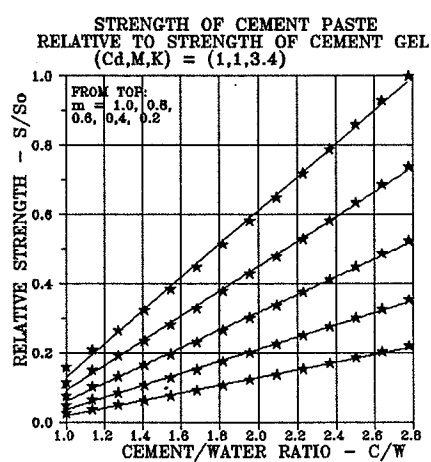


Et notat vedrørende
CEMENTPASTAS STYRKE I RELATION TIL KAPILLARPORØSITET

Lauge Fuglsang Nielsen



Laboratoriet for Bygningmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole
Bygning 118
2800 Lyngby

Et notat vedrørende

CEMENTPASTAS STYRKE
I RELATION TIL KAPILLARPORØSITET

Lauge Fuglsang Nielsen

Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole
2800 Lyngby, Danmark

I. INDLEDNING OG FORMLER

Notatet er udarbejdet som supplerende tekstmateriale til laboratoriets kursus 6110: "Materialemekanik" som et eksempel på, hvordan de gennemgåede teorier vedrørende porøse materials styrke kan anvendes til løsning af praktiske problemstillinger som for eksempel porøsitetens indflydelse på cementbaserede materials styrke.

Udover kursets grundmateriale (1,2) anvendes et andet supplerende notat (3), der omhandler impregnerede materials styrkeforhold.

I notatet er de betragtede materialer porøse med poresystemer, der kan karakteriseres som relativt grove i forhold til de, der kendetegner avancerede keramiske produkter. I det aktuelle tilfælde er porerne kapillarporer i et grundmaterialet, bestående af cementgel og uhydraticeret cement.

Den anvendte terminologi er følgende:

- c Porøsitet = kapillarporevolumen i forhold til det porøse materials samlede volumen
- c_k Kritisk porøsitet = porøsitet, hvor materialet mister sin sammenhæng
- S Styrke ved porøsitet, c
- S_0 Styrke ved forsvindende porøsitet - styrke af grundmateriale - referencestyrke

Med basis i revneteorien kan vi efter (2,3) udtrykke styrken af de her betragtede, relativt grovporøse materialer ved

$$\frac{S}{S_0} = e^{-[K \log_e(1/\Gamma) + 1/\Gamma - \Gamma]/2} \quad (1)$$

hvor

$$\Gamma = (1 - c/c_d)^M \quad (2)$$

M er en konstant ($0 < M \leq 1$), der sammen med den kritiske porøsitet, c_d , karakteriserer porernes interaktion. Et lille M betyder, at interaktionens variation er lav ved små porekoncentrationer.

K er en konstant, der karakteriserer porestørrelsen. Et lavt $K \cdot M$ betyder en langsom størrelsesvariation ved små porekoncentrationer.

For al praksis med relativt grove poresystemer kan Ligning 1 tilnærmes ved

$$\frac{S}{S_0} \approx e^{-B \log_e(1 - c/c_d)^{-1}} = (1 - c/c_d)^B \quad (3)$$

hvor eksponenten

$$B = M(1 + K/2) \quad (4)$$

For små c/c_d (< 0.15) gælder for både Ligning 1 og 3 den nøjagtige grænseværdi

$$\frac{S}{S_0} \approx e^{-B \cdot c/c_d} \quad (5)$$

For cementbaserede materialer kan vi, jfr. (3), sætte

$$c_d \approx 1 \quad ; \quad M \approx 1 \quad ; \quad K \approx 3 - 4 \quad (6)$$

Ligningerne 3 og 5 minder om den velkendte empirisk bestemte Ryshkewitch-formel (4,5), $S/S_0 = \exp(-Ac)$, hvor A er en konstant, afhængig af det betragtede porøse materiale. Ryshkewitch's udtryk har en række ulemper, som er diskuteret i (6). Af speciel interesse i den foreliggende sammenhæng er det, at udtrykket, kalibreret ved moderate porøsiteter (0.2 - 0.4), vil overestimere lavporøsitetsstyrken for grovporøse materialer. Desuden er beskrivelsen af højporøsitetsstyrker åbenlyst forkert. Ligningerne 1 og 3 er "rensede" for disse fejl.

II. ANVENDELSE

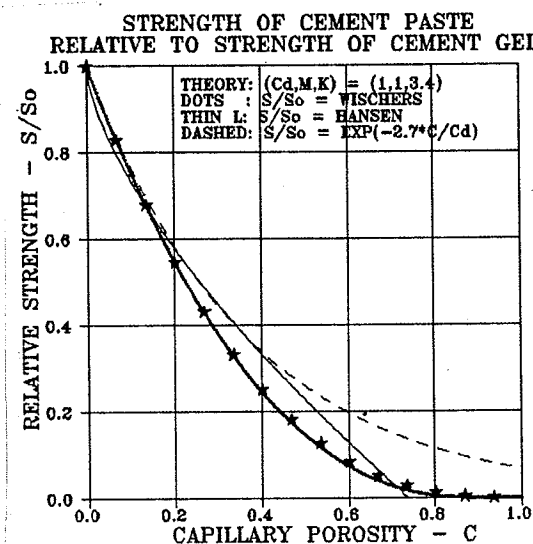
Med $c_d = 1$ er Ligning 3 identisk med adskillige empiriske udtryk i litteraturen vedrørende cementpastas styrkeegenskaber. Størrelsesordenener, $B \approx 3$ er angivet i (7) for eksempel.

Dette svarer efter Ligningerne 4 og 6 til $K \approx 4$, hvilket er i udmærket overensstemmelse med et fundet resultat i (3) på $K = 3.9$ for autoklaverede calcium-silicate-systemer, testede i (8).

Wischer (9) udførte eksperimenter, hvor resultaterne på bedste måde lod sig beskrive ved

$$\frac{S}{S_0} = (1 - c)^{2.7} \quad (7)$$

Dette svarer efter Ligningerne 3 og 6 til $K = 3.4$. Figur 1 viser Wischers beskrivelse sammen med det her beskrevne teoretiske udtryk, Ligning 1 med $(c_d, M, K) = (1, 1, 3.4)$. Tilnærmelsen, Ligning 5, er også vist.



Figur 1. Styrkebeskrivelse i henhold til Ligning 1 med de anførte parametre. Til sammenligning er Wischers (9) empirisk- og Hansens (10) teoretisk bestemte resultater vist.

Til sammenligning er i samme figur vist resultater fra en model (kugleformede kapillarporer), udviklet af Hansen (10). Hansens resultat er

$$\frac{S}{S_0} = (1 - 1.22 \cdot c^{0.66}) \quad (8)$$

hvor der angives følgende udtryk for kapillarporositeten af cementpasta

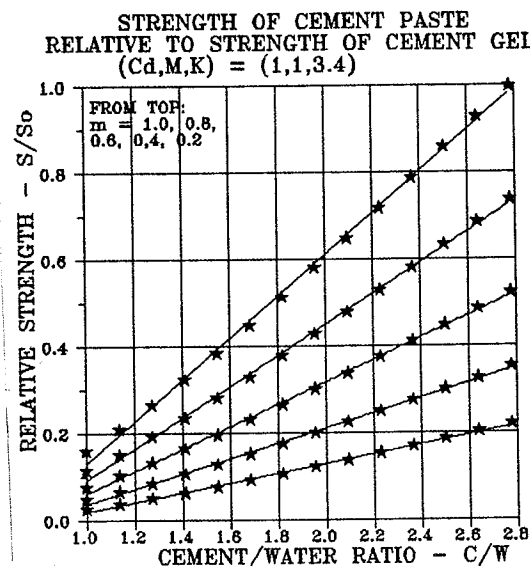
$$c = \frac{w/c - 0.36 \cdot m}{w/c + 0.32} \quad (9)$$

w/c og m ($0 \leq m \leq 1$) er pastaens vand/cement (vægt)tal henholdsvis hydraticeringsgrad (modenhed).

På basis af Ligningerne 8 og 9 foretog Hansen en interessant analyse af det velkendte Bolomey's styrkeudtryk (11) for cementbaserede materialer,

$$S = k_1 (c/w - k_2) \quad (10)$$

hvor k_1 og k_2 er konstanter afhængige af alder og anvendte materialer. Bl. a. bestemte Hansen k_2 som en funktion af hydraticeringsgraden. Hansens resultater er givet som $k_2 = \theta(H)$ i Tabel 1.



Figur 2. Afbildning af Ligning 1 (C_d, M, K) = (1, 1, 3.4) og porøsitet efter Ligning 9, ($1 \leq c/w \leq 2.77$). Punkterne er teoretiske. Linierne er de bedste lineære fit.

Det foreliggende notat giver ikke de samme resultater på grund af den i Figur 1 viste forskel mellem Ligningerne 1 og 8. For at vise dette kombinerer vi (som Hansen) styrkeudtrykket (nu Ligning 1 med (C_d, M, K) =

(1,1,3.4)) og porositetsudtrykket, Ligning 9. Resultatet er vist i Figur 2, der ved lineær regression giver

$$S/S_0 = \alpha \cdot (c/w - \beta) \quad (12)$$

med de i Tabel 1 viste parametre, α og β . En udmærket approximation af disse er

$$\begin{aligned} \alpha &= k_1/S_0 \approx 0.48 \cdot m \\ \beta &= k_2 \approx 0.84 - 0.12m \end{aligned} \quad (13)$$

der også giver sammenhængen til parametrene, k_1 og k_2 , i Bolomey's formel. Bemærk, $k_1 = \alpha \cdot S_0$. Styrken, S_0 (≈ 100 MPa), skal herunder opfattes som styrken af en fuldt hydrateret cementpasta med $W/C = 0.36$, hvilket, jfr. Ligning 9, giver en porøsitet på 0.

I simplificeret form kan Ligningerne 12 og 13 sammenfattes i

$$S \approx (0.48mS_0) \cdot (c/w - 0.75) \quad (14)$$

m	α	β		$\alpha(H)$	$\beta(H)$
1.0	0.481	0.729		0.380	0.36
0.8	0.358	0.741		0.305	0.37
0.6	0.256	0.760		0.250	0.44
0.4	0.175	0.788		0.203	0.56
0.2	0.111	0.827		0.163	0.78

Tabel 1. Lineær regression af Ligning 1 med $(c_0, M, K) = (1, 1, 3.4)$ og porøsitet efter Ligning 9, ($1 \leq c/w \leq 2.77$). Til sammenligning er Hansens resultater i (10) vist til højre i skemaet.

Til sammenligning med de her præsenterede resultater (Ligning 13) er de bedste lineære fit af α og β i Hansens undersøgelse

$$\begin{aligned} \alpha &= k_1/S_0 \approx 0.10 + 0.27m \\ \beta &= k_2 \approx 0.81 - 0.52m \end{aligned} \quad (15)$$

III. SLUTBEMÆRKNINGER

I modsætning til Hansens analyse (10) af styrken af cementbaserede materialer viser den foreliggende undersøgelse, at Bolomey's formel, Ligning 10, kan anvendes med et konstant $k_2 \approx 0.75$. Konstanten $k_1 = \alpha S_0$ er rela-

teret til hydraticeringsgraden, m , på simpel måde, nemlig $k_1 \approx 0.48 \cdot m \cdot S_m$.

Bolomey foreslog selv en konstant, $k_m \approx 0.5$. Afvigelsen fra den ovenfor nævnte værdi kan tilskrives forskelle i anvendt cement.

Den foreliggende undersøgelse hviler på forfatterens egne analyser af porøse materials styrke i forbindelse med en vurdering af Wischers forsøgsresultater (9). Ovenstående konklusioner vedrørende Bolomey-konstanterne skal ses på denne baggrund. Der er intet til hinder for, at de af Hansen opnåede resultater (10) er gyldige i andre sammenhænge, hvor der er anvendt andre cementtyper - og måske andre lagringsformer.

Nærværende forfatter er fuldstændig enig i Hansen's slutbemærkning (10), at flere eksperimentelle undersøgelser er nødvendige, før endelige konklusioner kan drages vedrørende porøsitetens indflydelse på cementbaserede materials styrkeforhold.

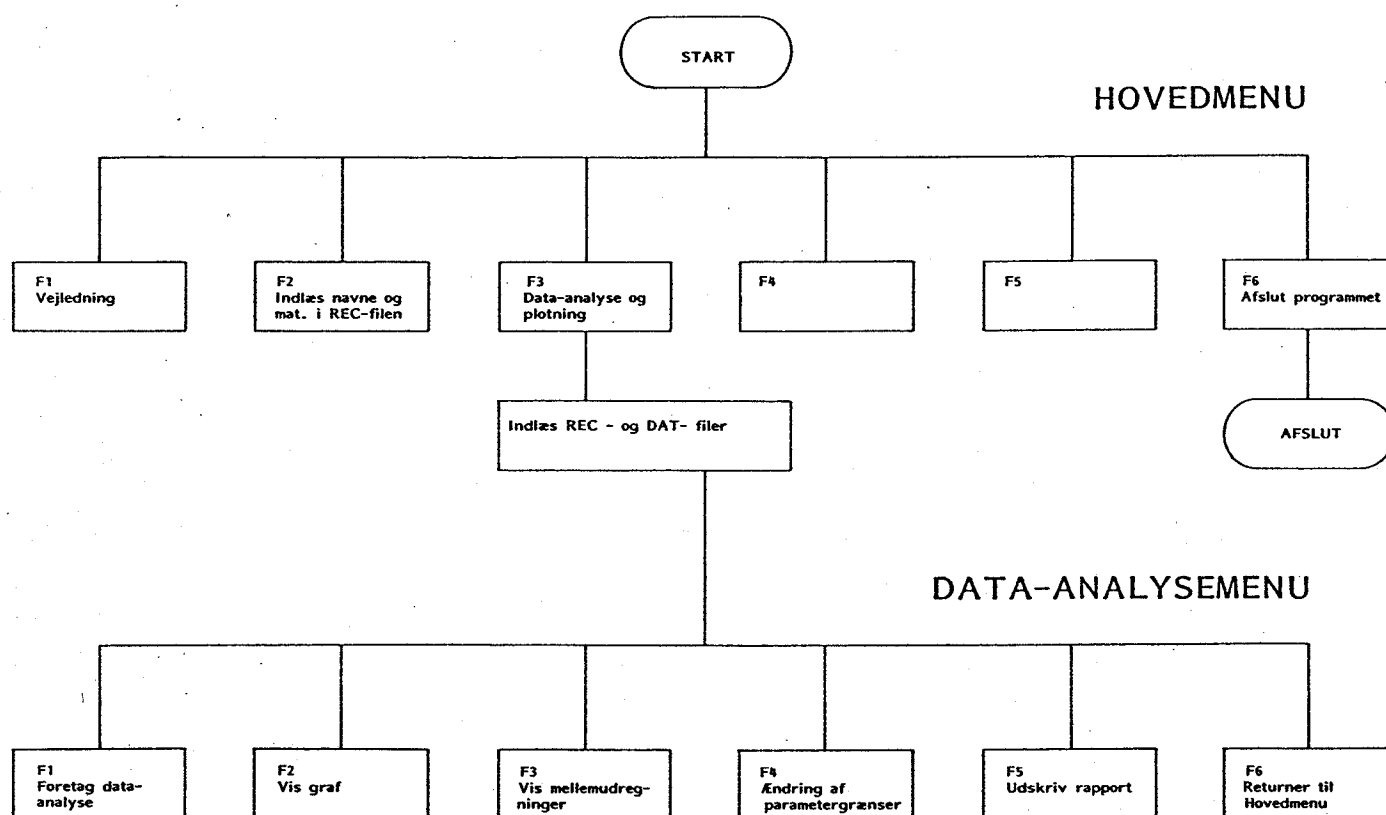
Det skal i den forbindelse bemærkes, at det generelt i litteraturen vedrørende cementbaserede materials styrkeforhold implicit antages, at grundmaterialets styrke er uafhængig af dets sammensætning af gel og uhydraticeret cement. Dette er en antagelse, hvis bekræftelse i høj grad skal efterprøves eksperimentelt.

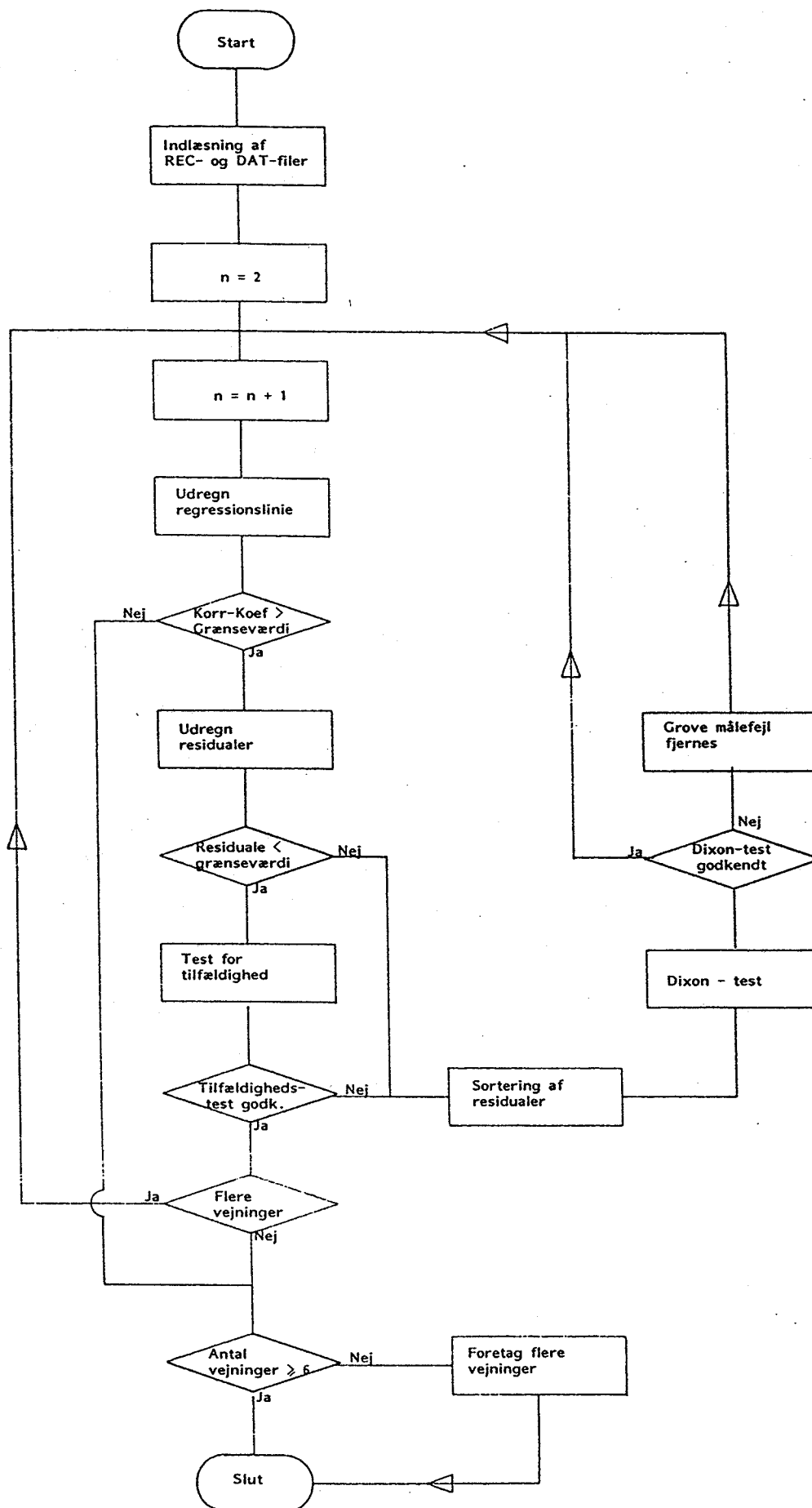
Til slut skal bemærkes, at den udviklede teori ikke kan forventes at gælde uændret, når kompakte cementbaserede produkter med meget lave W/C-tal betragtes. Her skal analysemetoder anvendes, der er udviklede for keramiske materialer med fint-strukturerede poresystemer (6).

Litteratur

- 1) Nielsen L. Fuglsang: "Materialemechanik". Teknisk Rapport 169-A(1986), Laboratoriet for Bygningmateria-
le, DtH.
- 2) Nielsen, L. Fuglsang: "Materialemechanik II". Tek-
nisk Rapport 189(1988), Laboratoriet for Bygningmate-
riale, DtH.
- 3) Nielsen, L. Fuglsang: "Selvødelæggelse af impreg-
nerede porøse materialer". Teknisk Rapport 192(1988),
Laboratoriet for Bygningmateriale, DtH.

- 4) Ryshkewitch, E.: "Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia", J. Am. Ceram. Soc. 36 (1953), 65 - 68.
- 5) Duckworth, W.: "Discussion of Ryshkewitch Paper", J. Am. Ceram. Soc. 36(1953), 68.
- 6) Nielsen, L. Fuglsang: "Stiffness and Strength of Porous Materials", (accepted for publication in J. Am. Ceramic Soc.). Revised Technical report 174 (1987), Building Mat Lab., Dth.
- 7) Fagerlund, G.: "Samband mellan porositet og materials mekaniske egenskaper". Rapport 26(1972), Institutionen för Byggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund.
- 8) Beaudoin, J.J. and Feldman, R.F.: "A Study of Mechanical Properties of Autoclaved Calcium Silicate Systems". Cem. and Concr. Res. 5(1975), 103 -118.
- 9) Wischers, G.: "Einfluss einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Warmedehnung". Schriftenreihe der Zement Industrie. Verein Deutscher Zementwerke E.V., Heft 28, Dusseldorf 1961.
- 10) Hansen, Torben C.: In "Studies on Concrete Technology", Swedish Cement and Concrete Res. Inst., Stockholm 1979, pp 34 - 41.
- 11) Bolomey, J.: "Durcissement des Mortiers et Betons". Bulletin Technique de la Suisse Romande, 16, 22 et 24, 1927.





APPENDIX C: Behandling af ASCII-filen i Lotus Symphony

Proceduren MasOgTid danner automatisk en ASCII-fil med navnet ASCIIFIL.DAT. Denne kan indlæses af regnearkprogrammer og statistikprogrammer. I dette appendix beskrives indlæsning til regneark i Lotus Symphony. For yderligere beskrivelse henvises til de enkelte programmers brugervejledninger.

Afhængig af konfigurationen på PC'eren skal der muligvis skiftes til et andet bibliotek (directory) inden Symphony kan kaldes. Den her givne vejledning er baseret på Lotus Symphony version 2.0.

Indlæsning af ASCII-filen til regnearket i Lotus Symphony sker på følgende måde. Skriv:

access <R> (Programmet påbegyndes)

I den fremkomne menu vælges Symphony ved blot at taste S, tast:

s

Når regnearket er fremme, vælges "Services" med F9-tasten, tast:

F9

For at indlæse ASCII-filen vælges i den fremkomne menu funktionen File, tast:

f

Der gives nu mulighed for at importere en fil med kommandoen import, tast:

i

ASCII-filen skal indlæses som typen Structured, tast:

s

Herefter angives navnet på ASCII-filen, som skal indlæses:

asciifil.dat <R>

Datafilen indlæses nu, og er klar til behandling. Brugeren skal selv angive overskrifter over de enkelte kolonner. Dette er gjort i det skærm billede, som vises efterfølgende.

For yderligere vejledning og anvendelse af programmet iøvrigt henvises til producentens brugervejledning.

Der ligger ved anvendelsen af Lotus Symphony som eksempel på regneark ikke nogen vurdering af dette regnearks anvendelighed og brugervenlighed i forhold til andre tilsvarende programmer.

T1:

SHEET

	M	N	O	P	Q	R	S	T
1								
2	3	7	0	340.823	49.02	4.22	22.53	
3	3	1332	-0.196	340.627	49.41	4.27	22.55	
4	3	5477	-1.056	339.767	49.46	4.37	22.77	
5	3	6969	-1.382	339.441	49.02	4.35	22.7	
6	3	9835	-2.043	338.78	48.78	4.19	23.25	
7	3	11430	-2.454	338.369	49.12	4.22	23.13	
8	3	15640	-3.604	337.219	48.68	3.47	23.11	
9	3	17093	-3.986	336.837	48.88	4.16	23.12	
10	3	18789	-4.429	336.394	48.54	4.08	23.32	
11	3	19893	-4.714	336.109	49.61	4.26	23.25	
12	3	21776	-5.201	335.622	49.41	4.16	23.14	
13	3	25838	-6.275	334.548	49.12	4.36	23.13	
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
								MAIN
	19-Oct-88 06:05 PM							Num

Figur C1

Skærbillede fra Lotus Symphony hvori ASCII-filen er indlæst. Søjle M viser kopnummer, N tiden i minutter, O masseændringen i gram, P totalmassen i gram, Q den relative luftfugtighed i prøvekommeret, R lufthastigheden over eksponeringskiven og S viser temperaturen i eksponeringskommeret.

APPENDIX D: Anvendelse af programmet med manuelt indtastede data

Programmet KOPANALYSE er fremstillet til analyse af måledata, som er opsamlet med dataopsamlingsprogrammet KOPLOG, se /2/. Denne type forsøg, hvor der søges en sammenhæng mellem forløbet tid og masseændring foretages imidlertid ofte ved blot manuelt at notere temperatur, relativ fugtighed, tidspunkt samt absolut masse i et skema, og det vil da være hensigtsmæssigt, hvis også disse data kan analyseres med KOPANALYSE-programmet. Ved at overholde det dataformat, som er angivet i næste tabel, kan data, som er indtastet i en fil (DAT-fil) analyseres med programmet. Data kan indtastes ved anvendelse af en editor (f.eks. PASCAL). Når programmet KOPANALYSE påbegyndes, skal der laves en RECORD-fil (REC-fil), som passer til de anvendte materialer.

Scannr	Dato	Tidspkt. Tidlalt	KopNr	Masse	RH	v_luft	Temp	
0	05.AUG.1988	15.34.00	0	1	345.567	52.4	0	23.2
0	05.AUG.1988	15.36.00	0	2	274.286	52.4	0	23.2
0	05.AUG.1988	15.38.30	0	3	571.765	52.4	0	23.2
0	05.AUG.1988	15.40.00	0	4	743.655	52.4	0	23.2
0	06.AUG.1988	15.34.00	0	1	344.546	52.8	0	23.0
0	06.AUG.1988	15.36.00	0	2	272.342	52.8	0	23.0
0	06.AUG.1988	15.38.30	0	3	568.583	52.8	0	23.0
0	06.AUG.1988	15.40.00	0	4	739.288	52.8	0	23.0
0	07.AUG.1988	15.34.00	0	1	342.456	52.6	0	23.3
0	07.AUG.1988	15.36.00	0	2	265.783	52.6	0	23.3
0	07.AUG.1988	15.38.30	0	3	565.385	52.6	0	23.3
0	07.AUG.1988	15.40.00	0	4	743.199	52.6	0	23.3
0	08.AUG.1988	15.34.00	0	1	340.543	52.7	0	23.1
0	08.AUG.1988	15.36.00	0	2	267.578	52.7	0	23.1
0	08.AUG.1988	15.38.30	0	3	564.542	52.7	0	23.1
0	08.AUG.1988	15.40.00	0	4	738.685	52.7	0	23.1

Tabel D1 Dataformat for data, som skal anvendes af KOPANALYSE. Variable, hvis værdi ikke anvendes i KOPANALYSE har tildelt værdien 0 (nul).

Scannr

Scannummer skal være et heltal. Denne variabel anvendes ikke i selve analysen, så hvis forsøget ikke har noget scannummer, kan blot indtastes et 0 (nul).

Dato

Dato angiver datoen for den aktuelle vejning og skal angives i følgende format:

dd.MMM.ÅÅÅÅ

dd : Datoen angivet med to-cifret tal, f.eks 03 for den 3.
 MMM : Månedens angives med de første tre bogstaver i månedens navn. Der skal anvendes store bogstaver.
 ÅÅÅÅ: Årstallet angivet med fire cifre, f.eks. 1988

De enkelte elementer skal adskilles af . (punktum).

Eksempel: 03.JAN.1988

Tidspunkt

Tidspunkt angiver klokkeslettet for vejningen og skal angives i følgende format:

tt.mm.ss

tt: Timen angivet med to-cifret tal mellem 0 og 23, f.eks 08.
 mm: Minuttet angivet med et to-cifre tal mellem 0 og 59, f.eks. 07.
 ss: Sekunder angivet med to-cifret tal mellem 0 og 59.

De enkelte elementer skal adskilles af . (punktum).

Eksempel: 08.57.13

Tidlalt

Denne tid bliver udregnet i dataopsamlingsprogrammet KOPLOG, og anvendes ikke ved selve analysen. Her kan blot angives et 0 (nul).

KopNr

Angiver koppers (prøveemnets) nummer, og skal være et heltal mellem 1 og 24.

Masse

Her angives koppers masse til den ovenfor angivne dato og tidspunkt. Massen skal angives i gram.

RH

Luftens relative fugtighed ved den enkelte måling. Den skal angives i procent, dvs. $0 \leq RH \leq 100$.

v_luft

Luftens hastighed ved passage af kopperne. Den skal angives i m/s. v_luft anvendes ikke ved beregningerne, så hvis den ikke er målt, kan der blot anføres 0 (nul).

Temp

Angiver temperaturen omkring kopperne på vejtidspunktet. Temperaturen skal angives i °C, og er nødvendig ved beregningerne.

APPENDIX E: Udsnit af datafil fra KOPLOG

Her vises et udsnit af den datafil, som programmet KOPLOG danner og som anvendes ved dataanalysen af programmet KOPANALYSE.

62	27.MAJ.1988	10.17.21	20.86	-1	0.000	49.66	4.31	22.47
63	27.MAJ.1988	10.47.25	21.35	-1	0.000	49.71	4.16	22.44
64	27.MAJ.1988	11.17.30	21.85	-1	0.000	49.61	4.40	22.45
65	27.MAJ.1988	11.23.41	21.94	0	499.999	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.24.34	21.94	1	337.550	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.25.23	21.94	2	339.864	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.26.08	21.94	3	340.627	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.26.55	21.94	4	340.392	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.27.46	21.94	5	290.147	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.28.21	21.94	6	285.099	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.29.28	21.94	7	292.982	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.30.22	21.94	8	275.866	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.31.07	21.94	9	284.355	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.31.48	21.94	10	284.100	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.32.29	21.94	11	553.457	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.33.05	21.94	12	553.237	49.41	4.27	22.5
65	27.MAJ.1988	11.34.38	21.94	13	0.000	49.41	4.27	22.5
66	27.MAJ.1988	11.52.51	22.43	-1	0.000	49.41	4.34	22.49
67	27.MAJ.1988	12.22.55	22.93	-1	0.000	49.22	4.38	22.53
68	27.MAJ.1988	12.53.00	23.43	-1	0.000	49.17	4.34	22.53
69	27.MAJ.1988	13.23.02	23.92	-1	0.000	49.37	4.24	22.53
70	27.MAJ.1988	13.53.07	24.42	-1	0.000	49.32	4.33	22.51

APPENDIX F: ASCII-filen

Her vises et udsnit af ASSCII-filen, som dannes i forbindelse med indlæsning af datafilen (DAT-filen).

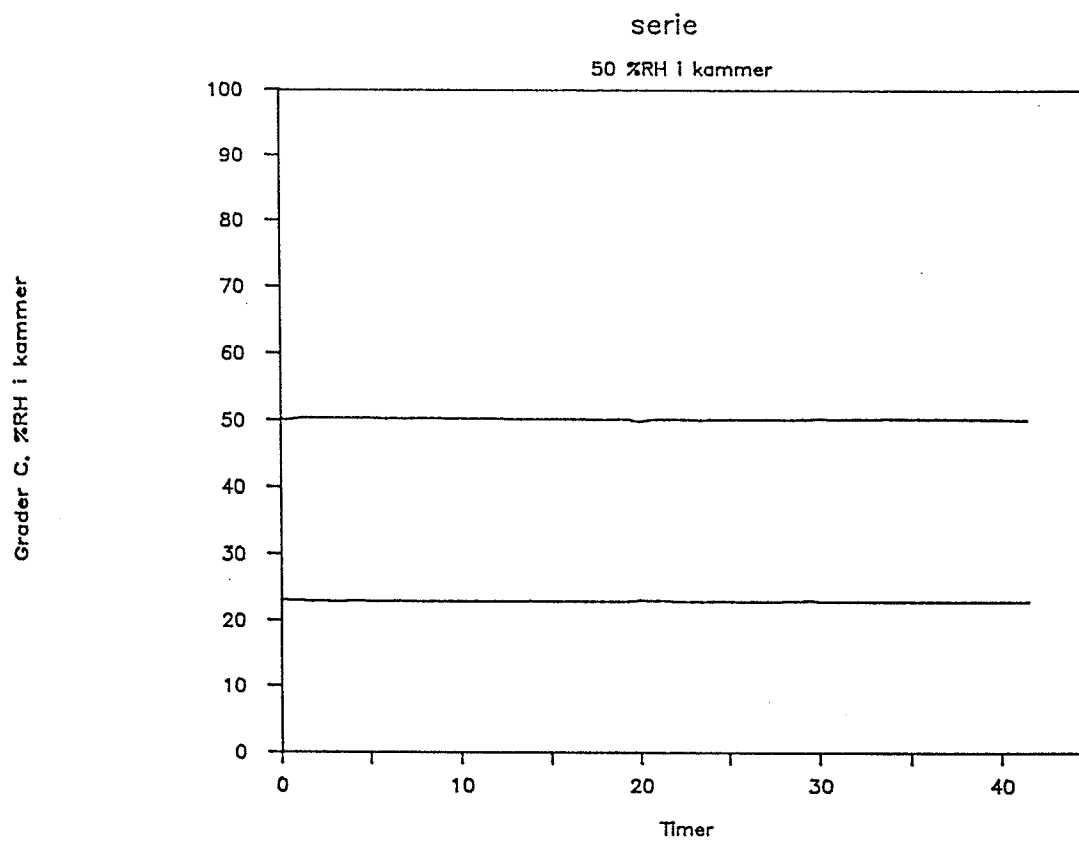
T2:

SHEET

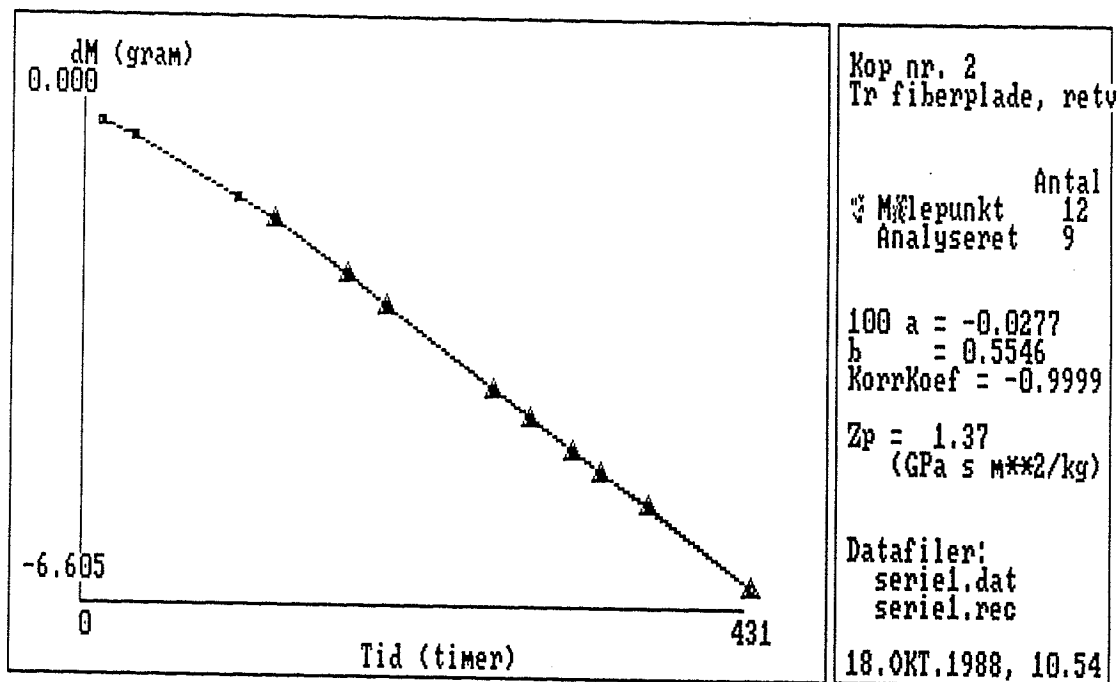
	M	N	O	P	Q	R	S	T
1								
2	KopNr	Totaltid	dM	Masse	RH	v_luft	Temp	
3								
4	3	7	0	340.823	49.02	4.22	22.53	
5	3	1332	-0.196	340.627	49.41	4.27	22.55	
6	3	5477	-1.056	339.767	49.46	4.37	22.77	
7	3	6969	-1.382	339.441	49.02	4.35	22.7	
8	3	9835	-2.043	338.78	48.78	4.19	23.25	
9	3	11430	-2.454	338.369	49.12	4.22	23.13	
10	3	15640	-3.604	337.219	48.68	3.47	23.11	
11	3	17093	-3.986	336.837	48.88	4.16	23.12	
12	3	18789	-4.429	336.394	48.54	4.08	23.32	
13	3	19893	-4.714	336.109	49.61	4.26	23.25	
14	3	21776	-5.201	335.622	49.41	4.16	23.14	
15	3	25838	-6.275	334.548	49.12	4.36	23.13	
16								
17								
18								
19								
20								

MAIN

APPENDIX G: Behandling af DAT-filen i Lotus Symphony



APPENDIX H: Graf for masseændring som funktion af tiden med korrelationskoefficient 0.9999



Prt Scr: Udskriv billedet på printer

F6: Returner

Opsummering af analysen efter 11 iterationer.

Kop nummer 2
Træfiberplade, retv

AntalTalTilBeregning : 9

AntalTal : 9

Grænseværdier

Aktuelle værdier

Logiske værdier

KorrKoefGrænse : ± 0.9999
y = ax + b

Korr Koef : -0.99991
a · 100 : -0.02766
b : 0.55464

KorrKoefOK : TRUE

ResidualGrænse : ± 0.050

Max Residual : 0.032

ResidualOK : TRUE

TilfældigInterval: 0.51-1.49

RTilfældig : 0.97

RTilfældigOK : TRUE

3 tal fjernet pga. sandsynlig grov målefejl
Fugtmodstandstallet Zp: 1.369 GPa·s·m²/kg

Data-analysen er afsluttet

Tast en tast