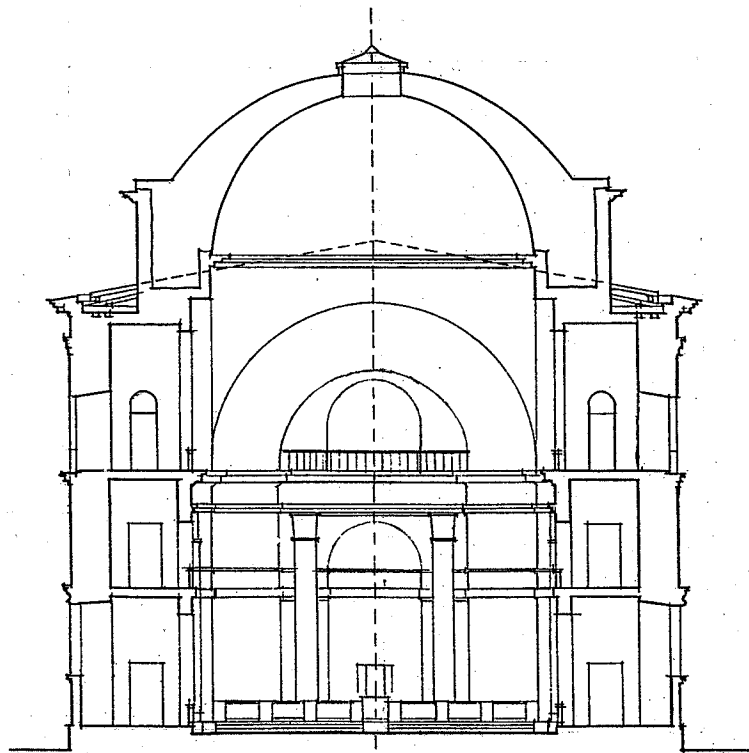


TR 280/93
ISSN 0907-7073

SIMULERING AF UDTØRRINGSFORLØB I HVÆLVINGER I CHRISTIANSBORG SLOTSKIRKE



**JETTE BRUNNSTRØM JENSEN
KURT KIELSGAARD HANSEN
LABORATORIET FOR BYGNINGSMATERIALER
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE • 1993**

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. INDLEDNING	1
2. BESKRIVELSE AF MATCH	3
2.1 Simuleringsmåde	3
2.2 MATCH-parametre	3
3. LABORATORIEUNDERSØGELSER	4
3.1 Kopforsøg	4
3.2 Sorptionsforsøg	6
3.3 Opsugnings- og vacuummætningsforsøg	7
4. MATCH-SIMULERINGER	9
4.1 Tværsnitsanalyse	10
4.2 Vejrforholdsanalyse	14
4.3 Simulering med saltindhold i materialerne	17
5. SAMMENFATNING	20
6. REFERENCELISTE	22

APPENDIX A : Materialedata i MATCH's materialebibliotek

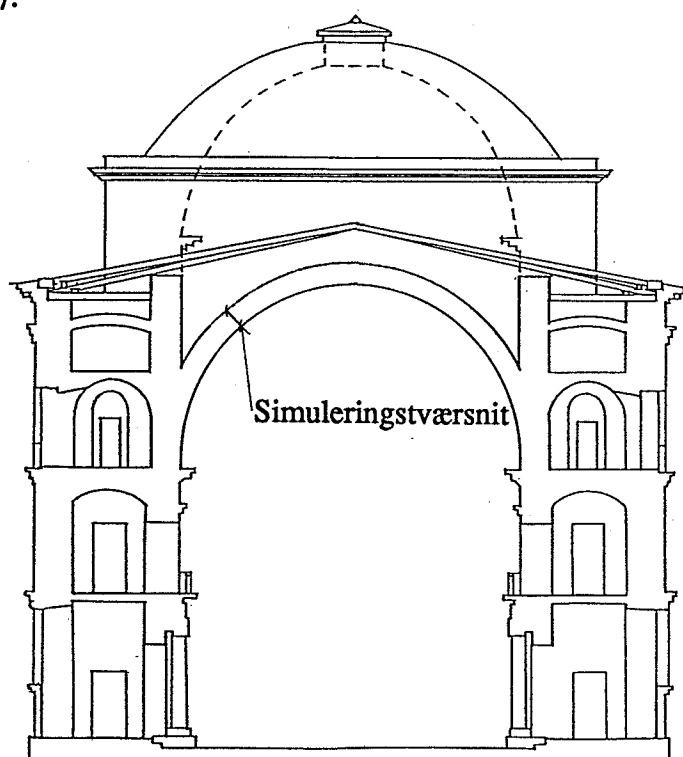
APPENDIX B : Sorptionsisotermer

APPENDIX C : Koprapporter for teglsten og puds

1. INDLEDNING

Nærværende rapport redegør for de opnåede resultater fra en opgave rekvireret af ingeniør Svend Jakobsen fra Eduard Troelsgård, Rådgivende Ingeniører A/S, på vegne af Erik Møllers tegnestue og Slots- og Ejendomsstyrelsen.

Christiansborg Slotskirke er gennem tiden brændt adskillige gange. Den "nuværende" Slotskirke er opført af arkitekt C.F. Hansen i perioden 1813 - 1826. Slotskirken brændte natten til 7. juni 1992. Den store kuppel i kirketaget styrtede ned, mens Slotskirkens berømte orgel fra 1829 og hovedparten af det øvrige inventar blev reddet. I forbindelse med slukning af branden blev store dele af murværket - specielt tøndehvælvene - i kirkens tagetage meget våde. Ved undersøgelser foretaget af Byggeteknisk Institut, Dansk Teknologisk Institut (DTI), er der efter branden konstateret op til 20 vægt-% vandindhold i murværket i tagetagen /1/.



Figur 1.1. Tværsnit af hvælvingskonstruktioner i Christiansborg Slotskirke.

Da det er nødvendigt at holde det uimprægnerede og indmurede træværk, som findes i Slotskirken, på et lavt vandindhold p.g.a. fare for råd- og svampeangreb, er Slotskirken i dag under udtørring. Ved starten på denne opgave mente Svend Jakobsen fra Eduard Troelsgård, Rådgivende Ingeniører A/S, at hvælvingskonstruktionerne i tagetagen burde udtørres til 1 vægt-% vandindhold.

Formålet med opgaven er at foretage edb-simuleringer af udtørningsforløbet for hvælvingskonstruktioner i Christiansborg Slotskirke v.h.a. MATCH-programmet /2/, således at det kan vurderes, hvornår udtørringen med rimelighed kan standses.

Edb-simuleringer for en konstruktion med MATCH-programmet forudsætter kendskab til konstruktionsopbygning, vejrforhold (temperatur, relativ luftfugtighed og vindpåvirkning) samt materialedata for de anvendte materialer. Konstruktionsopbygning og vejrforhold er fastlagt af Svend Jakobsen fra Eduard Troelsgård, Rådgivende Ingeniører A/S, mens Laboratoriet for Bygningsmaterialer (LBM) har stået for bestemmelse af materialedata, udførelse af simuleringer og vurdering af disse. Bestemmelse af materialedata har medført en del laboratorieundersøgelser og krævet assistance fra MATCH-programmets udvikler civ.ing., Ph.D. Carsten Rode.

2. BESKRIVELSE AF MATCH

2.1 Simuleringsmodel

Hvælvingstværsnittet er i MATCH-programmet opbygget som en endimensional model af $2\frac{1}{2}$ stens tykkelse. Hvælvingen består af skiftende lag af teglsten og mørtel, som ind mod kirkerummet er beklædt med et bemalet pudslag. Hvælvingstværsnittets opbygning er yderligere beskrevet i kapitel 4.1. Ved de udførte MATCH-simuleringer er mørtel og puds betragtet som samme materiale, idet Murværkscentret, DTI ved undersøgelse /3/ af materialerne fra kirken har fundet, at både puds og mørtel kan karakteriseres som kalkmørtel.

2.2 MATCH-parametre

Ved MATCH-simuleringer er det nødvendigt at kende damptransport- og sorptionsparametre, væsketransport- og suctionparametre samt termiske parametre for de indgående materialer.

Damptransportkoefficienter for materialerne er bestemt af LBM med kopmetoden /4/, /5/, /6/ og /7/, og sorptionsparametrene er fittet v.h.a. SORPF-programmet /8/ ud fra materialernes sorptionsisotermier bestemt af Byggeteknisk Institut, DTI /9/ og LBM. Materialernes sorptionsisotermier er vedlagt i Appendix B.

For væsketransport- og suctionparametre er vandtørstofforholdet ved kapillarmætning og vacuummætning bestemt ved h.h.v. kapillære opslugningsforsøg og almindelige vacuummætningsforsøg. De resterende væsketransport- og suctionparametre er bestemt af Carsten Rode på grundlag af væskediffusiviteter fra litteraturen /10/ og målte porestørrelsesfordelinger rapporteret i et tidligere eksamensprojekt /11/. M.h.t. bestemmelse af disse parametre henvises til Carsten Rodes Ph.D.-afhandling /12/.

De termiske parametre er på nær materialernes tørdensitet hentet fra MATCH's materialebibliotek. Materialernes tørdensitet er bestemt på LBM i forbindelse med vacuummætningsforsøgene.

I Appendix A er vedlagt en udskrift af de bestemte materialedata for teglsten og kalkmørtel.

3. LABORATORIEUNDERSØGELSER

Der er foretaget laboratorieundersøgelser af tegl-, puds- og mørtelprøver udtaget fra Christiansborg Slotskirke af Svend Jakobsen, Eduard Troelsgård, Rådgivende Ingeniører A/S. Der er udført kopforsøg med teglsten og puds, sorptionsforsøg med puds samt opslugnings- og vacuummætningsforsøg med teglsten og mørtel.

3.1 Kopforsøg

Der er udført kopforsøg med teglsten og puds.

Forsøgsbeskrivelse :

De modtagne teglsten og pudsstykker er tilpasset forsøgsudstyrets kopper, d.v.s. der er udformet cirkulære prøveemner med en diameter på 10 cm og en maksimal tykkelse på 3 cm.

Prøveemner af teglsten er udboret med betonbor fra tilskårede teglsten. Teglstenene er tilskåret for at kunne opfylde forsøgsudstyrets krav til den maksimale prøveemnetykkelse. Teglprøverne er forseget med paraffin på de lodrette sider og med fugemasse mod pakningsringene i kopperne. Den anvendte fugemasse til forsegling er Marine Sealant fugemasse fra 3M A/S i Glostrup. I Appendix C side 2 er tegnet en skitse af en teglprøve monteret i en kop.

Pudsprøverne er efter udsavning indstøbt i afskårede plexiglasrør under anvendelse af fugemasse som bindemiddel/lim. Forinden er pudsprøvernes lodrette sider forseget med fugemasse. Til dette er der benyttet en Silikon Sanitet 2650 fugemasse fra Bostik Oy i Holland. I Appendix C side 7 er tegnet en skitse af en pudsprøve monteret i en kop.

Det bør bemærkes, at den bemalede overflade af pudsprøverne vendte mod koppen under forsøgene.

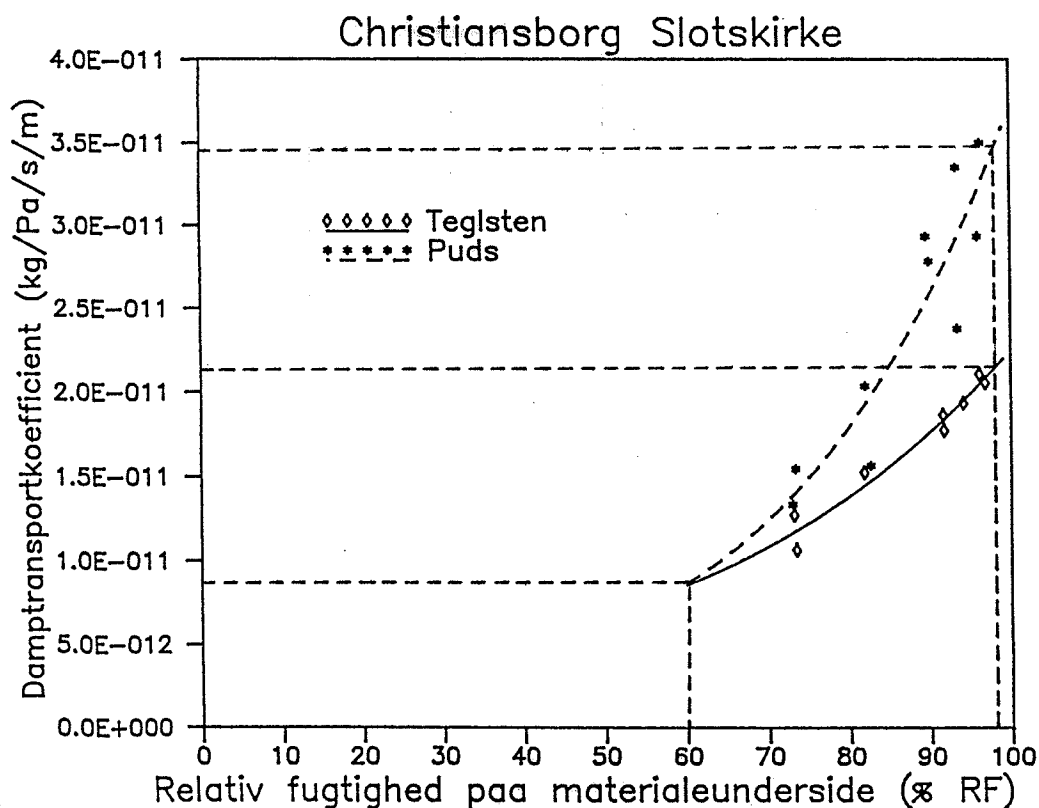
Kopmålingerne er udført som vådkopforsøg med 50 % RF og 23°C i målekammeret og h.h.v. 75, 84, 94, 97 og 100 % RF i koppen. Der er udført dobbelt bestemmelse ved hver RF-værdi. M.h.t. yderligere beskrivelse af kopmetoden henvises til /4/, /5/, /6/ og /7/.

Måleresultater fra kopforsøg :

Måleresultaterne fra kopforsøgene er behandlet v.h.a. LBM's kopanalyseprogram /13/ og /14/ og en svensk beregningsmetode /15/ og /16/. Damptransportkoefficienter bestemmes ved den svenske beregningsmetode som funktion af vanddamptrykket på undersiden af materialet, jvf. figur 3.1. De optegnede kurver i figur 3.1 er en illustration af, at sammenhængen mellem damptransportkoefficienten og vanddamptrykket for materialerne teglsten og puds følger en exponentialfunktion. I Appendix C forefindes måleresultaterne for kopfor-

søgene i form af 2 koprapporter. De måleresultater, som anvendes til beregning af materialernes damptransportkoefficienter, er v.h.a. kopanalyseprogrammet korrigeret for luftlagstykkelse og masked-edge-effekt. Masked-edge-effekt er den ekstra difusion, der sker i det udkragede volumen, jvf. Appendix C side 2 og 7.

Ved simulering med MATCH-programmet tilnærmes damptransportkoefficienternes variation med vanddamptrykket som vist i figur 3.1. Der anvendes koefficienter bestemt ved et vanddamptryk på h.h.v. 60 % RF og 98 % RF. De bestemte damptransportkoefficienter ved de nævnte RF-værdier er angivet i tabel 3.1.



Figur 3.1. Damptransportkoefficient som funktion af vanddamptryk på materialeunderside.

Materiale	Damptransportkoefficient ved 60 % RF; deltadry [kg/Pa·m·s]	Damptransportkoefficient ved 98 % RF; deltawet [kg/Pa·m·s]
Teglsten	0.85·10 ⁻¹¹	2.14·10 ⁻¹¹
Puds	0.86·10 ⁻¹¹	3.47·10 ⁻¹¹

Tabel 3.1. Damptransportkoefficienter for teglsten og puds bestemt ved kopmetoden.

3.2 Sorptionsforsøg

Der er bestemt 2 punkter på sorptionsisotermerne for puds for at kontrollere, at sorptionsisotermerne for puds ikke afviger specielt fra sorptionsisotermerne for mørtel uden saltindhold, som Byggeteknisk Institut, DTI /9/ har bestemt, jvf. Appendix B.

Forsøgsbeskrivelse :

Der er benyttet laboratorietørt materiale i størrelsesordenen 1-2 mm. Prøverne blev placeret i 2 ekssikkatorer med h.h.v. 84 % og 94 % RF. Ekssikkatorerne har under forsøget stået ved en rumtemperatur på 23°C. Prøverne er vejjet efter 5 og 10 døgn. Forsøget er af tidsmæssige årsager afsluttet efter 10 døgn, selv om pudsprøverne endnu ikke er helt i ligevægt med omgivelserne.

Efter forsøget er prøverne tørret i 1 døgn ved 105±5°C.

Måleresultater fra sorptionsforsøg :

Måleresultaterne fra forsøget er sammen med sorptionsisotermer bestemt af Byggeteknisk Institut, DTI /9/ optegnet i Appendix B.

Sammenligning med resultater fra Byggeteknisk Institut, DTI :

Byggeteknisk Institut, DTI /9/ har bestemt sorptionsisotermer for 4 teglstensprøver (7E, 6B, 4A og 3A). Prøve 3A indeholdt salt, mens 7E, 6B og 4A ikke antages saltholdige. Ved simulering med MATCH-programmet er der anvendt en middelkurve af sorptionsisotermerne for prøverne 7E, 6B og 4A som sorptionsisoterm for teglsten uden salt, mens sorptionsisotermerne for prøve 3A er anvendt som sorptionsisoterm for teglsten med salt.

Byggeteknisk Institut, DTI /9/ har bestemt sorptionsisotermer for 2 mørtelprøver (6C og 10A). Belliggenheden af disse kurver er meget forskellige, jvf. Appendix B. Det antages, at den højt liggende kurve (10A) er udtryk for, at mørtelprøven har indeholdt mere salt end normalt i mørtel. Ved MATCH-simuleringerne er den ved LBM fundne sorptionsisoterm for puds anvendt som sorptionsisoterm for mørtel uden salt, mens sorptionsisotermerne for prøve 10A er anvendt som sorptionsisoterm for mørtel med salt.

Fitning af sorptionsparametre :

Ved simulering benytter MATCH-programmet et analytisk udtryk for sorptionsisotermernes kurveforløb. Det analytiske udtryk er angivet i Appendix B. I det analytiske udtryk indgår 3 konstanter u_h , A og n, hvilke er sorptionsparametrene. Hvorledes disse konstanter skal opstilles i MATCH's materialebibliotek er angivet i Appendix B. Sorptionsparametrene fittes v.h.a. SORPF-programmet /8/ udfra de fundne kurveforløb for materialernes sorptionsisotermer.

I tabel 3.2 er de fittede sorptionsparametre for teglsten og mørtel, med og uden saltindhold angivet.

Materiale	Sorptions-konstant; u_h [vægt-%]	Sorptions-konstant; n [-]	Sorptions-konstant; A [-]
Teglsten uden salt	3.058	1.6584	0.0331
Teglsten med salt	39.732	1.0445	0.0857
Mørtel uden salt	3.290	1.0695	0.0857
Mørtel med salt	4.384	0.8632	0.2243

Tabel 3.2. Sorptionsparametre for teglsten og mørtel fittet v.h.a. SORPF-programmet.

3.3 Opsugnings- og vacuummætningsforsøg

Der er udført opsuignings- og vacuummætningsforsøg på teglsten og mørtel.

Forsøgsbeskrivelse :

Opsugningsforsøgene er udført efter LBM-prøvemetode 1 /17/ og vacuummætningsforsøgene efter LBM-prøvemetode 2 /18/. Der er udført dobbelt bestemmelse for både teglsten og mørtel. Til forsøgene er anvendt hele teglsten samt mørtelstykker med et gennemsnitlig opsuigningsareal og en gennemsnitlig tykkelse på h.h.v. 52 cm² og 1.8 cm. Teglstenenes opsuigningsareal og tykkelse var ca. 256 cm² og 4.3 cm. Inden forsøget tørres prøveemnerne ved 50±5° C til vægskonstans.

Ved opsuigningsforsøg anbringes prøveemnerne sugeflade på afstandsholdere i kontakt med vand således, at vandet når ca. 3 mm op på siden af prøveemnet. Vandbadet afdækkes for at forhindre fordampning. Forsøget starter, når der er kontakt mellem sugeflade og vand. Med passende tidsintervaller (1, 2, 4, 8, 16 og 32 min. og 1, 2, 4, 8, 16, 24, 48 og 96 timer) regnet fra starttidspunktet vejes prøveemnerne.

Vacuummætningsforsøgene er udført på de samme prøveemner som anvendt ved opsuigningsforsøgene. Ved vacuummætningsforsøg anbringes prøveemnerne i ekssikkator og evakueres tørt i 4 timer. Derefter ledes demineraliseret vand ind i ekssikkatoren, så prøveemnerne er dækket af vand, og der evakueres til vands damptryk. Prøveemnerne henstår uden pumpning ved dette tryk i nogle timer efter udsivning af luftbobler er ophørt. Herefter ledes luft ind, og prøveemnerne henstår i vandet natten over ved atmosfæretryk. Dagen efter vejes de vandmættede prøveemner over og under vand. Efter forsøget tørres prøveemnerne ved 105±5° C til vægskonstans.

Måleresultater fra opsuignings- og vacuummætningsforsøg :

Måleresultaterne fra opsuigningsforsøgene er behandlet v.h.a. et regnearksprogram. Af resultater fra opsuigningsforsøgene er det kun materialernes vandtørstofforhold ved kapillarmætning u_{cap} , som bruges ved MATCH-simuleringerne. Disse resultater er angivet i tabel 3.3. Andre resultater såsom opsuigningskurver og kapillaritetstal er derfor ikke medtaget i denne rapport, men forefindes i sagsmappe "Christiansborg Slotskirke" på LBM.

M.h.t. måleresultaterne fra vacuummætningsforsøgene er det kun vandtørstofforholdet ved vacuummætning u_{vac} og tørdensiteten ρ_0 , der bruges ved simuleringer med MATCH-programmet. I forbindelse med vacuummætningsforsøgene er materialernes totalporøsitet p_{tot} og faststoffdensitet ρ_f desuden bestemt. Resultaterne er angivet i tabel 3.3.

Materiale	Vandtørstof- forhold ved kapillarmæt- ning; u_{cap} [kg/kg]	Vandtørstof- forhold ved vacuummæt- ning; u_{vac} [kg/kg]	Totalporø- sit; p_{tot} [m ³ /m ³]	Tørdensitet; ρ_0 [kg/m ³]	Faststof- densitet; ρ_f [kg/m ³]
Teglsten	0.200	0.230	0.39	1670	2740
Mørtel	0.145	0.200	0.34	1730	2620

Tabel 3.3. *Vandtørstofforhold, porøsitet og densitet for teglsten og mørtel.*

4. MATCH-SIMULERINGER

Ved simulering med MATCH-programmet er det muligt at undersøge forskellige parametres indflydelse på et udtørningsforløb i en konstruktion med et bestemt startfugtindhold.

I denne undersøgelse, som omfatter 7 (nr. 1 - 7) simuleringer, undersøges hvorledes forskellige hvælvingsopbygninger, vejrforhold og saltindhold i de indgående materialer påvirker udtørningsforløbet i en hvælving i Christiansborg Slotskirke. Der er foretaget simuleringer med 3 forskellige hvælvingstværsnit A, B og C, 3 forskellige vejrtilfælde 1, 2 og 3, med og uden vindpåvirkning samt med og uden saltindhold i materialerne. Simuleringerne er angivet i tabel 4.1.

Simulering nr.	Tværsnitstype - Note 1	Vejrtilfælde - Note 2	Vindpåvirkning - Note 2	Saltindhold - Note 3
1 - Note 4	A	2	-	-
2	B	2	-	-
3	C	2	-	-
4	A	1	-	-
5	A	3	-	-
6	A	2	+	-
7	A	2	-	+

Note 1 : Tværsnitstyperne A, B og C er defineret i figur 4.1 i kapitel 4.1.

Note 2 : Vejrtilfældene 1, 2 og 3 og vindpåvirkning er behandlet i kapitel 4.2. I tabel 4.2 er vejrtilfældene skematisk opstillet.

Note 3 : Saltindhold i konstruktionsmaterialerne er behandlet i kapitel 4.3.

Note 4 : Standardtilfælde.

Tabel 4.1. *Oversigt over udførte simuleringer.*

Et hvælvingstværsnit er karakteriseret ved en veldefineret rækkefølge af materialelag, et vejrtilfælde ved temperatur og relativ luftfugtighed på over- og underside af hvælving, vindpåvirkning ved overgangsmodstande og saltindhold ved materialernes sorptionsisoterm. Disse forskellige parametre uddybes yderligere i de efterfølgende kapitler.

Ved analyse af en parameter fastholdes de resterende parametre til standardværdier, således at det er muligt at sammenligne de enkelte simuleringer. Følgende er valgt som standardtilfælde : hvælvingstværsnit A, vejrtilfælde 2, ingen vindpåvirkning og intet saltindhold.

Der er simuleret en tidsperiode på 4 år med starttidspunkt d. 15 januar 1993 og sluttidspunkt d. 14 januar 1997.

Startfugtindholdet er ud fra /1/ fastsat til 20 vægt-% for alle materialeglag i hvælvingen ved alle udførte MATCH-simuleringer.

Som allerede nævnt i kapitel 2.2 er der i Appendix A vedlagt en udskrift af de anvendte materialedata for teglsten og kalkmørtel. Ved simulering med materialer uden saltindhold benyttes materialedata for KIRKTEGL og KIRKMØRT (KIRKMRT), mens materialedata for TEGLSALT og MØRTSALT (MRTSALT) benyttes ved simulering med saltholdige materialer.

Som resultat fra en MATCH-simulering kan der v.h.a. MATCHGRF-programmet optegnes grafer for temperaturforløb, relativ fugtighed, fugtindhold, fugtstrømme eller varmestrømme i lagene i det opstillede tværsnit. I forbindelse med Christiansborg Slotskirke er det hovedsagelig fugtindholdet som funktion af tiden, der er interessant. Resultaterne fra de udførte simuleringer præsenteres således grafisk i de efterfølgende kapitler. Det bør dog bemærkes, at det p.g.a. begrænsninger i WordPerfect og printer ikke har været muligt at frembringe grafer med tilstrækkelige mange forskellige signaturer. Ens signaturer er derfor adskildt ved nummerering.

4.1 Tværsnitsanalyse

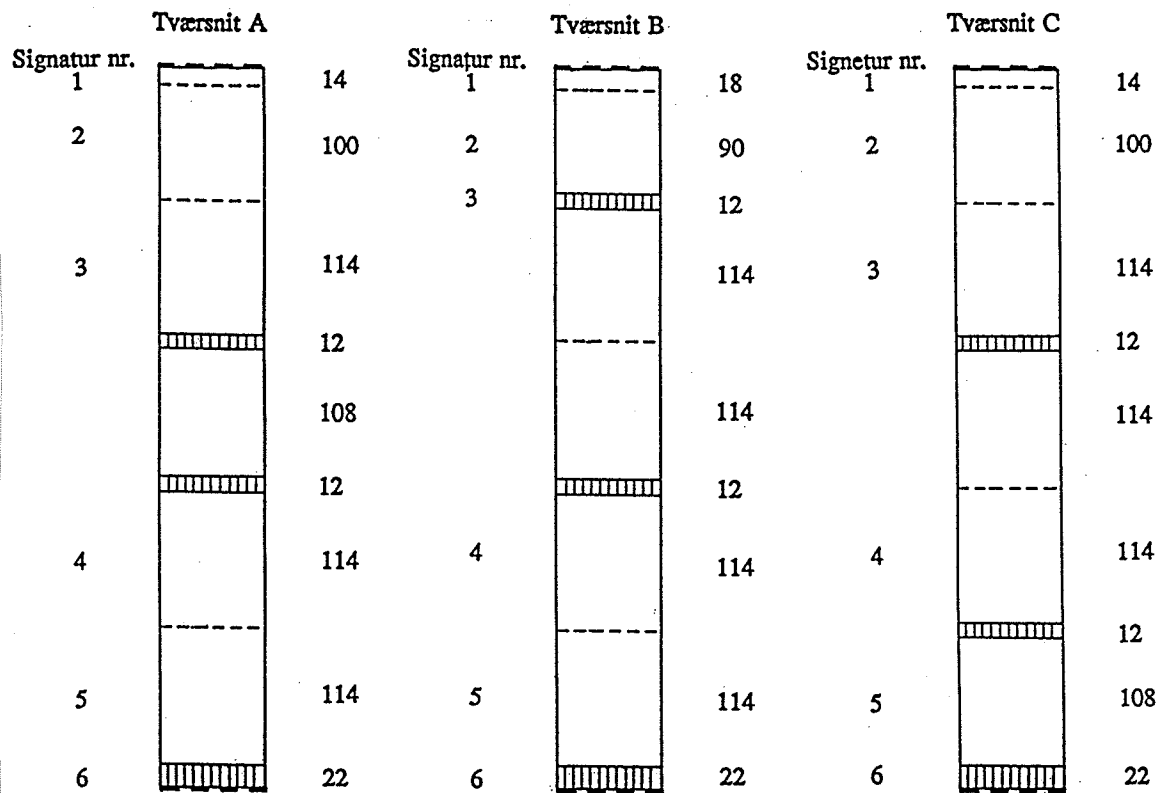
Hvælvings tværsnittet er opbygget som en endimensional model af 2½ stens tykkelse. Tykkelsen af hvælvings tværsnittet er 610 mm. Hvælvingen består af skiftende lag af teglsten og mørtel samt et pudslag ind mod kirkerummet. Som nævnt i kapitel 2.1 betragtes mørtel og puds som samme materiale (kalkmørtel) ved MATCH-simuleringerne.

Der simuleret et udtørningsforløb for 3 forskellige tværsnit. De 3 hvælvings tværsnit A, B og C er optegnet i figur 4.1 (side 11). Forskellen på tværsnittene er placeringen af den halve sten. I figuren er endvidere angivet den valgte laginddeling ved simuleringerne. Ved opdeling af tværsnittet i mange lag opnås en forbedret nøjagtighed i beregning af f.eks. fugtvandringen gennem lagene, men også en længere beregningstid. Det er ønskeligt at opdele nogle af de tykke materialeglag i mindre stykker, men også at beregningstiden er kort. Antallet af lag i hvælvings tværsnittet er derfor begrænset til 9, jvf. figur 4.1.

De hele teglsten er opdelt i 2 lag med en tykkelse på 114 mm, mens mørtellagene ikke er opdelt ekstra. P.g.a. de store gradienter, der må forventes ved randene, ønskes en finere inddeling af materialeglagene ved randene. Derfor er det yderste teglstenslag mod overside af hvælvning opdelt i et ekstra lag, jvf. figur 4.1.

Ved simulering med de 3 forskellige hvælvings tværsnit er anvendt vejrtilfælde 2, ingen vindpåvirkning og intet saltindhold. Vejrtilfælde 2 er konstant 10°C og 40 % RF på overside af hvælvning og konstant 15°C og 60 % RF på underside af hvælvning.

OVERSIDE AF HVÆLVING



UNDERSIDE AF HVÆLVING (KIRKERUM)

Teglsten
 Mørtel

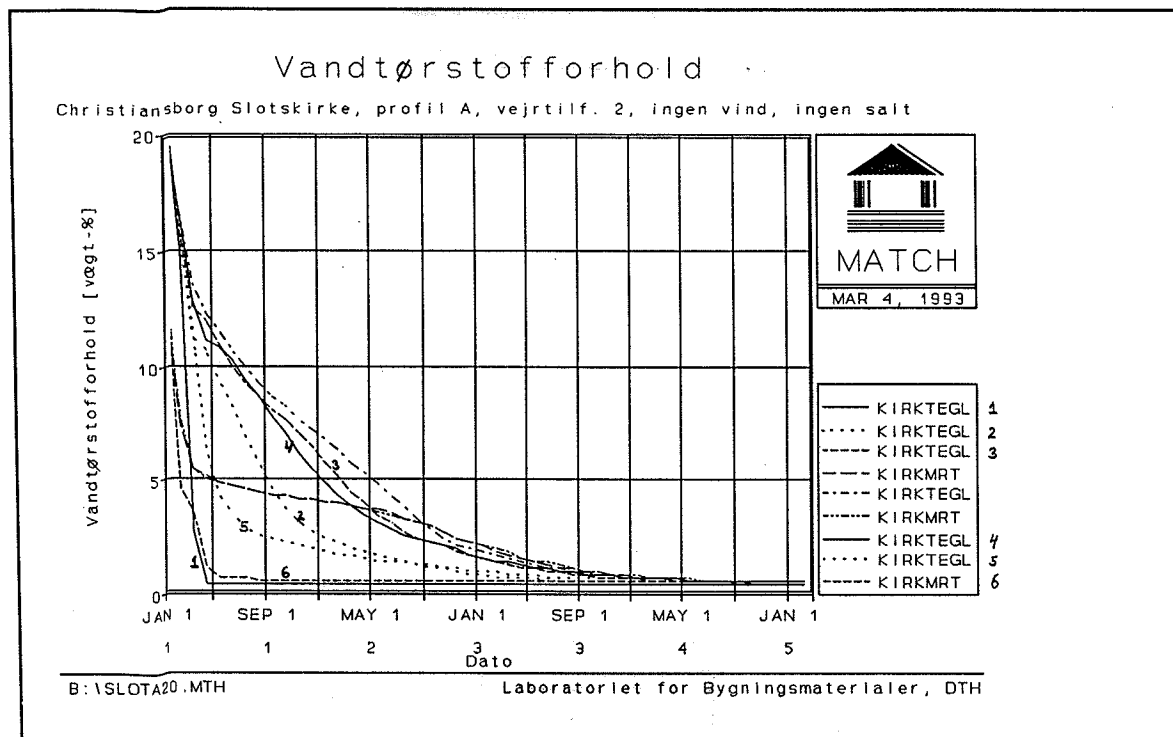
- - - - Overgangsmønstre
 Laggrænse i materialelag

Alle mål angivet i mm

Figur 4.1. Hvælvningstværsnit A, B og C.

Resultater af tværsnitsanalyse :

Resultaterne fra simuleringerne af udtørningsforløbet for de 3 hvælvingstværsnit er angivet i figur 4.2 - 4.4. Alle figurer viser vandtørstofferforholdet i vægt-% som funktion af tiden. Tiden er angivet som datoer med 8 måneder mellem hver datoangivelse.

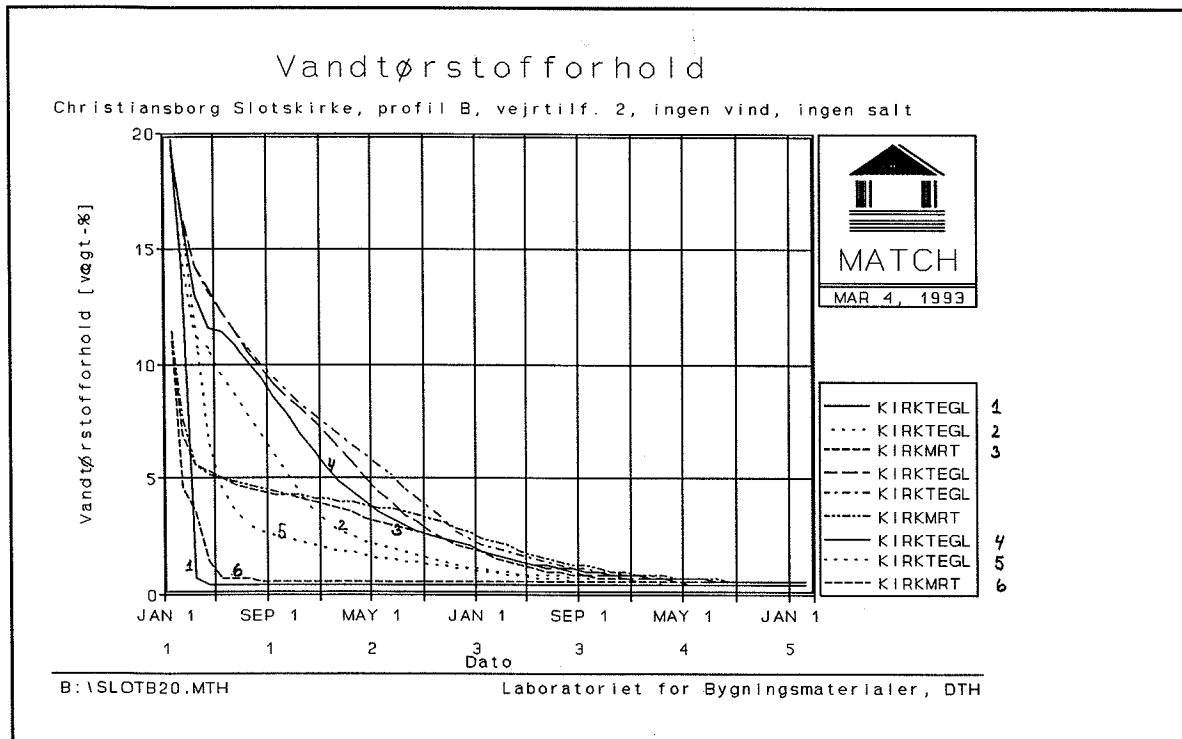


Figur 4.2. Udtørningsforløb for hvælvingstværsnit A. Standardtilfælde.

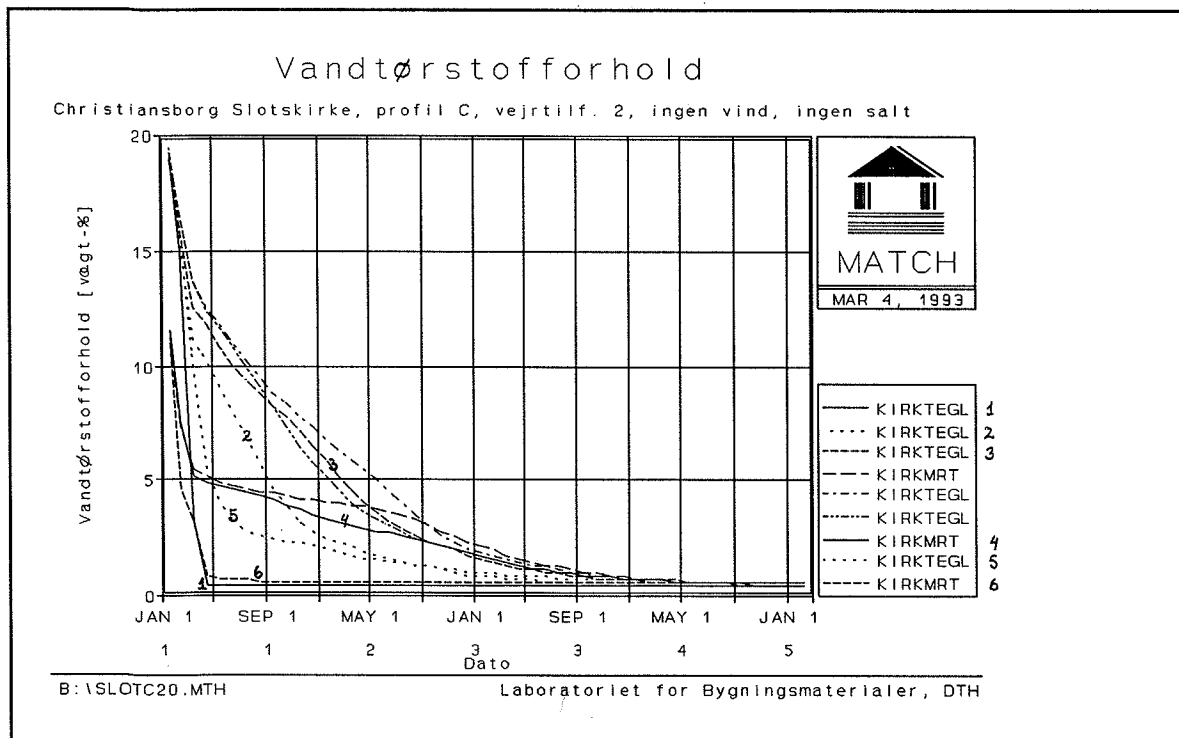
Det ses af figurene (side 12 og 13), at mørtellagene i starten udtørre meget hurtigere end teglstenslagene. Fugtindholdet i mørtellagene er allerede omkring 10 vægt-% efter en halv måneds udtørring. Denne observation er i overensstemmelse med, at det er væsketransport, som er den kritiske transportform ved de udførte simuleringer, og at det er materialernes suctionskurver, der er bestemmende for det indbyrdes forhold mellem ligevægtsfugtindholdene, idet ligevægten indstiller sig efter poretrykket, jvf. væsketransport- og suctionsparametre i Appendix A.

Det bør bemærkes, at kurverne for mørtellagenes fugtindhold ikke begynder ved startfugtindholdet på 20 vægt-%. Dette skyldes, at det er månedsmiddelværdien, som plottes, og at mørtellagenes fugtindhold falder meget i løbet af den første måneds udtørring.

I figur 4.2, som indeholder udtørningsforløbet for det såkaldte standardtilfælde, ligger kurverne for de 2 indvendige mørtellag oven i hinanden, hvilket ikke er tilfældet for de tilsvarende kurver i figur 4.3 og 4.4. Dette skyldes, at mørtellagene ligger tættere i hvælvingstværsnit A end i hvælvingstværsnit B og C.



Figur 4.3. Udtørningsforløb for hvælvingstværsnit B.



Figur 4.4. Udtørningsforløb for hvælvingstværsnit C.

Ved sammenligning af de 3 simuleringer kan det konstateres, at placering af materialegene i hvælvningstværsnittet ikke har betydning for det generelle udtørningsforløb af hvælvingen. Fugtindholdet i alle materialegag er under 1 vægt-% efter 32 måneders udtørring af hvælvningstværsnit A og C, mens det kræver 34 måneders udtørring af hvælvningstværsnit B.

4.2 Vejrforholdsanalyse

Der er foretaget simuleringer med 3 forskellige vejrtilfælde samt en simulering, hvor hvælvingen påvirkes af vind på oversiden. Et vejrtilfælde er karakteriseret ved en konstant temperatur og relativ luftfugtighed på h.h.v. over- og underside af hvælvingen. Temperatur og relativ luftfugtighed for de 3 vejrtilfælde er angivet i tabel 4.2.

Vejrtilfælde	Underside af hvælvning		Overside af hvælvning	
	Temperatur [° C]	Relativ luft- fugtighed [% RF]	Temperatur [° C]	Relativ luft- fugtighed [% RF]
1	10	60	5	60
2	15	60	10	40
3	20	60	20	40

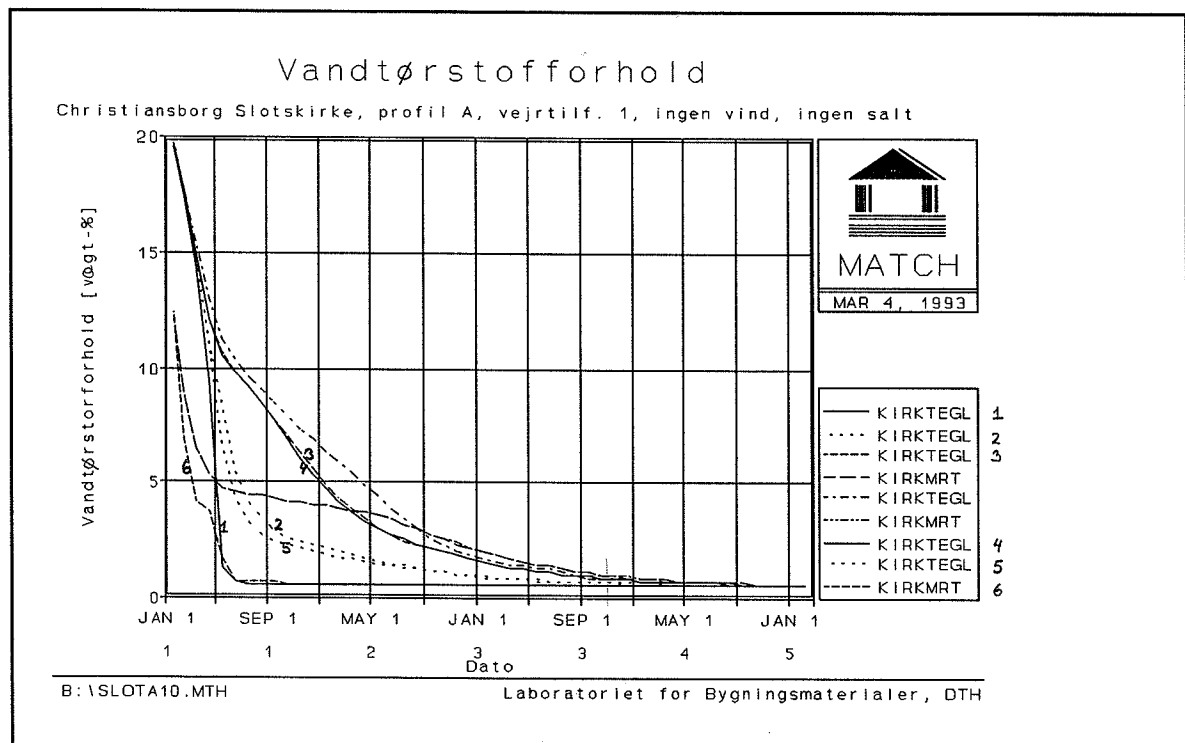
Tabel 4.2. Temperatur og relativ luftfugtighed for vejrtilfælde 1, 2 og 3.

Vindpåvirkning simuleres ved at ændre overgangsmodstandene d.v.s. den termiske modstand R [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] og diffusionsmodstanden Z [$\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{GPa}/\text{kg}$]. Der simuleres kun vindpåvirkning på overside af hvælvingen. Ingen vindpåvirkning (vindhastighed 0 m/s) medfører $R = 0.13 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ og $Z = 0.051 \text{ m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{GPa}/\text{kg}$. Vindpåvirkning af hvælvningstværsnittet simuleres med en vindhastighed på 3 m/s. Dette medfører $R = 0.04 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ og $Z = 0.016 \text{ m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{GPa}/\text{kg}$.

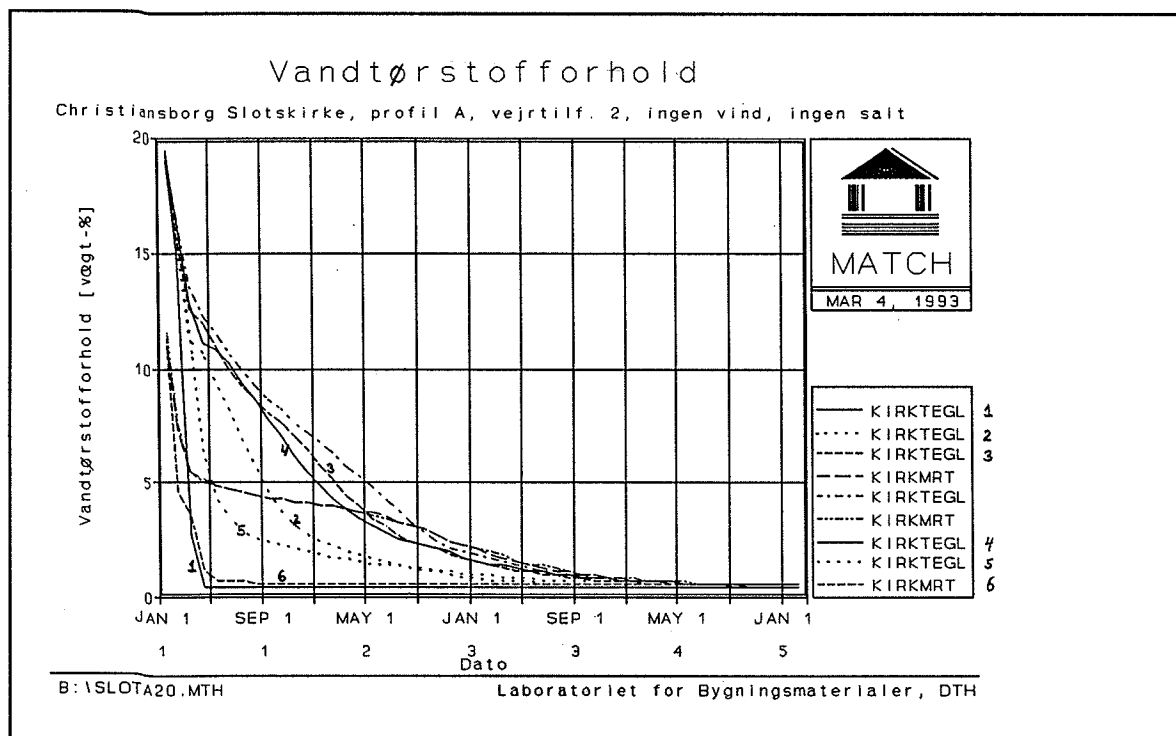
Ved simulering med de forskellige vejrtilfælde er anvendt hvælvningstværsnit A, ingen vindpåvirkning og intet saltindhold, mens simulering af vindpåvirkning er udført med hvælvningstværsnit A, vejrtilfælde 2 og intet saltindhold.

Resultater af vejrforholdsanalyse :

Resultaterne fra simuleringerne af udtørningsforløbet for de 3 vejrtilfælde og vindpåvirkning er angivet i figur 4.5 - 4.8. Alle figurer viser vandtørstofforholdet i vægt-% som funktion af tiden. Tiden er angivet som datoer med 8 måneder mellem hver datoangivelse. Det bør bemærkes, at figur 4.2 og 4.6 er ens. De viser begge resultatet af simulering med standardtilfældet, jvf. kapitel 4.1.



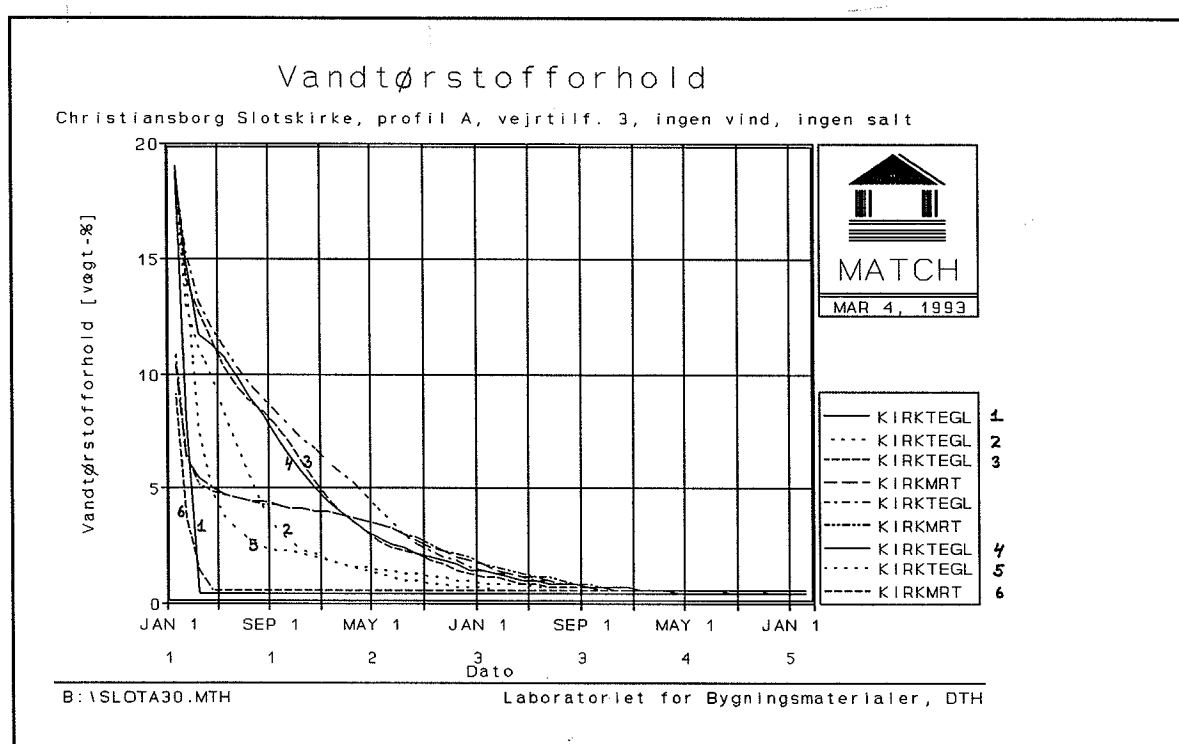
Figur 4.5. Udtørningsforløb for vejrtilfælde 1.



Figur 4.6. Udtørningsforløb for vejrtilfælde 2. Standardtilfælde.

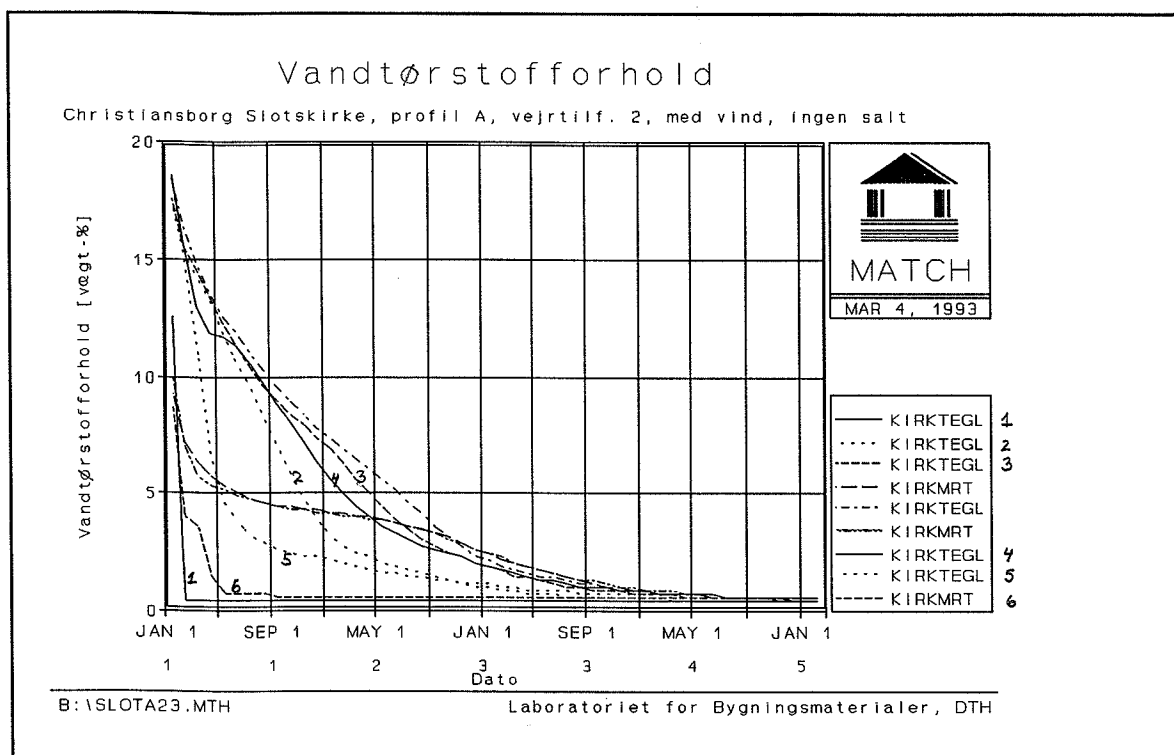
Udseendet af de forskellige kurver i figurer 4.5 - 4.7 (side 15 og 16) er stort set ens. Den eneste forskel er længden af udtørringstiden. Det kræver 34 måneders udtørring ved vejrtilfælde 1 før alle materialelag i hvælvingstværsnittet har et fugtindhold på mindre end 1 vægt-%. Tilsvarende skal der forløbe h.h.v. 32 og 30 måneder før hele konstruktionen ved vejrtilfælde 2 og 3 er under 1 vægt-% i vandindhold.

Det må konstateres, at ændring af vejrsituationen fra vejrtilfælde 1 til vejrtilfælde 3 ikke har den store betydning. Denne iagttagelse er i overensstemmelse med, at væsketransport er den kritiske transportform ved de udførte simuleringer, idet væsketransport ikke er så temperaturfølsom som damptransport. Væsketransporten er den kritiske transportform, fordi damptransporten specielt fordamningen fra vandfronten nær overfladen det meste af tiden kan forløbe mindst lige så hurtigt, som væsketransporten kan bringe fugt frem til vandfronten.



Figur 4.7. Udtørningsforløb for vejrtilfælde 3.

Sammenlignes figur 4.6 (side 15) og 4.8 (side 17) kan effekten af en vindpåvirkning på overside af hvælvingen vurderes. Vindpåvirkningen medfører, at det yderste teglstenslag tørrer meget hurtigt. Ellers kan der ikke konstateres de store forskelle mellem de 2 udtørningsforløb. Alle materialelag i vindpåvirkningstilfældet indeholder under 1 vægt-% vand efter 34 måneders udtørring.



Figur 4.8. Udtørningsforløb for vindpåvirkning.

4.3 Simulering med saltindhold i materialerne

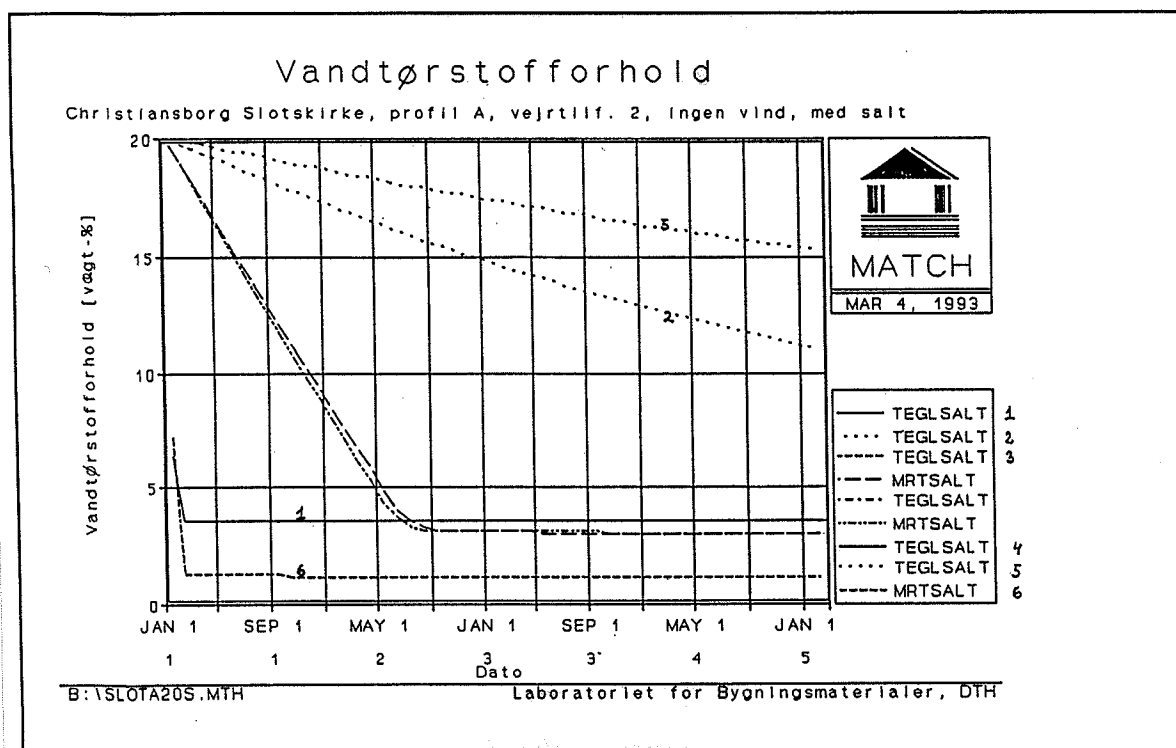
Der er foretaget en simulering, hvor konstruktionens materialer indeholder salt, jvf. Appendix A.

Saltindholdet i materialerne medfører ændrede parameterværdier for materialerne - for både damptransport-, sorptions- og suctionparametre. Da teglstenslagene fugtmæssigt allerede befinder sig i det hygroskopiske område ved et fugtindhold på 20 vægt-%, jvf. sorptionsisotermen for teglsten med salt i Appendix B, foregår der under tørring af hvælvingen ingen væsketransport i teglstenslagene. Da mørtellagene endvidere er ubetydelige i forhold til teglstenslagene, medtages væsketransport ikke ved denne MATCH-simulering. Det er derfor ikke nødvendigt at ændre materialernes suctionparametre, idet de ikke anvendes ved simuleringsberegningerne.

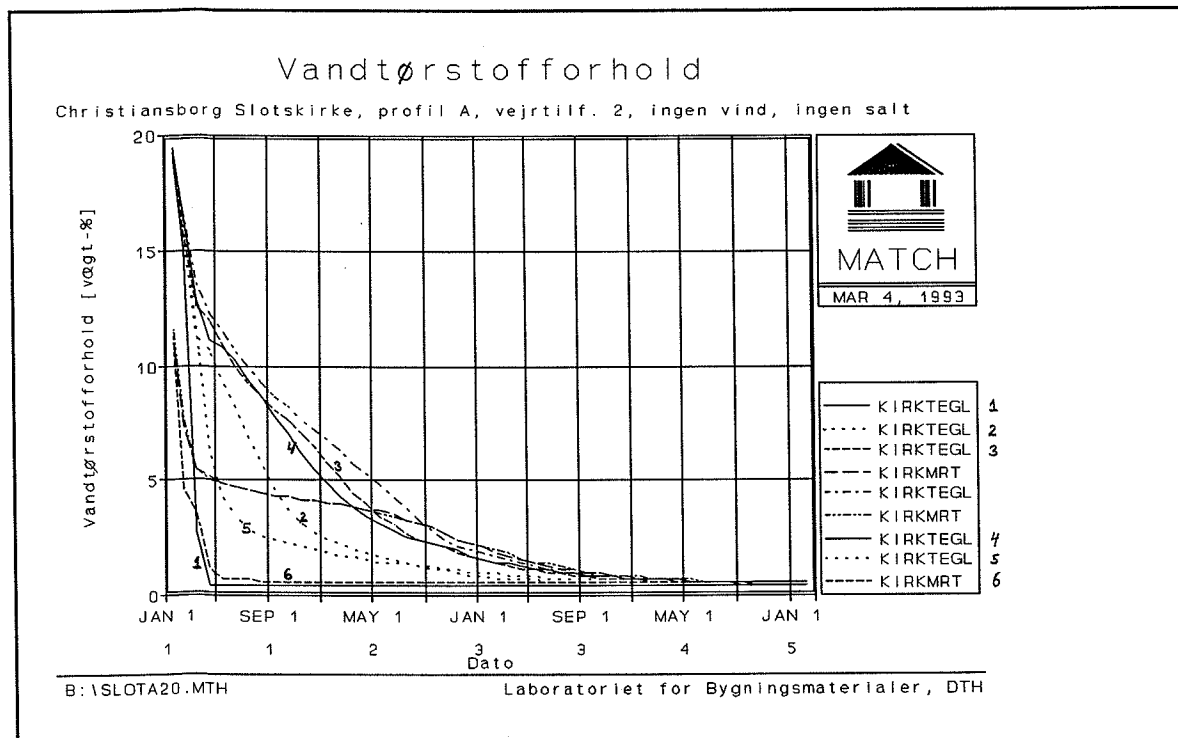
Ved simuleringen er anvendt hvælvingstværsnit A, vejrtilfælde 2, ingen vindpåvirkning og damptransportparametre for materialer uden saltindhold.

Resultater af simulering med saltindhold i materialerne :

Resultaterne af simuleringen af udtørningsforløbet for salttilfældet er angivet i figur 4.9, mens resultatet for standardtilfældet er angivet i figur 4.10. Begge figurer viser vandtørstofforholdet i vægt-% som funktion af tiden. Tiden er angivet som datoer med 8 måneder mellem hver datoangivelse. Figur 4.10 er identisk med figur 4.2 og 4.6.



Figur 4.9. Udtørningsforløb for saltholdige materialer.



Figur 4.10. Udtørningsforløb for ikke saltholdige materialer. Standardtilfælde.

Der kan kun ses 6 kurver i figur 4.9 (side 18). Det skyldes, at fugtindholdet i de resterende materialelag ikke ændres i løbet af simuleringsperioden. Disse lag indeholder stadig 20 vægt-% vand efter 4 års udtørring af konstruktionen.

Sammenlignes figur 4.9 og 4.10 (side 18) kan det konstateres, at udtørring af den saltholdige hvælving foregår meget langsommere end ved udtørring af den ikke saltholdige hvælving. Faktisk vil vandindholdet aldrig komme under 1 vægt-% i den saltholdige teglsten. Dette kan ses af materialets sorptionsisoterm i Appendix B.

Da den relative luftfugtighed på overside af hvælving aldrig kommer under 40 % RF, vil vandindholdet i teglstenslagene ved denne overflade aldrig komme under 4 vægt-%. Tilsvarende gælder for mørtellaget mod underside af hvælvingen, hvor den relative luftfugtighed konstant er 60 % RF. Af sorptionsisotermen for mørtel med salt (Appendix B) ses, at dette medfører et vandindhold på ca. 1 vægt-%. Disse fænomener kan også observeres i figur 4.9, hvor kurve nr 1 og 6 efter et stykke tid netop ligger på h.h.v. 4 og 1 vægt-% vandindhold.

Det er altså ikke muligt at udtørre hvælvingen, hvis den indeholder salt, med mindre saltindholdet trækkes ud af konstruktionen først. M.h.t. udtrækning af salte fra kirker henvises til Carsten Bredahl Nielsens Ph.D.-afhandling /19/ udført i 1991 på LBM, DTH.

5. SAMMENFATNING

I denne undersøgelse, som omfatter 7 simuleringer, er det undersøgt, hvorledes forskellige hvælvingsofbygninger, vejrforhold og saltindhold i de indgående materialer påvirker udtørningsforløbet i en hvælving i Christiansborg Slotskirke. Der er foretaget simuleringer med 3 forskellige hvælvingstværsnit A, B og C, 3 forskellige vejrtilfælde 1, 2 og 3, med og uden vindpåvirkning samt med og uden saltindhold i materialerne.

Der er simuleret en tidsperiode på 4 år med starttidspunkt d. 15 januar 1993 og sluttidspunkt d. 14 januar 1997. Startfugtindholdet har været 20 vægt-% for alle materialelag i hvælvingen ved alle udførte MATCH-simuleringer.

Simuleringerne viser, at udtørringstiden er lang. Ved sammenligning af de 3 simuleringer med forskellig placering af materialelagene kan det konstateres, at placering af materialelagene i hvælvingstværsnittet ikke har betydning for det generelle udtørningsforløb af konstruktionen. Fugtindholdet i alle materialelag er under 1 vægt-% efter 34 måneders tørring af hvælvingstværsnit B og 32 måneders tørring af hvælvingstværsnit A og C.

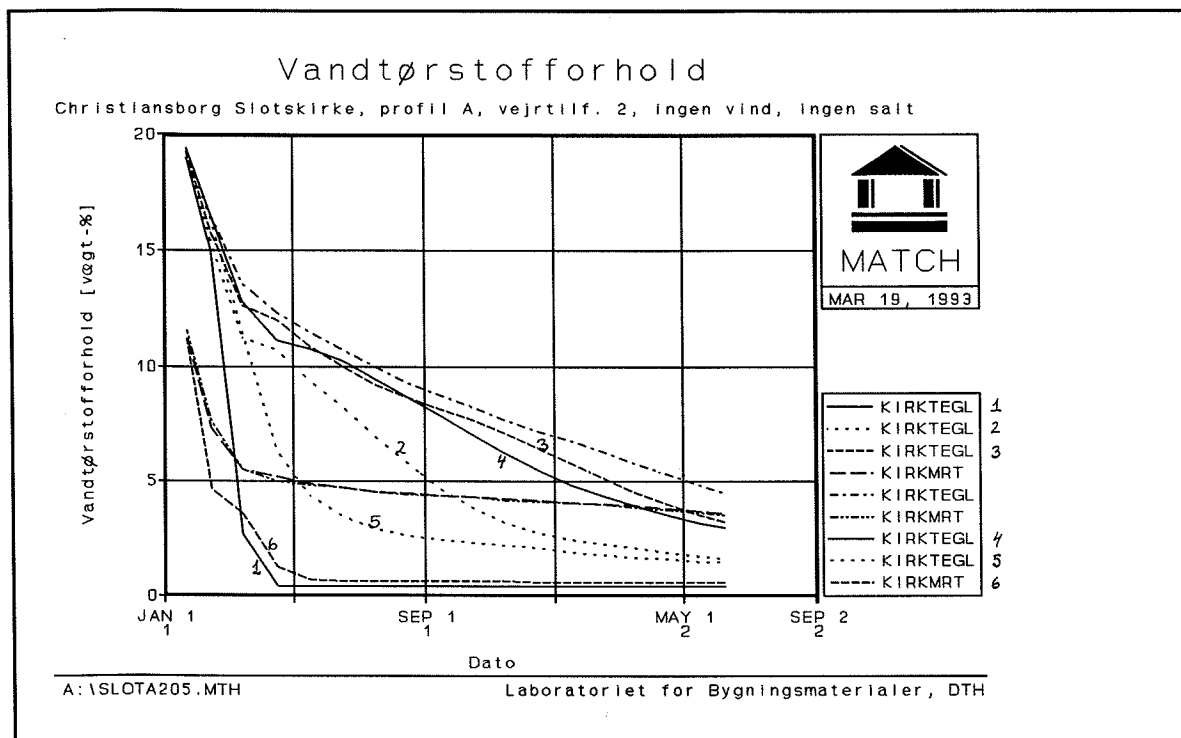
Vejrforholdsanalyserne har vist, at det kræver mindst 34 måneders tørring ved vejrtilfælde 1 før alle materialelag i hvælvingen har et fugtindhold mindre end 1 vægt-%. Tilsvarende skal der ved vejrtilfælde 2 og 3 forløbe h.h.v. 32 og 30 måneder før hele konstruktionen er under 1 vægt-% vandindhold.

Det må således konstateres, at ændring af vejr situationen fra vejrtilfælde 2 (standardtilfælde) til vejrtilfælde 1 og 3 ikke har den store betydning. Denne iagttagelse er i overensstemmelse med, at væsketransport er den kritiske transportform ved de udførte simuleringer, idet væsketransport ikke er så temperaturfølsom som damptransport.

Effekten af vindpåvirkning på overside af hvælving er ikke stor. Resultatet af simuleringen er, at alle materialelag i hvælvingen først har et fugtindhold mindre end 1 vægt-% efter 34 måneders udtørring.

Sammenlignes den saltholdige konstruktion med den ikke saltholdige konstruktion ses, at udtørring af den saltholdige konstruktion foregår meget langsommere end udtørring af den ikke saltholdige konstruktion. Faktisk vil vandindholdet aldrig komme under 1 vægt-% i den saltholdige teglsten.

Efter udførelsen af MATCH-simuleringerne synes et mere realistisk slutfugtindhold at være 4-5 vægt-% i de inderste lag. Af figur 5.1 (side 21) ses, at fugtindholdet i det inderste teglstenslag er udtørret til 5 vægt-% vandindhold og de 2 indvendige mørtellag til 4 vægt-% vandindhold efter 16 måneders udtørring. Figur 5.1 viser vandtørstofforholdet i vægt-% som funktion af tiden. Tiden er angivet som datoer med 8 måneder mellem hver datoangivelse. Det bør bemærkes, figur 5.1 er et udsnit af figur 4.2, 4.6 og 4.10, der alle er resultatet af simulering for standardtilfældet.



Figur 5.1. Udtørningsforløb over 1½ år for standardtilfældet.

6. REFERENCELISTE

- /1/ Collet, P.F., "Christiansborg Slotskirke. Målinger med Troxler-systemet". Sag nr. 2.6170, Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknisk Institut, 1992.
- /2/ Rode Pedersen, C., "MATCH MANUAL, ver. 1.4". Bygge- og Miljøteknik A/S, Birkerød, 1992.
- /3/ Østergaard, J. og Hansen, H., "Undersøgelser af puds, mørtler og mursten fra Christiansborg Slotskirke". Sag nr. 252-2-6126, Dansk Teknologisk Institut, Murværkscentret, Hasselager, 1992.
- /4/ Kielsgaard Hansen, K., "Equipment for and Results of Water Vapour Transmission Tests using Cup Methods". Proceedings of the ICHMT Symposium on Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures, Dubrovnik, Yugoslavia, September 4-8, 1989.
- /5/ West, G.P. og Kielsgaard Hansen, K., "Kopudstyr til måling af fugttransport". Teknisk Rapport 179/88, Danmarks Teknisk Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1988.
- /6/ Kielsgaard Hansen, K. og Lund, H.B., "Cup Method for Determination of Water Vapour Transmission Properties of Building Materials. Sources of Uncertainty in the Method". Proceedings of the 2nd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, Norway, August 20-22, 1990. ISBN 82-519-0941-4, Tapir Publishers 1990.
- /7/ Bredahl Nielsen, C., "Fejlkorrektion ved kopmålinger". Teknisk Rapport 259/92, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1992.
- /8/ Kielsgaard Hansen, K., "Sorptionsisotermer, Program- og brugerdokumentation for programmerne DATAIND, SORPF, DESORPF og UDTEGN fra disketten SORPTION". Teknisk Rapport 163/86, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1986.
- /9/ Collet, P.F., "Christiansborg Slotskirke, sorptionskurver". Sag nr. 2.6170, Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknisk Institut, 1993.
- /10/ Kiebl, K., "Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung". Der Fachbereiches Bauwesen der Universität - Gesamthochschule, Essen, 1983.
- /11/ Kalhauge, C. og Techen, N., "Kalkmørtlers porestruktur og egenskaber". Eksamensprojekt, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1988.

- /12/ Rode Pedersen, C., "Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions". Rapport nr. 214, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Varmeisolering, Lyngby, 1990.
- /13/ West, G.P. og Kielsgaard Hansen, K., "KOPANALYSE. Program til analyse af måleresultater opsamlet i KOP-udstyr". Teknisk Rapport 191/88, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1988.
- /14/ Mullit, P., "KOPANALYSE, version 2. Program til analyse af måleresultater opsamlet i kopudstyr". Teknisk Rapport xxx/92, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1992.
- /15/ Nilsson, L.-O., "Fuktproblem vid betonggolv". Rapport TVBM-3002, Tekniska Högskolan i Lund, Avdelningen för Byggnadsmateriellära, Lund, 1977.
- /16/ Brunnstrøm Jensen, J., "Dampdiffusivitet som funktion af relativ fugtighed. Den svenske metode". Teknisk Rapport 279/93, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1993.
- /17/ Bredahl Nielsen, C., "LBM-prøvemethode 1. Kapillarsugning, 6108/14". Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1989.
- /18/ Nielsen, A., "LBM-prøvemethode 2. Fugtparametre, porøsitet og densitet, silikatmaterialer, 6108/14". Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1992.
- /19/ Bredahl Nielsen, C., "Salts in Porous Building Materials". Teknisk Rapport 243/91, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1991.
- /20/ Kielsgaard Hansen, K., "Sorption Isotherms. A Catalogue". Teknisk Rapport 162/86, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1986.

APPENDIX A

Materialdata i MATCH's materialebibliotek

KIRKTEGL og KIRKMØRT indeholder matrialedata for teglsten og mørtel uden saltindhold, mens TEGLSALT og MØRTSALT indeholder materialdata for teglsten og mørtel med saltindhold.

Benævnelser og enheder i MATCH's materialebibliotek

Mat.navn	1	delx m	Absorpt -	Emiss -			
Termiske parametre							
ro	cp	dtfreez	lambda10	lambdauw	lambdau	tclambda	
kg/m3	J/(kgK)	K	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK ²)	
Damptransport- og sorptionsparametre							
deltadry	deltawet	usdes	usides	us2des	usabs	us1abs	us2abs
kg/msPa	kg/msPa	kg/kg	- (1/n)	- (A)	kg/kg	- (1/n)	- (A)
Væsketransport- og suctionparametre							
akliq	bkliq	ucr	ucap	uvac	plim1	plim2	
kg/msPa	-	kg/kg	kg/kg	kg/kg	ln(Pa)	ln(Pa)	
a-ipt	b-ipt	u0	a-dry	b-dry	lnp0		
kg/kg	1/ln(Pa)	kg/kg	kg/kg	-	ln(Pa)		

*KIRKTEGL 1 0.110 0.73 0.9
 1670.0 800.0 5.0 0.50 4.4 9.4 0.0
 0.85E-11 2.14E-11 0.03058 0.6030 0.0331 0.03058 0.6030 0.0331
 1.99E-15 81.7 0.03 0.200 0.230 11.967 14.5
 0.5085 0.0371 0.01554 -2.9214E8 -9.06676 -0.005083

Teglsten uden salt, 1670 kg/m3, k=0.50 W/mK, δ=0.85E-11 / 2.14E-11 kg/msPa

*KIRKMØRT 1 0.012 0.78 0.9
 1730.0 1000.0 5.0 0.9 1.0 3.0 0.0
 0.86E-11 3.47E-11 0.0329 0.9350 0.0857 0.0329 0.9350 0.0857
 4.12E-14 88.1 0.08 0.146 0.200 8.44 11.24
 0.437 0.0412 0.03574 -61232.3 -6.5254 0.04085

Kalkmørtel uden salt, 1730 kg/m3, k=0.9 W/mK, δ=0.86E-11 / 3.47E-11 kg/msPa

*TEGLSALT 1 0.110 0.73 0.9
 1670.0 800.0 5.0 0.50 4.4 9.4 0.0
 0.85E-11 2.14E-11 0.39732 0.9574 0.0857 0.39732 0.9574 0.0857
 1.99E-15 81.7 0.03 0.200 0.230 11.967 14.5
 0.5085 0.0371 0.01554 -2.9214E8 -9.06676 -0.005083

Teglsten med salt, 1670 kg/m3, k=0.50 W/mK, δ=0.85E-11 / 2.14E-11 kg/msPa

*MØRTSALT 1 0.012 0.78 0.9
 1730.0 1000.0 5.0 0.9 1.0 3.0 0.0
 0.86E-11 3.47E-11 0.04384 1.1585 0.2243 0.04384 1.1585 0.2243
 4.12E-14 88.1 0.08 0.146 0.200 8.44 11.24
 0.437 0.0412 0.03574 -61232.3 -6.5254 0.04085

Kalkmørtel med salt, 1730 kg/m3, k=0.9 W/mK, δ=0.86E-11 / 3.47E-11 kg/msPa

APPENDIX B

Sorptionsisotermer

MATCH-programmet benytter et analytisk udtryk til at beskrive kurveforløbene for materialernes sorptionsisotermer. Den analytiske beskrivelse angives i /8/ og /20/ til følgende :

$$u = u_h \cdot \left(1 - \frac{\ln(\phi)}{A}\right)^{-\frac{1}{n}}$$

Hvor u er vandtørstofforholdet [vægt-%], ϕ er den relative fugtighed [% RF], mens u_h , A og n er konstanter, der beskriver kurveforløbet. Det er disse 3 konstanter, der skal indføres for hver kurve (adsorption og desorption) i MATCH's materialebibliotek. I MATCH's materialebibliotek har disse konstanter følgende udseende :

$usdes = u_h/100$ for desorptionsisotermeren	[kg/kg]
$us1des = 1/n$ for desorptionsisotermeren	[-]
$us2des = A$ for desorptionsisotermeren	[-]
$usabs = u_h/100$ for adsorptionsisotermeren	[kg/kg]
$us1abs = 1/n$ for adsorptionsisotermeren	[-]
$us2abs = A$ for adsorptionsisotermeren	[-]

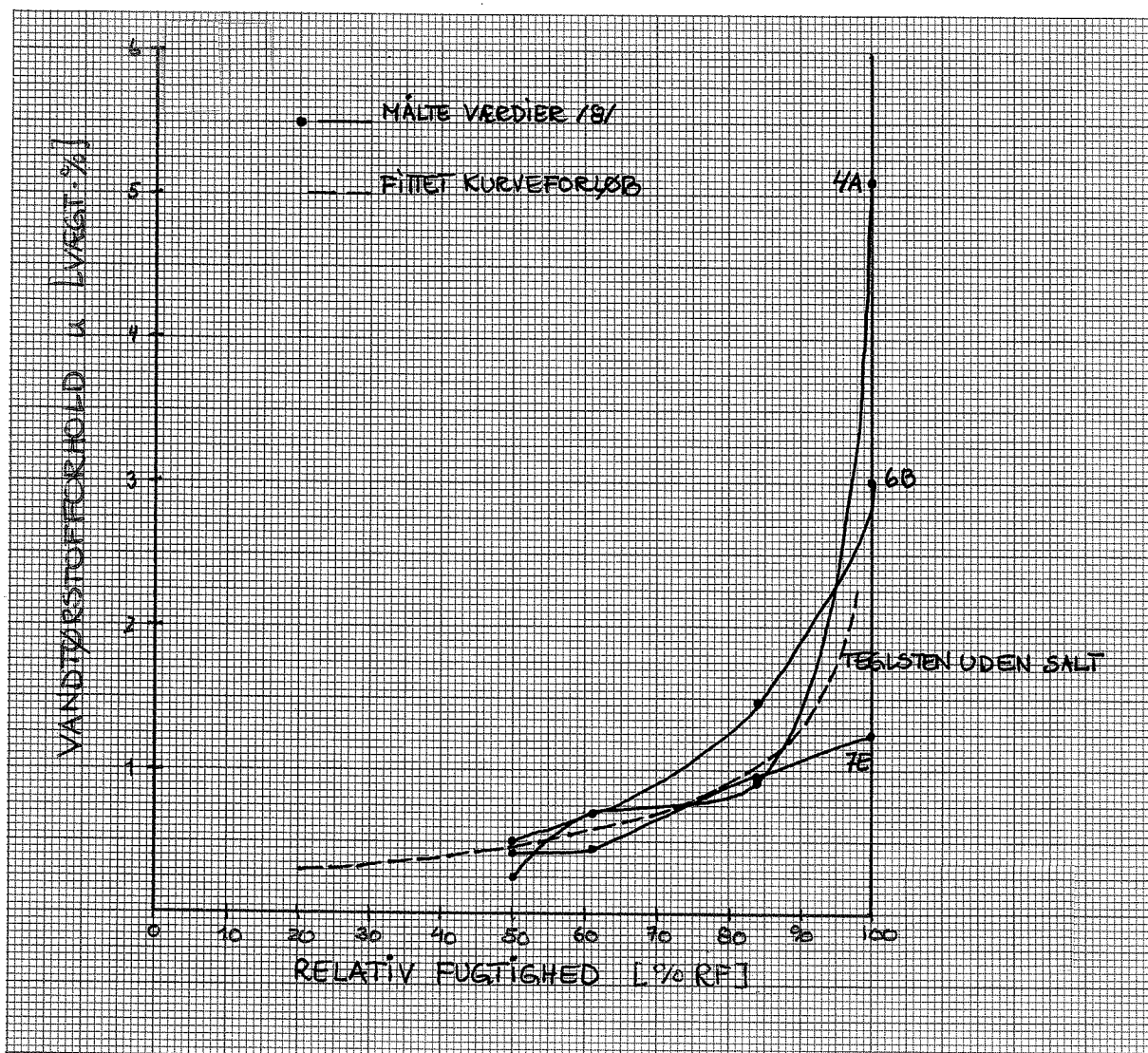
Det er her valgt at beskrive de anvendte materials adsorptions- og desorptionsisotermer med samme parametre.

Materiale	u_h [vægt-%]	n [-]	A [-]	$usdes =$ $usabs$ [kg/kg]	$us1des =$ $us1abs$ [-]	$us2des =$ $us2abs$ [-]
Teglsten uden salt	3.058	1.6584	0.0331	0.03058	0.6030	0.0331
Teglsten med salt	39.732	1.0445	0.0857	0.39732	0.9574	0.0857
Mørtel uden salt	3.290	1.0695	0.0857	0.03290	0.9350	0.0857
Mørtel med salt	4.384	0.8632	0.2243	0.04384	1.1585	0.2243

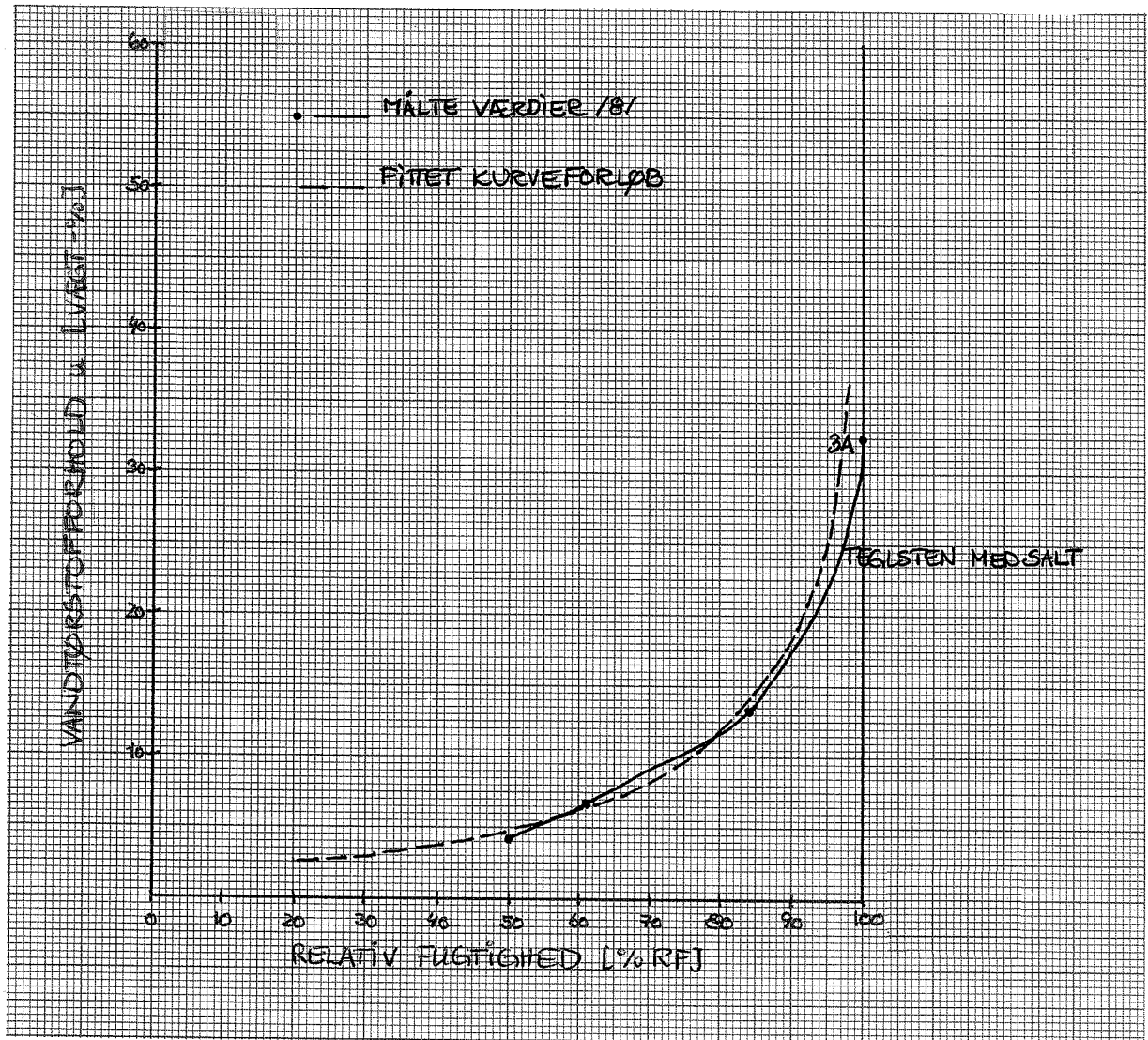
NOTE TIL TABEL : I Appendix A er Teglsten uden salt = KIRKTEGL, Teglsten med salt = TEGLSALT, Mørtel uden salt = KIRKMØRT og Mørtel med salt = MØRTSALT.

Tabel B.1. Anvendte sorptionsparametre ved MATCH-simuleringer

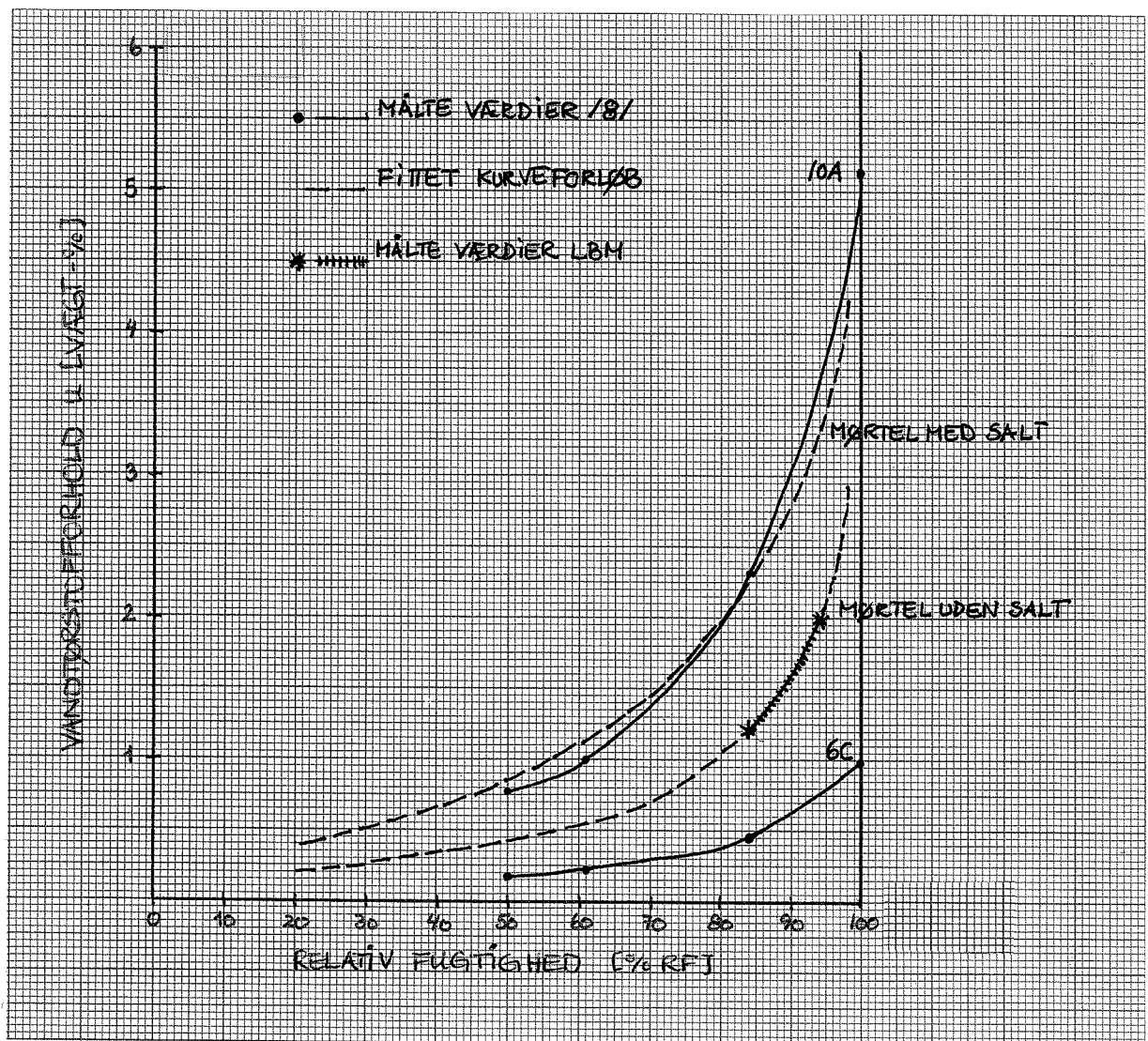
Sorptionsisoterner for teglsten uden salt



Sorptionsisoterm for teglsten med salt



Sorptionsisoterner for mørtel med og uden salt



APPENDIX C

Koprapporter for teglsten og puds

19.FEB.1993

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Rekvirent : Eduard Troelsgård - Rådgivende Ingeniører A/S
Kontaktperson : Svend Jacobsen

Prøveleder : Jette Brunnstrøm

Udført af: SJ/BR

Prøveperiode : December 1992

LBM-serienummer: 60

Prøvekammer : 23.3°C, 51.1 %RH v_luft: 2.1 m/s
Det angivne klima i prøveområdet er middelværdi for hele prøveperioden.

Effektivt prøveareal: $A = 5000 \text{ mm}^2$

Fugtmodstandstal

$$Z_p = A \cdot dp / \alpha \quad (\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg})$$

dp: Damptryksforskel over prøveemne.
 α : Hældningen af vægtændringskurven.

$$Z_c = Z_p \cdot 7.3 \cdot 10^{-6} \quad (\text{s/m})$$

Diffusivitet

$$\delta_p = 1 / Z_p \quad (\text{kg} / \text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m})$$

l: Prøvelegemets tykkelse.

$$D_c = 462 \cdot T \cdot \delta_p \quad (\text{m}^2 / \text{s})$$

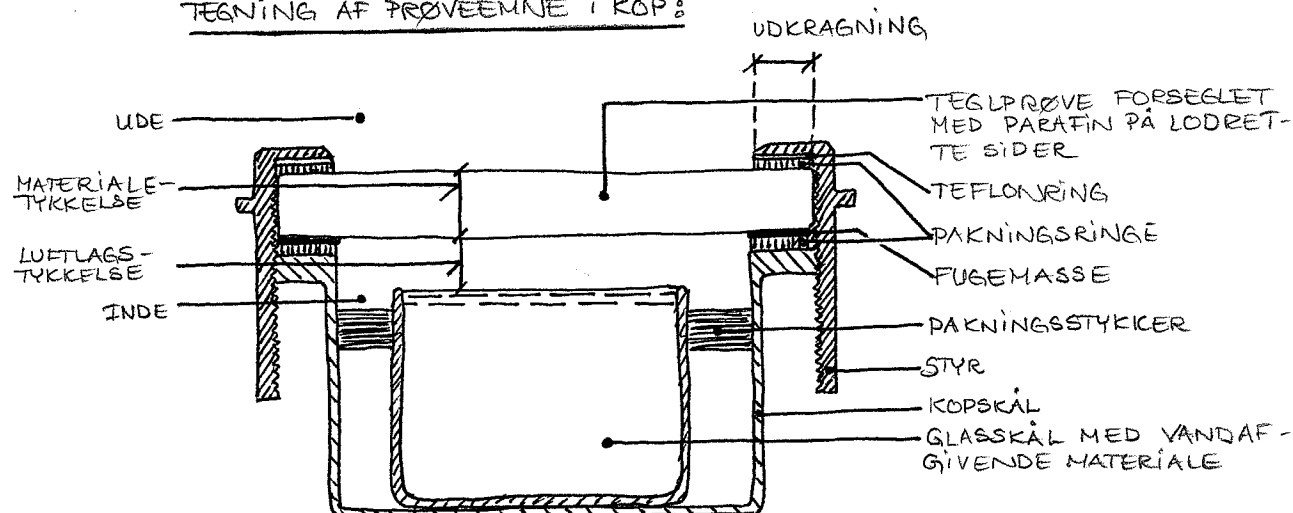
T: Temperatur i Kelvin.

Kommentarer:

LUFTLAGSTYKKELSE : 6 mm

UDKRAGNING : 10 mm

TEGNING AF PRØVEEMNE I KOP:



Prøveleders underskrift:

Jette Brunnstrøm
Jette Brunnstrøm

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: December 1992

LBM-serienummer: 60

Prøvekanne : 23.3°C, 51.1 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	$\cdot 10^9$ Pa·s·m ² /kg	$\cdot 10^3$ s/m	$\cdot 10^{-12}$ kg/Pa·s·m	$\cdot 10^{-6}$ m ² /s
1	Kirketegl	27.81	75	0.85	6.21	32.7129	4.4810
2	Kirketegl	28.28	75	0.75	5.50	37.5403	5.1423
3	Kirketegl	28.26	84	1.08	7.87	26.2038	3.5894
4	Kirketegl	28.32	84	0.87	6.34	32.6058	4.4664
5	Kirketegl	23.36	94	1.05	7.64	22.3280	3.0585
6	Kirketegl	26.75	94	1.08	7.87	24.7982	3.3969
7	Kirketegl	29.05	97	0.94	6.87	30.8544	4.2265
8	Kirketegl	27.96	97	1.03	7.51	27.1629	3.7208
9	Kirketegl	27.32	100	0.73	5.30	37.6470	5.1569
10	Kirketegl	26.18	100	0.89	6.51	29.3706	4.0232

Et nul for Zp, Zc, δp og Dc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:

Resultater uden korrektioner

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: December 1992

LBM-serienummer: 60

Prøvekammer : 23.3°C, 51.1 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		RH over materialeprøve	RH under
		l		Zp	Zc		
		mm	%	$\cdot 10^9$ Pa·s·m ² /kg	$\cdot 10^3$ s/m	%	%
1	Kirketegl	27.81	75	0.82	5.97	51.4	73.4
2	Kirketegl	28.28	75	0.72	5.26	51.5	73.1
3	Kirketegl	28.26	84	1.05	7.64	51.4	82.2
4	Kirketegl	28.32	84	0.84	6.10	51.5	81.8
5	Kirketegl	23.36	94	1.01	7.40	51.6	91.6
6	Kirketegl	26.75	94	1.05	7.64	51.5	91.7
7	Kirketegl	29.05	97	0.91	6.64	51.6	94.1
8	Kirketegl	27.96	97	1.00	7.28	51.6	94.4
9	Kirketegl	27.32	100	0.69	5.06	51.9	96.1
10	Kirketegl	26.18	100	0.86	6.27	51.7	96.8

Et nul for Zp og Zc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:Zp og Zc er korrigeret for **Luftlagstykkelse**.

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: December 1992

LBM-serienummer: 60

Prøvekammer : 23.3°C, 51.1 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	$\cdot 10^9$ Pa·s·m ² /kg	$\cdot 10^3$ s/m	$\cdot 10^{-12}$ kg/Pa·s·m	$\cdot 10^{-6}$ m ² /s
1	Kirketegl	27.81	75	1.15	8.43	24.0908	3.3000
2	Kirketegl	28.28	75	1.03	7.50	27.5399	3.7724
3	Kirketegl	28.26	84	1.47	10.7	19.2264	2.6336
4	Kirketegl	28.32	84	1.18	8.65	23.9121	3.2755
5	Kirketegl	23.36	94	1.37	9.97	17.1048	2.3430
6	Kirketegl	26.75	94	1.45	10.6	18.4252	2.5239
7	Kirketegl	29.05	97	1.29	9.43	22.4958	3.0815
8	Kirketegl	27.96	97	1.40	10.2	19.9790	2.7367
9	Kirketegl	27.32	100	0.98	7.16	27.8375	3.8132
10	Kirketegl	26.18	100	1.19	8.71	21.9299	3.0040

Et nul for Zp, Zc, δp og Dc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:Zp og øvrige værdier er korrigeret for **Masked-Edge-Effekt**.

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: December 1992

LBM-serienummer: 60

Prøvekammer : 23.3°C, 51.1 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	$\cdot 10^9$ Pa·s·m ² /kg	$\cdot 10^3$ s/m	$\cdot 10^{-12}$ kg/Pa·s·m	$\cdot 10^{-6}$ m ² /s
1	Kirketegl	27.81	75	1.12	8.19	24.7872	3.3954
2	Kirketegl	28.28	75	0.99	7.26	28.4380	3.8955
3	Kirketegl	28.26	84	1.44	10.5	19.6602	2.6931
4	Kirketegl	28.32	84	1.15	8.41	24.5853	3.3677
5	Kirketegl	23.36	94	1.33	9.73	17.5209	2.4000
6	Kirketegl	26.75	94	1.42	10.4	18.8462	2.5816
7	Kirketegl	29.05	97	1.26	9.19	23.0754	3.1609
8	Kirketegl	27.96	97	1.37	9.98	20.4530	2.8017
9	Kirketegl	27.32	100	0.95	6.93	28.7889	3.9435
10	Kirketegl	26.18	100	1.16	8.48	22.5423	3.0879

Et nul for Zp, Zc, δp og Dc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:

Zp og øvrige værdier er korrigeret for **Luftlagstykkelse**
og **Masked-Edge-Effekt**.

19.FEB.1993

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

Rekvirent : Eduard Troelsgård - Rådgivende Ingeniører A/S
Kontaktperson : Svend Jakobsen

Prøveleder : Jette Brunnstrøm Udført af: Britta Roll

Prøveperiode : Januar 1993 LBM-serienummer: 61

Prøvekammer : 23.5°C, 49.3 %RH v_luft: 2.1 m/s
Det angivne klima i prøveområdet er middelværdi for hele prøveperioden.

Effektivt prøveareal: $A = 5000 \text{ mm}^2$

Fugtmodstandstal

$Z_p = A \cdot dp / \alpha$ (Pa·s·m²/kg) dp : Damptryksforskelle over prøveemne.
 α : Hældningen af vægtændringskurven.

$Z_c = Z_p \cdot 7.3 \cdot 10^{-6}$ (s/m)

Diffusivitet

$\delta_p = 1 / Z_p$ (kg/Pa·s·m) l : Prøvelegemets tykkelse.

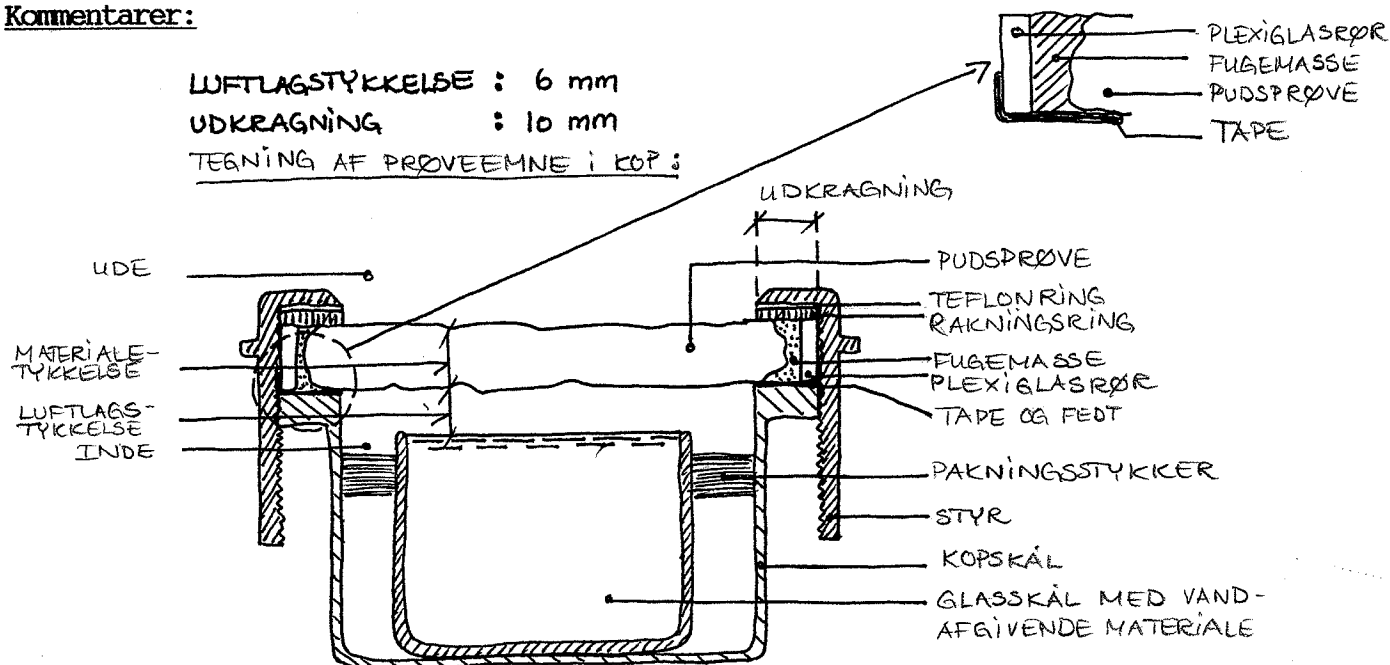
$D_c = 462 \cdot T \cdot \delta_p$ (m²/s) T : Temperatur i Kelvin.

Kommentarer:

LUFTLAGSTYKKELSE : 6 mm

UDKRAGNING : 10 mm

TEGNING AF PRØVEEMNE I KOP:



Prøveleders underskrift:

Jette Brunnstrøm
Jette Brunnstrøm

7

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: Januar 1993

LBM-serienummer: 61

Prøvekammer : 23.5°C, 49.3 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	$\cdot 10^9$ Pa·s·m ² /kg	$\cdot 10^3$ s/m	$\cdot 10^{-12}$ kg/Pa·s·m	$\cdot 10^{-6}$ m ² /s
1	Puds	18.13	75	0.72	5.22	25.3475	3.4741
2	Puds	20.81	75	0.88	6.41	23.7101	3.2497
3	Puds	16.08	85	0.87	6.32	18.5877	2.5476
4	Puds	21.38	85	0.68	4.93	31.6549	4.3386
5	Puds	23.14	93	0.82	6.01	28.1215	3.8543
6	Puds	24.74	93	0.72	5.28	34.2201	4.6902
7	Puds	17.87	97	0.78	5.67	23.0093	3.1537
8	Puds	25.30	97	0.76	5.54	33.3492	4.5708
9	Puds	24.25	100	0.80	5.82	30.4222	4.1697
10	Puds	20.53	100	0.72	5.26	28.4714	3.9023

Et nul for Zp, Zc, δp og Dc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:

Resultater uden korrektioner

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: Januar 1993

LBM-serienummer: 61

Prøvekammer : 23.5°C, 49.3 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		RH over materialeprøve	RH under
		l		Zp	Zc		
		mm	%	$\cdot 10^9$ Pa·s·m ² /kg	$\cdot 10^3$ s/m	%	%
1	Puds	18.13	75	0.68	4.98	49.8	72.9
2	Puds	20.81	75	0.85	6.17	49.7	73.3
3	Puds	16.08	85	0.83	6.08	49.8	82.6
4	Puds	21.38	85	0.64	4.69	49.9	81.9
5	Puds	23.14	93	0.79	5.77	49.9	89.9
6	Puds	24.74	93	0.69	5.04	50.0	89.5
7	Puds	17.87	97	0.74	5.43	50.0	93.4
8	Puds	25.30	97	0.73	5.30	50.1	93.3
9	Puds	24.25	100	0.76	5.58	50.1	96.3
10	Puds	20.53	100	0.69	5.03	50.1	95.9

Et nul for Zp og Zc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:

Zp og Zc er korrigeret for Luftlagstykkelse.

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: Januar 1993

LBM-serienummer: 61

Prøvekammer : 23.5°C, 49.3 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	·10 ⁹ Pa·s·m ² /kg	·10 ³ s/m	·10 ⁻¹² kg/Pa·s·m	·10 ⁻⁶ m ² /s
1	Puds	18.13	75	0.88	6.46	20.4893	2.8083
2	Puds	20.81	75	1.12	8.16	18.6272	2.5530
3	Puds	16.08	85	1.05	7.63	15.3761	2.1074
4	Puds	21.38	85	0.86	6.31	24.7250	3.3888
5	Puds	23.14	93	1.07	7.82	21.5883	2.9589
6	Puds	24.74	93	0.96	6.98	25.8804	3.5472
7	Puds	17.87	97	0.96	6.99	18.6528	2.5565
8	Puds	25.30	97	1.01	7.36	25.0947	3.4395
9	Puds	24.25	100	1.05	7.66	23.1118	3.1677
10	Puds	20.53	100	0.92	6.68	22.4324	3.0746

Et nul for Zp, Zc, δp og Dc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:

Zp og øvrige værdier er korrigeret for ~~Masked-Edge-Effekt~~.

19.FEB.1993

=====

RESULTAT AF KOPMÅLINGER

=====

Prøveperiode: Januar 1993

LBM-serienummer: 61

Prøvekammer : 23.5°C, 49.3 %RH

v_luft: 2.1 m/s

Kop	Prøveemne	Tykkelse	RH i kop	Modstand		Diffusivitet	
		l		Zp	Zc	δp	Dc
		mm	%	$\cdot 10^9$ Pa·s·m ² /kg	$\cdot 10^3$ s/m	$\cdot 10^{-12}$ kg/Pa·s·m	$\cdot 10^{-6}$ m ² /s
1	Puds	18.13	75	0.85	6.22	21.2689	2.9151
2	Puds	20.81	75	1.08	7.92	19.1841	2.6294
3	Puds	16.08	85	1.01	7.40	15.8682	2.1749
4	Puds	21.38	85	0.83	6.08	25.6885	3.5209
5	Puds	23.14	93	1.04	7.59	22.2619	3.0512
6	Puds	24.74	93	0.92	6.74	26.7893	3.6717
7	Puds	17.87	97	0.93	6.76	19.3064	2.6461
8	Puds	25.30	97	0.98	7.12	25.9288	3.5538
9	Puds	24.25	100	1.02	7.42	23.8490	3.2687
10	Puds	20.53	100	0.88	6.44	23.2565	3.1875

Et nul for Zp, Zc, δp og Dc angiver, at disse ikke er beregnet.

Bemærkninger:

Zp og øvrige værdier er korrigeret for **Luftlagstykkelse**
og **Masked-Edge-Effekt**.