Cathrine Andersson
Per-Erik Petersson

HÄRDNINGENS INVERKAN PÅ BETONGS PERMEABILITET OCH BESTÄNDIGHET

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF CURING CONDITIONS ON THE PERMEABILITY AND THE DURABILITY OF CONCRETE

In the project four concrete qualities were subjected to different curing conditions. The influence of the method of curing on the quality of the concrete surface layer was registered by use of parameters such as water tightness, air permeability, carbonation rate, chloride penetration rate, salt frost resistance and surface tensile strength.

The concrete qualities tested were two Portland cement concretes with water-cement ratios of 0.5 and 0.7 and two concrete qualities, both with a water-cement ratio corresponding to 0.5, containing silica fume and fly ash respectively.

The results indicate that wet curing is superior to other curing methods tested such as covering by plastic foils or membrane curing compounds. For example, wet cured Portland cement concrete with a water-cement ratio of 0.7 seems to be less permeable for water and air than concrete with a water-cement ratio of 0.5 which is cured by use of plastic foils. Another interesting result is that bad curing conditions during the first days after casting to a large extent can be compensated for by use of a renewed wet curing. Finally, the use of fly ash or silica fume does not, according to the results in this investigation, increase the sensitivity to the curing conditions.

Key words: Concrete, curing, permeability, durability

TEKNISK RAPPORT 1987:07
ISBN 91-7848-050-7
ISSN 0280-2503 Statens provningsanstalt

Borås 1987

INNEHÅLLSFÖRTECKNING sid

	ABSTRACT	2
	FÖRORD	5
	SAMMANFATTNING	6
1	BAKGRUND OCH SYFTE	7
2	PROVNINGSPROGRAM OCH UTFÖRANDE	9
2.1	Program	9
2.1.1	Inledning	9
2.1.2	Betongkvalitet	9
2.1.3	Härdningssätt	12
2.1.4	Provningsmetoder	13
2.2	Utförande	15
2.2.1	Betongtillverkning	15
2.2.2	Härdning	17
2.2.3	Provningsmetoder	19
3	VATTENTÄTHET	22
3.1	Allmänt	22
3.2	Provningsmetod	22
3.3	Resultat	24
4	LUFTPERMEABILITET	29
4.1	Allmänt	29
4.2	Provningsmetod	31
4.3	Resultat	31
5	KARBONATISERING	35
5.1	Allmänt	35
5.2	Provningsmetod	36
5.3	Resultat	36

		sid
6	KAPILLÄRSUGNING	44
6.1	Allmänt	44
6.2	Provningsmetod	45
6.3	Resultat	46
7	KLORIDINTRÄNGNING	52
7.1	Allmänt	52
7.2	Provningsmetod	52
7.3	Resultat	54
8	SALTFROSTBESTÄNDIGHET	67
8.1	Provningsmetod	67
8.2	Resultat	69
9	FROSTBESTÄNDIGHET - RENT VATTEN	79
9.1	Provningsmetod	79
9.2	Resultat	79
10	TUNNSLIPSANALYS	81
10.1	Allmänt	81
10.2	Provningsmetod	81
10.3	Resultat	82
11	YTHÅLLFASTHET	85
11.1	Provningsmetod	85
11.2	Resultat	86
12	SAMMANFATTANDE SLUTSATSER	92
13	REFERENSER	94
	BILAGOR	
	1 Material	96
	2 Reaktivitetstest	99

FÖRORD

Det arbete som presenteras i denna rapport har utförts vid Statens provningsanstalt i Borås och utgör en del av ett större projekt som behandlar betongs betständighet. Inom huvudprojektet har också två andra delprojekt utförts, dels vid FCB i Trondheim (luftstabilitet og luftporekarakteristikk i betong med luftporedannende tilsetningsstoff) och dels vid CBI i Stockholm (permeabilitetens betydelse för betongs beständighet).

Projektet har tillkommit genom en svensk-norsk intressentgrupp bestående av från svensk sida
Svenska Fabriksbetongföreningen
Svenska Byggnadsentreprenörföreningen
Vattenfall
Vägverket

och från norsk sida
Norsk Fabrikkbetongforening
Entrepenorenes Landsammenslutning
NORCEM Cement A/S
Statskraftverkene

Forskningsanslag har erhållits från
BFR
Nordisk Industrifond
SBUF

Borås i mars 1987

Cathrine Andersson Per-Erik Petersson

SAMMANFATTNING

I denna undersökning har härdningens inverkan på betongs permeabilitet och beständighet undersökts. Fyra betongkvaliteter har efter gjutningen härdats på olika sätt. Härdningssättets inverkan på kvaliteten hos betongskiktet närmast gjutytan har sedan studerats genom parametrar såsom vattentäthet, luftpermeabilitet, karbonatiseringshastighet, kloridinträngning, saltfrostbeständighet och ythållfasthet.

Två av betongkvaliteterna hade ren portlandcement som bindemedel och deras vattencementtal (vct) var 0,5 respektive 0,7. De andra två betongkvaliteterna, båda med ett vct motsvarande 0,5, hade tillsatser av flygaska respektive silikastoft.

Provningsresultaten visar att fullgod fukthärdning (vattenlagring) är klart bättre än de övriga härdningssätt som ingick i undersökningen. Till och med en så kort vattenlagring som 2 dygn ger klart bättre resultat än intäckning med plastfolie under 5 dygn eller efterbehandling med hjälp av membranhärdare. Ett exempel på detta är att en våtlagrad betong med ett vct på 0,7 är tätare mot luft och vatten än en betong med ett vct på 0,5 som härdats genom intäckning med plastfolie. Ett annat intressant resultat är att en utebliven efterbehandling under de första dygnen till stor del tycks kunna kompenseras genom en förnyad våtlagring. Slutligen har det i projektet inte kunnat påvisas några signifikanta skillnader i känslighet för härdningssättet för betong med respektive utan tillsatsmaterial.

1 BAKGRUND OCH SYFTE

Betongkvaliteten i en färdig konstruktion beror förutom på materialsammansättning och bearbetning också på härdningsbetingelserna efter gjutningen. En riktigt utförd efterbehandling är förmodligen nödvändig för att erhålla en betong med tillfredsställande egenskaper, särskilt med avseende på beständighet.

Stora resurser har lagts ned för att utreda framförallt materialsammansättningens men också bearbetningens betydelse för betongens egenskaper medan däremot kunskaperna om härdningens inverkan är mycket begränsade. I de fåtaliga rapporter som behandlar härdningens inverkan, t ex [1-5], framgår det dock klart att en bristfällig efterbehandling kan vara förödande för betongens täthet och därmed dess beständighet.

Syftet med denna undersökning har varit att öka kunskaperna rörande härdningens inverkan på betongs permeabilitet och beständighet. Vi har därvid valt att göra en "bred" undersökning. Detta innebär att effekten av ett stort antal härdningssätt har studerats för ett stort antal parametrar på ett flertal betongkvaliteter. Denna breda satsning har valts för att kartlägga området och avsikten har bl a varit att man med hjälp av resultaten från detta arbete ska kunna välja ut några intressanta och väsentliga delområden för en mer omfattande och ingående undersökning.

En annan avsikt med detta arbete har varit att undersöka olika provningsmetoders användbarhet för att studera härdningens inverkan på betongkvaliteten. Därvid har det varit av speciellt intresse att få fram metoder som lämpar sig för att i fält avgöra om härdningen utförts på ett riktigt sätt.

För att erhålla resultat som är direkt praktiskt tillämpbara har normala härdningssätt och vanligen förekommande betongkvaliteter valts. Bland de 9 härdningssätt som studerats finns allt från fullgod fukthärdning till ingen efterbehandlig alls. Bland de 4 betongkvaliteterna finns 2 som innehåller tillsatsmaterial (silikastoft respektive flygaska). Dessa 2 betongkvaliteter med tillsatsmaterial ingår i undersökningen för att dessa normalt anses vara mer beroende av en god efterbehandlig än vad betong med enbart portlandcement som bindemedel är.

2 PROVNINGSPROGRAM OCH UTFÖRANDE

2.1 Program

2.1.1 Inledning

Projektet är inriktat på att studera vilken inverkan härdningen har på betongens beständighet och permeabilitet. Utredningen är uppbyggd på tre olika parametrar; betongkvalitet, härdningssätt och provningsmetod. Utgående från de tre parametrarna har ett provningsprogram gjorts upp.

Fyra olika betongkvaliteter provades. Från de olika betongkvaliteterna framställdes ett stort antal provkroppar, vilka härdades på skilda sätt. Efter härdningen genomfördes de olika provningarna.

2.1.2 Betongkvalitet

Nedan används följande beteckningar

$vct = W/C$

$vbt = W/(C+R)$

$vct_{ekv} = W/(C+kR)$

där

vct = vattencementtal

vbt = vattenbindemedelstal

vct_{ekv} = ekvivalent vattencementtal

W = vikt vatten

C = vikt cement

R = vikt tillsatsmaterial

k = tillsatsmaterialets aktivitetskoefficient

I denna undersökning har k valts till 0,3 för flygaska och till 1,0 för silikastoft vid beräkning av vct_{ekv}. Dessa värden på k får normalt användas enligt Statens planverks godkännanderegler för mineraliska tillsatsmaterial till betong [6].

De tre första betongkvaliterna har det gemensamma att vct_{ekv} är ungefär lika med 0.5 och att de har en lufthalt på cirka 5.5 %. Till den första kvaliteten användes ren portlandscement, till den andra ersattes 30 % av cementmängden med flygaska och till den tredje ersattes 10 % av cementmängden med silikastoft. Den fjärde kvaliteten har ett vattencementtal lika med 0.7 och en lufthalt på cirka 2.5 %. I rapporten används följande beteckningar för att särskilja de olika betongkvaliteterna.

- kvalitet A: vct = 0,5
- kvalitet B: vct_{ekv} = 0,5 , 30 % flygaska*
- kvalitet C: vct_{ekv} = 0,5 , 10 % silikastoft*
- kvalitet D: vct = 0,7

* % tillsatsmaterial av cementmängden

Till alla betongkvaliteterna användes portlandscement (Slite Std P) och ballastens största stenstorlek var 16 mm. Sättmåttet för de fyra betongsammansättningarna var 100±10 mm. Till betongen med silikastoft (kvalitet C) användes vattenreducerande tillsatsmedel och därför blev bindemedelshalten lägre än för kvalitet A och B.

För de olika betongblandningarna bestämdes lufthalt enligt SS 13 71 24 i samband med gjutning och tryckhållfasthet enligt SS 13 72 10 vid 28 dygn. Resultaten samt erhållen bindemedelshalt, vct_{ekv} och vbt anges i tabell 2.1. En utförligare beskrivning av delmaterialen ges i bilaga 1.

Tabell 2.1 Betongsammansättning, lufthalt och tryckhållfasthet

Kvalitet/ sats		B (kg/m³)	vct_{ekv}	vbt	L (%)	f_c (MPa)
A	sats 1	411	0,47	0,47	5,4	44,2
	sats 2	411	0,50	0,50	5,5	42,3
	sats 3	411	0,49	0,49	5,6	42,8
B	sats 1	423	0,48	0,40	5,6	40,3
	sats 2	428	0,48	0,40	5,4	41,4
	sats 3	427	0,48	0,40	5,4	42,2
C	sats 1	360	0,50	0,50	5,1	45,7
	sats 2	360	0,48	0,48	4,8	42,1
	sats 3	360	0,51	0,51	5,5	50,1
	sats 4	364	0,50	0,50	4,8	49,0
D	sats 1	269	0,67	0,67	2,7	34,5
	sats 2	266	0,72	0,72	2,6	30,5

Förklaring till tabell

B är bindemedelshalt i kg/m³
L är lufthalt i % av betongvolymen
f_c är tryckhållfasthet i MPa

Tryckhållfastheten för kvalitet C, sats 1 och 2, är lägre än för sats 3 och 4. Det är sannolikt att sats 3 och 4 är mest representativa för en betong med inblandning av silikastoft eftersom den verkliga aktivitetskoefficienten normalt är betydligt högre än det antagna värdet 1,0.

2.1.3 Härdningssätt

Efterbehandling av betong kan utföras på olika sätt. I projektet provades ett antal olika härdningssätt för att se vilken inverkan härdningen har. De olika härdningssätten visas i tabell 2.2.

Tabell 2.2 Härdning före provningsstart vid 28 dygn. Temperaturen i vattnet var +20±1 °C. Luftlagring skedde vid +20±1 °C och 50±2 % RF om inget annat anges. Tabellen ska läsas från vänster till höger.

Härdningssätt	Antal dygn i Luft	Vatten	Folie	Luft	Anmärkning
1	0	5	0	23	
2	0	0	0	28	
3	0	2	0	26	
4	2	5	0	21	
5	0	0	5	23	
6	0	0	0	28	Membranhärdare
7	0	14	0	14	
8	0	0	0	28*	
9	0	0	5*	23*	

* Luftlagring vid +5±1 °C och 70±2 % RF

Härdningssätt 1-3 utgör tre nivåer på efterbehandling, från fullgod fukthärdning (härdningssätt 1) till utebliven fukthärdning (härdningssätt 2). Med hjälp av härdningssätt 4 studerades om utebliven fukthärdning under de första dygnen kan kompenseras genom en fukthärdning i efterhand. Härdningssätt 5 utfördes för att se hur effektiv en intäckning med plastfolie är jämfört med fullgod efterbehandling. Inverkan av en membranhärdare undersöktes med härdningssätt 6. För att studera om en fuktlagring utöver 5 dygn ytterligare kan förbättra resultatet har 14 dygns vattenlagring (härdningssätt 7) utförts för en av betongkvaliteterna. Slutligen har inverkan av intäckning med plastfolie studerats vid +5 °C (härdningssätt 8 och 9). Detta härdningssätt används ofta vid lägre temperaturer då det föreligger risk för frysning.

2.1.4 Provningsmetoder

Efter 28 dygns härdning startade provningsprogrammet, vilket omfattade nio olika mätningar på betongen. Alla provningar var inriktade på gjutytan och skiktet närmast under för att se vilken inverkan härdningen har. Provningarna beskrivs mer utförligt i kapitel 3-11. Följande provningar utfördes

- vattentäthet
- luftpermeabilitet
- karbonatisering
- kapillärsugning
- kloridinträngning
- saltfrostbeständighet
- frostbeständighet i rent vatten
- tunnslipsanalys
- ythållfasthet

Provningsprogrammet visas i tabell 2.3.

Tabell 2.3 Provningsprogram

Betong-kvalitet	Härdningssätt enligt tab. 2.2	Vattentäthet	Luftpermeabilitet	Karbonatisering	Kapillärsugning	Kloridinträngning	Saltfrostbest.	Frostbest. rent vatten	Tunnslip	Ythållfasthet
Kval A	1	X*	X	X	X	X	X		X	X
	2	X*	X	X	X	X	X		X	X
vct = 0,5	3	X	X		X		X		X	X
	4	X	X		X		X		X	X
	5	X	X	X	X	X	X		X	X
	6	X	X		X		X		X	X
	7									
	8	X	X				X		X	
	9	X	X				X		X	
Kval B	1	X*	X	X	X	X	X		X	X
	2	X	X	X	X	X	X		X	X
vct_{ekv} =	3									
0,5	4									
30 %	5	X	X	X	X	X	X		X	X
flygaska	6									
	7									
	8									
	9						X			
Kval C	1	X*	X	X	X	X	X		X	X
	2	X	X	X	X	X	X		X	X
vct_{ekv} =	3									
0,5	4									
10 %	5	X	X	X	X	X	X		X	X
silika-	6									
stoft	7	X		X			X			
	8									
	9						X			
Kval D	1	X*	X	X	X	X		X	X	X
	2	X	X	X	X	X		X	X	X
vct = 0,7	3			X		X				X
	4			X		X				X
	5			X		X				X
	6									
	7									
	8									
	9									

* Vattentäthet utan tryck utfördes för aktuell kombination betongkvalitet och härdningssätt

2.2 Utförande

2.2.1 Betongtillverkning

Gjutningarna, enligt programmet, startade i oktober 1985 och slutfördes under november 1985. För kvalitet C (10 % silikastoft) erhölls oväntat låg tryckhållfasthet. En reaktivitetstest utfördes på silikastoftmaterialet, vilket redovisas i bilaga 2. En omgjutning i mindre skala av kvalitet C utfördes under april 1986.

De fyra kvaliteterna delades upp i olika betongsatser i och med att mängden betong var för stor att gjuta i en omgång, se tabell 2.4.

Tabell 2.4 Gjutningsdatum.

Kvalitet	Betongsats	Gjutningsdatum
Kvalitet A	sats 1	1985-10-23
	sats 2	1985-10-28
	sats 3	1985-10-28
Kvalitet B	sats 1	1985-11-14
	sats 2	1985-11-14
	sats 3	1985-11-14
Kvalitet C	sats 1	1985-11-07
	sats 2	1985-11-07
Omgjutning	sats 3	1986-04-16
	sats 4	1986-04-16
Kvalitet D	sats 1	1985-10-02
	sats 2	1985-10-09

Betongsatserna 1,2 och 3 för kvalitet C har samma betongsammansättning. I betongsats 4 användes en annan typ av luftporbildare än för de övriga tre betongsatserna.

Blandningen av betongen gick till på följande vis för de olika kvaliteterna.

Kvalitet A
Ballast och cement blandades cirka 1 minut i blandaren Sandby "SU350" (350 liters gummiinklädd tvångsblandare). Luftporbildaren späddes ut i lite vatten och tillsattes med det första blandningsvattnet. Betongen blandades sedan i 2 minuter och därefter mättes konsistensen. Blandningen fortsatte ytterligare 1 minut och eventuellt spädvatten tillsattes för att uppnå rätt konsistens. Lufthalten i betongen bestämdes i en lufthaltsmätare, med fabrikat Tonindustrie, efter 2x15 sekunder vibrering på vebe-bord.

Kvalitet B
Blandningen utfördes på samma sätt som för kvalitet A, varvid flygaskan och cementen tillsattes samtidigt.

Kvalitet C
Silikastoftet tillsattes samtidigt som cementen. Luftporbildaren och flytmedlet späddes ut i lite vatten var för sig och tillsattes samtidigt som det första blandnings vattnet. För övrigt utfördes blandningen som för kvalitet A.

Kvalitet D
Samma förfarande som för kvalitet A.

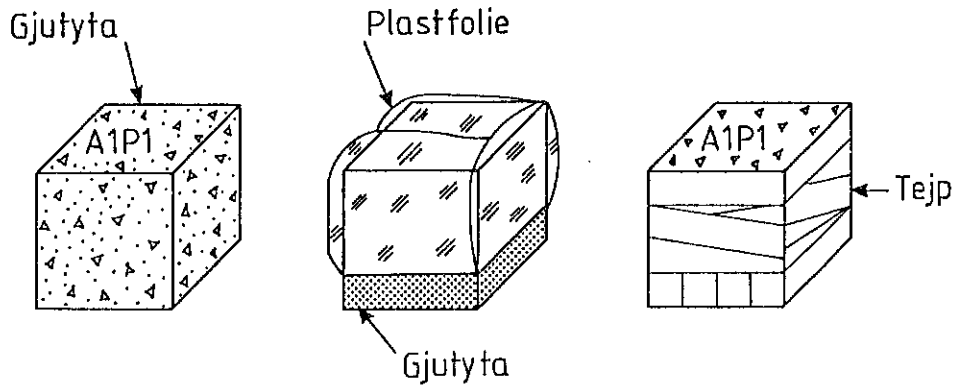
Av betongsatsen tillverkades provkroppar enligt gjutningsschema. Provkropparna vibrerades 2x15 sekunder på vibratorbord och ytan drogs av två gånger fram och tillbaka med en stålstav.

2.2.2 Härdning

Direkt efter det att provkropparna tillverkats började de olika härdningssätten. Förfarandet återupprepades för varje betongsats. Nedan följer en utförlig beskrivning över hur de olika härdningssätten utfördes och vilket nummer de har enligt tabell 2.2.

1 Vatten, 5 dygn
Provkropparna inneslöts i plastfolie direkt efter gjutning, varvid det tillsågs att folien inte låg an mot gjutytan. Våta wetexdukar placerades under plastfolien för att hålla en hög luftfuktighet. Efter 3-4 timmar, när ytvattnet hade försvunnit, lades våta wetexsdukar på provkropparna. Dessa hölls sedan fuktiga under det första dygnet.

Efter ett dygn avformades alla provkropparna och märktes efter uppgjort schema. Alla sidor utom provytan, gjutytan, förseglades med en plastfolie för att förhindra fuktutbyte med omgivningen, se figur 2.1. Därefter placerades provkropparna, med provytan nedåt, på galler i plastbaljor med vatten. Vattennivån nådde ca 5 mm upp på provkroppens sidor. Provkroppar och balja täcktes över med en plastfolie. Fem dygn efter gjutning avbröts vattenhärdningen och provkropparna förvarades därefter i klimatrum. Det första dygnet före avformning räknas med i de fem dygn vattenlagring som provningsprogrammet anger. Efter 23 dygns luftlagring startade provningarna.



Figur 2.1 Försegling av provkropp

2 Luft

Direkt efter gjutning placerades provkropparna i klimatrum. Ingen åtgärd gjordes för att förhindra avdunstning från betongytan. Provkropparna avformades efter ett dygn och märktes. På samma sätt som för vatten 5 dygn isolerades alla ytor utom provytan med plastfolie. Därefter fortsatt förvaring i klimatrum under 27 dygn innan provningarna började.

3 Vatten, 2 dygn

Samma som vatten 5 dygn med den skillnaden att provkropparna togs upp ur vattenbadet vid 2 dygns ålder. Luftlagringen blev 26 dygn.

4 Eftervattning

Härdningssättet eftervattning är en kombination av luftlagring och vattenlagring. Förfarandet var lika med luftlagring tills dag två, då provkropparna placerades i vattenbad för vattenhärdning i fem dygn. Efter vattenlagringen luftlagrades provkropparna 21 dygn i klimatrum.

5 Folie, 5 dygn

Provkropparna placerades i klimatrum efter gjutning med en plastfolie över. Plastfolien hade inte kontakt med betongytan. Under plastfolien placerades våta wetexdukar för att hålla en hög luftfuktighet. Efter ett dygn avformades och märktes provkropparna. Alla sidor utom provytan förseglades och provkropparna placerades därefter åter under plastfolie. Folien omslöt provkropparna helt och hållet. Vid fem dygns ålder togs plastfolien av och provkropparna förvarades 23 dygn i klimatrum fram tills dess att provningarna startade.

6 Membranhärdare

Efter gjutning placerades provkropparna i klimatrum utan någon form av övertäckning. Membranhärdaren, se bilaga 1, påfördes när ytvattnet hade försvunnit efter cirka 3-4 timmar. Provkropparna avformades, märktes och alla ytor utom provytan förseglades efter ett dygn. De placerades åter i klimatrum för fortsatt förvaring under 27 dygn.

7 Vatten, 14 dygn

För kvalitet C sats 3 och 4 utökades härdningsätten med ytterligare ett. Härdningen överensstämmer med vatten 5 dygn med den avvikelsen att vattenlagringen varade 13 dygn efter avformning och luftlagringen blev därför 14 dygn.

8 Luft, +5 °C

Samma förvaring som för luftlagring 20 °C med den skillnaden att provkropparna förvarades i klimatrum +5 °C och 70 % RF.

9 Folie, +5 °C:

Samma förvaring som för folie 5 dygn 20 °C förutom det att provkropparna förvarades i klimatrum +5 °C och 70 % RF.

2.2.3 Provningsmetoder

I kapitel 3-11 beskrivs provningsmetoderna utförligt och vilka resultat som har erhållits. I tabell 2.5 visas en sammanställning över vilken typ av provkroppar som har tillverkats för de olika provningsmetoderna.

Tabell 2.5 Provningsmetod - provkropp

Provningsmetod	Form	Antal per provning	Mått (mm) bxlxh
Vattentäthet	prisma	2	250x250x125
Luftpermeabilitet	prisma	2	250x250x125
Karbonatisering	prisma	4	100x400x100
Kapillärsugning	kub	2	150x150x150
Kloridinträngning	prisma	2	250x250x125
Saltfrostbeständighet	kub	4	150x150x150
Frost, rent vatten	kub	4	150x150x150
Tunnslipsanalys	prisma	1	250x250x125
Ythållfasthet	prisma	1	250x250x125

Varje betongkvalitet delades upp i 2-4 gjutsatser. Provningsmetoderna fördelades mellan satserna så att provkroppar till en provningsmetod kom från samma betongsats. Detta gick bra för alla provningsmetoder utom för karbonatisering kvalitet D som fick delas upp på två betongsatser. Följande sammanställning, tabell 2.6 visar på vilken betongsats provningsmetoderna har utförts.

Tabell 2.6 Provningsmetoder - betongsats

Kvalitet	A			B			C				D	
Sats	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	1	2
<u>Provningsmetod</u>												
Vattentäthet	X		*		*	X		X*	X	X	X*	
Luftpermeabilitet	X					X		X			X	
Karbonatisering			X		X		X		X		X	X
Kapillärsugning			X		X		X				X	
Kloridinträngning			X			X		X				X
Saltfrostbest.		X		X			X		X	X		
Frostbest. vatten												X
Tunnslipsanalys	X					X		X			X	
Ythållfasthet		X		X				X			X	

* Vattentäthet utan tryck kommer från denna betongsats

3 VATTENTÄTHET

3.1 Allmänt

Vattentäthetsprovning utfördes på två sätt; vattentäthet med tryck och utan tryck. Den sistnämnda utfördes endast på ett mindre antal provkroppar. Anledningen till att den genomfördes var för att se vilket samband som finns mellan de två provningsmetoderna.

3.2 Provningsmetod

Vattentäthet med tryck
För varje aktuell kombination betongkvalitet - härdningssätt provades två vattentäthetsprismor enligt SS 13 72 14, med den skillnaden att gjutytan provades istället för bottenytan. Provningen utfördes efter 28 dygn, i något fall efter 27 dygn beroende på begränsat antal platser i täthetsbädden. Gjutytan utsattes för ett vattentryck på 0,8±0,03 MPa under 24±2 h inom en cirkulär yta med diametern 170 mm. Plasten runt provkroppen var kvar under provningen. Provkroppen spräcktes upp efter 24±2 h och inträngningsdjupet mättes. Provningsresultatet, medelvärdet av två provkroppar, redovisas i mm.

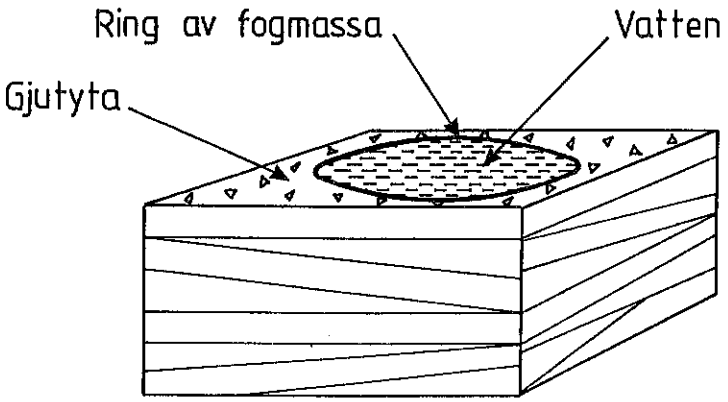
Härdningssättet membranhärdare provades på två sätt. Två provkroppar provades med membranhärdaren på medan gjutytan slipades bort för de två andra före provning.

Enligt BBK 79 anses en betong som vattentät om vattnets inträngningsdjup vid normaltidsprovning är högst 50 mm i samtliga prov.

Vattentäthet utan tryck

Vattentäthet utan tryck provades på 2 prismor per aktuell betongsammansättning och härdningstyp. Provningen utfördes i princip enligt SS 13 72 14, med den skillnaden att provkroppen inte utsattes för ett övertryck. Dagen före provning lades en ring, diametern 170 mm, av tätmassa på provkroppen se figur 3.1. Provningen startade 28 dygn efter gjutning med att ca 1 dl vatten hälldes på gjutytan. Under 1 dygn var vattnet kvar på provkroppen. Prismat spräcktes efter 24±2 h och inträngningsdjupet noterades.

För kvalitet D löstes fogmassan upp av vattnet och la sig som en hinna på gjutytan som blev helt tät. Inträngningsdjupet blev lika med noll för kvalitet D och inga resultat erhölls. För de övriga kvaliteterna användes en annan typ av fogmassa som inte gav upphov till några problem.



Figur 3.1 Provningsuppställning vid provning av vattentäthet utan tryck

3.3 Resultat

Vattentäthet med tryck

Resultaten för kvalitet A visas i figur 3.2. Som framgår av figuren har härdningen stor betydelse för betongens vattentäthet. En fullgod vattenhärdning, 5 dygn, ger ett inträngningsdjup på 20 mm medan en utebliven fukthärdning ger ett inträngningsdjup som är större än 125 mm, dvs vatten har helt trängt igenom provkroppen. Andra intressanta iakttagelser som kan göras är

- Även om efterbehandlingen med vatten är så kort som 2 dygn erhålls ett gott resultat som inte är mycket sämre än för en fullgod fukthärdning under 5 dygn.

- Om fukthärdningen påbörjas först 2 dygn efter gjutningen blir inträngningen ca 42 mm. Detta är mycket bättre än om fukthärdningen utelämnas helt. Eftervattning tycks således kunna användas för att "rädda" en betongyta som efter gjutningen fått en bristfällig fukthärdning.

- Intäckning med folie är betydligt sämre än en fullgod fukthärdning, dock blir resultaten något bättre än om fukthärdningen utelämnas helt.

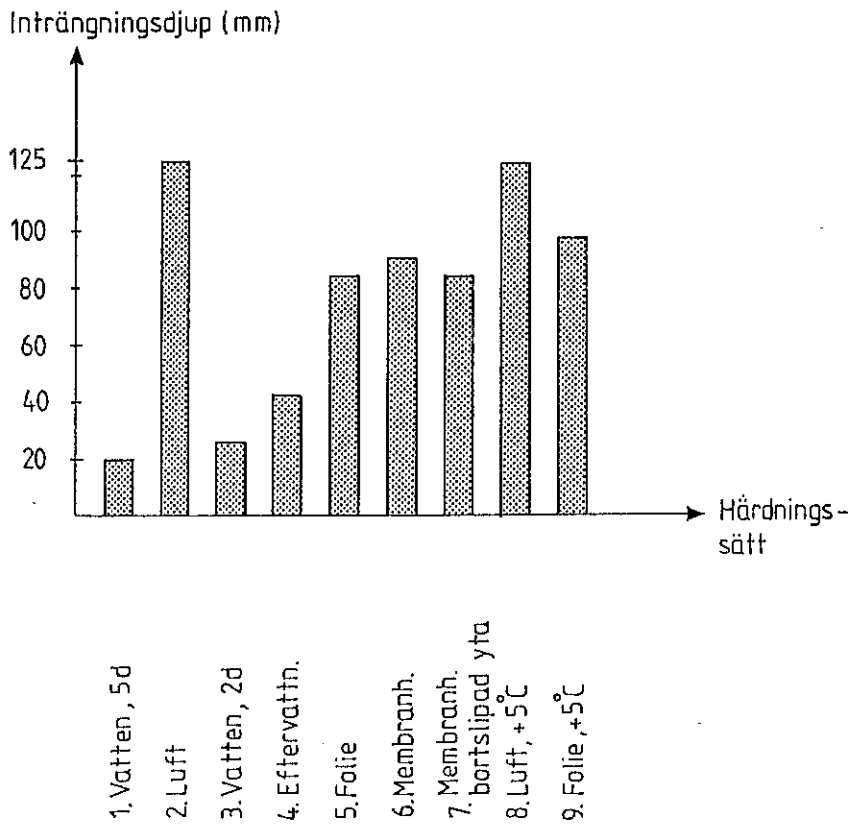
- Den använda membranhärdaren har gett ungefär samma resultat som plastfolien.

- Vid +5 °C har folien givit ett något bättre resultat än om fukthärdningen uteblivit helt.

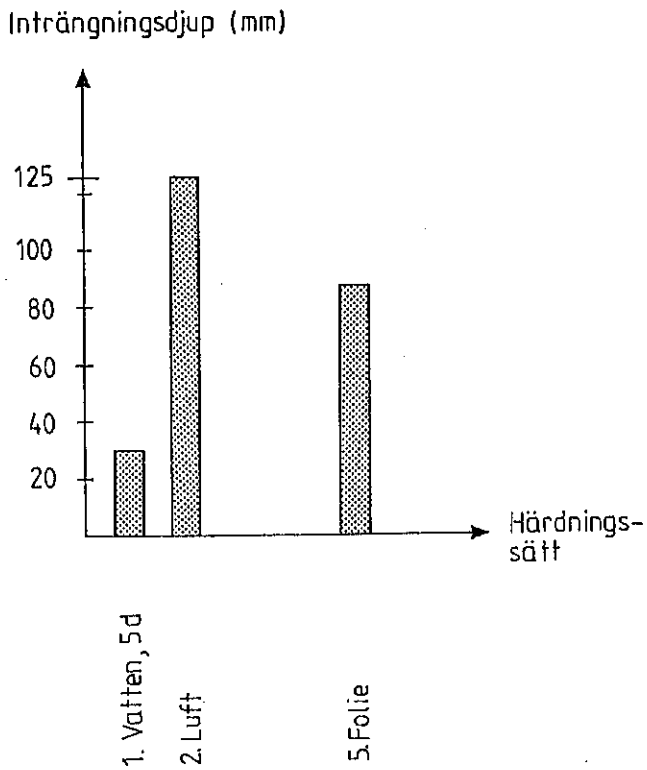
Resultaten för kvalitet B visas i figur 3.3. Här har endast 3 härdningssätt studerats och resultaten överensstämmer väl med de som uppmättes för kvalitet A.

Resultaten för kvalitet C visas i figur 3.4, där tre olika betongsatser har jämförts. Sats 2 uppvisade en oväntad låg hållfasthet och är troligen inte representativ för en normal silikastoftsbetong. Som framgår av figuren är tendenserna för satsen 3 och 4 desamma som för kvalitet A och B, dock är kvalitet C något tätare för alla härdningssätt. Vi kan konstatera att en fukthärdning under 14 dygn ger en ytterligare förbättring jämfört med om fukthärdning avbryts efter 5 dygn.

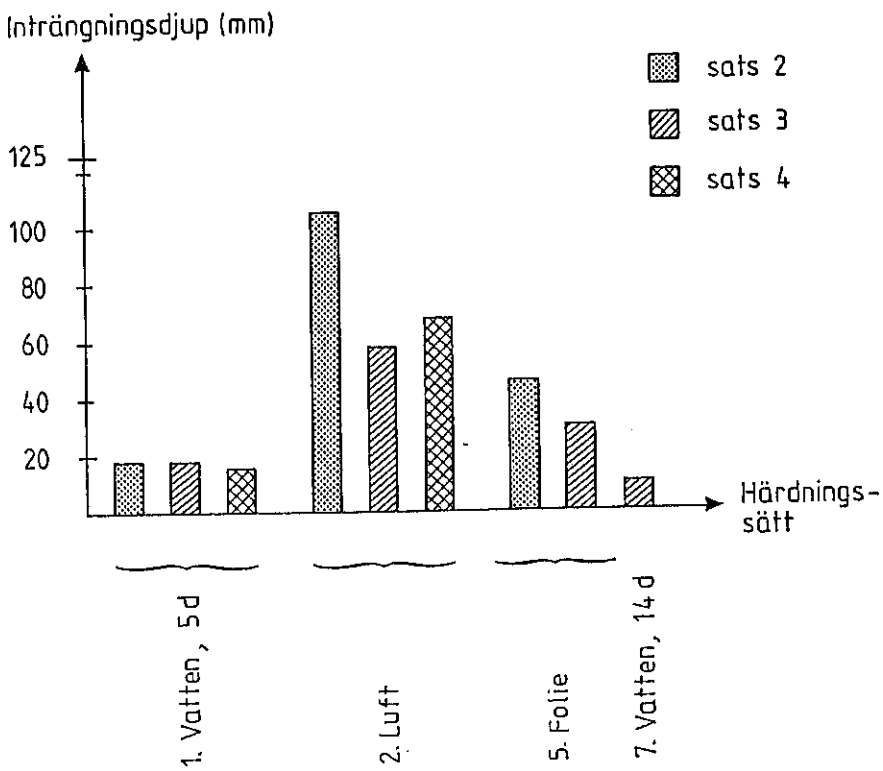
En fullgod fukthärdning för kvalitet D (vct = 0,7) ger enligt figur 3.5 ett inträngningsdjup på 50 mm. Detta är ett betydligt bättre resultat än för kvalitet A (vct = 0,5) vid utebliven fukthärdning och t o m bättre än resultaten för kvalitet A då härdningen utförts genom intäckning med plastfolie. Detta visar tydligt betydelsen av en riktigt utförd fukthärdning. Om fukthärdningen inte är tillräckligt bra hjälper det inte med ett lägre vct!



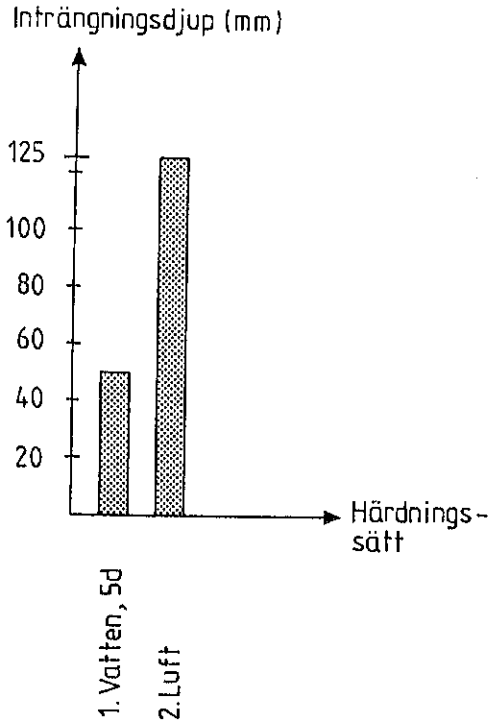
Figur 3.2 Vattentäthet med tryck, kvalitet A



Figur 3.3 Vattentäthet med tryck, kvalitet B



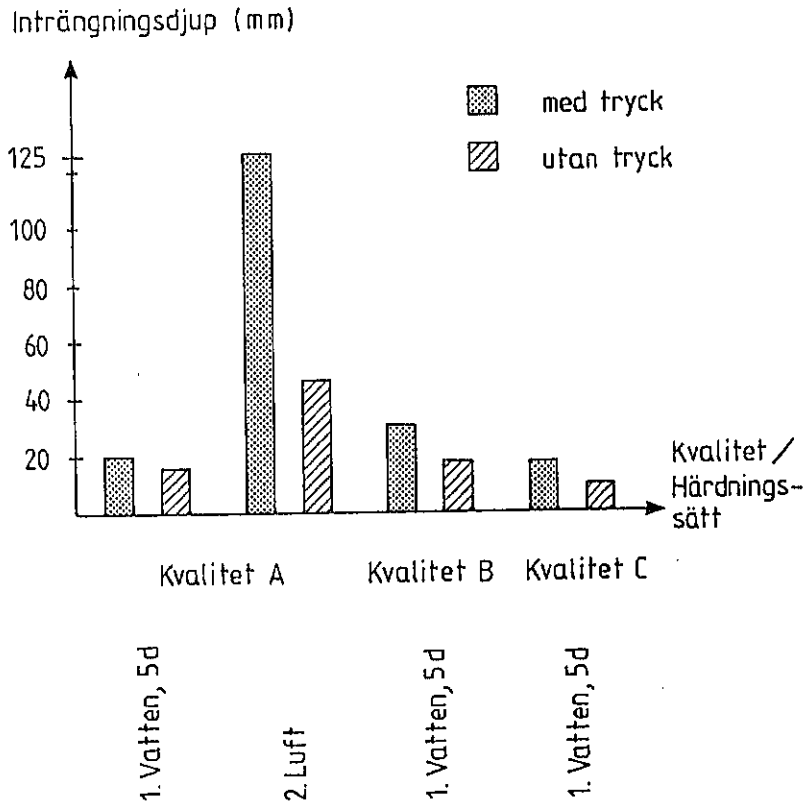
Figur 3.4 Vattentäthet med tryck, kvalitet C



Figur 3.5 Vattentäthet med tryck, kvalitet D

Vattentäthet utan tryck

I figur 3.6 jämförs de olika provningsmetoderna, med och utan tryck. Provningsunderlaget är litet men det visar tydligt att provningen med tryck ger ett betydligt större inträngningsdjup, speciellt när härdningen är bristfälligt utförd. Detta innebär att provning med tryck ger större utslag för olika härdningssätt.



Figur 3.6 Jämförelse mellan provningsmetoder

4 LUFTPERMEABILITET

4.1 Allmänt

Luftpermeabiliteten för betong är beroende av porositet, porstorlek och porstruktur. Även materialets fukthalt inverkar, då vatten i porerna hindrar luft att passera. Luftpermeabiliteten karakteriseras oftast med hjälp av den specifika luftgenomsläppligheten k, $m^3/mhPa$, vilken kan bestämmas genom permeabilitetsprovningar i princip enligt figur 4.1 Genom att registrera trycket i glasflaskorna som funktion av tiden kan k beräknas med hjälp av följande samband [7].

$$k = 2 \cdot \frac{V_o}{\Delta t} \cdot \frac{h}{A} \cdot \frac{P_{atm}}{\left(P_{atm}^2 - P_m^2\right)} \qquad (4.1)$$

där

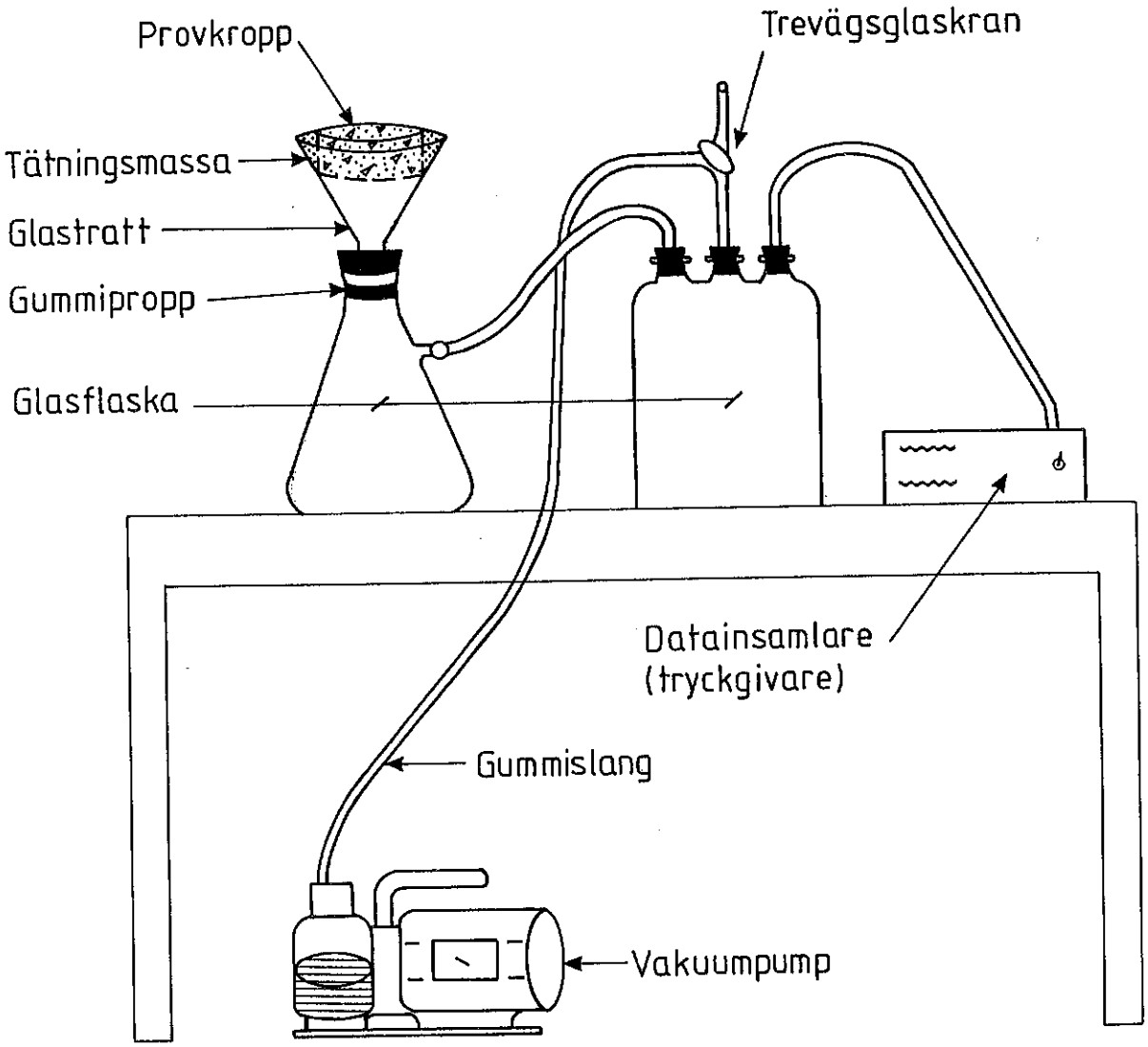
V_o = genomströmmande volym vid atmosfärstryck, m^3
Δt = tiden mellan två mätningar , $t_2 - t_1$, h
h = provkroppens höjd, m
A = provkroppens area, m^2
P_{atm} = atmosfärstrycket, Pa
P_m = medelvärdet av trycket i glasflaskorna vid tiden t_1 och tiden t_2, Pa

Med kännedom om glasflaskornas volym (V_k) kan man beräkna hur stor luftvolym (V_o) som strömmar genom provkroppen då trycket i kärlen ändras från P_1 till P_2

$$V_o = \frac{\left(P_2 - P_1\right)}{P_{atm}} \cdot V_k \qquad (4.2)$$

där

P_1 = trycket i glasflaskorna vid tiden t_1, Pa
P_2 = trycket i glasflaskorna vid tiden t_2, Pa
V_k = volymen på glasflaskorna, m^3



Figur 4.1 Provningsutrustning för permeabilitetsprovning

4.2 Provningsmetod

Borrkärnor borrades ut från vattentäthetsprismor, 2 st per aktuell betongkvalitet och härdningssätt. Från borrkärnorna sågades en ca 3 cm skiva av, mätt från gjutytan. Provkropparna konditionerades därefter i klimat 20±1 °C och 50±2 % RF under 3-4 veckor.

Före provningen mättes provkroppens höjd och diameter. Provkroppen monterades sedan i provningsutrustningen med fogmassa för att förhindra luftgenomträngning från sidorna. Med hjälp av en vakuumpump applicerades ett undertryck i kärlen. Tryckskillnaden och tiden noterades med jämna mellanrum. Provningen pågick minst 4 h.

Samtliga provkroppar provades under februari och mars 1986. Efter provningen förvarades provkropparna i samma klimat som tidigare. Under december 1986 gjordes provningen om för hälften av provkropparna.

4.3 Resultat

Vid den första provningen framgick det att spridningen var relativt liten mellan provkroppar från samma betongkvalitet och härdningssätt. Vid omprovningen ca 10 månader senare visade det sig att luftpermeabiliteten hade ökat. Förklaringen till detta är troligen att provkropparna inte konditionerats tillräckligt lång tid vid det första mättillfället (ca 1 månad). Resultaten från det senare mättillfället, då provkropparna konditionerats under ca 11 månader, bör därför vara de mest representativa och dessa resultat presenteras i figur 4.2-4.5. Varje värde representerar en provkropp.

I figur 4.2 visas resultaten för kvalitet A. Åtta stycken olika härdningssätt har provats och följande slutsatser kan dras.

- Vattenhärdning i 2 och 5 dygn ger bäst resultat och skillnaden mellan resultaten för de två härdningssätten tycks vara mycket liten.

- En utebliven härdning, användning av folieintäckning eller membranhärdare ger en betydligt genomsläppligare betong än vid fullgod härdning.

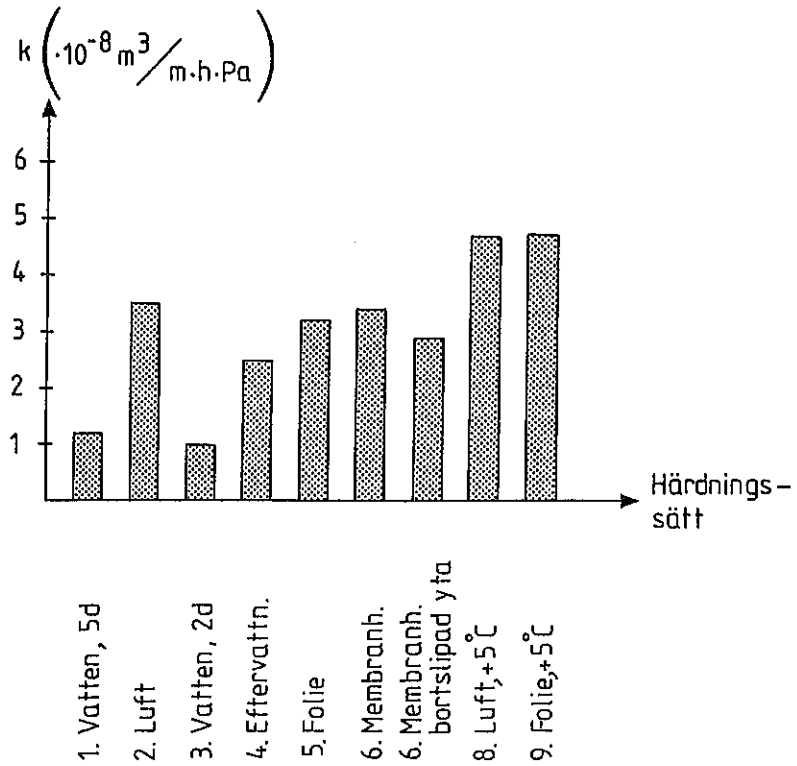
- Resultaten visar att en eftervattning av betongen ger ett något bättre resultat än om fukthärdning hade helt uteblivit och resultaten är till och med bättre än vid intäckning med plastfolie.

- De lagringssätt som har givit sämst resultat är de vid +5 °C. I detta fall tycks intäckning med plastfolie inte förbättra betongens täthet jämfört med utebliven härdning.

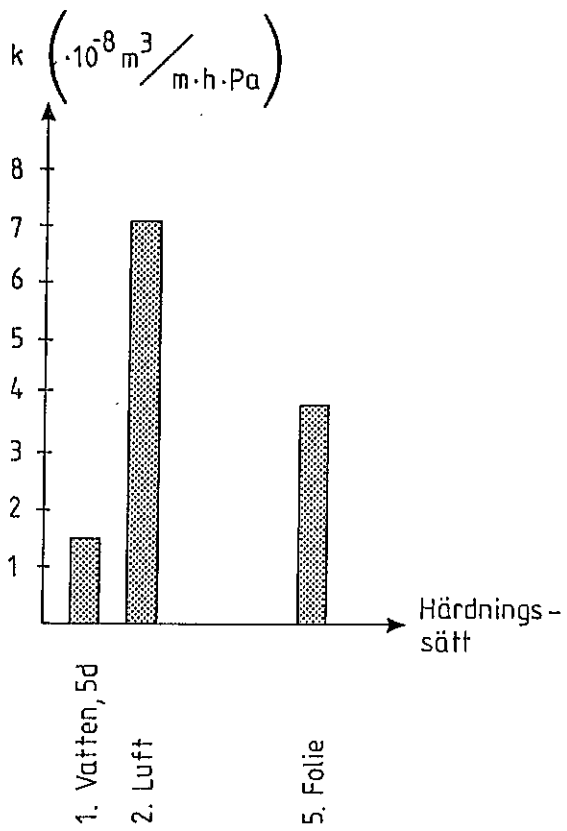
För kvalitet B, figur 4.3, är det samma tendenser som för kvalitet A, för de tre härdningssätt som har provats. Dock tycks kvalitet B genomgående vara mer genomsläpplig än kvalitet A, speciellt vid bristfällig härdning.

Resultaten för kvalitet C, figur 4.4, visar att en betong med silikastoft kan ge en relativt tät betong där härdningen i detta fall inte haft så stor inverkan på luftgenomsläppligheten.

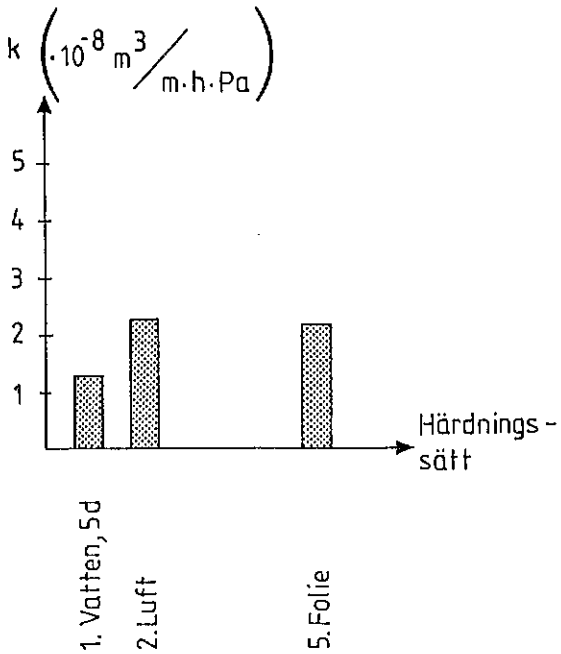
Kvalitet D, figur 4.5, har endast provats för två härdningssätt. En fullgod vattenhärdning har stor betydelse för en kvalitet med vct = 0,7. Vid en jämförelse med kvalitet A och B framgår betydelsen av en fullgod härdning. Ett lägre vct (0,5) med dålig härdning ger betydligt sämre resultat än ett högt vct (0,7) med fullgod efterbehandling.



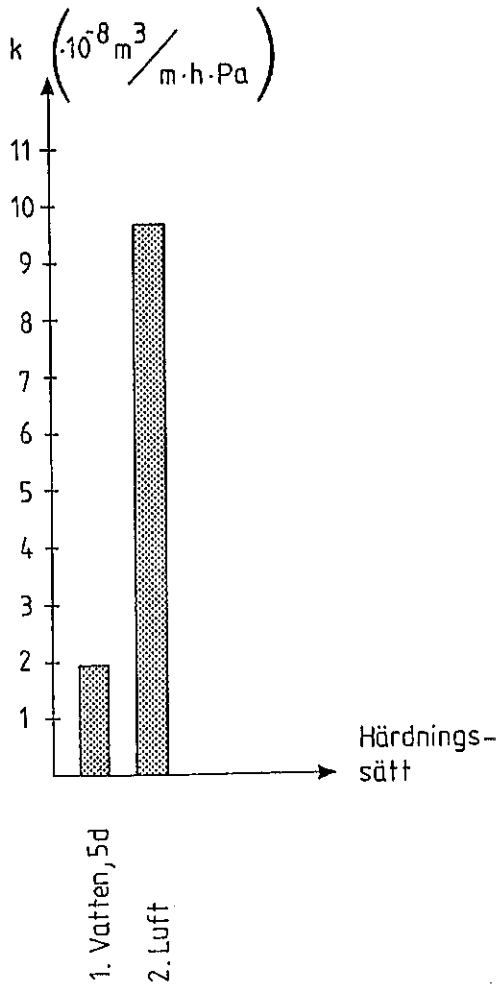
Figur 4.2 Luftgenomsläpplighet, k, kvalitet A



Figur 4.3 Luftgenomsläpplighet, k, kvalitet B



Figur 4.4 Luftgenomsläpplighet, k, kvalitet C



Figur 4.5 Luftgenomsläpplighet, k, kvalitet D

5 KARBONATISERING

5.1 Allmänt

Miljön i betong är normalt alkalisk (pH 12-13) på grund av förekomst av $Ca(OH)_2$- joner i porlösningen. I denna miljö blir ingjuten armering passiverad, vilket innebär att det normalt inte kan ske någon korrosion på armeringen. Emellertid kan den alkaliska miljön påverkas genom att luftens koldioxid tränger in i betongens porsystem och reagerar med $Ca(OH)_2$-joner så att dessa ombildas till karbonater ($CaCO_3$). I samband med denna karbonatisering sjunker pH-värdet kraftigt och betongens korrosionsskyddande förmåga försvinner.

Den hastighet varmed karbonatiseringen sker beror bl a på betongens täthet och cementinnehåll, koldioxidens koncentration och fukttillståndet i cementpastans porsystem.

Betongens täthet beror främst på vattencementtalet men även på hydratationsgraden och eventuell inblandning av tillsatmaterial. Det primära syftet med denna undersökning har varit att studera hur efterbehandlingen påverkar ytskiktets täthet och därmed dess förmåga att motstå karbonatsering.

Karbonatiseringshastigheten är kraftigt beroende på fukttillståndet. Vid låga och höga relativa fukthalter sker i stort sett ingen karbonatisering medan den största karbonatiseringshastigheten uppnås vid 65-75 % RF. I denna undersökning har vi därför valt att utföra försök vid 65 % RF.

Luftens koldioxidhalt är normalt ca 0,03 %. Försöken har skett dels vid denna koncentration och dels vid en förhöjd koldioxidhalt på 3 %. Genom denna höjning av koldioxidhalten erhålls en kraftig acceleration av förloppet.

5.2 Provningsmetod

För karbonatiseringsprovningen tillverkades 4 provkroppar med dimensionerna 100x100x400 mm för varje aktuell kombination betongkvalitet och härdningssätt. 28 dygn efter gjutning spräcktes provkropparna ca 50 mm mätt från ena kanten och karbonatiseringsdjupet bestämdes genom att 3 % fenolftaleinlösning sprutades på brottytan. Därefter lagrades hälften av provkropparna i klimat 20 °C, 65 % RF och luft med naturlig CO_2- halt och de övriga lagrades i klimat 20 °C, 65 % RF och luft med 3 % CO_2.

Karbonatiseringsdjupet mättes på nyspräckta ytor efter 4, 16, 31 och 52 veckors lagring i respektive klimat. Alla sidor utom provytan på provkroppen var förseglade mellan mätningarna. För kvalitet C sats 3 mättes karbonatiseringsdjupet efter 4, 16 och 31 veckors lagring i respektive klimat.

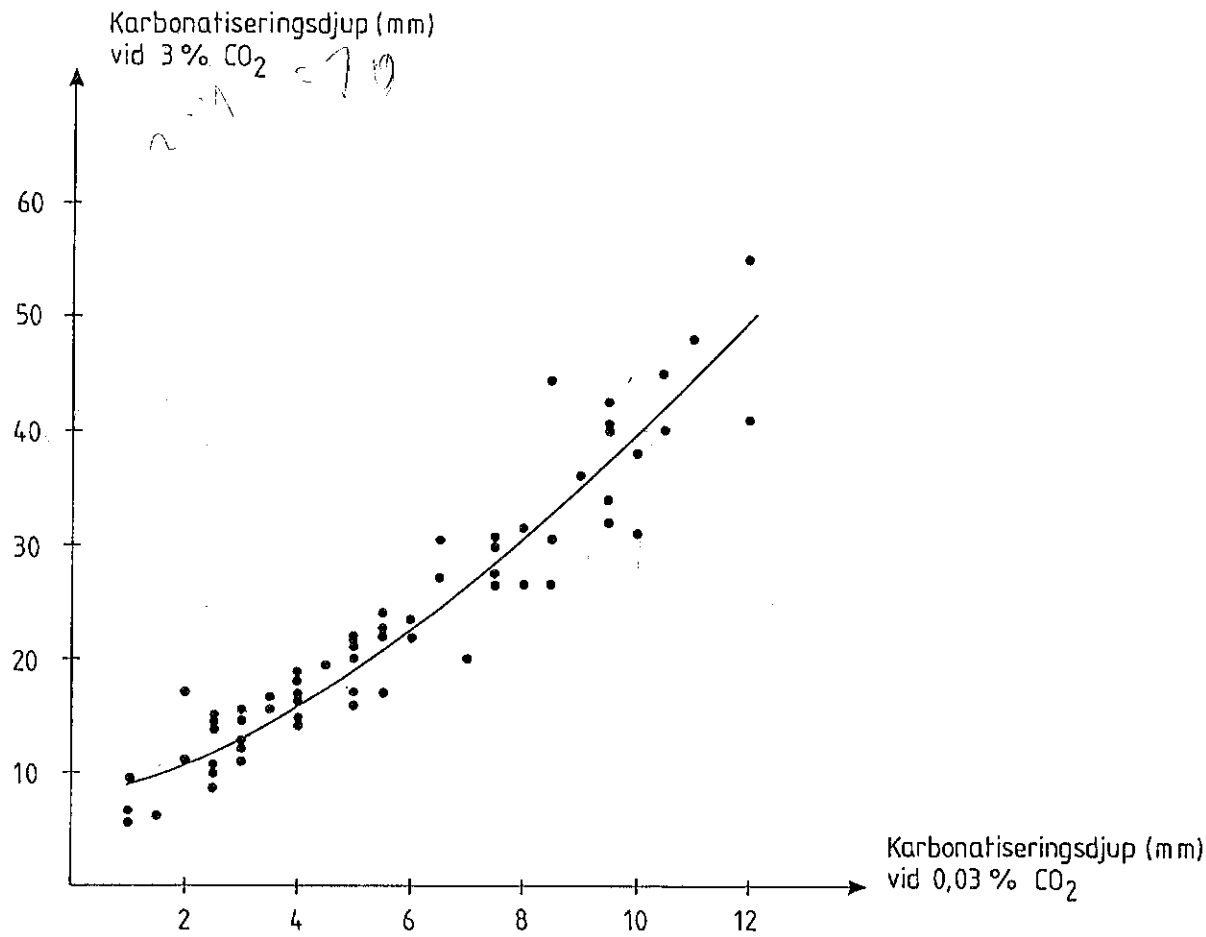
5.3 Resultat

I figur 5.1 har resultaten vid förhöjd koldioxidhalt plottats som funktion av resultaten vid naturlig koldioxidhalt. Punkterna i figuren representerar två olika ekvivalenta vattencementtal, tre olika bindemedel, sex olika härdningssätt och fyra olika åldrar på betongen. Trots dessa olika förutsättningar ligger resultaten tämligen väl samlade kring en kurva som kan tecknas

$$d_3 = (d_{0,03})^{1,5} + 8 \text{ mm} \qquad (5.1)$$

där d_3 och $d_{0,03}$ är karbonatiseringsdjup vid 3 % respektive 0,03 % koldioxidkoncentration. Eftersom resultaten så väl följer denna ekvation kan man dra slutsatsen att acceleration genom förhöjd koldioxidhalt är en användbar metod för att bestämma betongs förmåga att motstå karbonatisering.

Med hjälp av samband mellan tid och karbonatiseringsdjup vid naturlig koldioxidhalt kan livslängsberäkningar göras för betongkonstruktioner i samband med armeringskorrosion. Genom sambandet i figur 5.1 kan resultaten från accelererad karbonatisering översättas till naturliga förhållanden och detta innebär att resultaten från tester med förhöjd koldioxidhalt också är användbara för att göra livslängdsbedömningar.



Figur 5.1 Samband mellan förhöjd och naturlig koldioxidhalt

I följande figurer 5.2-5.6, visas resultaten för varje kvalitet och klimat. Som framgår av figurerna har härdningens inverkan på karbonatiseringen störst betydelse för de "bättre" kvaliteterna, dvs kvalitet A, B och C.

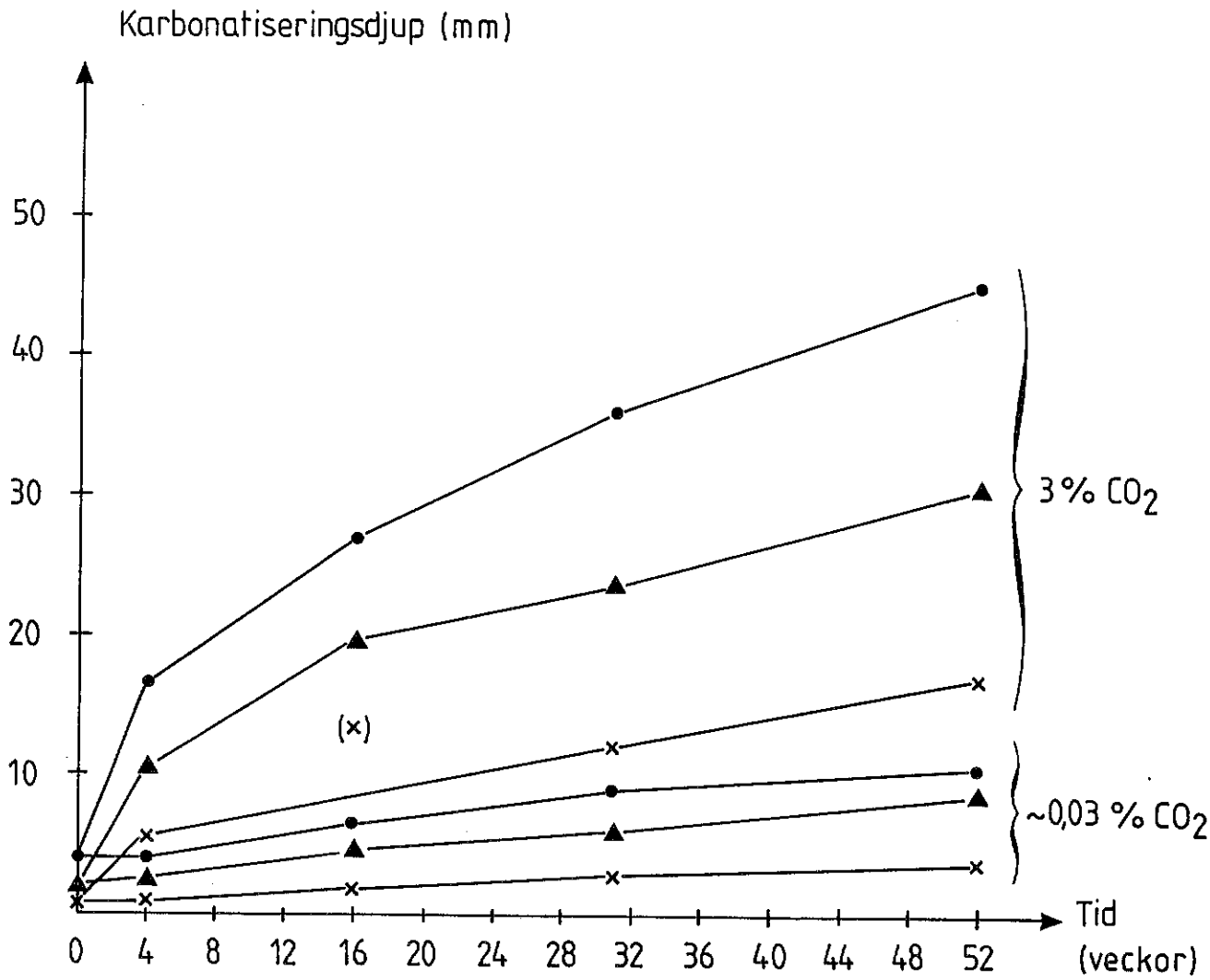
Resultaten för kvalitet A visas i figur 5.2. En fullgod härdning ger ett betydligt mindre karbonatiseringsdjup vid naturlig CO_2-halt, 4 mm vid 52 veckors lagring, än en utebliven härdning, 10,5 mm vid 52 veckors lagring.

De provkroppar som har förvarats i förhöjd CO_2-halt 3 % visar stora skillnader i karbonatiseringsdjup. De vattenlagrade provkropparna var betydligt tätare än de folielagrade och luftlagrade provkropparna. Tiden för att nå 15 mm karbonatiseringsdjup är ca 13 gånger så lång för den vattenlagrade som för den luftlagrade. Motsvarande siffra är ca 3 gånger för den provkropp som lagrats under plastfolie.

Kvalitet Bs resultat, figur 5.3, överensstämmer väl med kvalitet A. Resultaten visar att karbonatiseringsdjupet är obetydligt större för kvalitet B än A vid 52 veckors lagring.

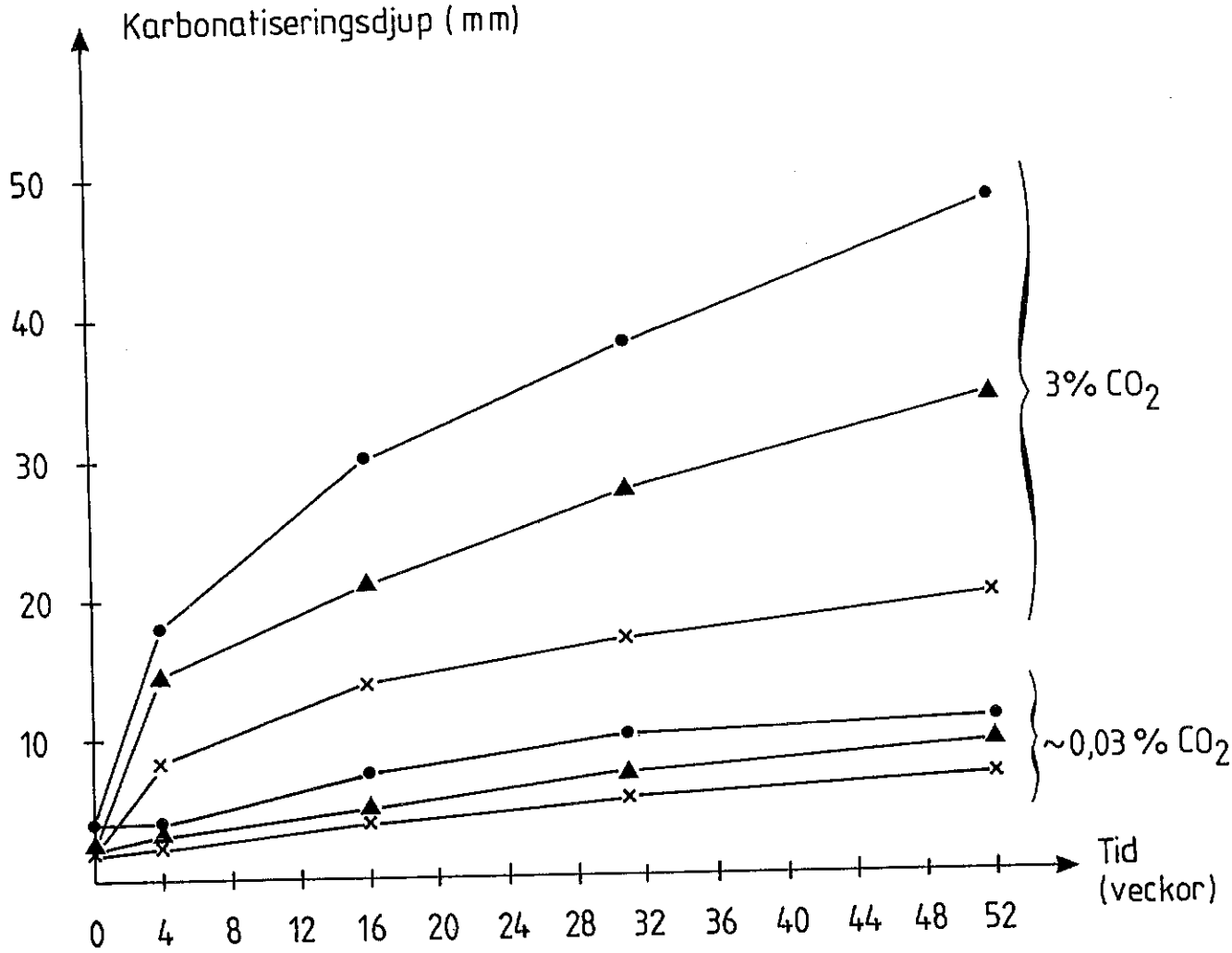
Resultaten för kvalitet C visas i figur 5.4 och 5.5, där två olika betongsatser är representerade. Det är god överensstämmelse mellan de två olika satsernas resultat. Som framgår av figurerna ger en luftlagrad betong det största karbonatiseringsdjupet för båda klimaten. Kvalitet C (med silikastoft) gav i stort sett samma karbonatiseringsdjup som för de två tidigare nämnda kvaliteterna oberoende av härdningssätt.

För kvalitet D som visas i figur 5.6 framgår det att härdningen inte har lika stor inverkan på karbonatiseringsdjupet som för de övriga kvaliteterna. Det enda härdningssättet som avviker markant är det luftlagrade som ger ett djup på 55 mm vid 52 veckor (3 % CO_2).



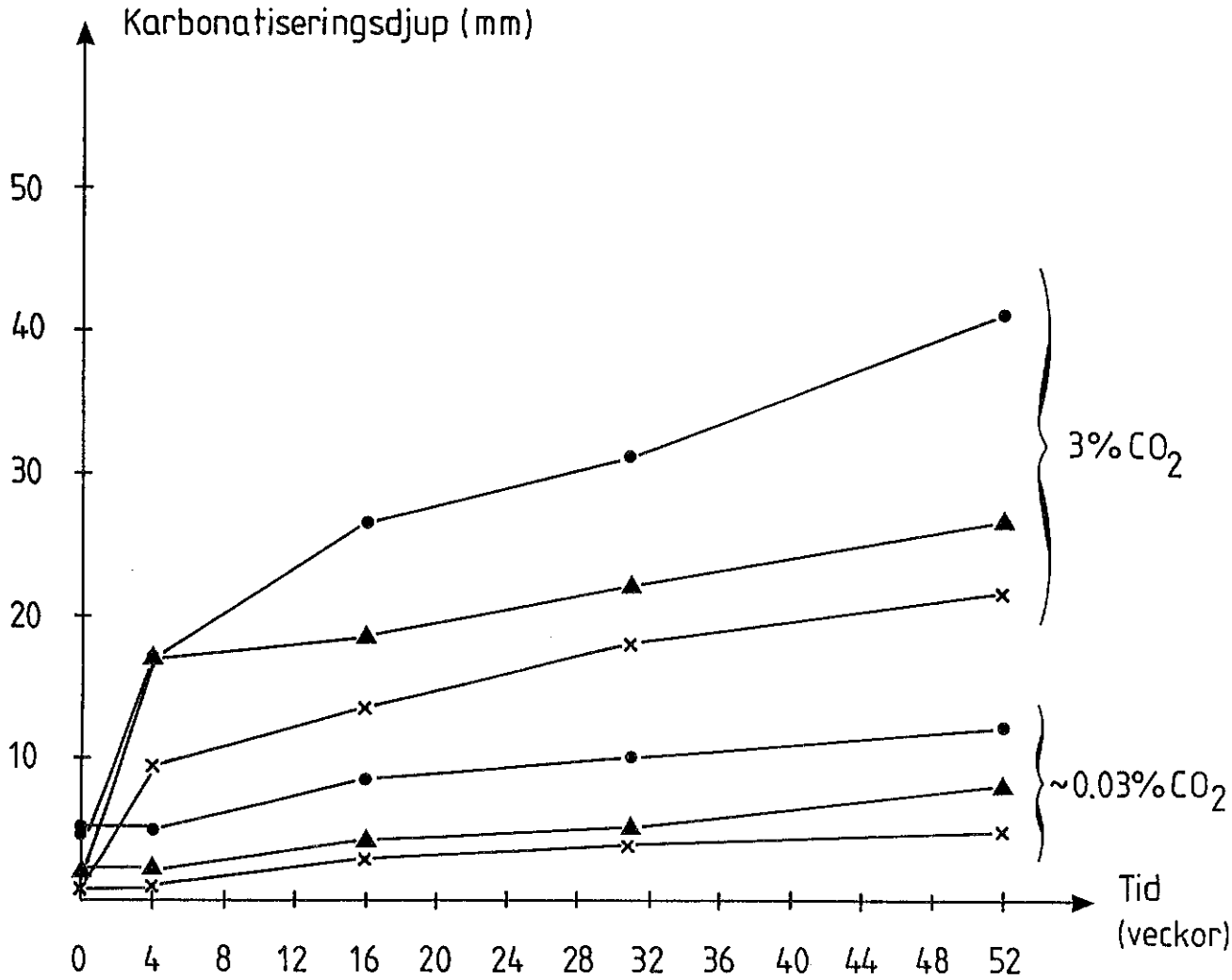
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
▲ 5 folie, 5 dygn

Figur 5.2 Karbonatisering, kvalitet A



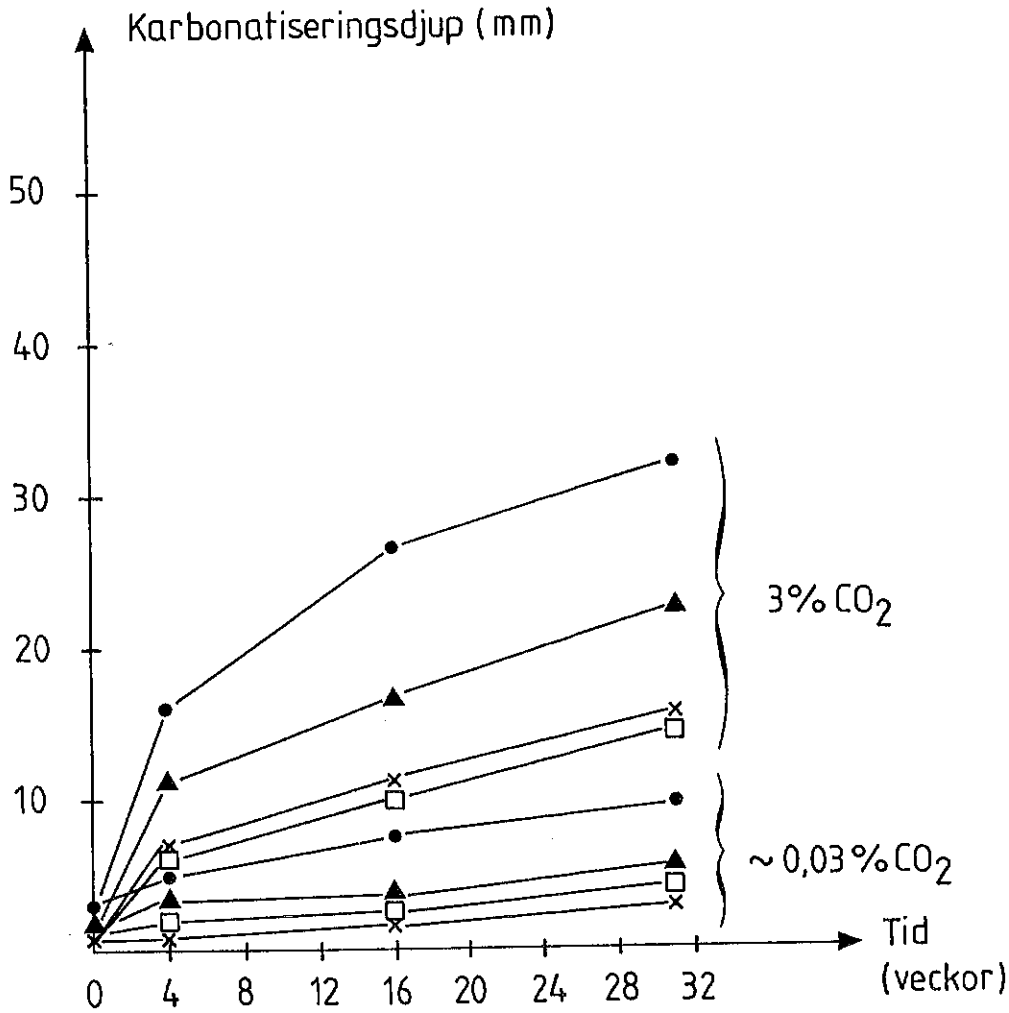
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
▲ 5 folie, 5 dygn

Figur 5.3 Karbonatisering, kvalitet B



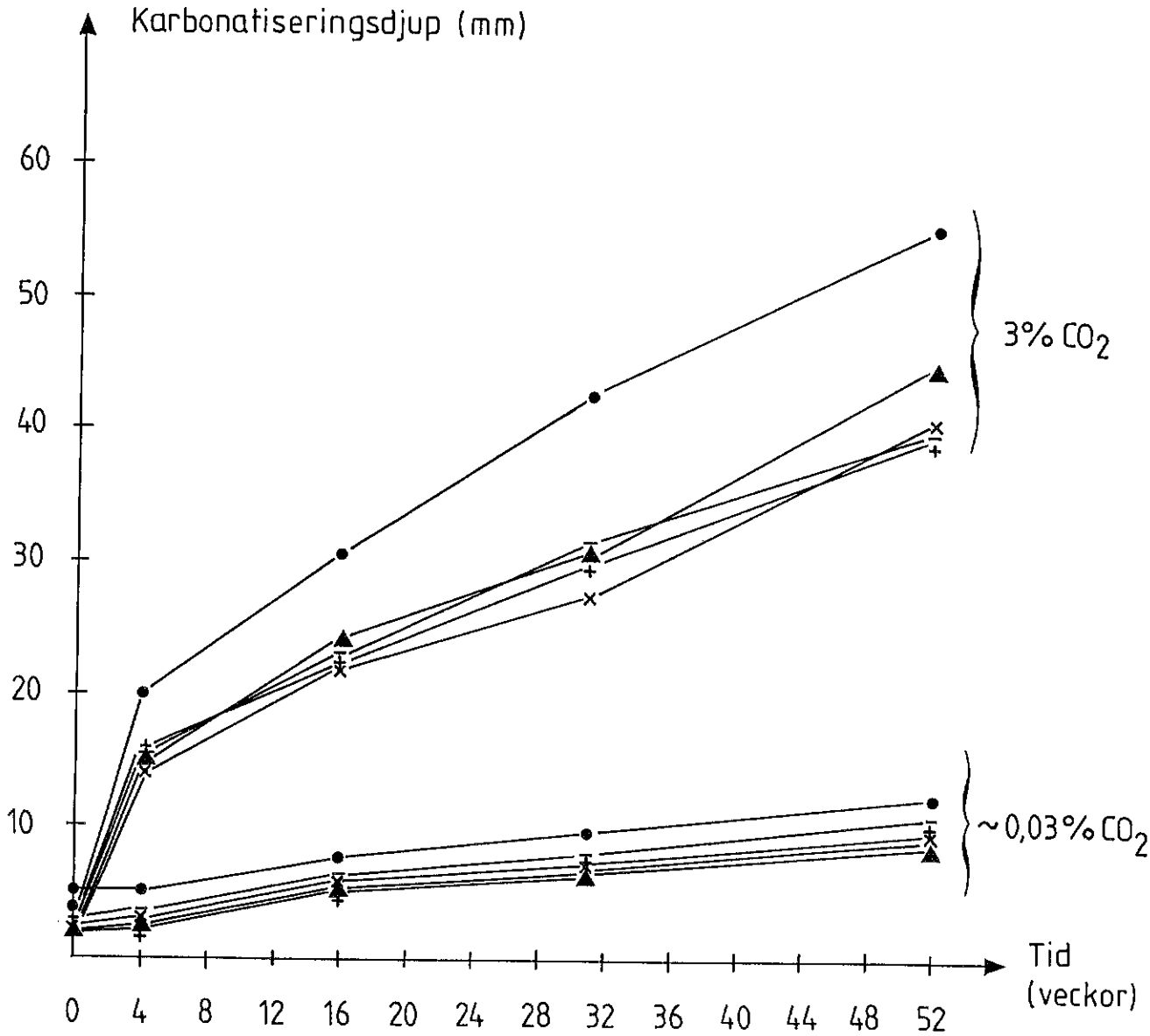
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
▲ 5 folie, 5 dygn

Figur 5.4 Karbonatisering, kvalitet C, sats 1



Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
▲ 5 folie, 5 dygn
□ 7 vatten, 14 dygn

Figur 5.5 Karbonatisering, kvalitet C, sats 3



Teckenförklaring:

x	1	vatten, 5 dygn
•	2	luft
–	3	vatten, 2 dygn
+	4	eftervattning
▲	5	folie, 5 dygn

Figur 5.6 Karbonatisering, kvalitet D

6 KAPILLÄRSUGNING

6.1 Allmänt

Följande samband brukar användas för att karakterisera kapillärsugning från fri vattenyta

$$t = m \cdot z^2 \tag{6.1}$$

och

$$G = k \cdot \sqrt{t} \tag{6.2}$$

Det första uttrycket 6.1 ger sambandet mellan vattenfrontens inträngning z och tiden t. Koefficienten m kallas för motståndstal och har dimensionen (s/m^2).

Det andra uttrycket 6.2 ger sambandet mellan uppsugen vattenmängd G (kg/m^2) och tid. Koefficienten k kallas för kapillaritetskoefficient och har dimensionen ($kg/m^2\sqrt{s}$).

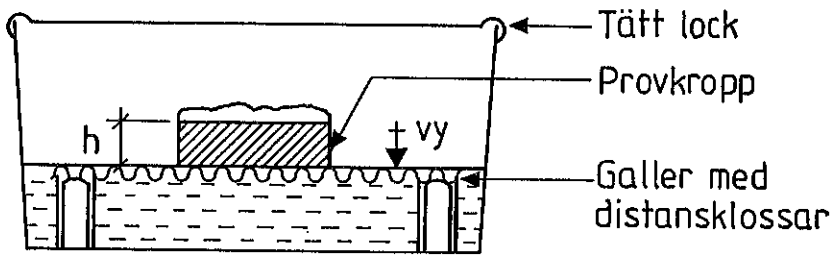
Med hjälp av kapillärsugningsförsök enligt figur 6.1 kan m och k bestämmas. Därvid plottas viktökningen som funktion av tiden enligt figur 6.2 och teoretiskt erhålls då ett bilinjärt samband med en knickpunkt vid tiden t_k. Knickpunkten inträffar då fuktfronten nått provkroppens överyta, dvs när inträngningsdjupet är lika med provkroppens tjocklek d. m och k kan således beräknas som

$$m = t_k/d^2 \tag{6.3}$$

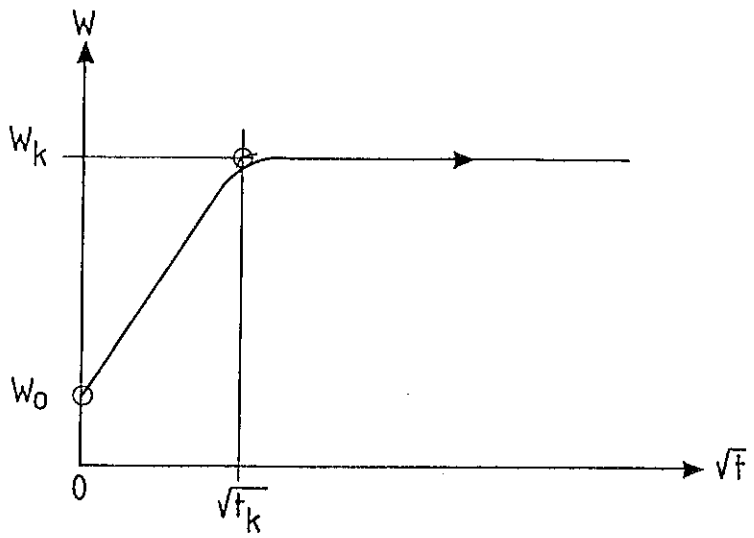
$$k = \frac{(W_k - W_o)}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_k}} \tag{6.4}$$

där

t_k = tid vid knickpunkt, s
d = provkroppens tjocklek, m
A = provkroppens area, m^2
W_k = provkroppens vikt vid knickpunkt, kg
W_o = provkroppens startvikt, kg



Figur 6.1 Kapillärsugningsförsök



Figur 6.2 Samband viktökning och tid

6.2 Provningsmetod

Kapillaritetsegenskaperna bestämdes för två kuber per aktuell kombination betongkvalitet och härdningssätt.

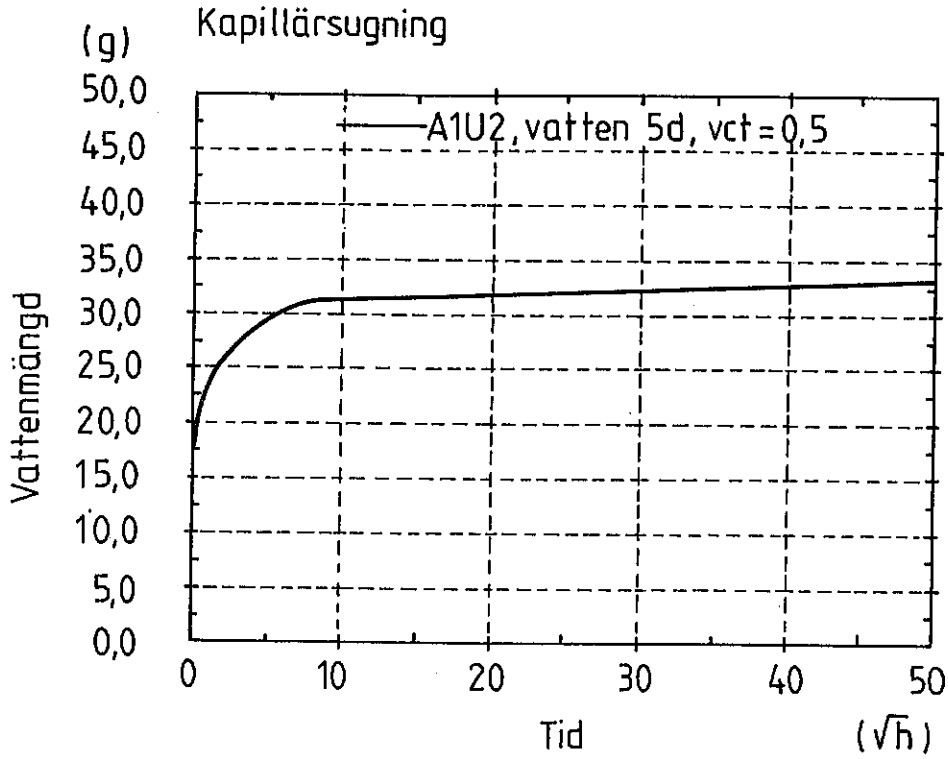
Provningen utfördes på följande sätt enligt Betonghandboken, materialdelen [8]. Under härdningen, 14-15 dagar efter gjutning, sågades en ca 20 mm tjock skiva av från gjutytan mätt. Provkropparnas sidor förutom gjutytan förslöts åter och provkropparna förvarades i klimatrum 20 °C och 50 % RF fram till provning. Dagen före provning avlägsnades all plast och provkroppens höjd och area uppmättes. För att förhindra avdunstning från alla sidor utom gjutytan var dessa "tejpade" under provningens gång.

Provningen startade med att samtliga provkroppar vägdes. Provkropparna placerades med gjutytan nedåt på ett nät så att kontakt med fri vattenyta fanns. Vattenytan justerades till att vara ca 1 mm ovanför gjutytan. Skivan torkades lätt av med ett papper före vägning. I början av provningen vägdes provkropparna med korta tidsintervall som sedan utökades. Vägning av provkroppar pågick tills konstant vikt hade erhållits, därefter avbröts provningen och tejpen togs bort. Provkropparna torkades i värmeskåp, 105 °C, till konstant vikt för att bestämma utgångsfukthalt.

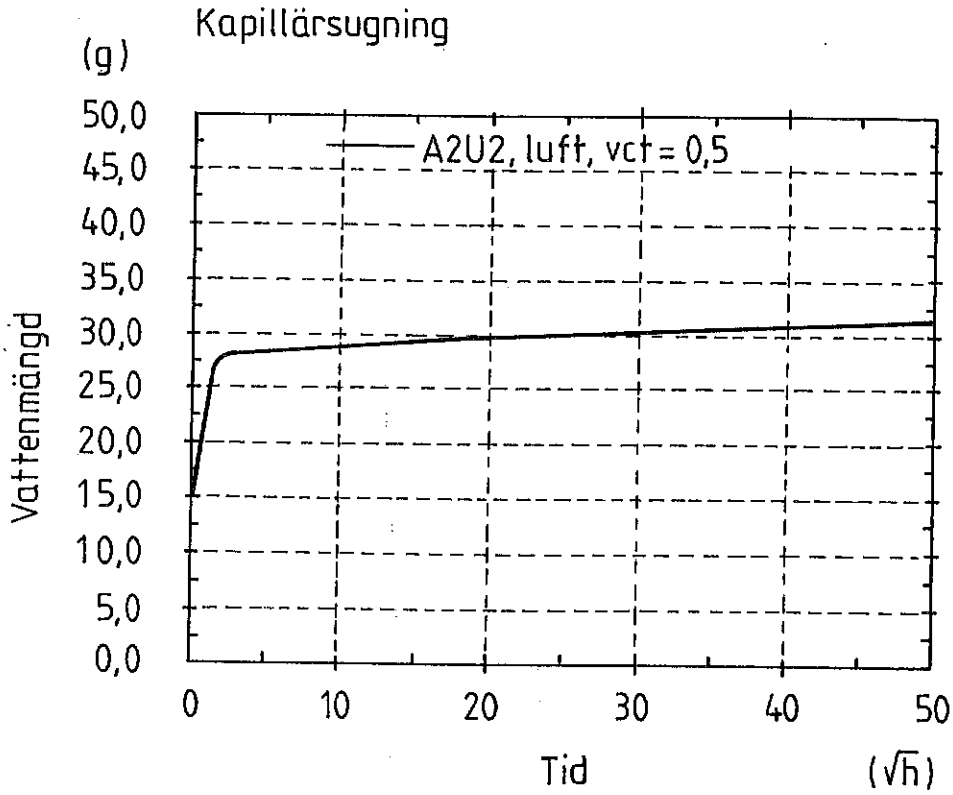
6.3 Resultat

I figur 6.3 och 6.4 visas två exempel på uppmätta knickpunktskurvor. För välhärdad betong sker vattenuppsugningen långsamt och sambandet mellan uppsugen vattenmängd W och t skiljer sig kraftigt från den teoretiska kurvan i figur 6.2. Detta innebär att uppskattningen av knickpunktens läge blir osäker och därmed också värdena för k och m.

För betong som fått en bristfällig härdning sker uppsugningen snabbt och det går att fastställa en väldefinierad knickpunkt. De resultat som visas i tabell 6.1 är således mest tillförlitliga för låga värden på m respektive för höga värden på k.



Figur 6.3 Knickpunktskurva, fullgod fukthärdning



Figur 6.4 Knickpunktskurva, utebliven fukthärdning

Tabell 6.1 Motståndstal, m och kapillaritetstal, k

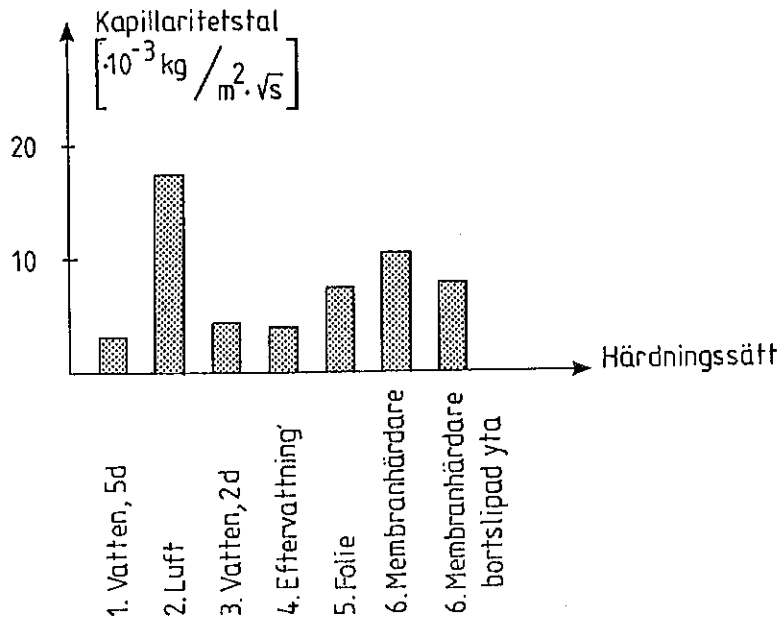
Kvalitet/ härdningssätt	m (s/m^2)	k ($kg/m^2\sqrt{s}$)
Kvalitet A		
1 Vatten 5 dygn	$445 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
2 Luft	$26 \cdot 10^6$	$17,3 \cdot 10^{-3}$
3 Vatten 2 dygn	$286 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
4 Eftervattning	$246 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
5 Folie	$102 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^{-3}$
6 Membranhärdare	$66 \cdot 10^6$	$10,5 \cdot 10^{-3}$
6 Bortslipad yta	$83 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^{-3}$
Kvalitet B		
1 Vatten 5 dygn	$283 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
2 Luft	$19 \cdot 10^6$	$14,6 \cdot 10^{-3}$
5 Folie	$98 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^{-3}$
Kvalitet C		
1 Vatten 5 dygn	$399 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
2 Luft	$23 \cdot 10^6$	$17,1 \cdot 10^{-3}$
5 Folie	$97 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^{-3}$
Kvalitet D		
1 Vatten 5 dygn	$59 \cdot 10^6$	$11,0 \cdot 10^{-3}$
2 Luft	$9 \cdot 10^6$	$31,5 \cdot 10^{-3}$

Kapillaritetstalet för de olika betongkvaliteterna och härdningssätten har åskådliggjorts i figur 6.5-6.8. Resultatet för kvalitet A figur 6.5 visar att någon form av vattenhärdning, 5 eller 2 dygns vattenhärdning och eftervattning, ger en relativt tät betong i jämförelse med övriga härdningssätt. Utebliven fukthärdning är betydligt sämre än någon form av fukthärdning. Intäckning med plastfolie och användning av membranhärdare gav ett resultat mellan en fullgod och utebliven fukthärdning. Vid en jämförelse med resultaten från vattentäthetsprovning ser man samma tendenser för de olika härdningssätten.

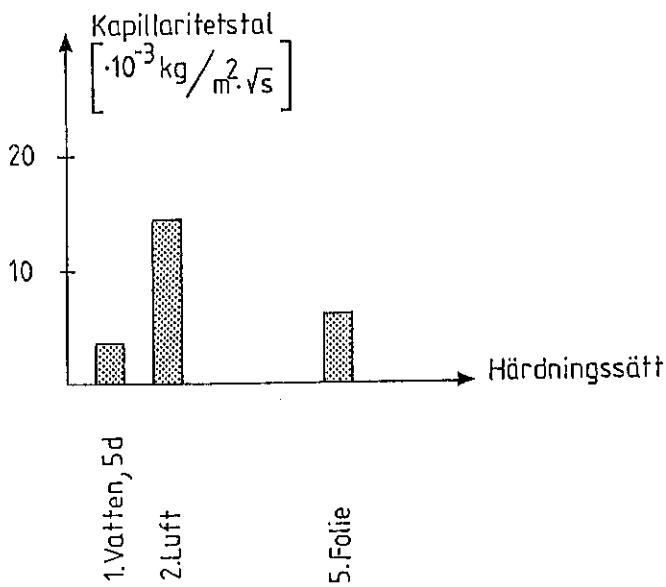
Kvalitet Bs resultat visas i figur 6.6. De tre olika härdningssätten ger liknande skillnader i resultat som kvalitet A. En fullgod härdning är bättre än en utebliven fukthärdning och en intäcking med plastfolie är bättre än utebliven men sämre än fullgod härdning.

I figur 6.7 visas resultaten för de tre olika härdningssätt som har provats för kvalitet C. De överensstämmer väl med resultaten för kvalitet A och B.

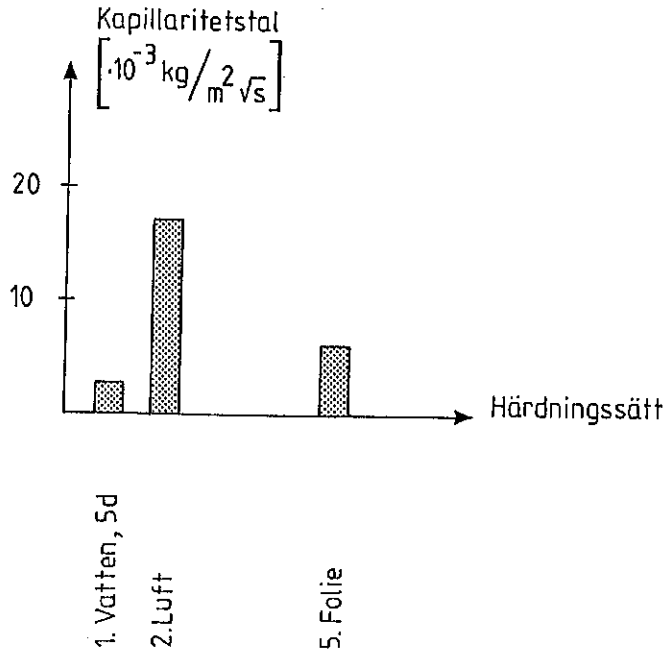
Resultaten för kvalitet D visas i figur 6.8. En fullgod härdning motsvarar ungefär härdningssätt folieintäckning och användning av membranhärdare för kvalitet A.



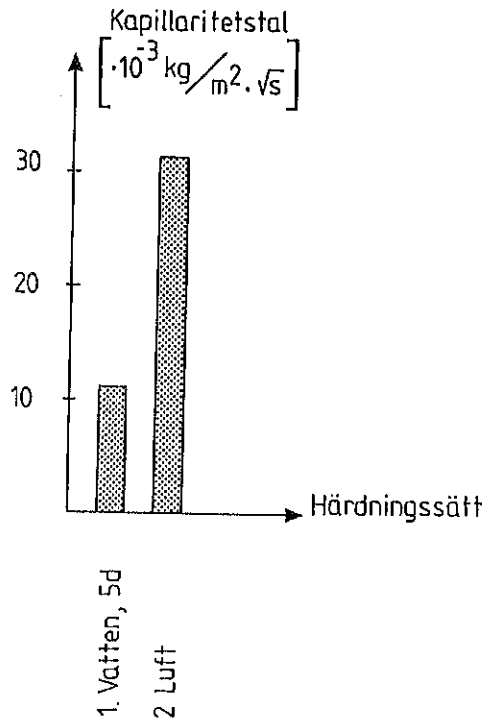
Figur 6.5 Kapillärsugning, kvalitet A



Figur 6.6 Kapillärsugning, kvalitet B



Figur 6.7 Kapillärsugning, kvalitet C



Figur 6.8 Kapillärsugning, kvalitet D

7 KLORIDINTRÄNGNING

7.1 Allmänt

Kloridinträngning i betong är av intresse bl a ur två synpunkter. Klorider gör betongen mindre motståndskraftig mot frost samt de inverkar negativt på miljön med hänsyn till armeringskorrosion.

Det finns två olika sätt kloriderna kan transporteras in i betongen. Transporten kan ske genom ren diffusion och genom kombinerad diffusion och kapillärsugning. I projektet har valts två lagringssätt som ska motsvara dessa transportsätt. Lagringssätt ett innebär att provytan är i kontakt med NaCl-lösning under hela provningens gång, vilket motsvarar diffusion. Kapillärsugning och diffusion erhålls om provkroppen omväxlande är i kontakt med luft och med NaCl-lösning.

7.2 Provningsmetod

Kloridinträngning undersöktes för två vattentäthetsprismor per aktuell kombination betongkvalitet och härdningssätt. Prismorna lagrades på två sätt efter 28 dygns härdning

- En prisma förvarades så att överytan var i kontakt med vatten en vecka och därefter med 3 % NaCl-lösning under 51 veckor.

- Den andra prisman förvarades först en vecka i luft. Därefter förvarades prisman växelvis så att överytan var i kontakt med 3 % NaCl-lösning en vecka och med luft två veckor, 20±1 °C och 50±2 % RF.

Analyser av kloridinnehållet skedde efter 4, 16 och 52 veckors lagring av provkropparna (den första veckan med lagring i vatten respektive luft är medräknad). Kloridhalten bestämdes enligt modifierad SS 13 72 27 (upplösning i enbart vatten), med slutbestämning av kloridhalten med hjälp av jonkromatograf. Vid varje mättillfälle borrades 10 nya hål. Hålen gjordes med hjälp av en pelarborrmaskin med borrkrona av typ Coromant. Vid borrningen användes smalare borr vid större djup för att undvika borrkax från ovanliggande nivå. Inget vatten tillfördes under borrning. Borrkaxet samlades upp och analyserades för olika nivåer. Hålen tätades med gummiproppar för att förhindra uppsugning på borrhålens sidor. Vid de olika mättillfällen utfördes följande

Mättillfälle 1 (efter 4 veckor)
Borrkax togs från tre djup, 0-10, 10-20 och 20-30 mm mätt från gjutytan, på alla provkroppar. Kloridinnehållet bestämdes för alla djup och provkroppar.

Mättillfälle 2 (efter 16 veckor)
Borrningen utfördes på liknande vis som för mättillfälle 1. Vid detta mättillfälle borrades ytterligare ett djup, 30-50 mm, för analys av kloridinnehåll.

Mättillfälle 3 (efter 52 veckor)
Borrningen gjordes på fem djup, 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 och 50-70 mm mätt från gjutytan. Kloridanalys utfördes först på de fyra översta djupen. Därefter kompletterades med analys på djupet 50-70 mm för kvalitet A och för kvalitet D, lagringssätt 2.

7.3 Resultat

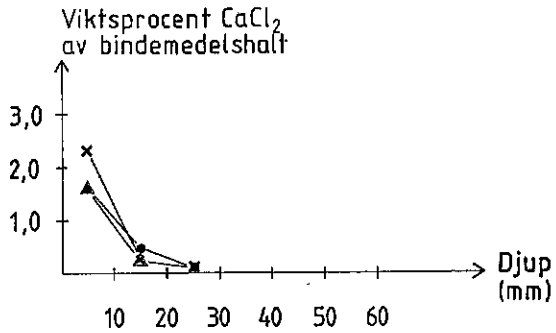
I figurerna 7.1-7.24 anges resultaten. I diagrammen anges kloridinnehållet som viktprocent $CaCl_2$ i förhållande till bindemedelshalten. Därvid har antagits att bindemedelshalten är lika med den proportionerade.

Som framgår av resultaten tycks härdningssättet påverka kloridprofilerna i mycket liten utsträckning. Detta resultat är något förvånande och kan möjligen bero på provningsmetodiken. Enligt andra resultat i denna rapport t ex från vattentäthetsprovningen, tycks en bristfälligt utförd härdning till stor del kunna repareras genom en återupptagen fukthärdning. Under provningen av kloridinträngning står betongytan under lång tid i kontakt med saltlösning, varvid det är troligt att skillnaden mellan de olika härdningssätten minskar ganska snabbt. Detta skulle kunna förklara de små skillnaderna mellan kloridprofilerna för de olika härdningssätten.

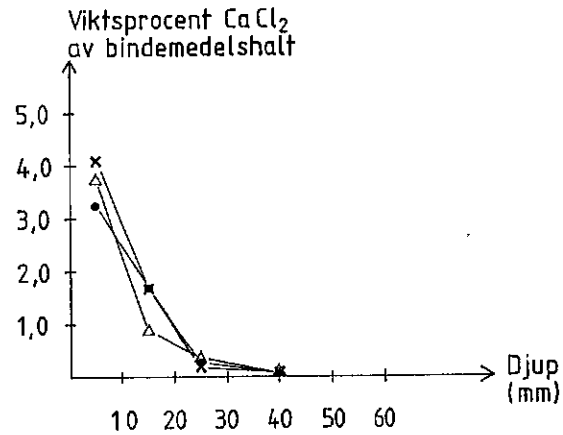
Vid en jämförelse mellan de olika kvaliteterna tycks betong med tillsatsmaterial (kvalitet B och C) ge en något långsammare kloridinträngning än betong med ren portlandcement som bindemedel (kvalitet A), se figur 7.25 och 7.26. Detta gäller både vid ren kloriddiffusion och vid kombinerad diffussion och kapillärsugning.

För de olika betongkvaliteterna med vct_{ekv} = 0,5 blir skillnaden i resultat mellan de två lagringssätten mycket liten, se t ex kvalitet A figur 7.27. För kvalitet D med ett högre vct sker däremot kloridtransport betydligt snabbare vid en kombinerad diffussion och kapillärsugning än vid en ren diffussion, se figur 7.28. Detta tyder på att kloridtransporten genom kapillärsugning blir av större betydelse ju otätare betongen är.

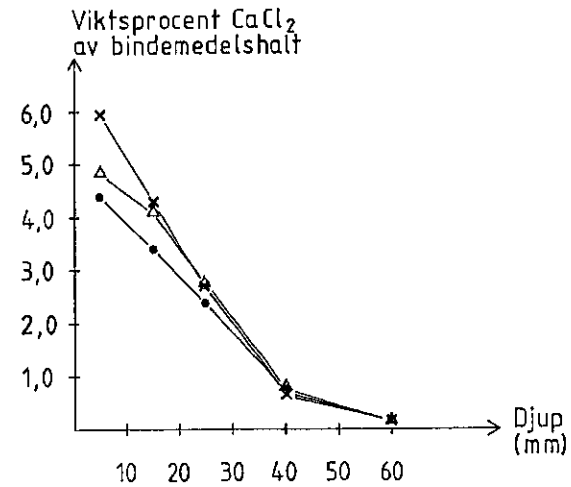
Vid kombinerad kapillärsugning och diffussion är ofta kloridinnehållet lägre vid ytan än någon mm in i betongen, speciellt vid längre provningstider, se t ex figur 7.6. Detta inträffar aldrig vid ren diffussion. Förklaringen är troligen att betongskiktet närmast ytan karbonatiseras under luftlagringsperioden och därvid sjunker pH-värdet. Detta innebär i sin tur att cementpastans förmåga att binda klorider minskar. När klorider frigörs från cementpastan i samband med karbonatiseringen ökar kloridkoncentrationen i porvattnet och kloriderna transporteras längre in i betongen genom osmos. Resultatet blir att det totala kloridinnehållet minskar närmast ytan och ökar längre in i betongen.



Figur 7.1 Kloridinträngning efter 4 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet A

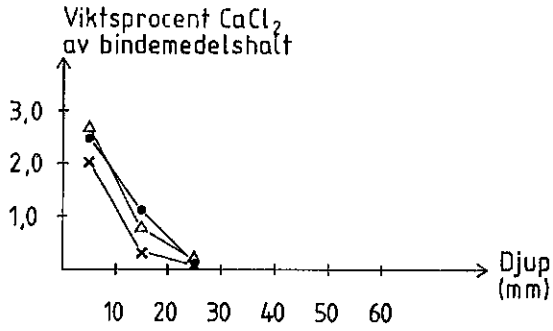


Figur 7.2 Kloridinträngning efter 16 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet A

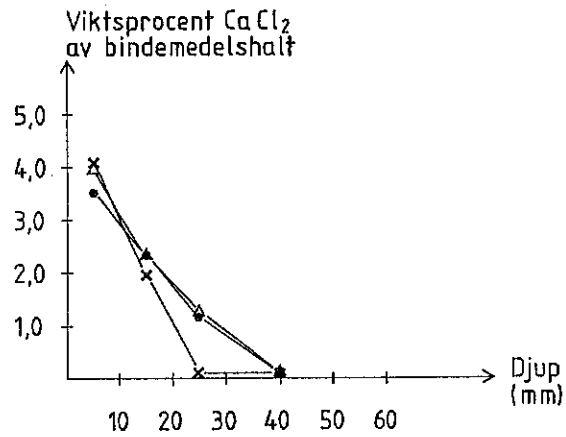


Figur 7.3 Kloridinträngning efter 52 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet A

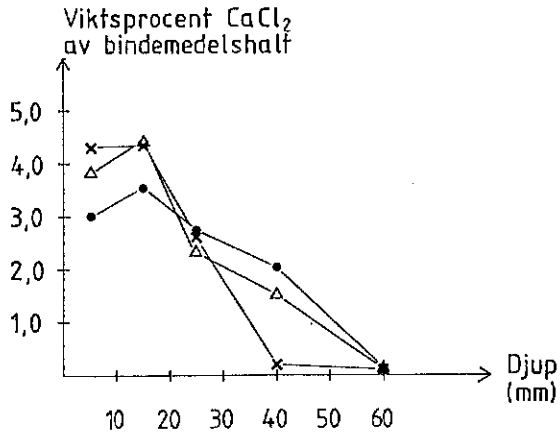
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn



Figur 7.4 Kloridinträngning efter 4 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet A

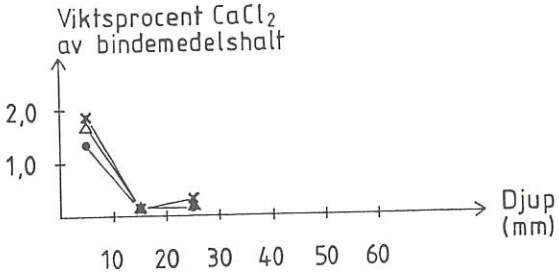


Figur 7.5 Kloridinträngning efter 16 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet A

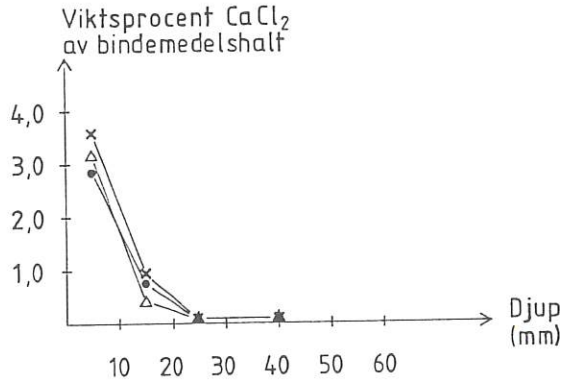


Figur 7.6 Kloridinträngning efter 52 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet A

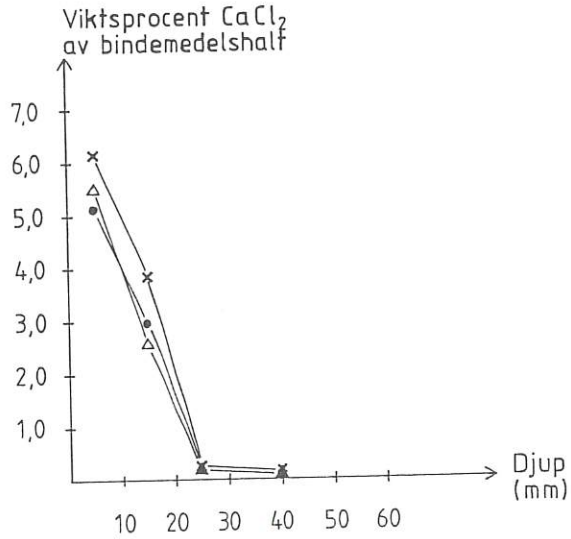
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn



Figur 7.7 Kloridinträngning efter 4 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet B

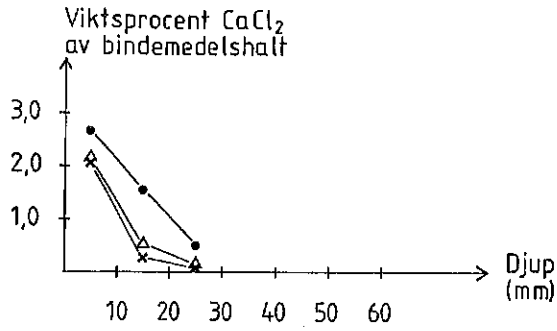


Figur 7.8 Kloridinträngning efter 16 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet B

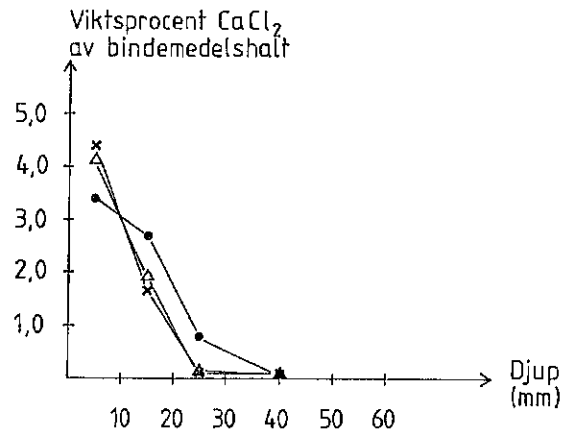


Figur 7.9 Kloridinträngning efter 52 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet B

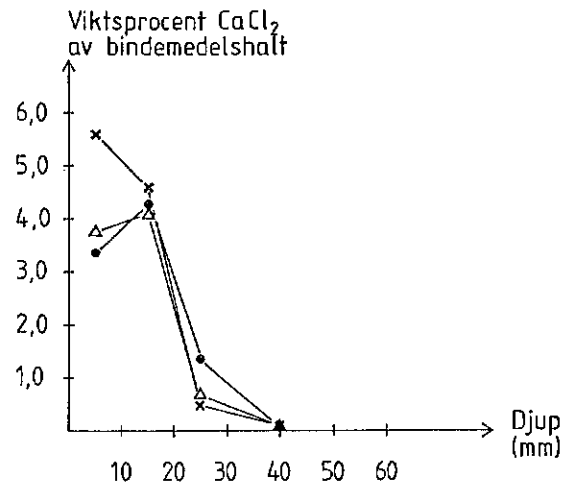
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn



Figur 7.10 Kloridinträngning efter 4 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet B

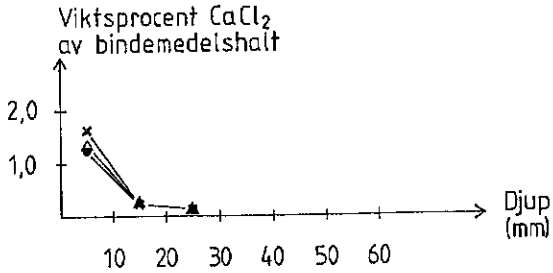


Figur 7.11 Kloridinträngning efter 16 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet B

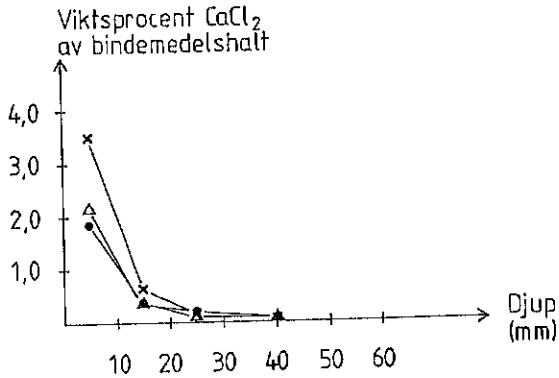


Figur 7.12 Kloridinträngning efter 52 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet B

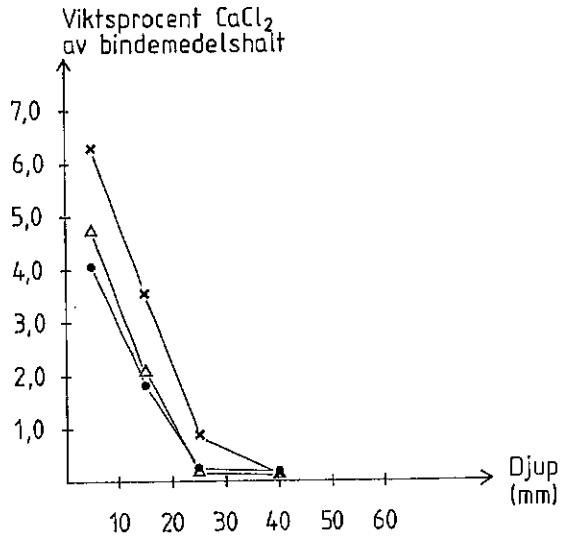
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn



Figur 7.13 Kloridinträngning efter 4 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet C

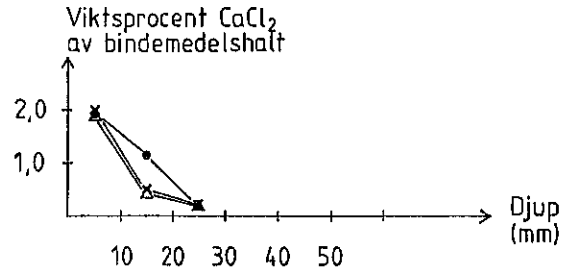


Figur 7.14 Kloridinträngning efter 16 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet C

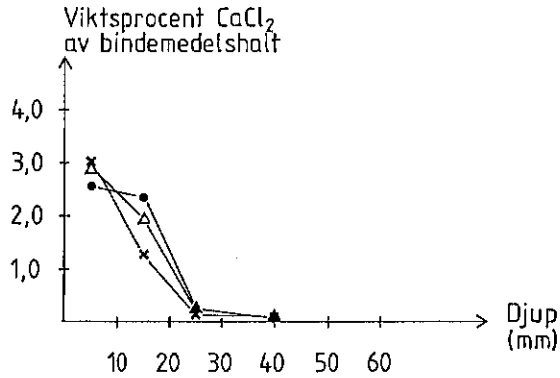


Figur 7.15 Kloridinträngning efter 52 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet C

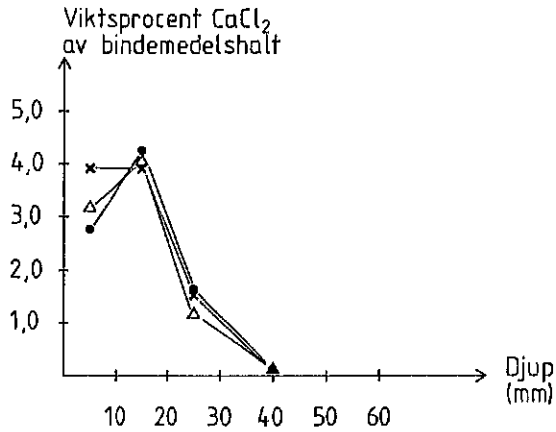
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn



Figur 7.16 Kloridinträngning efter 4 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet C

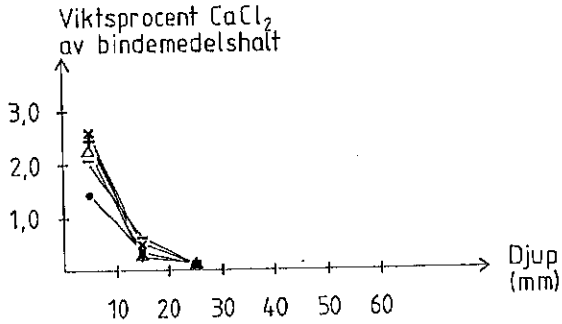


Figur 7.17 Kloridinträngning efter 16 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet C

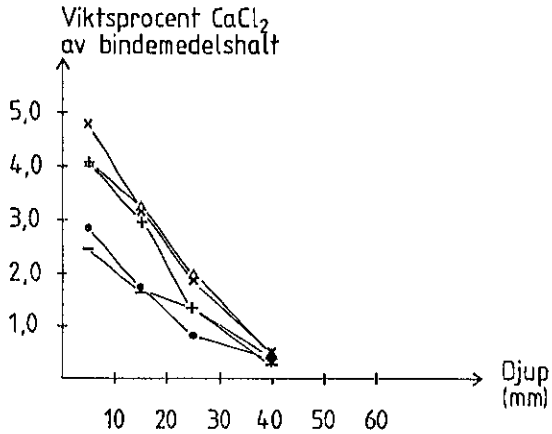


Figur 7.18 Kloridinträngning efter 52 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet C

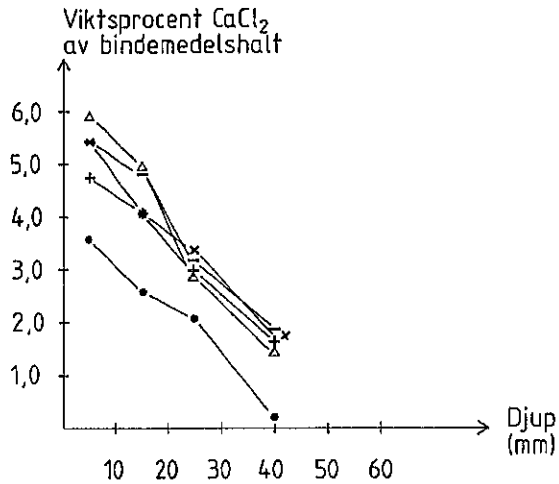
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn



Figur 7.19 Kloridinträngning efter 4 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet D

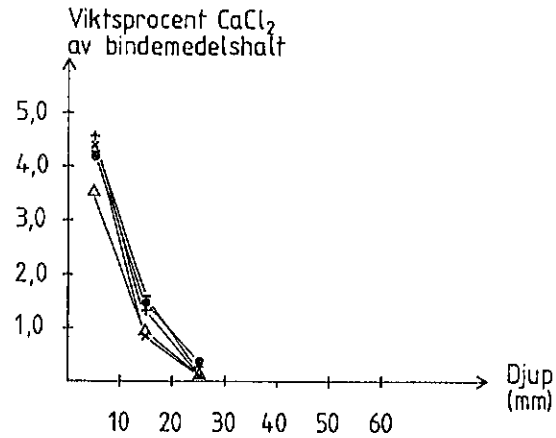


Figur 7.20 Kloridinträngning efter 16 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet D

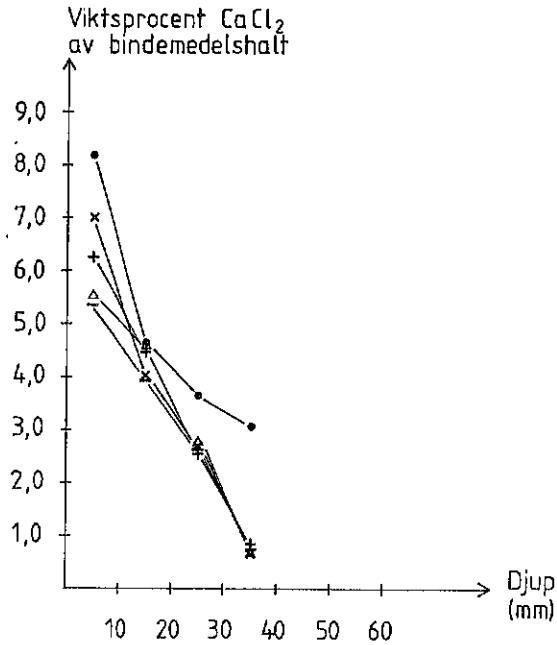


Figur 7.21 Kloridinträngning efter 52 veckors lagring i NaCl-lösning, kvalitet D

Teckenförklaring:	x	1	vatten, 5 dygn
	•	2	luft
	-	3	vatten, 2 dygn
	+	4	eftervattning
	Δ	5	folie, 5 dygn

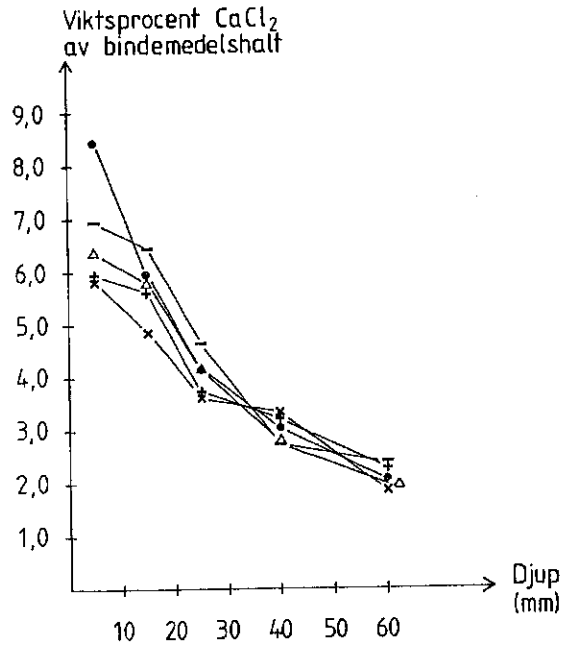


Figur 7.22 Kloridinträngning efter 4 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet D



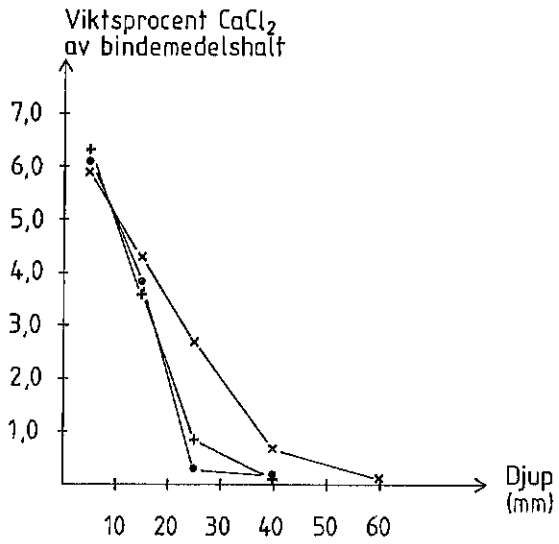
Figur 7.23 Kloridinträngning efter 16 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet D

Teckenförklaring:			
	x	1	vatten, 5 dygn
	•	2	luft
	–	3	vatten, 2 dygn
	+	4	eftervattning
	Δ	5	folie, 5 dygn

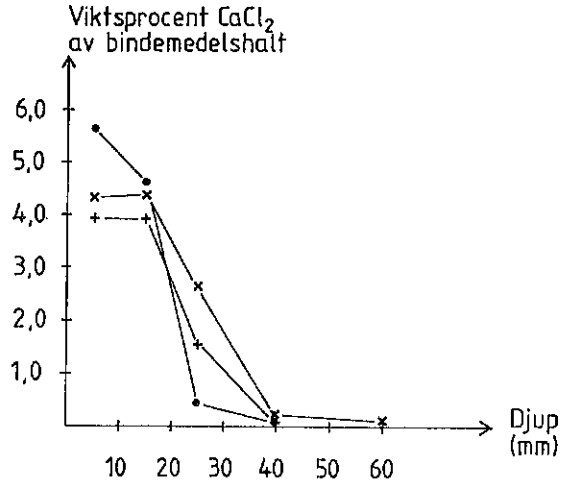


Figur 7.24 Kloridinträngning efter 52 veckors växelvis lagring i NaCl-lösning och luft, kvalitet D

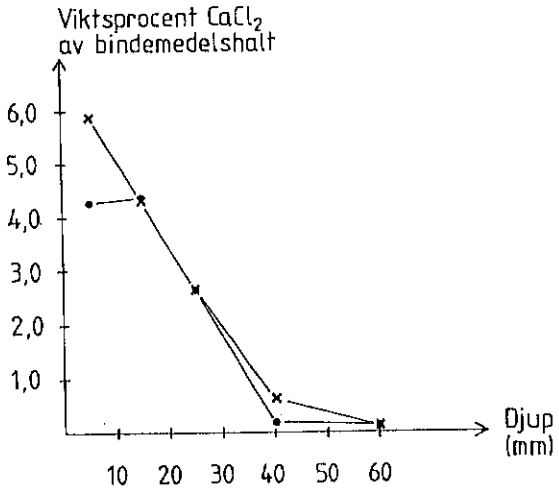
Teckenförklaring:	x	1	vatten, 5 dygn
	•	2	luft
	–	3	vatten, 2 dygn
	+	4	eftervattning
	Δ	5	folie, 5 dygn



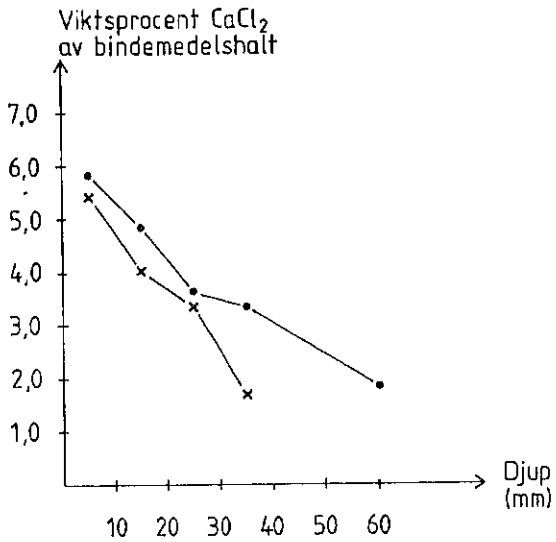
Figur 7.25 Jämförelse mellan kvalitet A (x), kvalitet B (•) och kvalitet C (+) för vattenlagrade provkroppar med lagringssätt NaCl-lösning. Mättillfälle 3, 52 veckors lagring.



Figur 7.26 Jämförelse mellan kvalitet A (x), kvalitet B (•) och kvalitet C (+) för vattenlagrade provkroppar med lagringssätt: cykler 1 vecka NaCl-lösning + 2 veckor luft. Mättillfälle 3, 52 veckors lagring.



Figur 7.27 Jämförelse mellan lagringssätt: NaCl-lösning (x) och cykler 1 vecka NaCl-lösning och 2 veckor luft (•). Gäller för kvalitet A, vattenlagrade provkroppar vid mättillfälle 3, 52 veckor.

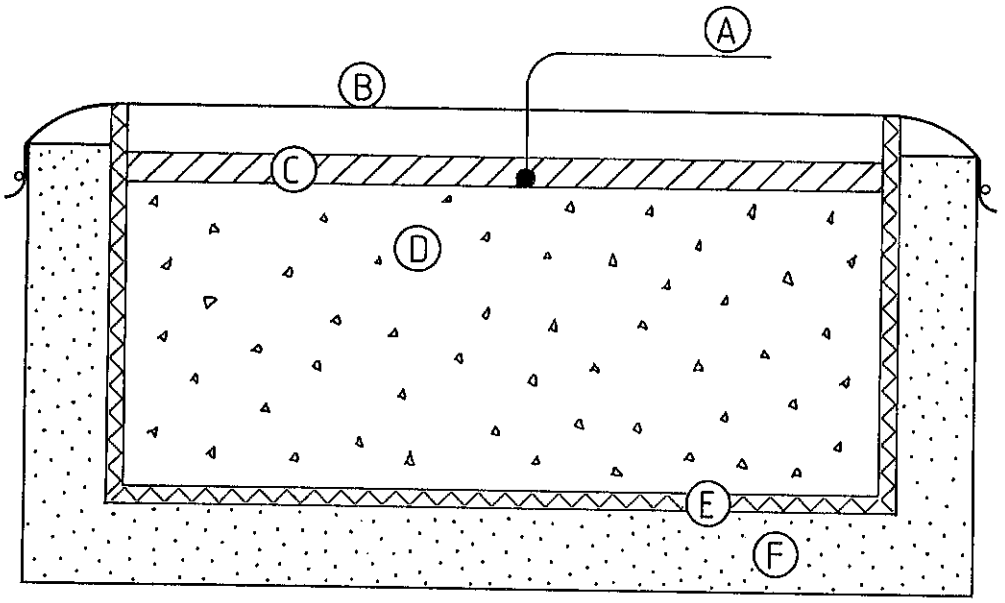


Figur 7.28 Jämförelse med lagringssätt: NaCl-lösning (x) och cykler 1 vecka NaCl-lösning och 2 veckor luft (•). Gäller för kvalitet D, vattenlagrade provkroppar (5 dygn) vid mättillfälle 3, 52 veckor.

8 SALTFROSTBESTÄNDIGHET

8.1 Provningsmetod

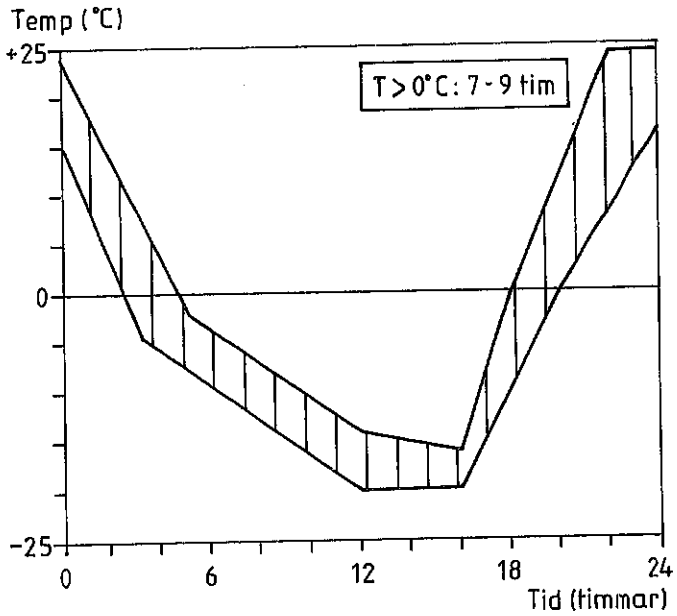
Provningen utfördes för att bestämma betongens motståndsförmåga mot upprepad frysning och tining i kontakt med 3 % NaCl-lösning. SP-metoden SP A1 898 "Betongprovning - Bestämning av frostresistens, förfarande IIA" ligger till grund för provningen. Provuppställning framgår av figur 8.1.



A termoelement
B avdunstningsskydd
C saltlösning
D provkropp
E fuktspärr
F värmeisolering

Figur 8.1 Provuppställning

Saltfrostbeständigheten bestämdes på 4 st kuber per aktuell betongkvalitet - härdningssätt enligt följande. 14 dagar efter gjutning sågades en 50±5 mm tjock skiva parallellt med gjutytan. Denna skiva användes sen som frysprovkropp, varvid gjutytan utgjorde frysyta. Limning av gummiduk (fuktspärr) gjordes dagen efter sågning. Fortsatt förvaring skedde i respektive klimat fram till dess att provkropparnas ålder var 25±1 dygn. Vattenledningsvatten hälldes på frysytan till ca 3 mm höjd 3±1 dygn före provning. Vid 28 dygns ålder startade provningen med att provkropparna värmeisolerades och vattnet på frysytan byttes ut mot 3 % NaCl-lösning. Provkropparna placerades därefter i fryskammare som utsatte dem för upprepad frysning och tining. En cykel motsvarar 24 timmar då temperaturen går från +20 °C till -18 °C och åter till +20 °C, se figur 8.2. Efter 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84, 98 och 112 cykler mättes mängden avskalningar. Normalt fortsatte provningen till 112 cykler gentemot 56 cykler som föreskrivs i provningsmetoden.



Figur 8.2 Tid-temperaturcykeln i saltlösningen ska falla inom det streckade området i figuren. Dessutom ska temperaturen i saltlösningen under varje cykel överstiga 0 °C under minst 7 men högst 9 timmar.

8.2 Resultat

Resultaten har delats upp i två delar; en del som anger avskalningar under de 7 första cyklerna, tabell 8.1 och en del som anger avskalningarna från 7 till 112 cykler, figur 8.3-8.8. Denna uppdelning har gjorts för att det ska vara möjligt att skilja den första mycket ytliga avskalningen från det fortsatta förloppet. Bortfrysning av det allra översta skiktet av betongytan har normalt ingen avgörande betydelse för en betongkonstruktions beständighet. Förutom frysprovningarna utfördes också en analys av de olika betongkvaliteternas luftporstruktur med hjälp av tunnslipsteknik. Resultaten från denna analys presenteras i tabell 10.1, kapitel 10.

För kvalitet A blir avskalningarna lägst under de första 7 cyklerna för de betongkvaliteter som har vattenlagrats 2 och 5 dygn medan alla andra härdningssätt ger sämre resultat. Eftervattning tycks inte vara lika effektiv när det gäller ytskiktets saltfrostbeständighet som när det gäller andra parametrar som vattentäthet, luftpermeabilitet etc.

Resultaten för större antal cykler, figur 8.3 och 8.4, tycks vara likvärdiga för alla härdningssätt som inneburit någon form av vattenlagring vid +20 °C och även härdning genom intäckning med plastfolie ger bra resultat. Däremot sker en kraftig accelereration av avskalningar vid 50-70 cykler för de provkroppar som har luftlagrats och för de provkroppar som behandlats med hjälp av membranhärdare. Denna accelereration tyder på en väsentligt sämre saltfrostbeständighet.

Avskalningarna för provkroppar som härdats vid +5 °C blir större än för de som härdats vid +20 °C. Vid +5 °C tycks inte heller intäckning med plastfolie ha haft någon positiv inverkan jämfört med lufthärdning.

Tabell 8.1 Avskalningar, kg/m², efter 7 cykler

Kvalitet	A Cement	B Cement + flygaska	C Cement + silikastoft		
Sats	2	1	1	3	4
Härdningssätt					
1 Vatten, 5 dygn	0,17	0,06	0,54	0,22	0,15
2 Luft	0,32	0,33	0,06	0,06	0,10
3 Vatten, 2 dygn	0,08	-	-	-	-
4 Eftervattning	0,87	-	-	-	-
5 Folie	0,34	0,11	0,55	0,45	0,77
6 Membranhärdare	0,86	-	-	-	-
6 Membranhärdare, bortslipad yta	0,18	-	-	-	-
7 Vatten, 14 dygn	-	-	-	0,10	0,70
8 Luft, +5 °C	1,09	-	-	-	-
9 Folie, +5 °C	0,50	0,51	0,56	0,07	0,52

För kvalitet B, figur 8.5, är tendenserna desamma som för kvalitet A, dvs vattenlagring 5 dygn vid +20 °C ger bättre resultat än övriga härdningssätt och att lufthärdning ger sämst resultat. Storleken på avskalningarna är ungefär lika stor för kvalitet A och B.

För kvalitet C visas resultaten, figur 8.6-8.8, för tre olika blandningar 1, 3 och 4. Det som skiljer satserna åt är framförallt att sats 3 och 4 har högre hållfasthet än kvalitet 1 och att sats 4 har en annan luftporbildare än sats 1 och 3.

Avskalningarna tycks generellt sett vara högre för kvalitet C än för kvalitet A och B. En förklaring till detta skulle kunna vara att vattenreducerande tillsatsmedel används vid tillverkningen av kvalitet C. Det har nämligen visat sig att kombinationen av vattenreducerare och luftporbildare har en tendens att ge en sämre frostbeständighet.

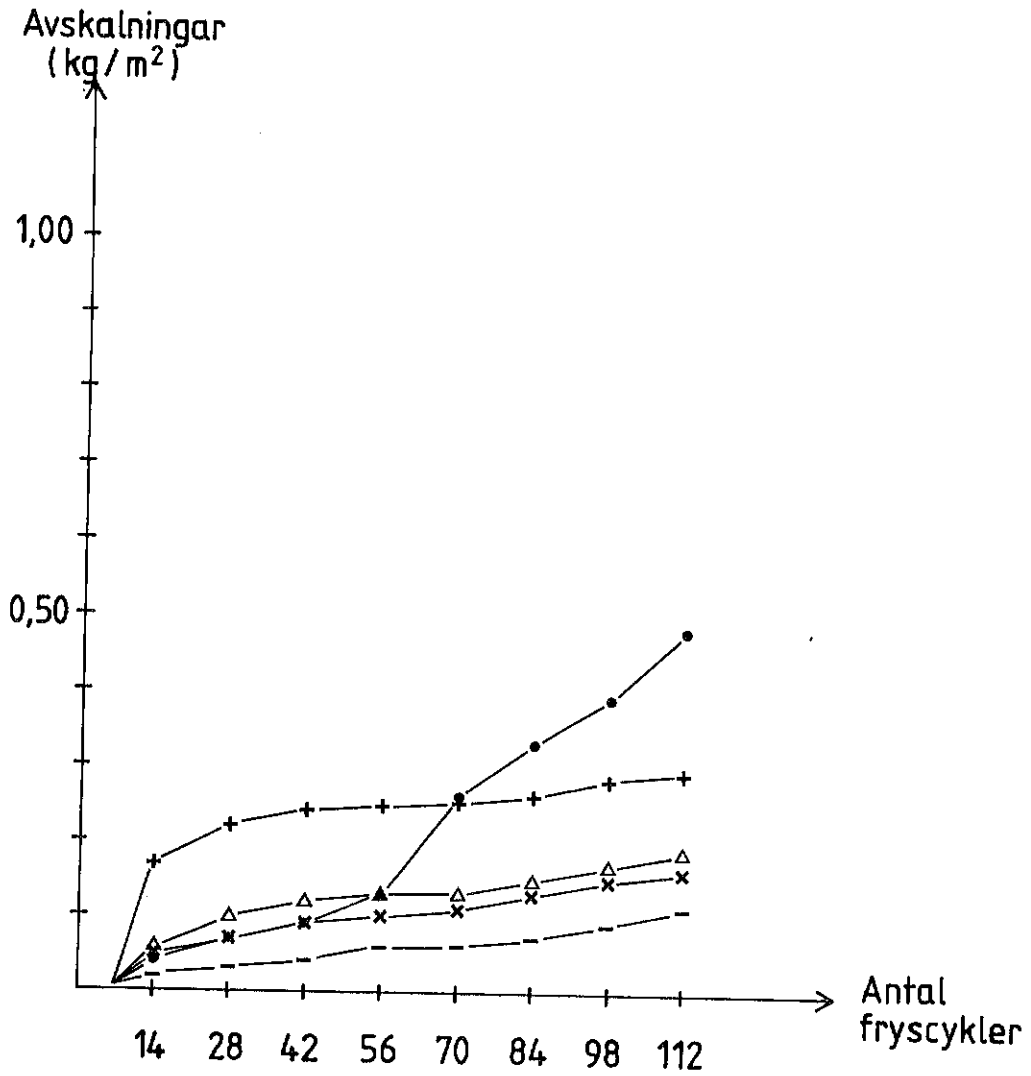
Under de första 7 cyklerna ger de luftlagrade provkropparna lägre avskalningar än de vattenlagrade för kvalitet C. Detta kan förmodligen förklaras med att betong med silikastoft har en tät porstruktur och det tar lång tid att uppnå ett visst fuktinnehav i porsystemet. De luftlagrade proven har förmodligen startat suga vatten från en lägre fuktnivå än de vattenlagrade och därför har inte den kritiska vattenmättnadsgraden nåtts under de första 7 cyklerna. Det visar sig också att vid större antal fryscykler, dvs då betongen sugit vatten under längre tid, så blir avskalningarna störst för de luftlagrade provkropparna, vilket är i överensstämmelse med resultaten för kvalitet A och B.

Härdning genom intäckning med plastfolie vid +20 °C ger ungefär samma resultat som vid vattenhärdning under 5 dygn, möjligtvis är vattenhärdning något bättre för det allra översta betongskiktet, vilket framgår vid en jämförelse av avskalningarna under de första 7 cyklerna.

För de övriga två härdningssätten som testats för silikastoftsbetongen är det svårt att dra några säkra slutsatser eftersom spridningarna är stora. Dock kan man göra en intressant iakttagelse för de provkroppar ur sats 3 som vattenlagrats under 14 dygn. Avskalningarna för dessa provkroppar accelererar kraftigt efter 84 cykler. Samma fenomen har iakttagits i andra undersökningar rörande betong med silikastoft [9, 10].

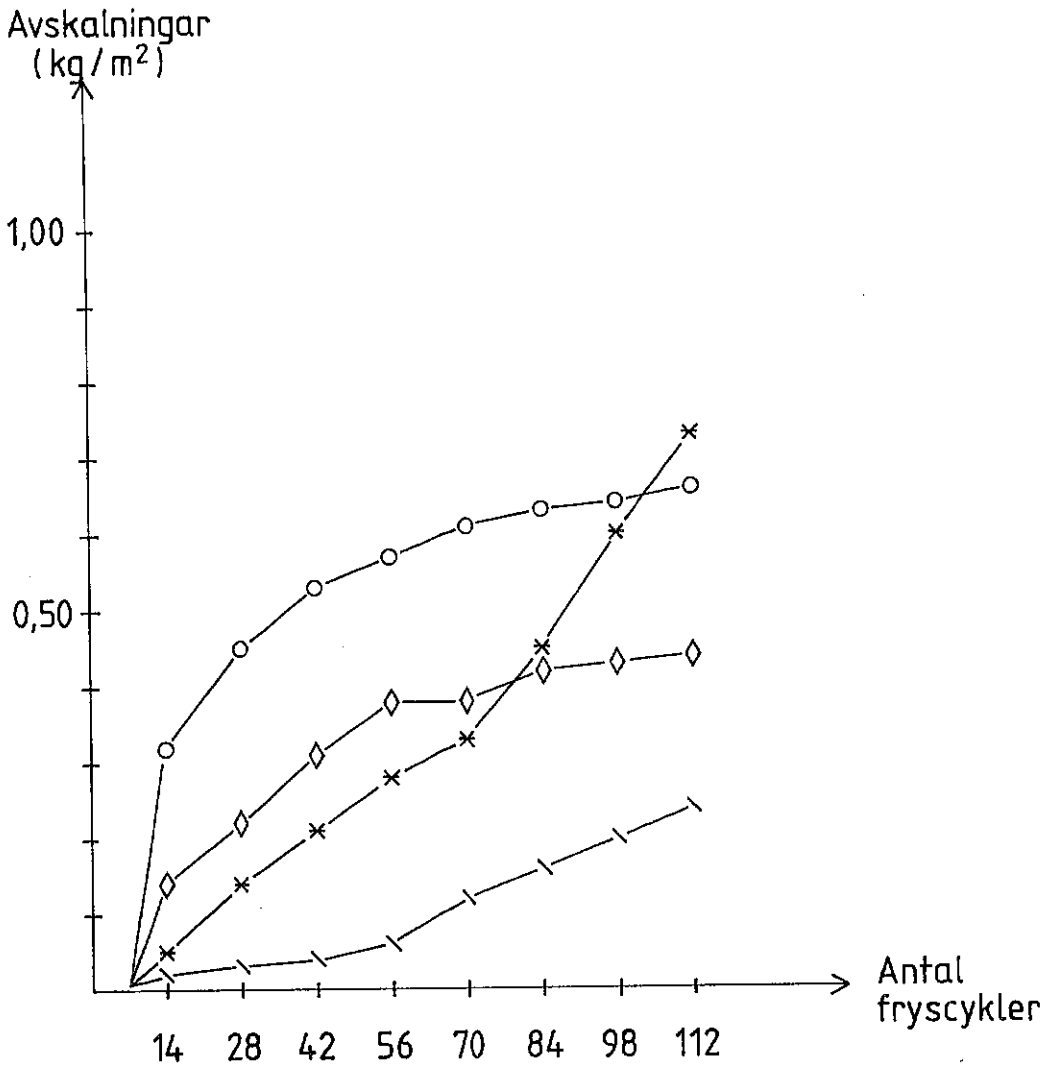
Någon definitiv förklaring till accelereration finns inte men troligtvis beror den på att en kritisk vattenmättnadsgrad nås då betongen fått suga vatten tillräckligt lång tid, dvs när de utsatts för tillräckligt många fryscykler.

Sammanfattningsvis kan sägas att härdningssätten verkar ha en förvånansvärt liten inverkan på betongens saltfrostbeständighet. Dock tycks en fullgod fukthärdning ge bäst resultat och en helt utebliven fukthärdning ger definitivt en sämre beständighet mot salt och frost.



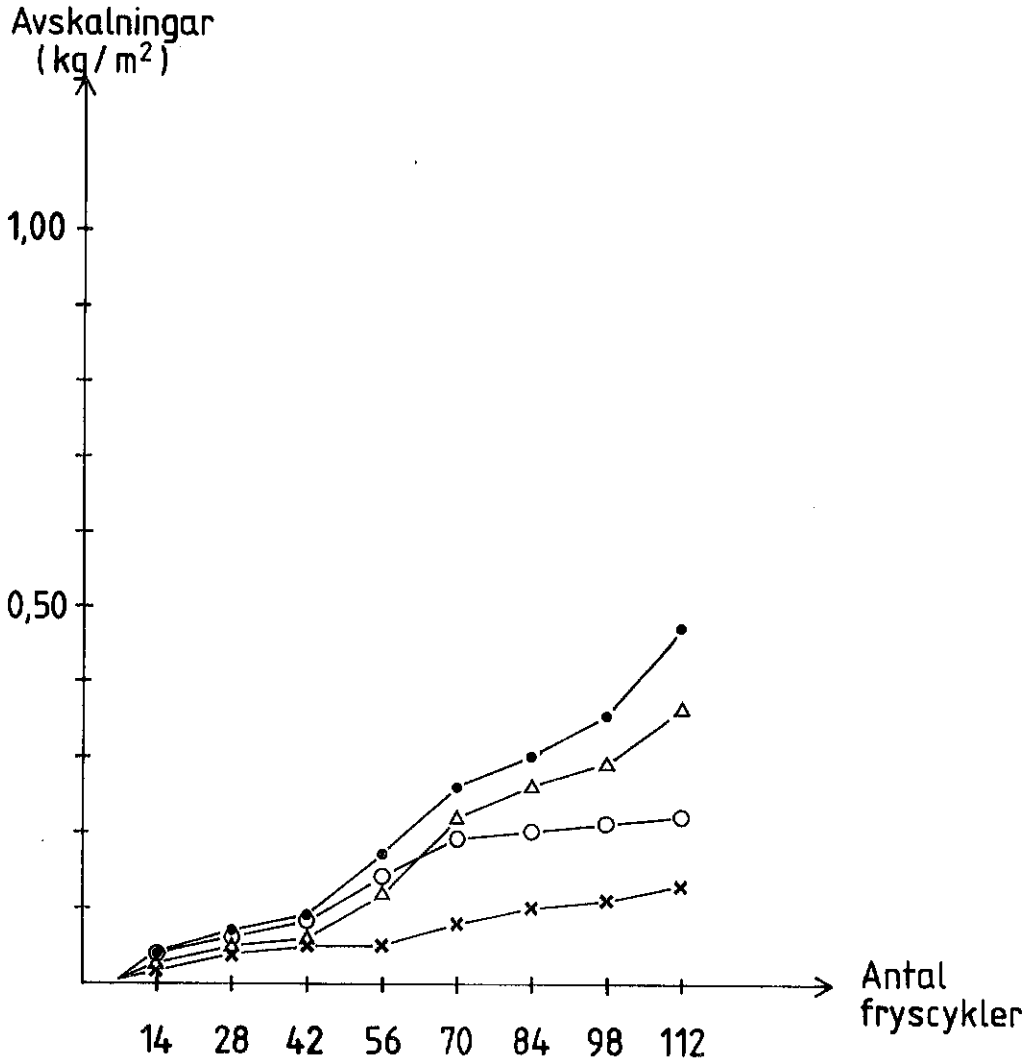
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
– 3 vatten, 2 dygn
+ 4 eftervattning
Δ 5 folie, 5 dygn

Figur 8.3 Saltfrostbeständighet, kvalitet A (I)



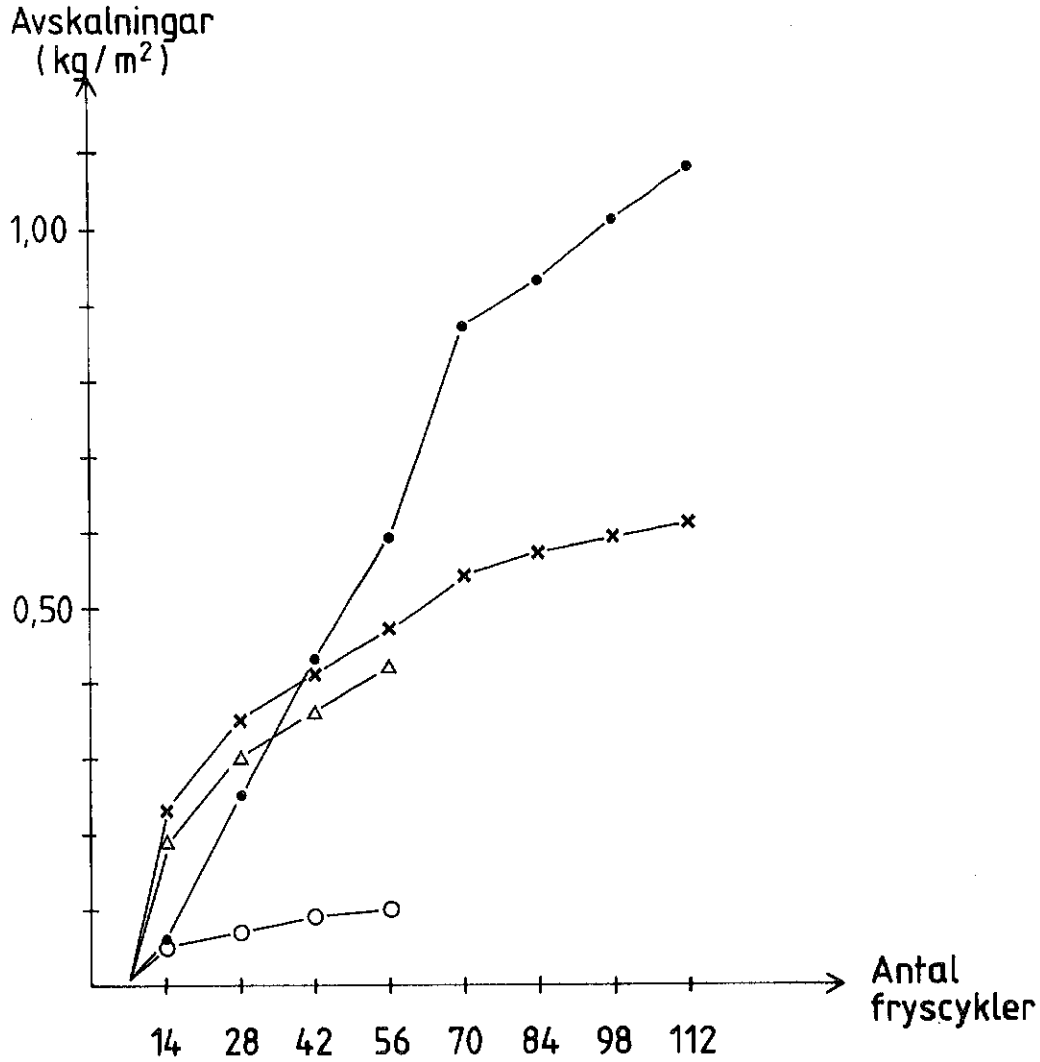
Teckenförklaring: * 6 membranhärdare
\ 6 membranhärdare, bortslipad yta
◊ 8 luft +5 °C
o 9 folie +5 °C, 5 dygn

Figur 8.4 Saltfrostbeständighet, kvalitet A (II)



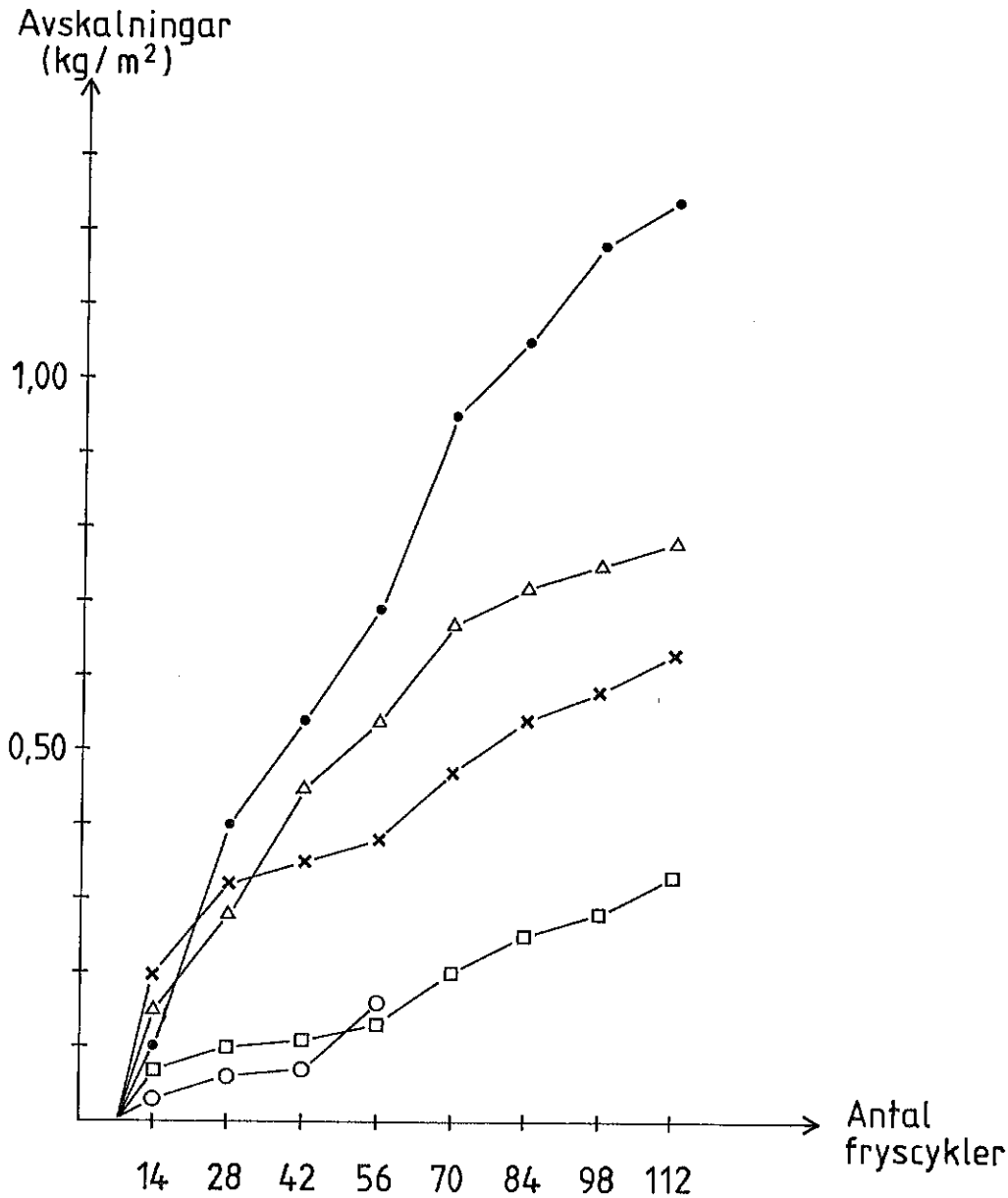
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn
o 9 folie +5 °C, 5 dygn

Figur 8.5 Saltfrostbeständighet, kvalitet B



Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn
o 9 folie +5 °C, 5 dygn

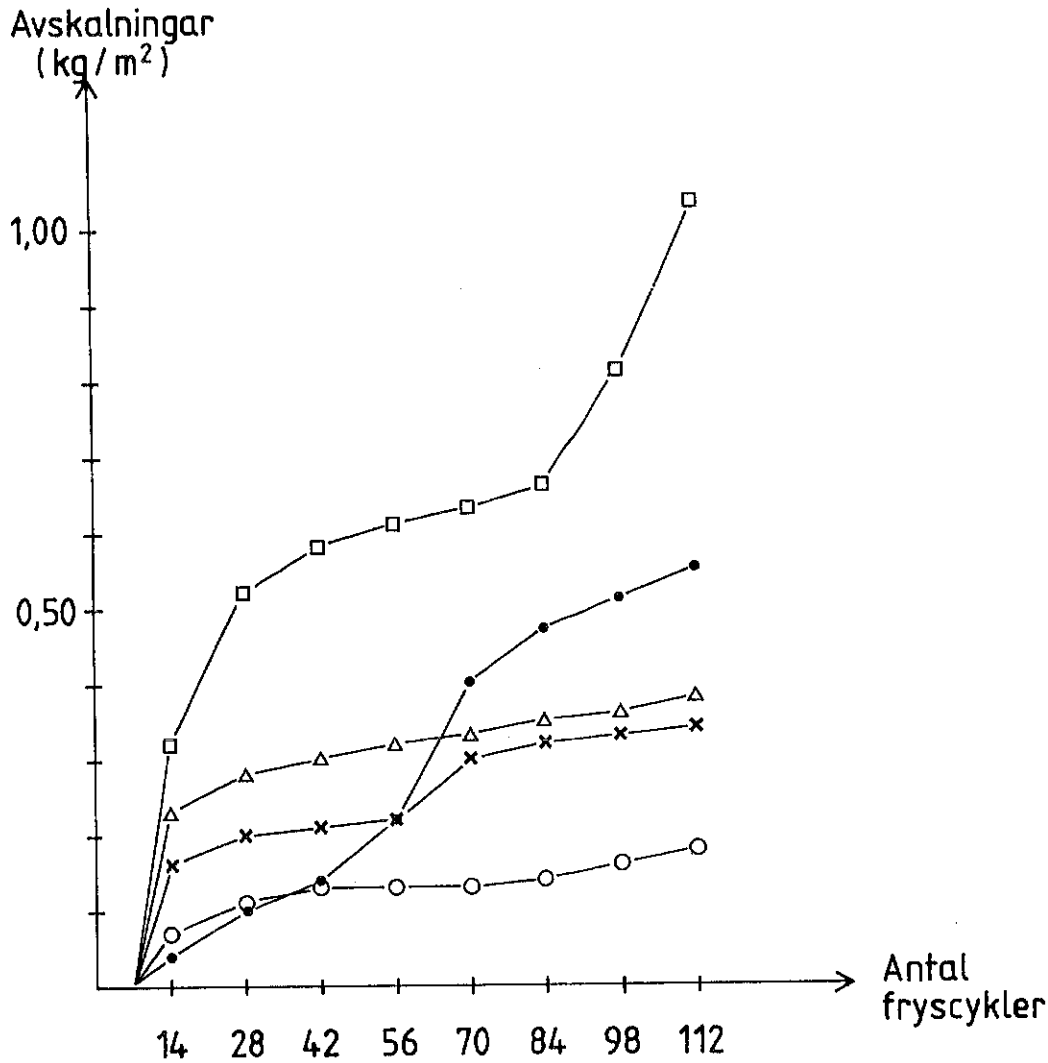
Figur 8.6 Saltfrostbeständighet, kvalitet C, sats 1



Teckenförklaring:

x	1	vatten, 5 dygn
•	2	luft
Δ	5	folie, 5 dygn
□	7	vatten, 14 dygn
o	9	folie +5 °C, 5 dygn

Figur 8.7 Saltfrostbeständighet, kvalitet C, sats 3



Teckenförklaring:

x	1	vatten, 5 dygn
•	2	luft
Δ	5	folie, 5 dygn
□	7	vatten, 14 dygn
o	9	folie +5 °C, 5 dygn

Figur 8.8 Saltfrostbeständighet, kvalitet C, sats 4

9 FROSTBESTÄNDIGHET - RENT VATTEN

9.1 Provningsmetod

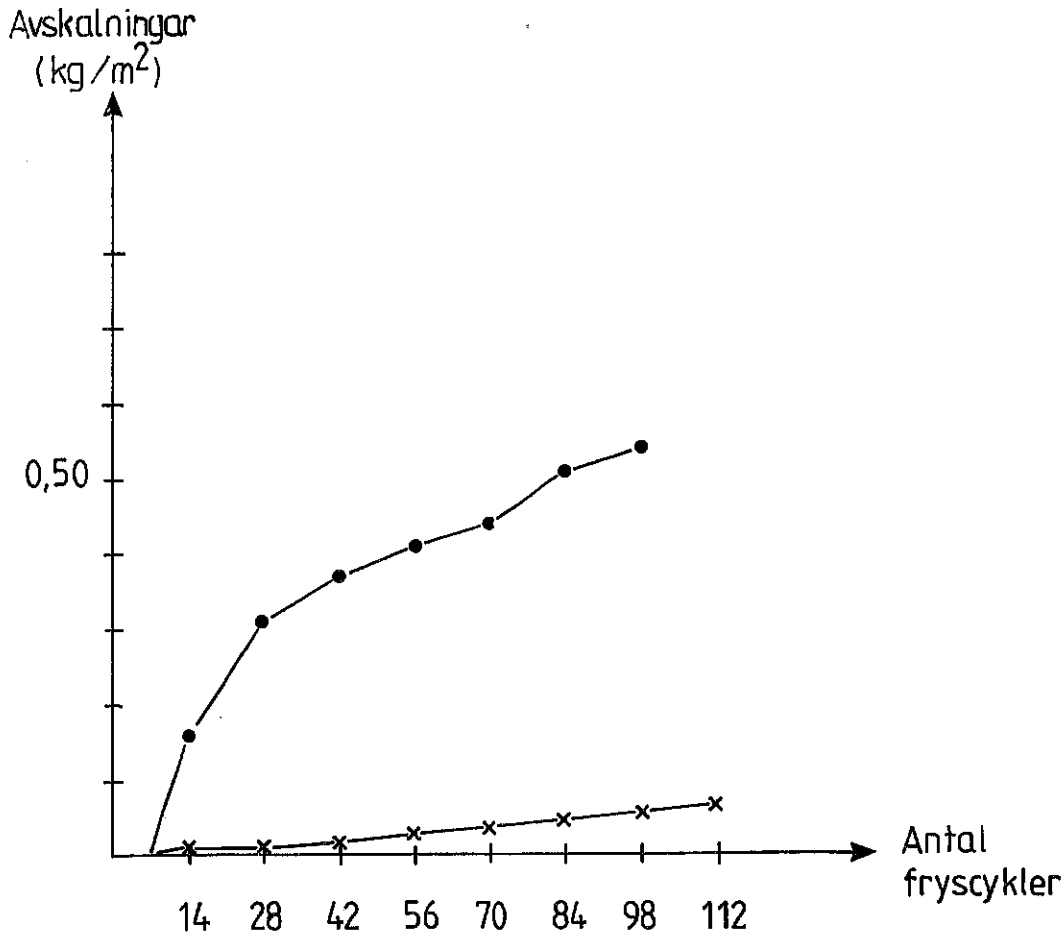
Frostbeständighet mot rent vatten provades endast för kvalitet D. Provningen utfördes på samma sätt som provning av saltfrostbeständighet med den skillnaden att frysmediet bestod av rent vatten. Antalet cykler utökades till 98 cykler för de luftlagrade och till 112 cykler för de vattenlagrade (5 dygn) provkropparna.

9.2 Resultat

I tabell 9.1 ges resultatet för avskalningar vid 7 cykler, vilket visar en större mängd avskalningar för luftlagrade än för vattenlagrade provkroppar. Figur 9.1 visar avskalningarna för resterande cykler. En fullgod härdning ger klart bättre frostbeständighet mot rent vatten än om fukthärdning uteblir.

Tabell 9.1 Avskalningar, kg/m^2, efter 7 cykler

	Avskalning efter 7 cykler
Vatten, 5 dygn	0,03
Luft	0,19



Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft

Figur 9.1 Frostbeständighet mot rent vatten, kvalitet D

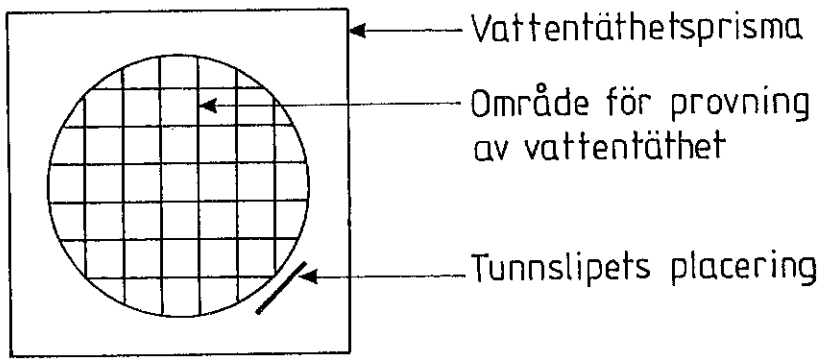
10 TUNNSLIPSANALYS

10.1 Allmänt

Vid en mikroskopisk analys av betong kan man studera betongens tre olika strukturfaser; ballast, pasta och luftporer. För pastan kan man bestämma t ex bindemedelstyp, innehåll av tillsatsmaterial och karbonatisering. Luftporerna är av intresse för att bedöma betongens frostbeständighet. Det är mängden luftporer samt deras storlek och fördelning som har betydelse för frostbeständigheten. I mikroskop kan man mäta upp följande parametrar som beskriver porstrukturen; lufthalt, specifik yta och avståndsfaktor. Syftet med att utföra tunnslipsanalys i detta projekt var främst att studera huruvida tunnslipstekniken är ett användbart instrument för att avgöra om härdningen utförts på ett riktigt sätt. Därvid är det av intresse att studera förekomst av mikrosprickor i betongskiktet närmast ytan samt hur cementpastans täthet varierar med avståndet från betongytan.

10.2 Provningsmetod

Under projektets gång bestämdes det att tunnslipsanalys skulle utföras på provkroppar som hade använts vid vattentäthetsprovning. Provet togs från den delen av provkroppen som inte hade utsatts för vattentryck, se figur 10.1. Tunnslipet togs ut från gjutytan och nedåt, ca 2,5 cm. Tunnslipsanalysen utfördes på ett prov per aktuell kombination betongkvalitet-härdningssätt.



Figur 10.1 Tunnslipets placering i vattentäthetsprisma

10.3 Resultat

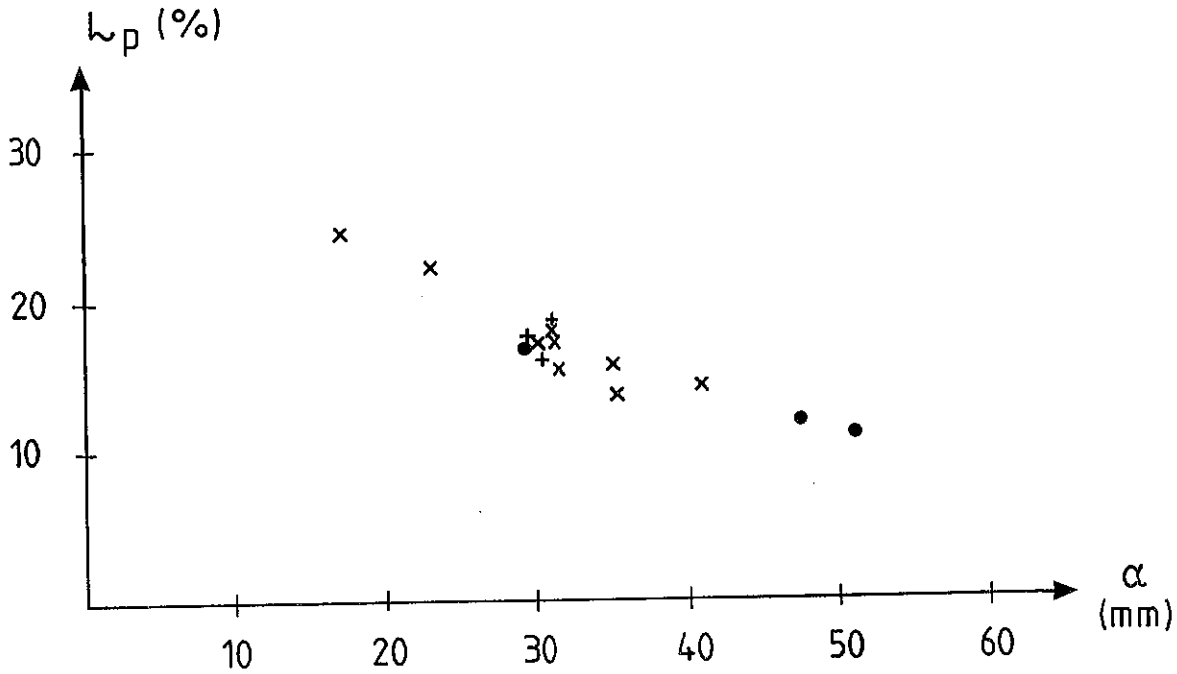
Resultatet från tunnslipsanalysen visar mycket små skillnader mellan de olika härdningssätten, både med avseende på frekvens av mikrosprickor och variation av cementpastans täthet. Detta tyder på att tunnslipstekniken är mindre lämplig att använda för att avgöra efterbehandlingens kvalitet.

I tabell 10.1 visas resultat rörande betongens luftporstruktur. Spridningen är stor både för lufthalten och den specifika ytan men trots detta erhålls relativt liten spridning på avståndsfaktorn. Detta innebär att det finns ett samband mellan specifik yta och lufthalt, vilket klart framgår av figur 10.2, en hög lufthalt ger en låg specifik yta och vice versa.

Värdena på avståndsfaktorn är relativt låg för kvaliteterna A, B och C, vilket tyder på att saltfrostbeständigheten bör vara god, vilket är i överensstämmelse med resultaten i kapitel 8.

Tabell 10.1 Resultat från mikroskopisk analys

Prov	Avstånds-faktor, L (mm)	Specifik yta, α (mm^{-1})	Lufthalt pasta, Lp (%)
Kvalitet A			
1 Vatten, 5 dygn	0,15	23,0	22,4
2 Luft	0,14	35,1	15,7
3 Vatten, 2 dygn	0,14	31,4	17,5
4 Eftervattning	0,18	17,1	24,6
5 Folie	0,14	35,5	13,7
6 Membranhärdare	0,12	40,8	14,4
6 Membranh. slipad yta	0,15	31,6	15,4
8 Luft, +5 °C	0,14	31,2	17,9
9 Folie, +5 °C	0,15	30,1	17,0
Kvalitet B			
1 Vatten, 5 dygn	0,12	47,7	11,7
2 Luft	0,16	29,6	16,6
5 Folie	0,11	51,2	10,8
Kvalitet C			
1 Vatten, 5 dygn	0,14	31,1	18,5
2 Luft	0,16	30,4	16,1
5 Folie	0,15	29,6	17,5
Kvalitet D			
1 Vatten, 5 dygn	0,32	14,6	16,6
2 Luft	0,25	18,0	17,7

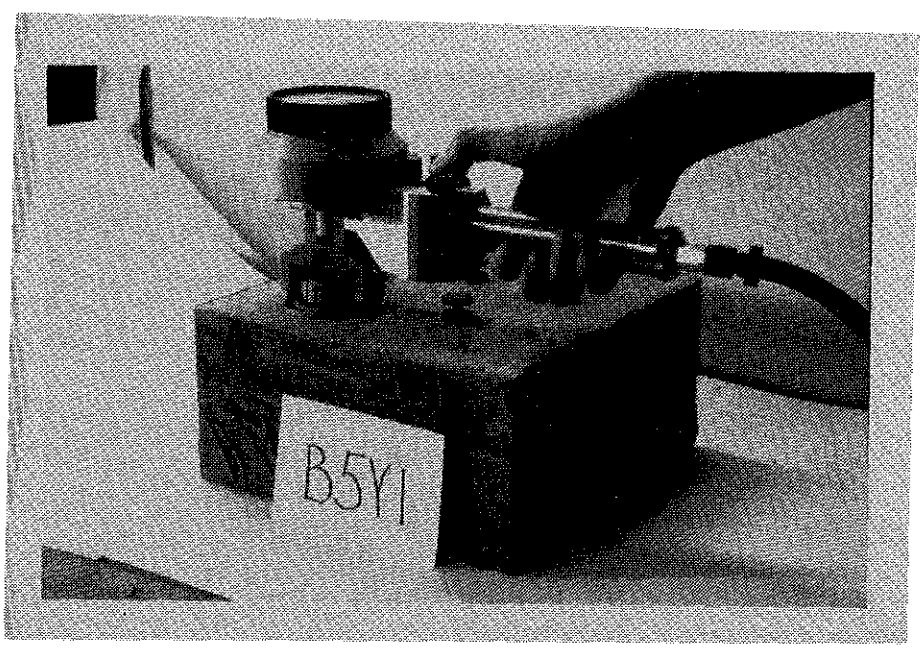


Figur 10.2 Samband mellan specifik yta, α, och lufthalt, L_p, för kvalitet A (x), kvalitet B (•) och kvalitet C (+)

11 YTHÅLLFASTHET

11.1 Provningmetod

Ythållfastheten bestämdes med en Säbergapparat, se figur 11.1, på provkroppar som utgjordes av vattentäthetsprismor. Mätningen gick till så att dragklackar limmades på en betongyta. Dragklackarna belastades centriskt så att brott inträffade i betongen. Ythållfastheten erhölls som brottlasten dividerat med dragklackens yta.



Figur 11.1 Säbergapparat

1 provkropp per aktuell kombination betongkvalitet-härdningssätt provades efter 28 dygns härdning. Ythållfastheten bestämdes på fyra olika nivåer enligt följande

- överytan, före bortslipning av gjuthud
- överytan, efter bortslipning av det översta skiktet på betongen (ca 1 mm slipades bort)
- på 10 mm djup
- på 20 mm djup

På varje yta gjordes 6-8 delprov.

Provningen utfördes under tre dagar på grund av att limning inte kunde ske på våt betongyta direkt efter sågning. På det 28:e dygnet bestämdes draghållfastheten för överytan och för ytan efter bortslipning. En 9 mm skiva sågades av och den nya ytan provades dagen efter. Proceduren upprepades än en gång och på den tredje dagen provades ytan på 20 mm djup.

Vid provning av kvalitet A gick det inte att utföra ythållfasthetsprovning på överytan för membranhärdad provkropp. Överytan var mjuk och dammade mycket vid slipning.

11.2 Resultat

I figur 11.2-11.5 visas de erhållna resultaten. Varje värde på ythållfastheten representerar medelvärdet av 6-8 mätpunkter per djup och prisma.

Genomgående ökar ythållfastheten med ökande djup från gjutytan. Detta kan förklaras dels av att det sker en separation vid gjutytan så att ytskiktets kvalitet påverkas, dels av härdningens inverkan.

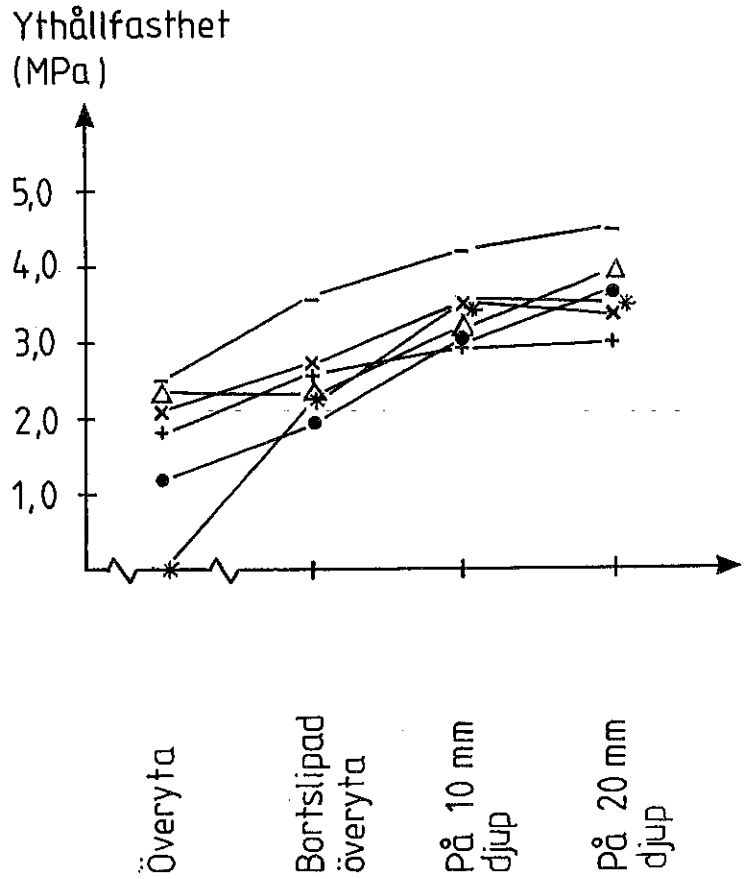
För kvalitet A, B och C finns det en klar tendens att de luftlagrade provkropparna ger de lägsta resultaten och de vattenlagrade de högsta. Detta gäller dock inte för mätningarna som utförts på överytan (gjutytan) där de provkroppar som lagrats under plastfolie genomgående ger de högsta värdena på ythållfastheten. Detta kan möjligen förklaras med att det sker en viss urlakning av det allra översta skiktet vid vattenlagringen och att denna urlakning reducerar ytskiktets hållfasthet.

För kvalitet C tycks ythållfastheten vara mer eller mindre oberoende av avståndet från ytan för de provkroppar som vattenlagrats eller lagrats under plastfolie.

Detta indikerar att ingen eller ringa separation skett vid tillverkningen av dessa provkroppar, vilket kan förklaras med att betongen innehåller silikastoft. De luftlagrade provkropparna visar däremot en kraftigt nedsatt ythållfasthet och detta kan tolkas som om betong med silikastoft är mer beroende av en fullgod efterbehandling än vad andra betongkvaliteter är. Dock har effekten av de dåliga härdningsbetingelserna i stort sett upphört redan 10 mm in i betongen.

För kvalitet D är skillnaden i resultat mellan de olika härdningssätten mycket liten. Detta tyder på att separation vid tillverkningen av provkroppar för betong med högre vct har större inverkan på ythållfastheten än vad härdningen har. Dock finns det en tendens att de provkroppar som härdats i luft eller under plastfolie får en något lägre hållfasthet längre in i provkroppen (> 15 mm från ytan).

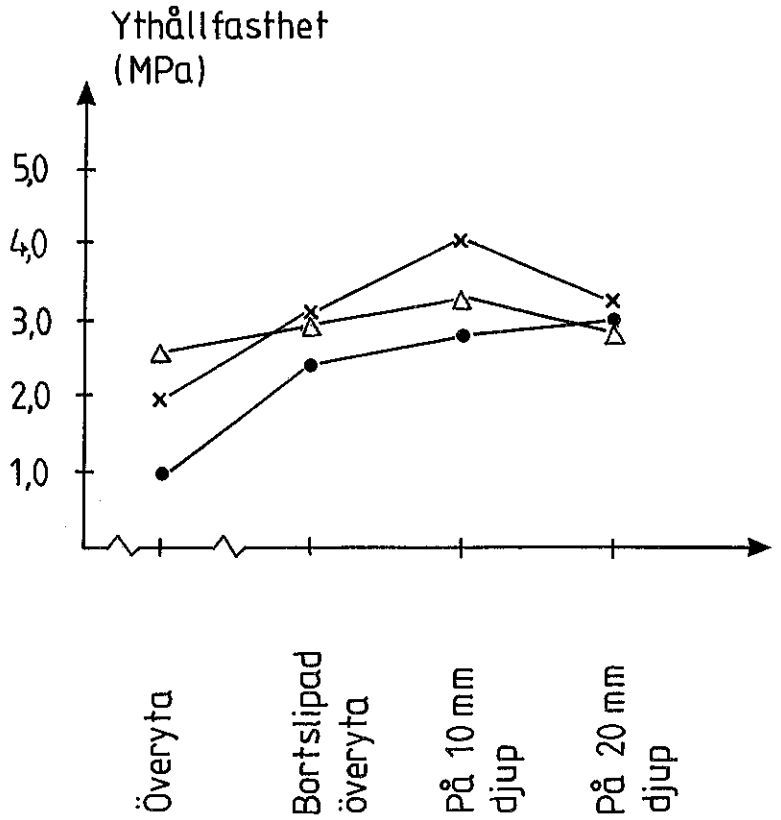
Det kan också konstateras att de provkroppar som lagrats under folie ger ett högre värde på ytans hållfasthet än vad de övriga lagringssätten ger och skillnaden är t o m mer markant än för de övriga kvaliteterna. Detta styrker påståendet ovan att urlakning vid vattenlagring påverkar ytans hållfasthet eftersom en kvalitet med vct = 0,7 är mer otät än en kvalitet med vct = 0,5 och därför bör vara mer känslig för urlakning.



Teckenförklaring:

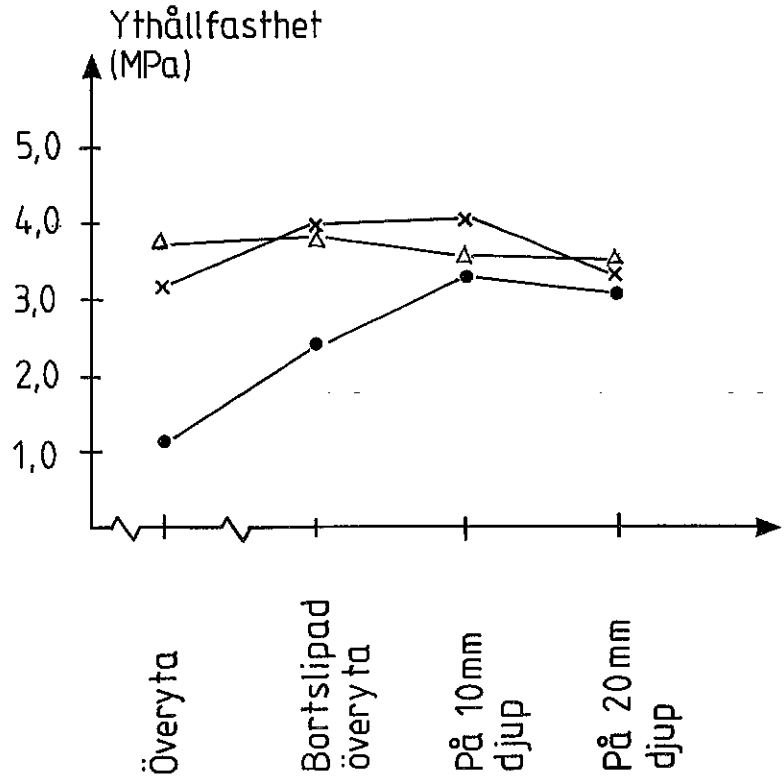
x	1	vatten, 5 dygn
•	2	luft
–	3	vatten, 2 dygn
+	4	eftervattning
Δ	5	folie, 5 dygn
*	6	membranhärdare

Figur 11.2 Ythållfasthet, kvalitet A



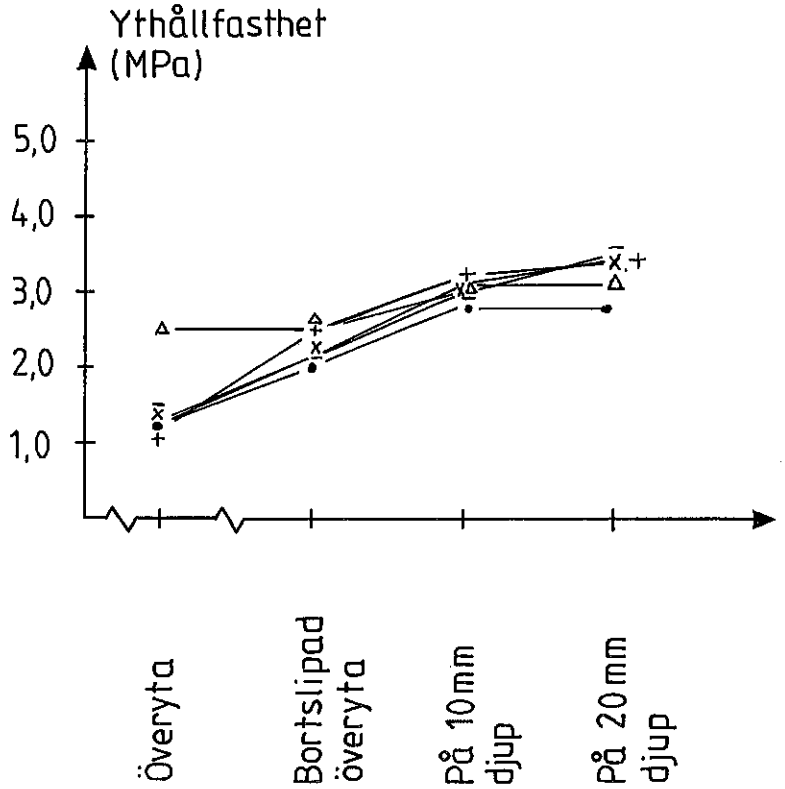
Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn

Figur 11.3 Ythållfasthet, kvalitet B



Teckenförklaring: x 1 vatten, 5 dygn
• 2 luft
Δ 5 folie, 5 dygn

Figur 11.4 Ythållfasthet, kvalitet C



Teckenförklaring:

x	1	vatten, 5 dygn
•	2	luft
–	3	vatten, 2 dygn
+	4	eftervattning
Δ	5	folie

Figur 11.5 Ythållfasthet, kvalitet D

12 SAMMANFATTANDE SLUTSATSER

Resultatet av detta projekt kan sammanfattas genom följande slutsatser

- Efterbehandling genom vattenlagring ger klart bättre resultat än övriga härdningssätt. Resultatet blir bättre ju längre vattenbegjutningen pågår men redan 2 dygns vattenlagring ger betydligt tätare betong än då andra härdningssätt används, såsom intäckning med plastfolie eller besprutning med membranhärdarpreparat.

- Efterbehandling genom intäckning med plastfolie ger normalt resultat som ligger ungefär mitt emellan fullgod fukthärning och utebliven efterbehandling. Skillnaderna mellan fullgod fukthärdning och intäckning med plastfolie är störst för de betongkvaliteter som har ett vct motsvarande 0,5 och betydligt mindre då vct är 0,7.

- Enligt resultaten i denna undersökning tycks effekterna av en utebliven fukthärdning under de första dygnen till stor del kunna avhjälpas genom en fukthärdning i efterhand. Detta är en intressant iakttagelse och denna möjlighet att avhjälpa en bristfälligt utförd efterbehandling borde utredas ytterligare.

- Resultaten från provningarna av kloridinträngning och frostbeständighet har i förvånansvärt liten grad påverkats av sättet för efterbehandling. Under bägge dessa provningar står emellertid provytan under lång tid i kontakt med vatten och det är därför troligt att skillnaderna mellan de olika härdningssätten därvid utjämnas på samma sätt som vid en återupptagen fukthärdning enligt ovan.

- Resultaten av denna undersökning påvisar tydligt betydelsen av en fullgod efterbehandling. Så blir t ex en vattenlagrad betongyta med ett vct på 0,7 tätare mot vatten och luft än en betongyta med ett vct på 0,5 där fukthärdningen utelämnats helt och till och med då den utförts genom intäckning med plastfolie.

- Vid +5 °C och 70 % RF tycks intäckning med plastfolie ge obetydligt bättre resultat än om fukthärdningen utelämnas helt.

- Denna undersökning har inte kunnat påvisa några signifikanta skillnader i känslighet för sättet av efterbehandling för betong med respektive utan tillsatsmaterial (silikastoft och flygaska).

- Provkroppar som härdats genom intäckning med plastfolie får en något högre ythållfasthet än provkroppar som vattenlagrats. Detta beror troligen på urlakning i samband med vattenlagringen. Emellertid blir förhållandet det omvända bara några mm in i betongen, d v s vattenlagring ger högst hållfasthet.

- Provning av vattentäthet med tryck enligt SS 13 72 14 ger stora utslag för en bristfälligt utförd efterbehandling. Metoden är snabb och enkel och borde lätt kunna modifieras så att den blir lämplig för provning av vattentäthet också på utborrade cylindrar eller för fältmässig provning.

13 REFERENSER

[1] Senbetta, E
Scholer, C F
A New Approach for Testing Concrete Curing Efficiency, ACI journal, title no 81-12, pp 82-86, 1984

[2] Fabrizio, A. Di
Colli, F
The Effect of Curing on the Quality of the Surface Layer of Concrete, CIA News, 11 (1), pp 9-10, 1985

[3] Fattuhi, N.I.
Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period, Matériaux et Constructions, Vol. 19 N° 110, pp 131-135, 1986

[4] Nischer, P
The quality of the concrete texture. Effect of curing on concrete stripped of its formwork at an early age. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 6, pp 363-368, 1986

[5] Gräf, H
Grube, H
Einfluss der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit, Betontechnische Berichte, vol 11, pp 426-429, 1986

Fortzetzung
Betongtechnische Berichte, vol 12, pp 473-476, 1986

[6] SBN Godkännanderegler
Mineraliska tillsatsmaterial till betong, Statens planverks författningssamling 1985:2

[7] Gräf, H
Grube, H
The influence of curing on the gas permeability of concrete with different compositions, Proceedings of the Rilem Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung Universität Hannover, pp 80-87, 1984

[8] Fagerlund, G
Betonghandboken, materialdelen, avsnitt 8:6.6. Kapillaritet, Svensk Byggtjänst, pp 366-371, Stockholm 1982

[9] Petersson, P-E
The influence of silica fume on the salt frost resistance of concrete. Statens Provningsanstalt, Byggnadsteknik, SP-RAPP 1986:32, Borås 1986

[10] Lehtonen, V
The influence of puzzolanic admixtures on the frost resistance of hardened concrete. Concrete & Frost, Concrete Society of Denmark (Dansk Betongförening) report 22:85, pp 217-230, Copenhagen 1985

[11] Petersson, P-E
Bestämning av aktivitetskoefficienten för tillsatsmaterial i bruk. Statens provningsanstalt, Byggnadsteknik, SP-RAPP 1984:05, Borås 1984

MATERIAL

Följande material har använts till framställning av betong

Cement

Slite Std P

Silikastoft

Cementa, Mikropoz. Vid beräkning av ekvivaltent vatten-cementtal multiplicerades mängden silikastoft med faktorn 1,0.

Flygaska

Cementa, Pozzolan. Vid beräkning av ekvivalent vatten-cementtal multiplicerades mängden flygaska med faktorn 0,3.

Vatten

Vattenledningsvatten med temperaturen 14±2 °C, vilket gav en betongtemperatur på 20±2 °C.

Luftporbildare

Barra 55L, baserad på Vinsol Resin, till alla betongsatser utom för kvalitet C, sats 4. Barra Aer L, baserad på tensider till kvalitet C, sats 4.

Vattenreducerare

Cementa Flyttillsats V33, baserad på melamin, användes till betongkvalitet C.

Membranhärdare

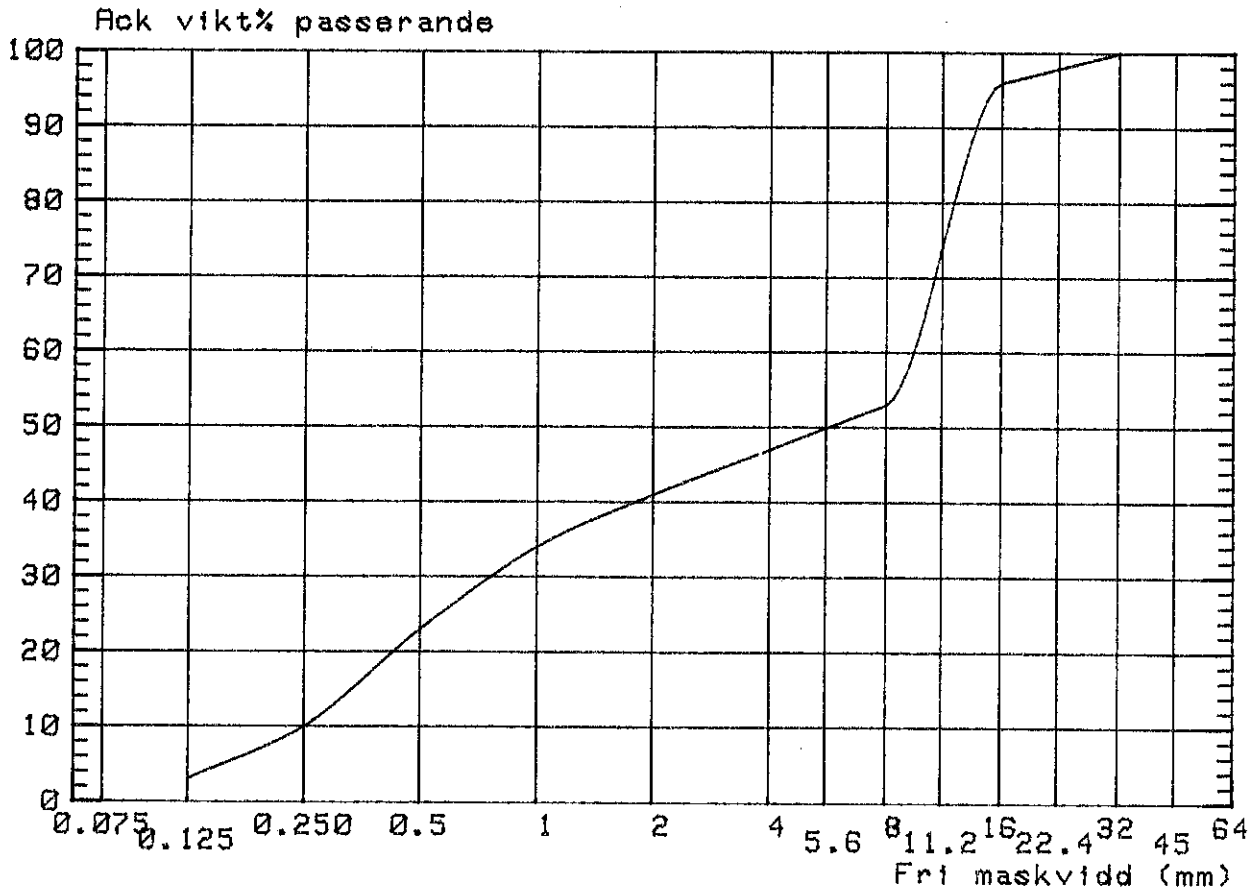
Cementa krympspärr, baserad på en vattenlöslig polyglykol.

Ballast

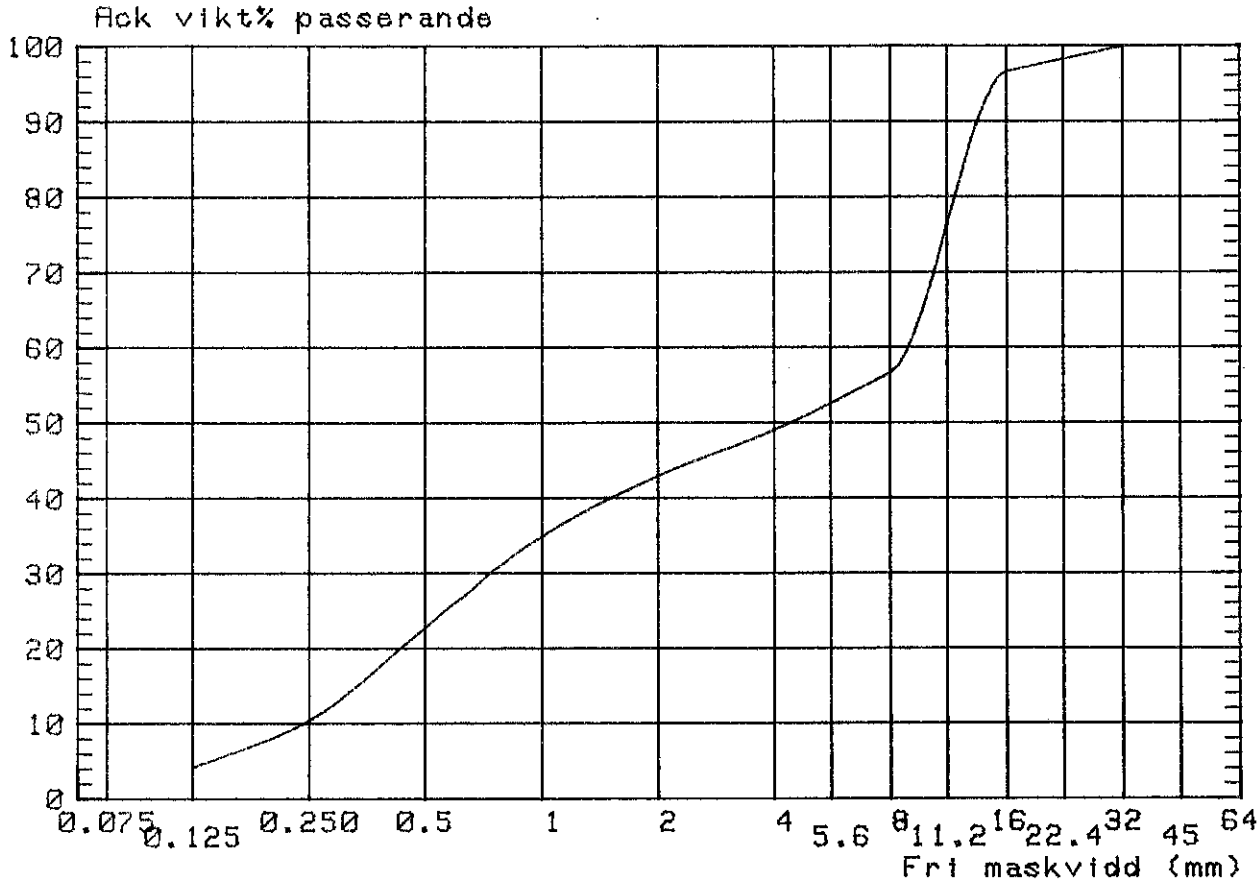
Fingrus av naturmaterial. Stenmaterial bestående av natursingel. Maximal stenstorlek 16 mm.

För kvalitet A, B och C var sammansättningen 53±1 % fingrus och 47±1 % sten. I figur 1.1 visas en genomsnittlig siktkurva för de tre kvaliteterna.

Kvalitet D hade en sammansättning av 55 % fingrus och 45 % sten. Siktkurvan för kvalitet D visas i figur 1.2.



Figur 1.1 Genomsnittlig siktkurva för kvalitet A, B och C



Figur 1.2 Siktkurva för kvalitet D

REAKTIVITETSTEST

Reaktivitetstest utfördes enligt [6] på samma material som hade använts till kvalitet C, sats 1 och 2, vilket var Cementas Mikropoz. En jämförelse gjordes med ett material från Vargön Alloys. I nedanstående tabell redovisas resultaten från testen vid 28 dygn, aktivitetskoefficienten k har beräknats enligt [11].

Tabell Resultat från reaktivitetstest

		Tillsatsmaterial, vikts% av bindemedelshalten		
		0 (%)	5 (%)	10 (%)
Typ av tillsats-material				
Mikropoz	f_c (MPa)	50,5	54,2	61,0
	k	-	2,1	2,6
Vargön	f_c (MPa)	50,5	56,6	61,5
	k	-	2,8	2,6

Erhållna resultat visar att använt material vid gjutningarna inte skiljer sig nämnvärt med jämförande material. De erhållna aktivitetskoefficienterna för silikastoftsmaterialet överensstämmer med tidigare erfarenheter. Till omprovningen, 2 st satser, valdes att använda samma material som tidigare, Cementa Mikropoz.