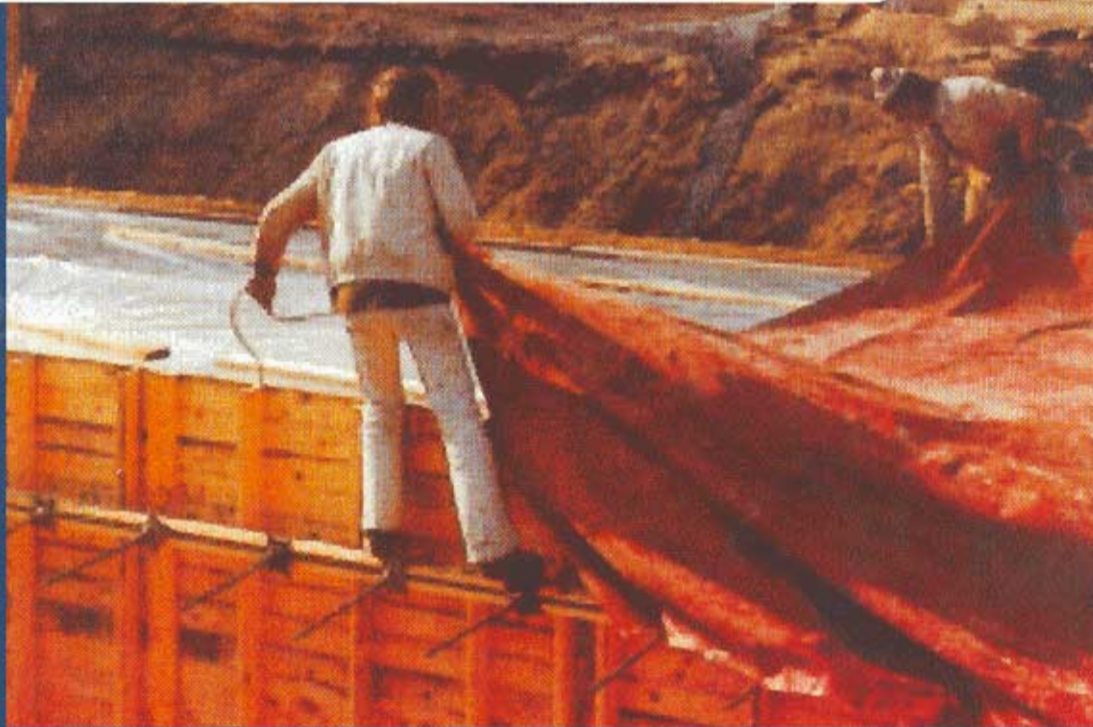




HETEK

Efterbehandling
Hovedrapport



Rapport nr. 104
1997

IRRD Information

Title in English	HETEK - Curing - Main Report	
Title in Danish	HETEK - Efterbehandling af beton - Hovedrapport	
Authors	Kirsten Riis and Marlene Haugaard	
Subject classification	Field 32 Concrete	
Keywords	Concrete	4755
	Curing	3678
	Surface	6438
	Quality	9063
	Test methods	6288
	Denmark	8028

Abstract This report forms a part of the Danish Road Directorate's research programme called High Performance Concrete - The Contractor's Technology (abbreviated to HETEK). HETEK is divided into eight parts where part No. 6 concerns Curing.

This report is a summary of the 24 curing tests performed in this part. The first 16 tests were performed in the laboratory with the same concrete recipe used for casting. This concrete recipe is a class A concrete with a water/cement-ratio of max. 0,40 which also is used in HETEK, part No. 3+4. The last 8 curing tests are partly 2 tests performed in the laboratory and partly 6 tests performed on a bridge construction which is the project's full-scale test. For casting of the last 8 curing tests is used a class A concrete with a water/cement-ratio of max. 0,45 chosen by the contractor on the bridge construction which was used for the full-scale test. The full-scale test was performed to verify the theory based on the first 14 curing methods. Hereby it was also possible to test form liner which had not been possible to test in a laboratory due to lack of form pressure.

The tests have been evaluated and two remarkable results have been found. Firstly, the tests show that you can not obtain a tighter concrete surface by curing the concrete surface up to 10 days of maturity compared to what can be achieved at 3 - 5 days of maturity. Secondly, the tests show that sealing sprayed on the concrete surface even 2 hours of maturity after the mixture of the concrete gives a tight concrete surface. This is surprising as producers of sealings do normally not recommend that sealing is sprayed on the concrete surface before the concrete has set.

UDK	624.012.4	621.795	693.548
ISSN	0909 - 4288		
ISBN	87 7491 814 1		

Indholdsfortegnelse

0. Forord	1
1. Indledning	3
2. Forsøg og resultater	4
2.1. Forsøg	4
2.2. Betonrecepter	5
2.3. Resultater	6
3. Evaluering af forsøg	12
4. Konklusion	16
5. Vurdering af krav	19
6. Anvisning	21
7. Forslag til videre undersøgelser	22
8. Litteraturliste	23

0. Forord

Dette projekt vedrørende efterbehandling er en del i Vejdirektoratets udviklingsprogram Højkvalitetsbeton - Entreprenørens Teknologi forkortet til HETEK.

Højkvalitetsbeton er beton med funktionsmæssig levetid på mindst 100 år i særlig aggressivt miljø.

Dette udviklingsprogram inkluderer undersøgelser vedrørende entreprenørens oplæg til højkvalitetsbeton og udførelse af betonarbejde med reference til at opnå den krævede funktionsmæssige levetid på 100 år.

Dette udviklingsprogram er opdelt i 7 delopgaver indenfor de følgende emner:

- Chloridmodstandsevne
- Frostbestandighed
- Styling af revner i ung beton
- Komprimering
- Efterbehandling (fordampningsbeskyttelse)
- Prøvestøbning
- Reparation i udførelsesfasen

Vejdirektoratet har indhentet tilbud til dette udviklingsprojekt, hvilket primært er finansieret af Erhvervsministeriet.

Denne delopgave vedrørende efterbehandling er udført af:

Dansk Teknologisk Institut repræsenteret af Betoncentret ved:

- Marlene Haugaard (Projektleder)
- Kirsten Riis
- Tommy Nielsen
- Jette Schaumann

og

Dansk Betoninstitut repræsenteret af tre entreprenører:

Højgaard & Schultz A/S - Per Fogh Jensen
Monberg & Thorsen A/S - Jan Graabek
Rasmussen & Schiøtz - Per Jeppesen

Formålet med dette projekt er at undersøge effekten af forskellige efterbehandlingsmetoder baseret på kvaliteten af betonoverfladen og at udarbejde en anvisning vedrørende efterbehandling.

Efterbehandlingsmetoderne er udført som en kombination af forskellige typer af overfladebeskyttelse og varigheden af overfladebeskyttelsen.

Resultaterne af delopgaven er udgivet i følgende rapporter:

- HETEK - Efterbehandling - Status for emnet
- HETEK - Efterbehandling - Supplerende undersøgelser - forslag
- HETEK - Efterbehandling - Fase 1: Laboratorieforsøg
- HETEK - Efterbehandling - Fase 2: Evaluering af forsøgsresultater
- HETEK - Efterbehandling - Fase 3: Verifikationsforsøg
- HETEK - Efterbehandling - Fase 4: Afsluttende evaluering og definition af overensstemmende krav
- HETEK - Efterbehandling - Hovedrapport
- HETEK - Efterbehandling - Anvisning.

April 1997
Per Fogh Jensen
Marlene Haugaard
Styregruppen for HETEK-Efterbehandling
projekter

1. Indledning

Kendetegnende for beton til aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse er, at der ikke er overskud af vand i forhold til den vandmængde cementen anvender under hydratiseringen. Dette sikrer en tættere betonstruktur ved, at cementpastaen ikke bliver fyldt med små vandmættede porer. Såfremt der sker fordampning fra betonen kan der ikke opnås en hydratisering som forventet, hvilket vil have betydning for betonens styrke og stivhed. Det er derfor vigtigt at skabe en efterbehandling i form af fugttabsbeskyttelse, så betonoverfladen kan opnå den ønskede hydratiseringsgrad.

Da fordampningen fra betonoverfladen er størst, mens betonen er frisk, er det vigtigt at påbegynde efterbehandlingen så tidligt som muligt for at undgå plastiske svindrevner. Hermed sikres også tilstedeværelse af tilstrækkeligt med vand i betonen til, at der kan skabes en acceptabel hydratisering af betonoverfladen. Specifikationer vedrørende tidlig efterbehandling kan i nogle tilfælde være i modstrid med krav til, at overfladebehandle betonen ved f.eks. glitning. I disse tilfælde kan det være nødvendigt at etablere en midlertidig efterbehandling af betonen.

Endvidere er det nødvendigt, at efterbehandlingen har en tilstrækkelig varighed, så betonoverfladen kan opnå den ønskede hydratisering, så en god kvalitet af betonlaget i overfladen sikres. Herved sikres en god holdbarhed af betonkonstruktionen, hvor betonen er tæt mht. chloridindtrængning, karbonatisering, opsugning af havvand mm.

I nuværende normer og standarder for betonkonstruktioner vedrørende efterbehandling er der stillet krav til hvor tidligt og hvor længe, betonoverfladen skal være beskyttet mod fordampning samt hvor effektiv efterbehandlingen skal være. I de sidste år har der være en tendens til mere og mere restriktive krav såsom tidligere beskyttelse og længere beskyttelsesperiode.

Nogle undersøgelser udført af DTI og Dansk Beton Teknik A/S [Lundberg, 1994] har indikeret, at en kortere periode med form på betonoverfladen kombineret med forseglingsmiddel kan resultere i en højere kvalitet af betonoverfladen udtrykt i antallet af mikrorevner sammenholdt med beton, der var beskyttet med form i en længere periode.

Det er derfor ønskværdigt at få yderligere information om, hvor effektiv efterbehandlingen skal være for at opnå den ønskede kvalitet af betonoverfladen.

2. Forsøg og resultater

Med baggrund i rapporten Status for Emnet [Anette Berrig, Marlene Haugaard og Per Fogh Jensen, 1996] blev 14 forskellige efterbehandlingsmetoder udvalgt. Disse 14 efterbehandlingsmetoder omfatter almindelig anvendte efterbehandlingsmetoder og nogle ekstreme efterbehandlingsmetoder såsom ingen efterbehandling og vådholdelse af betonoverfladen. De 14 efterbehandlingsmetoder er repræsenteret ved efterbehandlingsforsøgene 1 til 14, der alle blev udført i laboratorie, hvor de klimatiske forhold kan holdes næsten konstante i forsøgsperioden. De 14 efterbehandlingsforsøg er rapporteret i Fase 1 rapporten [Kirsten Riis og Marlene Haugaard, 1996].

Til verifikation blev yderligere 10 efterbehandlingsforsøg udført. De 6 af efterbehandlingsforsøgene blev udført på en byggeplads, idet det herved var muligt at afprøve efterbehandlingsmetoder, såsom bræddeforskalling og formdug. De sidste 4 efterbehandlingsforsøg blev udført i laboratorie. De 10 verifikationsforsøg er rapporteret i Fase 3 rapporten [Kirsten Riis og Marlene Haugaard, 1997].

2.1 Forsøg

Efterbehandlingsforsøg nr. 1 til 18 blev udført i laboratorie, mens efterbehandlingsforsøgene Horisontal og Vertikal er udført på en byggeplads.

Figur 1: Efterbehandlingsforsøgenes varighed er angivet i modenhedstimer

Efterbehandlingsforsøg nr.	Forskalling	Fri overflade	Forseglingsmiddel	Skumplast måtte	Våd overflade	Plast
1*	1-76	76-240	-	-	-	-
2*	1-77	77-79	79-240	-	-	-
3	1-240	-	-	-	-	-
4	-	2-240	-	-	-	-
5	1-25	25-240	-	-	-	-
6	1-25	25-27	27-240	-	-	-
7**	-	1-240	-	-	-	-
8**	1-78	78-80	80-240	-	-	-
9	-	1-5	5-240	-	-	-
10	-	2-5	-	-	5-244	-
11	1-25	25-27	-	27-240	-	-
12	1-77	77-79	-	79-240	-	-
13	-	1-5	-	5-240	-	-
14	-	1-2	2-240	-	-	-
15**	1-81	81-83	83-240	-	-	-
16**	-	1-2	2-240	-	-	-
17	2-75	75-77	77-241	-	-	-
18	-	-	-	-	-	2-243
1, Horisontal	-	-	-	-	210-297	1-210
2, Horisontal	-	-	1-297	-	119-297	20-88
3, Horisontal	-	1-7	7-297	-	119-297	20-88
1, Vertikal	1-79	79-284	-	-	79-284	98-113
2, Vertikal	1-79	79-80	80-284	-	79-284	98-113
3, Vertikal	1-79	79-80	80-284	-	79-284	98-113

Ved forsøgene nr. 1-18 var klimaforholdene med temperatur på 20 °C, en vindhastighed på 3,6-3,7 m/s og en relativ luftfugtighed på 63-70 %.

* Temperaturen var 22 °C.

** Relativ luftfugtighed på 44-50 %.

Ved forsøgene Horisontal og Vertikal er de aktuelle klimatiske forhold målt på byggepladsen i forsøgsperioden ved hjælp af en mini-vejrstation. De klimatiske forhold var i gennemsnit 87 % relativ luftfugtighed, en temperatur på 7,6 °C og en vindhastighed på 1,2 m/s.

Nedenstående er en kort beskrivelse af de anvendte typer af efterbehandling.

Forskalling: Til efterbehandlingsforsøgene nr. 1-18 og 2, Vertikal blev anvendt 18 mm tyk vandtæt plyfaplade. Til forsøg nr. 3, Vertikal blev anvendt 20 mm brædeforskalling. Til forsøg nr. 1, Vertikal blev anvendt formdug, der var fastgjort til en plyfaplade. På både den rene plyfaplade og på brædeforskallingen blev anvendt formslipmiddel, der var baseret på vand og ester.

Fri overflade: Der blev ikke anvendt nogen efterbehandling.

Forseglingsmiddel: Til efterbehandlingsforsøgene nr. 2, 6, 8, 9 og 14-17 blev anvendt den af fabrikanten foreskrevne dosis af forseglingsmidlet, der er 250 ml/m². Produktet er baseret på vand og ester og har en effektivitet på 84 % i henhold til TI-B 33. Ved fuldskalaforsøget (efterbehandlingsforsøgene Horisontal og Vertikal) er der påsprøjtet en større mængde af forseglingsmidlet på overfladen end den foreskrevne dosis.

Skumplast måtte: En 10 mm tyk måtte af ekstruderet polyethylen blev lagt på betonoverfladen.

Våd overflade: Forsøg nr. 10 blev vådholdt ved at placere en hessiansæk på overfladen. Sækken blev vandet dagligt. Ved fuldskalaforsøget (efterbehandlingsforsøgene Horisontal og Vertikal) blev denne betegnelse anvendt for det tidsinterval, hvor betonoverfladen var regnvandspåvirket.

Plast: En gennemsigtig plastfolie blev lagt på betonoverfladen.

2.2 Betonrecepter

Til de 24 efterbehandlingsforsøg blev to forskellige betonrecepter anvendt. Figur 2 viser betonrecept nr. 6021 fra 4K, der blev anvendt til forsøgene nr. 1-16. Betonrecepten blev valgt af projektgruppen og er også blevet anvendt i HETEK, delopgave 3+4. Figur 3 viser betonrecept nr. A35LSFAA25L3 fra Unicon, der blev anvendt til de øvrige forsøg. Denne betonrecept er valgt af den pågældende entreprenør på byggepladsen, hvor fuldskalaforsøget (efterbehandlingsforsøgene Horisontal og Vertikal) blev udført.

Kendetegnende for begge betonrecepter er, at de opfylder kravene til større anlægskonstruktioner.

Figur 2: Betonrecept 6021 med ækv. vand-cement forhold på 0,38

	Type/oprindelse/klasse	kg/m ³
Cement	Lavalkali-Sulfatbestandig cement CEM I 42,5 (HS/EA/≤2)	285
Flyveaske	Danaske	60
Mikrosilica	Elkem	12
Vand	Vand	127
Sand	RN-Avedøre, 0-4/A	758
Sten	Rønne granit, 8-16/A	535
Sten	Rønne granit, 16-25/A	565
Luftindblandingsmiddel	Conplast 316 AEA 1:1, Fosroc	0,357
Plastificeringsmiddel	Conplast 212, Fosroc	1,428
Superplastificeringsmiddel	Peramin F, Fosroc	2,856

Figur 3: Betonrecept A35LSFAA25L3 med ækv. vand-cement forhold på 0,41

	Type/oprindelse/klasse	kg/m ³
Cement	Lavalkali-Sulfatbestandig cement CEM I 42,5 (HS/EA/≤2)	274
Flyveaske	Danaske	61
Mikrosilica	Pulver	16
Vand	Vand	134
Sand	RN-Avedøre, 0-4/A	733
Sten	Rønne granit, 4-16/A	679
Sten	Rønne granit, 16-25/A	453
Luftindblandingsmiddel	Conplast 316 AEA 1:5, Fosroc	1,6
Plastificeringsmiddel	Conplast 212, Fosroc	1,1
Superplastificeringsmiddel	Peramin F, Fosroc	1,8

2.3 Resultater

I et klimastyret rum med to vindtunneler blev efterbehandlingsforsøgene nr. 1-18 gennemført. I vindtunnelerne er der placeret en vægt, således at vægttabet kan registreres kontinuert i forsøgsperioden. Da flere af forsøgene er udført med forseglingsmiddel, blev et forsøg udført for at bestemme fordampningen af forseglingsmidlet.

I figur 4 er den fordampede mængde vand fra betonoverfladen angivet. Den fordampede mængde vand er det målte vægttab minus fordampningen fra eventuelt forseglingsmiddel.

Figur 4: Vandfordampning fra betonoverfladen indtil 10 modenhedsdøgn

Efterbehandlingsforsøg nr.	Vandfordampning [kg/m ²]
1	0,51
2	0,22
3	0,04
4	3,39
5	0,91
6	0,32
7	3,56
8	0,23
9	1,14
10	-0,67
11	0,27
12	0,08
13	0,66
14	0,34
15	0,25
16	0,62
17	0,30
18	0,05

Efter efterbehandlingsperioden blev betonemnerne til efterbehandlingsforsøgene nr. 1-18 flyttet til et klimarum med 65 % relativ luftfugtighed og en temperatur på 20 °C, mens betonemnerne fra efterbehandlingsforsøgene Horisontal og Vertikal blev opbevaret i lukkede plastikposer ved 20 °C.

Da betonemnerne var 28 modenhedsdøgn gamle, blev den ene halvdel af hvert betonemne anvendt til at undersøge betonoverfladens kvalitet vha. 4 forskellige prøvningsmetoder. De 4 prøvningsmetoder er bestemmelse af chloridpermeabiliteten i de yderste 50 mm af betonoverfladen i henhold til ASTM C 1202, bestemmelse af betonoverfladens carbonatiseringsdybde i henhold til NT Build 357, bestemmelse af antallet af revner og revnelængder i de yderste 25 mm af betonoverfladen i henhold til TI-B 5 og bestemmelse af betonoverfladens kapillære vandopsugning i henhold til TI-B 25.

Den anden halvdel af hvert betonemne blev placeret udendørs og er udsat for udendørs klima herunder regnvandspåvirkning. Dette gør det muligt på et senere tidspunkt at undersøge betonemnerne yderligere.

Figur 5 viser betonoverfladens chloridpermeabilitet bestemt ved 28 modenhedsdøgn i henhold til AASHTO T277-831.

Figur 5: Chloridpermeabilitet bestemt ved 28 modenhedsdøgn

Efterbehandlingsforsøg nr.	Chloridpermeabilitet [Coulombs]
1	1013
2	1049
3	2139
4	>4000
5	1717
6	1556
7	>4000
8	951
9	1710
10	985
11	1084
12	1059
13	1463
14	985
15	1098
16	1015
17	1534
18	1360
1, Horisontal	1475
2, Horisontal	2103
3, Horisontal	2671
1, Vertikal	1421
2, Vertikal	1904
3, Vertikal	1352

Figur 6 viser betonoverfladens karbonatiseringsdybde efter henholdsvis 1, 2 og 3 måneders påvirkning. Prøvningen er udført på betonoverfladen fra 28 modenhedsdøgn i henhold til NT Build 357.

Figur 6: Overfladekarbonatiseringen bestemt i henhold til NT Build 357

Efterbehandlingsforsøg nr.	1 måned		2 måneder		3 måneder	
	middel [mm]	max. [mm]	middel [mm]	max. [mm]	middel [mm]	max. [mm]
1	0	0	3	4	3	5
2	0	0	3	3	3	5
3	6	9	9	10	10	12
4	16	19	20	23	25	26
5	7	8	9	11	11	13
6	4	5	6	8	8	9
7	14	17	21	25	22	25
8	0	0	0	0	0	3
9	4	6	4	6	8	10
10	3	5	5	11	5	7
11	5	7	7	11	8	10
12	3	6	4	6	5	9
13	3	5	3	4	3	4
14	0	0	0	2	0	0
15	0	0	0	5	0	7
16	0	3	0	4	0	3
17	3	5	5	11	7	12
18	12	17	17	19	20	24
1, Horisontal	7	9	8	12	10	13
2, Horisontal	9	10	13	14	14	15
3, Horisontal	3	4	5	6	3	6
1, Vertikal	0	0	0	0	0	0
2, Vertikal	4	6	6	6	8	10
3, Vertikal	3	4	0-3	3	0-3	4

Tyndslib blev udtaget vinkelret på betonoverfladen for at undersøge omfanget af revner i betonoverfladen. Figur 7 viser den samlede længde af revner i de yderste 2,5 mm af overfladen og antallet af pastarevner i den indre struktur. Tyndslibene er undersøgt i henhold til TI-B 5.

Figur 7: Revner på et tyndslib udtaget vinkelret på betonoverfladen

Efterbehandlingsforsøg nr.	Samlet længde af revner i overfladen, [mm]	Pastarevner i indre struktur, [Antal/mm ²]
1	12,3	0,29
2	7,4	0,27
3	16,4	0,12
4	2,9	0,05
5	1,2	0,06
6	7,7	0,15
7	0,0	0,02
8	1,4	0,09
9	15,5	0,05
10	17,7	0,30
11	5,2	0,04
12	8,8	0,09
13	10,1	0,18
14	4,6	0,04
15	8,6	0,14
16	6,2	0,09
17	9,9	0,14
18	12,2	0,19
1, Horisontal	4,4	0,29
2, Horisontal	0,0	0,22
3, Horisontal	0,9	0,31
1, Vertikal	5,7	0,14
2, Vertikal	4,9	0,36
3, Vertikal	3,5	0,22

Figur 8 viser betonoverfladens kapillære vandopsugning. Prøvningen er udført i henhold til TI-B 25, hvor emnerne blev udtørret ved 50 °C inden prøvning.

Figur 8: Kapillær vandopsugning bestemt i henhold til TI-B 25

Efterbehandlingsforsøg nr.	Mætningsgrad [-]	Mætningstid [Timer]
1	0,61	5,6
2	0,63	8,1
3	0,53	4,0
4	0,48	5,3
5	0,41	3,5
6	0,42	3,2
7	0,40	7,3
8	0,44	17,6
9	0,41	6,6
10	0,54	2,3
11	0,61	3,6
12	0,56	3,4
13	0,50	4,0
14	0,43	15,2
15	0,51	2,8
16	0,52	3,2
17	0,58	9,3
18	0,71	1,6
1, Horisontal	0,45	2,4
2, Horisontal	0,50	2,5
3, Horisontal	0,42	2,7
1, Vertikal	0,41	2,4
2, Vertikal	0,41	3,6
3, Vertikal	0,37	2,0

3. Evaluering af forsøg

Forsøgsresultaterne af de 24 efterbehandlingsforsøg er evalueret i Fase 2 og 4 rapporter [Tommy Nielsen og Marlene Haugaard, 1997].

Projektets hypotese er at parametrene revnedannelse, chloridpermeabilitet, kapillær vandopsugning og karbonatiseringsdybde afhænger af faststofætheden af cementpastaen.

For at kunne undersøge hypotesen er faststofætheden, $V_{kap=0}$, beregnet for efterbehandlingsforsøgene nr. 1-18 på baggrund af de målte væggtab fra de enkelte forsøg og betonens ækvivalente vand-cement forhold. Faststofætheden repræsenterer det maksimale volumenandel af faststof, der i teorien kan opnås i cementpastaen, når kapillarvandet er enten opbrugt under hydratisering eller er fordampet. Beregningerne er baseret på Powers' teori [Power, 1948].

I beton med lavt vand-cement forhold ($< 0,45$) vil kun en del af cementen, β_0 , kunne hydratisere, når der samtidig hverken sker fordampning eller vandtilførsel. Når der sker fordampning fra betonoverfladen under hydratiseringsperioden vil en mindre del af cementen kunne hydratisere, β .

I figur 9 er betonens maksimale opnåelige hydratiseringsgrad angivet for forsøgene 1-18. Betonens maksimale opnåelige hydratisering udtrykker forholdet i mellem β og β_0 , hvilket vil sige, at β_{max} er lig 1, når der hverken sker fordampning eller vandtilførel.

Figur 9: Faststofætheden, $V_{kap} = 0$, og betonens maksimale opnåelige hydratiseringsgrad beregnet ud fra vandfordampningen

Efterbehandlingsforsøg nr.	Faststofætheden, $V_{kap=0}$	Betonens maksimale hydratiseringsgrad, β_{max}
1	0,908	0,96
2	0,918	0,98
3	0,923	1,00
4	0,804	0,74
5	0,893	0,93
6	0,914	0,98
7	0,799	0,72
8	0,917	0,98
9	0,884	0,91
10	0,948	1,05
11	0,914	0,98
12	0,921	0,99
13	0,901	0,95
14	0,912	0,97
15	0,916	0,98
16	0,903	0,95
17	0,911	0,98
18	0,920	1,00

Af figur 9 fremgår det, at betonens maksimale opnåelige hydratiseringsgrad er større end 90 % for alle efterbehandlingsforsøgene med undtagelse af efterbehandlingsforsøg nr. 4 og 7. I efterbehandlingsforsøgene nr. 4 og 7 er betonen ikke efterbehandlet, hvorved der fås større fordampning fra betonoverfladen. Betonens maksimale opnåelige hydratiseringsgrad er derfor henholdsvis 74 % og 72 %.

Som angivet i afsnit 2.3 er betonoverfladens kvalitet vurderet ved at måle betonoverfladens chloriddiffusion, karbonatisering, revnelængder og kapillære vandopsugning for alle 24 efterbehandlingsmetoder. Resultaterne blev grafisk optegnet som funktion af faststof-tætheden for at afprøve den førnævnte hypotese.

For at kunne drage en samlet konklusion på baggrund af de 4 forskellige målinger blev resultaterne fra hver målemetode og faststof-tætheden normeret til talområdet 0 til 100 (idet der dog for revnedannelse blev brugt et gennemsnit af de normerede parametre for overfladerevner og pastarevner). Revneformation er en ligelig vægtning af både pastarevner og revnelængder. Lineær regressionsanalyse blev udført på de normerede måleresultater som funktion af den normerede faststof-tæthed. Der er kun udført regressionsanalyse på efterbehandlingsforsøgene nr. 1-18, da fordampningen kun er målt ved laboratorieforsøgene.

Beregningsresultaterne var:

	Korrelationskoeff. (R^2)	Hældningen på regressionskurven
Chloridpermeabiliteten	0,84	-1,10
Karbonatiseringsdybden	0,52	-0,87
Revneformation	0,37	0,56
Kapillær vandmætning	0,10	0,29

Korrelationskoefficienten viser, at kun chloridpermeabiliteten og til dels karbonatiseringsdybden korrelerer med faststof-tætheden.

Ved at anvende hældningen på regressionslinien til at gange den normerede talstørrelse for hver målemetode som vægtning kan de enkelte måleresultater vægtes til en samlet sum, WSP, som vist på figur 10.

Som eksempel er vist beregningen for efterbehandlingsforsøg nr. 1:

$$\text{WSP} = 75 \cdot 0,56 + 2 \cdot (-1,10) + 95 \cdot (0,29) + 13 \cdot (0,87) \approx 56.$$

Figur 10: Normerede resultater og den samlede vægtede sum

Efterbehandlingsforsøg nr.	$V_{\text{kap}=0}$	Revne-dannelse	Chlorid permeabilitet	Kapillær vandopsugning	Karbonatisering	WSP
1	73	75	2	95	13	56
2	80	59	3	100	13	47
3	84	63	39	54	41	-27
4	4	10	100	29	100	-183
5	63	12	25	17	44	-54
6	77	43	20	22	29	-17
7	1	2	100	33	93	-180
8	79	16	0	52	2	22
9	57	51	25	29	26	-13
10	100	91	1	41	21	43
11	78	21	4	68	33	-2
12	82	37	4	41	20	12
13	68	53	17	46	15	11
14	76	18	1	56	2	23
15	79	43	5	27	0	27
16	70	30	2	30	0	23
17	75	47	19	59	22	4
18	81	38	13	52	79	-47
1, Horisontal		53	17	14	41	-21
2, Horisontal		31	38	24	59	-69
3, Horisontal		36	56	11	19	-55
1, Vertikal		36	15	8	0	5
2, Vertikal		64	31	14	29	-20
3, Vertikal		42	13	0	9	1

Den samlede vægtede sum anvendes til at rangordne efterbehandlingsmetoderne, som vist på figur 11.

Figur 11: Efterbehandlingsmetoder er rangordnet efter den samlede vægtede sum

Forsøg nr.	WSP	β_{\max}	Efterbehandlingsmetode
1	56	0,96	Formsat i 3 modenhedsdøgn
2	47	0,98	Formsat i 3 modenhedsdøgn og forseglingsmiddel
10	43	1,05	Vådholdt
15	27	0,98	Formsat i 3 modenhedsdøgn og forseglingsmiddel
14	23	0,97	Forseglingmiddel påsprøjtet efter 2 modenhestimer
16	23	0,95	Forseglingmiddel påsprøjtet efter 2 modenhestimer
8	22	0,98	Formsat i 3 modenhedsdøgn og forseglingsmiddel
12	12	0,99	Formsat i 3 modenhedsdøgn og skummåtte
13	11	0,95	Skummåtte efter 5 modenhestimer
1, Vertikal	5	-	Formdug og formsat i 3 modenhedsdøgn
17	4	0,98	Formsat i 3 modenhedsdøgn og forseglingsmiddel
3, Vertikal	1	-	Bræddeforskalling i 3 modenhedsdøgn og forseglingsmiddel
11	-2	0,98	Formsat i 1 modenhedsdøgn og skummåtte
9	-13	0,91	Forseglingmiddel påsprøjtet efter 5 modenhestimer
6	-17	0,98	Formsat i 1 modenhedsdøgn og forseglingsmiddel
2, Vertikal	-20	-	Formsat i 3 modenhedsdøgn og forseglingsmiddel
1, Horisontal	-21	-	Plasttildækning efter 1 modenhestime
3	-27	1,00	Formsat i 10 modenhedsdøgn
18	-47	1,00	Plasttildækning efter 2 modenhestimer
5	-54	0,93	Formsat i 1 modenhedsdøgn
3, Horisontal	-55	-	Forseglingmiddel påsprøjtet efter 7 modenhestimer
2, Horisontal	-69	-	Forseglingmiddel påsprøjtet efter 1 modenhestimer
7	-180	0,72	Ingen efterbehandling
4	-183	0,74	Ingen efterbehandling

4. Konklusion

Hypotesen, som blev opstillet i afsnit 3, beskriver, at parametrene revnedannelse, chloridpermeabilitet, kapillær vandmætningsgrad og karbonatisering afhænger af cementpastas faststofæthed.

Der er anvendt en teoretisk udregnet parameter (faststofætheden $V_{cap=0}$) til at beskrive den cementpastatæthed, som kan opnås med et givet ækvivalent vand-cement forhold og en vis mængde fordampet vand indtil 10 modenhedsdøgn efter støbningen.

Fire parametre er blevet målt for at bedømme effekten af de forskellige efterbehandlingsmetoder. Hver enkelt af disse parametre er blevet sat i forhold til faststofætheden $V_{cap=0}$.

Følgende konklusioner kan drages fra resultaterne:

- Der er ingen korrelation mellem faststofætheden $V_{cap=0}$ og de parametre, der bruges til at beskrive den kapillære vandmætningsgrad.
- Der er kun fundet en svag korrelation mellem faststofætheden $V_{cap=0}$ og dannelsen af revner i overfladen (de yderste 2,5 mm) og i cementpastaen.
- Der er kun fundet svag korrelation mellem faststofætheden $V_{cap=0}$ og karboniseringsdybden.
- Der er fundet korrelation mellem faststofætheden og chloridpermeabiliteten.

Der er udregnet en vægtet sum af de fire parametre, som er anvendt til at rangordne resultaterne af efterbehandlingsmetoderne. Vægtningen er udregnet ved, at der for hver af de fire parametre er givet en karakter på en skala fra 0 - 100, hvor 0 repræsenterer den laveste værdi og 100 den højeste værdi. Karakteren er multipliceret med hældningen af regressionslinien og efterfølgende er de fire værdier adderet.

Baseret på denne rangordning skiller to efterbehandlingsforsøg sig ud fra de andre efterbehandlingsforsøg og rangerer med lave værdier af den vægtede sum af parametre. De to efterbehandlingsforsøg er begge blevet udført med en fri overflade.

De resterende efterbehandlingsmetoder har fået højere værdier af den vægtede sum af parametre. Disse efterbehandlingsmetoder kan inddeles i to grupper:

1. 12 efterbehandlingsprøver med de højeste værdier af den vægtede sum af parametre dækker metoderne:
 - Form i 3 modenhedsdøgn, med eller uden efterbehandling
 - Vådholdelse af overfladen
 - Forseglingsmiddel på frisk beton og
 - Skummåtte anbragt, når betonen er afbundet (5Mh).

Det er kun to af fuldskalaforsøgene (2, Vertikal og 2, Horisontal), der ikke bekræfter dette mønster, idet de falder i gruppe 2 (gennemsnitlige værdier).

2. 10 efterbehandlingsmetoder med gennemsnitlige værdier af den vægtede sum af parametre dækker metoderne:
 - Forseglingmiddel, når betonen er afbundet (5 Mh)
 - Form i 1 modenhedsdøgn, med eller uden efterfølgende efterbehandling
 - Form i 10 modenhedsdøgn
 - Plastfolie på den friske beton

Nogle af forsøgene er blevet udført mere end én gang. Efterbehandlingsmetoden form i 3 modenhedsdøgn efterfulgt af forseglingmiddel blev anvendt på laboratorieforsøgene 2, 15, 8 (med ændret RF) og 17 (hvor en anden type beton blev anvendt). Forsøgene frembragte næsten identiske resultater. Laboratorieforsøgene 14 og 16, forseglingmiddel på frisk beton, viste ens resultater. Disse resultater tyder på en god reproducerbarhed i laboratoriet.

Ved laboratorieforsøg 18 og fuldskalaforsøg nr. 1, Horisontal blev der i begge tilfælde anvendt plastfolie på frisk beton. Efterbehandlingsforsøgene viste næsten de samme resultater. Vindhastigheden i laboratorieforsøgene var en smule højere (3,6 m/s) end i feltmålingerne (1-2 m/s) og temperaturforskellen mellem luften og betonen var en smule højere i feltmålingerne (6 °C) end i laboratoriet, (hvor den lå på omkring 0 °C). Forskellene i forsøgsresultaterne kan muligvis forklares med disse temperaturforskelle eller med almindelige variationer i forsøgsresultaterne. Sammenholdt med resultaterne fra de forsøg, hvor forseglingmiddel blev brugt på den friske beton, viste forsøgene med plastfolie lavere værdier. Dette indikerer, at plastfolie er mindre effektivt end forseglingmiddel, hvilket højst sandsynligt skyldes, at det er svært at holde plastfolien helt tæt til betonoverfladen, selv under laboratorieforhold.

Feltforsøgene nr. 1, Vertikal (form med formdug i 3 modenhedsdøgn efterfulgt af forseglingmiddel og 3, Vertikal (brædeforskalling i 3 modenhedsdøgn efterfulgt af forseglingmiddel) gav de samme resultater. Dette indikerer, at anvendelsen af formdug, som er dyr, ikke er bedre end den gammeldags metode med brædeforskalling, som er billigere. Både feltforsøg nr. 1, Vertikal og 3, Vertikal gav en anelse højere værdier end feltforsøg nr. 2, Vertikal (form i 3 modenhedsdøgn efterfulgt af forseglingmiddel). Forskellene i resultaterne er små.

Det bør tages i betragtning, at ovennævnte kommentarer er baseret på få resultater.

Det er bemærkelsesværdigt, at laboratorieforsøg nr. 14 og 16 (forseglingmiddel på frisk beton) gav høje værdier og det sammenlignelige feltforsøg nr. 2, Horisontal gav en ret lav værdi. Der kan imidlertid ikke findes nogen forklaring på denne forskel.

Der var ikke nogen synlig effekt ved at anvende formdug, forseglingmiddel eller skummatte som efterbehandling ud over form i 1 eller 3 modenhedsdøgn.

Resultatet af projektet er, at hypotesen blev bekræftet med hensyn til klasse A beton med flyveaske og mikrosilika og med et ækvivalent vand-cement forhold på 0,38.

Tre bemærkelsesværdige resultater er:

1. Efterbehandling med forseglingsmiddel på frisk beton gav gode resultater undtagen i et feltforsøg.
2. Efterbehandling i form i 10 modenhedsdøgn førte til en mindre god kvalitet af overfladen, som tidligere forsøg også har vist.
3. Der er målt lave værdier for antal af mikrorevner i prøver uden efterbehandling.

Hvis disse resultater antages at være generelle, kan der indføres væsentlige forbedringer i entreprenørernes procedurer. Yderligere undersøgelser er imidlertid nødvendige for at bekræfte resultaterne.

Det bemærkelsesværdige resultat med forseglingsmiddel påført efter 2 modenhedstimer bør undersøges nærmere ved forsøg med forskellige typer forseglingsmiddel og forskellige typer betoner. Resultatet med efterbehandling i form i 10 modenhedsdøgn fører ikke til et bedre resultat i forhold til i form i 3-5 modenhedsdøgn, hvilket bekræftes af et tidligere resultat, beskrevet i [Lundberg 1994] og må føre til reduktion af kravene til den samlede efterbehandlingstid, som det ses i en del anlægsbeskrivelser.

Det skal understreges, at lave værdier for dannelse af mikrorevner i beton uden efterbehandling (med fri overflade) er i overensstemmelse med teoretiske betragtninger, som påviser, at mikrorevner i betontyper med et lavt vand-cement forhold ($< 0,45$), er en følge af hydratiseringen. Dette betyder, at få mikrorevner kan forventes, når hydratiseringsprocessen bliver langsommere på grund af udtørring af betonoverfladen. Hvis man ikke finder mikrorevner i overfladen af en beton med et lavt v/c-forhold, kan det indikere, at betonen ikke er blevet ordentligt efterbehandlet.

Den overordnede konklusion på baggrund af efterbehandlingsforsøgene er, at betonoverfladen skal beskyttes mod fordampning for at sikre en overflade, der er tæt nok. Undersøgelsen synes også at bekræfte AAB's krav om, at det for betonkonstruktioner til aggressive og ekstra aggressive miljøer skal gælde, at efterbehandlingen skal være, indtil der er opnået en reaktionsgrad på 85-90% baseret på den adiabatisk varmeudvikling.

5. Vurdering af krav

I Det Danske Vejdirektorats specifikationer for betonkonstruktioner "Almindelig arbejdsbeskrivelse" (AAB) [Vejregeludvalget, 1994] er der opstillet krav til efterbehandling for at sikre en god betonkvalitet, især af det yderste lag beton.

Disse krav går ud på følgende:

citat start

Entreprenøren skal beskytte overfladerne mod udtørring. Medmindre andet vises, skal beskyttelsen etableres så tidligt som muligt, og inden der er nået at fordampe en vandmængde på 1,5 kg/m², dog senest 1 time efter betonen er afbundet. Denne vandmængde gælder ved en betontykkelse på mindst 0,2 m. Hvis betonlaget er tyndere, skal den tilladte vandmængde reduceres proportionalt med tykkelsen.

Hvis der ikke gennemføres en beregning af den fordampede vandmængde, baseret på de aktuelle forhold, skal beskyttelsen etableres inden 1 time efter støbning.

Hvis betonoverfladen skal viderebearbejdes, kan beskyttelsen etableres som en midlertidig foranstaltning.

Beskyttelsen mod udtørring skal bibeholdes indtil de i tabel 5.1 angivne modenheder (ækvivalent hærdetid ved 20 °C) er opnået i det yderste lag beton, målt i en dybde af højst 10 mm.

Hvis afbindingstiden er større end 5 timer, skal den krævede modenhed øges med et tilsvarende antal timer.

Tabel 12. Tidligste tidspunkt for fjernelse af beskyttelse mod udtørring

<i>Miljøklasse</i>	<i>Modenhedstimer</i>
<i>C (Ekstra aggressiv)</i>	<i>180</i>
<i>A (Aggressiv)</i>	<i>120</i>
<i>M (Moderat)</i>	<i>36</i>

citat slut

De i dette projekt gennemførte målinger synes at bekræfte den overordnede fastsatte minimumstid i AAB i aggressiv miljøklasse, hvor 120 modenhedstimer svarer til, at efterbehandlingen skal være så lang, at der opnås en reaktionsgrad på 85-90% baseret på måling af den adiabatisk varmeudvikling.

En reaktionsgrad på 85-90% svarer typisk til, at varigheden af beskyttelsesperioden vil være 90-120 modenhedstimer, afhængigt af betontypen. Et krav om en varighed af udtørningsbeskyttelsen på 180 modenhedstimer i Ekstra aggressiv miljøklasse må betegnes som en konservativ værdi, også når der ikke er kendskab til den aktuelle betons varmeudvikling.

I nogle specifikationer ses der endog krav til varigheden af beskyttelsen på helt op til 10 modenhedsdøgn. Resultaterne i dette projekt bør føre til, at kravet i aggressiv miljøklasse bevares på 120 modenhedstimer eller evt. nedsættes til 96 modenhedstimer og i ekstra aggressiv miljøklasse sættes ned til 120 modenhedstimer.

Da kun få af de gennemførte forsøg har omfattet beskyttelse i den tidlige fase med plast, vintermåtter eller forseglingsmiddel på den friske beton, er der ikke tilstrækkeligt grundlag for at ændre praksis for disse beskyttelsesmetoder. Ændringer på dette felt vil kræve yderligere undersøgelser, der er koncentreret om beskyttelsen af betonoverfladen i den tidlige fase.

6. Anvisning

Til dette projekt er der udarbejdet en anvisning i efterbehandling af betonkonstruktioner. De krav, der er stillet til efterbehandling af beton, indgår i forslaget til DS 482 "Udførelse af betonkonstruktioner", revisionsudgave [marts, 1997].

Kravene består for det første i, hvor tidligt efterbehandlingen skal påbegyndes, og for det andet i varigheden af efterbehandlingen. Tidspunkt for påbegyndelse af efterbehandling er defineret enten som et krav til seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling eller som et krav til maksimal vandfordampning inden efterbehandlingen påbegyndes. Hvor længe der skal efterbehandles er defineret enten som et krav til varigheden af efterbehandlingen eller som et krav til en minimum opnået relativ hydratiseringsgrad udregnet ud fra betonens adiabatisk varmeudvikling.

Anvisningen indeholder eksempler på planlægning og dokumentation af efterbehandling.

7. Forslag til videre undersøgelser

Ved planlægningen af de 24 efterbehandlingsforsøg var det antaget, at betonens hydratiseringsgrad ville variere meget, således at ville være muligt, at eftervise hvilken minimum hydratiseringsgrad, der er nødvendig for at sikre en tilstrækkelig god kvalitet af dæklaget. Det har imidlertid vist sig, at 22 af de 24 efterbehandlingsforsøg giver en opnåelig hydratiseringsgrad på over 90 %. De to efterbehandlingsmetoder, der har en opnåelig hydratiseringsgrad på cirka 73 %, er betonoverflader, der ikke er efterbehandlet. Disse forhold gør, at det vil være interessant at udføre efterbehandlingsforsøg, der giver en opnåelig hydratiseringsgrad i området mellem 75 og 90 %.

Da hydratiseringsgraden er afhængig af både vandfordampningen inden efterbehandlingen påbegyndes og af varigheden af efterbehandlingen ville det være interessant at undersøge om en eventuel længere/kortere periode inden efterbehandlingen påbegyndes, kan ændre på kravene til varigheden af efterbehandlingen.

Ved efterbehandlingsforsøgene er den en opnåelig hydratiseringsgrad, der er defineret ved, at kapillarvandet er opbrugt. Ved yderligere vandtilførsel i form af regnvejlr vil betonoverfladerne kunne hydratisere yderligere, hvilket forventes at medføre en tættere overfladestruktur. Det vil derfor være interessant at undersøge nogle af de prøveemner, der er placeret udendørs.

Betonens hydratiseringsgrad er tæt forbundet med mængden af kapillarvand. Derfor vil det være interessant at undersøge, hvordan vandtransporten sker i betonen. Hvis vandet i betonen transporteres langsomt fra betonens indre til betonoverfladen, vil det kun være det yderste lag af betonoverfladen, der bliver påvirket af en mangelfuld efterbehandling. Hvis vandet i betonen til gengæld transporteres hurtigt fra betonens indre til betonoverfladen, vil det være hele betonkonstruktionen, der bliver påvirket af en mangelfuld efterbehandling. Herved forventes krav til tidligste tidspunkt for efterbehandling at kunne opstilles ud fra andre parametre end pulverindhold og maksimal vandfordampning.

Forsøg med at påsprøjte et forseglingsmiddel på betonoverfladen, inden betonen er afbundet, har vist, at det giver en tæt betonoverflade. Dette er overraskende, da producenter af forseglingsmiddel anbefaler, at forseglingsmiddel først bør påsprøjtes betonoverfladen, når betonen er afbundet. Det vil være interessant at undersøge, om dette gælder generelt, og hvilke krav der i givet fald skal stilles til forseglingsmidlet.

Forsøg med en formsat overflade i 24 modenhedstimer viser umiddelbart en tilstrækkelig efterbehandling. Det kunne være interessant at undersøge om dette generelt er tilstrækkeligt ved at afprøve forskellige betontyper.

8. Litteraturliste

Berrig, A. and Frederiksen, J.O.: "Måling af betonforseglingsmidlers virkningsgrad, Ny prøvningsmetode; TI-B 33" (in Danish, Determination of the efficiency of concrete curing compounds, New test method: TI-B 33). DTI report, November 1992.

Berrig, A., Haugaard, M. and Jensen, P.F.: "HETEK - Curing - State of the Art". Road Directorate report No. 37, Copenhagen 1996.

Riis, K. and Haugaard, M.: "HETEK - Curing - Phase 1: Laboratory Tests". Road Directorate report No. 73, Copenhagen 1997.

Nielsen, T. and Haugaard, M.: "HETEK - Curing - Phase 2: Evaluation of Test Results". Road Directorate report No. 100, Copenhagen 1997.

Riis, K. and Haugaard, M.: "HETEK - Curing - Phase 3: Verification Tests". Road Directorate report No. 101, Copenhagen 1997.

Nielsen, T. and Haugaard, M.: "HETEK - Curing - Phase 4: Final evaluation and definition of Conformity Criteria". Road Directorate report No. 102, Copenhagen 1997.

Schaumann, J. and Haugaard, M.: "HETEK - Curing - Guideline". Road Directorate report No. 121, Copenhagen 1997.