

FUGTTRANSPORT I HØJSTYRKEBETON  
MED REVNER SOM FØLGЕ AF  
AUTOGENT SVIND

BIRGITTE FRIIS DELA

# **FUGTTRANSPORT I HØJSTYRKEBETON MED REVNER SOM FØLGE AF AUTOGENT SVIND**

**ET PILOT PROJEKT**

Birgitte Friis Dela  
Maj 1995

Afdelingen for Bærende Konstruktioner  
Laboratoriet for Bygningsmateriale  
Danmarks Tekniske Universitet  
Bygning 118, 2800 Lyngby  
Danmark

# Forord

Denne rapport beskriver resultaterne af et pilot projekt med omvendt-kop forsøg på to typer beton. Betonerne er udstøbt i forbindelse med udførelsen af mit eksamensprojekt "Svindrevner i Højstyrkebeton" ved hhv. Lab. for Bygningsmaterialer og Afd. for Bærende Konstruktioner.

Laborant Britta Roll, Lab. for Bygningsmaterialer har forestået en stor del af forsøgsarbejdet. Hun takkes hermed for samarbejdet og for hendes store hjælpsomhed.

Pilot-projektet er udført under min ansættelse hos Henrik Stang, Afd. for Bærende Konstruktioner i løbet af vinteren 1994/1995. Der skal i den forbindelse rettes en stor tak til STVF, der har finansieret min ansættelse under de udførte undersøgelser.

Birgitte Friis Dela  
ABK, september 1995

## Synopsis

Mikrorevners indflydelse på fugttransporten i betonkonstruktioner er ofte kilde til diskussioner om revnernes betydning for holdbarheden af betonkonstruktioner. For at undersøge dette er der lavet nogle indledende pilotforsøg på to typer beton, hvor planslib har vist, at der er mikrorevner i den ene type beton (med mikrosilica), mens der ikke er observeret revner i den anden type beton (uden mikrosilica). Forsøgene er udført som omvendt-kop forsøg på 5 måneder gamle betoner, der ikke har været udsat for udtørring.

Forsøgene viste, at vandpermeabilitetskoefficienten for de revnede betoner med mikrosilica var omkring halvt så stor som den urevnede beton uden mikrosilica. Forsøgene har således ikke givet anledning til at konkludere en øget fugttransport i beton, der er revnet.

## Indhold

1. Indledning	1
2. Materialet	1
3. Teori	2
4. Omvendt-kop forsøget	5
5. Resultater	6
6. Yderligere undersøgelser	
7. Diskussion	
8. Konklusion	7
9. Litteratur	9

- Bilag A: Beregning af middelvandindhold i udtørringszone  
Bilag B: Datablade fra forsøget  
Bilag C: Grafisk illustration af resultaterne



## 1. Indledning

Denne rapport giver resultaterne af nogle pilot-tests med omvendt-kop forsøg udført på beton med og uden mikrosilica. De anvendte betonemner stammer fra eksamensprojektet "svindrevner i højstyrkebeton" [1] udført af undertegnede i foråret 1994. Her blev der lavet planslib på de to typer beton. Planslibene viste entydigt revner i betonen med 10% mikrosilica, mens der ikke kunne påvises revner i betonen uden mikrosilica. Betonen er forsimpleret på den måde, at der kun er anvendt én stenstørrelse (4-8 mm). Betonerne er således ikke direkte sammenlignelige med konventionelle betoner.

For at undersøge de påviste revners indflydelse på vandgennemtrængningen er der udført omvendt-kop forsøg på resten af betonemnerne. For yderligere oplysninger omkring revnedannelsen henvises til omtalte eksammensprojekt [1].

## 2. Materialet

Der skal her kort gøres rede for betonemnernes historie.

Betonernes støberecepter er angivet i skema 2.2 nedenfor. Forkortelserne MS i de to kolonner til højre refererer til mikrosilica.

Materiale, type	0% MS mængde (kg/m <sup>3</sup> )	10% MS mængde (kg/m <sup>3</sup> )
Cement, Hvid Portland-Cement	803,05	749,20
Mikrosilica, slurry fra Elkem (tørvægt: 49,8%)	-	150,44
Superplastificering, Sikament-FF (tørvægt: 30%)	28,11	28,85
Vand 1, demineraliseret	140,94	54,13
Vand 2, demineraliseret	80,31	74,92
Vand 3, demineraliseret	10,48	10,48
Tilslag, søsten, 4-8 mm, tørret	1278,0	1278,0

Skema 1 - Støberecepter for beton

Der blev blandet 4 liter af hver af de to betoner. Tilslaget blev inden brug vasket og tørret i tre døgn i et varmeskab ved 100°C. "Vand 3" udgjorde den ekstra mængde vand, som det tørrede tilslag skulle tilsættes for at opnå vandmættet overfladetør tilstand.

Blandeproceduren foregik på en "Hobart"-blandemaskine. Betonen blev blandet ved først at blande cementpastoen med "Vand 1", siden blev "Vand 2" og "Vand 3" tilsat. Dernæst blev tilslaget tilsat under omrøring ved hastighedstrin 1. Efter yderligere 3 minutters omrøring blev betonen udstøbt i smurte forme. Formene var cylindriske med en indvendig diameter på 60 mm og en højde på 120 mm.

Betoncylindrene blev afformet et døgn efter udstøbningen. Herefter blev hver enkelt beton-cylinder lagt i en pose af plast. Inden posen blev svejset sammen, blev den udsat for vakuum, så luften blev trukket ud. Poserne blev anbragt i et vandbad ved 30°C. Alle prøveemner blev lagret på denne måde i 14 døgn.

Efter forsegling i 14 døgn, blev prøverne savet igennem på tværs i trediedelspunkterne. Den ene af de tre skiver blev der på dette tidspunkt lavet planslib på. Eksempler på planslib af de to betontyper er vist i figur 4 og 5. De to resterende skiver er vandlagret i ca. 5 måneder.

De vandlagrede beton-prøveemner blev ved starten af omvendt-kop forsøget savet i cirka 2 cm tykke skiver. Skiverne blev efterfølgende vejet. Derefter er de blevet vakuum-vandmættet og vejet igen. Skiverne var nu klar til selve omvendt-kop forsøget.

Betonernes lagring har dermed taget sig ud som noteret i skemaet nedenfor:

Dato	Alder	Lagringsforhold
10/5 '94	-	Betonerne støbes, lagres i form ved 20°C
11/5 '94	1 døgn	Betonerne afformes, lagres forseglet ved 30°C
25/5 '94	14 døgn	Betonerne skæres op til planslib, resten vandlagres ved 20°C
12/10 '94	~5 mdr.	Betonerne skæres op til omvendt-kop forsøg, vakuumvandmættes
18/10 '94	~5 mdr.	Omvendt-kop forsøg starter
24/3 '95	~10½ mdr.	Omvendt-kop forsøg slutter, betonerne lægges i ovn ved 105°C
3/4 '95	~11 mdr.	Betonerne tages ud af ovn, forsøget slut

Skema 2 - Betonernes lagringsforhold,

### 3. Teori

I Thorsen [2] og Waldstrøm & Rosenbom [3] er der gjort rede for teorien bag omvendt-kop forsøgene. For nærmere gennemgang af teorien henvises derfor til disse. I denne rapport vil de anvendte formler blive angivet sammen med en ganske kort forklaring af fysikken bag formlerne.

Selve beregningen af resultaterne er udført ved hjælp af PC-programmet "OMVKOP" (se Mullit [4]). De parametre, der er målt før og efter selve forsøget er følgende:

- m(v): Masse af prøve efter vandmætning
- m(uv): Masse af prøve under vand
- L: Tykkelse af prøve
- r: Radius af prøve

m(s):	Slutmasse af prøven efter forsøget
m(t):	Masse af prøve efter tørring ved 105°C
rho(t):	Densiteten af prøven
T:	Rumtemperatur i °C
RF(rum):	Relativ luftfugtighed i rum

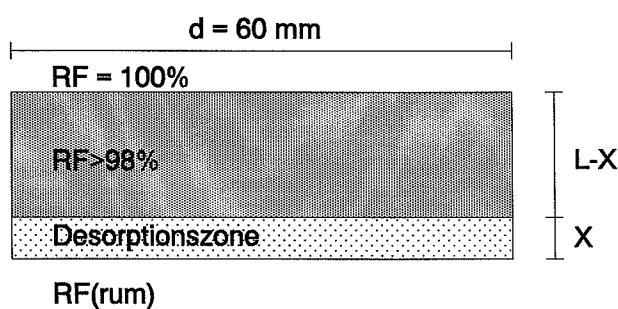
Endvidere krævedes materialets gennemsnitlige vandindhold i udtørningszonen defineret ud fra fugtfronten ved hhv. RF=90% og RF=98%. De to vandindhold betegnes hhv.:

- u-mid(90): Vandindhold ved middelværdi for RF i rum og i frugtfront (90%)
- u-mid(98): Vandindhold ved middelværdi for RF i rum og i frugtfront (98%)

Dette fugtindhold kan bestemmes ved lagring af et stykke af prøven ved en RF på gennemsnittet mellem fugtfrontens RF (hhv. 90%RF og 98%RF) og rummets RF. Efter lang tids lagring kan fugtindholdet af prøven da bestemmes ved veje-tørre-veje metoden. Det er imidlertid et meget langvarigt forsøg, der i nærværende tilfælde anses at være for tidskrævende i forhold til forsøgets karakter af forforsøg.

I stedet er vandindholdene bestemt af metoden i Betonbogen [5]. Beregningerne er foretaget i bilag A. Her er der ikke taget højde for lagringsmetode/-temp, cementtype eller mikrosilica-tilsætning. Der alene foretaget et skøn af hærdningsgraden. Der er regnet med samme middelvandindhold for de to betontyper, hvilket sandsynligvis ikke stemmer med virkeligheden, idet man må påregne et lavere middelvandindhold i betonen med silica end i betonen uden silica. Da vi ikke kender de reelle middelvandindhold ville det imidlertid være forkert at regne med forskellige værdier herfor, idet resultaterne umiddelbart vil være svære at sammenligne.

Med kendskab til de ovennævnte parametre er det nu muligt at bestemme permeabilitetskoefficienterne. For at beregne disse skal længden af "desorptionszonen" X bestemmes. Længden X beskriver således i hvilken dybde fugtfronten (hhv. RF=90% og RF=98%) har fundet ligevægt. I figur 1 nedenfor er fugtfronten og X indtegnet på et prøveemne.



**Figur 1** - Fugtfrontens placering og angivelse af længden X(98)

Formlen for bestemmelse af X for RF=90% er givet ved:

$$X(90) = \frac{[m(s) - m(v)] \cdot L}{[m(v) - m(uv)] \cdot u_{mid}(90) \cdot \frac{\rho(t)}{\rho(vand)} - [m(v) - m(t)]} \quad (1)$$

Formlen for bestemmelse af X for RF=98% er givet ved:

$$X(98) = \frac{[m(s) - m(v)] \cdot L}{[m(v) - m(uv)] \cdot u_{mid}(98) \cdot \frac{\rho(t)}{\rho(vand)} - [m(v) - m(t)]} \quad (2)$$

Med kendskab til eller beregning af Kelvinsradius  $r_K$  for hhv. RF=90% og RF=98% og vands overfladespænding  $\sigma_{vand}$  (begge kan findes i Nielsen [6]) kan vandpermeabilitetskoefficienten for de to RF-værdier 90% og 98% findes af følgende ligninger:

$$K(90) = \frac{r_K(90) \cdot [L - X(90)] \cdot (-a)}{2 \cdot \sigma_{vand} \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3)$$

og

$$K(98) = \frac{r_K(98) \cdot [L - X(98)] \cdot (-a)}{2 \cdot \sigma_{vand} \cdot \pi \cdot r^2} \quad (4)$$

På nøjagtig tilsvarende vis fås damppermeabilitetskoefficienten ved:

$$K_d(90) = \frac{X(90) \cdot (-a)}{\pi \cdot r^2 \cdot P(s) \cdot [RH_{90\%} - RH_{rum}]} \quad (5)$$

og

$$K_d(98) = \frac{X(98) \cdot (-a)}{\pi \cdot r^2 \cdot P(s) \cdot [RH_{98\%} - RH_{rum}]} \quad (6)$$

Den åbne porositet, porer åben, bestemmes ved følgende udtryk:

$$porer \text{ åben} = \frac{m(v) - m(t)}{m(v) - m(uv)} \quad (7)$$

Mens densiteten bestemmes af:

$$\rho_t = \frac{m(t) \cdot \rho_{vand}}{m(v) - m(uv)} \quad (8)$$

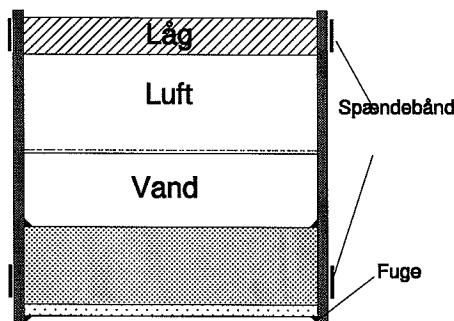
Alle beregninger er blevet kontrolleret ved beregning i et regneark, hvor også middelværdi og spredning er bestemt. Spredningen er beregnet på baggrund af følgende:

$$Spredning = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

hvor  $x_i$  betegner den enkelte værdi,  $\bar{x}$  betegner middelværdien af parametrene og n betegner antallet af parametre.

#### 4. Omvendt-kop forsøget

De vakuum-vandmættede prøveemner blev sat ind i et rør af kraftig gummi. Et spændebånd blev spændt omkring røret for at det skulle lukke tæt omkring betonskiven. Der blev derefter fuget langs randen ind- og udvendig med en vandbestandig tjærefugemasse (fra BOSTIK). Der blev nu hældt 50 g demineraliseret vand i koppen, låget blev sat i og spændebåndet blev spændt omkring. Opstillingen er tegnet i figur 2.



**Figur 2 -** Forsøgsopstilling til omvendt-kop forsøg

Kopperne med betonskiverne blev placeret på en rist cirka 20 cm over gulvet. En ventilator sørger for luft-cirkulation, mens en termohydrograf mælte temperatur og relativ fugtighed i den omgivende luft. Kopperne blev nu vejet med aftagende intensitet over circa 5 måneder.

Da der havde indstillet sig en ligevægt, blev betonskiverne pillet ud og vejet. Desværre var det svært at få prøveemnerne rene for fugemasse, så vi var nødt til at lægge betonskiverne i petroleum for at fjerne dette. Efter endt rengøring blev prøveemnerne tørret ud ved 105°C i 7 døgn.

#### 5. Resultater

Datablade, beregninger og kurver over de enkelte prøveemners vægttab er vist i bilag B. I bilag C findes kurver over beregningsresultaterne for X(90), X(98), K(90), K(98), Kd(90)

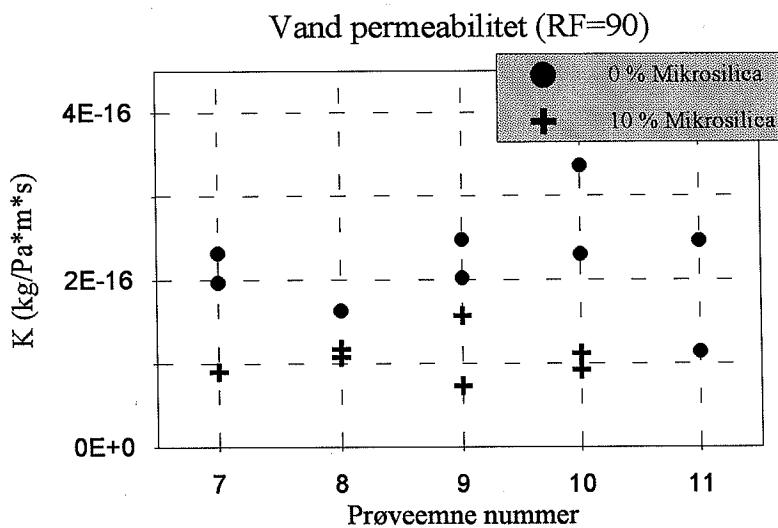
samt Kd(98).

Middelværdi og spredning for alle de beregnede parametre er vist i skema 3 nedenfor:

	Gennemsnit		Spredning	
	0% MS	10% MS	0% MS	10% MS
X(90) [mm]	6,4	3,9	2,8	0,42
X(98) [mm]	6,6	4,1	2,9	0,45
K(90)·10 <sup>16</sup> [kg/Pa*m*s]	2,2	1,1	0,58	0,25
K(98)·10 <sup>16</sup> [kg/Pa*m*s]	8,6	4,3	2,3	1,0
Kd(90)·10 <sup>13</sup> [kg/Pa*m*s]	8,8	2,3	3,1	0,30
Kd(98)·10 <sup>13</sup> [kg/Pa*m*s]	7,8	2,0	2,8	0,27
Porer åben	0,148	0,144	3,3·10 <sup>-3</sup>	5,4·10 <sup>-3</sup>
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	2225	2253	8,6	15,7

Skema 3 - Resultater

Den mest interessante af disse parametre er K(90). Dette begrundes med, at for finporøse betoner, som de her undersøgte, foregår fugttransport for RF>40% næsten alene ved kapillarsugning, se [3]. Kurven for K(90) er vist i figur 3 nedenfor:



**Figur 3** - Kurve for vand-permeabilitetskoefficienten for RF=90%

## 6. Yderligere undersøgelser

Resterne af prøveemnerne er efter forsøgenes start (d. 18/10 1994) blevet opbevaret ved laboratorieatmosfære. Prøverne var tynde skiver (<15 mm), der således i en alder af cirka 5 måneder fik mulighed for at tørre ud i 7 måneder. De et år gamle prøveemner er derefter blev sendt til tyndslisanalyse for at undersøge en hypotese om, at kalkudfældning har lukket de observerede revner.

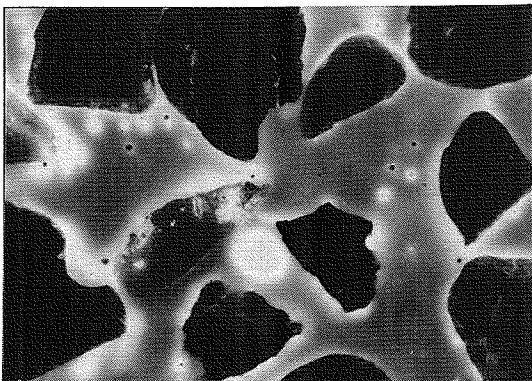
Tyndslisanalysen viste ingen kalkudfældning i betonerne med 10% mikrosilica og kun en ganske svag tendens til kalkudfældning i betonerne uden mikrosilica. Generelt var revnerne helt åbne i begge betontyper. Tyndslibene viste ikke nogen signifikant forskel i mængden af revner i de to betontyper. Der var dog en tendens til forskel i revnemønsteret. I betonerne med 10% mikrosilica er der flere grove revner, der går fra tilslag til tilslag, mens revnerne i betonen uden mikrosilica er finere og fordelt ud i matricen. De grove revner er kommet tidligt og er dem, vi har kunnet observere under eksamensprojektet. De fine revner er kommet senere og er en naturlig følge af hydratisering og efterfølgende selvudtørring af begge typer cementpasta.

## 7. Diskussion

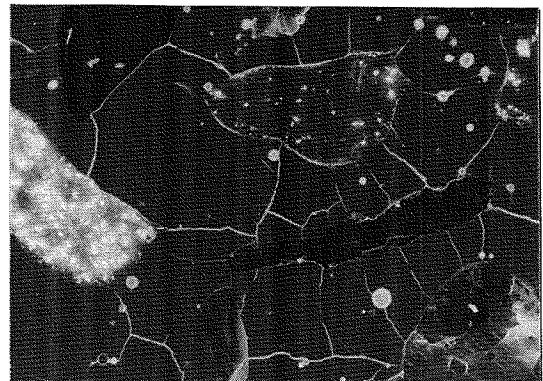
Som det ses af både skema 2 og af figur 3 (og figurerne i bilag C), viser omvendt-kop forsøgene, at mikrosilicabetonerne med revner er tættere end betonerne uden mikrosilica og uden revner. Forskellen på de to typer beton er endda af størrelsen en faktor 2.

Planslib udført på betonerne 14 dage efter udstøbning viser mange revner i betonen med silica, mens der slet ikke er fundet revner i betonen uden mikrosilica, se eksemplerne i figur 4 og 5 nedenfor. Revnevidderne er af størrelsesordenen 0,01 mm. Tyndslib og planslib

udført på betonerne et år efter udstøbning har imidlertid vist langt mindre forskel på revnedannelsen i de to betoner end de nedenfor viste.



**Figur 4** - Eksempel på fotografi af plan-slib på beton uden mikrosilica



**Figur 5** - Eksempel på fotografi af plan-slib på beton med 10% mikrosilica

Resultaterne stemmer ganske godt overens med resultater opnået af Wittmann [7]. Disse resultater viser, at der ikke er nogen sammenhæng mellem revner pga. udtørringssvind og selve udtørningsprocessen. Overfladerevner, der er opstået som følge af udtørringssvind har således ingen eller forsvindende lille effekt på fugttransport i betonen.

Bazant og hans medarbejdere har undersøgt sammenhængen mellem revner og fugttransport, hvor revnerne er dannet ved ydre lastpåvirkning [8]. De dannede revner havde en gennemsnitlig bredde på ca. 0,1 mm. Undersøgelserne viste her en faktor 2,5 på fugttransporten fra det urevnede til det revnede prøveemne. Artiklen fandt dog en væsentlig afhængighed af indsnævringer i revnerne svarende til omkring 1/10 af den målte revnevidde.

Revnernes orientering i betonen har højst sandsynligt stor betydning for deres indflydelse på fugttransporten. Således er revner dannet pga. udtørring og revner dannet ved ydre belastning (som i Bazant's undersøgelser [8]) ikke umiddelbart sammenlignelige. Revner, der er dannet som følge af autogent svind i cementpastaen afviger sikkert også fra overfladerevner dannet pga. udtørring til omgivelserne.

## 8. Konklusion

Forsøgene har vist, at revner som følge af autogent svind i beton tilsat 10% mikrosilica ikke giver anledning til øget fugttransport i forhold til fugttransporten i beton uden revner (og uden mikrosilica). Der er således ikke på dette grundlag belæg for at forkaste beton der er revnet som følge af tilsætning af mikrosilica.

Forsøgene i denne rapport er alene pilotforsøg. Materialet er ikke omfattende nok til en endelig konklusion om tætheden af revnet beton i forhold til beton uden revner. Resultatet er imidlertid i overensstemmelse med lignende forsøg udført af Wittmann og medarbejdere [7].

Pilotforsøgene har ført til interessante resultater, der sætter spørgsmålstege ved frygten for

revner fremkaldt pga. anvendelse af mikrosilica. Før denne frygt kan elimineres helt kræves imidlertid et langt mere omfattende forskningsarbejde, end det her udførte.

## 9. Litteratur

- [1] Dela, Birgitte Friis: "Svindrevner i Højstyrkebeton"  
Tekn.rap. no 333/95, LBM & ABK, DTU 1994
- [2] Thorsen, Torsten: ""Inverted-Cup" Method"  
Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark  
Lyngby, Denmark
- [3] Waldstrøm, Martin og Rosenbom, Kim: "Praktisk og teoretisk udførelse af omvendt-kop metoden", Teknisk rapport 254/91  
LBM, DTH, 1991
- [4] Mullit, Paw: "Brugervejledning til OMVKOP"  
Teknisk rapport 242/91, LBM, DTH, Lyngby, Danmark, 1991
- [5] Herholdt, Aage D. et.al.: "Betonbogen"  
CTO, Aalborg Portland, Danmark, 1985
- [6] Nielsen, Anders: "Fugt i Bygningsmaterialer"  
Teknisk rapport 206/90, LBM, DTH, 1990
- [7] Wittmann, F.H.: "Influence on drying induced damage on the hygral diffusion koefficient", Proceedings of the Second International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures, 1519-1525, vol.2, F.H. Wittmann,ETH, Zürich, Switzerland, 1995
- [8] Bazant, Z.P., Sener, S., and Kim, J.-K.: "Effect of Cracking on Drying Permeability and Diffusivity of Concrete", ACI Materials Journal 84, 351-357

## Bilag B

### Datablade fra forsøget

# Omvendt-kop Registrering

Omvendt-kop Vejeskema							
Prøveemne	Vægt (g)						
	11.00	11.30	11.40	Dato	10.15	9.00	11.00
	18.10.94	19.10.94	21.10.94	24.10.94	27.10.94	31.10.94	
H4	502,76	502,39	502,17	501,48	500,93	500,78	
H6xx	506,13	507,50	507,22	506,56	506,19	506,04	
H7	500,61	500,13 511,33	499,90	499,76	499,62	499,49	
H7x	511,92	511,33	511,09	510,93	510,81	510,68	
H8	490,61	489,99	489,71	489,31	489,00	488,79	
H9	511,81	511,31	511,09	510,93	510,82	510,73	
H9x	520,43	520,10 520,00	519,79	519,62	519,27	518,93	
H10	504,90	504,45	504,24	504,08	503,94	503,78	
H10x	525,46	524,77	524,50	524,32	524,19	524,04	
H11	507,32	506,77	506,28	505,03	504,85	504,66	
H11x	488,02	487,47	487,21	487,08	486,98	486,88	
<u>KONTROLLOD</u>							
START	499,91	499,91	499,90	499,91	499,91	499,90	
SLUT	499,91	499,91	499,91	499,91	499,91	499,91	

**Omvendt-kop**  
**Vejeskema**

Prøveemne	Vægt (g)					
	10 <sup>-2</sup>	11 20	950	Dato 11 <sup>-2</sup>	11 <sup>-2</sup>	11 43
	7-11-94	17-11-94	29-11-94	20-12-94	13-1-95	13-2-95
44	500.55	500.19	499.78	499.15	496.53	494.37
46xx	505.76	505.42	505.07	504.41	503.69	502.97
47	499.22	498.91	498.58	498.00	497.44	496.85
47x	510.43	510.16	509.85	509.33	508.68	507.98
48	488.52	488.27	487.97	487.52	486.98	486.49
49	510.51	510.27	510.01	509.64	509.16	508.69
49x	518.48	518.17	517.86	517.29	516.64	515.96
410	503.49	503.19	502.85	502.30	501.64	501.01
410x	523.77	523.42	523.03	522.42	521.75	521.11
411	504.45	504.26	504.02	503.63	503.19	502.75
411x	486.65	486.41	486.12	485.67	485.14	484.63
KONTROLLOD						
START	499.89	499.92	499.90	499.90	499.91	499.91
SLUT	499.92	499.90	499.91	499.90	499.91	499.91

# Omvendt-kop Vejeskema

# Omvendt-kop Registrering

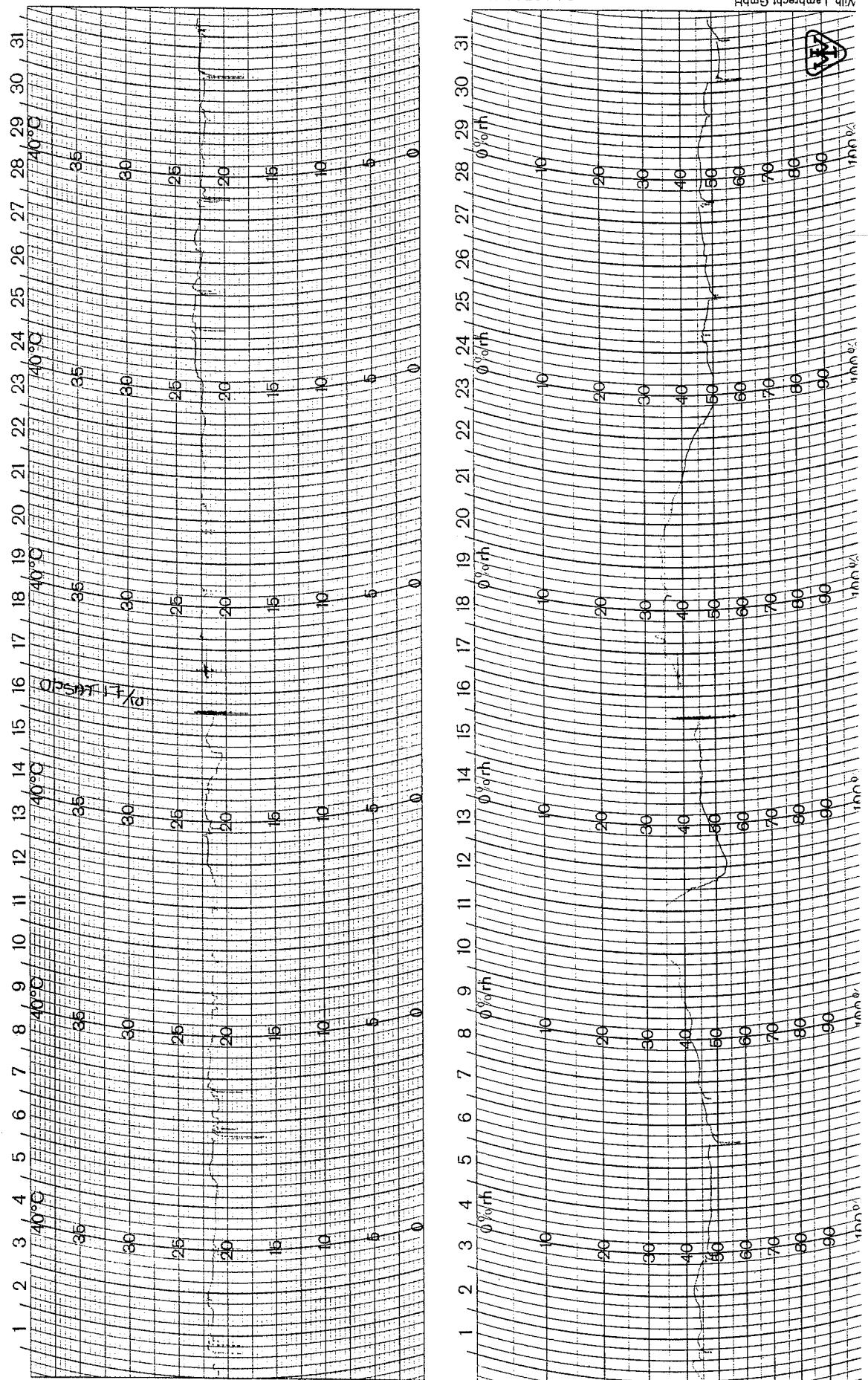
## Omvendt-kop Registrering

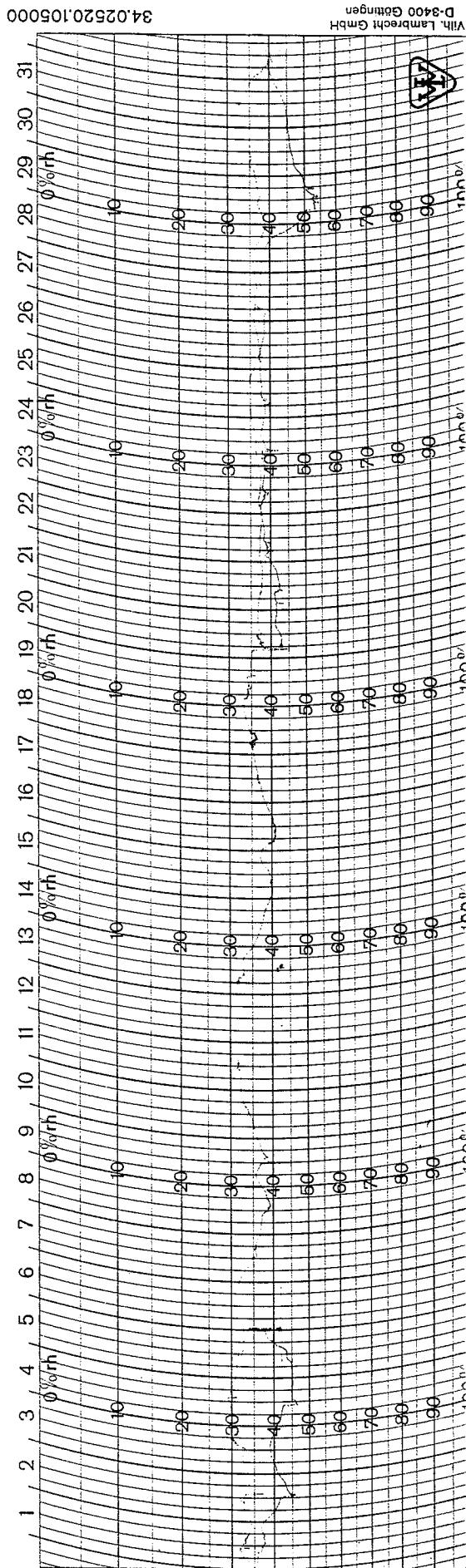
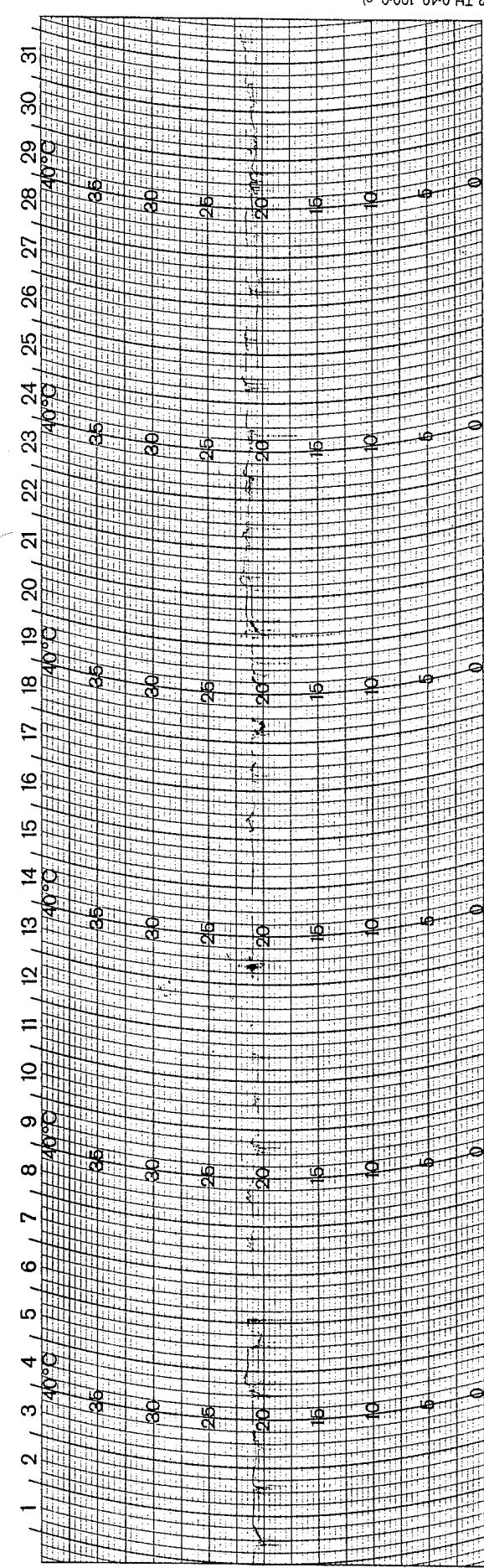
# Omvendt-kop Vejeskema

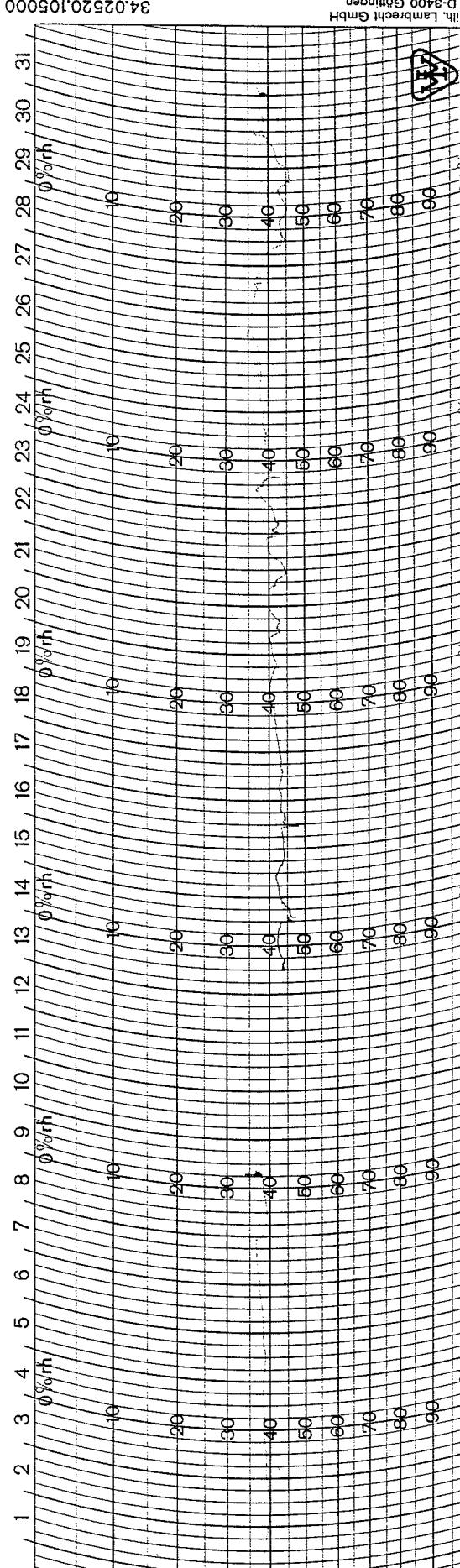
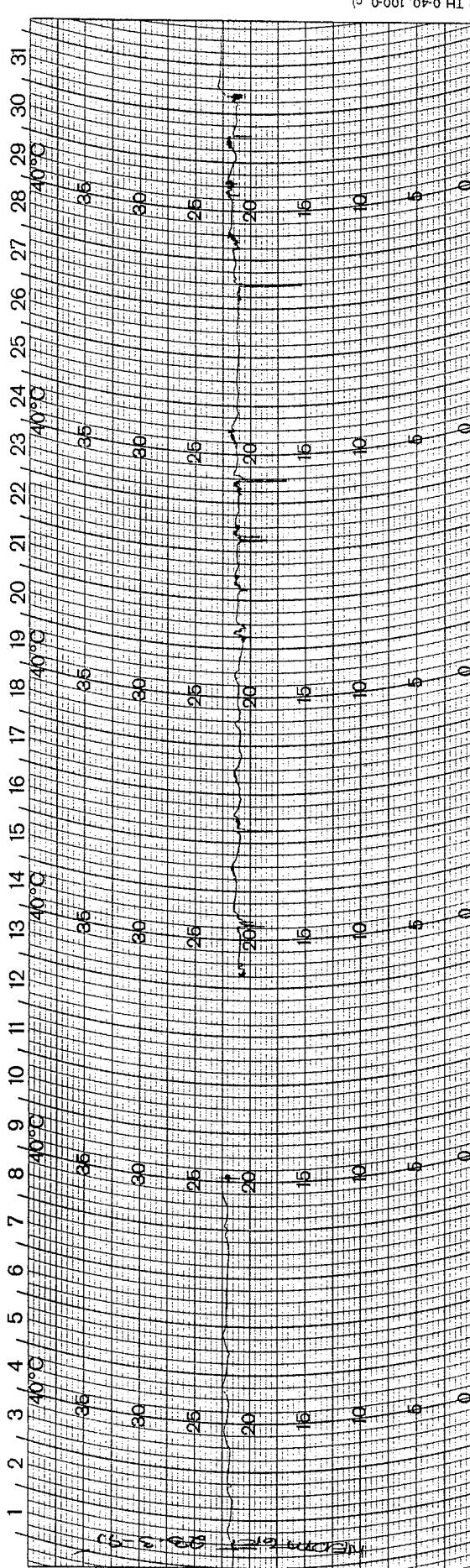
18-10-94

# Omvendt-kop Vejeskema

# Omvendt-kop Vejeskema







## Bilag C

Grafisk illustration af resultaterne

