



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R3:1977

**Kalkutfällningar på
betongytor**

Paul Samuelsson



Byggforskningen

son

INVEST

STATION

77-0288

Class

Dep.

ser

R3:1977

KALKUTFÄLLNINGAR PÅ BETONGYTOR

Paul Samuelsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
730625-5 från Statens råd för byggnadsforskning till
Cementa AB, Malmö.

UDK 620.191.7
691.32

Nyckelord:

betong
missfärgningar
kalkutfällningar
kemi
provningsresultat
ytbehandlingsmedel
syrvatvättning

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.
ISBN 91-540-2642-3

FÖRORD

Kalkutfällning på betongytor har varit ett stort problem för cementtillverkare, betongproducenter och användare av betongprodukter. Problemet är av estetisk natur och har varit en källa till irritation lika länge som man använt betongytor, på vilka det ställts krav i fråga om utseende.

Projekt KALKUTFÄLLNINGAR PÅ BETONGYTOR startades på initiativ av Utvecklingssektorn vid Cementa AB och det har genomförts med anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning. Avsikten var i första hand att öka kunskaperna om kalkutfällningarnas mekanism. Därutöver fanns en förhoppning, att resultaten av projektarbetet även skulle leda till praktiskt användbara råd och anvisningar.

En referensgrupp har varit knuten till projektet och i den har förutom sakkunniga från Cementa AB även ingått professor Lars Erik Nevander och civilingenjör Lars-Olof Nilsson från Tekniska Högskolan i Lund. Till dessa framförs ett varmt tack för saklig kritik och konstruktiv rådgivning. Till många andra inom och utom Cementa AB riktas likaså ett varmt tack för värdefull hjälp i olika sammanhang.

Malmö i oktober 1976

Paul Samuelsson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

BETECKNINGAR	8	
1	PROBLEMSTÄLLNING	9
2	PROJEKTETS MÅL OCH GENOMFÖRANDE	11
2.1	MÅL	11
2.2	GENOMFÖRANDE	11
3	LITTERATURSTUDIE	12
3.1	CEMENTPASTANS HYDRATISERING OCH KARBONATISERING	12
3.1.1	Cement	12
3.1.2	Hydratisering	14
3.1.3	Cementpastans porsystem	14
3.1.4	Karbonatisering	15
3.2	KALKUTFÄLLNINGSPROBLEMET I LITTERATUREN	19
4	KVALITATIVA FÖRSÖK	24
4.1	FÖRFÖRSÖK	24
4.1.1	Omfattning	24
4.1.2	Utförande	24
4.1.3	Resultat	29
4.1.3.1	Cementfabrikat	29
4.1.3.2	Vattencementtal	30
4.1.3.3	Härdningstemperatur	30
4.1.3.4	Vatten	30
4.1.3.5	Luft	31
4.1.3.6	Ohydratiserat cement	32
4.1.4	Sammanfattning av förförsök	33
4.2	PÖLPROV	34
4.2.1	Cementfabrikat och cementtyp	37
4.2.2	Vattencementtal	38
4.2.3	Temperatur	40
4.2.4	Relativ fuktighet	43
4.2.5	Vind	46
4.2.6	Strålning	48
4.2.7	Härdning i form	51
4.2.8	Sammanfattning av pölprov	53
4.3	FÄLTSTUDIER	54
4.3.1	Avsikt och omfattning	54
4.3.2	Utförande och resultat	54
4.3.2.1	Okulärbesiktning	54
4.3.2.2	Färgmätning med gråskalor	56
4.3.2.3	Inverkan av väderlek	58
4.3.2.4	Inverkan av form och formsläppningsmedel	62
4.3.2.5	Behandlingsmedel mot kalkutfällning	63
4.3.3	Kommentar	64
4.3.4	Sammanfattning av fältstudier	65

5	TEORETISK MODELL	66
5.1	VATTENMEKANISM	66
5.2	KALCIUMHYDROXID	67
5.3	KOLDIOXID	70
5.4	UTFÄLLNINGAR	70
5.4.1	Kraftiga utfällningar	70
5.4.2	Inga eller svaga utfällningar	70
5.4.2.1	Måttlig uttorkningshastighet	71
5.4.2.2	Stor uttorkningshastighet	72
5.5	KARBONATISERINGSTID	72
5.6	SCHEMATISK BILD PÅ MODELLEN	76
6	KVANTITATIVA FÖRSÖK	77
6.1	ERFORDERLIG KALKMÄNGD FÖR SYNLIIG UTFÄLLNING	77
6.1.1	Försök	77
6.1.2	Kommentarer	80
6.1.3	Sammanfattning	81
6.2	FÄRGMÄTNING	82
6.2.1	Avsikt	82
6.2.2	Metod	82
6.2.3	Provmätning	83
6.2.4	Mätningar på pölprov	84
6.2.4.1	Vattencementtal och relativ fuktighet	85
6.2.4.2	Hur fort utbildas skyddsskiktet	91
6.2.4.3	Avformningstid	92
6.2.5	Färgmätning på behandlad yta	94
6.2.6	Sammanfattning	95
6.3	URLAKNINGSPROV	96
6.3.1	Motiv	96
6.3.2	Utförande	97
6.3.3	Analysvärdena och deras användning	101
6.3.4	Kalkutfällning som ett sannolikhetsproblem	104
6.3.5	Cementfabrikat och cementtyp	105
6.3.6	Vattencementtal	110
6.3.7	Temperatur	112
6.3.8	Relativ fuktighet	116
6.3.9	Härddningstid i form	119
6.3.10	Ballastmängd	120
6.3.11	Betongens tjocklek	126
6.3.12	Lång härddningstid	128
6.3.13	Ändring av relativa fuktigheten under härddning	134
6.3.14	Sammanfattning av urlakningsförsök	139

6.4	METODER OCH MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING	140
6.4.1	Värmehärdning	140
6.4.2	Ökad koldioxidhalt	144
6.4.3	Ytbehandlingsmedel	149
6.4.3.1	Vatten	150
6.4.3.2	Soda	159
6.4.3.3	Ammoniumkarbonat	160
6.4.3.4	Ammoniumkarbamat	160
6.4.3.5	Vattenglas	164
6.4.3.6	Natriumtripolyfosfat	166
6.4.3.7	Natriumhexametafosfat	177
6.4.3.8	Fluorosilikat	178
6.4.3.9	Kommersiella behandlingsmedel	180
6.4.3.10	Syrvatvättning	186
6.4.3.11	Kombinerad behandling	193
6.4.3.12	Praktiska försök	196
6.4.4	Tillsatsmedel	199
6.4.4.1	Aluminatcement och puzzolana ämnen	199
6.4.4.2	Stearinsyra och kommersiellt tillsatsmedel	200
6.4.4.3	Luftporbildande tillsatsmedel	202
6.4.4.4	Kalciumklorid	204
6.4.5	Sammanfattning	208
6.5	BETONGYTANS UPPTAGNING AV KOLDIOXID	210
6.5.1	Försöksmetod och omfattning	210
6.5.2	Kalkurlakning och karbonatiseringsdjup	214
6.5.3	Härdningen och tidig karbonatisering	216
6.5.4	Behandlingsmedel och karbonatisering	220
6.5.5	Karbonatiseringshastighet i tidigt skede	221
6.5.6	Beräkning av karbonatiseringsdjup	222
6.5.7	Karbonatisering i praktiken - exempel	224
6.5.8	Sammanfattning	227
7	VERKAN AV MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING	228
7.1	BAKGRUND	228
7.2	OMFATTNING	228
7.3	SANNOLIK MEKANISM HOS DE ENSKILDA METODERNA	229
7.3.1	Ökad koldioxidhalt	229
7.3.1.1	Luft	229
7.3.1.2	Vatten	230
7.3.1.3	Karbonatlösningar	231
7.3.2	Silikat- eller fosfatlösningar	232
7.3.2.1	Vattenglas	232
7.3.2.2	Natriumtripolyfosfat	234
7.3.2.3	Natriumhexametafosfat	236
7.3.3	Fluorosilikat, fluatering	236
7.3.3.1	Natriumfluorosilikat	237
7.3.3.2	Kommersiellt fluateringsmedel	238

7.3.4	Syrabehandling	238
7.3.4.1	Saltsyra	239
7.3.4.2	Sulfaminsyra, ättiksyra	240
7.3.4.3	Fosforsyra	240
7.3.4.4	Kommentar till syrabehandling	240
7.3.5	Fysikaliskt verkande ytskikt	242
7.3.5.1	Silikonolja	242
7.3.5.2	Krympningsreducerande medel	242
7.3.5.3	Vegetabiliska oljor	243
7.3.5.4	Betongfärg - tekniska produkter	243
7.3.5.5	Akrylbaserade produkter	244
7.3.5.6	Epoxyplast	244
7.3.6	Tillsatser i den färska betongen	245
7.4	SAMMANFATTNING	246
8	KAN DEN TEORETISKA MODELLEN KVANTIFIERAS?	248
9	KAN RESULTATEN OMSÄTTAS I PRAKTIKEN?	249
9.1	DIMENSIONERING AV BEHANDLING	249
9.2	REPRODUCERBARHET	250
9.3	BETONGVAROR	252
9.4	PLATSGJUTEN BETONG	255
9.5	SLUTKOMMENTARER	255
10	SAMMANFATTNING	256
	LITTERATURFÖRTECKNING	262
	Bilaga 1 BETONGENS SAMMANSÄTTNING. FORMAR. GJUTNING.	265
	Bilaga 2 KALKUTFÄLLNINGAR PÅ BETONGYTOR. En färgbildbilaga. Problemet - inverkan av olika faktorer - åtgärder	269

BETECKNINGAR

CaCO_3	kalciumpkarbonat
CaO	kalciumoxid
Ca(OH)_2	kalciumhydroxid
CO_2	koldioxid
L	vattenbelastning, timmar
L_c	karbonatiseringsdjup, mm
LH	långsamt hårdnande portlandcement
rf	relativ fuktighet, %
SH	snabbt hårdnande portlandcement
Std	standardportlandcement
t_0	avformningstid, dvs härdningstid i form, timmar eller dygn
t_1	härdningstid efter avformning, timmar eller dygn
t_2	urlakningstid, timmar eller dygn
t_3	tidpunkt för syratvättningens början räknad från avformningen, timmar eller dygn
t_4	syratvättningens varaktighet, sekunder
vct	vattencementtal

Övriga beteckningar definieras i texten.

1 PROBLEMSTÄLLNING

Cemeta AB har av de skäl som anges nedan med anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning genomfört projektet KALKUTFÄLLNINGAR PÅ BETONGYTOR.

Betong är inte bara ett stommaterial. Förutom den bärande eller skyddande funktionen har den ofta en estetisk. Färgvalet kan skifta inom vida gränser. Ljusare eller mörkare grå färger erhålls normalt med vanligt portlandcement och används exempelvis i broar och stödmurar. Vill man ha andra färger väljer man ett färgcement eller tillsätter själv vid betongblandningen ett pigment. Färgbetong används i fasader, takpannor, gångbaneplattor m m.

Eftersom betongytan i sådana fall fyller en estetisk funktion, ställs det också högre krav på dess utseende än på annan betongs. Kraven gäller inte minst missfärgningar. En del av dessa kommer från betongen själv, andra gör det inte. De förra kan bero på fel hos betongmassan, t ex separationstendenser eller varierande vattencementtal, men även på felaktig behandling av betongen såsom ojäm vibrering eller tidig frysning. De senare kan drabba betongen såväl under själva byggnadsskedet, t ex olje- och rostfläckar, som under brukstiden, inte minst i form av nedsmutsning. En sammanställning av olika färgvariationer hos betong är gjord av Johansson och Skarendahl (1973).

En del av missfärgningarna undviks relativt enkelt genom omsorgsfullt arbetsutförande och undvikande av slarv. Andra däremot har visat sig svåra att undgå. Dit hör inte minst kalkutfällningar. Dessa har ställt till med stor förtret för många beställare, som fått sin betong helt eller delvis missfärgad. Olusten känns speciellt stor därför att kalkutfällningen kommer i

ett tidigt skede. Byggnadsverket i övrigt är då i regel nytt och snyggt och det är en klen tröst, att kalkutfällningen går bort av sig själv så småningom.

Den tid det tar för utfällningen att försvinna varierar. Ibland anges något år, ibland t o m några månader. Det är emellertid dokumenterat, att det kan ta flera år. Exempelvis är taket med den kraftiga kalkutfällningen på FIG 1 i BIL 2 mer än fyra år gammalt. Där kan man tvivla på om den överhuvud taget går bort. Under alla omständigheter kan en beställare ej känna sig nöjd med en sådan missfärgning, även om han vet att kalkutfällningen varken reducerar hållfasthet eller beständighet. När, var och hur kalkutfällningar uppträder och några orsaker till dem illustreras på FIG 1-4 i BIL 2.

Problemet med kalkutfällningarna går genom klagomål och reklamationer tillbaka till betongvarutillverkare och entreprenörer. Dessa belastas rent kostnadsmässigt genom kassation eller borttagande av missfärgningen, i regel genom syratvättning. Eftersom kalkutfällningarna härrör från cementet, går problemet i sista hand till cementindustrin i egenskap av materialleverantör. Som sådan har man självfallet ambitionen att anvisa sina kunder metoder eller medel för att undvika dessa estetiska problem.

Kalkutfällningarna varierar alltifrån en svagt ljus slöja till en intensivt vit beläggning. På grå betong upplever man ej utfällningen som en störande missfärgning, såvida den ej är mycket intensiv eller ojämnt fördelad på ytan. På färgad betong och framför allt på svart märks däremot redan en svag utfällning och även en inte alltför kraftig missfärgning upplevs som irriterande. En lösning av problemet skulle otvivelaktigt innebära en stor lättnad för många och kanske medföra att betong i färg används i större utsträckning än nu till glädje för både användare och tillverkare.

2 PROJEKTETS MÅL OCH GENOMFÖRANDE

2.1 MÅL

Projektets huvudmål var att studera kalkutfällningens mekanism. Erhållna bakgrundsdata skulle sedan kunna tjäna som underlag för vidare arbete, eget eller andras. Förhoppningsvis skulle projektet även ge direkt användbara resultat i form av anvisningar till producenter. Arbetet avgränsades till att gälla kalkutfällningarna som ett rent estetiskt problem.

2.2 GENOMFÖRANDE

För att ge projektledaren en omfattande sakkunskap inte bara om materialet betong utan även i fysik och kemi bildades en intern, rådgivande projektgrupp inom Cementa AB. Denna bestod av en fysiker (Göran Jansson), en kemist (Olle Peterson) och byggnadstekniker (Svante Bernow, Rolf Blank och Bengt Wennerberg). Till dessa knöts i en referensgrupp med sakkunskap i framför allt fuktforskning (Lars Erik Nevander och Lars-Olof Nilsson från Tekniska Högskolan i Lund).

Arbetet delades upp i tre etapper. Under den första gjordes litteraturstudier och förförsök. Dessa senare tjänade dels att kontrollera andras och egna erfarenheter, dels att ge vägledning för det fortsatta arbetet.

Den andra etappen innebar undersökning av olika variablers inverkan på risken för kalkutfällning. Arbetet genomfördes med kvalitativa metoder.

I den tredje etappen kontrollerades med kvantitativa försök tidigare erhållna resultat och vidare undersöktes verkan av metoder och medel mot kalkutfällning.

Parallellt med nyssnämnda arbeten har en del studier på arbetsplatser och betongvarufabriker skett.

3. LITTERATURSTUDIE

I fackpressen har under årens lopp kalkutfällningsproblemet tagits upp åtskilliga gånger. Oftast har det rört sig om begränsade undersökningar, beskrivning av praktikfall eller smärre notiser, men mera sällan redogörelser för systematiska undersökningar. Många patentskrifter behandlar medel mot kalkutfällning, men de är av naturliga skäl ganska speciella och ger sällan allmängiltig kunskap i ämnet. Något universalmedel har inte heller kommit fram, och därför är kalkutfällning fortfarande ett akut problem.

Nedan följer i 3.2 en kortfattad sammanställning av de erfarenheter som samlats ur litteraturen. Dessförinnan följer en kort redogörelse för cement och cementpastas hydratisering och karbonatisering. På dessa områden är litteraturen rikhaltig och kunskapen stor.

3.1 CEMENTPASTANS HYDRATISERING OCH KARBONATISERING

3.1.1 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel. Det bildar med vatten ett lim, cementpasta, som i betong omsluter ballasten och efter hårdandet håller denna på plats. Egenskaperna och i någon mån sammansättningen hos svenska portlandcement är reglerad, bla genom Statliga Cementbestämmelser (Statens Betongkommitté, 1960). Beroende på utgångsmaterial skiljer sig sammansättningen mer eller mindre för olika fabrikat. På nästa sida ges exempel på analyser av två svenska fabrikat, Slite Std och Limhamn Std. Det förstnämnda cementet har använts i de flesta provstyckena i projektets försök. Det senare fanns också med vid vissa prov och det intar en särställning bland de svenska cementfabrikaten genom att vara alkalifattigt relativt de övriga.

CEMENTANALYSER

	<u>Limhamn Std</u>	<u>Slite Std</u>
Kiseldioxid, SiO ₂	22,3 %	20,5 %
Aluminiumoxid, Al ₂ O ₃	4,1	4,7
Järn(III)oxid, Fe ₂ O ₃	2,9	2,3
Manganoxid, MnO	0,1	0,1
Kalciumoxid, CaO	66,3	63,2
Magnesiumoxid, MgO	1,7	4,1
Svaveltrioxid, SO ₃	2,1	3,5
Kaliumoxid, K ₂ O	<u>0,2</u>	<u>1,2</u>
	99,7	99,6
Glödförlust	2,3 %	1,8 %
Olöslig rest	0,4	0,1
Fri kalk	0,3	0,7
Kaliumsulfat, K ₂ SO ₄	0	2
Kalciumsulfat, CaSO ₄	3	4
Trikalciumsilikat, C ₃ S	62	57
Dikalciumsilikat, C ₂ S	17	16
Trikalciumaluminat, C ₃ A	6	8
Tetrakalciumaluminat- ferrit, C ₄ AF	9	7
Specifik yta	320 m ² /kg	350 m ² /kg

Analyserna utförda 1972. Värdena är framtagna med röntgenfluorescens-analys. Cementets halt av natrium är därför inte angiven. Halten natriumoxid, Na₂O, är normalt 0,2 % för Limhamn Std och 0,3 för Slite Std.

Intressant ur kalkutfällningssynpunkt är det stora kalkinnehållet (CaO) i cement. Ungefär två tredjedelar av cementvikten utgör kalk. Bortsett från en ringa del som är bunden i form av gips kan resten via kalciumhydroxid Ca(OH)₂ omvandlas till kalciumkarbonat CaCO₃. Se vidare under Karbonatisering, sid 15.

3.1.2 Hydratisering

När cementet blandas med vatten startar en rad reaktioner, hydratiseringen, varvid ett cementgel bildas. Hastigheten varierar bl a med temperatur och cementfabrikat, men huvuddelen av reaktionerna äger rum under de första dygnen efter gjutningen. Vid hydratisering binds vatten kemiskt i hydratform. Detta vatten, som ingår i den fasta massan, utgör vid fullständig hydratisering ungefär 25 % av cementvikten. Därutöver binds vatten till ca 15 % av cementvikten rent fysikaliskt i form av gelvatten, huvudsakligen bundet på mineralpartiklarnas yta. För fullständig hydratisering är således vattenbehovet ca 40 % av cementvikten. Mindre vatten ger cementpasta med delvis ohydratiserat cement och mer vatten innebär uppkomst av kapillärporer. Vid hydratiseringsprocesserna frigörs kalciumhydroxid i en storleksordning av 25 - 30 % av cementvikten, vilket medför att nygjutna betongytor är starkt basiska ("alkaliska").

3.1.3 Cementpastans porsystem

Man särskiljer olika typer av porer i cementpastan, nämligen

gelporer	0,5 - 1,5 nm
kontraktionsporer	0,5 - 1,5 nm
kapillärporer	1,5 - 100 nm
luftporer	$5 \cdot 10^3 - 10^6$ nm
	(10^6 nm = 1 mm)

Siffrorna anger ungefärlig porstorlek. Olika författare anger olika gränser.

Kontraktionsporerna uppstår vid den volymminskning som sker när vattnet binds kemiskt.

Det vatten som finns i kapillärporer och luftporer kan avges till och återupptas från omgivningen. Vid betongytan kan utbytet av vatten mellan dessa porer och luften ske relativt snabbt vid normala temperaturer. Detta är av väsentlig betydelse, om man genom härdning vill bygga upp ett skydd mot kalkutfällning. Det fysikaliskt bundna vattnet kräver för att avgå, att omgivningens relativa fuktighet är låg. Vid 105°C avgår större delen av det fysikaliskt bundna vattnet. Ännu svårare är det att avlägsna det kemiskt bundna vattnet.

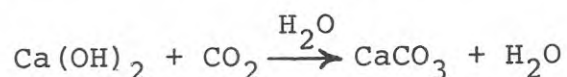
Cementets specifika yta är i storleksordningen 300 - 400 m²/kg. Vid fullständig hydratisering växer den till ca 0,2 · 10⁶ m²/kg (Czernin 1969). Dessa ytor är av betydelse vid karbonatiseringen enligt den teoretiska modell för kalkutfällning som redovisas på sid 66.

3.1.4 Karbonatisering

En betongyta karbonatiserar i regel i vanlig luft. Undantag finns dock, nämligen vid låg relativ fuktighet (uttorkat porsystem) och mycket hög (vattenfyllt porsystem). Den hastighet med vilken karbonatiseringen framskrider beror på temperatur, relativ fuktighet, vattencementtal etc. En optimal relativ fuktighet för karbonatiseringen finns. Pihlajavaara angav värdet 50 % rf i ett föredrag vid det nordiska betongforskningsmötet i Oslo 1976. Andra forskare har angett något högre värde.

De längre fram redovisade försöken inom projektet tyder på avsevärt snabbare karbonatisering vid 80 - 95 % rf. Därvid måste man dock hålla i minnet, att dessa försök gällde karbonatiseringsdjup av storleksordningen 0,1 mm i själva ytskiktet under kort tid. Undersökning av karbonatisering sker oftast under lång tid (år) och med större karbonatiseringsdjup (mm).

Karbonatiseringen kan beskrivas med formeln



Här bör man observera, att reaktionen kräver närvaro av vatten i flytande form. Det är ett faktum som hjälper till att förklara skillnaderna i betongytans karbonatisering vid de olika fukttillstånden i försöken längre fram.

Kalciumkarbonatet, CaCO_3 , kan antingen bildas på själva betongytan eller inuti själva ytskiktet. I det förra fallet blir karbonatet mer eller mindre synligt, beroende på den utfällda karbonatmängden. Det är denna synliga karbonatbildning på ytan som utgör det egentliga kalkutfällningsproblemet och som kan ge intensivt grå eller vita missfärgningar, FIG 1 och 4 i BILAGA 2. Som visas genom försök längre fram i projektet är den kalkmängd som krävs för att ge synlig utfällning mycket liten jämfört med mängden tillgänglig kalk i cementet, se sid 13 och 81.

I det andra fallet, dvs när karbonatiseringen sker inuti ytskiktet, blir inverkan på betongens färg ingen eller ringa. Karbonatiseringen gör även i detta fall ytan något ljusare, men denna färgändring blir på flertalet betongytor inte märkbar för ögat. På mörka, framför allt svarta, betongytor kan dock denna karbonatisering bli möjlig att iakttaga. Missfärgningen är emellertid ofta så svag, att den kan accepteras. Som störande uppfattas den mest på svarta ytor och speciellt vid direkt jämförelse med målade eller syratvättade ytor, FIG. 12 i BILAGA 2.

Jämsides med karbonatiseringen har cementpastans porositet (halten kapillärporer) betydande inverkan på om ytan ser ljusare eller mörkare ut.

Kalkutfällning på betongytan, dvs den som ger de egentliga problemen uppträder enligt erfarenhet då fritt vatten får stå på nygjuten betong.

Tidigare har nämnts att cementet tillhandahåller rikligt med kalciumhydroxid i betongen. En förutsättning för att den skall kunna ge upphov till kalkutfällning på ytan är löslighet i vatten. Kalciumhydroxiden är lös i vatten, 1,85 g/l vid 0°C, 1,65 g/l vid 20°C och 0,71 g/l vid 100°C. Värdena angivna av Boynton (1966).

Ibland anger man den större lösligheten vid låg temperatur som orsak till att kalkutfällningarna är svårare under vinterhalvåret. Löslighetens inverkan måste nog betraktas som marginell, men däremot har temperaturen en avgörande betydelse, som visas längre fram i rapporten, sid 112.

Till skillnad från kalciumhydroxiden är kalciumkarbonatet, dvs kalkutfällningen, svårlös i vatten. Rent vatten, fritt från främmande joner, löser vid 25°C endast 0,014 g/l av karbonatet. Detta är skälet till att det tar lång tid för karbonatet att försvinna med hjälp av regn, se sid 10.

Om vattnet innehåller koldioxid, fri eller bunden, ändras dess förmåga att lösa kalciumkarbonat. Sålunda finns det vatten som i stället för att lösa kalciumkarbonat rent av fäller ut nytt kalciumkarbonat på redan befintligt. Å andra sidan finns aggressiva vatten med större lösningsförmåga.

Övergången från kalciumhydroxid till kalciumkarbonat innebär en volymökning. Hur stor volymökningen blir, beror på i vilken form karbonatet bildas, som calcit eller aragonit. Volymändringen framgår i princip av följande uppställning.

	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	
vikt	74,09	100,09
densitet	2,24	2.71 - 2.93
volym	33,08	36,93 - 34,16
		(calcit) (aragonit)

Volymökningen medför inte nödvändigtvis en tätning av porsystemet. Denna påverkas även av det nybildade karbonatets geometriska uppbyggnad och specifika yta jämfört med ursprungsprodukternas. Cole och Krone (1960) har behandlat bl a i vilken form karbonatet bildas.

Erfarenheter från praktiken visar, att om man lyckas få ett karbonatskikt i ytan (ej på ytan) utgör detta ett skydd mot framtida utfällningar. Betongytor, som hunnit karbonatisera tillräckligt före första rikliga regn, klarar sig i allmänhet från utfällningar. Vad man inte känner är bl a vilken grad av karbonatisering som behövs för att skydda och hur man skall åstadkomma en snabb karbonatisering. Det är frågor som studerats under projektets gång. När det i fortsättningen av rapporten talas om skyddsskikt avses denna, i huvudsak osynliga karbonatbildning i själva ytan (ej på ytan). Enligt den teoretiska modellen på sid 66 är det inte karbonatskiktet som sådant som ger skyddet. Skiktet är inte tätt, men eftersom det innehåller ingen eller ringa mängd kalciumhydroxid, fördröjer det transporten av denna genom diffusion till ytan och minskar risken för utfällning på denna.

De flesta saltutslag på betongytor utgörs av kalciumkarbonat. Enstaka gånger kan utfällningar av andra föreningar uppkomma, men det är då i regel fråga om i vatten lösliga salter, som inte vållar större problem. Blümel och Jung (1962) redovisar urlakningsförsök på cementbruksprismor. Det framgår därav, att CaO utgjorde 87 viktsprocent av de utlösta ämnena. Resten var Na₂O och K₂O. Erfarenheterna under projekt-

ets gång understryker, att kalciumkarbonat är orsaken till de flesta missfärgningarna av saltutslag på betong.

För vidare studier av cementpastans kemi, hydratisering och karbonatisering hänvisas till den rikhaltiga litteraturen därom. Däribland kan nämnas Powers (1960) djupgående analys av cementpastans struktur. På svenska finns en mer elementär framställning av Czernin (1969) och en lättillgänglig men ändå avancerad framställning av betongens principiella uppbyggnad av Ahlgren, Bergström, Fagerlund och Nilsson (1976). Den sistnämnda behandlar även betongens fuktmekanik, till vilken kalkutfällningsproblemet har nära anknytning. Slutligen hänvisas beträffande karbonatisering till Pihlajavaara (1965) samt Pihlajavaara och Pihlman (1974). Dessa arbeten behandlar dock inte speciellt den tidiga karbonatiseringen, som innebär kalkutfällning eller skydd mot denna.

3.2 KALKUTFÄLLNINGSPROBLEMET I LITTERATUREN

I det följande nämns kortfattat ett urval av publikationer rörande kalkutfällningar. Resultaten och synpunkterna i dessa bedöms intressanta och tillsammans ger de en uppfattning om tillgänglig kunskap om kalkutfällningsproblemet vid projektets början. De har därför i viss mån utgjort en utgångspunkt för projektarbetet. Även några senare publikationer har medtagits.

En kartläggning ger Johansson och Skarendahl (1973) av faktorer som påverkar betongens färg tillsammans med en sammanställning av praktiska försöksresultat, som visar de olika faktorernas betydelse för den slutliga färgen.

Betongens gråton diskuterar Trüb (1973). Den sammanställs av två komponenter, dels betongens egen färg, dels utfällning av kalk. Likaså tas frågan upp om vad

som styr dessa komponenter. Genom några kvantitativa beräkningar påvisas sannolikheten i att den kalk som behövs för kalkutfällning efter hand tas från den fasta massan i ett tunt ytskikt snarare än ur kapillärvattnet längre in i betongen.

Samme författare (Trüb, 1966) påvisar, att nytt solbelyst formvirke kan åstadkomma missfärgning av betongytan. Detta har verifierats genom efterföljande svenska försök, där kraftig kalkutfällning erhöles på ytor gjutna mot nytt solbelyst virke. I samma form fanns även nytt virke, som skyddats mot sol. Betongen gjuten mot dessa ytor fick ingen som helst synlig kalkutfällning.

Neubarth (1969 och 1973) ger en teori om störning av den tidiga hydratationen som en orsak till kalkutfällning. Den kan förklara bl a att visst formvirke eller viss formolja ger upphov till utfällning. Författaren anger även en metod (Abmehltest) att kontrollera formvirkets och formoljans eventuella benägenhet att framkalla kalkutfällning. Som visas längre fram stöder flera försök i projektet Neubarths teori om störning av den tidiga hydratationen. Teorin går ut på att det lämnas kvar ohydratiserat cement i betongytan, som vid senare vattenpåföring (regn) ger kalkutfällning. Neubarth talar även om olika slag av kalkutfällningar, som skiljer sig inte enbart till uppkomstsätt utan även till struktur, amorf eller kristallin.

Neubarth (1969) visar även i en studie olika formvirkens inverkan på betongytans hydratisering. Där behandlas skillnaden mellan kärnved och ytved och betydelsen av den tidpunkt på året när avverkningen sker.

Omfattande urlakningsförsök, som framför allt kartlägger den potentiella risken för kalkutfällning vid

betongens avformning, presenterar Blümel och Jung (1962). De hävdar att mängden utlösbar kalk är ett mått på styrkan hos den väntade utfällningen. Den utlösbara kalkmängden bestäms av halten portlandcement och gelhalten (diffusionsmotståndet) hos bruket. Endast genom dessa båda faktorer påverkar den kemiska sammansättningen, halten fri kalciumoxid, malfinheten, vattencementtalet, puzzolaner och masugnsslagg utfällningsbenägenheten. Författarna fastslår helt allmänt, att det är fritt vatten på betongytan som startar kalkutfällningsmekanismen. Vidare säger de, att karbonatiseringen av cementpastan blir ett naturligt och verksamt skydd mot kalkurlakning. Karbonatiseringen är starkt beroende av temperatur och relativ fuktighet. Genom efterbehandling bl a med vattenglas kan man reducera urlakningen så mycket, att utfällning inte är att vänta. Den använda urlakningstekniken har i viss utsträckning tjänat som modell för urlakningsförsöken i föreliggande projekt.

Efter studier både i laboratorium och på fältet konstaterar Walz och Bonzel (1962) bl a följande. Betongytans utfällningar består huvudsakligen av kalciumkarbonat. Kalkutfällningarna är utan inverkan på betongens kvalitet utom i fråga om utseende. De uppkommer om fritt vatten blir stående på betongytan. Det gäller såväl regn som härdningsvatten. Inte minst farligt är regn som blir stående i springor mellan form och betong. Betongens eget vatten är av mindre betydelse och ger kalkutfällning endast om det kan bilda en fri vattenyta på betongen. Uppkomsten av utfällning påverkas inte väsentligt av cementsort. Inte heller betongens täthet, sammansättning och ålder betyder något, om betongytan inte kan torka och få ett karbonatskikt. Undersökta betongtillsatser hindrade inte kalkutfällningar. Betongvaror bör de första dagarna inte staplas för tätt och inte utsättas för regn eller härdningsvatten, utan förvaras i fuktrum eller i övertäckta lager. Vid värmebehandling tillses, att inget kondensvatten bildas eller droppar ned på ytan.

Liknande slutsatser dras av Zachrisson (1964). Författaren anger där utan närmare motivering, att hårdningen bäst sker vid minst rumstemperatur och en relativ fuktighet av 80 - 90 %. Förmodligen kommer författaren till denna slutsats genom sin stora praktiska erfarenhet. Försöksresultaten i projektet understryker med skärpa riktigheten i Zachrissons påstående om valet av relativ fuktighet. Artikeln tar vidare upp frågan om borttagning av uppkomna kalkutfällningar och behandling av betongytor för att undgå sådana. Borttagning, speciellt med syratvättning, innebär inga svårigheter, medan ett förhindrande av kalkutfällningarnas uppkomst synes mera problematisk.

En omfattande fransk undersökning redovisar Rabot, Coulon och Hamel (1970). Med stöd av försök konstaterar författarna, att vatten inte transporterar kalk från betongens inre till ytan. Den mängd som behövs för kalkutfällning finns i tillräcklig mängd i ytskiktet och tas därifrån. Som nämnts ovan kom Trüb (1973) till samma slutsats genom en kvantitativ beräkning. Författarna har undersökt inverkan av dels betongens eget vatten, dels utifrån påfört vatten. Liksom Walz och Bonzel (1962) fann de, att vattnet från betongen hade avsevärt mindre inflytande än utifrån tillfört vatten. Ett viktigt och intressant resultat är inverkan av vattencementtalet. Det fastslogs med försök, att tät betong är mer benägen för kalkutfällning än porös. Försök i föreliggande projekt bestyrker klart detta förhållande.

Resultaten från försök att få kalkutfällning av betongens eget vatten, bl a genom att åstadkomma en värmegradient i betongen, visade däremot att den täta betongen fick mindre utfällning än den porösa. Den franska undersökningen visar, att cementsorten har föga inflytande. Ett undantag var sådant cement som frigjorde endast litet kalk vid sin hydratisering och ett annat var cement med puzzolan tillsats. Båda fick

betydligt reducerade kalkutfällningar. Det påpekas också, att den färg cementet ger betongen har en viss betydelse. På en ljus betong syns en utfällning mindre än på en mörkare.

Ur de omfattande franska försöken ovan drog författarna den slutsatsen, att det är mycket svårt att undvika kalkutfällningar. Upphovet till dessa är antingen separationsvatten på färsk betong eller utifrån kommande vatten på hårdnad betong. Utfällning av separationsvatten ansåg de möjligt att förhindra medelst en helt tätslutande plastfolie på betongytan. Ett flertal behandlingsmedel har provats, men tillerkänns med något undantag ingen betydelsefull förbättrande verkan.

En förhöjd koldioxidhalt i härdningsluften sägs i en del publikationer ge ökad resistens mot kalkutfällning. Praktiska erfarenheter från betongblocktillverkning nämns av Smith (1973). Lovande resultat erhöles genom att sätta extra koldioxid till luften i härdkammaren i slutet av härdningscykeln. Koldioxidbehandlingen får inte enligt andra uppgifter i litteraturen påbörjas alltför tidigt (Kauer och Freeman, 1955). Smith omtalar även accelererad härdning av betong med puzzolantillsats.

Hur betongens färg påverkas av ånghärdning visas genom försök redovisade av Dutruel och Guyader (1975).

Även på målad betong inträffar besvärande kalkutfällningar. Det problemet, som inte tagits upp i detta projekt, har behandlats i en annan av Byggforskningens rapporter (Lindberg, 1972).

4 KVALITATIVA FÖRSÖK

4.1 FÖRFÖRSÖK

4.1.1 Omfattning

Inledningsvis utfördes en serie prov som dels skulle verifiera tidigare erfarenheter, dels skulle ge anvisningar för det fortsatta arbetet. Därvid söktes inverkan av

cementfabrikat	4.1.3.1
vattencementtal	4.1.3.2
härdningstemperatur	4.1.3.3
vatten	4.1.3.4
luft	4.1.3.5
ohydratiserat cement	4.1.3.6

4.1.2 Utförande

Provkropparna tillverkades huvudsakligen som cylindrar med diametern 70 mm och höjden 20 mm. Kantformen, som satt kvar under hela försöket, utgjordes av ett avsågat plaströr och bottenformen av en glasskiva, FIG. 1. Vid försöken användes den mot glasskivan gjutna ytan 2.

För formsläppningens skull ströks tunt med konsistensfett på bottenformen (Shell lubricant R). Betongen bearbetades på vibratorbord. Avformning ägde rum ett dygn efter gjutning. Tillverkning och förvaring fram till avformning skedde i rumstemperatur. Provkropparna gjordes röda genom pigmentering för att kalkutfällningar lätt skulle synas.

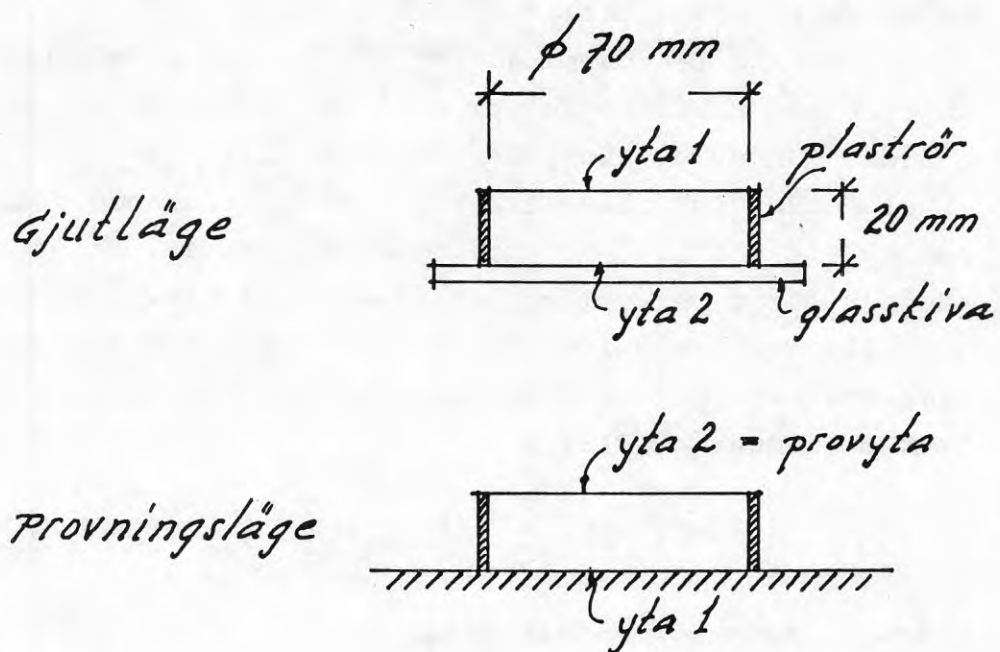


FIG. 1. Provkropp till förförsök.

Hela försöksserien exkl 4.1.3.6 genomfördes med tre olika vattencementtal: 0.4, 0.7 och 0.9.

Cementpastans mättnadsgrad var i alla tre blandningarna ungefär 130 %. Vid högre vct än 0.4 tillsattes filler i sådan mängd, att volymen cement + filler per volymenhet cementbruk blev lika stor som motsvarande volym cement vid vct 0.4. Rött pigment tillsattes, så att mängden därav per volymenhet cementbruk blev densamma för alla tre blandningarna. Utgångsvärde var 4 % av cementvikten för vct 0.4. Sammansättningen av cementbruket framgår av TAB. 1.

TAB. 1 Betongsammansättning.

Material	vct		
	0.4	0.7	0.9
Cement g	1 000	1 000	1 000
Vatten g	400	700	900
Sand ^a g	3x800	3x1440	3x1800
Filler ^b g	-	640	1 070
Pigment ^c g	40	70	90

^a Tre fraktioner normsand

^b Kalkstensmjöl från Ignaberga

^c Rött pigment, Bayer 110

Alla försök gjordes med två cementfabrikat, Slite Std och Limhamn Std.

Provkropparna delades upp i fyra grupper med likadana och lika många prover i varje. Dessa fick sedan var sin behandling enligt följande och TAB. 2.

- A. Vattenskikt 1 bestod i att ett ca 2,5 mm tjockt vattenskikt påfördes provytorna på avformningsdagen. Vattenskikten underhölls under daglig tillsyn i 5 dygn, varefter uttorkning fick ske. På grund av olika uttorkningshastighet blev den totalt påförda vattenmängden olika för de enskilda plattorna.
- B. Vattenskikt 2 innebar samma behandling som A. med undantag för underhållsvattnet. Detta valdes lika för alla tre vattencementtalen inom varje kolumn i TAB. 2. Tillsatt mängd bestämdes av betongen med vct 0,4, vilken torkade långsammast.
- C. Kapillärsugning underifrån definierades av att underytan, yta 2 i FIG. 1, var nedsänkt i vatten.
- D. Fuktig luft var förvaring 10 dygn i luft. Två olika klimat användes, se nedan. Efter luftlagringen påfördes provytorna ett 1,2 mm tjockt vattenskikt som underhölls i 5 dygn genom daglig tillsyn liksom för B ovan.

Två klimat simulerande vinter och sommar utnyttjades. Den ena hälften av försöken skedde i 1-6°C vid 86-92 % rf och den andra hälften i 18-20°C vid 66-80 % rf, se TAB. 2. Provkroppar och behandling var i övrigt identiskt lika i de båda klimatena.

Provstyckena studerades okulärt i 28 dygn efter avformningen. Uppkomna kalkutfällningar graderades enligt skalan: kraftig, svag, mycket svag och ingen (-).

TAB. 2 Resultat från okulärbesiktning av provkroppar i förförsök. Kalkutfällningen har subjektivt bedömts kraftig, svag, mycket svag eller ingen (-).

Behandling	Vct	Slite Std		Limhamn Std	
		Låg temp ^a	Rums-temp ^b	Låg temp ^a	Rums-temp ^b
A <u>Vattenskikt 1</u> ca 2.5 mm och underhållet i 5 dygn	0.4	Kraftig	Kraftig	Kraftig	Kraftig
	0.7	Svag	Svag	Svag	Svag
	0.9	Mycket svag	Mycket svag	Mycket svag	Mycket svag
B <u>Vattenskikt 2</u> ca 2.5 mm och underhållet i 5 dygn	0.4	Kraftig	Kraftig	Kraftig	Kraftig
	0.7	Svag	Svag	Svag	Mycket svag
	0.9	Svag	Svag	Mycket svag	Mycket svag
C <u>Kapillärsug- ning under- ifrån</u>	0.4	-	-	-	-
	0.7	-	-	-	-
	0.9	-	-	-	-
D <u>Fuktig luft</u> i 10 dygn, där- efter ca 1.2 mm vattenskikt i 5 dygn	0.4	-	Svag ^c	Kraftig ^c	Kraftig ^c
	0.7	-	-	-	-
	0.9	Mycket ^c svag	-	-	-

^a Intervallet för temperaturen var 1-6°C och för relativa fuktigheten 86-92 %.

^b Intervallet för temperaturen var 18-20°C och för relativa fuktigheten 66-80 %.

^c På detta prov fanns ingen störande kalkutfällning 10 dygn efter gjutningen, dvs innan en vattenfilm påfördes.

4.1.3 Resultat

Generellt gällde för alla förförsöken, att kalkutfällning uppstod endast efter det att fritt vatten påförts en provyta. Inverkan av övriga variabler anges var för sig nedan med kommentarer och i TAB. 2.

4.1.3.1 Cementfabrikat

Ingen påtaglig skillnad i kalkutfällning mellan de båda cementfabrikaten konstaterades.

Eventuellt hade provkroppar med Limhamn Std något mera utfällningar än Slite Std. En diskussion härom tas upp senare och då berörs även en möjlig orsak till skillnad mellan cementfabrikaten, sid 108.

Varje cementfabrikat har normalt sitt bestämda geografiska avsättningsområde. Eftersom kalkutfällningar uppträder överallt i landet, kan man knappast vänta sig att cementfabrikatet skall vara någon betydelsefull faktor för utfällningarna. Å andra sidan är det i en större undersökning dock motiverat att verifiera detta. Därför har alla prov i förförsöken utförts med dels Limhamn Std, dels Slite Std. Kemiskt sett skiljer sig det förra från övriga svenska cementfabrikat, här representerade av Slite Std, genom låg alkalihalt. Effekten härav blir en långsammare hydratation för Limhamn Std, vilket fysikaliskt innebär ett öppnare porsystem under den första tiden.

Föreligger en väsentlig skillnad mellan cementfabrikaten borde den avslöjas genom jämförelse mellan Limhamn Std och ett av de övriga.

4.1.3.2 Vattencementtal

Kalkutfällning efter vattenbelastning inträffade i huvudsak på betong med vct 0.4 och den blev i regel kraftig.

Betong med vct 0.7 och 0.9 drabbades också i vissa fall av utfällningar men dessa var mycket svagare.

4.1.3.3 Härdningstemperatur

Inget påtagligt temperaturberoende hos kalkutfällningarna kunde spåras.

All erfarenhet från praktiken tyder på att kall, fuktig väderlek innebär risk för kalkutfällningar. Det var därför naturligt att jämföra provkroppar som härdats i detta klimat med sådana som härdats vid högre temperatur.

Längre fram i rapporten visas att det finns ett temperaturberoende, men framför allt att risken för kalkutfällning har ett nära samband med härdningsluftens relativa fuktighet, sid 43 och 116. Vid försöken var relativa fuktigheten lägre vid rumstemperatur än vid låg temperatur. Denna skillnad kan ha varit mer utslagsgivande än temperaturskillnaden, vars effekt därigenom kan ha dolts.

4.1.3.4 Vatten

Fritt vatten på nygjuten betong utgör en stor risk för kalkutfällning

Praktiska erfarenheter visar, att kalkutfällningar ofta uppkommer efter det att en relativt nygjuten betongyta utsatts för vatten, i regel regn. Detta motiverade vatten som en försöksvariabel.

Resultatet överensstämmer med tidigare erfarenheter nämnda av bl a Walz (1962).

Försöken ovan innebar, att vattnet påförts betongytan utifrån. Rabot (1970) visade, att man under vissa villkor erhöll kalkutfällning av betongens eget vatten. I förförsöken gjordes en viss ansats att framkalla utfällning genom vatten- och kalktransport inifrån betongen och ut mot den fria ytan. Det skedde genom att provkroppens ena sida hölls nedsänkt 5 mm i vatten, behandling C enligt TAB. 2. Översidan, den sida som göts mot form, hade fritt lufttillträde, men fick inget vatten utifrån. På ingen av dessa provkroppar upptäcktes synlig utfällning. Till skillnad från de franska försöken fanns ingen temperaturgradient mellan ytan i vatten och luftytan. Detta kan förklara skillnaden i resultat.

4.1.3.5 Luft

Kalkutfällningarna blev avsevärt mindre, när vatten påfördes efter lagring i fuktig luft (behandling D) än vid vattenbehandling strax efter avformningen (behandling A och B).

Härdning i luft synes alltså ge betongen ett visst skydd. Om man drar denna slutsats av förförsöken, måste man samtidigt ha i minnet, att vattenskiktets tjocklek i D endast var hälften av det i A och B. I själva verket torde dock tjockleken hos skiktet vara av ingen eller ringa betydelse jämfört med varaktigheten av detta. Klimatets inverkan behandlas utförligt längre fram, sid 40, 43, 46, 48, 112 och 116.

4.1.3.6 Ohydratiserat cement

För att med ett par stickprov testa Neubarth's hypotes om störning av hydratationen som orsak till kalkutfällning, sid 20, genomfördes följande två försök:

- A. Ett par betongskivor göts i K 250 mot en porös form, som avvattnade ytskiktet så mycket att det inte fanns tillräckligt med vatten för fullständig hydratation.
- B. Några betongytor göts i K 250 emot en form med onormalt mycket formolja.

Från betongytorna A och B borstades ett pulver av, som först studerades i mikroskop och därefter rördes ut med vatten, varefter det fick torka. Betongytorna A placerades dessutom efter en tid utomhus tillgängliga för regn.

Resultaten av dessa försök visade att

det fanns ohydratiserade klinkerkorn (iakttagna i mikroskop) i det ytskikt som legat närmast formarna med porös yta eller mycket formolja

såväl avborstat som kvarsittande (på ytor A utomhus) löst pulver med ohydratiserad klinker fick kraftig kalkutfällning efter vattenbegjutning och upptorkning.

Försöksresultaten överensstämde helt med Neubarth's (1969) hypotes. Längre fram, sid 62, redovisas svåra utfällningar i praktiken då onormalt mycket formolja använts.

4.1.4 Sammanfattning av förförsök

Resultaten av förförsöken tyder på att man kan vänta

väsentlig inverkan på kalkutfällning av
vattencementtal
vatten påfört i tidigt skede
härdningsvillkor
störning av den tidiga
hydratationen

ingen eller ringa inverkan av
olika fabrikat portlandcement

Observera att denna värdering inte är slutgiltig,
utan tjänar som vägledning för den fortsatta under-
sökningen.

4.2 PÖLPROV

Erfarenheterna från litteraturstudier, praktik och egna förförsök pekade alla på att fritt vatten på en nygjuten betongyta i regel är den faktor som initierar en kalkutfällning. Som ett första steg i en mera systematisk undersökning studerades därför inverkan av utifrån påfört vatten på ett antal provkroppar enligt FIG. 2. Dessa tillverkades med olika sammansättning och lagrades i 28 dygn efter avformning.

Vattnets verkan studerades vid ändring av cementfabrikat och cementtyp, vattencementtal, temperatur, relativ fuktighet, vind, strålning och härdningstid före avformning.

Vattnet påfördes betongytan i form av 1,8 mm tjocka cirkulära pölar, FIG. 2. Vattenpölarerna avgränsades från den övriga betongytan medelst en blyertslinje. Denna kunde på grund av ytspänningen nätt och jämnt hålla vattnet inom cirkeln utom i något fall av missöde. Påföringen skedde i regel $t_1 = 0, 1, 2, 3, 7, 14, 21$ och 28 dygn efter avformningen och på två cirkelytor vid varje tillfälle, FIG. 2. t_1 definieras på FIG. 18, sid 102. Vattnet i pölarerna fick avdunsta och sugas in i betongen och underhölls ej med nytt vatten.

När vattnet försvunnit från betongytan kunde eventuellt uppkomna kalkutfällningar observeras visuellt, FIG. 5 i BIL. 2. Dessa observationer gav en god kvalitativ bild av olika faktorerers inverkan på uppkomsten av kalkutfällning.

På samma provkroppar utfördes efter okulärbesiktning även färgmätning i viss utsträckning. Den gav ett kvantitativt mått på utfällningens intensitet och överensstämmelsen med de visuella iakttagelserna blev god, sid 84.

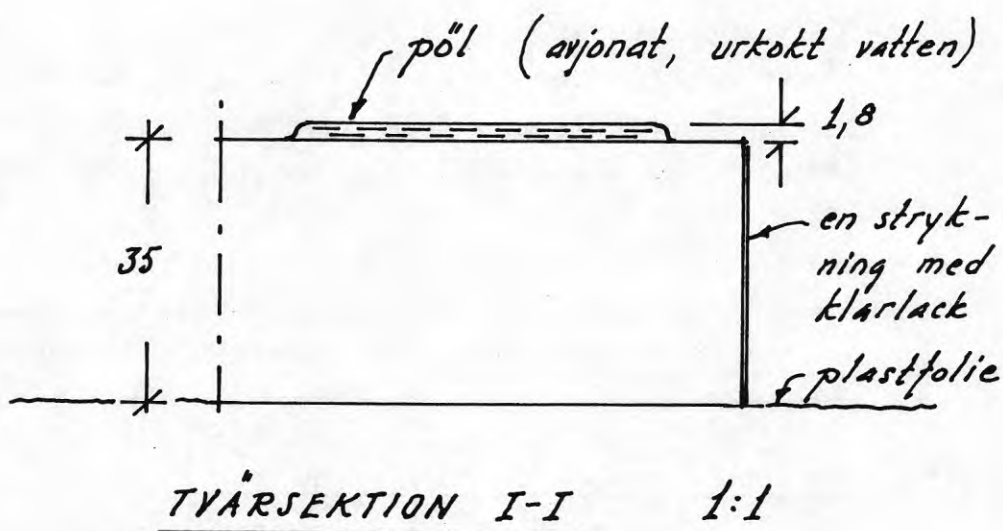
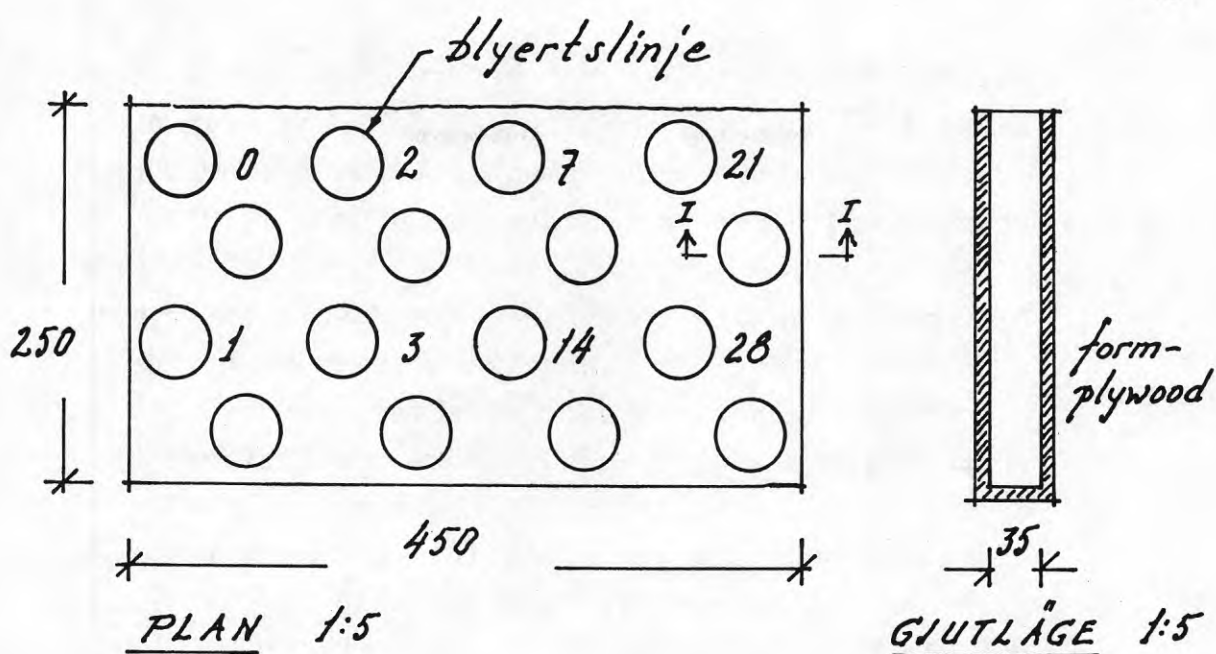


FIG. 2. Provkropp för pölprov. Siffrorna på planen anger tidpunkten för vattnets påförande i dygn efter avformningen. Två pölar vid varje tillfälle. Ingen förnyelse av vattnet i pölar. I vissa fall hade pölar en annorlunda placering än planen visar.

Huvuddelen av försöken har utförts med vattencement-talen 0.4, och 0.7, men i vissa fall har även 0.5 och 0.6 provats. Betongsammansättningen (cementbruk) framgår med vissa kommentarer av BILAGA 1.

Plattor som skulle förvaras i ett speciellt klimat avformades inne i det aktuella klimatrummet. Där placerades de horisontellt med överytan fri, för att vattenpölarne skulle kunna påföras och luftens koldioxid få fritt tillträde. Klimatrummen var alla så stora och hade sådan luftväxling, att luften inte utarmades på koldioxid. Plattorna låg med undersidan mot plastfolie, för att hindra uttorkning den vägen. Av samma skäl målades plattornas kanter med klarlack.

De temperaturer och relativa fuktigheter som anges i text och figurer nedan är nominella, om inget annat nämns. Avvikelserna från uppmätta värden framgår av TAB. 3. De synes vara utan betydelse för resultaten.

TAB. 3 Jämförelse mellan nominella och uppmätta temperaturer och relativa fuktigheter

Nominellt klimat		Uppmätt klimat	
Rf %	temp °C	Rf %	temp °C
40	20	40 ±1	19 ±0,5
65	20	63 ±1	20 ±0,5
80	20	80 ±5	20 ±1
95	20	95 ±5 ^a	--
80	5	80 ±3	7 ±2

^aI huvudsak 90-95 %, högre endast tillfälligtvis

Här nedan liksom annorstädes i rapporten definieras avformningstiden t_0 och härdningstiden t_1 enligt FIG. 18, sid 102.

4.2.1 Cementfabrikat och cementtyp

Med pölprov enligt föregående stycke provades tre standardcement och ett snabbcement. Dessa jämte andra variabler och villkor var följande.

Cementfabrikat: Slite Std, Limhamn Std, Skövde Std
och Skövde SH

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Relativ
fuktighet: 40 och 95 %

Temperatur: 20°C

Avformning: $t_0 = 1$ dygn

Härdningstid: $t_1 = 0, 1, 2, 3, 7, 14, 21$ och 28 d

Vid den okulära besiktningen av dessa pölprov kunde konstateras, FIG. 5 i BIL. 2, att

samtliga provkroppar fick tydlig kalkutfällning av vattenpåföring omedelbart efter avformningen ($t_1 = 0$ d)

samtliga provkroppar som lagrades i 40 % rf efter 28 dygn ($t_1 = 28$ d) fortfarande var benägna till en tydlig kalkutfällning vid vattenpåföring

de provkroppar som förvarades i 95 % rf hade efter ett dygn ($t_1 = 1$ d) erhållit ett skyddsskikt. Detta medförde, att vattenpölna som påfördes ytan inte orsakade någon som helst synlig utfällning (företredesvis vid vct 0.7) eller en avsevärt försvagad sådan (mestadels vid vct 0.4).

Denna del av undersökningen gav sålunda inget påtagligt belägg för någon väsentlig skillnad mellan cementen i fråga om kalkutfällning. Från praktiken har ibland gjorts gällande att byte av cementfabrikat inverkat på betongens benägenhet till kalkutfällning. Därför har frågan tagits upp mera ingående i den kvantitativa undersökningen, sid 105.

I ett portlandcement utgörs 60 - 70 % av cementvikten av CaO. En ringa del härav ingår i gipsen, men större delen ingår i klinkermineralen och kan genom inverkan av vatten och koldioxid så småningom överföras till kalciumkarbonat, CaCO_3 . Betänker man samtidigt att det endast behövs en CaO-mängd av storleksordningen 1 g/m^2 , se sid 78, för att åstadkomma en synlig utfällning, kan man knappast vänta sig någon väsentlig skillnad mellan olika portlandcement som sådana.

Man kan däremot tänka sig, att det påverkar risken för kalkutfällning, om två cementsorter skiljer sig väsentligt i fråga om hastigheten hos reaktionerna med vatten i hydratiseringens tidigare skede.

4.2.2 Vattencementtal

Fyra vattencementtal undersöktes med pölprov under olika villkor enligt följande data.

Vattencementtal: 0.4, 0.5, 0.6 och 0.7

Relativ fuktighet: 40, 65, 80 och 95 %

Temperatur: 20°C

Avformning: $t_0 = 1$ dygn

Härdningstid: $t_1 = 0, 1, 2, 3, 7, 14, 21$ och 28 d

Okulärbesiktning visade, FIG. 6 i BIL. 2, att

samtliga provkroppar fick tydlig kalkutfällning av vattenpåföring omedelbart efter avformningen ($t_1 = 0$ d)

betongen med vct 0.4 var mer benägen för kalkutfällning än den med högre vct

den tätare betongen (vct 0.4) krävde längre tid för att utveckla ett effektivt skyddsskikt än den mindre täta. Vidare blev i regel utfällningen intensivare på den förra än på den senare efter samma härdning.

Inverkan av vattencementtal iakttas bäst på betong härdad i gynnsamt klimat, 80-95 % rf. Vid otillräcklig eller ogynnsam härdning, 40-65 % rf, döljs vattencementtalets inverkan av andra effekter.

Som väntat var uttorkningen av vattnet (pölarne) långsammare vid vct 0.4 än vct 0.7. Detta bör vara en bidragande orsak till att mera kalciumhydroxid hinner föras ut i vattenskiktet på ytan för att där omvandlas till synligt kalciumkarbonat. Är insugningshastigheten hos vatten på ytan av en porös betong stor, hinner knappast kalciumhydroxiden diffundera dit. Då blir det ej heller någon synlig kalkutfällning.

Skillnaden i benägenhet för kalkutfällning var påtaglig mellan vct 0.4 och 0.7. Det är då ur praktisk synpunkt intressant att få veta utfällningsrisken för betong med mellanliggande vattencementtal, eftersom det intervallet otvivelaktigt representerar en betydande betongvolym.

Den färgmätning som redovisas längre fram syns vara en bättre bedömningsmetod för denna risk än den okulära besiktningen. Tills vidare konstateras därför endast,

att när det gäller kalkutfällning tycks betong med vct 0.5 och 0.6 vara mera lik betong med vct 0.7 än 0.4.

Denna del av undersökningen bestyrker resultaten dels i de franska försöken enligt Rabot (1970), dels i de egna förförsöken. Observera emellertid, att ovanstående gäller för utifrån påfört vatten, som är den dominerande orsaken till kalkutfällning. Vid inverkan av betongens eget vatten är däremot ett lågt vattencementtal gynnsammare än ett högt enligt de franska försöken.

4.2.3 Temperatur

Erfarenheter från praktiken pekar ganska entydigt på att kalkutfällningsproblemet är störst under vinterhalvåret, speciellt vår och höst. De enligt föregående avsnitt genomförda proven vid 20°C kan sägas representera sommarklimat. Pölprov utfördes därför i ett simulerat vinterklimat. Data för detta och övriga variabler följer nedan.

Temperatur: $7 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (nominellt 5°C)

Relativ fuktighet: $80 \pm 3 \%$

Vattencementtal: 0.4, 0.5, 0.6 och 0.7

Avformning: $t_0 = 0.5, 1$ och 2 dygn

Härdningstid: $t_1 = 0, 1, 2, 3, 7, 14, 21$ och 28 d

Gjutning skedde vid 20°C och i denna temperatur förvarades plattorna i 4 timmar, varpå de lagrades 8 timmar i 4°C. Sedan flyttades de till ett klimatrum med ovanstående temperatur och relativa fuktighet, där avformning och härdning ägde rum.

Okulärbesiktningen efter slutfört prov gav som resultat, FIG. 6 i BILAGA 2, att

de flesta provkropparna fick synlig kalkutfällning av vattenpåföring omedelbart efter avformningen ($t_1 = 0$ d). Ett undantag utgjorde provkroppen med vct 0.7, som avformades efter 0.5 dygn. Den undgick kalkutfällning och fick i stället en mörkare och klarare färg än området utanför vattenpölen. Detsamma gällde provkroppen med vct 0.6, avformad efter 0.5 dygn, fastän mindre markerat.

Plattorna som avformades efter 0.5 dygn fick tydliga mörka eller ljusa missfärgningar utanför blyertscirklarna. Det konstaterades visuellt att dessa uppstod av vatten, som transporterades i ytskiktet under blyertscirklarna. Vattnet fuktade tydligt betongytan utanför dessa utan att åstadkomma en fri vattenyta. Samma fenomen inträffade även på plattor med längre avformningstid, företrädesvis vid vct 0.7. Effekten var då svagare och avtog i regel med ökad härdning.

Provkroppar som avformades 1 eller 2 dygn efter avformning hade efter något eller några dygn erhållit ett skyddsskikt som var resistent mot den 1.8 mm vattenbelastning som vattenpölna utgjorde.

De utfällningar som erhöles syntes mindre intensiva än de vid försöken i 20°C.

Pölproven gav inget påtagligt intryck av att härdning vid låg temperatur skulle medföra större risk för kalkutfällning än vid hög. Som framgår av urlakningsproven på sid 112, föreligger dock en tydlig skillnad som bestyrker erfarenheterna från praktiken.

Att pölprovet inte visat denna skillnad sammanhänger sannolikt med att detta prov kräver att porsystemet i ytan är tillräckligt tätt, så att inte vattenskiktet sugas in alltför fort. Sker detta, blir pölprovets varaktighet alltför kort för att en synlig utfällning skall hinna utbildas. En förutsättning för ett tillräckligt tätt ytskikt är att tätande hydratationsprodukter fått tid och möjlighet att bildas. Sänkt temperatur medför minskad hydratationshastighet.

Det mest extrema exemplet på kort insugningstid var den provkropp som härdats i 5°C med vct 0.7 och avformningstid 0.5 dygn, FIG. 6 i BILAGA 2. I stället för kalkutfällning fick den mörkare färgton. I det fallet sögs det påförda vattnet in i betongen på ca 8 min. På motsvarande platta vid 20°C var insugningstiden ca 75 min.

En kort insugningstid kan innebära, att kalciumhydroxid visserligen löses i det påförda vattnet men samtidigt med detta sugas in i betongen och därigenom hindras karbonatisering på ytan.

En lång insugningstid medger däremot karbonatisering redan på vattenytan. Karbonatet blir efter vattnets insugning och avdunstning kvar på betongytan.

En väl avvägd vattenbehandling i ett tidigt skede efter gjutningen vore i vissa fall en tänkbar metod att motverka kalkutfällning. Frågan tas upp längre fram under rubriken Behandlingsmedel mot kalkutfällning på sid 63 och Vatten på sid 150.

4.2.4 Relativ fuktighet

Fyra relativa fuktigheter provades under de olika villkor som anges nedan.

Relativ fuktighet: 40, 65, 80 och 95 %

Temperatur: 20°C

Vattencementtal: 0.4, 0.5, 0.6 och 0.7

Avformning: $t_0 = 1$ dygn

Härddningstid: $t_1 = 0, 1, 2, 3, 7, 14, 21$ och 28 d

Proven utfördes i så stora klimatrum och med sådan luftväxling, att ingen brist på koldioxid behövde befaras.

Den okulära besiktningen visade enligt FIG. 7 i BILAGA 2 att

samtliga provkroppar fick tydlig kalkutfällning av vattenpåföring omedelbart efter avformningen ($t_1 = 0$ d)

provkroppar förvarade i 40 och 65 % rf var benägna till kalkutfällning vid vattenpåföring ännu 28 dygn efter avformningen ($t_1 = 28$ d). Detta gällde oavsett vattencementtal vid 40 % rf. Däremot kunde en viss förbättring skönjas för de högre vattencementtalen i slutet av försöksperioden för 65 % rf.

provkroppar härdade i 80 och 95 % rf hade i regel redan efter ett dygn blivit resistenta mot kalkutfällning vid vattenpåföring. Ett undantag utgjorde vct 0.4, som

krävde längre tid för att bygga upp det skyddande karbonatskiktet. Även för detta vattencementtal är dock fördelen med härdning i hög relativ fuktighet gentemot i låg otvetydig.

Härdningsluftens relativa fuktighet visade sig vara den mest betydande av alla undersökta variabler. Dess betydelse har redan framgått i avsnitten 4.2.1 - 4.2.3 och den understryks ytterligare av resultaten längre fram.

Det har sagts ovan, att redan efter ett dygns härdning i fuktig luft (80-95 % rf) har ett väsentligt skydd uppnåtts. Den tid som erfordras från avformning tills betongytan blivit tillräckligt resistent är givetvis av stort praktiskt intresse. Därför utfördes pölprov på en del ytor med kortare härdningstid än ett dygn i 80 och 95 % rf vid 20°C. Resultaten därav tyder på att ett betydande skydd nåtts redan efter ett halvt dygn, speciellt för vct 0.7, FIG. 8 i BILAGA 2.

Härdningsluftens temperatur och relativa fuktighet, makroklimatet, är givetvis ej i sig självt det väsentliga. Det är däremot de klimatvillkor, mikroklimatet, som de åstadkommer i betongens ytskikt. För karbonatiseringen krävs förutom tillgång till koldioxid även närvaro av vatten, sid 16. Det idealiska tillståndet i ytan bör därför vara luftfyllda porer med fuktiga väggar. Då får koldioxiden dels tillträde, dels möjlighet att reagera med befintlig kalciumhydroxid, så att karbonatiseringen sker innanför ytan, FIG. 3.

Helt öppna och torra porer, den ena ytterligheten, ger i brist på vatten ingen karbonatisering. Vattenfyllda porer, den andra ytterligheten, fördröjer koldioxidens inträngning i ytan. De hindrar däremot inte i vattnet löst kalciumhydroxid att tränga upp till ytan och där möta luftens koldioxid. Följden blir ett synligt kar-

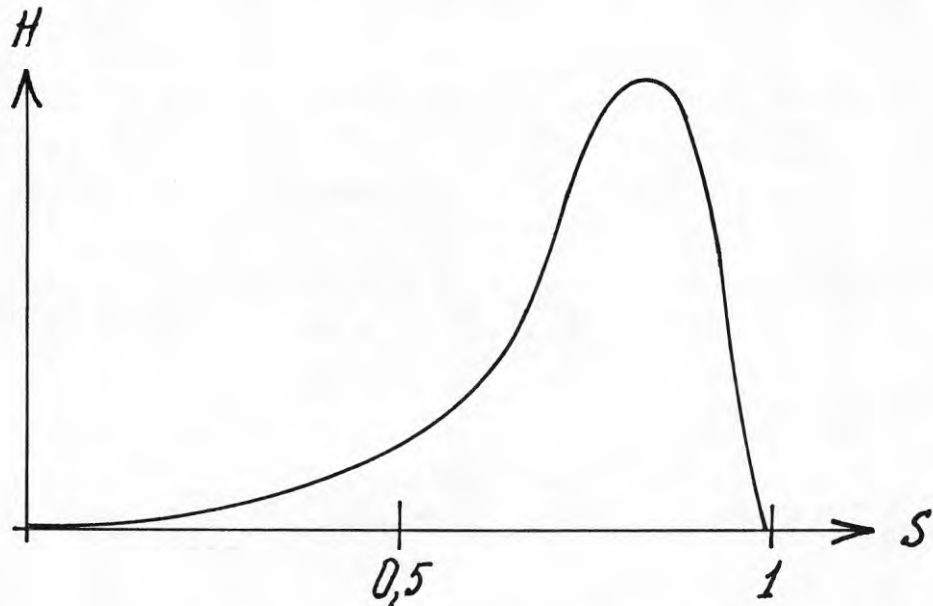
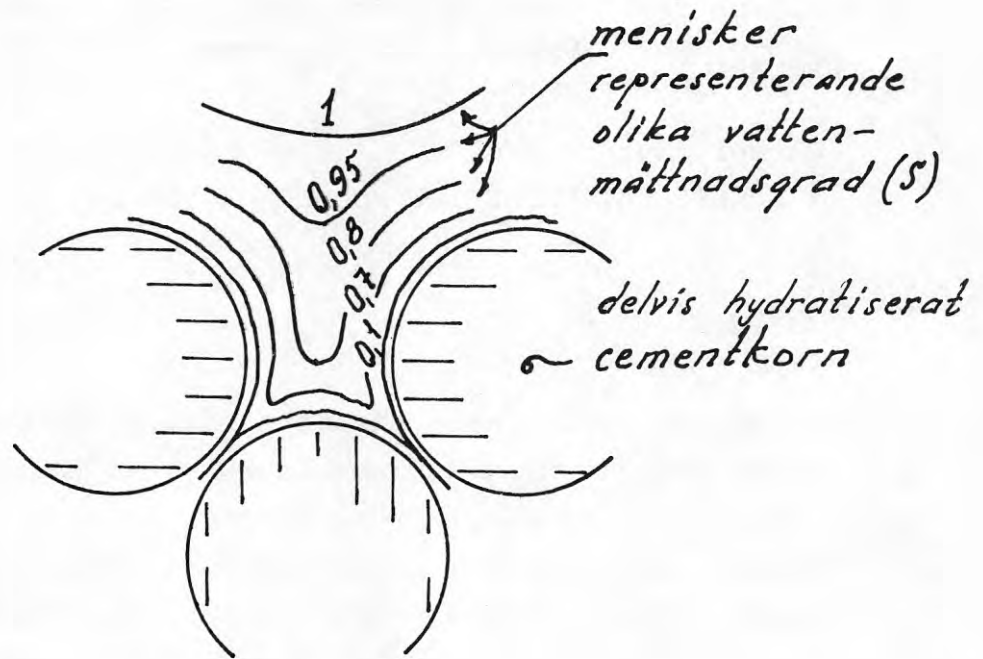


FIG. 3. Villkor för karbonatisering. Den övre bilden visar principiellt olika vattenmättnadsgrader (S) i cementpasta. Fyllt porsystem ($S=1$) hindrar luftens koldioxid att tränga in och karbonatisera under betongytan. Uttorkat porsystem ($S=0$) medger på grund av vattenbrist ingen karbonatisering trots tillgång på koldioxid. Vid viss vattenmättnad är såväl tillgången på koldioxid som vatten gynnsam för karbonatisering. Detta illustreras i princip av den nedre figuren med karbonatiseringshastigheten (H) som funktion av vattenmättnadsgraden (S).

bonat på ytan, FIG. 4. För att undvika detta får fritt vatten inte komma på betongytan, innan en karbonatisering inuti ytskiktet ägt rum.

En mera ingående diskussion om karbonatiseringen förs i avsnitt 5, TEORETISK MODELL på sid 66.

4.2.5 Vind

Betongvarutillverkare har ofta fått rådet att undvika drag, för att minska risken för kalkutfällning. Vidare är det känt, att betongytor som vetter mot förhärskande vindriktning ofta fått mer kalkutfällning än övriga. Ett eventuellt samband mellan vind och kalkutfällning vore därför värdefullt att få kartlagt. I anslutning till övriga pölprov i klimatarummen utsattes därför en del plattor för vind med hjälp av en fläkt. För dessa försök gällde följande data.

Vindhastighet: 0.7 - 1.6 m/s

Temperatur: 7° (5°C nominellt) och 20°C

Relativ fuktighet: 80 % (vid 5°C) samt
40 och 95 % (vid 20°C)

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Avformning: $t_0 = 2$ dygn (vid 5°C) och
1 dygn (vid 20°C)

Härdningstid: $t_1 = 0, 1, 2, 3, 7, 14, 21$ och 28 d

Temperaturen vid gjutningen och timmarna därefter var för 5°-plattorna densamma som för plattorna i låg temperatur enligt 4.2.3, sid 40.

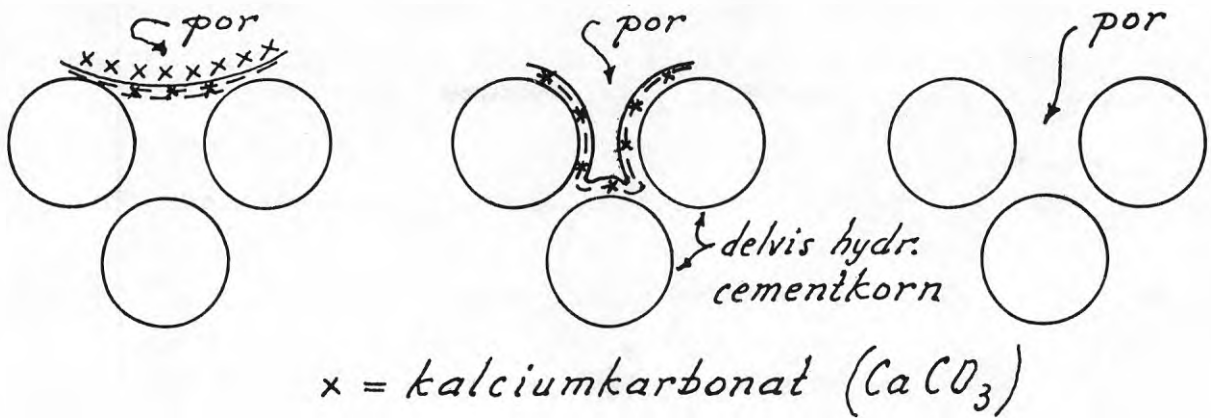


FIG. 4. Olika villkor för karbonatisering av en betongyta i schematisk avbildning.

Den vänstra figuren visar en vattenfylld por. Vattnet tillåter endast en långsam inträngning av luftens koldioxid, men medger kalciumhydroxid att snabbt nå ytan. Där bildas då synligt karbonat.

Mellanfiguren visar en por med kapillärkondensation. Koldioxid kan tränga in i betongen och med den i de tunna vattenskikten lösta kalciumhydroxiden bilda karbonat som inte syns.

Den högra figuren visar en uttorkad por. Där sker ingen karbonatisering på grund av vattenbrist, trots god tillgång på koldioxid.

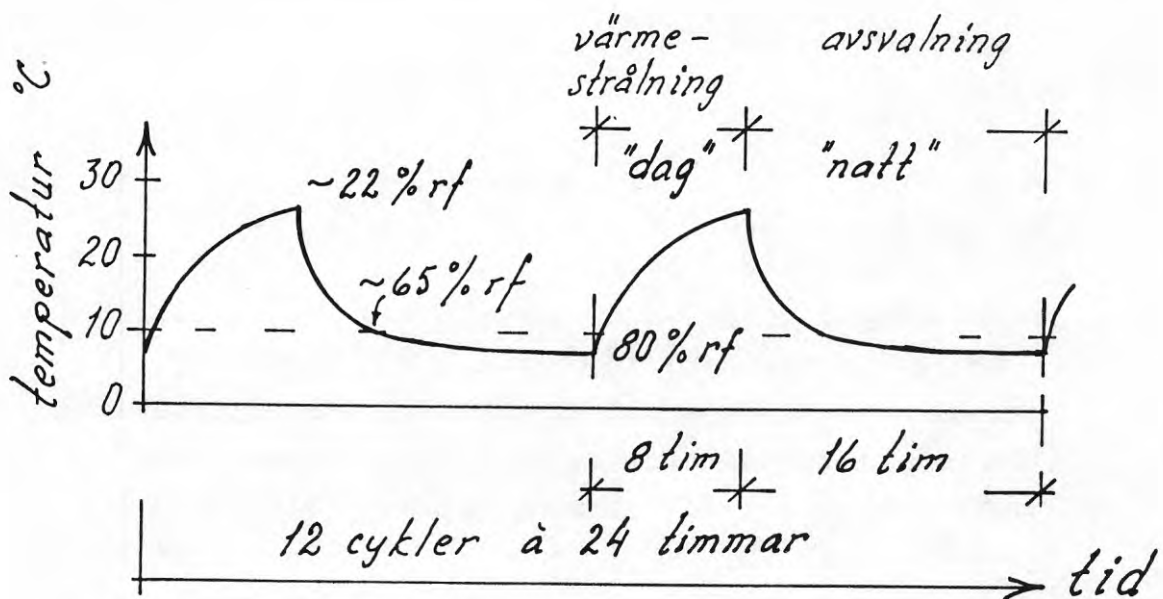


FIG. 5. Pölprov på provkroppar som utsatts för intermitterent strålning. Temperaturförlopp i betongytan, registrerat med termoelement.

Resultatet, se även FIG. 10 BILAGA 2, av den okulära besiktningen blev att

vinden inte åstadkom någon för ögat märkbar verkan

en ändring av vattencementtalet eller relativa fuktigheten gav samma effekt som tidigare beskrivits i 4.2.2 och 4.2.4

Trots nyssnämnda resultat kan man inte bortse från, att vind kan ha en reell inverkan på risken för kalkutfällning.

I praktiken kan vinden påskynda uttorkningen mera än vid laboratorieförsöken, som innebar en omrörning av luft med konstant temperatur och fuktighet. Risken för kalkutfällning bör minska, om tiden med fritt vatten på ytan förkortas avsevärt av vind.

Att vind å andra sidan kan innebära stor risk för kalkutfällning visas i 4.3.2.3 på sid 58. Det som därvid sker är att vinden ger en horisontell rörelse åt regnvatten, som kan ge nygjutna fasader etc en alltför stor vattenbelastning, FIG. 4 BILAGA 2.

4.2.6 Strålning

Det antydde i 4.2.5 Vind, att ytor vettande mot förhärskande vindriktning skulle löpa störst risk att få kalkutfällning. Iakttagelserna som ligger till grund för denna tanke är gjorda i Malmö-trakten, där betongytor mot söder vid flera tillfällen fått avsevärt mer kalkutfällning än ytor mot norr. Förutom vind vore därför solstrålning (värmestrålning) en tänkbar orsak. Värmestrålnings eventuella inverkan studerades därför med hjälp av pölprov på två prov-

kroppar, som förvarades i ett klimat som simulerade varm dag - kall natt. För försöken gällde följande data.

Temperatur: $5^{\circ} - 25^{\circ}\text{C}$ i 12 cykler enligt FIG. 5

Relativ
fuktighet: 80 %

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Avformning: $t_0 = 2$ dygn

Grundklimatet var detsamma som för plattorna i låg temperatur, likaså temperaturen vid gjutningen och timmarna därefter, se 4.2.3. sid 40. Temperaturen mätt i ytan med termoelement.

Plattorna värmdes med strålning från en värmelampa. Denna tändes strax efter avformningen, varefter 12 cykler med växelvis tänd lampa i 8 timmar och släckt lampa i 16 timmar genomfördes. Temperaturen ändrades under en cykel ungefär 20°C och så som FIG. 5 visar.

Resultaten efter visuell bedömning blev, FIG. 10 i BILAGA 2 att

plattan med vct 0.4 fick kraftig utfällning av vattenpåföring ännu efter 28 dygns härdning

plattan med vct 0.7 också erhöll utfällning av vatten under hela försöksperioden. Dock var dessa mindre intensiva än vid vct 0.4.

båda provplattorna gav väsentligt mer utfällningar än motsvarande plattor utan värmestrålning

En tänkbar förklaring till strålningens verkan kan vara, att denna under värmeperioderna torkar ur yt-skiktet så mycket att detta inte hinner få kapillär-kondensation och karbonatisering inuti ytskiktet under kallperioderna. Följande överslagsberäkning visar, att man måste räkna med en viss fördröjning i ytans karbonatisering. Den vattenånghalt som fanns i luften vid 5°C (nominellt) och 80 % rf räckte vid en temperaturstegring på 20°C endast till en relativ fuktighet av ungefär 22 %. Detta låga värde innebar att karbonatiseringen var mycket ringa, jfr pölproven vid 40 % rf. Av de tidigare pölproven har framgått, att relativa fuktigheten bör ligga över 65 % för att ge en snabb karbonatisering av betongens ytskikt. Den i luften tillgängliga ånghalten motsvarar vid 65 % rf en temperatur av ca 10°C . Kurvan på FIG. 5 visar att denna temperatur överskreds ungefär halva tiden i en cykel. Således rådde ett ur kalkutfällningssynpunkt ogynnsamt mikroklimat mer än halva härdningstiden under de 12 första dyggen.

Ovanstående pekar på en rimlig orsak till att pölproven gett sämre resultat med strålning än utan. Det är dock anmärkningsvärt, att man inte under tiden från strålningens upphörande ($t_1 = 12$ dygn) till försökets slut ($t_1 = 28$ dygn) lyckats få ett skyddande karbonat-skikt, som var tillräckligt resistent mot den vattenbelastning pölarne innebar. Se även 6.3.7 sid 112.

En fråga av praktiskt intresse är, om en väl härdad betongyta, t ex 1 dygn i 20°C och 80 % rf, hade klarat pölprovet med strålning bättre än de båda provplattorna. Svaret bör bli jakande, ty strålningen hindrade endast uppkomsten av ett skyddsskikt. Den bröt däremot knappast ned något redan befintligt.

4.2.7 Härdning i form

En naturlig fråga är, om man kan påverka risken för kalkutfällning med formrivningstiden, t_0 . Här avses sådana verkningar en tidig eller sen formrivning har på betongytans porsystem och därmed på graden av vattenmättnad och koldioxidens inträngning.

En betongyta, där kalkutfällning inte tolereras, får självfallet ej öppet avformas i eller före regn, vilket redan indirekt framgått av tidigare försök.

Pölprov genomfördes med fyra olika avformningstider och med övriga villkor enligt nedanstående data.

Avformning: $t_0 = 0.5, 1, 2$ (endast vid 5°C)
och 8 dygn

Temperatur: 7° (nominellt 5°C) och 20°C

Relativ
fuktighet: 80 % (vid 5°C) samt
40 och 95 % (vid 20°C)

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Temperaturen vid gjutningen och timmarna därefter var för 5° -plattorna densamma som för plattorna i låg temperatur enligt 4.2.3 sid 40.

Okulärbesiktning, FIG. 9-10 BILAGA 2, visade att

för plattor härdade i 5°C och 80 % rf blev det ingen väsentlig skillnad i kalkutfällning antingen avformningstiden var 1 eller 2 dygn

för plattor härdade i 5°C och 80 % rf med avformningstid 0.5 dygn blev det dels utfällningar av relativt måttlig intensitet, dels mörka ytor på betongen, framför allt i form av mörka ringar utanför pölarna

för plattor med vct 0.4 härdade i 20°C och 40 % rf blev kalkutfällningen i stort sett densamma vid avformningstiderna 0.5, 1 och 8 dygn

för plattor med vct 0.7 härdade i 20°C och 40 % rf blev kalkutfällningen i stort sett densamma vid avformningstiderna 1 och 8 dygn. Avformning efter 0.5 dygn medförde snarare mindre utfällning, men å andra sidan erhöll plattorna mörka ringar utanför cirklarna.

för plattor härdade i 20°C och 95 % rf blev kalkutfällningen i huvudsak densamma för alla tre avformningstiderna vid båda vattencementtalen

ändringar av vattencementtal, relativ fuktighet etc gav resultat som styrker erfarenheterna från tidigare pölprov

Huvudintrycket av försöken blir, att en mycket kort härdning före avformning lätt kan ge missfärgning i betongytan vid vattenpåföring. Det kan antingen vara kalkutfällning eller mörkfärgning av ytan. I senare fallet kan det vara fråga om kalciumhydroxid, som löses i vattnet och med detta suges in i betongen, varigenom karbonatisering i ytskiktet förhindras.

Det är givetvis inte tiden före avformningen i sig själv som är utslagsgivande, utan den mognadsgrad eller hydratiseringsgrad som nås och påverkar por-systemet.

Man minskar inte risken för kalkutfällning genom att dröja med avformningen, vilket noteras ur praktisk synpunkt.

Utförda försök med vct 0.5 och 0.6 följde mönstret för vct 0.4 och 0.7.

Avformningstidens (t_0) inverkan studeras även i 6 KVANTITATIVA FÖRSÖK, sid 119, där resultaten ovan i huvudsak verifieras.

4.2.8 Sammanfattning av pölprov

Resultaten av de kvalitativa försöken kan i korthet sammanfattas enligt följande:

Härdning i hög relativ fuktighet, 80 - 95 %, efter avformningen ger på kort tid ett skyddande karbonatskikt, som avsevärt reducerar risken för kalkutfällning.

Härdning i låg relativ fuktighet, 40-65 %, efter avformningen ger en mycket långsam uppbyggnad av ett skyddande karbonatskikt. Risken för svår kalkutfällning är då stor under lång tid.

Det är svårare, men inte omöjligt, att göra en tät betong (vct 0.4) resistent mot kalkutfällning av utifrån påfört vatten än en mindre tät (vct 0.7).

Värmestrålning (sol) tycks kunna öka risken för kalkutfällning påtagligt.

Cementfabrikat och cementtyp, temperatur, vind och härdningstiden i form (avformningstiden) har ingen eller föga inverkan på kalkutfällningen. En mera definitiv bedömning av dessa faktorerers effekt görs i 6 KVANTITATIVA FÖRSÖK.

4.3 FÄLTSTUDIER

4.3.1 Avsikt och omfattning

I projektets målsättning ingick, att om möjligt även göra observationer på kalkutfällningar i praktiken.

Ett utmärkt tillfälle därtill erbjöds under projekt-tiden vid byggandet av pelarna till en transportbana vid cementfabriken i Limhamn.

Antalet observerade pelare var 35 st. Pelarna hade bredden 1,5 m, tjockleken 0,4-0,5 m och höjden ca 6,5 m. Endast breddsidorna (1,5 x 6,5 m) studerades. De var vända mot öster och väster på 7 pelare och mot norr och söder på de övriga, FIG 6. Se även FIG. 4 i BILAGA 2.

Betonggjutningen skedde på byggnadsplatsen och konti-nuerligt under vinterhalvåret 1974-75. Pelarna av-formades i regel två dygn efter gjutningen.

Följande undersökningar genomfördes

- Okulärbesiktning
- Färgmätning med gråskalor
- Inverkan av väderleken vid gjutnings-tillfällena och tiden därefter
- Inverkan av form och formsläppningsmedel
- Behandlingsmedel mot kalkutfällning

4.3.2 Utförande och resultat

4.3.2.1 Okulärbesiktning

Det konstaterades, att samtliga observationssidor mot söder fick kraftiga kalkutfällningar kort tid efter avformningen. Nordsidorna stod lång tid utan synliga utfällningar. Även dessa fick senare

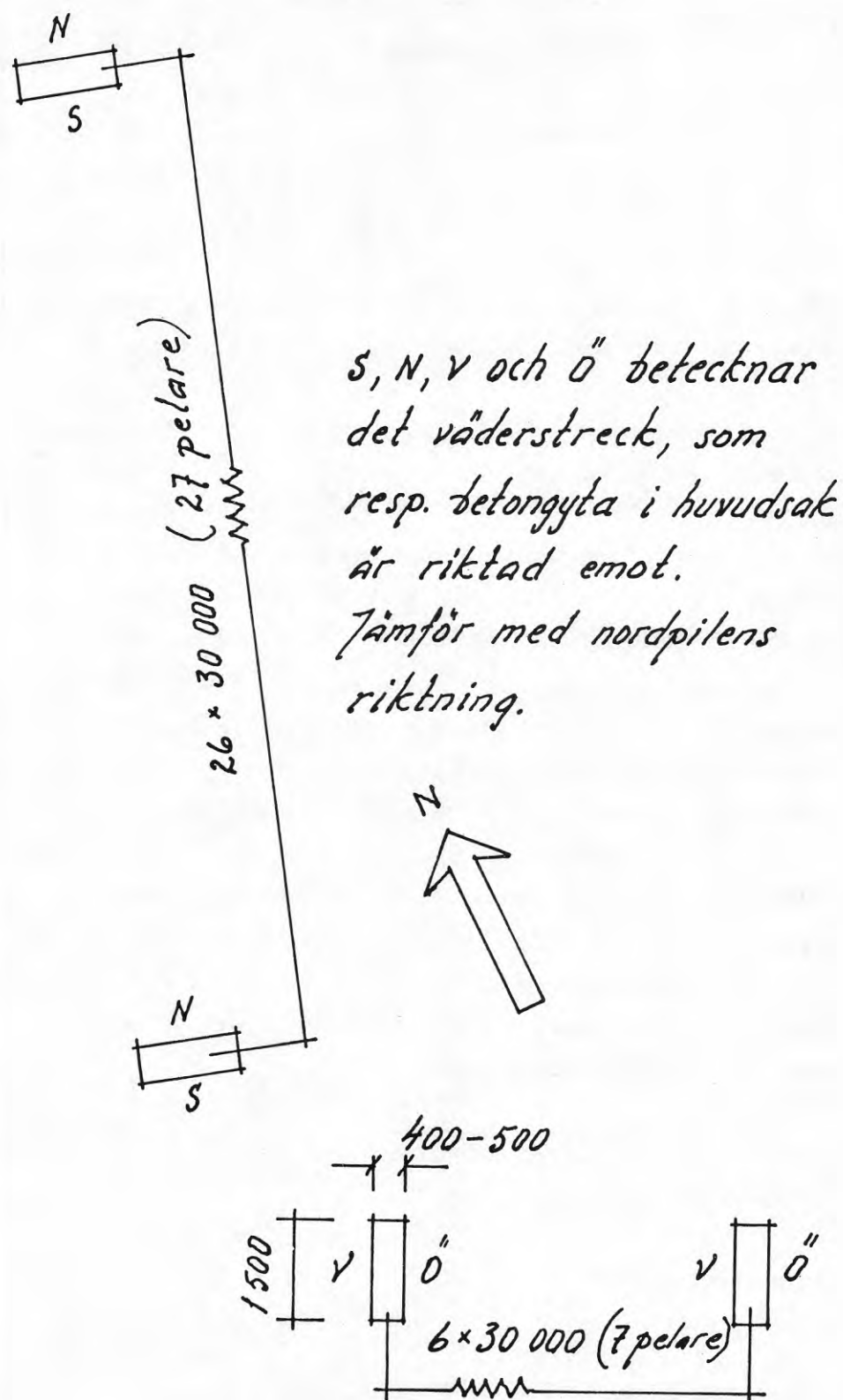


FIG. 6. Mått- och orienteringsskiss över observerade pelare i Limhamn.

utfällningar, ehuru mindre intensiva än sydsidorna. Flertalet nordsidor fick sina utfällningar samtidigt och ej kort tid efter avformningen som sydsidorna. Uppkomsten av utfällningarna är kopplade till tidpunkten för första regn mot ytan, se 4.3.2.3, sid 58.

På pelarna med observationssidor mot öster och väster uppträdde inga störande utfällningar. Framför allt noterades ingen påtaglig skillnad mellan ytor mot olika väderstreck.

4.3.2.2 Färgmätning med gråskalor

Betongens gråton mättes med färgskalor dels enligt SIS 81 20 03, dels enligt CIB (1973). Den förra hade en serie tonade gråfärger, som med sin något rödaktigt gula kulörton är karakteristiska för de flesta betongytor. Skalan har 15 gråfärger med svartheten 10, 15, 20 - - - 80. Den andra skalan är en ren gråskala med 7 fält, som går från mycket ljust grått (1) till nästan svart (7). Rent praktiskt var den sistnämnda lättare att använda, eftersom de enskilda färgfälten i den är avsevärt större än i Byggstandardiseringens skala. Å andra sidan var skalindelningen grövre och ej speciellt anpassad till betongytor.

I bägge skalorna mäts svartheten och en lägre siffra betyder ljusare färg än en hög.

Färgmätningen bekräftade, att sydsidorna - utsatta för förhärskande vind - hade blivit mycket ljusare än övriga sidor. Dessa hade i stort sett samma svarthet. Till skillnad från sydsidorna hade de vid mätningstillfället ingen eller ringa kalkutfällning. Resultaten anges i TAB 4.

TAB. 4 Medelvärden och variationsintervall för svartheten hos pelarsidor vända mot olika väderstreck. Mätningarna utförda relativt kort tid efter gjutningen, mars 1974.

Pelarsida mot	SIS-skalan		CIB-skalan	
	Medelvärde	Variationsintervall	Medelvärde	Variationsintervall
söder	23	(10, 55)	1.9	(1, 4)
norr	43	(15, 65)	3.2	(2, 6)
väster	49	(40, 60)	3.3	(3, 4)
öster	40	(35, 45)	3.3	(3, 4)

Värdena i TAB 4 härrör från mätningar i mars 1974, dvs innan nordsidorna fick de i 4.3.2.1 nämnda utfällningarna.

I augusti 1976 upprepades mätningarna på de 7 pelarna med observationssidor mot väster och öster och på 15 av dem som var orienterade åt norr och söder.

Från dessa observationer erhöles de medelvärden och variationsintervall, som anges i TAB 5.

TAB. 5 Medelvärden och variationsintervall för svartheten hos pelarsidor vända mot olika väderstreck. Mätningarna utfördes i augusti 1976, dvs ungefär 2,5 år efter gjutningen och innebar en upprepning av tidigare, efter gjutningen utförda mätningar.

Pelarsida mot	SIS-skalan		CIB-skalan	
	Medelvärde	Variationsintervall	Medelvärde	Variationsintervall
söder	31	(15, 45)	2.5	(1, 4)
norr	38	(25, 45)	3.3	(2, 4)
väster	27	(25, 30)	2.4	(2, 3)
öster	26	(25, 30)	2.3	(2, 3)

Färgmätningarna redovisas även i stolpdiagram på FIG 7 - 8. De bestyrker resultaten av den okulära besiktningen, främst då att södersidorna blev mycket ljusare av kalkutfällning i ett tidigt skede än övriga sidor. Dessa var i stort sett lika inbördes, dvs hade samma svarthet.

De upprepade mätningarna efter ungefär 2,5 år visade, att en hel del av sydsidornas utfällningar försvunnit och deras svarthet ökat. Syd-, väst- och östsidorna hade i stort sett samma svarthet, vilket innebar att väst- och östsidorna blivit märkbart ljusare. Man kunde ej iaktta detta som störande kalkutfällning. Nordsidorna hade blivit något ljusare, men var odiskutabelt mörkast av alla.

4.3.2.3 Inverkan av väderlek vid gjutningstillfällena och tiden därefter

Det som i sista hand bestämmer klimatets inverkan på en betongytas resistens mot kalkutfällning, är klimatsituationen i själva ytan, mikroklimatet. Detta påverkas i regel väsentligt av makroklimatet, omgivningens väderlek. För den skull bedömdes det av intresse att skaffa fram väderleksuppgifter under själva byggnadsskedet och tiden därefter. Sådana anskaffades från den närbelägna flygplatsen i Sturup. Självfallet fanns vissa tillfälliga skillnader i klimatet mellan byggnadsplatsen i Limhamn och Sturup, men i huvudsak var klimatet detsamma.

Följande data om klimatet kan nämnas:

Temperaturen varierade mellan -10° och 10°C . Under större delen av observationstiden (1973-10-24--1974-03-01) låg den i intervallet 0° - 5°C .

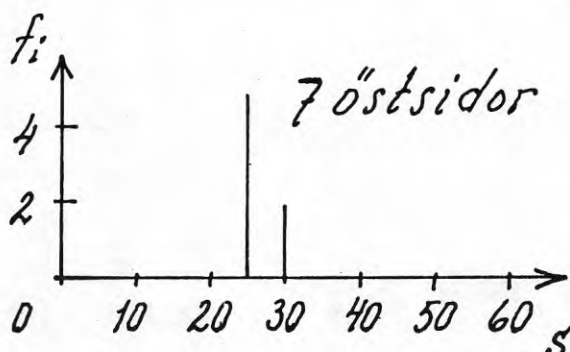
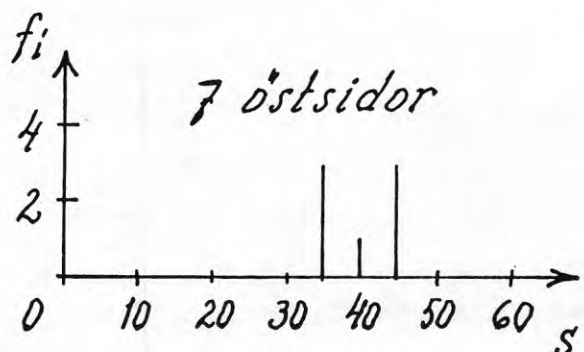
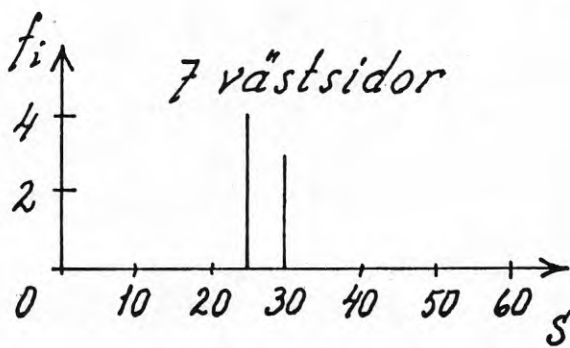
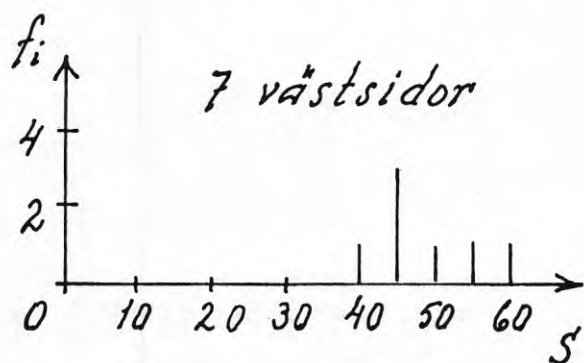
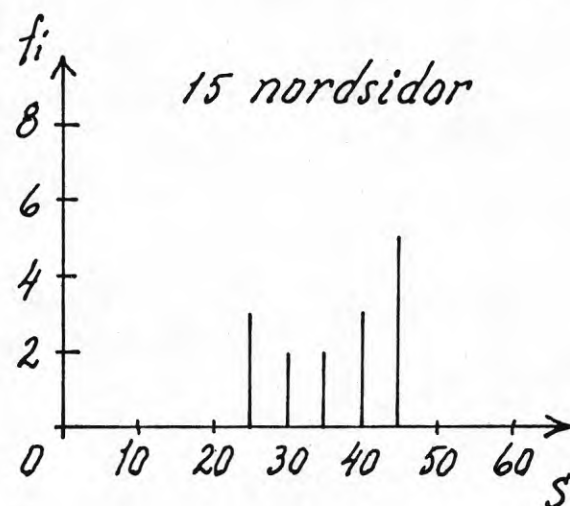
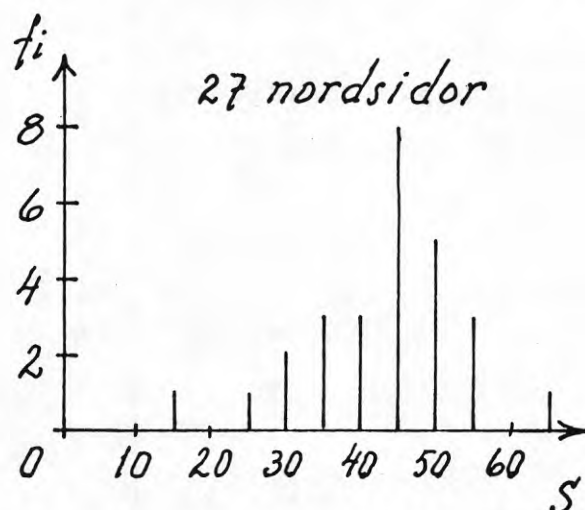
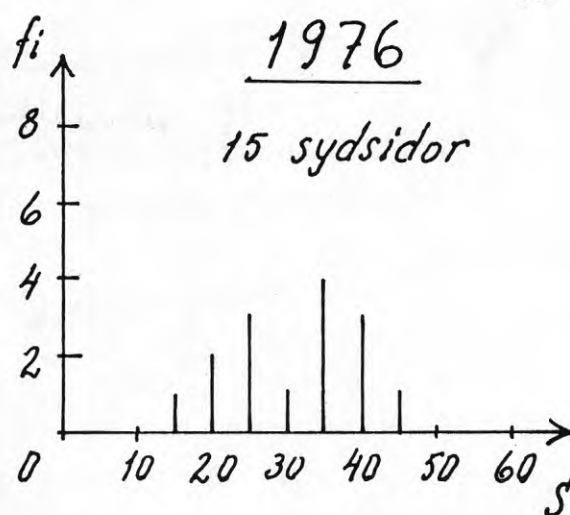
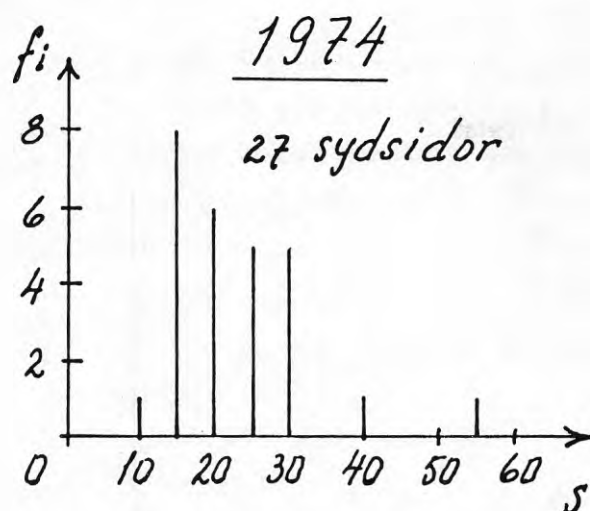


FIG. 7. Stolpdiagram visande frekvensen (f_i) av olika svarthet (S) enligt Byggstandardiseringens färgskala hos betongytor på pelare. Jämförelser mellan ytor orienterade åt olika väderstreck. Mätningar utförda 1974, kort tid efter gjutningen (diagrammen till vänster), upprepades 1976 (diagrammen till höger).

Relativa fuktigheten låg mestadels mellan 80-100 %. Lägre värden noterades tillfälligt, men ej under någon längre sammanhängande period.

Regn, som observerades på byggnadsplatsen, inträffade ofta och utan långa sammanhängande torrperioder.

Vindstyrkan varierade i intervallet 0-30 m/s. Endast vid få tillfällen rådde vindstilla och det högsta värdet avsåg maximal byvind. Under en stor del av tiden var vindhastigheten 5-10 m/s. Vinden kom i huvudsak från sektorn väst-syd-ost.

Nordlig vind och samtidigt regn observerades endast vid något eller några tillfällen. De flesta regnen ägde rum vid sydliga vindar.

Om klimatets inverkan på kalkutfällningarna kan följande sägas:

Regnen medförde fritt vatten på betongen, medan denna var relativt nygjuten, och orsakade flera kraftiga utfällningar.

Vinden, huvudsakligen från söder, drev regnet, så att det träffade främst sydsidorna. Dessa erhöll de intensivaste utfällningarna. Efter regn i samband med nordlig vind fick även nordsidorna utfällning. Denna var emellertid avsevärt svagare, förmodligen därför att regnet kom lång tid efter gjutningen och ytorna hunnit få ett visst skyddsskikt. Eventuellt har även regnmängden varit liten relativt den som drabbade sydsidorna.

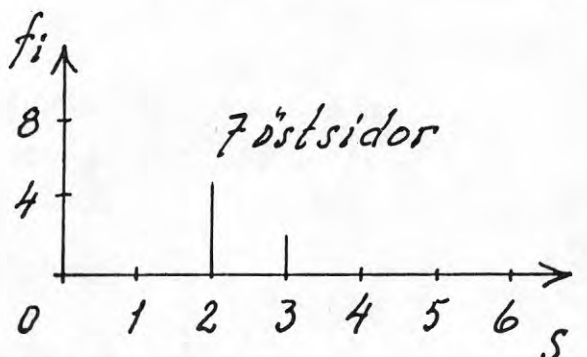
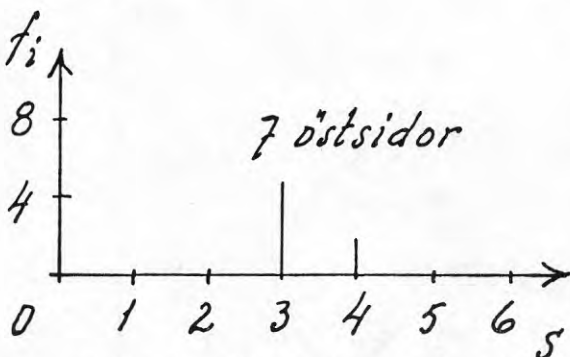
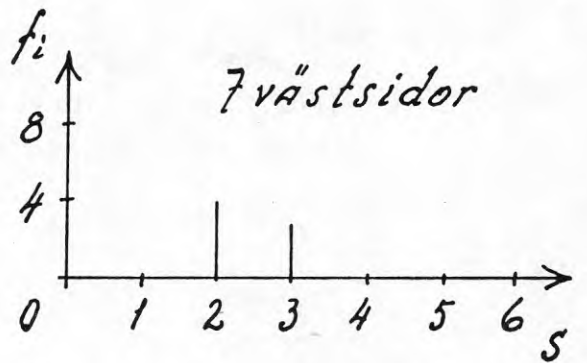
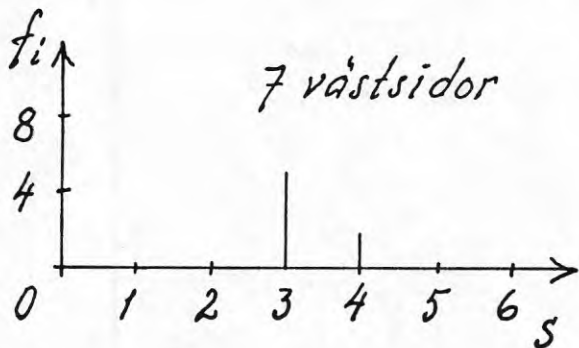
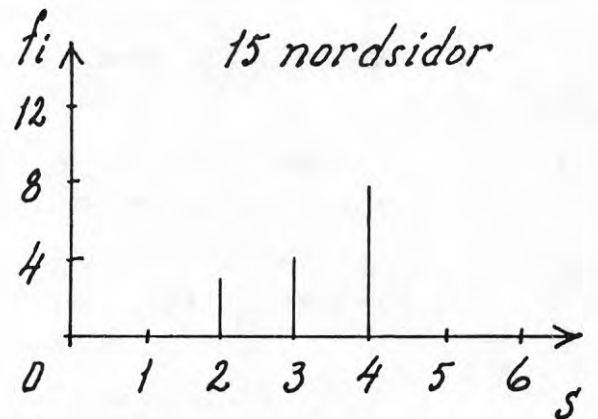
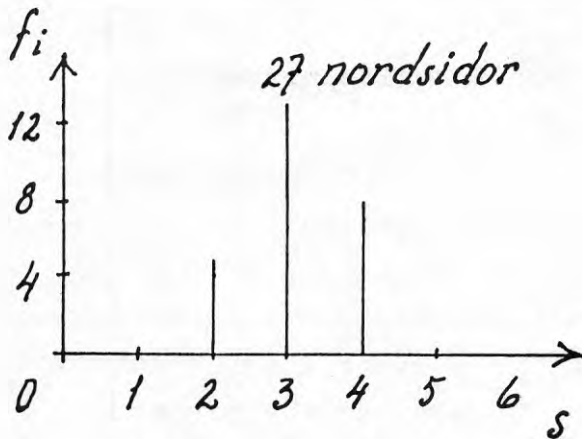
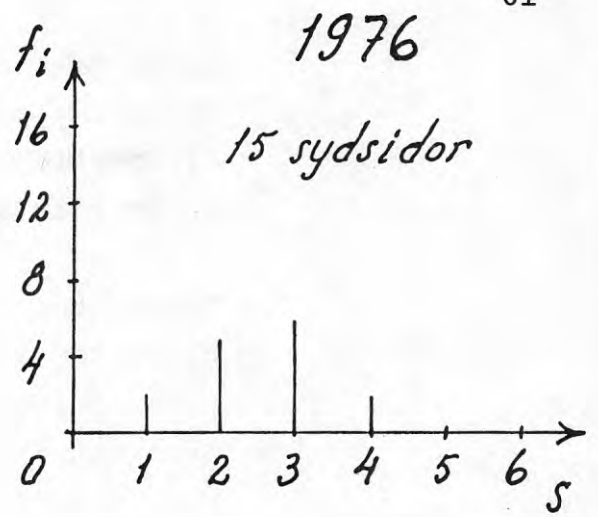
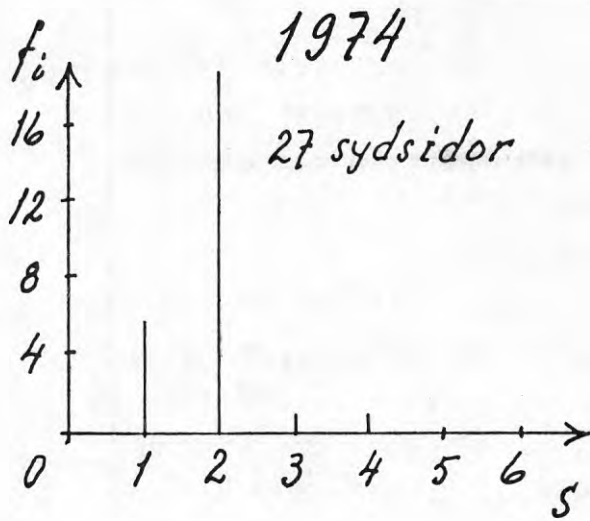


FIG. 8. Stolpdiagram visande frekvensen (f_i) av olika svarthet (S) enligt CIB:s gråskala, hos betongytor på pelare. Jämförelser mellan ytor orienterade mot olika väderstreck. Mätningar utförda 1974, kort tid efter gjutningen (vänstra diagrammen), upprepades 1976 (högra diagrammen).

Relativa fuktigheten var mestadels gynnsam för uppbyggnad av ett skyddsskikt genom karbonatisering, men effekten reducerades av det kalla vädret.

Temperaturen var så låg, att den fördröjde hydratiseringen och därmed karbonatiseringen. Fördröjningen var så stor, att ett tillräckligt skydd ej hann byggas upp, innan ytan drabbades av regn. Jämför med urlakningsförsöken i 6.3.7 Temperatur, sid 112.

4.3.2.4 Inverkan av form och formsläppningsmedel

Formmaterialet var sågat virke och som formsläppningsmedel användes emulsion av olja i vatten.

Det konstaterades vid något tillfälle, att formytan hade ett tjockt lager (1-2 mm) av fettliknande formoljerester, som förmodligen byggts genom upprepade rikliga påstrykningar. Det sugande, sågade virket bidrog sannolikt till att absorbera mycket olja. Själva betongytan var i regel lös och mjölig. Överskottet av formolja är en trolig orsak därtill.

Från fyra pelare borstades en del av det lösa mjölet i ytan av och analyserades på olja genom lösning i kloroform. Därvid erhöles i ordning oljemängderna i procent av det avborstade mjölets (betongens) vikt 2.1, 2.2, 2.6 och 2.6 %. Dessa värden kan jämföras med 0.2 %, som erhöles efter avborstning från en betongyta gjuten mot formplywood. I detta fall användes endast ett tunt skikt formolja.

Överskottet av formolja har sannolikt stört den tidiga hydratationen och lämnat en del cement i ytan ohydratiserat. När betongen sedan blev våt av regn har hydratationen fortsatt, kalciumhydroxid

gått i lösning och karbonatiserat. Detta kunde ske omedelbart i ytan, eftersom både vatten från regnet och koldioxid från luften fanns tillgängliga där. Ovanstående förklaring ger Neubarth (1973).

Överskottet på formolja är förmodligen inte den enda orsaken till kalkutfällningen, men det har troligen bidragit till att göra denna ovanligt intensiv. Liknande kraftiga utfällningar av störd hydratation erhöles med ett mycket sugande formmaterial, som gav en mjölig yta med ohydratiserat cement, se 4.1.3.6, sid 32.

4.3.2.5 Behandlingsmedel mot kalkutfällning

På en av de ovannämnda pelarna med observationssidor mot norr och söder gjordes behandling med två kommersiella betrykningsmedel, avsedda att motverka kalkutfällning. Det ena medlet gav ett gott bestående resultat på sydsidan, men gjorde ingen verkan på nordsidan, FIG. 4 i BILAGA 2. Det andra medlet däremot hade god verkan på nordsidan men ingen på sydsidan. Någon tillförlitlig förklaring till medlens olika verkan kan inte ges här.

Ytterligare en pelare behandlades på nordsidan, men i det fallet endast med vatten. Skälet till vattenbetrykningen var följande. Nordsidorna fick inte utfällning samtidigt med sydsidorna, vilka hade utsatts för regn i samband med vind. En vattenbehandling skulle ge utfällning även på nordsidan och visa, att det inte fanns någon egentlig skillnad mellan nord- och sydsida och att utfällningarna utlöstes av vatten oberoende av väderstreck.

Vattnet påfördes med pensel i 2 - 3 strykningar. Det konstaterades, att betongytan var mycket sugande och vattnet sögs in i betongen omedelbart. Vattenmängden var otillräcklig och någon kalkutfällning kunde inte

upptäckas efter försöket. Däremot gjordes en intressant observation vid besiktningen i ett senare skede, då nordsidorna fått en tydlig utfällning efter regn i samband med nordlig vind. Den vattenbehandlade betongytan hade då avsevärt mindre utfällning än pelarsidan i övrigt. Försöket tyder således på, att vattenskikt som inte står kvar på ytan utan i stället snabbt sugts in i densamma kan tjäna som behandlingsmedel mot kalkutfällning. Vissa laboratorieförsök i projektet stöder denna tanke på vatten som behandlingsmedel, men antyder samtidigt både problem och begränsningar med en sådan metod, jfr 4.2.3 sid 40 och 6.4.3.1 sid 150.

4.3.3 Kommentarer

Självfallet kan variabler och observationer inte hållas under samma stränga kontroll som vid laboratorieförsök. Noggrannheten har dock varit så stor, att det bedömts intressant och meningsfullt att göra dessa praktiska iakttagelser parallellt med laboratoriearbetet.

Ovan har pelarnas orientering angivits till nord-syd respektive öst-väst. Som framgår av FIG. 6 fanns smärre avvikelser.

Ytterligare en orsak, som kanske bidrog till de intensiva utfällningarna på sydsidorna, var den solstrålning som åtminstone tidvis måste ha förekommit. Mekanismen för ett sådant förlopp diskuterades i 4.2.6 på sid 48.

Intill pelarna göts under samma period några stora siloanläggningar, som också studerades under uppförandet och tiden därefter. Det mest anmärkningsvärda under glidformsgjutningen var effekten av de låga temperaturerna under vissa tider av arbetet.

De mörka banden på silorna, se FIG. 2 i BILAGA 2, motsvarade lufttemperaturer av ca -10°C . Dessa blev senare mycket ljusa av kalkutfällningar, sannolikt utlösta av regn. Liksom för pelarna kom utfällningarna mycket tidigare på de regnrikare sydsidorna än på nordsidorna. En tänkbar förklaring skulle enligt Neubarth (1973) teorin om störning av den tidiga hydratationen kunna ge.

4.3.4 Sammanfattning av fältstudier

Studiet av pelarna visade kraftiga kalkutfällningar på vissa delar av betongytan. Iakttagelserna överensstämmer väl med andras erfarenheter och kan i huvudsak förklaras med resultaten av de egna laboratorieförsöken. Det konstaterades sålunda, att

utfällningarna var kraftiga och uppstod under den kalla och regniga delen av året

vatten i form av regn var den utlösande faktorn

ytor som vette mot förhärskande vindriktning fick de intensivaste utfällningarna

vinden är en betydande faktor genom att ge regnet en horisontell rörelsekomponent

överskott av formolja kan ha ökat utfällningarnas intensitet

tydlig inverkan av två kommersiella behandlingsmedel kunde noteras, men reproducerbarheten var otillfredsställande

en antydning erhöles om att vatten i vissa fall skulle kunna tjäna som behandlingsmedel

efter två år hade de kraftigaste kalkutfällningarna minskat i styrka men inte försvunnit.

5.

TEORETISK MODELL

Den modell som beskrivs nedan har föreslagits av Göran Jansson, Cementa AB, som i huvudsak utarbetat detta avsnitt.

Nedan betecknas kalciumkarbonat med CaCO_3 , kalciumhydroxid med Ca(OH)_2 och koldioxid med CO_2 .

För att CaCO_3 skall kunna bildas måste det finnas tillgång på vatten i flytande form, Ca(OH)_2 och CO_2 . Platsen där denna reaktion huvudsakligen försiggår är beroende av uttorkningshastigheten, med vilken hastighet Ca(OH)_2 bildas och levereras samt med vilken hastighet CO_2 tränger in i vattenskiktet.

5.1

VATTENMEKANISM

Vid gjutning omges betongens alla partiklar av en vattenfilm. Beroende på betongens vattencementtal leder hydratationen till att en större eller mindre del av betongens vatten förbrukas och ingår i fasta material. Restvattnets mängd vid formlossningen beror på den färska betongens vattencementtal och på hydratiseringsgraden vid formlossningen.

Så snart betongen avformats kan vatten avdunsta från betongytan och vid icke formsatta ytor direkt efter gjutningen. Avdunstningshastigheten beror på temperaturen och relativa fuktigheten hos den omgivande luften samt på med vilken hastighet denna rör sig. Avdunstningshastigheten är även beroende av porstrukturen hos betongytan.

Även om nämnda parametrar är konstanta avtar avdunstningshastigheten med tiden och hastigheten börjar mer och mer att bestämmas av hur snabbt vatten från betongens inre kan nå ytan. Alternativt

kan avdunstningen ske ett stycke inne i betongen och då blir diffusionen av ångan från vattenfronten till den fria luften hastighetsbegränsande.

På den plats i betongen där karbonatiseringen sker bildas en ny vattenmolekyl för varje förbrukad Ca(OH)_2 -molekyl.

5.2 KALCIUMHYDROXID

Ca(OH)_2 bildas när cement hydratiserar. Reaktionen med vatten börjar vid cementkornens yta och tränger vidare med tilltagande fördröjning in i dessa. Mängden bildad Ca(OH)_2 är beroende av cementmängd och hydratationsgrad.

Vid avformningen, eller direkt efter gjutningen för yta som gjuts utan form, finns en konstant ¹⁾ koncentration ($C_x = k_2$) av Ca(OH)_2 i hela betongtvärsnittet, FIG 9 a. I omgivande luft finns CO_2 med en konstant koncentration ($C_x = k_1$).

Antag nu att betongens ytporer innehåller en lämplig mängd vatten. När luftens CO_2 träffar ytan sker i ett ytskikt av tjockleken d en karbonatisering till CaCO_3 , varvid Ca(OH)_2 förbrukas. Resultatet blir en temporär sänkning av Ca(OH)_2 -koncentrationen och den fasta Ca(OH)_2 går i lösning.

När all fast tillgänglig Ca(OH)_2 har förbrukats sänks Ca(OH)_2 -koncentrationen ($C_x < k_2$ för $x \leq d$) i

- 1) Hydratationsgraden är visserligen olika i betongens inre och vid ytan på grund av temperaturdifferenser mellan ytan och den inre delen. Den frigjorda mängden Ca(OH)_2 är emellertid tillräckligt stor för att mätta betongvattnet med avseende på Ca(OH)_2 .

yta. Vid fullständig karbonatisering är således $C_x = 0$ för $x \leq d$, FIG 9 b. ¹⁾

Differensen i Ca(OH)_2 -koncentrationen medför en strävan till utjämning av denna, dvs en transport (diffusion) av Ca(OH)_2 från området $x > d$ till området $x \leq d$, FIG 9 c. Denna transport kan beskrivas med formeln

$$J = - D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

där

J = antalet diffunderande joner
per tids- och ytenhet

D = diffusionskonstanten

c = koncentrationen

x = lägeskoordinaten

Om diffusionskonstanten är oberoende av tiden kan koncentrationsändringen skrivas

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

(jmf värmeledningsekvationen)

- 1) Största delen av den kalk som efter hydratisering är bunden i de nybildade mineralen kan liksom avges till vattnet som kalciumhydroxid. Detsamma gäller kalk bunden i ohydratiserad klinker.

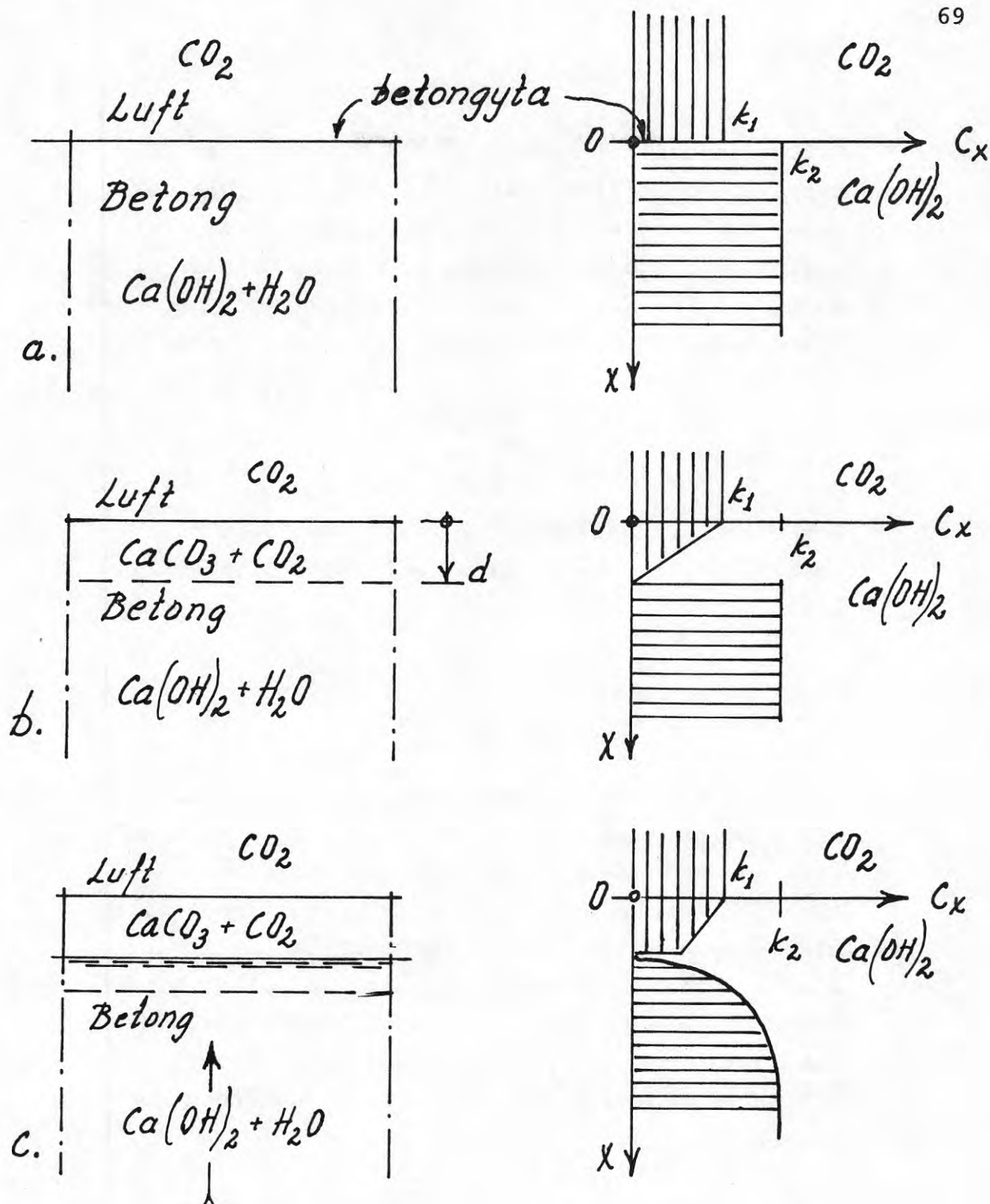


FIG. 9. Teoretisk modell för kalkutfällningarnas mekanism.

- I avformningsögonblicket är C_x av Ca(OH)_2 konstant i hela betongtvärsnittet och C_x av CO_2 är konstant i luften.
- Kort efter avformningen har ett tunt karbonatskikt bildats i ytan och samtidigt har det uppstått en skillnad i C_x av Ca(OH)_2 i betongen. CO_2 tränger efter hand in i betongen.
- Tillförsel av vatten och differens i C_x av Ca(OH)_2 möjliggör transport av denna genom diffusion från betongens inre mot ytan. Finns det fritt vatten på betongytan kan Ca(OH)_2 , om tiden medger, nå dit och karbonatisera (synlig utfällning). Med vatten endast i porsystemet sker karbonatiseringen under ytan. Karbonatet (skyddsskiktet) tillväxer i tjocklek och fördröjer ytterligare Ca(OH)_2 -transporten mot ytan.

5.3 KOLDIOXID

Luften innehåller normalt 0,033 volymsprocent CO_2 . Dessa CO_2 -molekyler träffar betongytan och absorberas av betongvattnet. CO_2 -molekylerna reagerar antingen direkt med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ och CaCO_3 utfälls eller om $c_x = 0$ för $\text{Ca}(\text{OH})_2$ diffunderar CO_2 in i betongen och reagerar med $\text{Ca}(\text{OH})_2$, där $c_x > 0$ för denna.

5.4 UTFÄLLNINGAR

Mekanismen vid platsen där reaktionen äger rum är helt avgörande om kalkutfällningen blir synlig eller inte.

5.4.1 Kraftiga utfällningar

Om de kemiska reaktionerna mellan kalciumhydroxid och koldioxid sker på betongens yta i en vattenfilm som täcker betongen, kan kalciumkarbonat antingen kristallisera på ytan av vattenfilmen eller på betongytan, där den är täckt av vattenfilmen. I båda fallen blir resultatet ett mer eller mindre täckande lager av kalciumkarbonatkristaller. Sedan betongytan torkat, reflekteras ljus i gränsytorna mellan kalciumkarbonat och luft och betongen kommer att se "vit" ut.

5.4.2 Inga eller svaga utfällningar

Om ytan inte är våt kan kalciumkarbonat i stället avsätta sig punktformigt vid poröppningarna. Eftersom endast föga ljus tränger in i dessa blir ljusreflexerna mot kalciumkarbonatyterna föga synliga, men ju fler sådana punkter som uppstår desto ljusare blir betongen.

Risken (sannolikheten) för en kraftig kalkutfällning med en vattenbegjutning är beroende av i hur hög grad vattnet kan mättas med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ från betongen. Detta påverkas av betongens tidigare historia (hydratationsgrad, omgivningens temperatur och relativa fuktighet). Som framgår av avsnitt 5.2 är omfattningen av betongytans karbonatisering också en viktig del av denna historia.

5.4.2.1 Måttlig uttorkningshastighet

Vid avformningen kan det omgivande klimatet vara sådant att uttorkningshastigheten blir så pass långsam att all löslig $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i ytporerna karbonatiserar.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ från betongens inre transporteras mot ytan, möter CO_2 och bildar CaCO_3 som fälls ut. Genom nybildning av karbonat underhålls differensen i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -koncentrationen. Även om vatten finns tillgängligt avtar karbonatiseringshastigheten. Detta beror antingen på $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -brist eller CO_2 -brist. Den förra kan bero på långsammare $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -transport på grund av det med tiden tätare porsystemet och förbrukning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ och den senare på långsammare CO_2 -transport på grund av större transportavstånd från betongytan samt ett tätare por-system till följd av fortgående hydratisering och karbonatisering.

Större karbonatiseringsdjup medför mindre sannolikhet för en kraftig utfällning vid en senare vattenbegjutning.

5.4.2.2 Stor uttorkningshastighet

Det omgivande klimatet kan vara sådant att ytpor-systemet blir tömt på vatten innan all $\text{Ca}(\text{OH})_2$ har karbonatiserats. Vid en senare vattenbegjutning löses kvarvarande $\text{Ca}(\text{OH})_2$, diffunderar ut till ytan, möter CO_2 och CaCO_3 utfälls.

5.5 KARBONATISERINGSTID

Karbonatiseringen bestäms av antalet tillgängliga $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -molekyler och upptagningshastigheten av CO_2 -molekyler. Antalet CO_2 -molekyler som upptages bestäms av antalet kollisioner av CO_2 -molekyler med vatten. De molekyler som kan upptas är de som befinner sig på ett avstånd från vattenytan som är lika med fria medelväglängden för CO_2 -molekyler.

Antal kollisioner med en yta per tids- och ytenhet är enligt allmänna gaslagarna:

$$n = \frac{1}{4} N \cdot \bar{v} = \frac{1}{4} \bar{v} \cdot \delta \cdot \frac{1000}{22,4} \cdot N_0 \cdot C_{\text{CO}_2}$$

$$n = 11,2 \cdot \bar{v} \cdot \delta \cdot N_0 \cdot C_{\text{CO}_2}$$

där N = antal CO_2 -molekyler per m^2 inom den fria medelväglängden från ytan räknat

\bar{v} = medelhastigheten för CO_2 -molekyler i m/sek

N_0 = Avogadros tal $\approx 0,6 \cdot 10^{24}$ molekyler/mol

δ = fria medelväglängden $\approx 95 \cdot 10^{-9}$ m

C_{CO_2} = koncentration av CO_2 i luft =
 $0,33 \cdot 10^{-3}$ mol/mol

$$\text{medelhastigheten } \bar{v} = \sqrt{3 \frac{RT}{M_{\text{CO}_2} \cdot 1000}}$$

där R = allmänna gaskonstanten = 8,3 J/K mol

T = absoluta temperaturen i $^{\circ}\text{K}$

M_{CO_2} = molekylvikten för CO_2 = 44

Varje CO_2 -molekyl uppfattar vattenytan i kapillärporerna som en plan yta. Antalet stötar per m^2 betongyta blir därför beroende på antalet ytporer, dess radie och vattenfyllnadsgrad.

Antag att den tillgängliga våta kapillärporytan är $A_1 \text{ m}^2$ per m^2 betongyta.

$$A_1 = A_0 \cdot C \cdot L_c$$

där A_0 = den våta kapillärporytan i m^2 per kg cement

L_c = karbonatiseringsdjupet i m

C = cementmängden i kg/m^3

Antalet stötar av CO_2 per m^2 betongyta och sekund blir då

$$n_1 = n \cdot A_1 = n \cdot A_0 \cdot C \cdot L_c$$

$$n_1 = 11,2 \cdot \bar{v} \cdot \delta \cdot N_0 \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot A_0 \cdot C \cdot L_c$$

Antalet frigjorda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -molekyler per m^2 betongyta och inom karbonatiseringsdjupet L_c m vid fullständig hydrataion

$$n_2 = k \cdot C \cdot L_c \cdot \frac{1000}{M_{\text{CaO}}} \cdot N_0$$

där $k = \text{andelen CaO i cementet} = 0,62$

$M_{\text{CaO}} = \text{molekylvikten för CaO} = 56$

För övriga beteckningar, se ovan.

Den tid t_c det tar för fullständig karbonatisering blir enligt ovanstående

$$t_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{k \cdot C \cdot L_c \cdot \frac{1000}{M_{\text{CaO}}} \cdot N_0}{11,2 \cdot \bar{v} \cdot \delta \cdot N_0 \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot A_0 \cdot C \cdot L_c}$$

$$t_c = \frac{1000 \cdot k}{11,2 \cdot \bar{v} \cdot \delta \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CaO}} \cdot A_0}$$

Vid 20° blir $\bar{v} \approx 400$ m/sek

Insätts detta och övriga värden, som angetts tidigare blir

$$t_c = \frac{1}{A_0} \cdot 86,7 \cdot 10^6$$

Väljs $A_0 = 320 \text{ m}^2/\text{kg}$, dvs cementets specifika yta blir:

$$t_c = 270\,000 \text{ sek} \approx 75 \text{ timmar}$$

Väljs $A_0 = 0,2 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$, dvs cementgelets specifika yta blir:

$$t_c = 440 \text{ sek}$$

Laboratorieförsöken visar att karbonatiseringen av ytan sker inom dessa tidsgränser under gynnsamma förhållanden.

Ovanstående beräkning förutsätter, att tillgången

på CO_2 ej begränsas. Förutsättningen gäller endast själva ytskiktet. Längre in minskar mängden CO_2 , FIG 9 b och 9 c, eftersom denna förbrukas vid karbonatiseringen och det tar tid att ersätta den förbrukade mängden. Beroende om porsystemet är mer eller mindre öppet till följd av hydratiseringsgrad och vattenmättnadsgrad sker diffusionen av CO_2 in i betongen med olika hastighet. Där porerna är vattenfyllda bromsas diffusionen av CO_2 -molekylerna ytterligare.

Enligt förutsättningen skall hela kapillärporytan vara våt, vilket man ej kan förvänta.

Fullständig hydratisering sker ej momentant och därför ger cementgelets specifika yta i beräkningen en alltför kort karbonatiseringstid.

Trots nyssnämnda inskränkningar är beräkningen av intresse, därför att den visar den våta kapillärporytans betydelse för karbonatiseringen.

Vid större karbonatiseringsdjup ökar detta allt långsammare med tiden. Principiellt skulle man därför kunna tänka sig förloppet som FIG 9 d antyder. Intill ett visst, om än litet, djup L_c är karbonatiseringstiden t_c konstant, men därefter går karbonatiseringen allt långsammare.

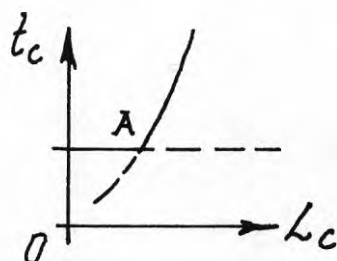


FIG 9 d. Karbonatiseringstiden t_c som funktion av karbonatiseringsdjupet L_c . Till höger om skärningspunkten A avtar karbonatiseringshastigheten efterhand som koldioxiden får längre väg att diffundera in i betongen.

På FIG 13 i BIL. 2 exemplifieras den teoretiska modellen med några bilder a-f. Tre renodlade alternativ med olika uttorkning och karbonatisering visas där.

Karbonat bildat under ytan som i c2 tjänar som ett skyddsskikt mot kalkutfällning. Därvid utgör det inte i sig själv något hinder mot utfällning, jfr e3, utan skyddet består i att ett fullständigt karbonatiserat skikt inte tillhandahåller någon kalciumhydroxid. Denna måste i stället hämtas under karbonatskiktet och passera detta. Är karbonatiseringsdjupet tillräckligt stort hinner hydroxiden för en rimlig vattenbelastning (t ex tiden $L = 10$ timmar, sid 250) inte nå betongytan, som därigenom är skyddad mot kalkutfällning.

Man måste emellertid ha klart för sig, att även den gynnsamma karbonatiseringen i porsystemet, t ex i f2, gör en betongyta något ljusare än en okarbonatiserad. Effekten är ibland kanske en nackdel, speciellt vid mörka ytor, FIG 12 i BILAGA 2, men torde i de flesta fall vara betydelselös.

6 KVANTITATIVA FÖRSÖK

6.1 ERFORDERLIG KALKMÄNGD FÖR SYNLIIG UTFÄLLNING

6.1.1 Försök

En väsentlig fråga för hela kalkutfällningsproblemet är vilken mängd kalk som fordras på betongytan för synlig missfärgning. Därför utfördes följande försök.

Fem serier träplattor med 7 st i varje målades med skilda färger enligt A i FIG. 10. Olika färger användes för att utröna om samma kalkmängd skulle ge olika synintryck på dem. Varje platta försågs med en 80 mm ring av paraffin. I ringarna hälldes 2 mm urkockt vatten med olika koncentration av kalciumhydroxid. Vattnet fick avdunsta och därefter gjordes okulär besiktning av uppkomna utfällningar. Dessa bedömdes huvudsakligen bestå av kalciumkarbonat, då man redan tidigt kunde se skinn av kalk på flera av vattenytorna. Eftersom det där fanns tillgång till både kalciumhydroxid och koldioxid bör det bildas just kalciumkarbonat, som sedan blir kvar på ytan efter uttorkning.

Resultaten framgår av följande tabell.

TAB. 6 Erforderlig mängd CaO i g/m² för synlig utfällning. Den första sifferkolumnen "Ej synlig" anger största kalkmängd utan synlig utfällning och den andra "Synlig" minsta kalkmängd med synlig utfällning.

Färg a)	CaO i g/m ²		Anmärkning om utfällningen
	Ej synlig	Synlig	
Svart b)	0,050	0,125	Mycket svag
Svart c)	0,050	0,125	Mycket svag
Rödbrun c)	0,125	0,250	Mycket svag
Gul b)	0,250	0,625	Mycket svag
Gul c)	0,250	0,625	Mycket svag

a) Samtliga färger tillhandahållna av Nordsjö i Malmö

b) Beteckning "På mur"

c) Beteckning "På trä"

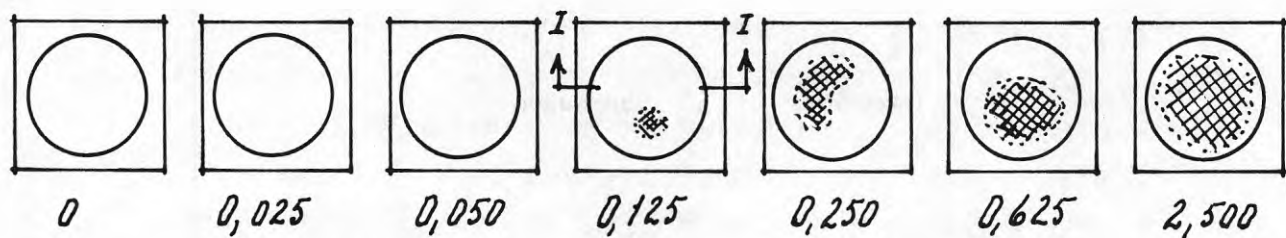
Man observerade, ej oväntat, att utfällningen blev synlig vid lägre kalkhalt på de mörka ytorna än på de ljusa. Utfällningarna var emellertid inte jämnt fördelade på provytorna, utan förekom på de delar där vattnet stått kvar längst. Det syntes som om vattnet till följd av ytspänningsfenomen drog ihop sig till mindre ytor vid uttorkningen. Man kunde därför befara, att försöken hade gett för låga och missvisande värden.

Nya försök gjordes med 11 olika färger. För att eliminera eller åtminstone reducera de ovan befarade felen vid uttorkningen av kalkvattnet, minskades radien på vattenpömlarna till 40 mm, B i FIG. 10. Varje färgplatta försågs med två pölar. Dessutom tillsattes ett ytspänningsnedsättande medel. Resultaten framgår av TAB. 7.

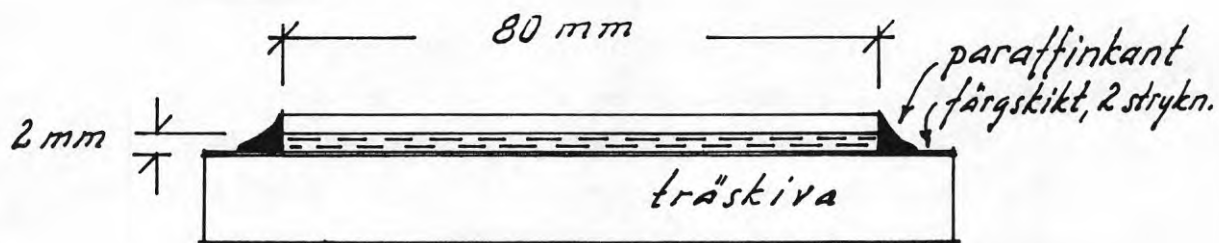
TAB. 7 Erforderlig mängd CaO i g/m² för synlig utfällning. Den första sifferkolumnen "Ej synlig" anger största kalkmängd utan synlig utfällning och den andra "Synlig" minsta kalkmängd med synlig utfällning.

Färg a)	CaO i g/m ²		Anmärkning om utfällningen
	Ej synlig	Synlig	
By 140 Järnoxidröd ljus	0,25	0,50	Punktvis och mycket svagt
By 150 Blå	0,25	0,50	2 små punkter
Svart	0,50	0,75	
By 27 Järnoxidgul	0,50	0,75	
By 170 Gröngul	0,50	0,75	
Kn 4 Ljusblå	0,50	0,75	Svår att se
By 18 Solgul	0,50-0,75	0,75-1,00	Mycket svag
By 43 Järnoxidröd mörk	0,75	1,00	Svag
By 120 Ljusgul	0,75-1,00	1,00-1,50	
By 131 Ljusrosa	1,00	1,50	Svag
By 172 Ljusgrön	1,00	1,50	

a) Samtliga färger tillhandahållna av Nordsjö i Malmö

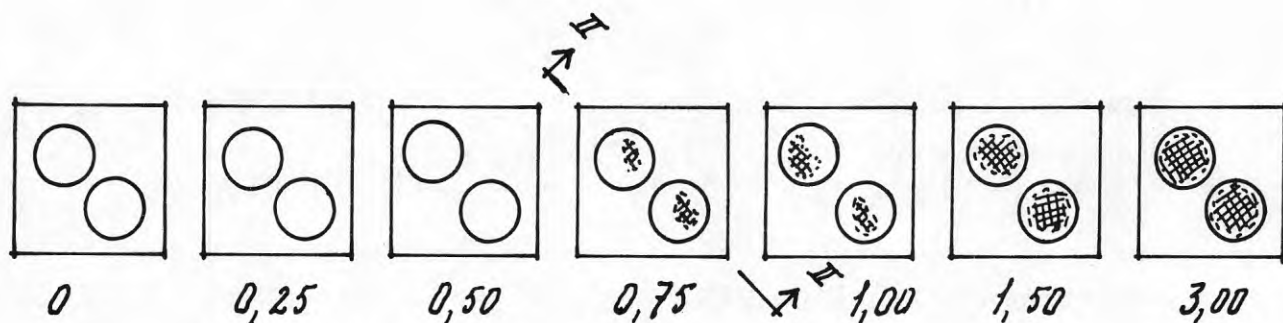


PLAN

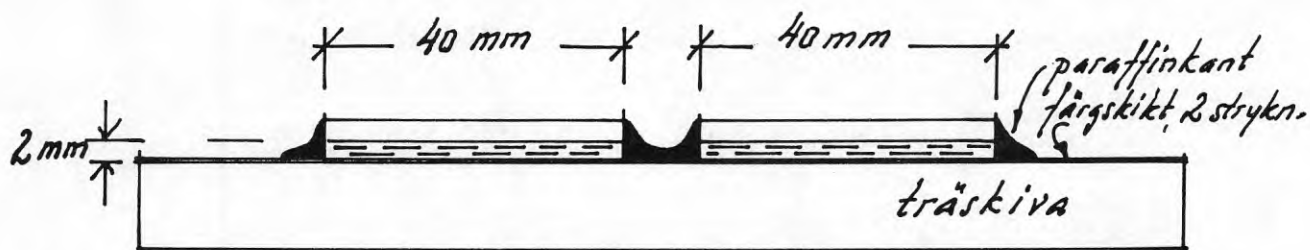


A.

TVÄRSEKTION I-I



PLAN



B.

TVÄRSEKTION II-II

FIG. 10. Målade träskivor med skikt av kalciumhydroxid-lösning. Koncentrationen av denna anges som CaO i g/m^2 under respektive skiva. Streckade ytor inom cirklarna visar ungefärligt synlig utfällning på de svarta skivorna.

6.1.2 Kommentarer

Man konstaterar, att värdena på kalkmängden för synlig utfällning är märkbart större i den andra undersökningen än i den första. Ej heller i den andra blev utfällningen helt jämn och man kan därför misstänka, att även där är värdena något för låga. Kalken i en del av de synliga utfällningarna, speciellt på By 140 och By 150, skulle med största sannolikhet inte blivit skönjbar, om den fördelats på hela cirkelytan. Endast för två färger erhöles olika värden på de båda tvillingcirkelarna. Det tyder på tillfredsställande reproducerbarhet.

Provplattorna, som ströks två gånger, hade en något skrovlig yta som påminde om betong. De torde därför ge godtagbara värden även för betongytor. Jämförelser mellan pölprov och urlakningsförsök bekräftar detta, sid. 249.

Försök på blanka plåtar med olika färg resulterade i lägre kalkmängd för synlig utfällning än på de något skrovliga träytorna.

Ovanstående tabeller visar, att vissa ljusa färger tålde dubbelt så mycket kalk som svart, innan synlig utfällning uppkommer. Självfallet kan detta spela en viss roll i praktiken. Denna skall förvisso inte förbises, men bör inte heller överskattas. Alla de kalkmängder som anges i tabellerna är nämligen mycket små jämfört med de CaO-mängder betongen innehåller. Som jämförelse kan nämnas, att en betong med ett cementinnehåll av 300 kg/m^3 på en yta av 1 m^2 i ett $0,1 \text{ mm}$ tjockt ytskikt innehåller ca 20 g CaO , dvs 20 gånger mer än som krävs för synlig utfällning.

6.1.3 Sammanfattning

Endast en ringa mängd kalk behövs för synlig utfällning. Den är av storleksordningen 1 g/m^2 , räknat som CaO.

Mörka ytor får för ögat synlig utfällning av mindre kalkmängd än ljusa ytor.

6.2 FÄRGMÄTNING

6.2.1 Avsikt

I ett försök att bedöma intensiteten av utfällningarna vid pölproven mera objektivt än med okulärbesiktning genomfördes en serie färgmätningar. Avsikten var närmast att med de erhållna siffervärdena på kalkutfällningarna avbilda dessa som en funktion av härdningstiden (t_1) i olika klimat etc. Förhoppningsvis skulle sådana kurvor ge mer information än den okulärbesiktningen av pölproven gav.

6.2.2 Metod

Färgmätningen utfördes med remissionsfotometri (Zeiss ELREPHO). Med mätinstrumentet tas tre värden - RX, RY och RZ - fram med hjälp av tre s k tristimulusfiltra enligt av ICI (International Commission on Illumination) rekommenderad metod. Härur fås direkt $Y = RY$, dvs ljusheten. Y mäts i det gröna tristimulusområdet. Det är ett mått på remissionen, dvs det oriktade återkastandet av ljus. Y påverkas av ytfärgen, men även av defekter som porer, ljuslukande klara ballastkorn m m.

Vidare framräknas två värden, x och y, med vars hjälp man ur diagram erhåller färgrenheten i procent. x och y är relativa mått och påverkas inte av porer och inte heller av glasklara ballastkorn. Färgrenheten syns därför vara ett bättre mått på graden av kalkutfällning än ljusheten.

Även dominerande våglängd fås ur diagram, om x och y är kända.

Hög färgrenhet (högst 100 %) innebär, att den dominerande våglängden svarar för en stor del av den återutsända strålningsenergin.

Låg färgrenhet (lägst 0 %) innebär, att jämsides med den dominerande våglängden mycket energi med andra våglängder återutsänds. I gränsfallet 0 % är remissionen helt neutral. Ytan ser då grå ut, i gränfall vit eller svart.

6.2.3 Provmätning

För att få en uppfattning om metodens användbarhet i det aktuella fallet utfördes färgmätning på fem provkroppar från pölproven. På varje provkropp utfördes två mätningar, den ena på ytan i befintligt skick och den andra på en saltsyratvättad del av ytan. Resultatet framgår av följande tabell, där även en okulär bedömning av förekommande utfällningar finns för de obehandlade ytorna.

TAB. 8 Bestämning av ljushet och färgrenhet med elektrisk remissionsfotometer (Zeiss ELREPHO).

Yta	Prov nr	1	2	3	4	5
Obehandlad	Ljushet Y	18,90	21,60	24,15	24,40	33,55
	Dominerande våglängd λ	597	596	598	598	594
	Färgrenhet %	42	39,5	30,5	26,5	19,5
	Okulär bedömning av utfällning	Ingen	Ingen	Svag	Kraftig	Kraftig
Saltsyra-tvättad	Ljushet Y	15,55	14,50	14,80	14,05	15,85
	Dominerande våglängd λ	598	599	598	596	596
	Färgrenhet %	37	40	42	38	38

Tabellvärdena visar, att kalkutfällning på en betongyta påverkar såväl ljushet som färgrenhet. Ju kraftigare kalkutfällningen är desto större värde får man på ljusheten och desto lägre på färgrenheten.

Dominerande våglängd ändrades ej väsentligt av kalkutfällningarna.

För de syratvättade ytpartierna var såväl ljushet som färgrenhet i stort sett konstanta.

Provmätningarna visade, att färgmätning kan vara en användbar metod för redovisning av kalkutfällning. Den användes därför i viss utsträckning på provplattor från pölproven, se 6.2.4. nedan. Värdet av dessa har viss begränsning som bl a beror på uttorkningshastigheten hos pölna, se 6.3.1. sid. 96. Den begränsningen kvarstår självfallet även vid redovisning genom färgmätning.

6.2.4 Mätningar på pölprov

På åtskilliga pölprov på röda provplattor enligt 4.2 mättes färgrenhet och ljushet. Mätningarna skedde dels inom cirklarna som vattenbehandlats, dels på någon yta utanför dessa. Dessutom mättes på en syratvättad del av provplattan.

Pölproven visade, att vattencementtalet och framför allt den relativa fuktigheten i härdningsluften hade ett väsentligt inflytande på uppkomsten av ett skyddsskikt. Färgmätningen koncentrerades därför i huvudsak på dessa variabler.

6.2.4.1 Vattencementtal och relativ fuktighet

Fyra vattencementtal - 0.4, 0.5, 0.6 och 0.7 - studerades. Betongen hade härdats i fyra olika klimat, nämligen med 40, 65, 80 och 90-95 % relativ fuktighet. Temperaturen var i samtliga fall 20°C och avformningstiden 1 dygn.

Resultaten framgår av FIG. 11 och 12, där färgrenheten respektive ljusheten visas som funktion av härdningstiden (t_1) efter avformning. Man konstaterar att

det var svårast att åstadkomma en skyddsverkan mot kalkutfällning vid vct 0.4. För övriga tre vattencementtal gick det lättare och de syns i huvudsak likvärdiga i detta avseende

vid hög relativ fuktighet erhöles en avsevärt bättre skyddsverkan än vid låg. Den byggdes upp inom loppet av något eller några dygn. Vid 40 % rf var skyddsverkan liten och dess tillväxt ingen eller ringa. Tillväxten vid 65 % rf blev snabbare men fortfarande långsam.

färgrenheten var med undantag för vct 0.4 efter några dygns härdning i fuktig luft (80-95 % rf) i stort sett densamma som för ytan utanför pölarna

färgrenheten blev oavsett vattencementtal och relativ fuktighet aldrig så hög som hos de syratvättade ytorna.

Färgmätningarna har bekräftat erfarenheterna från pölproven och dessutom gett en del detaljinformation.

Betraktar man bilderna på pölproven för vct 0.7 vid 80 eller 95 % relativ fuktighet på FIG. 7 i BILAGA 2. uppfattar man ingen egentlig färgskillnad hos pölytorna. Med undantag för 0-dygnscirklarna har dessa i huvudsak samma utseende som den obehandlade betongen utanför pölarna. Ser man däremot på motsvarande kurvor på FIG. 11, finner man att färggrenheten ändras påtagligt med härdningstiden intill $t_1 = 2$ dygn. Slutsatsen härav blir, att färgmätningen är en känsligare metod att registrera kalkutfällningens intensitet än visuell bedömning.

Ur produktionssynpunkt bör det vara intressant att uppmärksamma, att en kritisk gräns för vattencementtalet tycks ligga i närheten av vct 0.4. Överhuvudtaget hade provplattorna med detta vattencementtal okulärt ett något ljusare utseende än de övriga. Kurvornas form i diagrammen visar för vct 0.4 emellertid en väsentlig skillnad gentemot övriga provade vattencementtal.

Jämförelser mellan syratvättade och icke syratvättade ytor visar, att även den karbonatisering som sker inuti själva ytskiktet ger ytan en ljusare färg. På de flesta betongytor, speciellt de grå, uppfattas sällan denna ändring och i varje fall knappast som en missfärgning. Ögat torde vara mest känsligt för kalkutfällning på svarta betongytor. Där uppfattas i regel även skyddsskiktet som en mer eller mindre svagt grå slöja. Även en sådan yta torde normalt kunna accepteras under beteckningen svart. Det svagt grå skyddsskiktet på en svart betong framträder mest påtagligt vid direkt jämförelse med en svartmålad yta eller en måttligt syratvättad svart betong, FIG. 12 i BILAGA 2.

Enligt diagrammen tycks färggrenheten vid härdning i 80 % relativ fuktighet vara något högre än i 90-95 % och ljusheten något lägre. Skillnaderna är för små och försöken i det avseendet för fåtaliga för en defi-

- - - - - vct 0,4
 - - - - - vct 0,5
 - - - - - vct 0,6
 - - - - - vct 0,7
 s anger värde för syratväntad yta
 0 - - - - - obehandlad yta efter längre tid

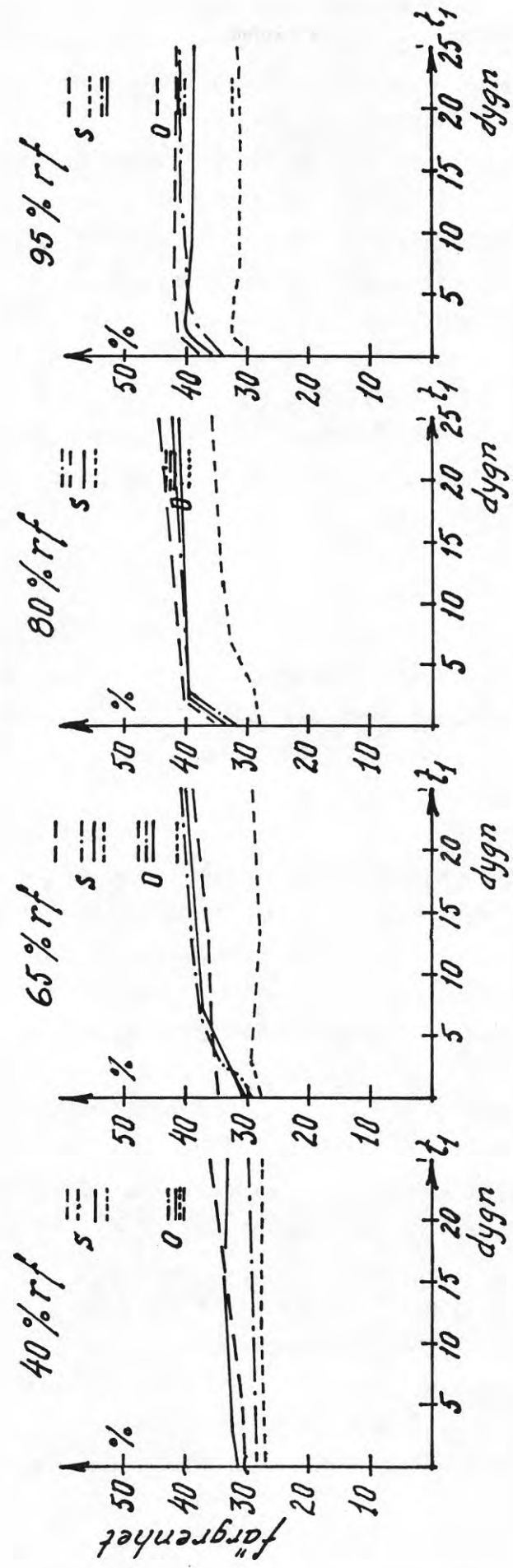


FIG. 11. Inverkan av utifrån kommande vatten, 1.8 mm tjocka vattenpölar. Betongytans färgrenhet anges som funktion av härdningstiden (t_1) mellan avformning och vattenpåföring. Färgmätningen är utförd efter vattnets uttorkning.

nitiv slutsats. Förhållandet nämns ändå, eftersom det styrker den subjektiva uppfattningen från försöken, att plattorna från klimat med 80 % relativ fuktighet i allmänhet hade den klaraste färgen.

Det kan vara av intresse att redovisa konstruktionen av kurvorna i FIG. 11 och 12. Ritar man upp kurvor direkt från mätvärdena blir dessa mer eller mindre sågtandade som FIG. 13 visar. Kurvorna i FIG. 11 och 12 är medelkurvor. De har tagits fram ur sågtandskurvor enligt FIG. 13 genom att först förbinda de övre punkterna (kryss i ringar) till en kurva och de undre (kryss) till en annan. Mitt emellan dessa två har sedan inlagts medelkurvan för plattan. På detta sätt har kurvan för vct 0.6 och 65 % rf i FIG. 11 tagits fram ur sågtandskurvan på FIG. 13.

Originalkurvornas sågtandsform förklaras av att hälften av pölarna (0, 2, 7 och 21 dygn) befann sig på den halva av plattan som var överst i formen vid gjutningen. Övriga pölar (1, 3, 14 och 28 dygn) fanns på den nedre halvan.

Gjutningsarbetet och framför allt då vibreringen torde medfört en viss omfördelning av delmaterialen i betongmassan, så att vattencementtalet blivit högre i plattans övre (vid gjutningen) del. Detta innebär en rimlig förklaring till de gynnsammare värdena där. En annan är att packningen blir mindre i en betonggjutnings övre del, vilket gör denna mindre tät än underliggande delar. Det är t ex känt, att denna effekt ökar antalet gjutblåsor och sänker hållfastheten i överdelen av väggar och pelare.

Det har sålunda fastslagits, att man inom en och samma betonggjutning fått delytor med olika benägenhet för kalkutfällning. Med största sannolikhet var orsaken en viss inhomogenitet i betongen till följd av gjutningsarbetet, som i detta fall utfördes med

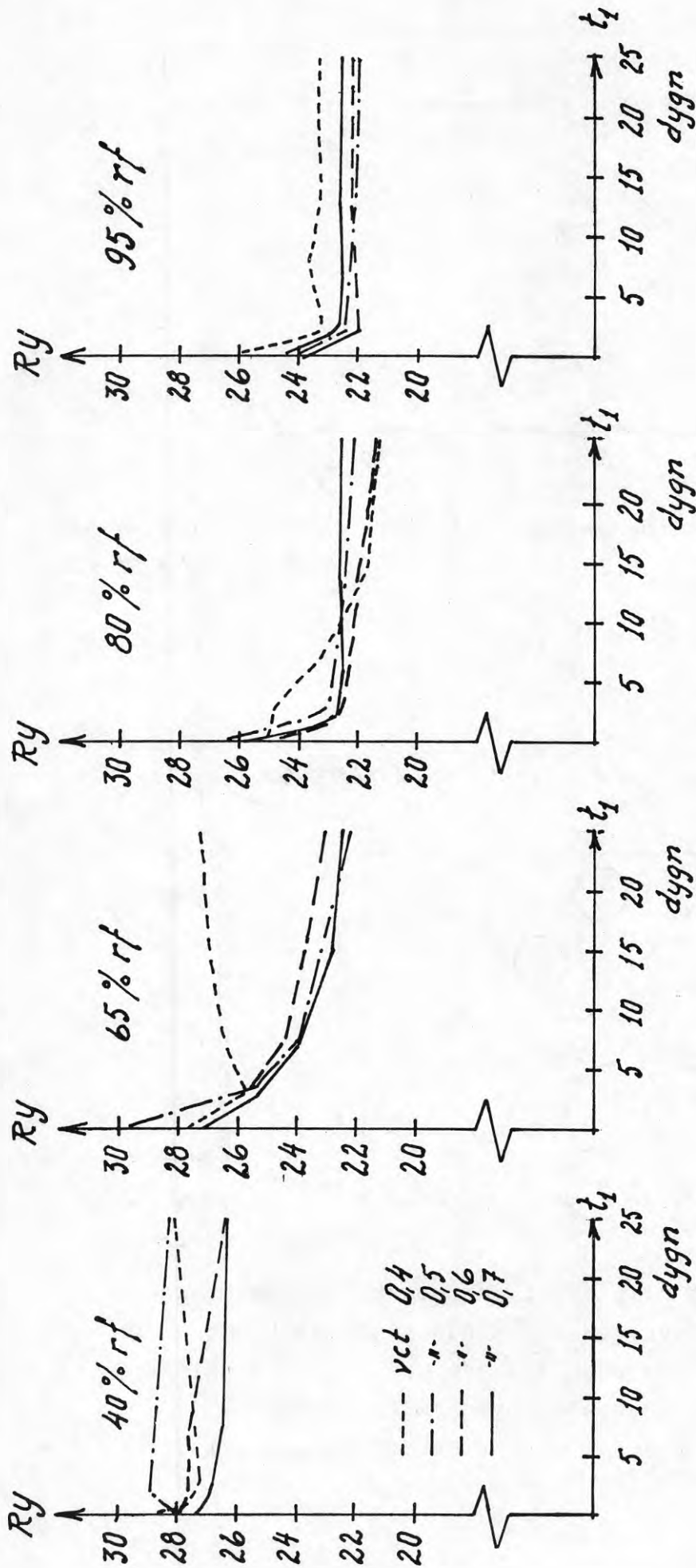
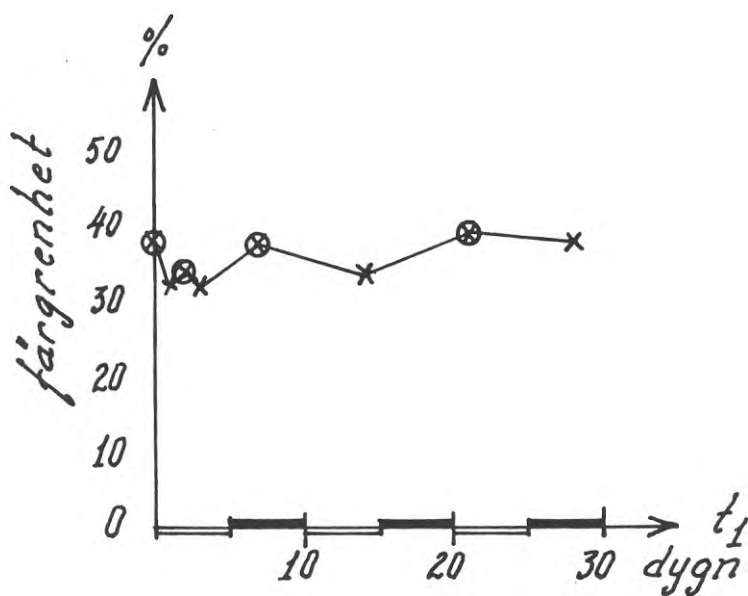


FIG. 12. Inverkan av utifrån kommande vatten, 1.8 mm tjocka pölar. Betongytans ljushet (Ry) anges som funktion av härdningstiden (t_1) mellan avformning och vattenpåföring. Färgmätningen är utförd efter vattnets uttorkning.



- ⊗ representerar pölar på plattans överdel ($t_1=0, 2, 7$ och 21)
 x —"—" —"—" —"—" underdel ($t_1=1, 3, 14$ och 28)

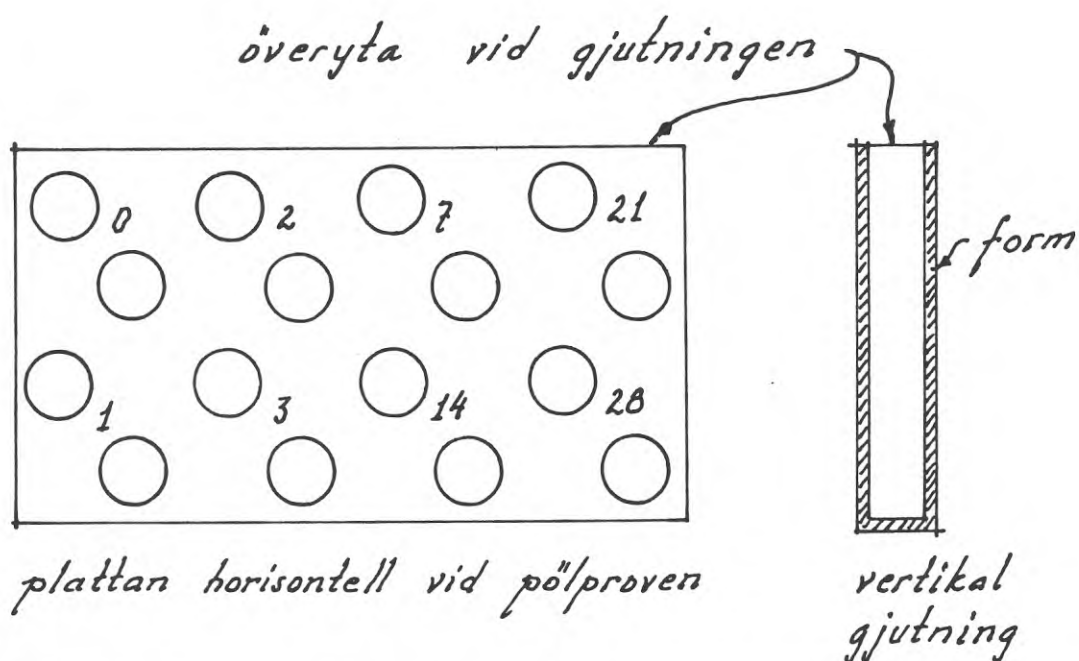


FIG. 13. Betong blir något inhomogen vid gjutningen. Delar närmast överytan tycks något mindre benägna för kalkutfällning än underliggande. Detta kan förklara, att kurvan för färgrenhet ovan blir sågtandad. t_1 är härdningstiden i dygn från avformning till vattenpåföring.

omsorg på laboratorium. Man bör därför på arbetsplatser med svårare förhållanden se till att få en så homogen betong som möjligt.

6.2.4.2 Hur fort utbildas skyddsskiktet?

Kalciumkarbonat som ett skyddsskikt i betongytan har diskuterats på sid 18 och i anslutning till den teoretiska modellen på sid 66. Det antydde i 4.2.4, sid 43 att en betydande del av detta skyddsskikt byggdes upp redan under det första härdningsdygnet efter avformning, om klimatet var gynnsamt. Eftersom färgmätning syntes vara en känsligare metod än okulärbesiktning för bedömning av kalkutfällningars intensitet, mättes färgrenheten på pölprov med kort men gynnsam härdningstid. Resultaten (i diagramform på FIG. 14) blev att

färgrenheten ökade snabbt med härdningstiden under det första dygnet

färgrenheten var större och växte snabbare med vct 0.7 än vct 0.4

väsentlig skillnad i färgrenhet mellan prover som härdats i 80 och 95 % relativ fuktighet inte förelåg.

I FIG. 14 är den vertikala skalan för vct 0.4 förskjuten 10 enheter jämfört med den för vct 0.7. Någon justering av kurvorna med hänsyn till provstyckenas läge (över- eller underdel) vid gjutningen har inte gjorts här.

Resultaten stöder de tidigare påståendena, att en väsentlig del av skyddsskiktet byggs upp under det första halva dygnet efter avformning. Det gäller vid härdning i gynnsamt klimat och i högre grad för vct 0.7 än vct 0.4. Speciellt för den förra steg färgrenheten, dvs växte skyddsskiktet, starkt under den första timmen ($t_1 \leq 1$) efter avformningen.

Beträffande kurvornas lutning kan FIG. 14 direkt jämföras med FIG. 11, eftersom skalan för såväl den horisontella som vertikala axeln ändrats i samma proportion.

Inverkan av tiden (t_0) för avformning syns inte helt oväsentlig. Denna tas upp i nästa stycke.

6.2.4.3 Avformningstid

Färgmätningen på pölproven med kort härdningstid enligt föregående stycke gjordes för tre olika avformningstider: 0,5, 1 och 8 dygn. Resultatet, som också illustreras i FIG. 14, visar att

en avsevärt större färgrenhet erhöles vid avformningstiden 0,5 dygn än 1 och 8 dygn. Om det fanns någon skillnad i inverkan mellan de två senare avformningstiderna, var den obetydlig.

Färgmätning fastslog en uppenbar skillnad i inverkan av avformningstiden. Eftersom den inte utan vidare kunde observeras vid okulärbesiktning, har den kanske mera teoretiskt än praktiskt intresse. Ur produktions-teknisk synpunkt lämnar dock försöken en viss, värdefull information. Man reducerar nämligen inte risken för kalkutfällning genom att uppskjuta avformningen.

En förkortad tid i form innebär ett öppnare porsystem vid avformning och därmed underlättad inträngning av koldioxid i ytskiktet. Vid gynnsamt klimat (20°C och 80-95 % rf) påskyndas då karbonatiseringsprocessen, dvs uppbyggnaden av ett skyddsskikt.

Å andra sidan visade försöken med kort avformningstid vid 5°C i 4.2.3 på sid 40, att ett alltför öppet porsystem gör betongen känslig för utifrån kommande vatten. Detta kan orsaka både mörka missfärgningar och ljusa (kalkutfällningar).

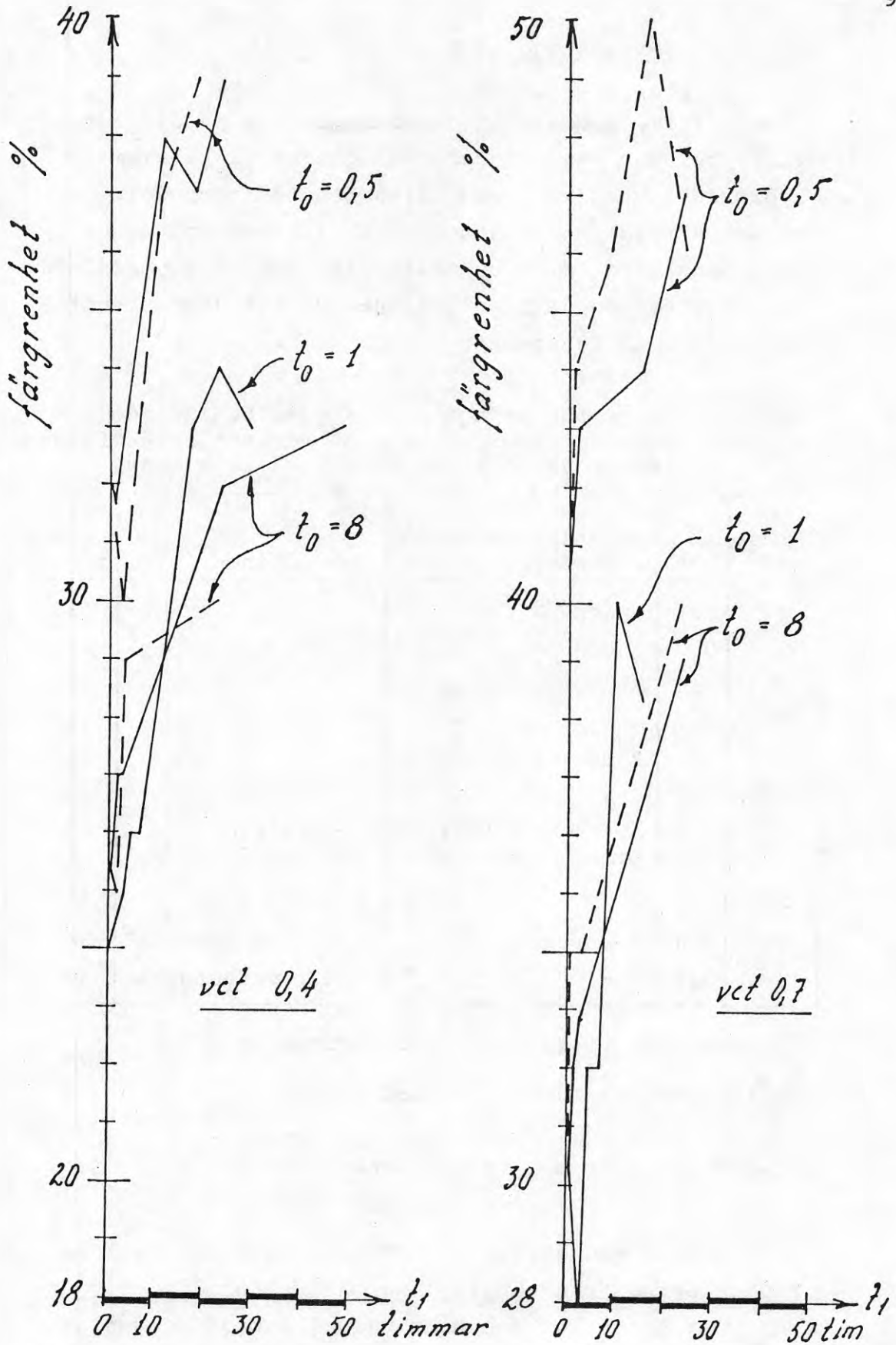


FIG. 14. Uppbyggnaden av skyddsskiktet i tidigt skede. Färgrenheten som funktion av härdningstiden t_1 .

————— härdning i 20°C och 95 % rf
 - - - - - härdning i 20°C och 80 % rf
 t_0 avformningstid i dygn

6.2.5 Färgmätning på behandlad yta

Längre fram, i 6.4.3 Ytbehandlingsmedel på sid 149, visas hur man kan reducera tillgången på kalciumhydroxid i ytskiktet med olika behandlingsmedel. Det syntes därvid intressant att få mätvärden på provstyckenas färg efter behandlingen. Ett antal mätningar genomfördes med data enligt TAB. 9, där även resultaten i form av färgrenhet anges.

TAB. 9 Färgrenheten hos provkroppar behandlade med natriumtripolysulfat och vattenglas jämförda med provkroppar härdade i olika klimat

Prov-kropp nr	Vct	Härdning efter avformning	Behandling	Färgrenhet %
1	0.4	Ingen ^a	-	43
2	0.7	Ingen ^a	-	46
3	0.4	2 dygn i 20°/40 %	-	42
4	0.7	"-	-	46
5	0.4	2 dygn i 20°/90 %	-	41
6	0.7	"-	-	43
7	0.4	ca 2 dygn i 20°/40 % (efter behandling)	1 h Na ₅ P ₃ O ₁₀ ^b	43
8	0.7	"-	1 h Na ₅ P ₃ O ₁₀ ^b	44
9	0.4	"-	1 h i vattenglas ^c	39
10	0.7	"-	1 h i vattenglas ^c	44

^aMotsvarande tillståndet vid avformning

^bNatriumtripolyfosfat, mättad lösning

^cKommersiellt natriumvattenglas, en del på fem delar vatten i volym räknat

Av tabellen framgår, att värdena ligger väl samlade. Avvikelserna från mätningarna på nyavformade ytor är små. Det bestyrker den rent visuella bedömningen, att de behandlade ytorna hade en ren och klar betongfärg.

6.2.6 Sammanfattning

Färgmättningsresultaten, som dels bekräftade erfarenheterna från pölproven, dels gav mera detaljinformation, kan sammanfattas på följande sätt:

Härdningsluftens relativa fuktighet har avgörande betydelse för uppbyggnaden av ett skydd mot kalkutfällningar.

Det är svårare att skydda betong med vct 0.4 mot kalkutfällningar än betong med vct 0.5, 0.6 eller 0.7. De tre sistnämnda vattencement-talen tycks ge samma resultat.

I gynnsamt klimat byggs en väsentlig del av skyddsskiktet upp redan under det första halva dygnet efter avformningen.

En förlängd avformningstid minskar inte risken för kalkutfällning. Däremot är en kort avformningstid i vissa fall fördelaktig. Det tycks finnas en avformningstid, som ger ett porsystem med optimal karbonatisering av betongens ytskikt.

Färgmätning är en känsligare metod för registrering av kalkutfällningarnas intensitet än visuell bedömning.

6.3 URLAKNINGSPROV

6.3.1 Motiv

Pölproven, sid 34, gav en god bild av olika variablers inverkan på kalkutfällningen. Resultaten var i huvudsak av kvalitativ art, frånsett att färgmätningen gav utfällningens intensitet i siffervärden.

Å ena sidan kan man fråga, vilken vattenbelastning de 1,8 mm tjocka vattenpölnarna innebar, och å andra sidan, vilken vattenbelastning man måste ta hänsyn till i praktiken. Den första frågan behöver ett svar för en värdering av pölproven och den andra ett svar för att ge den vattenlast man bör dimensionera en betongyta för. Den senare frågan tas upp i 9.1, Dimensionering av behandling, sid 249.

I princip är det inte vattenskiktets tjocklek som utgör den egentliga belastningen, utan det är den tid vattnet står på en betongyta. I närvaro av koldioxid kommer i vattnet löst kalciumhydroxid att karbonatisera. Så länge det finns tillgänglig fast kalciumhydroxid, kommer den att gå i lösning för att ersätta den karbonatiserade.

Den tid som vattnet stod på betongytan vid pölproven varierade starkt med vattencementtal, klimat, härdningstid etc. Torktiden för ytan var i något fall mindre än 10 minuter och i flera fall större än ett dygn. Även om pölproven ger en god överblick över olika faktorerers inverkan på kalkutfällning, gäller de endast för den aktuella vattenbelastningen (1,8 mm). De möjliggör således ingen säker grund för kvantitativa bedömningar. För vissa faktorer, t ex cementfabrikat, där pölprovets utsago var mer eller mindre obestämd, skulle man önska en provningsmetod, med vilken man mera definitivt kunde bestämma inverkan. Under det fortsatta arbetet användes därför urlakningsprov, som gav möjlighet att styra vattenbelastningens varaktighet. Metoden beskrivs nedan.

6.3.2 Utförande

Försöken utfördes på likadana plattor av betong (cementbruk) som användes vid pölproven, FIG. 15. Plattorna klövs efter avformning och endast mellandelarna brukades för urlakning. Skälet till detta var den skillnad i kalkutfällning som registrerades mellan över- och underdelar vid färgmätningen, se sid 88. Genom att endast arbeta med mellandelarna borde effekten av ovidkommande variationer i betongsammansättning undvikas.

Varje gjuten platta räckte till 7 provstycken. På vart och ett av dessa limmades ett plaströr, som FIG. 16 visar. Limningen gjordes utan onödigt dröjsmål, så snart avsedd härdning eller annan behandling avslutats. Den utfördes i rum med torrt klimat för att undvika karbonatisering. Provstycken, som inte kunde limmas direkt, inpackades i plastfolier för att skyddas mot luftens koldioxid.

Efter limningen paraffinerades provstyckets botten, kanter och limsträng, medan överytan lämnades fri. Därpå hälldes 15 ml urlakningsvatten i plaströret. Detta var urkokt och avjonat för att undvika tillförsel av koldioxid respektive kalk. Proppar påsattes för att hindra koldioxid i luften att nå vattnet.

Urlakningsvattnet byttes med bestämda tidsintervall beroende på undersökningens art och i huvudsak enligt följande:

- a) Vatten byttes en gång per dygn under 7 dygn på prov, där effekten av normala härdningsbetingelser, vattencementtal, avformningstid etc undersöktes.

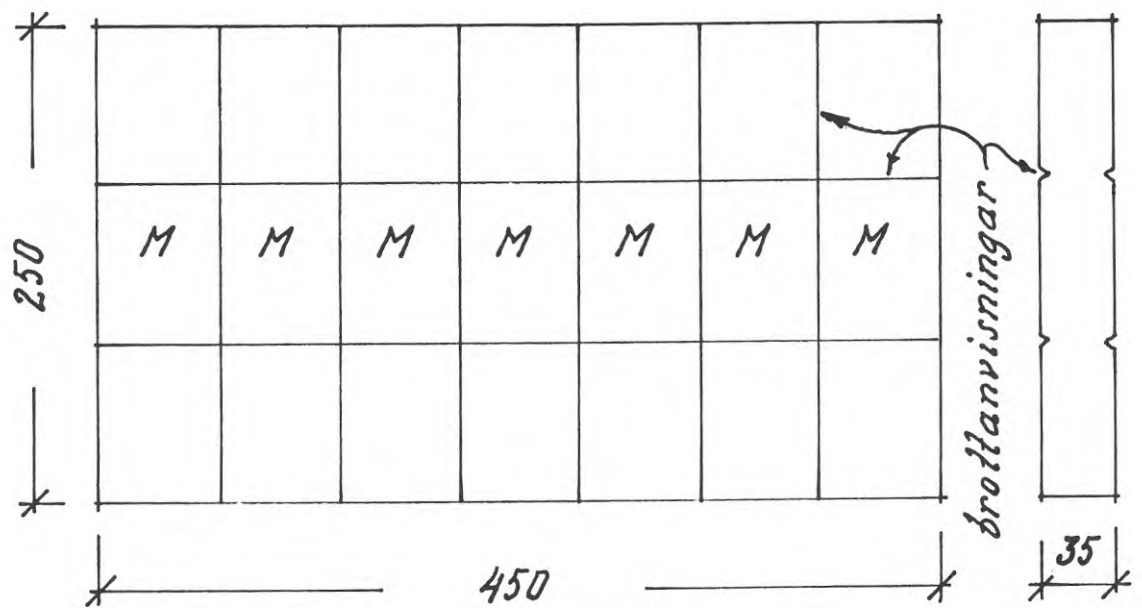


FIG. 15. Betongplatta för urlakningsprov. Klyvning skedde längs brottanvisningarna. Endast mellanstyckena (M) användes för urlakningen.

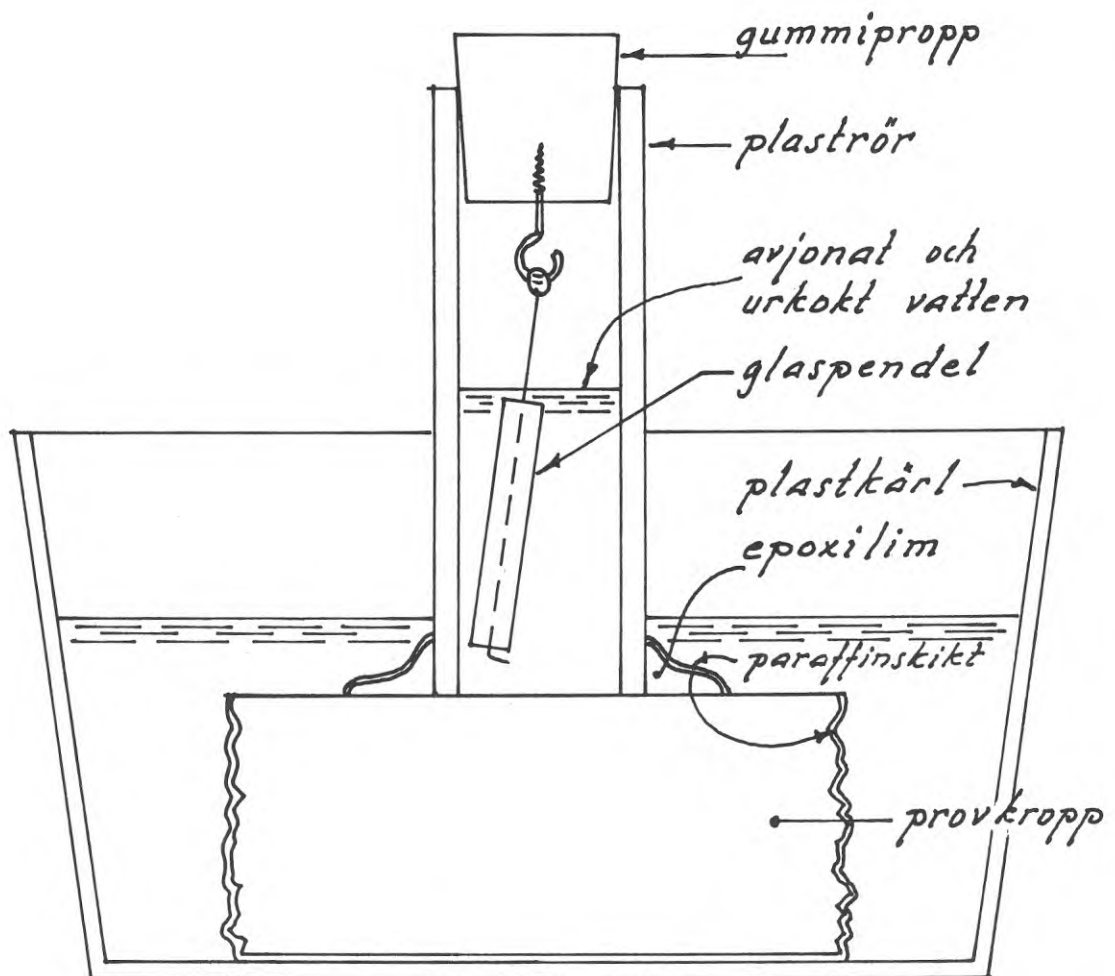


FIG. 16. Provkropp under urlakningsprov.

- b) Vatten byttes var sjätte timme under ett dygn på prover med accelererad härdning eller speciell behandling.

För att förhindra uppkomsten av ett med kalciumhydroxid mättat skikt strax ovan betongytan i rören, ansågs en viss omröring av urlakningsvattnet önskvärd. I annat fall vore det tänkbart, att nämnda mättade skikt kunde bromsa en fortsatt kalkurlakning.

Omröringen ordnades genom att provstyckena placerades på en vagga med ca 20 svängningar per minut, FIG. 17. För att ytterligare öka vattnets rörelse i rören fästes en glaspindel i propparna på dessa.

Inledande försök hade visat, att vissa betongytor absorberade urlakningsvattnet så snabbt att återstoden inte räckte till analys. Detta, som framför allt gällde prover med vct 0.7, förhindrades genom att hela provstycket sattes i en skål med vatten. Därigenom erhöles ett utvändigt vattentryck, som var tillräckligt för att hindra alltför mycket urlakningsvatten från att sugas upp av betongen.

Vattnet från varje vattenbyte analyserades med avseende på CaO. Analyserna utfördes till största delen medelst flamemission. En del av de första proverna analyserades dock med EDTA-titrering.

Betongens sammansättning i de olika blandningarna framgår av Bilaga 1. Om inget annat sägs, avses betongtyp A med Slite Std. Beträffande formar, formolja och vibrering gäller vad som sägs i Bilaga 1, vilket i huvudsak överensstämmer med motsvarande för pölproven.

Avvikelserna i fråga om härdningsluftens temperatur och relativa fuktighet var av samma storleksordning som vid pölproven, se sid. 36. Liksom vid dessa var variationerna större vid hög luftfuktighet än vid låg. Avvikelserna har sannolikt inte märkbart påverkat resultaten.

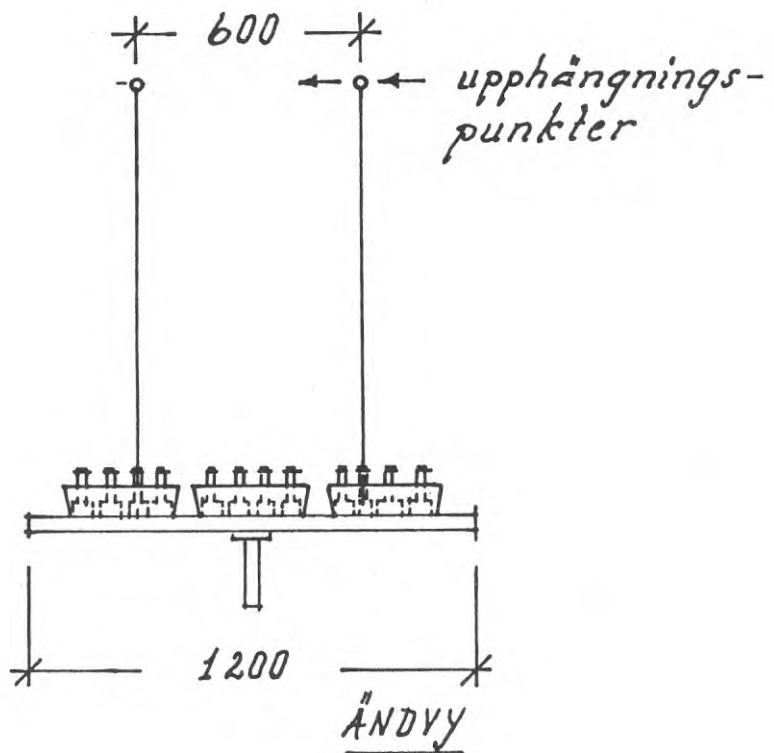
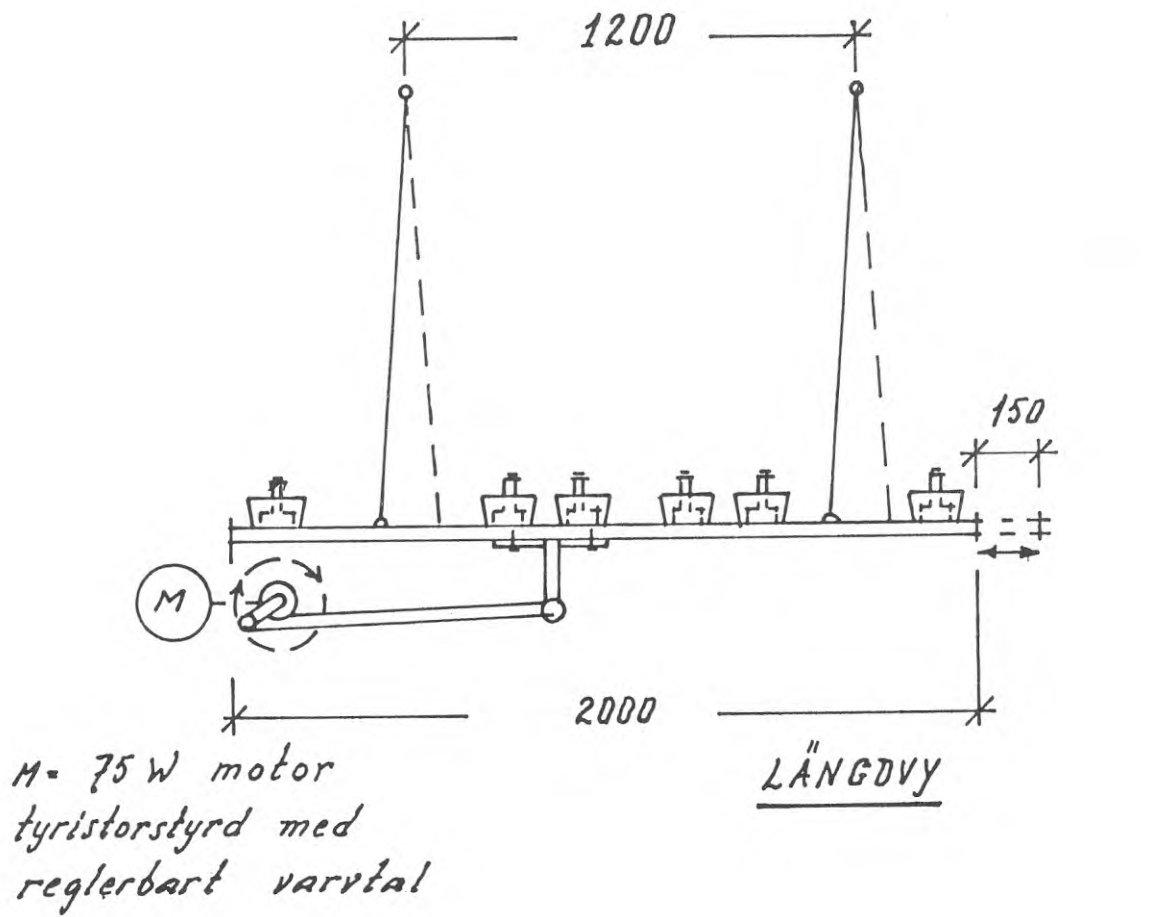


FIG. 17. Vagga med 20 hela svängningar per minut för omrörning av urlakningsvattnet.

6.3.3 Analysvärdena och deras användning

Kalken i urlakningsvattnet finns huvudsakligen i form av kalciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Analysen gjordes emellertid på Ca-joner, vilket gör att alla vattenlösliga kalciumföreningar kommer med. Resultaten anges omräknade i g CaO per m^2 betongyta.

Det är inte endast urlakningstiden t_2 som är av intresse vid urlakningsförsöken, utan även avformningstiden t_0 och härdningstiden t_1 , se FIG. 18.

I första hand har kalkmängden (ackumulerad) angivits i diagram som funktion av urlakningstiden t_2 enligt FIG. 19 - 20. Där finns två extrema resultat. Den övre kurvan visar urlakningen på en provkropp omedelbart efter avformningen och den nedre urlakningen på ett provstycke efter gynnsam härdning.

På FIG. 20 liksom i följande av samma slag har inlagts en horisontell linje V, som anger gränsen för synlig utfällning, $1 \text{ g CaO}/\text{m}^2$, enligt 6.1, sid 77. Vidare har inlagts en vertikal linje L, vattenbelastningsgränsen. Den är ett valt värde på vattenbelastningens varaktighet ur dimensioneringssynpunkt. Siffervärdet på L har satts till 10 timmar av skäl som närmare anges i 9.1, Dimensionering av behandling, sid 250. Dessa två gränsvärden, V och L, är ur teoretisk synpunkt nödvändiga och tillräckliga, för bedömningen av en betongytas resistens mot kalkutfällning med hjälp av urlakningsprov.

Om man startar urlakningsförsök vid olika tidpunkter efter avformning erhålls i regel olika urlakningsdiagram beroende på härdningens inverkan, FIG 21 och 22. Projicerar man som där värdena för en viss urlakningstid, t ex $t_2 = 3$ dygn, på de vertikala axlarna och förbinder de där erhållna punkterna, får man kurvor för kalkurlakningen som funktion av härdningstiden. Indirekt visar kurvorna således med vilken hastighet betongens resistens mot kalkutfällningar byggs upp.

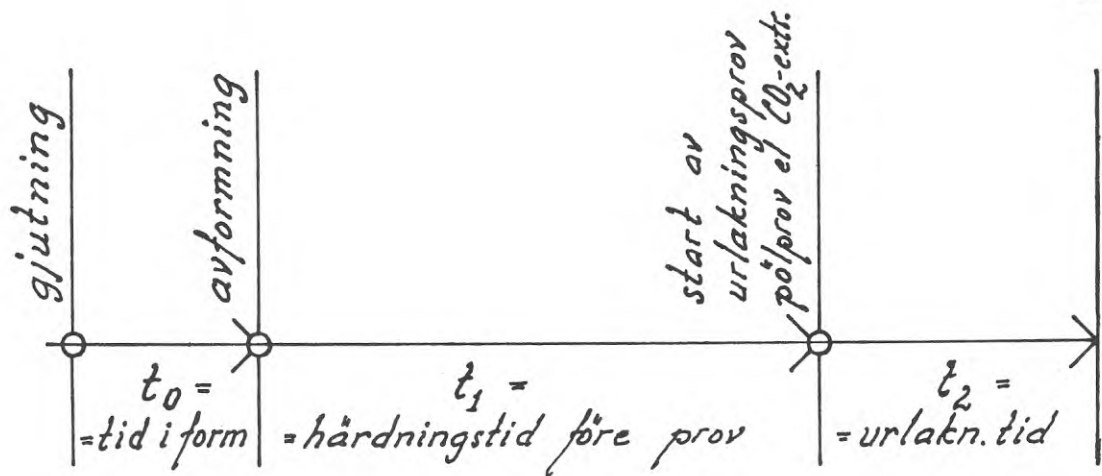
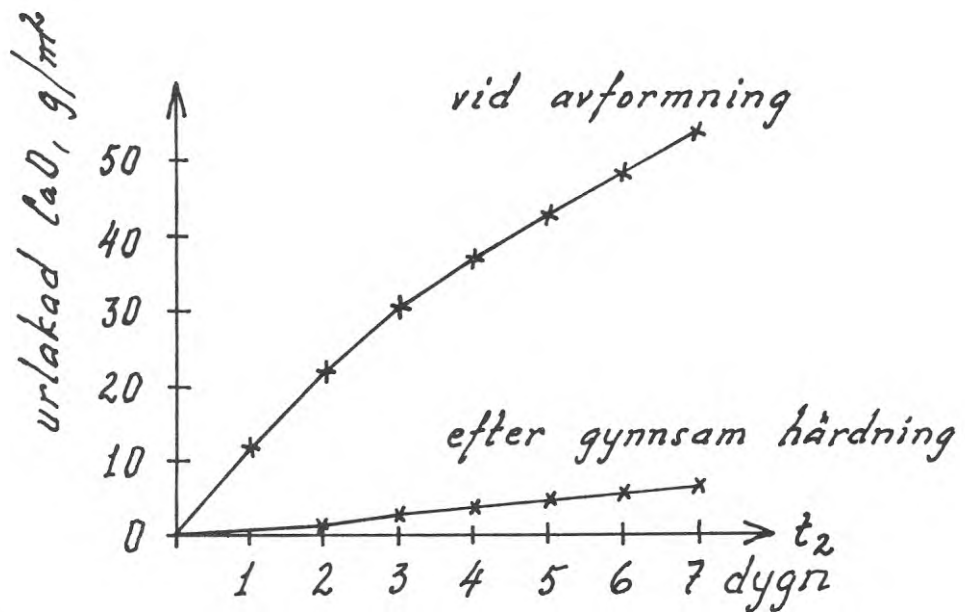
FIG. 18. Definition av t_0 , t_1 och t_2 .

FIG. 19. Urlakningskurvor.

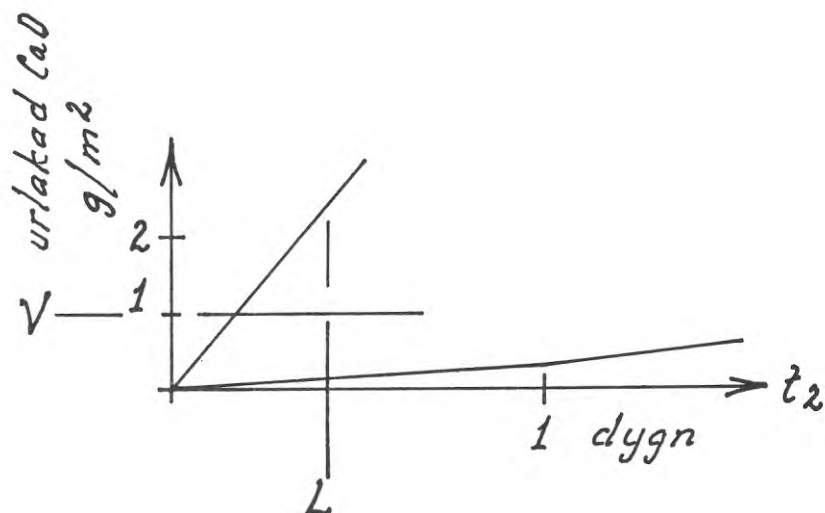


FIG. 20. Detalj vid origo av FIG. 19.

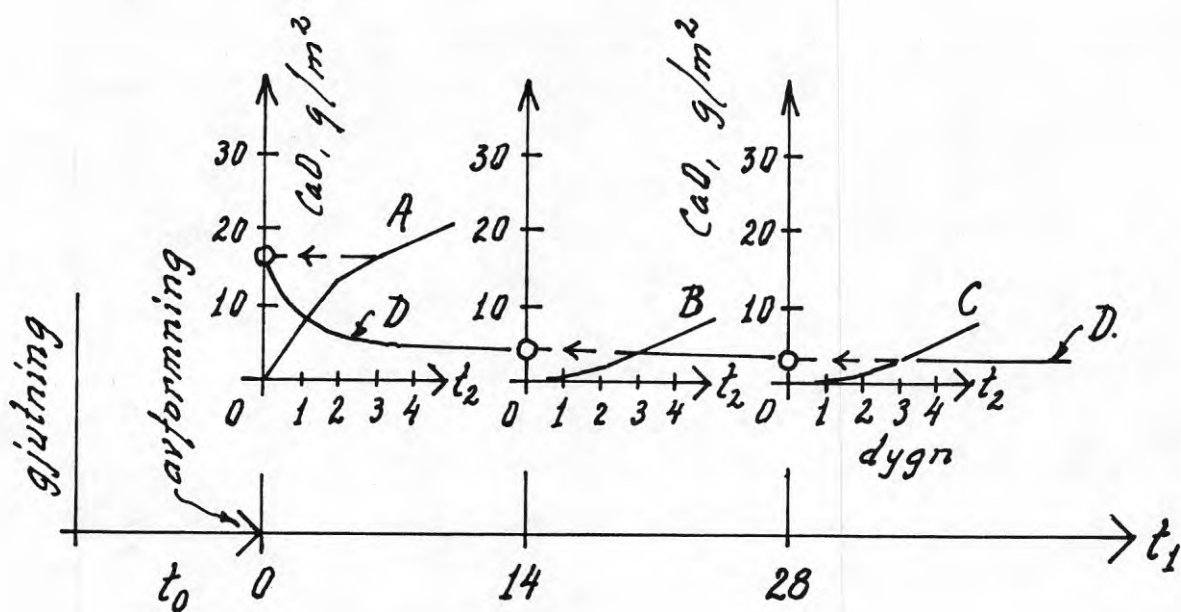


FIG. 21. Beroende på härdningstiden (t_1) före urlakning får man olika kurvor (A, B eller C). Projicieras punkter med samma urlakningstid, t ex $t_2 = 3$ dygn på den vertikala axeln fås punkter som ger kurvan D. Denna visar då urlakad CaO som funktion av härdningstiden t_1 .

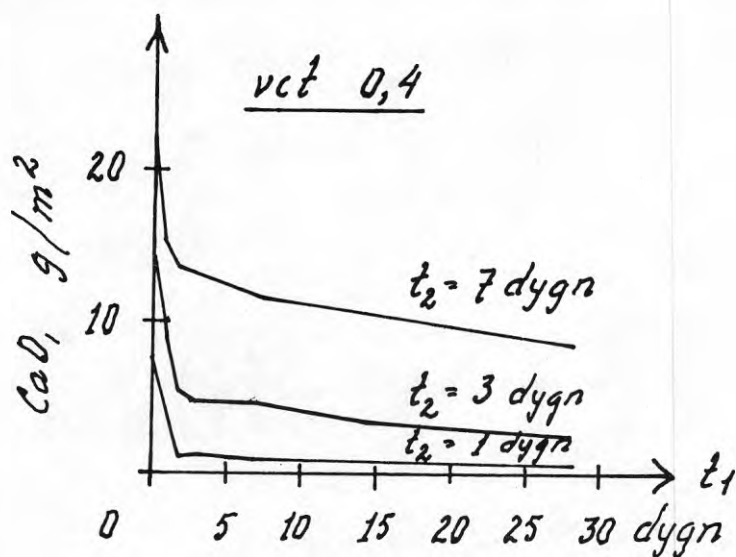


FIG. 22. Urlakad CaO som funktion av härdningstiden t_1 . Kurvorna är konstruerade som D i föregående figur. t_2 anger härdningstiden. Provkropparna var härdade i 20°C och 90-95 % rf.

6.3.4 Kalkutfällning som ett sannolikhetsproblem

Betraktar man ett antal urlakningskurvor, speciellt sådana med urlakningstiden 7 dygn, finner man, att alla har en tendens att övergå i räta linjer. Kalkurlakningen avtar med andra ord inte med tiden. Får vatten stå tillräckligt länge på en betongyta, som inte är helt förseglad, kommer det att lakas ur tillräckligt med kalk för synlig utfällning. Frågan om en given betongyta kommer att få en synlig kalkutfällning eller ej kan därför betraktas som ett sannolikhetsproblem. Det går således inte att avgöra, om en enskild betongyta, t ex tak eller fasad, får kalkutfällning. Däremot bör det vara möjligt att förutsäga sannolikheten (risken) för att den skall belastas av en vattenfilm (genom regn) så lång tid, att tillräcklig mängd kalk för synlig utfällning urlakas. Detta synsätt på kalkutfällningarna gavs på sid 71 i

5. TEORETISK MODELL. Urlakningskurvornas övergång i räta linjer styrker således denna.

Med urlakningsprov - utförda och redovisade på det sätt som beskrivits ovan - har ett flertal variablers inverkan på kalkutfällning testats. Undersökningen har haft två huvuddelar:

kartläggning av inverkan från faktorer som normalt finns med vid betongframställning, 6.3.5 - 6.3.13, sid 105 - 138.

studier av metoder och behandlingsmedel med syfte att accelerera och förbättra betongs resistens mot kalkutfällning, 6.4 sid 140.

6.3.5 Cementfabrikat och cementtyp

Varken förförsök eller pölprov gav något belägg för någon väsentlig skillnad mellan olika sorters portlandcement i fråga om kalkutfällningar. Eftersom en del erfarenheter från praktiken tyder på en fullt märkbar skillnad, utfördes ytterligare en del jämförande försök i form av urlakningsprov.

Sex olika cementsorter provades. De anges nedan tillsammans med övriga variabler och data.

Cementfabrikat: Slite Std
 Limhamn Std
 Limhamn LH
 Degerhamn Std
 Skövde SH
 Stora Vika Std

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Härdningstid i
 form: $t_0 = 1$ dygn

Härdningsklimat: 20°C och 80 % rf (nominellt)
 21°C och 83 ± 3 % rf (uppmätt)

Härdningstid: $t_1 = 0, 1$ och 7 dygn

Urlakningstid: $t_2 = 24$ timmar

Resultatet, som även visas i kurvorna på FIG. 23-24, blev att

inga större skillnader i kalkurlakning, dvs risk för utfällning, konstaterades för de olika cementsorterna

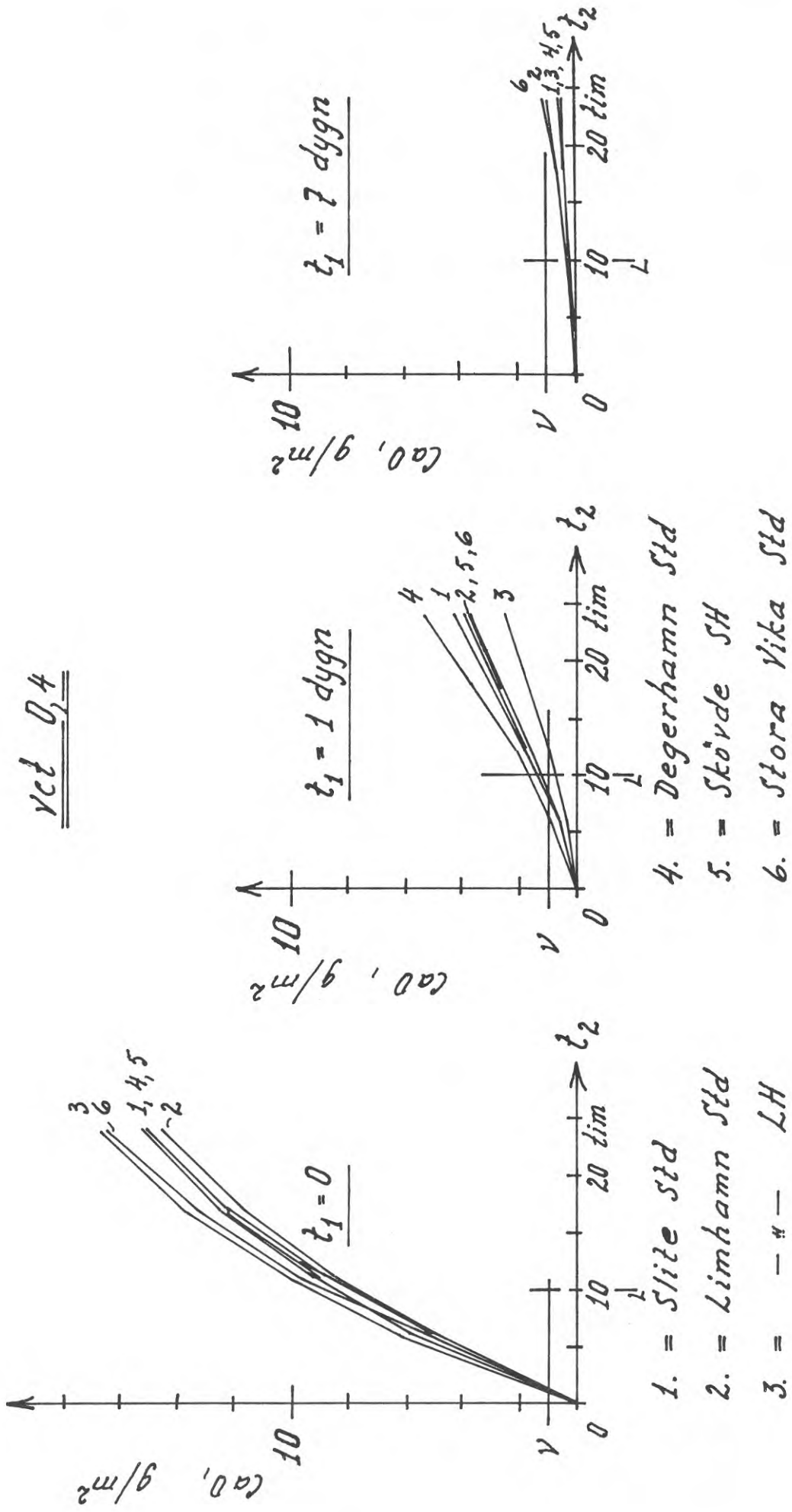
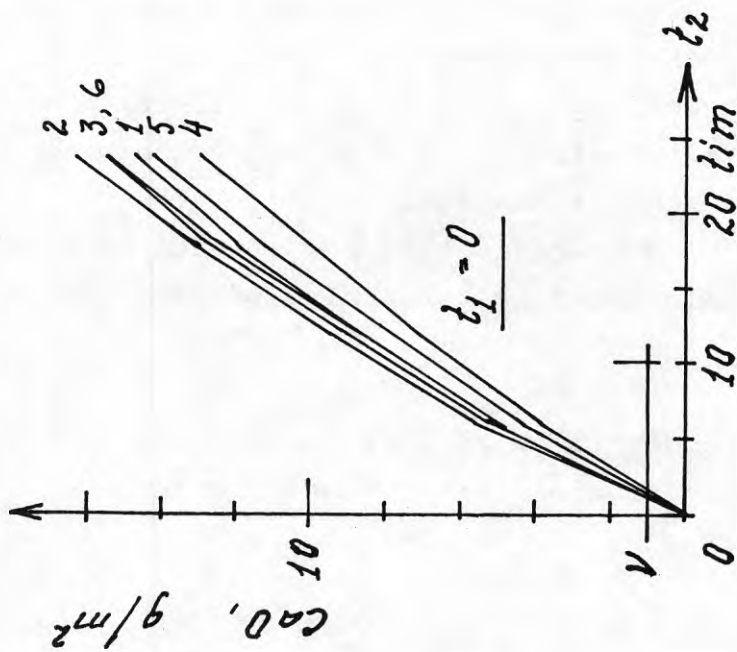
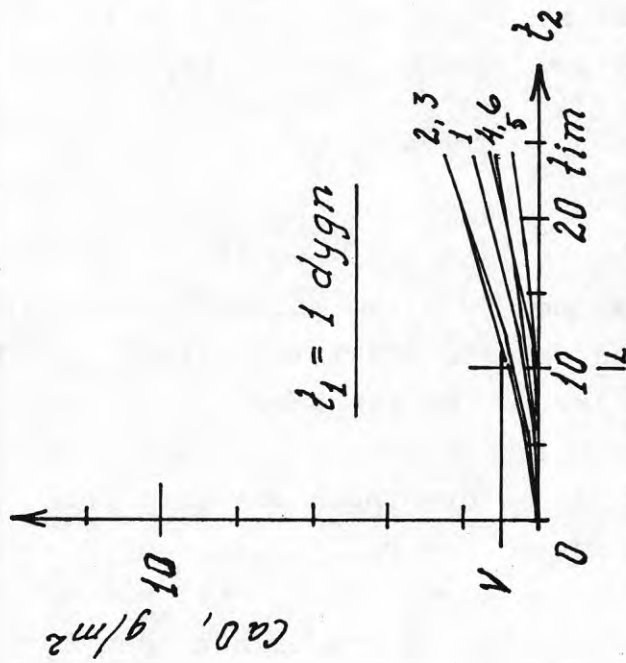


FIG. 23. Inverkan av cementfabrikat, Urlakningsprov på betong med vct 0,4, härdad i 20°C och 80 % rf. t_1 är härdningstid mellan avformning och urlakningens start.

vct 0,7



- 1. = Slite Stå
- 2. = Limhamn Stå
- 3. = " LH



- 4. = Degerhamn Stå
- 5. = Skövde SH
- 6. = Stora Vika Stå

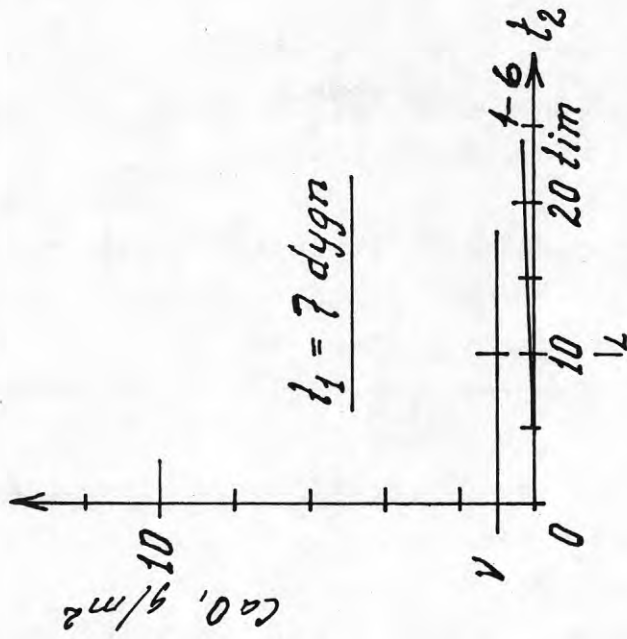


FIG. 24. Inverkan av cementfabrikat, Urlakningsprov på betong med vct 0,7, härdad i 20°C och 80 % rf. t_1 är härdningstid mellan avformning och urlakningens start.

Limhamn Std och LH fick vid vct 0.7 en något större urlakning än övriga cement vid avformning och vid 1 dygns härdning

härdningstiden hade stort inflytande vid detta klimat. Urlakningen avtar snabbt med härdningstiden i början, dvs under det första dygnet. Därefter avtar den allt långsammare.

betong med vct 0.4 fick större kalkutlakning, dvs löpte större risk för kalkutfällning, än betong med vct 0.7. Den förra krävde längre härdning än 1 dygn för att klara 10 timmars vattenbelastning utan synlig utfällning. Den senare krävde mindre än 1 dygns härdning för detta,

I stort bekräftar urlakningsförsöken resultaten från förförsök och pölprov, att det inte föreligger någon väsentlig skillnad med de olika portlandcementen. Ändock motsäger de inte de praktiska erfarenheterna om vissa skillnader. De två långsammaste i fråga om tidig hydratation, Limhamn Std och LH, hade störst urlakning av CaO vid avformningen och efter ett dygns härdning för betong med vct 0.7. Efter 7 dygns härdning eller med vct 0.4 ligger emellertid kurvorna för dessa inte högst. Den större urlakningen för vct 0.7 kan mycket väl bero på en långsammare hydratation hos de två Limhamns cementen än de övriga. Vid vct 0.4 kan värmeutvecklingen till följd av större cementmängd varit tillräcklig för att ge en snabbare hydratation. Likaså kan härdningstiden 7 dygn vid vct 0.7 ha gett nödvändig hydratation för att ta bort eventuella skillnader i kalkurlakning på ett tidigare stadium.

Man kan med tanke på det ringa antalet försök inte bortse från, att skillnaderna för Limhamn-cementen gentemot övriga mera kan vara ett resultat av normal

spridning än regelbunden avvikelse. Resonemanget styrks dock en del av TAB. 10, där total mängd av urlakad CaO för de sex cementsorterna framräknats. Siffervärdena i tabellen har framräknats genom att addera urlakad CaO efter 24 timmar för härdningstiderna 0, 1 och 7 dygn.

TAB. 10 Totalt urlakad mängd CaO i g/m² för tre provkroppar härdade i 20°C och 80 % rf i resp 0, 1 och 7 dygn. Urlakningen ordnad efter stigande CaO-mängd anges av siffror inom parentes.

Cementsort	vct 0.4		vct 0.7	
Slite Std	19.8	(4)	16.8	(3)
Limhamn Std	18.9	(1)	19.0	(6)
Limhamn LH	19.7	(3)	18.2	(5)
Degerhamn Std	21.4	(5)	14.5	(1)
Skövde SH	19.5	(2)	15.2	(2)
Stora Vika Std	21.5	(6)	17.4	(4)
Medelvärde med variationsgränser	20.1	+ 1.3 - 1.2	16.91	+ 2.1 - 2.4

Av tabellen framgår, att Limhamns cementen hade störst urlakning vid vct 0.7. För vct 0.4 var förhållandet i stort sett det omvända. Skövde SH hade näst minst urlakning med båda vattencementtalen. Även det överensstämmer med den antydda hypotesen om hydratationshastighetens inverkan.

FIG. 25 visar urlakningsförsök på en del betongytor (utanför cirklarna) från pölproven. Försöken är utförda några månader efter pölprovets avslutning. Under mellantiden har provkropparna förvarats i rumstemperatur med ungefär 60 % rf. Urlakningstiden var $t_2 = 7$ dygn med vattenbyte efter 1 och 4 dygn. Dessa provningar

tjänstgjorde som försök att värdera urlakningsförsök som testmetod. Vissa avvikelser i utförandeteknik gentemot följande urlakningsförsök förekom. Direkta jämförelser med dessa bör därför inte göras. Däremot duger försöken väl för en jämförelse mellan de tre använda cementsorterna, Limhamn Std, Skövde Std och Skövde SH. De visade en större urlakning för det långsammare cementet än för de två snabbare.

Det är alltså helt rimligt att man i praktiken vid viss härdning skulle kunna märka en minskning i kalkutfällning genom övergång från ett långsamt cement till ett snabbare.

6.3.6 Vattencementtal

En tydlig skillnad i kalkurlakning mellan betong med vct 0.4 och 0.7 konstaterades kvantitativt redan under rubriken 6.3.5 Cementfabrikat och cementtyp. Jämförelser mellan de två vattencementtalen har gjorts genom hela projektet. Nedan redovisas dessutom urlakningsförsök, där vct 0.5 och 0.6 medtagits. Data för dessa prov var

Vattencementtal:	0.4, 0.5, 0.6 och 0.7
Relativ fuktighet:	40, 65, 80 och 95 %
Temperatur:	20°C
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn

Resultaten blev i enlighet med FIG. 26, att

kalkurlakningen, dvs risken för kalkutfällning, var större med vct 0.4 än med vct 0.7

inget entydigt svar erhöles om kalkurlakningen för vct 0.5 och 0.6 i relation till vct 0.4 och 0.7. Med kort härdningstid ($t_1 \leq 3$ dygn) syns dock vct 0.4 ha haft den största urlakningen.

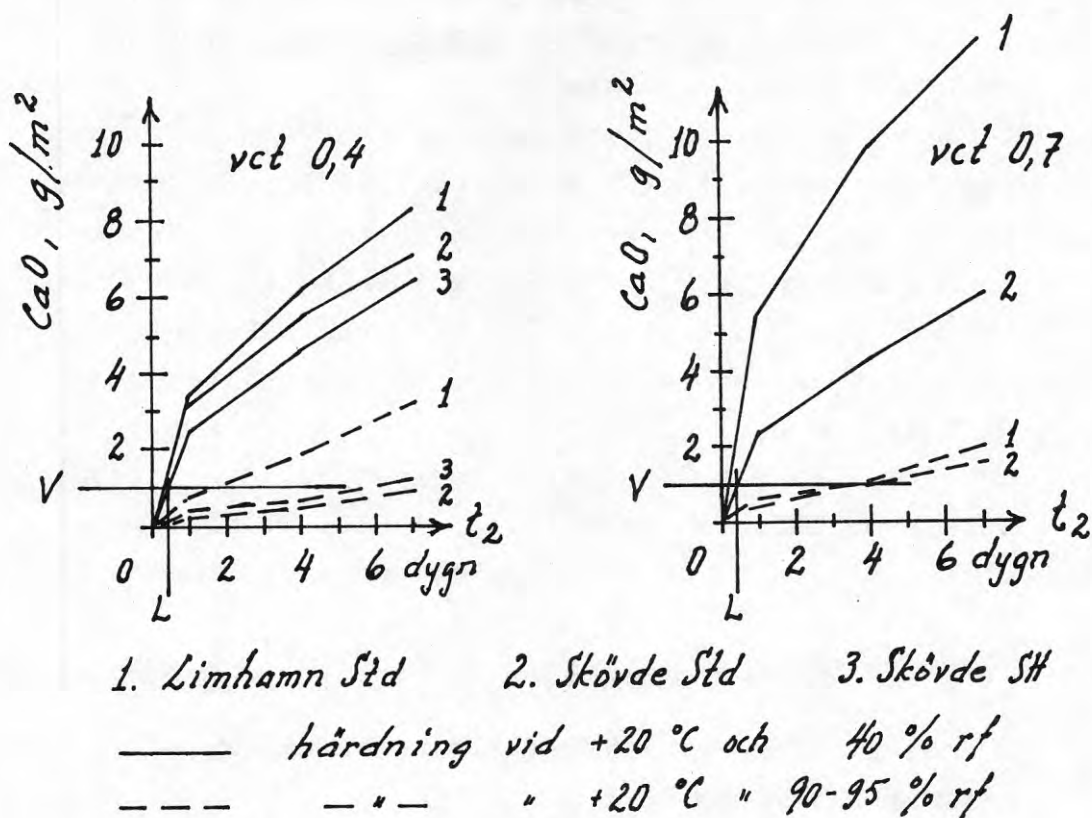


FIG. 25. Inverkan av cementsort, urlakningsprov. Heldragen linje anger härdning i 20°C och 40 % rf. Streckad linje anger härdning i 20°C och 90-95 % rf. Utöver ovanstående härdning i 28 dygn förvarades provkropparna i rumstemperatur och ungefär 60 % rf under några månader före urlakningsförsöken. Dessa utgjorde förprov till efterföljande, modifierade försök i större skala. t_2 är urlakningstiden.

vattencementtalets inverkan är av sekundär betydelse jämfört med den relativa fuktighetens.

Dessa urlakningsförsök bekräftar resultaten från förförsök och pölprov, att det är lättare att göra en betong med vct 0.7 resistent mot kalkutfällning än en med vct 0.4. Däremot innebär kurvorna i FIG. 26 en viss motsägelse gentemot färgmättningsresultaten i FIG. 11. De senare antyder samma inverkan av vct 0.5 och 0.6 som av 0.7. Avvikelsen från vct 0.4 var där uppenbar. Urlakningsresultaten i FIG. 26 blev mera diffusa, även om en tydlig skillnad fanns mellan vct 0.4 och 0.7.

Det är tänkbart, att färgrenheten enligt FIG. 11 dikteras mindre av kalkutfällningseffekter än av någon annan orsak.

6.3.7 Temperatur

Praktiska erfarenheter tyder på att kalkutfällningar uppträder oftare och intensivare vid kall och fuktig väderlek än eljest. Vår och höst har ofta medfört besvärande missfärgningar på betongytor. Det var därför naturligt att kvantitativt söka fastställa ett eventuellt samband mellan härdningstemperatur och kalkurlakning, dvs risk för kalkutfällning. Pölproven på sid. 40 hade ju inte klart visat ett sådant samband.

Data för dessa urlakningsförsök var följande.

Temperatur vid härdning:	5 och 20°C
Relativ fuktighet:	95 %
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn

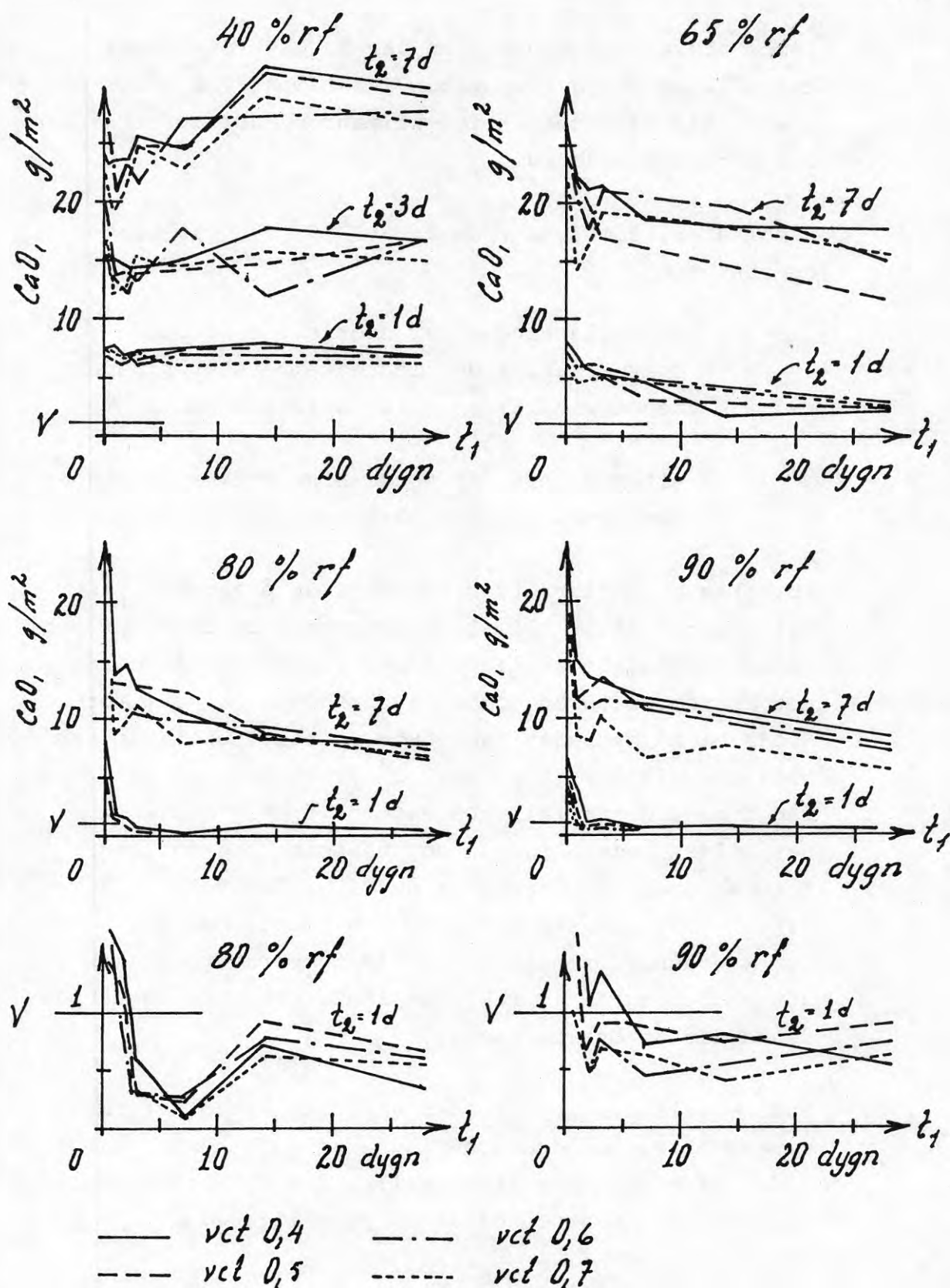


FIG. 26. Inverkan av vattencementtal, Urlakningsprov på betong härdad i olika relativa fuktigheter vid 20°C. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn. De två nedre figurerna är detaljbilder av de två ovanför.

Temperaturen vid gjutningen var 20°C . Provkropparna kvarhölls i denna temperatur i 4 timmar. Därefter placerades de i respektive klimatrum, där avformning och härdning ägde rum.

Resultaten, som även framgår av FIG. 27, gav besked om att

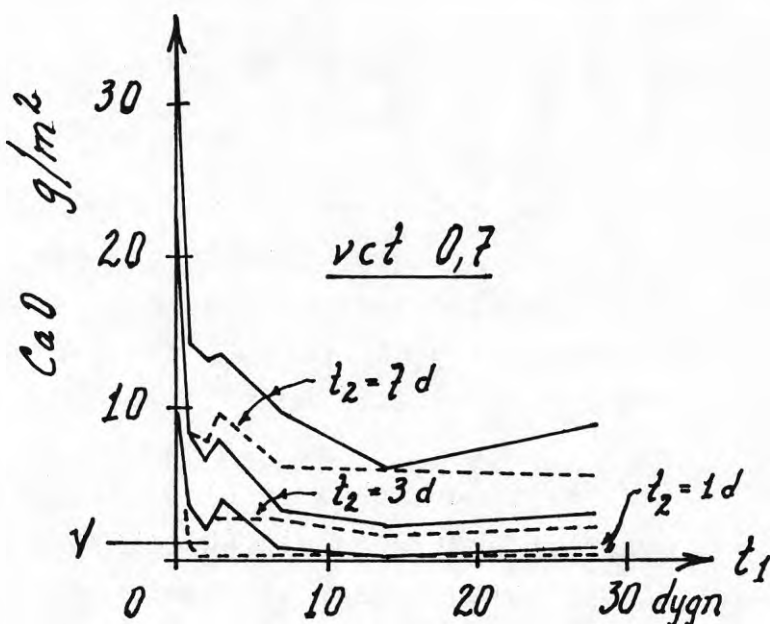
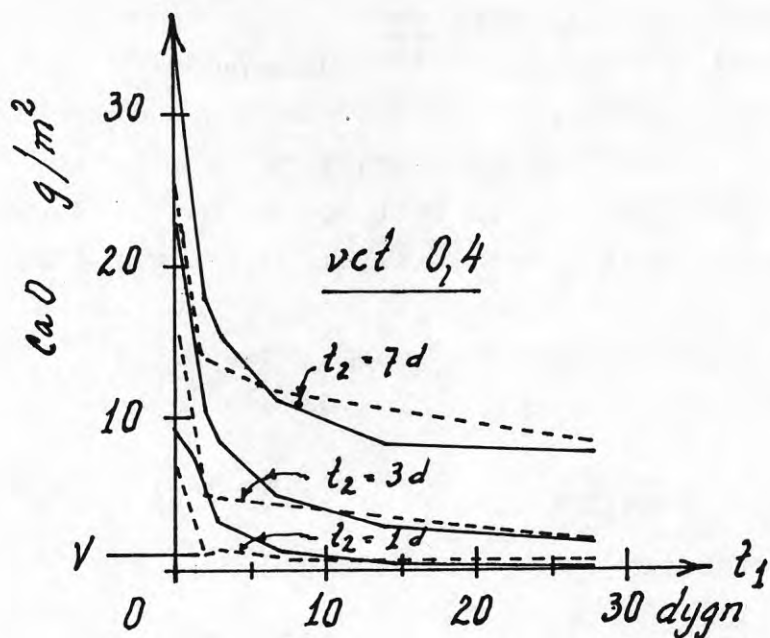
kalkurlakningen var större för betongen som härdats i den lägre temperaturen under den första tiden efter avformningen

efter ungefär en vecka blev kalkurlakningen densamma, oavsett härdningstemperaturen

Försöken bekräftar erfarenheten från praktiken, att kallt och fuktigt klimat är ogynnsammare än varmt och torrt. Här måste emellertid ett förtydligande göras. Det är temperaturen som är avgörande genom att fördröja bl a hydratationen. Hög relativ fuktighet har tidigare visat sig gynnsam och är säkerligen bättre än låg även i detta fall. Däremot är fuktig väderlek i betydelsen nederbördsrik ogynnsammare vid den låga temperaturen. Som framgick av FIG. 27 var kalkurlakningen avsevärt större under den första veckan ($t_1 < 7$ dygn) för betongen i låg temperatur. Risken för att en betongyta i praktiken skall vätas av regn under denna tid är överhängande.

Skulle relativa fuktigheten vara låg efter avformningen eller temperaturen lägre än i försöket, kan tiden då risken för kalkutfällning vid vattenbegjutning (regn) är stor förlängas ytterligare.

Flera försök i låg temperatur redovisas under Härdningstid i form, Ballastmängd och Natrium-tripolyfosfat på sid 119, 120 och 166.



— hårdning vid +5 °C och 95% rf
 - - - - " - " +20 °C - " - 95% rf

FIG. 27. Inverkan av temperatur. Urlakningsprov.
 Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 dygn.
 Urlakningstid t_2 dygn.

6.3.8 Relativ fuktighet

Alla tidigare beskrivna försök i projektet har entydigt visat, att härdningsluftens relativa fuktighet spelade en avgörande roll för betongens motståndsförmåga mot synlig kalkutfällning. Det var därför naturligt, att med urlakningsförsök studera inverkan därav mera ingående. Försök genomfördes med fyra olika luftfuktigheter och övriga data enligt följande.

Relativ fuktighet:	40, 65, 80 och 95 %
Temperatur:	20°C
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn

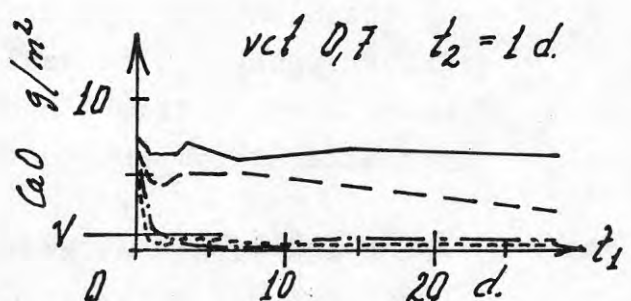
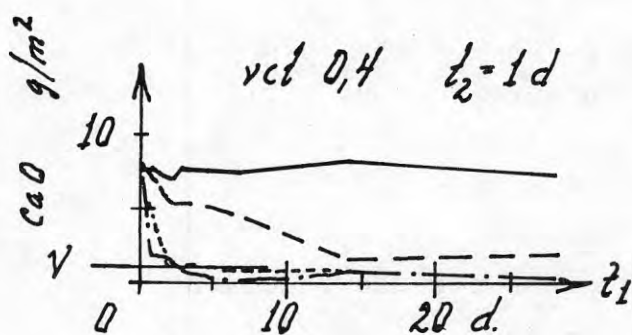
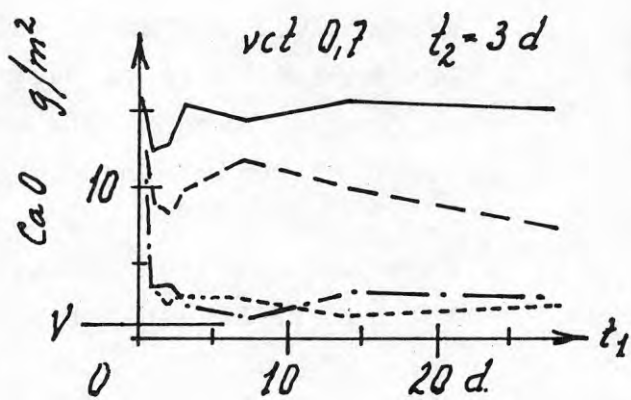
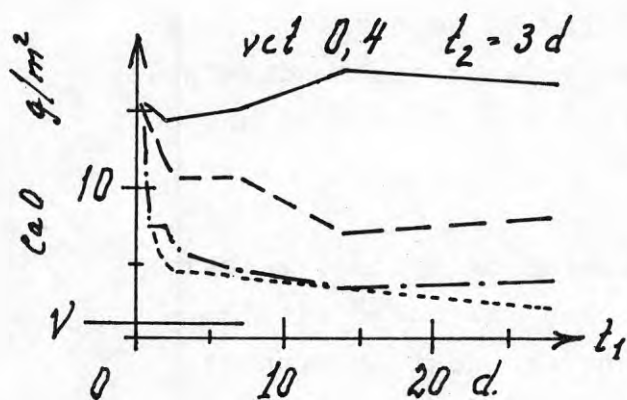
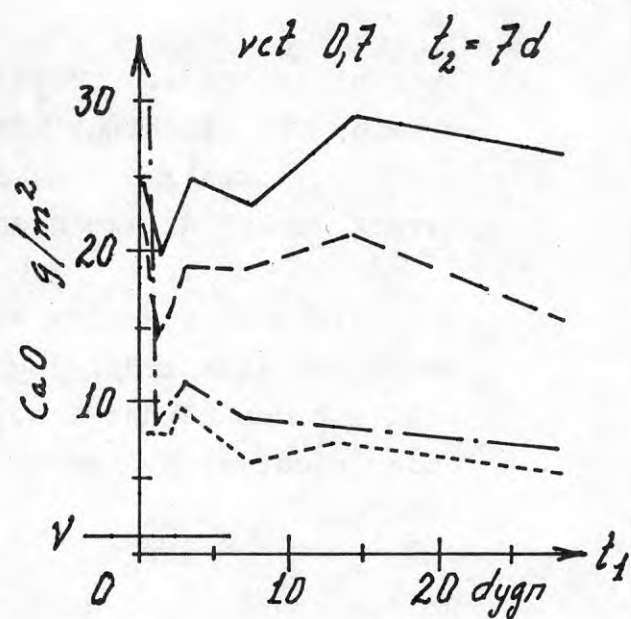
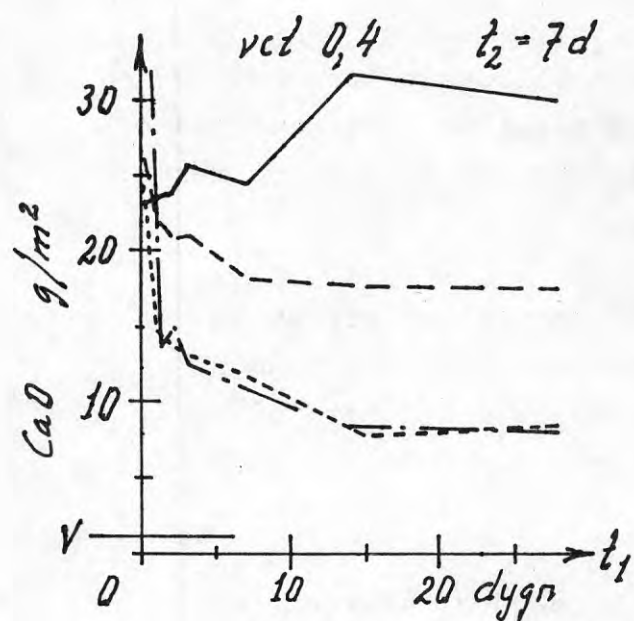
Resultaten, även återgivna i FIG. 28, visade att

vid härdning i 80 eller 95 % rf erhöll provkropparna redan efter något dygn en avsevärt reducerad kalkurlakning. Denna var vid en urlakningstid av $t_2 = 1$ dygn av storleksordningen 1 g CaO per m^2 , dvs vad som fordras för synlig utfällning

vid härdning i 65 % rf blev urlakad kalkmängd avsevärt större än vid 80 och 95 % rf. Urlakningen avtog endast långsamt med härdningstiden t_1 .

vid härdning i 40 % rf erhölls ingen minskning i kalkurlakning under de 28 dygn försöken pågick

urlakningen blev något mindre för vct 0.7 än för vct 0.4



— 40% rf - - - 80% rf
 - - - 65% rf ····· 95% rf

FIG. 28. Inverkan av relativ fuktighet. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad vid 20°C. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

Urlakningsförsöken bekräftade således pölproven. De visade, att härdningsluftens relativa fuktighet under i övrigt normala betingelser var den faktor som mest påverkade kalkurlakningen.

Vill man snabbt skaffa en betongyta ett effektivt skydd mot kalkutfällning, bör man i första hand se till att den härdas i hög relativ fuktighet (80-95 %) under något dygn. Samtidigt måste man dock skydda den mot fritt vatten.

Om man snabbt vill göra en betongyta resistent mot kalkutfällning, är en relativ fuktighet på 65 % inte tillräcklig. Å andra sidan synes 80 % rf vara lika effektiv som 95 % rf enligt FIG. 28. Det bör observeras, att provkropparna i 80 % rf tillverkats och provats vid ett annat tillfälle än de övriga. Detta kan ha inneburit en viss avvikelse trots omsorgsfullt utförande. Även senare utförda prov i 80 % rf har gett liten kalkurlakning.

Försöken ger inget säkert besked om optimal relativ fuktighet. Skillnaden i urlakad kalkmängd vid 80 resp 95 % rf syns vara liten. Ur praktisk synpunkt kan det dock vara lättare att åstadkomma den lägre luftfuktigheten.

Rent subjektivt uppfattades färgen något klarare på provkroppar, som härdats i 80 % rf än i 95 % rf. Detta kunde motivera något mer ingående studier än vad projektet inrymmer i detta avseende.

Det tycks finnas en kritisk gräns för den relativa fuktigheten i intervallet 65 - 80 %. En rimlig förklaring till detta kan vara att kapillärkondensationen (Ahlgren, 1973) här ger en lagom vattenmättnadsgrad. Då blir tillgången på kalciumhydroxid i vattenlösning tillräcklig samtidigt som koldioxid från luften når in i porsystemet, FIG. 3 - 4. Förutsättningarna för

karbonatisering, dvs kalciumhydroxid och koldioxid i närvaro av vatten, är alltså uppfyllda. Den sker i detta fall under ytan.

Flera av urlakningskurvorna har till synes omotiverat höga värden för $t_1 = 14$ dygn. Detta torde bero på någon ovidkommande, ej känd faktor. Kontrollförsök utfördes och gav värden som ansluter till kontinuerligt avtagande kurvor.

6.3.9 Härdningstid i form

Pölproven visade å ena sidan, att en lång härdningstid i form inte medför några fördelar i fråga om kalkutfällningar. Å andra sidan framgick av dem, att en mycket kort tid i form kan vara ogynnsam för betongen till följd av ogynnsam hydratation, se 4.2.3 på sid 40.

Inverkan av härdningstiden i form t_0 , dvs avformningstiden, har även studerats med urlakningsförsök enligt följande data.

Härdningstid i form: $t_0 = 0.5$ och 1 dygn vid 5°C och $t_0 = 0.4, 1$ och 7 dygn vid 20°C

Temperatur: 5° och 20°C

Relativ fuktighet: 40 % (endast vid 20°C) och 95 %

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Plattorna som härdades i 5°C göts och förvarades under de fyra första timmarna i 20°C . Därefter placerades de i sitt klimatrum, där avformning och härdning skedde.

Resultaten, även redovisade i FIG. 29 och 30, visade att

inverkan av härdningstiden i form på kalkurlakningen var ingen eller ringa. Lång avformningstid reducerade inte kalkurlakningen.

hög relativ fuktighet till skillnad från låg sänkte kalkurlakningen väsentligt oavsett avformningstiden

betongen med vct 0.7 gav mindre kalkurlakning än betongen med vct 0.4

Urlakningsförsöken tyder på att härdningstiden i form är av underordnad betydelse. De visade dock inte som pölproven vid mycket tidig avformning, att vatten som påförs en betongyta med otillräcklig hydratation kan medföra kraftig missfärgning, se sid 41.

Man observerar, att urlakningen sjunker långsammare med härdningstiden t_1 vid 5°C än vid 20°C . Detta överensstämmer med resultaten i 6.3.7 på sid 112.

6.3.10 Ballastmängd

Betong med tre olika värden på cementpastemättnaden studerades med urlakningsprov. Data vid försöken var enligt nedan.

Cementpastemättnad:	120, 132 och 140 %
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn
Temperatur:	5°C (endast vid 95 % rf) och 20°C
Relativ fuktighet:	40, 65, 80 och 95 %

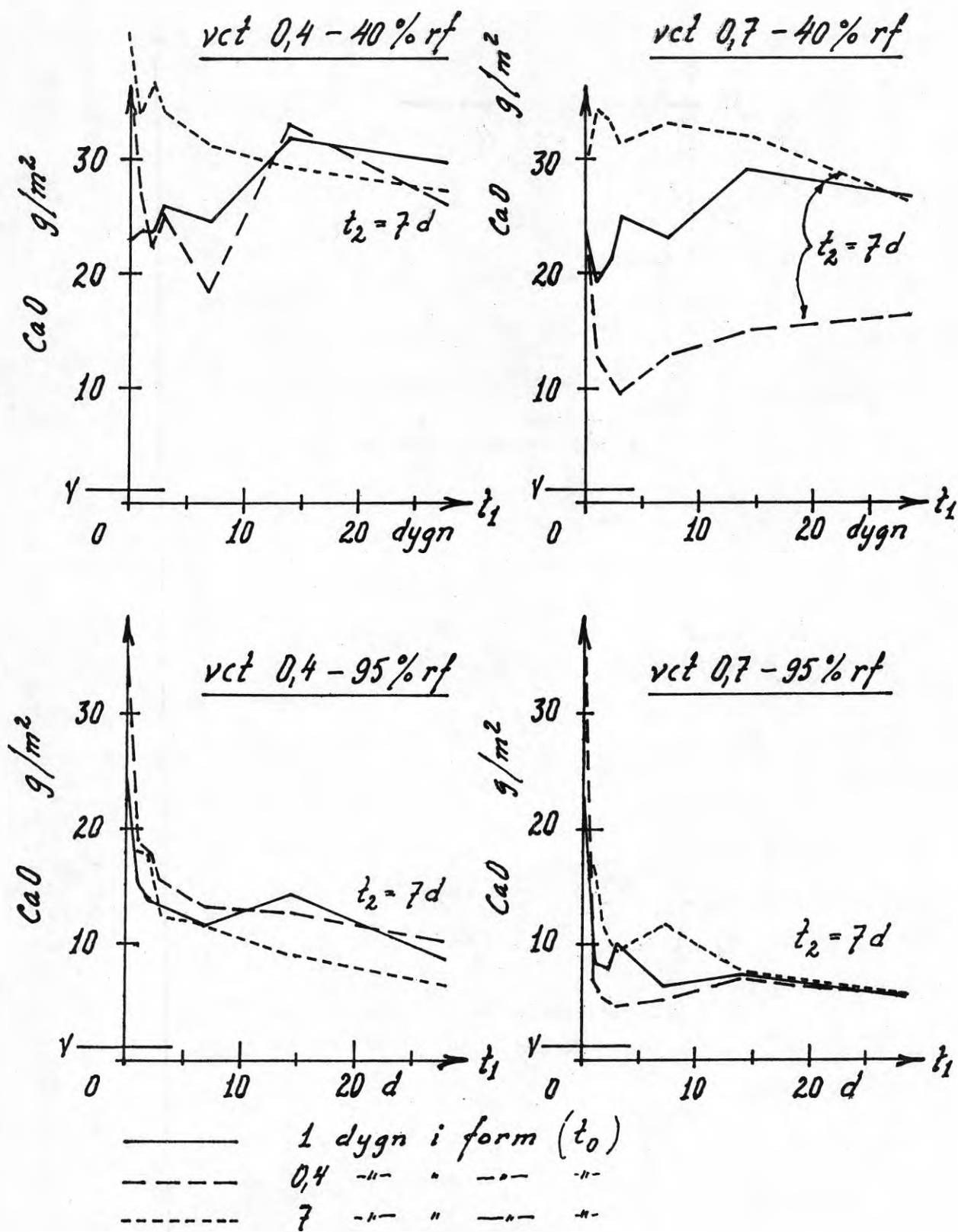


FIG. 29. Inverkan av härdningstid i form. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 20°C. Relativ fuktighet 40 och 95 %. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

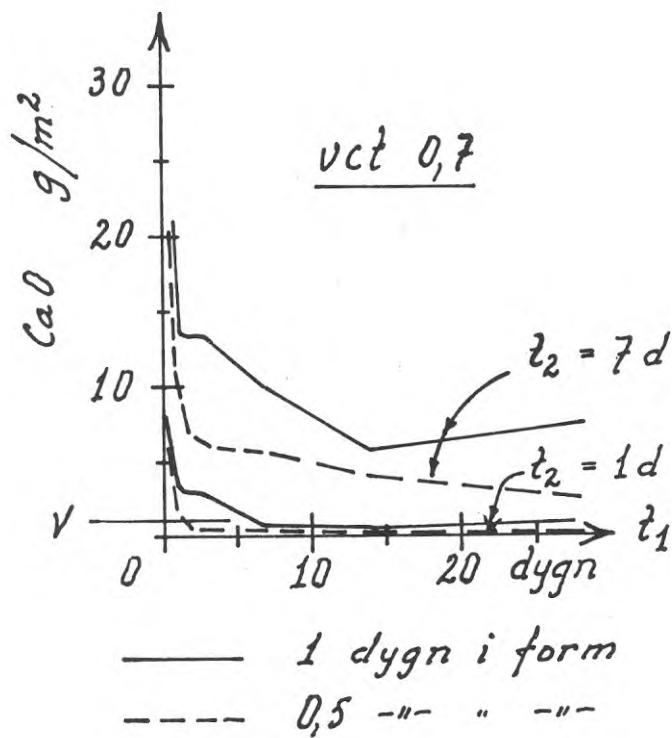
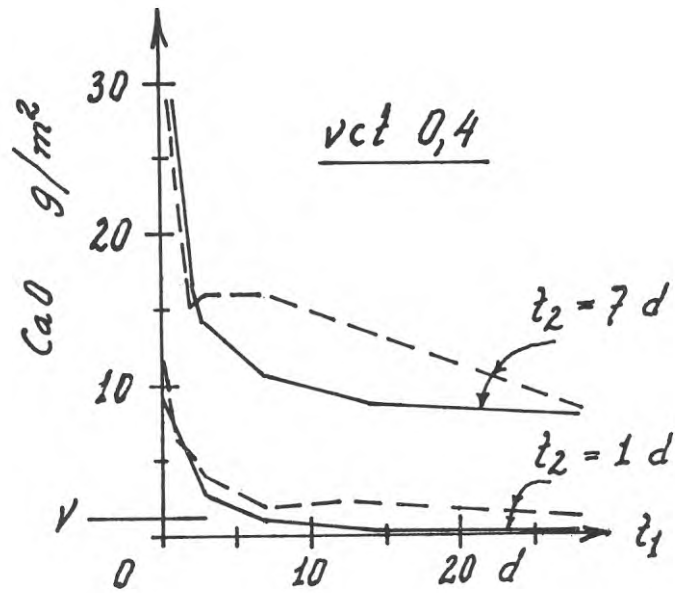


FIG. 30. Inverkan av härdningstid i form. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 5°C och 95 % rf. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

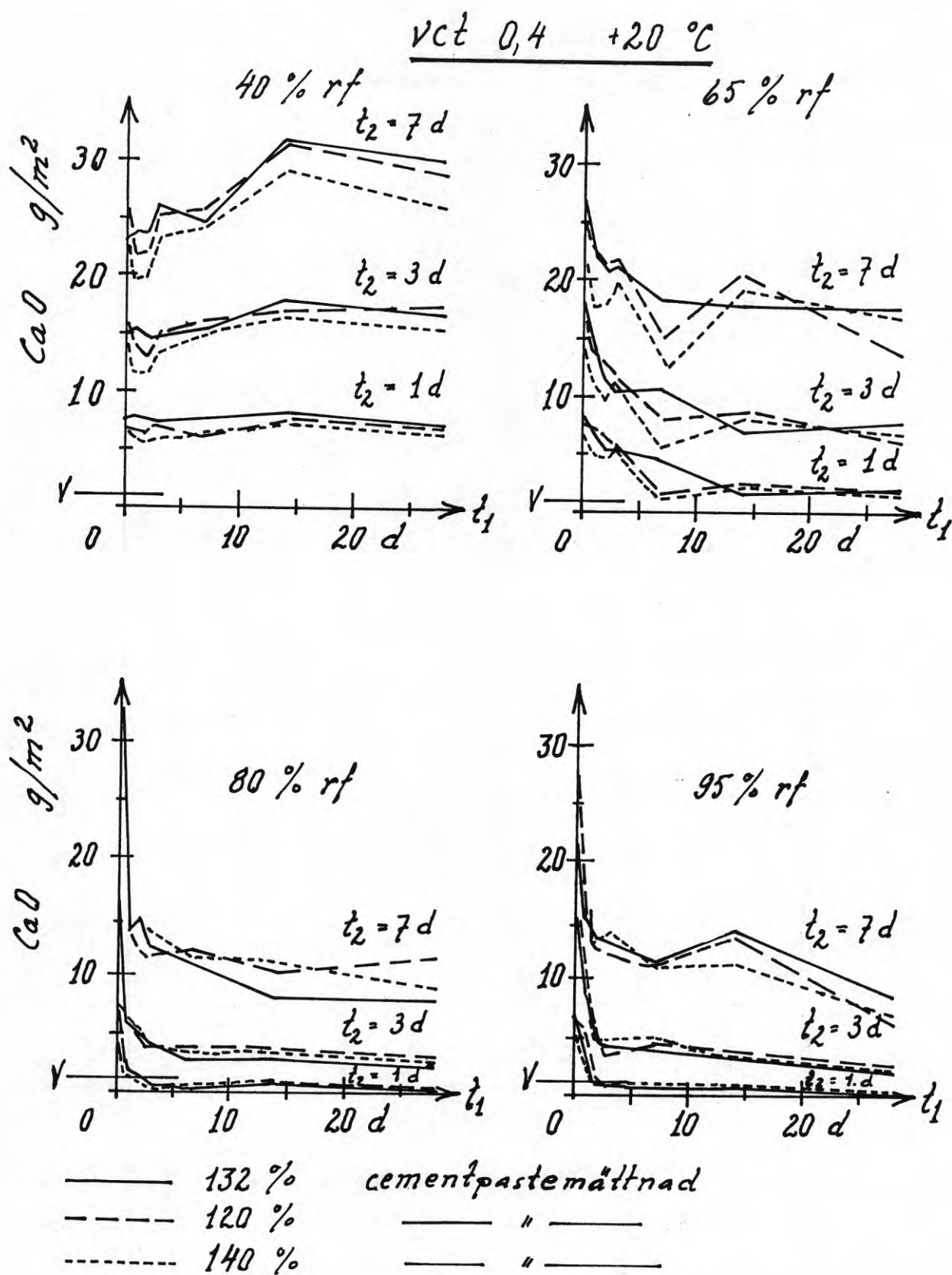
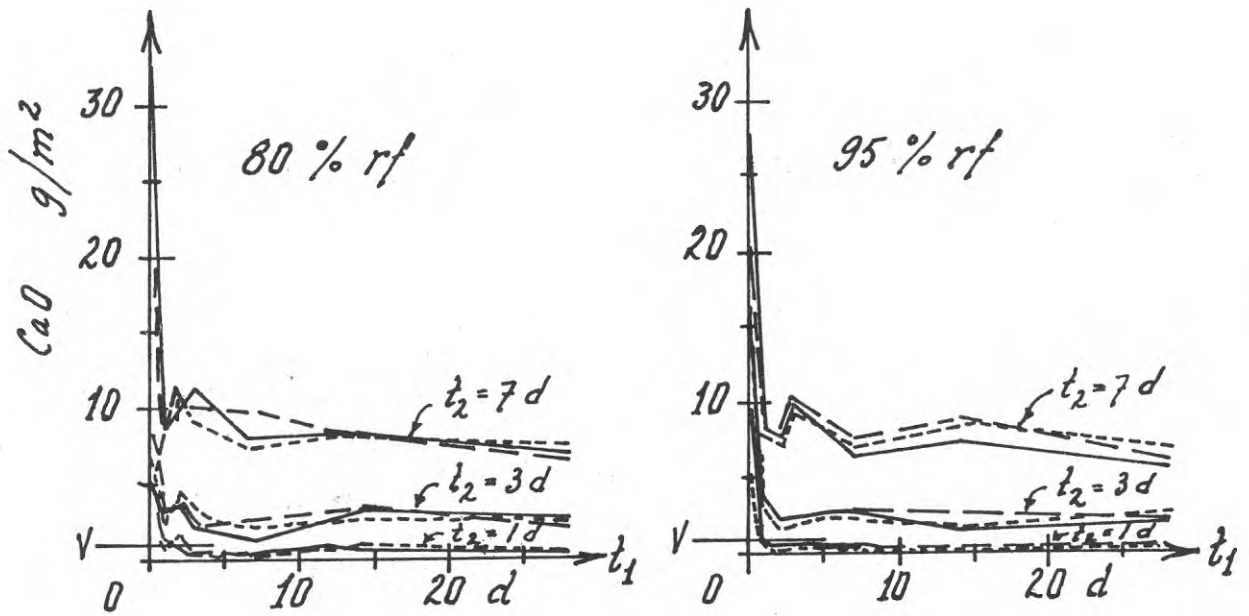
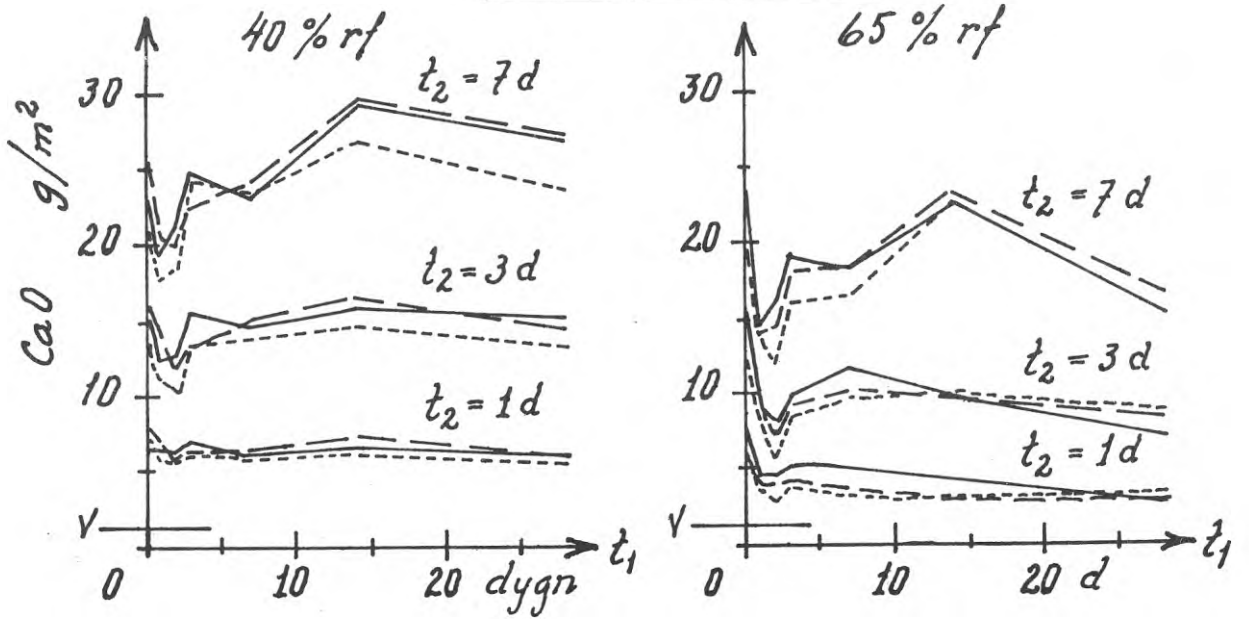


FIG. 31. Inverkan av ballastmängd. Urlakningsprov på betong med $vct\ 0,4$ vid olika cementpastemättnad. Härdningstemperatur $20^\circ C$. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

$vct\ 0,7\ +20\ ^\circ C$



—— 132 % cementpastemättnad

- - - 120 % " "

· · · 140 % " "

FIG. 32. Inverkan av ballastmängd, Urlakningsprov på betong med vct 0,7 vid olika cementpastemättnad. Härdningstemperatur 20°C. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

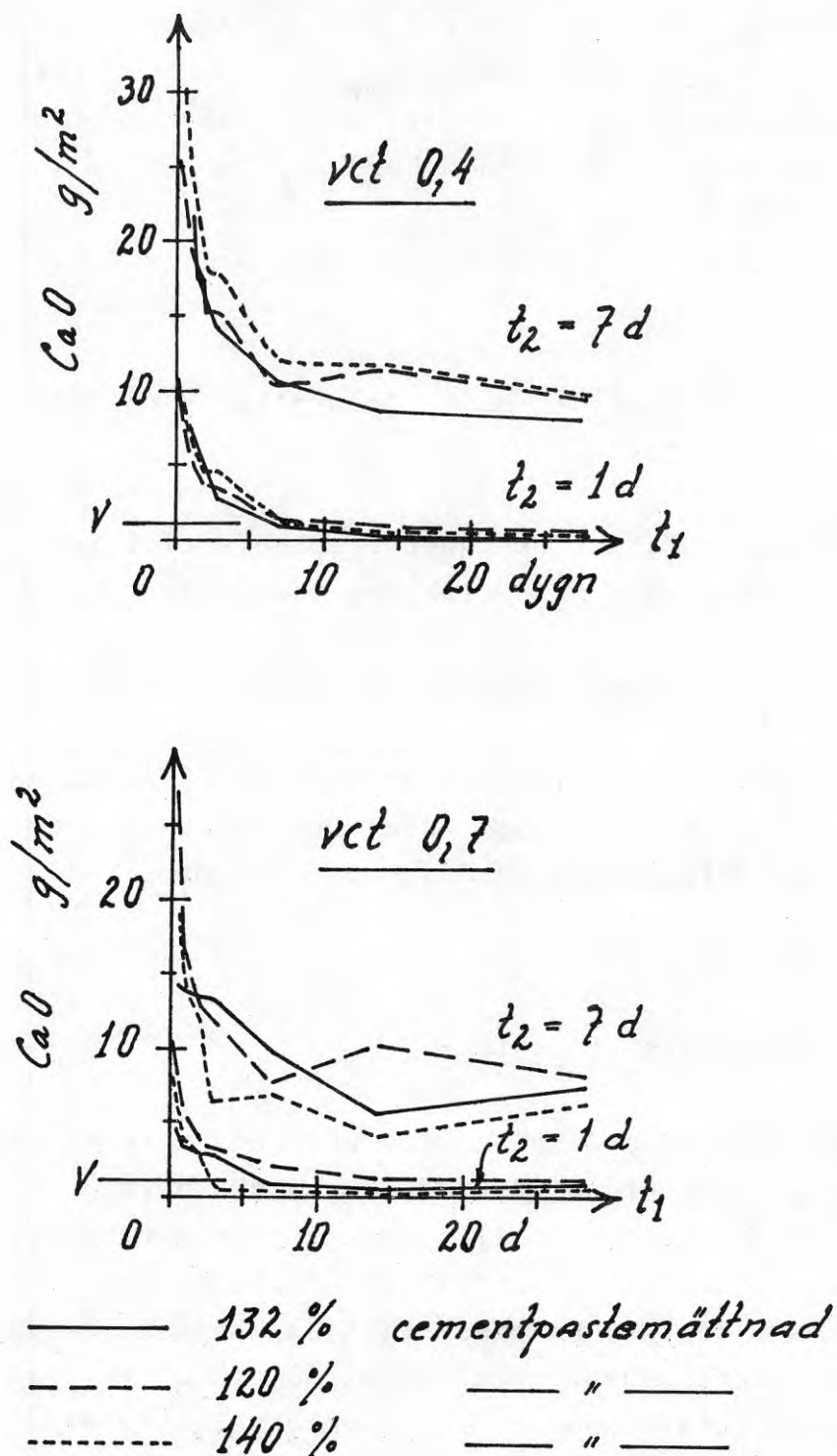


FIG. 33. Inverkan av ballastmängd. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7 vid olika cementpastemättnad. Härdningsklimat $5^{\circ}C$ och 95 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

Provkropparna för härdning i 5°C tillverkades i 20°C och förvarades i denna temperatur i 4 timmar efter gjutningen. Därefter placerades de i sitt klimatrum, där avformning och härdning skedde.

Urlakningsförsöken gav till resultat, enligt FIG. 31 - 33, att

ballastmängden hade ingen eller ringa inverkan på kalkurlakningen

hög relativ fuktighet i motsats till låg reducerade kalkurlakning väsentligt

vct 0.7 var märkbart gynnsammare än 0.4

Man konstaterar här liksom tidigare att kalkurlakningen var märkbart större under den första veckan efter avformningen vid härdning i 5°C jämfört med 20°C.

6.3.11 Betongens tjocklek

Både pölprov och urlakningsprov utfördes i regel på provkroppar som uttagits ur 35 mm tjocka betongplattor. Det var självfallet av intresse att undersöka om risken för kalkutfällning ändrades med betongens tjocklek. En orsak till skillnad kunde vara olika uttorkningshastighet, en annan olika temperaturfördelning till följd av ökad värmeutveckling vid grövre betongdimension.

Ovannämnda skäl föranledde jämförande urlakningsförsök på provkroppar med två olika tjocklekar enligt följande data.

Betongtjocklek:	35 och 125 mm
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	40 och 85 %
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn

Provkropparna med 35 mm tjocklek var dels gjutna samtidigt och ur samma betongsats som de tjockare, dels gjutna vid en annan tidpunkt.

Resultatet, även visat på FIG. 34, blev att

i stort var kalkurlakningen opåverkad av betongtjockleken

kalkurlakningen reducerades kraftigt vid ökning av relativa fuktigheten från 40 till 85 %

en ändring av vattencementtalet från 0.4 till 0.7 minskade kalkutfällningen tydligt men dock i begränsad omfattning

Några av kurvorna tyder på att liten tjocklek vore att föredra framför stor. Man observerar emellertid att kurvorna för de båda tjocklekarna ligger mycket nära varandra vid 1 dygns urlakning ($t_2 = 1$ d). Eftersom redan 10 timmars vattenbelastning är sällsynt i praktiken, behöver man knappast befara någon inverkan av betongtjockleken. Även om det tycks vara betingelserna vid själva betongytan som är utslagsgivande för kalkutfällningsrisken, kan man självfallet från de gjorda försöken inte extrapolera resultaten till vilka tjocklekar som helst.

6.3.12 Lång härdningstid

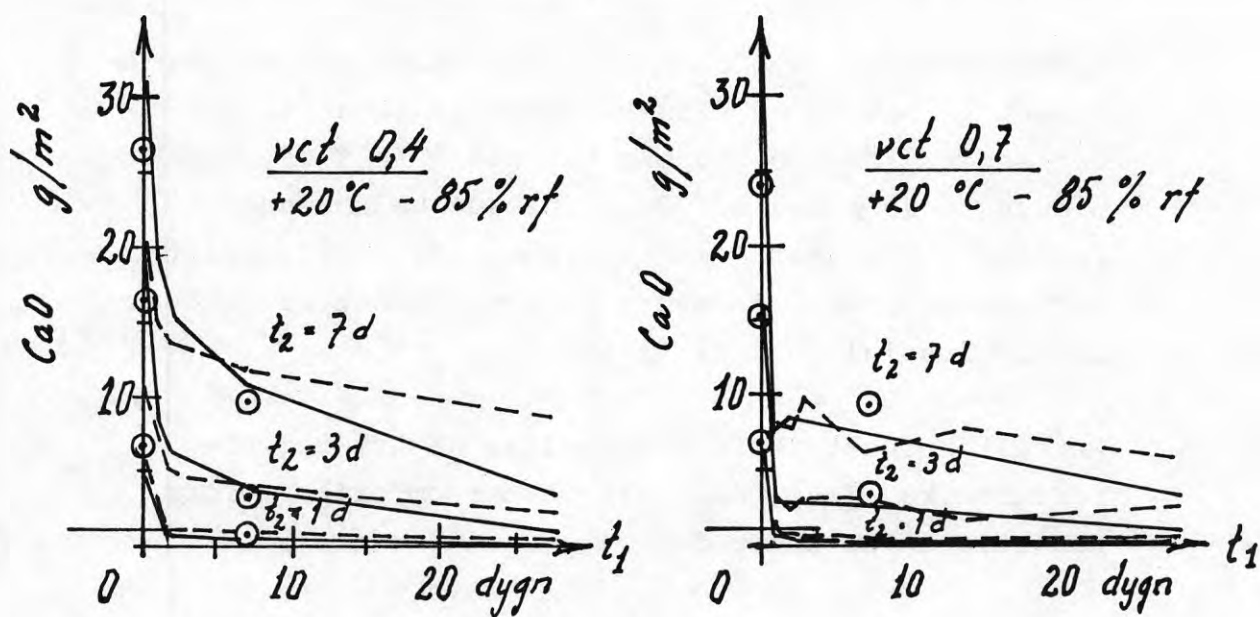
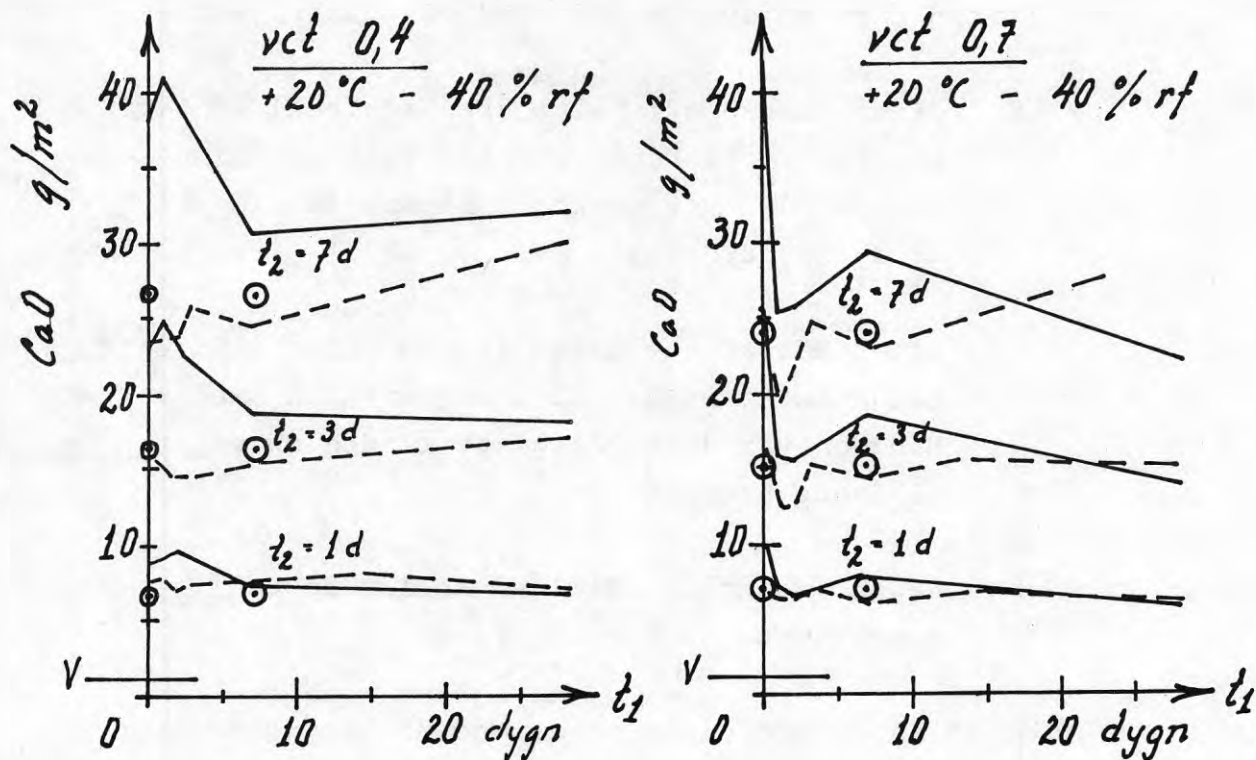
Av mera teoretiskt än praktiskt intresse utfördes en del urlakningsprov på betong, som härdats avsevärt längre än övriga provstycken. Avsikten med försöken var att utröna hur härdningstiden påverkade kalkurlakningen både vid gynnsam och ogynnsam lagring.

Följande försöksdata gällde.

Cementsort:	Slite Std Specialcement
Vattencementtal:	0,4 och 0,7
Temperatur:	20° C
Relativ fuktighet:	40 % och 95 %
Härdningstid i form:	$t_0 = 7$ dygn (Slite Std) $t_0 = 1$ dygn (Specialcement)
Härdningstid:	$t_1 = 170$ dygn
Urlakningstid:	$t_2 = 7$ dygn, $t_2 = 16$ och 60 tim

Med specialcement avses här Skövde Std, som till 20 % ersatts av aluminatcement och material med puzzolan-effekt.

Vid $t_2 = 16$ tim och $t_2 = 60$ tim skedde tätare vattenbyten och analyser än vid proven i övrigt. Detta skedde för att studera skeendet i urlakningens början.



————— 125 mm tjock
 - - - - - 35 - - - - från annan betongsats än 125-proven
 ⊙ 35 - - - - från samma betongsats som 125-proven.

FIG. 34. Inverkan av betongens tjocklek. Urlakningsprov på betong av vct 0.4 och 0.7, härdad i 40 och 85 % rf vid $20^\circ C$. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

Resultaten framgår av FIG. 35 - 37 och visar, att

efter nästan ett halvt års lagring i 40 % rf
erhölls fortfarande en stor kalkurlakning,
även om den var märkbart mindre än vid
28 dygns härdning

efter nästan ett halvt års härdning i 95 % rf
kunde fortfarande urlakning av kalk ske.
Mängden var dock påtagligt mindre än efter
28 dygns härdning

någon väsentlig skillnad mellan de två
cementsorterna förelåg inte.

I FIG. 35 kan jämförelser göras med urlakningen efter
28 dygns härdning på provkroppar med standardcement.

Specialcementet uppförde sig i huvudsak som standard-
cementet. Det förra fick märkbart lägre urlakning än
det senare för provkroppar härdade i 40 % rf. Minsk-
ningen torde svara mot den minskade kalkmängden i
cementet. För att få en avgörande förbättring måste
dock avsevärt större mängd portlandcement ersättas med
annat material (Blümel, 1962).

En helt korrekt jämförelse mellan de två cement-
sorterna kan inte göras här, eftersom olika avform-
ningstid använts för dem.

Detaljstudier av urlakningens första skede finns på
FIG. 36 - 37. Speciellt noterar man på tre av de fyra
kurvorna i FIG. 37 en snabb om än liten urlakning
under den första halvtimmen. Det tycks som om det
funnits en viss mängd kalciumhydroxid i själva yt-
skiktet, som inte kunnat karbonatisera förrän det
blev tillgång till fritt vatten.

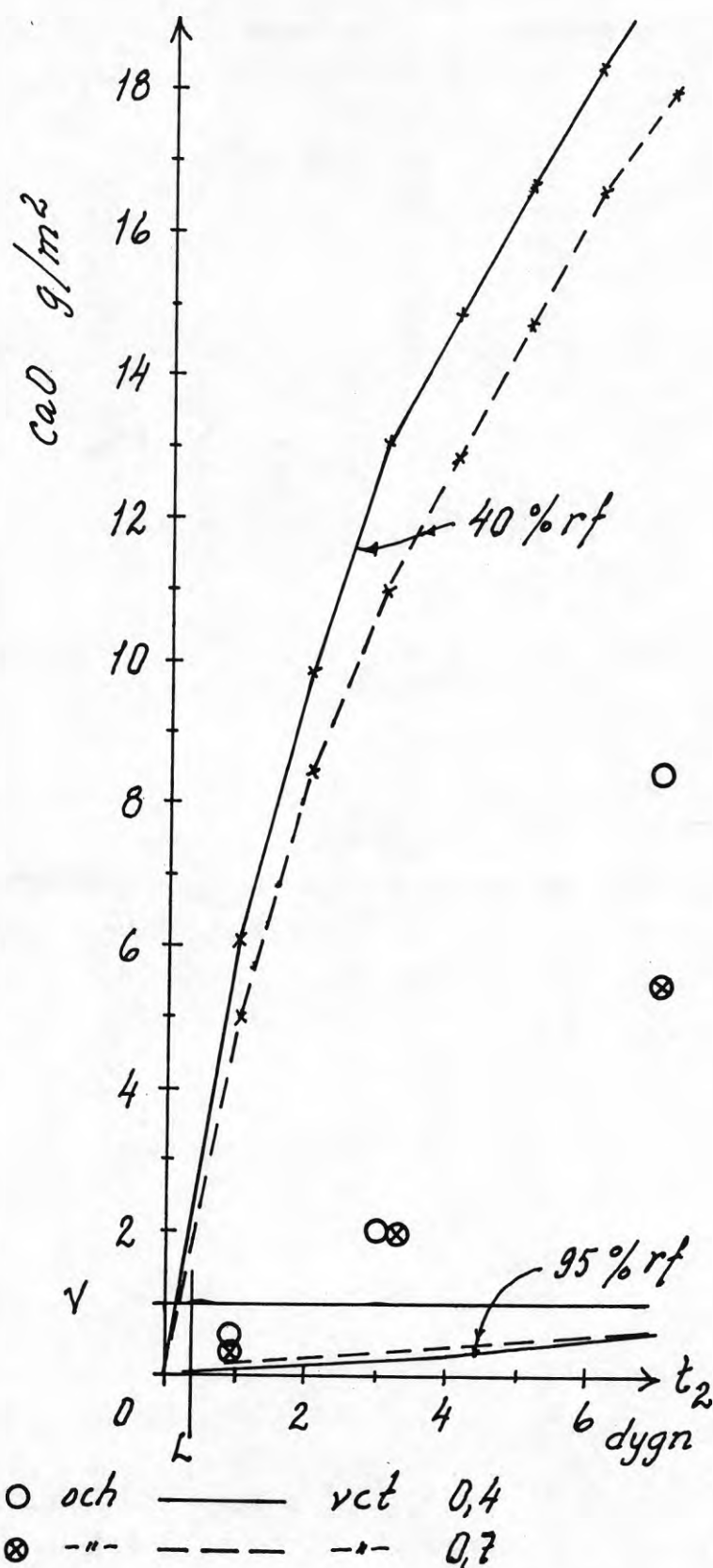


FIG. 35. Urlakningsprov på betong härdad i $t_1 = 170$ dygn. Avformningstid $t_0 = 7$ dygn. Urlakningstid t_2 dygn. Slite Std. 20°C . Ringarna visar urlakningsprov på likadana betong efter härdningstiden $t_1 = 28$ dygn i 95 % rf.

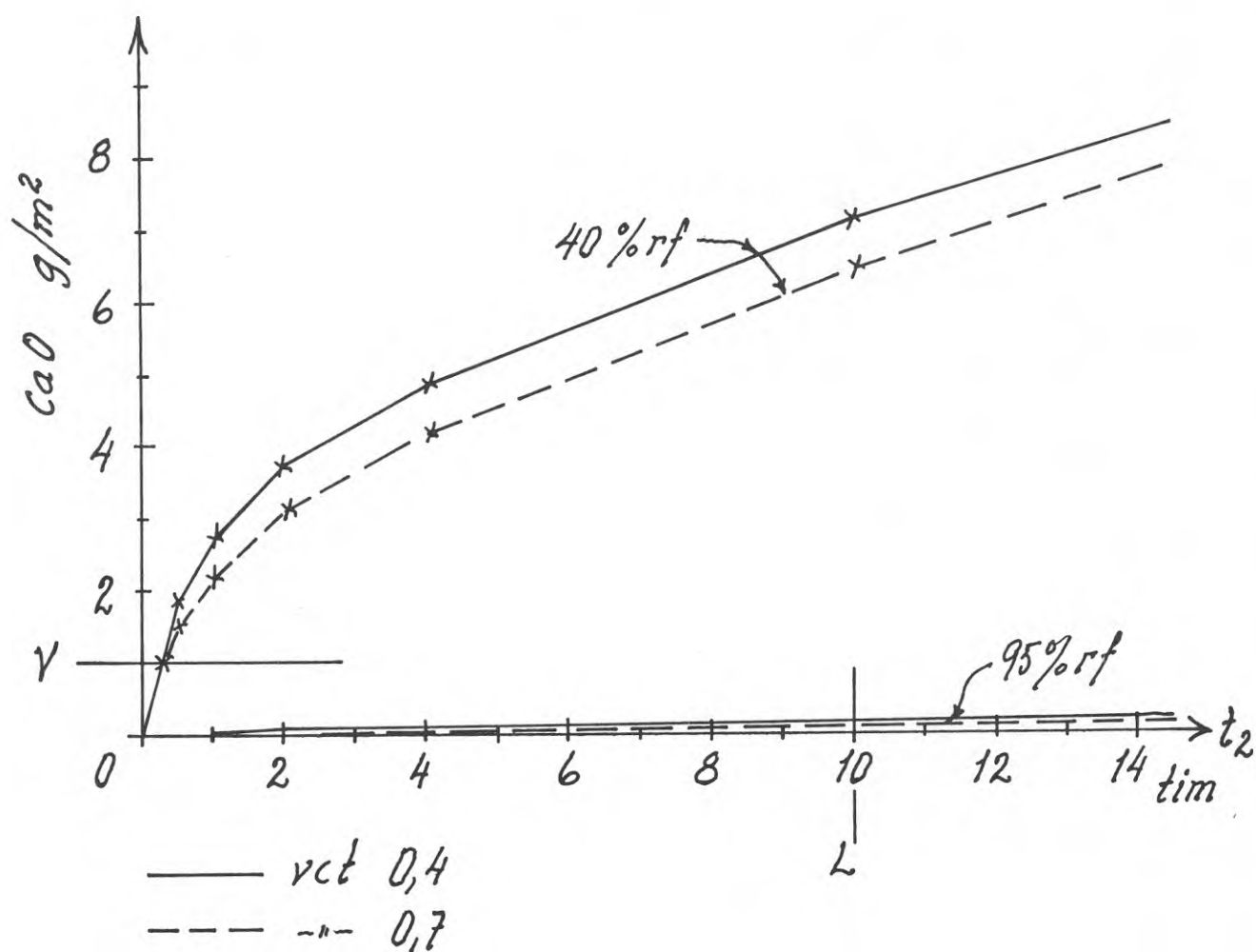


FIG. 36. Urlakningsprov på betong härdad i $t_1 = 170$ dygn. Avformningstid $t_0 = 7$ dygn, Urlakningstid t_2 dygn. Slite Std. $20^\circ C$, Täta vattenbyten i urlakningens början, se kurvornas brytpunkter.

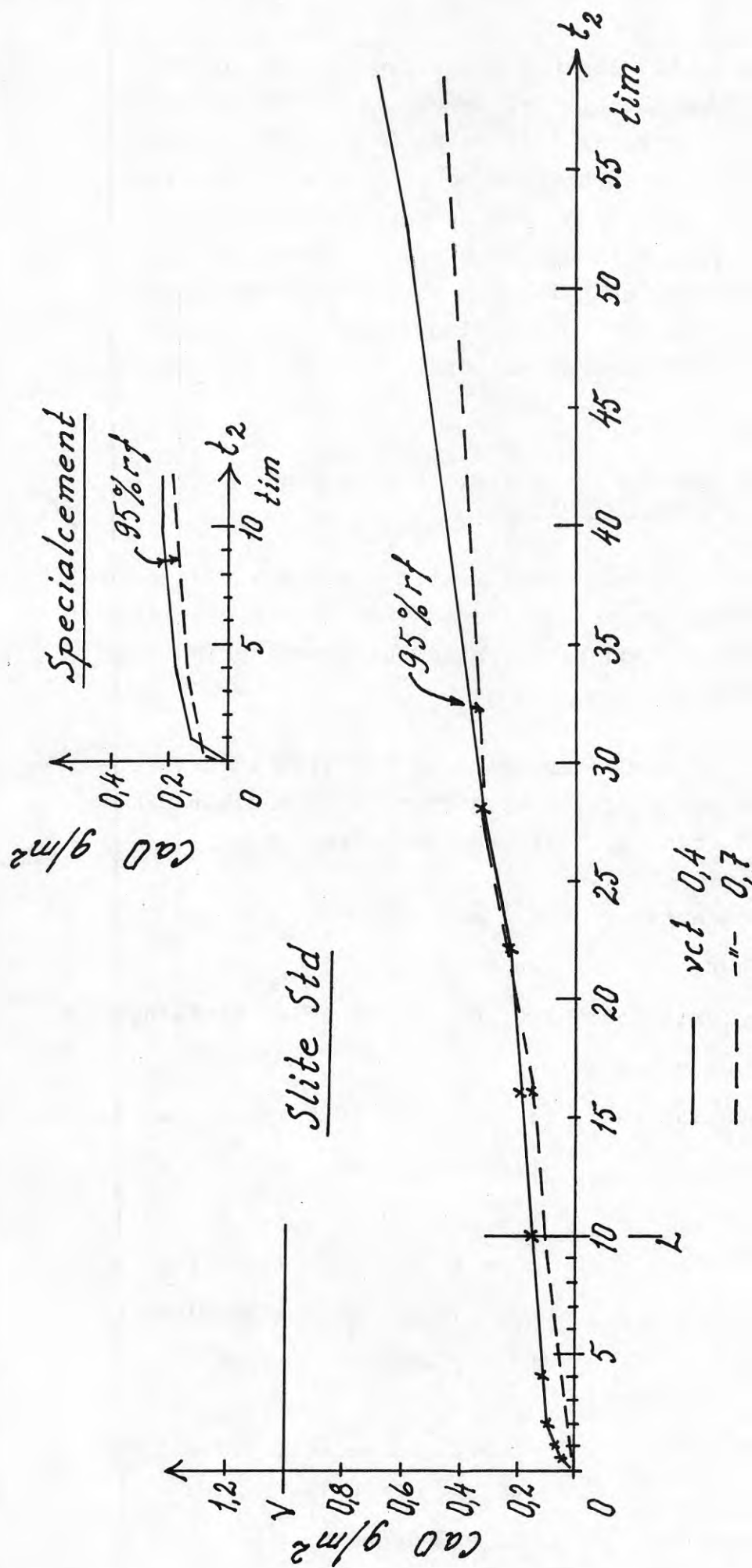


FIG. 37. Detalj av kurvorna för 95 % rf i FIG. 36.
 Det övre, mindre diagrammet visar motsvarande kurvor
 för ett specialcement.

Kurvorna i FIG. 35 - 37 avser provstycken ur samma betong (cementbruk). Det är värt att notera större kalkurlakning på FIG. 35 än på FIG. 36. Förklaringen är de tätare vattenbytena och tillhörande analyser som ligger till grund för kurvorna i den förra figuren. Speciellt ger de utslag, när stora kalkmängder är tillgängliga. De täta bytena ger lägre kalkkoncentration i urlakningsvattnet och därmed snabbare diffusion av kalk från betongen till detta.

6.3.13 Ändring av relativa fuktigheten under härdning

Av teoretiskt, men framför allt praktiskt, intresse är frågan om en uttorkning före härdning i hög relativ fuktighet fördröjer en gynnsam karbonatisering, och i vilken grad.

Försök gjordes därför dels med härdning i torr luft följt av härdning i fuktig luft, dels med härdning i omvänd ordning. Villkoren för försöken var

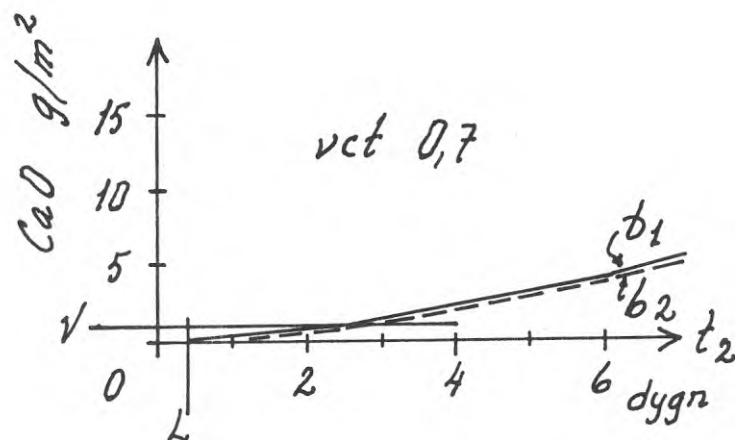
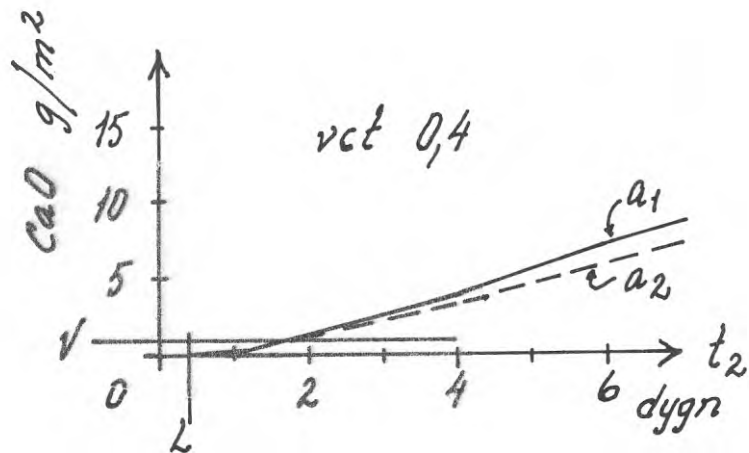
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	40, 85 och 95 % (se härdningstid)
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 3$ d i 40 % + 3 d i 95 % $t_1 = 3$ d i 95 % + 3 d i 40 % $t_1 = 28$ d i 40 % + 1 d i 85 % $t_1 = 1$ d i 85 % + 28d i 40 % $t_1 = 28$ d i 40 % + 7 d i 85 % $t_1 = 7$ d i 85 % + 28d i 40 %
	(För varje t_1 ovan fanns en provkropp med vct 0.4 och en med vct 0.7)
Urlakningstid:	$t_2 = 7$ dygn

Resultaten, i grafisk form på FIG 38-40, visar att

härddning i torr luft före härddning i fuktig luft ger större kalkurlakning än omvänd härddningsföljd. Skillnaden är dock begränsad, speciellt om inte tiden i torr luft är alltför lång och påföljande period i fuktig luft kort.

provkroppar förvarade i ogynnsamt klimat, dvs torr luft, kan göras resistenta mot kalkurlakning genom fortsatt härddning i fuktig luft.

Försöken visar alltså, att en betongtillverkare ej nödvändigtvis måste sätta in en ur kalkutfällningssynpunkt lämplig härddning omedelbart efter tillverkningen. I stället kan tidpunkten anpassas i viss utsträckning. Det är dock nödvändigt att förhindra att fritt vatten blir stående på betongen före och under härddningen i fuktig luft.



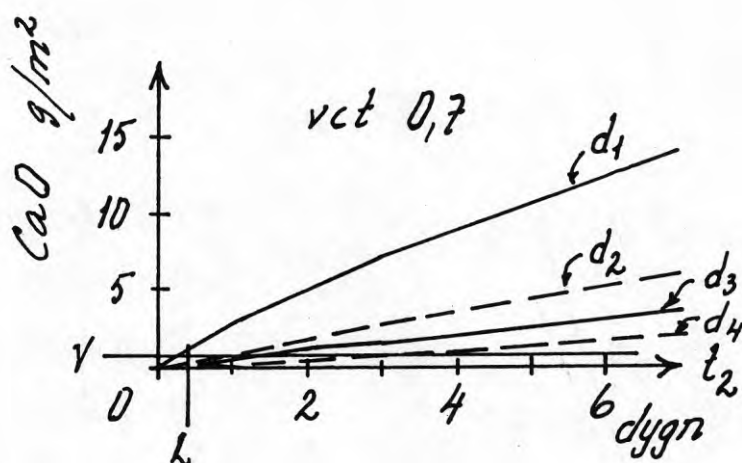
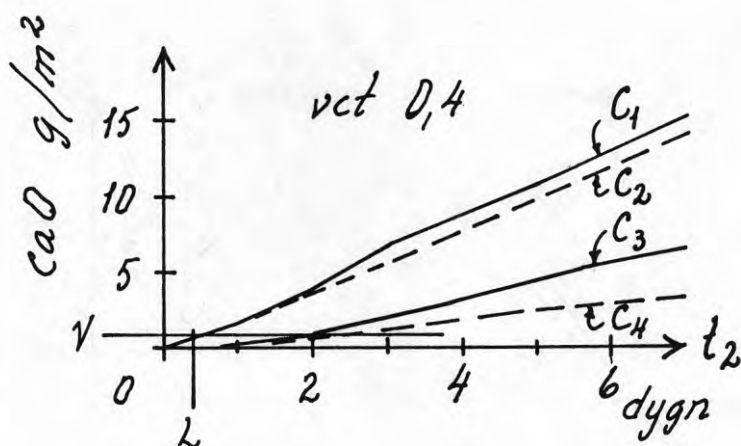
a_1 och b_1 : $t_1 = 3d$ i 40% + 3d i 95% rf

a_2 och b_2 : $t_1 = 3d$ i 95% + 3d i 40% rf

———— = härdningen började i torr luft

----- = " " " i fuktig "

FIG. 38. Inverkan på kalkurlakningen av härdning i torr luft före härdning i fuktig luft jämförd med härdning i omvänd ordning. Temperatur 20°C . Avformning efter $t_0 = 1$ dygn.



C_1 och $d_1: t_1 = 28 \text{ d i } 40\% + 1 \text{ d i } 85\% \text{ rf}$

C_2 " $d_2: t_1 = 1 \text{ d i } 85\% + 28 \text{ d i } 40\% \text{ rf}$

C_3 " $d_3: t_1 = 28 \text{ d i } 40\% + 7 \text{ d i } 85\% \text{ rf}$

C_4 " $d_4: t_1 = 7 \text{ d i } 85\% + 28 \text{ d i } 40\% \text{ rf}$

————— härdningen började i torr luft

----- " " " fuktig " "

FIG. 39. Inverkan på kalkurlakningen av härdning i torr luft före härdning i fuktig luft jämförd med härdning i omvänd ordning. Temperatur 20°C . Avformning efter $t_0 = 1$ dygn.

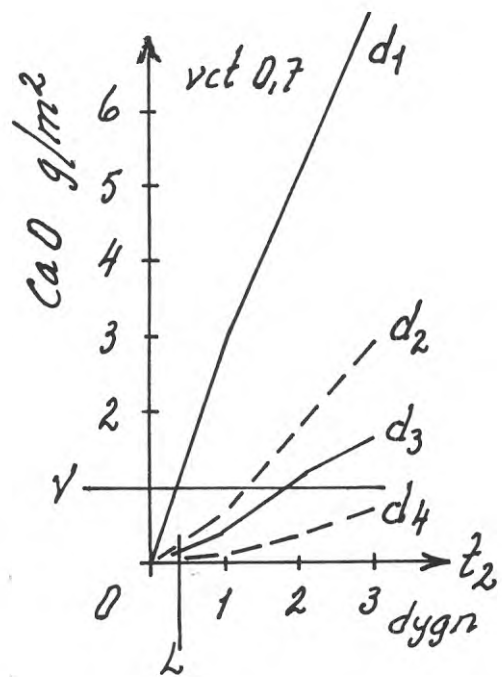
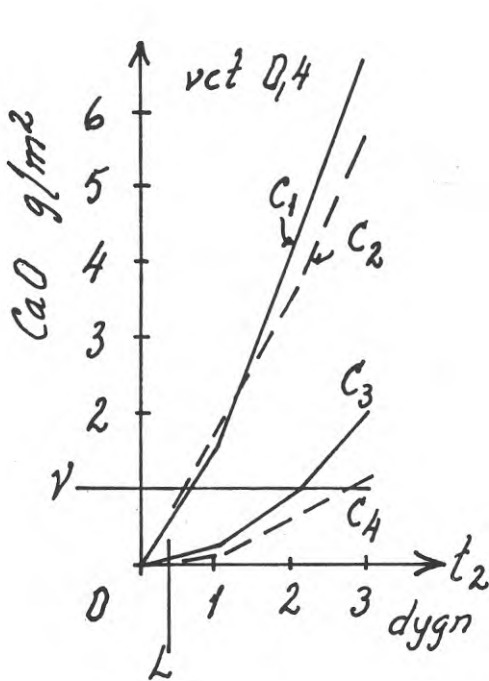
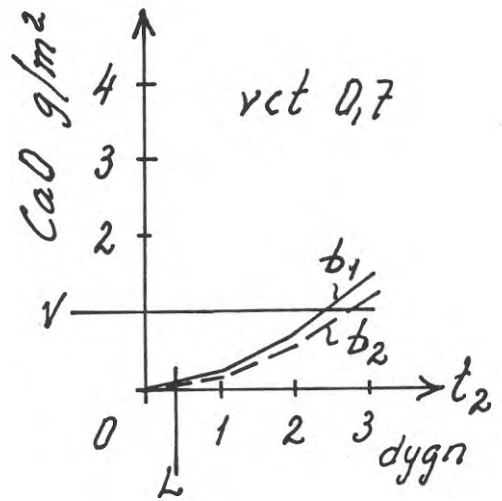
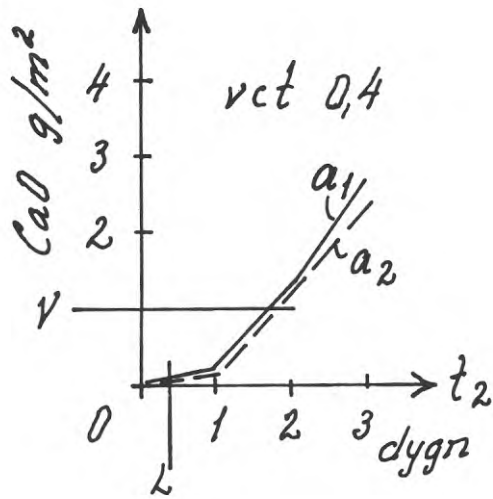


FIG. 40. Detaljbilder av kurvorna på FIG, 38-39.

a_1 , a_2 , b_1 etc enligt dessa figurer.

6.3.14 Sammanfattning av urlakningsförsök

Urlakningsförsöken bekräftar i huvudsak resultaten från pölproven och färgmätningarna sid 53 och 95. Vissa undantag och tillägg görs dock nedan.

Låg temperatur fördröjer avsevärt uppbyggnaden av ett skyddsskikt. Försöken tyder på en fördröjning av 1-2 veckor om temperaturen sänks från 20° till 5° C. Det förklarar helt eller delvis varför kalkutfällning är ett större problem under vinterhalvåret än sommarhalvåret.

Urlakningsförsöken visar, att det är lättare att skydda en betong med vct 0,7 än vct 0,4 mot kalkutfällning. Däremot tyder de ej på att vct 0,5 och 0,6 skulle vara likvärdiga med vct 0,7 som färgmätningarna indikerar.

Betongens tjocklek syns spela en underordnad roll. Viss reservation måste - utan stöd av försök - göras vid grova konstruktioner med stor värmetuveckling.

Vid lång tids härdning (ett halvt år) minskar kalkurlakningen efter hand. Den är emellertid fortfarande stor vid härdning i torrt klimat. Är relativa fuktigheten hög blir urlakningen mycket liten, men ej helt eliminerad.

Betong som förvaras i ogynnsamt klimat, dvs torr luft, kan relativt fort ges ökad resistens mot kalkurlakning genom fortsatt härdning i fuktig luft.

6.4 METODER OCH MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING

Projektarbetet hade både kvalitativt och kvantitativt genom pölproven respektive urlakningsproven givit en ganska klar bild av olika faktorerers inverkan på risken för kalkutfällning. Det syntes då naturligt att gå vidare och undersöka om man genom olika åtgärder kunde accelerera uppkomsten av ett skyddande karbonatskikt eller på annat sätt ge ytan effektivt skydd mot kalkutfällning.

Försöken delades i huvudsak upp i två grupper. I den ena, 6.4.1-6.4.2, studerades effekten av metoder för accelererad karbonatisering, t ex värmehärdning. I den andra, 6.4.3-6.4.7, undersöktes inverkan av kemiska behandlingsmedel. Effekten av dessa metoder och behandlingsmedel kontrollerades genom urlakningsprov enligt 6.3.

6.4.1 Värmehärdning

Undersökningen i 6.3.7 Temperatur visade, att en ökning av temperaturen innebar en accelererad uppbyggnad av skyddet mot kalkutfällning. En osökt fråga blev då, om man genom ytterligare förhöjd temperatur skulle få ett skyddande karbonatskikt ännu snabbare.

Försök med förhöjd temperatur genomfördes med följande förutsättningar:

Temperatur:	20° och 60°C
Relativ fuktighet:	65 och 80 %
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Härdningstid:	$t_1 = 0, 3$ och 6 timmar
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn

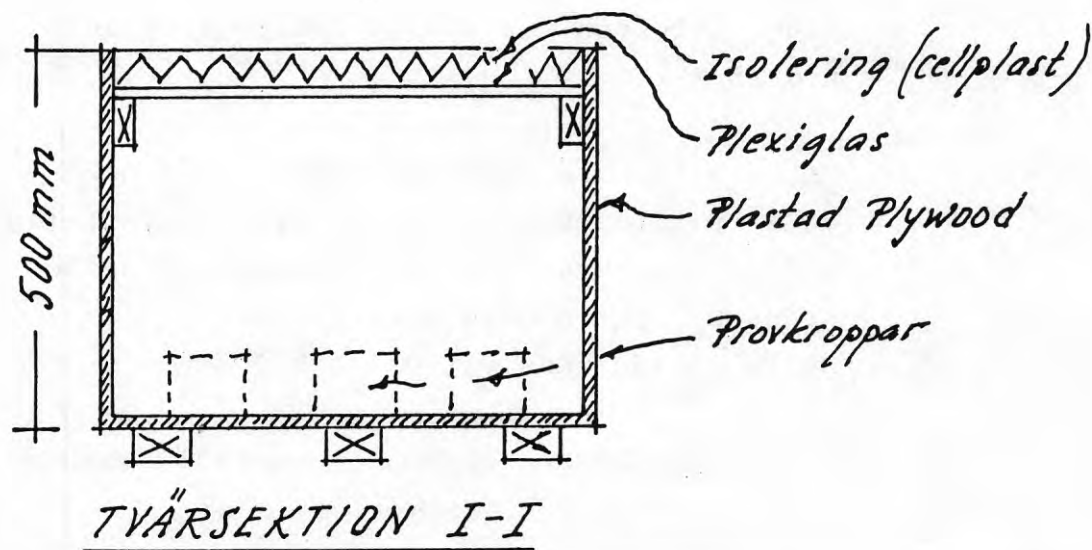
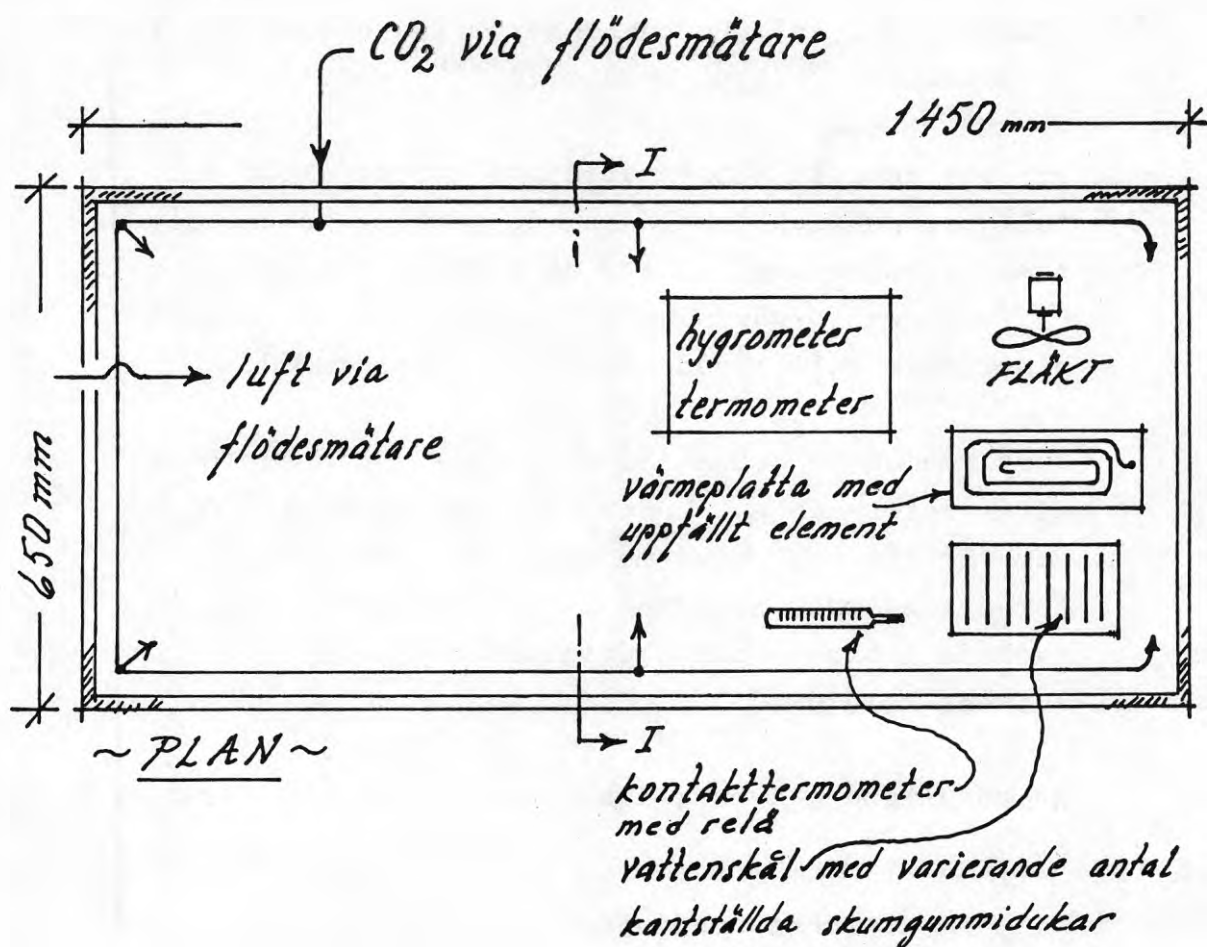


FIG. 41. Klimatlåda, där luftens temperatur, relativa fuktighet och koldioxidhalt kan regleras och hållas konstanta.

Värmehärdningen utfördes i en klimatlåda enligt FIG. 41, sid 141. Luftgenomströmning var ordnad för att undvika brist på koldioxid i luften.

För att inte få kondensation på provstyckena vid inläggningen i klimatlådan, förvärmades de en halv timme i värmeskåp, så att de fick en temperatur av 70°C. Under förvärmning var provkropparna inlagda i plastfolie till skydd mot luftens koldioxid.

Förvärmning och värmehärdning ägde rum omedelbart efter avformningen. Under den tid (ungefär 1 dygn) som förflöt mellan värmehärdning och urlakning, förvarades provkropparna i rumstemperatur väl inpackade i plast- och aluminiumfolie till skydd mot luftens koldioxid.

Av resultaten, även illustrerade i FIG. 42, framgår att

temperaturhöjningen från 20° till 60°C innebar en tydlig reducering av kalkurlakning. Effekten var större vid 80 % rf än vid 65 % rf.

Efter 6 timmars värmehärdning i 60°C och 80 % rf tålde betongytan en vattenbelastning i 10 timmar utan att kalkurlakningen nådde gränsen V för synlig utfällning. Detta gällde både vct 0.4 och 0.7.

Värmehärdning framstår som en möjlig behandlingsmetod eller som en del därav.

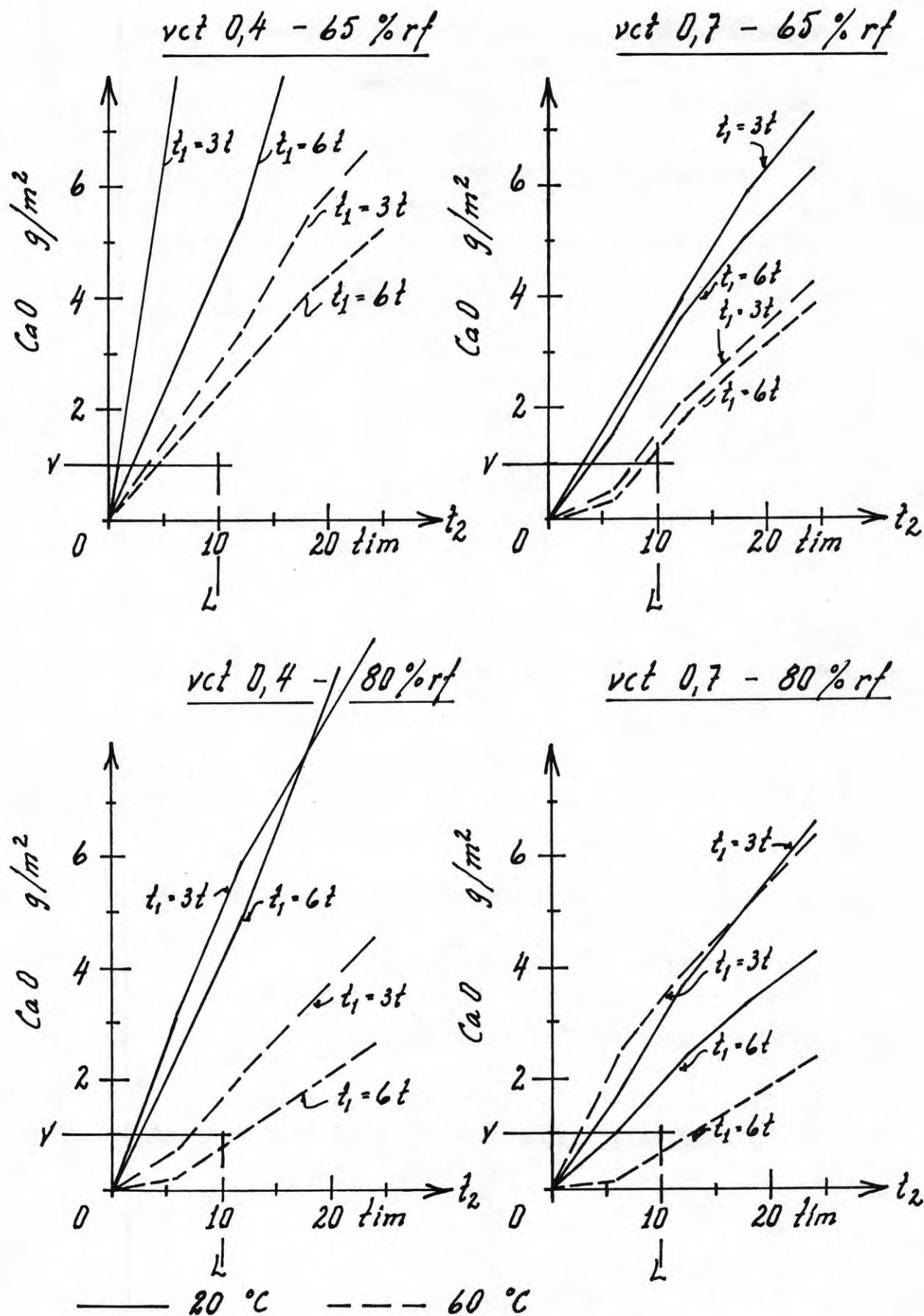


FIG. 42. Inverkan av värmehärdning. Urlakningsprov på betong med vct 0,4 och 0,7 i 65 och 80 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 timmar. Urlakningstid t_2 timmar.

6.4.2 Ökad koldioxidhalt

Tillgång på koldioxid är en av förutsättningarna för uppkomsten av ett skyddande karbonatskikt i betongytan. Om den vore en begränsande faktor för karbonatiseringen, skulle denna kunna påskyndas genom att på konstgjord väg öka luftens innehåll av koldioxid, som utgör 0,03 volymprocent.

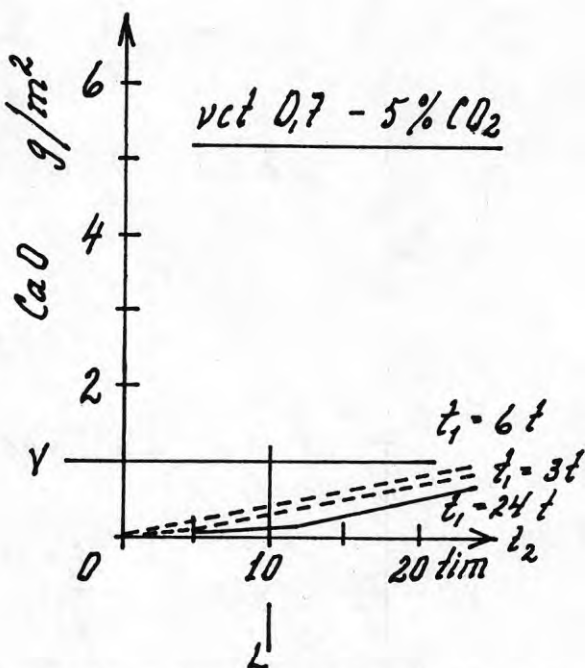
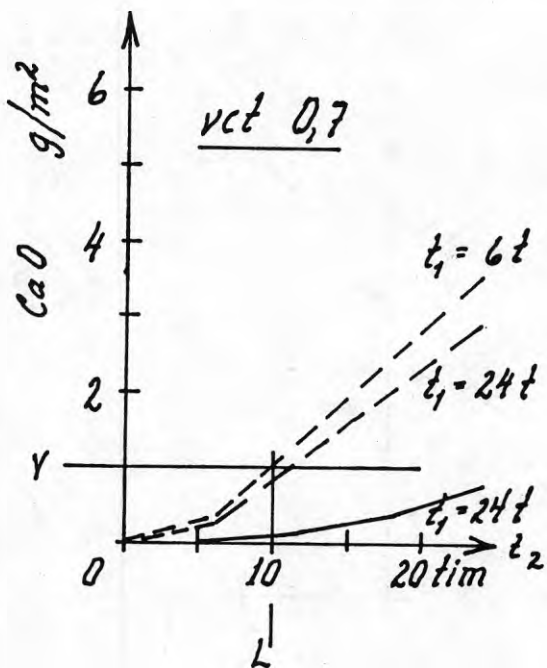
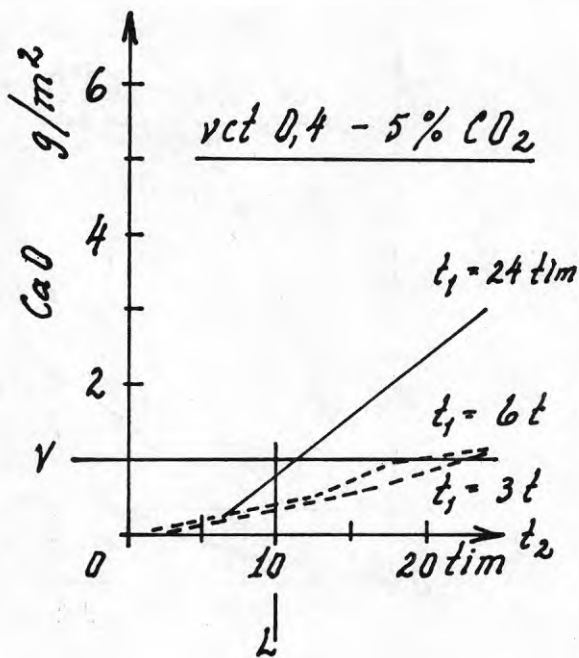
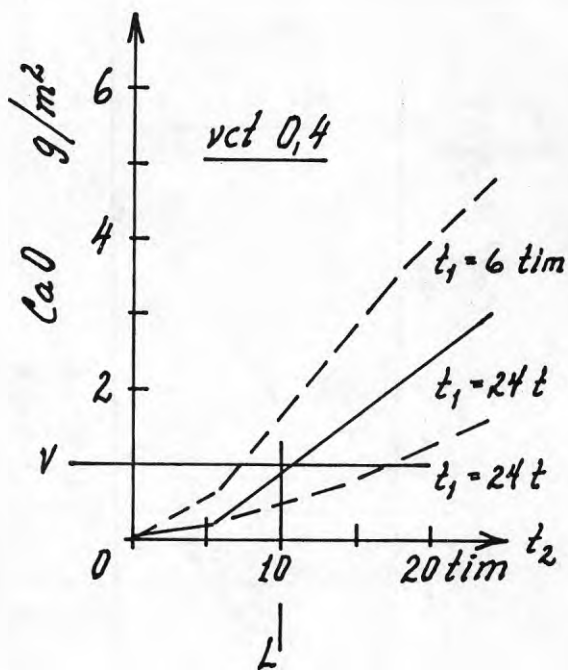
För att undersöka inverkan av en ökad koldioxidhalt genomfördes försök med följande variabler.

Koldioxidhalt:	0,03 (vanlig luft), 5 och 10 volymprocent
Relativ fuktighet:	65 och 80 %
Temperatur:	20 ^o och 60 ^o C
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn
Härddningstid:	$t_1 = 0.2, 0.5, 1.5, 3, 6$ och 24 timmar

Hur variablerna var kombinerade framgår av FIG. 43-45.

Förvärmning av provkroppar vid försök i 60^oC och förvaring mellan koldioxidbehandling och urlakning skedde, som angetts i 6.4.1 på sid. 142.

Koldioxidbehandlingen ägde rum i en klimatlåda enligt FIG. 41, vilken tillät reglering av koldioxidhalt, temperatur och relativ fuktighet.



— hårdning 20°C/80%rf utan extra koldioxid
 - - - - - " 60°C/80%rf " " " "
 - - - - - " 60°C/80%rf med 5% koldioxid

FIG. 43. Inverkan av värmehärdning med och utan extra koldioxid, CO₂. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7. Avformningstid t₀ = 1 dygn. Härdningstid t₁ timmar. Urlakningstid t₂ timmar.

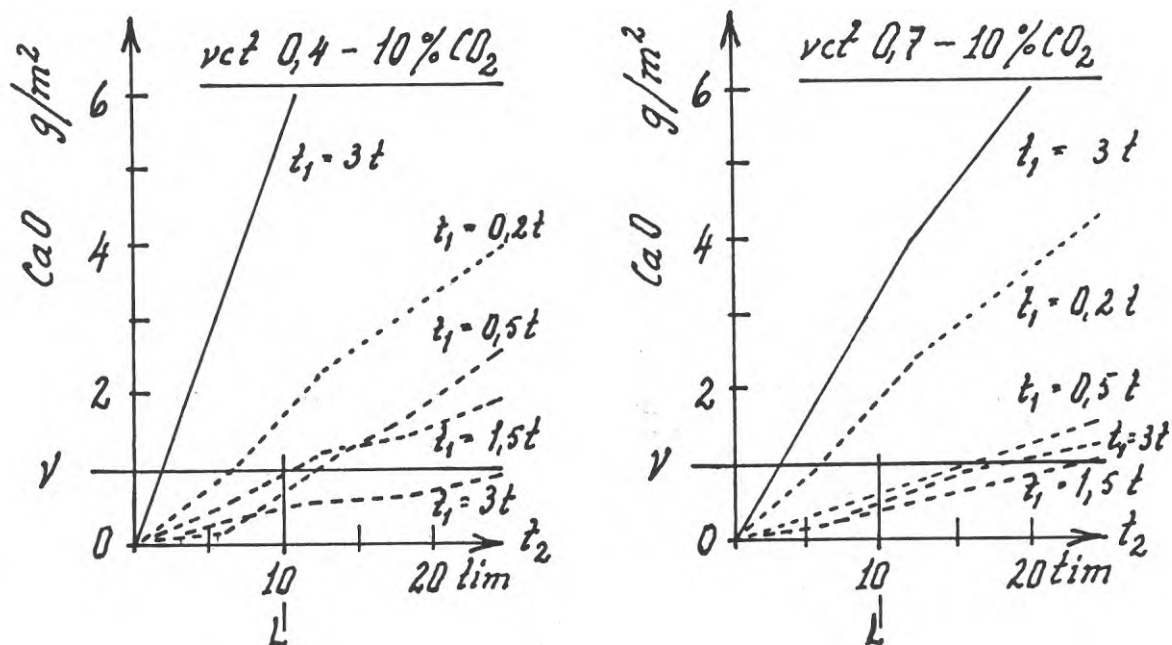
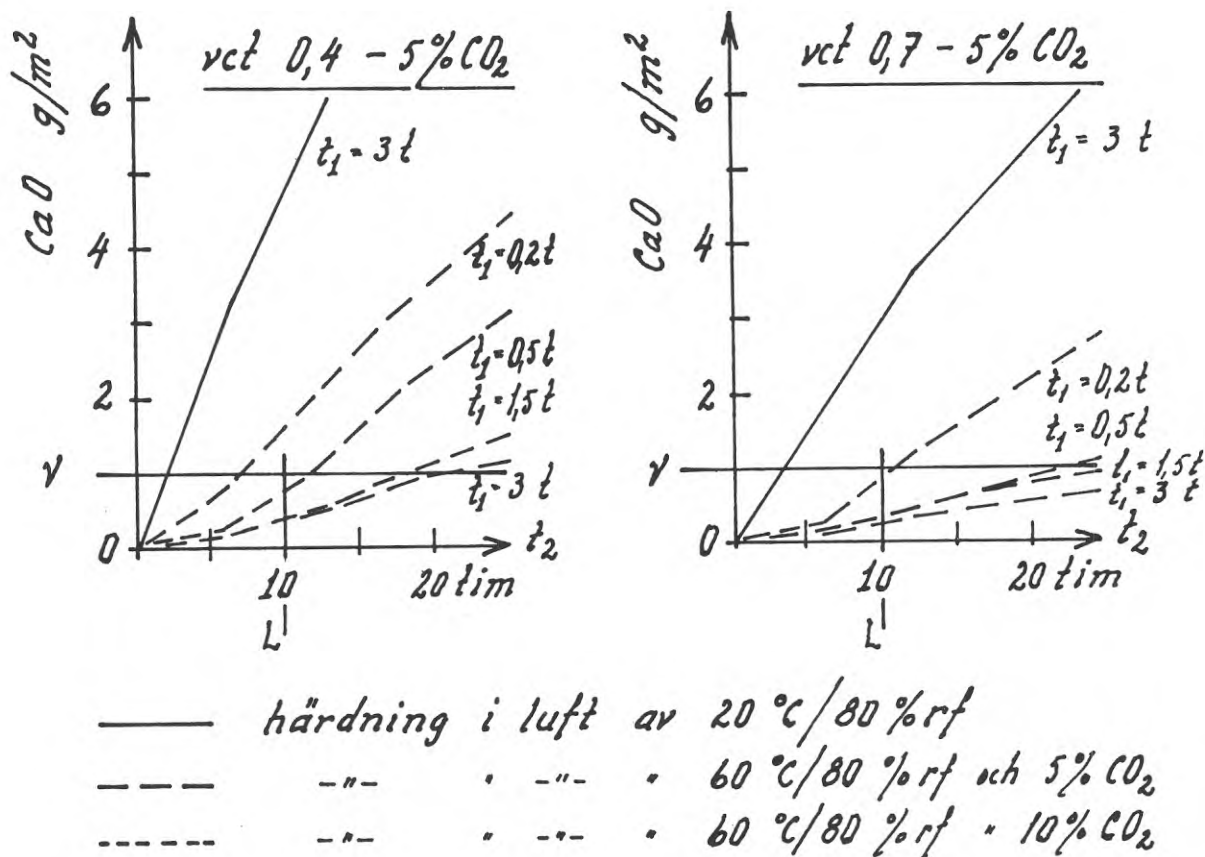
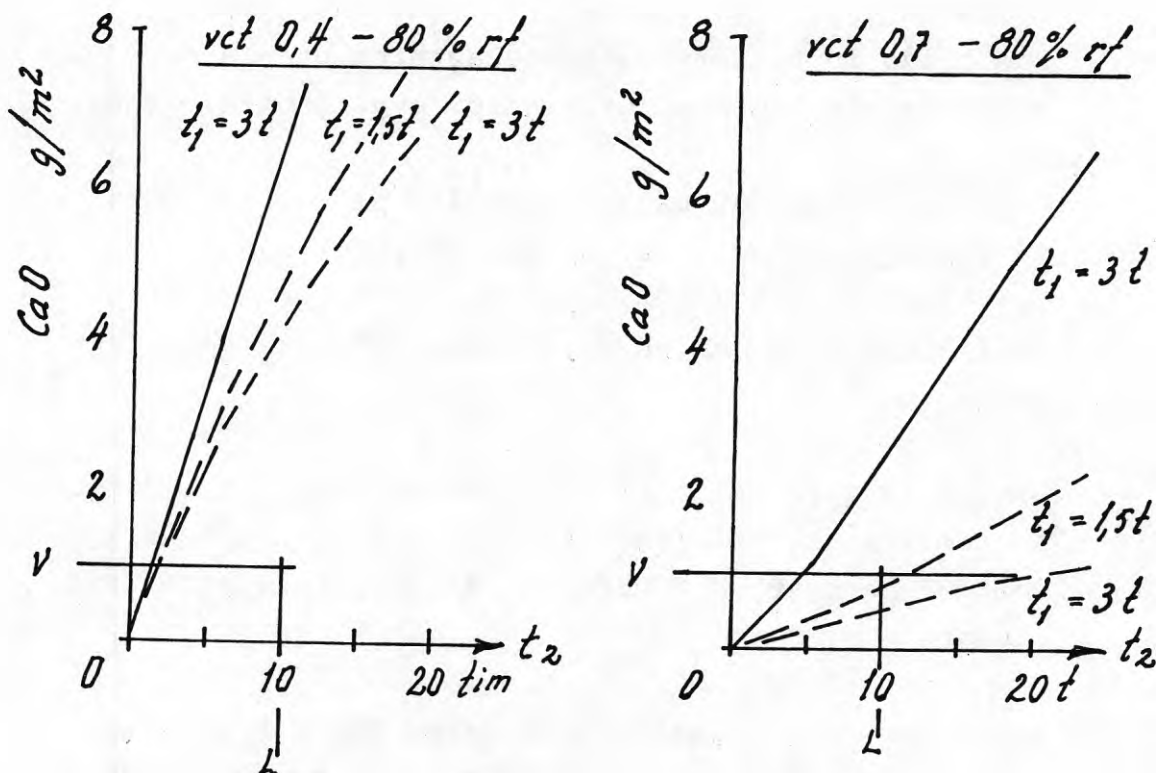
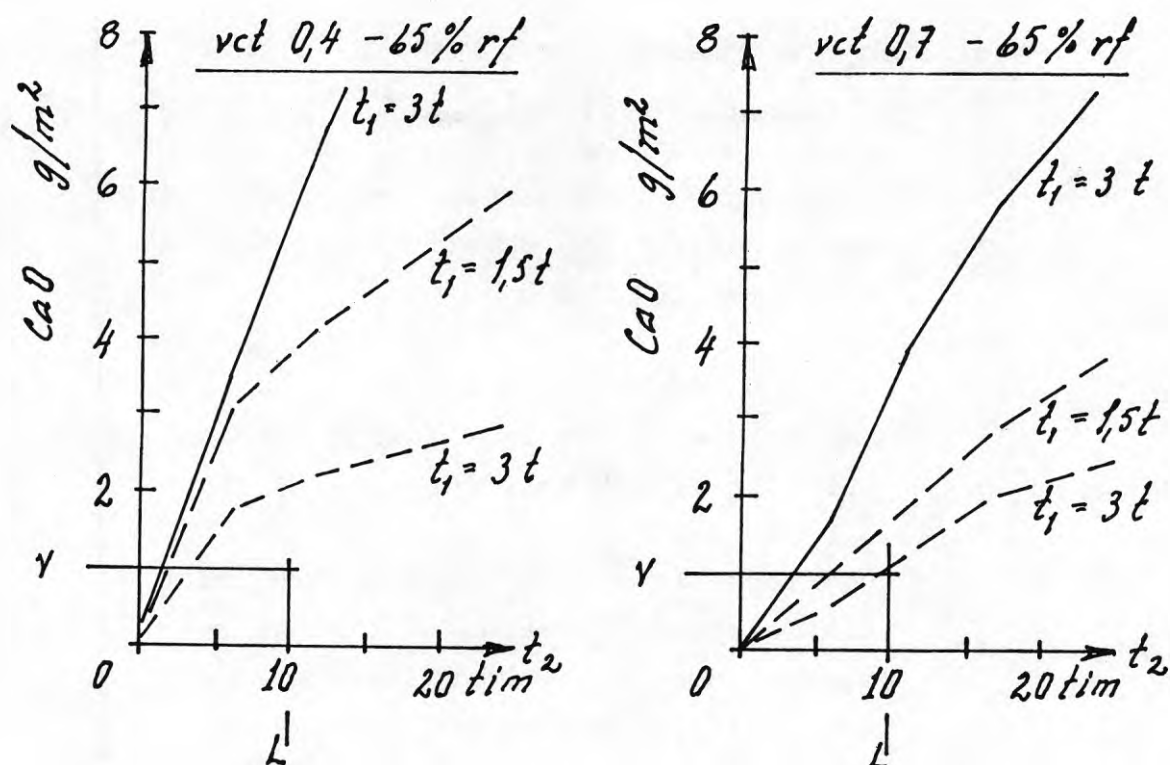


FIG. 44. Inverkan av värmehärdning med extra koldioxid, CO_2 . Urlakningsprov på betong med $vct\ 0,4$ och $0,7$.
 Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 timmar.
 Urlakningstid t_2 timmar.



— härdning i luft av $20\ ^\circ C$ utan extra koldioxid
 - - - " " " " $20\ ^\circ C$ och 10% koldioxid

FIG. 45. Inverkan av koldioxidbehandling vid olika relativ fuktighet i rumstemperatur. Urlakningsprov på betong med vct 0,4 och 0,7. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 timmar. Urlakningstid t_2 timmar.

Resultaten, även redovisade i FIG. 43-45, blev att

ökad koldioxidhalt (5-10 %) accelererade karbonatiseringen i betongytan i hög grad, om temperatur och relativ fuktighet var gynnsamma (60°C och 80 % rf)

det i huvudsak var fråga om en snabbare men inte ökad karbonatisering jämfört med härdning i luft av 20°C och 80 % rf

vid lägre temperatur eller lägre relativ fuktighet var inverkan av förhöjt koldioxidinnehåll hos härdningsluften mindre, speciellt för betong med vct 0.4

Koldioxidbehandling framstår som en effektiv metod att snabbt erhålla ett skyddande karbonatskikt. Redan en halv timmes behandling gav betongytor, som tålde 10 timmars vattenbelastning utan större kalkurlakning än som fordras för synlig utfällning.

Ungefär lika goda resultat erhöles både vid 5 och 10 % koldioxidhalt. Det är möjligt, att man även med lägre halt koldioxid men vid i övrigt lika förhållanden, 60°C och 80 % rf kunnat få lika goda resultat.

Det borde vara relativt lätt att finna en kombination av temperatur, relativ fuktighet och koldioxidhalt, som ger en snabb och effektiv karbonatisering i härdkammare.

Som kommer att framgå längre fram, torde koldioxidbrist i härdkammare vara vanlig, vilket medför betongvaror utan skydd mot kalkutfällning vid tidig vattenpåföring, dvs i regel regn.

6.4.3 Ytbehandlingsmedel

Föregående undersökningar har i lämplig härdning anvisat en metod att undgå kalkutfällningar. Av olika skäl, t ex brist på lämpliga härdningsanordningar, vore det önskvärt med alternativa behandlingar av betongytan. Dessa skulle således vara mer eller mindre oberoende av speciella klimatutrymmen.

Ett flertal försöksserier genomfördes, där olika ytbehandlingar provades. Verkan av dessa skulle i huvudsak ske på kemisk väg. Behandlingsmedlet skulle dessutom reagera någorlunda snabbt och därefter vara inert, så att oförutsedda ogynnsamma biverkningar förhindrades.

Behandlingsmedlen valdes med två utgångspunkter

en underlättad och helst accelererad karbonatisering genom tillförsel av koldioxid eller vatten, eventuellt bådadera, 6.4.3.1 - 6.4.3.4

en bindning eller ett borttagande av den kalk som kan bli tillgänglig för karbonatisering på betongytan, 6.4.3.5 - 6.4.3.10

Verkan av ytbehandlingsmedlen har kontrollerats med urlakningsprov och i några fall även med pölprov.

6.4.3.1 Vatten

Idén med vattenbehandling var, att vattnet skulle tillföras i tunna skikt som snabbt sögs in i betongen. För det första skulle då vattnet inte bli kvar så länge på ytan, att synlig karbonatisering hann ske där. För det andra skulle det tunna vattenskiktet kunna ge porsystemet det vatten som behövdes för karbonatisering under ytan. Samtidigt vore det tänkbart, att vattnet hann att lösa kalciumhydroxid och ta denna med sig in i betongen.

Försöken med tunna vattenskikt gjordes under följande villkor

Behandlingsvatten:	a) avjonat vatten b) avjonat vatten mättat med koldioxid
Vattenskiktets tjocklek:	0,1 och 0,2 mm per behandling
Antal behandlingar:	Ingen 1 strykning vid avformningen eller 7 timmar därefter 2 "- 4 "- 6 "- 4 strykningar 1 dygn efter avformningen
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	40 och 90 %
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Avformningstid:	$t_0 = 6$ och 24 timmar
Härdningstid t_1 :	66 timmar vid avformning efter 6 timmar 48 timmar vid avformning efter 24 timmar

Mellan varje behandling fick betongen bli yttorr.
Resultaten, FIG. 46 - 50, blev att

i vissa fall erhöles en påtagligt minskad
kalkurlakning genom vattenbehandlingen

vattenbehandlingen i försöken var mer
gynnsam för vct 0.4 än för vct 0.7

effekten syntes bäst vid kort avformningstid

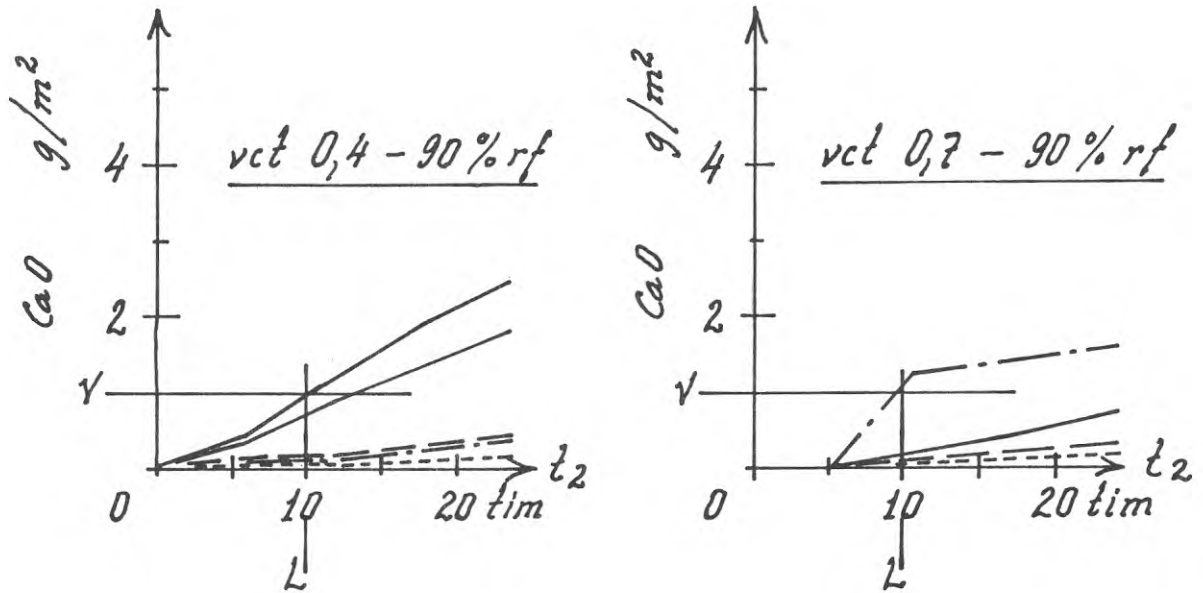
koldioxid i behandlingsvattnet inte
minskade kalkurlakningen märkbart

själva behandlingen i flera fall gav
upphov till synlig kalkutfällning

Resultaten är inte helt entydiga. Idén med vatten-
behandling bör dock inte utan vidare förkastas.
Försöken med kort avformningstid för vct 0.4 tyder
på att ett relativt öppet porsystem ger vattnet
möjlighet att reducera kalkurlakning både vid hög
och låg relativ fuktighet.

En liknande tendens upptäcktes för vct 0.7 under pöl-
proven vid låg temperatur, sid 40 och FIG. 6 i
BILAGA 2.

Det är självfallet, att om vattenbehandling skall
användas som praktisk metod måste den utprovas om-
sorgsfullt. Den är dock tänkbar i betongvaruproduk-
tion med direktavformning, där man enkelt kan avgöra
när betongen har lagom sugförmåga. Även vid plats-
gjutning vore strykning eller dimsprutning med vatten
en tänkbar åtgärd mot kalkutfällning vid avformning,
i synnerhet på sugande ytor, se 4.3.2.5 sid 63.



Antal vattenbehandlingar (utan CO_2)

- 0
- 1 7 tim. efter avformning
- 2 " " " " " "
- 6 " " " " " "

varje vattenbehandling innebar
påförande av ett 0,1 mm vattenskikt

FIG. 46. Inverkan av vattenbehandling. Urlakningsprov på betong med vct 0,4 och 0,7, härdad i $20^{\circ}C$ och 90 % rf. Avformningstid $t_0 = 6$ timmar. Härdningstid $t_1 = 66$ timmar. Urlakningstid t_2 timmar.

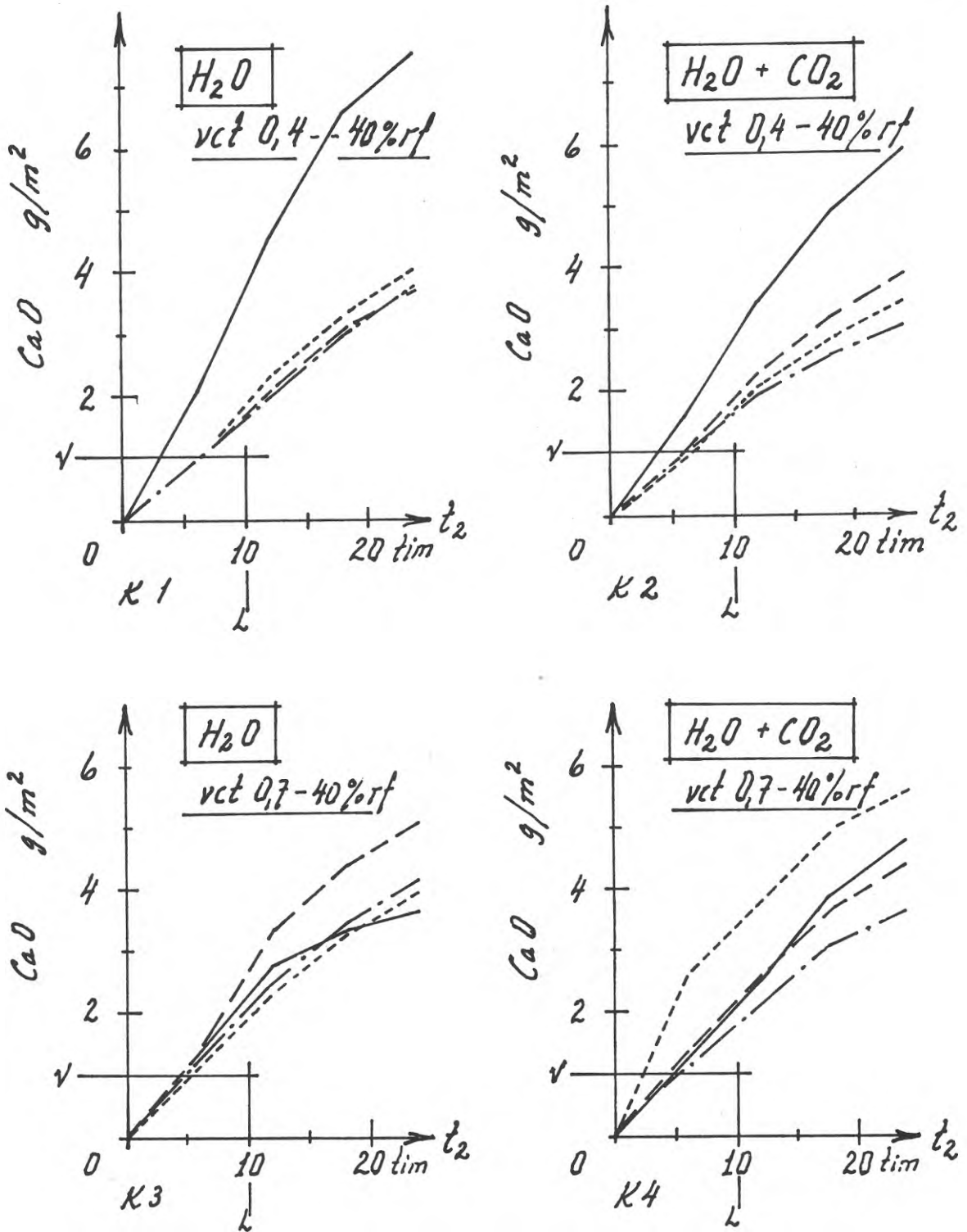
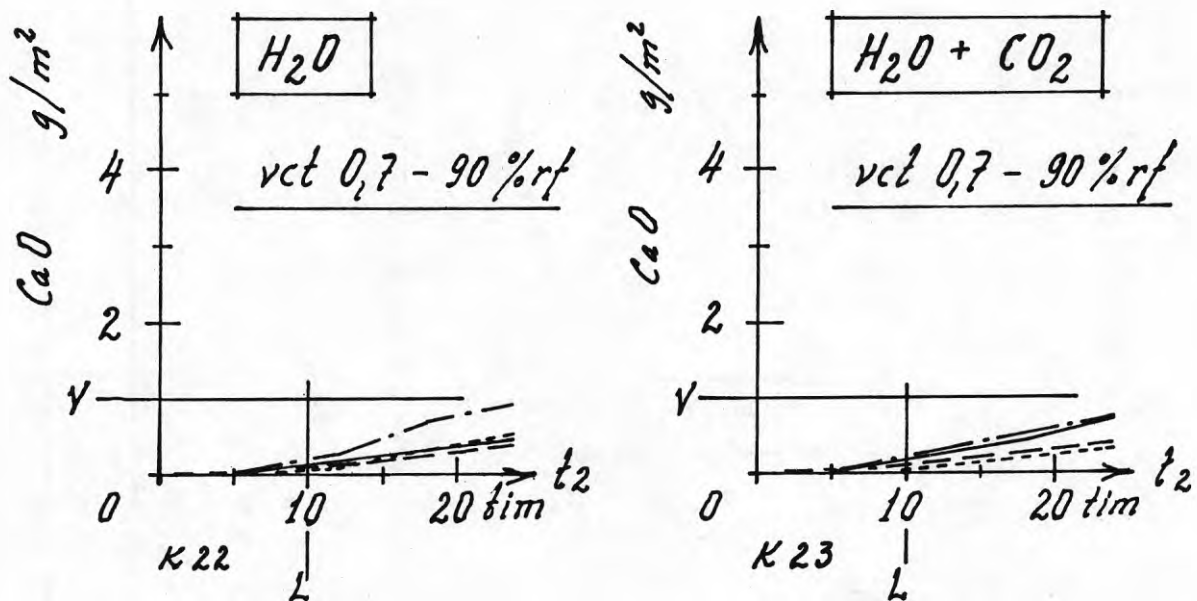
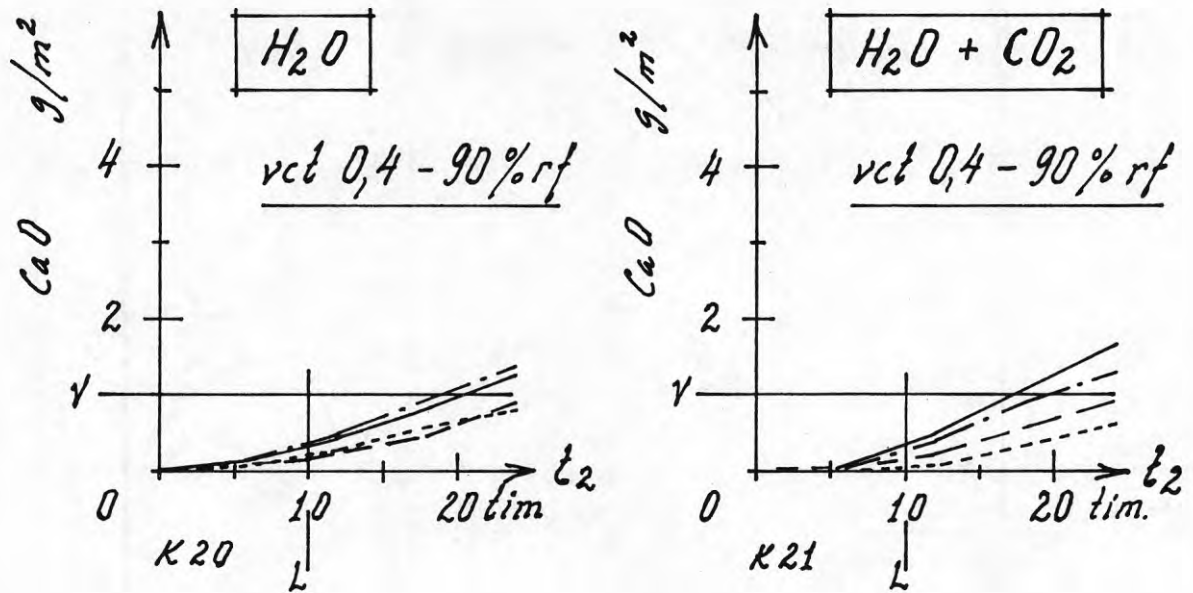


FIG. 48. Inverkan av vattenbehandling med och utan koldioxid. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i $20^{\circ}C$ och 40 % rf. Avformningstid $t_0 = 6$ timmar. Härdningstid $t_1 = 66$ timmar. Urlakningstid t_2 timmar. Kurvornas beteckningar och behandlingens skiktjocklek enligt FIG. 47.



Antal behandlingar, skiktjocklek 0,1 mm

- 0
- - - - 2 vid avformningen
- 4 " " "
- · - · 4 ett dygn efter avformning

FIG. 49. Inverkan av vatten med och utan koldioxid. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 20°C och 90 % rf. Avformningstid $t_0 = 24$ timmar. Härdningstid $t_1 = 48$ timmar. Urlakningstid t_2 dygn.

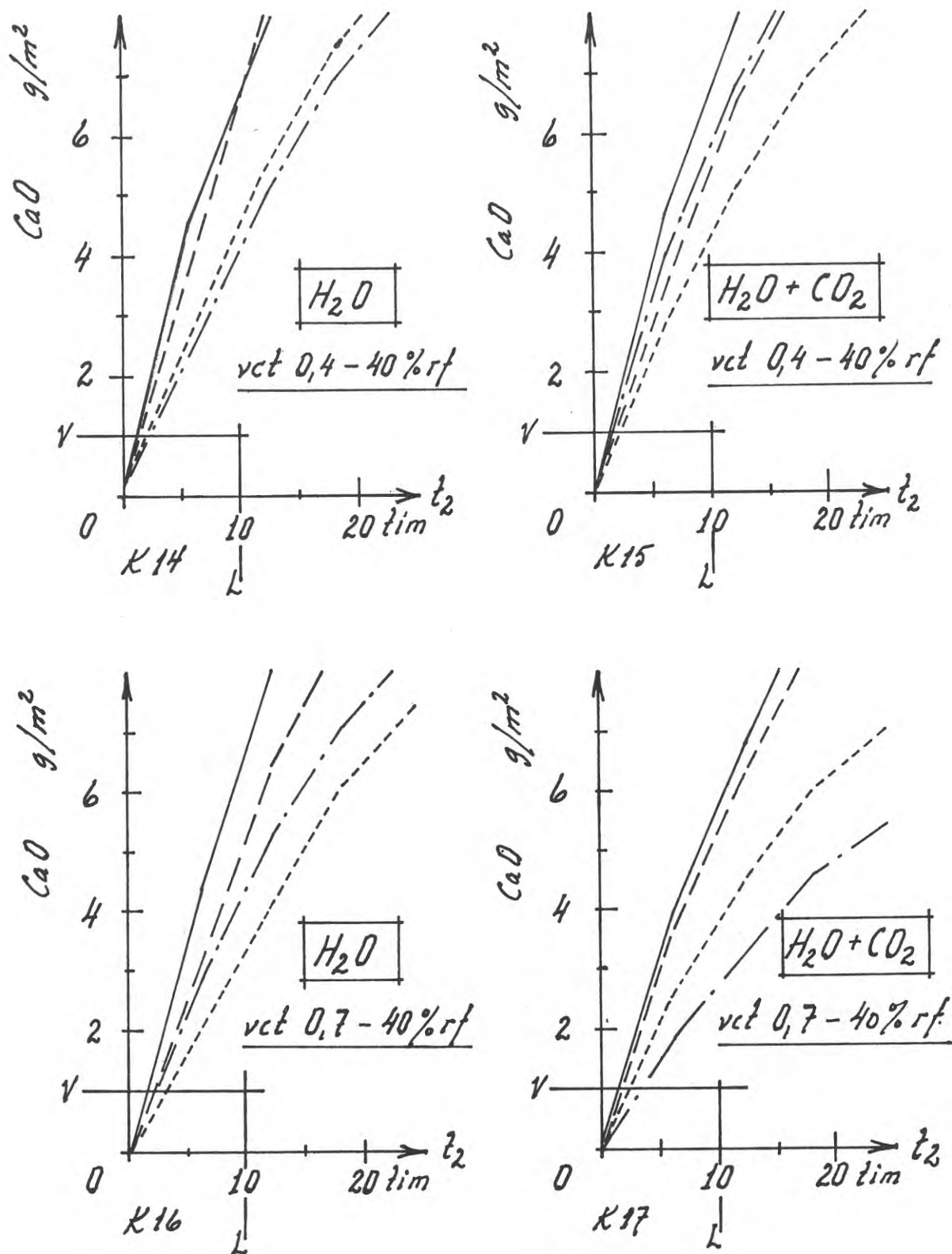


FIG. 50. Inverkan av vatten med och utan koldioxid.

Urlakningsprov på betong med vct 0,4 och 0,7, härdad i 20°C och 40 % rf. Avformningstid $t_0 = 24$ timmar.

Härdningstid $t_1 = 48$ timmar. Urlakningstid t_2 timmar.

Kurvornas beteckningar och skiktjocklek enligt FIG. 49.

Frågan om den i vissa fall gynnsamma verkan av vatten beror på att detta skapar ett lämpligt mikroklimat för karbonatisering eller för in kalken från ytan vid insugningen, besvaras inte direkt av försöken. Eftersom man i flera fall, t ex enligt FIG. 47, fått avsevärd förbättring även där relativa fuktigheten är gynnsam, kan tanken på transport av kalk från ytan och inåt inte utan vidare avvisas.

Av praktiska skäl gjordes vattenbehandlingarna med så korta mellanrum som möjligt, ibland endast 15 - 20 minuter. Detta kan ha inneburit en utfyllnad av por-systemet, som därigenom möjliggjort hög koncentration av kalciumhydroxid nära ytan och karbonatisering ovanpå denna vid ny vattenbehandling.

Försöken startade med skiktjockleken 0,2 mm, vilken senare minskades till 0,1 mm för att vattnet inte skulle bli kvar på ytan alltför länge. Det gällde framför allt de tätare plattorna, som härdats 24 timmar i form.

Försöken är av stort intresse inte bara som ett studium av en behandlingsmetod. De simulerar i viss mån vad som händer en betongyta utomhus, när denna träffas av upprepade regn. De visar, att om nygjuten betong under kortare tid får härda i någorlunda gynnsamt klimat, har den goda möjligheter att slippa kalkutfällning, även om den skulle drabbas av smärre regnskurar. Dessa kan t o m bidra till att öka betongens resistens.

Provstyckena för urlakning uttogs ur betongplattornas mellandelar. På en del av de kvarvarande, likadant behandlade underdelarna utfördes pölprov med data och resultat enligt TAB. 11.

TAB. 11 Pölprov på vattenbehandlade betongytor

Komplettering av urlakningsproven på FIG. 47 - 50.
Kodbeteckningen i första kolumnen återfinns på de aktuella figurerna.

Prov- kropp	Vct	Klimat % rf	Utfällning	
			Ingen behandling	Två behandlingar
K 1	0.4	40	väl synlig	väl synlig
K 3	0.7	40	väl synlig	väl synlig
K 7	0.4	90	väl synlig	ingen
K 8	0.4	90	väl synlig	ingen
K 9	0.7	90	ingen	ingen
K 10	0.7	90	ingen	ingen
K 14	0.4	40	väl synlig	väl synlig
K 15	0.4	40	väl synlig	väl synlig
K 16	0.7	40	väl synlig	ingen
K 17	0.7	40	svag	svag
K 20	0.4	90	svag	svag
K 21	0.4	90	svag	svag (ev)
K 22	0.7	90	ingen	ingen
K 23	0.7	90	ingen	ingen

Jämförelse mellan pölprov och urlakningsprov kan göras med hjälp av beteckningarna K_1 , K_3 , etc, som finns både i tabellen och på kurvorna i FIG. 47 - 50. Överensstämmelse mellan provningsmetodernas resultat råder i huvudsak.

6.4.3.2 Soda

Ett antal plattor behandlades med en sodalösning (Na_2CO_3). Tanken var att sodan skulle tillföra betongytan extra koldioxid i karbonatform för accelererad karbonatisering av betongytan. Försöksvillkoren var följande

Behandlingsmedel:	mättad sodalösning
Behandlingsmetod:	0, 2 eller 4 strykningar
Skiktjocklek:	0,05 mm per strykning
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	<65 % (torr luft) och 80-95 % (fuktig luft)
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 2$ dygn

Behandlingen startade inom en timme efter avformningen. Strykningarna med sodalösningen ägde rum med ungefär 30 minuters mellanrum. Efter behandlingen förvarades provkropparna i aktuellt klimat tills urlakningen startade.

Resultaten, som även ges i FIG. 51, visade att

sodabehandlingen reducerade kalkurlakningen avsevärt

behandlingen i sig själv gav besvärande missfärgning av kalkutfällning

Man konstaterar, att behandlingen inte är direkt användbar, eftersom den själv gav utfällning. Eventuellt skulle den ge tillfredsställande resultat efter en lätt syratvättning.

6.4.3.3 Ammoniumkarbonat

Av samma skäl som angavs för soda i föregående stycke provades behandling med ammoniumkarbonat, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, i mättad vattenlösning. Samma försöksvariabler som vid sodaförsöken, sid 159, användes.

Resultatet blev, se FIG. 52, att

ingen påtaglig förbättring erhöles av
behandlingen, framför allt inte vid
härdning i torr luft

Behandlingsmedlet syns ointressant ur praktisk synpunkt.

Trots att ammoniumkarbonat är mera lösligt (ca 850 g/l) i vatten vid rumstemperatur än soda (ca 150 g/l), blev verkan mindre. För ytterligare kommentarer se punkt 7. VERKAN AV MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING, sid 228.

6.4.3.4 Ammoniumkarbamat

I projektets slutskede genomfördes en serie behandlingar med ammoniumkarbamat, $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$. Det skedde efter teoretiska överväganden av Olle Peterson, Cementas Utvecklingssektor, se sid 232.

Försöksdata följer nedan.

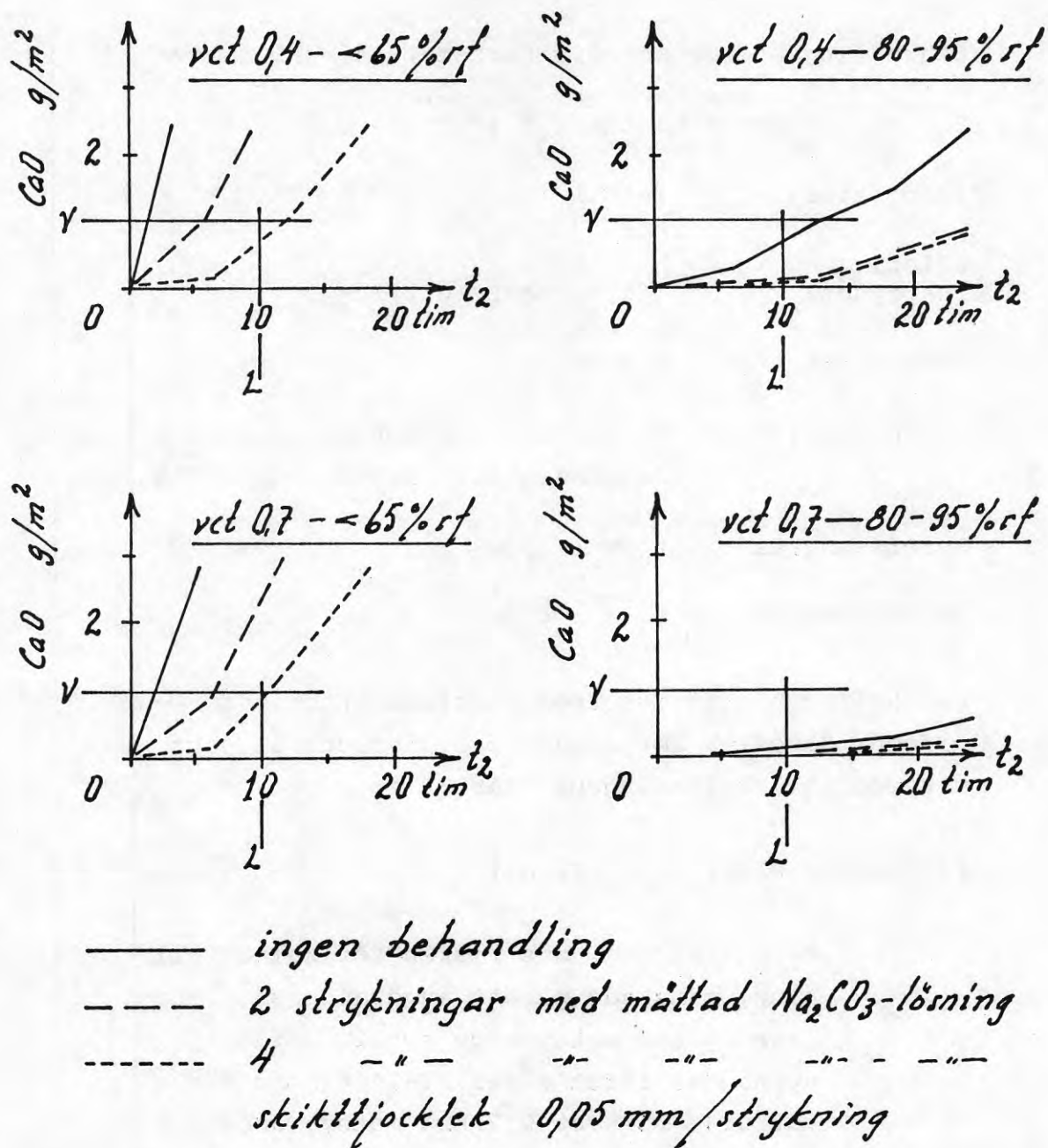


FIG. 51. Inverkan av soda, Na_2CO_3 , i mättad vattenlösning. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad vid $20^\circ C$ och i torr luft, $<65\%$ rf, eller i fuktig, $80-95\%$ rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 2$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar.

Behandlingsmedel: ammoniumkarbamat 145 g/l vatten

Behandlingsmetod: 1 timma i lösningen

Temperatur: 20°C

Relativ
fuktighet: <65 % (torr luft)

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Cementfabrikat: Slite Std, Limhamn Std, Limhamn LH,
Degerhamn Std, Skövde SH, S Vika Std

Avformningstid: $t_0 = 1$ dygn

Härdningstid: $t_1 = 1$ dygn

Behandlingen utfördes inom en timme efter avformningen. Därefter förvarades provstyckena i torrt utrymme till urlakningens start.

Resultaten blev, FIG. 53, att

kalkurlakning, dvs risken för kalkutfällning, minskade på ett avgörande sätt. Urlakning som motsvarade synlig utfällning uppnåddes först efter 17-24 timmar för vct 0.4. För vct 0.7 kan motsvarande tid extrapoleras till ungefär 30 timmar

för alla sex cementfabrikaten är kurvorna väl samlade och tyder på god reproducerbarhet

samtliga behandlade provstycken hade en jämn men något ljusare färg än de obehandlade proven

Den stora reduktionen av kalkurlakningen är självfallet av intresse. På de röda plattorna märktes visserligen en ljusare färgton vid direkt jämförelse med nollproven. Det tycks dock vara viktigt, att betongytan inte får stå fuktig mer än nödvändigt vid uttorkningen efter behandlingen. Självfallet kan man även här tänka sig en kombination med lätt syratvättning eller en ökning av pigmentmängden.

Det bör observeras, att försök endast gjorts med en koncentration och en behandlingstid. Möjligheterna att reglera kalkurlakningen med dessa faktorer syns stora.

6.4.3.5 Vattenglas

Försök genomfördes med vattenglas under följande villkor.

Behandlingsmedel: kommersiellt natriumvattenglas utspätt med vatten i volymproportionerna 1:2 och 1:5 (vattenglas:vatten)

Behandlingsmetod: 0, 2 och 4 strykningar alternativt 1 timme i lösningen

Skikttjocklek: 0,05 eller 0,1 mm per strykning

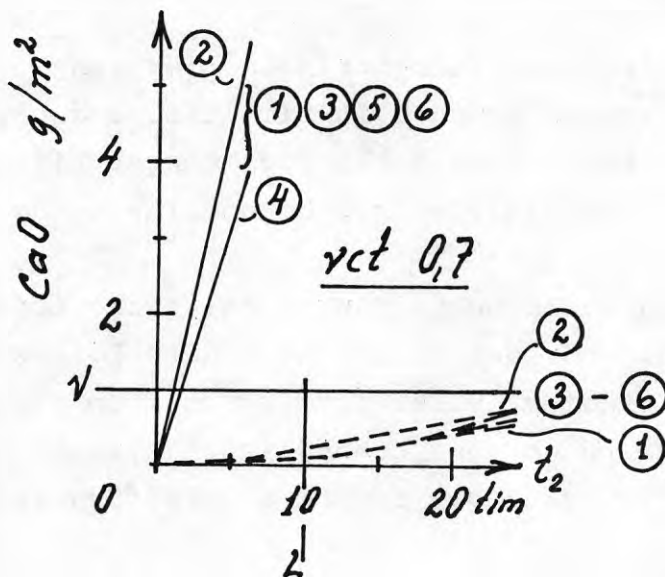
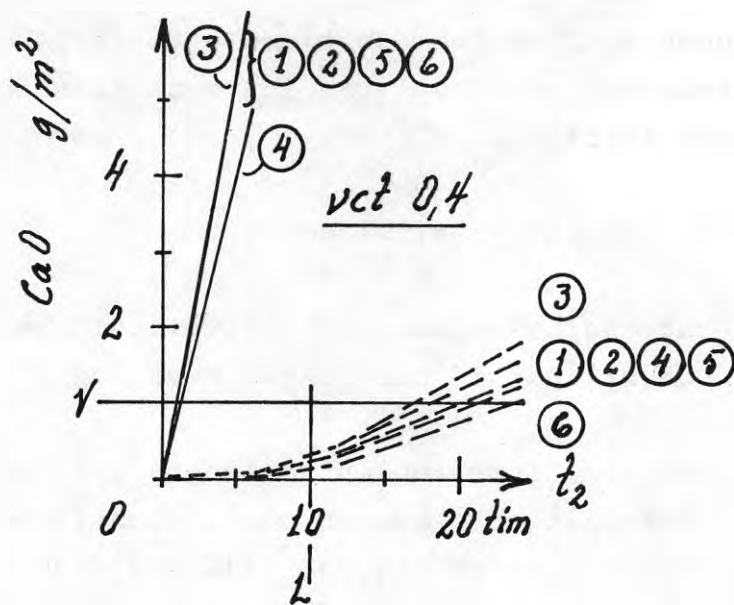
Temperatur: 20°C

Relativ fuktighet: <65 % (torr luft) och 80-95 % (fuktig luft)

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Avformningstid: $t_0 = 1$ dygn

Härdningstid: $t_1 = 1$ och 2 dygn



- ① *slite Std* ② *Limhamn Std* ③ *Limhamn Lt*
 ④ *Degerhamn Std* ⑤ *Skövde St* ⑥ *Stora Vika Std*

————— *vid avformning, obehandlade*

----- *1 timme i $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$ -lösning, sedan i torr luft*

FIG. 53. Inverkan av ammoniumkarbamat, $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$, i vattenlösning med 145 g/l vatten. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 20°C och torr luft, <65 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 1$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar.

165

gjordes inom en timme efter avformning.
 s provkropparna i avsett klimat tills
 tade.

IG. 54 - 56, visade att

vattenglas reducerade kalkurlakningen
 väsentligt vid härdning i torr luft

vid den högre koncentrationen, 1:2, gav
 behandlingen själv en mörk, glansig miss-
 färgning åt betongytan till följd av ofull-
 ständig inträngning. Det var inte fråga om
 kalkutfällning.

Det är naturligt att förbättringen blev ringa vid
 provkroppar som härdades i fuktig luft. I det fallet
 är nämligen, som visats åtskilliga gånger tidigare,
 härdningen i sig själv en god behandlingsmetod.

Även om några andra behandlingsmedel tycks effektivare
 än vattenglas, bör det inte utan vidare förkastas.
 Ytterligare studier, vilka inte rymts inom projektet,
 skulle kanske kunna göra behandlingen effektivare
 utan att ge biverkningar i form av missfärgning.

6.4.3.6 Natriumtripolyfosfat

Ganska omfattande försök genomfördes med natriumtri-
 polyfosfat. Verkan av detta medel skulle vara, att
 kalciumhydroxiden i betongens ytskikt tillsammans
 med fosfatet övergick i en komplex förening och
 hindrades karbonatisera. Försöksdata framgår av
 följande uppgifter.

Behandlingsmedel: mättad lösning av natriumtripoly-
 fosfat, 145 g/l vatten

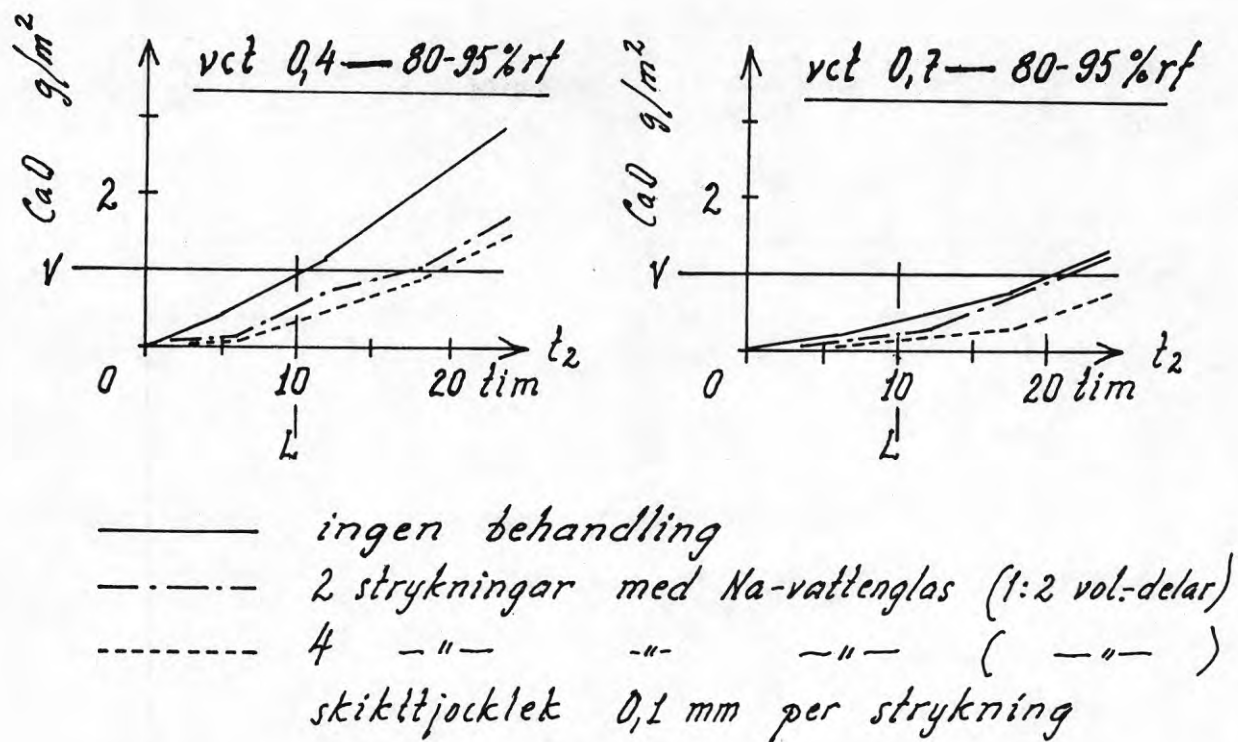


FIG. 54. Inverkan av natriumvattenglas.

Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 20°C och 80-95 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn.

Härdningstid $t_1 = 2$ dygn. Urlakningstid t_2 dygn.

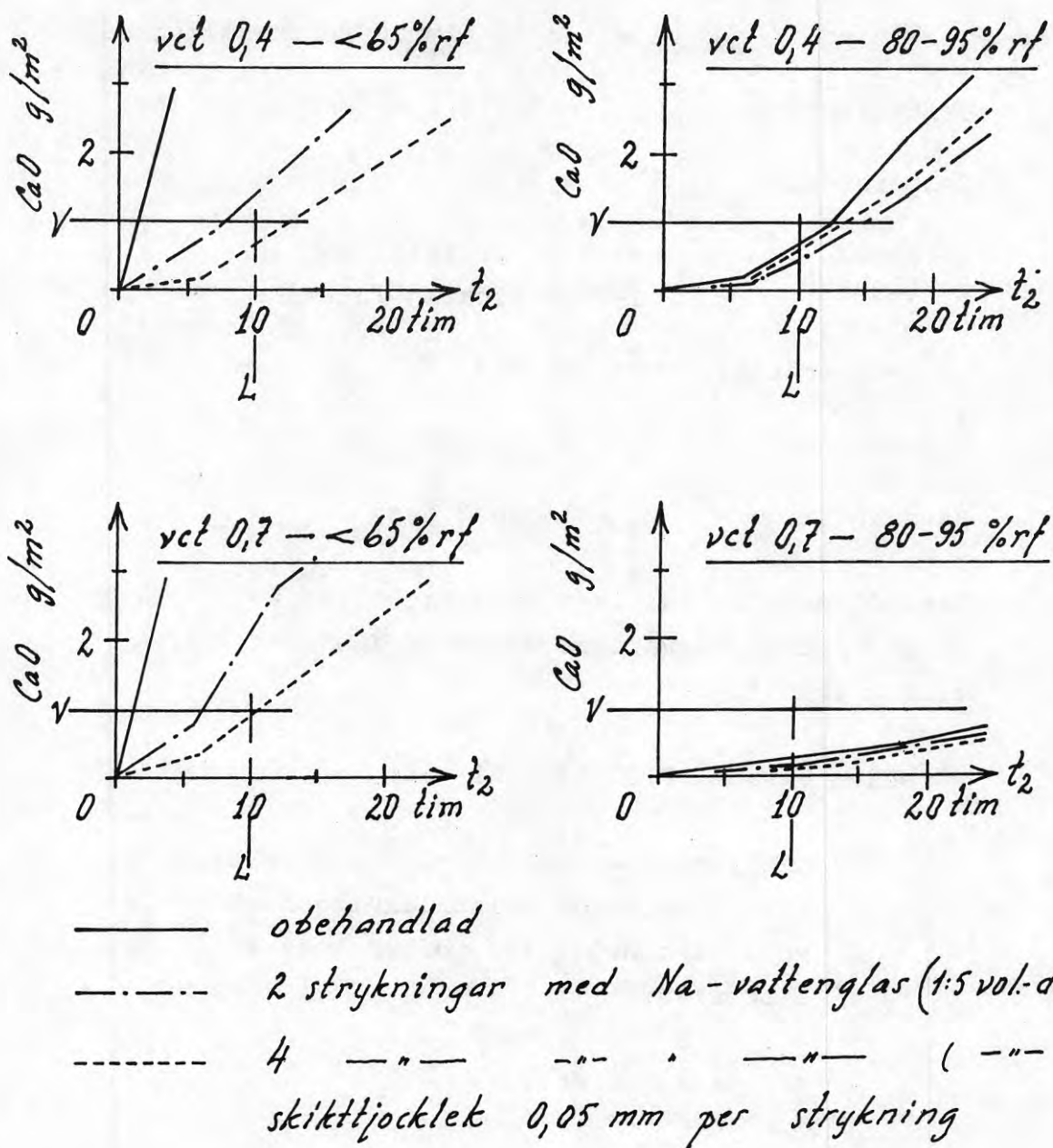


FIG. 56. Inverkan av natriumvattenglas. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad vid 20°C i torr luft, $<65\%$ rf, eller i fuktig, $80-95\%$ rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 2$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar.

Behandlingsmetod: 0, 2 och 4 strykningar alternativt
1 eller 24 timmar i behandlingsmedlet

Skiktthjocklek: 0,05 eller 0,1 mm per strykning

Temperatur: 5° och 20°C

Relativ fuktighet: <65 % (torr luft) och
80-95 % (fuktig luft)

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Avformningstid: $t_0 = 0,5$ och 1 dygn

Härdningstid: $t_1 = 1$ och 2 dygn

Behandlingen skedde inom en timme efter avformningen.
Provkropparna förvarades därefter i avsett klimat
till urlakningen.

Försöken visade, FIG. 57 - 61, att

natriumtripolyfosfat på ett effektivt
sätt reducerade kalkurlakningen både vid
vct 0.4 och 0.7 även efter kort härdning
i torr luft

effekten var entydig

verkan av natriumtripolyfosfatet var i stort
sett oberoende av cementfabrikat

betongytan fick i regel en klar och ren färg
efter behandlingen. Endast vid flera stryk-
ningar uppstod någon enstaka gång missfärg-
ning av behandlingen. Då stod behandlings-
medlet kvar alltför länge på ytan.

24 timmars behandling gav mycket låg kalk-
urlakning

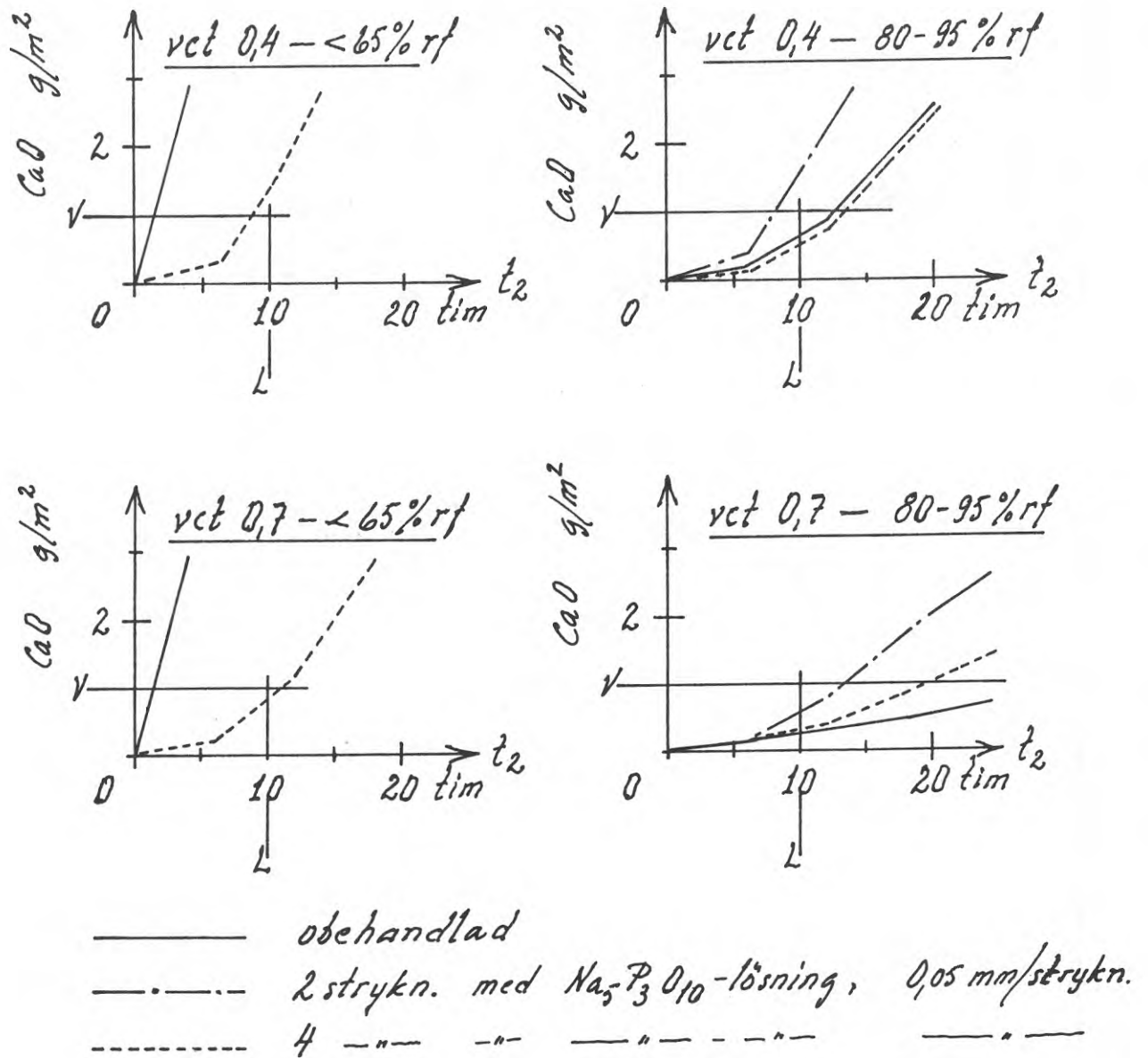
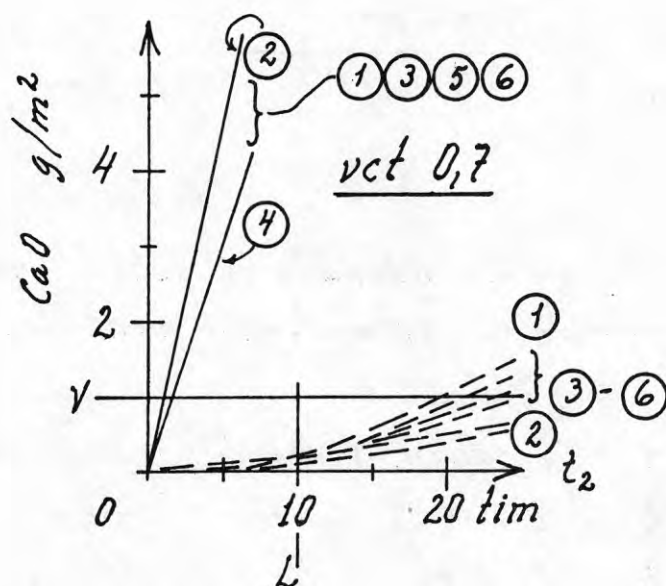
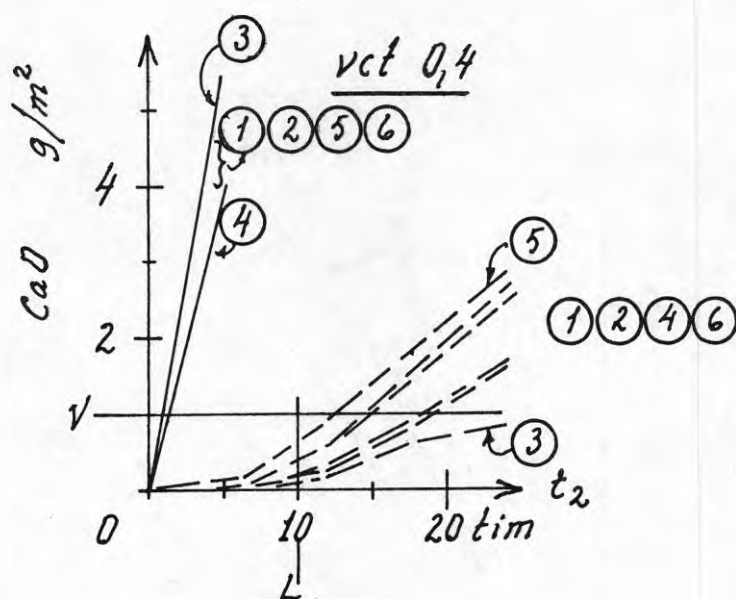


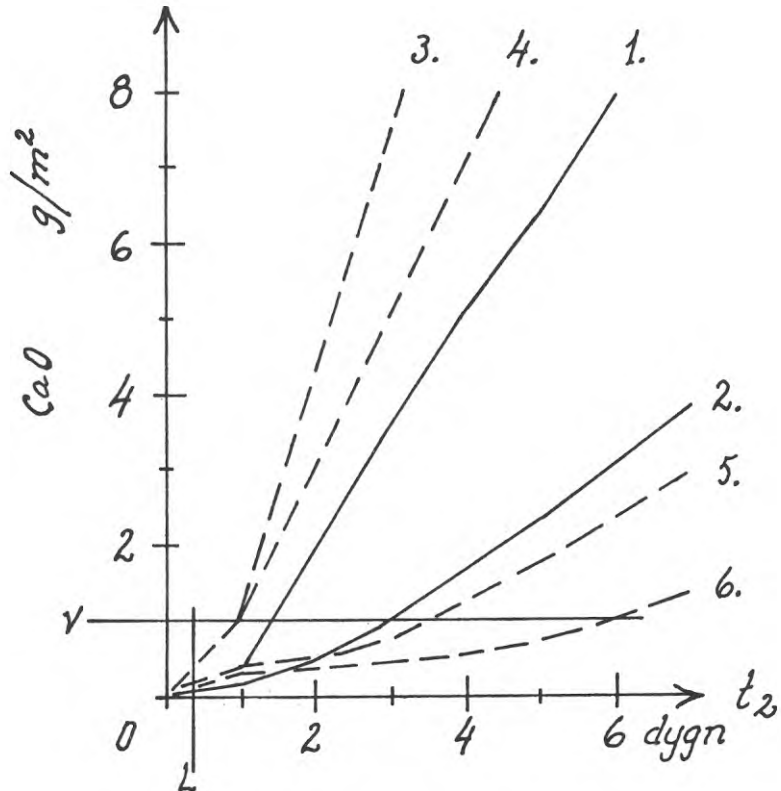
FIG. 58. Inverkan av mättad natriumtripolyfosfatlösning, 145 g/l vatten. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad vid 20°C i torr luft, <65 % rf, eller i fuktig, 80-95 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 2$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar.



- ① *Slite Stå* ② *Limhamn Stå* ③ *Limhamn Ltt*
 ④ *Begerhamn* ⑤ *Skövde Stå* ⑥ *Stora Vika Stå*

————— *vid avformning, obehandlade*
 - - - - - *1 timme i Na₅P₃O₁₀-lösning, sedan i torr luft*

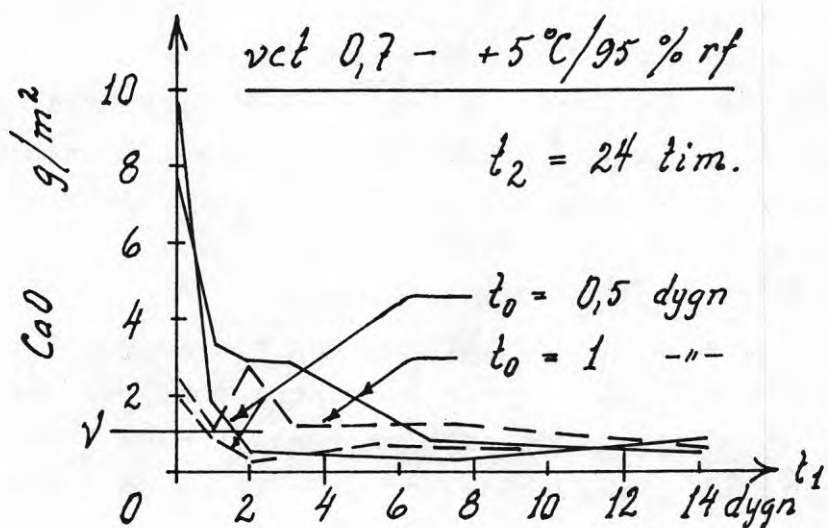
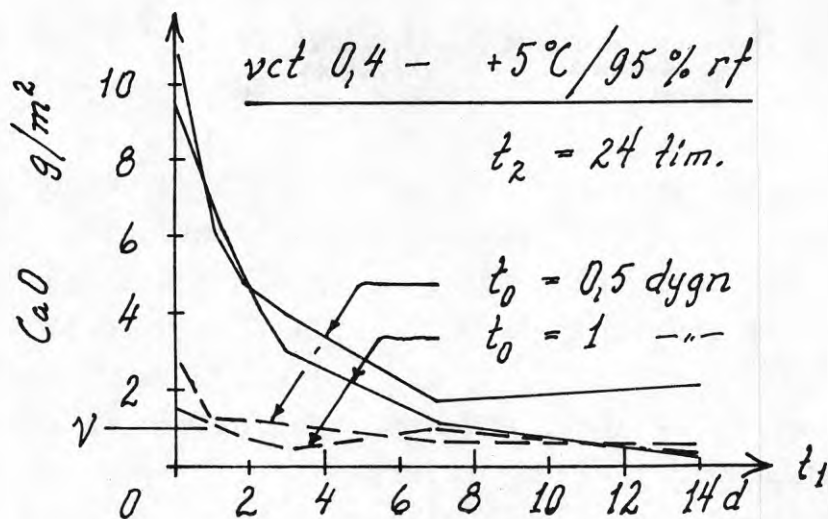
FIG. 59. Inverkan av natriumtripolyfosfat, Na₅P₃O₁₀⁻ lösning, 145 g/l vatten. Urlakningsprov på betong med wct 0.4 och 0.7, härdad vid 20°C i torr luft, <65 % rf. Avformningstid t₀ = 1 dygn. Härdningstid t₁ = 1 dygn. Urlakningstid t₂ timmar.



————— härdade i fuktig luft
 - - - - - behandlade med $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$

1.	vct	0,4	7 dygn	i	+20 °C / ~ 90 % rf
2.	"	0,7	7 "	"	" " " "
3.	"	0,4	1 tim	i	$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ + 1 dygn 20 °C / ~ 40 % rf
4.	"	0,7	1 "	"	" " + " " " "
5.	"	0,4	24 tim.	i	$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ + 1 dygn 20 °C / ~ 40 % rf
6.	"	0,7	24 "	"	" " + " " " "

FIG. 60. Inverkan av härdning i fuktig luft jämfört med inverkan av behandling med natriumtripolyfosfat i mättad lösning, 145 g/l vatten. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid t_1 . Urlakningstid t_2 dygn.



— obehandlad

--- 1 timme i $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ -lösning

FIG. 61. Inverkan vid låg temperatur av natriumtripolyfosfat, $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, i mättad lösning, dvs 145 g/l vatten. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad vid 5°C och 95 % rf. Avformningstid t_0 dygn. Härdningstid t_1 dygn. Urlakningstid $t_2 = 24$ timmar.

natriumtripolyfosfatet minskade avsevärt kalkurlakningen under den första veckan på betong som härdades i låg temperatur

Natriumtripolyfosfat framstår efter försöken som ett effektivt medel att reducera kalkurlakningen hos en betongyta. Det bör ha möjlighet att i praktiken bli ett bra alternativ till härdning i fuktig luft.

Den ringa urlakningen efter behandling med natriumtripolysulfat vid låg temperatur, FIG. 61, tyder på att även platsgjutna konstruktioner, t ex broar, med framgång skulle kunna behandlas mot kalkutfällning.

Enstaka färgmätningar tydde på att färgrenheten efter behandlingen ligger emellan den hos en obehandlad yta utan "synlig" utfällning och den hos en syratvättad. Framför allt syntes behandlingen genom neddoppning en timme ge en god färgrenhet. I de enstaka fall behandlingen själv gav missfärgning, kalkutfällning, rörde det sig om att vattnet efter flera bestrykningar blev stående på ytan alltför länge.

Eftersom lösningen var mättad, kan man knappast räkna med bättre effekt av annan koncentration. Den var samtidigt så lättflytande, att en mera utspädd lösning troligen inte skulle ge bättre effekt genom större inträngningsförmåga.

Eventuellt kan man tänka sig en lägre men dock tillräcklig verkan, som exempelvis nätt och jämnt klarar 10 timmars vattenbelastning, genom lägre koncentration eller kortare behandlingstid.

6.4.3.7 Natriumhexametafosfat

Nedan följer data för prov med natriumhexametafosfat, $(\text{NaPO}_3)_6$. Verkan av detta skulle i princip vara densamma som av tripolyfosfatet. Den skulle t o m kunna bli större p g a en avsevärt större löslighet i vatten.

Behandlingsmedel: natriumhexametafosfat, 145 g/l vatten
 " , 290 "
 " , 600 " "

Behandlingsmetod: 0 och 4 strykningar, alternativt
 1 timme i behandlingsmedlet

Skiktjocklek: 0,05 mm per strykning

Temperatur: 20°C

Relativ
 fuktighet: <65 % (torr luft)

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Avformningstid: $t_0 = 1$ dygn

Härdningstid: $t_1 = 1$ dygn

Behandlingen skedde inom en timme efter avformningen, varefter provstyckena förvarades i avsett klimat, 20°C och torr luft, <65 % rf.

Resultaten av försöken visade, FIG. 62, att

natriumhexametafosfat effektivt reducerar
 kalkurlakningen genom en betongyta även
 efter kort härdning i torr luft

effekten var entydig

behandlingsmedlet verkade i huvudsak
 oberoende av cementfabrikat

tendens till kalkutfällning eller annan missfärgning av behandlingsmedlet förelåg inte, såvida detta inte blev stående alltför länge på ytan

effekten syntes öka med koncentrationen intill en viss grad. Därefter avtog verkan.

Natriumhexametrafosfatet tycks liksom natriumtripolyfosfatet kunna bli ett alternativ till härdning i fuktig luft för att minska risken för kalkutfällning. Egentligen bör möjligheterna vara större för det förstnämnda till följd av större löslighet i vatten, FIG. 62. På denna ser man dock, att koncentrationen inte kan ökas hur mycket som helst, eftersom lösningen då blir alltmer trögflytande.

6.4.3.8 Fluorosilikat

Det har ibland uppgetts att fluatering minskar risken för kalkutfällning. Därför genomfördes en del försök dels med natriumfluorosilikat, dels med ett kommersiellt fluateringsmedel. Data för proven var följande.

Behandlingsmedel: Natriumfluorosilikat, 6-7 g/l vatten
Kommersiellt fluateringsmedel avsett för golvbehandling, 250 g/l vatten

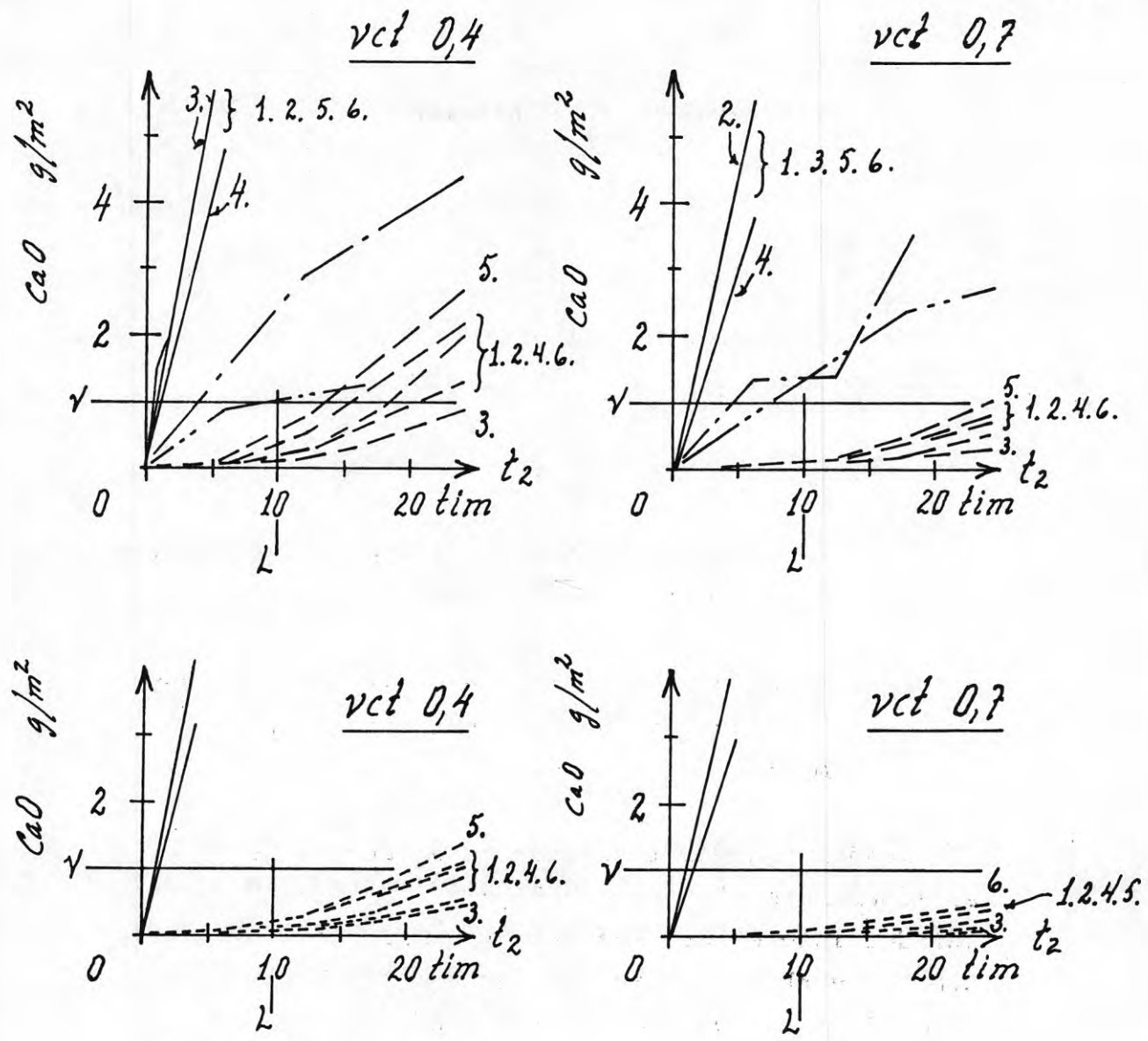
Behandlingsmetod: 2 och 4 strykningar

Skikttjocklek: 0,05 mm per strykning

Temperatur: 20°C

Relativ fuktighet: <65 % (torr luft) och 80-95 % rf

Vattencementtal: 0.4 och 0.7



- obehandlad
- - - - 1 timme i $(NaPO_3)_6$ konc. 145 g/l vatten
- · - · 1 " " " " " " 290 " " "
- · · · 1 " " " " " " 600 " " "
- - - - 4 strykn. med " " " " 600 " " , 0,05 mm/strykn.

1, 2, 3, 4, 5 och 6 anger olika cementsort enligt FIG 59

FIG. 62. Inverkan av natriumhexametafosfat i vattenlösning av olika koncentration. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad vid 20°C i torr luft, <65 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 1$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar.

Avformningstid: $t_0 = 1$ dygn

Härdningstid: $t_1 = 1$ dygn (kommersiellt
fluateringsmedel)
2 dygn (natriumfluorosilikat)

Behandlingen utfördes inom en timme efter avformningen. Därefter och till urlakningen förvarades provstyckena i ovan angivet klimat.

Resultatet, FIG. 63, blev att

inverkan på kalkutfällningen var ingen eller ringa av natriumfluorosilikatet

en betydande reduktion av kalkurlakningen erhöles med det kommersiella fluateringsmedlet

Skillnaden i behandlingsmedlens effekt torde huvudsakligen bero på olika löslighet i vatten. Det räcker således inte enbart med att ett behandlingsmedel är kemiskt verksamt, utan det måste också kunna tillhandahållas betongytan i tillräcklig mängd.

Natriumfluorosilikatet, Na_2SiF_6 , har även provats med tjockare skikt, 0.1 mm. Inte heller då kunde någon förbättring iakttas.

Se vidare 7. VERKAN AV MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING, sid 228.

6.4.3.9 Kommersiella behandlingsmedel

I patent, reklam och på andra ställen hittar man många ytbehandlingsmedel för betong. Bland andra förbättrande egenskaper finns ofta ett tillägg om att medlet i fråga dessutom minskar kalkutfällningsrisken. Det ansågs därför lämpligt att prova några sådana kommersiella medel. Försöken, som var relativt begränsade, utfördes enligt nedanstående förutsättningar.

Behandlingsmedel och behandlingsmetod:

1. Ingen behandling, härdning i 20°C i torr luft, 40 % rf, under $t_1 = 1$ dygn.
2. Ytbehandlingspreparat, speciellt avsett för härdning av betonggolv. Ingen närmare specificering av beståndsdelar. Nedsänkning av provstycket 1 timme i preparatet.
3. Lika som 2 ovan men med behandlingstiden 1/2 timme.
4. Krympningsreducerande medel. Två strykningar, 0,05 mm tjocka vardera, med ungefär 4 timmars mellanrum för upptorkning.
5. Akrylatbaserat medel med två strykningar om 0,05 mm vardera.
6. Akrylbaserad polymerlösning, som enligt uppgift genom impregnering och tätning skyddar betongytan mot vittring och nedsmutsning. En timmes neddoppning i behandlingsmedlet efter avformningen. Därefter härdning vid 20°C i torr luft <65 % rf, under $t_1 = 1$ dygn.
7. Lika som 6. ovan men med två strykningar, 0,15 mm per strykning, i stället för neddoppning.

8. Rengöringsmedel för bl a betongytor innehållande syra. Neddoppning i 45 sekunder. Före behandlingen vattenlagrades plattorna i 10 minuter och eftersköljdes noga i vatten. Behandlingen utförd 1 dygn efter avformningen och ungefär 1 timme före urlakningen.
9. Lika som 8. ovan men med neddoppning i 180 sekunder.
10. Ytbehandlingsmedel för betong innehållande vegetabilisk olja. Neddoppning i en timme.
11. Lika som 10 men med två strykningar, 0,15 mm tjocka vardera, i stället för neddoppning.
12. Epoxiplast, en strykning till full täckning.

Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	<65 % rf (torr luft)
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 1$ dygn

Ovanstående behandlingar utfördes, om ej annat angetts ovan, inom en timme efter avformning. Därefter har provstyckena förvarats i ovanstående temperatur och relativa fuktighet under tiden $t_1 = 1$ dygn.

Resultaten blev, som FIG. 64 visar, att

det fanns stor skillnad mellan de olika medlens inverkan på kalkurlakningen. En del hade en klart gynnsam verkan, andra ingen eller ringa. Några behandlingsmedel gav t o m större urlakning än vid obehandlad yta.

I stort sett har fabrikantens anvisningar följts vid behandling.

Bästa resultatet erhöles med epoxiplast, 12. Noggrann okulär besiktning visade, att epoxiytan hade en del små porer. Sannolikt har en viss vattengenomträngning skett genom dem, vilket förklarar att det över huvud taget blev någon kalkurlakning. Epoxiplasten hindrade kalkurlakningen i sin egenskap av tätande skikt, som isolerade betongen från luftens koldioxid och utifrån påfört vatten.

Observera även det goda resultatet med det kommersiella fluateringsmedlet enligt 6.4.3.8 på sid 178.

Man bör hålla i minnet, att flertalet av medlen har annan huvuduppgift än att hindra kalkutfällningar.

Medlen 8 och 9 med syraverkan hade en relativt gynnsam effekt, vilket överensstämmer med resultaten i nästa stycke, 6.4.3.10 Syratvättning, sid 186. Enligt fabrikantens anvisningar kan man använda både starkare och svagare koncentration än i försöken. Det ger möjlighet att styra kalkurlakningen, dvs risken för kalkutfällning.

Utöver dessa provades på ett tidigt skede även ett silikonbaserat medel och ett som bl a innehöll natriumhexametafosfat. De provades under något andra förhållanden än medlen 1-12 ovan. De hade en tydlig men knappast tillräckligt gynnsam effekt. Försöken

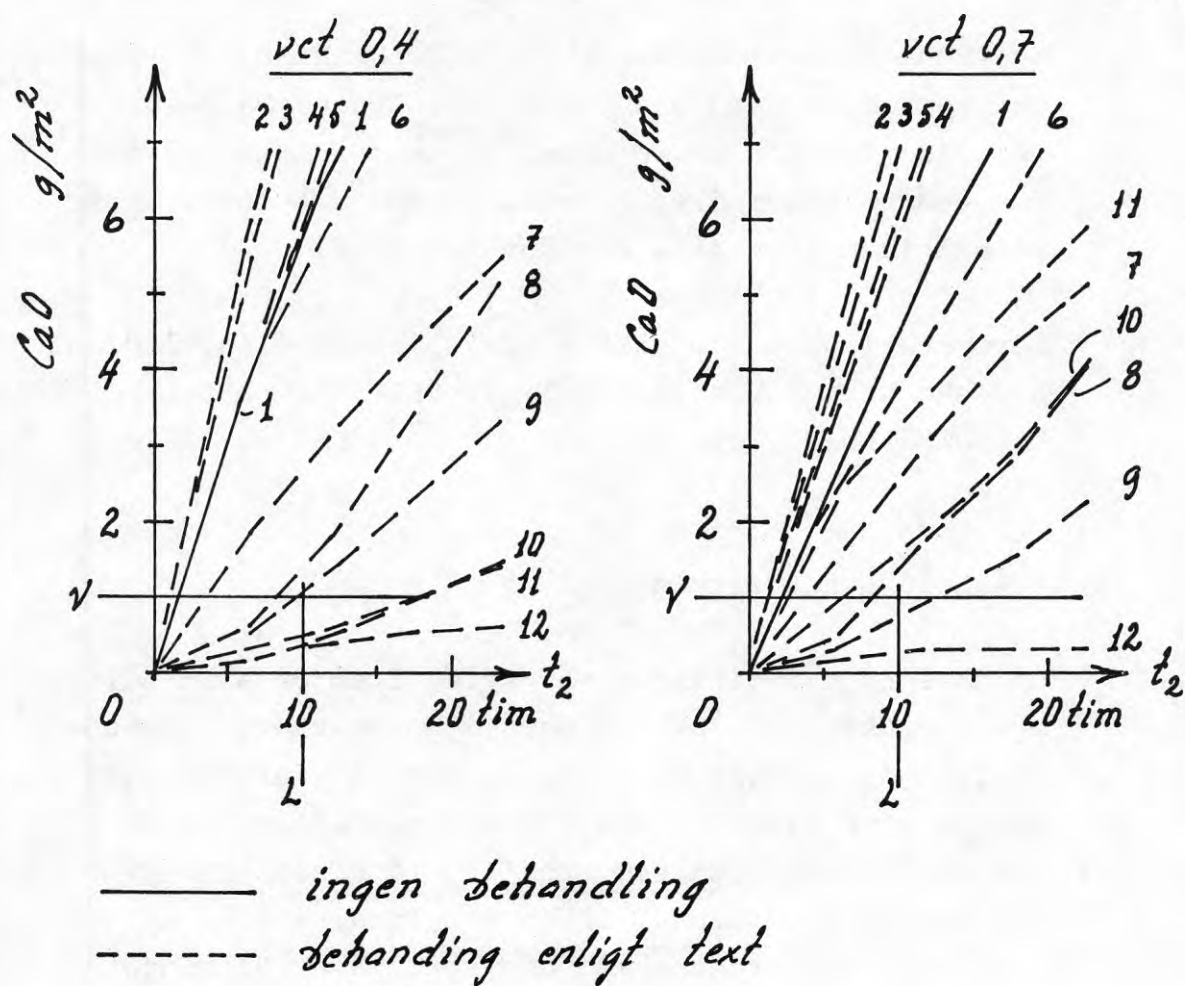


FIG. 64. Inverkan av olika kommersiella behandlingsmedel. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7. Härdning enligt texten. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 1$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar.

med behandling av pelaren på FIG. 4 i Bilaga 2 visade, att verkan av dem inte var helt entydig. På pelarens framsida erhöles bra och bestående resultat med det ena behandlingsmedlet och dåligt med det andra, men på baksidan blev effekten den motsatta.

För ytterligare synpunkter bl a på behandlingsmedlens kemiska verkan hänvisas till 7. VERKAN AV MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING, sid 228.

6.4.3.10 Syratvättning

Sedan lång tid tillbaka har syra, framför allt salt-syra, brukats för att ta bort icke önskvärda kalkutfällningar. Vidare har syra stundom använts för att tvätta bort slam o d och för att ge betongytan en klarare färg än den som erhålls vid vissa produktionsmetoder. Man skulle kunna befara, att en syratvättning tillsammans med den synliga utfällningen tog bort hela det befintliga karbonatskiktet i ytan. Denna skulle sedan löpa uppenbar risk för nya utfällningar, när vatten kom på ytan.

En del försök genomfördes i första hand för att undersöka om farhågan var berättigad. De visade ingen ogynnsam effekt, utan tydde tvärtom på att syratvätt ger ett icke föraktligt skydd mot framtida utfällningar. Därför utökades undersökningarna och flera syror studerades.

Försöken gjordes under nedanstående villkor.

Syror:

HCl (saltsyra) 1:20	50 ml	35 % syra (densitet 1,19)	per liter lösning
HCl (saltsyra) 1:10	100 ml	"	"
HCl (saltsyra) 1:2	500 ml	"	"
CH ₃ COOH (ättiksyra) 1:10	100 ml	100 % syra (dens 1,05)	per liter lösning
H ₃ PO ₄ (fosforsyra) 1:10	100 ml	85 % syra (dens 1,71)	per liter lösning
H.NH ₂ SO ₃ (sulfaminsyra) 1:10	100 g	per liter lösning	

Behandlingsmetod:

Förvattning i 10 minuter genom nedsänkning i vatten, därpå syratvättning genom nedsänkning i syralösningen under 45 eller 180 sekunder och slutligen avspolning med vatten 10 - 20 sekunder. I några fall har förvattningen utelämnats.

Tidpunkt för syratvättning och urlakning:

1. Syratvättning inom en timme efter avformning, därefter lagring vid 20°C i torr luft, <65 % rf, under tiden $t_1 = 1$ dygn före urlakningen, FIG. 65
2. Syratvättning 1 dygn efter avformning. Urlakningen påbörjad ungefär en timme efter syratvättningen. Lagring i 20°C och torr luft, <65 % rf, mellan avformning och urlakning, $t_1 = 1$ dygn, FIG. 66
3. Syratvättning 1 dygn efter avformning. Urlakning igångsatt 7 d efter denna. Förvaring mellan avformning och urlakning vid 20°C i 40 % eller 95 % rf, FIG. 67 - 68

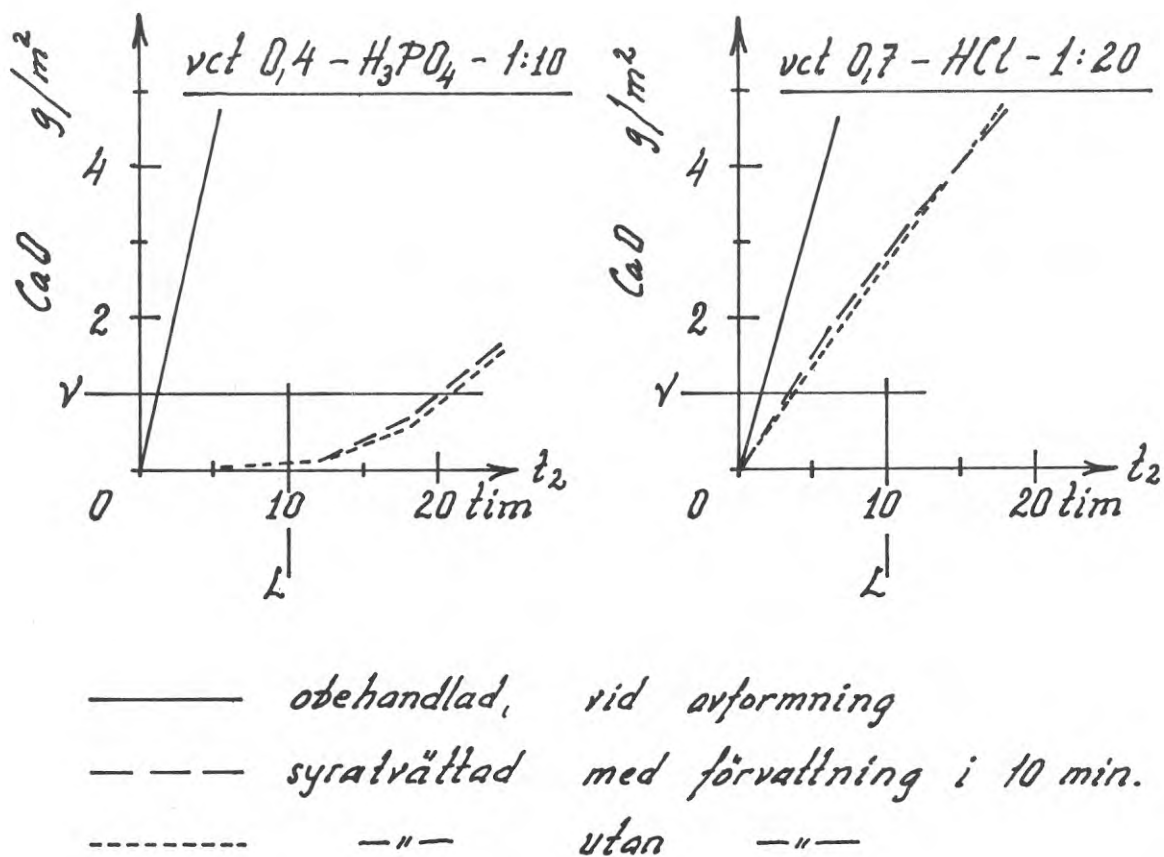
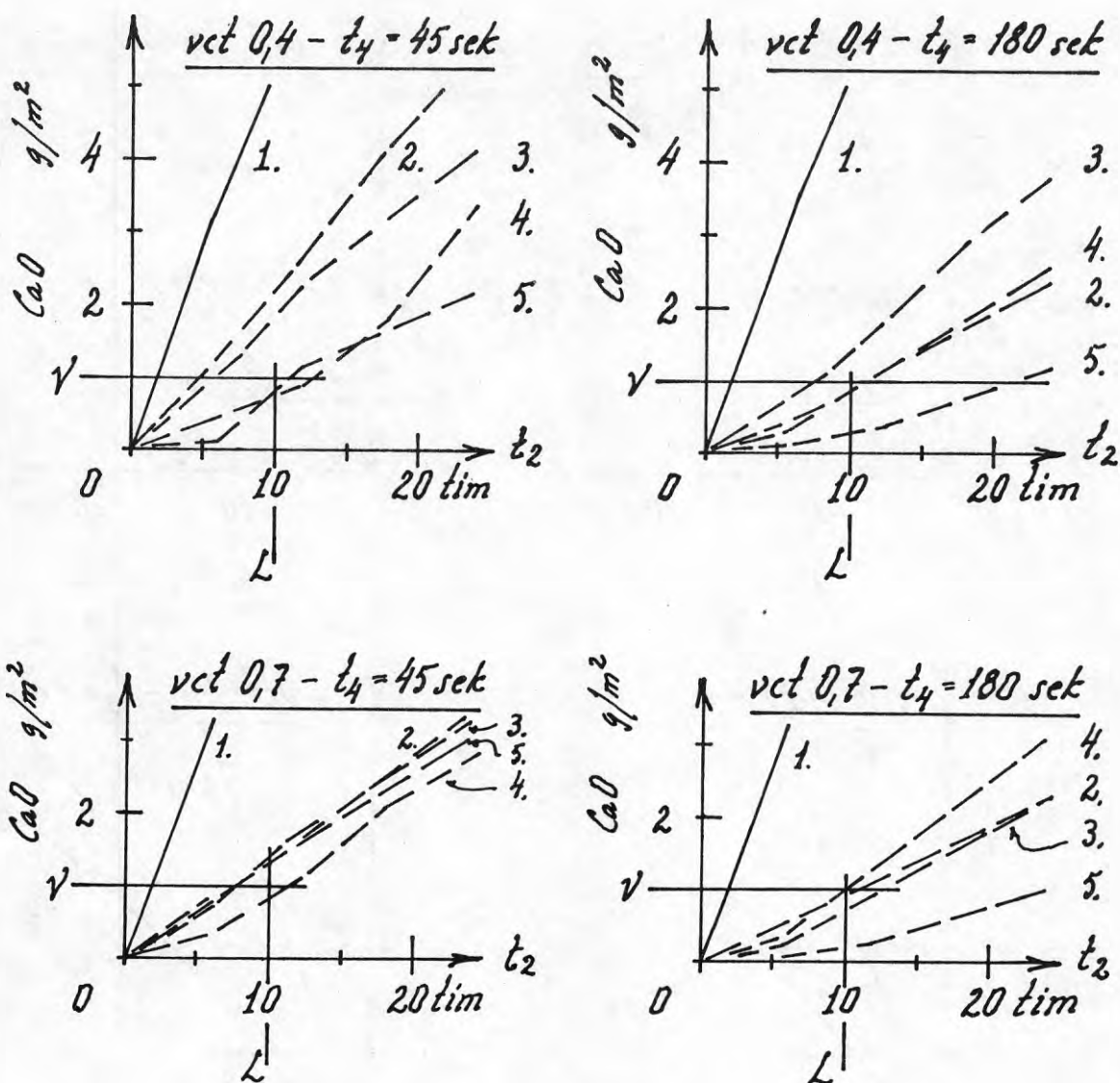


FIG. 65. Inverkan av syratvättning med och utan förvattning. Fosforsyra (H_3PO_4 1:10) på betong med vct 0.4 och saltsyra (HCl 1:20) på betong med vct 0.7. Härdning i torr luft, <65 % rf, vid $20^{\circ}C$. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 1$ dygn. Tidpunkt för syratvättning $t_3 \leq 1$ timme efter avformningen. Syratvättningens varaktighet $t_4 = 45$ sekunder.



1. obehandlad
2. HCl 1:20 (saltsyra)
3. CH₃COOH 1:10 (ättiksyra)
4. H.NH₂SO₃ 1:10 (sulfaminsyra)
5. H₃PO₄ 1:10 (fosforsyra)

FIG. 66. Inverkan av syratvättning. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 20°C och torr luft, <65 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 1$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar. Tidpunkt för syratvättning $t_3 = 1$ dygn efter avformningen. Syratvättningens varaktighet t_4 sekunder.

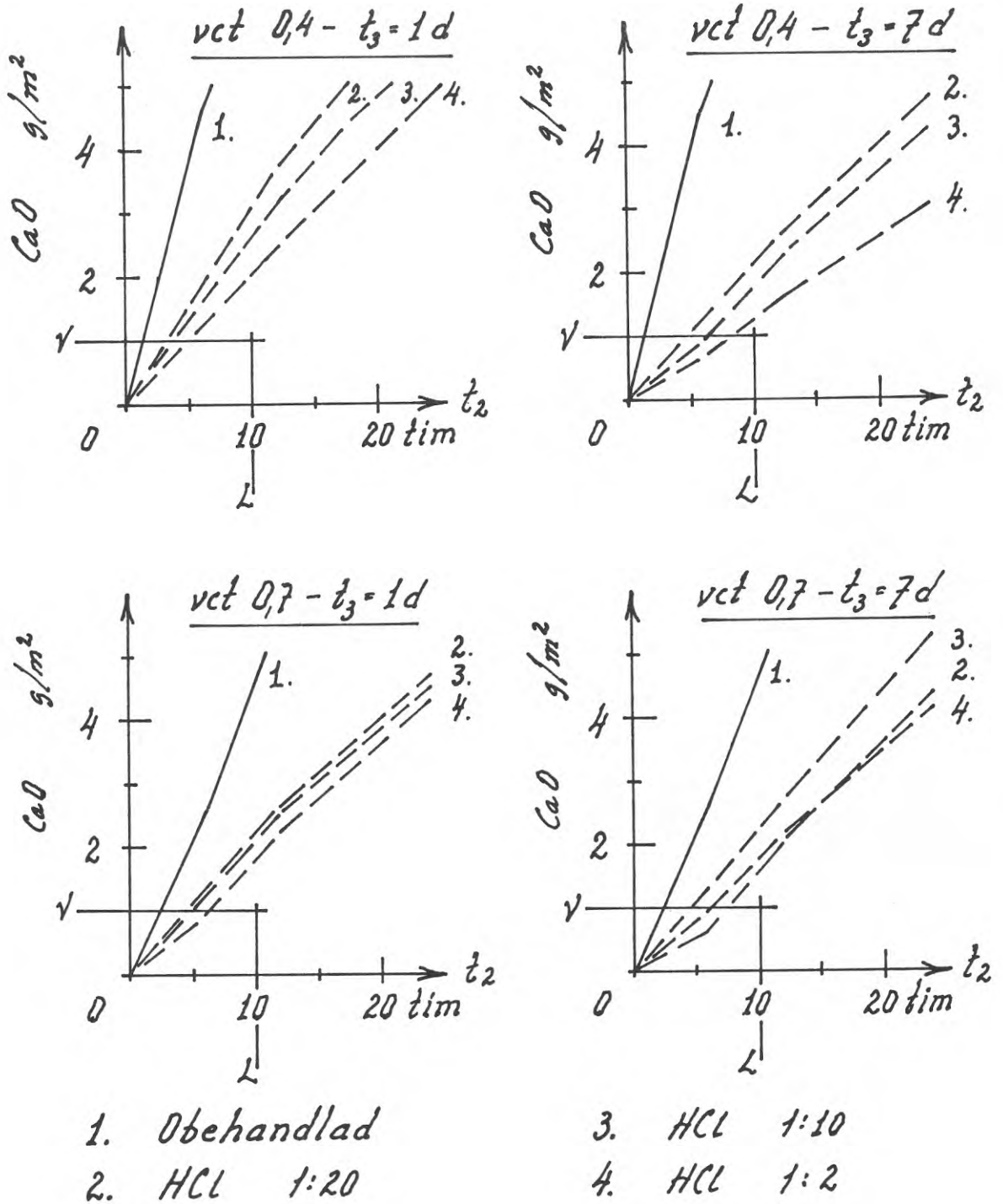


FIG. 67. Inverkan av saltsyratvättning. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 20°C och 40 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 7$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar. Tidpunkt för syratvättning t_3 dygn efter avformning. Syratvättningens varaktighet $t_4 = 45$ sekunder.

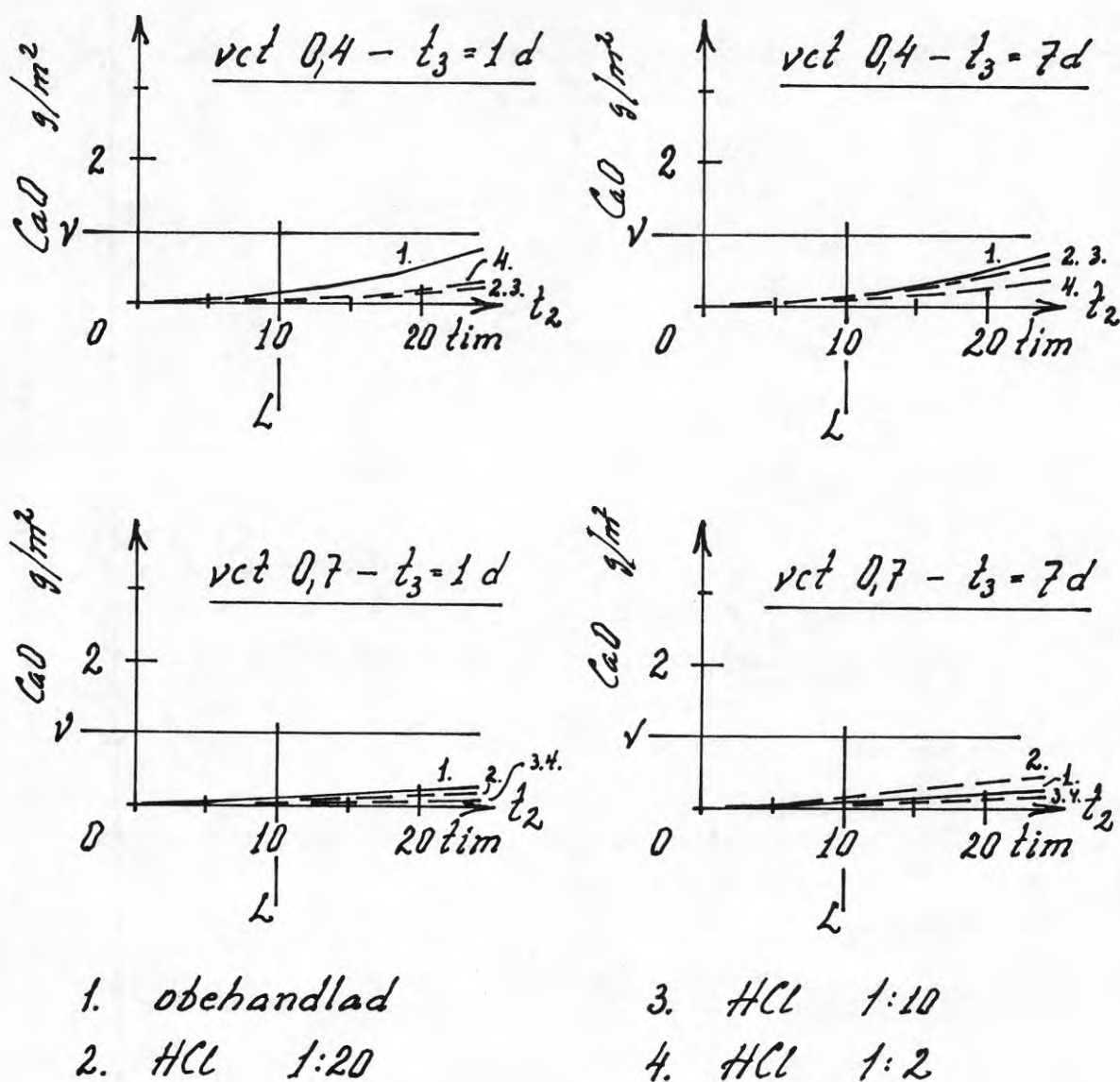


FIG. 68. Inverkan av saltsyrvatvättning. Urlakningsprov på betong med vct 0.4 och 0.7, härdad i 20°C och 95 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 7$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar. Tidpunkt för syrvatvättning t_3 dygn efter avformningen. Syrvatvättningens varaktighet $t_4 = 45$ sekunder.

4. Syratvättning 7 dygn efter avformning.
 Urlakning igångsatt ungefär en timme
 efter behandlingen. Under tiden mellan
 avformning och urlakning skedde härd-
 ningen i 20°C i 40 % eller 95 % rf,
 FIG. 67 - 68

Temperatur och

Relativ fuktighet: se under föregående rubrik

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Avformningstid: $t_0 = 1$ dygn

Observera att alla jämförelseprov utan behandling
 - normalprov - härdats under samma klimatvillkor och
 samma tid som motsvarande syrabehandlade provkroppar.

Resultaten framgår av FIG. 65 - 68 och utvisar, att

syratvättning inte skadade betongens skydds-
 skikt mot kalkutfällning

syrabehandling ger ett skydd mot framtida
 kalkutfällningar

Ökad behandlingstid, 180 s, gav ökad skydds-
 effekt gentemot kortare, 45 s

även kraftigt utspädda lösningar 1:20 och
 1:10 medförde avsevärd reduktion av kalkur-
 lakningen. Koncentrerade lösningar kan skada
 ytan genom friläggning av ballasten.

fosforsyra gav det bästa skyddet av de
 provade syror

verkan blev ungefär densamma om förvatt-
 ningen slopades (se kommentar nedan)

Samtliga provade syror hade gynnsam inverkan på kalkurlakningen. De måste betraktas som behandlingsmedel och inte enbart som rengöringsmedel.

Fosforsyra syns fördelaktigast. Till det bör läggas, att den är skonsammare mot åtskilliga andra material än t ex saltsyra.

Ibland påstås, att saltsyratvättning kan ge upphov till ny kalkutfällning, om inte grundlig förvattning och efterspolning sker (Bisle, 1975). Försöken har, med ett par undantag utan förvattning, följt gängse rekommendationer om vattenbehandling före och efter syratvättningen av följande skäl. För att slippa djupare inträngning av syra i betongen bör förvattning ske. Sköljning med vatten efter syrabehandlingen är till för att missfärgning av vattenlösliga salter, t ex klorider, skall undvikas när betongytan torkar.

Några syratvättade ytor testades med pölprov och gav gott resultat, se FIG.11 i Bilaga 2. En alltför hög syrakoncentration medför friläggning av ballasten, vilket ändrar ytans struktur.

Ytterligare kommentarer finns i 7. VERKAN AV MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING, sid 228.

6.4.3.11 Kombinerad behandling

Goda resultat erhöles var för sig med koldioxidbehandling, sid 144 och med en del ytbehandlingsmedel, t ex natriumtripolyfosfat ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) eller vattenglas, sid 166 och 164. Några kompletterande urlakningsförsök genomfördes för att utröna om en kombinerad härdning med ytbehandlingsmedel följd av lagring i luft med förhöjd koldioxidhalt skulle vara fördelaktigare än respektive behandling var för sig. Samtidigt gjordes några försök, där provkropparna förvärmades före nedsänkningen i ytbehandlingsmedel.

Försöksdata följer nedan (h = timme).

- Behandling 1: 1 h i vattenglas + 1.5 h i 5 % CO₂
- Behandling 2: 1 h i vattenglas + 1.5 h i 10 % CO₂
- Behandling 3: Uppvärmning till 70°C + 1 h i vattenglas + 1 dygn i 20°C och 40 % rf
- Behandling 4: 1 h i Na₅P₃O₁₀ + 1.5 h i 5 % CO₂
- Behandling 5: 1 h i Na₅P₃O₁₀ + 1.5 h i 10 % CO₂
- Behandling 6: Uppvärmning till 70°C + 1 h i Na₅P₃O₁₀ + 1 dygn i 20°C och 40 % rf

Klimat vid koldioxidbehandling: 60°C och 80 % rf

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Avformningstid: $t_0 = 1$ dygn

Provkropparna förvarades efter behandlingen inpackade i plast till skydd mot luftens koldioxid intill urlakningens start.

Som jämförelseobjekt användes provstycken som förvarats i 20°C och 80 % rf i 3 resp 24 timmar. De hade ingen speciell behandling därutöver.

Resultaten, se även FIG. 69 - 70, visade att

behandlingarna i samtliga fall varit effektiva. Kalkurlakningen var avsevärt mindre än för jämförelseproven med 3 h härdning och av samma storleksordning som för jämförelseproven med 24 h härdning

Den kombinerade behandlingen gav på kort tid en väsentlig reducering av kalkurlakningen. Ur praktisk synpunkt torde den knappast vara berättigad, eftersom de enkla behandlingarna var för sig i stort sett ger samma resultat.

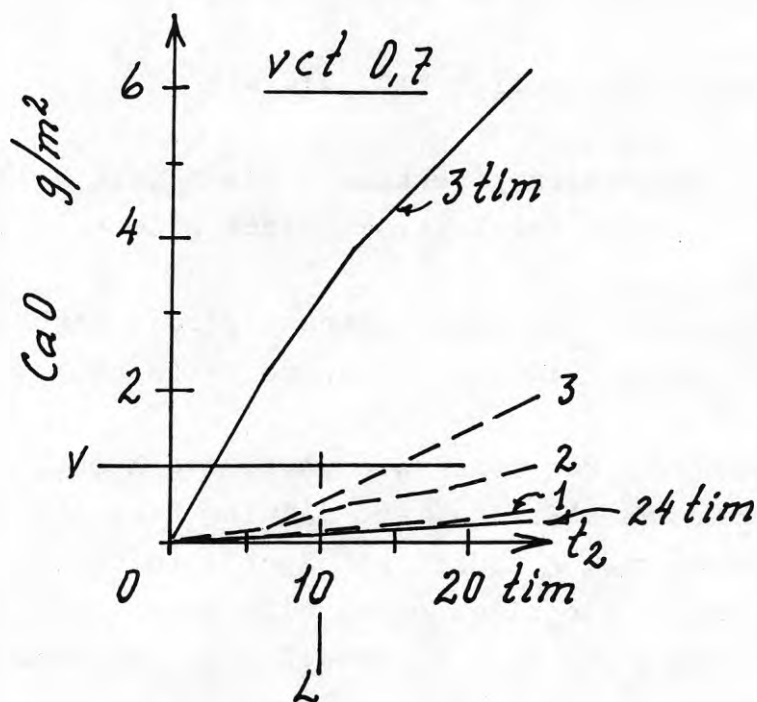
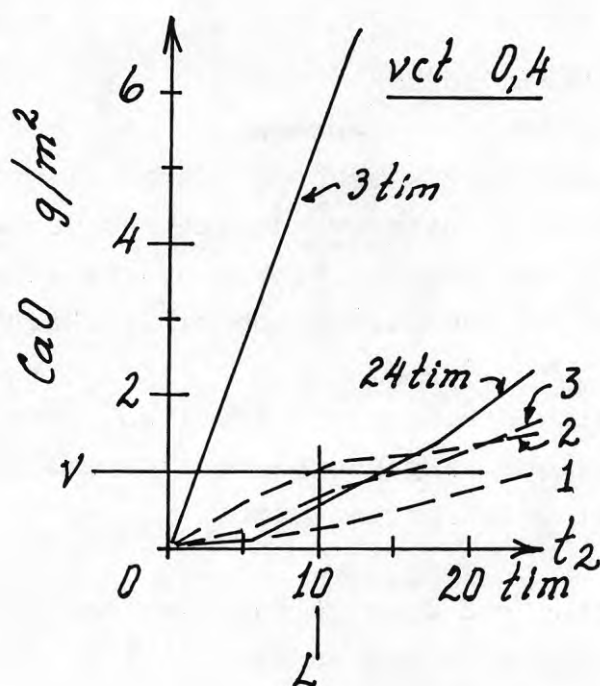


FIG. 69. Kombinerad behandling av vattenglas och värme med och utan ökad koldioxidhalt i luften. Urlakningsprov. Kurvbeteckningarna 1, 2 och 3 avser behandling enligt texten.

6.4.3.12 Praktiska försök

Från en betongvarufabrik erhöles ett antal svarta takpannor för urlakningsprov. Hälften av dem var omålade och hälften målade. Provkropparna indelades i tre serier efter behandling och tillverkning.

Serie A Härdning ett dygn vid fabriken. Därefter isolerades takpannorna mot luftens koldioxid intill urlakningens start.

Serie B Härdning ett dygn på fabriken och därefter 3 dygn i 20°C och ungefär 80 % rf före urlakningen.

Serie C Enligt A. Dessa takpannor tillverkades vid annan tidpunkt och eventuellt var målningen utförd med en annan färgtyp än i A och B.

Resultaten blev enligt FIG. 71, att

målningen påverkade i vissa fall kalkurlakningen märkbart, men inte på ett entydigt sätt

målningen tycks kunna fördröja karbonatiseringen vid efterföljande härdning

Målningens verkan synes vara på gott och ont. Från praktiken har erfarits, att målning har minskat kalkutfällningarna. Försöken motsäger inte detta. De ger emellertid i sin ringa omfattning ingen förklaring till när målning är till fördel eller nackdel.

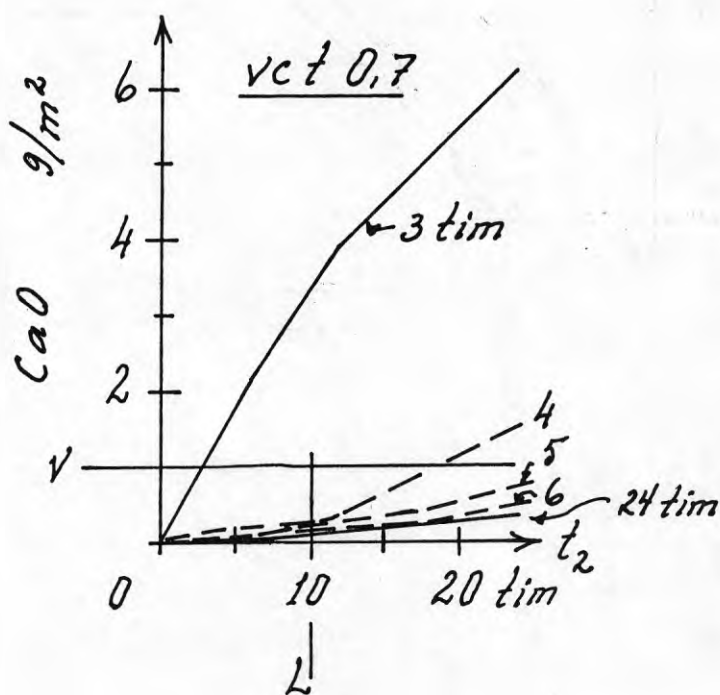
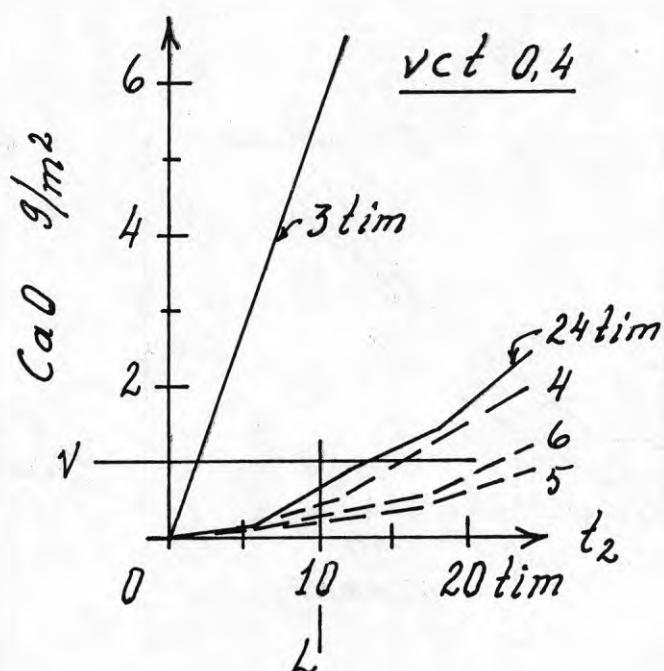


FIG. 70. Kombinerad behandling av natriumtripolyfosfat och värme med och utan ökad koldioxidhalt i luften. Urlakningsprov. Kurvbeteckningarna 4, 5 och 6 avser behandling enligt texten.

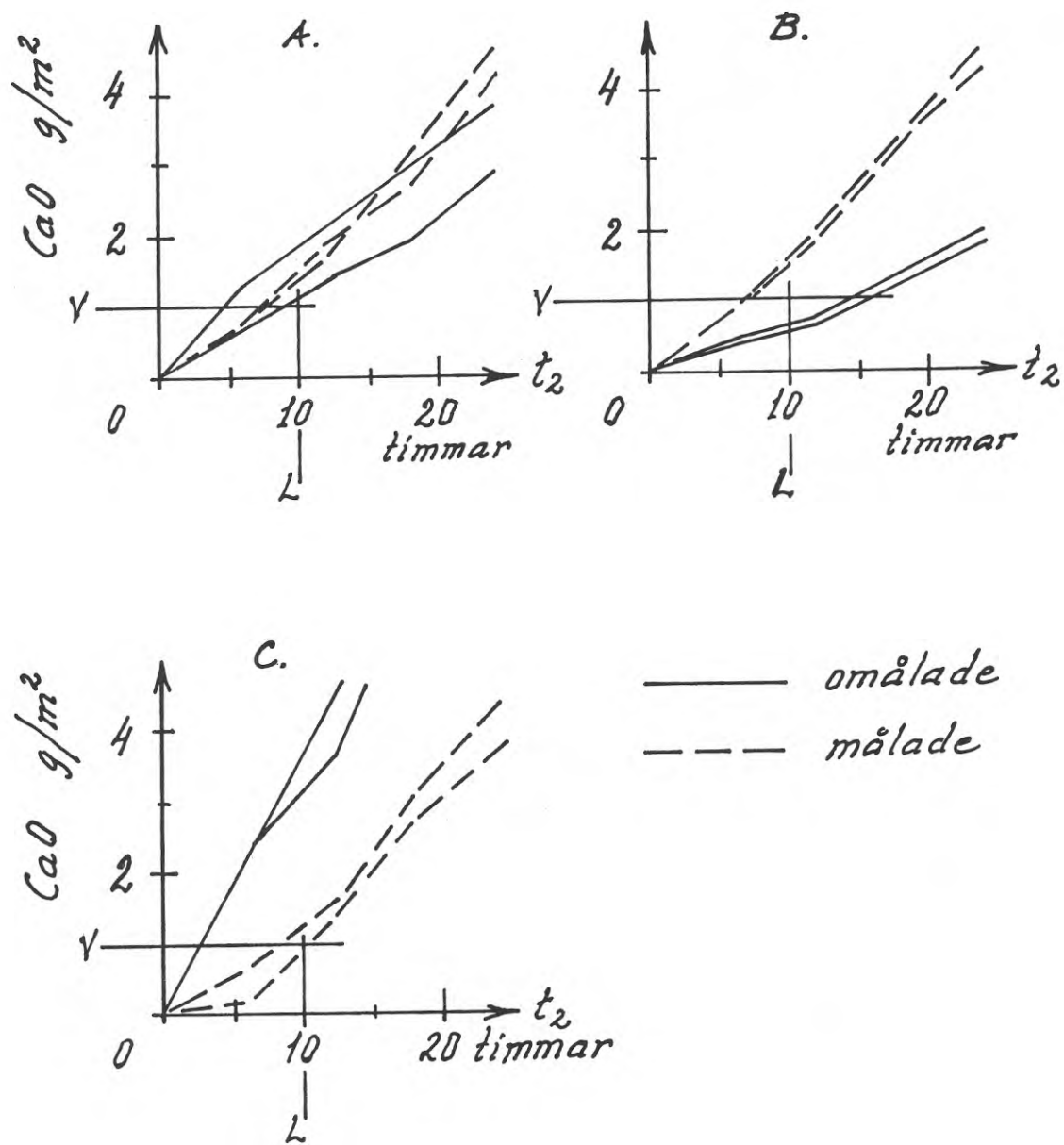


FIG. 71. Inverkan av målning på betongtakpannor.

6.4.4 Tillsatsmedel

En tänkbar lösning på kalkutfällningsproblemet vore att använda något tillsatsmedel vid betongtillverkning. En del ganska begränsade försök har gjorts för att utröna effekten av några tillsatsmedel.

6.4.4.1 Aluminatcement och puzzolana ämnen

Två specialcement har jämförts med ett standardcement, Slite Std. Det ena, Specialcement 1, var baserat på Skövde Std, i vilket 20 % var ersatt med aluminatcement och ett ämne med puzzolaneffekt. Det andra, Specialcement 2, bestod av Skövde SH, i vilket 10 % ersatts med ett ämne med puzzolaneffekt. Betongblandningarna med specialcement hade samma cementmängd (inklusive aluminatcement och puzzolanämne), som de med Std-cement och hade i övrigt lika sammansättning.

Försöken utfördes enligt följande villkor.

Cementsort:	Slite Std Specialcement 1 Specialcement 2
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	40 och 95 %
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn

Resultaten, FIG. 72, blev att

kombinationen av kalkrikt cement med speciella andra ämnen gav en tydlig reduktion av den urlakade kalkmängden

de tillsatta mängderna av aluminatcement och puzzolanämne reducerade inte kalkmängden så mycket, att risken för synlig kalkutfällning försvann

vct 0.4 gav större urlakning än vct 0.7

hög relativ fuktighet (95 %) reducerade kalkurlakningen väsentligt. Vid låg relativ fuktighet blev reduktionen ringa.

Undersökningen stöder tidigare erfarenheter (Blümel och Jung, 1962), dvs att kalkbindande material av ovannämnda typer och mängder för Std-cement är otillräckliga för att hindra kalkutfällning.

6.4.4.2 Stearinsyra och kommersiellt tillsatsmedel

Försök gjordes med stearinsyra som tillsatsmedel. Använd mängd var 0,5 % av cementvikten. Jämförande prov utfördes med ett kommersiellt tillsatsmedel, som förmodades innehålla stearinsyra eller derivat därav. Dosering var i detta fall 0.5 % av torrbrukets vikt. Övriga försöksvillkor var

Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	40 och 80 %
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 1$ dygn

Resultatet, som för vct 0.7 framgår av FIG. 73, visade att

effekten av de provade tillsatsmedlen var ingen eller ringa

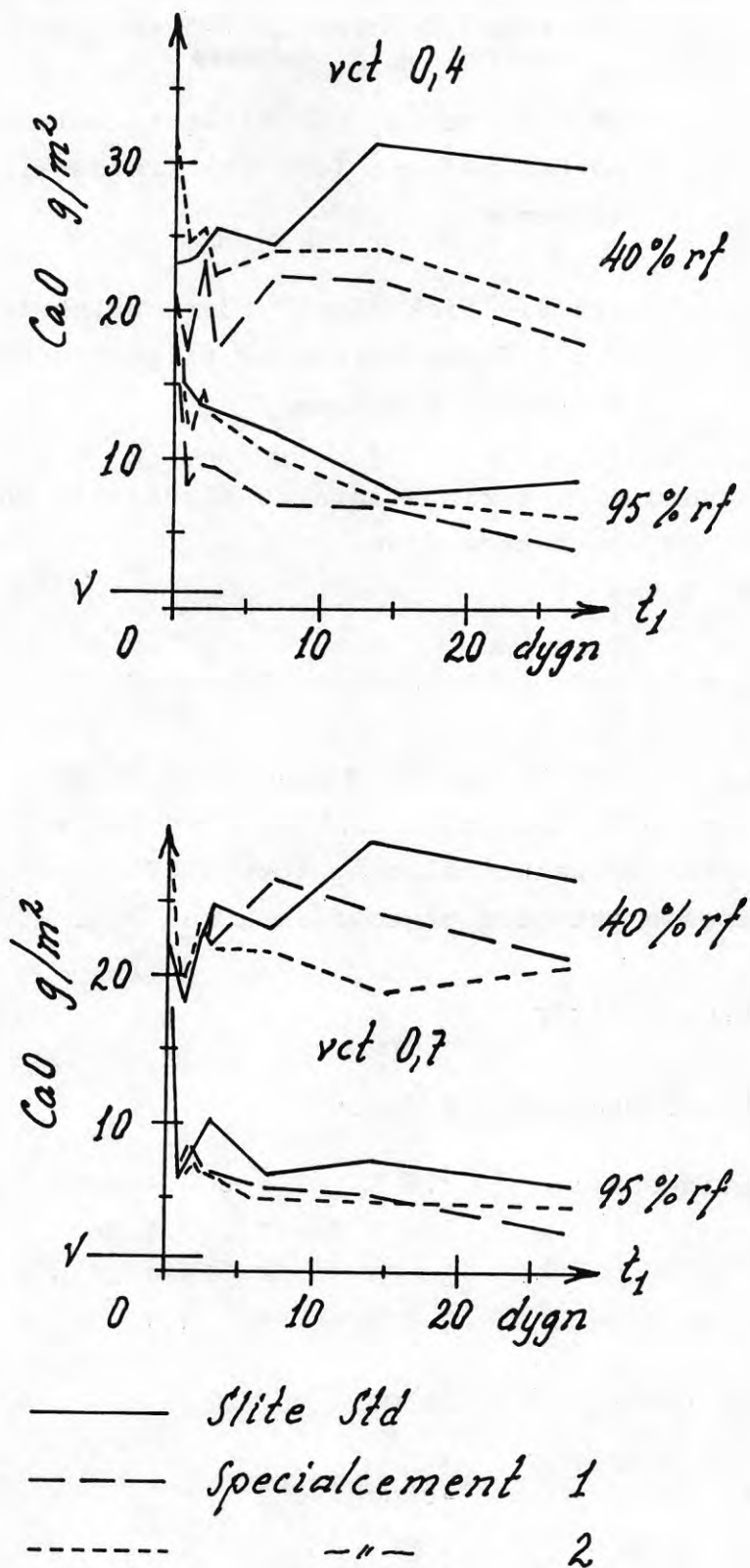


FIG. 72. Inverkan av aluminatcement och puzzolana ämnen. Specialcement 1 och 2 enligt texten. Urlakningsprov.

vid 20°C och 80 % rf blev resultatet märkbart sämre med än utan tillsatsmedlen

ytor av betong med tillsatsmedlen blev porösa med ett icke tillfredsställande utseende

vct 0.4 fick något större urlakning än vct 0.7 men verkan av tillsatsmedlen var i princip densamma

På grund av det ringa antalet försök får endast försiktiga slutsatser dras.

6.4.4.3 Luftporbildande tillsatsmedel

Ofta används luftporbildande tillsatsmedel i betong. Eftersom de ibland tillskrivs fördelen att reducera risken för kalkutfällning (Ct0, 1972) ansågs det av intresse att göra några försök med dem.

Försöksvillkor

Vattencementtal: 0.4 och 0.7

Luftinnehåll:	3.5 %	för vct	0.4	utan tillsatsmedel
	7 %	" "	0.4	med "
	5 %	" "	0.7	utan "
	8 %	" "	0.7	med "

Temperatur: 20°C

Relativ fuktighet: 40 och 95 %

Avformningstid: $t_0 = 1$ dygn

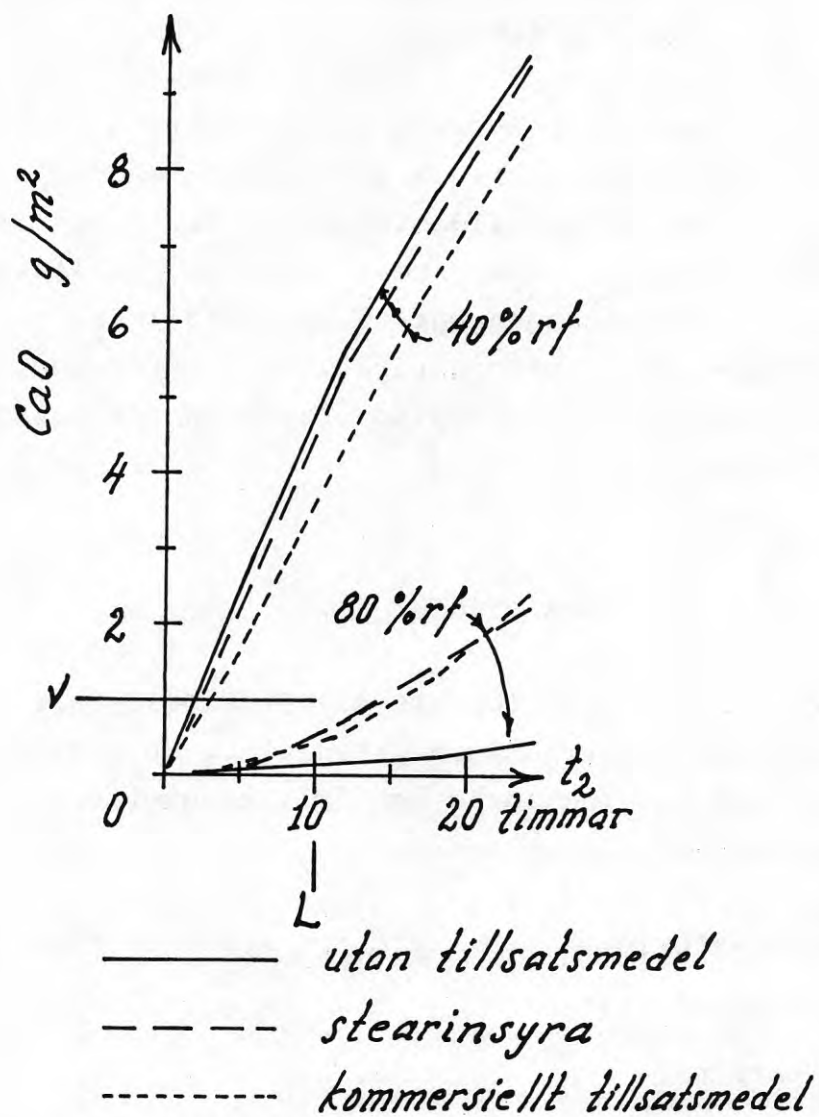


FIG. 73. Inverkan av stearinsyra och ett kommersiellt preparat som tillsatsmedel. Vct 0.7. Urlakningsprov.

Resultaten, FIG. 74 - 75 gav att

inverkan på kalkurlakningen var ingen eller ringa.

Försöksresultatet tycks stå i motsats till tidigare goda erfarenheter. Någon motsägelse behöver dock inte finnas. De luftporbildande medlen kan ha en indirekt verkan, som inte kom fram i försöken. Tillsatsmedlen ger i regel betongen bättre sammanhållning och mindre tendenser till vattenseparation. Hindrar man därigenom fritt vatten på betongytan är risken för kalkutfällning reducerad.

6.4.4.4 Kalciumklorid

Det varnas ibland för att kalciumklorid ökar risken för utfällningar. Några provplattor göts därför med och utan kalciumklorid och urlakningsprov gjordes. Försöksdata följer nedan.

Kalciumklorid:	0 och 1.5 % av cementvikten
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	20°C
Avformningstid:	$t_0 = 1$ dygn
Härddningstid:	$t_1 =$ ingen

Resultatet blev som FIG. 76 visar, att

inverkan på kalkurlakningen var ingen eller ringa

Eftersom försöken endast avsåg själva avformningsstadiet, erhöles ingen uppgift om eventuell inverkan under fortsatt härdning. I de inledande urlakningsförsöken ingick även några provstycken innehållande kalciumklorid (1,5 % av cementvikten) och med viss

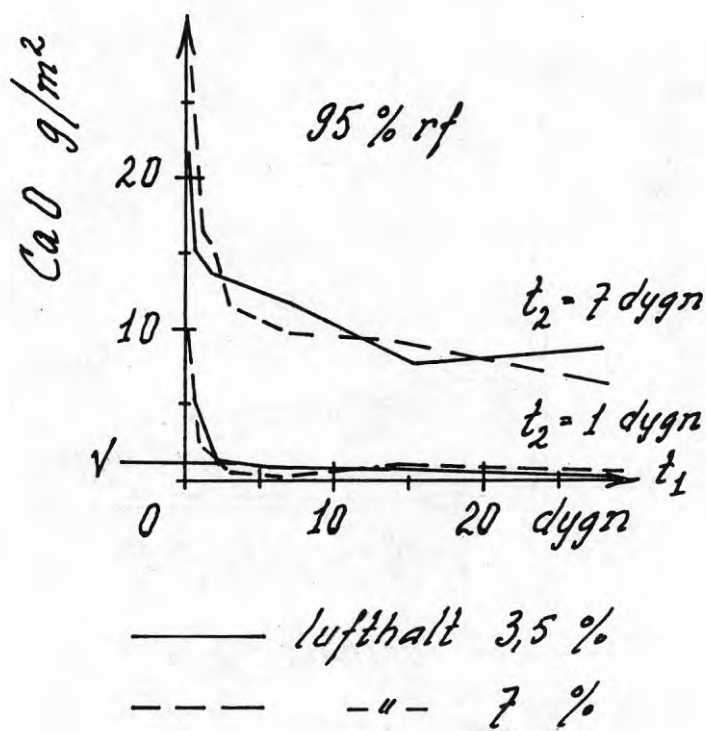
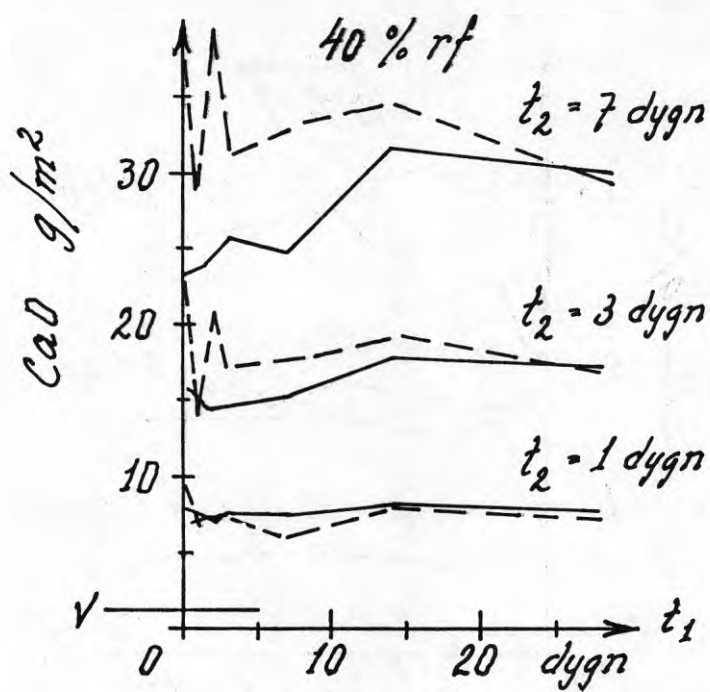
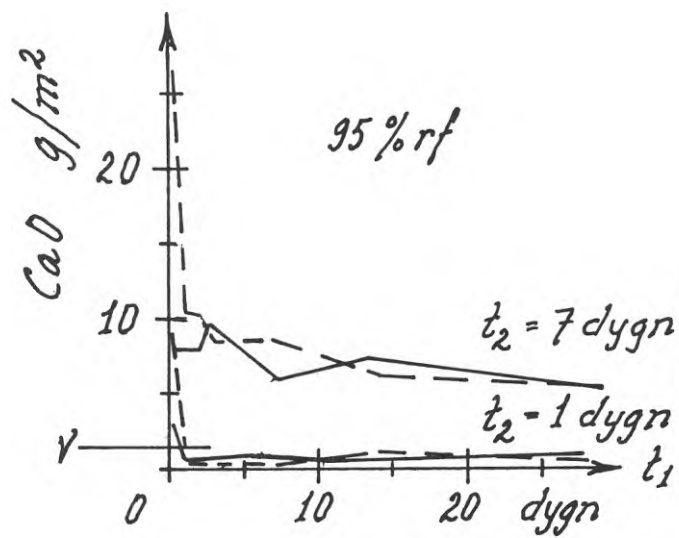
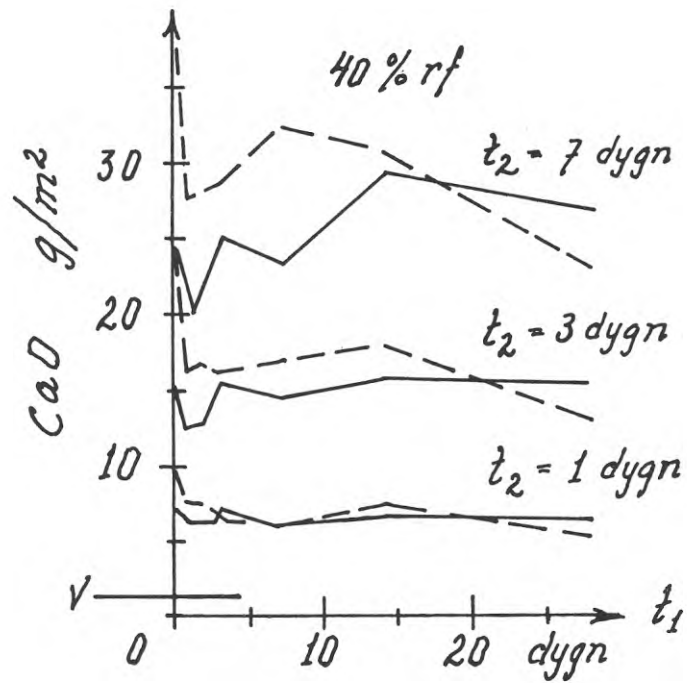


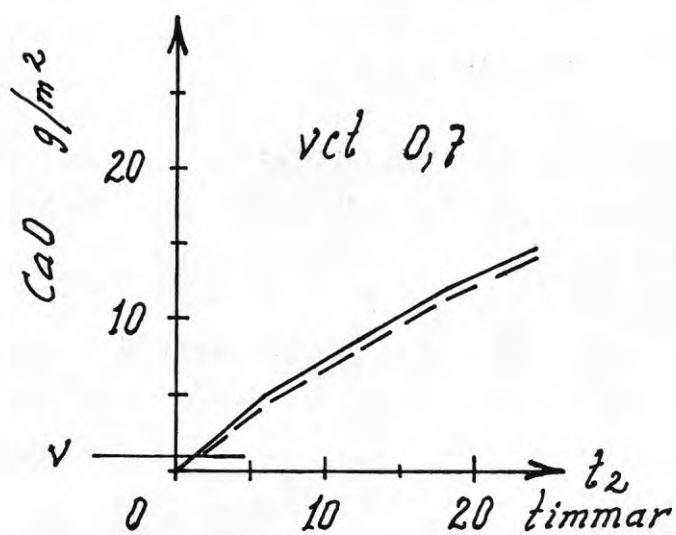
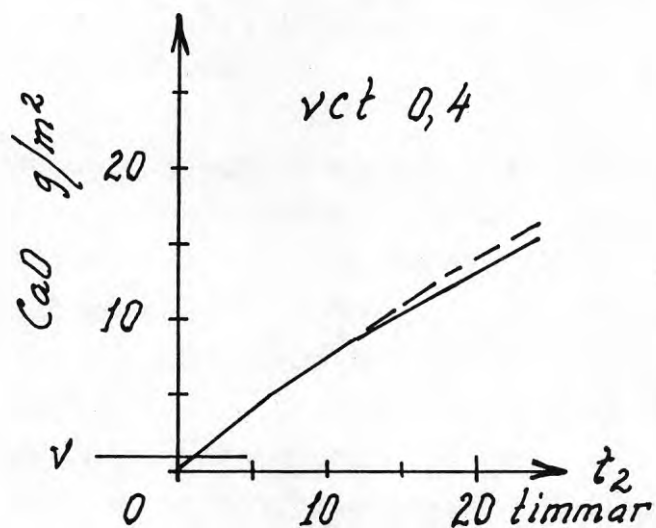
FIG. 74. Inverkan av förhöjd lufthalt i betongen.
Vct 0.4. Urlakningsprov.



— lufthalt 5%

- - - - - " 8%

FIG. 75. Inverkan av förhöjd lufthalt i betongen.
Vct 0.7. Urlakningsprov.



————— ingen kalciumklorid
 - - - - - 1,5% — " —

FIG. 76 Inverkan av kalciumklorid. Urlakningsprov.

härddning efter avformningen. Samtliga dessa prov visade en påtagligt större kalkurlakning än motsvarande prov utan kalciumklorid. Det gällde såväl för vct 0.4 som vct 0.7, och både vid 40 % och 90 % rf.

Några plattor tillhörande pölproven innehöll också kalciumklorid. På dessa erhöles svaga missfärgningar i form av ljusa slöjor utan att vatten påfördes. Varningen för kalciumklorid i fråga om utfällning fick således ett visst stöd även av pölproven. Någon kontroll om utfällningen bestod av kalciumkarbonat gjordes inte. Man får inte bortse från, att cementsorter med olika alkalihalt kan röna olika inverkan av kalciumklorid. Samtliga provstycken i detta avsnitt var tillverkade med Slite Std.

6.4.5 Sammanfattning

De verkställda försöken rörande inverkan på kalkutfällning av olika metoder och medel gav i korthet följande resultat:

Värmehärddning påskyndar vid lämplig relativ fuktighet uppbyggnaden av ett skyddsskikt i betongytan

Koldioxidbehandling är i kombination med lämpligt klimat en verksam metod för att göra betong resistent mot kalkurlakning

Vissa ytbehandlingsmedel minskar väsentligt kalkurlakning, antingen genom att accelerera en gynnsam karbonatisering eller genom att förhindra karbonatbildning.

Vatten syns i vissa fall tjäna som ett skyddsmedel

Syratvättning tjänar inte enbart till att ta bort uppkomna kalkutfällningar. Den skyddar även mot framtida sådana.

Om en viss del av portlandcement byts ut mot aluminatcement eller puzzolana ämnen erhålls en viss reduktion av kalkurlakningen. Övriga provade tillsatsmedel gav ingen eller ringa fördel.

6.5 BETONGYTANS UPPTAGNING AV KOLDIOXID

I Litteraturen uppges, att det skydd mot kalkutfällning som betongytan får under härdningen efter avformning utgörs av kalciumkarbonat bildat genom inverkan av luftens koldioxid. Under projektets gång har detta godtagits efter en enstaka kontroll och något skäl att betvivla påståendet har inte funnits. Det skulle emellertid vara en icke betydelselös komplettering av projektarbetet, om man kunde konstatera hur mycket koldioxid betongytan upptar under den första tiden efter avformningen.

Till en början gjordes vissa försök att uppskatta karbonatiseringsdjupet med hjälp av tunnslip. Det visade sig svårt, huvudsakligen på grund av provstyckenas röda färg som omöjliggjorde en tillförlitlig bestämning av karbonatiseringens inträngning. I stället användes en metod för extraktion med saltsyra av den i betongytans karbonat bundna koldioxiden.

6.5.1 Försöksmetod och omfattning

På den betongyta, vars koldioxidinnehåll skulle bestämmas, klistrades ett plaströr. Detta fylldes delvis med saltsyra och utvecklad mängd koldioxid (CO_2) uppmättes som FIG. 77 visar. Efter 15-20 minuter hade i stort sett all koldioxid utdrivits, se diagrammet FIG. 78. Om man antar att fullständig karbonatisering har skett, kan koldioxidmängden omräknas till karbonatiseringsdjup, L_c , enligt FIG. 78. En sådan omräkning har skett vid den resultatredovisning som följer nedan. (Tillvägagångssättet exemplifieras i 6.5.6 på sid 222.) Där har kalkurlakningen, bestämd på andra men likadana provstycken, ställts i relation till karbonatiseringsdjupet.

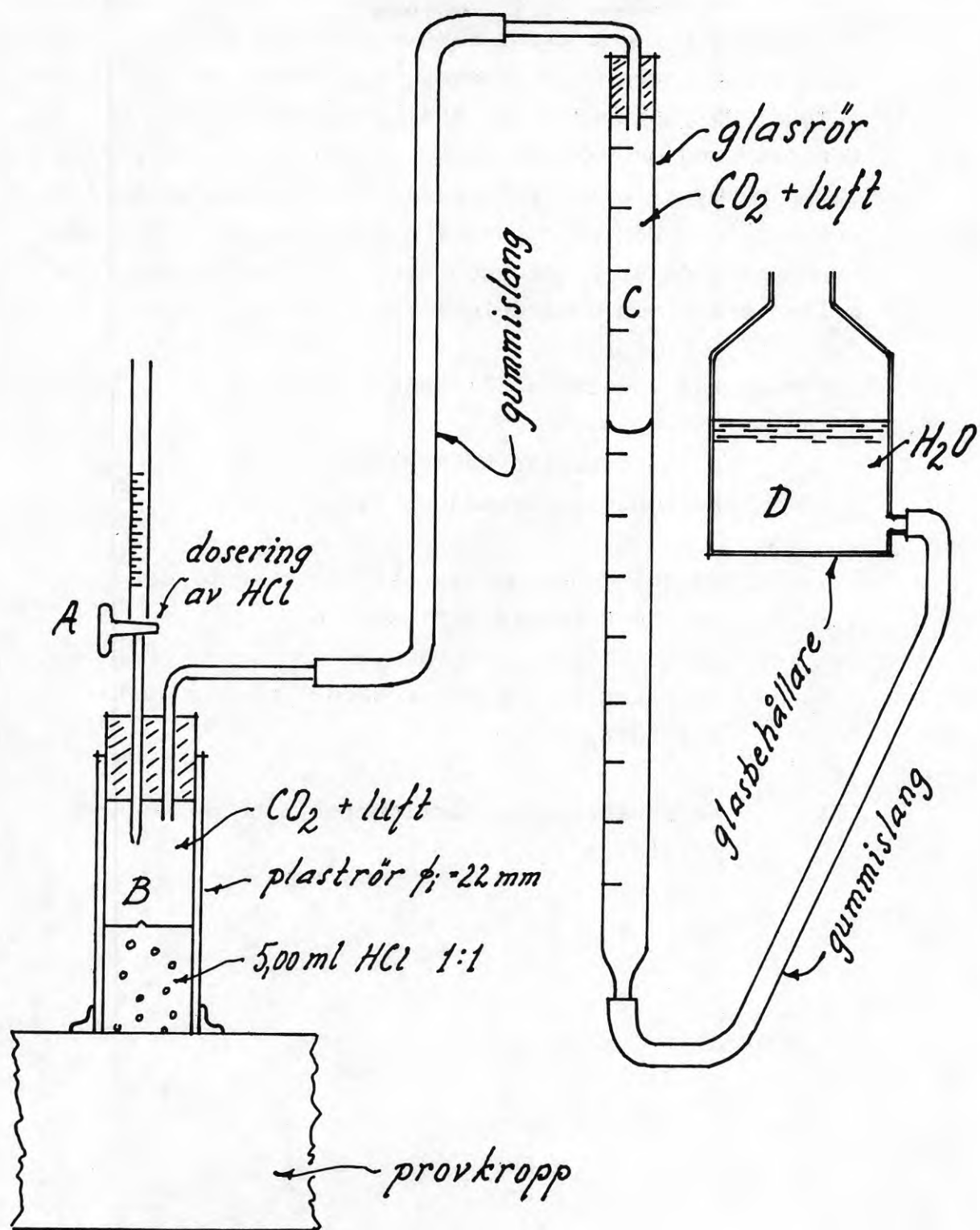


FIG. 77. Apparatur för bestämning av betongytans koldioxidinnehåll.

Åtskilliga försök gjordes, eftersom de både var lätta att utföra och det fanns riklig tillgång på provstycken från urlakningsproven. Dessa genomfördes, som tidigare nämnts, på plattornas mellandelar, FIG. 15, sid 98. Försöken med extraktion av koldioxid skedde huvudsakligen på över- eller underdelar men så nära plattmitt som möjligt. Därigenom undveks i görligaste mån verkan av de skillnader i betongen som tidigare konstaterats mellan över- och underdelar, FIG. 13, sid 90.

Försöken kan indelas i följande fyra avsnitt:

Samband mellan kalkurlakning och karbonatiseringsdjup, 6.5.2

Härdbningsbetingelsernas inverkan på den tidiga karbonatiseringen, 6.5.3

Inverkan av behandlingsmedel på karbonatiseringen, 6.5.4

Karbonatiseringshastigheten i härdbningens första skede, 6.5.5

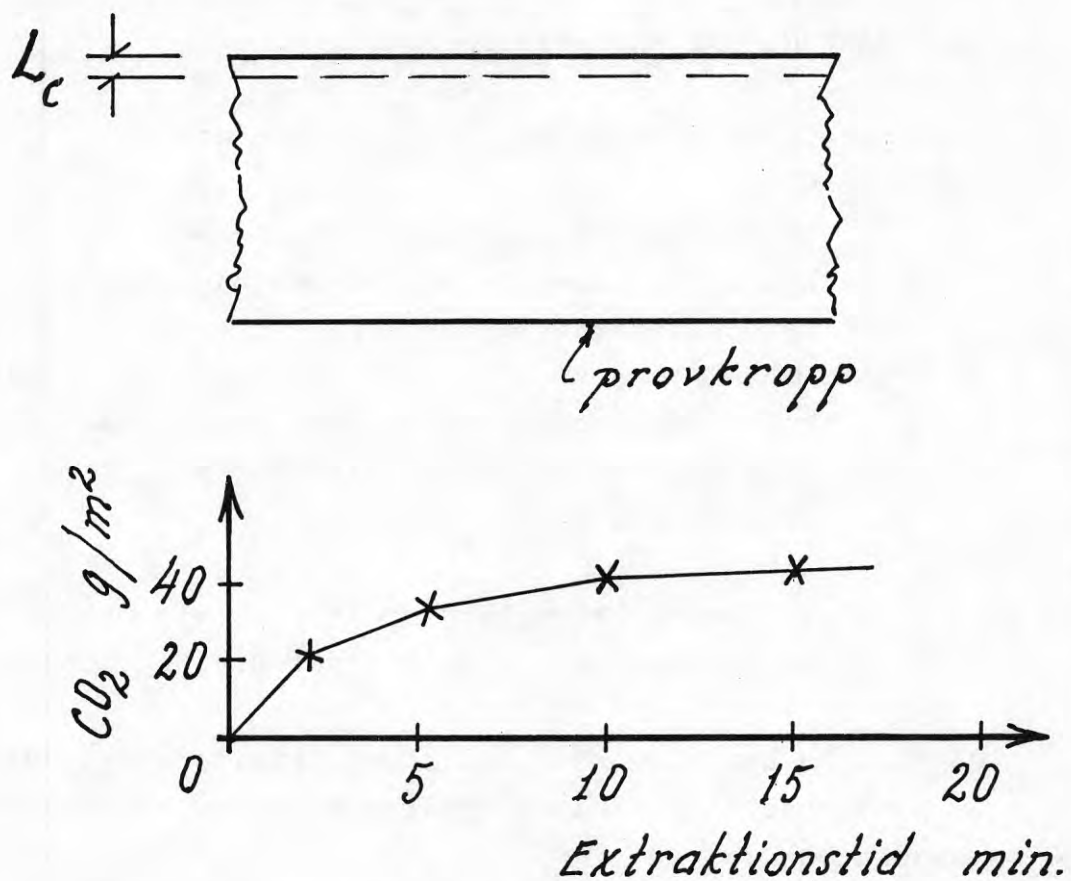


FIG. 78. Med saltsyra utdriven koldioxidmängd som funktion av extraktionstiden. Totala koldioxidmängden kan omräknas till karbonatiseringsdjup.

6.5.2 Kalkurlakning och karbonatiseringsdjup

Försöken genomfördes på provkroppar med mycket varierande härdningsbetingelser beträffande temperatur, relativ fuktighet och koldioxidhalt. Avsikten var i första hand att konstatera ett eventuellt samband mellan kalkurlakning och av betongytan upptagen koldioxidmängd, dvs karbonatiseringen.

Resultatet som framgår av FIG. 79 visar att

kalkurlakningen minskade med ökande koldioxidupptagning av betongytan, dvs karbonatiseringsdjupet, L_c

kalkurlakningen avtog snabbt med ökande karbonatisering intill ett djup av ungefär 0,2 mm

för samma kalkurlakning krävdes ett mindre karbonatiseringsdjup vid vct 0.4 än vct 0.7

På FIG. 79 har kurvorna till höger dragits med ledning av punkterna till vänster, vilka motsvarar försöksvärdena.

Det innebär ingen motsägelse gentemot tidigare försök, att vct 0.4 kräver ett mindre karbonatiseringsdjup än vct 0.7 för samma kalkurlakning. Vct 0.4 kräver mer koldioxid än vct 0.7 för fullständig karbonatisering av lika tjocka skikt, och vidare fördröjs koldioxidens inträngning i den tätare betongen mera än i den porösa.

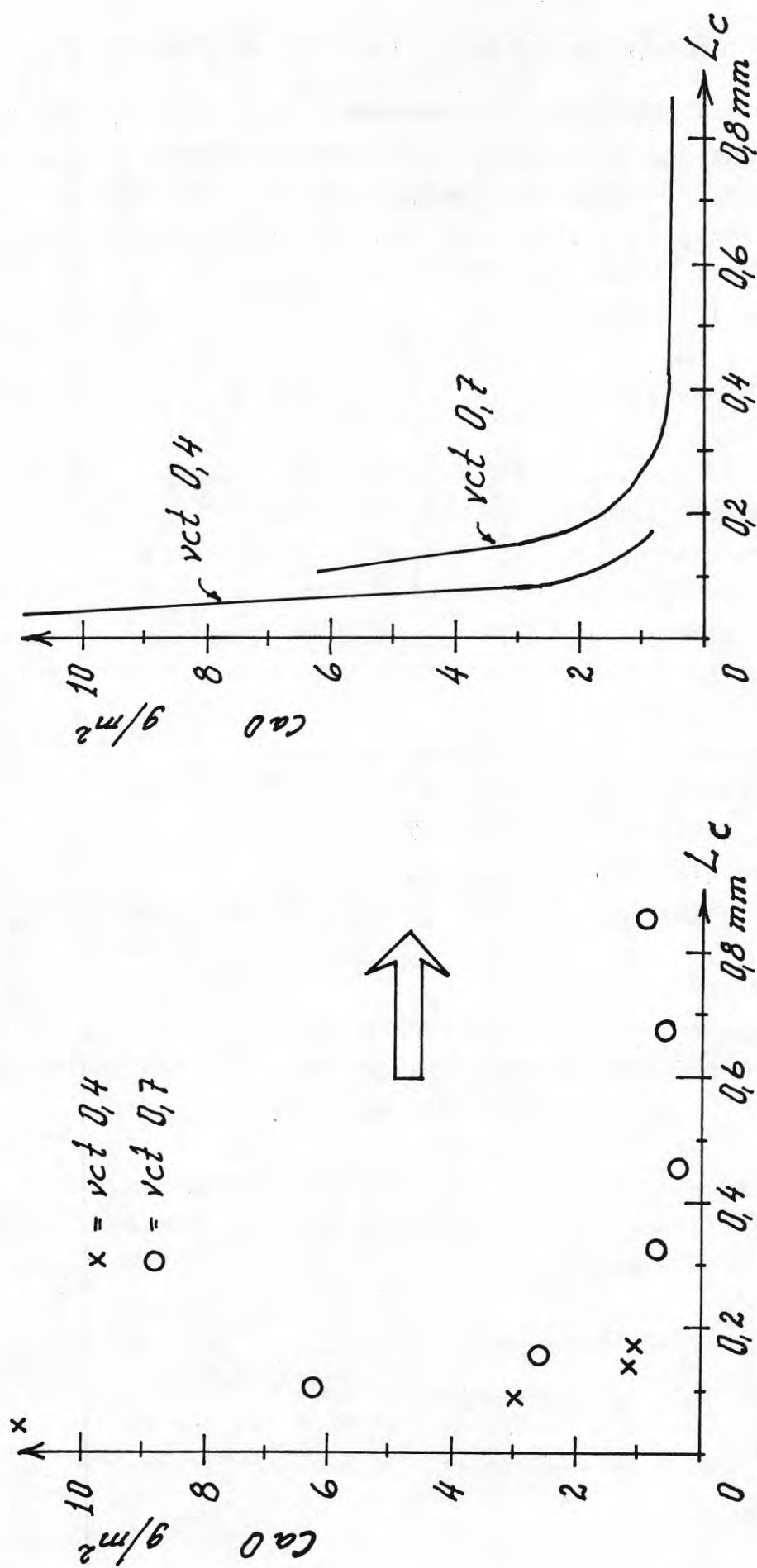


FIG. 79. Kalkurlakningen som funktion av karbonatiseringsdjupet L_c . Kurvorna till höger är en approximation av mätvärdena (punkterna) till vänster.

6.5.3 Härdningen och tidig karbonatisering

För att utröna en eventuell inverkan av härdningsklimat och härdningstid på koldioxidupptagningen utfördes extraktionsprov enligt ovan under följande betingelser.

Delserie 1

Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	80 %
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 0, 1$ och 7 dygn
Urlakningstid:	$t_2 = 24$ timmar (4 x 6 h)

Delserie 2

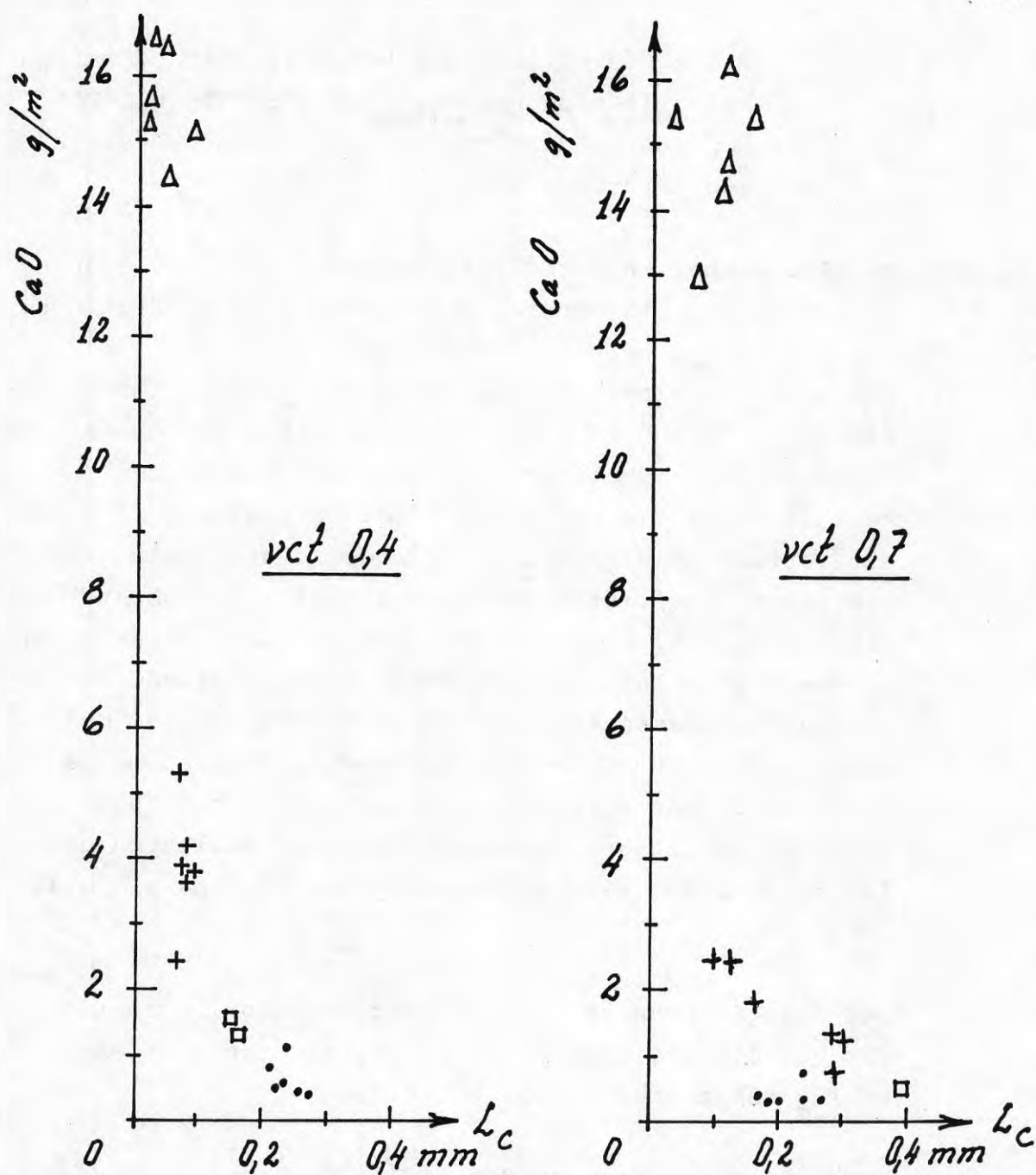
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	5°C
Relativ fuktighet:	95 %
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 15$ och 40 timmar samt $t_1 = 7, 14$ och 28 dygn

Provkropparna för den lägre härdningstemperaturen, 5°C, göts vid 20°C och kvarhölls i den temperaturen under 4 timmar. Därefter placerades de i avsett klimat.

Avvikelserna från ovan angivna temperaturer och relativa fuktigheter var av samma storleksordning som anges i TAB. 3 på sid. 36.

Resultaten, som även finns på FIG. 80 - 81, blev att

vid 20°C bekräftades erfarenheterna från föregående avsnitt, se sid. 214.



Δ provkropp vid avformningen

$+$ — " — härdad i $+20\text{ }^\circ\text{C}$ och 80% rf $t_1 = 1$ dygn

\cdot — " — — " — $+20\text{ }^\circ\text{C}$ " 80% rf $t_1 = 7$ — " —

\square { — " — — " — $+20\text{ }^\circ\text{C}$ " 80% rf $t_1 = 1$ — " —

{ behandlad med ammoniumkarbamat ($\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$)

FIG. 80. Kalkurlakningen som funktion av karbonatiseringsdjupet L_c vid olika grad av härdning.

vid 5°C erhöjls inget entydigt samband mellan kalkurlakning och karbonatiseringsdjup. För konstant sådant varierade urlakad CaO starkt med härdningstiden.

På FIG. 81 har kurvorna till höger dragits med ledning av punkterna till vänster som representerar mätvärden.

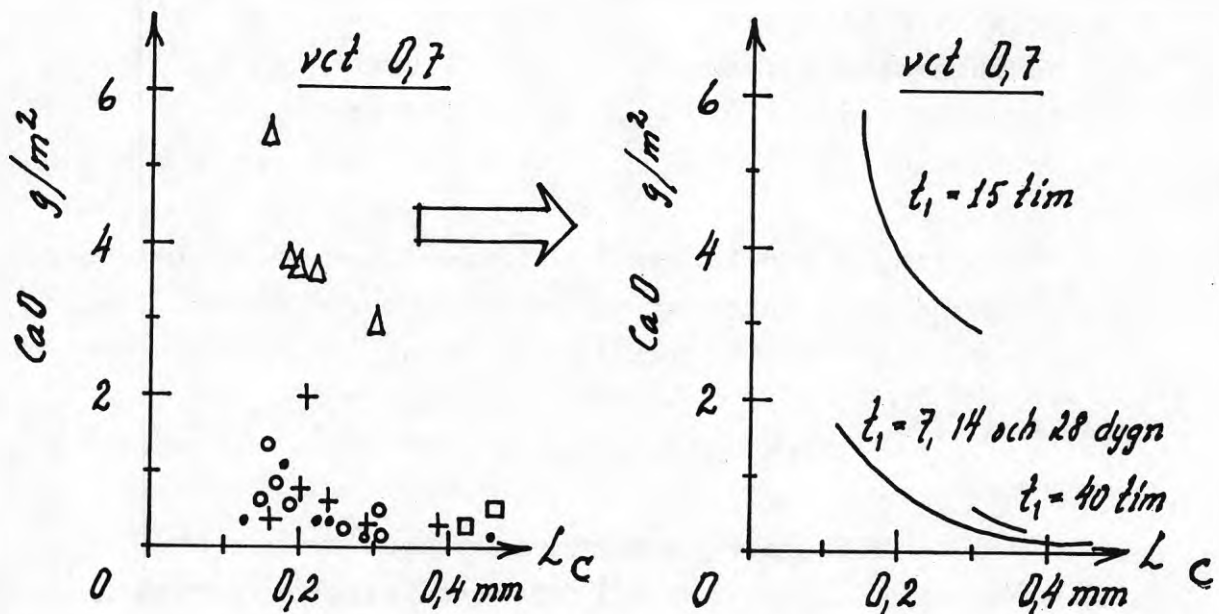
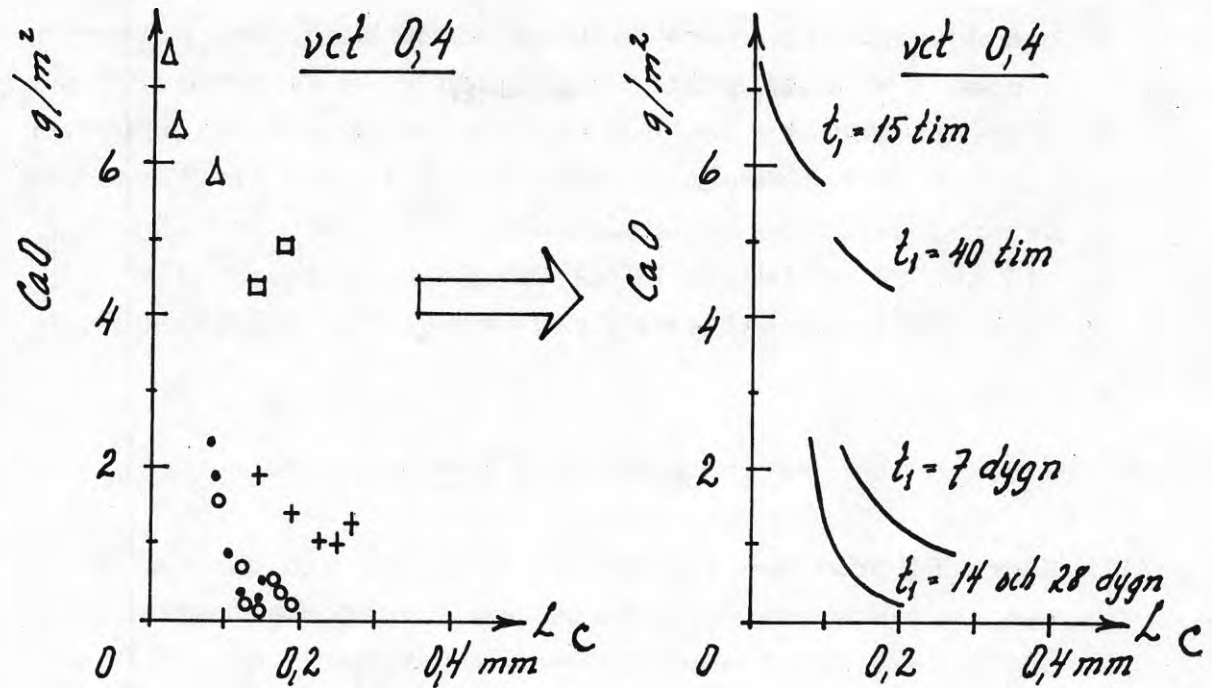
Att kalkurlakningen har blivit stor vid kort härdningstid ($t_1 = 15$ och 40 timmar) kan ha följande förklaring. Vid den låga hydratiseringsgraden (mognadsgraden) som kort härdningstid gav vid 5°C var porsystemet så öppet, att luftens koldioxid lätt trängde relativt långt in i ytskiktet. Emellertid har inte all kalk i ytskiktet karbonatiserat, utan vid den efterföljande urlakningen löstes kvarvarande kalciumhydroxid och diffunderade ut i urlakningsvattnet. Karbonatiseringsdjupet har med andra ord varit större än som anges i figuren men å andra sidan har karbonatiseringen inte varit fullständig. Vid längre härdningstid blir resultaten ungefär desamma som i föregående stycke 6.5.2 på sid 214.

Det framgår även av FIG. 81, att det tog längre tid för vct 0.4 att kompensera den retarderande effekten av låg temperatur än för vct 0.7.

Ett närmare studium av det tidiga karbonatiseringsförloppet kan sannolikt optimera en koldioxidbehandling beträffande koldioxidmängd och tidpunkten då behandlingen skall sättas in.

Man bör observera den varning för tidig koldioxidbehandling av nygjuten betong som Kauer och Freeman (1955) ger.

Slutligen understryks med hänvisning till FIG. 80 det faktum, att man redan efter 1 dygn i 80 % rf vid rumstemperatur får en effektiv karbonatisering av



- Δ provkropp härdad i +5 °C och 95 % rf i $t_1 = 15$ timmar
- \square — " — " +5 °C " 95 % " " $t_1 = 40$ —
- $+$ — " — " +5 °C " 95 % " " $t_1 = 7$ dygn
- \cdot — " — " +5 °C " 95 % " " $t_1 = 14$ —
- \circ — " — " +5 °C " 95 % " " $t_1 = 28$ —

FIG. 81. Kalkurlakningen som funktion av karbonatiseringsdjupet L_c vid olika härdningstid i låg temperatur. Kurvorna till höger är en approximation av mätvärdena (punkterna) till vänster.

betongytan. Observera i detta sammanhang, att urlakningen i figuren gäller för tiden $t_2 = 24$ timmar, dvs avsevärt mera än den tid man kan vänta att fritt vatten står på en betongyta i praktiken. Figuren styrker också den tidigare gjorda erfarenheten, att det tar längre tid att få tillräckligt skydd (karbonatisering) mot kalkutfällning på betong med vct 0.4 än med vct 0.7.

6.5.4 Behandlingsmedel och karbonatisering

Några få prov med extraktion av koldioxid gjordes på betong, vars yta behandlats med ammoniumkarbamat, $\text{NH}_4\text{CO}_2\text{NH}_2$. Försöksbetingelserna var följande

Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Temperatur:	20°C
Relativ fuktighet:	<65 %
Härdningstid i form:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 1$ dygn
Urlakningstid:	$t_2 = 24$ timmar (4 x 6 h)

Behandlingen med karbamat utfördes inom en timme efter avformningen. Därefter förvarades provstycken i ovan angivna härdningsklimat intill urlakningen.

Resultatet, även illustrerat i FIG. 80, visar att

behandling med ammoniumkarbamat ger en snabbare och effektivare karbonatisering än ett dygns härdning i gynnsamt klimat (20°C och 80 % rf)

Effekten av behandlingen var den avsedda, nämligen att snabbt tillföra ytan mer koldioxid än vanlig luft gör under det första härdningsdygnet.

6.5.5 Karbonatiseringshastigheten i tidigt skede

Ett mindre antal försök genomfördes för att utröna med vilken hastighet karbonatiseringen av betongytan sker. Försöksvillkoren var följande.

Relativ fuktighet:	60-70 % och 80-90 %
Temperatur:	23°C
Vattencementtal:	0.4 och 0.7
Avformning:	$t_0 = 1$ dygn
Härdningstid:	$t_1 = 0, 1, 2, 3$ och 6 timmar samt $1, 2, 3$ och 6 dygn

Resultaten, som även framgår av FIG. 82, visar att

karbonatiseringsdjupet växte snabbast under de båda första dyggen. Därefter var tillväxten avsevärt långsammare.

betongen med vct 0.7 erhöll en väsentligt hastigare tillväxt i karbonatiseringsdjup under det första dygnet efter avformningen än betongen med vct 0.4

karbonatiseringen gick fortare vid 80-90 % relativ fuktighet än vid 60-70 % rf

Försöken var visserligen fåtaliga, men de bekräftar erfarenheterna från såväl pölprov som urlakningsförsök.

Ur praktisk synpunkt är det värt att notera att härdningseffekten under det första dygnet är mest väsentlig. För vct 0.4 kan dock härdning i ytterligare ett dygn vara av värde.

Något förvånande syns kanske den relativt stora karbonatiseringen inom det lägre intervallet (60-70 % rf) för relativa fuktigheten. Även en kortare tid vid övre gränsen (70 % rf) kan dock ha bidragit till ökad karbonatbildning.

6.5.6 Beräkning av karbonatiseringsdjup

Nedan visas gången av den tidigare nämnda omräkningen av upptagen koldioxidmängd i betongytan till karbonatiseringsdjup, L_c . En fullständig karbonatisering förutsätts. Det innebär, att all kalciumoxid (CaO) som fanns i cementet med undantag av den i gipsen bundna omvandlas till karbonat.

Beräkningen genomförs för den betong (cementbruk) som i huvudsak använts i försöken. Både vct 0.4 och vct 0.7 (värdena inom parentes) har medtagits.

Cementinnehåll:	600 kg/m^3	(360 kg/m^3)
Motsvarande mängd i ett 0.1 mm tjockt ytskikt	$600 \cdot 0.0001$	$= 60 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
Därav är mängden CaO (62 %)	$0.62 \cdot 60 \cdot 10^{-3}$	$= 37 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
Denna CaO (molekylvikt 56) kan binda mängden CO_2 (mol vikt 44)	$\frac{44}{56} \cdot 37 \cdot 10^{-3}$	$= 29 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ $(17.5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2)$

För att karbonatisera ett 0.1 mm tjockt ytskikt krävs således koldioxid i en mängd 29 g/m^2 (17.5 g/m^2).

Med utgångspunkt från dessa värden omräknas vilken uppmätt koldioxidmängd som helst till karbonatiseringsdjup genom direkt proportionering.

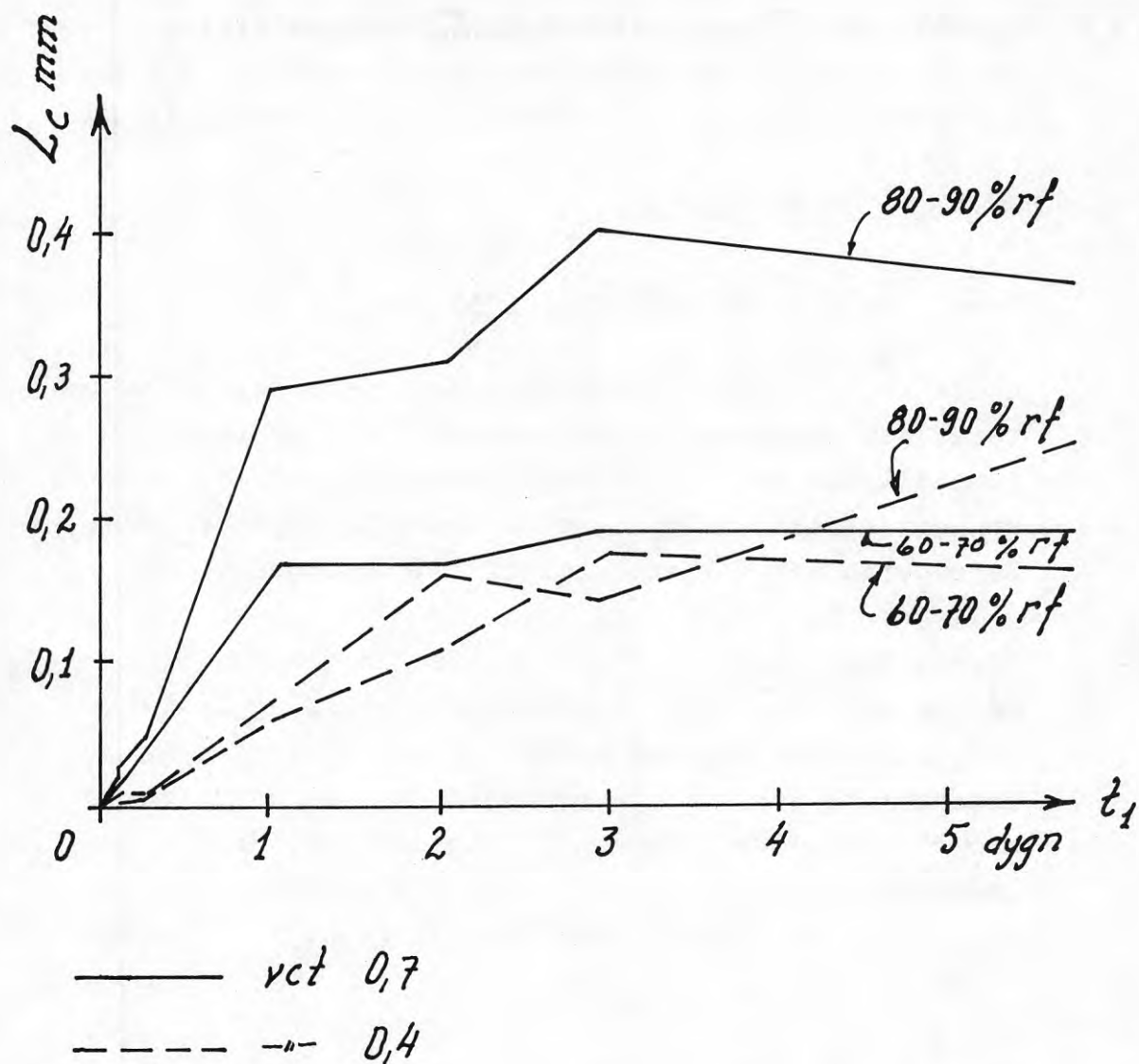


FIG. 82. Karbonatiseringsdjupet som funktion av härdningstiden t_1 .

En ytterligare förutsättning är, att ballasten inte innehåller karbonat, vilket skulle ge missvisande resultat. I de redovisade försöken har kontroller gjorts genom att utföra prov på betongytor direkt vid avformningen.

6.5.7 Karbonatisering i praktiken - exempel

Genom överslagsberäkningar kunde i vissa fall konstateras att härdkammare för betongvaror i praktiken inte innehöll den mängd koldioxid som behövs för att bygga upp ett effektivt skydd mot kalkutfällning. Den fria betongytan var för stor relativt luftmängden.

På ett antal takpannor från en fabrik och på några gångbaneplattor från en annan mättes med apparatur enligt FIG. 77 mängden koldioxid som upptagits av betongytan. Takpannorna var härdade i en härdkammare med tät stapling. Gångbaneplattorna hade härdats i en kammare med mera luft men i gengäld packade tätt, så att flertalet plattor inte hade tillgång till luftens koldioxid.

Mätning utfördes dels på sådana takpannor som kom direkt från härdkammaren (ca 40°C och >80 % rf), dels på sådana som därefter fått en extra härdning med riklig tillgång på luft. Hälften av takpannorna var målade före den extra härdningen.

Beträffande gångbaneplattorna utfördes mätningar dels på sådana som inte hade fri yta mot luften under härdningen, dels på sådana som hade en sida mot luften.

Pölprov utfördes på två takpannor (målade och omålade) med enbart härdning i kammare och på två (målade och omålade) med ytterligare härdning i gynnsamt klimat och god lufttillgång.

Resultaten, TAB. 12 och 13, visade att

hårdning i kammare med liten luftvolym
relativt den fria betongytan innebar låg
karbonatiseringsgrad

hårdning, där luften hindrades tillträde till
betongytan, gav ingen eller ringa karbonatise-
ring

omålade plattor karbonatiserade snabbt om de
fick tillgång till koldioxid

målade plattor karbonatiserade långsamt även
om de fick tillgång till koldioxid

pölprov på betong härdade med brist på kol-
dioxid gav kraftiga utfällningar. Om betongen
fick tillfälle att härda ytterligare med till-
gång på koldioxid i gynnsamt klimat, medförde
pölprov ingen eller mycket ringa utfällning

De målade ytorna visade sämre förmåga att ta upp kol-
dioxid. Man kan emellertid inte utan vidare säga, att
målade plattor därför är sämre än omålade ur kalkut-
fällningssynpunkt. Enstaka försök har visat, att mål-
ningen minskat kalkurlakningen i viss grad. Detta
överensstämmer med vissa uppgifter från praktiken.

TAB. 12. Karbonatiseringsdjup hos takpannor härdade i ett dygn i härdkammare med brist på koldioxid. Verkan av fortsatt härdning med god tillgång på koldioxid.

A = härdning ca ett dygn i härdkammare (ca 40°C och >80 % rf)

B = enligt A + tre dygn i 20°C och 80 % rf med riklig tillgång på koldioxid

Prov nr	Yta	Härdningsförlopp	Karbonatiseringsdjup, mm
1	omålad	A	0,05
2	omålad	A	0.05
3	omålad	A	0.03
4	målad	A	0.02
5	målad	A	0.01
6	målad	A	0.01
7	omålad	B	0.13
8	omålad	B	0.16
9	målad	B	0.02
10	målad	B	0.01

TAB. 13. Karbonatiseringsdjup hos gångbaneplattor med och utan tillgång till luftens koldioxid.

Prov nr	Tillgång till koldioxid	Karbonatiseringsdjup, mm
1	normal	0.05
2	normal	0.09
3	ingen eller ringa	0.02
4	ingen eller ringa	0.01

6.5.8 Sammanfattning

Försöken med extraktion av koldioxid ur betongytans kalciumkarbonat har tillsammans med urlakningsförsök visat att

kalkurlakningen avtog med ökande karbonatiseringsdjup, dvs betongens upptagning av koldioxid. Ett undantag utgör betong med låg hydratiseringsgrad.

betong med vct 0.7 karbonatiserade fortare under den första tiden efter avformningen än betong med vct 0.4 under i övrigt lika förhållanden

karbonatiseringen gick fortare vid hög relativ fuktighet (80-90 %) än vid lägre (60-70 %)

betong, som härdas i härdkammare med begränsad tillgång på koldioxid, riskerar fördröjd karbonatisering

7 VERKAN AV MEDEL MOT KALKUTFÄLLNING

Detta avsnitt är i huvudsak författat av Olle Peterson, Cements AB.

7.1 BAKGRUND

Huvuddelen av projektet behandlar villkoren för att betongens yta under inverkan av luftens koldioxid skall förändras, så att den uthärdar en rimlig vattenbelastning (10 timmar) utan risk för synlig kalkutfällning.

Av olika orsaker kan det vara svårt att i en tillverkningsprocess ta hänsyn till dessa kunskaper. I denna utredning skall behandlas den kemiska bakgrunden till de alternativa metoder som kan tillämpas för att minska risken att betongytan skall få utfällningar.

Huvudintresset har koncentrerats på kemiska metoder. Även fysiskt verkande metoder såsom påförande av lacker eller silikoner behandlas emellertid.

7.2 OMFATTNING

Baserade på verkan av koldioxid
 Extra koldioxid till luften
 Extra vatten, ev koldioxid till vattnet
 Natriumkarbonat i lösning
 Ammoniumkarbonat i lösning
 Ammoniumkarbammat i lösning

Vattenglas, eventuellt kombinerat med koldioxid

Baserade på komplexa fosfater
 Natriumtripolyfosfat
 Natriumhexametafosfat

Fluatering

Natriumfluorosilikat
Kommersiellt fluateringsmedel

Syrabehandling

Saltsyra
Sulfaminsyra
Ättiksyra
Fosforsyra

Fysikaliskt verkande ytskikt

Silikonolja
Krympningsreducerande medel
Vegetabiliska oljor
Tekniska betongfärgprodukter
Akrylbaserade produkter
Epoxyplast

Tillsatser avsedda att blanda in i den färska betongen.

7.3 SANNOLIK MEKANISM HOS DE ENSKILA METODERNA

7.3.1 Ökad koldioxidhalt

Den grundläggande metoden att efter avformningen lagra betongen i fuktig luft med normal halt av koldioxid har visat sig effektiv. Några metoder har prövats med avsikt att påskynda upptagningen av koldioxiden och därmed snabbare skapa ett diffusionshämmande skikt.

7.3.1.1 Luft

Prov med 5 och 10 % koldioxid i luft visade att luft med extra koldioxid verkar snabbare än vanlig

luft, om

fuktigheten är hög, t ex 80 % relativ fuktighet
temperaturen samtidigt är förhöjd, t ex 60° C.

Vinsten genom kortare behandlingstid är ringa. Däremot kan man i en härdkammare med ett tillskott av koldioxid slippa tillföra stora mängder luft som måste uppvärmas och uppfuktas, och man kan på så sätt göra en väsentlig besparing av värme.

Som alternativ finns i dag värme- och fuktväxlare tillgängliga (Munters), som tillåter att ny luft tillförs men att värme och fukt från den förbrukade, koldioxidfattiga luften tillvaratages.

7.3.1.2 Vatten (som ev kan innehålla koldioxid)

I stället för att förvara betongen i luft med hög fuktighet kan man tillföra det behövliga vattnet i flytande form, t ex genom att upprepade gånger stryka på ett tunt skikt.

Bäst lyckades försöken då provkropparna hade lågt vct (0,4) och avformades tidigt (efter 5,5 timmar). Provkropparna motstod under dessa omständigheter sex timmars vattenbelastning innan så mycket kalciumjoner utlakats att synlig utfällning riskeras. Skyddet anses fullgott om tio timmars vattenbelastning uthärdas.

Att resultatet blivit sämre med högre vct (0,7) eller med senare avformning (efter 24 timmar) torde bero på att ytskiktet under dessa omständigheter behöver tillföras mer vatten för att behandlingen skall bli verksam. Detta extra tillskott har inte givits. Det är följaktligen lätt att tillföra allt för mycket vatten, så att ytan får synlig utfällning redan efter behandlingen.

Vid försöken kunde inte påvisas att vattnets halt av koldioxid har någon mätbar betydelse för resultatet.

Vattendimma har tidigare tillförts betongytor för att motverka tidig uttorkning med åtföljande sprickbildning (Arlanda-bygget). Det är rimligt att anta att dimbesprutning är en lämplig metod att tillföra vattnet, då man vill ha ytan tidigt motståndskraftig mot utfällningar. Genom att vattendropparna i strålen är små är det lätt att kontrollera vattentillförseln så att porsystemet inte överfylls. Man hinner avbryta besprutningen av den aktuella delen av ytan i tid.

7.3.1.3 Karbonatlösningar (natrium- eller ammoniumkarbonat)

Vill man åstadkomma att kalciumhydroxid i betongens ytskikt omvandlas till kalciumkarbonat genom en vattenbehandling, når man lättare resultat med en karbonatlösning än med en lösning av koldioxid i vatten.

Försök har visat att man med upprepade (4 gånger) påföringar av natriumkarbonatlösning eller med en timmes neddoppning i lösningen kan få en betongyta som avger mycket litet kalciumhydroxid till ett vattenskikt på ytan.

Dessvärre är reaktionen så snabb att en del kalciumkarbonat utfälls på ytan redan under behandlingen. Man skulle därför bli tvungen att komplettera en sådan behandling med syratvättning, för att den motståndskraftiga ytan skall få ett godtagbart utseende.

Behandling med ammoniumkarbonat är inte tillräckligt verksamt. Sannolikt förloras den påförda karbonatlösningen genom att fri ammoniak avdrivs, samtidigt

som en stor del av koldioxiden hinner avgå till luften innan den reagerar med betongens kalciumhydroxid.

En i sammanhanget intressant kemisk förening är ammoniumkarbamat (eller ammonium-amido-karbonat), $\text{NH}_4 \text{CO}_2 \text{NH}_2$.

Om denna förening hydrolyseras med rimlig hastighet, vore det tänkbart att den

inte ger synlig utfällning,

efter hydrolys fäller ut kalciumjonerna som kalciumkarbonat i por-systemet.

Försök med karbamat har i efterhand utförts med stark reducering av kalkurlakningen som följd. En viss ljusfärgning av ytan erhöles dock, sid 162.

7.3.2 Silikat- eller fosfatlösningar

Den diffusionshämmande föreningen behöver inte nödvändigtvis vara kalciumkarbonat. Väljer man lämpliga beståndsdelar i behandlingslösningen kan diffusionshämmande skikt av annan önskad sammansättning skapas.

7.3.2.1 Vattenglas (med eller utan koldioxid)

Vattenglas kan betraktas som en lösning av kisel-dioxid i natrium- eller kaliumsilikat som är löst i vatten.

När vattenglas påförs en betongyta som är så ung att kalciumhydroxid ännu kan lösas ut, sker en reaktion mellan kalciumhydroxiden och vattenglasets

alkalisilikat så att svårlösligt kalciumsilikat-hydrat bildas.

Vattenglasets var utspätt i förhållandet 1:5 och påfördes inom en timme efter avformningen, antingen som fyra på varandra följande strykningar med 30 minuters mellanrum eller som en timmes neddoppning.

Under behandlingen förbrukas vattenglasets innehåll av kiselsyra men dess alkalihalt kvarstår oförändrad i lösningen. När behandlingen är färdig och betongen har torkat är det önskvärt att den alkalihaltiga resten av vattenglasets tvättas bort med vatten. Detta gjordes inte men likväl kunde man inte iaktta några utfällda alkaliföreningar.

Försöken har visat att vattenglas ger ett verksamt skydd mot kalkutfällningar även om vattenbelastningen överskrider tio timmar. Någon utfällning på grund av behandlingen har inte kunnat observeras.

Det gjordes även försök med vattenglasbehandling i atmosfär med förhöjd koldioxidhalt. Resultaten tyder på att 5-10 % koldioxid ej väsentligt förändrar den goda skyddsverkan av enbart vattenglas.

Betong uthärdade minst 10 timmars vattenbelastning efter kombinerad behandling med vattenglas och koldioxid, vare sig vattencementtalet var 0,4 eller 0,7. Kalkurlakningen var dock märkbart mindre för det högre vattencementtalet än för det lägre.

Ur kemisk synpunkt har man anledning vänta sig att närvaro av koldioxid i atmosfären bryter ned vattenglas till fri kiseldioxid i gelform och alkalikarbonat. Omvandlingen tar tid och man undgår därför den kalkutfällning i samband med behandlingen, som man får efter behandling med natriumkarbonat.

7.3.2.2 Natriumtripolyfosfat $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$

Prov har gjorts i normal atmosfär och i koldioxid-anrikad luft.

Natriumtripolyfosfat är ett typiskt "tvättmedelsfosfat". En mättad lösning har ett pH-värde omkring 10. Sätter man en sådan lösning till en lösning med kalciumjoner får man en vit utfällning av svårlösligt kalciumfosfat.

Tillför man överskott av natriumtripolyfosfat, löser den vita fällningen upp sig och lösningen blir åter klar. En komplex-förening har bildats, som tillåter kalcium och magnesium (hårdhetsbildare) i vatten att existera tillsammans med tvål utan att kalktvål faller ut.

Natriumtripolyfosfat-lösning löser också nyfällt kalciumkarbonat. En gammal och mogen utfällning löser sig dock alltför långsamt för att detta förhållande praktiskt skall kunna utnyttjas.

Av ovanstående beskrivning framgår att natriumtripolyfosfat bör användas relativt koncentrerad. Vid försöken har mättad lösning använts (ca 145 g per liter). Betongen har avformats efter ett dygn och behandlats en timme efter avformningen, antingen med fyra strykningar eller genom neddoppning under en timme.

Betong med vct 0,7 kan behandlas på båda sätten och i båda fallen få en helt betryggande motståndsförmåga mot vattenbelastning på ytan (väsentligt över 10 timmar innan synlig utfällning behöver befaras).

För betong med vct 0,4 är en timmes neddoppning fortfarande med god marginal tillräckligt. Fyra

strykningar ger betongen motståndsförmåga mot åtta timmars vattenbelastning innan risk för synlig utfällning föreligger, vilket är något mindre än tillräckligt men ett gott resultat.

Med utgångspunkt från de kemiska egenskaperna hos natriumtripolyfosfat är den sannolika mekanismen att kalciumhydroxid från ytskiktet bringas i lösning. Vid upprepad strykning suges den därefter in i porsystemet, vid neddoppning upptages kalken i stället i badet, som då med ökad användning blir allt mer mättat.

Framför allt i det senare fallet torde det vara ändamålsenligt att efter behandlingen tvätta ytan med rikligt vattenflöde. Detta har emellertid inte gjorts vid försöken.

Resultatet blir i båda fallen att ytans yttre skikt befrias från löslig kalciumhydroxid och därför kan belastas med vatten under ganska lång tid innan kalciumhydroxid hinner diffundera fram från det inre av ytan.

I de djupare lagren är tripolyfosfat-lösningen mindre koncentrerad. Den kan då fällas ut av kalciumhydroxid i porsystemet och bidrar därvid till att göra detta tätare.

Försök har gjorts med förhöjd koldioxidhalt i luften (5 och 10 volymprocent) i samband med en timmes neddoppning i mättad tripolyfosfatlösning. God motståndsförmåga har alltid uppnåtts och resultaten tyder på att störst marginal erhålls med den högre halten koldioxid.

Några kemiska reaktioner mellan koldioxid och natriumtripolyfosfat är inte att vänta. Man är för övrigt knappast beroende av att ytterligare förbättra den

mycket goda verkan som neddoppning i polyfosfatlösningen ändock visat sig ha.

Med tiden hydrolyseras tripolyfosfat av vatten och övergår då till ortofosfat. Eventuella rester av lösligt kalciumkomplex blir då omvandlade i svårlöslig substans.

7.3.2.3 Natriumhexametafosfat (NaPO_3)₆

Även natriumhexametafosfat är ett tvättmedelsfosfat och en koncentrerad vattenlösning har ett pH-värde omkring 6. Den uppträder helt analogt mot natriumtripolyfosfat men är mer löslig i vatten och en koncentrerad lösning blir viskös.

Provytorna blev vid något tillfälle ljusfärgade. Motståndet mot vattenbelastning blev i regel lika gott som med natriumtripolyfosfat. Betong med vct 0,7 tålde dock tio timmars vattenbelastning oavsett behandlingssättet. Att verkan på betong med vct 0,4 i något fall endast skyddade mot 5 timmars vattenbelastning kan bero på lösningens höga viskositet och därigenom dåliga inträngningsförmåga. Koncentrationen var 600 g/liter. Bästa resultatet når man med en koncentration av storleksordningen 150-300 g natriumhexametafosfat per liter.

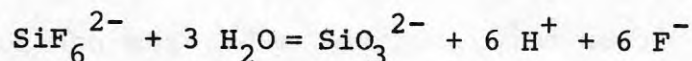
Av intresse vore att pröva verkan av vattentvättning efter behandlingen.

7.3.3 Fluorosilikat, fluatering

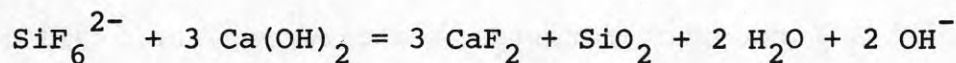
Karakteristiskt för denna behandling är att ett medel används som ger vattnet en koncentration av hexafluorosilikat-joner, SiF_6^{2-} .

Det gynnsamma med behandlingsprincipen är att kalciumfluorosilikat är relativt lösligt i vatten. Man riskerar därför inte den omedelbara utfällningen som exempelvis uppkom då man behandlade med natriumkarbonat. Kalciumfluorosilikatlösningen får tid att sugas in i porsystemet.

Fluorosilikatjonen är komplex och kan hydrolyseras:



I betongytan kan detta leda till olika reaktioner, enklast



Man kunde till och med tänka sig att den nybildade kiseldioxiden binder ytterligare kalciumhydroxid, men även om så inte skulle vara fallet framgår av formlerna att fluorosilikatet effektivt kan binda kalk i svårlöslig form.

Denna egenskap gör tyvärr att en lösning av fluorosilikat är skadlig att få på huden. Sannolikt tränger lösningen in i cellerna, kalciumhalten i cellvätskan sänks och man får något som liknar eksem. Man måste därför skydda alla delar av kroppen mot beröring. Skulle man likväl få lösningen på huden, sköljer man bort den med vatten och efterbehandlar rikligt med kalciumkloridlösning.

7.3.3.1 Natriumfluorosilikat Na_2SiF_6

Trots ovanstående gynnsamma förutsättningar blev betongytor som behandlats med natriumfluorosilikatlösning (mättad) inte mer motståndskraftiga mot utlakning av kalciumhydroxid än obehandlade betongytor som legat i luft med 40 % relativ fuktighet.

Förklaringen är att lösligheten hos natriumfluorosilikat endast är ca 6-7 gram per liter. Halten verksam substans i lösningen blir därför alltför låg. Önskvärd halt är ca 250 g/liter.

7.3.3.2 Kommersiellt fluateringsmedel

Fluorosilikatjonen har givits en "mot-jon", som ger saltet en hög löslighet. 250 gram per liter har använts, men i receptet föreskrivs 280 g/l för tredje behandlingen.

I receptet föreskrivs att betongytan skall tvättas sedan den tredje bestrykningen torkat. Avsikten är sannolikt att överskott av fluorosilikat skall oskadliggöras. Vid försöken har fyra likformiga bestrykningar utan efterföljande tvättning gjorts. Oavsett betongens vattencementtal uthärdade ytorna väsentligt längre vattenbelastning (17 timmar) än eftersträövade 10 timmar utan risk för synlig kalkutfällning.

7.3.4 Syrabehandling

Har en synlig kalkutfällning redan uppkommit kan man avlägsna den med hjälp av en syra.

En syrabehandling inleds alltid med grundlig sköljning av ytan, så att porsystemet i görlig mån fylls med vatten. Man önskar absolut inte att syran skall sugas in i ett mer eller mindre torrt porsystem.

Försök har gjorts med olika koncentrerade syralösningar och olika tider för behandlingen (neddoppning).

Efter avslutad behandling har betongytan tvättats

med vatten i riklig mängd så att syran i görlig mån avlägsnats.

Det är känt att man med syra kan avlägsna misspyrdande beläggning av kalciumkarbonat, men att alltför riklig tillförsel gör att även cementpastan går i lösning, så att ballasten blir frilagd.

Mindre känt är hur ytans benägenhet att avge kalciumhydroxid till vatten påverkas genom en syrabehandling.

7.3.4.1 Saltsyra

Försök med utspädningsgraderna 1:20-1:10-1:2, alla med 45 sekunders neddoppning, visar att 1:2 ger alltför hög syrakoncentration. Cementpastan löses och ballasten blir frilagd. Med större utspädning synes en något längre neddoppningstid kunna ge bättre resultat.

Med utspädningsgraden 1:20 provades behandlingstiderna 45 och 180 sekunder. Resultaten tyder på att 180 sekunders neddoppning är gynnsammare än 45 sekunder.

En yta som före syrabehandlingen givits ett gott skydd mot kalkutfällning genom vattenbelastning förlorar inte detta skydd genom syrabehandlingen, inte ens om syran är så koncentrerad att ballasten friläggs.

En yta som före syrabehandlingen är oskyddad mot kalkutfällning av vattenbelastning får genom syrabehandlingen ett förbättrat skydd. Skyddet är dock måttligt verksamt: ungefär 5 timmars vattenbelastning uthärdas utan synlig kalkutfällning. Det utsträcks till ca 10 timmars vattenbelastning om man behandlar med utspädning 1:20 under 180 sekunder.

7.3.4.2 Sulfaminsyra, ättiksyra

Sulfaminsyra eller amidosvavelsyra, $\text{H.NH}_2\text{SO}_3$, skiljer sig från modersubstansen svavelsyra genom att kalciumsaltet är väsentligt mer vattenlösligt.

Samtliga syror användes i utspädningen 1:10. Tiderna 45 sekunder och 180 sekunder användes. Behandlingen utfördes 1 dygn efter avformningen.

Samtliga syror gav resultat som var jämförbara med saltsyra i utspädningen 1:20.

Med 180 sekunders neddoppningstid fick man ett skydd mot vattenbelastning under 7-11 timmar för betong med vct 0.4 och 10-12 timmar för betong med vct 0.7. Det är tveksamt om den antydda skillnaden är verklig eller ett mått på osäkerheten i försökstekniken.

7.3.4.3 Fosforsyra, H_3PO_4

Fosforsyran användes i utspädningsgraden 1:10 och neddoppningstiden hölls vid 45 och 180 sekunder. Behandlingen utfördes 1 dygn efter avformningen.

Med 180 sekunders neddoppning uthärdade betong med vct 0.4 vattenbelastning under 20 timmar innan synlig kalkutfällning riskerades. För betong med vct 0.7 var motsvarande tid 24 timmar. Resultatet är åtminstone lika gott som med det kommersiella fluatiseringsmedlet.

7.3.4.4 Kommentar till syrabehandling

Med syror kan redan uppkomna kalkutfällningar avlägsnas.

Det är relativt komplicerat att förklara, hur syrabehandling kan göra ung betong mer motståndskraftig mot

utfällningar på grund av vattenbelastning.

En utspädd syra löser i första hand kalken i cementpastan och lämnar pastans "sura" beståndsdelar, t ex kiseldioxid och järnoxid, oangripna. En mer koncentrerad syra löser i stor utsträckning även dessa oxider.

Sannolikt är det den föregående vattenbehandlingen som förklarar att skydd erhålls även då koncentrerad syra används. Längre in i ytan finns alltid ett skikt där syran är mer utspädd, och där kommer svårslösliga restmaterial att återstå som ökar diffusionsmotståndet för kalken i den oangripna betongen. Skyddet är dock måttligt verksamt.

Fosforsyran, H_3PO_4 , är såsom framgår av formeln trebasisk. Det är endast den första vätejonen som är verksam som lösande syra. I nästa dissociationssteg är fosforsyran 10 gånger svagare än kolsyra, och motsvarande kalciumsalt är väsentligt mycket mer svårslösligt än kalciumhydroxid.

Använder man fosforsyran under för kort tid kan man därför få en synlig rest av kalciumhydrogenfosfat, $CaHPO_4 \cdot 2 H_2O$. Fortsätter man tvättningen löses denna förening av fosforsyran. Man kommer dock alltid att få en utfällning av den svårslösligare kalciumfosfatföreningen inne i porsystemet, och detta är en rimlig förklaring till att en betongyta som tvättats med fosforsyra under tillräckligt lång tid är bättre skyddad mot kalkurlakning än om man valt andra syror för behandlingen. Fosforsyra är i utspädning 1:10 ganska mild att handskas med.

Till skillnad från behandling med tvättmedelsfosfaterna är åtgången av bristvaran fosfor ringa vid fosforsyrtvättning - resultatet blir inte bättre om man slösar med fosforsyran.

7.3.5 Fysikaliskt verkande ytskikt

En grupp medel är avsedda att försvåra för betongens kalciumhydroxid att upptas i vatten som påförs ytan. Medlen är således inte avsedda att förändra eller avlägsna kalciumhydroxiden.

Några medel verkar genom att göra ytan svårvätbar för vatten. Det kan tänkas att provningsmetoden med mätning av kalciumupptagningen i en vattenpelare på ytan kan vara alltför svår. Kanske skulle ytan klara ett lätt regn.

De tätande skikt, som behandlas här, har således en annan verkan än det skyddsskikt av kalciumkarbonat, som tidigare nämnts och som ej förutsätts vara tätt.

Sannolikt är dock slagregn, dvs regn i samband med kraftig vind, åtminstone en lika svår påkänning som vattenpelaren.

7.3.5.1 Silikonolja

Oljan har använts såsom 30 % lösning i kristallolja. Lösningen har påförts omedelbart efter avformningen. Parallellt har provats påförning av lösning 3 dygn efter avformningen.

Silikonolja-behandlade ytor har inte nämnvärt långsammare avgivit kalciumjoner till en vattenpelare på ytan än ytor som utan silikonbehandling utsatts för torr eller fuktig luft under lika lång tid.

7.3.5.2 Krympningsreducerande medel

Medlen är vattenlösliga. Avsikten är att de vid vattenbelastning skall fördröja utlösning av kalcium-

hydroxid från betongens ytskikt.

Vid provning under vattenpelare var inget av medlen verksamt. Sannolikt löser den relativt stora vattenmängden upp "spärr-skiktet". Möjligen är medlen trots detta verksamma mot kort nederbörd. Vid denna undersökning krävdes att ett medel skulle skydda mot utfällning under 10 timmars vattenbelastning.

7.3.5.3 Vegetabiliska oljor

Betong med vct 0,4 uthärdade mer än 10 timmars vattenbelastning utan risk för synlig kalkutfällning, såväl med två strykningar som med en timme i oljan.

Betong med vct 0,7 blev med två strykningar knappast hårdigare mot vattenbelastning än utan oljebehandling. Efter en timme i oljan uthärdade betongen 5 timmars vattenbelastning, vilket ej anses tillräckligt. Oljan är spädd med nära sin egen vikt lacknafta, vilket kan förklara att skyddet ej räcker till när betongens por-system är rymligt.

7.3.5.4 Betongfärg - tekniska produkter

Ett bindemedel i en kommersiell betongfärg har provats. Vare sig betongen har vct 0,4 eller 0,7 har den efter bestrykningen uthärdat omkring 7 timmars vattenbelastning innan risk uppkommer för synlig kalkutfällning. Sannolikt innehåller detta bindemedel ett lösningsmedel, som vid torkningen avdunstar och kvarlämnar ett por-system.

En färg som används för betongtakpannor har provats. Såväl behandlade som obehandlade takpannor uthärdade omkring 5 timmars vattenbelastning. Vid ett annat tillfälle ökades vattenbelastningen för synlig utfällning till 8-10 timmar för de målade takpannorna.

Behandlade och obehandlade pannor förvarades ungefär tre dygn i fuktig luft (ca 80 % rf). De obehandlade pannorna motstod mer än 10 timmars vattenbelastning, de målade endast 5 timmar. Sannolikt kommer dock takpannorna med tiden att få ett naturligt skydd. En del av försöken, men inte alla, har visat att målningen ger pannorna extra skydd.

7.3.5.5 Akrylbaserade produkter

En kommersiell akrylprodukt anbringades tillsammans med vatten och propylenglykol. Skiktet ökade inte betongytans förmåga att uthärda vattenbelastning utan risk för kalkutfällning. Det är sannolikt inte tillräckligt porfritt.

Ett annat kommersiellt medel, en akryl-copolymer, är avsedd att skydda betongytor mot nedsmutsning och ger enligt uppgift även skydd mot kalkutfällning. Provad med vattenbelastning under pelare uthärdar ytan föga längre vattenbelastning än en obehandlad yta, innan risk uppkommer för synlig kalkutfällning.

7.3.5.6 Epoxyplast

Vid provet användes en lågviskös plastbas tillsammans med en härdare.

Vid två av försöken erhöles betryggande skyddsverkan vare sig betongens vct var 0.4 eller 0.7. Dessförinnan hade emellertid mycket dålig skyddsverkan erhållits vid fyra försök, säkerligen därför att skikten inte blivit tätta. Överlag gäller för tätande skyddsskikt att verkan helt beror på hur tät och porfri man lyckats göra beläggningsen. Epoxyplast krymper inte vid hårdnandet och har god vidhäftning. Före hårdnandet rinner plasten och man får lätt oskyddade fält som är svåra att upptäcka.

Genom att epoxyplast används utan lösningsmedel undviks en källa till mikroporer, som är svår att undvika om plasten är emulgerad eller löst vid påförandet.

7.3.6 Tillsatser i den färska betongen

Stearinsyra har i pulverform malts in i betongsanden. Tillsatsens storlek var 0,5 % av cementvikten.

Oavsett om betongens vct var 0.4 eller 0.7 blev gjutytorna mer porösa än normalt, och provytorna tålde inte större vattenbelastning än ytor av motsvarande betong utan tillsats. Vid lagring i luft med hög fuktighet (80 % rf) blev tåligheten mot vattenbelastning sämre än utan stearinsyra, för betong med vct 0.4 endast 6 timmar. För betong med vct 0.7 var tåligheten mot vattenbelastning trots försämringen betryggande över 10 timmar.

Försök gjordes även med ett kommersiellt medel (förmodligen baserat på stearinsyra), som uppges vara "bra mot kalkutfällning". Den tillsattes i betongvattnet och doseringen är 0,5 % av torrbrukets vikt.

I betong med vct 0.4 riskeras synlig kalkutfällning efter endast några timmars vattenbelastning oavsett fuktigheten i luften. Obehandlat prov uthärdade mer än 10 timmars vattenbelastning om luften hade hög fuktighet (80 % rf).

I betong med vct 0.7 var resultatet jämförbart med det som erhöles med stearinsyra. Medlet ger inte skydd vid lagring i torr luft. Däremot blir tåligheten mot vattenbelastning tillräcklig (över 10 timmar) vid lagring i fuktig luft.

7.4 SAMMANFATTNING

Inom projektet har undersökts ett antal ämnen, varav några är avsedda att blanda i betongen för att minska dennas benägenhet att få kalkutfällningar.

De flesta undersökta substanserna är avsedda att i efterhand påföras betongytan, antingen för att minska risken att kalkutfällningar senare uppkommer i samband med nederbörd eller för att avlägsna kalkutfällningar som redan uppkommit.

I denna utredning har de olika medlen uppdelats efter den kemiska eller fysikaliska verkningsmekanismen. Där så varit möjligt har mekanismen preciserats.

Att anrika luften i härdkammaren med avseende på koldioxid är verksamt endast om luften är varm och fuktig. Då kan metoden vara ett gott alternativ till att införa, förvärma och uppfukta ny frisk luft.

Att behandla betongen med vattenglas eller ett lättlösligt fluorosilikat är verksamt. Under arbetet är emellertid i synnerhet fluorosilikatet skadligt för huden.

Ett komplext fosfat, t ex natriumtripolyfosfat, är verksamt och resultatet gynnas av om luften är anrikad på koldioxid.

Med syror kan uppkomna utfällningar avlägsnas och betongen skall då vattenmättas före behandlingen och vattentvättas efteråt. Betongens motstånd mot kalkutfällningar efter nederbörd försämras inte - hos ny betong förbättras motståndet avsevärt. Väljer man fosforsyra erhålls ett gott motstånd mot kalkutfällning i samband med långvarig vattenbelastning.

Fysikaliskt verkande medel som bildar motståndskraftiga och täta skikt (epoxyplast) är verksamma skydd. Hur sådana skikt förhåller sig efter långvarig inverkan av väder, särskilt solsken, är inte prövat.

En hel del skiktbildande medel och även silikonolja har inte visat sig så verksamma som väntat, inte heller två provade medel att blanda i betongen före gjutningen.

Den teoretiska modellen, sid 66, uppställdes efter pölproven. I dessa fanns inget som motsade teorin. Inte heller fältstudierna, de följande urlakningsförsöken eller några av de övriga proven har föranlett några tvivel på teorins giltighet.

Å andra sidan är modellen helt kvalitativ, om man bortser från viss uppskattning av karbonatiseringstiden. Det har inneburit, att den huvudsakligen varit ett verktyg till att förklara erhållna resultat. För att göra noggranna förutsägelser om kalkurlakningen och därmed risken för synlig utfällning skulle modellen behöva kvantifieras, dvs beskrivas i formelspråk. En sådan beskrivning vore speciellt värdefull vid bedömning av situationer som inte täcks av gjorda försök eller skulle kräva extrapolering från dessa.

Något försök till systematisk kvantifiering har inte skett under projektets gång. Det skulle i så fall ha inkräktat på tiden för laborieförsöken och det bedömdes viktigare att i första hand genomföra dessa, varigenom ett bättre underlag ges för en eventuell framtida teoretisk studie.

En sådan studie skulle anvisa när och var karbonatiseringen kommer att ske. Den skulle vidare tala om ifall en på betongytan bildad karbonatmängd är tillräckligt stor för att synas. Beskrivningen måste bygga på kalciumhydroxidens diffusion i vatten och koldioxidens diffusion i luft och vatten. Svårigheter kan därvid förutses, om man vill göra en korrekt beräkning av diffusionen i porsystemet, som är föränderligt i tiden på grund av fortgående hydratisering och karbonatisering.

Projektet skulle i första hand studera kalkutfällningens mekanism. Förhoppningsvis skulle det även ge erfarenheter som direkt kunde bli till nytta. En hel del av försöksresultaten kan förmodligen tillgodogöras i praktisk verksamhet framför allt inom betongvaruindustrin. Självfallet får man räkna med en viss anpassning till använd produktionsmetod. Flera olika metoder och medel har vid laboratorieförsöken gett goda resultat, varför valmöjligheter finns. Några kommentarer rörande betongvaror och platsgjuten betong görs nedan. Först berörs emellertid två viktiga frågor, nämligen dimensionering av ytans behandling och reproducerbarheten hos resultaten.

9.1 DIMENSIONERING AV BEHANDLING

Tidigare har nämnts, att det behövs värden dels på mängden kalk (V) för synlig utfällning, dels på vattenbelastningen (L) i praktiken. Med den sistnämnda menas den tid som vatten kan stå på en betongyta, t ex en fasad. Det förstnämnda värdet (V) har bestämts genom särskilda försök i 6.1, sid. 77. Värdet 1 g CaO per m^2 torde vara ett tillfredsställande genomsnittsvärde, även om man får räkna med att mörka ytor kan berättiga ett något lägre värde än ljusa. Att värdet är av rätt storleksordning bekräftas av pölprov och urlakningsprov tillsammans.

Pölprov som förvarats i fuktig luft (80-95 % rf) och vid 20°C erhöill ingen (vct 0.7) eller ringa (vct 0.4) utfällning, om vatten påfördes ett dygn efter avformning. Den tid som pölvattnet stod kvar på betongytan var av storleksordningen 10 timmar (t_2) för vct 0.7 och 25 timmar (t_2) för vct 0.4. Ser man på motsvarande urlakningskurvor i FIG. 23 och 24 finner man, att

dessa för de aktuella urlakningstiderna ($t_2 = 10$ resp 25 timmar) ligger nära gränsen V för synlig utfällning. Betong med vct 0.4 befinner sig över gränsen, men betong med vct 0.7 under, vilket i stort överensstämmer med pölproven.

För vattenbelastningen (L) fanns inga noggranna uppgifter att tillgå. Oscar Beijer vid Cement- och Betonginstitutet i Stockholm har studerat regn mot fasader och med hans hjälp har L valts till 10 timmar. Regn torde endast vid ett fåtal tillfällen kunna hålla en fasad våt (fri vattenyta) ännu längre. Har betongytan redan vid tillverkningen fått en god initialresistens mot kalkurlakning, står det klart att risken för synlig utfällning är liten. Resistensen ökar sedan efter hand som karbonatiseringsdjupet växer. Valet av L = 10 timmar innebar ingen stor noggrannhet, men var sannolikt en bedömning som ger stor säkerhet.

Eftersom sannolikheten för långvariga regn varierar med årstiden, kunde L eventuellt anpassas till denna. Som framgick av fältförsöken i 4.3 på sid 54 drabbas ytor mot skilda väderstreck av olika vattenmängder. Likaså ger regn på horisontella och lutande ytor annan vattenbelastning än på vertikala. Det gör valet av L än mer komplicerat.

9.2 REPRODUCERBARHET

Det är nödvändigt med god reproducerbarhet, om en metod eller ett behandlingsmedel skall vara av värde för en producent. Resultaten från försök, där väsentlig reduktion av kalkurlakningen skett tyder på en tillfredsställande reproducerbarhet, t ex enligt FIG 23-24, 53, 59 och 62. Pölproven utfördes i regel som tvillingförsök, dvs två pölar påfördes betongytan samtidigt. Resultaten från dessa pekar på god reproducerbarhet.

TAB. 14 visar kalkurlakningen vid upprepade försök med samma betong (cementbruk) och samma härdning. Resultatet åskådliggörs även i FIG. 83, där medelkurvor och variationsgränser inlagts. Man ser där att vct 0.7 klarar gränsen för synlig utfällning med god marginal. Beträffande vct 0.4 är risken märkbart större. Överensstämmelsen med pölproven är tillfredsställande. Betong med vct 0.4 fick ibland, men inte alltid, synlig utfällning efter ett dygns härdning i fuktig luft (≥ 80 % rf), medan vct 0.7 klarade sig utan.

TAB. 14 Kalkurlakningen i g/m^2 vid upprepade försök med samma betongsammansättning och härdning. Enskilda mätvärden och medelvärden jämte variationsgränser. Slite Std. Härdning i 24 timmar i $20^{\circ}C$ och 80 % rf. Urlakningstiden $t_2 = 12$ och 24 timmar.

Prov nr	vct 0.4		vct 0.7	
	$t_2=12$ h	$t_2=24$ h	$t_2=12$ h	$t_2=24$ h
1	1.1	3.0	0.2	0.7
2	1.2	2.9	0.5	1.3
3	0.7	2.2	0.3	1.0
4	0.9	2.4	0.2	0.5
5	1.0	3.4	0.3	0.7
6	0.9	2.5	0.2	0.3
7	0.9	2.4	0.2	0.4
8	1.7	4.2	0.5	1.9
Medel- värde	$1.0^{+0.7}$ -0.3	$2.9^{+1.3}$ -0.7	$0.3^{+0.2}$ -0.1	$0.9^{+1.0}$ -0.6

Reproducerbarheten vid avformningen eller dålig härdning är av mindre intresse. En uppfattning om den fås av FIG. 23-24 för $t_1 = 0$. Där har de sex provkropparna olika cementsort, vilket dock torde vara av föga betydelse.

Man skulle kunna misstänka, att upprepade vattenpåföringar (regn) gav synlig utfällning genom ackumuleringseffekt. Mot detta talar vid normala vattenmängder dels försöken i projektet, dels erfarenheter i praktiken. Måttliga vattenskikt försvinner ganska snabbt från betongytan och är snarast en behandlingsmetod. Praktiken visar, att betong som klarar de första regnen i regel slipper kalkutfällningar.

Analyserna på urlakningsproven gjordes med avseende på Ca-joner. Speciellt vid behandling med olika ytbehandlingsmedel vore det tänkbart med missfärgning av kemiska föreningar, som inte innehåller kalcium. Försöken antydde inga allvarliga sådana bieffekter.

9.3 BETONGVAROR

Om man vill omsätta projektresultaten i praktiken är det självfallet lättare för fabrikstillverkade produkter än för platsgjuten betong. På en fabrik är det för det första lättare att skydda nygjuten betong mot fritt vatten (regn) än på en byggnadsplats. För det andra är en behandling lättare att genomföra. I många fall torde redan befintliga härdkammare kunna utnyttjas. Ofta torde nog extra koldioxidtillförsel vara nödvändig, om ett skyddande karbonatskikt skall kunna byggas upp.

Härdning i fuktig luft (80-95 % rf) med eller utan extra värme och extra koldioxid, syns vara den mest naturliga vägen. Brist på koldioxid får dock inte förekomma. Om sådan härdning inte är möjlig eller lämplig, kan användning av ytbehandlingsmedel övervägas. Därvid måste beaktas, att de i projektet mest intressanta medlen varit vattenlösningar. Därför måste man vid påföring i tunna skikt tillse, att behandlingsvätskan inte står för länge på betongytan. I så fall kan själva behandlingen medföra synlig utfällning. Nedsänkning i medlet syns vara bäst, varvid en timmes behandling som använts i försöken troligen är onödigt lång.

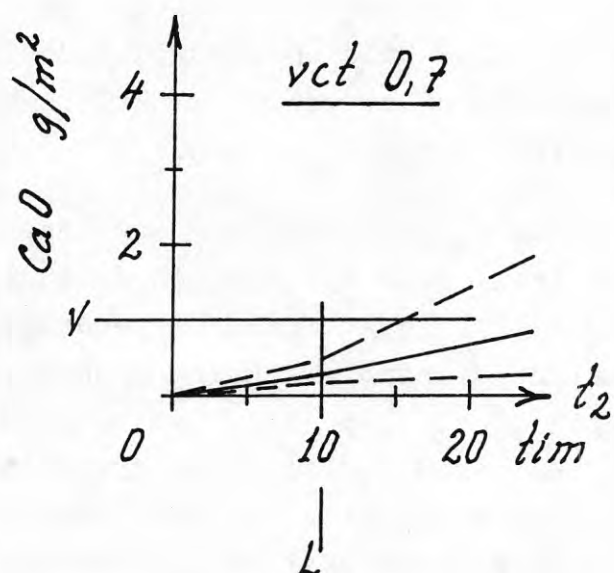
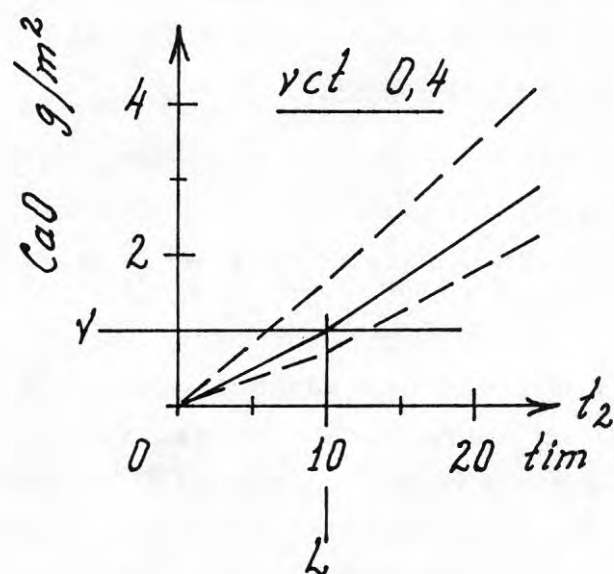


FIG. 83. Reproducerbarhet. Urlakningsförsök på åtta likadana provstycken av vardera vct 0.4 och vct 0.7. Härdning i 20°C och 80 % rf. Avformningstid $t_0 = 1$ dygn. Härdningstid $t_1 = 1$ dygn. Urlakningstid t_2 timmar. Medelkurva (heldragen) och variationsgränser (streckade).

Projektet har studerat behandlingsmedlen ur verknings-synpunkt, men det har inte övervägt vilka merkostnader de medför. Ur kemisk synpunkt eller i laboratorie-försöken finns det inget som talar för att betongytan försämras i andra avseenden.

Skulle kraven vara mycket stora på färgade ytor, speciellt svarta, kan syratvättning övervägas. Därvid skall behandlingen i första hand ses som en skydds-metod och inte som en rengöring.

I vissa fall, där man har sugande produkter, borde vattenbehandling kunna vara ett realistiskt alternativ. Som exempel nämns här tillverkning av färgade betong-hålblock, vilka spolades med vatten dagen efter till-
verkningen men före utsättningen på lagergården. Vattenbehandlingen var i det fallet avsedd för håll-
fasthetstillväxt, men blocken klarade sig utan kalkut-fällning både av behandlingen och av efterföljande regn. Man kan tänka sig, att vattnet snabbt sögs in i blocken och därvid förde löst kalciumhydroxid med sig. När vatten blir stående på en yta, förs kalciumhydroxiden däremot ut på ytan genom diffusion.

Ibland tillverkas element med ytor som inte gjuts mot form, men som skall vara synliga och fylla vissa krav på utseende. Då föreligger risk för separationsvatten och därmed kalkutfällning. Täckning av betongytan med tätslutande plastfolie som skydd har rekommenderats i litteraturen. En sådan skulle i varje fall hindra kar-bonatisering. Ett annat sätt som har prövats är en bearbetning av ytan. Den skall ske efter det att separa-tionsvattnet försvunnit men innan betongen hårdnat.

Skälet till att projektet inte studerat icke formsatta ytor av denna typ är följande. Efter gjutning bearbetas ytan, t ex genom brädrivning och stålglättning. Därvid upparbetas lätt finmaterial i ytan, vars sammansättning blir svårt att bedöma. Följaktligen hade det varit svårt att dra tillförlitliga slutsatser av prov på sådana ytor.

9.4 PLATSGJUTEN BETONG

Redan på sid 252 angavs orsakerna till att kalkutfällningsproblemet är svårare vid platsgjutna än fabriks-tillverkade betongytor.

Beroende på de krav man ställer på den platsgjutna betongytan och vilket pris man vill betala för att reducera risken för kalkutfällning, kan man tänka sig olika åtgärder. I första hand bör man skydda ytorna mot fritt vatten under den första tiden efter avformningen. Vill man gå längre kan man tänka sig en behandling t ex med något av de fosfat som angetts på sid 166 och 177. Ytterligare en möjlighet är syratvättning på tidigt stadium. Den skall då i första hand inte ses som en rengöringsmetod, utan som en behandling mot framtida kalkutfällning. Självfallet skall den då ske i samband med byggnadsarbetena och inte i efterhand. Vidare väljes en syra som dels är så skonsam som möjligt, dels är effektiv. Fosforsyra syns vara ett realistiskt alternativ. Man bör också beakta att det finns kommersiella tvättmedel för betong, som enligt uppgift är skonsammare mot organiska ämnen, t ex huden, än de rena syrorna.

9.5 SLUTKOMMENTAR

Slutligen påpekas, att försöken i projektet i huvudsak varit laboratoriearbeten. Även om de antyder goda möjligheter till skydd mot kalkutfällning krävs sannolikt en viss anpassning, om de skall kunna användas i praktiken. Försök där bör följaktligen starta i måttlig skala. Det gäller såväl platsgjuten som fabriks-tillverkad betong.

Om behandlingsmedel används, skall erforderliga skydds-åtgärder vidtas. Koldioxid är exempelvis kvävande och påverkar andningen redan vid en relativt låg koncentration.

Kalkutfällningar på betongytor har orsakat stora bekymmer för många beställare och producenter, både entreprenörer och betongvarutillverkare. I sista hand har problemet gått tillbaka till cementindustrin såsom materialleverantör. Det skulle vara av stort allmänt värde, om olägenheterna med kalkutfällningar undanröjdes.

Cemeta AB sökte därför och fick anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning till ett forskningsprojekt KALKUTFÄLLNINGAR PÅ BETONGYTOR. För att ersätta en hel del tro i ämnet med vetande, skulle projektets huvudmål vara ett studium av kalkutfällningens mekanism. Framskaffade bakgrundsdata skulle tjäna som plattform för vidare arbete, eget eller andras. Förhoppningsvis skulle projektet även ge praktiskt användbara resultat.

Karbonatisering - kalkutfällning på gott och ont

Kemiskt sett är kalkutfällningarna kalciumkarbonat. De bildas av kalciumhydroxid och koldioxid i närvaro av flytande vatten, men inte annars, enligt formeln



Tillgången på utgångsämnen är riklig. Cementet tillhandahåller kalciumhydroxiden och luften koldioxiden. Synlig utfällning är därför en ganska naturlig företeelse på betong som kan utsättas för vatten. Har man krav på utseendet hjälper det inte att utfällningen är ofarlig. Kommer fritt vatten att stå på en nygjuten betong, sker karbonatiseringen ovanpå ytan och blir en synlig missfärgning, en olägenhet. Slipper betongen däremot fritt vatten under den första tiden finns möjligheten, att man får kalkutfällningen under ytan utan att verka störande. Karbonatet har då blivit ett skydd mot framtida utfällning.

Problemet

Projektet har betraktat utfällningarna helt och hållet som ett estetiskt problem och bortsett från den förstörande verkan urlakning av vatten har vid genomströmning av betong i sprickor och fogar.

Den utlösande faktorn är vatten, i regel regn, som med vindens hjälp även når vertikala ytor. Störning av den tidiga hydratationen till följd av kyla, olämplig form eller formolja ökar riskerna. De flesta och svåraste utfällningarna kommer av erfarenhet under den kalla, regniga årstiden.

När, var och hur kalkutfällningar uppträder och några orsaker till dem illustreras i FIG 1-4 i BILAGA 2.

Kvalitativa försök - pölprov

Med vetskap om vattnet som utlösande faktor för kalkutfällning startades ett stort antal pölprov. Dessa innebar, att ungefär 2 mm tjocka, cirkulära vattenskikt placerades på röda betongplattor, som tillverkats och härdats på olika sätt. Om betongytan var benägen till kalkutfällning, kvarstod en mer eller mindre intensiv sådan inom cirkeln efter uttorkning, men var ytan resistent behöll den sin färg. Pölna sattes på betongytorna parvis vid olika tider efter avformningen för studium av härdningens inverkan. Siffrorna intill cirklarna anger dessa tider i dygn. Genom att observera eventuella utfällningar inom cirklarna, erhöles en god bild av olika faktorerers inverkan, se exemplen i FIG 5-12 i BILAGA 2.

Resultat av pölprov

Försöken gav klart besked. Av de undersökta variablerna var relativa fuktigheten i härdningsluften den som mest påverkade risken för kalkutfällning. Övriga variablers inverkan var av sekundär betydelse jämfört därmed.

Hög relativ fuktighet (80-95 %) vid rums-temperatur ger efter något eller några dygn ett gott skydd mot kalkutfällning. Låg relativ fuktighet (≤ 65 %) kräver mycket lång tid för att eliminera utfällningsrisken.

Det är svårare att göra en betong med lågt vattencementtal, t ex 0.4, resistent mot kalkutfällning än en med högt vattencementtal, t ex 0.7.

Låg härdningstemperatur fördröjer uppbyggnaden av skyddet mot kalkutfällning.

Värmestrålning (sol) tycks ibland väsentligt öka risken för utfällning.

Lång avformningstid ger ingen fördel, och en mycket kort kan i vissa fall vara ogynnsam.

Valet av cementsort påverkar endast undantagsvis risken för kalkutfällning.

Ballastmängd har ingen eller ringa inverkan på kalkutfällningarna.

Under uppbyggnaden av betongytans skydd mot kalkutfällning, dvs ett karbonatskikt under ytan, får vatten inte bli stående på ytan. Däremot är tunna vattenskikt som snabbt sugs in i betongen tänkbara som behandlingsmedel mot utfällning.

Svaghet hos pölproven

Man kan göra följande anmärkning mot pölproven. Dessa motsvarar endast vattenbelastningen av ett 2 mm tjockt vattenskikt. Vad händer om man provar med andra vattenmängder? Egentligen betyder den tid som fritt vatten står på ytan mer än själva vattenmängden. Ett tunt vattenskikt innehåller mindre kalciumhydroxid i lösning

än ett tjockt. Det betyder emellertid föga, eftersom ny hydroxid går i lösning allt eftersom den i vattnet lösta karbonatiseras. Huvudsaken är alltså, att det finns vatten på ytan. Mängden är av underordnad betydelse, då vatten inte förbrukas vid karbonatiseringen.

Kvantitativa prov - urlakningsförsök

För att dels kontrollera resultatet av pölproven, dels få en mera kvantitativ uppskattning av olika variabelers inverkan, gjordes urlakningsprov på betongytor, som härdats och behandlats på olika sätt. Försöken tillgick så, att plaströr klistrades på betongytorna. De fylldes med urkott, avjonat vatten och försågs med gummiproppar. Med jämna mellanrum byttes urlakningsvattnet och analyserades med avseende på kalkinnehåll. Jämförelser mellan prov från olika ytor avslöjade inverkan på risken för kalkutfällning av olika härdning, behandling, etc. Ju mer kalk som vatten kan lösa ur ytan, desto större är risken för utfällning.

När man vill veta om kalkutfällning kan väntas, behöver man ytterligare två uppgifter. Det är dels den mängd kalk V som behöver urlakas för att utfällningen skall bli synlig, dels den tid fritt vatten (i regel regn) kan väntas bli kvar på ytan, dvs vattenbelastningen L . Genom egna laboratorieförsök har V uppskattats till 1 g/m^2 och L har med stöd av andras erfarenheter valts till 10 timmar. Det är ytterst sällan regn står kvar längre tid på en fasad och denna tid anses därför som en acceptabel dimensioneringsgräns.

Resultat av urlakningsprov

Försöken med urlakning bekräftade resultaten från pölproven och underströk ytterligare vikten av en hög relativ fuktighet - dock utan fritt vatten på betongytan - i härdningsluften. De visade dessutom följande:

Man accelererar uppkomsten av ett skyddsskikt i ytan genom förhöjd temperatur i hög relativ fuktighet. Effekten höjs avsevärt genom ökad koldioxidhalt i luften.

Genom ytbehandling av betongen i tidigt skede med vissa behandlingsmedel reduceras kalkurlakningen, dvs risken för kalkutfällning, väsentligt.

Syratvättning utförd i svag koncentration reducerar kalkurlakningen påtagligt. Den kan utföras på ett tidigt stadium i förebyggande syfte.

Se även FIG 14-17 i BILAGA 2.

Betongytans koldioxidupptagning

På betongytor som härdats under olika betingelser uppmättes hur mycket koldioxid som upptagits i samband med karbonatiseringen. Urlakningsförsök på lika ytor visade att kalkurlakningen minskade med tilltagande karbonatiseringsdjup. Koldioxidbehandling som satts in alltför tidigt, dvs innan betongen i ytan är tillräckligt hydratiserad, ger inte ett verksamt skydd mot kalkurlakning.

En teoretisk modell

Med utgångspunkt från pölproven uppställdes en teoretisk modell för kalkutfällningens mekanism. Den bygger på diffusionsteorin.

Vid avformning är koncentrationen av koldioxid i luften och av kalciumhydroxid i betongens vatten konstant. I betongytan sker då - om vatten finns runt cementkornen - en snabb karbonatisering. Förbrukningen av kalciumhydroxid medför därvid en differens mellan koncentrationen av denna i ytskiktet och i underliggande betong.

Finns vatten i porsystemet diffunderar kalciumhydroxiden i riktning mot betongytan. Porsystemets vattenmättnadsgrad styr diffusionen av såväl kalciumhydroxid ut mot ytan som koldioxid in från ytan. Den bestämmer därmed till storlek och läge ytskiktets karbonatisering. Är kalciumhydroxiden i ytskiktet helt förbrukad kan ytan vattenbelastas en viss tid utan att få synlig utfällning, FIG 13 i BILAGA 2. Karbonat-skiktet är i och för sig inget hinder mot ny karbonatisering vare sig i själva skiktet eller på betongytan. Det är inte tätt. Det skikt som helt befriats från kalciumhydroxid verkar skyddande genom att förlänga vägen och tiden för kalciumhydroxiden att nå betongytan.

Liksom pölproven ger både urlakningsförsöken och koldioxidmätningarna stöd åt modellen.

Slutsatser

Den stora mängd kalk - ungefär 2/3 av cementvikten - som kan omvandlas till kalciumkarbonat blir inte nödvändigtvis och inte slumpmässigt synlig missfärgning.

Man kan reducera risken för kalkutfällning i hög grad genom lämpligt vald härdning eller ytbehandling. Självfallet är det lättare att vidta erforderliga åtgärder vid betongvarutillverkning i fabrik än vid platsgjutning. Även där bör dock en del av erfarenheterna från laboratoriearbetet kunna utnyttjas.

LITTERATURFÖRTECKNING

- Ahlgren L,
1972, Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial.
Institutionen för Byggnadsteknik, Tekniska
Högskolan i Lund.
- Ahlgren L, Bergström S G, Fagerlund G och Nilsson L O,
1976, Fukt i betong. Cement- och Betonginstitutet,
Stockholm.
- Bisle H,
1975, Ausbessern von Betonoberflächen, Rezepte
und Arbeitsverfahren, sid 67. Bauverlag GmbH,
Wiesbaden und Berlin.
- Blümel O W och Jung F,
1962, Untersuchungen über Zementausblühungen.
Betongstein-Zeitung nr 6 och 7.
- Boynton R,
1966, Chemistry and Technology of Lime and
Limestone. John Wiley & Sons, New York, London,
Sidney.
- CIB Conseil International du Bâtiment pour la Recherche,
l'Etude et la Documentation,
1973, Tolérances sur les défauts d'aspect du béton.
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris.
- Cole F W och Krone B,
1960, Carbon Dioxide in Hydrated Portland Cement.
Proceedings of the American Concrete Institute,
Vol 56, 1275-1295.
- Cto Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor
1972, Hvid betons teknologi. Köpenhamn.
- Czernin W,
1969, Cementkemi för byggare, Svenska Cement-
föreningen, Malmö, och Bauverlag GmbH, Wiesbaden
und Berlin.
- Dutruef F och Guyader R,
1975, Influence de l'étuvage sur l'évolution de
la teinte d'un béton. Revue des Matériaux de
Construction, nr 696, september-oktober.
- Johansson A och Skarendahl Å,
1973, Färgvariationer hos betong. Byggforsk-
ningen R 13:1973, Stockholm.
- Kauer J A och Freeman R L,
1955, Effect of carbon dioxide on fresh concrete.
Proceedings of the American Concrete Institute,
Vol. 52, 447-454.

- Lindberg B,
1972, Betongmålning. Karakterisering av betong-
ytor, färgers vidhäftning och inträngning. Bygg-
forskningen R 34:1972, Stockholm.
- Neubarth E,
1969, Ein Beitrag zur Entstehung von Ausblühungen
und anderen Kalkausscheidungen auf Betonflächen.
beton Nr 11.
- 1973, Kalkausscheidungen auf Betonflächen und
deren Ursachen. Betongwerk + Fertigteil-Technik,
häfte 3.
- Pihlajavaara S E,
1965, On the main features and methods of
investigation of drying and related phenomena
in concrete. Valtion teknillinen tutkimuslaitos,
Helsingfors.
- Pihlajavaara S E och Pihlman E,
1974, Effect of carbonation on microstructural
properties of cement stone. Cement and Concrete
Research. Vol. 4, sid 149-154, Pergamon Press,
Inc., USA.
- Powers T C,
1960, Physical Properties of Cement Paste.
Proceedings of the Fourth International Sympo-
sium on the Chemistry of Cement, Washington D.C.,
Vol. II, sid 577-609.
- Smith L M,
1973, Colour variations on Concrete masonry.
N.Z. Concrete Construction, februari.
- Statens Betongkommitté,
1960, Statliga Cementbestämmelser. AB Svensk
Byggtjänst.
- Trüb U,
1966, Vergilbtes Schalungsholz. Cementbulletin,
nr 1 januari.
- 1973 Kalkausscheidungen und Grauton. Cement-
bulletin, nr 13 januari. Technische Forschungs-
und Beratungsstelle der schweizerischen Zement-
industrie, Wildegg.
- Walz K und Bonzel J,
1962, Ausblühungen auf Betonflächen.
beton nr 3 och 4.

BILAGA 1

BETONGENS SAMMANSÄTTNING. FORMAR. GJUTNING.

Sammansättning

Bortsett från förförsöken sid. 24, hade betongen (cementbruket) i övriga laboratorieförsök följande sammansättning. Beroende på ballastmängd fanns tre olika betongsammansättningar, A, B och C, för varje vattencementtal. I huvudparten av försöken har betong A använts och endast om det särskilt angivits i texten har betong B eller C använts.

Betong A (cementpastemättnad 132 %)

Material	vct 0.4 kg	vct 0.5 kg	vct 0.6 kg	vct 0.7 kg
Cement	1.000	1.000	1.000	1.000
Vatten	0.400	0.500	0.600	0.700
Normsand 1	0.800	1.000	1.200	1.400
" 2	0.800	1.000	1.200	1.400
" 3	0.800	1.000	1.200	1.400
Kvartsmjöl	-	0.225	0.420	0.640
Pigment	0.040	0.050	0.060	0.070

Betong B (cementpastemättnad 120 %)

Material	vct 0.4 kg	vct 0.5 kg	vct 0.6 kg	vct 0.7 kg
Cement	1.000	1.000	1.000	1.000
Vatten	0.400	0.500	0.600	0.700
Normsand 1	0.875	1.095	1.310	1.530
" 2	0.875	1.095	1.310	1.530
" 3	0.875	1.095	1.310	1.530
Kvartsmjöl	-	0.225	0.420	0.640
Pigment	0.042	0.053	0.063	0.073

Betong C (cementpastemättnad 140 %)

Material	vct 0.4 kg	vct 0.5 kg	vct 0.6 kg	vct 0.7 kg
Cement	1.000	1.000	1.000	1.000
Vatten	0.400	0.500	0.600	0.700
Normsand 1	0.755	0.950	1.130	1.320
" 2	0.755	0.950	1.130	1.320
" 3	0.755	0.950	1.130	1.320
Kvartsmjöl	-	0.225	0.420	0.640
Pigment	0.039	0.049	0.058	0.068

Normsandens kompaktdensitet var 2 650 kg/m³ och dess fuktkvot 0. Siktanalys för de tre fraktionerna normsand som används för cementprovning framgår av följande tabell.

Sikt med mask- vidd mm	Passerande mängd i % för normsand nr		
	1	2	3
1	100	100	73
0.5	100	100	23
0.25	90	55	1
0.125	40	20	0
0.074	10	10	0

Kvartsmjölet bestod av två fraktioner blandade i förhållandet 1:1.

Fraktion 1: ungefär 60 % med kornstorlek <0.043 mm
 " 2: " 96 % " " <0.043 mm

Pigmentet (rött) hade beteckningen Bayer 110 F.

Formar

Provplattorna (450 x 250 x 35 mm) göts i batteriformar med 6 plattor i varje och i det läge för de enskilda plattorna som FIG. 2 på sid 35 visar. Mellan plattorna i batteriformen fanns ett fritt utrymme (exkl formmaterialet) av 35 mm för att undvika stor och olika temperaturstegring hos plattorna. Vid ett fåtal gjutningar i projektets början göts 12 provplattor i varje batteriform. Därvid blev det ingen luftspalt mellan plattorna och temperaturen steg kraftigt, speciellt i innerplattorna.

Formmaterialet var plastbehandlad formplywood, som i huvudsak byttes mellan varje gjuttillfälle, så att formytnan alltid var i gott skick. Ingen formolja användes.

Gjutning

All betong maskinblandades omsorgsfullt. Tillverkningen skedde under likartade förhållanden och alltid inomhus. Bearbetningen skedde genom formvibrering på så sätt att en 25 mm stavvibrator hölls vertikalt mot formen på de enskilda plattorna. Vibreringen skedde med 60-70 sekunder för varje enskild platta och med vibreringen jämnt fördelad utefter sidorna. Konsistensen var plastisk för samtliga plattor men något styvare för vct 0.4 än vct 0.7. De ytor som användes för prov var inte helt fria från gjutblåsor, men i allmänhet av god kvalitet. I stort sett kunde alla försök genomföras utan hinder av gjutblåsor eller andra defekter.

BILAGA 2

KALKUTFÄLLNINGAR PÅ BETONGYTOR

En färgbildbilaga

Problemet -

Inverkan av olika faktorer -

Åtgärder

Kalkutfällningar på betongytor

*Problemet —
inverkan av olika faktorer —
åtgärder*



Fig. 1.
Betongtakpannor illustrerar ofta kalkutfällningsproblemet. Ett svart tak som blev vitt gläder sällan ägaren av en vacker villa. Att grannens betongtakpannor är vackert svarta är en klen tröst. Ofta är det ännu värre om taket endast delvis fått utfällningar. Det kan ta flera år innan en kalkutfällning försvinner.



Fig. 2.
Klimatet under gjutningen och tiden därefter har en avgörande betydelse för betongytors utseende i allmänhet och för kalkutfällningar i synnerhet. Kyla periodvis vid gjutningen störde den tidiga hydratationen och gav silorna de mörka banden. Dessa blev nästan helt vita av kalkutfällning efter första rejäla regn.



Fig. 3.
Lika förhållanden ger lika utseende. De sex kuberna är uttagna vid olika tidpunkter ur satser till gjutningen av silorna i fig. 2. De göts och förvarades inomhus och har därigenom fått ett enhetligt utseende. En måttlig men jämn utfällning är svår att urskilja på grå betong. På svart eller färgad betong kan den vara liktydig med ett misslyckande.

Fig. 4.
Vatten på nyss avformad betong innebär oftast kalkutfällning. Pelaren i förgrunden fick en kraftig utfällning på sin sydsida vid första regnet som drabbade den. Vinden drev regnet mot denna sida. Norsidan däremot fick svagare utfällning och denna kom först långt senare, i samband med regn och nordlig vind, vilket är en ganska ovanlig kombination. Överskott på formolja och solstrålning kan ha ökat utfällningens intensitet. Under plankan har två kommersiella skyddsmedel provats med olika resultat. Tyvärr hade de omvänd effekt på norsidan. Pelaren i bakgrunden är nyavformad. Även den blev vit av kalkutfällning efter första regn.



20°C – vct 0,7
Avformning efter 1 dygn

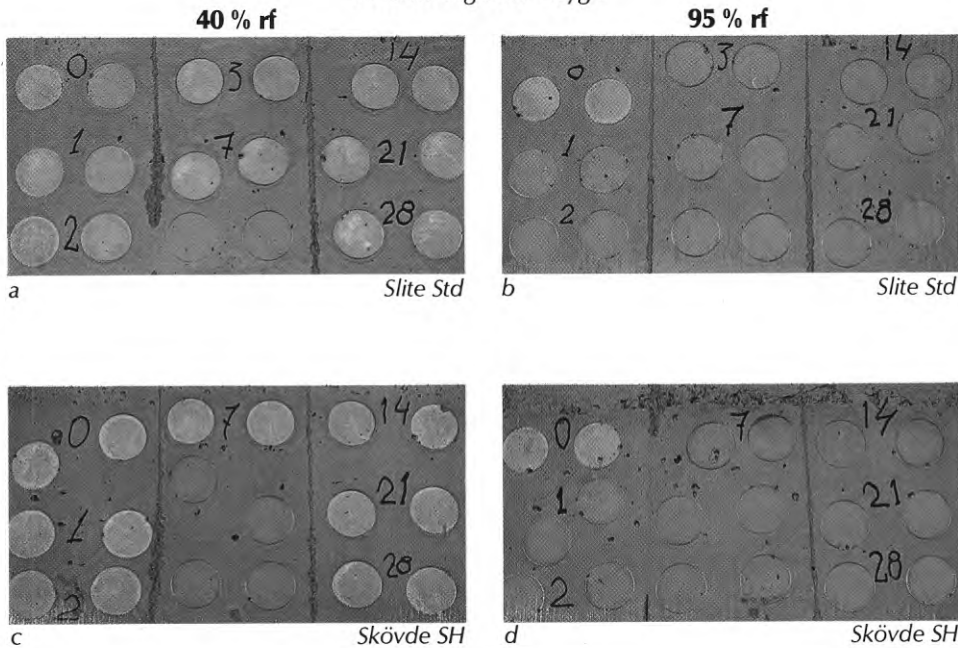


Fig. 5. Pölprov, som visar inverkan av cementsort och relativ fuktighet. Risken för kalkutfällning är i stort sett densamma för olika portlandcement, jämför a och b med c resp. d. Sannolikt kan ett cement med långsam hydratation under vissa villkor lättare få kalkutfällning än ett med snabb. Högt vattencementtal, låg temperatur och kort härdningstid bidrar då att framhäva skillnaden. Inverkan av härdningsluftens relativa fuktighet är däremot mycket stor, jämför a och c med b resp. d.

80° rf

Avformning efter 0,5 dygn

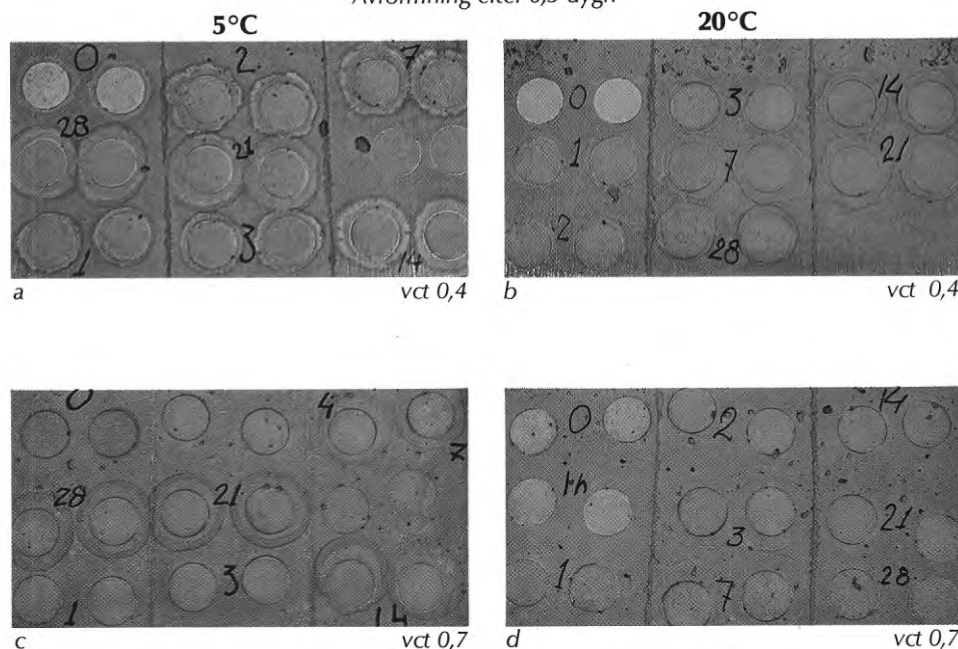
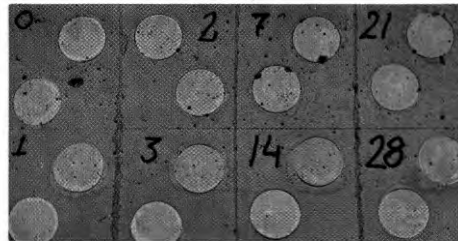
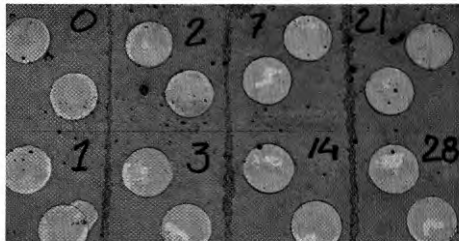


Fig. 6. Pölprov för att utröna temperaturens inverkan. Låg temperatur och kort avformningstid ger betong ett öppet porsystem till följd av otillräcklig hydratation. Vatten tränger lätt in i en sådan betong samt löser och fördelar kalken ojämnt i ytan, som blir ljus, kalkutfällning, eller mörk, a och c. Märk särskilt de mörka cirkelarna i c vid avformningen, tiden 0. Vattnet sögs här in i den porösa betongen på mindre än 10 minuter. I stället för utfällning fick betongen en klar färg. Kanske en idé till behandling mot utfällning i vissa fall. Rumstemperatur ger med samma korta avformningstid betydligt bättre resultat. Skydd mot kalkutfällning är nådd efter ett dygns härdning, b och d. Det är något svårare att få en betong med lågt vattencementtal skyddad mot utfällning än en med högt. Det illustreras här av den mer intensiva utfällningen för vct 0,4 (b) än för vct 0,7 (d) vid avformningen, d. v. s. tiden 0.

20°C
Avformning efter 1 dygn

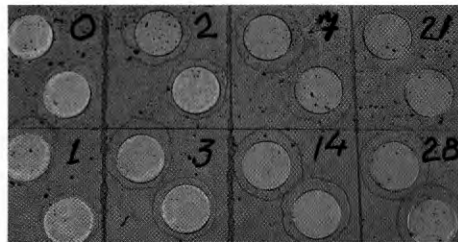
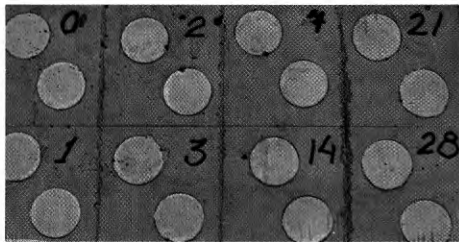
vct 0,4

vct 0,7



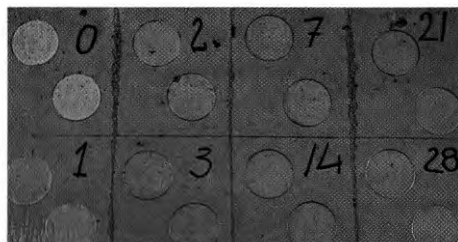
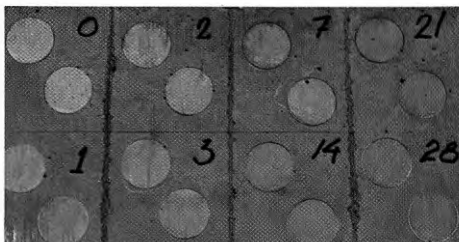
a 40 % rf

b



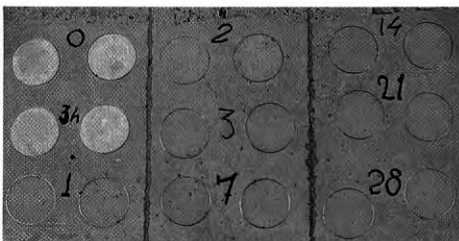
c 65 % rf

d



e 80 % rf

f



g 95 % rf

h

Fig. 7.
Relativa fuktigheten har en dominerande inverkan.
a–b Ännu efter 28 dygn i torr luft var betongen benägen till kalkutfällning vid vattenpåföring.

c–d Höjningen av härdningsluftens relativa fuktighet reducerade kalkutfällningarna något. Det högre vattencementtalet var gynnsammare än det lägre.

e–f Ytterligare höjning av relativa fuktigheten minskade utfällningarna avsevärt. Skillnaden mellan vct 0,4 och 0,7 bestyrks.

g–h Även en mycket hög luftfuktighet – dock ej fritt vatten – vid härdningen är gynnsam. Redan efter 1 dygn var även plattan g med vct 0,4 resistent mot vattenbelastningen, pölen. 3 timmar (3 h) var för kort härdningstid.

20°C – 95 % rf
 Avformning efter 1 dygn

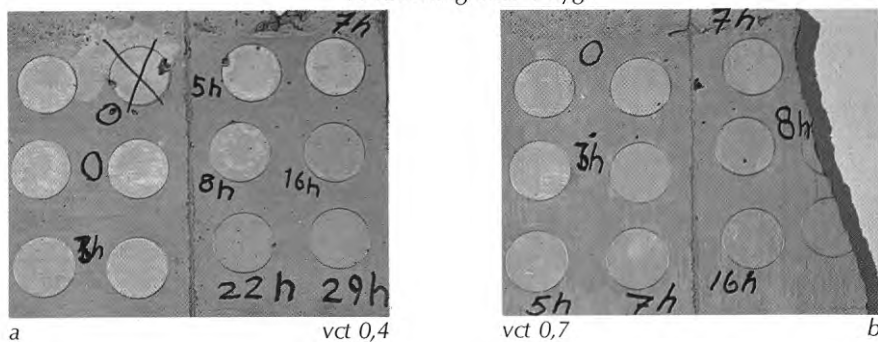


Fig. 8
 I gynnsam relativ fuktighet utbildas snabbt ett skyddande karbonatskikt. Siffrorna intill cirklarna anger tiden i timmar (h) efter avformningen när vattenpömlarna sattes på. Skyddet utbildades snabbare på betong med vct 0,7 än vct 0,4.

20°C – 95 % rf

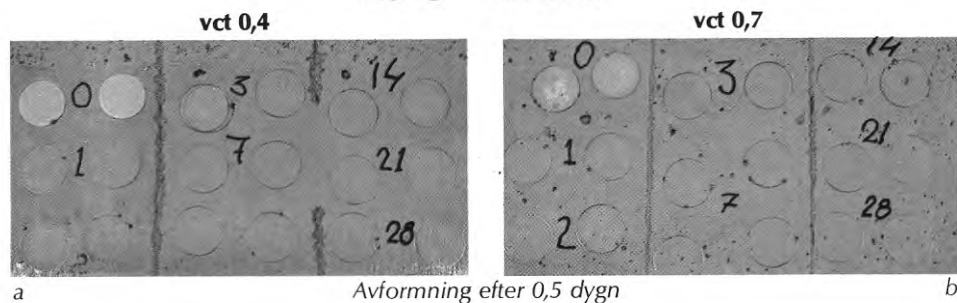
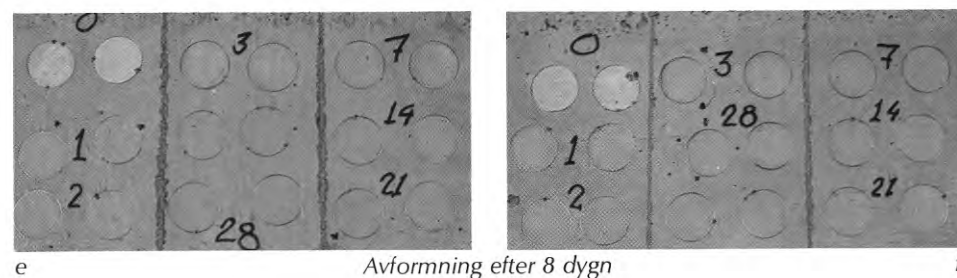
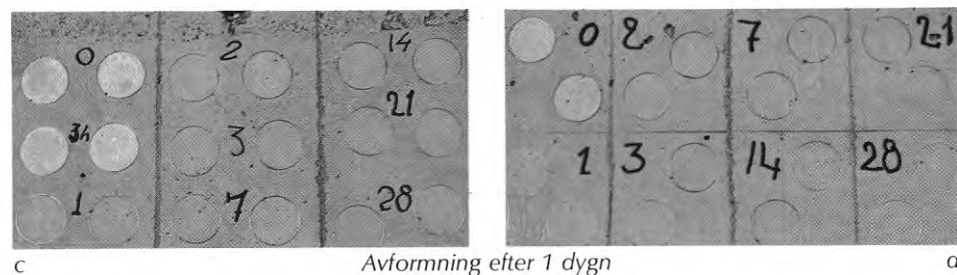


Fig. 9
 Avformningstidens betydelse. Bortsett från så kort tid i form, att hydratationen ej hinner täta porsystemet tillräckligt, är kort avformningstid ingen nackdel ur kalkutfällningssynpunkt. Inget vinnes med lång härdning i form.



5°C – 80 % rf
 Avformning efter 2 dygn

vct 0,4

vct 0,7

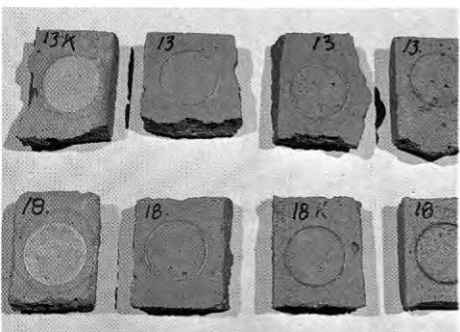
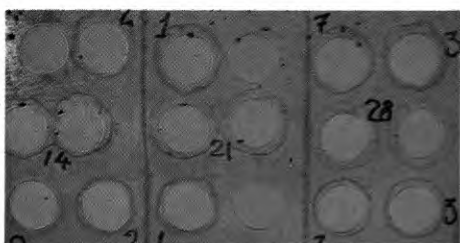
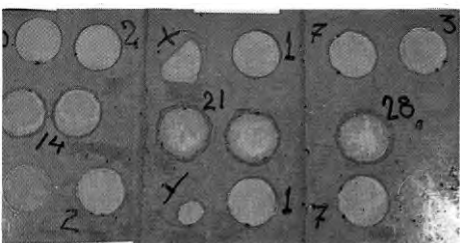
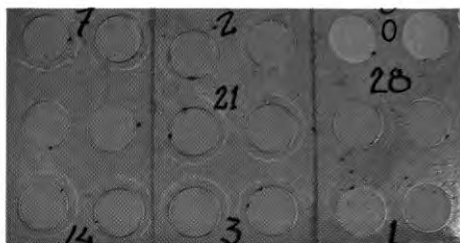
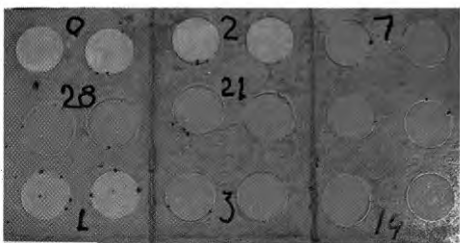
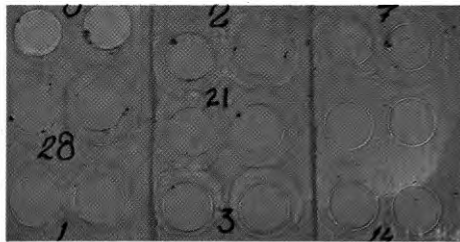
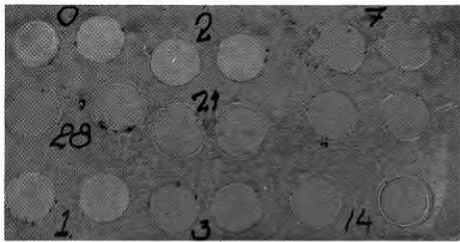


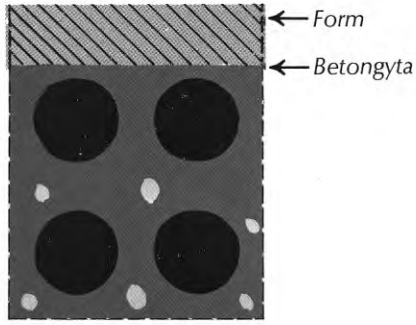
Fig. 10.
 Effekter av vind och värmestrålning. Jämfört med normalproven a och b gav vinden, c och d, ingen eller ringa påverkan. Observera dock vindens ogynnsamma verkan i praktiken, där den kan transportera vatten horisontellt till en nygjuten betongyta. Upprepad – 12 cykler – värmestrålning i 8 timmar (dag) med följande avsvälning i 16 timmar (natt) hindrade uppbyggnaden av ett skydd i betongytan. Svåra kalkutfällningar uppstod av pölarna, e och f. Temperaturen steg under uppvärmningen med ungefär 20°C. Vct 0,4 var ogynnsammare än vct 0,7, jämför e och f.

Fig. 11

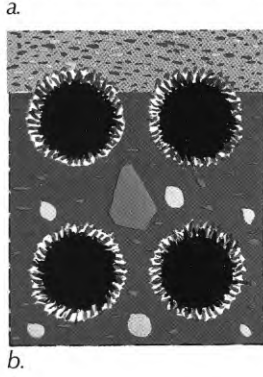
Fig. 12

Fig. 11.
 Syratvättning tar ej endast bort uppkomna kalkutfällningar utan skyddar även för framtiden. Plattorna har från vänster till höger tvättats med saltsyra i koncentrationen: ingen, 1:20, 1:10 och 1:2. Pölprov inom cirklarna visar den goda verkan. Koncentrationen 1:2 var alltför stark och frilade ballasten.

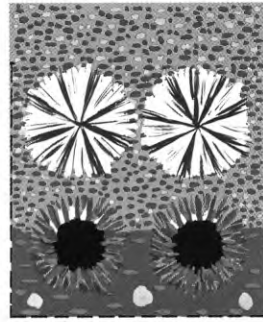
Fig. 12.
 Två sätt att få en helt svart takpanna. Till vänster en målad, blank panna, och till höger en omålad, svagt grå, vars underdel är svart med matt yta efter syratvättning.



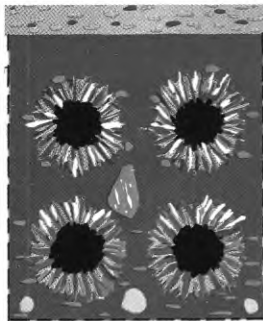
- Luft
- Koldioxid
- Vatten
- Ohydratiserat cement
- Kalciumhydroxid
- Övriga hydratationsprodukter
- Kalciumkarbonat
- Järn-, kisel- och aluminiumföreningar



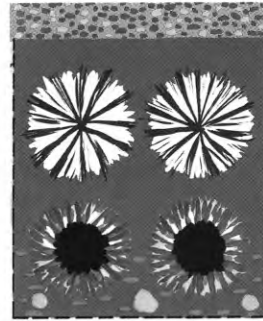
c1.



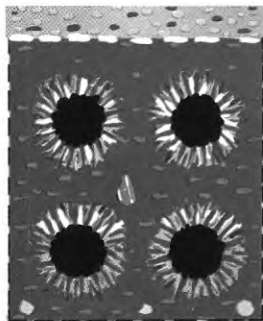
c2.



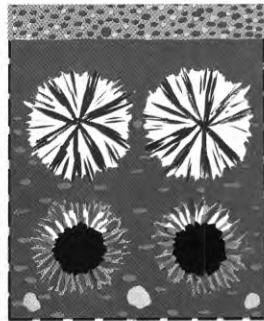
d1.



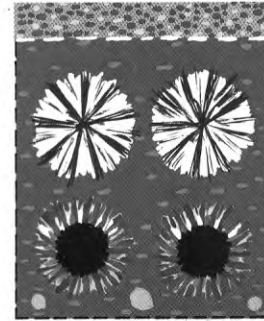
d2.



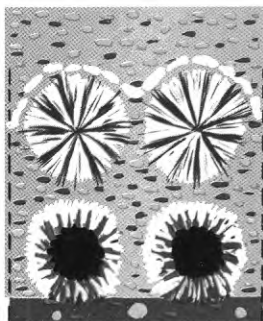
e1.



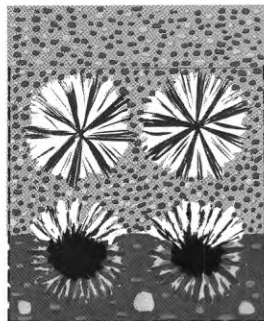
e2.



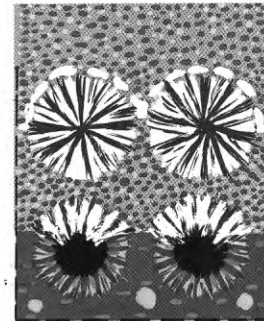
e3.



f1.



f2.



f3.

Fig. 13.

Teoretisk modell i schematisk form.

- a Vid gjutningstillfället är cementet ohydratiserat och formen hindrar luftens koldioxid att nå den färska betongen.
- b Vid avformningen har en viss hydratisering ägt rum och därmed en viss vattenförbrukning, i detta exempel liten. Kvarvarande porvatten är mättat med kalciumhydroxid. Luftens koldioxid når betongytan och karbonatiseringen kan börja.
- c1 Uttorkning i torr luft medför att porvattnet i ytan försvinner dels genom avdunstning, dels genom fortsatt hydratation. Vattenbristen hindrar vidare karbonatisering, som kräver vatten i flytande form, trots att luft innehållande koldioxid trängt in i ytskiktet. Endast en mycket begränsad karbonatbildning har skett.
- d1 Vatten påförs ytan, t. ex. som regn.
- e1 Kalciumhydroxiden diffunderar snabbt ut till vattenytan och mer därav går i lösning, så att vattnet mättas. Vid vattenytan möter luftens koldioxid kalciumhydroxiden och svårslösligt kalciumkarbonat bildas på ytan. Det kan ses med blotta ögat som en hinna på vattenytan. Karbonatiseringen fortsätter, eftersom både koldioxid och kalciumhydroxid genom diffusion snabbt når vattenytan. Allt eftersom den befintliga kalciumhydroxiden förbrukas, bildas ny ur hydrationsprodukterna.
- f1 När vattnet i ytans porsystem torkar ut på nytt lägger sig karbonatet som ett vitt skikt på betongytan och en synlig kalkutfällning är ett faktum. Beroende av tillgången på vatten och koldioxid karbonatiserar sedan betongen i ytskiktet mer eller mindre.
- c2 Till skillnad från c1 sker uttorkningen i fuktig luft. Karbonatbildningen sker inuti porsystemet, ty där finns tillgång både på koldioxid och kalciumhydroxid i vattenlösning. Det verksamma vattnet tänkes här ge sammanhängande vatten-skikt runt cementkornen i kapillärporena. Vattenmängden får dock inte vara så stor, att koldioxidens inträngning hindras. Är tiden tillräcklig blir ytskiktet fullständigt karbonatiserat.
- d2 Omedelbart efter vattenpåföring (regn).
- e2 Kalciumhydroxiden i ytskiktet är helt förbrukad och ny måste tillföras genom diffusion från innanför liggande delar. Den har här inte hunnit nå upp till vattenytan.
- f2 Efter uttorkning har det fria vattnet på betongytan försvunnit. Då det i e2 inte som i e1 fanns något karbonat på vattenytan har ej heller något sådant kunnat avsätta sig på betongen. Om förutsättningarna i fortsättningen är gynnsamma – tillgång till koldioxid och kalciumhydroxid i vattenlösning i skikt runt cementkornen – tränger karbonatiseringen allt djupare in i betongen.
- e3 Till skillnad från e2 har vattnet stått kvar på ytan så länge, att diffunderande kalciumhydroxid nått denna. Karbonatisering sker då efter hand som i e1.
- f3 Vattnet har ånyo torkat ut och ett karbonatskikt har avsatt sig på betongytan som en synlig kalkutfällning. Denna är dock något mindre intensiv än i f1 vid samma vattenbelastning, eftersom kalciumhydroxiden måste diffundera mot ytan från större djup.

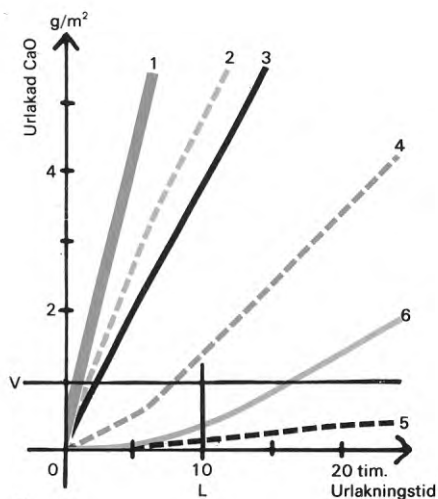


Fig. 14.
Relativa fuktighetens betydelse.
Temperatur 20°C.
Vattencementtal 0,4 (1–5) och 0,7 (6).
1. Urlakningsprov vid avformningen.
2. Urlakningsprov efter 1 dygn i 40 % rf.
3. Urlakningsprov efter 7 dygn i 40 % rf.
4. Urlakningsprov efter 1 dygn i 85 % rf.
5. Urlakningsprov efter 7 dygn i 85 % rf.
6. Urlakningsprov efter 1 dygn i 85 % rf.

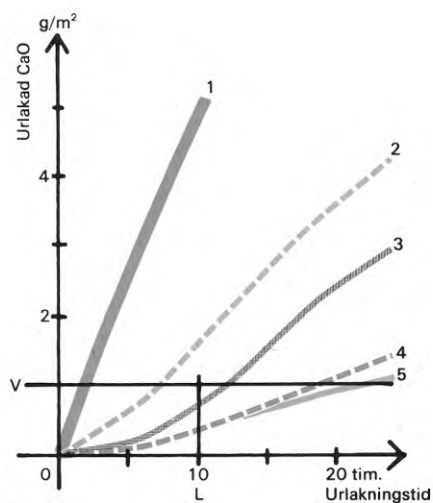


Fig. 15.
Verkan av ökad koldioxidhalt vid värme-
härdning. Urlakningsprov på betong (cement-
bruk) med vct 0,4 härdad i 60°C och
80–85 % rf.
1. Efter 3,0 timmar i luft med 0,03 % CO₂
(vanlig luft).
2. Efter 0,2 timmar i luft med 5 % CO₂.
3. Efter 0,5 timmar i luft med 5 % CO₂.
4. Efter 1,5 timmar i luft med 5 % CO₂.
5. Efter 3,0 timmar i luft med 5 % CO₂.

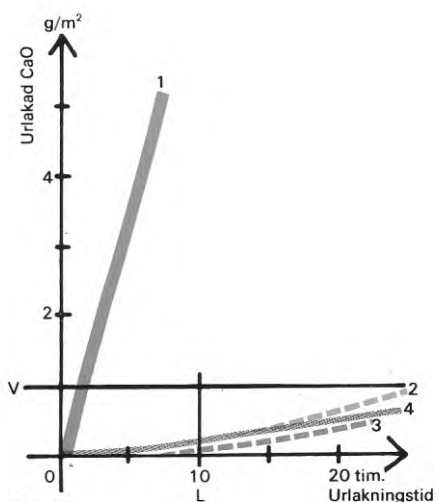


Fig. 16.
Verkan av ytbehandling. Vattencementtal 0,7.
Behandlingen utförd efter avformningen.
Lagring i ett dygn i torr luft, <65 % rf,
vid 20°C före urlakningen.
1. Nollprov – obehandlade, urlakning vid
avformningen.
2. 1 timmas nedsänkning i vattenlösning
av natriumtripolyfosfat.
3. 1 timmas nedsänkning i vattenlösning
av natriumhexametafosfat.
4. 1 timmas nedsänkning i vattenlösning
- av ammoniumkarbammat.
Varje kurva ovan är medelkurva för sex
urlakningsförsök med olika cementsorter
Spridningen mellan de enskilda försöken
var ganska liten.
Samtliga vattenlösningar innehöll 145 g
per liter vatten av respektive behandlings-
medel.

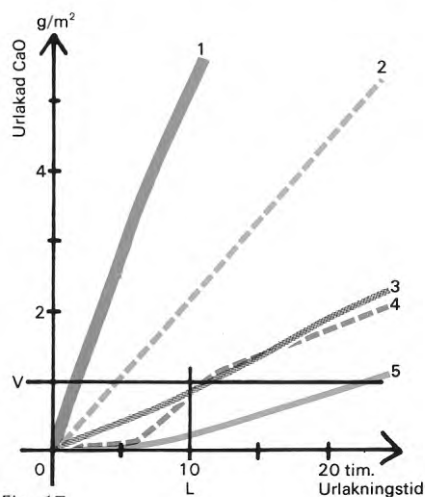


Fig. 17.
Inverkan av syratvättning. Urlakningsprov
på betong (cementbruk) med vattencement-
tal 0,4.
Behandling: Förvattning, syratvättning och
avsköljning med vatten.
Syratvättningen utfördes strax efter avform-
ningen. Sedan lagrades plattorna 1 dygn
i torr luft, <65 % rf, vid 20°C före urlakningen.
1. Obehandlat prov.
2. Tvättning i 45 sekunder i saltsyra 1:20.
3. Tvättning i 180 sekunder i saltsyra 1:20.
4. Tvättning i 45 sekunder i fosforsyra 1:10.
5. Tvättning i 180 sekunder i fosforsyra 1:10.

Diagrammen i de fyra figurerna visar risken för kalkutfällning vid olika härdning och behandling av betongytan. Risken åskådliggörs av den mängd kalk, räknad som CaO, som urlakas då fritt vatten står på betongen.

$V = 1 \text{ g/m}^2$ anger ungefärligt den mängd kalk (CaO) som behövs för synlig utfällning.

$L = 10$ timmar anger dimensionerande vattenbelastning, dvs den tid som en betongyta bör tåla fritt vatten utan att få synlig utfällning.

Urlakningskurvan för en ur kalkutfällningssynpunkt bra betongyta skär alltså den horisontella linjen $V = 1 \text{ g/m}^2$ till höger om $L = 10$ timmar.

R3:1977

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 730625-5 från
Statens råd för byggnadsforskning till Cements AB, Malmö.**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Grupp: konstruktion**

Pris: 57 kronor + moms

Art.nr: 6600603

BYGGDOK
Institutet för byggdokumentation
Hälsingegatan 49
113 31 Stockholm, Sweden
08-34 01 70 Telex 125 63

ISBN 91-540-2642-3