

Udtørring af beton i byggefasen

Afrapportering af udtørringsforsøg

Claus V. Nielsen og Lars Olsen
Teknologisk Institut

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 FORSØGSPROGRAM	10
1.1 BAGGRUND OG FORMÅL	10
1.1.1 Formål	11
2 MATERIALER OG FORSØGSEMNER	15
2.1 GULVBETONER	15
2.2 LETKLINKERBETON	16
2.3 DENSIT	17
2.4 SAMLET FORSØGSPROGRAM	18
3 SELVUDTØRRINGSFORSØG	19
3.1 FORSØGSMETODE	19
3.2 RESULTATER	20
3.3 SAMMENFATNING	27
4 DESORPTIONSFORSØG	29
4.1 FORSØGSMETODE	29
4.2 RESULTATER	31
4.3 SAMMENFATNING	40
5 MÅLINGER PÅ BETONFLISER	41
5.1 FORSØGSMETODE	41
5.2 RESULTATER	42
5.3 SAMMENFATNING	48
6 REFERENCER	49
6.1 LITTERATURLISTE	49
6.2 DEFINITIONER	50
BILAG	
Bilag A Betonrecepter for gulvbetoner fra Unicon Beton A/S	51
Bilag B Betonrecepter og kontroljournaler fra Expan A/S	57

Forord

Denne rapport er en del af "Produktområdeprojekt vedrørende betonprodukter", som finansieres af Miljøstyrelsen.

Delprojektet "Udtørring af beton i byggefasen" er gennemført med aktiv deltagelse fra:

- Betonelement- og færdigbetonindustrien, som har leveret prøveemner. Unicon Beton A/S, 4K-Beton A/S og Expan A/S.
- Densit A/S har leveret forsøgsmateriale og prøveemner.
- NCC A/S har medvirket som repræsentant for de udførende.
- Gulvbranchens Samarbejds- og Oplysningsråd (GSO) har medvirket på vegne af gulvbranchen.

Den brede industrideltagelse har sikret at alle relevante emner er berørt samt, at delprojektets overordnede formål er fulgt.

Under produktion af beton tilsættes cement, vand og tilslag i et bestemt forhold. En del af vandet forbruges under den kemiske hydratiseringsproces, hvor betonen hærdner og opnår styrke og stivhed. Den resterende del af vandet vil forblive i betonens porer som fysisk vand og afhængig af omgivelsernes relative fugtighed og temperatur vil en del af dette vand langsomt tabes til omgivelserne.

I byggefasen er det vigtigt at fugtindholdet i betonen ikke overskrider visse grænser inden betonkonstruktionerne færdigbehandles med gulv- og flisebelægning, maling, etc. Hvis fugtigheden i betonen er for høj når færdigbehandlingen udføres er der risiko for, at limen eller malingen delaminerer, løse eller nedfaldne fliser samt svindrevner. Desuden kan der opstå indeklimaproblemer på sigt. Derfor er det vigtigt, at fugten nedbringes til et fornuftigt niveau i byggefasen.

Udtørring af beton er per definition tidskrævende og ofte er der behov for forceret udtørring, hvis byggeriets tidsplan er stram og flere entreprenører afhænger af hinandens fremdrift. Forceret udtørring kræver energi til opvarmning, ventilation, affugtning, etc. primært i form af elektricitet. Hovedformålet med delprojektet er at nedbringe energibehovet til udtørring og i øvrigt at skabe bedre fokus på hele udtørningsproblematikken på tværs af de forskellige aktører i betonbyggeri.

Der er bred enighed om at en fornuftig planlægning af udtørningsbehovet er nøglen til en energibesparelse. For at kunne planlægge kræves det, at der findes en plausibel model for betons udtørningsmæssige egenskaber så udtørningsforløbet kan forudsiges med en vis nøjagtighed. Denne rapport er et forsøg på at danne grundlag for en model, der kan beskrive udtørring af danske betoner, herunder også letklinkerbeton til vægge.

Det skal dog holdes for øje, at forsøgsprogrammet, som er indeholdt i nærværende undersøgelse, højst kan opfattes som et indledende arbejde, der afdækker visse vigtige mekanismer og sammenhænge. Generelt må det siges at

der forsat er behov for yderligere eksperimentelle undersøgelser for at beskrive udtørring af beton.

Sammenfatning og konklusioner

Der er gennemført et forsøgsprogram med det formål at belyse og kortlægge de udtørningsmæssige egenskaber af typiske danske betontyper til gulve og vægge. Forsøgsprogrammet er gennemført hos Teknologisk Institut og prøveemner er leveret af projektets industrideltagere.

Forsøgene omfatter:

- A. Selvudtørningsforsøg udført på 2 sætmålsbetoner og Densit.
- B. Desorptionsforsøg udført på 4 sætmålsbetoner og 2 letklinkerbetoner.
- C. Udtørring af udstøbte fliser under kontrollerede klimabetingelser udført på betoner svarende til B.

Grunden til at forsøgene er medtaget i Miljøstyrelsens Produktområdeprojekt er en tidlig erkendelse af, at den bedste måde at effektivisere energiforbruget under udtørring af beton på byggepladsen er ved at tilvejebringe viden på området. Dermed gøres entreprenører og rådgivere i stand til at vurdere og planlægge behovet for udtørring så tidligt som muligt i byggeprocessen og dermed undgå dyre hovsa-løsninger og forceringer undervejs.

Der findes ikke umiddelbart noget stort datagrundlag på området baseret på danske materialer og derfor skal dette forsøgsprogram ses som et pilotforsøg til at bane vejen for yderligere forsøg. De forsøgsdata som findes er enten meget gamle eller udført udenfor Danmark. Erfaringerne fra forsøgsprogrammet vil blive indarbejdet i den vejledning som udarbejdes under projektet.

Hver af de ovennævnte forsøgstyper er beskrevet i de følgende kapitler og hvert kapitel afsluttes af en sammenfatning. Alle disse sammenfatninger skal ikke gentages her, men de væsentligste lyder:

- De klimadata som benyttes for danske forhold kunne med fordel differentieres. Det er vist hvordan referencetallene for relativ fugtighed fra SBI er rigeligt på den sikre side især for indenlandske lokaliteter. Det er disse klimadata som ligger til grund for en modellering af betons udtørring.
- Selvudtørring er en effekt som bør medtages når udtørningsbehovet vurderes. Selvudtørring er registreret både for konventionelle gulvbetoner og for en højkvalitetsbeton med $v/c = 0,40$. I sidstnævnte tilfælde kan selvudtørringen alene medføre, at RF falder under 85 % uden at der tabes fugt til omgivelserne.
- Denne selvudtørringseffekt medfører at med et lavt vand/cement tal (omkring 0,40) kan betonen udtørres meget hurtigt sammenlignet med konventionelle betoner. Samtidig opnås en hurtig og høj styrkeudvikling som evt. kan udnyttes til at reducere gulvtykkelsen.

- En anden gunstig ting som er dokumenteret for den selvudtørrende beton er, at den trods sin større tæthed ikke udtørres langsommere end konventionelle betoner som traditionelt anses for mere porøse og dermed nemmere at udtørre.
- Udtørningsforløb målt på en 100 mm gulvplade under kontrollerede klimabetingelser er sammenlignet med beregninger udført med det udbredte svenske program TorkaS. Beregningerne viser et meget langsommere udtørningsforløb end hvad der observeres i forsøgene. Dette indikerer at programmet ikke er kalibreret til danske materialer.
- Der er etableret desorptionskurver for letklinkerbeton (LAC 10/1550 og 10/1850) og der er foretaget udtørningsmålinger på et vægudsnit for at kvantificere sammenhæng mellem relativ fugtighed og det absolutte fugtindhold. Det er verificeret at de erfaringsmæssige fugtgrænser som benyttes for letklinkervægge er i overensstemmelse med måleresultaterne.

Endeligt skal det nævnes at de prøvningsmetoder som er benyttet i forsøgsprogrammet har udvist både styrker og svagheder. Selvudtørningsforsøgene er udført med en metode som sikrer konsistente resultater og endvidere er der tale om en ganske simpel prøvningsmetode. Desorptionsforsøgene kræver en vis videreudvikling for at give pålidelige resultater. Denne videreudvikling ligger udenfor dette projekts afgrænsning. Udtørningsforsøg med spande har vist sig at være en simpel og operationel metode til at fremskaffe udtørningsresultater indenfor en kort tidshorisont.

Summary and conclusions

The Danish Technological Institute has carried out a test programme with the purpose of clarifying the mechanisms and parameters involved in drying of concrete used in Denmark for floor slabs and walls. The test specimens were supplied from the industrial partners of the project.

The test programme comprised:

- A. Self-desiccation measured on 2 concretes and Densit matrix.
- B. Desorption tests on 4 concretes and 2 lightweight aggregates concretes (LAC).
- C. Drying of cast slabs under controlled climatic conditions.

The test programme is a part of a series of concrete projects financed by the Danish Environmental Protection Agency. The scope of the drying project was to focus on the excessive energy consumption taking place at building sites in order to dry-out concrete prior to other treatments (wooden floor, non-permeable floor coverings, etc.). The best way to act more environmentally friendly on the building site is to provide knowledge to engineers so that they are able to predict and plan the building process with respect to the drying needs of concrete. This test series is a vital part of this knowledge. Another part is a set of Guidelines for drying of concrete that are also to be published under this project.

It should be noted that there is a limited number of test results, a factor which must be taken into consideration when reviewing the conclusions reached.

The most interesting conclusions of the investigation are:

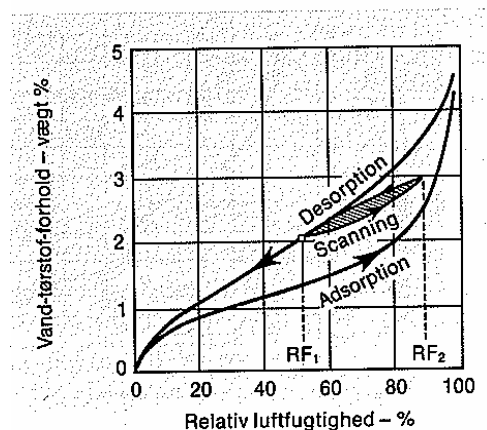
- Using a low v/c ratio of about 0.40 makes it possible to utilise the self-desiccation (drying-out by means of hydration) of concrete to speed up the drying process. It was documented that this is a way to obtain a significant improvement in drying times compared with conventional concretes for floor slabs.
- Desorption curves were established for Danish concretes and LAC. They were shown to be consistent with other published findings in this area.
- The application of the Swedish software TorkaS was compared with results on Danish concretes and it turned out to yield very conservative results when it came to drying times of concrete for a floor slab. Therefore, it is recommended that more data should be collected so that the simulation software may be calibrated properly.

1 Forsøgsprogram

1.1 Baggrund og formål

Beton er et hygroskopisk materiale, som forsøger at komme i fugtligevægt med de omgivelser det befinder sig i. Omgivelsernes tilstand beskrives af luftens temperatur og relative fugtighed (RF). Ved et givet fugtindhold kan betonens ligevægtstilstand beskrives vha. såkaldte sorptionskurver, som angiver sammenhængen mellem RF og fugtindholdet. Adsorptionskurven beskriver ligevægten under opfugtning og desorptionskurven under affugtning (

Figur 1.1). Detaljerne omkring betons fugtmekanik skal ikke gengives her – der henvises til Betonbogen (1985), afsnit 3.4.



Figur 1.1 Principielt udseende af sorptionskurver. Taget fra Betonbogen (1985), p. 170.

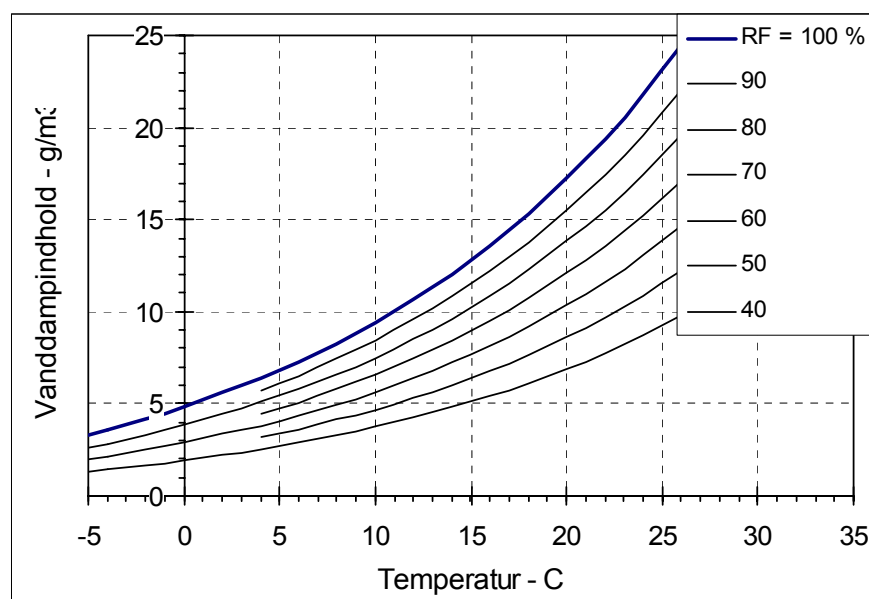
Foruden sorptionskurverne er også transportkoefficienten væsentlig, idet den indikerer hastigheden, hvormed fugt transporteres igennem betonen. Transportkoefficienten beskriver hvor meget fugt der transporteres gennem materialet ved en given potentialeforskel (vandindhold eller damptryk). Ud fra en kendt fastholdt forskel i damptryk eller fugtindhold igennem en betonskive kan transporten måles vha. den såkaldte kopmetode. Det er imidlertid også kendt, at disse koefficienter er behæftet med stor variation og at bestemmelsen kræver mange gentagelser for at kunne give et troværdigt resultat. Derfor er denne bestemmelse ikke foretaget i nærværende forsøgsserie.

Transportkoefficienten er målt indirekte gennem de en-dimensionelle udtørningsforsøg.

Det er almindeligt kendt at man i Sverige har fokuseret langt mere på betons fugtmekanik end i Danmark gennem de sidste årtier. Mange af de svenske anstrengelser og erfaringer er samlet under det såkaldte Fuktcentrum¹ på Lunds Tekniske Højskole.

Udtørring af beton til omgivelserne bestemmes altså af potentialeforskellen mellem betonen og omgivelserne (fx udtrykt i trykforskel eller fugtindholdsfor-skel). Sorptionskurven giver den relative fugtighed i betonens porer ud fra et givet fugtindhold. Den relative fugtighed af den omgivende luft afhænger af dens temperatur og fugtindhold (Figur 1.2). På grænsefladen mellem beton og luft vil man typisk antage at have forhold svarende til luftens relative fugtighed.

Figur 1.3 indeholder data for årstidsvariationen af luftens fugtighed i Danmark, stammende dels fra meteorologiske data indsamlet på to danske lokaliteter og dels fra SBI (1993). Figur 1.3 indeholder desuden variationen i indendørsluftens fugtindhold. Det ses at SBI's referencedata stemmer meget godt overens med målingerne for en kystlokalitet, mens fugtigheden for indlandslokaliteten ligger betydeligt lavere især i sommerhalvåret.



Figur 1.2 Sammenhæng mellem temperaturen af atmosfærisk luft og dens fugtindhold i g/m³ ved forskellige værdier af RF. Dugpunktstemperaturen findes for en given kombination af temperatur og RF ved at flytte punktet vandret til venstre indtil linien med RF = 100 % nås.

1.1.1 Formål

Formålet med laboratorieundersøgelsen er at kvantificere de vigtigste udtørringsegenskaber for typiske danske betontyper til gulvstøbninger samt letklinkerbeton. Dette gøres i erkendelse af, at tilgængelige fugtmekaniske data

¹ Kan findes under www.Fuktcentrum.LTH.se, hvor diverse rapporter kan downloades og referencerne på området er samlet. Desuden kan softwareprogrammet TorkaS downloades herfra.

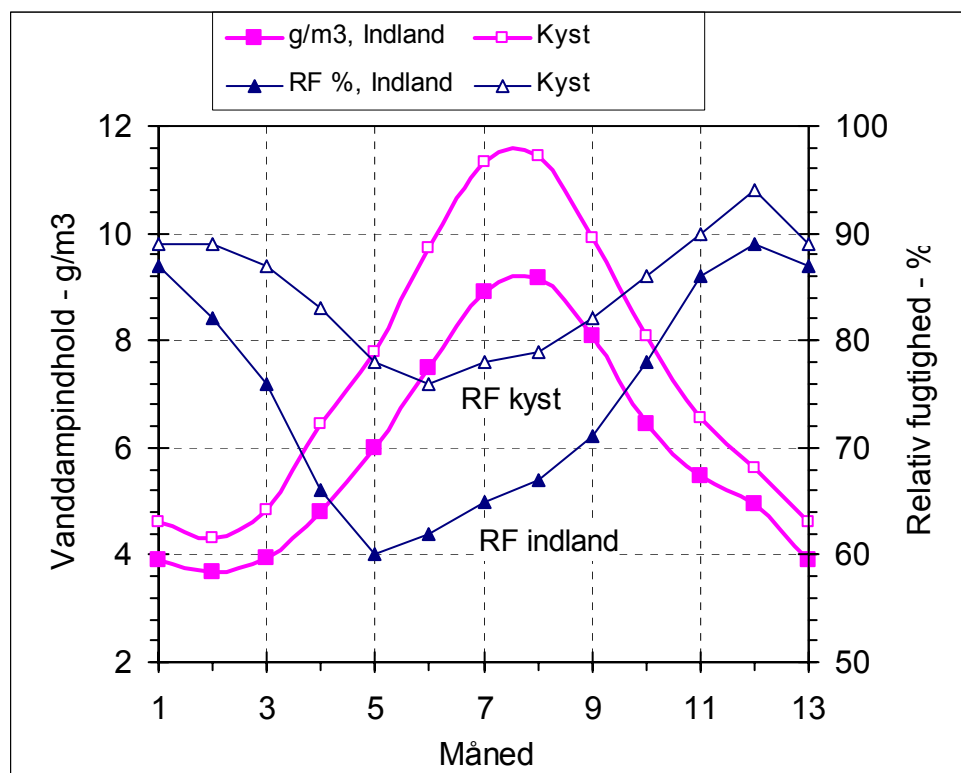
er mangelfulde i Danmark og at sådanne data er nødvendige for at kunne forudsige/planlægge/optimere udtørningsforløbet under byggefasen.

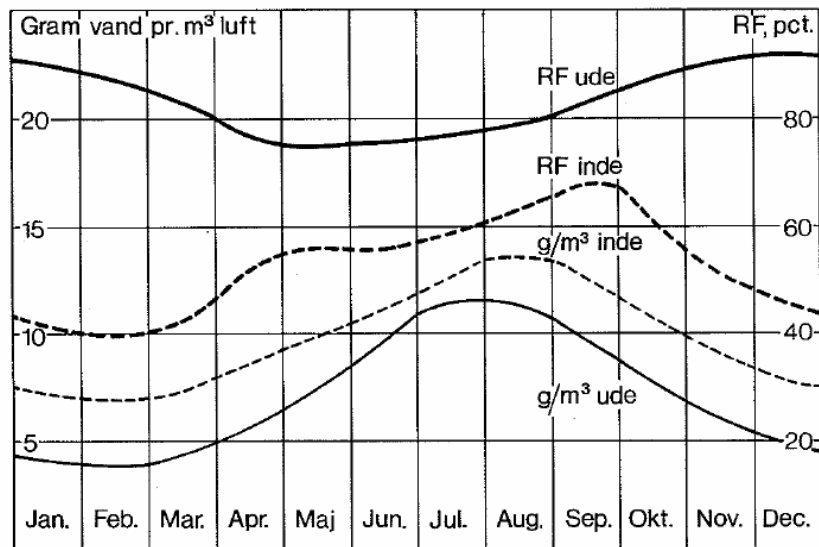
Forsøgsprogrammet omfatter:

- A. Selvudtørningsforsøg udført på 2 sætmålsbetoner og Densit.
- B. Desorptionsforsøg udført på 4 sætmålsbetoner og 2 letklinkerbetoner.
- C. En-dimensionel udtørring under kontrollerede klimabetingelser udført på betoner svarende til B.

I Kapitel 2 findes en gennemgang af de betoner, som er udvalgt til forsøgene samt de benyttede prøveemner. Derpå følger en beskrivelse af hvert enkelt forsøg med resultaterne angivet i de efterfølgende kapitler.

Bemærk at forsøgene må betegnes som pilotforsøg, idet forsøgsomfanget langt fra er dækkende for at kunne beskrive materialernes fugtmekaniske egenskaber. Der er for eksempel ikke foretaget gentagelser af hvert forsøg og forsøgsusikkerheden er dermed ikke kortlagt. Dette betyder at forsøgsresultaterne skal benyttes med stor forsigtighed og det er vores håb at der på sigt vil komme flere danske data til.





Figur 1.3 Øverst: Typisk årstidsvariation i Danmark ved kysten (åbne symboler) og indland (fyldte symboler). Data fra Vejr2 A/S er målt for en lokalitet på hhv. Fanø og Tylstrup i Nordjylland.
 Nederst: Årsvariation for Danmark i henhold til SBI (1993).

2 Materialer og forsøgsemner

Først gennemgås de betontyper, som er udvalgt i delprojektets arbejdsgruppe til at være repræsentative for de anvendelser som delprojektet omhandler. Derefter beskrives prøveemnerne og deres konditionering. Selve forsøgsmetoden er beskrevet i de følgende kapitler under de respektive forsøgstyper.

2.1 Gulvbetoner

For at dække projektafgrænsningen til gulvbeton beregnet til efterfølgende gulvbelægning (trægulve, elastiske gulvbelægninger, tætte belægninger, etc.) arbejdes der udelukkende med delmaterialer til beton i passiv miljøklasse. Det vil sige beregnet til indendørs gulve og terrændæk til bolig, kontor, butikker, o.l.

Der er udvalgt følgende betontyper til forsøgsprogrammet:

1. P20 baseret på ren cement binder
2. P20 baseret på 3-pulver binder (cement, flyve aske og mikrosilika)
3. P20 som 2, men med SCC egenskaber
4. P40 baseret på 3-pulver binder

Tabel 2.1 indeholder betonsammensætningen for de 4 betontyper. Prøveemnerne blev støbt på Unicon Beton A/S i Hedehusene den 23. februar 2005. Betontyperne 1, 2 og 4 er konventionelle sætmålsbetoner med et tilstræbt sætmål på 120 mm. Betontype 3 er i modsætning hertil selvkomprimerende² og dermed meget mere flydende i den friske tilstand. Denne forskel er illustreret ved, at SCC-betonens bearbejdelse er et udbredelsesmål i stedet for sætmål. Det forventes at SCC vil øge sin markedsandel betydeligt i de kommende år så derfor er denne type medtaget i forsøgsprogrammet.

P20 betonerne har et ækvivalent v/c forhold på omkring 0,65, idet der til passiv miljøklasse ikke stilles krav hertil. P40 derimod er en beton med et tilstræbt v/c forhold på 0,40 (svarende til aggressiv miljøklasse) som er medtaget primært for at vurdere effekten af selvudtørring.

² Betegnes SCC efter det engelske navn Self-Compacting Concrete.

Tabel 2.1 Betonrecepter for gulvbetoner. Alle værdier i kg/m³ undtaget de tre nederste rækker. Data taget fra kontrolattesterne fra Unicon Beton A/S (Bilag A).

Betontype	1 P20 Ren cement	2 P20 3-pulver	3 P20 SCC	4 P40 3-pulver
Cement, Rapid ^a	277	171	163	281
Flyve aske (E-mineral B4)	0	60	80	53
Mikrosilika B104	0	12	11	17
Vand ^b	171	151	155	135
Conplast 316 AEA	0	0,86	0,97	0,93
Conplast 212	1,61	1,41	1,21	2,00
Superplast Structuro A1510	0	0	2,2	1,42
Sand, 0-4 mm	822 ^c	832 ^c	835 ^d	691 ^e
Sten ^f 4-16 mm	1055	1051	1009	1113
I alt	2326	2279	2257	2294
Ækv. v/c	0,62	0,67	0,69	0,39
Luftindhold	2,6 %	4,6 %	5,4 %	6,5 %
Sætmål	190 mm	110 mm	-	110 mm
Udbredelsesmål	-	-	410 mm	-

Noter: a) CEM I 52,5 fra Aalborg Portland A/S. b) Inkluderer fugt i tilslag og tilsætningsstoffer.

c) Svogerslev type I. d) 50 % Svogerslev og 50 % Avedøre. e) Avedøre.

f) Karlshamn granit.

2.2 Letklinkerbeton

Letklinkerbeton anvendes overvejende til vægelementer med og uden stålarmring. Tilslaget i letklinkerbeton består delvist af brændte letklinker i fraktionen 0-4 mm. Dertil kommer naturligt sand. Sættningen af tilslaget bestemmer hvilken densitetsklasse letbetonen tilhører. De to letklinkerbetoner som er undersøgt i delprojektet er:

5. LAC 10/1550
6. LAC 10/1850

Det første tal i betegnelsen angiver styrkeklassen i MPa og det andet densitetsklassen (angivet ved tørdensiteten i kg/m³). Kvalitet LAC 10/1550 er støbt på Expan's fabrik i Ølsted og LAC 10/1850 er støbt i Linå.

Tabel 2.2 Betonrecepter for letklinkerbeton. Alle værdier i kg/m³ undtaget hvor angivet anderledes. Data oplyst fra Expan A/S.

Betontype	5 LAC 10/1550	6 LAC 10/1850
Cement, Basis ^a	205	240
Flyve aske (E-mineral B4)	30	20
Vand	165	118
Sikament 92	1,4	1,5
Sand ^b , 0-4 mm	890	1550
Letklinker ^c 0-4 mm	275	105

Noter: a) CEM II/A-LL 52,5R fra Aalborg Portland A/S. b) Sinding, kl. E.
c) Fibro knækkede.

2.3 Densit

Densit dækker over en række cementbaserede materialer med ekstrem høj styrke og tæthed, som blev udviklet hos Aalborg Portland A/S i 1970'erne. Densit benyttes bl.a. som top lag på gulve i hårdt belastede og aggressive omgivelser. I denne undersøgelse er produktet Densitop[®] MT benyttet. Dette produkt leveres som færdigblandet tørt mørtel (cement, mikrosilica og sand samt dispergerende, svindkompenserende og accelererende tilsætningsstoffer). Produktet blandes med vand i forholdet 1,8 liter vand til 25 kg tørt mørtel. Dette giver en ekstrem stærk mørtel med et vand/bindemiddel forhold på 0,25.

Densit prøveemnerne blev støbt hos Densit A/S i Aalborg den 2. marts 2005 og efterfølgende transporteret til Teknologisk Institut.

2.4 Samlet forsøgsprogram

Betontyperne er udsat for de forskellige forsøgstyper som angivet i Tabel 2.3. Alle prøveemner er udtørret i klimakammer hos Teknologisk Institut under 50 % RF og 20 °C undtaget selvudtørningsforsøgene.

Tabel 2.3 Kombination af forsøg og anvendte betontyper.

Betontype Forsøg	1 P20	2 P20	3 P20 SCC	4 P40	5 LAC 10/1550	6 LAC 10/1850	7 Densitop MT
A	-	X	-	X	-	-	X
B	X	X	X	X	X	X	-
C	X	X	X	X	X	X	X
	Prøveemner						
A ^a	ø100x200 mm				-	-	ø45x90 mm
B	ø150x300 mm udsavet i ca. 25 mm tykke skiver ^b				120x120x50 mm udsavet af vægelement ^c		-
C	100 mm tykkelse udstøbt i 10 liters plastspand ^d 2 spande pr. betontype				500x500x120 mm udsavet af vægelement ^e 2 fliser pr. beton		10 mm toplag på 2 P20 ^f

Noter: a) Afformet efter 1 dag og placeret i forseglede pvc-rør indtil prøvning. Lagring i laboratorium.

b) Afformet efter 1 dag og indpakket i plastik. Hver cylinder udsaves i 7-8 skiver efter ca. 14 dages lagring i laboratoriet. Straks herefter vejes skiverne og placeres i klimakammer.

c) Udsaves hhv. 12 og 6 dage efter støbning hos Expan i Brørup. Indpakkes dernæst i plastik og sendes til Teknologisk Institut. Vejes og placeres i klimakammer ca. 2½ uge efter støbning.

d) Plastspanden forsegles med plastlæg og opbevares i laboratorium i 5 uger efter støbning. Herefter fjernes låget og emnet placeres i klimakammeret udsat for ensidig udtørring.

e) Udsavning og transport til Teknologisk Institut som under c). Emnerne forbliver indpakket i plastik i laboratoriet indtil de placeres i klimakammeret samtidigt med spandene under d). På dette tidspunkt er emnerne 4 - 4½ uge.

f) Der udstøbes et 10 mm toplag af Densitop på den spand indeholdende P20 3-pulver beton. Udstøbning foretages umiddelbart inden spanden placeres i klimakammer.

3 Selvudtørningsforsøg

Selvudtørring foregår i et vist omfang for alle betoner og dækker over det fænomen, hvor hydratiseringen medvirker til at sænke fugtindholdet. Selvudtørringen er stærkest ved lave v/c forhold pga. den finporøse struktur og tilstedeværelsen af mikrosilika er også kendt for at forstærke selvudtørringen. Selvudtørring foregår altså selvom betonen er forseglet og ikke kan udveksle fugt med omgivelserne. Selvudtørringseffekten er imidlertid mest markant for højkvalitetsbeton med tilpas lave v/c forhold typisk af størrelsesorden 0,4 og lavere. Baggrunden for selvudtørring og autogent svind for højkvalitetsbetoner med forskelligt indhold af mikrosilika er detaljeret beskrevet i Mejlhede Jensen (2005). Disse højkvalitetsbetoner (eller mørtler) er i øvrigt nært beslægtede med Densit.

Under hydratiseringen bindes en del af blandevandet kemisk i cementgel og andre komponenter. Rent cementkemisk kan det påvises, at mængden af kemisk bundet vand er ca. $\frac{1}{4}$ gange den hydratiserede cementmængde. Ved lave v/c forhold vil cementen ikke hydratiseres fuldstændigt og mængden af hydratiseret cement i forhold til den totale cementmængde betegnes ofte hydratiseringsgraden α . For v/c = 0,4 er $\alpha = 0,7-0,8$ og for v/c > 0,6 nærmer hydratiseringsgraden sig 1.

Der findes tidligere bestemmelser af selvudtørringen. I et dansk-svensk Nordtest projekt (Hansen, Hansen & Persson, 1998) blev selvudtørringen bestemt i form af RF efter forseglet lagring meget lig den metode der er anvendt i nærværende undersøgelse. Undersøgelsen indeholder både svenske og danske betoner med v/c forhold fra 0,30 til 0,50. Betonerne er imidlertid ikke særligt repræsentative for anvendte betoner i byggeriet og de danske betoner indeholder således 500-600 kg cement pr. m^3 plus flyveaske og mikrosilika. Dette gør det svært at anvende resultaterne i praksis. Selvudtørringen er udelukkende bestemt efter 28 døgns lagring.

I en ny svensk undersøgelse er selvudtørringen også målt (Johansson, 2005). Denne undersøgelse vurderer indflydelsen fra cementtype og v/c forhold. Der måles udelukkende RF til forskellige terminer og udelukkende på mørtelprøveemner forseglet i metalspande.

Resultaterne fra begge ovennævnte undersøgelser vil blive sammenlignet med resultaterne fra nærværende forsøgsserie i det følgende.

3.1 Forsøgsmetode

Prøvningen foregår ved at åbne et pvc-rør indeholdende 3 cylinder prøveemner til en given prøvningstermin. Emnerne vejes og måles, hvorefter de knuses i en trykpresse. Trykstyrken noteres og de knuste rester fordeles i en foliebakke som placeres i udtørringsovn og i et reagensglas som derefter tilsluttes en relativ fugtighedsmåler af typen Novasima.

Ovntørringen foregår ved 105 °C indtil alt fysisk vand er fordampet. Via den våde og tørre vejning kan fugtindholdet bestemmes ud fra:

$$u = \frac{m_{v\ddot{a}d} - m_{t\ddot{o}r}}{m_{t\ddot{o}r}}$$

Denne størrelse kaldes også for fugtbrøken og angives som vægt-%.

I Novasima fugtighedsmålerne registreres RF og efter et par dages forløb er reagensglassets indhold i ligevægt og RF aflæses. Fugtighedsmålerne i laboratoriet hos Teknologisk Institut aflæses kontinuert via en datalogger.

3.2 Resultater

Generelt er forsøgsspredningen fundet at være indenfor de grænser man normalt antager for tilfredsstillende når der udføres laboratorieforsøg med beton. Alle resultater er angivet i Tabel 3.1 og i Figur 3.1 og Figur 3.2 er de målte enkeltværdier afbilledet som en funktion af prøvningsterminen.

For at vurdere pvc-rørens forseglingssevne blev cylindrene vejede umiddelbart inden forseglingen og forud for hver prøvning blev de vejede på ny. Vægttabet under de første 7 døgn androg omkring 2 % for P20 og under 0,5 % for de to øvrige betontyper. Efter den første uge er der ikke registreret noget yderligere vægttab. Dette vurderes at være tilstrækkeligt effektivt til at sikre, at kun selvudtørringen registreres under forsøgene. Den sidste registrering sker, når prøveemner er godt og vel ½ år gamle.

Densit

For Densit emnerne ses den relative fugtighed at synke til 80 % allerede efter 7 døgn og yderligere til 70 % efter nogen ugers yderligere lagring (Figur 3.1). Dette skyldes den ekstremt finporøse struktur af dette højstyrkemateriale og effekten af det høje mikrosilikaindhold. Dette er i overensstemmelse med Hansen, Hansen & Persson, (1998), hvor et RF-niveau på 70 % kræver et v/c forhold på under 0,20. Som det kunne forventes har Densit en selvudtørringseffekt, der gør, at udtørringsproblematikken sjældent er aktuel for dette materiale.

Gulvbeton

For P20 og P40 falder RF med alderen (Figur 3.1).

Ud fra kendskabet til betonrecepten kan mængden af fordampeligt vand estimeres ved at fratække det i hydratiseringen kemisk bundne vand fra blandevandet:

$$w_{\text{fys}} = W - C/4 = (151 - 1,0 \cdot 0,25 \cdot 171) \text{ kg/m}^3 = 108 \text{ kg/m}^3 \text{ for P20}$$

$$w_{\text{fys}} = (135 - 0,7 \cdot 0,25 \cdot 281) \text{ kg/m}^3 = 86 \text{ kg/m}^3 \text{ for P40}$$

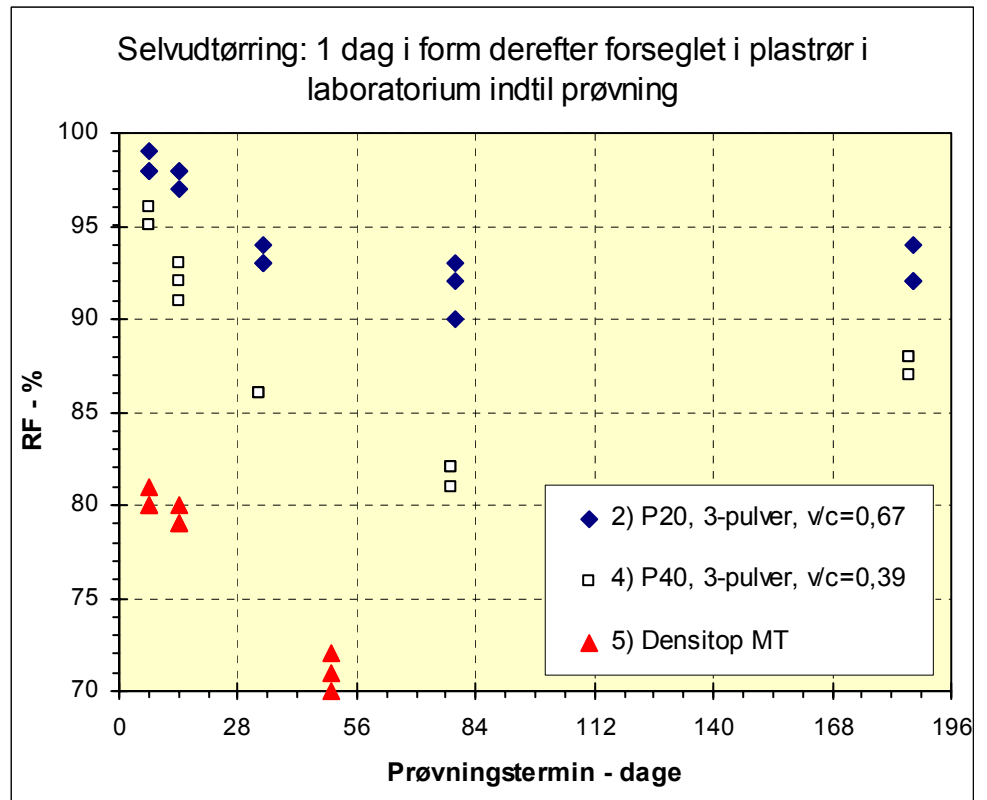
hvor faktor 1,0 og 0,7 er de forudsatte hydratiseringsgrader for hhv. P20 og P40. Bemærk at kun det rene cementindhold medregnes i det kemisk bundne vand og altså ikke det ækvivalente cementindhold med bidrag fra flyveaske og mikrosilika. Dette skyldes at disse materialer ikke reagerer direkte med vandet, men med den calciumhydroxid, som er dannet under cementens hydratiseringsproces (Mejlhede Jensen, 2005).

Hvis ovenstående vandindhold divideres med en gennemsnitlig tørdensitet for begge betoner (fundet til ca. 2190 kg/m³) fås fugtbrøken til hhv. 4,9 og 3,9 % for P20 og P40. Dette svarer altså til det teoretiske fugtindhold efter at hydratiseringen har fundet sted. Sammenholdes disse værdier med målingerne

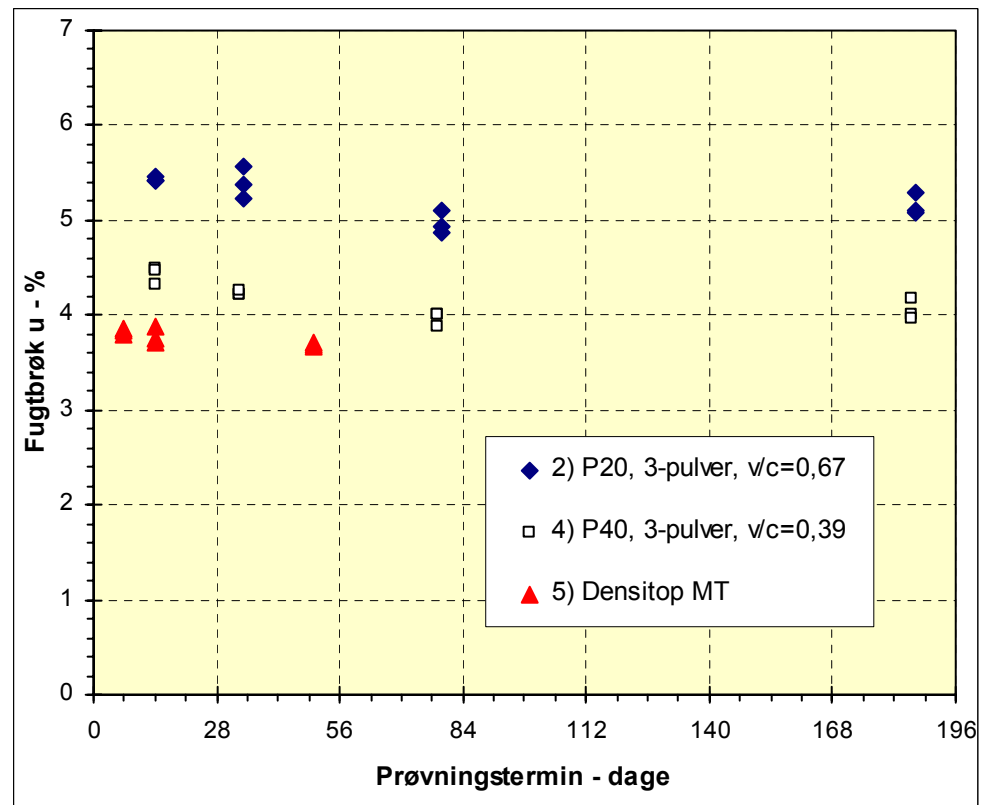
i Figur 3.1b fås en god overensstemmelse. Det ses endvidere, at det kemisk bundne vand i overvejende grad er opbrugt allerede indenfor den første uge. Der foregår imidlertid stadig et markant fald i den relative fugtighed i de følgende uger indtil 3 måneders alderen, hvilket forklares med, at hydratiseringen stadig foregår i denne periode og porestrukturen færdigudvikles. Dette ses også af styrkeudviklingen (Figur 3.2).

Tabel 3.1 Selvudtørringsresultater. Fugtbrøken for P20 og P40 er blevet fejlbestemt ved 7 døgnns terminen og er udeladt af beregningerne. Trykstyrker er målt på ø100x200 mm cylindre. Der er ikke foretaget korrigering til standardcylinderstørrelse. Korrektionsfaktoren svarer til en faktor 0,95 på trykstyrkerne nedenfor.

Termin døgn	Relativ fugtighed RF %	Fugtbrøk u %	Trykstyrke MPa
P20 3-pulver			
7	99	-	21,0
	98	-	20,7
	98	-	21,6
14	98	5,4	28,6
	98	5,5	29,2
	97	5,4	29,6
34	93	5,4	39,0
	93	5,6	39,0
	94	5,2	38,4
79	93	5,1	46,7
	92	4,9	46,5
	90	4,9	46,0
187	92	5,1	50,2
	92	5,3	42,0
	94	5,1	52,5
P40 3-pulver			
7	95	-	36,3
	95	-	41,6
	96	-	38,0
14	92	4,5	49,2
	93	4,5	49,6
	91	4,3	50,5
33	86	4,2	55,5
	86	4,2	60,2
	86	4,3	57,1
78	82	4,0	66,5
	82	3,9	62,6
	81	4,0	64,9
186	88	4,0	61,4
	87	4,2	68,0
	88	4,0	71,6
Densitop MT			
7	80	3,8	78,3
	80	3,8	83,8
	81	3,9	75,6
14	79	3,9	111,6
	79	3,7	112,6
	80	3,8	109,0
50	72	3,7	133,4
	70	3,7	126,5
	71	3,7	131,0



a)

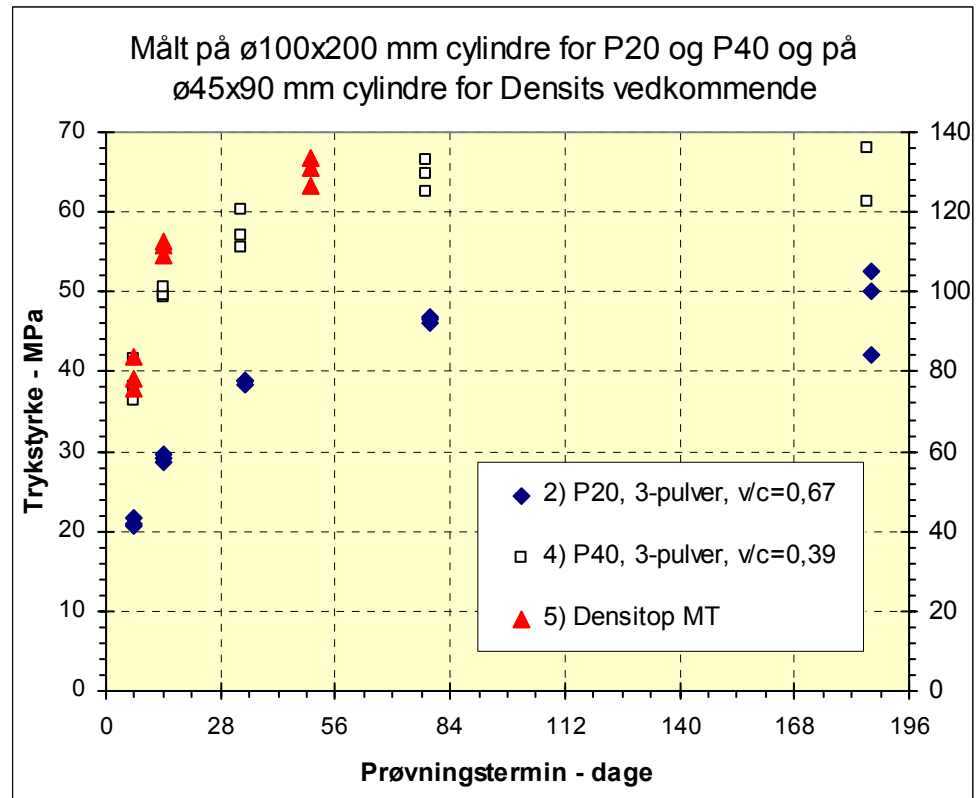


b)

Figur 3.1 Selvudtøringsresultater svarende til Tabel 3.1.

a) Relativ fugtighed målt på nedknuste dele af prøveemner.

b) Tilhørende fugtbækninger. Bemærk at blænde vandet svarer til et vandindhold ved 0 dage på ca. 7 % for P20 og ca. 6 % for P40.



Figur 3.2 Målt styrkeudvikling efter forsejlet lagring. Enkel tresul tater findes i Tabel 3.1.

Densitop resul taterne aflæses på den højre akse. Bemærk at der ikke er foretaget nogen korrektion af må lingerne mht. cyl inderstørrelse.

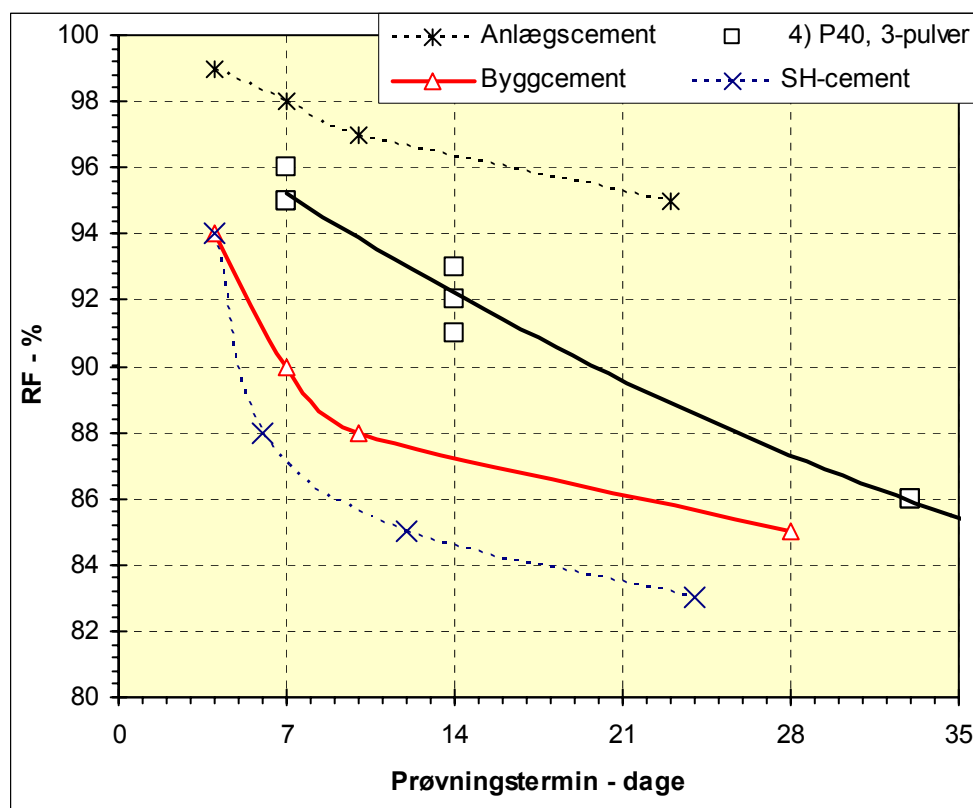
Mellem 3 og 6 måneder ses det, at RF stiger igen (Figur 3.1a). Det ses også, at fugtbrøken samtidig stiger i denne periode og det er tvivlsomt om denne effekt er reel eller et resultat af fejlmålinger. Der findes ikke umiddelbart nogen begrundelse for denne iagttagelse og der er heller ingen lignende observationer at finde i litteraturen. Derfor må disse $\frac{1}{2}$ års resultater ikke tillægges for stor betydning før de er verificeret af supplerende forsøg.

Figur 3.3 indeholder en sammenligning mellem resultaterne i Johansson (2005) for tre forskellige svenske cementer og P40 3-pulver baseret på dansk Rapid cement. De svenske forsøg er rene cementmørtler uden mikrosilika. Bemærk at tidsaksen er afkortet i forhold til de tidligere diagrammer, da de svenske forsøg standser ved ca. 28 døgn. Som det fremgår ligger de danske resultater midt i de svenske, hvilket bl.a. kan tilskrives effekten af porevandets alkalitet af (se mere herom nedenfor).

Effekt af mikrosilika og porevandets alkalitet

Effekten af mikrosilika er ikke specifikt undersøgt, da både P20 og P40 indeholder stoffet i stort set samme relative dosering (6-7 % af cementindholdet). Hansen, Hansen & Persson (1998) fandt ikke nogen målbar effekt på selvudtørringen af at tilsætte 5 % mikrosilika i hverken svensk eller dansk beton. Dette var uanset v/c forholdet. Dette er imidlertid ikke i overensstemmelse med resultaterne af en undersøgelse i Mejlhede & Hansen (1996), hvor mikrosilikas effekt på selvudtørring af cementpasta er undersøgt og fundet markant. Sidstnævnte undersøgelse omfatter imidlertid kun

materialer af Densit typen, som ikke umiddelbart kan overføres på gulvbetoner.



Figur 3.3 Selvudtøringsresultater for $v/c = 0,4$. Sammenligning mellem dansk P40 3-pulver beton og svenske mørtel forsøg (Johansson, 2005). Forsøgsresultater for P40 svarer til de første 3 terminer i Figur 3.1. De svenske forsøg er baseret på ren cementmørtel uden mikrosilika.
 Svensk Anlægs cement er lavalkali sulfatbestandig (CEM I 42,5N).
 Svensk Bygg cement er en kalkstens cement (CEM II/A-LL 42,5R).
 Svensk SH er en ren Portland cement (CEM I 52,5).

En anden effekt som også er registreret i Hansen, Hansen & Persson (1998) og ligeledes i Johansson (2005) er porevandets alkalitet. For det samme fugtindhold vil en beton med høj porevandsalkalitet give lavere RF. Dette indebærer, at når v/c forholdet sænkes får man typisk højere alkalitet - alt andet lige, men samtidig giver anvendelsen af mikrosilika anledning til en sænkning af alkaliteten. Det vil sige flere mekanismer, som trækker i hver sin retning.

Rapid cementen, som benyttet i nærværende forsøgsserie har et ækvivalent alkaliindhold på $(Na_2O)_{\text{ækv}} = 0,6 \%$. De svenske bygge cement typer har tilsvarende 0,7-0,8 % (bygg cement og SH-cement), mens den svenske anlægs cement har $(Na_2O)_{\text{ækv}} = 0,4 \%$ (Johansson, 2005). Sidstnævnte svarer stort set til den danske lavalkali sulfatbestandig cement. Rækkefølgen af kurverne i Figur 3.3 følger således alkaliindholdet af de anvendte cement typer.

Johansson (2005) afprøver også 10 % mikrosilika i cementmørtler med et vand/bindemiddel tal = 0,30. For bygg cement og SH-cement fås at en sænkning af vand/binder-tallet fra 0,4 til 0,3 sænker RF med godt 5 %-point og tilsætning af 10 % mikrosilika ved et vand/binder-tal på 0,3 hæver RF med 3-5 %-point. For anlægs cement virker både en sænkning af vand/binder forholdet og en tilsætning af mikrosilika reducerende på RF, men effekten er

marginal. Konklusionen må være, at udtørringseffekten af mikrosilika afhænger af mange indirekte faktorer såsom cementtype og -sammensætning. De enkelte faktors betydning er ikke kvantificeret.

3.3 Sammenfatning

På baggrund af de udførte selvudtørringsforsøg kan følgende konklusioner opsummeres:

- Der er en markant selvudtørringseffekt hos beton med v/c forhold omkring 0,40. Det er muligt at bringe fugtigheden ned til 85 % RF alene ved selvudtørringens kraft. Sammenligninger med svenske forsøg udviser god overensstemmelse, men også relativt stor variation i selvudtørringens størrelse.
- Effekten af mikrosilika synes ikke at være dokumenteret i tilstrækkeligt omfang. Der kan tilsyneladende ikke tales om en enkel mikrosilika-effekt, men nærmere om en række faktorer afhængig af cementtype. De resultater som findes i litteraturen er modstridende og svært kvantificerbare.
- De danske forsøg baseret på Rapid cement synes generelt at ligge omkring 5 %-point højere end tilsvarende svenske byggecementer (som indgår i TorkaS). Hvis der sammenlignes med dansk lavalkali cement må forskellen forventes endnu højere. Desuden er den svenske mikrosilika-effekt tilsyneladende noget overvurderet.
- For normal gulvbeton P20 er effekten også målbar, men det er ikke muligt at bringe den relative fugtighed under 90 %.
- For Densit materialet ligger den relative fugtighed stort set under 80 % allerede efter en uges lagring.
- Den anvendte forsøgsmetode har vist sig at være operationel og simpel og det forventes, at denne metode med succes kan anvendes på andre betoner.

4 Desorptionsforsøg

Bestemmelse af desorptionskurven er foretaget for alle betoner undtagen Densit. Desorptionskurven er væsentlig at kende, idet den giver omregningen mellem absolut fugtindhold (eller fugtbrøken) og relativ fugtighed i betonens porer. Bestemmelsen er sket ud fra en tillempet metode som det fremgår af afsnit 4.1. Dette er valgt ud fra de ressourcer og den tidsramme som delprojektet var underlagt.

Det principielle udseende af kurven for en given beton ses i

Figur 1.1 og følgende generelle kommentarer skal knyttes hertil:

- Kurven vil typisk flytte sig nedad hvis målingerne foretages ved et højere temperaturniveau. De kurver som findes i litteraturen er oftest bestemt ved en stuetemperatur på 20 °C eller deromkring.
- Kurven flytter sig ligeledes nedad for reduceret v/c forhold, da dette giver en mere finporøs (tæt) beton, hvor et givet fugtindhold giver anledning til øget RF.
- Endeligt afhænger kurven af hydratiseringsgraden, hvilket er specielt udtalt i betonens første levedøgn.

En af de mest fuldstændige samlinger af sorptionskurver findes i Hansen (1986), hvor mange forskellige byggematerialer er samlet, herunder også beton. De betondata som findes heri stammer fra svenske forsøg fra 1970'erne.

4.1 Forsøgsmetode

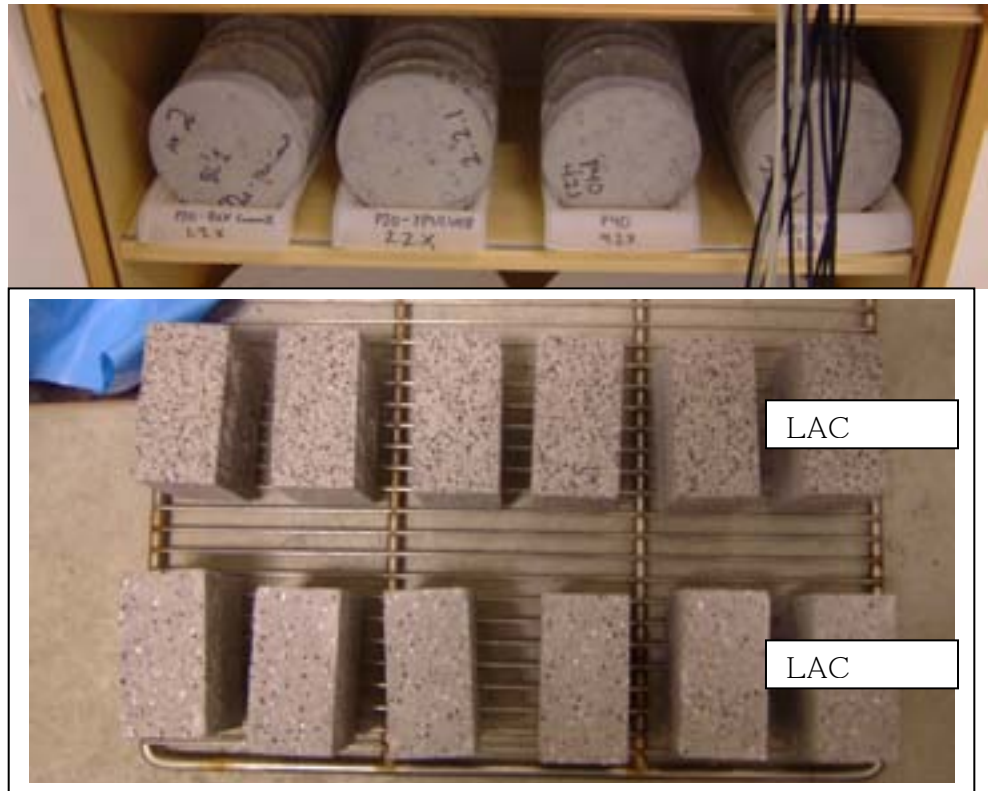
De udsavede betonstykker (Ø100x25 mm og 100x100x50 mm) placeres i klimakammer, hvor der konstant holdes 20 ± 2 °C og $RF = 50 \pm 2$ %. Emnerne placeres med luft omkring for at sikre fri luftstrømning omkring dem (Figur 4.1).

Selve prøvningen foregår ved at tage et prøveemne fra klimakammeret og nedknuse det i en kæbeknuser. Det nedknuste materiale deles i to og den ene del puttes i et reagensglas til relativ fugtighedsbestemmelse. Den anden del placeres i en foliebakke og placeres i tørreovnen ved 105 ± 2 °C indtil vægttabet stopper ($< 0,1$ % over 24 timer).

Bestemmelsen af fugtindholdet u i vægt-% og relativ fugtighed foregår således parallelt på det samme prøveemne. Det forudsættes at samhörrende værdier af u og RF kan tolkes som punkter på desorptionskurven og at der således er opnået hygroskopisk ligevægt.

Den korrekte måde at bestemme desorptionskurven på ville være at udsætte hvert prøveemne for en given RF og vente indtil ligevægten indtræder. På dette tidspunkt kan prøveemnet knuses og udtørres ved 105 °C. Dette kræver imidlertid laboratoriefaciliteter og ressourcer som ikke er realistiske i nærværende delprojekt.

Det må forventes at den modificerede prøvningsmetode giver visse uønskede effekter såsom fugtgradienter hen over prøveemnerne, uensartethed som følge af forskelle i pasta- og tilslagsindhold fra emne til emne. Disse effekter kan give anledning til resultater som afviger fra andre prøvningsmetoder.



Figur 4.1 Forsøgsemner til desorptionsbestemmelse. Øverst ses skiver af sætmålsbeton. Nederst ses klodser udsavet af letklinkervægelementer.

4.2 Resultater

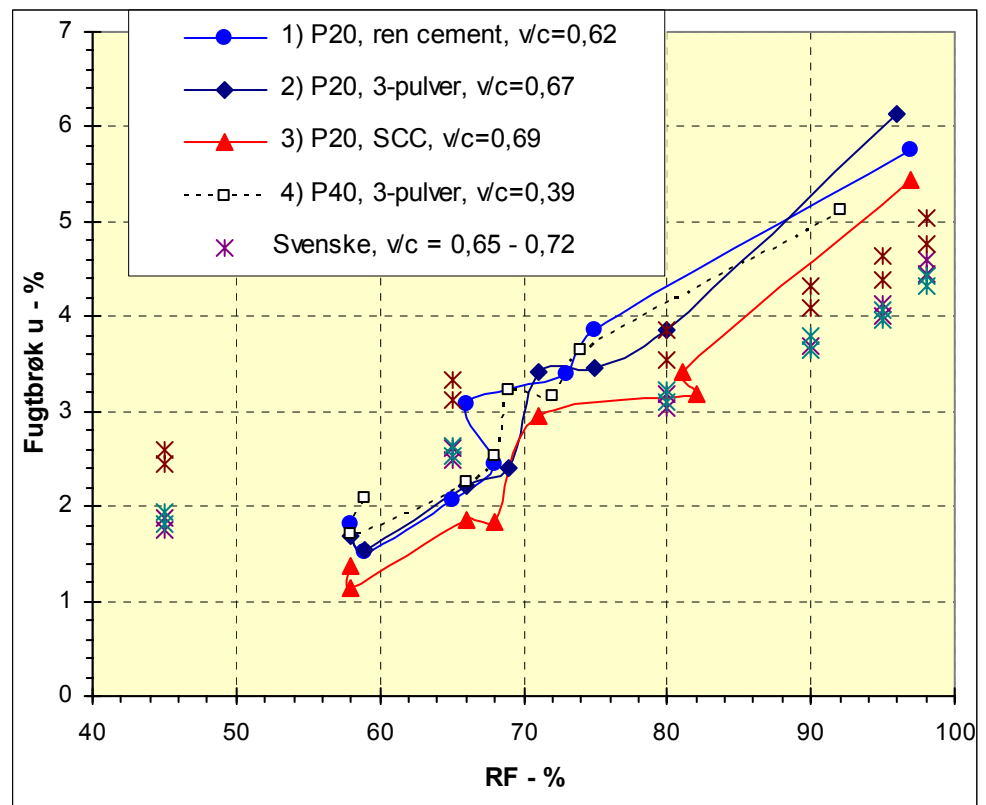
Gulvbetoner

Måleresultaterne for de 4 betoner ses i Tabel 4.1 og de er illustreret i Figur 4.2. Prøvecylindre er støbt den 23. februar 2005, afformet og indpakket i plastik dagen efter. Cylindrene er derefter savet i skiver den 10. og 11. marts 2005, vejte og placeret i klimakammeret. Den første måling i Tabel 4.1 er således udgangsfugtindholdet på det tidspunkt, hvor prøveemnerne placeres i klimakammeret og udtørringen begynder. I begyndelsen blev udtørringen fulgt med ugentlige prøvninger. Ved de samme lejligheder blev alle prøveemner vejte. Ved hver prøvning er der brugt et prøveemne, dvs. ingen gentagelser.

Der ses at være overensstemmelse med selvudtøringsforsøgene. For P20 betonen blev der i afsnit 3.2 fundet, at fugtbrøken er omkring 5 %, når hydratiseringen er overstået, hvilket fandtes at svare til en relativ fugtighed på ca. 90 %. For P40 betonen er de tilsvarende værdier en fugtbrøk på ca. 4 % svarende til RF lig 80 %. Dette kan genfindes på Figur 4.2.

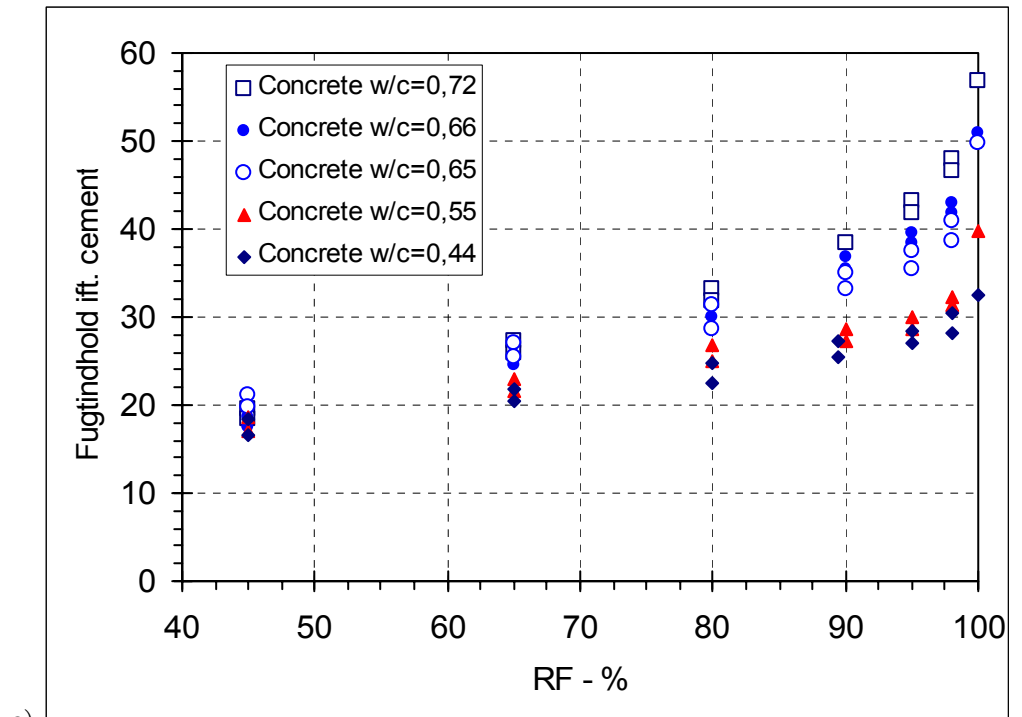
Tabel 4.1 Desorptionsresultater. Samhørende værdier af RF og u målt på 4 betoner under udtørring i klimakammer. Betonrecepter ses i Tabel 2.1.

Dato	1) P20 ren cement		2) P20 3-pulver		3) P20 SCC		4) P40 3-pulver	
	RF - %	u - %	RF - %	u - %	RF - %	u - %	RF - %	u - %
11/3-05	97	5,8	96	6,1	97	5,4	92	5,1
16/3-05	75	3,8	80	3,9	81	3,4	74	3,6
22/3-05	73	3,4	75	3,5	82	3,2	72	3,2
30/3-05	66	3,1	71	3,4	71	3,0	69	3,2
27/4-05	68	2,4	69	2,4	68	1,8	68	2,5
13/5-05	65	2,1	66	2,2	66	1,9	66	2,3
14/9-05	59	1,5	59	1,5	58	1,1	58	1,7
	58	1,8	58	1,7	58	1,4	59	2,1

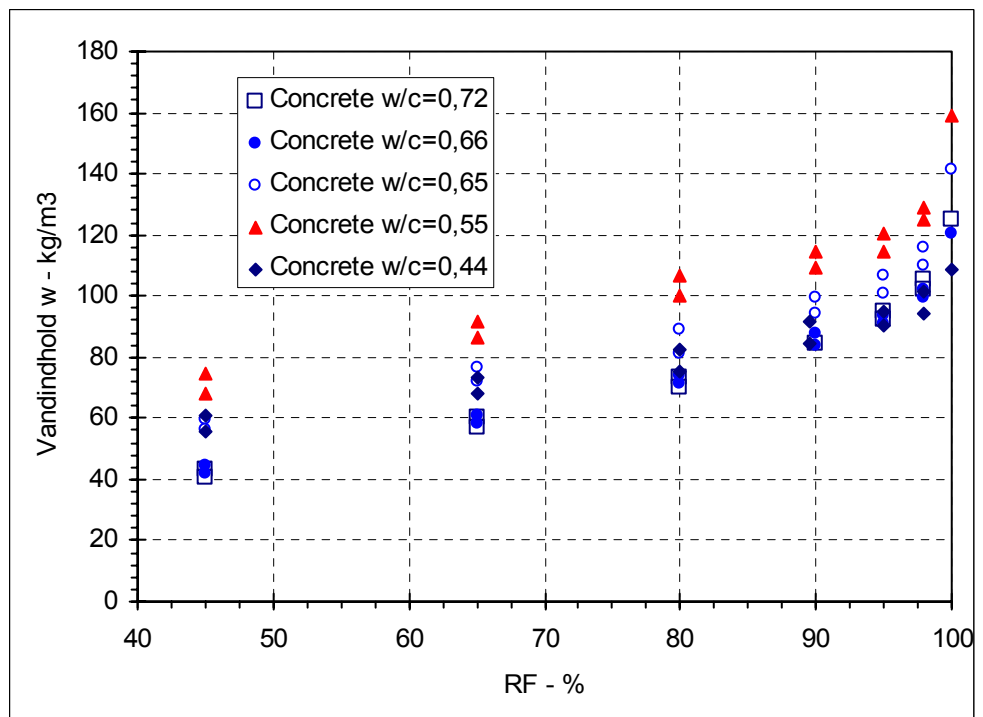


Figur 4.2 Målte desorptionskurver på basis af resultater i Tabel 4.1. Svenske forsøgsresultater taget fra Hansen (1986).

Det er valgt at sammenligne resultaterne med svenske betonforsøg, hvor måledata er taget fra Hansen (1986). De svenske forsøg er alle udført med rene cementbaserede betoner med v/c forhold mellem 0,44 og 0,72 (Figur 4.3).



a)



b)

Figur 4.3 Svenske forsøgsresultater (Hansen, 1986). Øverste diagram viser fugtindhold i forhold til cementindholdet i vægt-%. Nederste diagram viser det absolutte fugtindhold.

For bedre at kunne sammenligne med de svenske forsøg er disse optegnet separat i Figur 4.3. Det øverste diagram viser klart den normale antagelse om at desorptionskurverne flytter sig nedad, når w/c forholdet mindskes. Dette er især udpræget i området over 80 % RF. Det nederste diagram viser absolutte fugtindhold og her ses det at rækkefølgen er omvendt, idet et lavt w/c tal typisk

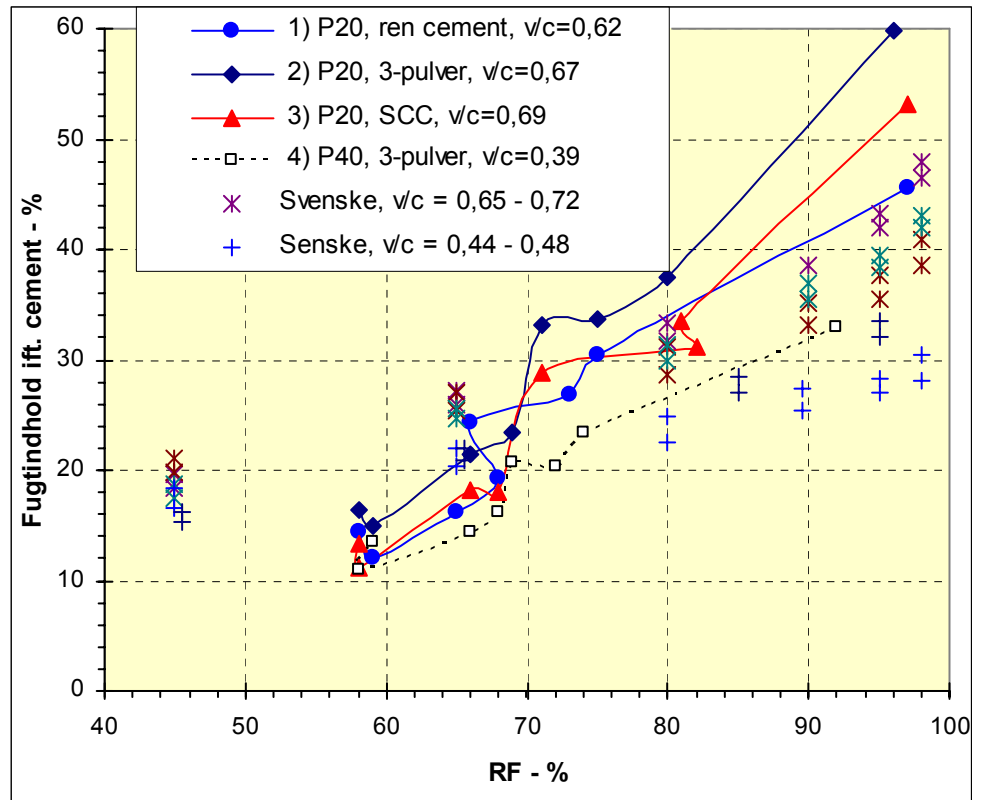
også fordrer et relativt højt cementindhold. Det skal dog tilføjes at forskellene mellem de enkelte betoner er langt mindre i denne afbildning.

Figur 4.4 indeholder tilsvarende afbildninger med de svenske betoner indtegnet sammen med forsøgsresultaterne fra Tabel 4.1. Bemærk at resultaterne er normaliseret mht. det ækvivalente cementindhold.

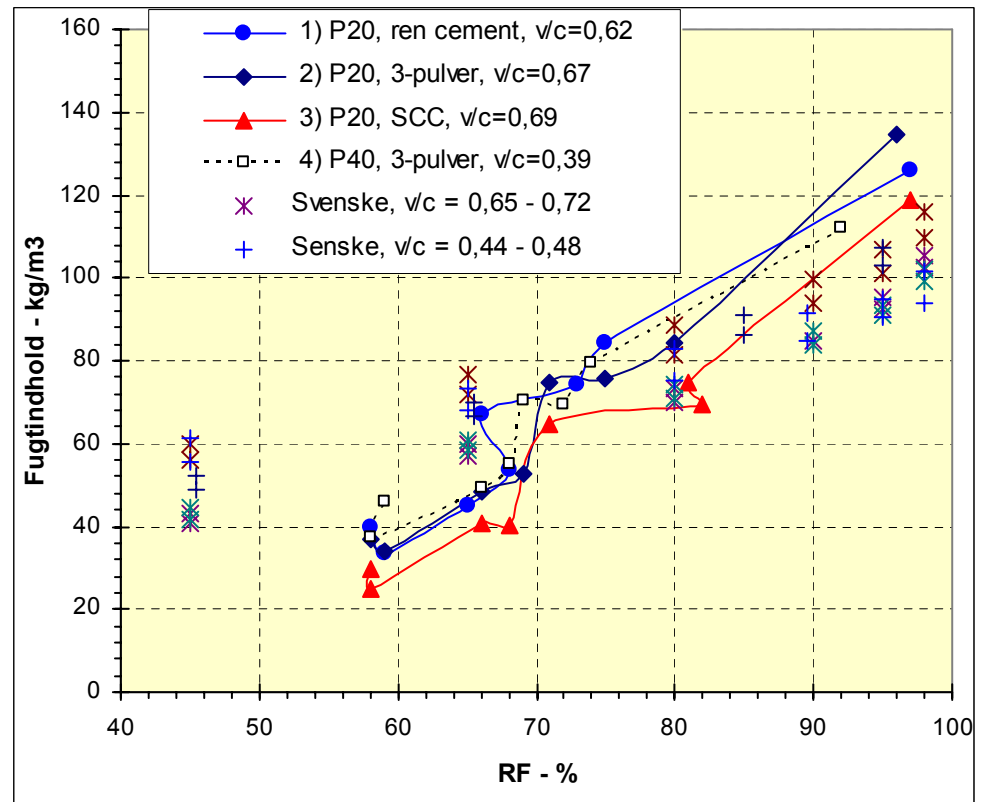
Det fremgår af Figur 4.4a, at de danske forsøgsresultater generelt ligger højere placeret end de tilsvarende svenske for høje RF værdier, mens dette er omvendt, når RF nærmer sig 50 %. Det skal bemærkes at fugtindholdet i Figur 4.3a er divideret med det ækvivalente cementindhold, dvs. inklusiv k-faktorer på mikrosilika og flyveaske. Det er også forsøgt at afbilde resultaterne baseret på det rene Portland cementindhold, men dette giver ingen mening. Hvis de forsøgsresultaterne sammenlignes med Betonbogen (1985) fås tilsvarende at forsøgsresultaterne ligger for højt i forhold til det forventede for høje RF værdier, mens de er på linie med det forventede omkring 50 % RF. Denne forskel kan skyldes, at prøvningsmetoden er modificeret i forhold til andre forsøgsserier. Dermed vil der forekomme en effekt fra, at prøveemnet ikke er i fuldstændig ligevægt med omgivelserne, når det knuses og tørres. Ydermere kan det konstateres, at Betonbogens kurver er optegnet for 25 °C som referencetemperatur i stedet for de sædvanlige 20 °C.

Når det absolutte fugtindhold betragtes på Figur 4.4b fås et mere ensartet billede, hvor de enkelte betoner ikke stikker ud. Igen er der forskelle mellem de danske betoner og de svenske. Ud over ovennævnte forskel i prøvningsmetode kan dette også skyldes forskelle i cementsammensætningen, hvor det skal erindres, at de svenske forsøg daterer sig 30 år tilbage.

Det ses at for en given værdi af den relative luftfugtighed vil fugtindholdet i betonen ligge indenfor et bånd på ca. 20 kg/m³ uafhængig af v/c forhold.. Dette svarer til et bånd på ca. 1 % i Figur 4.2. Generelt ses SCC betonen at ligge nederst blandt de 4 danske desorptionskurver.



a)

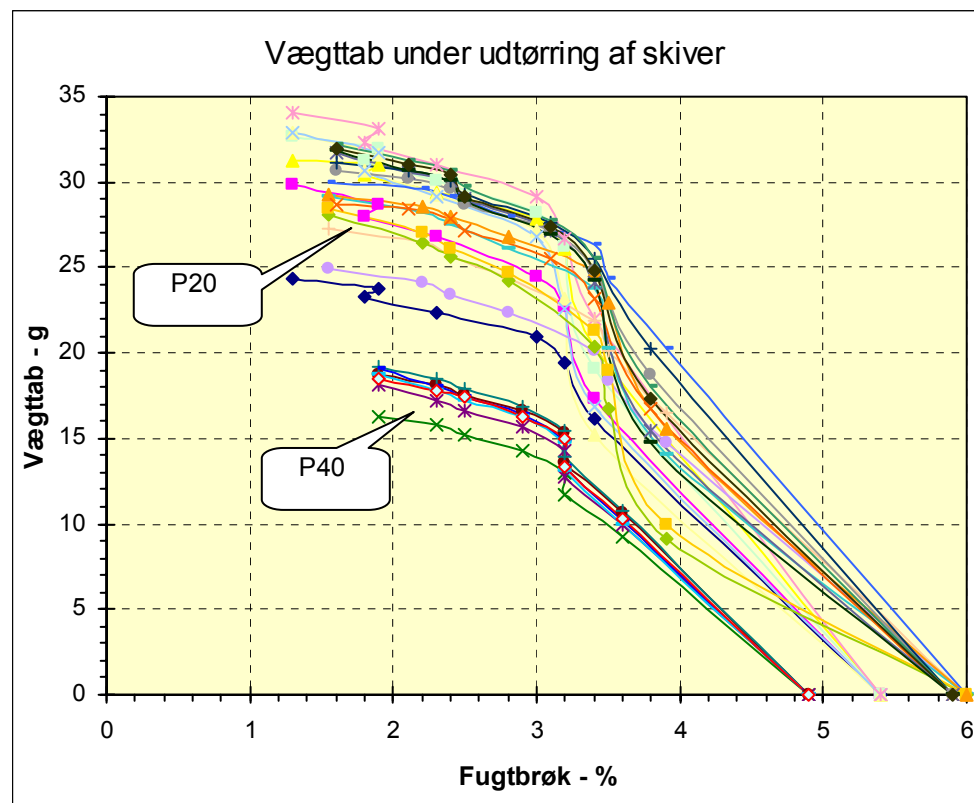


b)

Figur 4.4 Sammenligning mellem Figur 4.2 og Figur 4.3. Øverste diagram viser fugtindhold i forhold til ækvivalent cementindhold i vægt-%. Nederste diagram viser det absolutte fugtindhold svarende til data i det øverste diagram ganget med ækv. cementindhold.

Det er forsøgt at kæde fugtindholdet og vægttabet sammen i Figur 4.5. For hver beton er vægttabet målt løbende på 8 skiver og alle disse registreringer er angivet i diagrammet. Som det fremgår er sammenhængen ikke specielt entydig, især ikke for P20 betonerne, hvor forsøgsspredningen er markant. Dette er uafhængig af hvilken type P20 beton, som betragtes. For P40 er billedet lidt mere konsistent. Der ses en tydelig ændring i opførsel efter de tre første målinger, hvor betonen opnår 28 døgns modenhed. Dette kan skyldes indflydelsen af hydratiseringsprocessen, hvilket betyder, at det registrerede vægttab i denne periode både skyldes udtørring og hydratisering i kombination.

Det er muligvis den samme effekt som gør sig gældende i området omkring 70 % RF på Figur 4.4, hvor desorptionskurverne synes at springe lidt.



Figur 4.5 Vægttab (regnet positivt) sammenholdt med fugtbrøken fundet ud fra ovntørringsforsøg. Den første måling svarer til et vægttab på 0, hvilket vil sige at den kronologiske orden af kurverne er fra nederste højre hjørne mod øverste venstre hjørne.

Letklinkerbeton

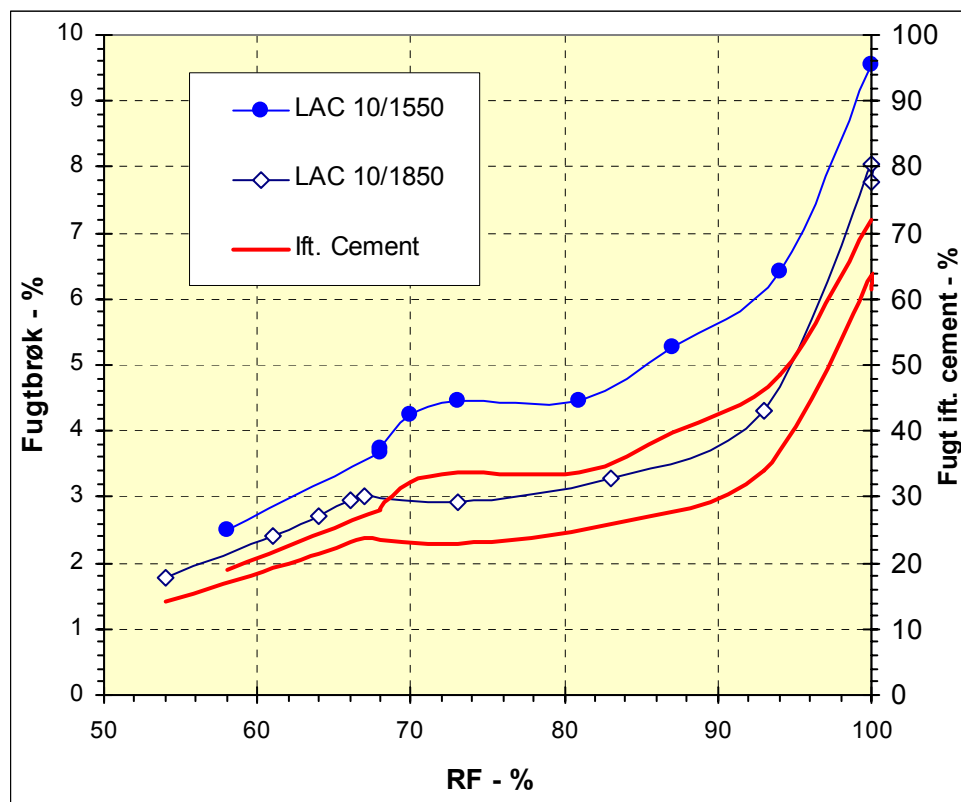
Table 4.2 summarizes the test results for the lightweight concrete. The bottom of the table shows the test results determined at Expan's laboratory in Brørup. The measured properties are registered 14 days after casting on test specimens cut from the concrete. The properties are mean values of at least 3 test specimens. The test specimens were cast and cut in two stages (February and June) due to communication problems at Teknologisk Institut. The test specimens are currently produced at the same production plant and with the same concrete recipe so this is not expected to have any significance for the interpretation of the test results.

Table 4.2 Desorption results. Corresponding values of RF and u measured on 4 concrete under drying in a climate chamber. Concrete recipes are given in Table 2.2.

Alder		5) LAC 10/1550		Alder		6) LAC 10/1850	
døgn	RF - %	u - %		døgn	RF - %	u - %	
14	100	9,5		6	100	7,8	
14	100	9,5		6	100	8,0	
16	94	6,4		8	93	4,3	
19	87	5,3		11	83	3,3	
23	81	4,5		15	73	2,9	
42	73	4,5		39	67	3,0	
49	70	4,3		46	66	2,9	
55	68	3,7		52	64	2,7	
98	58	2,5		90	54	1,8	
Støbedato	25. feb.	1. juni			28. feb.	9. juni	
ID i Bilag B	Linå-085	Linå-222			Ølsted-022	Ølsted-055	
Tørdensitet	1555	1550	kg/m ³		1910	1847	
Trykstyrke	17,3	18,5	MPa		28,6	25,1	
Fugt	7,6	6,3	%		4,1	3,2	

It is surprising that for LAC 10/1850 a double so high moisture content is measured at the time of arrival at Teknologisk Institut as measured at Expan. The explanation can be that TI's measurement is taken at an age of only 6 days, while Expan measures after 14 days. The test specimens are dried and a part of the moisture from this process can very well be included in TI's determination, as the test specimens have been wrapped in plastic during transport.

For LAC 10/1550 there is also a slight difference, but not so significant and it can be stated that for this concrete the moisture determination was made simultaneously at Teknologisk Institut and at Expan.



Figur 4.6 Målte desorptionskurver på basis af resultater i Tabel 4.2. Kurver med symboler refererer til venstre akse og kurver uden symboler til den højre.

En vurdering af fugtindholdet i letklinkerbeton baseret på betonrecepten i Tabel 2.2 giver følgende resultat:

- LAC 10/1550: Blandevandet udgør 165 kg/m^3 og divideret med tør densiteten giver det $u = 10,5 \%$. Det kemisk bundne vand udgør $0,25 \cdot 205 \text{ kg/m}^3 = 51 \text{ kg/m}^3$, svarende til $3,5 \%$. Det betyder at fysisk vand udgør ca. 7% , hvilket er i overensstemmelse med Expans målinger efter 14 dage.
- LAC 10/1850: Blandevandet udgør 118 kg/m^3 og divideret med tør densiteten giver det $u = 6 \%$. Det kemisk bundne vand udgør $0,25 \cdot 240 \text{ kg/m}^3 = 60 \text{ kg/m}^3$, svarende til ca. 3% . Det betyder at fysisk vand udgør ca. 3% , hvilket er i nogenlunde overensstemmelse med Expans målinger efter 14 dage.

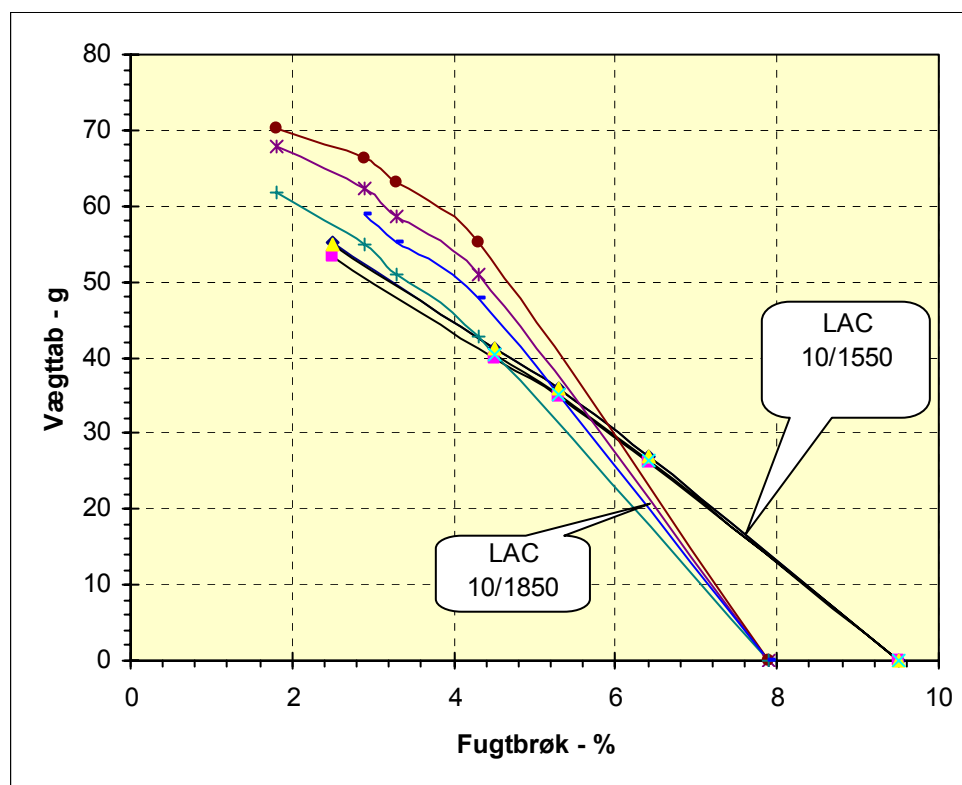
Disse beregninger underbygger formodningen om, at en ikke ubetydelig del af skærevandet stadig var tilstede i de prøveemner som blev transporteret til Teknologisk Institut fra Expan.

En sammenligning med de målte desorptionskurver normaliseret mht. cementindholdet og Betonbogens kurver fås ligesom for gulvbetonerne at de målte kurver ligger højere end forventet. Dette kan dog skyldes, at Betonbogens angivelser gælder for $25 \text{ }^\circ\text{C}$ i stedet for $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Expan A/S har selv opstillet krav til fugtindholdet af letklinkerbeton for at undgå fugt- og svindproblemer i byggerier med letklinkervægge. Kravet til LAC 10/1550 og LAC 10/1850 er fastsat erfaringsmæssigt til hhv. 5 og 4

vægt-%. Dette svarer til at ca. halvdelen af svindet er overstået efter Expan's egne erfaringer.

En sammenligning af disse krav med Figur 4.6 viser at for LAC 10/1550 er dette et fornuftigt krav med henblik på at opnå $RF < 85\%$. For LAC 10/1850 synes kravet ikke at være tilstrækkeligt og det foreslås at det reduceres fra 4 til 3,5 vægt-% for at svare til $RF < 85\%$. Dette svarer i øvrigt til, at yderligere 10 liter vand skal udtørres pr. m^3 .



Figur 4.7 Sammenhæng mellem registreret vægttab og fugtbrøk.

4.3 Sammenfatning

Det er konstateret muligt at bestemme fornuftige desorptionskurver for beton såvel som letklinkerbeton vha. den metode, som er foreslået i udtørningsprojektet. Prøvningsmetoden har visse mangler og simplifikationer, som gør at den er velegnet til at dokumentere en trend eller afdække en parameters indflydelse på desorptionskurverne. Det har ikke været muligt at vurdere metodens repetérbarhed, idet projektets ressourcer ikke var tilstrækkelige til at foretage gentagelser af prøvningen. Derfor skal resultaterne anvendes med en vis portion sund fornuft og kritisk omtanke.

Resultaterne er fundet at stemme overens med litteraturens angivelser, når den forventede variation tages i regning. Det har ikke været muligt at skelne mellem de afprøvede gulvbetoner. Dog ligger kurven for SCC generelt lavere end de øvrige.

For letbetonmålingerne er der ligeledes fundet overensstemmelse med tidligere Fibo forsøg, men det er også konstateret vanskeligt at håndtere og fremstille letklinkeremnerne, idet skærevandet får en forholdsvis stor indflydelse på målingerne.

5 Målinger på betonfliser

For at kunne rangordne de forskellige betontyper mht. udtørningsforløb er der udført forsøg under kontrollerede klimaforhold. Gulvbetonerne er udsat for ensidig udtørring som simulerer forholdene ved et terrændæk.

Letklinkerbetonerne er udsat for dobbeltsidet udtørring. Det skal naturligvis holdes for øje, at gulvbetonerne er produceret og lagret under laboratorieforhold og således ikke kan sammenlignes direkte med terrændæk for så vidt angår de udførelsesmæssige aspekter. For letklinkerbetonerne er produktionsbetingelserne i overensstemmelse med vægelementer produceret til et givet byggeprojekt.

5.1 Forsøgsmetode

Prøveemnerne fremgår af Tabel 2.3C og består af 100 mm tykke fliser som udtørres enten ensidet (gulvbeton) eller dobbeltsidet (letklinkerbeton). Den relative fugtighed er målt kontinuert midt i prøveemnet, mens de er placeret i klimakammeret under 20 ± 2 °C og $RF = 50 \pm 2$ % sammen med skiverne til desorptionsbestemmelse (Afsnit 4.1). Prøveemnerne vejes desuden ved forsøgets start og løbende undervejs.

Fugtfølerne er fra Vaisala (typebetegnelse: Humidity probe HMP50UB UBC1A1X).

Prøveemnernes konditionering efter støbning er som følger:

- Gulvbetonerne er støbt den 23. februar 2005 og plastspandene forsegles med plastlåg. Opbevares i laboratoriet. Den 31. marts fjernes plastlågene og emnerne placeres i klimakammeret. I den efterfølgende uge monteres fugtfølere således at målingerne påbegyndes den 7. april. Umiddelbart inden, at spandene placeres i klimakammeret udstøbes 10 mm Densitop på den ene spand med P20 3-pulver.
- Letklinkerbetonemnerne udsaves hos producenten af helvægselementer og sendes indpakket i plast til Teknologisk Institut. Emnerne modtaget den 16. marts 2005 og opbevares plastindpakket i laboratoriet indtil den 31. marts, hvor de placeres i klimakammeret som nævnt ovenfor.



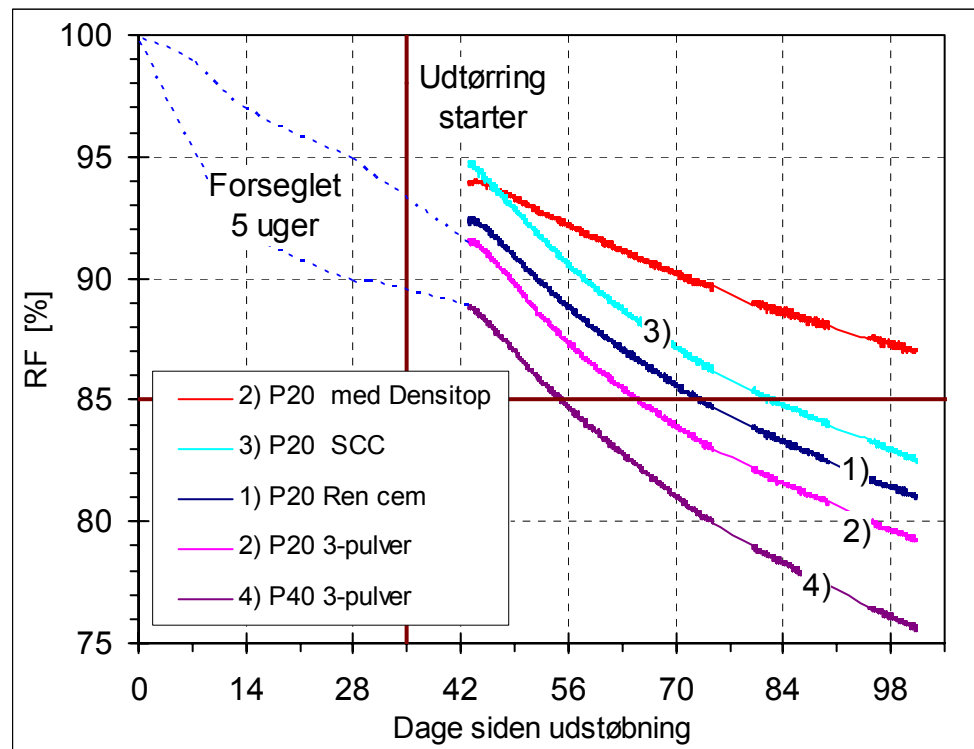
Figur 5.1 Foto af klimakammer med spande og letklinkerbetonfliser. Ledningerne fører fra fugtfølerne placeret i prøveemnernes midte til datalogger, hvor signalet opsamles kontinuert.

5.2 Resultater

Gulvbetoner

Udtørringen er fortsat over et halvt år. Den største effekt fås imidlertid indenfor de første 3 måneder (Figur 5.2). Hældningen på kurverne siger noget om udtørningshastigheden og siden der er tale om et diffusionsproblem vil udtørningens hastighed følge en eksponentiel funktion styret af diffusionstallet og udtørningsafstanden. Ofte opererer man med en tidsfaktor udtrykt som L^2/D , hvor L er en karakteristisk dimension (fx tykkelsen på terrændækket) og D er diffusionstallet ($m^2/sekund$). Denne tidsfaktor skalerer udtørningshastigheden således at en stor værdi medfører langsom udtørring og en lille værdi hurtig udtørring. Prøveemnerne er udsat for et drivende udtørningspotentiale svarende til fugtigheden i emnerne og klimakammerets RF på 50 %. En eksponentiel kurvefitning udført på resultaterne i Figur 5.2 giver tidsfaktorer svarende til værdierne i Tabel 5.1. Disse tidsfaktorer er dernæst omregnet til diffusionstal ud fra tykkelsen $L = 100$ mm.

Det er ikke overraskende, at P20 med Densitop udviser den største tæthed med et diffusionstal på kun halvdelen af de konventionelle gulvbetoners. Dette skyldes den store tæthed af Densitop materialet. De tre P20 betoner udviser kun marginale forskelle i diffusionstal, mens det er bemærkelsesværdigt at P40 har 20 % højere diffusionstal end P20. Man ville forvente det stik modsatte resultat med et lavere v/c forhold og dermed mere finporøs struktur. Bemærk at tallene er opnået, hvor betonerne er mere end 5 uger gamle så der er kun en marginal selvudtørringseffekt indeholdt i måleresultaterne. Selvudtørringen er derimod årsag til, at kurvernes begyndelsespunkt ved udtørringens start er forskellig for de forskellige betontyper. Dette forhold er illustreret af de stiplede linier i Figur 5.2.



Figur 5.2 Udtørring af gulvbeton. De første ca. 5 uger foregik plastindpakket i laboratoriet. Registrering af RF midt i prøveemnerne starter ca. en uge efter udtørringens opstart.

Tabel 5.1 Rangordning af betonerne efter deres diffusionstal. Rangordnet som i Figur 5.2.

Prøveemne	Tidsfaktor τ [døgn]	Diffusionstal $D = \frac{(0,1\text{m})^2}{\tau}$ [$10^{-11} \text{ m}^2/\text{sekund}$]
2) P20 med Densitop	327	35 (50 %)
3) P20 SCC	184	63 (90 %)
1) P20 ren cement	183	63 (90 %)
2) P20 3-pulver	166	70 (100 %)
4) P40 3-pulver	138	83 (119 %)

Betonbogen (1985) indeholder en håndberegning metode til at estimere udtørringsbehovet for en betonplade (ensidig) baseret på de svenske erfaringer. De variable parametre er betonkvalitet, udtørringsklima, pladetykkelse og det ønskede slutniveau for fugtigheden. Standardtilfældet stemmer ganske godt overens med en P20 beton og udtørringsbetingelserne i Figur 5.2. Håndberegningen resulterer i en udtørringstid på 60 dage (regnet fra tidspunktet for plastafdækningens fjernelse) til at opnå 90 % RF i middel og skal man ned på 80 % RF er øges dette med en faktor 4. Denne regneøvelse viser med stor tydelighed, at der er stor forskel på en grov håndberegning og virkelighedens målinger.

Sammenligning med TorkaS for gulvbetoner

Det mest anvendte program til simulering af betons udtørring er det svenske TorkaS som er frit tilgængeligt fra bl.a. LTH's hjemmeside. TorkaS (ver. 2.0) er nemt at bruge og kræver ingen dybtgående kendskab til de teoretiske mekanismer bag udtørring og fugttransport. Programmet indeholder en materialdatabase baseret på svensk byggecement og det er skræddersyet til

svenske klimaforhold og betontraditioner. Det vil sige uden generel mulighed for at anvende flyveaske og mikrosilika. Mikrosilika anvendes i Sverige udelukkende for at forcere udtørringen, hvilket er medtaget i programmet.

Figur 5.3 viser resultatet af en TorkaS beregning, hvor råhuset lukkes efter 5 uger og styret udtørningsklima opnås. Fugtigheden i 40 % pladetykkelse ses nederst på figuren. Efter 5 ugers vind og vejr fås $RF = 96 \%$, hvilket stemmer ganske godt overens med målingerne i Figur 5.2 for P20 betonerne.

Under de efterfølgende 10 ugers udtørring falder RF til 90 %, dvs. stadig relativt langt over kravet om 85 %. Dette er i nogenlunde overensstemmelse med ovennævnte håndberegning baseret på Betonbogens anvisning. TorkaS resultatet stemmer til gengæld meget dårligt med målingerne for P20 betonerne i Figur 5.2, hvor 10 ugers udtørring ender med et RF niveau på mellem 80 og 85 %, dvs. klart under kravet. Faktisk krydser de 3 P20 betoner 85 % linien efter 4 til 7 ugers udtørring. Dette til trods for at målingerne foregår i halv pladetykkelse, hvor det må formodes at være fugtigere end i 40 % dybde.

Tilsvarende beregninger er foretaget med en "selvudtørrende beton" med $v/c = 0,40$ som repræsentant for P40 gulvbeton (Figur 5.4 og Figur 5.5). TorkaS tillader imidlertid ikke et vandindhold lavere end 160 kg/m^3 , idet dette udgør erfaringsgrundlaget fra Sverige. Af Tabel 2.1 fremgår det at vandindholdet for P40 er 135 kg/m^3 , hvilket altså ikke kan simuleres i TorkaS. På den anden side regner TorkaS med et rent cementindhold på 400 kg/m^3 , som er væsentligt højere end i P40 og dermed fås et stort kemisk bundet vandindhold i den svenske model.

En sammenligning af Figur 5.4 og Figur 5.5 viser, at mikrosilikaindholdet på 5 % (af cementindholdet) influerer selvudtørringen væsentligt (i den 5 ugers periode, der går forud for den kontrollerede udtørningsperiode). Uden mikrosilika fås et fugtighedsniveau på $RF = 91 \%$ ved udtørringens start og med 5 % mikrosilika fås 86 %. Dette betyder, at 5 % mikrosilika giver et massivt udtørningsforspring set i forhold til en ren cementbaseret betonløsning. En så stor selvudtørringseffekt hidrørende fra mikrosilikaens tilstedeværelse alene synes imidlertid ikke at være tilstrækkeligt dokumenteret (jf. diskussionen i afsnit 3.2).

Udtørringsraten som beregnes af TorkaS i Figur 5.5 er desuden langt mindre end den som er bestemt for P40 ved laboratiemålinger. Simuleringen forudsiger at fugtigheden falder godt 2 %-point gennem 10 ugers udtørring (Figur 5.5), mens målingerne viser et fald på op imod 15 %-point over den samme periode (Figur 5.2).

Resultat från uttorkningsberäkning med TorkaS, 2.0

Projekt:
Produktområdeprojekt

Namn: P20

Företag: TI, Beton

14-10-2005

Förutsättningar

Platta på mark med underliggande tätt skikt

Gjutning : 5/9 2005

Tätt hus : 10/10 2005

Torkstart : 10/10 2005

Slutdatum : 19/12 2005

Ort : Göteborg

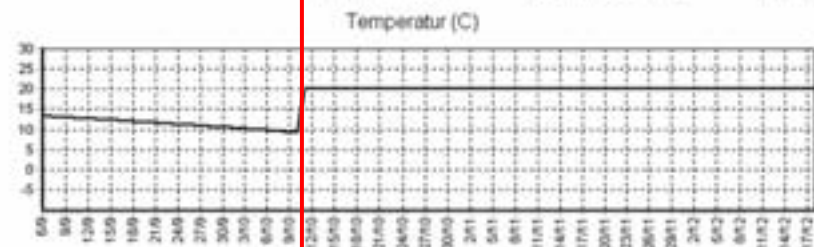
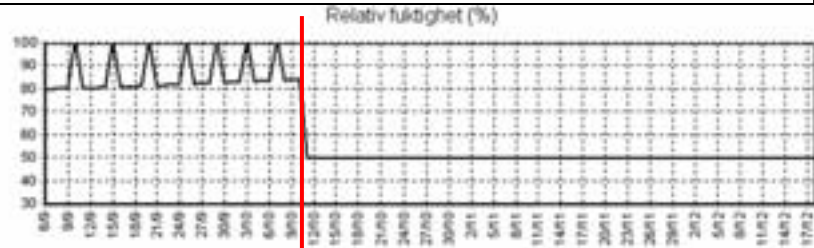
Betongtjocklek: 10 cm

Vct: 0,62

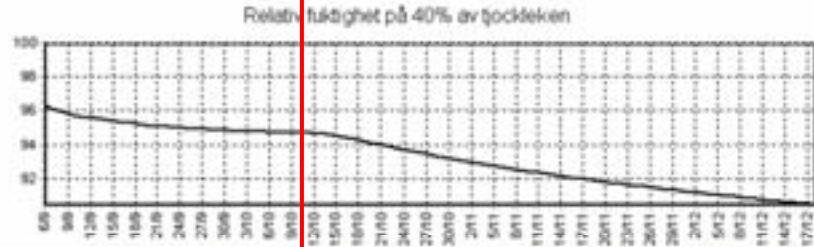
Silika: 0 %

Vattenhalt: 172 l/m³

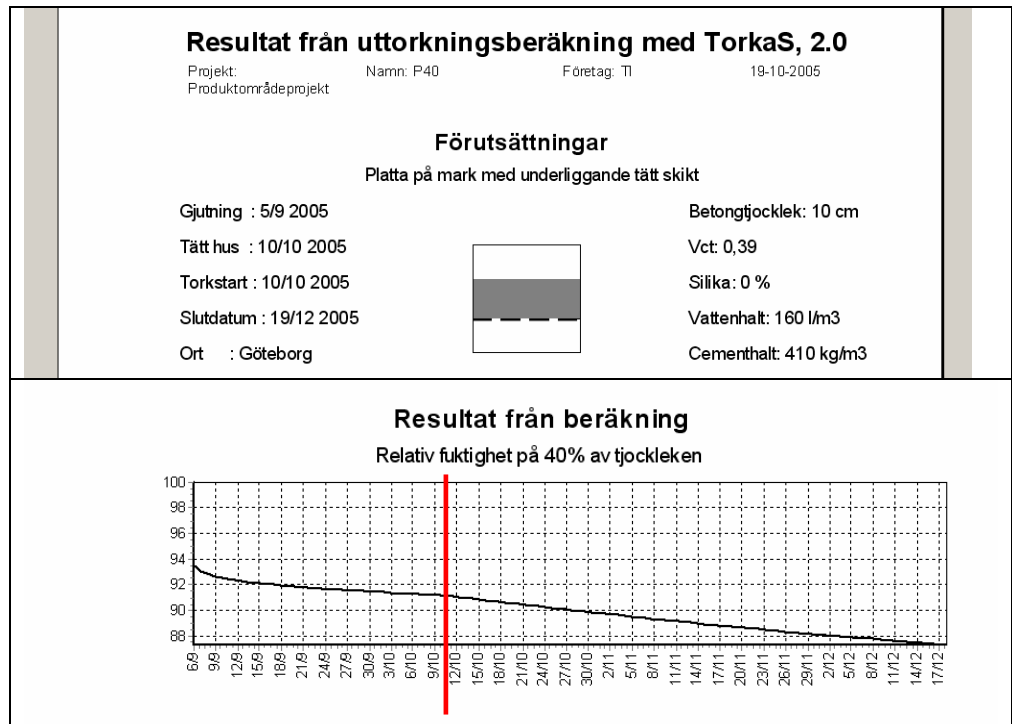
Cementhalt: 277 kg/m³



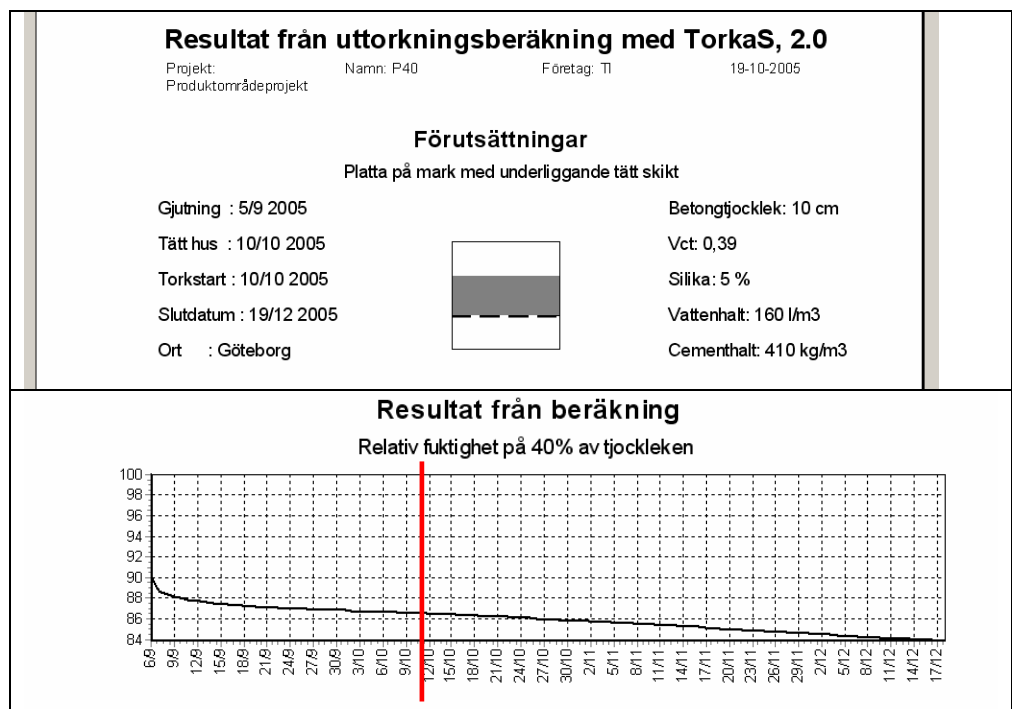
Resultat från beräkning



Figur 5.3 TorkaS beräkning af ensidet utdörning af gulvbeton P20. Øverst: forudsætninger. Nederst: resultat. De første 5 uger foregår udendørs (Göteborg kl imadata). Derefter styret utdörning ved 20 °C og 50 % RF startende ved den lodrette røde streg. Tidsaksens længde svarer til den på Figur 5.2.



Figur 5.4 TorkaS beräkning af ensidet udtørring af gulvbeton P40 uden mikrosilika. Øverst: forudsætninger. Nederst: resultater. Klimadata som på Figur 5.3.



Figur 5.5 TorkaS beräkning af ensidet udtørring af gulvbeton P40 med mikrosilika. Øverst: forudsætninger. Nederst: resultater. Klimadata som på Figur 5.3.

Letklinkerbeton

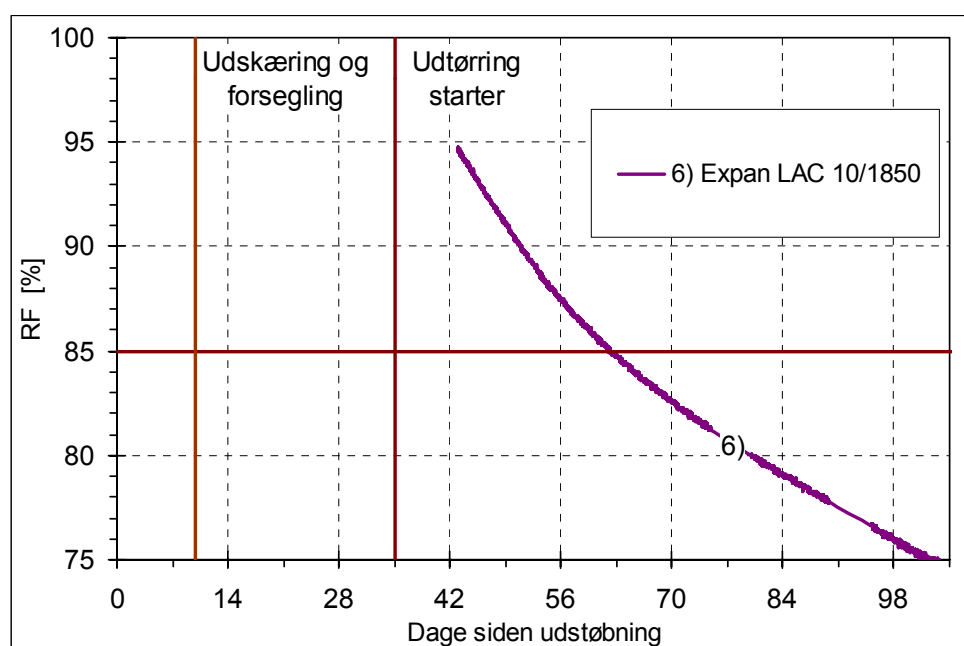
En flise fra hver af de to letbetontyper er udstyret med fugtighedssensor som måler RF midt i emnet. Prøveemnernes dimensioner fremgår af Tabel 2.3. Det skal bemærkes, at RF midt i flisen ikke svarer til middelværdien som det var tilfældet for gulvbetonerne pga. dobbeltsidet udtørring i stedet for ensidet.

Målingerne af RF er illustreret i Figur 5.6, hvor det bemærkes at kun LAC 10/1850 er repræsenteret. Det skyldes at for LAC 10/1550 blev der opnået urealistisk høje målinger, som ikke er i overensstemmelse med de målinger, der er rapporteret i afsnit 4.2. Der er ikke fundet nogen måleteknisk begrundelse for disse urealistiske værdier og derfor er det besluttet at udelade resultaterne heraf.

Vægtmålinger på LAC 10/1850 fliserne sammenholdt med kendskabet til tørdensiteten fra Tabel 4.2 giver mulighed for indirekte at vurdere fugtbrøken:

- Ved udtørringens start registreres der et fugtindhold på $u = 4,4 \%$ ved udtørringens afslutning er denne værdi faldet med 2% svarende til at der er udtørret ca. $40 \text{ kg vand pr. m}^3$. Dette svarer til ca. $1,25 \text{ kg pr. flise}$.

Hvis dette fugttab sammenholdes med desorptionskurven i Figur 4.6 fås en overensstemmelse som underbygger resultaternes pålidelighed.



Figur 5.6 Dobbelt sided udtørring af Letkl inkerbeton LAC 10/1850. Den første lodrette streg angiver tidspunktet for udsavning af prøveemnerne. Derefter ca. 4 uger plastindpakket i laboratoriet. Registrering af RF midt i prøveemnerne starter ca. en uge efter udtørringens opstart.

5.3 Sammenfatning

Udtørningsforsøg på gulvbetoner under kontrollerede klimaforhold medfører følgende observationer:

- Det er muligt at rangordne forskellige betoners udtørningspotentiale på en simpel måde ved at anvende den foreslåede metode med forsøgsemner udstøbt i plastspande. Under forsøget kan betonernes diffusionstal bestemmes, men det må ikke forveksles med en bestemmelse baseret på kopforsøg eller lignende.
- Det skal bemærkes, at ovennævnte prøvning bør verificeres imod fuldskalaforsøg på terrændæk under realistiske produktions- og lagringsbetingelser. Denne verifikation er ikke udført i nærværende projekt.
- En sammenligning med det svenske simuleringsprogram TorkaS viser generelt en dårlig overensstemmelse med de målte værdier. Tilsyneladende udviser danske betoner markant hurtigere udtørringsegenskaber end de svenske, som danner grundlag for TorkaS. Det samme kan siges om de håndberegningmetoder som findes i Betonbogen.
- TorkaS er desuden bundet af en række svenske betontraditioner, klima og materialevalg som reducerer dets fleksibilitet i forhold til danske forhold.
- Det er overraskende at udtørningsraten for beton P40 er af samme størrelsesorden og endda højere end for P20. Dette er ikke umiddelbart i overensstemmelse med erfaringsgrundlaget på området og bør verificeres ved fuldskalaforsøg. Konsekvensen heraf er, at P40 er velegnet til at forcere udtørringen pga. dens selvudtørringsevne.

For prøveemnerne af letklinkerbeton er udtørningsresultaterne for LAC 10/1850 fundet at være i overensstemmelse med det forventede, når desorptionskurven tages i regning. Den samme overensstemmelse er ikke opnået med LAC 10/1550, hvilket må tilskrives fejlmålinger.

6 Referencer

6.1 Litteraturliste

Betonbogen (1985) **Beton-Bogen** redigeret af A.D. Herholdt, C.F.P. Justesen, P. Nepper-Christensen og A. Nielsen. Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor. Aalborg Portland A/S. 2. udgave.

Hansen, K.K. (1986) **Sorptions isotherms – a catalogue**. BYG-DTU. Technical Report 162.

Hansen, K.K., Hansen, J. de P. & Persson, B. (1998) **Betons selvudtørring – Rapportering af fase I**. BYG-DTU.

Johansson, Niklas (2005) **Uttorkning av betong** Lunds Tekniske Højskole. Afd. for Bygningsmaterialer. TVBM-3124, 164 pp.

Mejlhede Jensen, O. & Freiesleben Hansen (1996) “Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica-fume-modified cement paste”. ACI Materials Journal, Vol. 93. No. 6. pp. 539-543.

Mejlhede Jensen (2005) Autogenous Phenomena in Cement-Based Materials, Aalborg Universitet, Doktorafhandling, 188 pp.

SBI (1993) Bygningers Fugtisolering, SBI anvisning 178, Statens Byggeforskningsinstitut, 1993.

6.2 Definitioner

Absolut fugtindhold	: Fugtindhold i kg per m ³ materiale.
Fugtbrøk	: Relativt fugtindhold i forhold til betonens tørre vægt. Betegnes u.
Fysisk vand	: Fugten som findes i betonens porestruktur og som kan udtørres ved opvarmning til 105 °C.
Kemisk bundet vand	: Fugten som er bundet i cementpastaen under hydratiseringsprocessen.
Relativ fugtighed	: Fugtindhold set i forhold til mættet tilstand. Forkortes RF.
Selvudtørring	: Effekt af hydratiseringen som forbruger vand. Selvudtørring er mest markant for et finporøst materiale og resulterer i en sænkning af RF i porerne selv under forseglede forhold.
Vand/bindemiddel	: v/c-tal baseret på cement, mikrosilika og flyveaske uden hensyntagen til ovennævnte aktivitetsfaktorer.
Ækvivalent v/c	: v/c-tal baseret på aktivitetsfaktorer på k=1 for cement, k=2 for mikrosilika og k=0,5 for flyveaske.

Betonrecepter fra Unicon A/S

Unicon A/S

Betonkontroltest

v. 1.14

Side 1 d. 23-02-2005 kl. 12:34:18

1) P20
ten Cement**unicon**///

Nummer : beh-001308 Hedehusene

Bestillingsnr.: Receipt: p20r-pe16in-gn--
 Bestillingskonto : prvbhho
 Kunde: Prøvestation - Vestsjælland
 Højvang 3
 4300 Holbæk

Levering:

Fabrik: Hedehusene
 Folgeseddel: 6216814
 Prøvested: fabrik

Produceret (m3) : 1,52
 Blandedato: 23-02-2005
 kl.: 11:29:51

Konsistens: 120
 Blandemester: ekb
 Blander: Hedehusene
 Vogtnr.: 788
 Udtaget: 23-02-2005
 kl.: 11:29:51
 Udtaget af: 1knkn

Sammensætning	Materialenavn	Fugt %	Densitet kg/m ³	Tilsat (bør)	Blandet kg	1 m ³ (bør)	V.O.T. er
Cement	Rapid CEM I 52,5N(MS/LA<2)		3.160	417	422	278	277
Vand	Koldt vand		1.000	187	186	125	122
Vand	Vand		1.000	8,0	3,0	5,3	1,97
Plastificering	Conplast 212	64,0	1.170	2,5	2,5	1,67	1,81
Sand	P0004 Svogerslev type I	4,8	2.582	1.317	1.314	837	822
Sten	E0416 Karlshamn granit	0,8	2.659	1.565	1.618	1.037	1.055
	Total: Fugt i materiale		1.000	0,00	0,00	46	46
	Total kg		3.497	3.545	2.330	2.326	
	Volumen (liter)		1.501	1.525	1.000	1.000	

Bør værdi Målt / bereg.

Total vand	177,4	170,8 l/m ³
Ækvivalent cement	277,9	276,8 kg/m ³
Ækv. V/C-forhold	0,84	0,62
Konsistens	120	190 mm
Wattmeter	174,0	149,0
Blandetid	90,00	287,00 s
Rumvægt	2.326	2.333 kg/m ³
Luftindhold i % af beton	2,0	2,6 %
Luftindhold i % af kitmasse	7,0	9,1 %

Prøve	Kategori	Termin	Målt	Beregnet
Sætnål/udbredelsesmål			190 mm	
Temperatur			9 °C	
Målt luftindhold på friskbeton			2,6 %	
Beregning af densitet	25-80		18,71 Kg	2.333 kg/m ³

Komkurve, gennemfald i %

Sigte, mm	0,075	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
Vægt % (Bør)	0	1	6	19	29	38	45	64	98	100	100	100
Vægt % (Er)	0	1	6	18	29	37	44	63	98	100	100	100

Unicon A/S

Betonkontrolattest

v. 1.14

Side 1 d. 23-02-2005 kl. 09:27:09

UNICON

2) P20
3-parties

Nummer : heb-001304 Hedehusene

Bestillingsnr. Receipt: p20rsfpe16in-kn--
 Bestillingskonto : prvbhho
 Kunde: Prævestøbing - Vestsjælland
 Højvang 3
 4300 Holbæk

Levering

Fabrik: Hedehusene Produceret (m3) : 1,50
 Følgeseddel: 6216808 Blandedato: 23-02-2005
 Prævested: fabrik kl.: 09:04:25

Konsistens: 120
 Blandemester: ekb
 Blander: Hedehusene
 Vognr.: 788
 Udtaget: 23-02-2005
 kl.: 09:04:25
 Udtaget af: 1knkn

Sammensætning	Materialenavn	Fugt %	Densitet kg/m ³	Tilsat (bør)	Blandet kg	1 m ³ (bør)	V.O.T. e
Cement	Rapld CEM I 52,5N(MS/LA<2)		3.160	251	257	167	17
Flyveaske	Emineral B4		2.300	90	90	60	60
Microsilica	Mikrosilica B104 Unicon		2.290	18	18	12	12
Vand	Koldt vand		1.000	147	145	98	97
Vand	Vand		1.000	8,0	3,0	5,3	2,0
Luftblanding	Conplast 316 AEA 1:5	98,2	1.003	1,26	1,29	0,84	0,86
Plastificering	Conplast 212	64,0	1.170	2,2	2,1	1,43	1,4
Sand	P0004 Svogerslev type I	5,3	2.582	1.325	1.315	839	832
Sten	E0416 Karlshamn granit	0,6	2.659	1.565	1.587	1.037	1.05
	Total: Fugt i materiale		1.000	0,00	0,00	51	50
	Total kg			3.407	3.419	2.271	2.277
	Volumen (liter)			1.500	1.501	1.000	1.000

Bør værdi Målt / bereg.

Total vand	155,7	150,7	l/m ³
Ækvivalent cement	220,6	225,3	kg/m ³
Ækv. V/C-forhold	0,71	0,67	
Konsistens	120	110	mm
Wattmeter	174,0	147,0	
Blandetid	90,00	91,00	s
Rumvægt	2.277	2.303	kg/m ³
Luftindhold i % af beton	4,5	4,6	%
Luftindhold i % af kitmasse	15,8	16,3	%

Prøve	Kategori	Termin	Målt	Beregnet
Sætmål/Udbredelsesmål			110 mm	
Temperatur			8 °C	
Målt luftindhold på friskbeton			4,6 %	
Beregning af densitet	25-60		18,47 Kg	2.303 kg/m ³

Kornkurve, gennemfald i %

Sigte, mm	0,075	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
Vægt % (Bør)	0	1	6	19	29	38	45	64	98	100	100	100
Vægt % (Er)	0	1	6	19	29	37	45	63	98	100	100	100

on A/S

Betonkontroltest

v. 1.14

Side 1 d. 23-02-2005 kl. 11:17:11

Nummer : heh-001307 Hedehusene

3) P20 - Sec
Vibetøbet

UNICON///

Bestillingsnr.: Receipt: p20rsfp16if-knv--
Bestillingskonto :prvbhho
Kunde:Prøvestøbning - Vestsjælland
Højvang 3
4300 Holbæk

Levering

Fabrik:Hedehusene
Følgeseddel:6216812
Prøvested:fabrik
Produceret (m3) : 1,53
Blandedato: 23-02-2005
kl.: 10:23:20

Konsistens: 540
Blandemester: ekb
Blander: Hedehusene
Vognnr.: 788
Udtaget: 23-02-2005
kl.: 10:23:20
Udtaget af: 1knkn

Sammensætning	Materialenavn	Fugt		Tilsat (bør)	Blandet kg	1 m3 (bør)	V.O.T. er
		%	kg/m3				
Cement	Rapid CEM I 52,5N(MS/LA<2)		3.160	249	247	166	163
Flyveaske	Emineral B4		2.300	112	121	75	80
Microsilica	Mikrosilica B104 Unicon		2.290	15	16	9,9	11
Vand	Koldt vand		1.000	156	154	104	101
Luftblanding	Conplast 316 AEA 1:5	98,2	1.003	1,44	1,47	0,96	0,97
Superplast	Structuro A1510	77,0	1.090	3,4	3,4	2,3	2,2
Plastificering	Conplast 212	64,0	1.170	1,88	1,83	1,25	1,21
Sand	P0004 Svogerslev type I	5,1	2.582	655	658	416	412
Sand	E0004 RN Avedøre	4,9	2.640	668	674	425	423
Sten	E0416 Karlshamn granit	0,6	2.659	1,485	1,174	984	769
Sten	E0416 Karlshamn granit	0,6	2.659	0,00	367	0,00	240
Vand	Vand		1.000	4,0	4,0	2,7	2,6
	Total: Fugt i materiale		1.000	0,00	0,00	48	48
	Total kg			3.351	3.422	2.234	2.253
	Volumen (liter)			1.500	1.518	1.000	1.000

Bør værdi Målt / bereg.

Total vand	158,1	155,3 l/m3
Ækvivalent cement	223,2	223,7 kg/m3
Ækv. V/C-forhold	0,71	0,69
Konsistens	540	410 mm
Wattmeter	0,0	0,0
Blandetid	90,00	91,00 s
Rumvægt	2.253	2.253 kg/m3
Luftindhold i % af beton	6,0	5,4 %
Luftindhold i % af kitmasse	19,5	18,0 %

Prøve	Kategori	Termin	Målt	Beregnet
Sætmål/udbredelsesmål			410 mm	
Temperatur			7 °C	
Målt luftindhold på friskbeton			5,4 %	
Beregning af densitet	25-60i		18,07 Kg	2.253 kg/m

Kornkurve, gennemfald i %

Sigte, mm	0,075	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
Vægt % (Bør)	0	1	8	22	34	41	47	65	98	100	100	100
Vægt % (Er)	0	1	8	21	34	40	46	64	98	100	100	100

Unicon A/S

Betonkontrolattest

v. 1.14

Side 1 d. 24-02-2005 kl. 11:26:43

Nummer : heh-001311 Hedehusene

Bestillingsnr.:564168 Receipt: p40rfee16ln-kn---
 Bestillingskonto :prvbhho
 Kunde:Prøvestøbning - Vestsjælland
 Højvang 3
 4300 Holbæk

Levering:Pladsen - Hedehusene
 (prøvestegninger)

Fabrik:Hedehusene Produceret (m3) : 1,22
 Følgeseddel:6216838 Blandedato: 24-02-2005
 Prøvested:fabrik kl.: 11:08:16

Konsistens: 120
 Blandemester: ekb
 Blander: Hedehusene
 Vognnr.: 788
 Udtaget: 24-02-2005
 kl.: 11:08:16
 Udtaget af: 1knkn

Sammensætning	Materialenavn	Fugt		Tilsat (bør)	Blandet kg	1 m3 (bør)	V.O.T. er
		%	kg/m3				
Cement	Rapid CEM I 52,5N(MS/LA<2)		3.160	347	350	269	281
Flyveaske	Emineral B4		2.300	66	66	55	53
Microsilica	Mikrosilica B104 Unicon		2.290	21	22	17	17
Vand	Koldt vand		1.000	111	109	92	88
Vand			1.000	8,0	4,0	6,7	3,2
Luftblanding	Conplast 316 AEA 1:5	98,2	1.003	1,09	1,16	0,91	0,93
Superplast	Structuro A1510	77,0	1.090	1,73	1,77	1,44	1,42
Plastificering	Conplast 212	64,0	1.170	2,5	2,5	2,2	2,0
Sand	E0004 RN Avedøre	4,9	2.640	902	903	716	691
Sten	E0416 Karlshamn granit	0,8	2.659	1.335	1.394	1.106	1.113
	Total: Fugt i materiale		1.000	0,00	0,00	42	41
	Total kg		2.795	2.853	2.329	2.291	
	Volumen (liter)		1.200	1.245	1.000	1.000	

	Bør værdi	Målt / bereg.
Total vand	144,3	134,6 l/m3
Ækvivalent cement	351,2	342,0 kg/m3
Ækv. V/C-forhold	0,41	0,39
Konsistens	120	110 mm
Wattmeter	147,0	162,0
Blandetid	90,00	91,00 s
Rumvægt	2.291	2.289 kg/m3
Luftindhold i % af beton	4,5	6,5 %
Luftindhold i % af kitmasse	14,4	20,3 %

Prøve	Kategori	Termin	Målt	Beregnet
Sætmål/udbredelsesmål			110 mm	
Temperatur			10 °C	
Målt luftindhold på friskbeton			6,5 %	
Beregning af densitet	25-60:		18,36 Kg	2.289 kg/m

Kornkurve, gennemfald i %

Størrelse, mm	0,075	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
Vægt % (Bør)	0	1	8	20	33	37	41	60	98	100	100	100
Vægt % (Er)	0	1	8	20	32	36	40	59	98	100	100	100

Unicon AS

Betonkontroltest

v. 1.14

Side 1 d. 23-02-2005 kl. 12:41:48

4) P40

UNICON

Nummer : heh-001309 Hedehusene

Bestillingsnr. Receipt: p40rsfee16ln-kn--
 Bestillingskonto :prvbhho
 Kunde:Prøvestabning - Vestsjælland
 Højvang 3
 4300 Holbæk

Levering

Fabrik:Hedehusene
 Følgeseddel:6216819
 Prøvested:fabrik

Konsistens: 120
 Blandemester: knkn
 Blander: Hedehusene
 Vogtnr.: 788
 Udlaget: 23-02-2005
 kl.: 12:02:49
 Udlaget af: 1knkn

Sammensætning	Materialenavn	Fugt %	Densitet kg/m ³	Tilsat (bør)	Blandet kg		V.O.T. er
					1 m ³ (bør)		
Cement	Rapid CEM I 52,5N(MS/LA<2)		3.160	289	291	289	280
Flyveaske	Emineral B4		2.300	55	57	55	55
Microsilica	Mikrosilica B104 Unicon		2.290	17	18	17	17
Vand	Koldt vand		1.000	91	88	91	85
Vand	Vand		1.000	7,0	4,0	7,0	3,8
Luftblanding	Conplast 316 AEA 1:5	98,2	1.003	1,04	1,00	1,04	0,96
Superplast	Structuro A1510	77,0	1.090	1,45	1,46	1,45	1,41
Plastificering	Conplast 212	64,0	1.170	2,2	2,2	2,2	2,1
Sand	E0004 RN Avedøre	4,9	2.640	752	765	717	702
Sten	E0416 Karishavn granit	0,6	2.659	1.113	1.169	1.107	1.118
	Total: Fugt i materiale		1.000	0,00	0,00	42	41
	Total kg			2.329	2.396	2.330	2.306
	Volumen (liter)			1.000	1.039	1.000	1.000

Bør værdi Målt / bereg.

Total vand	143,4	133,0 l/m ³
Ækvivalent cement	351,3	341,2 kg/m ³
Ækv. V/C-forhold	0,41	0,39
Konsistens	120	100 mm
Wattmeter	130,0	131,0
Blandetid	90,00	91,00 s
Rumvægt	2.306	2.281 kg/m ³
Luftindhold i % af beton	4,5	6,0 %
Luftindhold i % af kitmasse	14,4	19,1 %

Prøve	Kategori	Termin	Målt	Beregnet
Prøve	FB		100 mm	
Sætnål/mudbredelsesmålt			8 #C	
Temperatur			6,0 %	
Målt luftindhold på friskbeton			18,29 Kg	2.281 kg/m
Beregning af densitet	25-80°			

Kornkurve, gennemfald i %												
Sigte, mm	0,075	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
Vægt % (Bør)	0	1	8	20	33	37	41	60	98	100	100	100
Vægt % (Er)	0	1	8	20	32	36	40	60	98	100	100	100

Betonrecepter og kontroljournaler fra Expan A/S

EXPAN Byggesystem

Teknologisk Institut
Betoncenteret
Att. Claus Nielsen
Gregersensvej
2630 Tåstrup

FØLGESKRIVELSE

01-03-05

EXPAN A/S, Laborator

Ribevej 45

0650 Ørnuop

Tlf. 7637 7666

Fax 7637 7060

post@expan.dk

mgr@expan.dk

CVR-nr. 21474678

<input checked="" type="checkbox"/> Ifølge aftale	<input type="checkbox"/> Ring venligst	<input type="checkbox"/> Kan beholdes
<input type="checkbox"/> Iht. brev	<input type="checkbox"/> Til orientering	<input type="checkbox"/> Med tak for lån
<input type="checkbox"/> Iht. telefonsamtale	<input type="checkbox"/> Til godkendelse	<input type="checkbox"/> Ønskes retur
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Høj Claus

Jeg fremsender hermed, receptoplysninger til de leverede prøvelegemer.

LAC 10/1550 (LJ 85)		LAC 10/1850 (ØL 22)	
Type	Mængde - Kg.	Type	Mængde - Kg.
Basis cement: CEM I/A-LL 52,5 R	205	Basis cement: CEM I/A-LL 52,5 R	240
Flyveaske: B4	30	Flyveaske: B4	20
Klinker: Fibo 0/4 knækket	275	Klinker: Fibo 0/4 knækket	105
Sand: Sinding 0/4 mm, kLE	890	Sand: Kamstrup 0/4 mm, kLP	1550
H ₂ O: Byvand	185	H ₂ O: Byvand	118
Additiv: Sikament 92	1,4	Additiv: Melcret 500	1,5

Styrke, densitet og fugtindholds oplysninger, følger når prøvningen er afsluttet d. 18.03.05. ^{1566 kg} ^{2074 kg}

Jeg skal oplyse at, opskæring ved 7 døgn ikke har været mulig.
Prøverne er udskåret d.10.03.05. Dvs. LAC 10/1550 havde en alder på 12 døgn og LAC 10/1850 en alder på 9 døgn, ved opskæring.

Med venlig hilsen
Morten Grundvad
Morten Grundvad
Laboratorieleder

EXPAN



23.MAJ'2005 14:45 +76377959

EXPAN A/S

#2700 P.001/002

Gyldig fra 15.10.2001

EXPAN A/S
Laboratoriet
Ribevej 45
6650 Brørup

Kontroljournal

Trykstyrke og densitet

BL 20-3804
Afd.: Linå
Elem.nr.: 05-85

LAC 10/550

Prøvelement:					
Støbedato	25-02-05			Elementdimensioner	mm
Støbchal/bane/bord	1A7			Højde	2270
Saydato	09-03-05			Tykkelse	120
Prøvningsdato	11-03-05			Bredde	700
Alder døgn	14			Betontype	LAC 10/1550
Element modtaget:	07-03-05				

Kantstyrke: T: Element tykkelse - B: Savet bredde - H: Prisme højde

Prismer		Kant mål		Højde	Brudkraft		Brudstyrke	
Placering	Prøve nr.	T mm	B mm	H mm	Manometer afl. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²
Top	A							
Top	B							
Bund	C							
Bund	D							
Densitet		Vægt	Vægt brudstykker		Tørdensitet			
Placering	Prøve nr.	Prøve gr.	Våd gr.	Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Middel kg/m ³	
Top	A							
Top	B							
Bund	C							
Bund	D							

Trykstyrke (fri flade):

Prismer		Kant mål		Højde	Brudkraft		Brudstyrke	
Placering	Prøve nr.	T mm	B mm	H mm	Manometer afl. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²
	2	125,3	120,4	120,6	270,0	270,0	17,90	
	3	124,4	120,5	120,8	256,0	256,0	17,08	
	5	123,4	120,4	119,7	252,0	252,0	16,96	17,31
Densitet		Vægt	Vægt brudstykker		Tørdensitet			
Placering	Prøve nr.	Prøve gr.	Våd gr.	Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Middel kg/m ³	
	2	3045	3029	2815	8,76	1555		
	3	3013	2997	2785	8,76	1546		
	5	2988	2979	2771	8,75	1563	1555	
Boreprøve:		Frisk dens.	0	Fugt %:	0,0	Tørdens. f.	0	
Lagerfugt:	Ja	Prøve våd:	0	Prøve tør:	0	Fugt %:	0	

Bemærkninger:

Forhold kant-/elementstyrke		
Middelværdi:	17,31	OK
Enkelværdi:	16,96	OK
Variationsk.	1,97	OK

Dato: 15-03-05

Prøvning udført af TH

Prøvning beregnet af: TH

Version 03

Godkendt af MGR/

Gyldig fra 15.10.2001

EXPAN A/S
Laboratoriet
Ribevej 45
6650 Brørup

Kontroljournal

Trykstyrke og densitet

Bl. 20-3804
Afd.: Linå
Elem.nr.: 05-222
LAC 10/1550

Prøvelement:

Støbedato	01-06-05	Elementdimensioner	mm
Støbehal/bane/bord	1B14	Højde	2400
Savdato	10-06-05	Tykkelse	100
Prøvningsdato	15-06-05	Bredde	700
Alder døgn	14	Betontype	LAC 10/1550
Element modtaget:	08-06-05		

Kantstyrke: T: Element tykkelse - B: Savet bredde - H: Prisme højde

Prismer		Kantmål			Højde	Brudkraft		Brudstyrke	
Placering	Prøve nr.	T mm	B mm	H mm	Manometer afl. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²	
Top	A	101,3	101,3	100,1	172,0	172,0	16,76		
Top	B	100,3	100,2	100,2	186,0	186,0	18,51		
Bund	C	106,0	101,2	100,8	240,0	240,0	22,37		
Bund	D	102,8	100,2	100,9	193,0	193,0	18,74		19,09
Densitet		Vægt Prøve gr.	Vægt brudstykker Våd gr.		Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Tørdensitet Middel kg/m ³	
Placering	Prøve nr.								
Top	A	1663	1660	1565	6 5,1	1526			
Top	B	1643	1639	1543	6 6,2	1536			
Bund	C	1812	1808	1699	6 6,9	1575			
Bund	D	1715	1709	1607	6 6,3	1552		1547	

Trykstyrke (fri flade):

Prismer		Kantmål			Højde	Brudkraft		Brudstyrke	
Placering	Prøve nr.	T mm	B mm	H mm	Manometer afl. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²	
	1	102,4	100,3	101,0	156,0	156,0	15,19		
	4	102,8	100,3	101,1	200,0	200,0	19,40		
	6	103,1	100,4	101,1	207,0	207,0	20,00		18,19
Densitet		Vægt Prøve gr.	Vægt brudstykker Våd gr.		Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Tørdensitet Middel kg/m ³	
Placering	Prøve nr.								
	1	1693	1685	1582	7 6,5	1532			
	4	1739	1733	1631	6 6,3	1570			
	6	1756	1752	1643	7 6,6	1574		1559	
Boreprøve:		Frisk dens	0	Fugt %:	0,0	Tørdens. f.	0		
Lagerfugt:	Ja	Prøve våd:	0	Prøve tør:	0	Fugt %:	0		

Bemærkninger:

8 stk. terninger til TI - CVN

Forhold kam-/elementstyrke	104,94742
Middelværdi:	18,19 OK
Enkeltværdi:	15,19 OK
Variationskoeff.	9,63 OK

Dato 20-06-05

Prøvning udført af TH

Prøvning beregnet af: TH

Version 03

Godkendt af MGR/

24.MAJ'2005 14:46 +76377959

EXPAN A/S

#2700 P.002/002

Gyldig fra 15.10.2001

EXPAN A/S
Laboratoriet
Ribevej 45
6650 Brørup

Kontroljournal

Trykstyrke og densitet

BL 20-3804
Afd.: Ølsted
Elem.nr.: 05-22

LAC 10/1850

Prøvelement:	
Støbedato	28-02-05
Støbehal/banc/bord	2429
Savdato	09-03-05
Prøvningsdato	14-03-05
Alder døgn	14
Element modtaget:	04-03-05
Elementdimensioner	mm
Højde	0
Tykkelse	120
Bredde	700
Betontype	LAC 10/1850

Prismer		Kant mål		Højde	Brudkraft		Brudstyrke	
Placering	Prøve nr.	T mm	B mm	H mm	Manometer afl. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²
Top	A							
Top	B							
Bund	C							
Bund	D							
Densitet		Vægt	Vægt brudstykker		Tørdensitet			
Placering	Prøve nr.	Prøve gr.	Våd gr.	Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Middel kg/m ³	
Top	A							
Top	B							
Bund	C							
Bund	D							

Prismer		Kant mål		Højde	Brudkraft		Brudstyrke	
Placering	Prøve nr.	T mm	B mm	H mm	Manometer afl. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²
	2	122,5	120,4	120,4	370,0	370,0	25,09	
	3	122,1	120,6	120,4	449,0	449,0	30,49	
	5	120,8	120,6	120,3	442,0	442,0	30,34	28,64
Densitet		Vægt	Vægt brudstykker		Tørdensitet			
Placering	Prøve nr.	Prøve gr.	Våd gr.	Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Middel kg/m ³	
	2	3487	3424	3286	4 4,2	1885		
	3	3554	3508	3372	4 4,0	1927		
	5	3502	3407	3271	4 4,2	1918	1910	
Boreprøve:		Frisk dens.	2000	Fugt %:	8,5	Tørdens. f.	1878	
Lagerfugt:	Ja	Prøve våd:	0	Prøve tør:	0	Fugt %:	0	

Bemærkninger:

Forhold kant-/elementstyrke

Middelværdi:	28,64	OK
Enkeltværdi:	25,09	OK
Variationsk.:	7,17	OK

Dato: 18-03-05

Prøvning udført af TH

Prøvning beregnet af: TH

Version 03

Godkendt af MGR/

Gyldig fra 15.10.2001

EXPAN A/S
Laboratoriet
Ribevej 45
6650 Brørup

Kontroljournal

Trykstyrke og densitet

Bl. 20-3804

Afd.: Ølsted
Elem.nr.: 05-55

LAC 10/1850

Provclement:

Støbdato	09-06-05	Elementdimensioner	mm
Støbchal/bane/bord	2428	Højde	0
Savdato	13-06-05	Tykkelse	100
Prøvningsdato	23-06-05	Bredde	700
Alder døgn	14	Betontype	LAC 10/1850
Element modtaget:	10-06-05		

Kantstyrke: T: Element tykkelse - B: Savet bredde - H: Prisme højde

Placering	Prisme nr.	Kantmål		Højde H mm	Brudkraft		Brudstyrke	
		T mm	B mm		Manometer aft. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²
Top	A							
Top	B							
Bund	C							
Bund	D							
Densitet		Vægt		Vægt brudstykker		Tørdensitet		
Placering	Prøve nr.	Prøve gr.	Våd gr.	Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Middel	kg/m ³
Top	A							
Top	B							
Bund	C							
Bund	D							

Trykstyrke (fri flade):

Placering	Prisme nr.	Kantmål		Højde H mm	Brudkraft		Brudstyrke	
		T mm	B mm		Manometer aft. enh.	F kN	N/mm ²	Middel N/mm ²
	2	99,8	100,5	100,1	195,0	195,0	19,44	
	3	99,8	100,8	100,0	250,0	250,0	24,85	
	5	101,0	100,9	100,3	316,0	316,0	31,01	25,10
Densitet		Vægt		Vægt brudstykker		Tørdensitet		
Placering	Prøve nr.	Prøve gr.	Våd gr.	Tør gr.	Fugt %	kg/m ³	Middel	kg/m ³
	2	1837	1830	1775	3 3,1	1775		
	3	1924	1897	1839	3 3,2	1854		
	5	2018	1984	1923	3 3,2	1914	1847	
Boreprøve:		Frisk dens:	0	Fugt %:	0,0	Tørdens. l.	0	
Lagerlugt:	Ja	Prøve våd:	0	Prøve tør:	0	Fugt %:	0	

Bemærkninger:

8 stk. terninger til TI - CVN

Forhold kant-/elementstyrke

Middelværdi:	25,10	OK
Enkeltværdi:	19,44	OK
Variationsk.:	16,42	110J

Dato 27-06-05

Prøvning udført af TH

Prøvning beregnet af: TH

Version 03

Godkendt af MGR/

