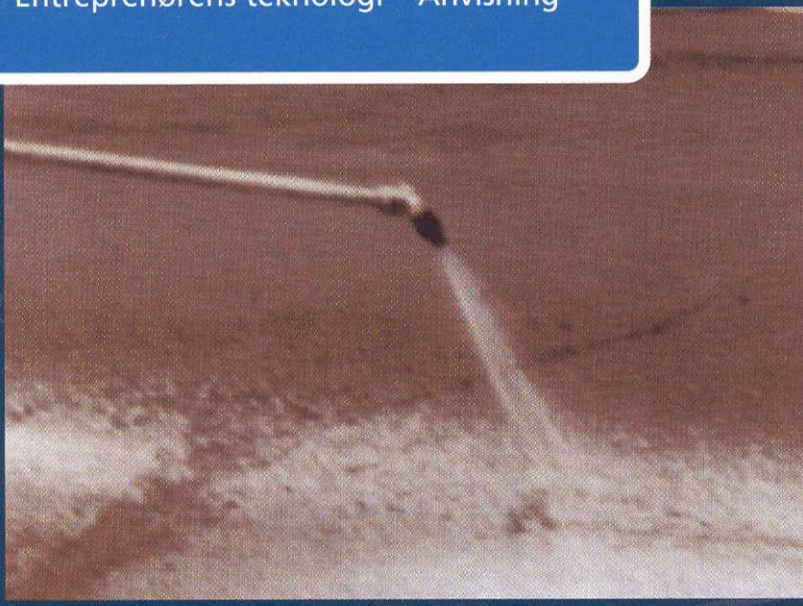
Efterbehandling

Højkvalitetsbeton
Entreprenørens teknologi – Anvisning



Rapport nr. 124
1997

Vejdirektoratet

IDDR Information

Title in English	High Performance Concrete - Contractors Technology, Curing · Guidelines
Title in Danish	Højkvalitetsbeton - Entreprenørens teknologi, Efterbehandling · Anvisning
Authors	Marlene Haugaard
Subject classification	Field 32 Concrete
Key words	Concrete 4755 Curing 3678 Evaporation 7183 Demand (Econ) 0169 Temperature 6722 Drying 5184 Denmark 8028

Abstract

This report presents the commonly used requirements on curing of concrete, and it may function as a manual on practical handling of curing problems. It also presents an example of handling curing problems in practice.

A main requirement on curing prescribes the amount of water allowed to evaporate before curing must be started. This amount depends on the concrete's content of mineral admixtures. This requirement can be met by a theoretical calculation or must start within a short period, specified as a number of hours after casting. Another main requirement concerns the length of the period before the curing can be stopped. This requirement depends on the environmental class and on the degree of hydration, which in turn can be evaluated from the maturity hours.

Various curing techniques have been mentioned. They include commonly used methods like keeping the concrete in mould, adding curing membranes or curing compounds, keeping the surface wet or controlling the climate. A few examples have been included to present the calculation of degree of reaction, maturity and the starting time and duration of curing.

UDK	624.012.4, 621.795, 693.548
ISSN	0909 4288
ISBN	87 7491 8419

INDHOLDSFORTEGNELSE

0. FORORD **3**

1. INDLEDNING **4**

2. TYPISKE KRAV TIL EFTERBEHANDLING **5**
2.1 Efterbehandlingstidspunkt 5
2.1.1 Beregning af efterbehandlingstidspunkt 6
2.1.2 Krav til efterbehandlingstidspunkt 9
2.2 Efterbehandlingsperiode 10
2.2.1 Beregning af efterbehandlingsperiode 11
2.2.2 Krav til efterbehandlingsperiode 12
2.3 Efterbehandlingens effektivitet 13

3. TYPISKE KLIMADATA FOR DANMARK **16**

4. PLANLÆGNING **19**
4.1 Eksempel på planlægning 20

5. DOKUMENTATION **25**

6. REFERENCER **26**

0. FORORD

Erhvervsministeriet - Udviklingskontraktudvalget har medfinansieret det af Vejdirektoratet initierede betonteknologiske forskningsprojekt HETEK - Højkvalitetsbeton, Entreprenørens Teknologi. Højkvalitetsbeton er i HETEK-projektet defineret som en beton i en konstruktion placeret i aggressivt miljø med mindst 100 års levetid.

Projektet blev opdelt i 8 delopgaver, som hver for sig repræsenterede et selvstændigt emne med betydning for betonens kvalitet og levetid:

- Chloridindtrængning
- Prøvning af frostbestandighed
- Selvudtørring
- Hærdeteknologi
- Udstøbning og bearbejdning (komprimering)
- Efterbehandling
- Vejledning i forprøvning af beton
- Reparationer i udførelsesfasen.

De 8 delopgaver er blevet løst af forskellige konsortier og firmaer, som er specialister indenfor hver deres delemne. Under jævnlige møder mellem alle opgaveløsere er løsningen af de enkelte delopgaver blevet koordineret og informationer udvekslet. Denne model for løsning af HETEK-projektet har i høj grad medvirket til at forny og intensivere samarbejdet mellem universiteter, institutter, betonlaboratorier, rådgivere og entreprenører.

HETEK-projektet er blevet gennemført i perioden november 1995 til marts 1997 med Vejdirektoratet som projektleder.

Resultatet af projektarbejdet er rapporteret i en samling rapporter, som er blevet udgivet af Vejdirektoratet. Essensen af rapporterne er endvidere blevet trykt i nogle kortfattede og præcise anvisninger, der ligeledes er blevet udgivet af Vejdirektoratet.

Nærværende anvisning er baseret på arbejdet udført i HETEK-delopgaven vedrørende efterbehandling. For yderligere information henvises til referencelisten.

Vejdirektoratet
Maj 1997

1. INDLEDNING

Umiddelbart efter udstøbning af en betonkonstruktion vil der under normale forhold fordampe vand fra betonens frie overflader.

Hvis der fordamper meget vand fra den friske beton, vil der være risiko for, at der opstår revner i betonoverfladen. Disse revner kaldes plastiske svindrevner. Da revner har betydning for holdbarheden, er det vigtigt så tidligt som muligt at beskytte betonens frie overflader mod stærk fordampning.

Beton udvikler tæthed og styrke, når cement reagerer med vand. Hvis der fordamper for meget vand fra betonen, vil reaktionen mellem cement og vand ikke forløbe som planlagt, og det kan betyde, at betonen bliver mindre tæt og dermed mindre holdbar. Det er derfor også nødvendigt at beskytte alle betonens flader tilstrækkeligt længe.

Fordampningen af vand og betonens følsomhed for fordampning afhænger især af temperaturforholdene mellem beton og luft, men også af de klimatiske forhold som vindhastighed og relativ fugtighed. Desuden har betonens sammensætning betydning, valg af cementtype, men især indhold af flyveaske og mikrosilica samt v/c-forhold.

2. TYPISKE KRAV TIL EFTERBEHANDLING

Krav til efterbehandlingen af betonen er normalt formuleret som en kombination af tre krav:

- efterbehandlingstidspunkt
- efterbehandlingsperiode
- efterbehandlingens effektivitet

Kravene til efterbehandlingstidspunkt og -periode stilles med udgangspunkt i betonens modenhed og v/c-forhold.

Modenhed Betonens modenhed defineres som ækvivalent hærdning ved 20°C.

v/c-forhold Betonens v/c-forhold defineres som vandindholdet divideret med det ækvivalente cementindhold, som er lig med cementindholdet + flyveaskeindholdet gange en aktivitetsfaktor (typisk 0.5) + mikrosilicaindholdet gange en aktivitetsfaktor (typisk 2.0).

De krav, som er refereret i de efterfølgende afsnit, er gengivet fra udkast til DS 482, Udførelse af betonkonstruktioner, som forventes publiceret i 1997.

2.1 Efterbehandlingstidspunkt

Efterbehandlingstidspunkt er det seneste tidspunkt efter betonens udstøbning, hvorefter betonen skal være beskyttet mod udtørring.

Kravet til efterbehandlingstidspunkt afhænger normalt af betonens indhold af flyveaske (FA), mikrosilica (MS) og v/c-forholdet.

Kravet til efterbehandlingstidspunkt er som udgangspunkt normalt formuleret som et krav til maksimalt fordampet vandmængde, som derefter skal omsættes til modenhed.

Såfremt entreprenøren ikke ønsker at regne sig frem til efterbehandlingstidspunktet, er der angivet konservative krav til efterbehandlingstidspunktet.

I praksis har især temperatur- og klimaforholdene betydning for entreprenørers valg af fremgangsmåde til opfyldelse af kravet.

2.1.1 Beregning af efterbehandlingstidspunkt

Typiske krav til, hvor stor en vandmængde der maksimalt må fordampe, inden betonen skal beskyttes mod udtørring, fremgår af tabel I.

Ved hjælp af figur 1 kan det beregnes, til hvilket tidspunkt den maksimalt tilladte vandmængde er fordampet. Figur 1 gælder kun for fordampning fra våd overflade, dvs. indtil ca. 10-20 modenhedstimer.

Eksempel 1.

Et eksempel på beregning er vist i figur 1. Betonens temperatur er målt til 27°C og den relative fugtighed på betonens overflade sættes til 100% våd overflade (pkt. A). Luftens temperatur er 25°C og den relative fugtighed er målt til 70% (pkt. B). Ud for pkt. A aflæses partialtryk af vanddamp til 3,6 kPa og ud for pkt. B aflæses partialtryk af vanddamp til 2,2 kPa. Forskellen i damptryk, også kaldet damptrykspotential ΔP, er 3,6 - 2,2 = 1,4 kPa.

Med et damptrykspotential på 1,4 kPa og en skønnet vindhastighed på 2 m/s (pkt. C) aflæses fordampningshastigheden $\dot{w}$ til knap 0,4 $kg/m^2 \cdot h$.

Fra betonblanketten vides, at betonen indeholder 5% mikrosilica og 12% flyveaske og har et v/c-forhold på 0,42, så må der ud fra tabel I maksimalt fordampe 1,5 kg vand pr. m^2 inden efterbehandlingen skal etableres.

Når fordampningshastigheden er 0,4 $kg/m^2 \cdot h$, skal efterbehandlingen altså etableres inden

$$1{,}5\ kg/m^2 \,/\, 0{,}4\ kg/m^2 \cdot h = 3{,}75\ \text{time}$$

Konklusion: Seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling er 3 timer og 45 minutter efter udstøbning.

Krav til vandfor-dampning

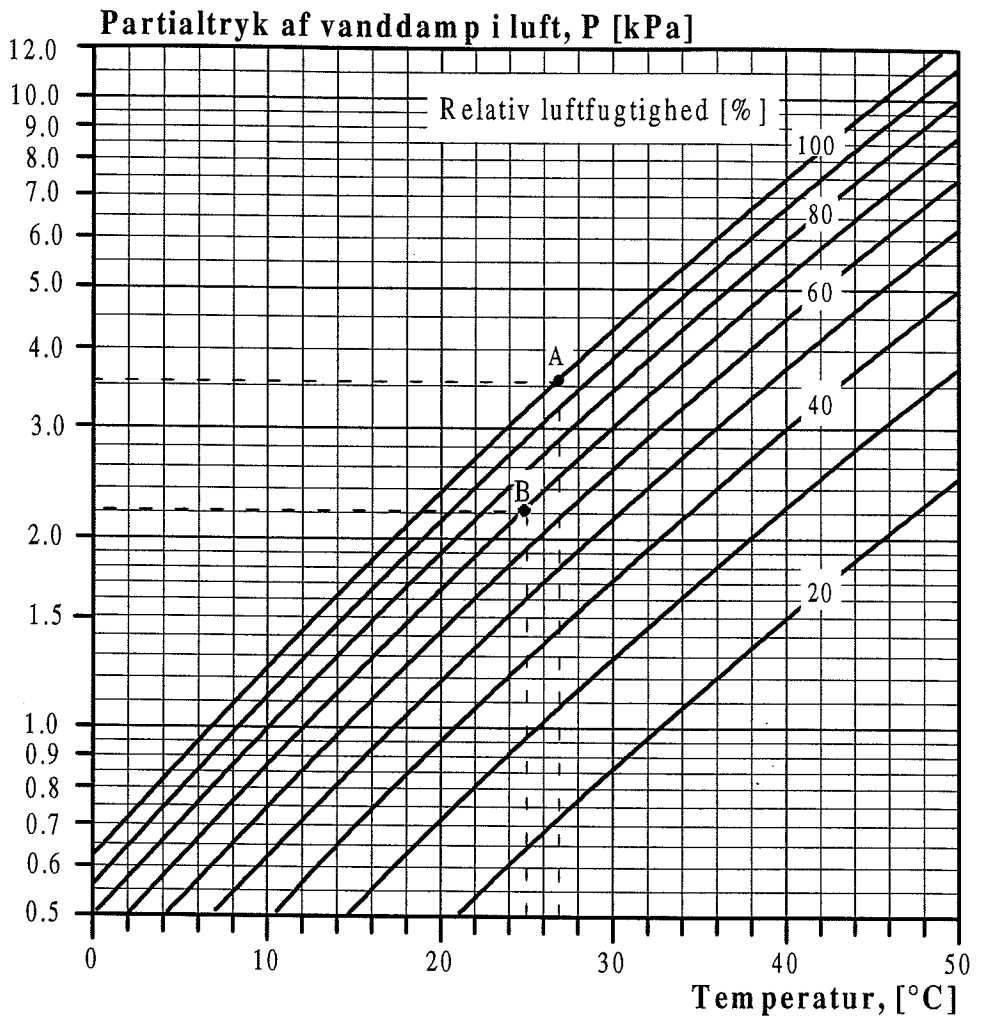
Flyveaske + Mikrosilica, maksimal vægt-% af bindemiddel	Mikrosilica, maksimal vægt-% af bindemiddel	Maksimalt fordampet vandmængde før efterbehandling kg/m^2
35	10	1,5
15	5	3,0
5	0	6,0

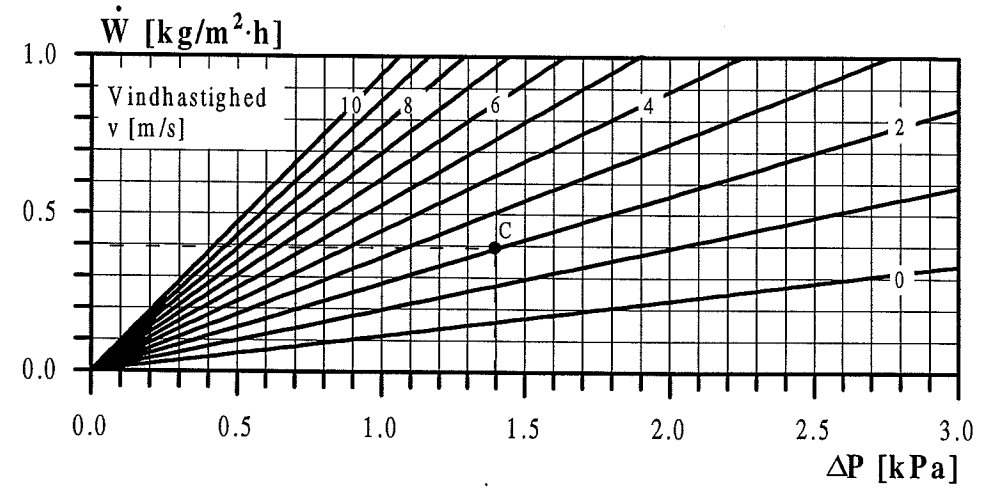
Tabel I. Typiske krav til maksimal vandfordampning før etablering af udtørringsbeskyttelse. (DS 482)

Hvis betonen er varmere end luften, vil der kunne ske fordampning også ved relative fugtigheder på 100% (tåge).

Hvis betonen er koldere end luften, vil der kunne ske kondensation på betonoverfladen, som altså får tilført fugt, men også samtidig varme, således at betontemperaturen stiger.

Ved at arbejde med figur I vil man opdage, at det ofte er i situationer, hvor betonen er varmere end luften, f.eks. ved vinterstøbning, hvor der er vanskeligheder med opfyldelse af kravene. Desuden kan tørre og blæsende sommerstøbninger skabe betydelige vanskeligheder, lige som solindfald kan skabe problemer.





Fordampningshastigheden $\dot{w}$, som funktion af vindhastighed v og damptrykspotential ΔP, er beregnet af udtrykket:

$$\dot{w} = (0.113 + 0.083 \cdot v) \cdot \Delta P \quad [kg/m^2 \cdot h]$$

Forudsætning: Våd overflade ~ indtil 10 - 20 modenhedstimer.

Figur 1. Nomogram til beregning af fordampningshastighed af vand fra nyudstøbt beton

2.1.2 Krav til efterbehandlingstidspunkt

Såfremt man ikke ønsker at beregne seneste tidspunkt for efterbehandling, er der i tabel II opstillet krav til seneste tidspunkt for etablering af udtørringsbeskyttelse for betonkonstruktioner ved indendørs- og udendørsarbejder.

Krav til tidspunkt

De i tabel II anførte efterbehandlingstidspunkter er på den sikre side i forhold til kravene i tabel I og beregningsmetoden i figur 1.

Flyveaske + Mikrosilica maksimal vægt-% af bindemiddel	**Mikrosilica maksimal vægt-% af bindemiddel**	**Udendørs-arbejder**	**Indendørsarbejder**		
			Betontemperatur		
			< 15°C	**15-30°C**	**≥ 30°C**
35	10	1 time	2 timer	1,5 timer	1 time
15	5	2 timer	4 timer	3 timer	2 timer
5	0	4 timer	8 timer	6 timer	4 timer

Tabel II. Krav til seneste tidspunkt før etablering af udtørringsbeskyttelse ved indendørs- og udendørsarbejder (DS 482)

2.2 Efterbehandlingsperiode

Efterbehandlingsperioden er det tidligste tidspunkt efter betonens udstøbning, hvor betonen ikke længere behøver at være beskyttet mod udtørring. Efterbehandlingsperioden gælder også, selv om konstruktionen afformes, inden perioden er slut. Entreprenøren skal da beskytte de afformede overflader.

Kravet til efterbehandlingsperioden afhænger af betonens v/c-forhold og hvilken miljøklasse, konstruktionen udføres i.

Krav til reaktionsgrad

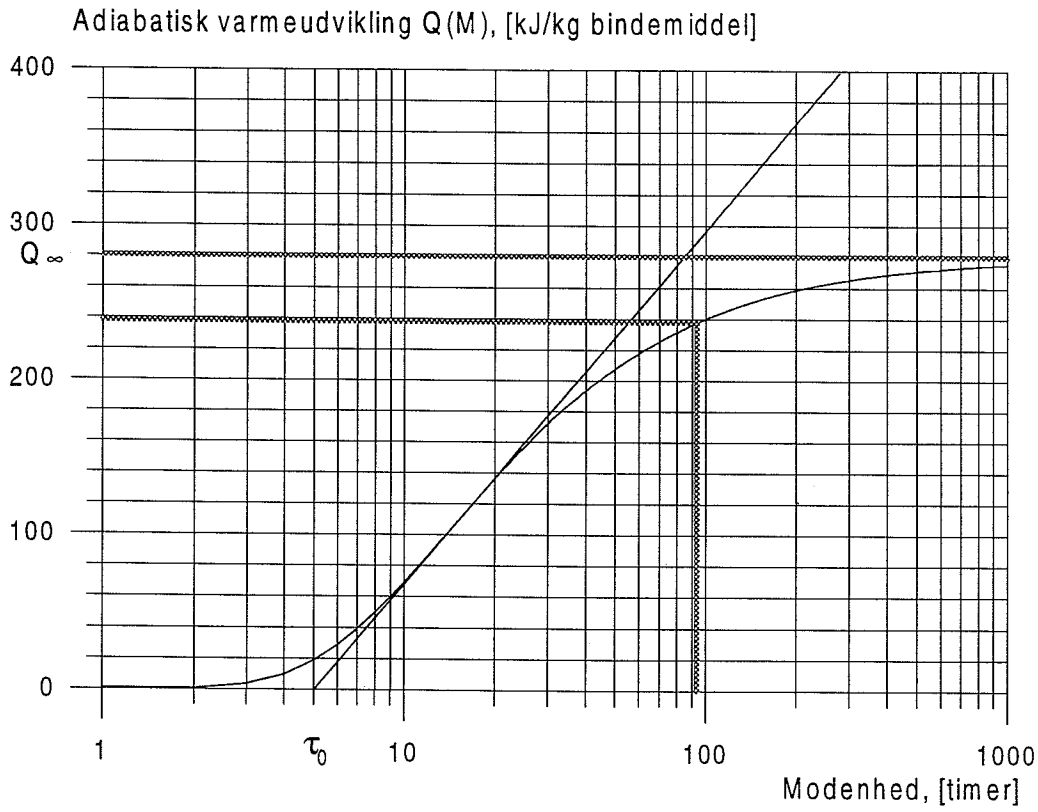
Kravet til efterbehandlingsperioden er som udgangspunkt normalt formuleret som et krav til en reaktionsgrad, som derefter skal omsættes til en modenhed. Typiske krav til betonens reaktionsgrad fremgår af tabel IV og er defineret som den aktuelt opnåede adiabatiske varmeudvikling delt med den totalt opnåelige varmeudvikling.

Miljøklasse	**Passiv**	**Moderat**	**Aggressiv**	**Ekstra aggressiv**
Reaktionsgrad R, %	40	60	85	90

Tabel IV. Typiske krav til mindste reaktionssgrad svarende til efterbehandlingsperiode (DS 482).

Eksempel 2

Et eksempel på adiabatisk varmeudvikling i afhængighed af modenhed vist ved den S-formede kurve



2.2.1 Beregning af efterbehandlingsperiode

Efterbehandlingsperiode kan beregnes på baggrund af den adiabatiske varmeudvikling for den aktuelt anvendte beton. Et eksempel på adiabatisk varmeudvikling er vist i eksempel 2.

Eksempel 3.

Hvis konstruktionen skal udføres i aggressiv miljøklasse, skal reaktionsgraden R være min. 85%, inden udtørringsbeskyttelsen må fjernes, jvf. tabel IV. Den aktuelle betons varmeudvikling fremgår af eksempel 2. Ved en reaktionsgrad på 85% er

$$Q = Q_\infty \cdot R = \frac{Q_\infty \cdot 85}{100} = \frac{280 \cdot 85}{100} = 238$$

På kurven aflæses modenheden til 93 timer. Hvis betonens v/c-forhold er 0,38, kan det tidligste tidspunkt for fjernelse af efterbehandlingen reduceres fra de i tabel V krævede 96 timer til de beregnede 93 timer, hvor betonens målte varmeudvikling Q_∞ ganges med den krævede mindste reaktionsgrad. På denne måde er det tidligste tidspunkt for fjernelse af efterbehandlingen beregnet.

2.2.2 Krav til efterbehandlingsperiode

Krav til efterbehandling

Såfremt man ikke ønsker at beregne efterbehandlingsperioden, er der i tabel V opstillet krav til tidligste tidspunkt for fjernelse af udtørringsbeskyttelse. De i tabel V anførte efterbehandlingsperioder er på den sikre side i forhold til kravene i tabel IV for normale betoner. For betoner med forsinket eller retarderet afbinding og styrkeudvikling skal efterbehandlingsperioden beregnes.

Miljøklasse	Betonens alder målt i modenhedstimer ved tidligste fjernelse af udtørringsbeskyttelse			
	Passiv	Moderat	Aggressiv	Ekstra aggressiv
v/c > 0,55	15	-	-	-
0,55 ≥ v/c > 0,45	15	36	-	-
0,45 ≥ v/c > 0,40	12	24	120	-
0,40 ≥ v/c	12	24	96	120

Tabel V. Tidligste tidspunkt for fjernelse af udtørringsbeskyttelse

2.3 Efterbehandlingens effektivitet

Efterbehandlingen skal være så effektiv, at fordampningen fra betonen i perioden fra efterbehandlingstidspunkt til efterbehandlingsperiodens ophør er væsentligt reduceret i forhold til ingen efterbehandling.

Typisk accepteres efterbehandlingsmetoder, der har en effektivitet på 75%, dvs. tilbageholder 3/4 af den vandmængde, der ellers ville være fordampet.

Efterbehandlingsmetoder

Følgende efterbehandlingsmetoder anses for at have en effektivitet på mindst 75%:

- forseglingsmidler, som har en effektivitet på mindst 75% bestemt i henhold til TI-B 33
- damptætte membraner, som fastholdes mod betonens overflade (plastfolie, presenning, mineraluldsmåtte, polystyrenplast)
- form (lakeret træ/finer, stål, ru støbebrædder, forme med formdug)
- fugtigholdelse (sprinkling af overflade, vandfilm på overflade, udlægning af våde sække)
- klimastyring, hvor RF $\geq$ 90%, V $\leq$ 2 m/s og betonens temperatur er mindre end eller lig med luftens temperatur.

I tabel VI er givet en oversigt over fordele og ulemper ved anvendelse af forskellige efterbehandlingsmetoder.

Materiale/Metode	Fordele	Ulemper
Plastfolie Presenning Mineraluldsmåtter Polystyrencelleplast	• Fleksible metoder, bedst på vandrette flader. Presenning er også god på lodrette flader • Kan bruges på både hærdnende og hærdnede betonoverflader • Efterfølgende overfladebehandling uden gener • Arbejdsmiljø venlig	• Risiko for aftryk i frisk beton. Større risiko herfor ved brug af presenning i forhold til plastfolie. Mineraluldsmåtter kan ikke anvendes på frisk beton. Polystyrencelleplast er vanskelig at anvende her • Uegnet på konstruktions undersider. Plastfolie er mindst egnet på lodrette afformede flader • Giver kondensskjolder • Risiko for vindtunneler
Presenning Mineraluldsmåtter Polystyrencelleplast	• Let at håndtere • Stort genbrug • Stor holdbarhed, lavt vedligehold	

Materiale/Metode	Fordele	Ulemper
Mineraluldsmåtter Polystyrencelleplast		• Der skal som regel etableres anden beskyttelse ved støbestart
Plastfolie	• Vedligehold begrænset (kassation)	• Begrænset holdbarhed og genanvendelse
Forme af lakeret træ/finér eller stål og forme med ru støbebrædder samt forme med formdug	• Efterfølgende overfladebehandling uden gener • Arbejdsmiljø venlig	• Der skal som regel etableres anden beskyttelse for at opfylde krav til lang beskyttelsesperiode • Ved lang formtid kan form gro fast • Særlige forholdsregler ved støbeskel
Forme af lakeret træ/finér eller stål og forme med ru støbebrædder	• Effektive metoder	
Forme med ru støbebrædder		• Sårbar med hensyn til udtørring af form
Forme med formdug	• Forbedret overflade kvalitet/æstetik	• Vanskelig montage • Lav genanvendelse • Øgede omkostninger
Forseglingsmiddel Fugtigholdelse	• Let at gennemføre • Anvendes som supplerende beskyttelse efter afformning • Arbejdsmiljø venlig • Økonomiske metoder	
Forseglingsmiddel		• Gener ved efterfølgende overfladebehandling • Særlige forholdsregler ved støbeskel
Fugtigholdelse	• Giver en god hydratisering af betonoverfladen • Ingen gener ved efterfølgende overfladebehandling • God ved støbeskel	• Stiller skærpede krav til overvågning • Risiko for plastiske svindrevner pga. sen iværksættelse • Risiko for termorevner • Risiko for misfarvninger • Risiko for frysning • Risiko for udvaskning

Materiale/Metode	Fordele	Ulemper
Klimastyring	• Indendørs let at gennemføre • Ensartet hærdning • Ingen gener ved efterfølgende efterbe-handling • Økonomisk ved udendørs	• Stiller krav til styring • Specielt indrettede produktionsområder • Mindre arbejdsmiljø venlig
Tilsætningsmidler (polymerer)	• Let at udføre • Ensartet hærdning • Arbejdsmiljø venlig	• Metoden er ikke gennemprøvet på beton • Måske gener for efterfølgende overfladebehandling • Uøkonomisk
Fibre	• Let at udføre • Arbejdsmiljø venlig	• Usikkerhed med hensyn til nødvendig mængde og type for at reducere svindrevner • Usikkerhed med hensyn til luft-porestruktur • Mindre økonomisk betydning

Tabel VI. Fordele og ulemper ved metode til efterbehandling

3. TYPISKE KLIMADATA FOR DANMARK

Planlægningen af udførelsen af efterbehandlingen skal foretages ud fra de forventede klimaforhold og mulige variationer i klimaforholdene. Til brug herfor er i tabel VII angivet typiske vejrdata for Danmark og i tabel VIII en definition på vindhastigheder.

Element-støbning

Ved elementstøbning i haller, hvor der ikke forekommer træk, kan vindhastigheden ved elementets frie flader antages at være 2 m/s på grund af konvektion.

Temperatur hele landet [°C]												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Absolut maksimum (1874-1994)	12,0	15,8	22,2	28,6	32,8	35,5	35,3	36,4	32,3	24,1	18,5	14,5
Måneds maks. (normal 1931-1960)	6,8	6,7	10,7	16,5	23,6	26,0	26,9	24,8	21,5	16,4	10,9	8,2
Døgn middel maks. (1961-1990)	2,0	2,2	4,9	9,6	15,0	18,7	19,8	20,0	16,4	12,1	7,0	3,7
Døgn middel (1961-1990)	0,0	0,0	2,1	5,7	10,8	14,3	15,6	15,7	12,7	9,1	4,7	1,6
Døgn middel minimum (1961-1990)	-2,9	-2,8	-0,8	2,1	6,5	9,9	11,5	11,3	9,1	6,1	2,3	-0,7
Måneds min. (normal 1931-1960)	-9,9	-10,0	-7,2	-3,0	0,5	4,5	7,3	7,0	2,9	-1,4	-5,2	-8,3
Absolut minimum (1874-1994)	-31,2	-29,0	-27,0	-19,0	-8,0	-3,5	-0,9	-2,0	-5,6	-11,9	-21,3	-25,6
Relativ luftfugtighed hele landet [%]												
Døgn gennemsnit (1961-1990)	91	90	87	80	75	77	79	79	83	87	89	90
Klokken 8	91	90	89	84	77	77	81	85	89	91	92	91
Klokken 14	88	83	77	69	62	64	66	68	72	77	86	89
Klokken 21	91	90	89	86	81	83	85	89	90	91	91	92
Vindhastighed [m/s]												
Landstationer (1982-1995)	5	6	6	5	4	4	5	4	4	5	5	4
Kyststationer (1961-1990)	7	7	7	6	6	6	6	6	7	7	8	8

Tabel VII. Typiske vejrdata for Danmark. Udarbejdet på baggrund af data fra Danmarks Meteorologiske Institut

Vindstyrke	Vindhastighed [m/s]	Virkning
Stille	0 - 0,2	Røg stiger lige op.
Svag luftning	0,3 - 1,5	Røgens drift viser vindens retning.
Svag brise	1,6 - 3,3	Løv rasler, vimpler løftes og vinden kan mærkes.
Let vind	3,4 - 5,4	Blade og kviste i bevægelse, vimpler og flag løftes.
Jævn vind	5,5 - 7,9	Smågrene bevæger sig, papirstykker løftes.
Frisk vind	8,0 - 10,7	Små løvtræer svejer.
Kuling eller blæst	10,8 - 13,8	Store grene bevæges, telefontråde synger.
Stiv kuling	13,9 - 17,1	Større træer bevæger sig.
Hård kuling [1)]	17,2 - 20,2	Kviste og grene brækker af træer.
Storm [1)]	20,8 - 24,4	Træstammer svejer, store grene brækker af.
Stærk storm [1)]	24,5 - 28,4	Træer rives op, betydelige skader på huse.
Orkanagtig storm [1)]	28,5 - 32,6	Mange ødelæggelser, svært at gå.
Orkan [1)]	32,7 -	Voldsomme ødelæggelser.

1) støbning frarådes

Tabel VIII. Oversigt over vindhastigheder

4. PLANLÆGNING

I det følgende gennemgås, hvilke overvejelser entreprenøren skal gøre sig med hensyn til efterbehandlingen.

Konstruktionsdele

1. Entreprenøren skal kende de enkelte konstruktionsdeles miljøklasse og hvilke krav, der er specificeret til de forskellige betontyper.

Beton

2. Entreprenøren skal hos betonleverandøren indhente betonblanket på de relevante betoner, som kan anvendes til den aktuelle konstruktion. Her skal entreprenøren sikre sig oplysning om betonens varmeudvikling og forventet temperatur ved levering.

Klima

3. Entreprenøren skal overveje, hvilke klimaforhold konstruktionen vil blive støbt under. Entreprenøren skal overveje RF, lufttemperatur og vindhastighed samt mulige variationer i klimaforholdene, jvf. tabel VII og VIII.

Krav

4. Entreprenøren kan nu med de ovenstående oplysninger aflæse kravene til efterbehandlingen i projektspecifikationerne eller eventuelt hente krav i tabel I, II eller III, IV og V.

Udførelsesmetoder

5. Entreprenøren skal i sin egen organisation indhente oplysninger om valg af formtype og afforskallingstidspunkt. Entreprenøren skal overveje valg af efterbehandlingsmetode for frie overflader og valg af efterbehandlingsmetode på afformede overflader, såfremt det er nødvendigt at efterbehandle disse. Fordele og ulemper ved forskellige efterbehandlingsmetoder findes i tabel VI. Hvis der vælges forseglingsmidler, skal entreprenøren indhente dokumentation for 75% effektivitet - jvf. TI-B 33 - hos leverandøren.

Vurdering

6. Entreprenøren skal med den aktuelle betontype, de valgte efterbehandlingsmetoder og under de forventede klimaforhold vurdere, hvordan de stillede krav opfyldes, dvs. tidspunkt for hvornår der senest skal etableres tildækning af frie overflader, og hvornår tildækningen tidligst kan fjernes.

Valg af metode

7. På baggrund af de gennemregnede forhold vælges en udførelsesme tode, og mulige ændringer i efterbehandlingsmetoder forberedes, således at de kan iværksættes, hvis det forudsatte klima eller andre kritiske forhold - f.eks. betontemperaturen - ændres.

4.1 Eksempel på planlægning

Der skal støbes et brodæk i henhold til Vejdirektoratets AAB.

Konstruktionsdele

1. Brodækket er i aggressiv miljøklasse. Kravene til betonen er et maks. v/c-forhold på 0,45, et minimums cementindhold på 275 kg, lavalkalicement og et maksimalt indhold af flyveaske på 20% af pulvermængden, et maksimalt indhold af mikrosilica på 6% af pulvermængden og et maksimalt indhold af flyveaske og mikrosilica på 25% af pulverindholdet.

Beton

2. Der er mulighed for at anvende tre betontyper, som opfylder kravene. Dokumentationen fremgår af betonblanketterne. Af tabel IX fremgår betonens indhold af flyveaske, mikrosilica, bindemiddelindhold og varmeudvikling.

Betontype	**Flyveaske + Mikrosilica (vægt-% af bindemiddel)**	**Mikrosilica (vægt-% af binde-middel)**	**Bindemiddelindhold (kg/m³)**	**Q (kJ/pr. kg bindemiddel**	**τ_e (timer)**	**α**
A	20,2	3,4	357	280	14,2	0,96
B	10	0	341	267	15,8	1,01
C	0	0	400	388	9,9	0,88

Tabel IX. Betontype A, B og C's indhold af flyveaske, mikrosilica, bindemiddel og varmeudvikling

Klima

3. Støbningen skal foregå i februar måned. Der støbes udendørs i åbent terræn. Klimaforhold aflæses i tabel VI.

Vindhastighed = 6 - 7 m/s
Temperatur = ÷ 2,8 - 2,2 °C
Relativ fugtighed = 83 - 90%

Fra betonproducenten er oplyst, at betonens temperatur ved levering er ca. 10°C i februar måned.

Krav

4. Entreprenøren finder kravene til efterbehandlingen i tabel I, III, IV og V.

Af tabel X fremgår krav til seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling og krav til tidligste tidspunkt for fjernelse af efterbehandling. Kravene afhænger af betontypen.

Betontype	**v/c-forhold**	**Maksimalt fordampet vand [kg/m²]**	**Maksimal modenhed før efter-behandling [mh]**	**Minimum reaktions grad før fjernelse**	**Minimum alder før fjernelse [mh]**
A	0.41	1.5	1	85	120
B	0,42	3,0	2	85	120
C	0,43	6,0	4	85	120

Tabel X. Krav til etablering af efterbehandling og fjernelse af efterbehandling.

Udførelsesmetode

5. Entreprenøren vil anvende en stålform. Forskallingen fjernes efter 1 døgn og den efterfølgende efterbehandling sker ved hjælp af vintermåtter. På den frie overflade efterbehandles med vintermåtter, som tidligst kan pålægges 4 timer efter endt støbning af hensyn til glitning af overflade. Selve støbningen forventes at tage 2 timer.

Vurdering seneste tidspunkt for etablering

6. Med den valgte udstøbningstemperatur vil betonens modenhed være ca. 3 timer, når der kan tildækkes på de frie overflader med vintermåtter. Dvs. med betontype A og B kan kravet til maksimal modenhed på 1 time - respektiv 2 timer - før etablering af efterbehandling ikke overholdes. Det er således nødvendigt at etablere en midlertidig beskyttelse, f.eks. med plastfolie inden den endelige tildækning foretages. Med betontype C kan kravet til maksimal modenhed på 4 timer overholdes uden midlertidig tildækning.

Beregning af af seneste tidspunkt for etablering

Alternativt kan fordampningen under de givne forhold vurderes i henhold til figur 1. Vurderingen foretages for en middel vejrsituation, hvor luftens temperatur er 0 °C. Der støbes om morgenen, så den relative luftfugtighed er 90%. Der støbes inde i landet, så vindhastigheden sættes til 6 m/s. Alle vejrdata fremgår af tabel VII. Betonens temperatur er 10 °C og har en relativ fugtighed på 100%.

Af figur 1 aflæses partialtryk P af vanddamp i beton og luft til følgende:

P_{beton} = 1,25 kPa
P_{luft} = 0,55 kPa

Damptrykspotentialet:
$\Delta P = P_{beton} - P_{luft} = (1,25 - 0,55)$ kPa = 0,7 kPa.

Fordampningshastigheden $\dot{w}$ aflæses for vindhastigheden v = 6 m/s af figur 1 til 0,45 kg/m^2 · h.

For betontype A, hvor den maksimalt tilladte fordampning af vand er 1,5 kg/m2 jvf. tabel X, kan tiden, fra udstøbning til efterbehandlingen skal være etableret, beregnes:

$$\text{tid} = \frac{1,5 \text{ kg/m}^2}{0,45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{t}} = 3,3 \text{ timer}$$

Det vil sige, at efterbehandlingen skal være etableret senest 3 timer og 20 minutter efter udstøbning. For betontype B og C beregnes tidspunkterne til 6 timer og 40 minutter, respektiv 13 timer og 20 minutter. Der gøres opmærksom på, at efterbehandlingen altid skal være etableret senest 1 time efter betonens afbinding.

Afbindings-tid

Betonens afbindingstidspunkt er 5,5, 4,0 og 5,0 timer for henholds vis betontype A, B og C. Med den aktuelle betontemperatur på 10°C, som svarer til en hærdehastighed på 0.5, fås, at afbindingstidspunktet i den aktuelle situation er 11, 8 og 10 timer for henholdsvis betontype A, B respektiv C.

Betontype	Seneste tidspunkt
A	3 timer og 20 minutter
B	6 timer og 40 minutter
C	10 timer

Tabel XI. Seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling med vindhastigheden 6 m/s.

Variationer i klima

Entreprenøren skal udover middelvejrsituationen vurdere variationer i klimaforholdene. I det følgende er en enkelt variationsmulighed gennemgået

Beregning af seneste tidspunkt for etablering

Hvis det er stiv kuling og vindhastigheden øges til 15 m/s og alle øvrige forhold holdes konstant, så er damptryksforskellen fortsat 0,7 kPa. Fordampningshastigheden $\dot{w}$ beregnes til

$$\dot{w} = (0{,}113 + 0{,}083 \cdot v) \cdot \Delta P = (0{,}113 + 0{,}083 \cdot 15) \cdot 0{,}7$$
$$= 0{,}95 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{t}$$

For eksempel vil det betyde for betontype A, hvor der maksimalt må fordampe 1,5 kg vand/m², at efterbehandlingen skal være etableret senest

$$\frac{1{,}5 \text{ kg/m}^2}{0{,}95 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{t}} = 1{,}6 \text{ timer} = 1 \text{ time og } 35 \text{ minutter efter udstøbning}$$

På tilsvarende vis bør betontype B og C vurderes.

I planlægningsfasen bør den indflydelse variationer i betonens og luftens temperatur har på seneste tidspunkt for etablering af efterbehandlingen ligeledes vurderes.

Tidligste tidspunkt for fjernelse

Af tabel X fremgår, at tidligste tidspunkt for fjernelse af efterbehandlingen uanset betontype er 120 modenhedstimer. Alternativt kan tidspunktet vurderes ved en beregning af tidspunktet for opnåelse af betontypens adiabatiske varmeudvikling.

Beregning af tidligste tids-

Varmeudviklingsdata for betontype A, B og C fremgår af tabel IX. Som eksempel ses, at betontype A har Q_∞ =280 kJ/kg bindemiddel

punkt for fjernelse

Den modenhed, hvor betontypen har opnået en reaktionsgrad på

$$Q_{R = 85\%} = Q_{\infty} \cdot R = \frac{280 \cdot 85}{100} = 238 \text{ kJ}$$

85%, regnes herefter ud fra varmeudviklingsdata τ_e og α fra tabel IX eller aflæses på varmeudviklingskurven.

$$M = \frac{\tau_e}{(-\ln(R))^{1/\alpha}} = \frac{14{,}2 \text{ timer}}{(-\ln(0{,}85))^{1/0{,}96}} \approx 94 \text{ mh}$$

Det vil sige at efterbehandlingen tidligst må fjernes efter 94 mo denhedstimer.

På tilsvarende vis gennemføres beregningerne for betontype B og C. Resultatet fremgår af tabel XII.

Betontype	**Tidligste tidspunkt (mh)**
A	94
B	95
C	78

Tabel XII. Tidligste tidspunkt for fjernelse af efterbehandlingen

Valg af metode

7. På baggrund af de gennemførte beregninger nævnt under punkt 1 - 6, sammenholdt med de økonomiske overvejelser, vælger entreprenøren at anvende betontype B til brodækket, da denne betontype, selv ved kraftig blæst, tidligst skal tildækkes efter ca. 3 timer. Med hensyn til varigheden af efterbehandlingen skal der under alle omstændigheder tildækkes med vintermåtter efter afformning. Det er uden særlig økonomisk betydning at holde vintermåtter på i 3 eller 4 modenhedsdøgn.

5. DOKUMENTATION

Entreprenøren skal dokumentere den udførte efterbehandling.

Dokumentationen skal omfatte følgende:

Klima
- aktuel lufttemperatur, relativ fugtighed og vindhastighed for støbedagen noteres i dagbog. Oplysningerne indhentes fra den nærmeste DMI klimastation. Andre relevante klimaforhold, så som regn, sol, mv. noteres i dagbog.

Beton levering
- betonens temperatur ved levering og tidspunktet for levering noteres i dagbog.

Beton hærdning
- betonens temperatur, i perioden fra udstøbning til krævet minimum modenhed før fjernelse af efterbehandling er opnået, noteres i dagbog min. to gange daglig.

Efterbehandling, etablering
- tidspunktet for etablering af efterbehandling og type af efterbehandling noteres i dagbog. Hvis efterbehandlingen har været midlertidig noteres tidspunktet for midlertidig etablering og efterfølgende fjernelse samt tidspunkt for retablering.

Afformning
- tidspunkt for afformning noteres i dagbog.

Efterbehandling, etablering
- tidspunkt for etablering af eventuel efterbehandling efter afformning noteres i dagbog. Desuden noteres typen af efterbehandling.

Efterbehandling, fjernelse
- tidspunkt for fjernelse af efterbehandling noteres i dagbog.

Curing
- såfremt efterbehandlingen er curing, noteres den påsprøjtede mængde.

Beregning
- på baggrund af ovenstående foretages en beregning af, om kravene har været overholdt under de givne forhold.

6. REFERENCER

[1] Berrig, A. & Haugaard M. & Fogh Jensen, P.: "HETEK, Curing, State of the Art", Rapport No. 37, ISBN 87 7491 6912, ISSN 0909 - 4288, UDK 624.012.4 621.795 693.548, Vejdirektoratet, 1996.

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

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

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

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

[6] Riis, K. & Haugaard, M.: "HETEK - Curing - Main Report". Road Directorate report No. 104, Copenhagen 1997.

[7] "Anvisning i brug af højkvalitetsbeton til udsatte anlægskonstruktioner", Dansk Betoninstitut A/S, ISBN 87-89962-13-3, 1995.

[8] Freiesleben Hansen, P. & Pedersen, E. J.: "Vinterstøbning af beton", SBI-anvisning, Statens Byggeforskningsinstitut, 1982.

[9] Pedersen, E.S. et. al.: "HETEK - Styring af revner i ung beton - Anvisning", Vejdirektoratet, rapport nr. 119, 1997.