdet 1:50 til gengivelse af planer og facader. Kun ved rene oversigtstegninger kan det anbefales at gå ned i mindre målestoksforhold. Snittegning skal give oplysning om

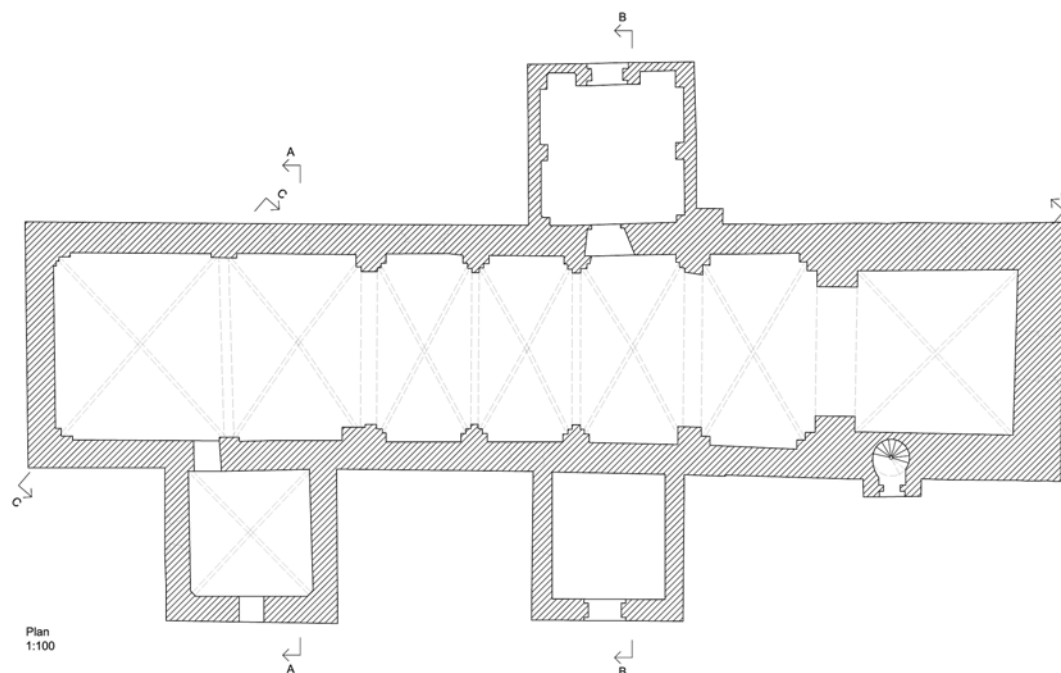


Fig. 6.8 Høje Tåstrup Kirke, plan. Planen angiver placeringen af det diagonalsnit, hvor tryk-linjen i hvælvet beregnes. Planen anvendes, i den forbindelse, til beregning af lastoplandet.

alle relevante bygningsdele, dimensioner på disse samt sætte dem i indbyrdes relation.

Snittegningen er derfor meget væsentlig, især for beregningen af tryklinjernes placering i de murede konstruktioner. Målestoksforholdet til snitopmåling kan med fordel vælges som 1:50 eller for små kirker 1:20.

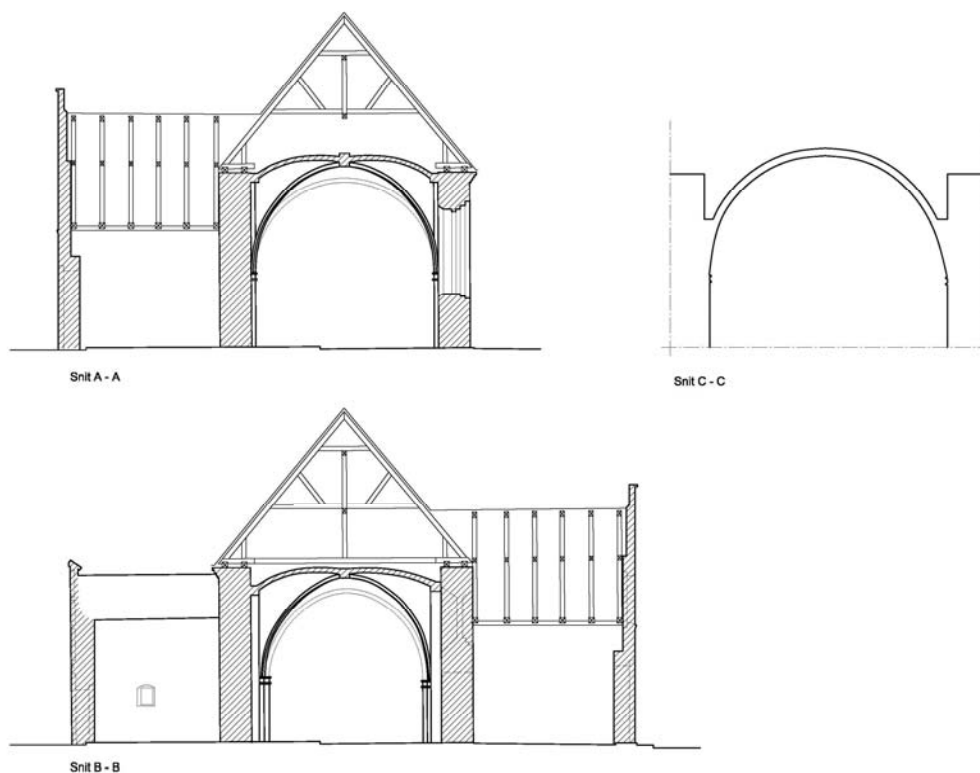


Fig. 6.8 Høje Tåstrup Kirke, tværsnit og diagonalsnit. Diagonalsnittet skal meget nøje gengive den faktiske geometri, for at den beregnede tryklinje (se efterfølgende) kan placeres så realistisk i hvælvets snit, som det lader sig gøre.

## 7. Statiske modeller

### 7.1 Indledning

Middelalderkirkerne hører til en særlig gruppe af konstruktioner i statisk forstand. Når man som ingeniør skal beregne en konstruktion er det første problem at opbygge en relevant statisk model. Den sædvanlige praksis er at forestille sig bygværkets konstruktionselementers systemlinjer forbundne enten i stive forbindelser eller ved hængsler (charnierer).

Der er principielt 3 kategorier. Disse kan simpelt illustreres ved nedenstående tre figurer.

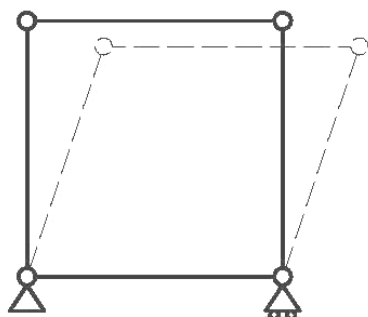


Fig. 7.1

Ovenstående konstruktion kaldes geometrisk ubestemt statisk overbestemt. Og er tilsyneladende uinteressant som konstruktion.

Efterfølgende konstruktion er geometrisk bestemt og statisk bestemt.

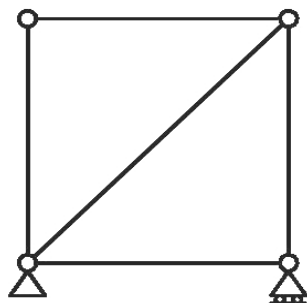


Fig. 7.2



Endelig er den sidste konstruktion geometrisk overbestemt og statisk ubestemt.

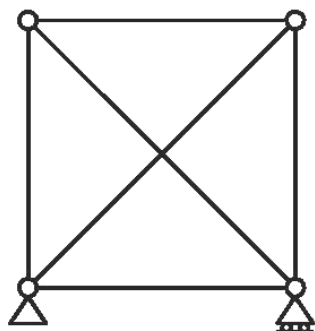


Fig. 7.3

De 2 sidste konstruktionstyper kan kodes ind i en computer. En statisk beregning er derfor en elementær opgave.

Men middelalderkirkerne hører til den geometrisk ubestemte statisk overbestemte kategori. De kan derfor ikke umiddelbart beregnes ved hjælp af almindelige kendte computerprogrammer.

Den første konstruktion kan jo faktisk godt overføre visse laster. F.eks. lodrette kræfter på overliggeren, men så snart der kommer en vandret kraft vil konstruktionen kollapse.

Hvis en sådan konstruktion skal overføre en samtidig lodret og vandret last må søjlerne skulle stå skrå i præcis den retning som er den vektorielle sum af den lodrette og vandrette kraft.

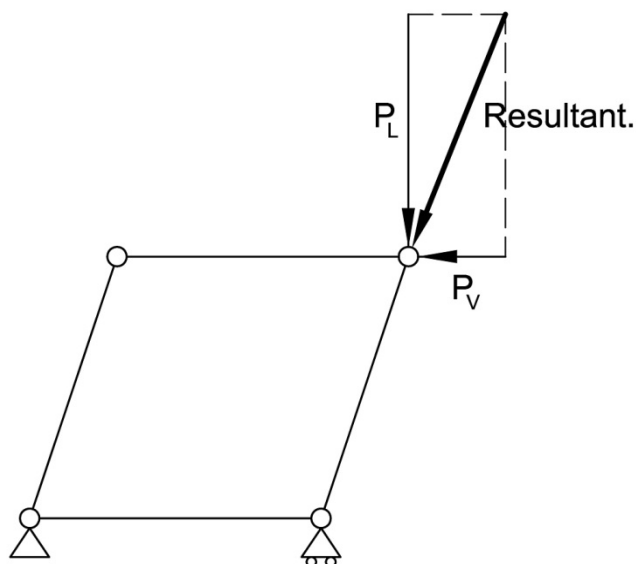


Fig. 7.4

Problemet med konstruktionen er blot, at den skal ændre geometri hver gang kraftpåvirkningen ændres. Man siger, at det er statikken, der bestemmer geometrien. Det er baggrunden for betegnelsen geometriske ubestemt statisk overbestemt.

Pointen er naturligvis, at bygværker ikke er systemlinjer, men reelt har en dimension og en egenvægt.

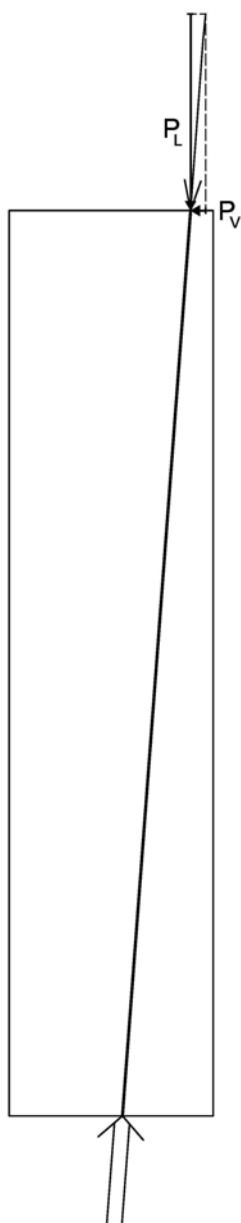


Fig. 7.5

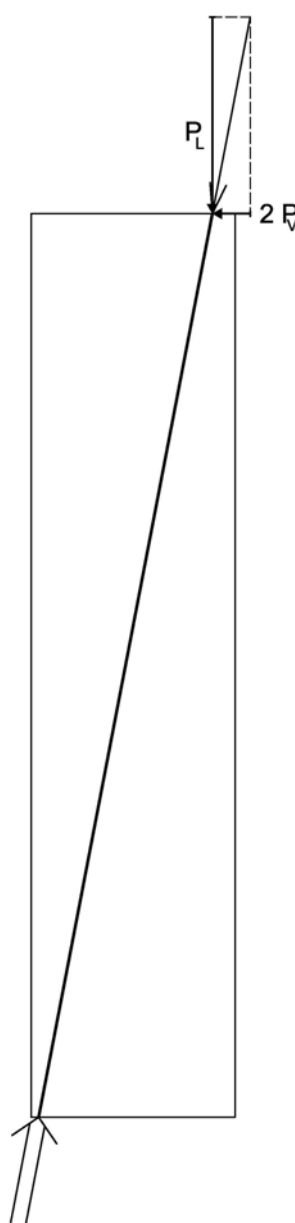


Fig. 7.6

Hvis bygværket til venstre (figur 7.5) er påvirket af en lodret kraft  $P_L$  og en vandret kraft  $P_V$ , kan vi se, at trykket kan følge en skrå linje indenfor bygværkets udstrækning. Man kan sige at den skrå tryklinje repræsenterer den egentlige konstruktions systemlinje.

I situationen til højre (figur 7.6) er den vandrette last den dobbelte og det betyder, at tryklinjen bliver mere skrå. Den egentlige konstruktions systemlinje æn-

drer retning. Men dette kan lade sig gøre så længe den skrå linje ligger indenfor bygværkets udstrækning.

Jo større den lodrette last er, jo større vandret last kan bygværket klare, så længe at murværkets trykstyrke ikke overskrides.

Det er altså reelt bygningens egenvægt, der er afgørende for bygningens stabilitet for vandrette påvirkninger. Dette er baggrunden for, at bygninger af denne type kaldes gravitationsstabile.

Ovennævnte ræsonnement er i al sin enkelthed princippet i tryklinje metoden. I de efterfølgende afsnit gennemgås hvordan denne metode konkret bruges som analysemetode på middelalderkirker.

Det er kendetegnende for middelalderkirker, at de normalt er opført i materialer (sten og mørtel), hvor der ikke er nogen vedhæftning i fugerne, hvilket vil sige, at konstruktionen ikke kan overføre trækspændinger. Styrkeparametrene  $f_{xk1}$ ,  $f_{xk2}$ ,  $f_{vk0}$  som normalt anvendes i forbindelse med den statiske projektering kan derfor sættes til 0 MPa.

Bæreevnen for denne type konstruktioner kan således kun etableres ved, at der i ethvert tværsnit er trykspændinger som normalt fremkommer gennem egenvægten, som beskrevet indledningsvist.

Analysen af disse konstruktioner foretages ved hjælp af tryklinjer, som repræsenterer den resulterende kraft (resultanten) i ethvert snit i konstruktionen. Filosofien i analysen er baseret på, at tryklinierne skal ligge indenfor den geometriske konstruktions grænseflader. Dette begreb er velkendt fra buer, men for disse konstruktionstyper anvendes denne metodik for alle konstruktionsdele fra tag til fundamentsunderkant.

I afsnit 7, 8 og 9 behandles statiske modeller, beregningsmetoder og gennemregnede eksempler. Der tages udgangspunkt i ”håndregninger”, da der i skrivende stund (år 2011) ikke findes noget rimelig håndterlig edb-program.

Tagkonstruktionen behandles ikke specifikt i dette skrift, da denne normalt er en ”traditionel” konstruktion i statisk henseende. Reaktionen udregnes normalt via et Finite Element – program (rammeprogram eller lignende). Se dog kapitel 10.4 om tagværket.

Specielle fundamentsforhold for gravitationsstabile konstruktioner (fx sidetryk) behandles i afsnit 9.3 Krydshvælv i Tåstrup Kirke.

## 7.2 En typisk konstruktion

En typisk konstruktion, hvor alle relevante problematikker er repræsenteret, er en række krydshvælv i et skib eller kor. Konstruktionselementer ses på efterfølgende figur:

*Kappen:* Den tynde skal mellem ribberne, der udgør selve udstrækningen af hvælvet. Kappen har normalt en tykkelse svarende til  $\frac{1}{2}$  munkesten (cirka 130 – 150 mm). Enkelte kapper kan have en tykkelse svarende til  $\frac{1}{1}$  munkesten (cirka 260 – 300 mm). Kappen viderefører kræfter til ribberne, der ofte er en integreret del af kappen

*Ribber:* Ribben er buer, der fører belastningerne fra kappen ned til facadepillerne, ved sædvanlig buevirkning. Ribben kan ligge under kappen (fx i krydshvælv) eller over kappen (fx i tøndehvælv)

*Gjordbuer:* Buen mellem facadepillerne vinkelret på facaden. Deltager i nogen tilfælde også i optagelse af kræfterne fra hvælvet (dette emne er yderligere uddybet i afsnit 7.7)

*Facademure:* Fører kræfterne fra ribberne, gjordbuen, taget, etc. til fundamentet. Konstruktionen er vist på efterfølgende figur.

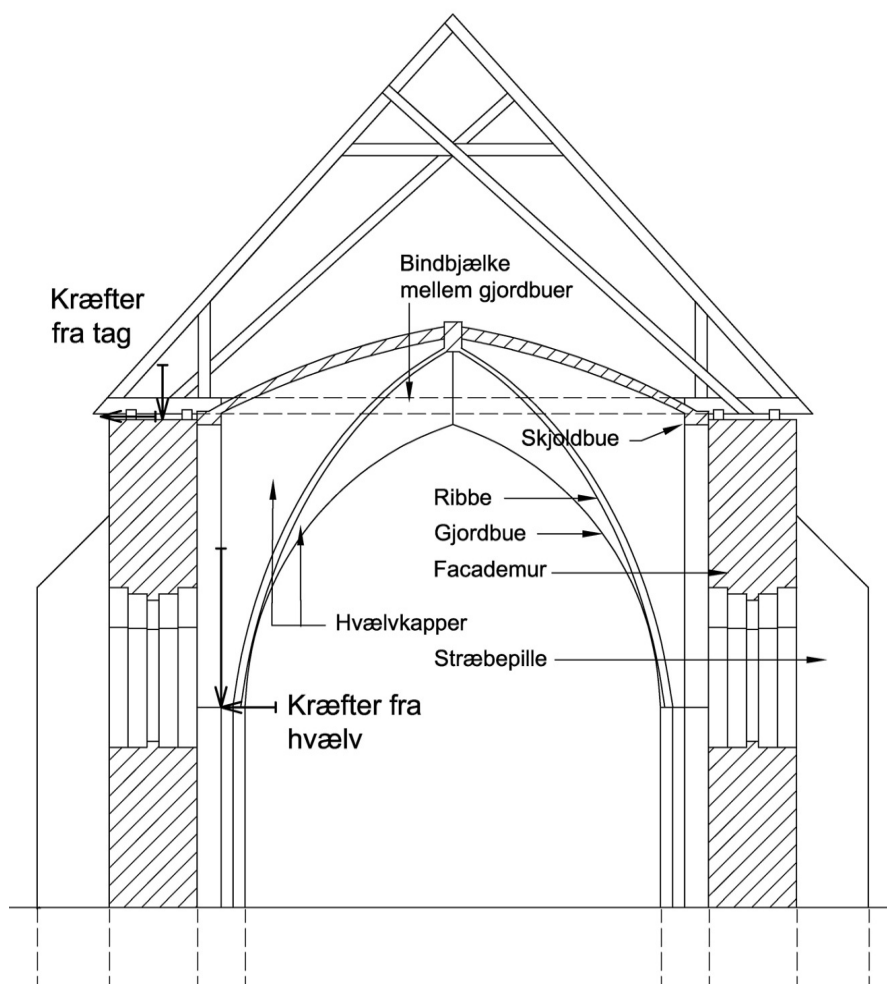


Fig. 7.7

Bemærk for denne typiske konstruktion er bindbjælkerne i tagkonstruktionen fjernet, undtagen ud for jordbuerne, hvilket medfører en uensartet vandret påvirkning af væggen/vægpillen, som vist på efterfølgende figur.

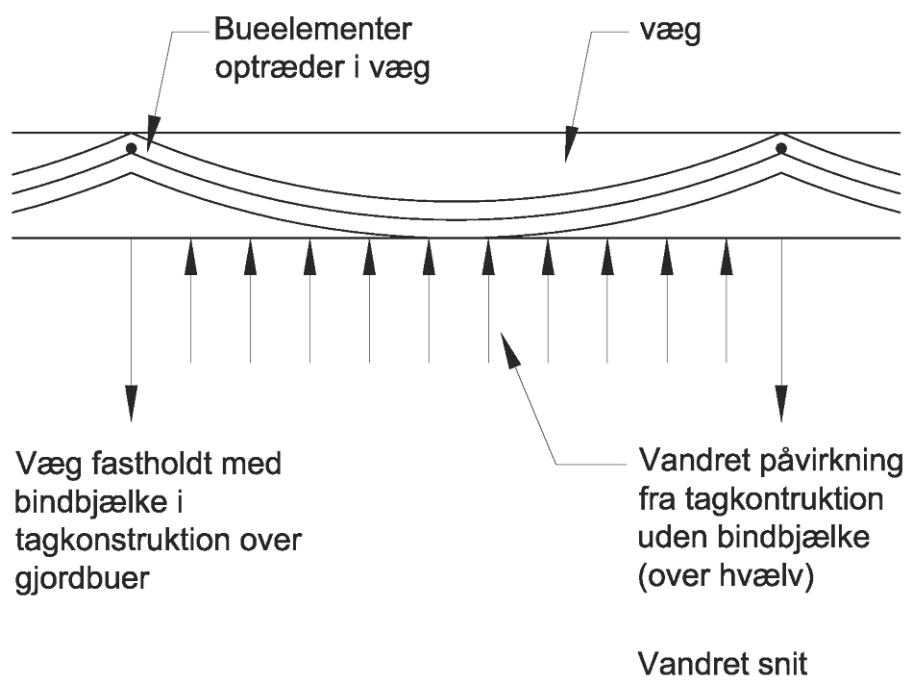


Fig. 7.8

### 7.3 Skjulte buer/ bueelement

En bue er nok det mest velkendte eksempel på et konstruktionselement, hvor en analyse af tryklinjen normalt anvendes. En skjult bue defineres normalt som en del af et konstruktionselement, der kan analyseres som en normal bue, men som ikke geometrisk (og synligt) optræder som en bue. Dette kan fx være en tænkt ”strimmel” i et hvælv, spændende fra ribbe til ribbe eller den øverste del af vægfeltet, der i områder er påvirket af vandrette kræfter fra tagkonstruktionen, men fastholdt vandret over jordbuerne (som vist på ovenstående figur 9.2).

I dette skrift defineres en sådan tænkt strimmel som et bueelement.

### 7.4 Fra 3D til 2D konstruktionselementer

Når en håndregning er den valgte fremgangsform, er den eneste praktisk anvendelige metode at udforme en statisk model, hvor alle 3-dimensionale konstruktionselementer repræsenteres som 2-dimensionale.

3 dimensionale konstruktioner defineres ved ikke at kunne beskrives i planen. Dette kan for eksempel være et hvælv som vist på figur 7.13 (I afsnit 7.7 gennemgås hvorledes et hvælv modelleres til 2-dimensionale elementer).



Når konstruktionen beskrives som en række 2-dimensionale elementer, kan bæreevnen analyseres via tryklinjer.

## 7.5 Tryklinjer

En grafisk og analytisk metode til bestemmelse af tryklinjer er angivet i afsnit 8. I dette afsnit beskrives blot de overordnede principper.

Tryklinjen repræsenterer placering og retning af den indre snitkraft, således at de statiske ligevægtsbetingelser i ethvert snit er opfyldte.

Ofte regnes blot med, at tryklinjen skal ligge indenfor den geometriske afgrænsning af konstruktionen. Det vil sige, at spændingerne ikke beregnes, da disse normalt er meget små.

Denne indgangsvinkel kan dog være lidt dristig, såfremt tryklinjen ligger helt ude ved kanten af konstruktionen. Her vil trykspændingerne i princippet blive uendelige, da spændingerne skal bestemmes ud fra det symmetriske tilgængelige areal omkring tryklinjen. Se efterfølgende figur, skitse 4.

Hvorvidt de faktiske spændinger skal bestemmes må afgøres af den foreliggende problemstilling.

Når tryklinjen ligger indenfor kerneradius (Kerneradius = modstandsmoment/tværsnitsareal se fig. 7.9), kan forventes et stort set revnefrit tværsnit, da der kan opstilles en spændingsfordeling med tryk over hele tværsnittet, der er ækvivalent med tryklinjens resultant vinkelret på tværsnittet. Se efterfølgende figur, skitse 1 og 2.

Når tryklinjen er udenfor kerneradius, men indenfor den geometriske konstruktion må forventes revner i konstruktionen, da der kun kan opstilles en spændingsfordeling med trykspændinger over en del af tværsnittet og 0-spændinger i resten. Denne spændingsfordeling er en plasticitetsteoretisk løsning, der i praksis betyder, at konstruktionen først har ”prøvet” at etablere ligevægt med en tilnærmelsesvis trekantet fordeling med trækspændinger i en del af tværsnittet. Disse trækspændinger vil hurtigt overstige materialets trækstyrke, hvorefter denne ny tilnærmede spændingsfordeling, som vist på efterfølgende figur skitse 3 og 4, fremkommer og medfører revner i en del af tværsnittet. Konstruktionen er, på trods af revnerne, stabil. Såfremt revnerne er indvendige vil de normalt kun være af kosmetiske art. Såfremt revnerne er udvendige, vil indtrængende vand og fugt kunne medføre frostskafer i murværk og råd i trækonstruktioner.

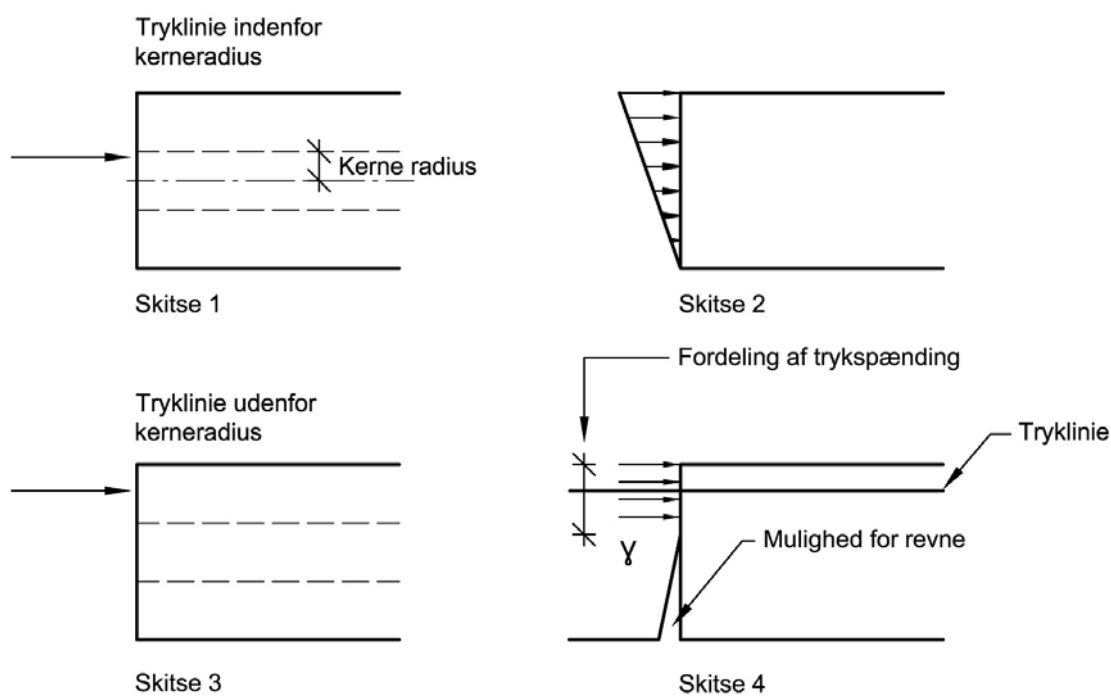
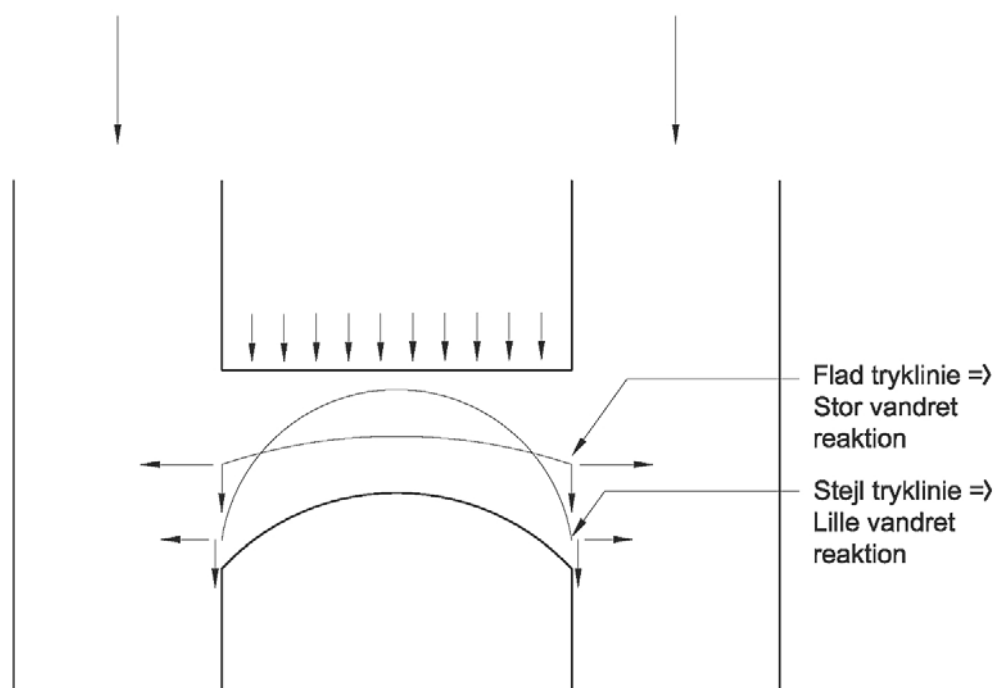


Fig. 7.9

En tryklinje, der er i ligevægt med de ydre kræfter kan normalt placeres på flere måder. Dette er illustreret på efterfølgende figur, med en stejl og en flad tryklinje, som begge repræsenterer indre snitkræfter, der overalt er i ligevægt med laster og reaktioner.



Den viste bue kan i kombination med andre buer påvirke en pille, hvor kræfterne tænkes ført til fundamentsunderkant.

Ved analysen vælges den tryklinje, der er mest gunstig for konstruktionen som helhed (hvilket dog i praksis kan være vanskelig gennemskuelig ved en håndregning).

Denne indgangsvinkel bygger på plasticitetsteoriens nedreværdisætning, der i princippet angiver, at når der vælges en statisk tilladelig kraft- / spændingsfordeling, svarer den fundne bæreevne mindst til konstruktionens faktiske bæreevne.

I praksis vil tryklinien, som udgangspunkt, i den enkelte bue vælge den samlet set ”stiveste” løsning. Optræder der for eksempel, fra nabo buer, kraftige vandrette reaktioner kan en flad tryklinje være relevant for en gunstig fordeling (se efterfølgende figur, hvor buer af forskellige størrelse er placeret overfor hinanden på en høj murpille). Over buerne er tryklinien fra de overliggende laster cirka midt i pillen og tryklijens retning ønskes ikke ændret nævneværdigt, da det vil give problemer ved bunden af konstruktionen.

Tryklinien i venstre og højre bue, som begge har et stort spænd, vælges derfor stejl således, at den vandrette reaktion minimeres, mens tryklinien i den midterste bue vælges flad således, at den vandrette reaktion herfra kan modsvare de vandrette reaktioner fra venstre og højre bue.

Bemærk, at såfremt der i buens geometriske afgrænsning kan indlægges en vandret linje, er der i princippet ingen begrænsninger for den vandrette reaktion, idet tryklijens grænsetilfælde bliver den rette linje. Derfor er det også rimelig uproblematisk at have buer med et lille spænd mellem buer med et stort spænd.

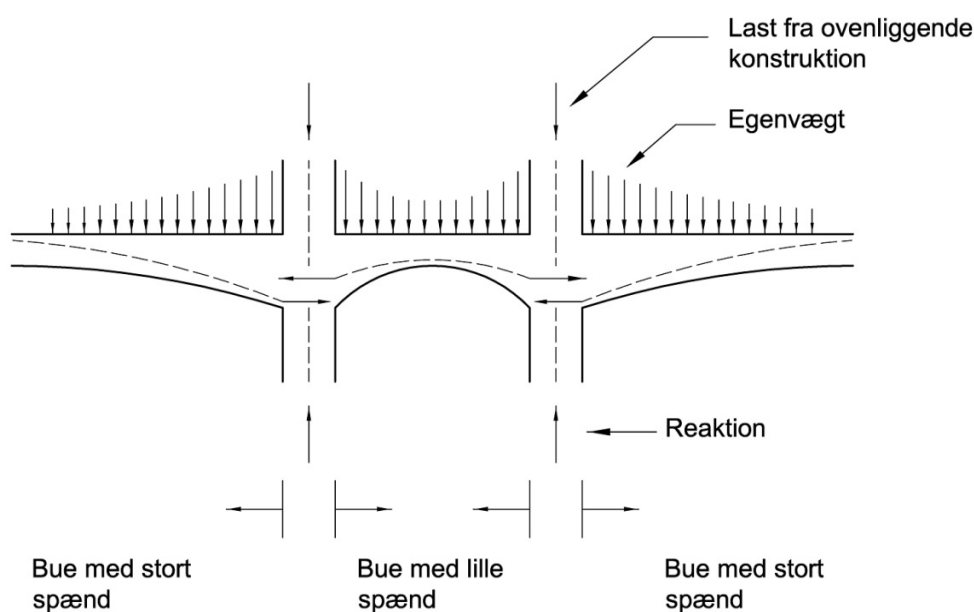


Fig. 7.11

## 7.6 Tværsnitsundersøgelse og styrkeparametre

Som beskrevet i foregående afsnit er styrkeparametre normalt ikke relevante, da det ofte forudsættes at bøjningstrækstyrken ( $f_{xk1}$ ) = 0 MPa og trykstyrken ( $f_k$ ) =  $\infty$ , hvorved en analyse, der viser, at en tryklinje, der ligger indenfor det geometriske tværsnit giver en tilstrækkelig bæreevne.

Dog skal der i nogle tilfælde tages hensyn til, at tryklinjen skærer svage fuger under en vinkel  $\neq 90^\circ$ . Herved kan spændingerne i denne fuge være dimensiongivende (se efterfølgende figur)

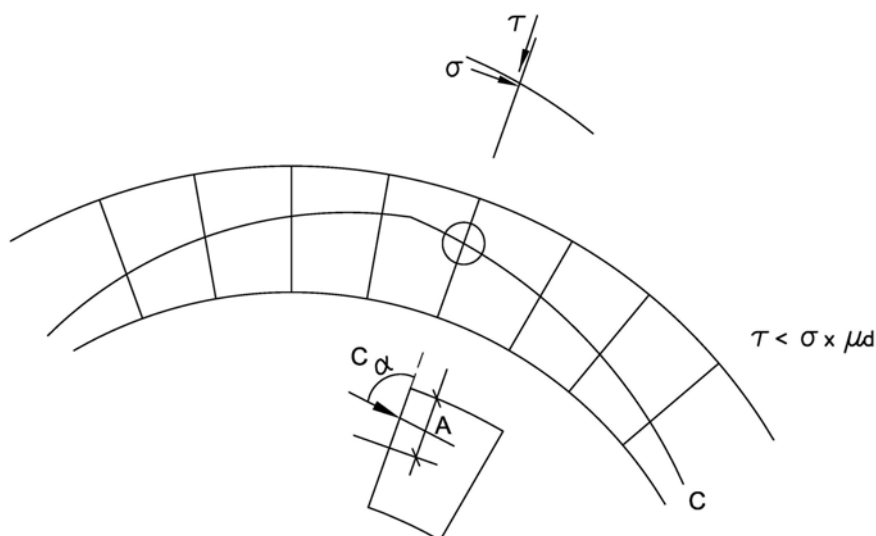


Fig. 7.12

Tryklinjen regnes at passere fugen under en vinkel  $\alpha$  (hvor  $\alpha < 90^\circ$ ), hvorved følgende spændingerne kan bestemmes.

Følgende parametre introduceres:

$C$  = Kraften i tryklinjen

$A$  = Det symmetriske, tilgængelige areal omkring tryklinjen

Heraf fås:

$$\sigma = C/A \times \sin(\alpha) \quad (\text{trykspændingen})$$

$$\tau = C/A \times \cos(\alpha) \quad (\text{forskydningsspændingen})$$

Bæreevnen med hensyn til forskydning er tilstrækkelig, såfremt følgende ulighed er opfyldt:

$$\tau < \sigma \times \mu_d \quad (\mu_d \text{ er den regningsmæssige friktionskoefficient})$$

hvoraf det ses, at  $\cot(\alpha) < \mu_d$

For kalkmørtel kan iht. DS/INF 167, tabel 3 regnes med følgende værdi for  $\mu_d$ .

$$\mu_d = 0,6/1,3 = 0,46$$

Friktionskoefficienten for andre mørteltyper, knas fuge, etc. regnes større end eller lig med friktionskoefficienten for kalkmørtel.

Heraf fås at  $\alpha > 65^0$

Det vil sige, at følgende enkle regel kan opstilles:

Krydser tryklinjen en svag eller en knas fuge uden sidestøtte må vinklen mellem tryklinjen og fuge ikke være mindre end  $65^0$

En mere kompleks brudflade med sidestøtte er behandlet i afsnit 7.9.

### **Geometri**

Geometrien for de aktuelle buer og hvælve kan sjældent beskrives matematisk, som fx en parabel, cirkel eller ellipse (og for hvælve) en rotationssymmetrisk parabel, cirkel eller ellipse, og må normalt fastlægges gennem geometriske målinger in-situ og deraf følgende optegninger (dette emne er beskrevet nøjere i afsnit 6.1).

## **7.7 Analyse af hvælv**

I dette afsnit behandles det traditionelle krydshvælv, som er vist på efterfølgende figur. Der findes en række andre hvælve, som beskrevet i afsnit 4.3. Analysen af disse hvælve foretages efter samme systematik som angivet i dette afsnit. Hvælvet repræsenterer stort set alle problemstillinger omkring de statiske modeller og behandles derfor overordnet i dette afsnit.

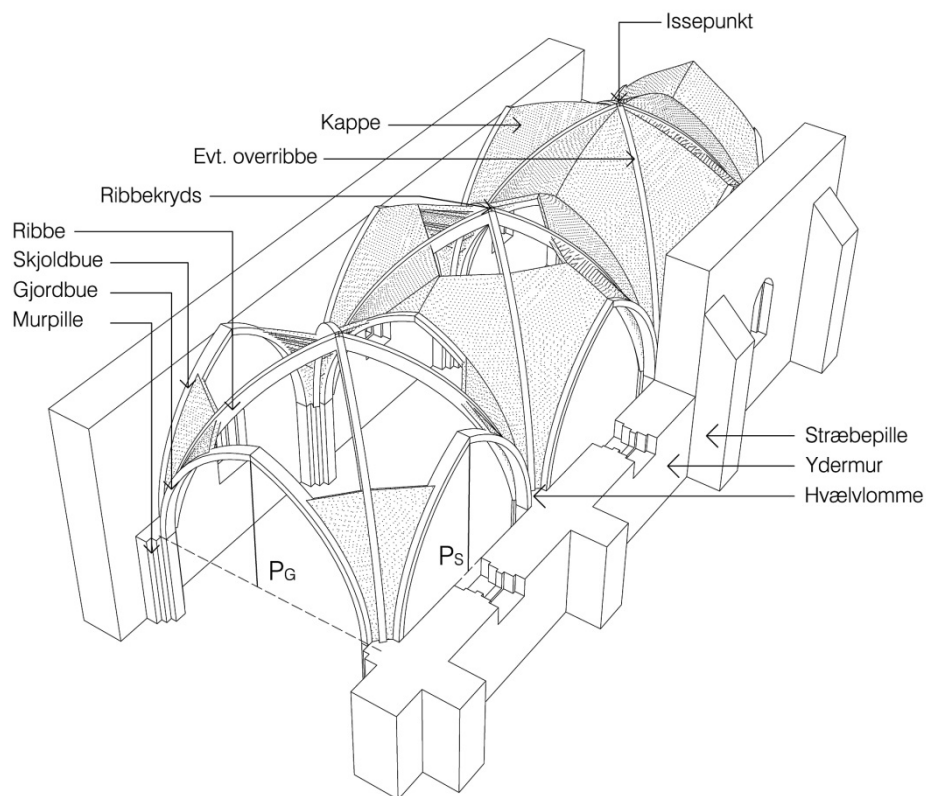


Fig. 7.13

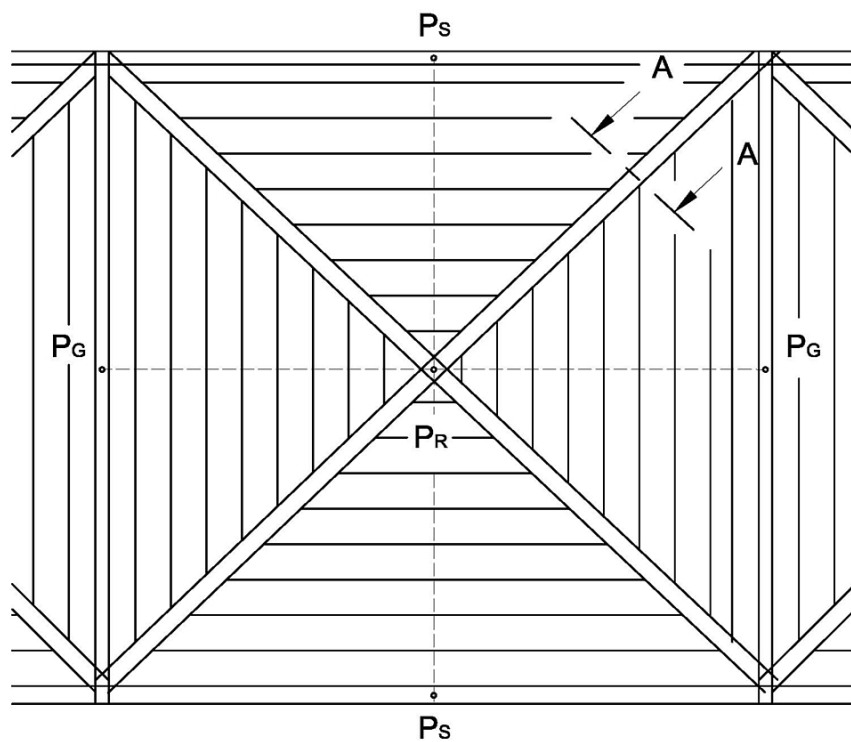


Fig. 7.14

I figur 7.14 er gjordbuen, skjoldbuen og ribberne markeret med dobbelt optrukne linjer, mens kappen er markeret med enkelt optrukne linjer. Hvælvet regnes dobbeltsymmetrisk.



### Optagelse af belastninger

Det viste krydshvælv støder op til et nabokrydshvælv ved jordbuen i begge sider. Disse nabokrydshvælv regnes identisk med det viste krydshvælv. Skjoldbuen regnes derimod ikke understøttet vinkelret på buens plan.

Til behandling og beskrivelse af krydshvælvet indføres en række parametre:

$P_G$  : Pilhøjde af jordbuen

$P_S$  : Pilhøjde af skjoldbuen

$P_R$  : Pilhøjde af ribbe (buen)

Disse højdepunkter af buerne benævnes isse – punktet.

I nogle tilfælde er  $P_G = P_S = P_R$ . I andre tilfælde er  $P_R > P_G$  og  $P_R > P_S$

I mellem ribberne buer kappen. Det vil sige, at de enkeltoptrukne linjer buer ud af det viste plan, således at højden på kappen ved den stiplede linje er større end ved ribben.

Kappen kan således betragtes som en række bueelementer parallel med de fuldt optrukne linjer, der afleverer reaktionerne til ribberne (se efterfølgende figur 7.15).

Fra bueelementerne afleveres således:

- en vandret (parallel med ribben) kraft ( $p_{vp}$ )
- en vandret (vinkelret med ribben) kraft ( $p_{vv}$ )
- en lodret kraft ( $p_L$ )

Er kappen nogenlunde symmetrisk ophæver  $p_{vv}$  fra de hosliggende bueelementer hinanden og den resulterende belastning bliver  $2 p_{vp}$  og  $2 p_L$ .

Såfremt  $2p_{vp}$  er begrænset i forhold til  $2p_L$  og tryklinjen fra  $2p_L$  alene ikke er tæt på den geometriske afgrænsningsflade, kan der ses bort fra påvirkningerne fra  $2p_{vp}$ . Ellers må påvirkningerne fra  $2p_{vp}$  medtages i beregningerne.

Disse beregninger kan vanskeligt foretages i hånden og må foretages via computer.

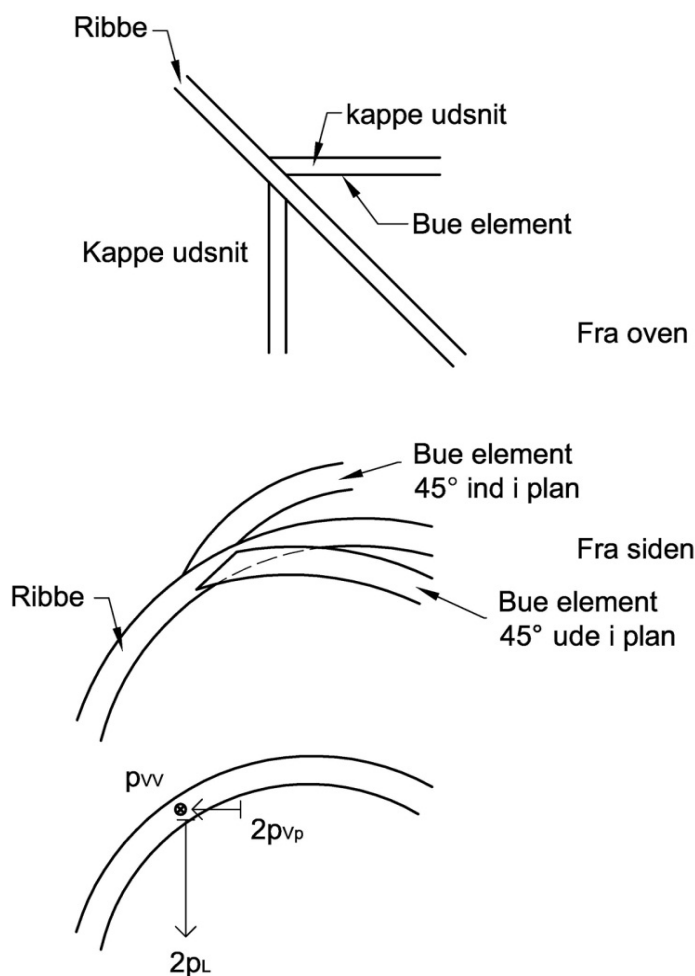


Fig. 7.15

Det skal bemærkes at for danske middelalderhvælve er antagelsen om at  $2p_{vp}$  er begrænset i forhold til  $2p_L$  en rimelig antagelse, fordi kapperne er temmelig kuppede. Dvs. at kapperne afleverer sin last på krydsribben under en stejl vinkel. Denne tilnærmelse er central for at kunne omskabe analysen fra 3D til 2D.

Elementer, der følger de stiplede linjer mellem  $P_R$  og  $P_G$  (eller  $P_S$ ) og parallelle linjer herimellem (dvs. kappen mellem ribben og skjold- eller gjordbuer) kan være ret eller krum. Denne krumning er således vinkelret på de før omtalte buelementer i mellem ribberne. (Ved den "stiplede linje" forstås således, i det følgende, kappen mellem ribben og skjold-/gjordbuerne).

Bemærk, at her anvendes betegnelsen krumning, idet kappen buer i 2 retninger. Begrebet krumning betragtes altså her som buelementer vinkelret på hinanden (3 dimensionale); mens buelementer i sig selv er 2 dimensionale. Begrebet krumning er dog kun af beskrivende art.

Såfremt den stiplede linje er ret, overføres kræfterne (typisk egenvægten af kappen) kun via buelementerne repræsenteret ved de fuldt optrukne linjer.

Såfremt den stiplede linje er krum, kan en del af lasten overføres via bueelementer parallel med den stiplede linje under forudsætning af, at der er modhold for de vandrette kræfter ved den bue, hvor kræfterne afleveres.

Skjoldbuer ved facaden har dog sjældent dette modhold og deltager derfor normalt ikke i optagelsen af belastningerne i større grad såfremt den stiplede linje er krum. I praksis ses ofte, ved denne type krumninger, en revne mellem skjoldbuen og facaden, på grund af udadskydende kræfter fra taget. Den manglende stivhed vinkelret på skjoldbuen medfører, at kræfterne i kappen finder andre og mere hensigtsmæssige veje. Se figur 7.16.

Bueelementerne parallel med den stiplede linje  $P_R$  til  $P_G$  i figur 7.14 kan overfø-

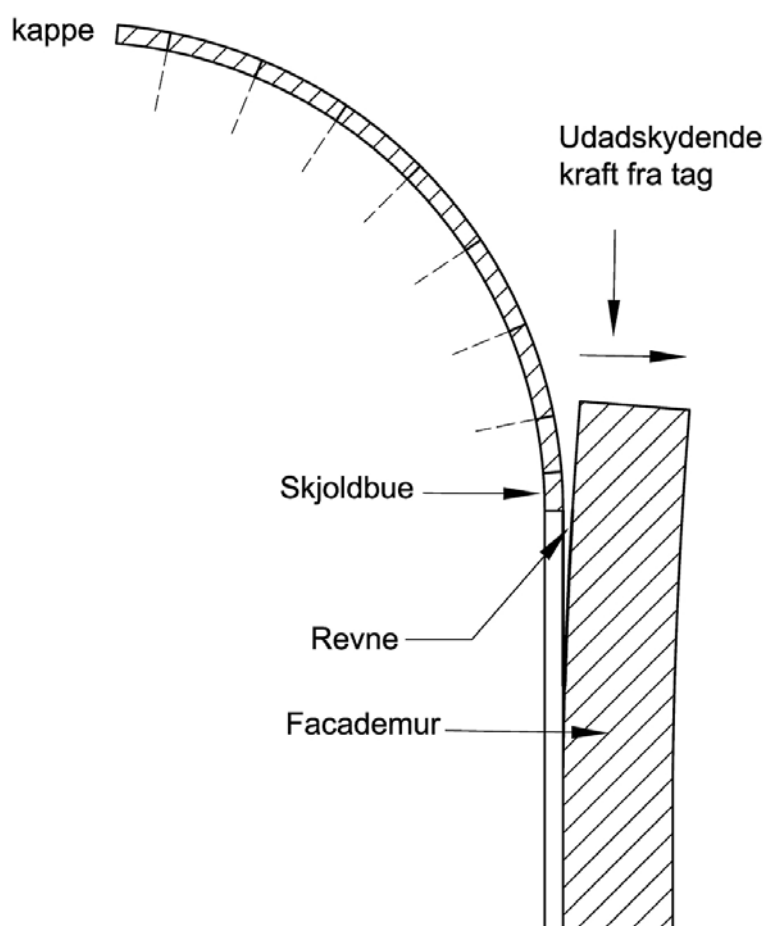


Fig. 7.16

re kræfter til skjoldbuen, da der gennem det hosliggende hvælv etableres modhold.

I praksis regnes normalt dog kun med bueelementer parallel med de fuldt optrukne linjer, således at egenvægten fra kappen føres til ribberne gennem disse bueelementer.

Dog skal der ved dimensionering af gjordbuen regnes med (utilsigtede) belastninger fra kappen, såfremt denne er krum langs den punkterede linje og belastes af hvælv på begge sider (hvorved der skabes et modhold og væsentlige lodrette reaktioner i praksis kan afleveres). Dette er illustreret på efterfølgende figur. Det vurderes, at ved analyse af gjordbuen medregnes den del af kappen, der svarer til belastningen fra  $1/3$  af kappen fra hver side. Det vil sige fra det trekantformede område bestemt ved afstanden ( $b_a$ ),

hvor:

$$b_a = 1/3 \text{ af længden mellem } P_G \text{ og } P_R$$

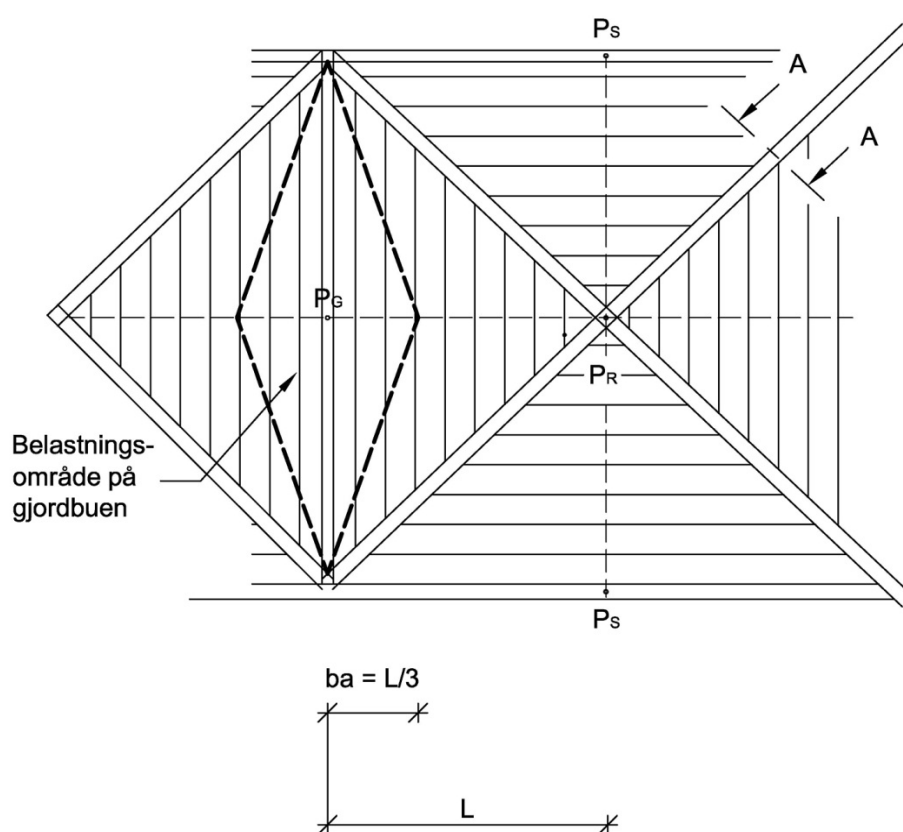


Fig. 7.17

### Tryklinje uden for ribberne

Ved bestemmelse af tryklinjen i ribberne i krydshvælv tages hensyn til, at ribben normalt er integreret med kappen således, at det statisk virker som ét tværsnit. Tryklinjen kan derfor i delområder ligge uden for selve ribben som illustreret på efterfølgende figur, idet trykspændingerne stammende fra kraften i tryklinjen kan optræde både i ribben og kappen.

Sammenvirkningen af ribben og kappen kan sammenlignes med en armeret beton T-bjælke, hvor der er sammenvirkning mellem overflangen og kroppen. I armerede beton T-bjælker regner man den medvirkende trykzone til 8 gange tykkelsen af overflangen. Af forsigtighedsgrunde bør udstrækningen af kappen, hvor der kan regnes sammenhæng med ribben, kun sættes til  $3t$  i begge sider.

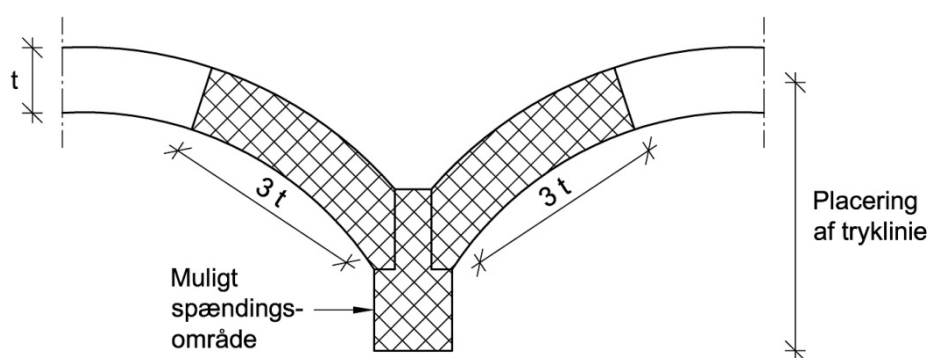


Fig. 7.18

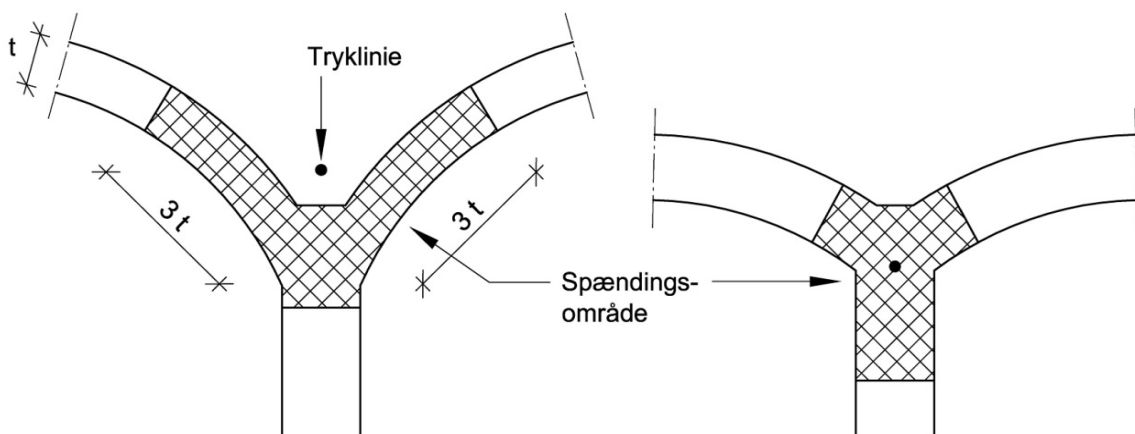


Fig. 7.19 Tv.: Mulig placering af tryklinjens ”tyngdepunkt” ved dybe hvælvkapper.  
Th.: Placering af tryklinje ved flade hvælvkapper.

Den øverste figur svarer til, at de stiplede linjer (og linjer parallelle hermed) er krumme, mens den nederste figur svarer til, at de stiplede linje er rette. Det ses, at ribben har størst betydning, hvor de stiplede linjer er rette.

### Analyse af hvælv. Sammenfatning i punkter

Ovenstående regler kan sammenfattes til følgende punkter ved analyse af et krydshvælv som vist på figur 7.7.

1. Geometri. Opmåling. Der foretages en opmåling af geometrien for relevante konstruktionsdele (kapper ribber, skjold- og gjordbuer, piller, etc). Da tryklinjer senere skal optegnes og det skal analyseres om tryklinjen kritiske steder ligger indenfor eller udenfor den geometriske afgrænsning af konstruktionsdelene er det derfor væsentligt, at opmålingen er rimelig præcis og giver et entydig overblik af konstruktionen (se afsnit 6.1).

2. Belastninger. Densiteter for de forskellige konstruktionsdele skal estimeres således, at belastninger i form af egenvægt kan bestemmes ud fra geometrien. Efterfølgende er angivet en tabel med densiteter, der kan anvendes til praktisk brug. Den kontinuerlige last opdeles i en række enkeltlaste. Antallet af enkeltlaste må vurderes i hvert enkelt tilfælde og skal have en størrelse således, at tryklinjen for den kontinuerlige last er nogenlunde sammenfaldende med tryklinjen for enkeltlasterne.

Det kan være omstændeligt at bestemme egenvægten af et krumt delelement nøjagtig. En enkel metode er blot at måle geometrien svarende til et rektangulært område og derefter multiplicere værdien med en estimeret buefaktor.

Den kan i princippet variere fra 1,0 hvilket svarer til en helt flad kappe til noget der nærmer sig forholdet mellem en diameter og en halv cirkelbue dvs.  $\pi/2 = \text{ca. } 1,6$ .

I praksis beror det på et erfaringsmæssigt skøn. En flad hvælvingskappe sættes til kappefaktor på 1,1 og en dyb hvælvingskappe sættes til 1,5.

3. Belastninger. Nytte- og naturlast. Andre typer belastninger end egenvægten er sjældent væsentlige i forbindelse med analyse af konstruktionselementerne. Disse skal dog principielt indregnes, vurderes og påsættes konstruktionen til ugunst. Nytte- og naturlaster findes i de relevante konstruktionsnormer (EN 1991, del 1 – 7)

4. 3 – dimensionale konstruktionsdele modelleres som 2 dimensionale efter systematik angivet i afsnit 7.7. Det vil sige i den 3 dimensionale konstruktion indlægges nogle tænkte parallelle linjer, der kan betragtes som bueelementer. Ved etableringen af disse bueelementer i den 3 dimensionale konstruktion skal det sikres, at der ved enderne af bueelementerne er vandret modhold.

5. Kritiske elementer udvælges og en tryklinje bestemmes. Tryklinjen søges indlagt således at:

- den ikke rammer den geometriske kant af konstruktionen, hvorved



trykspændingerne i princippet bliver uendelige og mindre fejl i den geometriske opmåling kan betyde, at tryklinjen ligger uden for konstruktionselementet, som dermed bliver instabilt.

- de resulterende reaktioner bliver til gunst for den øvrige konstruktion. Dette forhold kan være svært at overskue fra starten, hvorved en iterativ procedure kan være nødvendig.

6. Såfremt tryklinjen krydser svage fuger, knas fuger eller lignende, uden side-støtte, sikres, at tryklinjen krydser fugen under en vinkel  $65^{\circ} - 90^{\circ}$

7. Såfremt der kan indlægges en tryklinje til fundamentsunderkant, der ligger indenfor den geometriske afgrænsning af konstruktionen med en vis sikkerhedsmargin, kan det konkluderes, at konstruktionen er stabil

8. Jordbundsforholdene analyseres separat på traditionel vis. Eventuelt passivt sidetryk på fundamentet medtages i bestemmelse af tryklinjen (se afsnit 9.3 Krydshvælv i Høje Tåstrup Kirke)

Tabel 2:

Vejledende densiteter for forskellige materialer anvendt til kirkebyggeri

Materiale	Densitet (kN/m <sup>3</sup> )
Teglstensmurværk	17
Uarmeret beton	24
Natursten. Granit	29
Marmor, tæt kalksten	24
Skifer	29

## 7.8 Analyse af buer

Fra foregående afsnit ses, at analysen af buer i princippet blot er et specialtilfælde af foregående afsnit, hvor punkt 7.4 (3D til 2D) ikke er aktuel, da buen fra start er 2 dimensional. Derved konkluderes, at der ved analyse af buer anvendes samme metodik som angivet i foregående afsnit, dog eksklusiv punkt 4. Punkterne gentages ikke her.

## 7.9 Stabiliserende konstruktionsdele

De stabiliserende konstruktionsdele er kendetegnet ved at være sammenmuret med, eller på anden måde forbundet til, den aktuelle konstruktion uden at indgå direkte i konstruktionen. Et eksempel på dette er overmuring af en bue.

### Statisk model

Overmuringen betragtes ofte som et stabiliserende element, der hindrer en brudmekanisme af buen mod overmuringen.

I praksis vil tryklinjen blot løbe op i den stabiliserende overmuring. Tryklinjen vil dog ofte passere fugen under en lav vinkel og derfor er konstruktionen kun stabil såfremt der er modholdskræfter ved enden af overmuringen til sikring af stabiliteten.

I den efterfølgende figur er vinklerne, hvormed tryklinjen skærer fugen som eksempler angivet til  $30 - 70^\circ$ . Det vil sige, at et antal skifter kan "skride løs" såfremt modholdskræfterne ikke er tilstrækkelige.

Modholdet består i dette eksempel af piller, hvorpå der er en lodret kraft  $P_V$  og  $P_H$ , der her regnes identiske.

Spørgsmålet om hvor store  $P_V$  og  $P_H$  skal være fås af arbejdslikningen:

$$C \times \cos(\alpha_1) = 2 \times \mu_d \times P_V$$

Heraf fås

$$V/(2 \times \sin 30^\circ) = 2 \times \mu_d \times P_V$$

$$V = 0,92 \times P_V$$

Det ses, at som håndregel er konstruktionen stabil såfremt  $P_L$  og  $P_V \gg V$

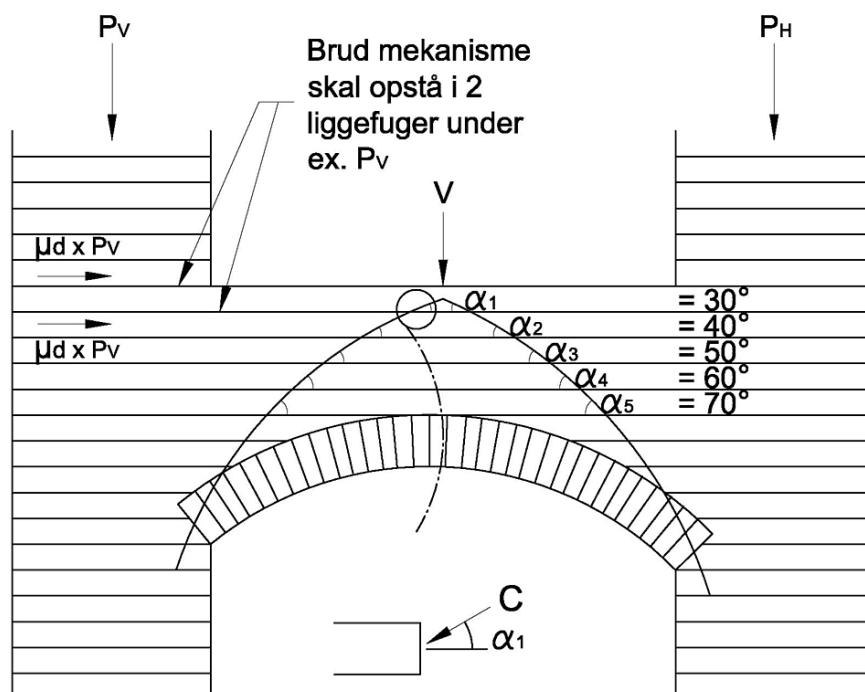


Fig. 7.20

Såfremt  $P_H$  eller  $P_V \approx V$  skal forholdene undersøges nærmere.

I familie med overmuringen af buer er udmuringen af hvælvlommerne. Ofte er der udført fortanding i facademurene for at muliggøre, at hvælvrubbernes tryk kan passere ud lidt højere end der, hvor ribben rammer murpillerne.

Kirkebygningens overordnede stabilitet for vind, er et særligt problem. Bygningens hvælvingskræfter afleveres sædvanligvis ret langt nede på facademurens inderside typisk 1 – 2 m over kirkegulvniveau. Og der er derfor kun brug for et smalt stykke facademur udfor gjordbuerne, for at resultanten, af den vandrette komponent af hvælvkraften og muren og hvælvets lodrette last, kan falde komfortabelt inden for fundamentets yderside.

Dette frigør hele murstykket mellem gjordbuerne til at stabilisere bygningen overfor vind. Her skal man være opmærksom på, at der er vind både på taget og på facaden.

Den simple analyse er at se på det samlede væltende moment for vind på tag og facade, og sammenligne det med det stabiliserende moment, der kan etableres ved at rykke facade og tagtyngde fra midten af muren og så langt ud som fundamentets bæreevne tillader.

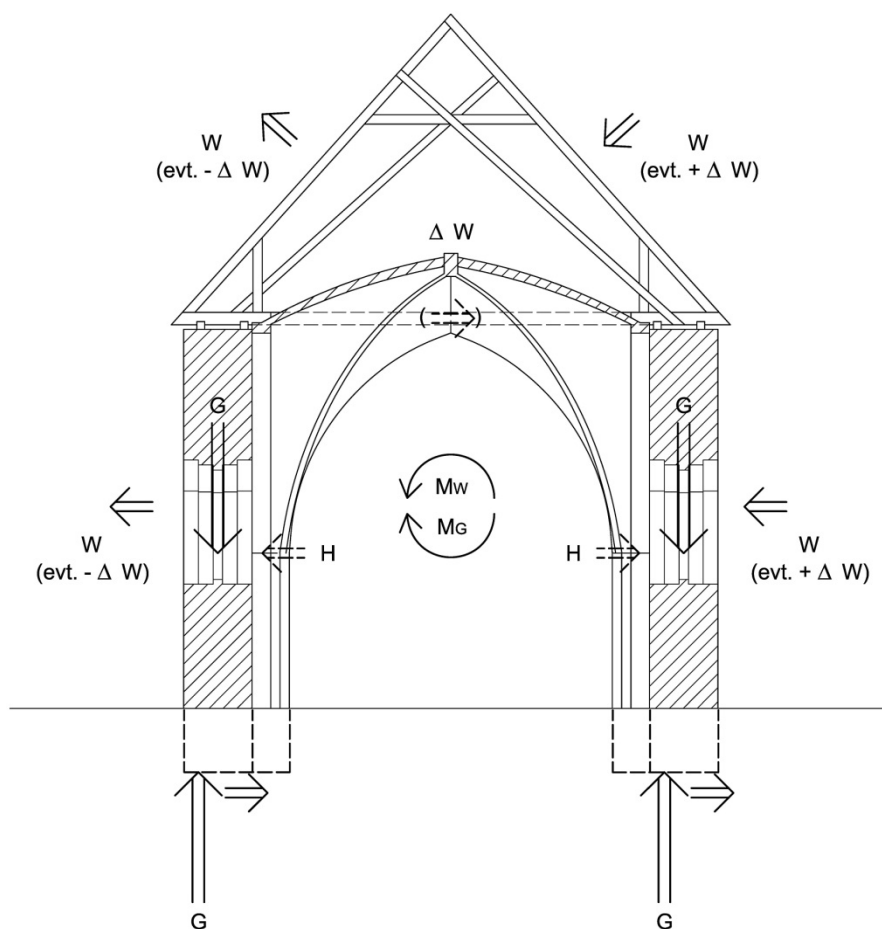


Fig. 7.21

Dette vil normalt være tilstrækkeligt. Men der kan være tilfælde, hvor denne kapacitet er i underkanten. Her kan det være af afgørende betydning, at tagværket er forbundet til murkronen. Herved hænger de modstående facader sammen. Dette muliggør at der kan føres noget last fra læsiden til luvsiden gennem bindbjælkerne. Der er nemlig en lille ekstra kapacitet i at hvælvtrykket og vindtrykket virker hver sin vej på luvsiden.

## 8. Beregningsmetoder

I dette afsnit gennemgås overordnet hvorledes en tryklinje i en 2 dimensional konstruktion bestemmes grafisk og analytisk.

Som det blev beskrevet i foregående afsnit (7.4 og 7.7) kræver en håndregning, at alle 3-dimensionale konstruktioner modelleres til 2-dimensionale konstruktioner, hvorved alle konstruktionsdele principielt kan beregnes via disse metoder.

Metoderne er beskrevet ud fra værket ”Äldre murverkshus”.

I afsnit 9 beskrives tillige, via et eksempel, en alternativ metode for anvendelsen af Pol-diagrammet for skæve belastninger.

### 8.1 Grafisk beregningsmetode. Pol-diagram

Et pol-diagram er en enkel grafisk metode til bestemmelse af tryklinjer gennem et konstruktionselement påvirket af en række parallelle kræfter.

Metoden kan synes kompliceret og tidskrævende, hvilket den også er i starten, men efter en række gennemregninger, kan den udføres indenfor et overskuelig tidsrum.

Metoden anvender et tænkt pol-punkt til etablering af en kraftpolygon, der er i ligevægt med de aktuelle belastninger.

Metodikken er vist grafisk på efterfølgende figur i kombination med nedenstående punkter.

1. Et eksempel med 3 kræfter betragtes. Tryklinjen skal gå igennem punkterne A, B og C. (Overordnet beskrivelse af mulighederne for valg af tryklinje er beskrevet i afsnit 7.5)
2. Til dannelse af kraftpolygon afsættes kræfterne  $P_1$ ,  $P_2$  og  $P_3$  i mål på lodret linje. Denne linje benævnes ”kraftlinjen”
3. En skønnet placering for pol-punktet ( $O'$ ) afsættes til venstre for kraftlinjen. Tegn linjer (pol-stråler) fra pol-punktet til de enkelte kræfters start og slutpunkter
4. Tegn en linje parallel med øverste pol-stråle gennem punkt A og frem til skæring med linjen gennem  $P_1$ . Denne linje udgør første del af kraftpolygonen
5. Tegn en linje parallel med den næstøverste pol-stråle fra skæringen fundet i punkt 4 og frem til skæring med linjen gennem  $P_2$ .
6. Gentag punkt 5, hvor sidste linje skærer den lodrette linje gennem C

Den fundne kraftpolygon går normalt ikke gennem B og C

7. Tegn lodrette linjer gennem B og C og benævn skæringen med kraftpolygonen som B' og C'

8. Tegn linjerne fra A til B' og B' til C'

9. Tegn gennem pol-punktet O' en linje parallel med linjen A-B'. Skæringen med kraftlinjen benævnes B''

10. Tegn gennem pol-punktet O' en linje parallel med linjen B'-C'. Skæringen med kraftlinjen benævnes C''

11. Tegn en linje fra A til B

12. Tegn en linje fra B til C

13. Tegn en linje fra B'' parallel med A-B og en anden linje fra C'' parallel med B-C. Linjernes skærings-punkter benævnes O, som således er det "virkelige" pol-punkt for den tryklinje, der går igennem punkterne A, B og C

14. Gentag punkt 1 – 6 med O som pol-punkt. Den herfra konstruerede tryklinje går gennem A, B og C. Eventuelle unøjagtigheder skyldes normalt, at parallelforskydninger af linjer er udført unøjagtigt

Tryklinjen gennem A angiver retningen af reaktionen i A. Størrelsen er lig med længden af pol-strålen O-D i det aktuelle målestoksforhold som  $P_1$ ,  $P_2$ , etc. Størrelsen på pol-strålen O-E angiver normalkraften mellem  $P_1$  og  $P_2$ . Den vandrette reaktion er lig med den horisontale projektion O-K fra pol-punktet til kraftlinjen. De lodrette reaktioner er lig med D-K ved A og K-G ved C.



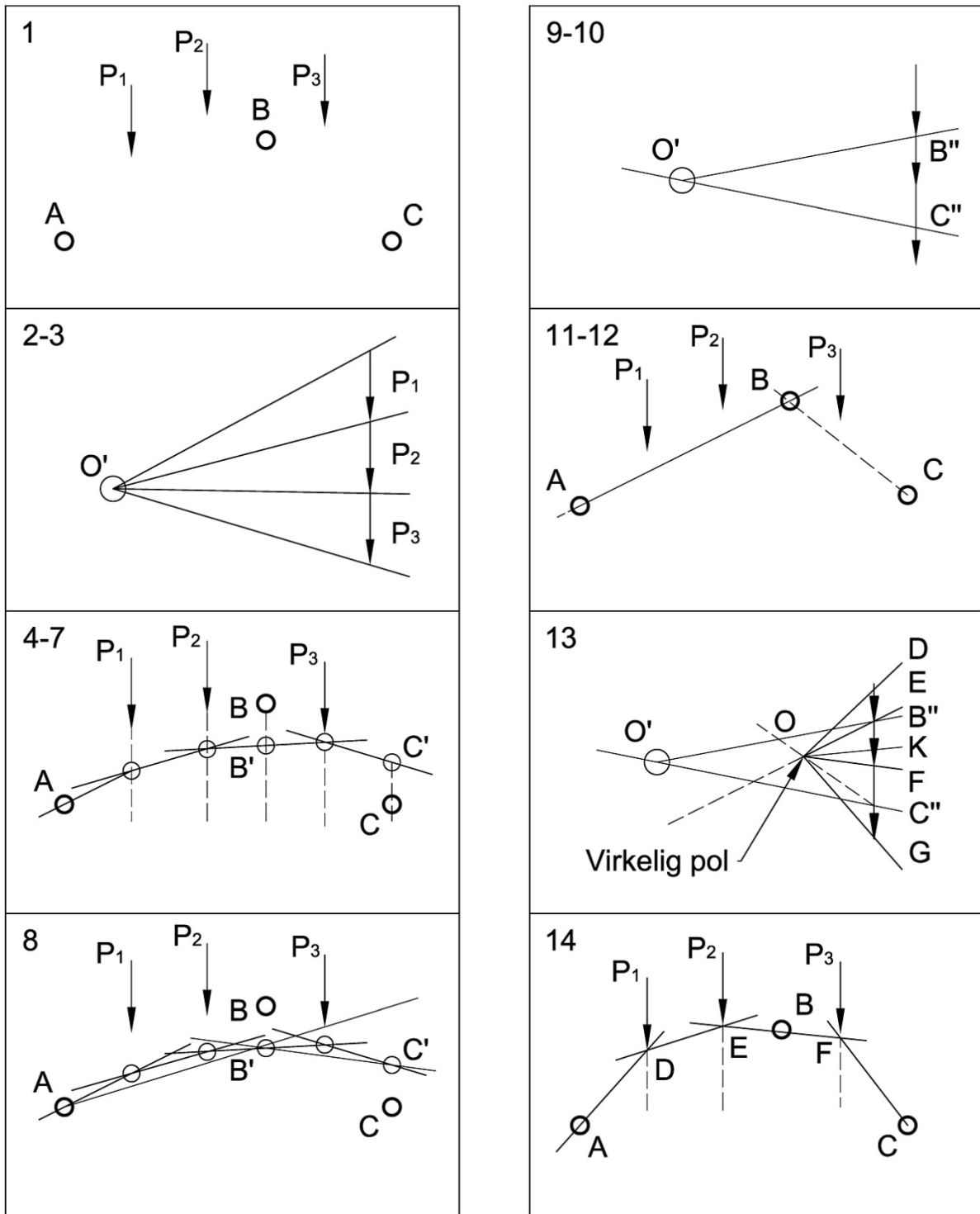


Fig. 8.1

## Analytisk beregningsmetode

### Understøtning i samme niveau

For kraftsystemet  $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$  og punkterne A, B og C (se figur 8.2) bestemmes først de vandrette reaktionerne i A og C ud fra de sædvanlige ligevægtsligninger. De lodrette reaktioner benævnes  $R_A$  og  $R_C$ . Afstanden fra A til  $P_1$  betegnes med  $x_1$ , fra A til  $P_2$  med  $x_2$  etc. Det fås:

$$R_C = \frac{1}{l} \sum_1^n P_i x_i$$

$$R_A = \sum_1^n P_i - R_C$$

hvor  $\sum_1^n P_i x_i$  betyder  $P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 + \dots P_n x_n$ . Dvs de ydre kræfters moment omkring A. Derefter bestemmes de vandrette reaktioner  $H$  ud fra:

$$H = \frac{1}{f} \left( R_C \times b - \sum_m^n P_i (x_i - a) \right)$$

hvor  $x_i - a$  er den horisontale afstand fra B til kraften  $P_i$  og  $f$  er den lodrette afstand fra B til linien AC.

I udtrykket  $\sum_m^n P_i (x_i - a)$  medregnes alle kræfter til højre for B ( $i > m$ ). I eksemplet er  $m = 2$ .

Trykkliniens beliggenhed (højde  $y$  over linien AC) ved den lodrette linie gennem  $P_1$  kan nu bestemmes ud fra

$$y_1 = \frac{R_A \times x_1}{H}$$

For  $P_2$  gælder

$$y_2 = \frac{R_A \times x_2 - P_1 (x_2 - x_1)}{H}$$

etc., dvs. fælles for  $P_s$

$$y_s = \left( R_A \times x_s - \sum_1^{s-1} P_i (x_s - x_i) \right) / H$$

### Eksempel

For systemet i figur 8.2 sættes  $P_1 = 2$ ,  $P_2 = 4$ ,  $P_3 = 3$ ,  $P_4 = 1$ ,  $P_5 = 3$ ,  $x_1 = 2$ ,  $x_2 = 4$ ,  $x_3 = 6$ ,  $x_4 = 8$ ,  $x_5 = 10$ ,  $a = 5$ ,  $b = 7$  og  $f = 3$ , hvoraf fås:

$$R_C = \frac{1}{12}(2 \times 2 + 4 \times 4 + 6 \times 3 + 8 \times 1 + 10 \times 3) = 6,33$$

$$R_A = 2 + 4 + 3 + 1 + 3 - 6,33 = 6,67$$

$$H = \frac{1}{3}(6,33 \times 7 - 3 \times 1 - 1 \times 3 - 3 \times 5) = 7,78$$

$$y_1 = 6,67 \times 2/7,78 = 1,71$$

$$y_2 = (6,67 \times 4 - 2 \times 2)/7,78 = 2,91$$

$$y_3 = (6,67 \times 6 - 2 \times 4 - 4 \times 2)/7,78 = 3,09$$

$$y_4 = (6,67 \times 8 - 2 \times 6 - 4 \times 4 - 3 \times 2)/7,78 = 2,49$$

$$y_5 = (6,67 \times 10 - 2 \times 8 - 4 \times 6 - 3 \times 4 - 1 \times 2)/7,78 = 1,63$$

Tryklinien er angivet i figur 8.2. Kræfterne i tryklinien kan være relevant for spændingskontrol, såfremt tryklinien ligger tæt på den geometriske grænseflade. Kræfterne beregnes ud fra:

*Mellem A og 1:*

$$N_{A1} = \sqrt{R_A^2 + H^2}$$

*Mellem 1 og 2:*

$$N_{12} = \sqrt{(R_A - P_1)^2 + H^2}$$

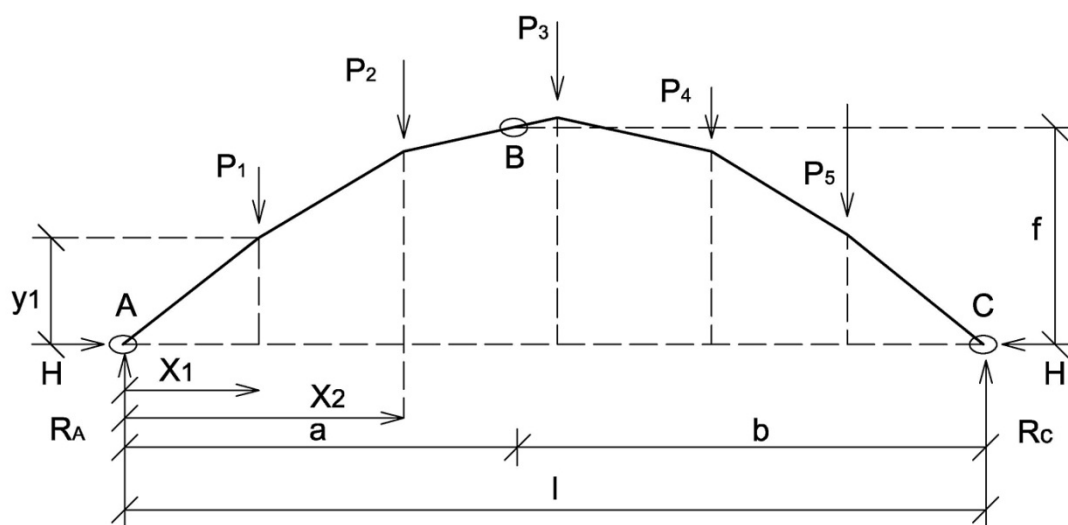


Fig. 8.2 Tryklinje for system af kræfter

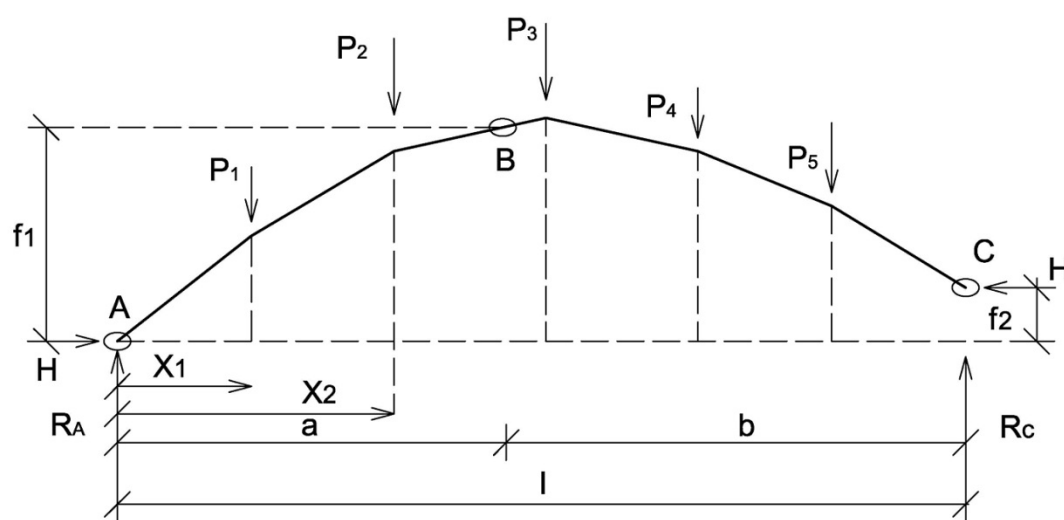


Fig. 8.3 Tryklinje med understøtninger i forskellig højde

Mellem  $s$  og  $s + 1$ :

$$N_{s,s+1} = \sqrt{\left(R_A - \sum_1^s P_i\right)^2 + H^2}$$

I eksemplet bliver:

$$N_{A1} = \sqrt{6,67^2 + 7,78^2} = 10,24$$

$$N_{12} = \sqrt{4,67^2 + 7,78^2} = 9,07$$

$$N_{23} = \sqrt{0,67^2 + 7,78^2} = 7,81$$

$$N_{34} = \sqrt{(-2,33)^2 + 7,78^2} = 8,12$$

$$N_{45} = \sqrt{(-3,33)^2 + 7,78^2} = 8,46$$

$$N_{5C} = \sqrt{(-6,33)^2 + 7,78^2} = 10,03$$

Understøtning i forskellig højde

Da forbindelseslinjen mellem A og C ikke er horisontal må  $R_C$  (eller  $R_A$ ) og  $H$  bestemmes ud fra de generelle ligevægtsligninger. Med betegnelser som angivet i figur 8.3 gælder:

$$l \times R_C + f_2 \times H = \sum_1^n P_i \times x_i$$

$$b \times R_C - (f_1 - f_2) \times H = \sum_m^n P_i (x_i - a)$$

$R_A$  beregnes derefter ud fra:

$$R_A = \sum_1^n P_i - R_C$$

Trykliniens højde  $y$  over A og normalkræfterne beregnes derefter ud fra samme ligninger som før (hvor linien AC var horisontal).

## Edb-metoder

Da der ikke er nogen oplagte edb-værktøjer tilgængelige, beskrives edb-metoder kun kort.

## Finite Element Metoder

FEM kan naturligvis anvendes i forbindelse med analysen af konstruktionsdelene, men i praksis er dette ikke en farbar vej, da opstilling af elementer og angivelse af randbetingelser for hvælv og lignende er særdeles tidskrævende. I praksis anvendes FEM da også kun ved længerevarende forskningsstudier. Ved beregning af tagkonstruktionen kan FEM i form af et rammeprogram dog være hensigtsmæssig.

## Bueprogram i murværksprojektering

I programmet ”Murværksværksprojektering”, som anvendes af rådgivende ingeniører i Danmark, er der et modul til analyse af buer, hvor tryklinjen bestemmes ud fra en linjelast og et vilkårlig antal enkeltkræfter. Den geometriske afgrænsningsflade (både for neden og for oven) for buerne i dette modul er parabler eller vandrette linjer, hvilket kun gør modulet anvendeligt overfor konstruktionsdele der (tilnærmelsesvis) har parabelformet afgrænsningsflader.

Såfremt et konstruktionselement har en tilnærmet parabelformet afgrænsningsflade angives buen i beregningsmodulet således, at den så vidt muligt har sammenfaldende afgrænsningsflade, men hvor dette ikke er muligt, skal konstruktionens afgrænsningsflade ligge *udenfor* den modellerede afgrænsningsflade. På denne måde sikres, at en funden tryklinje bliver placeret i konstruktionen.

## Mathcad, regneark og lignende matematikprogrammer.

Ved beregning af tryklinjen, foretages en geometriske opdeling af hvælvene. Ud fra dette ansættes egenvægten for hvert udsnit af hvælvet og endelig uddrages den horisontale resultant.

Til håndtering af disse data er det oplagt at bruge Mathcad eller regneark til opstilling og beregning.

I kapitel 9 vises hvordan en programmering i Mathcad kan anvendes til at beregne de horisontale resultanter i krydsribberne. Resultatet viderebearbejdes i et poldiagram, hvor tryklinjen i krydsribben bestemmes.

## 9. Beregningseksempler

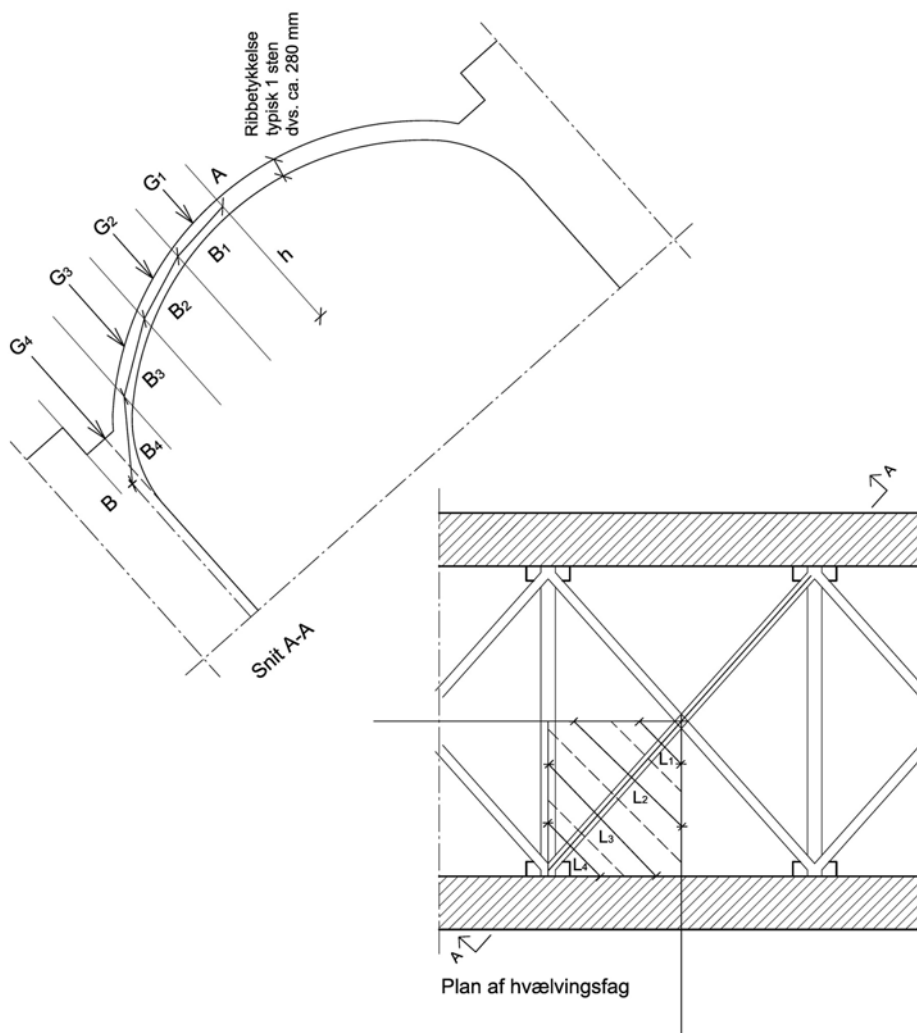
I nærværende kapitel vises den praktiske anvendelse af tryklinje metoden på 2 konkrete eksempler. Der er valgt Høje Taastrup kirke som repræsentant for en etskibet kirke med senere indlagte gotiske hvælv, og Sorø kirke som eksempel på en treskibet basilika kirke.

I afsnit 9.1 gennemgås indledningsvis den teoretiske måde for beregning og optegning af tryklinjen på et tænkt symmetrisk krydsribbehvælv. Dette er langt det hyppigst forekommende. For fuldstændighedens skyld vises i afsnit 9.2 også et tænkt eksempel på et skævt hvælv.

### 9.1 Tryklinjekonstruktion

Vi betragter, til at begynde med, et symmetrisk hvælv, som er symmetrisk belastet. Af symmetri Grunde kan vi nøjes med kun at behandle den ene halvdel af hvælvet.

De to halvdele holder hinanden i ligevægt derved, at begge hvælvhalvdele støtter hinanden i toppen med en kraft resultant  $H$ , som på grund af symmetrien må være vandret.





I praksis er det kun krydsribbernes geometri, der er kendt. Selve hvælvkappen er normalt ikke opmålt. Derfor beregnes kræfterne  $G_1, G_2, G_3$  og  $G_4$  tilnærmet på følgende måde.

I planen måles  $L_1, L_2, L_3$  og  $L_4$ .

Disse multipliceres med de skrå længder

$B_1, B_2, B_3$  og  $B_4$ .

Herefter multipliceres med hvælvtykkelsen typisk  $\frac{1}{2}$  sten dvs. ca. 140 mm.

Det forhold at hvælvkappen er dobbeltkrum tages der højde for ved at multiplicere med en hvælvfaktor. For flade hvælv er den 1,1 og for dybe hvælv er den 1,5.

Murværkets specifikke tyngde sættes til 17 kN/m<sup>3</sup>.

Den horisontale kraft  $H$  findes ved at vælge 2 punkter, som tryklinjen skal gå igennem, nemlig punkt A og punkt B. Dette valg er, som beskrevet i afsnit 7.5, centralt for metoden.

Såfremt de vandrette reaktioner ønsket minimeret bør A vælges så højt i krydsribben som muligt. I praksis vil man vælge den lidt neden for ribbens issepunkt, sådan at det tryk, der kommer her, lige netop kan overføres, typisk 50 mm under issepunktet.

B bør vælges svarende til der, hvor krydsribben møder murpillens kapital, og typisk 100 mm inde i ribben.

Plasticitetsteoriens nedre værdisætning siger, at man blot skal have en konstruktion, hvor den statiske og den fysiske betingelse er overholdt.

Grunden til, at man kan vælge de to punkter forholdsvis frit er altså, at vi blot skal etablere et kraftsystem i ligevægt, som ligger indenfor krydsribbens geometri. Hvis tryklinjen ligger så tilpas komfortabelt indenfor krydsribben, at der overalt er areal nok på hver side af tryklinjen til, at de tilladelige spændinger ikke overskrides, da har man ifølge plasticitetsteorien en nedre værdi for bæreevnen. Det vil sige at konstruktionen vil være stærkere end den styrke man har fundet.

Når disse to punkter er valgt, er tryklinjens pilhøjde  $h$  bestemt (se fig. 9.1). Herefter kan man udregne kræfterne  $G_1, G_2, G_3$  og  $G_4$ 's moment omkring punktet B, og ved at dividere med pilhøjden  $h$  findes horisontalkraften  $H$ .



tegning direkte på skærmen. Dermed kan tryklinjen optegnes med meget stor nøjagtighed.

Hvis tryklinjen ikke følger krydsribben kan det være nødvendigt med endnu en gennemregning. Ved at betragte den først optegnede tryklinje kan man med en smule erfaring se, om punktet B skal rykkes op eller ned.

Rykker man punktet B op, bliver pilhøjden  $h$  mindre, og dermed bliver den horisontale kraft  $H$  større. Dette giver et fladere pol-diagram.

Rykker man B ned bliver pilhøjden  $h$  højere og dermed bliver den horisontale kraft  $H$  mindre. Dette giver et stejlere pol-diagram.

Normalt vil tryklinjen i en middelalder kirke altid ligge indenfor krydsribben, ellers ville der for længst have opstået problemer. Derfor er eftervisningen af hvælvets styrke ikke det centrale problem i hvælvanalysen. Det afgørende er normalt at finde den lodrette og den vandrette kraft fra hvælvet samt dens angrebspunkt på murpillen. Dette er fordi, at det normalt er stabiliteten af kirkebygningens ydermure, der er problemet.

Der kan dog i sjældne tilfælde være problemer med selve hvælvet fx nedbulinger af krydsribben eller hvælvkappen. I sådanne tilfælde er det særlig vigtigt med en præcis analyse af tryklinjen.

Det kan også være, at man ikke kan få tryklinjen til at ligge i krydsribben ved at rykke B op eller ned. Hvis tryklinjen ligger nedenunder krydsribben, kan dette afhjælpes ved at udføre en påmuring i hvælvlommen. Denne tilføjede last yderst på krydsribben vil kunne flytte tryklinjen op efter.

## 9.2 Eksempel på skæv belastning

### Skæve belastninger

Det kan i sjældne tilfælde forekomme, at der er tale om skæve hvælv eller skæve belastninger af hvælvet, eller begge dele samtidig. Til at illustrere metoden gennemgås et eksempel på denne beregning. Den principielle fremgangsmåde er beskrevet nedenfor.

Først findes resultanten af  $G_{v1}$ ,  $G_{v2}$ ,  $G_{v3}$  og  $G_{v4}$ 's placering ved at tage kræfternes moment  $M_v$  om punktet B (se fig. 9.3).

$$\text{Hvis } G_{vres} = G_{v1} + G_{v2} + G_{v3} + G_{v4} \quad \text{og} \quad G_{hres} = G_{h1} + G_{h2} + G_{h3} + G_{h4}$$

er afstanden til resultanten givet ved

$$b = M_v / (G_{vres}) \quad \text{Afstanden til den anden resultant fås ligeledes ved}$$

$$c = M_h / (G_{hres})$$

Herefter trækkes en linje fra B gennem A til skæring med resultantlinjen for  $G_{hres}$ . Dernæst trækkes en linje fra C gennem dette skæringspunkt.

$G_{hres}$  kan nu ved kræfternes parallelogram opløses i kræfterne  $B_h$  og  $C_h$

På tilsvarende måde trækkes en linje fra C gennem A til skæring med resultantlinjen for  $G_{vres}$ , og en linje fra B gennem dette skæringspunkt.

$G_{vres}$  kan nu ved kræfternes parallelogram opløses i kræfterne  $B_v$  og  $C_v$ .

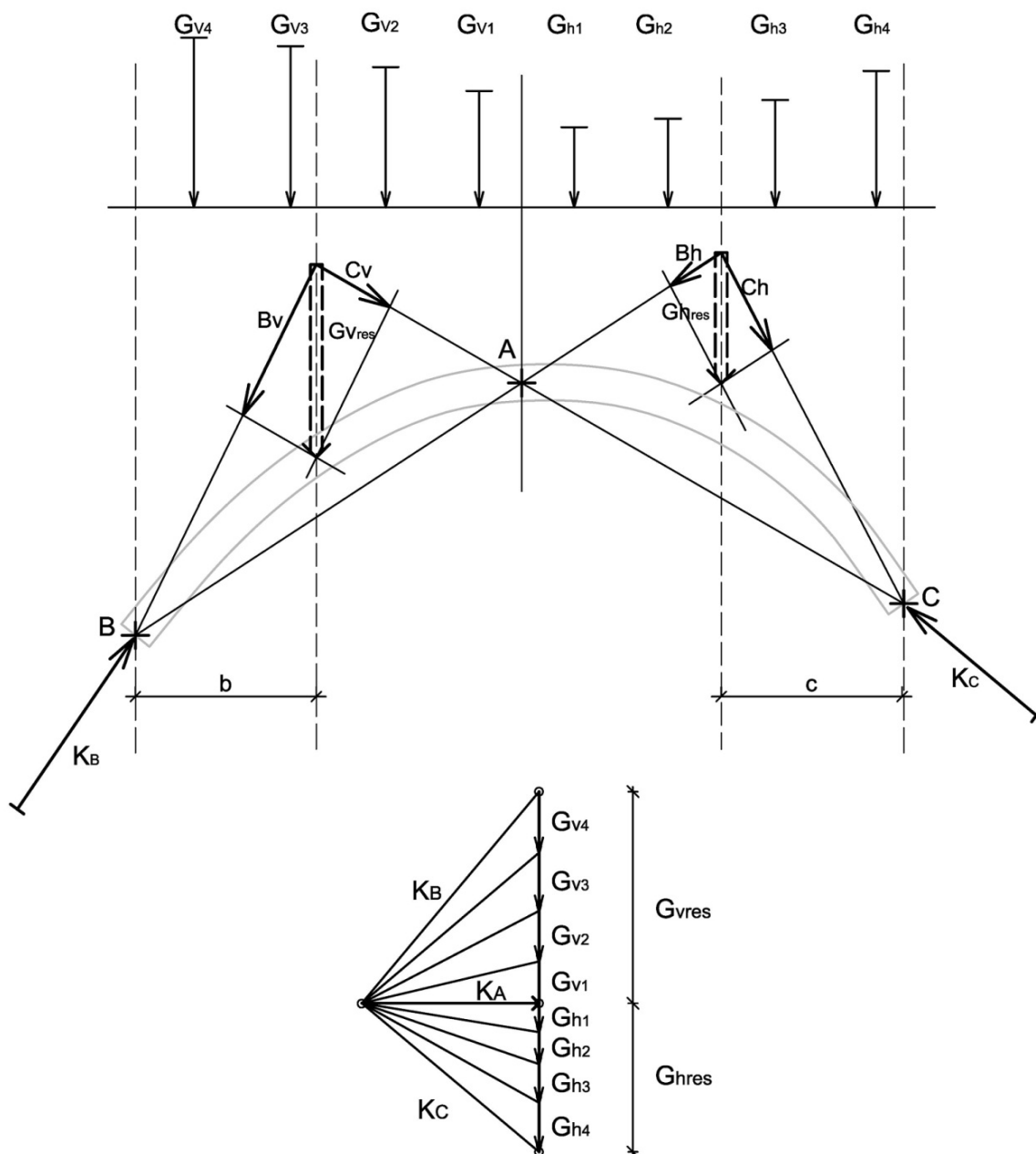
$K_B$  findes som den vektorielle sum af  $B_v + B_h$  og

$K_C$  findes som den vektorielle sum af  $C_v + C_h$ .

Herefter kan pol-diagrammet for hele hvælvets tryklinje optegnes, som vist nedenfor. Tryklinjen optegnes ved at man starter i punkt B og afsætter linjernes fra pol-diagrammets retninger, idet der ændres retning hver gang man passerer en af de lodrette kræfter  $G_{v4} \dots G_{h4}$ .

Hvis man har regnet rigtigt vil tryklinjen gå igennem punkterne B, A og C.

Nedenfor er vist et tal eksempel på ovennævnte analysemetode af skæve buer.



$$\bar{B}_v + \bar{C}_v = \bar{G}_{vres} \quad ; \quad \bar{B}_h + \bar{C}_h = \bar{G}_{hres}$$

$$\bar{K}_B = -(\bar{B}_v + \bar{B}_h) \quad ; \quad \bar{K}_C = -(\bar{C}_v + \bar{C}_h)$$

$$\bar{K}_A = \bar{K}_B + \bar{G}_{vres} = \bar{K}_C + \bar{G}_{hres}$$

Fig. 9.3

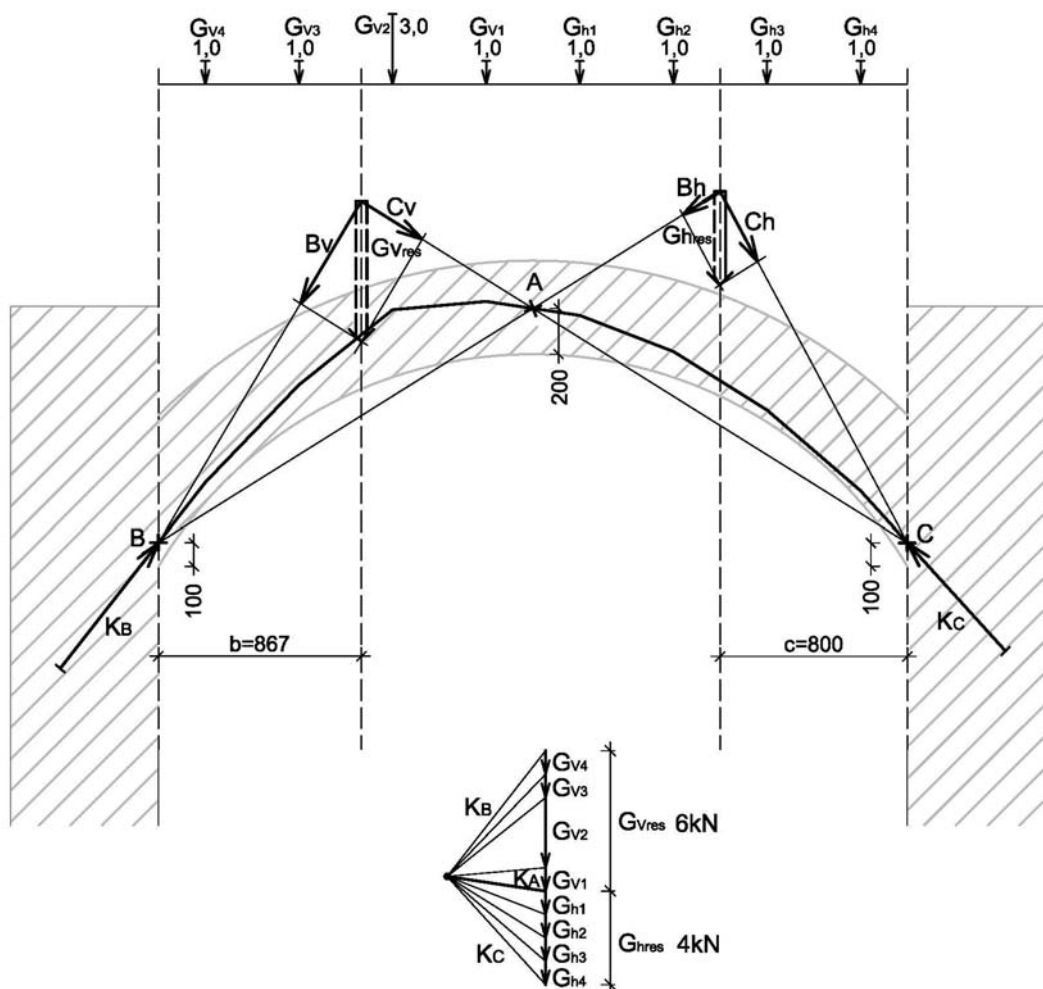


Fig. 9.4

En cirkelformet bue betragtes (se figur 9.4). Følgende parametre anvendes:

Laster:

$$\begin{aligned}
 G_{v4} &= 1,0 \text{ kN} \\
 G_{v3} &= 1,0 \text{ kN} \\
 G_{v2} &= 3,0 \text{ kN} \\
 G_{v1} &= 1,0 \text{ kN} \\
 G_{h1} &= 1,0 \text{ kN} \\
 G_{h2} &= 1,0 \text{ kN} \\
 G_{h3} &= 1,0 \text{ kN} \\
 G_{h4} &= 1,0 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

afstand mellem laster: 0,4 m  
 afstand fra last til lysningskant: 0,2 m

Geometri:

$L = 3200$  mm (Lysningsvidde)

$p = 1000$  mm (Pilhøjde på cirkelbue)

$t = 400$  mm (Buens tykkelse;  $t$  regnes konstant i hele buens længde)

$d = 200$  mm (Buens dybde vinkelret på planen)

Bemærk:  $t$  er ikke den lodrette højde, men tykkelsen målt vinkelret på begrænsningsfladen.

$A = 200$  mm

$B = 100$  mm

$C = 100$  mm

Punkterne A, B og C er angivet fra den nedre begrænsningsflade. Værdierne er valgt skønsomt.

Materiale parametre:

$f_d = 1,0$  MPa

Beregning

Følgende parametre bestemmes:

$G_{v,res} = 6$  kN

$G_{h,res} = 4$  kN

$M_v = 1,0 \times 0,2 + 1,0 \times 0,6 + 3,0 \times 1,0 + 1,0 \times 1,4 = 5,2$

$M_h = 1,0 \times 0,2 + 1,0 \times 0,6 + 1,0 \times 1,0 + 1,0 \times 1,4 = 3,2$

$b = M_v / G_{v,res} = 5,2 / 6 = 0,867$

$c = M_h / G_{h,res} = 3,2 / 4 = 0,8$

De resulterende kræfter ( $G_{v,res}$  og  $G_{h,res}$ ) er indtegnet på figur 9.4 og opløst i et parallelogram.

Optegningen af tryklinien i øvrigt i henhold til den generelle beskrivelse.

*Bestemmelse af trykspænding:*

Den mindste afstand fra tryklinien til den geometriske begrænsningsflade ( $a_{min}$ ) måles til:

$a_{min} = 41$  mm

Kraften i tryklinien ( $F_{a,min}$ ) i dette område (mellem  $G_{v3}$  og  $G_{v2}$ ) måles i pol-diagrammet til:



$$F_{a,\min} = 5,1 \text{ kN}$$

Spændingen ( $\sigma_{\max}$ ) i trykzonen (som er det største symmetriske område omkring tryklinien beliggende indenfor buen geometriske afgrænsningsflader) bestemmes til:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= 5,1 \times 1000 / (2 \times 41) \times 200 \\ &= 0,31 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Denne værdi er mindre end  $f_d$  og dermed regnes bæreevnen for tilstrækkelig.

Det ses i figur 9.4, at punkterne A, B og C kunne rykkes lidt op, hvilket vil give en mere optimal tryklinje med "samme" afstand til nedre og øvre begrænsningsflade, men en reduceret spænding ( $\sigma_{\max}$ ) til følge.

### 9.3 Krydshvælv i Høje Tåstrup Kirke

Høje Tåstrup kirke er vist i fig. 6.7, 6.8 og 6.9 i plan, længdesnit og tværsnit. Desuden er krydsribben vist.

Som det fremgår af teksten i kap. 2, 3, 4, 5 og 6 er det nødvendigt at have et vist overblik over bygningens tilblivelseshistorie, dens bygningsteknologiske opbygning og den nuværende geometri i form af hældninger og udbulinger samt murværkets tilstand fx med hensyn til revner og forvitrede fuger.

Kirken består af et romansk skib, med sen romansk tilbygning mod nord. Her til kommer et gotisk tårn, våbenhus og sakristi ved korets nordside. I sen gotisk tid er koret udvidet. I denne forbindelse har man i koret indbygget nye hvælvinger, som er større og højere liggende end i skibet. Desuden er hvælvenes skjoldbuer muret sammen med facademurene fordi de formodentlig er samtidige.

Dette er modsat skibet, hvor hvælvene er indbygget efter skibets mure. Derfor er skjoldmurene ikke sammenmuret med facaderne her.

Tagkonstruktionen er nyere og af langstolstype med hovedspær for hver 5 fag over skibet og hver 6 fag over koret.

Langstolens dragere understøtter i nogen grad spærenes hanebånd, og er på denne måde til dels i stand til, at optage udadskydende laster fra spærene. Langstolen er dog ikke fuldt effektiv, idet enkelte hanebånd "svæver" henover dragerne.

Der er ingen stræbepiller på bygningen. Men som ovenfor nævnt er den støttet af 3 tilbygninger, som er i stand til at modstå udadskydende kræfter fra hvælv og tag.

Der er observeret særlige revner der, hvor der ingen tilbygning er. Man kan ca. midt på korets sydgesims iagttage en udbuling. Udbulingen er størst ca. 1 m vest for korets midterste gjordbue.

På kirkeloftet over koret kan ses en revne mellem hvælvkappen og skjoldbuen på 70 mm.

I kirkerummet kan ses revner i hvælvkapperne langs skjoldbuerne, men der er ingen revner mellem skjoldbuer og facademure.

Korets midterste murpille på sydvæggen er desuden skæv, idet den hælder ca. 20 mm pr m op langs pillen.

En prøvegravning og geoteknisk undersøgelse viser, at bygningen er funderet 1,2 m under terræn, men på muldblandet sand med teglrester med en vingestyrke på 150-175 kN/m<sup>2</sup> ned til 1,5 m under terræn. Herunder er der ler, brunt, sandet lidt gruset moræne med en vingestyrke på 280 kN/m<sup>2</sup>.

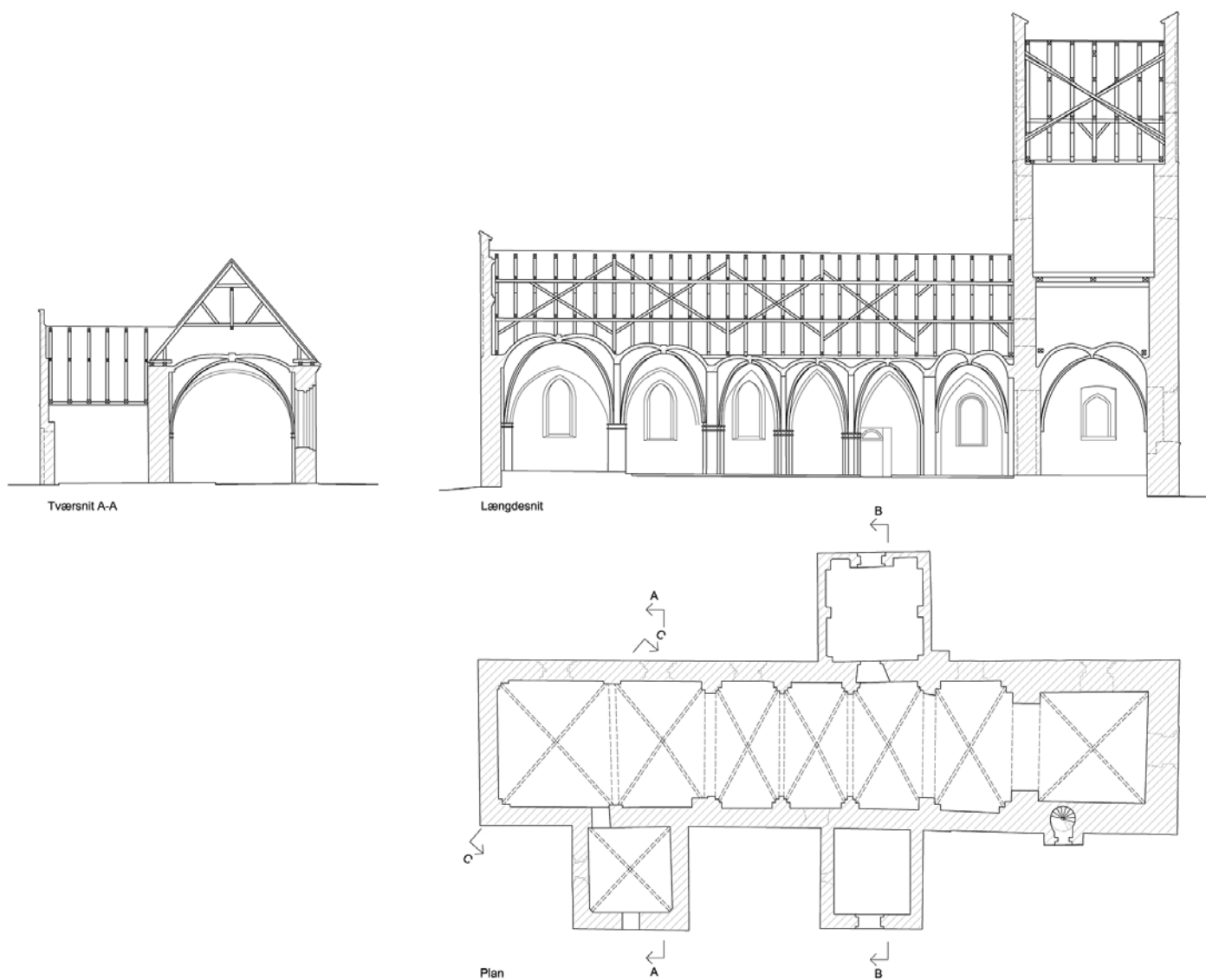


Fig. 9.5

For at få overblik over de konstruktive problemer er det nødvendigt at undersøge kraftforløbet i hvælvet og murene.

Det er sædvanligvis nødvendigt at gennemregne både krydsribben og jordbuen. Hvis jordbuen ikke er meget kraftig, kan den for simpelhedens skyld medregnes i kappelasten og dens udadskydende virkning regnes da med ind i krydsribbens tryk. Denne fremgangsmåde vælges her. I det efterfølgende eksempel vedrørende Sorø kirke regnes ribber og jordbuer for sig.

Nedenfor er vist en beregning af hvælvingslaster og den horisontale last, der er udgangspunktet for optegning af poldiagrammet. Den horisontale last fremkommer ved at skønne en pilhøjde. Dette giver punkt A og B som tryklinjen skal gå igennem. Dette er i øvrigt en kontrol på om man har regnet rigtigt.

Man kan komme ud for, at tryklinjen ligger udenfor hvælvrribben så må man forsøge med en ny pilhøjde og gennemføre endnu en beregning. Med lidt erfaring vil man dog kunne skønne rigtigt første gang.

Dette skøn er centralt i tryklinje metoden. Der er tale om en statisk tilladelig kraftfordeling og det gør metoden til en plasticitetsteoretisk beregningsmetode. Det er også den eneste metode, der er velegnet til geometrisk ubestemte statisk overbestemte konstruktioner.

Beregningen er opstillet således, at den kan testes direkte ind i et matematikprogram som Mathcad.

$$\begin{array}{llllll}
 l_1 := 1.2 \text{ m} & b_1 := 1.10 \text{ m} & c_4 := 0.55 \text{ m} & t := 0.15 & \text{m} & \\
 l_2 := 3.3 \text{ m} & b_2 := 1.2 \text{ m} & c_3 := 1.65 \text{ m} & \rho := 17 & \text{kN/m}^3 & \\
 l_3 := 3.4 \text{ m} & b_3 := 1.4 \text{ m} & c_2 := 2.74 \text{ m} & \eta := 1.2 & \text{Hvælvfaktor} & \\
 l_4 := 1.3 \text{ m} & b_4 := 2.3 \text{ m} & c_1 := 3.84 \text{ m} & h := 3.3 & \text{m, Pilhøjde på krydsribbe} & 
 \end{array}$$

$$G_1 := l_1 \cdot b_1 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_1 = 4.039 \text{ kN}$$

$$G_2 := l_2 \cdot b_2 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_2 = 12.118 \text{ kN}$$

$$G_3 := l_3 \cdot b_3 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_3 = 14.566 \text{ kN}$$

$$G_4 := l_4 \cdot b_4 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_4 = 9.149 \text{ kN}$$

$$G_5 := G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \quad G_5 = 39.872 \text{ kN}$$

$$M := G_4 \cdot c_4 + G_3 \cdot c_3 + G_2 \cdot c_2 + G_1 \cdot c_1 \quad M = 77.778 \text{ kNm}$$

$$H_1 := \frac{M}{h} \quad H_1 = 23.569 \text{ kN}$$

$$\begin{array}{llllll}
 l_1 := 1.1 \text{ m} & b_1 := 1.0 \text{ m} & c_4 := 0.51 \text{ m} & t := 0.15 & \text{m} & \\
 l_2 := 3.0 \text{ m} & b_2 := 1.2 \text{ m} & c_3 := 1.54 \text{ m} & \rho := 17 & \text{kN/m}^3 & \\
 l_3 := 3.1 \text{ m} & b_3 := 1.4 \text{ m} & c_2 := 2.56 \text{ m} & \eta := 1.2 & \text{Hvælvfaktor} & \\
 l_4 := 1.2 \text{ m} & b_4 := 1.9 \text{ m} & c_1 := 3.58 \text{ m} & h := 3.1 & \text{m, Pilhøjde på krydsribbe} & 
 \end{array}$$

$$G_1 := l_1 \cdot b_1 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_1 = 3.366 \text{ kN}$$

$$G_2 := l_2 \cdot b_2 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_2 = 11.016 \text{ kN}$$

$$G_3 := l_3 \cdot b_3 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_3 = 13.28 \text{ kN}$$

$$G_4 := l_4 \cdot b_4 \cdot t \cdot \rho \cdot \eta \quad G_4 = 6.977 \text{ kN}$$

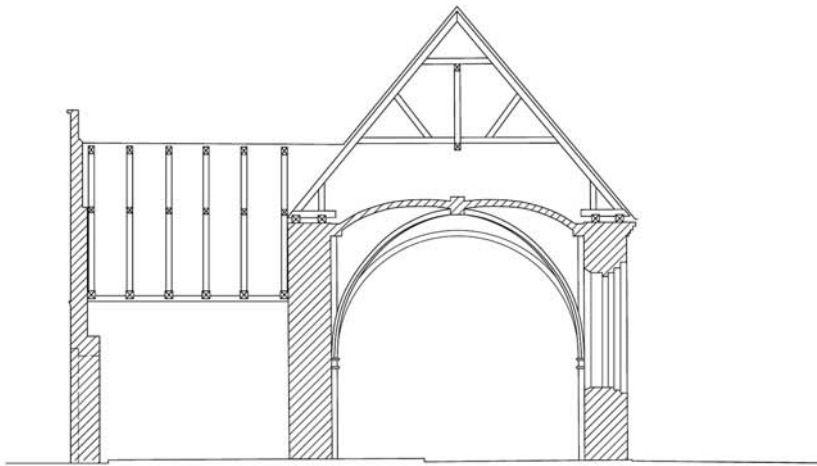
$$G_6 := G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \quad G_6 = 34.639 \text{ kN}$$

$$M := G_4 \cdot c_4 + G_3 \cdot c_3 + G_2 \cdot c_2 + G_1 \cdot c_1 \quad M = 64.261 \text{ kNm}$$

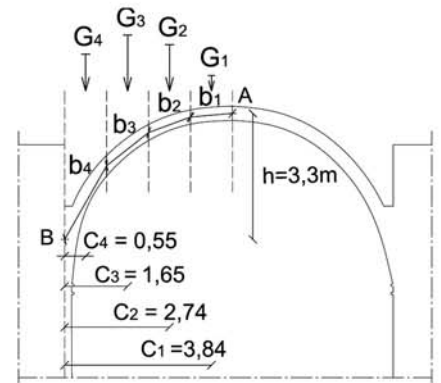
$$H_2 := \frac{M}{h} \quad H_2 = 20.729 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 := 47 \quad \alpha_2 := 53 \quad H := H_1 \cdot \sin(47\text{deg}) + H_2 \cdot \sin(53\text{deg}) \quad H = 33.793 \text{ kN}$$

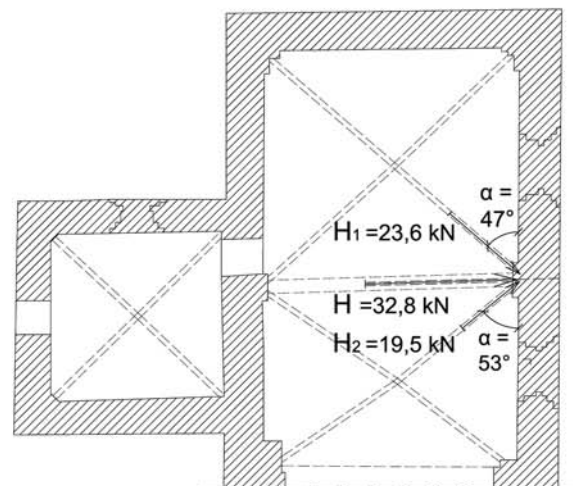
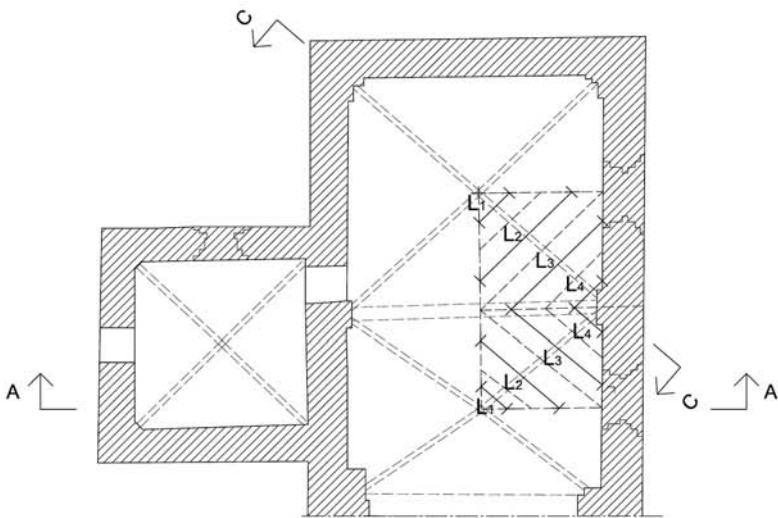
$$G_{\text{tot}} := G_5 + G_6 \quad G_{\text{tot}} = 74.511 \text{ kN}$$



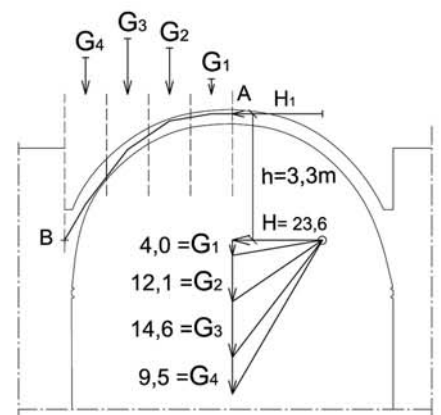
Snit A - A



Snit C - C



Plan



En gennemregning af kræfterne i tagværkets spær for egenvægt alene giver en lodret last på 4,6 kN og en vandret last på 3 kN pr. spær. Der er 5-6 spær pr. fag. Dette giver 23 kN henholdsvis 15 kN.

Lægges dette til de lodrette og vandrette laster fra hvælv og mure, kan man forestille sig følgende belastningshistorie for kirkens fundamenter.

1. Nybygget kor med hvælv.
2. Kor efter nogle århundreder med udadskydende kræfter fra tag og hvælv, hvorved der er opbygget et passivt jordtryk på fundamenternes forside.
3. Nuværende situation med sammenspændt tag og understøbt fundament.

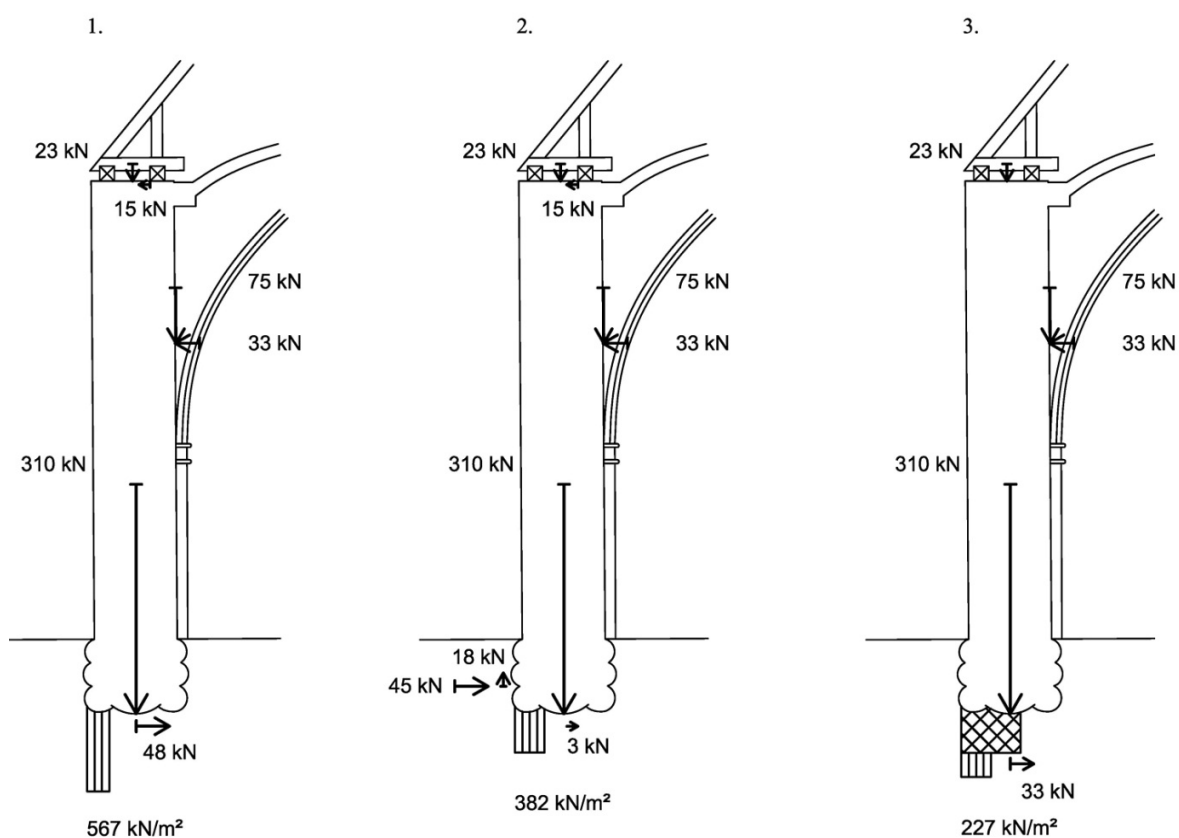


Fig. 9.7

Af gennemregningen ses, at koret til at begynde med ikke har haft den fornødne styrke i sit fundament. Derfor har sydfacaden sat sig og drejet sig. Herved er der opstået et såkaldt passivt jordtryk og en negativ overflademodstand på fundamentets yderside. De geotekniske beregninger gennemgås ikke i detaljer her da der er tale om standard beregninger, hvis metode kan ses i en teknisk stabi.

Det maksimale passive jordtryk, der kan opstå på denne måde har aflastet fundamentets underside ganske betydeligt, men dog ikke nok. Derfor har der til stadighed foregået mindre bevægelser af facaden.



Ved at understøbe bygningen til fastere bund og sammenspænde taget så der ikke kommer udadskydende laster fra spærene opstår der en situation, hvor man ikke har behov for passivt jordtryk, og bæreevnen af jorden er højere end belastningen.

Konklusionen er altså i dette tilfælde at bygningen bør understøbes til fast bund. Desuden bør tagværket sammenspændes således, at der ikke kommer udadskydende laster fra tagets egenvægt på facademurene.

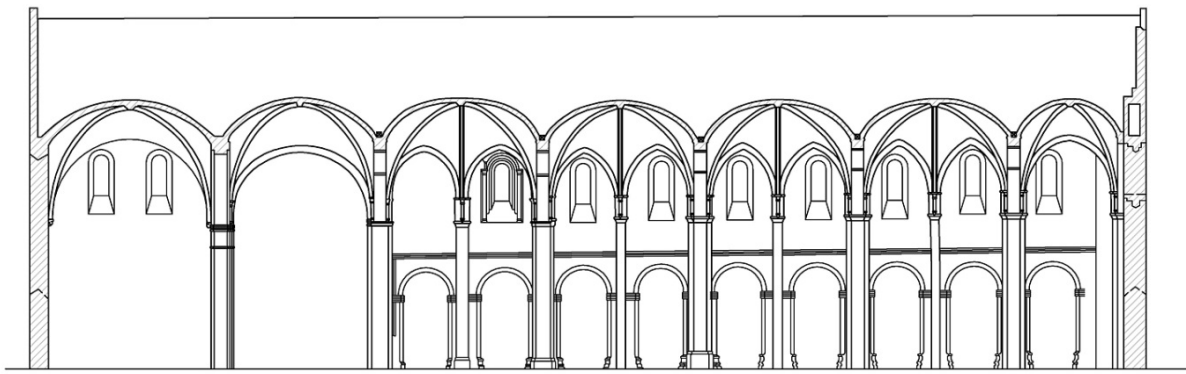
## 9.4 Sorø Kirke

Sorø kirke er vores første og eneste fuldt færdiggjorte romanske basilika klosterkirke i teglsten. Som sådan er den et enestående symbol på hele den danske teglstensbyggetradition.

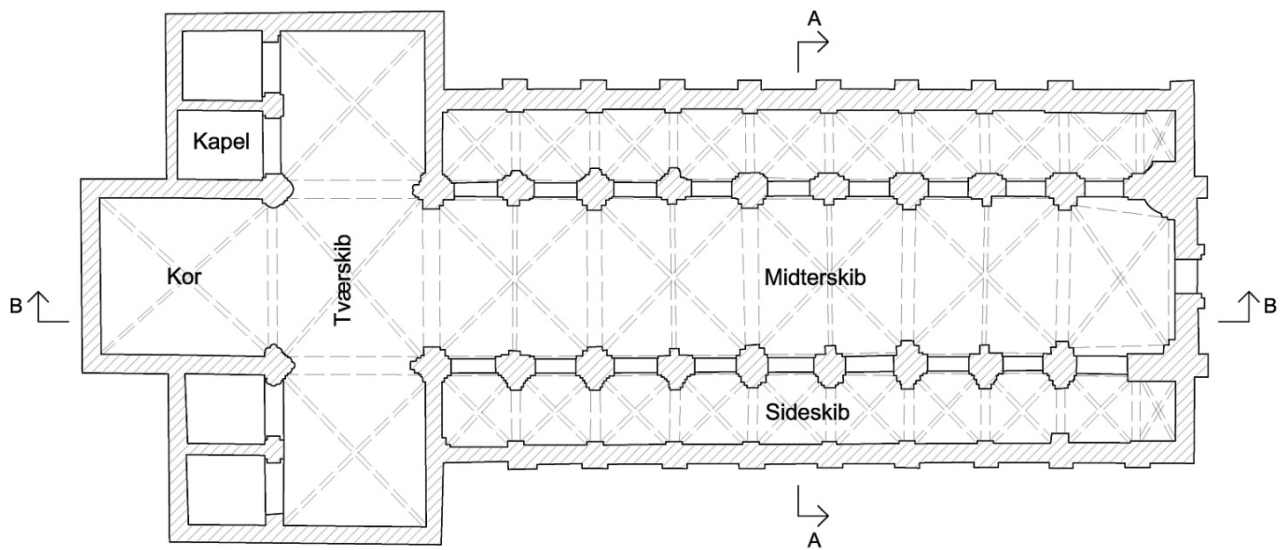


Fig. 9.8 Sorø kirke

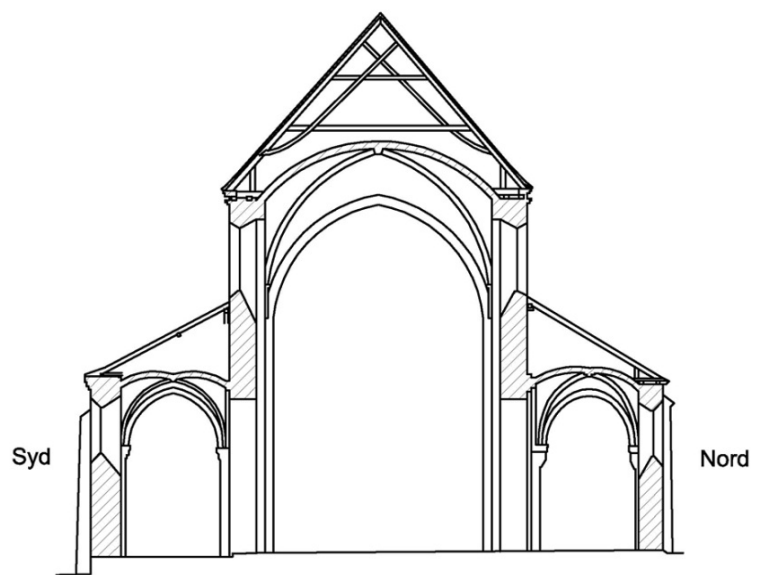
Nedenfor er vist plan, tværsnit og længdesnit. Tegningerne er digitaliserede ud fra opmålingstegningerne i Danmarks kirker. Ud fra disse er krydsribberne i midterskibet og sideskibet konstrueret..



Længdesnit B-B



Plan



Tværsknit A-A set mod vest

Fig.9.9

Ideelt set bør disse opmåles i dét konkrete fag, der regnes på. Beregningerne i nærværende fremstilling bør derfor verificeres, hvis de skal bruges i forbindelse med et konkret projekt. Den principielle fremgangsmåde er dog som vist i det følgende.

Sædvanligvis er fagene i midterskibet og sideskibene lige lange. Men i Sorø kirke er midterskibets fag dobbelt så langt som i sideskibene. Dette er baggrunden for midterskibets mellemribber. Det er det samme system som i Saint Étienne i Caen se kapitel 1.

Det er en smuk løsning, der giver en særlig rumlighed, men det besværliggør desværre regnearbejdet, idet det er nødvendigt at opstille flere tryklinjer. Gjordsbuerne er i dette tilfælde også ret kraftige. Det er derfor ikke en rimelig tilnærmelse at medtage disses last som en del af hvælvkapperne, som vi gjorde i tilfældet med Høje Tåstrup kirke.

Regnearbejdet omfatter derfor følgende:

1. Tryklinje for midterskibets gjordbue.
2. Tryklinje for midterskibets krydsribbe.
3. Tryklinje for midterskibets mellemribbe.
4. Tryklinje for sideskibets krydsribbe.
5. Tryklinje for sideskibets gjordbue.
6. Vektoriel sammensætning af resultanten fra midterskibet, sideskibet med lasten i arkadepillen.

Det er dog kun faget ud for gjordbuen der undersøges i det aktuelle tilfælde, idet det umiddelbart ses, at forholdene ud for mellemribben er gunstigere.

Først beregnes arealer og laster som vist under eksemplet Høje Taastrup kirke. Selve Math cad beregningen er dog ikke vist her. Kun poldiagrammet og tryklinjen er vist.

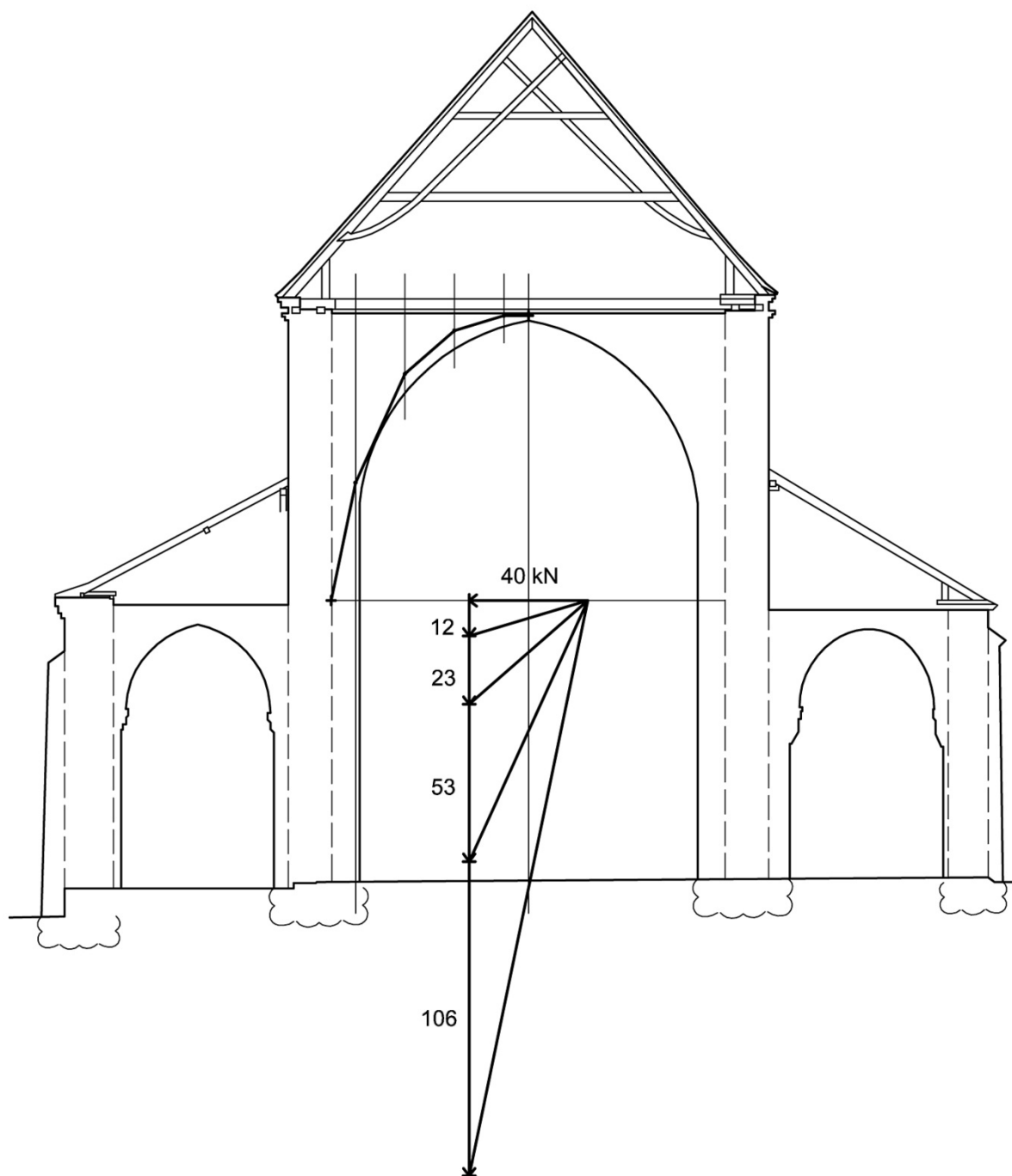


Fig. 9.10 Snit i gjordbue. Poldiagram og tryklinje er indtegnet

Midterskibets krydsribbe er som ovenfor nævnt konstrueret teoretisk ud fra plan og snit, men bør opmåles, hvis der skal foretages egentlige analyser, der skal munde ud i restaureringsforslag.

For fuldstændighedens skyld er midterribbens poldiagram og tryklinje også medtaget selvom den ikke indgår i analysen af gjordbuefaget.

Igen er det kun poldiagram og tryklinje, der er vises. Se fig. 9.11.

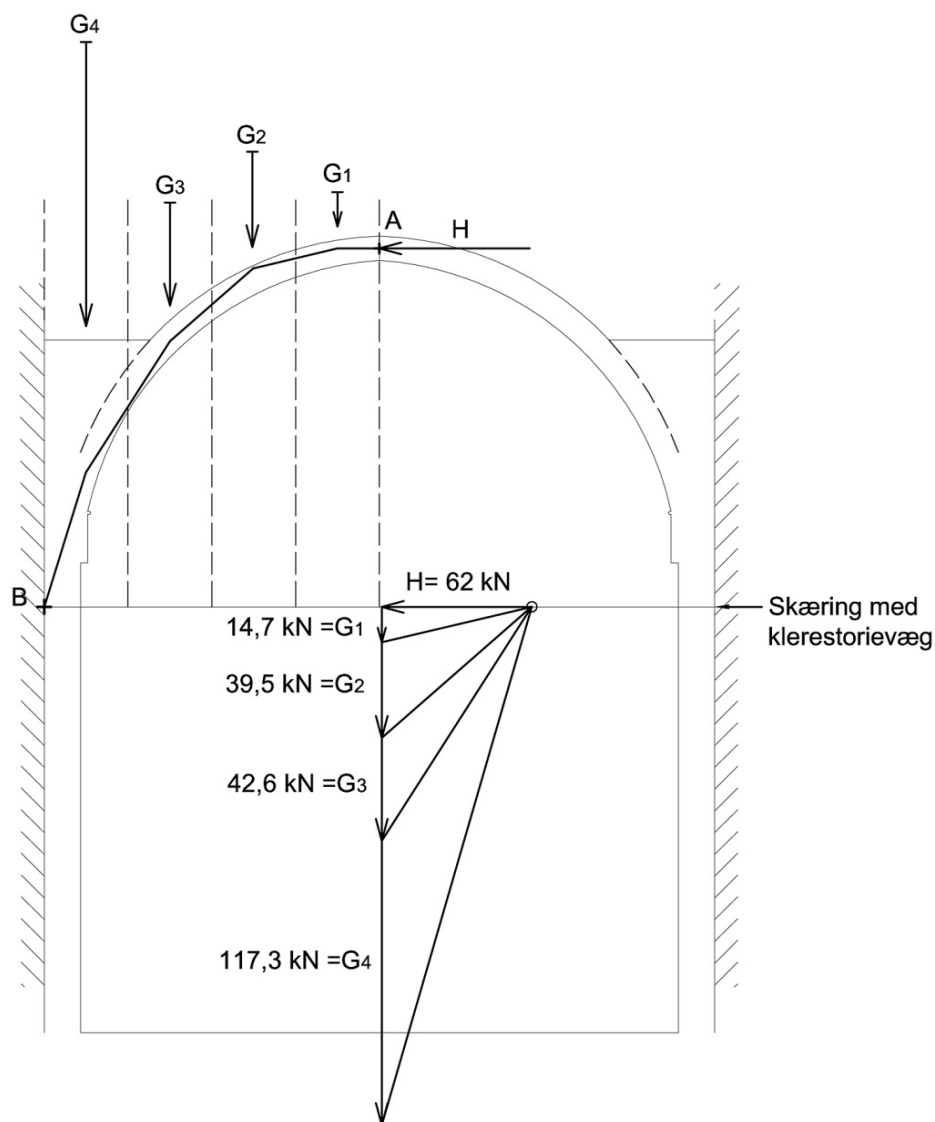


Fig. 9.11 Snit i midterskibets krydsribbe. Poldiagram og tryklinje er indtegnet

For fuldstændighedens skyld er midterribbens poldiagram og tryklinje også medtaget selvom den ikke indgår i analysen af jordbuefaget.

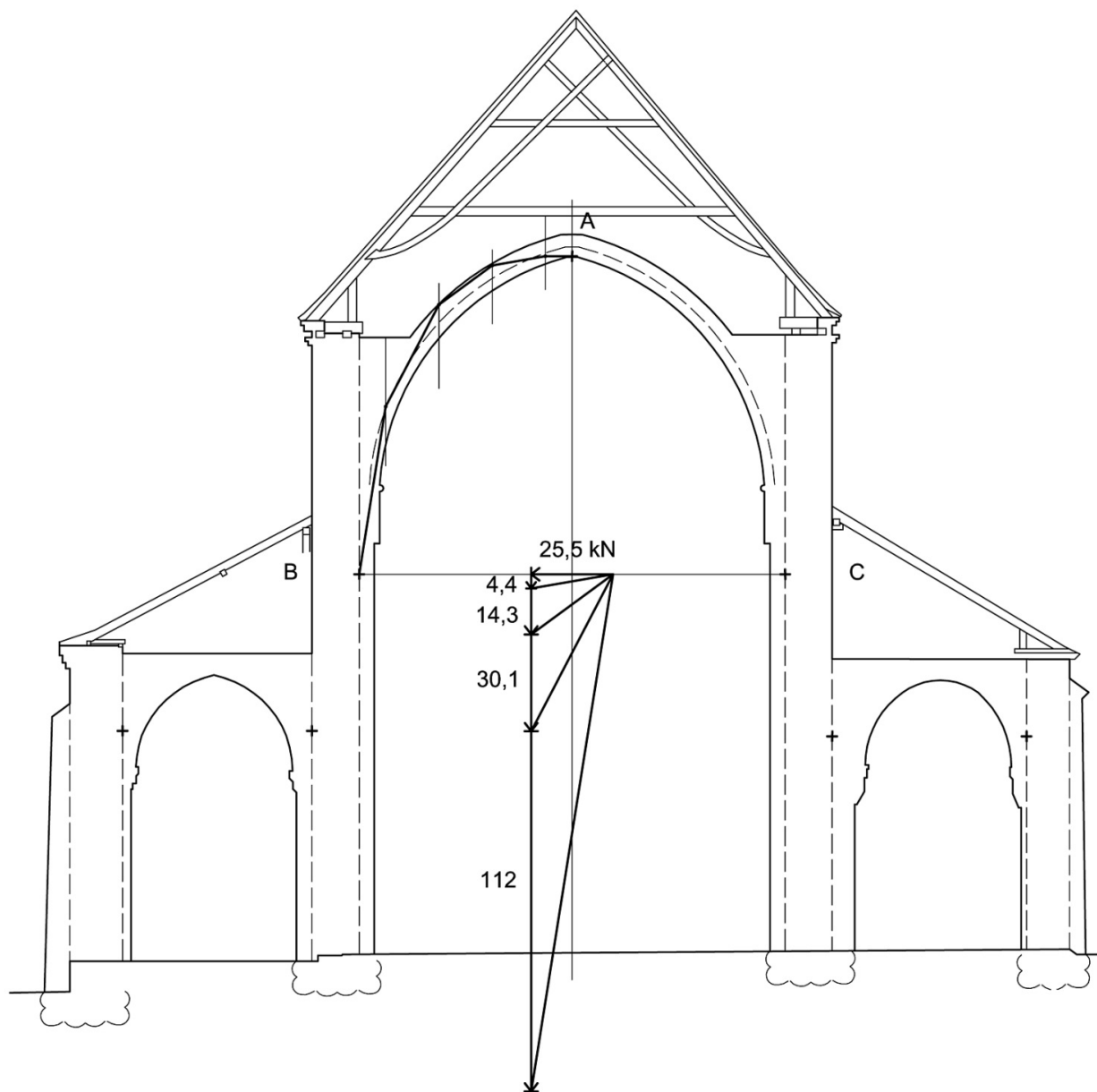
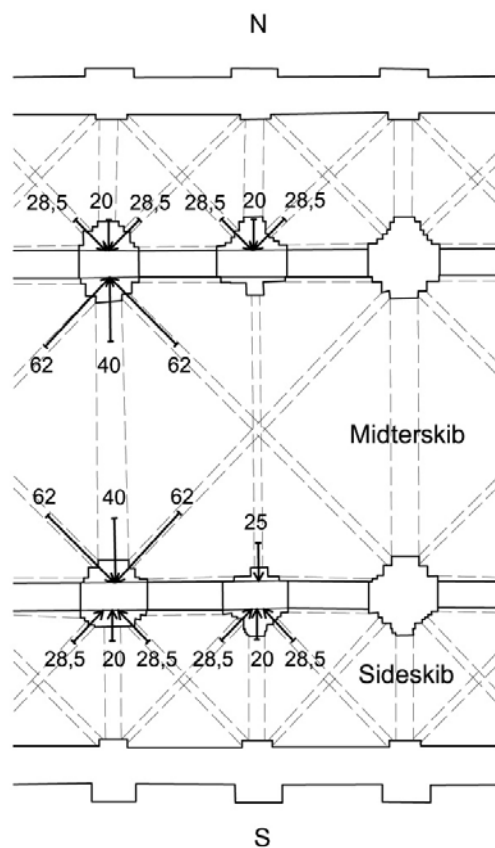


Fig. 9.12 Snit i mellemribbe. Poldiagram og tryklinje er indtegnet

Der er ikke vist tryklinjer for sideskibet, men Mathcad beregninger og optegning af poldiagram og tryklinjer er naturligvis nødvendige for at kunne analysere jordbuefaget.

På planen kan man nu se de vandrette komponenter fra midterskibet og sideskibets krydsribber og jordbuer. Se fig. 9.13.

Disse skal nu projiceres ind på en retning vinkelret på klerestorievæggen. Se fig. 9.14.



Ubenævnte kræfter er angivet i kN  
Fig. 9.13

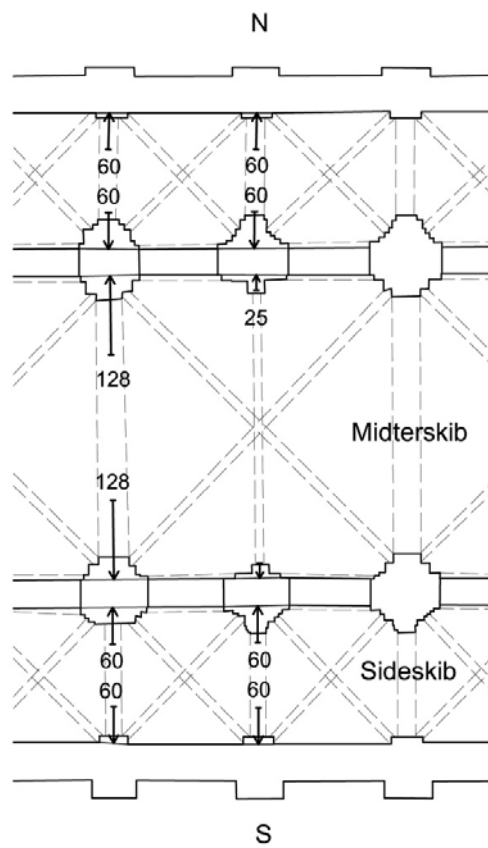


Fig. 9.14

Herefter kan tryklinjen i gjordbuens murpille optegnes. Den lodrette last fås af poldiagrammerne fra krydsribben og gjordbuen. Det er således summen af lasten fra 2 tilstødende krydsribber og den lodrette last på gjordbuen.

$$2 \times (14,7 + 39,5 + 42,6 + 117,3) + (12 + 23 + 53 + 106) = 622 \text{ kN}$$

Tilsvarende for sideskibet.

Herefter tegnes tryklinjen fra midterskibets laster 622 kN og de 128 kN og ligeledes fra sideskibets 128 kN og 60 kN. Der hvor de skærer hinanden. Sætter man lasten af den overliggende klerestorievæg.

Herefter kan man ved vektor addition, som er meget enkel på en digitaltegning, få resultanten og den retning som tryklinjen vil have til fundamentunderkant.



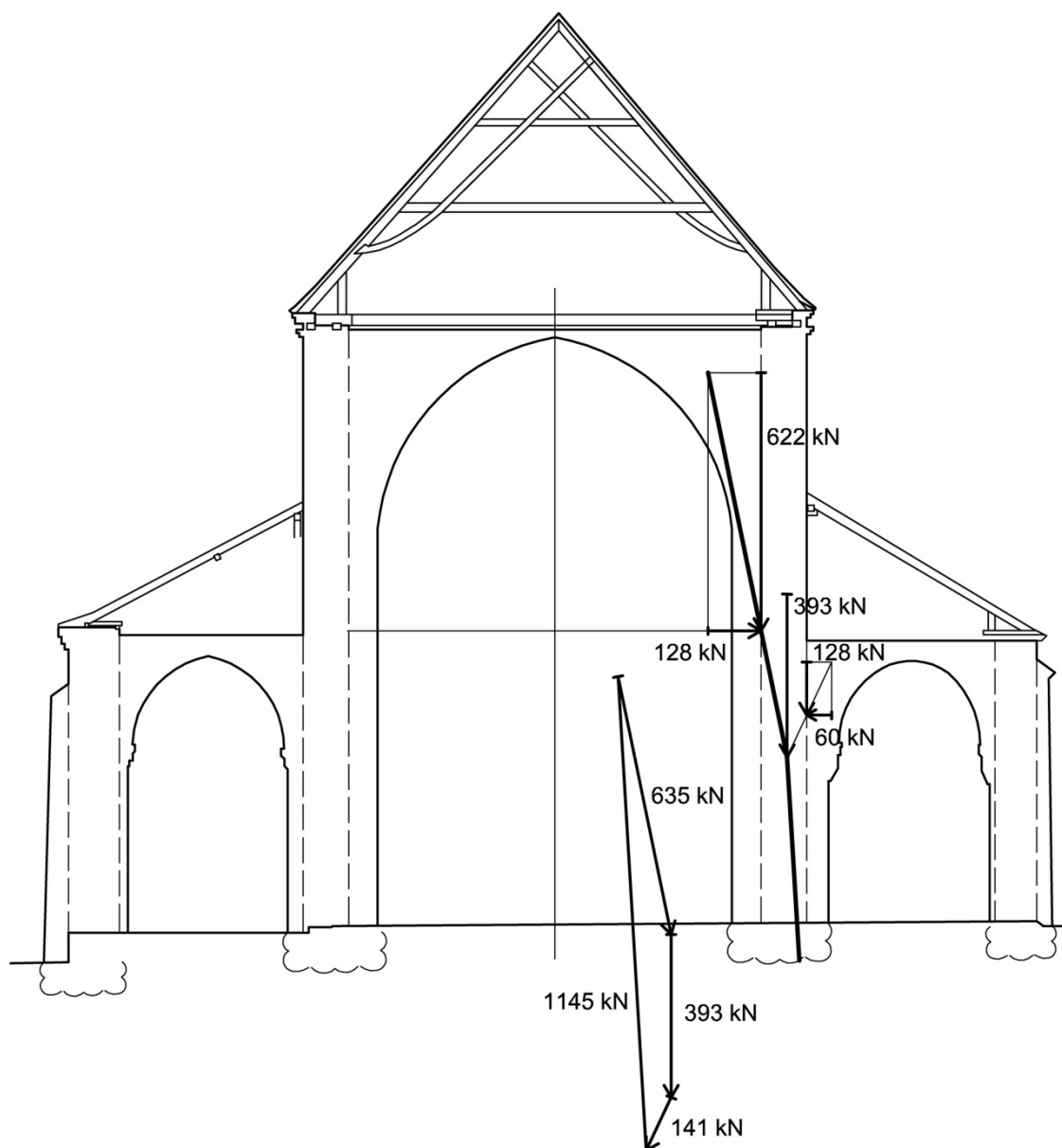


Fig. 9.15 Resultatet af ovenstående beregninger sammensat ved vektoraddition. Tryklinjen er ført til underkant fundament. Som det fremgår holder tryklinjen sig indenfor hvælvets, væggenes og fundamentets tværsnit.

I det aktuelle tilfælde er klerestorievæggens last beregnet som én last på 393 kN. Dette er fordi, at skæringpunktet mellem tryklinjerne fra midterskibet og sideskibet, er tæt på klerestorievæggens midte. Hvis det ikke er tilfældet er det nødvendigt at opdele denne væglast i to kræfter.

## 10. Principper for restaurering

I dette afsnit udpeges nogle af de mest almindelige fremgangsmåder ved afhjælpning af skader og udbedring på konstruktionen. Grundlæggende er rådgiverens opgave at projektere, og efterfølgende styre, at materialevalg og metodevalg udføres mest muligt i overensstemmelse med de oprindelige materialer og metoder.

Når der er foretaget en tilstrækkelig analyse af skader og skadesårsager, må der træffes et valg i mellem forskellige løsningsprincipper:

Man kan acceptere det eksisterende statiske system og de eksisterende laster, og vælge at forstærke konstruktionen. Til denne løsningsmodel hører udskiftninger, som for eksempel udkradsning og omfugning af forvitrede fuger. Det kan også være gennemførelse af fundamentsforstærkninger eller en forbedring af tagremmens forankring i murkronen.

En mere drastisk fremgangsmåde, er at ændre på konstruktionen, og dermed dens virkemåde. Denne fremgangsmåde må altid nøje opvejes i mod hvilke andre hensyn der må tages. Hensyn som ikke at forringe bygningens egenskab som historisk dokumentation, eller risikoen for at forstærkningen blot flytter problemet til et andet sted i bygningen.

Endelig kan man flytte lasten så den passer til den givne geometri. For eksempel kan lasten forøges, så tryklinjen placeres mere hensigtsmæssigt.

### 10.1 Valg af bygningsstatisk indgreb

Udover de økonomiske og udførelsesmæssige hensyn som at begrænse bevaringsindgrebene mest muligt, kan der være bevaringsmæssige og æstetiske hensyn at tilgodese (se afsnit 11 vedrørende strategi for restaurering). Det er derfor væsentligt at holde flest mulige løsninger for øje, inden reparationer eller ombygninger iværksættes.

Særligt for middelalderkirkerne, skal svækkelser og deformationer i én bygningsdel ofte forklares og afhjælpes, ved indgreb i andre bygningsdele. Eksempelvis vil en undersøgelse af kirkeskibet i en romansk kirke ofte afsløre at ydermurens sokkel afleverer et ganske stort tryk mod jorden, alene hidrørende fra egenvægten. En analyse af kraftforløbet viser, at resultanten ved fundament-sunderkant (hidrørende fra egenvægt og eventuelt snelast), ligger meget yderligt se figur 10.1. Horisontalkræfterne hidrørende fra tagkonstruktion, hvælv og murværk flytter resultanten yderligere udefter, hvilket resulterer i deformationer. Her vil en afhjælpning med en fundamentsforstærkning ikke nødvendigvis være det eneste rigtige indgreb, eller kunne stå alene.

Da denne problemstilling er typisk for de murede kirker, gives her en række eksempler på tiltag.

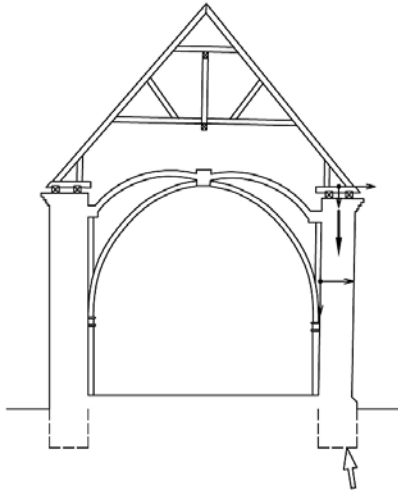


Fig. 10.1

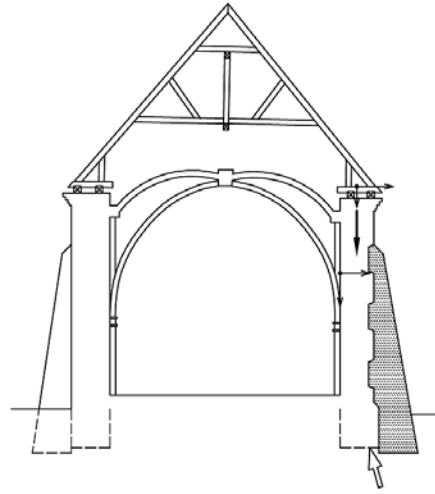


Fig. 10.4

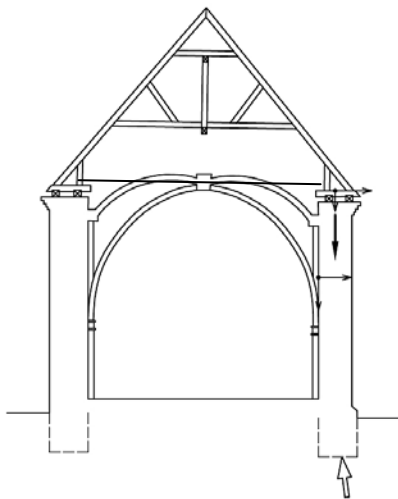


Fig. 10.2

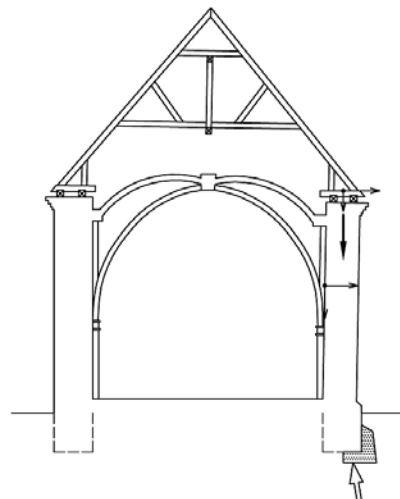


Fig. 10.5

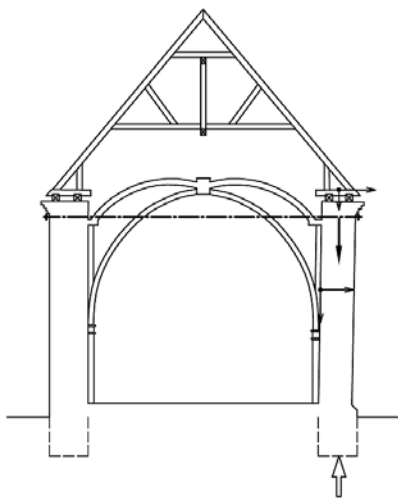


Fig. 10.3

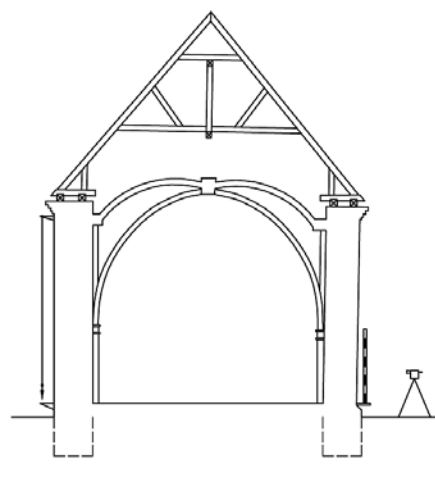


Fig. 10.6

### **Eksempel 1: Reducere de udskydende kræfter ved trækbånd i tagrummet**

Trækbåndet placeres over jordbuen og forankres i murremmen ved tagfoden. Fordelen ved denne forankring er at den er relativ enkel at montere, den supplerer den eksisterende konstruktions virkemåde og den er ikke synlig i kirkerummet. Figur 10.2.

### **Eksempel 2: Reducere de udskydende kræfter, ved trækbånd under hvælv**

Trækbåndet placeres under hvælvet og forankres i ydervæggens murværk. Fordelen ved denne forankring er, som i første eksempel, at den er relativ enkel at montere, den supplerer den eksisterende konstruktions virkemåde. Til forskel fra forrige eksempel, muliggør dette en mere effektiv efterspænding. Her kan både udskydende kræfter fra tagkonstruktion og fra hvælv optages i trækbåndet. Ulempen er trækbåndets synlighed i kirkerummet. Figur 10.3.

### **Eksempel 3: Optagelse af udskydende kræfter ved opbygning af stræbepiller**

Stræbepiller kan være en effektiv afstivning af ydermuren. Mindre sætninger kan forekomme, inden stræbepillen bliver effektiv. En tilføjelse af en, æstetisk set, så dominerende bygningsdel, må naturligvis overvejes nøje. Valg af materialer og byggeteknik må på samme måde vurderes nøje, så konstruktionen kan udføres mest muligt i overensstemmelse med den historiske bygning. Hvis bygningen ikke er forsynet med stræbepiller i øvrigt, skal det vurderes om løsningen overhovedet er forenelig med den aktuelle bygnings virkemåde. Se figur 10.4.

### **Eksempel 4: Forstærkning af fundamentet**

Dette tiltag kan handle om dels at udbygge fundamentet så spændingerne reduceres, dels at føre fundamentet ned til bæredygtige jordlag, og endelig kan eksisterende fundament være nedbrudt. Figur 10.5.

### **Eksempel 5: Overvågning af konstruktionen**

I nogle tilfælde kan det vælges at acceptere revnebilledet og blot foretage de mest nødvendige reparationer, ud fra bygningstekniske og æstetiske overvejelser. Hvis den statiske analyse viser, at der ikke er overhængende fare for konstruktionen eller bygningens funktion, kan i stedet vælges at iværksætte et overvågningsprogram. Overvågning kan være at foretrække, når eksempelvis præmisserne for at bestemme kraftresultanten er utilstrækkelige, eller oplysninger om jordbundsforhold ikke er afklaret.

Ved overvågning af konstruktionen kan beslutningen om bygningsbevarende indgreb udsættes, indtil alle relevante forhold er afdækket. Overvågningen kan omfatte revnemålinger og bevægelser af fikspunkter. I forbindelse med planlægningen af et overvågningsprogram, må der foretages en risikovurdering. I vurderingen fastlægges behovet for eventuelle passive afstivninger og afspærringer. Figur 10.6.

## 10.2 Fundament

De årlige bevægelser for århundrede gamle kirker vil typisk være så begrænsede, at gennemførelse af en forstærkning af fundamentet vil kunne medføre flere revner end hvis de eksisterende fundamenter bevares. Det skal derfor være afgjort at en fundamentsforstærkning er helt nødvendigt for at sikre bygningens stabilitet.

Der må ikke udføres udgravning og tildækningsarbejder før kirkelig myndighed og eventuel bygningsmyndighed har givet tilladelse. Under arbejdets udførelse skal der tages hensyn til, at der kan være kulturhistoriske lag og gravsteder.

### Forstærkning af fundament

Ved forstærkning af fundamentet, skal der først foretages en aflastning af disse. Ved at etablere trækbånd fra hvælvenes fodpunkter kan vandrette kræfter optages af andre konstruktioner midlertidigt. I facaderne bores der forsigtigt huller på hver side af stræbepillerne på tværs af facaderne. I hullerne i kirkeskibets facader monteres trækbånd.

Forstærkning kan ske ved at føre fundamentsunderkant til dybereliggende lag samt forøge fundamentets omfang.

Understøbning af fundamenter skal foregå etapevis i afsnit af længder på højst 1 m ad gangen. Når et afsnit er udstøbt springes 2 afsnit over før næste udstøbning. Et nabofelt kan først udstøbes efter 2 felters udstøbning. For at mindske sætninger afsluttes en fundamentsunderstøbning altid med, at en fuger på 70 mm under eksisterende fundament stoppes med jordfugtig cementmørtel, efter afbinding af det underliggende. Nyt afsnit udgraves først, når understopningen på de tilstødende er afbundet. Alternativt kan der benyttes ekspanderende beton i hele højden i stedet for at udføre understopning.

### Pilotering

Pilotering med nedpressede pæle anvendes sjældent pga. det stablede kampestens ringe sammenhæng. Hvis der er murede fundamenter med god sammenhæng er det en mulighed. I så fald skal piloteringen udføres af folk med stor erfaring og viden om nedpresning af pæle. Presningen af pæle skal ske så udførelsen af arbejdet ikke fører til unødvendige følgeskader på bygningen. For pælepresning graves der ved hver stræbepille først ud til den ene pæl, som presses, inden der graves til den næste pæl.

## 10.3 Murværk

### Forvitret murværk

Forvitringer af fuger og sten kan udvikle sig til et omfang hvor konstruktionens stabilitet bliver svækket. Dermed er det ikke alene et problem for bygningsdelens levetid og det visuelle udtryk, men en risiko for brud på bygningsdelen. Svækkelsen kan udvikle sig langsomt og forholdsvis ubemærket, men være fatal når huset udsættes for lastekstremer, som under en storm. Som det er illustreret i forrige kapitler vedrørende beregning af tryklinjer, kan trykzonen ligge helt

yderligt i murværket. Forvittringer i fugerne på 50-100 mm vil dermed være kritisk, selvom murpillen kan virke rigelig kraftig.

Udbedringen af forvitret murværk, skal ske med materialer der kommer så tæt på det udskiftede som muligt (se afsnittet om materialer). Et godt princip for udbedring, er at arbejde på små afgrænsede felter, frem for hele partier. Forvitrede fuger i hvælv udbedres ved opkilning, udkradsning og omfugning. Opkilning udføres med plast eller egekiler, som efter fugereparation fjernes og erstattes med mørtel. Opkilning i stedet for understøtning, sikrer at hvælvets tryklinje, og dermed statiske virkemåde, ikke påvirkes.

Ved tidligere hvælvreparationer er der ofte anvendt jernkiler, som i så fald skal udhugges og erstattes med mørtel. Sådanne kiler konstateres ofte pga. revnedannelser fra rust. De kan også findes med en simpel metaldetektor.

Understøtning med en buestilling kan vælges for passivt at sikre mod nedstyrtning, men skal ikke overtage lasten af buen eller hvælvet.

Ødelagte og porøse fuger udkradses og omfuges i 30 mm dybde. Konstruktive revner udkradses og omfuges partielt i den dybde, hvor fugen er ødelagt, og alle fuger komprimeres omhyggeligt med fugeske. Revner i hvælv skal undertiden repareres fra både undersiden og oversiden.

### **Tærede jern**

Tæring af indmurede ankre giver anledning til rustsprængninger af murværket. Der er typisk større korrosion af ankrene end det der umiddelbart kan registreres udefra.

I det omfang at ankrene har tilstrækkelig godstykkelse, smede- og maleristandsættes disse og genanvendes. Nye ankre udføres i rust- og syrefast stål og i mål som eksisterende.

Når ankrene er hugget ud, skal murværket retableres. Murstenene udhugges på en sådan måde, at der opstår forbandt. Efter endt anker-istandsættelse forestår murer genindmuring, så der i videst mulige omfang igen opnås forbandt til omkringliggende murværk.

### **Skadet murværk**

Forvitrede, knækkede eller revnede mursten udskiftes med genanvendte eller nye sten. Skadede sten hugges ud med mejsel og nye sten indmures med kalkmørtel. Hele fugen skal være helt fyldt ud.

Ilægning af fugearmering kan vælges ved mindre revner, hvor udbedringen primært er af kosmetisk betydning. Disse skader er typisk i vinduesbrystninger eller over vinduer. Det skal kontrolleres at revnerne ikke skyldes mere afgørende sætnings- eller stabilitetsproblemer. Evt. fugearmering skal være rust- og syrefast.

## 10.4 Tagværket

### Forankring for udskydende kræfter

I en typisk tagfodskonstruktion hviler spærfoden på en indre og ydre murrem. Ved opførelsen har tømmeret været muret inde. Sædvanligvis er der kun bindbjælker på tværs af bygningen, hvor de kan komme over gjordbuerne imellem hvælvene.

Så længe murremme og tagfodder er intakte, er denne konstruktion i stand til at spænde fra bindbjælke til bindbjælke. Men når remmene angribes af svamp og råd, forsvinder denne virkning. Dette har betydet, at man mange steder har fjernet udmuringerne. På denne måde sikrer man sig, at remmene ikke nedbrydes. Den uheldige konsekvens er, at den vigtige konstruktive funktion er forsvundet. Emnet er behandlet i afsnit 5.5 Skader på tagværket.

Hvis man fjerner udmuringerne er det derfor vigtigt, at man etablerer den konstruktive sammenhæng mellem tagværk og murkrone på anden måde.

Den sædvanlige måde at løse problemet på er at fastgøre murremmene til murværket. Da spærfod og bindbjælker er kæmmet ned over murremmene, vil man kunne holde tagværket sammen ved at indlægge vandrette skråbånd fra murremmene og hen til bindbjælkerne, se fig. 10.7.

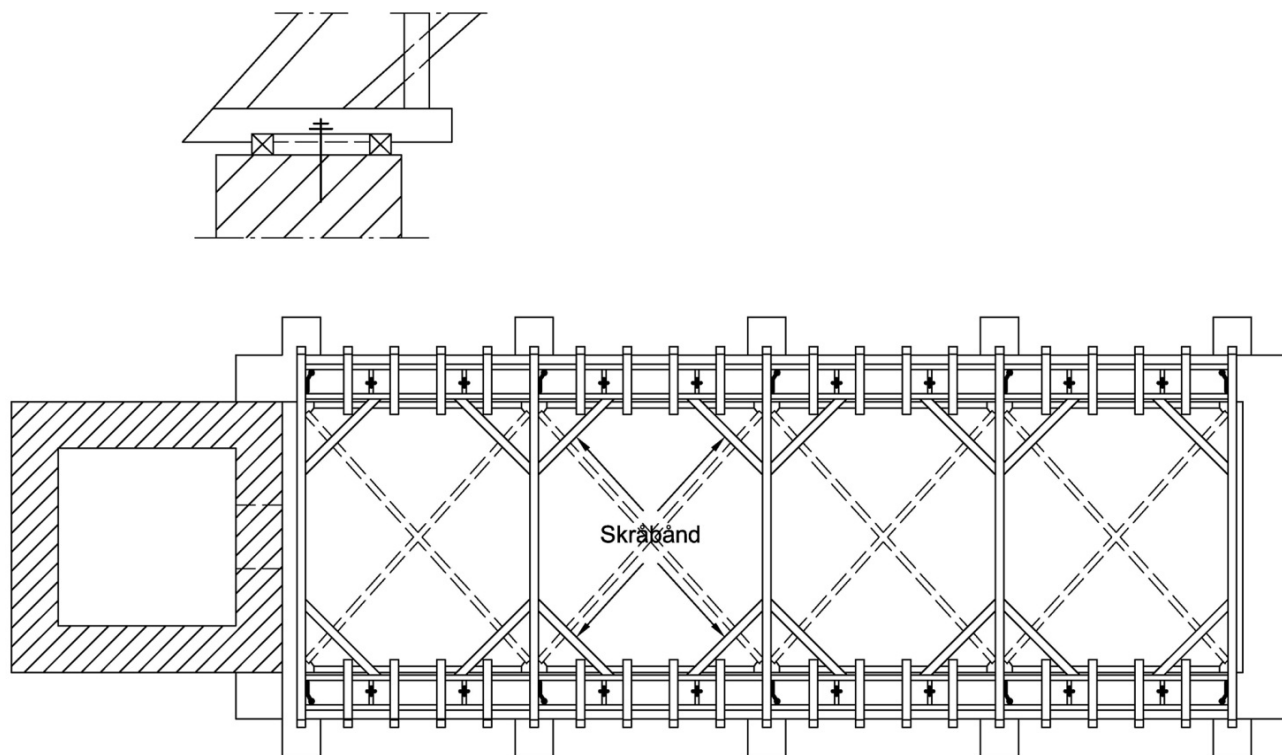


Fig. 10.7 Eksempel på etablering af vandrette skråbånd og forstærket forankring i murkronen. Disse tiltag kan erstatte den reducerede gittervirkning der omtales i afsnit 5.5 Skader på tagværket (se fig. 5.5), samt modvirke revneudvikling i hvælvet langs skjoldbuen, omtalt i afsnit 7.7 Hvælv (se fig. 7.16).



Hvor tagkonstruktionens geometri tillader det, kan skråbåndet udføres som en tømmerkonstruktion samlet med smedet jernbeslag. Fordelen ved dette er, at tagkonstruktionens stivhed forbedres. Restkapacitet i facademuren på luvsiden af bygning kan afstive læsiden, hvor summen af de udskydende laster kan blive kritiske (se også fig. 7.21).

Ved traditionelle tagformer og tunge tage som f.eks. tegl viser beregninger, at der i almindelighed ikke vil være brug for en lodret forankring mod sug. Dette forudsætter dog, at tagværket bl.a. er effektivt forbundet med det øverste bjælkelag. Det øverste bjælkelag, tagbjælkelaget, bør derimod være vandret fastholdt til murværket med ankre. Disse placeres som regel i bindbjælkerne.

I en række tilfælde skal tagværket med ankre også fastholde andre bygningsdele, f.eks. store gesimser og gavltrekanter. Gesimserne bør så vidt muligt gives så meget bagvægt, at de kan hvile i sig selv.

### **Remme**

Remmenes opgave er at fordele trykket fra spærene ned på muren og at fastholde spærene indbyrdes. Ofte medfører rådskader, at hele remmen eller dele af den må skiftes.

Det er vigtigt, at det murværk, der støder op til svampeangrebet træ, behandles med svampedræbende middel. Endvidere skal trædelene: rem, bjælkeender og spærfod, holdes mest muligt fri af murværket.

### **Spærfod/bindbjælker**

Ligesom remmen er spærfoden ofte angrebet af råd eller svamp. Efter afrensning og bortskæring af de angrebne dele skal en reparation opfylde kravene for overførsel af de aktuelle kræfter, jf. ens statiske model. Selv om tappen i spærfoden eller tagbjælkens træ bag tappen er rådnet bort, kan bjælken og spærenden fortsat være tilstrækkelig stærke til at optage de lodrette kræfter. Det forudsættes, at man samtidig fastholder spæret sideværts med et beslag, eventuelt et nakkebåndsbeslag.

Skarring af nye ender udføres som et blad, gerne som et skråt blad. I samlingen indlægges bulldog- eller stjernejern (mellemlæg af stålplader). Derefter samles med bolte og underlagsplader, som skal være tilstrækkeligt store (sidelængde x tykkelse = mindst  $4 d \times 0,4 d$ , hvor  $d$  er boltens diameter). I egetræ, der er hårdt, kan der dog ikke benyttes mellemlæg. Det er væsentligt for samlingens styrke, at afstanden mellem boltene bliver af rimelig størrelse, ofte 40 cm eller mere.

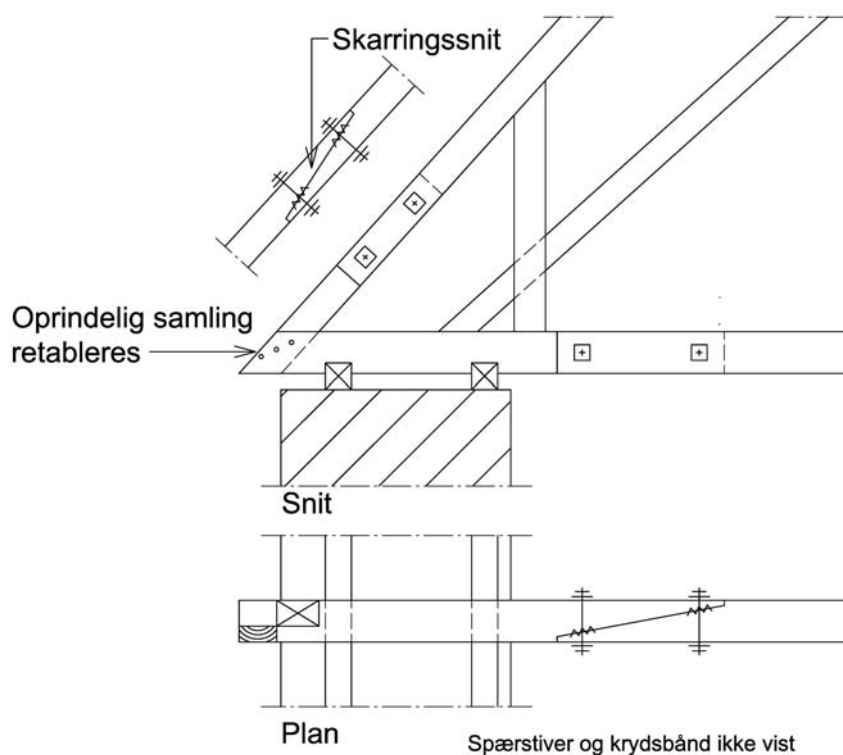


Fig. 10.8  
 Eksempler på udskiftninger af spærfod og bjælkeende, uden at der ændres på konstruktionens geometri og virkemåde.

Bladets skarring kan være stående eller liggende. Ved liggende blade skal underlagspladerne som regel være større.

Traditionelle tømmer-samlinger er udviklede til at fastholde og styre tryk eller træk. Disse kan kun i ringe grad optage bøjning, og er derfor ikke egnede til skarring af bjælke- eller spærstykker. Men med afsæt i de traditionelle tømmer-samlinger, kan man udføre bolteforbindelser, der kan optage bøjningsmomenter.

På figur 10.9 og 10.10 vises eksempel på en statisk model og beregning af samlingen ved udskiftning af en bjælkeende. Beregningen er opstillet i beregningsprogrammet Math Cad.

### Statisk model for stående skråt blad

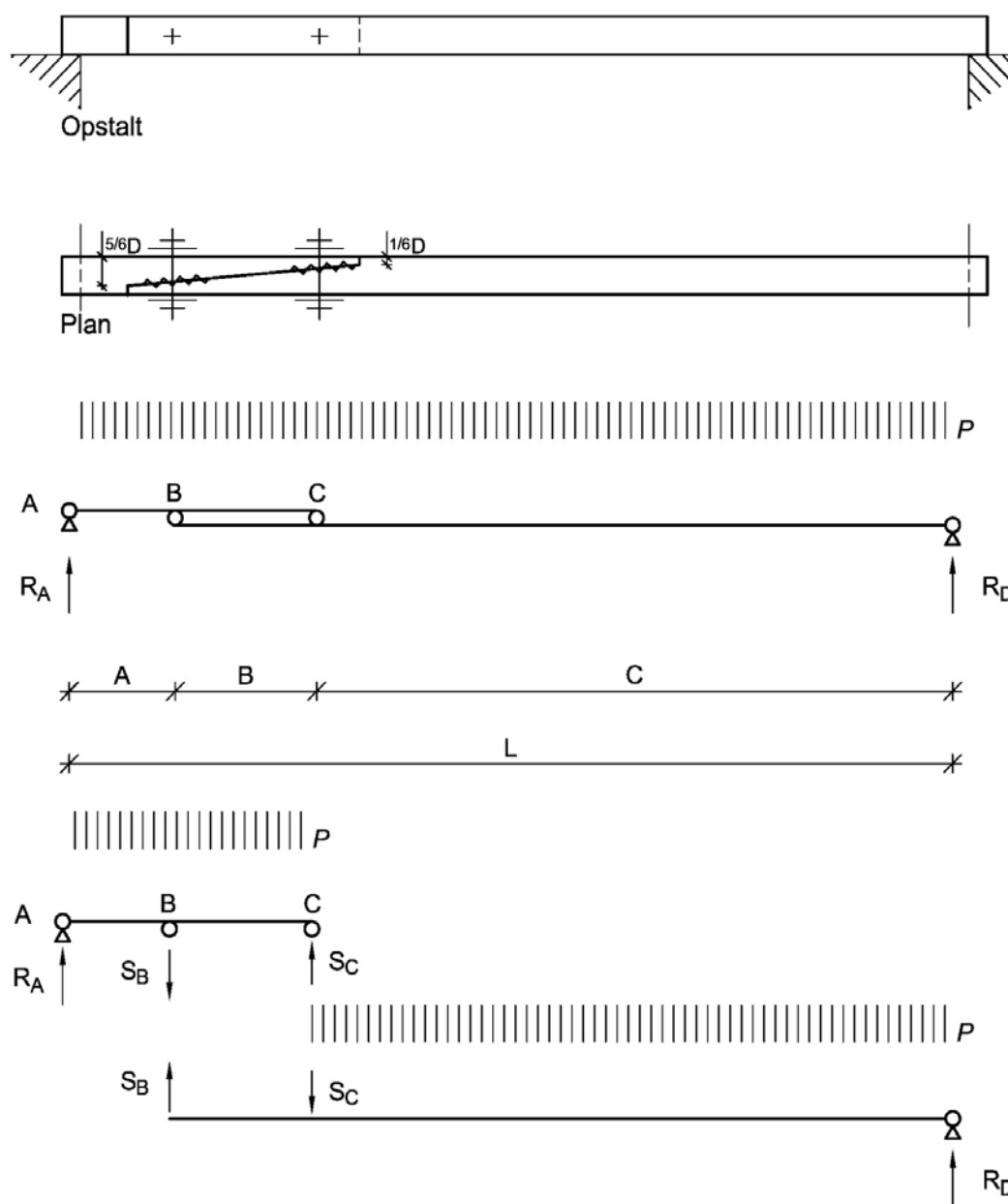


Fig. 10.9

**Moment om C ( $M_C=0$ ) medfører**

$$A := 0.5\text{m} \quad B := 1.1\text{m} \quad L := 6.3\text{m} \quad p := 5.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$R_A := \frac{1}{2} \cdot p \cdot L = 15.75 \cdot \text{kN}$$

$$M_C := R_A \cdot (A + B) - p \cdot (A + B)^2 \cdot \frac{1}{2} - S_B \cdot B = 0$$

$$S_B := \frac{R_A \cdot (A + B) - p \cdot (A + B)^2 \cdot \frac{1}{2}}{B} = 17.1 \cdot \text{kN}$$

$$S_C := S_B - R_A + p \cdot (A + B) = 9.3 \cdot \text{kN}$$

**Kontrol**

$$R_D := p \cdot [L - (A + B)] + S_C - S_B = 15.8 \cdot \text{kN} = R_A = 15.75 \cdot \text{kN} \quad \text{OK}$$

$$M_B := \frac{1}{2} \cdot p \cdot A \cdot (L - A) = 7.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

**Bæreevne eftervisning**

$$f_{\text{md}} := 10 \text{MPa}$$

$$\sigma_M := f_{\text{md}} = 10 \cdot \text{MPa}$$

$$D := 225 \text{mm} \quad b := \frac{5}{6} \cdot D = 187.5 \cdot \text{mm} \quad h := D = 225 \cdot \text{mm}$$

$$W := \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = 1.58 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

$$M_{\text{ud}} := \sigma_M \cdot W = 15.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} > M_B = 7.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{OK}$$

Fig. 10.10

## **Spær**

Store nedbøjninger af tagfladen er ofte forårsaget af skred i spærfoden. Hvis spærlængden er stor, kan det overvejes, om man kan undgå at udskifte hele spæret. Hvis man kun udskifter en del, skal der foretages en beregning af den nye samling (en skarring), og skarringen skal så vidt muligt placeres der, hvor bøjningspåvirkningen i spæret er mindst.

En nedbøjning kan også skyldes svækkelse af store dele af spæret på grund af råd. Rådskadens omfang kan som regel først vurderes, når tagbeklædningen er fjernet og spæret synligt ovenfra. Efter fjernelse af det nedbrudte træ vurderes bæreevnen i spæret. Spæret behandles med svampedræbende middel og repareres eller udskiftes, alt efter skadens omfang.

## **Materialer**

Træ til udskiftning bør være den samme træart og sortering som det oprindelige. Træet skal være vellagret, og hvis det er muligt, vil det være godt at anvende gammelt tømmer.

Man skal sørge for, at træet er kernefuldt og harpiks- eller garvesyreholdigt (fyrre- eller egetræ). Gamle beslag og murankre genbruges i størst muligt omfang efter en rensning. Efter eventuel reparation rustbeskyttes beslaget med f.eks. 2 gange jernmønjemaling, diffusionstæt mellemmalning, efterfulgt af 2 gange grafitmalning.

Nye bolte og beslag, som skal indmures, bør være af rust- og syrefast stål med kvalitetsbetegnelsen A4 eller en tilsvarende kvalitet. De øvrige nye bolte og beslag bør være varmforzinkede.

## 11. Begreber og bevaringsidealer

Begreber som en bygnings originalitet, autenticitet, identitet, fortælleverdi, konstruktiv virkemåde og reversibilitet introduceres som grundlag for at kunne formulere bevaringsprincippet i en given restaureringsopgave.

Desuden berøres de ældre restaureringsholdninger, især diskussionen mellem Viollet le Duc og John Ruskin. Men det er den for tiden gængse danske restaureringspraksis, der især gennemgås og foreslås anvendt.

Alle væsentlige elementer i middelalderkirkebygningerne kan ledes tilbage til kirkens opførelse. Byggetraditionen har udgangspunkt i nogenlunde ensartede metoder, der kun langsomt igennem tiderne er nuanceret og justeret igennem løbende vedligehold af bygningerne. Dette hænger sammen med, at der frem til starten af 1800 tallet var et relativt begrænset udvalg af byggematerialer, og at de forskellige håndværk var nøje afgrænset. Håndværkerlaug sørgede eksempelvis for at fastholde håndværkstraditioner og oparbejdelse af et grundigt kendskab til materialernes fremstilling, egenskaber og anvendelsesmuligheder (Brøgger m. fl. s. 7).

Det betyder ikke, at kirkerne ikke har undergået ændringer undervejs, for det er i høj grad tilfældet. De materialer og byggetekniske metoder, der er anvendt, har til gengæld ikke adskilt sig væsentligt fra bygningens opførelse. Det forhold, at den traditionelle byggeskik og materialeudvalget var ret konstant og relativt begrænset, har været forudsætning for at skiftende tiders formidealer kunne indarbejdes i de århundrede gamle kirker.

Det er med industrialiseringen, at traditionsmønstret ændrer sig og nye materialer får en stor plads i byggeriet. Især den omsiggribende anvendelse af cement i sidste del af 1800 tallet og første halvdel af 1900 tallet medførte til dels en forarmelse af murerhåndværket og mange af de skader, som vi nu skal til at udbedre. For restaureringsarbejdet i dag betyder det, at der må rettes et særligt fokus på hvilke metoder, der bedst kan modsvare det oprindeligt anvendte. Dertil kommer, at tidligere fremstillingsmetoder og byggeteknikker ikke længere er almindeligt kendte.

Bygningsbevaringen kan ikke længere, så selvfølgelig, tage udgangspunkt i de håndværksmæssige traditioner. Arkitekten, bygningsarkæologen, ingeniøren og bygmesteren har sammen en opgave i at træffe beslutninger om metodevalg. Som udgangspunkt skal der vælges metoder, der kommer tættest muligt på oprindelige konstruktioners virkemåde (i henhold til Venezia-Chartret's artikel 10, i Venezia-Chartret 1975 s. 9). Dette er medvirkende til, at der opstår et behov for at formulere bevaringsprincipper.

Holdninger til bygningers bevaring, som det forstås i dag, grundlagdes i forrige århundrede. Teorierne har sit udspring i den store interesse for historisk arki-

tektur, der voksede frem i Europa i sidste halvdel af 1800 tallet (Exner 2007 s. 57).

Den restaureringsdebat der opstod i 1800 tallet med indlæg af især Eugène Viollet-le-Duc (1814-1879) og John Ruskin (1819-1900), pågår stadig iblandt fagfolk. I Danmark var arkitekter som H. B. Storck (1839 -1922) og Mogens B. Clemmensen (1885 - 1943) eksponenter for en restaureringsfilosofi som kan sammenlignes med Viollet le Duc. De var begge ligesom han meget grundige i deres analyse af den enkelte bygnings historie og tilstand. Men flere af deres ”restaureringer” var meget kontroversielle. Fx kan nævnes H. B.Storcks Bjer-nede kirke og Sankt Bendts kirke, men der er også flere af hans værker, der er meget beundret fx karmelitterklostret i Helsingør og Ledøje kirke.

Polariseringen i bevaringsdiskussionen kan, meget forenklet, beskrives som modsætning imellem det museale bevaringsideal og det helhedsorienterede bevaringsideal. Hvor det museale fokuserer på det historiske, især bygningssubstansen som kildemateriale, og det helhedsorienterede fokuserer på bygningsværket.

I Viollet-le-Duc's *Restaurering* fremføres, at en væsentlig grundopfattelse for hans restaurering er:

*”... at historiske bygninger kun umiddelbart besidder deres egen eksistens. Statens og nationens repræsentant, restaureringsarkitekten, der som leder af arbejdet disponerer over betydelige pengesummer, store mængder materiale og arbejder i en proces, der samtidig er forudsætningen for udvikling af ny viden, er berettiget til at foretage en aktiv indgriben i det fortidige materiale. Idet bygningen som oftest ikke er i besiddelse af en tidsligt afgrænset og sluttet form, er det hans ret og hans pligt at foretage en intervention og reorganisering” (Viollet le Duc 2000 s. 8).*

Viollet-le-Duc var anerkendt for sin tekniske dygtighed og kritiserede selv andres restaureringer for at være gennemført med en syndig mangel på kendskab til bygningernes konstruktion og statik. Man kan udlægge hans tilgang til restaurering som en kultivering af den historiske bygning. En kultivering som tog afsæt i bygningens materialer og konstruktive principper. Viollet-le-Duc er, med henvisning til netop kultiveringen af bygningsværkerne, udskaeldt for at stå for en forfalskning af den historiske dokumentation, som bygningen repræsenterer. John Ruskin er blandt disse kritikere:

*”Hverken offentlighed eller de som har ansvaret for offentlige monumenter forstår den egentlige betydning af restaurering. Det betyder den mest absolutte ødelæggelse, der kan overgå en bygning: en ødelæggelse intet kan reddes fra: en ødelæggelse, der følger en falsk beskrivelse af den ødelagte genstand. Lad os ikke bedrage os selv, hvad denne betydningsfulde sag angår; det er umuligt, lige så umuligt som at få døde til at stå op af graven, at restaurere noget, der engang var stort og smukt i arkitekturen.” (Ruskin 2005 s.223 ).*

John Ruskin betragter restaureringen som et onde. Det handlingsorienterede i hans opfattelse rettes imod en konservering af den historiske bygning. John Ruskins holdninger har ansporet en tilbageholdende tilgang til restaureringsarbejdet.

I dag er ark. og prof. Johannes Exner repræsentant for en mere nuanceret forståelse for ”bygningens væren på liv og død”. Eksempelvis fremhæver han kirkerens overlevelse netop i kraft af kirkebygningernes stadige tilpasning igennem ombygninger og tilbygninger (Exner 2007 s. 60). Johannes Exner vægter originaliteten i materialet.

*”Originaliteten knytter sig udelukkende til den substans, dvs. de materialer, som bygningen bestod af, da den blev skabt.” ”Originalsubstans in-situ er det eneste, der kan dokumentere den originale bygnings fortsatte tilstedeværelse og oprindelighed”* (Exner 2007 s. 61).

En konsekvens af dette er dermed, at originaliteten svækkes, hvis skadede mursten udskiftes. Men originalitet i en konstruktions virkemåde kan også vægtes. Eugène Viollet le Duc udtrykker dette:

*”Vi må ikke glemme, at middelalderens (gotiske) bygningsværker er af en anden konstruktion end de romerske, hvis struktur hviler på modsætningen mellem passive modstande og aktive kræfter. I middelalderens bygninger er alle bygningsdele i aktion. Hvis hvælvet udøver et tryk, så udøver stræbebuer eller stræbepiller et modtryk. Hvis en slutsten bryder sammen, så er det ikke nok at afstive den vertikalt, man må opfange de forskellige tryk, der virker ind på den i modsat retning...”* (Viollet le Duc 1866 2000 s. 34).

Viollet le Duc siger altså både, at der er en ret og en pligt til at foretage aktiv indgriben, men også at det skal baseres på en forståelse for den oprindelige bygnings virkemåde. Den samme handling, udskiftning af en svækket bygningsdel, kan ses som et tab af original substans eller som en sikring af original virkemåde.

Viollet le Duc antyder derfor, at der er en anden form for originalitet end det, der er knyttet til originalsubstansen. Den anden og centrale opfattelse er af ikke-materiel art. Den knytter sig til forståelsen af det originale gennem at forstå de kundskaber og den viden og de ideer, der lå til grund for at skabe en bygning i første omgang.

Dette bør indgå, når ingeniørens grundlag for bevaring skal beskrives. Som oftest er det arkitekter, bygningsarkæologer og kunsthistorikere, der fastlægger bevaringsprincippet for en restaurering. Ingeniørens tilgang tager sit afsæt i bygningsteknologi og i de statiske beregningsteorier. Udfordringen er at relatere dette til den historiske bygning. At sikre konstruktionens dokumentation af en given tids *viden* og *kunnen*.

Ingeniøren, der har ansvaret for sikringen af bygningens fortsatte styrke, stabilitet og holdbarhed, kan ikke altid have en tilbageholdende tilgang til restaureringsarbejdet. Særligt ikke når det gælder konstruktioner, der er under nedbryd-



ning. Men ved at udskifte det nedbrudte korrekt kan den originale virkemåde og de autentiske teknologier genskabes. Dette fokus åbner for en aktiv brug af bevaringsidealene. Ingeniøren er dermed eksponent for et bygningsteknologisk bevaringsideal.

I forhold til at sikre ”at der ikke sker en forringelse af de kulturværdier, der er knyttet til kirkebygninger” (Loven om folkekirken § 1 stk.3), kan ansvarsfordelingen i bevaringsarbejdet således spredes ud på tre områder: Et musealt bevaringsideal, et helhedsorienteret bevaringsideal og et bygningsteknologisk bevaringsideal.

Set i den sammenhæng bliver ingeniørens rolle tydeligere. Ingeniøren kan med et bygningsteknologisk bevaringsideal spille en aktiv rolle i den aktuelle restaureringsdebat og dermed være en betydelig ressource for restaureringen.

I det følgende analyseres, hvordan bevaringsidealene kan formuleres igennem en række nøglebegreber.

## 11.1 Bevaringsgrundlagets nøglebegreber

Betydningen af at have et bevaringsgrundlag som udgangspunkt for arbejdet med den historiske bygning, er afgørende for at kunne handle stringent i udførelsesfasen. Defineringen af grundlaget skal ske meget tidligt i planlægningen af en bevaringsopgave. For at beskrive bevaringsgrundlaget analyseres ud fra en række nøglebegreber. Nøglebegreberne skal strukturere analysen og tilføre registreringerne objektivitet og en mere præcis argumentation.

I det følgende redegøres for nøglebegrebernes mulige praktiske anvendelse i bevaringsarbejdet.

Især er det ønsket at fremhæve det potentiale i nøglebegreberne, der er relevant for konstruktionsingeniøren. Diskussionen af begreberne skal ses på baggrund af den præmis for restaurering, at der ved restaureringsindgreb både kan tabes og vindes inden for hvert af de fem nøglebegreber. Begreberne redegøres for, og kommenteres, ud fra Johannes Exners definitioner.

## 11.2 Originalitet.

*Originalitet (oprindelighed) defineres som den grad af ægthed, som bygningen besidder på et givent tidspunkt i sit procesforløb, vurderet i forhold til dens genesisstand, tidspunktet, da den blev skabt, den eneste gang den var 100 procent original. (Exner 2007 s.61)*

Denne definition knytter sig kun til materialets grad af ægthed set i forhold til opførelsetidspunktet eller genesisidspunktet. Nødvendigheden af at bevare det originale stilles overfor nødvendigheden af at udskifte forvitrede og nedbrudte materialer.

Ingeniøren vil, i relation til at bevare det originale, skulle sikre den originale virkemåde. Ud fra det bygningsteknologiske bevaringsideal er det derfor afgørende at sikre, at de originale teknologier og materialer anvendes.

### 11.3 Autenticitet

*"Autenticitet (troværdighed) defineres som den agtbed og gyldighed, hvormed bygningen fremtræder. Og som fremgår af dens strukturer, detaljer og overflader, der dokumenterer hinanden i en lang sammenhørende kontinuitet og således sammen logisk beretter og bekræfter bygningens historie og kontinuerte procesforløb"* (Exner 2007 s.62).

Bevaring af selv de mindste detaljer kan være af største betydning for autenticiteten, herunder patina.

J. Exner bruger begrebet til at vurdere et givent øjebliksbillede af en bygning. En anden betydning af ordet autenticitet er tilforladeligt, modsat mystisk eller mærkeligt. Som ingeniør bør man derfor overveje de kundskaber og den viden som ligger i den oprindelige bygningsteknologi på opførelsestidspunktet. Hvad var tilforladeligt dengang? Derefter bør man overveje, hvad vi kan og ved i dag om traditionelle håndværk. Hvis der er et stort overlap, bør dette udnyttes maksimalt.

Ved sådan en tilgang bliver autenticitet en aktiv strategi for vedligeholdelsesarbejder.

### 11.4 Identitet

*"Identitet (fremtoning) defineres som det udseende, den fremtoning og personlige karakter, bygningen på et bestemt tidspunkt i sit historiske procesforløb har erhvervet sig og dermed udstråler."* (Exner 2007 s. 63).

Identitet vil ændre sig i procesforløbet og bliver aldrig den samme som på opførelsestidspunktet.

Fremtoning defineres ved bygningens udseende og karakter og knyttes til bygningens komposition formmæssigt, materialemæssigt, i farvevalg etc. Restaureringsarkitekten må være meget bevidst omkring bygningens identitet, så de påvirkninger, der er uundgåelige, bygger videre på og udvikler identiteten.

Forskellen på autenticitet og identitet er udtrykt på denne måde, hårfin. Igen må begrebet identitet, som aktiv strategi for nødvendige indgreb, indebære, at overlappet mellem oprindelige og nutidige byggetraditioner øges til det maksimale.

### 11.5 Narrativitet

*"Narrativitet (fortælleverdi) defineres som den fortælleevne, bygningen besidder og har erhvervet sig gennem livet, og som kommer frem ved bevarede historiske helheder, bygningsdele, bygningsarkæologiske spor, detaljer og rester fra tidligere perioder og hændelser. Bygningen selv er den mest direkte og originale kilde til bygningens historie."* (Exner 2007 s. 64).

Fortælleverdi eller læselighed, defineret ved bygningens evne til at vise bygningens historie og hændelser i dens levetid. Narrativitetsprincippet kan bruges til

at tydeliggøre vigtige skel i bygningens levealder, f.eks. ved at lade en moderne tilbygning være tydeligt forskellig fra det historiske.

I restaureringsammenhænge, hvor nye bygningspartier skal erstatte manglende eller nedbrudte dele, må disse indgå harmonisk i helheden, men adskille sig fra de omgivende partier så restaureringen ikke forfalsker det historiske vidnesbyrd. Dette kan være en uhyre subtil balancegang. Hvis en mursten udskiftes, kan man for eksempel anvende en vandstrøgen kulbrændt mursten i stedet for en oprindelig håndstrøgen kulbrændt sten. Eller savskåret træ i stedet for håndhugget (slinget) træ.

## 11.6 Reversibilitet

*"Ved reversibilitet forstås den fysiske form, et indgreb udføres med, som muliggør, at det kan fjernes senere uden at have skadet bygningen, der herefter fremtræder lige så intakt som før indgrebet."* (Exner 2007 s. 65).

At sikre bevaringsindgreb en reversibilitet eller tilbageføringsmulighed er altså, at indgrebet kan føres tilbage, så bygningen fremstår som før indgrebet. Ved addition i stedet for subtraktion opnås et forsigtighedsprincip i forhold til risikoen for uigenkaldelige tab med reduceret originalitet og autenticitet som konsekvens.

I ingeniørens tilgang er dette princip i modstrid med vægtningen af håndværkets videreførelse. Reversible adderinger resulterer i en håndværksmæssig og materialemæssig undtagelsestilstand. På den måde risikerer man at kompromittere det oprindelige udtryk, bygningens identitet og virkemåde.

Denne korte gennemgang og kommentering af nøglebegreberne er medtaget, fordi ingeniøren igennem sine valg ikke kan undgå at påvirke de aspekter, der her er defineret.

## 11.7 Grundlaget for bevaring af den historiske bygning

Betydningen af at kunne erfare vores fortid igennem bygningsværker kan defineres af alle, om det er som enkelt individ, befolkningsgruppe, som folkeslag eller igennem en verdensomspændende organisation som UNESCO.

Den historiske bygning repræsenterer fortiden på en direkte måde og kan opleves umiddelbart og uden særlige forkundskaber. Den historiske bygning kan skabe fælles identitet og dyrkes som reference for en kulturs udspring og udvikling.

Betydningen ændrer sig, og definitioner bliver til stadighed forsøgt uddybet og varieret. ICOMOS fungerer som UNESCOs ekspertorgan i spørgsmål inden for bevaring af kulturmiljøer. ICOMOS' vigtigste opgaver er at udvikle principper og normer i bevaringsarbejdet, og står bag en lang række charters og kon-

ventioner. I UNESCOs regi blev der i 1964 i Venezia formuleret en overordnet ramme for bevaringsarbejdet:

*”Som bærere af et åndens budskab fra fortiden er folkenes historiske mindesmærker det levende vidnesbyrd i nutiden om overleveringer gennem århundreder. Menneskebeden, der dag for dag bliver sig stadig stærkere bevidst, at de menneskelige værdier er en enhed, betragter mindesmærkerne som en fælles arv og erkender sig – overfor fremtidens generationer – solidarisk ansvarlig for bevaringsarbejdet. Den forpligter sig til at give dem uforfalsket videre i al deres rigdom” (Venezia-Chartret 1975 s.7).*

Begrebsgrundlaget i bygningsbevaringen er grundlaget for at kunne vurdere resultatet af anstrengelserne med at sikre de historiske bygningers overlevelse.

Uddraget fra Venezia-Chartret viser den overordnede målsætning, men peger også på nødvendigheden af at forklare værdierne og skabe definitioner. Hvornår er noget et historisk mindesmærke? Hvornår er der tale om forfalskning?

Ingeniøren kan med sin materialeteknologiske uddannelse være et bindeled, der kan sikre, at overlappet mellem de historiske og de moderne metoder og materialer bliver så stort som muligt. Ingeniøren skal kende til de traditionelle håndværksfags nuværende stade, f.eks. igennem studiet af erhvervsskolernes lærebøger for murere, tømrere og smede.

I *Venezia Chartret's* artikel 10 (Venezia Chartret 1975 s. 9) beskrives det som en selvfølge, at man under restaureringen af et hus anvender samme teknik og materialer, som er anvendt i det bestående. I den praktiske gennemførelse af restaureringer støder denne forudsætning uvægerligt på opvejninger mod, hvad der er praktisk gennemførligt. Samme artikel 10 imødekommer dette med den betingelse, *”at nye materials brugbarhed ikke blot må være godtgjort videnskabeligt, men også garanteret gennem erfaring”* (Venezia Chartret 1975 s. 9). Emnet er helt centralt i restaureringsarbejdet.

Baggrunden for udarbejdelsen af Venezia Chartret, var efterkrigstidens enorme genopbygningsopgave i Europa, herunder arbejdet med de historiske bygninger. Harald Langberg stod for den danske oversættelse af Venezia Chartret. I Harald Langbergs oversættelse anfører han, i en kommentar til Chartret, følgende: *”Det betragtes i artikel 10 som selvfølgelig, at man under restaurering af et hus skal anvende den teknik og de materialer, som har været brugt ved opførelsen, men i tilfælde, hvor teknikken og materialerne har vist sig uhensigtsmæssige, kan man ikke være bundet til at gentage fortidens fejl..”* (Venezia-Chartret 1975 s.17).

Ingeniøren har en afgørende rolle i beslutningsprocessen omkring materiale- og metodevalg. Fejlindgreb og fejlbehandlinger i kirkebygningerne har, som det konstateres i *Kirkens murværk* (Brøgger m. fl. 1985 s. 8) forårsaget store og kostelige skader. Et andet aspekt er, at bygningens egenskab som historisk do-

kumentation eller bygningens originalitet tabes. Dette behandles nærmere i afsnittet principper for restaurering.

Kirkerne ombygges og bygningsdele udskiftes igennem historien. Har ombygninger mindre værdi? Er det forfalskning, hvis en forvitret bygningsdel udskiftes, eller er det først en forfalskning, hvis der ikke udskiftes med tilsvarende materialer i tilsvarende forarbejdning?

Kirkebygningernes brug til kirkelige handlinger er i sig selv betydningsfuld. Er det en sikring af, at kirkerne fortsat er egnede som kirker, der er det afgørende?

Rækken af disse overvejelser er lang - i enhver restaureringssag. Spørgsmålene kan ikke besvares entydigt, og det understreger, at der ikke kan udstikkes enslydende retningslinjer for gennemførelsen af den ”perfekte” restaurering. I stedet må kulturen omkring bevaringsarbejdet udvikles og nuanceres.

For at opnå de bedste betingelser for udviklingen af bevaringsarbejdet, er det nødvendigt at inddrage alle relevante faggrupper i bevaringsdebatten. Bevaringsdebatten står ikke stille, men udvikler sig, skifter fokus og har, som nutidig arkitektur, skiftende dogmer.

I år 2000 afholdtes en konference i Krakow. Konferencen var kulminationen på tre års tværfaglige forskningsprojekter og international debat imellem europæiske universiteter og institutioner. Konferencen støttedes af ICOMOS og sås som en videreførelse af Venezia-Chartret fra 1964. Resultatet af konferencen er et charter med retningslinjer for restaurering og bevaring af den faste kulturarv i de europæiske lande. Krakow chartrets artikel 11 beskriver den gevinst, der ligger i bevaringsarbejdet.

*”Kulturarvens bevaring bør være en integreret del af et samfunds planlægnings- og forvaltningsprocesser, idet den kan bidrage til en bæredygtig, kvalitativ, økonomisk og social udvikling.”* (Algren-Ussing / Krakow Charter s. 6).

Dette er et vægtigt argument for, at afkastet i en restaureringsindsats nødvendigvis må række længere end til blot at sikre bygningen for yderligere en årrække. Artikel 11 i chartret giver det overordnede svar på den grundlæggende præmis for restaurering – hvorfor skal vi bevare? Chartrets svar er, at kulturarvens bevaring *kan* bidrage til en bæredygtig, kvalitativ, økonomisk og social udvikling, men ikke at det nødvendigvis sker.

Ser man på den enkelte restaureringsopgave, er det afledte spørgsmål: hvorfor bevare? Hvorfor skal der bruges ekstra ressourcer på en byggeteknik, der er mere tidskrævende eller kræver grundigere forundersøgelser eller kræver dyrere byggematerialer?

En del af svaret er, at viden, traditioner, metoder og indsigt i den praktiske udførelse fortabes, hvis ikke indsatsen er i overensstemmelse med bygningen. Hver restaureringsopgave er en mulighed for at dele og formidle viden, for at få indsigt i århundreders udvikling af byggetraditioner og dermed at forbedre vor tids håndværk og byggerier.

I indledningen nævnes risikoen for tabet ved, at ingeniøren ikke ser bevaringsopgaven i et større perspektiv end det at løse et givent statisk problem.

Fordi restaureringsopgaver er komplekse, er det vigtigt, at rådgivere inddrager bygmestre og traditionelt uddannede håndværkere i diskussioner og beslutningsprocesser på stedet. Det er heri, at muligheden for at sikre, at der kommer en bæredygtighed og en kvalitativ, økonomisk og social gevinst, er til stede.

Men ingeniøren skal være bevidst om den funktion og tage den opgave på sig sammen med de øvrige aktører i byggeriet. At det er en udfordring for rådgiverne, at inddrage bygmestre og håndværkere i beslutningsprocessen, viser sig i kravet om, at byggeopgaver typisk skal udbydes i relativt detaljerede beskrivelser. Selvom arbejdet er beskrevet så detaljeret, som det lader sig gøre, vil restaureringsarbejdet adskille sig fra arbejdet med ikke historiske bygninger og nybyggeri.

## 12. Myndighedsbehandling

I dette afsnit beskrives aktørerne i kirkebyggesager samt de juridiske krav og myndighedsbehandlingen. Herunder de kirkelige myndigheder, nationalmuseets og den kongelige bygningsinspektørs rolle.

I bevaringsindgreb, hvor der ikke er tale om tilbygninger eller bygningsændringer, men alene om sikring mod revneudvikling og skadesudbedring, er der ingen præcise retningslinjer for, hvordan ingeniøren for eksempel skal udføre en statisk beregning for hvælvkonstruktioner. Der stilles ikke krav om indsendelse af dokumentation til den kommunale byggesagsbehandling, så længe projektet kun indebærer konstruktive indgreb i eksisterende konstruktioner med henblik på at istandsætte disse.

Hvor der for eksempel er tale om stenskader i større omfang, eller hvor der forekommer revner i murværket, skal istandsættelsesforslaget forelægges den kirkelige myndighed til godkendelse. Den kirkelige myndighed er i første instans Stiftsøvrigheden.

Kirker administreres efter *lov om folkekirkens kirkebygninger og kirkegårde* og er ikke omfattet af *lov om bygningsfredning og bevaring af bygninger*.

De i bevaringssammenhænge væsentligste bestemmelser i lov om folkekirkens kirkebygninger og kirkegårde er følgende paragraffer:

*§ 1 stk. 3: at sikre, at der ikke sker en forringelse af de kulturværdier, der er knyttet til kirkebygninger og kirkegårde.*

*§ 3. Menighedsrådet sørger for vedligeholdelse af kirken og dens inventar og udsmykning.*

*§ 8. De kgl. bygningsinspektører, Nationalmuseet og Akademiet for de skønne Kunster yder Kirkeministeriet og stiftsøvrighederne sagkyndig bistand i forhold, der vedrører kirker og kirkegårde.*

Som rådgiver i kirkesager forpligter man sig altså til at sikre, at der ikke sker en forringelse af kulturværdier. I henhold til § 3 er det menighedsrådet, der er bygherre.

Rådgiveren er, underlagt kravene i *Bygningsreglementet* og *Eurocodes*. Reglerne for beregning, dimensionering og dokumentation er meget præcise og detaljerede, når det gælder almindelige konstruktionstyper. De fleste beregningsregler baserer sig på elasticitetsteorien. Førnævnte regler åbner dog også op for mere specielle eftervisningsmetoder og dokumentationsformer. I relation til middelalderkirkerne er det af afgørende betydning, at kunne anlægge betragtninger der tager udgangspunkt i den konkrete bygning, og ikke i en praksis for nyere bygninger. Det kan eksempelvis være igennem brug af plasticitetsteoriens nedre værdisætning, som er behandlet i kapitel 7, 8 og 9.

Det grundlæggende krav til bygninger er:

*Bygninger skal opføres, så der opnås tilfredsstillende forhold i funktions-, sikkerheds-, holdbarheds- og sundhedsmæssig henseende.*

*Udførelsen skal være i overensstemmelse med god praksis, og der skal anvendes materialer, som er egnede til det aktuelle formål (BR10 Kap. 4.1 Stk. 1).*

Det grundlæggende krav til dimensionering er i henhold til BR10 Kap. 4.2 Stk. 1 at: *"Dimensionering af konstruktioner skal ske på grundlag af følgende Eurocodes med tilhørende danske annekser..."*. Herefter er listet gældende Eurocodes, der i mange tilfælde definerer krav om CE-klassificering af materialer mv.

Det er imidlertid ikke nødvendigvis sådan at materialer og konstruktioner skal møde disse krav.

*Når der anvendes materialer og konstruktioner, der ikke dækkes af Eurocodes angivet i stk. 1, skal der på anden vis dokumenteres, at der opnås sikkerhedsmæssigt tilfredsstillende forhold. Prøvningsresultater, standarder eller alment anerkendte anvisninger kan med fordel indgå i dokumentationen under forudsætning af, at sikkerhedsniveauet herunder eventuel tredjepartsovervågning svarer til niveauet nævnt i stk. 1-4. (BR10 Kap. 4.2 Stk. 6).*

Disse overordnede formelle krav giver mulighed for at anvende fagbøger af ældre dato, når blot udførelsen følger *"alment anerkendte anvisninger"*. Valget af statisk model er frit. Netop dette forhold er væsentligt, fordi de historiske konstruktioners statiske principper nødvendiggør en specialisering i forhold til de beregningstekniske redskaber, man er fortrolig med fra moderne konstruktions typer.

En manglende specialisering kan medføre unødvendige indgreb eller overdimensionerede forstærkninger.

De forudsætninger, der skal lægges til grund for beregningerne, giver også anledning til at anvende metoder, der afviger fra moderne byggeri, herunder beregningsmæssig håndtering af laster, specielt egenlast og vindlast samt fastlæggelse af materialeparametre.

På spørgsmålet om fastlæggelse af materialeparametre og valg af beregningsmetoder, kan der således godt anvendes materialer der ikke er CE-klassificerede.

Til bestemmelse af materialeparametre kan det af flere grunde være nødvendigt at få udført materialeprøvning af for eksempel mørtelsammensætning og stenkvalitet. Dels kvalificeres kendskabet til bygningen og dels forhindres, at for stærke materialer anvendes, og endelig kan forudsætningerne for beregningerne gøres mere præcise.

Det er en nødvendighed at være kritisk overfor de "standardiserede" krav til materialerne. Et eksempel på dette er *Eurocode 6: Norm for murværkskonstruktioner*. Heri stilles der krav om, at anvendte mørtler og teglsten skal være CE certificerede, hvilket betyder overholdelse af harmoniserede standarder. Det kan i praksis være i modstrid med anvendelsen af sten brændt efter ældre brændingsme-



toder og kalkmørtler der tilpasses den oprindelige mørtelsammensætning. Prøvningsresultater kan lægges til grund for at afvige fra kravet for CE certificeringen, men det kræver en særlig stillingtagen og argumentation. Forundersøgelser og materialeprøvning kræver, at der afsættes ressourcer.

Nedenstående er en overordnet gennemgang af de typiske aktører i sager om restaurering af kirker:

Lov om folkekirkens kirkebygninger og kirkegårde og bekendtgørelsen om folkekirkens kirkebygninger og kirkegårde danner rammen for menighedsrådenes forvaltning af kirkebygninger og kirkegårde.

- Menighedsrådet er bygherre. Menighedsrådets beslutning om udvidelse, ombygning og ændring af en kirkebygning skal godkendes af stiftsøvrigheden. Menighedsrådets beslutning om istandsættelse af en kirkebygning, der er mere end 100 år gammel, skal godkendes af stiftsøvrigheden. Menighedsrådet varetager kirkens daglig drift og administrerer de økonomiske midler, der tildeles via den kirkelige ligning (lokal kirkeskat). Menighedsrådet ansøger om godkendelse af fx prøvegravninger ved fundamenter eller bygningsmæssige indgreb.
- Provstiudvalget består af provsten og et antal medlemmer valgt af menighedsrådene i provstiet. Provstiudvalgets opgave er blandt andet at fastsætte drifts- og anlægsrammer for de kirkelige kasser i provstiet og fastsætte det samlede ligningsbeløb for provstiet/kommunen.
- Stiftsøvrigheden er godkendende myndighed i forhold til udvidelse ombygning og ændring af kirkebygninger. Endvidere skal istandsættelse af kirkebygninger, der er over 100 år gamle, godkendes af stiftsøvrigheden.
- Kirkeministeriet er den folkekirkelige centralstyrelse og administrerer bevilinger til den statsfinansierede del af folkekirken. Ministeriet udarbejder lovforslag og udsteder generelle og administrative forskrifter for det kirkelige forvaltningsområde.
- Nationalmuseet og de kgl. bygningsinspektører yder Kirkeministeriet og stiftsøvrighederne sagkyndig bistand i forhold, der vedrører kirker og kirkegårde. Nationalmuseet har ekspertise indenfor bygningsarkæologi og konservering og deltager især i udpegningen af de væsentlige betydningsbærende historiske spor, der skal bevares. Forundersøgelser som fx prøvegravninger vil i visse tilfælde blive fulgt af Nationalmuseet. De kgl. bygningsinspektører afgiver udtalelser til stiftsøvrighederne i konkrete sager og foretager i den forbindelse en arkitektonisk og æstetisk vurdering af forslaget samt en bedømmelse af tilhørende udgiftsoverslag.
- De Kgl. Bygningsinspektører er konsulenter med den opgave at sikre, at kirkerne vedligeholdes og bevares i overensstemmelse med de kriterier, der er i lovgivningen, herunder de bevaringsæstetiske overvejelser.

- Arkitekten vil typisk være hovedrådgiver og være den overordnede og koordinerende rådgiver. I byggesagens første fase formulerer arkitekten det overordnede byggeprogram og definerer værdigrundlaget.
- Ingeniøren dækker konstruktions-, VVS- eller el-ingeniør. Ingeniørens ansvar i forbindelse med rådgivning i kirkesager adskiller sig principielt ikke fra andre byggesager.
- Konsulenter kan være geoteknikere, landmålere, laboratorier til undersøgelse af murstens- og mørtelprøver mv.
- Bygmester og entreprenører skal i henhold til loven om udbud af statsfinansierede byggeopgaver udvælges i fri konkurrence. Udbuddet kan dog målrettes firmaer med en dokumenteret fagekspertise og erfaring inden for restaurering, ved prækvalifikation og begrænset licitation. Underhåndsbud kan indhentes på bygge- og anlægsarbejder med en samlet anslået værdi af arbejdet eksklusive moms på mindre end 3 mio. kr. (for de nærmere bestemmelser henvises til teksten i tilbudsloven).

Det tilrådes, at der generelt i kirkesager gås frem efter et forsigtighedsprincip i forhold til indhentning af accepter, godkendelser og tilsyn. Dette indebærer konkrete, fyldestgørende orienteringer/skrivelser til alle relevante parter, hvad enten det gælder forundersøgelser, prøvegravninger, udbedringsarbejder eller større istandsættelsesopgaver.

Ansøgninger skal altid afsendes af bygherren, der altså er menighedsrådet. Det vil typisk være rådgiveren, der formulerer ansøgningen, eller bistår menighedsrådet med det tekniske indhold, hvad enten det drejer sig om destruktive prøver, prøvegravninger ved fundamenter eller bygningsmæssige indgreb som istandsættelser eller ombygninger.

## Konklusioner

Middelalderkirkerne som bærer af vores kulturarv i form af selve bygningerne og de kundskaber, viden og funktioner, der er deres forudsætning, er et så vigtigt element i vores selvforståelse, at de bør bevares på så højt niveau, som det er os muligt at gøre.

Vi må konstatere, at en bygning, som er skabt for snart 1000 år siden, uvægerligt vil få problemer i løbet af sin eksistensperiode. Det er et uomgængeligt faktum, der har at gøre med et cyklisk aspekt af naturlovene. Der er en nedbrydende kraft i form af slid, vejrlig, kemiske og biologiske mekanismer. Dette skal vi ikke nødvendigvis begræde. Hvis det ikke var sådan, så ville naturlovene være nogle helt andre, og så var der måske mere grund til bekymring.

For hver eneste bygningsdel er der en naturlig cyklus af skabelse, vedligeholdelse, kultivering, nedbrydelse og genskabelse. Denne proces har forskellige frekvenser for bygningens forskellige dele. Principielt er det ønskeligt at bevare originalsubstansen så længe som muligt, men intet materielt varer for evigt. Der skal med jævne mellemrum foretages fornyelser. Kalken på facaden skal udskiftes hver 5.-10. år, malingen på vinduerne hver 10. år, tagrenderne hver 25. år, tegltaget måske hver 50. år, spærfødderne skal måske repareres efter nedbrydning af råd og svamp efter 100-200 år osv.

Hver gang man skal foretage en genskabelse eller restaurering, kan man lære af naturens nedbrydende virkning og foretage justeringer af bygningsdele med henblik på forbedringer. Dette kan man kalde at kultivere.

Arkitekten Walter Gropius skrev engang:

*"Materien er i sig selv død og livløs. Først formen giver den det liv, som kunstnerens skabende vilje ånder ind i den....."*

*Kunsthåndværkets værdi består først og fremmest i den sjælelige tilfredsstillelse af en indre forløsningstrang, ikke i materialets egen værdi."*

At skabe, bevare, kultivere, ofre og genskabe gælder således ikke kun det materielle. Det gælder i lige så høj grad funktioner, kundskaber og viden. Også dette er kulturarv. Hvis vi vil bevare dette aspekt af vores kulturarv, stiller det særlige krav til de principper, som vi restaurerer efter.

Derfor er det af afgørende betydning, at vi studerer de historiske forudsætninger, kender til de gamle materialer og deres brug, kan foretage hensigtsmæssige analyser af en bygningens virkemåde og med baggrund i en indsigt i og en respekt for den traditionelle byggeteknik, baserer vores restaureringstiltag på de oprindelige materialer og metoder. Kun på denne måde kan vi bevare både bygninger og vores kundskaber og viden om bygningerne og deres originale virkemåde.

# Litteraturliste

## Kapitel 1

Frankl, Poul – **Gothic Architecture** rev. Paul Crossley. Yale University Press 2000.

Marstrand, Wilhelm – **Arsenalet i Piræus og Oldtidens byggregler**. Egmont H. Petersens kgl. hof-bogtrykkeri, København 1922.

Mc Guire, Brian Patrick – **Den levende middelalder**. Gyldendal 2005.

Mc Guire, Brian Patrick – **Den første europæer**. Forlaget Alfa 2008.

Panofsky, Erwin (Oversættelse af Lyhne, Vagn) – **Gotik. Arkitektur, Skolastik, Habitus**. Århus: Kulturklassiker Klim 2002.

Pevsner, Nikolaus – **Europas arkitekturhistorie**. Politikens forlag.

Skydsgaard, Jens Erik m. fl. – **Esrum Klosters Brevbog II**. Museum Tusulanums Forlag, rlag, Københavns Universitet 2002.

Vitruvius (Oversættelse af Mårtelius, Johan) - **Tio böcker om arkitektur**. Stockholm: Byggförlaget 1989.

## Kapitel 2

Brøgger, Poul/ Græbe, Henrik/ Jessen, Curt von/ Madsen, Arne – **Kirkens Murværk**. København. Udgivet af: Nordisk Arbejdsgruppe For Bevaring Af Kirker 1985.

Exner, Johan – **400 danske Landsbykirker**. Gyldendal 1968.

Mc Guire, Brian Patrick – **Da Himmelen Kom Nærmere**. Frederiksberg: Forlaget Alfa 2008.

Skydsgaard, Jens Erik m. fl. – **Esrum Klosters Brevbog I**. Museum Tusulanums Forlag, Københavns Universitet 2002.

## Kapitel 3

Brøgger, Poul/ Græbe, Henrik/ Jessen, Curt von/ Larsen Mogens – **Kirkens Mørtel og kalk**. København: Nordisk Arbejdsgruppe For Bevaring Af Kirker, udgivet af Kirkeministeriet 1990.

E. Suenson Byggematerialer III, 1911

Vitruvius (Oversættelse af Mårtelius, Johan) - **Tio böcker om arkitektur**. Stockholm: Byggförlaget 1989.

Østergaard Jens mfl. Renoveringshåndbogen mur og tag, Teknologisk institut, murværk, Forlaget tegl 1999.

## Kapitel 4

Brøgger, Poul/ Græbe, Henrik/ Jessen, Curt von/ Madsen, Arne – **Kirkens Murværk**. København. Udgivet af: Nordisk Arbejdsgruppe For Bevaring Af Kirker 1985.

## Kapitel 5

Brøgger, Poul/ Græbe, Henrik/ Jessen, Curt von/ Madsen, Arne – **Kirkens Murværk**. København. Udgivet af: Nordisk Arbejdsgruppe For Bevaring Af Kirker 1985.

Humble Olle, Troelsgård Eduard m.fl.- **Äldre murverkshus**. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm 1990.

## Kapitel 6

Humble Olle, Troelsgård Eduard m.fl.- **Äldre murverkshus**. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm 1990.

## Kapitel 7

**DS/INF 167. 1. Udgave 2008-09-09.** Supplerende vejledning for murværk i forbindelse med brug af Eurocode 6, Dansk Standard.

Humble Olle, Troelsgård Eduard m.fl.- **Äldre murverkshus.** Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm 1990.

Sandbye, Poul – **Buer og kupler af sten.** Kunstakademiets Arkitektskole 1969 s. 15-22.

## Kapitel 8

Humble Olle, Troelsgård Eduard m.fl.- **Äldre murverkshus.** Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm 1990.

## Kapitel 9

Andr. Bugge, **Husbygningslære.** H. Aschehoug & CO. 1918

Nationalmuseet – **Danmarks kirker Københavns amt** G.E.C. Gads forlag København 1951

Nationalmuseet – **Danmarks kirker Sorø amt** G.E.C. Gads forlag København 1936

## Kapitel 10

Humble Olle, Troelsgård Eduard m.fl.- **Äldre murverkshus.** Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm 1990.

## Kapitel 11

Algreen-Ussing, Gregers – **Kanon og sigtekorn, Et charter fra Kraków.** Kunstakademiets Arkitektskole Nytår 2006.

**Venezia-Charteret.** København: Fonden for Dansk Bygningskultur 1975.

Brøgger, Poul/ Græbe, Henrik/ Jessen, Curt von/ Madsen, Arne – **Kirkens Murværk.** København: Nordisk Arbejdsgruppe For Bevaring Af Kirker, udgivet af Landsforeningen af Menighedsrådsmedlemmer 1985.

Exner, Johannes – **Den Historiske bygnings væren på liv og død.** Fra bogen Fortiden For Tiden. Århus: Arkitektskolens forlag 2007 s. 56-73.

Ruskin, John (Oversættelse af Iversen, Karsten og Lyhne, Vagn) – **Arkitekturens syv lamper.** Århus: Kulturklassiker Klim 2005.

Viollet-le-Duc, Eugène (Oversat af Lyhne, Vagn) – **Restaurering.** Århus: Arkitektskolens Forlag 2000.

## Kapitel 12

Larsen, Poul Klenz – **Revner i hvælvet – er det farligt?** Vejledning udarbejdet af Nationalmuseets Bevaringsafdeling.

Lov nr. 77 om fredning af folkekirkens kirkebygninger og kirkegårde af 3. januar 2007

**Bygningsreglement 2010** (BR10) Byggecentrum 2011 Kap. 4.

**Eurocode 6** - Murværkskonstruktioner - Del 1-1: Generelle regler for armeret og uarmeret murværk.

## Billedliste

Der er gjort alle bestræbelser på at finde frem til ophavsrettighedshavere. Ophavsrettighedshavere som det ikke har været muligt at finde frem til, vil blive kompenseret, hvis de henvender sig.

### Kapitel 1

Fig. 1.2 Apollon templet i Nimes.	(creative commons)
Fig. 1.3 Pompei's forum	(Google maps)
Fig. 1.6 Diocletians termeanlæg	(creative commons)
Fig. 1.7 Diocletians termeanlæg	(creative commons)
Fig. 1.8 Diocletians termeanlæg	(creative commons)
Fig. 1.10 Skt. Apollinare Nuovo i Ravenna	(creative commons)
Fig. 1.11 Bernhard af Clairvaux	(Ukendt ophavsret)
Fig. 1.13 Chiaravalle Milanese	(Google maps)
Chiaravalle Milanese	(creative commons)
Chiaravalle Milanese	(Giuvani Dall'Orto)
Chiaravalle della Colomba	(creative commons)
Fig. 1.14 Arsenal inskriptionen	(Egmont H. Petersen)
Fig. 1.16 Saint Etienne Caen	(creative commons)
Saint Etienne Caen	(pubblico dominio)
Fig. 1.17 Pontigny	(ukendt ophavsret)
Fig. 1.20 Beauvais	(public domain)

### Kapitel 2

Fig. 2.1 Hørning trækirke	(creative commons)
Fig. 2.2 Bradford on Avon	(public domain)

### Kapitel 4

Fig. 4.5 Vitskøl kloster.	(Ukendt ophavsret)
Fig. 4.10 Underside af ribbehvæl	(Nationalmuseet)
Fig. 4.11 Eksempler på ribbesten	(Nationalmuseet)

### Kapitel 6

Fig. 6.1 Borre kirke facadeopstalt	(Kirkeministeriet)
Fig. 6.2 Borre kirke plan	(Kirkeministeriet)

Illustrationer er venligst stillet til rådighed som ovenfor angivet. Forfatterne har ophavsret til øvrige billeder, illustrationer og den udarbejdede tekst.

# Indeks

## A

Abbed Süger.....	26
Absalon.....	39
Akademiets arkitektursamlinger.....	69
Alexandria.....	21
Amiens.....	26
Analyse af buer.....	97
Analytisk beregningsmetode.....	104
Ankre.....	65
Apsis.....	31
Archimedes.....	21
Aristoteles.....	21
Arkitekten.....	155
Arsenalbygning.....	14
Augustus.....	12
Autenticitet.....	147

## B

Basileus.....	14
Basilika.....	13
Beauvais.....	26; 27
Begreber.....	143
Benediktinerkloster.....	18
Beregningsmetoder.....	101
Bernhard af Clairvaux.....	18
Bestemmelse af styrkeparametre.....	49
Bevaringsgrundlagets noglebegreber.....	146
Billum kirke.....	32
Bindbjælker.....	138
Bindbjælkerne.....	65
Bindemidler.....	45
Bjælkeloft.....	40
Bourges.....	26
Bradford on Avon.....	31
Bulldog.....	138
Burgund.....	18
Byggeteknologi.....	54
Bygherre.....	154
Bygmester.....	155
Bygningsreglementet.....	152
Bygningsundersøgelsen.....	70

## C

Caen.....	24
Centralkirker.....	12
Chartres.....	26
Chiaravalle della Columba.....	19
Chiaravalle Milanese.....	19
Christian den IV.....	5
Cistercienserne.....	18
Citeaux.....	18
Clairvaux.....	18
Cluny.....	18
Cotta sandsten.....	44

## D

Dansk normalformat.....	42
Dansk Teknologisk Institut.....	6
Danske kirkebygningstyper.....	31
Danske Vitruvius.....	69
De tidlige større teglstenskirker.....	38

Den Danske Kirkesamling.....	68
Diocletian.....	16
Domkirken i Köln.....	29
Dragstrup kirke.....	34

## E

Enskibede kirke.....	31
Entreprenører.....	155
Erwin Panofsky.....	23
Esrom kloster.....	39
Etienne.....	24
Euclid.....	21
Eugène Viollet-le-Duc.....	144
Eurocodes.....	152

## F

Facademure.....	83
Fakse marmor.....	32
Faksekalken.....	32
Fanum.....	15; 16
Finite Element Metoder.....	108
Flensborgsten.....	42
Forum.....	14
Forundersøgelser.....	68
Forvittringer.....	63
Fra romansk til gotisk kirkearkitektur.....	12
Frederik den II.....	5
Frederiksborg slot.....	39
Frådsten.....	32; 44
Fugtskader.....	63
Fundament.....	135
Fundamenter.....	54

## G

Genskabelse.....	156
Geoteknikere.....	155
Geotekniske undersøgelser.....	71
Gjordbuer.....	83
Goter.....	17
Gotiske landsbykirker.....	37
Grafisk beregningsmetode.....	101
Granit.....	43
Grathvælv.....	17
Gravitationsstabile.....	82
Grundlaget for bevaring af den historiske bygning.....	148

## H

H. B. Storck.....	144
Hadrians villa.....	17
Harald Blåtand.....	32
Herritslev kirke.....	36
Horisontalkraften.....	110
Hovedrådgiver.....	155
Hvælv.....	57; 89
Hvælvbet.....	16
Hydraulisk kalk.....	46
Hydraulisk kalkmørtel.....	49
Hørning kirke.....	31

## I

ICOMOS.....	148
-------------	-----

Identitet.....	147
Ingeniøren .....	155

**J**

Johannes Exner .....	145
John Ruskin.....	144
Jordlæsket kalk.....	46
Jordlæsket mørtel .....	48
Julius Cæsar.....	12

**K**

Kalkmørtel.....	47
Kalksten.....	32; 44
Kampesten .....	32
Kappen .....	83
Kgl. Bygningsinspektører .....	154
Kildekalk.....	32
Kirkeministeriet .....	154
Kirkeskibet .....	13
Konstantin.....	13; 17
Konsulenter.....	155
Koret .....	12
Korskirker .....	12
Kridtsten.....	32; 45
Krydsribbehvælv .....	24
Kulbrændte.....	42
Kulekalk.....	46
Kulekalksmørtel.....	48
Kultivering.....	156

**L**

La Ferté.....	18
Landmålere.....	155
Limsten .....	32
Lombardiet.....	18
Longobarder.....	17
Læskemørtel.....	48

**M**

Marcus Aureliu .....	17
Maribo domkirke.....	41
Marmor .....	45
Materialer.....	42
Mathcad .....	108; 120
Maxentius .....	17
Mekanisme .....	73
Menighedsrådet .....	154
Minutsugningen.....	43
Moesgård .....	31
Mogens B. Clemmensen.....	144
Monastiske.....	21
Morimond .....	18
Munkesten.....	42
Murpillerne.....	65
Mursten fremstillet af tegl.....	42
Murværk.....	135
Myndighedsbehandling.....	152
Mørtler .....	47

**N**

Napoleon.....	20
Narrativitet .....	147
Nationalmuseet.....	154
Natursten.....	32; 43
Naus .....	13

Navis .....	13
Nedbrydelse .....	156
Nedreværdisætning .....	87
Negativ overflademodstand.....	123
Nikæa .....	17
Notre Dame i Paris .....	26
Nørre Vedby .....	37

**O**

Obernkirchener sandsten.....	44
Opmåling.....	74
Originalitet.....	146

**P**

Passivt jordtryk .....	123
Peder Abelard .....	21
Philon.....	14
Pilhøjde.....	91
Piræus.....	14
Plasticitetsteorien.....	87
Pol-diagram .....	101
Pompei.....	14
Pontigny.....	18
Posta sandsten .....	44
Poul Frankl.....	30
Principper for restaurering.....	132
Processionskirker .....	12
Provstiudvalget .....	154
Provegravninger .....	70
Pythagoræerne .....	21

**R**

Rakkeby kirke.....	33
Ravenna .....	17
Reims.....	26
Remme.....	66; 138
Reversibilitet.....	148
Revnebillede .....	72
Ribber.....	83
Ribbestil .....	30
Romanske landsbykirker .....	32
Roskilde domkirke .....	32
Roskilde Domkirke .....	40
Rullestenskalk .....	32
Rundkirker.....	12
Rådskader .....	65

**S**

Saint Denis .....	26
Saint Étienne.....	25
Saltholmkalken.....	32
Sand.....	47
Sandsten.....	43
Sankt Knud .....	41
Sankt Olai .....	41
Santa Maria degli Angeli.....	16
Santiago de Compostela .....	20
Sengotikken.....	30
Skadet murværk .....	136
Skarring.....	138
Skibet.....	12
Skolastikken.....	21; 22
Skråt blad.....	138
Skt. Apollinare Nuovo.....	17
Skt. Bendts kirke.....	39
Skt. Peters kirke .....	17
Skæve belastninger .....	112



Sonnerup kirke.....	32
Sorø klosterkirke .....	39
Spærfod.....	138
Stabilitet .....	99
Statiske modeller.....	79
Stenkirker.....	31
Stiftsovrigheden.....	154
Stukhvælv.....	17
Svend Estridsen.....	32
Svend Nordmann.....	32
Sætningskader.....	62

## T

Tage.....	60
Tagværket .....	137
Teknisk ståbi .....	123
Tempel.....	12
Termeanlæggene.....	16
Terminologi.....	10
Teutoner .....	17
Theoderik .....	17
Thomas Aquinas.....	21
Tilslagsmaterialer.....	47
Travertin .....	44
Troelsgård, Eduard .....	6
Tryklinje.....	81
Tryklinjekonstruktion .....	109
Tryklinjer .....	85
Trykstyrke.....	43
Trækirker .....	31
Tuf .....	32; 45
Tveje Merløse kirke.....	35
Typiske skader .....	62
Tærede jern.....	136
Tøndehvælv.....	17

## U

Undersøgelser af murværk.....	72
UNESCO .....	148
Uvelse kirke.....	36

## V

Valdemar den Store.....	39
Valg af bygningsstatisk indgreb.....	132
Venezia Chartret.....	149
Vestervig kirke .....	34
Vitruvius .....	12; 15; 47; 54; 68
Vor Frelser kirke.....	26
Vådlæsket kalk .....	46

## W

Walter Gropius .....	156
Wilhelm erobreren .....	24

## Æ

Ærkebiskop Eskild af Lund.....	38
--------------------------------	----

## Ø

Ølandskalksten .....	44
----------------------	----

## Å

Århus Domkirke.....	39
---------------------	----