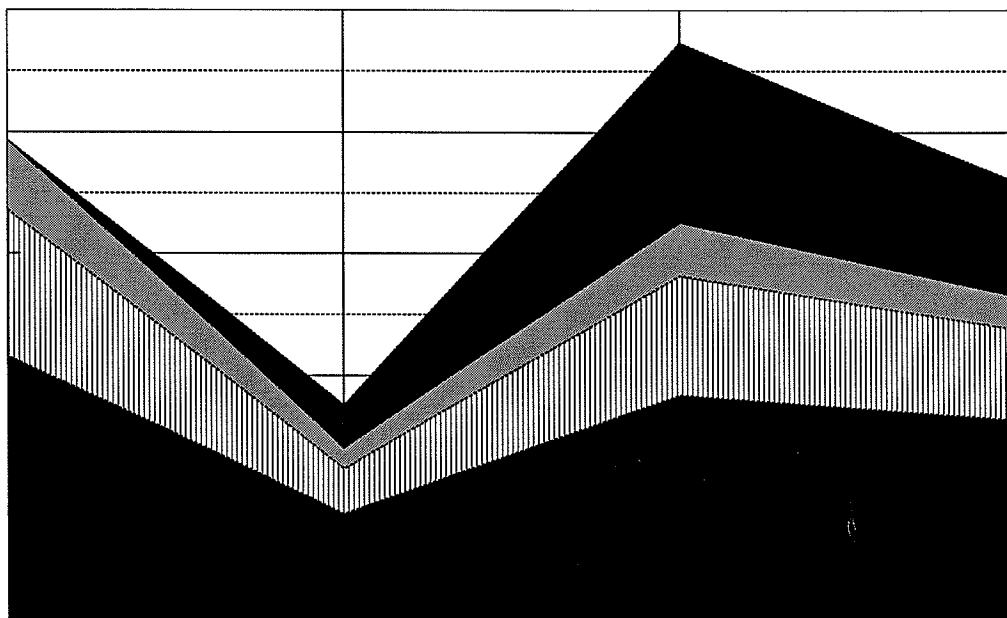


UDTRÆKNING AF SALTE

ODDEN KIRKE



Carsten Bredahl Nielsen

**Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole**

Februar 1991

INDHOLD

	Side
INDLEDNING	1
SAMMENFATNING	3
1. FORSØGEPLAN	
1.1 Formål	5
1.2 Tidligere undersøgelser	5
1.3 Plan for undersøgelse	5
2. BAGGRUND	
2.1 Materialebeskrivelse	7
2.2 Beskrivelse af salte	10
2.3 Udtrækningsmetode	13
3. UNDERSØGELSER I ODDEN KIRKE	
3.1 Skadesregistrering	19
3.2 Prøvefelt	21
3.3 Oplægning af mørtel	23
3.4 Prøveudtagning	23
3.5 Prøveanalyse	25
3.6 Indhold af vandopløselige salte	25
3.7 Kloridindhold	26
3.8 Klimamålinger	33
4. VURDERING AF MÅLINGER	
4.1 Tilstandsvurdering	37
4.2 Indhold af vandopløselige salte	37
4.3 Indhold af klorider	39
4.4 Udtrækningsmetodens virkemåde	42
4.5 Overslagsmæssige beregningseksempler	47
5. KONKLUSION	51
6. REFERENCER	53

BILAG

BILAG 1:	Prøvemetoder	55
BILAG 2:	Kloridindhold	57

INDLEDNING

Ved restaurering af kirker er det almindeligt at pudse oversiden af hvælvet, for at beskytte det mod nedbrydning. Den vigtigste årsag til nedbrydningen er udkrystallisation af salte under overfladen i teglstenen, og der er efterhånden blandt danske og udenlandske forskere enighed om, at den eneste effektive måde at standse nedbrydningen på er at fjerne saltene. I massivt murværk har man i Towers of London forsøgt at trække saltene ud ved at pålægge et lag ler på overfladen, andre steder har man anvendt papirmasse og mørtel, så man forventede, at pudsningen af hvælvene med kalkmørtel foruden at beskytte oversiden også trak salte ud af hvælvet. Normalt blev disse mørtellag dog siddende meget længe, og man har ikke nogen målinger for i hvor høj grad de trak salte ud af hvælvet. Denne undersøgelse er derfor et forsøg på at dokumentere, hvilken indflydelse pudsningen af hvælvets overside har på saltindholdet og salttransporten i hvælvet.

Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH startede i 1985 med at undersøge klimaet og neddrystet materiale fra hvælvingerne i Alslev kirke i Vestjylland. I 1987 blev der taget prøver fra teglsten og mørtel i 9 forskellige kirker /1/, bl.a. Odden kirke. Disse blev undersøgt i et eksamensprojekt ved LBM i 1988 /2/ og arbejdet er fortsat med mit licentiatprojekt, hvor denne undersøgelse udgør en del.

Projektet er et samarbejdsprojekt mellem Odden kirkes menighedsråd ved arkitekt m.a.a. Leif Bahn, Holbæk og LBM. Projektet er anbefalet af kirkeministeriets varmekonsulet, professor Vagn Korsgaard, kgl. bygningsinspektør, arkitekt m.a.a. Karsten Rønnow og Nationalmuseet.

Under projektet har deltaget mange personer. Specielt vil jeg takke civ.ing. Søren Hansen og civ.ing. Esben Thygesen for en stor arbejdsindsats og et godt samarbejde. I foråret 1989 udførte de under deres studier 1. del af projektet som et 18-points projekt på LBM med mig som vejleder.

Desuden en tak til de studerende Morten Niemann og Jesper Markussen for hjælp til senere prøveudtagning og analyse og graver Ove Henriksen for utrættelig skiftning af termohygrografpapir.

Jeg vil også takke min vejleder lektor Anders Nielsen og laboratorieleder ved Nationalmuseet i Brede Tim Padfield for mange gode diskussioner og hjælp under projektet. Endelig tak til Laboratoriet for Teknisk Hygiejne, DTH, der har stillet apparatur til rådighed for kloridanalyserne.

Februar 1991

Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH

Carsten Bredahl Nielsen

SAMMENFATNING

Det er undersøgelsens formål at dokumentere, i hvor høj grad det er muligt at trække vandopløselige salte ud af et middelalderligt kirkehvælv af teglstensmurværk ved pålægning af et lag kalkmørtel på hvælvets overside.

Undersøgelsen har fundet sted i Odden kirke, Ods herred i perioden 14. marts 1989 til 7. marts 1990. På oversiden af tårnhvælvets nordlige kappeflig er der udlagt et 3-5 cm tykt lag kalkmørtel. Tårnhvælvets vestlige kappeflig er brugt som referencefelt, hvor der ikke er udlagt mørtel. Kloridindholdet i mørtel og 9 udvalgte sten er fulgt igennem et år ved boring i 3 dybder og spektrofotometrisk analyse af det udborede pulver, hvor kloriderne er udvasket med vand. Klimaet er registreret med en termohygrograf på kirkeløftet over hvælvet gennem hele perioden og i en kortere periode i kirkerummet under hvælvet.

Der kan i undersøgelsen drages følgende konklusioner:

- 1) Klorider opløses og transporteres let i middelalderlige teglstenshvælv. Det er vigtigt at anvende så lidt vand som muligt, for at kunne kontrollere kloridbevægelserne.
- 2) Kloridindholdet i tårnhvælvet i Odden kirke er lavt sammenlignet med andre kirker. Der er skader på oversiden men ikke på undersiden af hvælvet.
- 3) Vand anvendt ved pudsning på oversiden af hvælvet giver en nedadgående kloridtransport efterfulgt af en opadgående kloridtransport ved udtørring af hvælvet.
- 4) Udover en kloridtransport på grund af kapillær opfugtning fra oversiden, sker der i Odden kirke en cyklisk transport af klorider i tårnhvælvet:
Om sommeren transporteres kloriderne mod oversiden.
Om vinteren transporteres kloriderne mod undersiden.
- 5) Det er muligt at trække klorider ud af et middelalder teglstenshvælv med et lag kalkmørtel på hvælvets overside. Det maksimale kloridindhold i mørtlen er målt i september. På dette tidspunkt er 20% af det oprindelige kloridindhold inden pudsning trukket op i mørtlen.

1. FORSØGSPLAN.

1.1 Formål

Det er undersøgelsens formål at dokumentere, i hvor høj grad det er muligt at trække vandopløselige salte ud af et middelalderligt kirkehvælv af teglstensmurværk ved pålægning af et lag kalkmørtel på hvælvets overside.

1.2 Baggrund

Ved tidligere undersøgelser bl.a. på Laboratoriet for Bygningsmaterialer (LBM) /1/, /2/, /8/ er det fundet, at vandopløselige salte i middelalderlige teglstenskirkehvelv opkoncentreres i overfladen på teglstenen således, at saltkoncentrationsprofilen får en karakteristisk U-form. I overfladen er fundet koncentrationer på 4-6 vægtprocent /2/. En kendt teknik til at beskytte teglstenene mod saltens nedbrydende virkning er at pudse oversiden af hvælvet med en kalkmørtel. Herved får man opkoncentreret saltene i mørtellaget, der nedbrydes istedet for teglstenene. Det er imidlertid ikke dokumenteret med målinger hvordan et sådant mørtellag virker, hvor hurtigt saltet trækkes ud samt hvor store mængder, det er muligt at trække ud. Saltprofilens udseende afhænger, udover af tegls og kalkmørtlens mikrostruktur, af klimaet (temperatur og relativ luftfugtighed) i kirkerum og på kirkeloft.

1.3 Plan for undersøgelse

Undersøgelsen har fundet sted i Odden kirke, Ods herred. Her er konstateret alvorlige skader på oversiden af hvælvene samt på muren mellem skib og tårn /1/.

På tårnhvælvets nordlige kappeflig er udlagt et 3-5 cm tykt lag kalkmørtel. Den vestlige kappeflig bruges som referencefelt, hvor der ikke er udlagt mørtel.

Undersøgelsen er påbegyndt den 14. marts 1989 og afsluttet med en besigtigelse den 7. marts 1990. Undersøgelsen har således strakt sig over et år, hvor der ved 5 besigtigelser er taget prøver til bestemmelse af kloridindholdet i 9 udvalgte sten samt den pålagte kalkmørtel i de to kappeflige. Desuden er der lavet en enkelt analyse til bestemmelse af andre vandopløselige salte. Klimaet på kirkeloftet er registreret gennem hele perioden og i en kortere periode i kirkerummet. Ialt har der været 8 besigtigelser af Odden kirke i perioden som det fremgår af nedenstående oversigt i figur 1.1. Oversigt over prøveudtagning findes i afsnit 3.3 figur 3.4.

Mørtellaget er ikke fjernet ved det sidste besøg den 7. marts 1990.

Dato	Aktivitet
14.03.89	Besigtigelse af kirke, fotodokumentation. Prøver fra vægge og loft.
20.03.89	Møde med menighedsråd, besigtigelse af kirke. Aftale om igangsættelse.
28.03.89	Afrensning af hvælv. Markering af forsøgsfelt og referencefelt. 1. prøveudtagning i sten inden udlægning af kalkmørtel.
29.03.89	Besigtigelse af tårnhvælv. Oplægning af kalkmørtel.
17.04.89	Besigtigelse af kalkmørtel. Prøver af mørtel.
19.05.89	2. prøveudtagning.
19.09.89	3. prøveudtagning.
07.03.90	4. prøveudtagning.

Figur 1.1 Oversigt over besigtigelser af Odden kirke.

2. BAGGRUND

2.1. Materialebeskrivelse

Hvælvene i Odden kirke blev opført i det 15. århundrede og består af teglsten med fuger af kalkmørtel. I denne undersøgelse er en del af tårnhvælvets overside pudset med et lag kalkmørtel. I det følgende gives en materialebeskrivelse af tegl og kalkmørtel.

Tegl

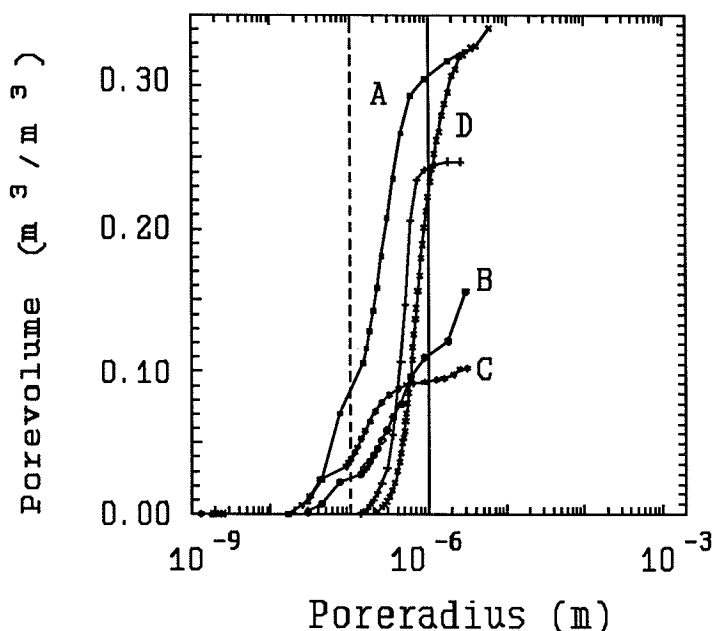
Metoden ved fremstilling af tegl er i grove træk den samme idag som i middelalderen. Teglene fremstilles ved brænding af ler, der i Danmark stammer fra såvel tertiære som kvartære aflejringer. Sammensætningen af disse varierer meget meget mellem lokaliteterne. Hovedparten består som regel af SiO_2 , Al_2O_3 samt CaO . Teglfremstillingen kan indelse i 5 trin:

- 1) **Opgravning** af ler.
- 2) **Bearbejdning** af ler. Herved reguleres lerets konsistens ved æltning og/eller tilsætning af vand, tørstof eller damp. Tidligere skete en del af bearbejdningen af leret gennem lagring af leret under forskellige klimatiske forhold.
- 3) **Formning** af ler. Idag sker formningen maskinelt. Ved strengpresning presses leret ud gennem et mundstykke med dimensioner svarende til bredde og længde af stenen. Strengen afskæres i skiver svarende til stenens højde. Ved blødstrygning trykkes leret ned i en form med et stempel. Ved håndstrygning gøres dette med håndkraft. Stenene i Odden kirke er fremstillet på denne måde.
- 4) **Tørring** af ler. Vandindholdet i de formede råsten reduceres til mindre end 5 vægt%. Inden tørring er vandindholdet 20-25 vægt% (strengpresning) eller højere (blød- og håndstrygning). Tørringen sker idag i tørreovne. Tidligere benyttede man andre metoder, f.eks. tørring i friluftslader.
- 5) **Brænding** af ler. Idag sker brændingen ved temperaturer omkring 950-1150 °C. Ved temperaturer over 900 °C sker en sintring (sammensmeltning) af lerpartiklerne i kontaktpunkterne. Herved sker en rumfangsformindskelse, der øges med stigende brændings-temperatur og brændingstid. De mindste partikler smelter først hvorved de mindste porer forsvinder. En høj brændingstemperatur og en lang brændingstid vil give et materiale med grove porer. Brændingen af middelaldertegl er sket ved en lavere temperatur og er mere uensartet end brændingen af moderne teglsten. Middelalderteglsten er derfor mere finporøs og inhomogen end moderne teglsten.

Ved en tidligere undersøgelse [1],[2] er densitet og porøsitet bestemt for en teglsten fra Odden kirke i den nordlige kappeflig i skibets vesthvælv. Tørdensiteten er 1849 kg/m³ og porøsiteten 30,9 %. Stenen var uden skader. I samme undersøgelse er densitet og porøsitet bestemt for 20 middelalderteglsten fra en række vestjyske kirker. Densiteten er bestemt til 1710 kg/m³ med

en spredning på 77 kg/m^3 og porøsiteten til 34,1 % med en spredning på 3,3 %. Der var tale om såvel skadede som uskadede sten. Til sammenligning kan densiteten for en moderne teglsten variere mellem 1450 kg/m^3 og 2040 kg/m^3 og porøsiteten mellem 25 % og 47 % [3].

Teglsten har grove porer, hvilket har betydning for transporten af vand og salte gennem materialet. I et grovporøst materiale vil opfugtning, udtørring og transport af salte normalt ske hurtigere end i et finporøst materiale. Porestørrelser kan måles med kviksølvindtrængning (MIP), hvor man bestemmer sammenhængen mellem poreradius og volumen af porer med denne poreradius. Ved en tidligere undersøgelse [1], [2] er porestørrelsesfordelingen målt med MIP for middelaldertegl fra Odden og Janderup kirke. Desuden er målt porestørrelsesfordelingen for en moderne teglsten. Resultatet er angivet i figur 2.1.



A: Middelaldertegl, Janderup C: Moderne kalkmørtel K100/1200
B: Middelaldertegl, Odden D: Moderne tegl

Figur 2.1 Porestørrelsesfordeling målt med MIP for to middelalderteglsten (Odden kirke og Janderup kirke) og for en moderne teglsten (Prøvelyst) og kalkmørtel K100/1200.

Kalkmørtel.

Kalkmørtel fremstilles ved blanding af kalk, sand og vand. Kalksten CaCO_3 brændes ved ca. 900°C , hvorved det omdannes til brændt kalk CaO . Den brændte kalk blandes med vand til hydratkalk (læskning). Når hydratkalken kommer i forbindelse med atmosfærisk luft, gendannes det stabile calciumkarbonat ved optagelse af CO_2 fra luften (karbonatisering). Karbonatisering kan kun foregå i luften, hvorfor de forskellige former for brændt kalk har fået fællesbetegnelsen **luftkalk**. Karbonatisering sker fra overfladen og indefter og reaktionshastigheden synker, jo længere man kommer væk fra overfladen. I middelalderlige bygninger,

kirker og borge opmuret med kalkmørtel har man fundet ukarboniseret mørtel i de metertykke mure.

Tørlæsket kalk eller hydratkalk er brændt kalk, som er tilsat en vandmængde, som kun er lidt større end end, der afgives ved brændingen. Ved denne læskning fås et finkornet pulver.

Vådlæsket kalk eller kulekalk er brændt kalk, som er læsket med overskud af vand. Den fremstilles ved, at stykker af brændt kalk blandet med vand til en slam, som ledes til åbne siloer eller huller i jorden (kuler). Her bundfælder urenheder og overskudsvand bortledes. Vådlæsket kalk er en stiv pasta.

Normalt fremstilles kalkmørtel ved blanding af læsket kalk og sand, men læskningen kan også ske ved at blande brændt kalk og sand og derefter tilsætte vand (mørtellæskning). Læskemørtlen kan lagres lige som kalk.

Idag er det ikke almindeligt at anvende lagret kalk eller mørtel, men dette var meget udbredt tidligere. Mørtel, som tilberedtes efter kalkens lagring, østes op i en kalkbænk, hvor den blev slået sammen med gruset med et plejlignende træskaft med en jernstang med trekantet tværsnit af en kalkslager. Denne proces var meget vigtig, idet kalkmørtlen derved blev iltet og findelt. Blandingen foregik til sidst ved hjælp af en rørhage eller en kalkrager. Den færdigjorte kalkmørtel har man ligeledes kunnet lægge til lagring.

Kalk- og Teglværkslaboratoriet (KTL) har i en undersøgelse (KT12542) af Rødvig Kulekalk (langtidslagret i kule) bestemt indholdet af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ til 96.7 % af tørstofmængden og vandindholdet til 109.6 vægt%. Ved blanding med normmørtelsand var vandbehovet 21.5 vægt%, og den friske mørtels densitet 1976 kg/m^3 . Til pudstning af hvælvet i Odden kirke er anvendt en kulekalk, 1:3 (tørvægt K100/750) fra Horsens Kulekalk med sand kornstørrelse 0-3 mm. På LBM er densitet og porøsitet bestemt på et stykke af den hærdede kalkmørtel fra Odden kirke et år efter pudstningen af hvælvet. Porøsiteten er 28 %, tørdensiteten 1848 kg/m^3 og faststoffdensiteten 2565 kg/m^3 .

I kalkmørtel findes porer, der er finere end porerne i teglsten, og porer, der er grovere. I figur 2.1 er angivet en porestørrelsesfordeling bestemt med MIP for den ovenfor omtalte moderne kalkmørtel K100/1200 fremstillet af KTL (KT12542). Da kalkmørtlen anvendt på hvælvet i Odden kirke er federe (mere kalkholdig) må den forventes at have en større andel af fine porer.

Vurdering af porestørrelser

De to middelalderteglsten ses at have en væsentlig større andel af fine porer end de to moderne teglsten. Kalkmørtlens porer ses at være af samme størrelsesorden som middelalderteglstenene, hvilket har betydning for kalkmørtlens evne til at trække salte ud af teglstenene ved kapillarsugning som omtalt i afsnit 2.3. Kalkmørtlen har desuden en andel af grove porer på ca. 20%. Disse porer er ikke medtaget i målingen på figur 2.1.

2.2 Beskrivelse af salte

Den følgende beskrivelse bygger bl.a. på /4/, /7/, /9/ og /10/.

Oprindelse af salte

Salte i bygningsmaterialer stammer hovedsagligt fra 4 kilder:

- 1) Bygningsmaterialerne selv (råmaterialerne kan indeholde salte).
- 2) Grundvand (opstigende grundvand indeholder salte).
- 3) Anvendelse af bygning (oplagring af salte, anvendelse af tøsalte).
- 4) Luftforurening (luftens indhold af svovl- og kvælstofforbindelser, saltholdigt regnvand i kystnære områder).

Almindelige salte i bygningsmaterialer

Saltene kan inddeles i 4 hovedgrupper:

- 1) Sulfater (luftforurening)
Eks: $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- 2) Klorider (havgus, saltholdigt regnvand)
Eks: NaCl , $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- 3) Nitrater (grundvand)
Eks: $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $3\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- 4) Karbonater (grundvand)
Eks: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, K_2CO_3 , CaCO_3

Opløselighed og krystallisering

Et vandopløseligt salt kan maksimalt opløses i en hvis mængde. Denne mængde betegnes saltets opløselighed. Under denne grænse vil al salt findes som ioner i opløsningen mens man over grænsen desuden vil have udfældet saltkrystaller. Er dette tilfældet taler man om en mættet opløsning. Et salts opløselighed afhænger af arten af salt samt temperaturen. I figur 2.2 er angivet opløseligheden af en række almindelige salte som den mængde salt, der kan opløses i 100 ml koldt hhv. varmt vand.

OPLØSELIGHED	Kold (20 C) [g/100 ml]	Varm (100 C) [g/100 ml]
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	0,24	0,22
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	11	92
KCl	35	57
NaCl	36	39
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	71	91
CaCl_2	75	159
$\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	167	367

Figur 2.2 Opløselighed af forskellige vandopløselige salte i g pr 100 ml vand. /4/.

Det ses, at der er meget stor forskel på saltenes opløselighed. Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) er meget tungtopløseligt mens magnesiumklorid ($\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) er letopløseligt. Natriumklorid (NaCl) ligger imellem og opløseligheden er kun svagt temperaturafhængig mens opløseligheden af natriumsulfat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) er stærkt temperaturafhængig.

Krystalvandsoptagelse

Mange salte optager krystalvand, der er vand som er kemisk bundet i krystalstrukturen, når saltet er udfældet. Mængden af krystalvand afhænger af den omgivende lufts temperatur og relative fugtighed. Ved optagelsen af krystalvand øges saltenes molvolumen, de fylder mere end det tilsvarende salt uden vand. Krystalvand i et salt angives ved, at man efter saltes støkiometriske formel (forholdet mellem de indgående grundstoffer) skriver antallet af vandmolekuler knyttet til et saltet.

Eksempler på salte, der optager krystalvand er natriumsulfat

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, magnesiumsulfat $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ og magnesiumklorid $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. Natriumsulfat med krystalvand afgiver ved 32,4 C og 100 %RF sit krystalvand og ændrer herved molvolumen fra 220 l/mol til 53 l/mol. Ved lavere RF sker denne omdannelse ved en lavere temperatur. Afgivelse og optagelse af krystalvand er blevet brugt til at forklare nedbrydning af saltholdige materialer.

Eksempler på salte, der **ikke** optager krystalvand er natriumklorid NaCl og kaliumklorid KCl.

Damptrykssænkning

Ligevægtsfugtigheden (RF) over vand er 100 %. Opløses et salt i vandet sænkes RF over opløsningen. Generelt er damptrykket lavere jo mere salt, der er opløst. Over en mættet opløsning af et salt vil RF således være mindre for et letopløseligt salt end for et tungtopløseligt salt. I figur 2.3 er angivet damptrykket over forskellige mættede saltopløsninger.

DAMPTRYK	RF [%]	Koncentration [g/100 ml]
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	98	0,24
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	93,1	11
KCl	85	35
NaCl	75,5	36
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	83	71
CaCl_2	75	
$\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	33	167

Figur 2.3 RF over en forskellige mættede saltopløsninger ved 20 °C samt den tilsvarende mætningskoncentration i g pr 100 ml vand. /4/.

For saltkoncentrationer større end mætningskoncentrationen er RF over opløsningen konstant lig den anførte værdi, mens der for koncentrationer mellem mætningskoncentrationen og nul er en lineær sammenhæng mellem koncentration og RF /7/. Over en opløsning af flere salte kan damptrykssænkningen (forskellen mellem RF over opløsningen og 100 %RF) tilnærmet bestemmes som summen af damptrykssænkningerne for de enkelte salte /7/. Der er ikke her taget hensyn til effekten af samvirkningen mellem ionerne og dannelsen af nye kombinations-salte. RF over en saltopløsning afhænger af temperaturen på samme måde som opløseligheden /7/. Da opløseligheden af NaCl kun er svagt temperaturafhængig vil RF over en NaCl-opløsning i praksis være uafhængig af temperaturen.

Saltes indvirkning på hygroskopisk vandoptagelse.

Et materiale, der anbringes i en bestemt relativ fugtighed, vil efter et stykke tid indstille sig i fugtligevægt med luften, således at materialet ved en given RF har et bestemt (hygroskopisk) fugtindhold.

Det samme gælder for en saltopløsning. Anbringes en saltopløsning i en bestemt relativ fugtighed vil opløsningen indstille sig i fugtligevægt med luften, således at opløsningen ved

en given RF har en bestemt koncentration (fugtindhold). Er luftens RF mindre end ligevægtsdamptrykket over opløsningen vil saltet udkrystallisere og al vandet vil fordampe fra opløsningen. Er luftens RF større end ligevægtsdamptrykket vil der dannes en fortyndet opløsning. Er luftens RF netop lig mætningsdamptrykket vil der dannes en mættet opløsning af saltet.

Et saltholdigt materiale vil i fugtmæssig henseende opføre sig som en blanding af et rent materiale og en saltopløsning. Det hygroskopiske fugtindhold kan som en god tilnærmelse bestemmes som summen af fugtindholdet for materiale og saltopløsning. Under saltets mætningsdamptryk vil fugtindholdet udelukkende være bestemt af materialets hygroskopiske fugtoptagelse, mens man over mætningsdamptrykket også får et bidrag fra den saltopløsning, der dannes i materialets porer. Er der tale om et materiale som tegl, der har en meget lavt hygroskopisk fugtoptagelse vil fugtindholdet af det saltholdige materiale næsten udelukkende være bestemt af saltet.

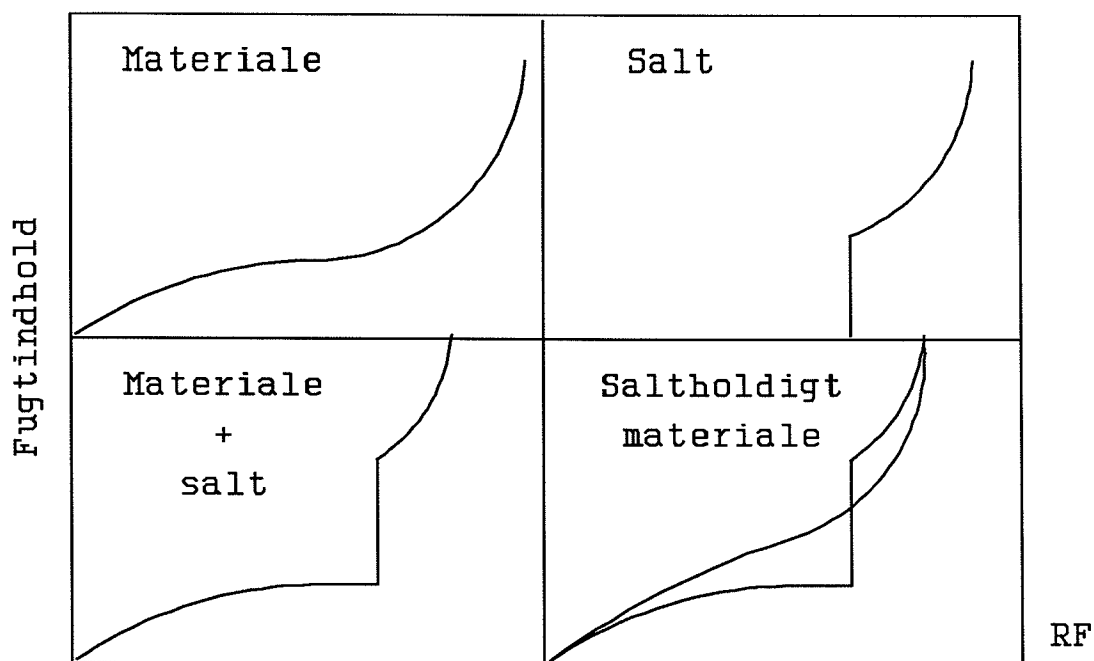
Hvis materialets og saltets fugtoptagelse var uafhængig af hinanden ville man få en skarp grænse for hygroskopisk fugtoptagelse ved saltets mætningsdamptryk med et spring i fugtindhold, der svarer til at der dannes en mættet opløsning af saltet i materialets porer. I praksis får man en mere glat overgang, da saltets fugtoptagelse er anderledes i materialets porer end når det findes som en fri saltopløsning. Tilsvarende vil materialets fugtoptagelse også blive påvirket af saltet i porerne. Således vil fugtoptagelsen for et saltholdigt materiale under saltets mætningsdamptryk være større end summen af materialets og saltets fugtoptagelse alene. Over saltets mætningsdamptryk vil fugtoptagelsen være mindre end summen af materialets og saltets fugtoptagelse. Dette er illustreret i figur 2.4. Beregningen af hygroskopisk fugtoptagelse for et saltholdigt materiale kompliceres yderligere, hvis materialet indeholder flere salte med forskellige mætningsdamptryk.

2.3 Udtrækningsmetode

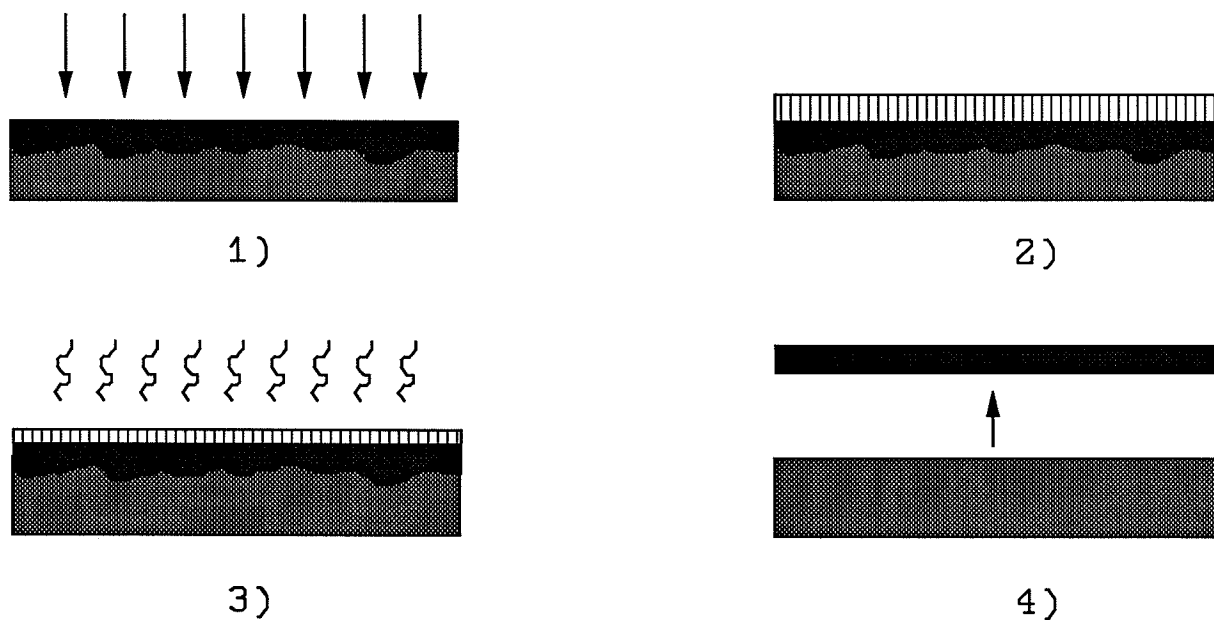
Princip i offerlagsmetode.

Vandopløselige salte kan kun transporteres, når saltet er opløst og kan bevæge sig som ioner. Er der tale om et materiale som tegl, der kan transportere store mængder vand kapillært (transport af væske i porerne) vil ionerne hovedsagligt blive transporteret med vandet. Dette kan udnyttes til udtrækning af salte af et materiale.

Princippet i offerlagsmetoden er at suge den saltholdige væske fra materialet over i et andet materiale, hvor saltene udfældes. Dette andet materiale kan herefter fjernes sammen med saltene. Princippet er illustreret i figur 2.5. Man ofrer det andet materiale for at beskytte det oprindelige materiale imod saltene. Det andet materiale betegnes derfor som et "offerlagsmateriale" og metoden som "offerlagsmetoden". Metoden har været kendt længe og anvendt med større eller mindre held med forskellige materialer som offerlagsmateriale. De mest anvendte offerlagsmaterialer er forskellige mørtler, hovedsagligt kalkmørtler, papirbaserede materialer (papirpulp, papmaché) samt forskellige lertyper (bentonit). Et eksempel er udtrækningen af salte i "Salt Tower, Tower of London" beskrevet af Bowley /6/.



Figur 2.4 Salts indflydelse på hygroskopisk fugtoptagelse. Øverst materialets og saltets fugtoptagelse alene. Nederst summen af materialets og saltets fugtoptagelse sammenlignet med den i praksis målte fugtoptagelse /5/.



Figur 2.5 Princip i offerlagsmetoden. 1) opfugtning af saltholdigt materiale. 2) Pålægning af offerlag. 3) Udtrækning af salte med kapillarsugning. 4) Fjernelse af offerlag med salte.

Skal offerlagsmetoden være effektiv, er der to nødvendige forudsætninger, der skal være opfyldt. For det første skal det saltholdige materiale være fugtigt, så saltene er opløst. For det andet skal offerlagsmaterialet være i stand til at suge vand kapillært fra det saltholdige materiale. Det kræver dels en god kontakt mellem de to materialer og dels, at offerlagsmaterialet er mere finporøst end det saltholdige materiale.

Kapillartransport

Et materiale kan suge kapillært, da der i materialets porer dannes en krum væskeoverflade (menisken) på grund af væskens overfladespænding. Under væskeoverfladen dannes et hydraulisk undertryk, der kan bestemmes som

(2.1)

$$P_h = -\frac{2\sigma\cos\theta}{r}$$

hvor

P_h	= det hydrauliske tryk [Pa]
σ	= væskens overfladespænding [N/m]
θ	= kontaktvinklen mellem væske og materiale
r	= poreradius [m]

Der sker en kapillær væsketransport, hvis der er en forskel i hydraulisk tryk. Af (2.1) ses, at det hydrauliske undertryk bliver større, jo mindre poreradius er. Det betyder, at der kun kan ske en sugning fra en stor pore til en mindre, idet man herved har en positiv forskel i hydraulisk tryk. Det omvendte, transport fra en lille pore til en stor, er ikke mulig. Da offerlagsmetodens effekt er betinget af, at offerlaget kan suge kapillært fra det saltholdige materiale, er det nødvendigt at offerlaget er mere finporøst end det saltholdige materiale.

Det hydrauliske undertryk afhænger også af væskens overfladespænding. En saltopløsning har normalt en større overfladespænding end rent vand. Det kan betyde, at det ikke saltholdige offerlagsmateriale kan have vanskeligt ved at suge fra et stærkt saltholdigt materiale, hvis det hydrauliske undertryk i offerlaget ikke er tilstrækkeligt. Tilsvarende kan der være problemer, hvis kontaktvinklen i det saltholdige materiale er større end i offerlagsmaterialet.

Udtrykket (2.1) siger ikke noget om, hvor hurtigt kapillarsugningen foregår. Til dette kan anvendes en stationær transportligning (Hagen-Poiseulles lov):

(2.2)

$$q = \frac{\rho_l r^2 \Delta P_h}{8\eta L}$$

hvor	q	= den transporterede væskemængde [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
	ρ	= densiteten af væsken [kg/m^3]
	r	= poreradius [m]
	η	= viskositeten af væsken [$\text{kg}/(\text{sm})$]
	ΔP_h	= den hydrauliske trykforskel [Pa]
	L	= længden, den hydrauliske trykforskel virker over [m]

Det ses, at transporthastigheden øges med kvadratet på poreradius. Da den hydrauliske trykforskel imidlertid mindskes med radius i første potens ligning (2.1) bliver resultatet, at den transporterede væskemængde øges proportionalt med poreradius. Det ses også, at transporthastigheden afhænger af væskens densitet og viskositet, hvilke begge er større for en saltopløsning end for rent vand. Erfarringsmæssigt foregår kapillartransport langsommere i et saltholdigt materiale end i et rent materiale.

Damptransport

Vand kan også transporteres som damp i et materiale. For grovporøse materialer som tegl er denne transportform betydeligt langsommere end kapillartransport. Drivkraften for damptransport er damptrykket, der kan bestemmes ud fra den relative fugtighed, vands mætningsdamptryk og temperaturen. Damptrykssænkningen over en saltopløsning er beskrevet i afsnit 2.2. Desuden sker der i et porøst materiale en damptrykssænkning over en menisken på grund af porestørrelsen beskrevet ved Kelvins ligning:

$$(2.3) \quad \ln RF = -\frac{2\sigma M \cos\theta}{r\rho_l RT}$$

hvor	RF	= den relative fugtighed
	σ	= væskens overfladespænding [N/m]
	M	= væskens molekulemasse [kg/mol]
	Θ	= kontaktvinklen
	r	= poreradius [m]
	ρ_l	= væskens densitet [kg/m^3]
	R	= gaskonstanten, $8,314 \text{ J}/(\text{molK})$
	T	= den absolutte temperatur [K]

Den resulterende damptrykssænkning i en pore kan som en tilnærmelse bestemmes som summen af damptrykssænkningerne på grund af salt og poreradius. Med dette damptryk kan damptransporthastigheden bestemmes af et stationært udtryk svarende til (2.2):

(2.4)

$$q = -\frac{\delta \Delta P}{L}$$

hvor q = den transporterede dampmængde [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
 δ = damptransportkoefficienten [s]
 ΔP = damptryksforskellen [Pa]
 L = længden, damptryksforskellen virker over [m]

Damptransportkoefficienten afhænger af den relative fugtighed. Normalt vokser damptransportkoefficienten med RF. Indholdet af salte i et materiale betyder, at damptryksforskellen bliver mindre på grund af saltenes damptryksnænkning. F.eks. vil fordampningen fra en saltholdig overflade blive mindre, hvilket betyder at udtørring af et saltholdigt materiale tager længere tid end udtørringen af et tilsvarende rent materiale. Ved offerlagsmetoden har dette betydning, da kapillartransporten fra det saltholdige materiale til offerlagsmaterialet er betinget af fordampning fra offerlagsmaterialets overside.

Transport af salte

Saltstrømning i et porøst materiale kan kun ske, når saltet er opløst og kan transporteres som ioner. Der er to forskellige måder, ionerne kan transporteres på:

- 1) Ionerne følger med vandet i den kapillære strømning
- 2) Ionerne bevæger sig på grund af koncentrationsforskelle (difussion).

Kapillartransporten er tidligere beskrevet. Iondiffusionen kan beskrives med et stationært udtryk svarende til (2.2) og (2.4)

(2.5)

$$J = \frac{D_c \Delta C}{L}$$

hvor J = den transporterede saltmængde [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
 D_c = difussionskoefficienten [m^2/s]
 ΔC = koncentrationsforskellen [$\text{kg salt}/\text{m}^3 \text{ pore}$]
 L = længden, koncentrationsforskellen virker over [m]

Difussionskoefficienten er meget lille for de almindelige salte, og i grovporøse materialer som teglsten vil langt den største del af saltene blive transporteret ved kapillartransport.

Transport af salte ved offerlagsmetoden.

Ved offerlagsmetoden må man først opfugte det saltholdige materiale dels for at få opløst saltene og dels for at skabe en god vedhæftning (kapillar kontakt) mellem materialet og offerlagsmaterialet. Er der tale om en væg med opstigende grundvand kan dette dog være overflødigt. Normalt er det kun praktisk muligt at foretage opfugtningen fra den ene side. Da opfugtningen sker ved, at materialet suger kapillært, vil der samtidig med opløsningen af saltene ske en transport af salte væk fra den side, der opfugtes. Det er derfor vigtigt, at der ikke anvendes for store mængder vand til opfugtningen, da saltene herved kan transporteres dybt ind i en konstruktion, suges ind i andre (tørre) dele af konstruktionen eller, ved tynde konstruktioner som et kirkehvelv, evt kan udfældes på den modsatte side.

Er offerlaget kun lagt på den ene side af konstruktionen skal man være opmærksom på, at der også især for tynde konstruktioner sker en udtørring og dermed kapillartransport af salte til den modsatte side af offerlagssiden. Dette er især problematisk, hvis man under opfugtningen har fået opkoncentreret sine salte modsat offerlagssiden. Saltene kan herved udfælde på den forkerte side så det ikke er muligt at suge dem ud i offerlagsmaterialet. Er dette sket, kan en fornyet opfugtning fra bagsiden (modsat offerlaget) hjælpe. En anden mulighed er at holde en høj relativ fugtighed på bagsiden under udtørringen, så man kun får udtørring til offerlagssiden. RF skal blot være lidt højere end saltenes krystallisationspunkt, da man herved normalt får tilstrækkelig med fugtighed i materialet til, at der kan ske en kapillartransport.

Omvendt er det også vigtigt, at udtørringen på offerlagssiden ikke bliver for kraftig, da man herved udtørre offerlaget, så der ikke sker nogen kapillartransport men udelukkende damptransport mellem det saltholdige materiale og offerlaget. Saltene vil herved udkrystallisere i det saltholdige materiale så offerlaget ikke får nogen effekt.

3. UNDERSØGELSER I ODDEN KIRKE.

3.1 Skadesregistrering

EMNE: Odden kirke, Overbygade, Overby
4583 Sjællands Odde.
Hvælvkappe over tårnrum.

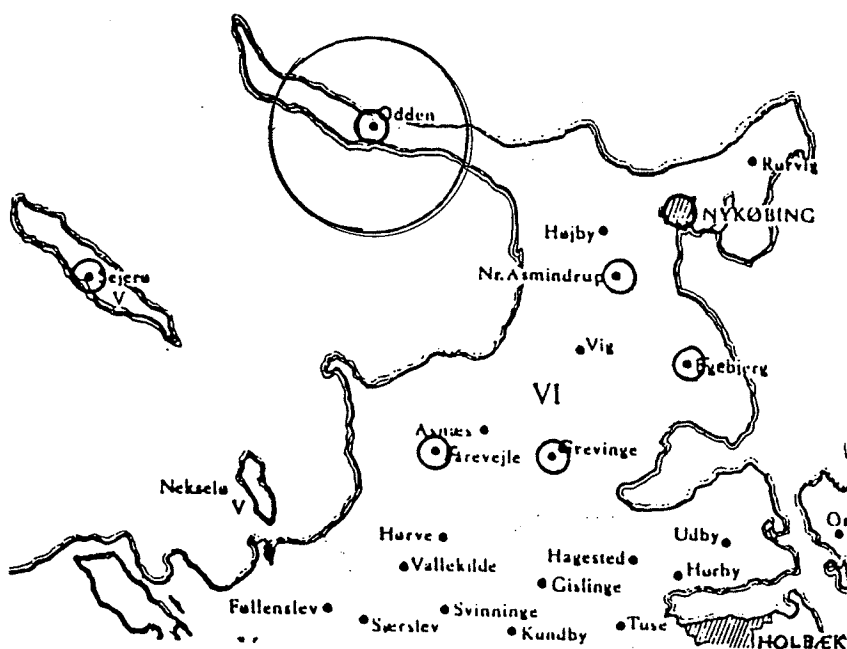
MATERIALE: Middelalder teglsten (munkesten), kalkmørtel.

REGISTRERING: Marts 1989 - april 1990.

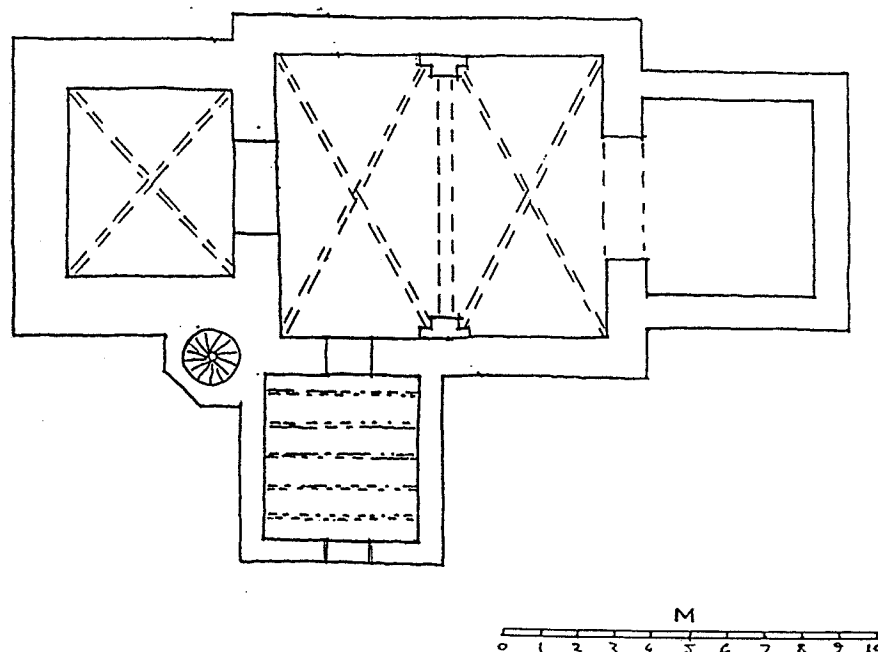
KONTAKT: Odden kirkes menighedsråd
v/arkitekt Leif Bahn
Tegnestuen Bysøstræde 10
4300 Holbæk

Menighedsrådsformand Agnethe Hansen
Prins Christiansvej 2
4583 Sjællands Odde

Graver Ove Henriksen, Tlf. 5342 6123



Figur 3.1 Geografisk beliggenhed af Odden kirke.



Figur 3.2 Skitse af grundplan i Odden kirke.

Historie

Kirken er opført i sidste halvdel af det 13. århundrede i overgangen mellem senromansk (flade bjælkelofter) og tidlig gotisk tid (spidsbuede vinduer). Fra denne tid er bevaret skibet og en del af korets vestre nordmur. I det 15. århundrede blev det brandfarlige bjælkeloft revet ned, skibet fik to krydshvælv og de oprindelige vinduer blev tilmuret. De første århundreder stod kirken upudset med synlige munkesten i munkeforbandt. I en periode efter tilbygning af tårn, våbenhus og kapel, men før ombygning og udvidelse af koret i 1820'erne, synes kirken at have været pudset og sikkert hvidkalket, indtil den engang før 1874, mens kirken ejedes af kongen, blev rødkalket, som den fremstår idag.

I halvtredserne blev der opdaget skader på hvælvet over skibet, og man oplagde et lag mørtel på det østlige hvælv. Denne reparation blev foretaget samtidig med en reparation af taget, som var blevet utæt. Utæthederne var især mellem taget over skibet og tårnet, hvilket idag tydeligt kan ses på den østlige tårnmur.

I nyere tid er kirken restaureret 1966-67, hvor kalkmalerierne fremdroges. I 1985 blev kaloriferen (varmluftsblæseren) udskiftet med elvarmeanlæg. Anlægget består af rørovn under bænke og langs nord- og sydvæggen i skib og tårnrum. Nord- og sydvæggen i koret, samt nordvæggen i skibets vestfag er forsynet med lave panelradiatorer til elvarme.

I juni 1987 blev der af Laboratoriet for Bygningmaterialer, DTH foretaget en besigtigelse af kirken /1/. Der blev udarbejdet følgende tilstandsbeskrivelse:

Kirkerum: Der var en del afskalninger på tårnrummets vestvæg i 1,5-2,5 m's højde, samt på muren mellem skib og tårn. Afskalningerne er forholdsvis små i udstrækning - omkring 2-10 cm². Adskillige steder rundt i hele kirkerummet har store flager af kalk løsnet sig fra muren, dog uden at falde af.

Kalkmalerier: Kalkmalerierne var udsat for en del afskalning, især på fligene. Der kunne iagttages afskalning i små flager omtrent under borested 1 og 2 (nordfligen af skibets vesthvælv), men denne skade var dog ikke særlig iøjnefaldende. Der var desuden flere steder på samme hvælv et udbredt netrevnemønster.

Loft: Der var udbredte skader på oversiden af stenene i hvælvene, i form af kraftig forvitring. På visse sten var op til flere cm af stenen forvitret. der var desuden tæringsskader på muren mellem skib og tårn samt på murkrone i sydmuren mellem skibets to hvælv.

Ved undersøgelsen blev der udtaget boreprøver som pulver i seks sten på loftet over skibet. Der blev fundet et kloridindhold på mellem 0.07 vægt% og 1.1 vægt%. En nærmere beskrivelse findes i /1/.

Påvirkninger

Fra Odden kirke er der kun ganske få kilometer til Kattegat, i både nord- og sydlig retning. Kirken ligger højt og er udsat for kraftig vind, der blæser ind fra Kattegat (havgus).

Kirken er periodisk opvarmet. Om vinteren falder temperaturen i kirkerummet ned til frysepunktet, mens man ved kirkelige handlinger og andre anvendelser af rummet opvarmer rummet til 20-25 °C. Ved disse opvarmninger falder den relative fugtighed betydeligt mens luftens fugtindhold stiger lidt.

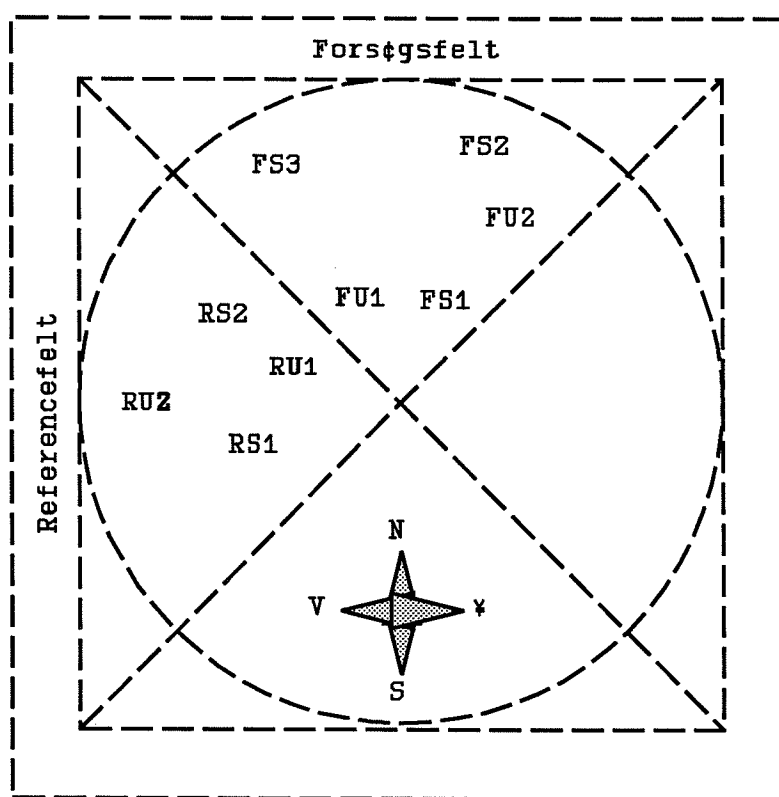
3.2 Prøvefelt.

Til den aktuelle undersøgelse blev i samråd med Nationalmuseets 2. afdeling og Odden kirkes menighedsråd udvalgt tårnhvælvet. Dette skete hovedsagligt, da der ikke er nogen kalkmalerier, som ville kunne tage skade ved udtrækningsforsøgene. Der var ikke nogen synlige skader på undersiden af tårnhvælvet, mens der på oversiden kunne konstateres smuldring af overfladelaget i nogle sten. Det nedbrudte materiale var meget findelt (pulver) og med en spatel kunne afskrabes en prøvemængde på 5-10 g pr. løberflade.

Den nordlige kappeflig af tårnhvælvet blev udvalgt til **forsøgsfelt**, hvorpå der på oversiden blev udlagt et lag kalkmørtel som offerlag. Den vestlige kappeflig blev udvalgt som **referencefelt**. Her blev der ikke udlagt kalkmørtel, så det er muligt at sammenligne et pudset og et ikke pudset hvælv.

I både forsøgsfelt og referencefelt var der såvel skadede som uskadede teglsten. I forsøgsfeltet blev udvalgt 3 skadede og 2 uskadede sten jævnt fordelt over kappefligen. I referencefeltet blev udvalgt 2 skadede og 2 uskadede sten ligeledes jævnt fordelt over kappefligen. Antallet af sten blev valgt i samråd med Nationalmuseets 2. afdeling for at gøre indgrebet i hvælvet så lille som muligt. Hver af de udvalgte sten i forsøgsfeltet blev i hjørnerne markeret med et søm samt en mærkat, så stenene kunne genfindes efter oplægning af mørtellaget.

Det samlede overfladeareal af tårnhvælvet er ca. 24 m². Arealet af forsøgsfelt og referencefelt er herved ca. 6 m² for hver.



Figur 3.3 Skitse af forsøgsfelt og referencefelts placering i Odden kirke med en omtrentlig placering af de enkelte sten. S=skadet sten, U=uskadet sten.

3.3 Oplægning af mørtel

Oplægningen af mørtel forgik over to dage. Den 28. marts 1989 blev oversiden af forsøgsfeltet afrenset og der blev udtaget prøver af stenene i forsøgsfelt og referencefelt. Dagen efter blev der oplagt et lag kalkmørtel på oversiden af forsøgsfeltet.

Det eksisterende mørtellag blev fjernet. Dette lag var fra 0-15 mm tykt, flere steder var det faldet af. Laget sad meget løst og kunne fjernes direkte ved at skrabe/lirke det løs med fladjern og skruetrækker. Kun ganske få steder sad mørtlen godt fast. Der blev ikke brugt hammer, muggert eller lignende.

Efter fjernelse af mørtlen blev forsøgsfeltet fejlet grundigt for støv og snavs. Efter gentagne fejninger blev forsøgsfeltet støvsuget grundigt. Et par af stenene var så skadede, at der kunne fjernes et flere centimeter tykt lag. Generelt var stenene dog ikke alvorligt skadede, skønmæssigt var 10-15 sten i forsøgsfeltet alvorligt skadede. Tårnhvælvet virkede mindre skadet end hvælvingerne over skibet.

Der blev udtaget prøver fra 3 skadede og 2 uskadede sten i forsøgsfeltet samt 2 skadede og 2 uskadede sten i referencefeltet. De uskadede sten var meget hårdere at bore i end de skadede sten (der blev benyttet stenbor). Farven af det opsamlede borepulver varierede fra "rosen-paprikarød" i uskadede sten over "cayennerød" til brunligt- gult hos de mest skadede sten.

Forsøgsfeltet blev tilsidst forvandlet med børste, med ca. 5 l vand. Dagen efter blev hvælvet på tilsvarende måde forvandlet to gange inden middag. Herefter blev mørtellaget oplagt. Der blev anvendt en kulekalk 1:3 (tørvægt K100/750) fra Horsens kulekalk med sand kornstørrelse 0-3 mm. Mørtlen blev blandet i 5-10 min i spand med mekanisk blander under tilsætning af vand til en passende konsistens. Mørtlen blev oplagt af murermeister Ejvind Overgaard, Sjællands Odde. Efter oplægningen blev mørtlen eftervandet i 10 døgn for at undgå svindrevner.

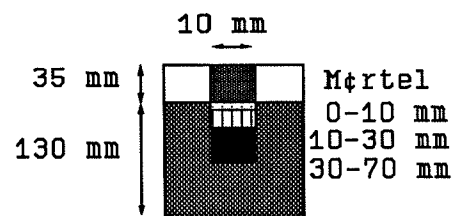
Ved besigtigelsen den 17. april 1989 kunne konstateres, at mørtlen havde en glat overflade næsten uden svindrevner. Kulekalken var endnu fugtig undtagen et ca. 2 mm tykt overfladelag. I et område af feltet med lysindfald fra nordvinduet i tårnrummet var mørtlen tør længere nede. Mørtellaget havde en tykkelse på 3-5 cm. Der blev udtaget prøver af mørtlen over de 5 markerede sten i forsøgsfeltet samt 9 andre steder i mørtlen jævnt fordelt over prøvefeltet.

Ved besigtigelsen den 19. maj 1989 kunne konstateres saltudfældninger indvendigt på den nordlige tårnvæg i en bue, der tydeligvis fulgte hvælvets form. På de nederste 30-40 cm var et lyst område og øverst et 10-20 cm mørkt bælte med udfældninger. Det samlede areal med udfældninger var skønmæssigt omkring 1 m².

3.4 Prøveudtagning

Igennem forsøgsperioden er der udtaget prøver i teglsten og kalkmørtel til bestemmelse af kloridindhold. Prøverne er udtaget som pulverprøver med en BOSH håndboremaskine med et

10 mm murbor. Der er udtaget prøver i de 5 udvalgte sten i forsøgsfeltet og de 4 udvalgte sten i referencefeltet. Alle prøver er udtaget i mindst 3 dybder; 0-1 cm, 1-3 cm og 3-7 cm. I hver sten er der ialt gennem forsøgsperioden boret 4 huller. Efter hver boring er hullerne repareret med kalkmørtel. Omfanget af prøver fremgår af nedenstående oversigt i figur 3.4.



Dato	Prøver
28.03.89	3 skadede + 2 uskadede sten i forsøgsfelt 2 skadede + 2 uskadede sten i referencefelt 3 dybder for hver prøve
	Ialt 27 analyser
17.04.89	Mørtel over 3 skadede + 2 uskadede sten i forsøgsfelt
	Ialt 5 analyser
19.05.89	3 skadede + 2 uskadede sten i forsøgsfelt 2 skadede + 2 uskadede sten i referencefelt 2 skadede + 1 uskadet sten i nordlig tårnvæg 10 mørtelprøver jævnt fordelt over forsøgsfelt 1-2 dybder i mørtel over sten i forsøgsfelt 3 dybder i sten
	Ialt 50 analyser
19.09.89	3 skadede + 2 uskadede sten i forsøgsfelt 2 skadede + 2 uskadede sten i referencefelt 1 skadet sten i nordlig tårnvæg 2 mørtelprøver i forsøgsfelt ved fugtskjold 1 dybde i mørtel over sten i forsøgsfelt 3 dybder i sten
	Ialt 37 analyser
07.03.90	3 skadede + 2 uskadede sten i forsøgsfelt 2 skadede + 2 uskadede sten i referencefelt 1 skadet + 1 uskadet sten i nordlig tårnvæg 8 mørtelprøver jævnt fordelt over forsøgsfelt 1-2 dybder i mørtel over sten i forsøgsfelt 3 dybder i sten
	Ialt 43 analyser

Figur 3.4 Oversigt over udtagne prøver i Odden kirke i hele forsøgsperioden.

3.5 Prøveanalyse

Alle prøver til kloridanalyse er udtaget som pulverprøver og hjemtaget i plastposer. I laboratoriet er prøverne yderligere nedknust hvorefter de i en kolbe er udvasket med vand (75 ml vand til 1 gram prøve). Efter bundfældning i 1 døgn er udtaget 20 ml væske øverst i kolben. Indholdet af kloridioner i væsken er bestemt med en spektrofotometrisk metode (autoanalyser) ved sammenligning med kendte standardopløsninger. På nogle enkelte prøver er indholdet af kationer bestemt med atomabsorptions analyse. Mængden af vandopløseligt stof er ligeledes bestemt på enkelte prøver med sedimenteringsmetoden. Sulfatanalyser er udført på Kalk- og Teglværkslaboratoriet i Århus. Prøvemetoderne er beskrevet i bilag 1.

3.6 Indhold af vandopløselige salte.

I det følgende er anført resultater fra en analyse af ionindhold og indhold af samlet mængde vandopløseligt stof. Analyserne er udført på 4 prøver fra hvælvet over kirkeskibet i Odden kirke. Prøverne er udvasket med vand hvorefter ionindholdet i vandet er bestemt med en fotospektrometrisk metode (autoanalyser) og atomabsorption som beskrevet i bilag 1. Den samlede mængde vandopløseligt stof er bestemt med sedimenteringsmetoden ligeledes beskrevet i bilag 1. Kalk- og Teglværkslaboratoriet har udført sulfatanalyse på 8 prøver fra hvælvet i tårnrummet. I figur 3.8 er anført resultatet af en tidligere undersøgelse /2/ af indhold og fordeling af vandopløselige ioner i oversiden af en sten i skibets vestlige hvælv.

	SO_4^{2-}	Cl^-	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Σ	VOS
A	0,39	0,52	0,07	0,31	0,11	0,38	1,78	2,02
B	0,20	0,53	0,07	0,30	0,10	0,37	1,57	1,86
Middel	0,30	0,53	0,07	0,31	0,11	0,38	1,68	1,94

Figur 3.5 Indhold i vægtprocent af ioner og vandopløseligt stof i to identiske teglprøver fra hvælvet over kirkeskibet i Odden kirke. Σ = samlet mængde af ioner i prøve. VOS = samlet mængde af vandopløseligt stof fundet ved sedimenteringsmetoden.

	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Σ
A	0,26	0,02	0,14	0,04	0,38	0,84
B	0,49	0,04	1,01	0,09	0,37	2,00
Middel	0,38	0,03	0,58	0,07	0,38	1,42

Figur 3.6 Indhold i vægtprocent af ioner fra to forskellige prøver fra Odden kirke. Σ = samlet mængde af ioner i prøve.

Prøve	1	2	3	4	5	6	7	8
Sulfat	0,13	0,45	0,27	0,64	0,94	0,26	0,26	0,27
Gips	0,23	0,80	0,48	1,15	1,68	0,47	0,47	0,48

Figur 3.7 Sulfat- og gipsindhold i vægtprocent for 8 prøver fra hvælvet over tårnrummet i Odden kirke. Analyse Kalk- og Tegl-værkslaboratoriet, Århus KT 12852. Middel gipsindhold 0,72 %, spredning 0,48 %.

Dybde (mm)	Vægtprocent						
	NO ₃ ²⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Σ
0-20	0.010	0.295	0.010	0.092	0.011	0.066	0.484
20-40	0.018	0.140	0.015	0.069	0.033	0.132	0.407
40-60	0.017	0.159	0.012	0.043	0.014	0.096	0.341

Figur 3.8 Indhold i vægtprocent af forskellige ioner i oversiden af en sten i skibets vestlige hvælv /2/.

3.7 Kloridindhold

I bilag 2 findes en komplet oversigt over samtlige prøver, der er udtaget i Odden kirke til bestemmelse af kloridindhold. For hver prøve er angivet materiale, beskrivelse af sten, boreddybde fra overfladen samt det målte kloridindhold. Kloridindholdet er bestemt ved udvaskning med vand og fotospektrometrisk analyse af udvaskningsvandet som beskrevet i bilag 1. For at kunne sammenligne prøverne er det totale kloridindhold (kg pr m² hvælv) udregnet i følgende 4 lag:

- A: Kalkmørtel
- B: 0-10 mm i tegl
- C: 10-30 mm i tegl
- D: 30-70 mm i tegl

Mørtellagets tykkelse (lag A) er udfra 15 borer i forsøgsfeltet bestemt til 35 mm med en spredning på 7 mm.

Den summerede kloridkoncentration mellem boreddybderne d_1 og d_2 er bestemt som:

(3.1)

$$Cl_s = \frac{\sum_{d_1}^{d_2} \rho_d (t_i Cl_i)}{(d_2 - d_1)}$$

- hvor
- Cl_s = den summerede kloridkoncentration i laget [kg/m^3]
 - d_1 = boreddybde fra overfladen, øvre grænse [m]
 - d_2 = boreddybde fra overfladen, nedre grænse [m]
 - t_i = tykkelse af det i'te lag [m]
 - Cl_i = kloridindhold i det i'te lag [kg/kg]
 - ρ_d = tørdensitet af materiale [kg/m^3]
 - Tegl : 1750 kg/m^3
 - Kalkmørtel : 1850 kg/m^3

Kloridkoncentrationen i de 4 lag er bestemt på følgende tidspunkter:

- | | |
|-----------------------|------------|
| 1: 28. marts 1989 | (0 dage) |
| 2: 19. maj 1989 | (52 dage) |
| 3: 19. september 1989 | (175 dage) |
| 4: 7. marts 1990 | (344 dage) |

Resultaterne er angivet i figur 3.9 og 3.10 samt afbildet grafisk i figur 3.11 og 3.12. Der er anvendt følgende betegnelser for sten:

- 1. tegn: F=forsøgsfelt
R=referencefelt.
- 2. tegn: S=skadet sten
U=uskadet sten.
- 3. tegn: Stennummer.

Sten	Tid (dage)	Mørtel 35 mm	Tegl			
			0-10 mm	10-30 mm	30-70 mm	Σ
FS1	Marts (0)		11,2	10,4	9,5	10,0
	Maj (52)	2,2	4,2	4,2	5,1	4,7
	Sept. (175)	2,2	4,9	6,0	5,8	5,7
	Marts (344)	1,4	3,9	6,7	7,5	6,7
FS2	Marts (0)		10,5	10,2	9,6	9,9
	Maj (52)	1,6	1,9	2,0	2,6	2,3
	Sept. (175)	4,1	4,2	4,1	3,8	3,9
	Marts (344)	1,5	1,8	4,2	4,2	3,9
FS3	Marts (0)		9,3	8,1	7,7	8,0
	Maj (52)	2,1	2,3	2,5	2,9	2,7
	Sept. (175)	9,1	7,4	7,4	6,8	7,0
	Marts (344)	3,1	4,7	5,9	6,0	5,8
FU1	Marts (0)		4,1	5,6	6,5	5,9
	Maj (52)	0,6	0,9	0,7	0,7	0,7
	Sept. (175)	0,2	2,0	3,0	3,0	2,8
	Marts (344)	0,4	1,4	1,4	1,3	1,3
FU2	Marts (0)		2,8	2,8	0,7	1,6
	Maj (52)	1,9	1,3	1,7	2,5	2,1
	Sept. (175)	4,1	5,6	5,9	5,3	5,5
	Marts (344)	2,2	3,2	4,1	5,1	4,5

Figur 3.9 Summeret kloridkoncentration [kg/m^3] for sten i forsøgfelt i Odden kirke.

Sten	Tid (dage)	Tegl			
		0-10 mm	10-30 mm	30-70 mm	Σ
RS1	Marts (0)	8,9	9,0	8,9	8,9
	Maj (52)	8,7	8,5	8,4	8,5
	Sept. (175)	9,9	10,6	10,9	10,7
	Marts (344)	9,2	9,2	9,4	9,3
RS2	Marts (0)	9,1	8,8	7,2	7,9
	Maj (52)	8,4	8,4	7,9	8,1
	Sept. (175)	9,5	9,7	9,3	9,4
	Marts (344)	8,9	9,0	8,9	8,9
RU1	Marts (0)	2,3	2,7	2,1	2,3
	Maj (52)	2,3	2,3	1,8	2,0
	Sept. (175)	3,9	2,5	3,2	3,1
	Marts (344)	2,6	2,7	2,5	2,6
RU2	Marts (0)	0,9	0,7		0,3
	Maj (52)	0,5	0,6	0,3	0,4
	Sept. (175)	1,8	1,6	1,3	1,5
	Marts (344)	0,9	0,8	0,7	0,8
S, /2/	Juni 1987	25,7	17,5	12,5	15,8
U, /2/	Juni 1987	5,6	3,3	3,2	3,6

Figur 3.10 Summeret kloridkoncentration [kg/m^3] for sten i referencefelt i Odden kirke samt middel af sten fra 9 kirker /2/.

Ud fra kloridkoncentrationen angivet i figur 3.9 og 3.10 beregnes en middelkloridkoncentration i de øverste 7 cm af en skadet og en uskadet sten. I både forsøgsfeltet og referencefeltet skønnes det, at 1/3 af stenene er skadede og 2/3 uskadede. Med denne vægtning beregnes den summerede kloridkoncentration i de øverste 7 cm af hævlevet. Resultatet er angivet i figur 3.11 og afbildet grafisk i figur 3.12. I figur 3.13 er angivet det samlede kloridindhold i hvælv. I figur 3.14 er angivet det samlede kloridindhold taget i forhold til kloridindholdet før pudsning (marts 1989).

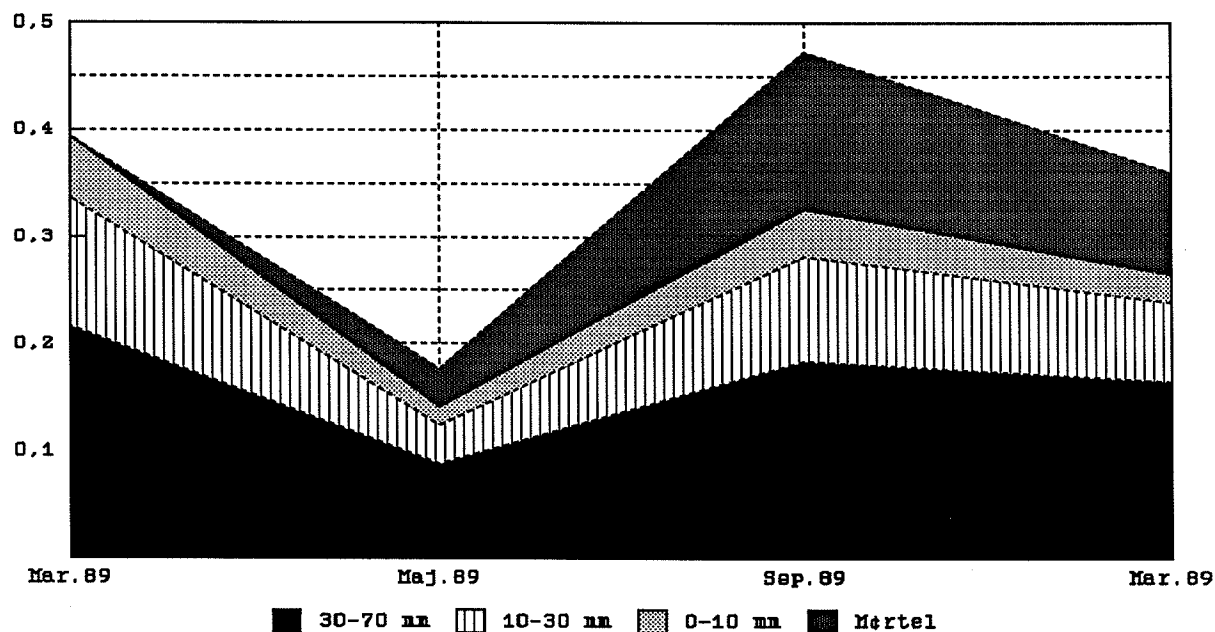
Udover prøver af de udvalgte sten blev der taget prøver af mørtellaget i forsøgsfeltet ved 4 besøg. Prøverne blev udtaget som en blanding af 8-10 prøver jævnt fordelt over forsøgsfeltet. Desuden blev der ved 3 besøg udtaget prøver fra indersiden i teglstenen i den nordlige tårnvæg, hvor der efter pudsningen kunne konstateres udfældning af salte. Udfra disse prøver er udregnet en middelværdi for den summerede kloridkoncentration [kg/m^3] i mørtlen og i de yderste 7 cm af tårnvæggen. Resultaterne er angivet i figur 3.15.

Felt	Tid (dage)	Mørtel 35 mm	Tegl			
			0-10 mm	10-30 mm	30-70 mm	Σ
Forsøgsfelt	Marts (0)		5,8	6,0	5,4	5,6
	Maj (52)	1,5	1,7	1,8	2,2	2,0
	Sept. (175)	4,2	4,4	4,9	4,6	4,6
	Marts (344)	2,7	2,7	3,7	4,1	3,8
Referencefelt	Marts (0)		4,1	4,1	4,1	4,1
	Maj (52)		3,8	3,8	3,5	3,6
	Sept. (175)		5,2	4,8	4,9	4,9
	Marts (344)		4,2	4,2	4,1	4,1
Middel af sten fra 9 kirker /2/	Juni 1987		12,3	8,1	6,3	7,7

Figur 3.11 Summeret kloridkoncentration [kg/m^3] i de øverste 7 cm af hvælvet med 1/3 skadede sten og 2/3 uskadede sten. Beregnet udfra middelværdier fra figur 3.9 og 3.10 samt /2/.

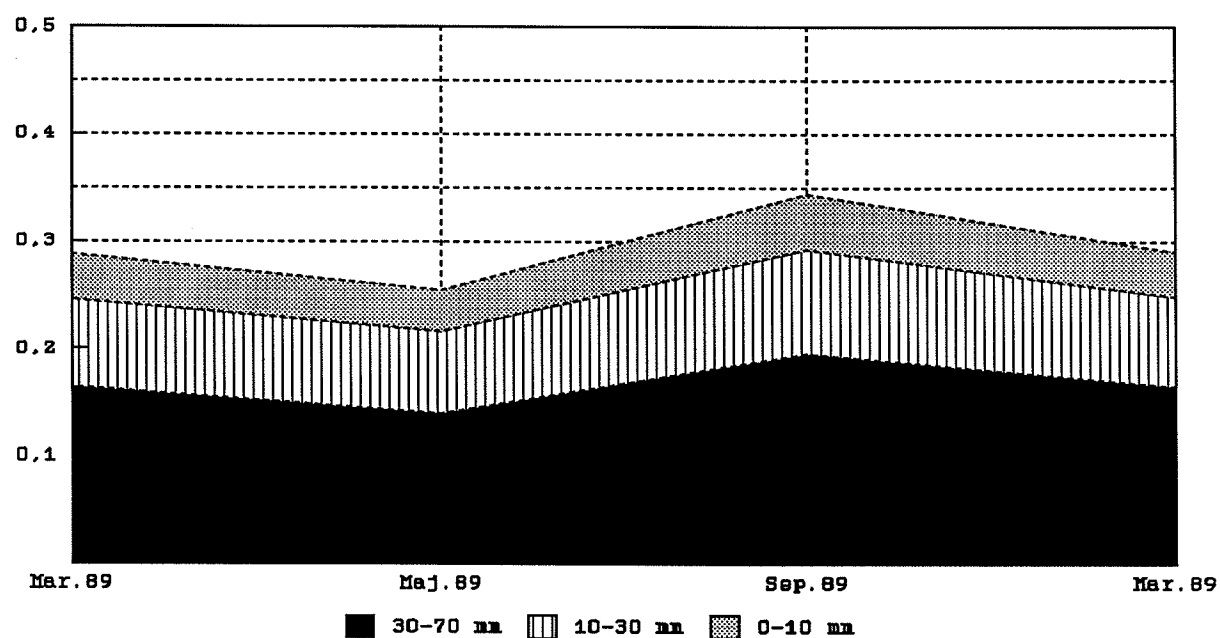
FORSØGSFELT

Kloridindhold [kg/m^2]



REFERENCEFELT

Kloridindhold [kg/m^2]



Figur 3.12 Summeret kloridindhold [kg/m^2] i de øverste 7 cm af hvælvet med 1/3 skadede sten og 2/3 uskadede sten. Beregnet ud fra middelværdier fra figur 3.11.

Tid (dage)	Forsøgsfelt			Referencefelt
	Samlet	Mørtel	Sten	
Marts (0)	0,39		0,39	0,29
Maj (52)	0,19	0,05	0,14	0,25
Sept. (175)	0,43	0,11	0,33	0,34
Marts (344)	0,28	0,05	0,24	0,29

Figur 3.13 Samlet kloridindhold [kg/m^2] i de øverste 7 cm af hvælvet med 1/3 skadede sten og 2/3 uskadede sten. Mørtellagets tykkelse er 35 mm.

Tid (dage)	Forsøgsfelt			Referencefelt
	Samlet	Mørtel	Sten	
Marts (0)	1,00		1,00	1,00
Maj (52)	0,48	0,13	0,35	0,86
Sept. (175)	1,10	0,27	0,83	1,17
Marts (344)	0,72	0,12	0,60	1,00

Figur 3.14 Relativt kloridindhold i de øverste 7 cm af hvælvet med 1/3 skadede sten og 2/3 uskadede sten. Mørtellagets tykkelse er 35 mm. Kloridindhold taget i forhold til kloridindholdet før pudsning (marts 1989). BEMÆRK forsøgsfelt og referencefelt har ikke samme kloridindhold før pudsning jævnfør figur 3.12.

Tid (dage)	Mørtel	Tårnvæg
April (20)	0,3	-
Maj (52)	1,7	4,7
Sept. (175)	1,9	3,2
Marts (344)	1,6	1,5

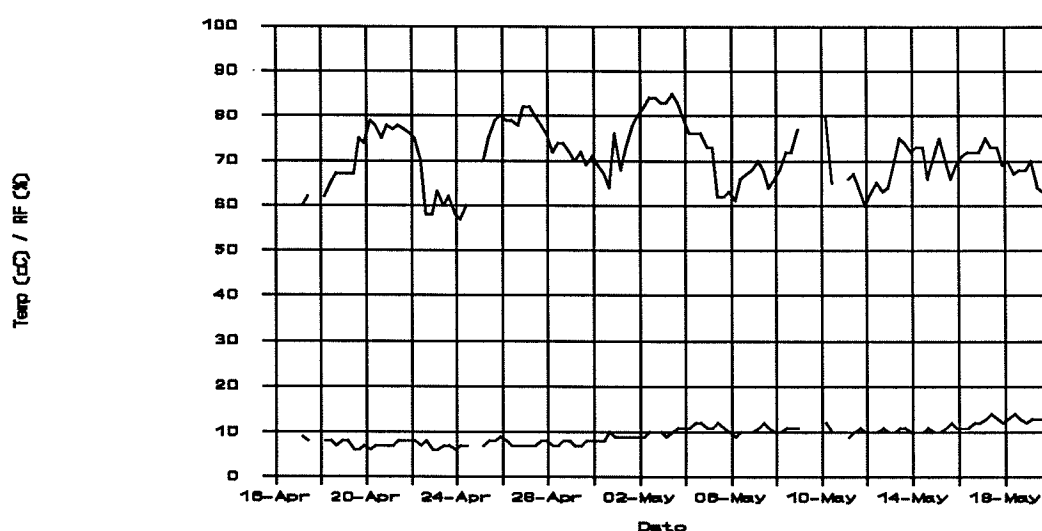
Figur 3.15 Kloridkoncentration [kg/m^3] i mørtellag over tårnhvælv og i de inderste 7 cm af teglstenen i nordlig tårnvæg. Mørtellagets tykkelse er 35 mm. Ekstra prøver udover prøver anført i figur 3.9 og 3.10. Arealet med udfældninger i tårnvæggen er omkring 1 m^2 .

3.8 Klimamålinger

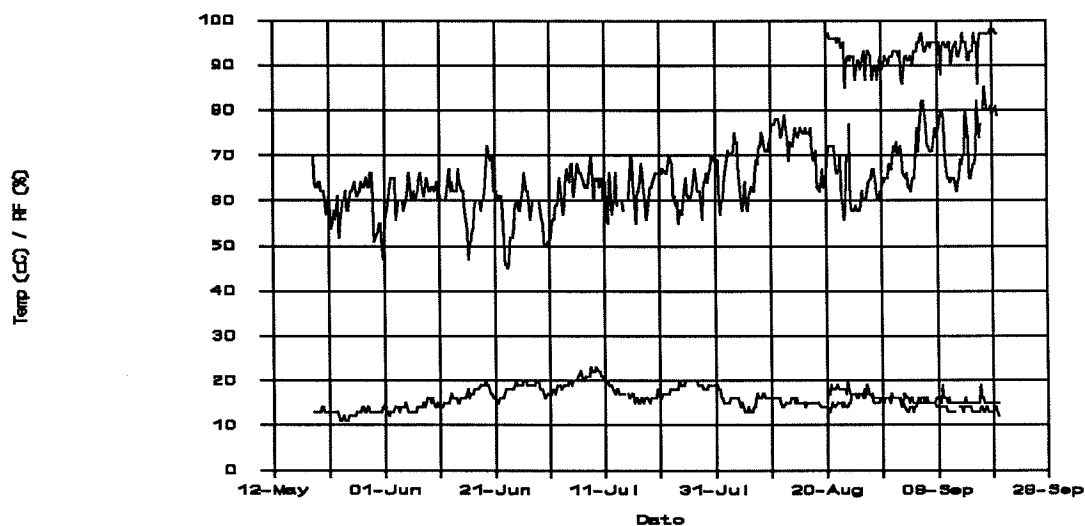
Der er foretaget måling af temperatur og relativ fugtighed (RF) over tårnhvælvet med en termohygrograf med ugeværk. Termohygrografen var placeret ved siden af en trætrappe til tårnet på en træplatform over tårnhvælvet. Den lodrette afstand over toppen af hvælvet var ca. 0.2 m og den vandrette afstand til forsøgsfeltets midte ca. 2 m. Der er foretaget målinger i perioden april 1989 til marts 1990.

Desuden er der foretaget måling af klimaet i tårnrummet under kirkehvælvet med en termohygrograf med månedsværk. Termohygrografen var anbragt på en bæk 0,5 m over gulvet ved tårnrummets sydvæg. Der er foretaget målinger i perioden 20.08-16.11 1989.

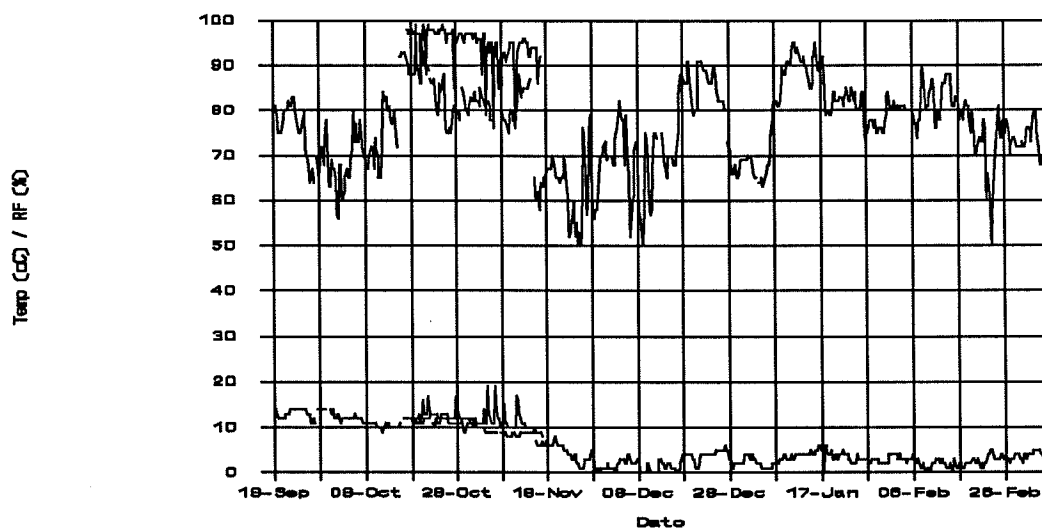
Temperatur og RF er aflæst manuelt på termohygrografpapiret og skrevet ind i datafiler, hver indeholdende målinger for en måned. Der er foretaget fire aflæsninger om dagen, kl. 4, 10, 16 og 22. På figur 3.16-18 er angivet klimaet mellem de 4 besigtigelser. I figur 3.19 er angivet minimumværdi, maksimumværdi, middelværdi og spredning af temperatur, RF og damptryk i de tre perioder mellem besigtigelserne.



Figur 3.16 Klima over tårnhvælv i perioden 17.04-19.05.1989 (forårsperiode).



Figur 3.17 Klima over tårnhvælv i perioden 19.05-19.09.1989 (sommerperiode). I perioden 20.08-19.09.1989 er der desuden angivet klimaet under tårnhvælv (øverste kurver).



Figur 3.18 Klima over tårnhvælv i perioden 19.09.1989-07.03.1990 (vinterperiode). For perioden 18.10-16.11.1989 er desuden angivet klimaet under tårnhvælv (øverste kurver).

KLIMAMÅLINGER	Min.	Max.	Mid.	Spr.
17.04 - 19.05 1989, Loft				
Temp (C)	6	14	9,4	2,0
RF (%)	57	85	70,9	6,7
Damptr (Pa)	543	1168	846	135
19.05 - 19.09 1989, Loft				
Temp (C)	11	23	15,9	2,4
RF (%)	45	85	64,5	7,1
Damptr (Pa)	683	1912	1174	208
20.08 - 19.09 1989, Kirke				
Temp (C)	15	20	16,1	1,2
RF (%)	85	98	93,0	3,0
Damptr (Pa)	1468	2111	1704	142
19.09.1989 - 07.03.1990, Loft				
Temp (C)	0	14	5,6	4,2
RF (%)	50	99	76,4	9,5
Damptr (Pa)	305	1334	724	248
19.09.1989 - 16.11.1989, Kirke				
Temp (C)	8	19	11,8	2,0
RF (%)	76	99	94,5	4,5
Damptr (Pa)	988	1737	1319	157

Figur 3.19 Minimumsværdi, maksimumsværdi, middelværdi og spredning for klimaet i Odden kirke i de tre perioder mellem besigtigelserne.

4. VURDERING AF MÅLINGER.

4.1 Tilstandsvurdering

Tilstanden af pudsen på hvælvenes underside og væggene i kirkerummet er ganske god. I 1987 kunne kun konstateres få afskalninger, hovedsagligt i tårnrummets vestvæg og på muren mellem tårnrum og skib. Tilstanden har ikke ændret sig frem til denne undersøgelse. Årsagen til afskalningerne på tårnets østvæg kan sandsynligvis føres tilbage til utætheder i taget mellem tårn og skib i halvtredserne, hvor der er blevet tilført fugt og salte. Afskalningerne på tårnets vestvæg skyldes sandsynligvis opstigende grundfugt. Der kan ikke iagttages nogen afskalninger på tårnhvælvets underside, og der er heller ikke fra graveren konstateret problemer med drys fra hvælvet.

På oversiden af hvælvene er der udbredte skader på stenene, på visse sten er op til flere cm af stenen forvitret. Specielt kan der konstateres salt- og frostskafer på væggen mellem tårn og væg. De skadede sten i hvælvet udgør skønsmæssigt 1/3 af det samlede antal sten, hvoraf 10-15 sten i forsøgsfeltet er alvorligt skadede. Skaderne på loftsiden er alvorligere end i kirkerummet, hvilket skyldes større klimavariationer på loftsiden og at man desuden ikke er så opmærksom på skader her.

4.2 Indhold af vandopløselige salte

Det samlede indhold af vandopløseligt stof i teglstenene er 10-15 % større end det samlede målte indhold af ioner (figur 3.5), hvilket må tilskrives indholdet af ioner, der ikke er analyseret for, f.eks. NO_3 , NO_2 , Fe og Al-ioner samt vandopløseligt stof, der ikke indgår i nogen salte. En orienterende analyse for nitrat og nitrit tyder dog ikke på at stenene indeholder disse ioner. En tidligere analyse (figur 3.8) viser også et lavt indhold af nitrat sammenlignet med de øvrige ioner. Indholdet af ioner for prøverne angivet i figur 3.5 og 3.6 er af samme størrelsesorden, men det ses, at der er en betydelig spredning på resultaterne. Sulfatanalyserne i figur 3.7 viser et sulfatindhold af samme størrelsesorden som fundet ved analyserne i figur 3.5. Der er tale om to forskellige analysemetoder, idet sulfatindholdet i figur 3.5 er bestemt efter udvaskning med vand, mens KTL's analyser er foretaget efter udvaskning med syre. Det ses, at KTL finder et lidt større sulfatindhold, hvilket må forventes, da man får udvasket en større mængde sulfat med syre end med vand. Det ses også, at spredningen på sulfatindholdet næsten er ligeså stor som middelværdien.

Analyserne foretaget i denne undersøgelse (figur 3.5-7) viser et 3-4 gange højere ionindhold end den tidligere undersøgelse (figur 3.8). Årsagen til dette er, at prøverne til denne undersøgelse er udtaget i overfladelaget i skadede sten mens den tidligere prøve er taget længere nede i stenen og at stenen er mindre skadet. De nye undersøgelser viser også et indhold af sulfationer, hvilket kun blev fundet i ybetydelig mængde tidligere.

De fundne ioner kan sammensættes til forskellige salte på utallige måder. Eksempler på almindelige salte i bygningsmaterialer er givet i afsnit 2.2. Nogle af disse salte har en meget lav opløselighed (CaSO_4 2,4 g/l, MgCO_3 0,1 g/l) hvilket betyder, at de vil udfælde ved en høj relativ fugtighed, i de fleste tilfælde nær ved eller på overfladen, hvor fordampningen er størst. Salte med større opløselighed ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 110 g/l, NaCl 360 g/l, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 710 g/l, K_2CO_3 1100 g/l) vil udfælde ved en lavere relativ fugtighed. Da et kirkehvælv normalt er tørt vil salte med en lav opløselighed konstant være udfældet mens salte med en større opløselighed vil veksle mellem at optræde på ionform og være udfældet afhængig af det omgivende klima.

Det relativt høje indhold af SO_4^{2-} og Ca^{2+} i denne undersøgelses prøver, der er taget i overfladen, kunne tyde på at der (konstant) er udfældet Ca_2SO_4 (gips) i overfladen. Indholdet af Ca^{2+} er støkiometrisk langt større end SO_4^{2-} -indholdet, hvilket kan betyde, at al sulfaten er bundet som gips. En stor del af calciumionerne kan dog være stærkere bundet som CaCO_3 (kalk) i kalkmørtel og sten, således at der er frie sulfationer, der kan udfælde med Na^+ og danne Na_2SO_4 . Denne udfældning vil ske ved en højere relativ fugtighed end den relative fugtighed, hvor NaCl udfælder. Længere inde i stenen (tidligere analyse, figur 3.8) findes ikke gips men hovedsagligt Na^+ og Cl^- , der en stor del af tiden vil findes på ionform. I overfladen findes også Na^+ og Cl^- , der skiftevis vil være på ionform ved høje relative fugtigheder og udfældet som NaCl ved lave relative fugtigheder. Når saltet er på ionform kan der ske en transport mellem overfladen og stenens indre, og der vil blive bundet relativt store mængder vand i stenen.

Ved udtørring af et hvælv vil der ske en udfældning af salte i følgende rækkefølge:

CO_3^{2-}	+ Ca^{2+}	→ kalk (Konstant udfældet)
SO_4^{2-}	+ Ca^{2+}	→ Gips (98 % RF, konstant udfældet)
	+ Na^+	→ Natriumsulfat (93 % RF, krystalvand)
	+ Mg^{2+}	→ Magnesiumsulfat (83 % RF, krystalvand)
Cl^-	+ Na^+	→ Natriumklorid (76 % RF)

Der vil ske en udfældning når opløsningen er mættet med det pågældende salt. Udfældningen vil fortsætte indtil en af ionerne er opbrugt. De tiloversblevne ioner kan herefter udfælde som et af de efterfølgende salte på lignende måde. Udfældet natriumsulfat eller magnesiumsulfat vil ved sækning af den relative fugtighed i porerne afgive krystalvand, hvorved saltets molvolumen ændres. Ved opfugtning af et hvælv vil der ske en opløsning af salte i den modsatte rækkefølge. Endnu ikke opløste salte kan blive opløst af hygroskopisk optaget fugt fra andre salte.

Ovenstående betragtninger gælder, hvis saltene ikke påvirker hinanden. Det vil de i praksis gøre, hvilket vil give anledning til udfældning af andre salte (kombinationssalte) og udfældning i en anden rækkefølge. Da samvirkningen er meget kompleks og hovedsagligt ukendt vil emnet ikke blive behandlet yderligere i denne rapport.

4.3 Indhold af klorider

Vurderingen af offerlagets effekt er baseret på målinger af kloridindhold i tegl og mørtel. Årsagen er, at måling af kloridindhold er forholdsvis enkel og sikker sammenlignet med måling af andre ioner og at der ved tidligere målinger /1/ er konstateret et højt indhold af klorid i hvælvingerne i Odden kirke. Vurdering af kloridindholdet giver også et skøn for udtræk-metodens effektivitet overfor andre salte med en tilsvarende opløselighed, hvorimod resultaterne ikke umiddelbart kan overføres til salte med en meget lav opløselighed.

De følgende vurderinger af kloridindholdet i hvælvet er baseret på middelværdier for borer i 9 sten. Det antages, at hvælvet indeholder 1/3 skadede sten og 2/3 uskadede sten og at mørtellaget i middel har en tykkelse på 35 mm.

Kloridindhold inden oplægning af mørtel

Kloridindholdet i forsøgsfeltet i Odden kirke er generelt lavt. Ved en undersøgelse af 9 kirker /2/ blev der i middel konstateret en kloridkoncentration i de øverste 7 cm af hvælvene på 15,8 kg/m³ for en skadet sten og 3,6 kg/m³ for en uskadet sten. Med 1/3 skadede sten og 2/3 uskadede sten bliver middelkoncentrationen af klorider i hvælvene 7,7 kg/m³. Sten i forsøgsfelt og referencefelt i Odden kirke indeholder inden oplægning af offerlaget i middel 8,9 kg/m³ i en skadet sten og 2,4 kg/m³ i en uskadet sten. Med 1/3 skadede sten og 2/3 uskadede sten fås et indhold i hvælvet på 5,6 kg/m³ svarende til 73% af det fundne middelindhold for de 9 kirker, mens indholdet i referencefeltet er 4,1 kg/m³ svarende til 53% af middelindholdet.

Kloridkoncentrationen inden oplægning af mørtlen (marts 1989) var for sten i forsøgsfelt og referencefelt i middel 8,9 kg/m³ for en skadet sten med en spredning på 1,0 kg/m³ (ialt 5 sten) og 2,5 kg/m³ for en uskadet sten med en spredning på 2,4 kg/m³ (ialt 4 sten). Variationskoefficienten for kloridkoncentrationen i en skadet sten er herved omkring 10%, mens den for en uskadet sten er omkring 100%. Der er altså ganske stor forskel på kloridindholdet i uskadede sten. Sten, der ser uskadede ud i overfladen kan altså godt have et relativt højt kloridindhold, mens en sten, der er tydeligt skadet i overfladen har et mere ensartet (højt) kloridindhold.

Der er tydelig forskel på kloridindholdet for skadede og uskadede sten jævnfør ovenstående middelværdier og spredninger. De skadede sten har et signifikant højere kloridindhold. Ved borerne blev det konstateret, at de uskadede sten var meget hårdere at bore i end de skadede sten. Det opsamlede pulvers farve varierede også, for uskadede sten var det kraftigt rødt, mens det for skadede var brunligt til gult. Dette tyder på, at de skadede sten er dårligere brændt og mere porøse end de uskadede. En dårligt brændt sten har en højere porøsitet og er mere finporøs end en hårdt brændt sten. Herved opsuger den dårligt brændte sten i højere grad (saltholdig) vand, og får et højere kloridindhold. Da stenen samtidig er svagere opstår skaderne i de dårligt brændte sten.

Kloridindholdet i forsøgsfeltet er i middel lidt højere end i referencefeltet. Inden oplægning

af mørtel (marts 1989) er kloridkoncentrationen i forsøgsfeltet $5,6 \text{ kg/m}^3$ og $4,1 \text{ kg/m}^3$ i referencefeltet (figur 3.11). Antallet af sten er for lille til at man udfra spredninger på kloridkoncentrationerne kan sige, om der er signifikant forskel på forsøgsfelt og referencefelt. Dette skønnes ikke at være tilfældet.

Kloridbevægelser under udtrækning

Efter pålægning af mørtlen på hvælvet overside falder kloridindholdet i de øverste 7 cm af forsøgsfeltet kraftigt (figur 3.12 og 3.14). Således er der i maj måned 52 dage efter pålægningen kun 35% tilbage af det oprindelige kloridindhold. I den samme periode falder kloridindholdet i referencefeltet kun til 86% af det oprindelige indhold. Mørtelen opsuger i perioden 13% af det oprindelige kloridindhold i forsøgsfeltet, så samlet er der forsvundet 52% af det oprindelige kloridindhold. Disse klorider er blevet vasket længere ned i hvælvet af det vand, der er brugt ved pudning af hvælvet. I denne undersøgelse er indholdet af klorider i den nederste halvdel af hvælvet ikke blevet analyseret, da man fra Nationalmuseets side ikke ønskede borer igennem hvælvet. Desuden er nogle klorider blevet opsugt i den nordlige tårnvæg ved foden af hvælvkappen.

I sommerperioden fra maj til september stiger kloridindholdet i forsøgsfeltet igen. Således er der i september 110% af det oprindelige kloridindhold. I samme periode stiger kloridindholdet i referencefeltet til 117% af det oprindelige indhold. Uafhængigt af mørtellaget sker der altså en vandring af klorider mod oversiden af hvælvet. Vandringen er dog næsten dobbelt så stor i forsøgsfeltet som i referencefeltet. Mørtellaget opsuger i perioden yderligere 14% af det oprindelige kloridindhold, så det i september ialt indeholder 27%. Stenenes indeholder i september 83% af det oprindelige kloridindhold.

I vinterperioden fra september til marts falder kloridindholdet i både forsøgsfelt og referencefelt. Forsøgsfeltet indeholder 72% af det oprindelige indhold, mens referencefeltet har det samme kloridindhold som ved forsøgets begyndelse. Kloriderne bevæger sig altså ned mod undersiden af hvælvet i vinterperioden. Mørtellagets indhold reduceres i samme periode fra 27% til 12%.

Der er ikke stor forskel på kloridkoncentrationer i de forskellige lag (figur 3.11) sammenholdt med de forskelle, der blev konstateret ved undersøgelsen af de 9 kirker i juni 1987 /2/, hvor koncentrationen i overfladen var betydeligt højere end længere inde i stenen. Ved denne undersøgelse er det yderste lags tykkelse større end ved den tidligere undersøgelse, hvilket delvis kan forklare forskellen, da man herved ikke får bestemt en evt. høj koncentration lige i overfladen. Desuden er denne undersøgelses målinger lavet på et andet tidspunkt. Kloriderne vandrer mod hvælvet overside i sommerperioden (jævnfør ovenstående), hvilket kan betyde, at kloridindholdet i overfladelaget har været højt netop i juni måned, hvor den tidligere undersøgelse blev lavet.

Kloridindhold i mørtel

Mørtellagets indhold af klorider er yderligere målt ved udtagning af 8-10 prøver jævnt fordelt over feltet (figur 3.15). I april, 20 dage efter oplægningen af mørtlen, var kloridkoncentrationen $0,3 \text{ kg/m}^3$ svarende til 3% af det oprindelige kloridindhold i forsøgsfeltet. Der er kun sket en ganske lille opsugning af klorider, vandringen er hovedsagligt sket ned mod hvælvets underside på grund af det vand, der er anvendt til pudsningen. I maj er koncentrationen steget til $1,7 \text{ kg/m}^3$ svarende til 15% af det oprindelige kloridindhold i forsøgsfeltet. Dette er i overensstemmelse med det målte indhold på 13% over de udvalgte sten (figur 3.14).

I september er der kun udtaget 2 ekstra prøver i mørtellaget. Koncentrationen er her $1,9 \text{ kg/m}^3$. I mørtelen over de udvalgte sten er der målt en koncentration på $3,0 \text{ kg/m}^3$ (5 prøver, figur 3.13). Koncentrationen over sten FS3 er specielt høj ($9,1 \text{ kg/m}^3$, figur 3.9), ses bort fra denne er koncentrationen over de udvalgte sten $2,5 \text{ kg/m}^3$ (4 prøver) svarende til 22% af det oprindelige kloridindhold. En middelværdi for kloridkoncentrationen af de ekstra prøver og den korregerede kloridkoncentration for prøver over de udvalgte sten giver en koncentration på $2,2 \text{ kg/m}^3$ (6 prøver) svarende til 20% af det oprindelige kloridindhold. Denne værdi er væsentlig, da det er den maksimalt udtrukne kloridmængde i forsøgsfeltet i undersøgelsesperioden.

I marts 1990, ét år efter oplægningen af mørtelen, viser de ekstra prøver en kloridkoncentration på $1,6 \text{ kg/m}^3$ i mørtellaget svarende til 14% af det oprindelige kloridindhold. Dette er i overensstemmelse med det målte indhold på 12% over de udvalgte sten (figur 3.14).

Opsugning af klorider i tårnvæg

Ved besigtigelsen den 19. maj blev der konstateret udfældninger af salt på den nordlige tårnvæg ved foden af hvælvkappen. Disse salte er suget op fra forsøgsfeltet med det vand, der blev brugt ved pålægning af mørtlen. I maj blev der målt en middelkoncentration i de inderste 7 cm af tårnvæggen på $4,7 \text{ kg/m}^3$. Arealet med udfældninger er skønsmæssigt 1 m^2 svarende til et totalt kloridindhold i tårnvæggen på 0,33 kg. Forsøgsfeltets areal er skønsmæssigt 6 m^2 , så det samlede kloridindhold bliver 2,35 kg. Der er altså vandret 14% af forsøgsfeltets oprindelige kloridindhold over i tårnvæggen. Dette er i overensstemmelse med at der i marts 1990 kunne konstateres et totalt kloridindhold i forsøgsfeltet incl. mørtellaget på 72% af forsøgsfeltets oprindelige kloridindhold. Dette skal sammenholdes med, at referencefeltet havde det samme kloridindhold efter et år.

Det målte kloridindhold i de inderste 7 cm af tårnvæggen falder i perioden maj til marts 1990 svarende til at kloriderne fordeler sig i tårnvæggen og evt. vandrer tilbage til tårnhvælvet.

Mulige fejlkilder ved målemetode

Kloridmålingerne er baseret på prøver udtaget som pulver med et 10 mm murbor. Det kan derfor ikke undgås, at der er sket en blanding af prøver fra de forskellige dybder, således at prøverne længst nede kan være påvirket af et højt kloridindhold i overfladen. Dette er søgt undgået ved omhyggelig rengøring af borehullet mellem boring i de forskellige dybder.

Boringerne på de 4 forskellige tidspunkter igennem forsøgsperioden er sket i de samme 9 sten for at sikre sammenlignelighed fra gang til gang. Efter hver boring er hullet repareret med kalkmørtel. Dette indgreb kan påvirke vandringen af klorider til og fra stenen sammenlignet med den vandring, der ville være i en intakt sten. Det samlede volumen af det udborede materiale udgør dog mindre end 1% af stenens volumen.

Analysemetoden til bestemmelse af klorider anses for at være så nøjagtig, sammenlignet med usikkerheden ved prøveudtagningen, at man kan se bort fra analyseunøjagtigheder.

4.4 Udtrækningsmetodens virkemåde

Anvendelsen af vand

Forudsætningen for at udtræksmetoden virker er, at hvælvet inden udtrækning opfugtes dels for at få opløst saltene og dels for at skabe en god vedhæftning (kapillar kontakt) mellem materialet og offerlagsmaterialet. Da opfugtningen er sket fra oversiden, er der herved sket en kappilar transport af væske mod undersiden, der har ført kloriderne med sig. Denne effekt ses tydeligt af kloridindholdsmålingerne. Noget af væsken, og dermed kloriderne, er suget op i den nordlige tårnvæg, hvilket tyder på, at der er anvendt mere vand end nødvendigt for alene at opfugte forsøgfeltet.

I sommerperioden ses tydeligt, at der sker en transport af klorider op mod oversiden af forsøgfeltet. Denne transport kan som anført i afsnit 2.2 kun ske, hvis saltene er opløst og transporteres som ioner. Da iondiffusion er en meget langsom transportform skønnes det, at langt den største del af iontransporten foregår som en kapillar strømning. En kapillar strømning i hvælvets indre er betinget af, at der foregår en fordampning fra en eller begge overflader. Fordampningen kan kun foregå, hvis den omgivende lufts relative fugtighed er lavere end damptrykket over saltopløsningen i poren. Damptrykket over saltopløsningen i poren er som anført i afsnit 2.2 afhængig af saltindhold i væsken og porestørrelse. Transporten af klorider mod oversiden betyder, at der kapillært suges væske og dermed klorider fra det indre af hvælvet op mod oversiden. Fordampningen må derfor være størst fra oversiden.

Den fordampede væske kan enten være tilført ved pålægningen af mørtlen eller være væske, der hygroskopisk er optaget fra undersiden af hvælvet på grund af saltindholdet, jævnfør afsnit 2.2. Da der også foregår en kloridtransport op mod oversiden af referencefeltet, der ikke er blevet opfugtet, må en del af transporten skyldes væske, der hygroskopisk er optaget fra undersiden af hvælvet. Samtidig er kloridtransporten op mod oversiden langt større i

forsøgsfeltet, hvilket betyder, at den væske, der er tilført ved oplægningen af mørtlen forøger kloridtransporten.

I vinterperioden (sept.-marts) sker der en transport af klorider mod undersiden af hvælvet, hvilket må betyde, at fordampningen i denne periode er størst fra undersiden. Den relative ændring af kloridindholdet i teglstenene er af samme størrelsesorden i forsøgsfeltet og referencefeltet (figur 3.14). Den relative ændring er størst i mørtellaget. Transporten i denne periode skønnes at ske ved, at der hygroskopisk optages fugt fra oversiden af hvælvet, hvorved salte i oversiden opløses, disse transporteres ved kapillartransport mod undersiden, hvor vandet afgives ved fordampning. Den væske, der er tilført ved oplægningen af mørtlen, skønnes ikke i så høj grad at forøge kloridtransporten som i sommerperioden. Forsøgsfeltet er ved at nå et ligevægtsfugtindhold svarende til referencefeltets, og den fremtidige kloridtransport vil være en årlig cyklisk transport mellem overside og underside svarende til det, der kan observeres for referencefeltet.

Kloridkoncentrationen vil være størst i oversiden efter sommerperioden. Det vil derfor være bedst at fjerne offerlaget på dette tidspunkt, da man herved fjerner flest klorider fra hvælvet.

Porestrukturens betydning

Med offerlagsmetoden trækkes kloriderne ud af materialet med kapillarsugning. Dette er som anført i afsnit 2.3 kun muligt, hvis offerlaget er mere finporøst end det materiale, kloriderne skal trækkes ud af. Dette ses også at være tilfældet for kalkmørtel, der skal udtrække klorider fra middelaldertegl (figur 2.1). I afsnit 2.3 blev det anført, at den transporterede væskemængde i det stationære tilfælde øges proportionalt med poreradius, hvilket betyder, at offerlagsmaterialet skal være så grovporøst som muligt. Den kapillare stighøjde øges ganske vist med faldende poreradius (ligning 2.1), men stighøjden vil i alle tilfælde være langt større end offerlagets tykkelse.

Forudsætningen for kapillartransport i materialet er, at der sker en stor fordampning fra offerlagets overflade. Det er derfor vigtigt, at mørtellagets ikke glittes, da man herved tilstopper overfladen og nedsætter damptransportevnen. En egentlig grovstruktur af overfladen vurderes at have mindre betydning, da man ikke kan påvirke overfladearealet væsentligt på denne måde.

Det er en fordel at have kapillartransport så langt som muligt op gennem offerlaget, da denne transportform er langt den hurtigste, og man herved får udfældet saltene så langt oppe i offerlaget som muligt, evt. på offerlagets overflade. Dette kan opnås ved at offerlagets porestruktur op gennem laget gøres mere og mere finporøs.

Samlet skal man altså vælge et offerlagsmateriale, hvor porestrukturen i overfladen giver en så stor fordampning som muligt. Ned gennem offerlaget skal porestrukturen blive grovere dog således, at man altid har finere porer i offerlagsmaterialet end i det materiale, saltene skal trækkes ud af.

De fine porer i en moderne kalkmørtel K100/1200 er af samme størrelsesorden som porerne i middelalderteglsten (figur 2.1). Andelen af disse porer udgør omkring 10% af mørtlen. Desuden er der en del porer, der er grovere end i teglsten. Andelen af disse udgør omkring 20%. Da den anvendte kalkmørtel i Odden kirke er federe (mere kalkholdig) end den, der er målt porestørrelser for på figur 2.1, må mørtlen i Odden kirke forventes at have en større andel af fine porer.

På figur 2.1 ses også, at en middelalderteglsten fra Janderup kirke har finere porer end kalkmørtlen K100/1200. På denne teglsten vil man udfra ovenstående forvente, at det er vanskeligt at udtrække salte med en kalkmørtel K100/1200. Den anvendte kalkmørtel i Odden kirke vil være mere velgenet, da den må forventes at have en større andel af fine porer. På moderne teglsten, der udfra figur 2.1 har grovere porer, vil der derimod ikke være problemer.

Ved udfældning af salte vil materialets porestørrelser blive påvirket, så materialet bliver mere finporøst. I nogle tilfælde kan der direkte blive tale om tilstopning af porer med udfældede salte.

Klimaets betydning

Transport af vand ind og ud af hvælvet er bestemt af damptrykkene ved de to overflader, jævnfør afsnit 2.3. Er damptrykket i luften højere end damptrykket over væsken i porene, vil der blive transporteret vand ind i hvælvet og modsat, hvis damptrykket i luften er lavere end damptrykket over væsken i porene.

Ved overgangen mellem luft og materialeoverflade vil der være en ganske betydelig modstand mod damptransport (fugtovergangsmodstand). Størrelsen af denne afhænger bl.a. af luftens hastighed (ventilation) over overfladen. For at vurdere fordampning og fugtoptagelse er det derfor nødvendigt enten at kende denne overgangsmodstand eller at kende klimaet præcis ved materialeoverfladen (mikroklimaet). I Odden kirke er klimaet målt nogle meter fra overfladen, så ved vurderingen af klimaet må man tage hensyn til fugtovergangsmodstanden.

Tilsvarende vil der være en overgangsmodstand mod varmetransport i overfladen. Ved fugttransport ind i hvælvet vil temperaturen af overfladen være højere end temperaturen af den omgivende luft på grund af kondensationsvarme. Tilsvarende vil temperaturen af overfladen være lavere end temperaturen af den omgivende luft ved fugttransport ud af hvælvet. Dette har især betydning i forbindelse med tilsmudsning af overfladen, idet støvpartikler tiltrækkes af den kolde overflade. En fugtig væg under udtørring bliver altså let tilsmudset. I Odden kirke er temperaturen målt nogle meter fra overfladen, så ved vurderingen af klimaet må man tage hensyn til ovenstående effekter.

I figur 3.19 er angivet minimum, maximum, middelværdi og spredning af temperatur, relativ fugtighed (RF) og damptryk på loftet over tårnhvælvet. Klimaet er bestemt af det udendørs klima. I perioden august til november er klimaet under tårnhvælvet målt og der er ligeledes i figur 3.19 angivet minimum, maximum, middelværdi og spredning af temperatur, RF og

damptryk. Det bemærkes, at RF i hele perioden har været ganske høj sammenlignet med RF over tårnhvælvet. Termohygrografen var anbragt nær ved tårnvæggen, der kan have været fugtig og dermed påvirket RF.

Generelt er det vanskeligt at vurdere klimaet tæt ved hvælvet (mikroklimaet) udfra de udførte målinger, jævnfør ovenstående diskussion. Til dette formål kræves, at der er anbragt følere i direkte kontakt med overfladen. Målingerne blev udført med termohygrograf, da det ikke var praktisk muligt at gennemføre mere præcise målinger. Målingerne kan dog bruges til en overlagsmæssig vurdering af klimaets effekt på kloridbevægelserne.

I vinterperioden er RF højere end NaCl's krystallisationspunkt (76% RF) både på oversiden af hvælvet og i det uopvarmede kirkerum. Herved vil hvælvet optage vand hygroskopisk fra begge sider. Ved opvarmning af kirkerummet vil RF i kirkerummet falde, mens damptrykket vil være uændret eller stige lidt på grund af inventarets fugtafgivelse. RF over NaCl-opløsningen i porerne er uafhængig af temperaturen (jævnfør afsnit 2.2), og ved en temperaturstigning i de yderste mm af hvælvets underside vil damptrykket stige kraftigt, hvorved der vil fordampe vand fra undersiden af hvælvet. Herved vil der ske en nedadgående kloridtransport i hvælvet ved hver opvarmning, jævnfør ovenstående. Dette er i overensstemmelse med de målte kloridbevægelser (figur 3.12).

I sommerperioden er RF i luften over hvælvet lavere end NaCl's krystallisationspunkt, mens RF er højere på undersiden. Herved vil der i hele perioden ske en fordampning fra oversiden og en hygroskopisk optagelse af fugt på undersiden, hvorved man får en opadgående fugtstrøm. Dette er i overensstemmelse med de målte kloridbevægelser. Solens opvarmning af hvælvets overside vil medføre en effekt svarende til opvarmningen af kirken om vinteren med en modsatrettet kloridstrøm til følge.

I både vinter- og sommerperioden sker der, udover det ovenfor nævnte, mange kortere klimavariationer, hvilket på lignende måde påvirker kloridbevægelserne. Disse klimavariationer har især betydning for de yderste lag af hvælvet, hvor krystallisation af salte og fugt- og varmebevægelser er med til at nedbryde overfladen.

Optimering af metode

I Odden kirke blev anvendt kalkmørtel til udtrækningsforsøgene, da materialet er velkendt og man erfarringsmæssigt ikke har fået skader ved anvendelse af kalkmørtel. Det betyder dog ikke, at kalkmørtel er det bedste materiale til udtrækning, ligesom den måde, man traditionelt udfører en pudsning på, heller ikke behøver at være den mest effektive. På baggrund af de udførte forsøg peges i det følgende på de områder, hvor man bør ændre på metoden.

Inden pudsningen blev teglstenen opfugtet fra oversiden for at opløse saltene og for at give en bedre kapillarkontakt mellem mørtel og tegl. Herved får man en nedadgående kloridstrøm. Dette kan undgås ved at opfugte hvælvet nedefra, enten ved direkte at påføre vand eller ved igennem en periode at have en høj RF, så det saltholdige materiale optager fugten

hygroskopisk. Herved fås en opadgående kloridstrøm.

Efter pudningen blev mørtlen eftervandet for at undgå svind-revner i overfladen. Dette skønnes udelukkende at have betydning for overfladens udseende og at være af mindre betydning for den kapillære kontakt. Skal mørtlen anvendes til udtrækning af salte er eftervanding derfor overflødig og direkte skadelig, da man herved yderligere vasker kloriderne mod undersiden af hvælvet og andre konstruktionsdele (tårnvæg). Mørtellaget blev glattet med et pudsebrædt, hvilket også kun har betydning for udseendet og man derfor bør undgå, da man risikerer, at porerne tilstoppes af finstof i overfladen.

Fordampningen fra offerlagets overflade bør være så stor, som mulig, da man herved får den største væskestrøm og dermed kloridtransport mod overfladen. Det skal dog sikres, at der damptransporten ikke overstiger kapillartransporten, så man får en udtørring af offerlaget før udtørring af det materiale, man trækker salte ud af. Hvor stor fordampning man får fra forskellige offerlagsmaterialer og overflader undersøges bedst ved eksperimenter.

Offerlaget skal være mere finporøst end det materiale, man ønsker at trække salte ud af, og have finere og finere porer ud mod overfladen af offerlaget, så man få kapillarsugning helt ud til overfladen. Dette kan i praksis opnås ved at oplægge mørtlen i to lag; første lag kastes ud i et tyndt lag og efter hærkning oplægges et andet lag, der komprimeres med en mureske. Ingen af lagene må glattes med et pudsebrædt. Evt. kan der oplægges flere lag, der komprimeres mere og mere for hvert lag. Det samlede lags tykkelse bør være nogle cm, så man får en sikkerhed for at saltene udfældes i offerlaget. Laget bør dog ikke være tykkere, da man ved oplægning af tykke lag tilfører meget vand, der kan gøre det vanskeligt at kontrollere salttransportens retning. Tykke lag bør kun anvendes ved offerlagsmaterialer, der ved udlægning ikke kræver anvendelsen af vand.

Offerlaget bør oplægges i foråret, da man undgår problemer med frost, og der i sommerperioden er en naturlig opadgående kloridstrøm. Dette kan dog være anderledes i andre kirker, og man bør ved et overslag sikre sig, at klimaet på over- og underside af hvælvet også betinger dette i det aktuelle tilfælde. Transporten af andre salte kan afvige væsentligt fra kloridtransporten, og man bør derfor inden oplægning af offerlaget ved en kemisk analyse bestemme hvilke salte, der er tilstede i hvælvet og udfra afsnit 2.2 foretage en vurdering af, om disse kan sammenlignes med kloriderne. Som en tommelfingerregel vil dette være tilfældet, hvis opløseligheden er af samme størrelsesorden.

Under udtrækningen kan en styring af klimaet lokalt under og over hvælvet øge effekten. En RF højere end saltenes krystallisationspunkt på undersiden af hvælvet vil sikre en hygroskopisk fugtoptagelse og hindre udfældning af salte på undersiden, der normalt skal beskyttes af hensyn til kalkmalerier. Klimaet på undersiden bør styres, så man undgår kondensdannelse og dermed vækstbetingelser for biologiske organismer. Ved at blæse tør luft henover hvælvet overside, kan man sikre en opadgående salttransport. Tørringen må dog ikke være så kraftig, at man udtørre offerlaget.

Offerlagsmaterialet bør fjernes igen om efteråret, da man her har den største kloridkon-

centration. Igen kan dette være forskelligt for forskellige salte og i forskellige kirker, så man bør fortage en nøje vurdering i hvert enkelt tilfælde. Specielt bør tidspunktet for fjernelsen af offerlaget fastlægges ud fra bestemmelser af offerlagets saltindhold. Ved en styring af klimaet på over- og underside af hvælvet vil saltbevægelserne afvige fra den årscyklus, der er iagttaget i Odden kirke.

4.5 Overslagsmæssige beregningseksempler

Hygroskopisk fugtoptagelse

Tilstedeværelsen af NaCl i et teglstenshvelv vil, som nævnt i afsnit 2.2 gøre, at der optages store mængder fugt fra luften. Teglstenens egen fugtoptagelse er meget mindre, og der kan normalt ses bort fra den. I det følgende er overslagsmæssigt beregnet væskemætningsgraden af et teglstenshvelv med et givent NaCl-indhold. Væskemætningsgraden angiver den del af teglstenens porer, der er fyldt med væske (saltopløsning). Beregningen bygger på data for NaCl-opløsninger fra /4/ og /7/.

Der kan opstilles følgende lineære sammenhænge mellem koncentration af opløsningen (kg NaCl pr. kg opløsning), densiteten af opløsningen og ligevægts RF over opløsningen:

$$(4.1) \quad \rho_l = 748C + 1000$$

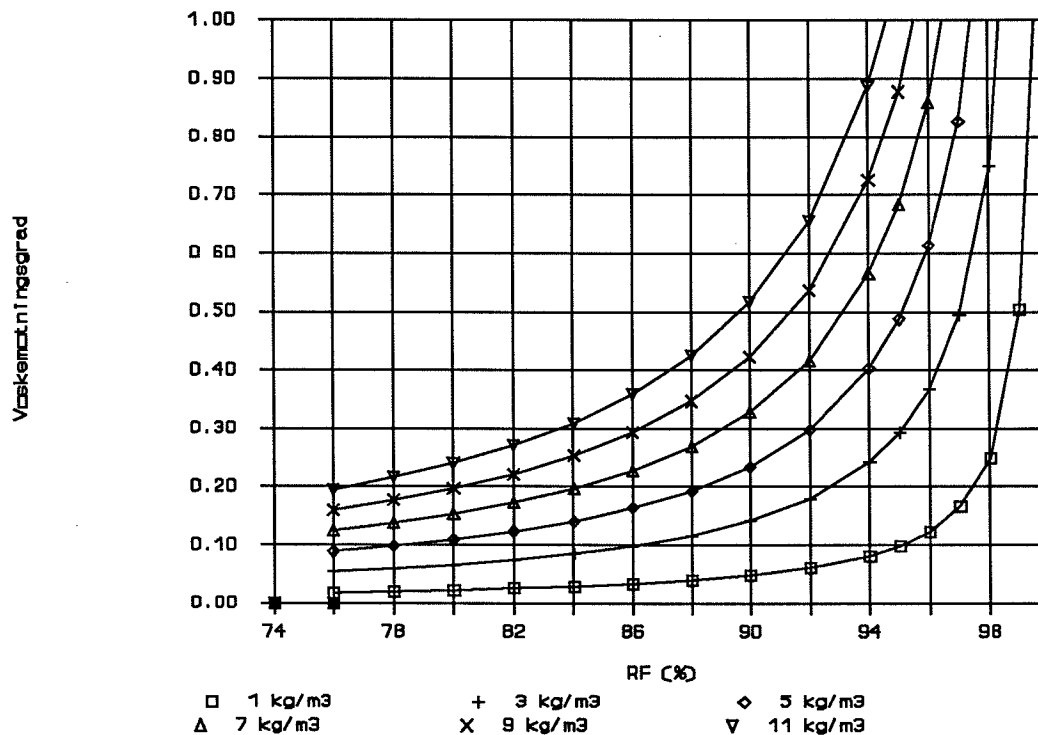
$$(4.2) \quad \begin{aligned} RF &= 100 - 92,3 C & 0 \leq C \leq 0,26 \\ RF &= 76 & C \geq 0,26 \end{aligned}$$

hvor C = koncentrationen af væsken [kg/kg]
 ρ_l = densiteten af væsken [kg/m³]
 RF = ligevægts RF over opløsningen [%]

Ser man bort fra teglstenens egen fugtoptagelse kan væskemætningsgraden ved ligevægt bestemmes som:

$$(4.3) \quad S_v = \frac{152[Cl^-]}{P(100 - RF)(1810 - 8,1RF)}$$

hvor P = porøsiteten af tegl [m³/m³]
 $[Cl^-]$ = indhold af Cl⁻ i teglstenen [kg/m³]
 RF = RF i den omgivende luft [%] (76% ≤ RF ≤ 100%)
 S_v = væskemætningsgraden ved ligevægt



Figur 4.1 Væskemætningsgrad i en NaCl-holdig teglsten med porøsiteten 30% ved ligevægt som funktion af den omgivende lufts RF. Der er set bort fra teglstenens egen hygroskopiske fugtoptagelse.

Den hygroskopiske fugtoptagelse forklarer, hvorfor der kan ske en kloridtransport selvom hvælvet ikke opfugtes kapillært. Den hygroskopisk optagne fugt findes i porerne som saltopløsning, der kan transporteres kapillært. En kapillær opfugtning som ved udtrækningens begyndelse giver dog en langt større kloridtransport (sammenlign forsøgsfelt og referencefelt figur 3.12) da væskemætningsgraden er større (0,7 ved kapillær mætning mod 0,1 ved hygroskopisk mætning) og der herved bedre kan foregå en kapillær transport i stenen.

Kloridtransport som følge af opvarmning på den ene side.

I det følgende gives et skøn over, hvad opvarmning i kirken om vinteren og opvarmning af loftet om sommeren betyder for kloridtransporten. Eksemplet tjener kun til at illustrere mekanismen.

I vinterperioden er klimaet i middel 5 °C, 80% RF på over- og underside, når kirken er uopvarmet. Med et Cl-indhold på 5 kg/m³, svarende til middelindholdet i hvælvet i Odden kirke, fås en væskemætningsgrad ved ligevægt på 11%. Ligevægtsdampptrykket er 697 Pa. Ved opvarmning af undersiden til 20 °C antages, at dampptrykket i den omgivende luft ikke ændres. I teglstenens underside fastholdes RF på 76% på grund af saltopløsningen, hvorved dampptrykket ændres til 1777 Pa. Regnes med et konvektivt fugtovergangstal $\beta_p = 0,5 \cdot 10^{-7}$ kg/m²sPa fås en nedadgående fugtstrøm ved opvarmningens begyndelse på

$$q = \beta_p \Delta P = 0,5 \cdot 10^{-7} (1777-697) = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Modsvares denne damptransport af en indre kapillartransport af en mættet NaCl-opløsning mod undersiden fås en kloridstrømning på $1,2 \cdot 10^{-5}$ kg/m²s. Med denne hastighed transporteres 7% af hvælvets samlede kloridindhold ned på undersiden i løbet af 1 time. I praksis vil dette ikke ske, da damptransporten aftager når væskefronten forskydes op i hvælvet, hvorved damptransportmodstanden øges. Desuden vil kun noget af damptransporten modsvares af en indre kapillartransport.

I sommerperioden er temperaturen i middel 15 °C. Det meste af tiden er hvælvet udtørret, da RF er mindre end 76% på oversiden, men i perioder bliver hvælvet opfugtet fra undersiden. Er hvælvet opfugtet, og RF er 76% på oversiden, vil dampptrykket være 1296 Pa. Ved en opvarmning af loftet til 25 °C vil dampptrykket i oversiden af teglstenen på grund af saltopløsningen ændres til 2407 Pa. Herved fås en opadgående fugtstrøm ved opvarmningens begyndelse på

$$q = \beta_p \Delta P = 0,5 \cdot 10^{-7} (2407-1296) = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

hvilket er af samme størrelsesorden som den nedadgående fugtstrøm i vinterperioden. Der gælder her de samme bemærkninger som for vinterperioden.

5. KONKLUSION

Der kan i undersøgelsen drages følgende konklusioner:

- 1) Klorider opløses og transporteres let i middelalderlige teglstenshvælv. Det er vigtigt at anvende så lidt vand som muligt, for at kunne kontrollere kloridbevægelserne.
- 2) Kloridindholdet i tårnhvælv i Odden kirke er lavt sammenlignet med andre kirker. Der er skader på oversiden men ikke på undersiden af hvælv.
- 3) Vand anvendt ved pudsning på oversiden af hvælv giver en nedadgående kloridtransport efterfulgt af en opadgående kloridtransport ved udtørring af hvælv.
- 4) Udover en kloridtransport på grund af kapillær opfugtning fra oversiden, sker der i Odden kirke en cyklisk transport af klorider i tårnhvælv:
 - Om sommeren transporteres kloriderne mod oversiden.
 - Om vinteren transporteres kloriderne mod undersiden.
- 5) Det er muligt at trække klorider ud af et middelalder teglstenshvælv med et lag kalkmørtel på hvælvets overside. Det maksimale kloridindhold i mørtlen er målt i september. På dette tidspunkt er 20% af det oprindelige kloridindhold inden pudsning trukket op i mørtlen.

REFERENCER

- /1/ Nielsen, Carsten Bredahl, Larsen, Jens Hübertz: "Kirkeundersøgelse - forvitring af tegl og kalkpuds, registrering af skader i vestjyske kirker". LBM intern rapport, DTH juni 1987.
- /2/ Larsen, Erik Stoklund: "Mursalte - kvalitativ og kvantitativ undersøgelse af salte i teglsten fra vestjyske middelalderkirker". LBM Teknisk rapport 181/88, DTH januar 1988.
- /3/ Nielsen, Anders et al.: "Tegl fra Prøvelyst - rapport fra kursus 6108". LBM Teknisk rapport 176/87, DTH maj 1987.
- /4/ CRC (the Chemical Rubber Co.): "Handbook of Chemistry and Physics". 64th edition, 1983-84.
- /5/ Padfield, Tim, Erhardt, David: "The spontaneous transfer to glass of an image of Joan of Arc". ICOM Committee for Conservation, 1987 vol III, Working Group 17, p. 909-913.
- /6/ Bowley, M.J.: "Desalination of stone: a case study". CP 46/75 Building Research Establishment, Garston Watford, april 1975.
- /7/ Robinson, Stokes: "Electrolyte Solutions". Butterworth London, 1955.
- /8/ Larsen, Erik Stoklund, Nielsen, Carsten Bredahl: "Decay of bricks due to salt", Materials and Structures, 1990, 23, 16-25.
- /9/ Arnold, Andreas.: "Determination of mineral salts from monuments". Studies in Conservation, 1984, 29, 129-138.
- /10/ Arnold, A., Zehnder, K., Küng, A.: "Verwitterung und Erhaltung von Wandmalerei". Methoden zur Erhaltung von Kulturgütern, herausgegeben von Francois Schweizer und Verena Villiger. Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart, april 1989.

BILAG 1: PRØVEMETODER

Boreudtagning

Metoden anvendes til at udtage en prøve af teglsten eller mørtel til analyse for indhold af vandopløselige salte. Der udtages fortrinsvis prøver i dybderne 0-1 cm, 1-3 cm og 3-7 cm. Prøverne udtages med et 10 mm murbor. Under boringen holdes et stykke papir under til opsamling af boresmuldet, resten udtages med spatel og glasrør efter boringen. Glasrøret drejes rundt nede i hullet, en finger sættes for enden, hvorefter prøvemængden inde i røret kan tages op og rystes ud. Imellem hver boringsdybde renses hullet grundigt, evt. ved hjælp af trykluft. For at undgå at forurene prøven fra overliggende lag skal boremaskinen holdes lige. Alternativt kan bores med mindre og mindre bordiametre. Det er endvidere vigtigt at planlægge boredybderne, så der tages maksimalt hensyn til krystallisationszoner og andre spring i saltprofilen.

Forberedelse af prøver til Autoanalyser

Der afvejes ca. 1 gram prøve. Hvis prøven ikke er helt nedknust kommes den i en rysteknuser. Prøven opløses i 75 ml vand, vand og prøve rystes kraftigt i mindst 15 sekunder, hvorefter prøven bundfælder i 1 døgn. De øverste 20 ml af væsken udtages med pipette og analyseres for ioner med en spektrofotometrisk metode (Autoanalyser).

Autoanalyser

Autoanalyseren bruges til bestemmelse af koncentrationen af anioner i en vandig opløsning. Metoden er baseret på, at de forskellige ioner absorberer lys med bestemte bølgelængder. Opløsningen tilsættes kemikalier, der skal udfælde de ioner, der ikke analyseres for. Prøven gennemlyses, absorptionen måles med et spektrofotometer og sammenlignes med en kendt standard.

Sedimenteringsmetoden

Teglpulveret tørres i varmeskab ved 105 °C og afkøles i eksikator. I en stor glaskolbe afvejes 4-5 g teglpulver, der tilsættes 800 ml vand og omrystes kraftigt. Kolben henstår i 3 døgn indtil teglpulveret er bundfældet, hvorefter 700 ml vand fra overfladen fjernes med hævert. Resten af vandet dampes væk i tørreskab ved 105 °C, kolben afkøles med prop, hvorefter kolbe og teglpulver vejes. Indholdet af vandopløselige stoffer beregnes som 8/7 af vægttabet af teglpulveret.

BILAG 2: KLORIDINDHOLD

I det følgende findes en komplet oversigt over samtlige prøver, der er udtaget i Odden kirke til bestemmelse af kloridindhold. Der er udtaget prøver følgende 5 dage:

- | | |
|----|------------|
| 1) | 28.03.1989 |
| 2) | 17.04.1989 |
| 3) | 19.05.1989 |
| 4) | 19.09.1989 |
| 5) | 07.03.1990 |

I forsøgsfeltet er der taget prøver i 3 skadede sten, 2 uskadede sten og i offerlagsmørtlen. I referencefeltet er der taget prøver i 2 skadede og 2 uskadede sten. Desuden er taget prøver i nogle sten i den nordlige tårnvæg. Alle dybder (d1 og d2) i forsøgsfelt og referencefelt er målt fra oversiden af hvælvet, i forsøgsfeltet fra oversiden af mørtellaget. I tårnvæggen er dybden målt fra indersiden af væggen. I oversigten er anvendt følgende betegnelser:

Nr = Fortløbende prøvenummer

Mat. = Prøvemateriale
T=teglsten
M=kalkmørtel

Sten = Betegnelse for prøve.
1. tegn:
F=forsøgsfelt
R=referencefelt
V=tårnvæg.
2. tegn:
S=skadet
U=uskadet
M=offerlagsmørtel.
3. tegn:
Sten nr.

d1 = Boreddybde i mm fra overfladen, øvre grænse.
d2 = Boreddybde i mm fra overfladen, nedre grænse.
Cl⁻ vægt% = Kloridindholdet i vægtprocent af prøvens tørmasse.

Dato 28.03.1989**FORSØGSFELT**

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
1	T	FS1	0	10	0.64
2			10	30	0.59
3			30	70	0.54
4	T	FS2	0	10	0.60
5			10	30	0.58
6			30	70	0.55
7	T	FS3	0	10	0.53
8			10	30	0.46
9			30	70	0.44
10	T	FU1	0	10	0.23
11			10	30	0.32
12			30	70	0.37
13	T	FU2	0	10	0.16
14			10	30	0.16
15			30	70	0.04

REFERENCEFELT

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
16	T	RS1	0	10	0.51
17			10	30	0.51
18			30	70	0.51
19	T	RS2	0	10	0.52
20			10	30	0.50
21			30	70	0.41
22	T	RU1	0	10	0.13
23			10	30	0.15
24			30	70	0.12
25	T	RU2	0	10	0.05
26			10	30	0.04
27			30	70	0.33

Dato 17.04.1989**FORSØGSFELT**

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
28	M	FS1	0	35	-
29	M	FS2	0	35	0.02
30	M	FS3	0	35	0.03
31	M	FU1	0	35	0.01
32	M	FU2	0	35	0.01

Dato 19.05.1989**FORSØGSFELT**

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
33	M	FS1	0	7	0.08
34			7	33	0.13
35	T		33	63	0.24
36			63	75	0.24
37			75	115	0.31
38	M	FS2	0	8	0.10
39			8	45	0.08
40	T		45	75	0.11
41			75	102	0.15
42	M	FS3	0	8	0.13
43			8	47	0.11
44	T		47	68	0.13
45			68	82	0.15
46			82	106	0.17
47	M	FU1	0	16	0.05
48			16	33	0.02
49	T		33	40	0.06
50			40	64	0.04
51			64	102	0.04
52	M	FU2	0	22	0.09
53			22	31	0.06
54	T		31	38	0.07
55			38	58	0.09
56			58	108	0.14
57	M	FM1	0	35	0.09
58		FM2	0	35	0.09

REFERENCEFELT

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
59	T	RS1	0	3	0.52
60			3	20	0.49
61			20	65	0.48
62	T	RS2	0	3	0.48
63			3	15	0.48
64			15	30	0.48
65			30	71	0.45
66	T	RU1	0	12	0.13
67			12	30	0.13
68			30	78	0.10
69	T	RU2	0	16	0.03
70			16	35	0.03
71			35	75	0.02

NORDLIG TÅRNVÆG

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
72	T	VS1	0	3	0.65
73			3	13	0.70
74			13	30	0.55
75			30	70	0.55
76	T	VS2	0	3	0.50
77			3	17	0.14
78			17	33	0.12
79			33	70	0.12
80	T	VU1	0	12	0.10
81			12	27	0.10
82			27	70	0.08

Dato 19.09.1989**FORSØGSFELT**

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
83	M	FS1	0	33	0.12
84	T		12	46	0.28
85			46	68	0.35
86			68	98	0.33
87	M	FS2	0	45	0.22
88	T		45	70	0.24
89			70	79	0.20
90			79	100	0.22
91	M	FS3	0	41	0.49
92	T		41	79	0.42
93			79	100	0.38
94	M	FU1	0	30	0.01
95	T		30	39	0.10
96			39	59	0.17
97			59	99	0.17
98	M	FU2	0	25	0.22
99	T		25	38	0.32
100			38	70	0.34
101			70	97	0.28
102	M	FM1	0	10	0.13
103		FM2	0	5	0.07

REFERENCEFELT

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
104	T	RS1	0	3	0.56
105			3	20	0.57
106			20	46	0.64
107			46	73	0.61
108	T	RS2	0	15	0.54
109			15	42	0.56
110			42	87	0.52
111	T	RU1	0	13	0.22
112			13	30	0.13
113			30	77	0.18
114	T	RU2	0	12	0.10
115			12	39	0.09
116			39	83	0.07

NORDLIG TÅRNVÆG

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
117	T	VS3	0	1	0.76
118			1	70	0.21
119	T	VU2	0	32	0.15

Dato 07.03.1990

FORSØGSFELT

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
120	M	FS1	0	23	0.06
121			23	35	0.11
122	T		35	45	0.22
123			45	66	0.38
124			66	94	0.43
125			94	108	0.43
126	M	FS2	0	42	0.08
127	T		42	52	0.10
128			52	86	0.24
129			86	108	0.24
130	M	FS3	0	30	0.17
131	T		30	44	0.27
132			44	73	0.35
133			73	104	0.34
134	M	FU1	0	30	0.02
135	T		30	65	0.08
136			65	96	0.07
137			96	114	0.09
138	M	FU2	0	25	0.12
139	T		25	40	0.18
140			40	56	0.25
141			56	74	0.27
142			74	108	0.31
143	M	FM1	0	35	0.10
144		FM2	0	35	0.09
145		FM3	0	35	0.07

REFERENCEFELT

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
146	T	FS1	0	3	0.54
147			3	24	0.52
148			24	55	0.54
149			55	88	0.53
150	T	RS2	0	10	0.51
151			10	58	0.51
152			58	95	0.51
153	T	RU1	0	17	0.15
154			17	45	0.15
155			45	80	0.14
156	T	RU2	0	20	0.05
157			20	59	0.04
158			59	88	0.04

NORDLIG TÅRNVÆG

Nr	Mat.	Sten	d1	d2	Cl ⁻ vægt%
159	T	VS4	0	12	0.09
160			12	63	0.09
161	T	VU3	0	10	0.10
162			10	52	0.10

