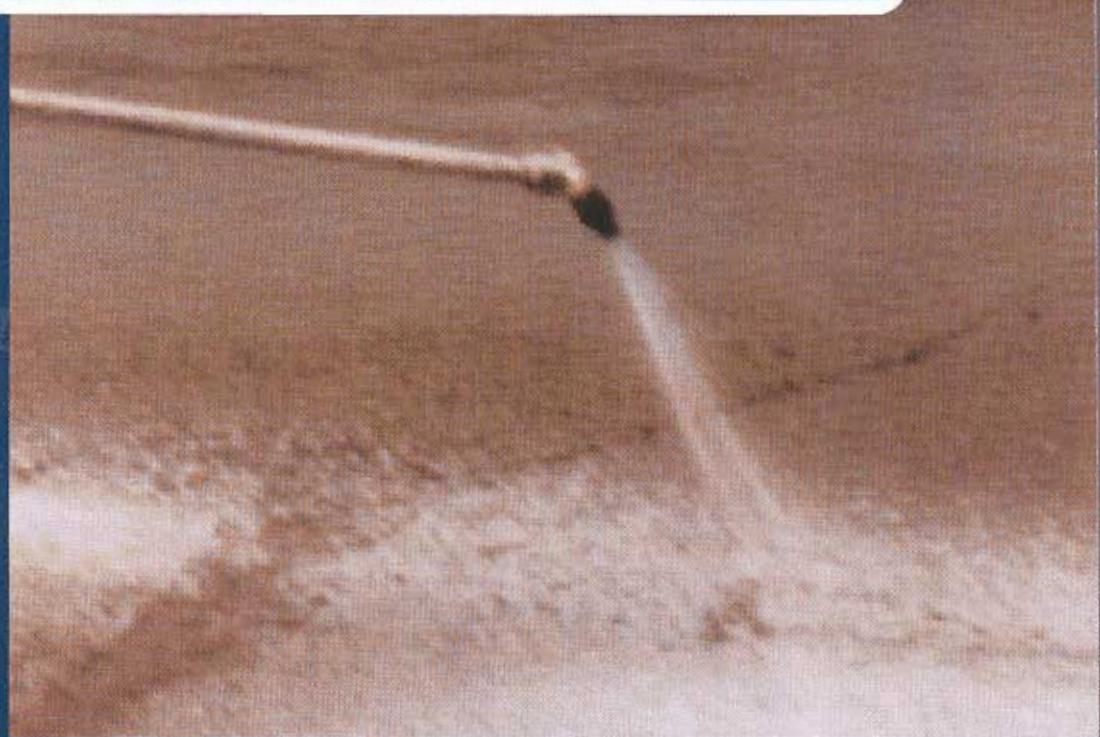




# HETEK

Efterbehandling  
Anvisning



Rapport nr. 103  
1997



Vejdirektoratet

# IDDR Information

Title in English      HETEK - Curing - Guidelines

Title in Danish      HETEK - Efterbehandling - Anvisning

Authors                Jette Schaumann, Marlene Haugaard and Per Fogh Jensen

Subject classification Field 32 Concrete

Key words	Concrete	4755
	Curing	3678
	Evaporation	7183
	Demand (Econ)	0169
	Shrinkage	4743
	Temperature	6722
	Drying	5184
	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 in which Part No. 6 concerns Curing. Part No. 6 includes State of the Art, Supplementary Research, Phases 1 to 4, Main Report and Guidelines.

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 a few examples 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 by reading diagrams based on the wind velocity, relative humidity and temperature of concrete and air. If the requirement is not met in one of these ways, the curing 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. Adding admixtures or fibres to the concrete is also mentioned as a possibility. A few examples have been included to present the calculation of degree of reaction, maturity and the starting time and duration of curing. A set of forms to facilitate the process of planning, inspection and documentation of the curing is given in appendices as well as examples of their use.

UDK                  624.012.4, 621.795, 693.548

ISSN                  0909 4288

ISBN                  87 7491 8133

# Indholdsfortegnelse

<b>0. Forord</b>	<b>1</b>
<b>1. Indledning</b>	<b>3</b>
1.1 Formål	4
1.2 Baggrund	4
<b>2. Krav til efterbehandling</b>	<b>6</b>
2.1 Efterbehandlingstidspunkt	6
2.2 Efterbehandlingsperiode	7
2.3 Efterbehandlingens effektivitet	8
2.4 Beton	8
2.4.1 Betons reaktionsgrad	9
2.4.2 Betons afbindingstid	11
2.5 Klimaforhold	12
<b>3. Efterbehandlingsmetoder</b>	<b>18</b>
3.1 Damptætte membraner	18
3.1.1 Plastfolie	18
3.1.2 Presenning	19
3.1.3 Mineraluldsmåtter	19
3.1.4 Måtter af polystyrencelleplast	20
3.2 Formen	21
3.2.1 Forme af lakeret træ/finér eller stål	21
3.2.2 Forme med ru støbebrædder	21
3.2.3 Forme med formdug	21
3.3 Forseglingsmidler	22
3.4 Fugtigholdelse	22
3.5 Klimastyring	23
3.6 Tilsætningsmidler	23
<b>4. Planlægning og inspektion</b>	<b>24</b>
4.1 Planlægning	25
4.1.1 Beton	25
4.1.2 Efterbehandlingsmetoder	25
4.1.3 Klimaforhold	25
4.1.4 Transmissionskoefficient	26
4.2 Inspektion	28
4.2.1 Seneste tidspunkt for efterbehandling	28
4.2.2 Varighed af efterbehandling	28

<b>5. Eksempler på planlægning</b>	<b>30</b>
5.1 Gulv støbt i august	30
5.1.1 Beton	30
5.1.2 Klimadata	31
5.1.3 Seneste tidspunkt for efterbehandling	32
5.1.4 Varighed af efterbehandling	36
5.1.5 Temperatur- og modenhedsberegnung	36
5.2 Væg støbt i oktober	38
5.2.1 Overordnede krav til betonen	38
5.2.2 Beton	39
5.2.3 Krav til varighed af efterbehandling	39
5.2.4 Efterbehandlingsmetoder	39
5.2.5 Klima og transmissionskoefficenter	39
5.2.6 Temperatur- og modenhedsberegnung	40
<b>Begreber</b>	<b>42</b>
<b>Symboler</b>	<b>44</b>
<b>Litteratur</b>	<b>47</b>
<b>Bilag:</b>	
1. Nomogrammer - Vandfordampning	48
2. Oversigt over efterbehandlingsmetoder	63
3. Blanketter til planlægning og inspektion	67
4. Hastighedsfaktor H til modenhedsberegnung	75
5. Eksempler	77
5.1 Gulv støbt i august	78
5.2 Væg støbt i oktober	84

# 0. Forord

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

Højkvalitetsbeton er beton med funktionsmæssig levetid på mindst 100 år i ekstra 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 inden for de følgende emner:

- Chloridmodstandsevne
- Frostbestandighed
- Styring 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 anvisningen er at sikre, at der ikke forekommer plastiske svindrevner i betonens overfladelag, og at en passende stor del af vandet forbliver i betonen, så udviklingen af betonens egenskaber forløber på den ønskede måde.

Anvisningen indeholder afsnit om planlægning, udførelse, inspektion og dokumentation af efterbehandlingen i praksis - og omhandler følgende:

- Krav til, hvor tidligt efterbehandlingen skal etableres
- Krav til varighed af efterbehandling
- Omtale og vurdering af efterbehandlingsmetoder
- Planlægning af efterbehandling
- Inspektion af efterbehandling
- Dokumentation af efterbehandling.

Kapitel 2 indeholder kravene til efterbehandling. Der er eksempler på beregning af reaktionsgrad, afbindingstid og fordampning under givne klimaforhold. Fordampningen kan alternativt aflæses af kurver i bilag 1.

I kapitel 3 beskrives og vurderes forskellige efterbehandlingsmetoder. I bilag 2 ses en oversigt herover.

Kapitel 4 omhandler planlægning og inspektion af efterbehandling. Blanketter til planlægning, inspektion og dokumentation fremgår af bilag 3.

I kapitel 5 ses to eksempler på planlægning af efterbehandling.

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

Hærdeteknologi er en overordnet beskrivelse af de kemiske og fysiske ændringer, der finder sted ved reaktion af portlandcement- og puzzolaner (for eksempel flyveaske og mikrosilica) i beton. Hærdningsforløbet kan styres med hensyn til både fugt og temperatur. Denne anvisning omhandler alene de fugtmæssige aspekter.

Beton er sårbar i den tidlige fase efter udstøbning. Efter udstøbning vil der typisk fordampe vand fra betonens frie overflader, hvilket kan give trækspændinger og dermed revner i overfladen. Såfremt fordampningen ikke styres på en hensigtsmæssig måde, er der risiko for plastiske svindrevner i betonoverfladen. Vandet i betonen har afgørende betydning for, om reaktioner mellem cement, puzzolan og vand og dermed udvikling af betonens egenskaber forløber som ønsket. Det er derfor vigtigt at styre vandfordampningen.

Der er i forslaget til DS 482 "Udførelse af betonkonstruktioner" (revisionsudgave, marts 1997) krav til, hvor tidligt efterbehandlingen skal være etableret, hvor formålet er at hindre plastiske svindrevner. Krav til efterbehandling afhænger af flyveaske- og mikrosiliciumindhold, da betonen har forskellig følsomhed over for vandfordampning og dermed risiko for plastiske svindrevner. Kravene til efterbehandling er omtalt nærmere i kapitel 2.1.

Forekomsten af plastiske svindrevner tiltager med øget udtørring af beton i den tidlige alder, hvor vandfordampningen primært afhænger af klimaet omkring betonen og af betonens temperatur. I kapitel 2.5 er det beskrevet, hvordan hastigheden af vandfordampningen kan beregnes med kendskab til omgivelsernes relative fugtighed, vindhastighed og luft- samt betontemperatur. Som alternativ hertil er der i bilag 1 vist nomogrammer, hvorfra tidspunktet for fordampning af en given vandmængde kan aflæses for typiske klimaforhold.

I forslaget til DS 482 er der også krav til, hvor længe betonen skal være beskyttet mod udtørring. Formålet hermed er at sikre tilstedeværelse af en passende stor del af vandet, således at dette kan tage del i betonens stofomsætning og dermed udvikling af egenskaber. Kravene til, hvor længe der skal efterbehandles fremgår af kapitel 2.2.

Ved planlægning og styring af betons fugtmæssige hærdningsforløb kan det være nødvendigt at kende betonens reaktionsgrad til et givet tidspunkt og afbindingstiden. Med kendskab til betonens varmeudvikling kan der fås et udtryk for både reaktionsgrad og afbindingstid, hvilket omtales nærmere i kapitel 2.4.

Udtørring som følge af fordampning forhindres mest effektivt ved at bindre vandrøren fra betonoverfladen eksempelvis ved at udskyde afformning eller tildække frie overflader med plastfolie, presenning, måtter af polystyrencelleplast eller lignende. Betonoverfladen kan også påsprøjtes et såkaldt forseglingsmiddel eller tilføres vand i den tidlige alder. Betonen kan også iblandes tilsætningsstoffer eller fibre, her er effektiviteten dog ikke altid veldokumenteret. Forskellige efterbehandlingsmetoder er beskrevet og vurderet i kapitel 3. Der er krav til effektiviteten af forseglingsmiddel, hvilket er omtalt i kapitel 2.3.

I bilag 2 ses en oversigt over de omtalte efterbehandlingsmetoder.

Formålet med planlægning af hærdningsforløb er at vurdere og vælge hele arbejdsgangen fra udstøbningstidspunktet og ind til, at den nødvendige periode for efterbehandling op-hører. I planlægningsfasen er der typisk mulighed for at vurdere forskellige betoner, forme og materialer til efterbehandling. For at finde den tekniske og økonomiske bedste løsning er det derfor nødvendigt at vurdere forskellige alternativer, hvilket kapitel 4 og 5 omhandler.

Ved planlægning af efterbehandlingen er det nødvendigt at kende modenhedsforløbet i betonens overflade. Modenheden kan vurderes ved hærdeteknisk EDB-simulering, hvor kapitel 5 indeholder eksempler herpå.

Inspektionen vedrører kontrollen og dokumentationen af efterbehandlingen, når betonen er blevet udstøbt. Inspektion omtales i kapitel 4.2.

I bilag 3 findes blanketter, der kan benyttes til planlægningen samt inspekitionsblanketter, som kan anvendes til dokumentation af, at krav til seneste tidspunkt for etablering af efterbehandlingen og varigheden heraf er overholdt.

Der stilles flere krav uddover til efterbehandling af beton i hærdningsperioden, for eksempel maksimale temperaturforskelle, relative spændinger, styrke ved afformning og frost-sikkerhed. Krav hertil skal, ud over kravene i denne anvisning, selvfølgelig også overholdes. Disse forhold er omtalt uddybende i [8] og [9].

## 1.1 Formål

Denne anvisning er primært et værktøj til entreprenører, så betoners fugtmæssige hærdningsforløb kan planlægges og styres på den bedst mulige måde. Anvisningen er søgt gjort operationel med skemaer, diagrammer og formeludtryk, hvor brugen af disse er illustreret med eksempler og vejledninger.

## 1.2 Baggrund

Anvisningen er skrevet på baggrund af følgende [1]-[6], som fremgår af litteraturfortegnelsen:

[1] HETEK, *Status for emnet*

Sammenfatning af relevant, eksisterende litteratur og tidligere udførte undersøgelser.

[2] HETEK, *Laboratorieforsøg, Fase 1*

Ved forsøg er betonoverfladen påvirket af en styret temperatur, relativ fugtighed og vindbelastning samtidig med, at den fordampede vandmængde er registreret kontinuerligt. Dette er opnået ved at placere betonprøveemnet på en vejecelle i en vindtunnel i et klimakammer.

Forsøgsopstillingen, som er udviklet af DTI, er anvendt til vurdering af forskellige efterbehandlingsmetoders indflydelse på dæklagets kvalitet. Principper for forsøgsopstillingen er beskrevet i DTI's prøvningsmetode TI-B 33 fra 1992: "Måling af betonforseglingsmidlers virkningsgrad".

Følgende er undersøgt:

- Efterbehandling af afrettede og formstøbte overflader
- Efterbehandling med plastfolie, forseglingsmiddel og vandpåsprøjtning
- Ikke-efterbehandlede overflader.

Kvaliteten af betonemnernes dæklag er karakteriseret på baggrund af følgende parametre:

- Mikrostruktur med hensyn til revneomfang, -størrelse og -orientering
- Betonens tæthed med hensyn til chloridindtrængning
- Betonens tæthed med hensyn til vandindtrængning
- Betonens tæthed med hensyn til karbonatisering.

*[3] HETEK, Evaluering af forsøgsresultater, Fase 2*

Forsøgsresultater opnået i HETEK, Fase 1 er evalueret med hensyn til at opstille modeller for betonens kapillaritet, permeabilitet og diffusivitet. Der er opstillet et teoretisk grundlag.

*[4] HETEK, Verifikationsforsøg, Fase 3*

Supplerende forsøg til verificering af den opstillede teori i fase 2.

*[5] HETEK, Afsluttende evaluering og definition af overensstemmende krav, Fase 4*

Slutevaluering af opnåede forsøgsresultater og HETEK, State of the Art [1]. Der er opstillet godkendelseskriterier for entreprenørens efterbehandling af højkvalitetsbeton, således at den ønskede betonkvalitet opnås.

*[6] HETEK, Hovedrapport*

Sammenfatning af resultater og konklusioner fra HETEK - Efterbehandling, Fase 1-4, [1]-[5] og denne anvisning.

## 2. Krav til efterbehandling

Kapitel 2.1 og 2.2 redegør for kravene til, dels hvor tidligt og dels hvor længe efterbehandling skal være etableret. Kravene er hentet fra forslag til DS 482 "Udførelse af betonkonstruktioner", revisionsudgave marts 1997.

Til mindskelse af vandfordampning kan der anvendes såkaldt forseglingsmiddel. Der er krav om, at forseglingsmiddel skal tilbageholde en passende del af vandet i betonen, hvilket omtales i kapitel 2.3.

Krav til efterbehandling kan være stillet, så der kræves kendskab til betonens reaktionsgrad og afbindingstid, hvor kapitel 2.4 omhandler bestemmelse af disse størrelser.

Kapitel 2.5 omhandler blandt andet beregning af tider for fordampning af givne vandmængder. Som alternativ hertil ses i bilag 1 kurver til aflæsning af tider svarende til en given fordampning under typisk forekommende klimaforhold.

### 2.1 Efterbehandlingstidspunkt

Kravene til efterbehandling i passiv miljøklasse, kapitel 2.1 og 2.2, vedrørende efterbehandlingstidspunkt og -periode, skal kun overholdes, hvis det fremgår af projektspecifikationen.

Med mindre andet eftervises at være forsvarligt, skal efterbehandlingen være etableret, inden der er fordampet de i skema 2.1 angivne vandmængder fra overfladen.

FA + MS, maksimal vægt-% af bindemiddel	MS, maksimal vægt-% af bindemiddel	Maksimalt fordampet vandmængde før efterbehandling kg/m <sup>2</sup>
35	10	1,5
15	5	3,0
5	0	6,0

Skema 2.1. Krav til maksimal vandfordampning før etablering af efterbehandling. Fra forslag til DS 482 "Udførelse af betonkonstruktioner".

Efterbehandlingen skal senest være etableret 1 modenhedstid efter betonens afbindings-tid.

Såfremt der ikke fremlægges dokumentation for, at de i skema 2.1 angivne krav opfyldes, skal beskyttelsen af overfladerne være etableret, inden de i skema 2.2 anførte tidsrum fra udstøbningstidspunktet er forløbet.

FA + MS, maksimal vægt-% af bindemiddel	MS, maksimal vægt-% af bindemiddel	Udendørs- arbejder	Indendørsarbejder		
			Beton temperatur		
			< 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

Skema 2.2. Krav til seneste tidspunkt for efterbehandling efter udstøbning ved hhv. uden-dørs- og indendørsarbejder. Fra DS 482 "Udførelse af betonkonstruktioner" (forslag).

Disse tider svarer til lagtykkeler større end eller lig med 0,2 m. For tykkeler mindre end 0,2 m skal tiderne reduceres proportionalt med den mindre tykkelse. Efterbehandlingen skal eventuelt etableres midlertidigt, inden afretning foretages.

## 2.2 Efterbehandlingsperiode

Med mindre andet eftervises at være forsvarligt, skal beskyttelsen mod udtørring oprettholdes, indtil den i skema 2.3 angivne reaktionsgrad R er opnået i betonens overfladelag (dokumenteres som modenhed ved måling i en dybde på maksimalt 10 mm).

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

Skema 2.3. Mindste reaktionsgrad for fjernelse af efterbehandling. Fra forslag til DS 482.

Såfremt der ikke fremlægges dokumentation for, at de i skema 2.3 angivne krav opfyldes, skal beskyttelsen mod udtørring opretholdes, indtil den i skema 2.4 angivne modenhed M er opnået i betonens overfladelag (målt i en dybde på maksimalt 10 mm).

Miljøklasse	Betonens alder målt i modenhedstimer ved tidligste fjernelse af tildækning				
	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	

Skema 2.4. Tidligste tidspunkt for fjernelse af efterbehandling. Fra forslag til DS 482.

Hvis afbindingen starter senere end 5 timer efter blanding, øges de anførte modenhedskrav i skema 2.4 tilsvarende.

## 2.3 Efterbehandlingens effektivitet

For at reducere vandfordampningen fra den friske beton påføres ofte forseglingsmiddel, som er en tyndtflydende væske. Kravet til effektiviteten af forseglingsmiddel er 75%, hvilket betyder, at forseglingsmidlet skal reducere vandtabet med mindst 75% i forhold til en ubehandlet betonoverflade.

Effektiviteten af et forseglingsmiddel bestemmes i henhold til DTI's prøvningsmetode TI-B 33. Der anvendes beton med en i TI-B 33 nærmere angiven sammensætning. Der benyttes seks betonprøveemner, hvoraf halvdelen er ubehandlede, og den anden halvdel er påsprøjtede forseglingsmiddel. Ved prøvningen bliver betonoverfladen påvirket af en kontrolleret temperatur, relativ fugtighed og vindbelastning samtidig med, at den fordampe vandmængde registreres kontinuerligt. Dette opnås ved at placere betonemner på en vejecelle i en vindtunnel i et klimakammer.

## 2.4 Beton

I betonens plastiske fase efter udstøbning og komprimering kan der under tyngdekraftens indvirkning ske en sedimentation, hvor de tungeste bestanddele (bindemiddel, sand og sten) sæger nedad, og samtidig hermed transporterer vandet mod overfladen. Denne vandudskillelse kaldes bleeding.

Afhængig af klimaforholdene vil vandet fordampe fra betonoverfladen. Såfremt vandfordampningen sker med større hastighed end den, hvormed bleedingen forløber, vil betonen udtørre, og der er risiko for plastiske svindrevner i overfladen. Plastiske svindrevner opstår som følge af trækspændinger forårsaget af damptryksænkningen over krumme vandspejl (væskemeniskner) i betonoverfladen. Ved sænkning af damptrykket falder den relative luftfugtighed til under 100% i betonoverfladen.

Jo større modstand plastisk beton udviser for vandtransport, des større er risikoen for plastiske svindrevner. Vandtransport i beton mindskes blandt andet med øget indhold af finstof som for eksempel flyveaske og mikrosilica. Mikrosilica er meget finkornet i forhold til cement og flyveaske, hvorfor mikrosilica typisk mindske vandtransporten forholdsvis mest.

Selv om vandudskillelse på grund af bleeding kan imødegå plastiske svindrevner i betonoverfladen, er dette ikke hensigtsmæssigt, da der samtidig fås et svagt slamlag på overfladen.

Ved en given vandfordampning vokser trækspændingerne i betonoverfladen typisk med tiltagende bindemiddlelindhold (for eksempel flyveaske og mikrosilica), da porerne hermed forfines [7].

Kravene til, hvor meget vand der maksimalt må fordampe, før efterbehandlingen etableres, afhænger derfor af betonens flyveaske- og mikrosilicaindhold.

Beton skal have opnået en tilstrækkelig reaktionsgrad, før tildækningen må fjernes, idet tilstedeværelse af vand er en betingelse for reaktion af cement og puzzolaner og derved betonens tæthed- og styrkeudvikling. Da betonkonstruktioner vil blive utsat for forskellige påvirkninger i de enkelte miljøklasser, er krav til varigheden af efterbehandling øget i takt med, at miljøpåvirkningerne af betonen skærpes.

#### **2.4.1 Betons reaktionsgrad**

Hvornår efterbehandlingen tidligst må fjernes, kan fastsattes på baggrund af krav til betonens reaktionsgrad. Reaktionsgraden angiver, hvor stor en del af bindemidlet, der er reageret i forhold til det oprindelige bindemiddel.

Reaktionsgraden kan vurderes ud fra betonens adiabatiske varmeudvikling fastlagt ved forsøg. Betonens adiabatiske varmeudvikling  $Q(M)$  som funktion af modenhed  $M$  beskrives matematisk ved (2.1). Den S-formede kurve i figur 2.1 er vist som et eksempel på en betons varmeudvikling  $Q(M)$ .

$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha}\right), \quad [\text{kJ/kg bindemiddel}] \quad (2.1)$$

hvor:

$Q_{\infty}$  Betonens beregnede totale varmeudvikling, [kJ/kg bindemiddel]

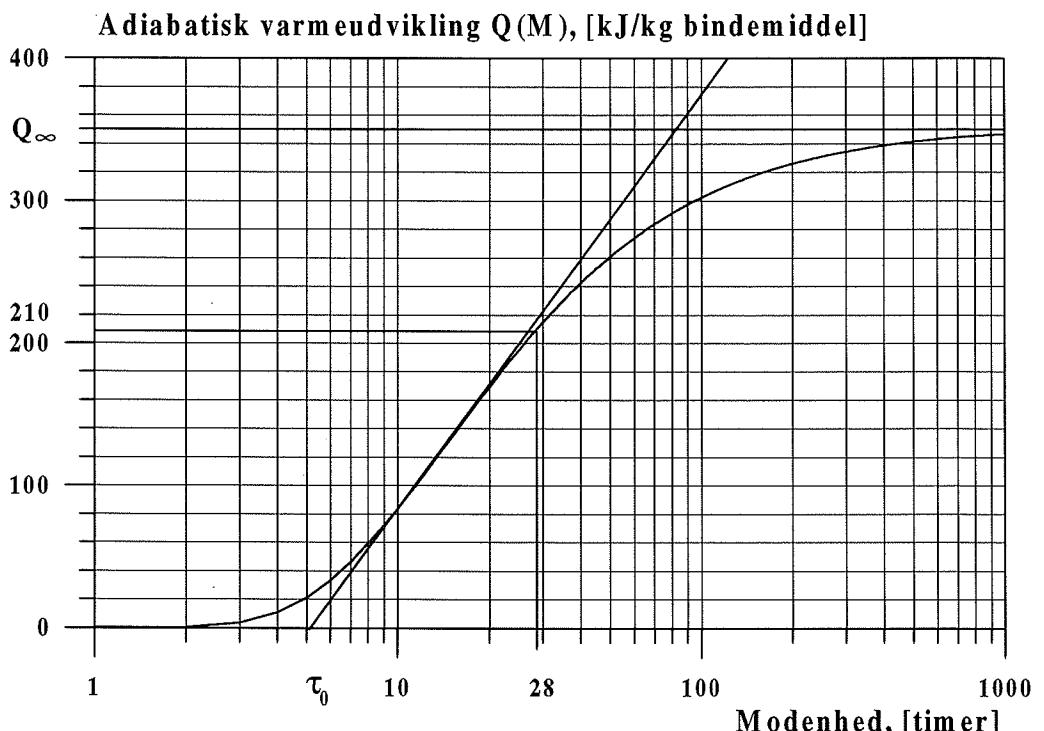
$\tau_e$  Tidskonstanten.  $Q(M)$  har vendetangent for  $M = \tau_e$ ,  
(den skrå, rette linie i figur 2.1)

Mindsket  $\tau_e$  angiver øget hastighed af varmeudviklingen, [timer]

$\alpha$  Krumningsparameteren. Stejlheden af den S-formede kurve, som  $Q(M)$  beskriver, øges med voksende værdi af  $\alpha$ .

Typisk oplyser betonleverandøren resultater fra måling af betonens varmeudvikling, hvor størrelserne:  $Q_{\infty}$ ,  $\tau_e$  og  $\alpha$  i formel (2.1) angives som resultat.

I de to følgende eksempler 2.1 og 2.2 vises det, hvordan efterbehandlingsperioden kan bestemmes, når der er krævet en given reaktionsgrad  $R$ . Efterbehandlingsperioden kan bestemmes enten grafisk eller ved beregning på baggrund af betonens varmeudvikling.



Figur 2.1. Adiabatisk varmeudvikling i afhængighed af modenhed vist ved den S-formede kurve.

**Eksempel 2.1: Efterbehandlingsperiode - grafisk bestemmelse.** Efterbehandlingsperioden ønskes vurderet for en beton til moderat miljøklasse. Der er krav om en efterbehandlingsperiode, hvor betonen som minimum har opnået en reaktionsgrad  $R = 0,6$ , jf. skema 2.3.

Betonens reaktionsgrad  $R$  bestemmes som udviklet varmemængde  $Q(M)$  efter  $M$  modenhedstimer i forhold til slutvarmen  $Q_\infty$ , hvor udtrykket fremgår af formel (2.2).  $Q_\infty$  aflæses af figur 2.1 til cirka 350 kJ/kg bindemiddel. Betonens adiabatiske varmeudvikling  $Q(M)$  svarende til  $R = 0,6$  findes herefter af (2.2):

$$R = \frac{Q(M)}{Q_\infty} \Rightarrow Q(M) = R \cdot Q_\infty = 0,6 \cdot 350 = 210 \text{ kJ/kg} \quad (2.2)$$

Efter indtegning af de to linier vinkelrette på hinanden i figur 2.1 aflæses det, at  $Q(M) = 210 \text{ kJ/kg}$  bindemiddel, opnås efter omtrent 28 modenhedstimer.

Det vil sige, at den anvendte efterbehandling, for eksempel form, plastfolie eller måtter, etc. tidligst må fjernes 28 modenhedstimer efter blandingstidspunktet, hvor betonen har opnået en reaktionsgrad på 60%.

**Eksempel 2.2: Efterbehandlingsperiode - bestemt ved beregning.** Såfremt betonens varmeudviklingsparametre:  $\tau_e$  og  $\alpha$  er kendte, kan formel (2.3) også anvendes til beregning af modenheten  $M$  for opnåelse af en given reaktionsgrad  $R$ .

Betonleverandøren har oplyst, at  $\tau_e$  og  $\alpha$  for betonens varmeudvikling, der er vist i figur 2.1, er henholdsvis 13,4 timer og 0,9. Af formel (2.3) beregnes det, at betonen opnår en reaktionsgrad  $R$  på 0,6 efter cirka 28 modenhedstimer.  $Q(M)$  i formel (2.3) er fra (2.1).

$$R = \frac{Q(M)}{Q_\infty} = \frac{\frac{Q_\infty \cdot \exp(-(\frac{\tau_e}{M})^\alpha)}{M}}{Q_\infty} = \exp(-(\frac{\tau_e}{M})^\alpha) \Rightarrow$$

$$M = \frac{\tau_e}{(-\ln(R))^{1/\alpha}} = \frac{13,4 \text{ timer}}{(-\ln(0,6))^{1/0,9}} = 28 \text{ timer} \quad (2.3)$$

Beregningen viser, at det varer 28 modenhedstimer fra blanding, før efterbehandlingen tidligst må fjernes, ved krav til en minimal reaktionsgrad på 0,6. Der fås samme resultat som ved den grafiske bestemmelse, jf. eksempel 2.1.

#### 2.4.2 Betons afbindingstid

Afbindingstiden anvendes som et mål for tidspunktet, under hvilket betonen kan vibreres ved givne klimaforhold. Den danske standard DS 423.17 beskriver, hvordan betons afbindingstid kan bestemmes.

Betonens afbindingstid kan skønnes, når varmeudviklingskurven er kendt, hvor  $\tau_0$  kan tages som et udtryk for betons afbindingstid.

$\tau_0$  bestemmes på følgende måde. Betonens S-formede varmeudvikling  $Q(M)$  optegnes som vist i figur 2.1. Der indtegnes en ret linie (vendetangent), som bedst muligt beskriver varmekurvens rette del.  $\tau_0$  aflæses, hvor denne linie skærer modenheds-aksen i timer. Af data i figur 2.1 fås, at betons afbindingstid  $\tau_0$  er omrent 5 timer.

I det følgende eksempel ses, at betons afbindingstid kan have indflydelse på varigheden af efterbehandlingen.

**Eksempel 2.3: Betons afbindingstid og varighed af efterbehandling.** For en beton til ekstra aggressiv miljøklasse med økv. v/c = 0,40 må efterbehandlingen fjernes efter 120 modenhedstimer, jf. skema 2.4.

Betonens varmeudvikling er målt, og efter en tilsvarende afbildning som vist i figur 2.1 er betons afbindingstid  $\tau_0$  bestemt til 8 timer.

Forudsætningen for tiderne i skema 2.4 er, at afbindingstiden er mindre end eller lig med 5 timer. Den mindste varighed af efterbehandlingen skal derfor korrigeres som vist i formel (2.4).

$$\text{Min. varighed} = 120 + (8 - 5) = 123 \text{ modenhedstimer} \quad (2.4)$$

Resultatet er, at efterbehandlingen tidligst må fjernes efter 123 modenhedstimer.

## 2.5 Klimaforhold

Klimaet, hvor beton udstøbes, har overordentlig stor indflydelse på, hvor meget vand der fordamper fra betonoverfladen i et givet tidsrum. Kravene til, hvornår efterbehandlingen skal være etableret, kan være formuleret sådan, at der maksimalt må være fordampet en bestemt vandmængde (skema 2.1).

Dette kapitel omhandler beregning af vandfordampning fra nyudstøbt beton i afhængighed af klimaforholdene. I figur 2.2 ses et nomogram til beregning af vands fordampningshastighed fra en våd betonoverflade.

Det følgende er et eksempel på beregning af vandfordampning.

**Eksempel 2.4: Fordampet vandmængde.** Der udstøbes gulv i en bolig. Det er krævet, at efterbehandlingen skal være etableret før, at der er fordampet  $1,5 \text{ kg/m}^2$  (skema 2.1), da betonens indhold af flyveaske og mikrosilica er 20%, og mikrosilicaindholdet er 7% af bindemiddelvægten.

For at kunne håndtere dette i praksis, er det nødvendigt at omsætte kravet til timer. Kravene i skema 2.1 gælder under forudsætning af, at lagtykkelsen som minimum er  $0,2 \text{ m}$ .

- Temperaturen i betonoverfladen er målt til  $27^\circ\text{C}$ . Den relative fugtighed i betonoverfladen er 100%. Punkt A ( $27^\circ\text{C}, 100\%$ ) i øverste del af nomogrammet i figur 2.2 bestemmer damptrykket  $P_{\text{beton}} = 3,6 \text{ kPa}$  i betonens overflade.
- Lufttemperaturen i boligen er  $25^\circ\text{C}$ , og den relative luftfugtighed er 70%. Dette svarer til punkt B( $25^\circ\text{C}, 70\%$ ) i figur 2.2. Ved aflæsning i nomogrammet fås damptrykket  $P_{\text{luf}}$  =  $2,2 \text{ kPa}$  i luften.
- Damptryksforskellen  $\Delta P$  beregnes af:  $\Delta P = P_{\text{beton}} - P_{\text{luf}} = 3,6 - 2,2 = 1,4 \text{ kPa}$ . I boligen er vindhastigheden v skønnet til  $2 \text{ m/s}$ . Med den aktuelle damptryksforskell og vindhastighed aflæses det af nederste del af nomogrammet i figur 2.2, at fordampningshastigheden  $w \approx 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot h$ . Dette svarer til punkt C.
- Tiden fra udstøbning, svarende til at der er fordampet  $1,5 \text{ kg/m}^2$  med  $w \approx 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot h$ , findes herefter af:

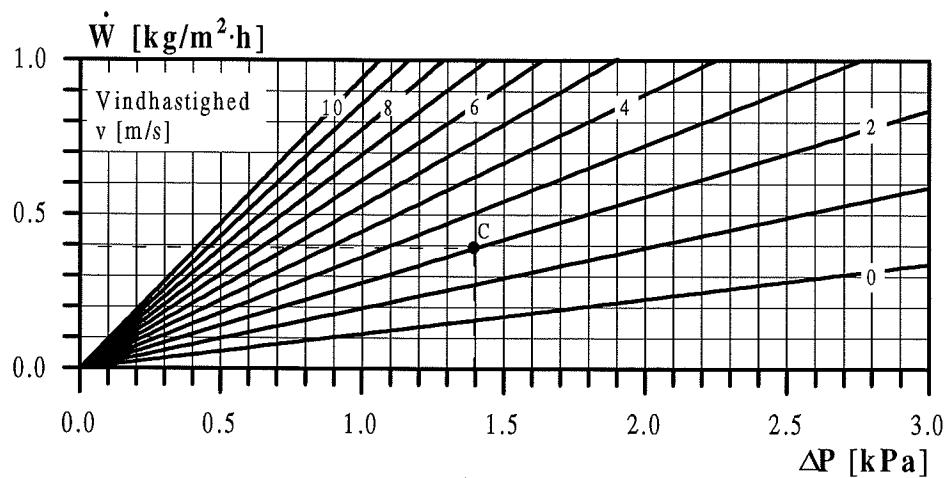
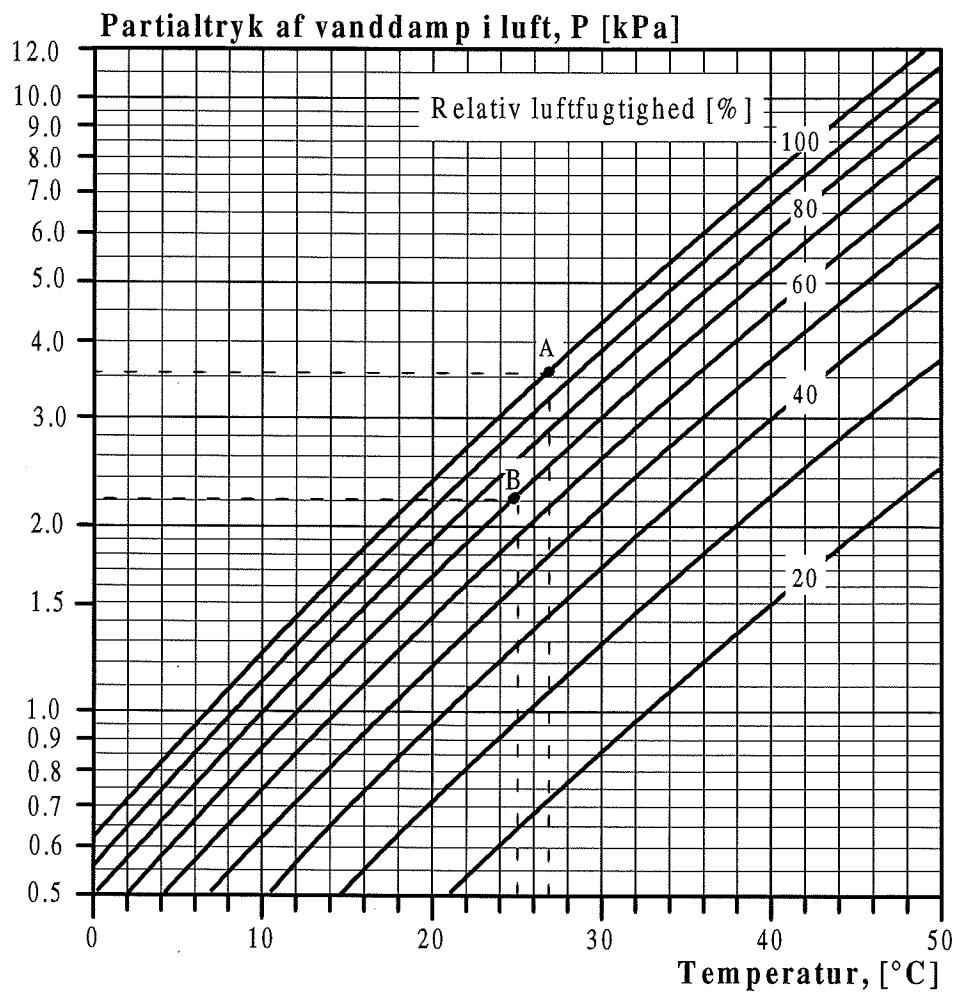
$$\text{Tid} = \frac{\text{Fordampet vandmængde}}{\text{Fordampningshastighed}} = \frac{1,5 \text{ kg/m}^2}{0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}} = 3,75 \text{ h} \quad (2.5)$$

Efterbehandlingen af gulvet skal således være etableret senest 3,75 timer = 3 timer og 45 minutter efter udstøbningen.

- e) Betontykkelsen er 0,15 m og således mindre end forudsat. For at korrigere herfor benyttes følgende udtryk (2.6) til beregning af maksimal tid før etablering af efterbehandling:

$$\begin{aligned} \text{Tid} &= \left( \frac{0,15 \text{ m}}{0,2 \text{ m}} \right) \cdot 3,75 \text{ timer} \approx 2,8 \text{ timer} \\ &\approx 2 \text{ timer og } 50 \text{ minutter} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Omrægningen sikrer, at tiden reduceres proportionalt med den mindre lagtykkelse.



Fordampningshastigheden  $w$ , som funktion af vindhastighed  $v$  og damptrykspotentialet  $\Delta P$ , er beregnet af udtrykket:

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

Forudsætning: Våd overflade ~ indtil 10 - 20 modenhedstimer.

Figur 2.2. Nomogram til beregning af fordampningshastighed af vand fra nyudstøbt beton.

Til beregning af fordampningshastigheder og fordampede mængder af vand fra nyudstøbt beton er det nødvendigt at have kendskab til omgivelsernes temperatur, relative fugtighed og vindhastighed.

Ved planlægning af efterbehandling kan de i skema 2.6 anførte typiske værdier for: Temperaturer og relative luftfugtigheder anvendes. Værdierne er baseret på data fra Statistisk årbog 1996. Vindhastigheder, som kan benyttes, er på baggrund af ugedata fra Danmarks Meteorologiske Institut.

Umiddelbart før støbning kontrolleres/justeres den planlagte efterbehandling (vejrmeldingen). Ved oversættelse af vindstyrker til vindhastigheder kan skema 2.5 anvendes.

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	Smårene 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	17,2 - 20,2	Kviste og grene brækker af træer
Storm	20,8 - 24,4	Træstammer svejer, store grene brækker af
Stærk storm	24,5 - 28,4	Træer rives op, betydelige skader på huse
Orkanagtig storm	28,5 - 32,6	Mange ødelæggelser, svært at gå
Orkan	32,7 -	Voldsomme ødelæggelser

Skema 2.5. Windstyrker og vindhastigheder. Fra [8].

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 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	77	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
Kystsationer (1961-1990)	7	7	7	6	6	6	6	6	7	7	8	8
Antal blæstdøgn, v ≥ 10,8 - 13,8 m/s	5,0	3,9	4,6	4,0	3,0	2,6	2,2	2,5	2,8	3,4	4,2	4,3

Skema 2.6. Typiske vejdata for Danmark. Udarbejdet på baggrund af data fra Danmarks Meteorologiske Institut. Forklaringer i note 2.1.

---

Note 2.1: Anvendte temperaturbetegnelser i skema 2.6.

De anførte månedlige landsgennemsnit for temperaturer er baseret på daglige målinger ved et antal velfordelte vejrstasjoner - som hovedregel 30. Temperaturer er gennemsnittet for den i skemaet angivne årrække.

Døgn middel: Angiver forventede gennemsnitstemperaturer for et januar-, februar-, og martsdøgn, etc.

Døgn middel maksimum/minimum:

Gennemsnit af den højeste/laveste daglige temperatur.

Måneds maksimum/minimum:

Gennemsnit af den højeste/laveste månedlige temperatur. Absolut maksimum/minimum: Henholdsvis højeste og laveste temperatur i den angivne periode.

---

# 3. Efterbehandlingsmetoder

Ved planlægningen af støbearbejdet vælger entreprenøren en eller flere efterbehandlingsmetoder, der er nødvendige for at opfylde projektets specifikationer. Valget er en optimering, der bør tage højde for konstruktionens geometri, det praktiske ved udførelsen samt de økonomiske og tekniske forhold.

De valgte efterbehandlingsmetoder har to formål:

- at styre fordampningen af vand
- at styre hærdningstemperaturer.

De typisk anvendte efterbehandlingsmetoder omfatter at:

- afdække med damptætte membraner
- lade formen sidde
- påføre forseglingsmiddel
- fugtigholde overfladen
- klimastyre

Det kan også være en mulighed at:

- anvende tilsvætningsmidler i betonen.

I dette kapitel beskrives de forskellige efterbehandlingsmetoder, fordele og ulemper samt tilhørende planlægning og dokumentation. I bilag 2 ses en oversigt over efterbehandlingsmetoderne.

## 3.1 Damptætte membraner

Damptætte membraner er plastfolie, presennin, mineraluldsmåtter eller polystyrencelleplast måtter.

### 3.1.1 Plastfolie

Plastfolie skal anbringes tæt på betonoverfladen for effektivt at hindre fordampning. Metoden er mest velegnet ved støbninger med vandrette overflader og mindre egnet på afformede lodrette flader og undersider på konstruktioner.

Tildækkes den friske betonoverflade meget tidligt (før den er afbundet), er der risiko for, at plastfolien efterlader aftryk. Den hærdnede betonoverflade får som regel et skjoldet eller blankt udseende fra kondens under selve plastfolien. Hvor kondenskjolder ikke kan accepteres, kan de til dels undgås ved at udlægge et lag filt mellem beton og plastfolie, hvilket gør efterbehandlingsmetoden mere kompliceret og dyrere. Filt ødelægges ved udlægning på våd/frisk beton.

Plastfolien skal være hel og udlægges med passende overlapning, og det vil ofte på grund af vind/træk være nødvendigt at etablere fastholdelse af plastfolien, for eksempel ved placering af brædder eller udlægning af vådt sand. Effektiviteten af tildækningen skal løbende inspiceres under hærdningsforløbet.

Håndtering af plastfolie påvirkes af vinden. Plastfolien beskadiges let og holdbarheden er begrænset med deraf følgende lav genanvendelighed.

### **3.1.2 Presenning**

Presenningen skal anbringes tæt på betonoverfladen for effektivt at hindre fordampning. Metoden er velegnet både ved vandrette flader og ved afformede lodrette flader.

På grund af presenningens vægt kan den friske betonoverflade ikke bære denne, før betonen er afbundet, idet der ellers er risiko for at få aftryk i betonoverfladen. Den hærdnede betonoverflade får som regel et skjoldet eller blankt udseende fra kondens under presenningen. Dette kan til dels undgås ved at udlægge et lag filt mellem beton og presenning, hvilket gør efterbehandlingsmetoden mere kompliceret og dyrere. Man skal være opmærksom på, at filt ødelægges ved udlægning på våd beton.

På lodrette afformede flader er tildækning med presenning effektiv med hensyn til at reducere fordampningen. Som regel er en presenning, på grund af længden, tilstrækkelig til at kunne klare højden af en lodret støbning. På grund af egenvægten vil den typisk sikre god kontakt med betonoverfladen. Presenningen skal fastgøres ved hjørner, tilslutninger og forneden på konstruktionen.

Presenninger er lette at håndtere og har god holdbarhed, det vil sige, at genanvendeligheden er stor.

Presenningen skal være hel, og udlægges med passende overlapning, og det vil ofte på grund af vind/træk være nødvendigt at etablere fastholdelse af presenningen, for eksempel ved placering af brædder på presenningen. Effektiviteten af tildækningen skal løbende inspiceres under hærdningsforløbet.

### **3.1.3 Mineraluldsmåtter**

Formålet med at anvende mineraluldsmåtter er primært for at styre temperaturer under hærdningsforløbet, men da måtterne normalt er indpakket i en beskyttende plastfolie, giver de også beskyttelse med hensyn til fordampning.

Mineraluldsmåtter skal anbringes tæt på betonoverfladen for effektivt at hindre fordampning, og der skal sikres god overlapning mellem måtterne. Metoden er velegnet ved vandrette støbningsflader. Ved lodrette støbningsflader er metoden vanskelig at gennemføre effektivt.

På grund af vægten af mineraluldsmåtten kan den friske betonoverflade ikke bære måtten, før betonen er afbundet, idet der ellers er risiko for at få aftryk i betonoverfladen. Den hærdnede betonoverflade får som regel et skjoldet eller blankt udseende fra kondens under måtten. Dette kan til dels undgås ved at udlægge et lag filt mellem den hærdnende beton og måtten, hvilket gør efterbehandlingsmetoden mere kompliceret og dyrere.

På lodrette afformede flader er tildækning med mineraluldsmåtter mindre effektiv med hensyn til at reducere fordampningen. Som regel er en måtte, på grund af længden, tilstrækkelig til, at kunne klare højden af en lodret støbning. Ved fastgørelse af måtten

forneden på væggen kan der fås god kontakt med betonoverfladen. Bredden på måtterne giver mange overlapninger med stor risiko for vindtunneler, hvorved beskyttelsen er mindre effektiv.

Mineraluldsmåtter er lette at håndtere, men plasten, der indhyller måtterne, er sårbar, men generelt må det siges, at måtterne har stor holdbarhed, det vil sige med en høj grad af genanvendelighed.

Mineraluldsmåtten skal være hel, og det vil ofte på grund af vind/træk være nødvendigt at etablere fastholdelse af måtten, for eksempel med brædder. Effektiviteten af tildækningen skal løbende inspiceres under hærdningsforløbet.

### **3.1.4 Måtter af polystyrencelleplast**

Formålet med at anvende måtter af polystyrencelleplast er normalt at styre temperaturer under hærdningen, men da måtterne har en tæt struktur, giver de også beskyttelse mod fordampning fra betonoverfladen.

Måtter af polystyrencelleplast leveres i brede baner (ruller), og materialet er stivere end for eksempel mineraluldsmåtter. Måtterne skal anbringes tæt på betonoverfladen for effektivt at hindre fordampning, og der skal sikres god overlapning mellem måtterne. Metoden er velegnet ved vandrette støbninger. Metoden kan anvendes ved lodrette støbninger, for eksempel ved at binde måtten til søjlen.

Måtternes egenvægt er meget lav, men på grund af måtternes stivhed kan det være vanskeligt at placere dem på den friske betonoverflade, før betonen er afbundet, idet der ellers er risiko for aftryk i betonoverfladen. Den hærdnede betonoverflade får som regel et skjoldet eller blankt udseende fra kondens under måtten, som til dels kan undgås ved at udlægge et lag filt mellem beton og måtte, hvilket gør efterbehandlingsmetoden mere kompliceret og dyrere.

På grund af måtternes bredde er der relativt færre overlapninger. Disse skal fastholdes effektivt for at reducere risikoen for vindtunneler. Effektiviteten af fastholdelsen skal løbende inspiceres under hærdningsforløbet.

På lodrette afformede flader er tildækning med måtter af polystyrencelleplast mindre effektiv, da det er vanskeligt at fastholde måtten ind imod betonoverfladen. Ved søjler og korte vægge kan måtten dog snøres ind imod konstruktionen og give effektiv beskyttelse mod fordampning.

Måtter af polystyrencelleplast er lette at placere på vandrette flader, men på grund af den lave egenvægt skal de fastholdes effektivt. Måtterne er robuste og har stor holdbarhed og en høj grad af genanvendelighed.

## **3.2 Formen**

Formen beskytter mod fordampning, og effektiviteten er til dels påvirket af overfladen på formmaterialet og kvaliteten af formen generelt.

Formoverfladerne er typisk af lakeret træ/finér, ru støbebrædder eller stål. I specielle situationer forskrives en indvendig fiberdug for at højne kvaliteten på betonoverfladen støbt imod form.

Anvendelse af form som eneste beskyttelse mod fordampning er en dyr og forsinkende løsning for byggeprocessen, da muligheden for genanvendelse reduceres.

Hvor der stilles krav om en lang efterbehandlingsperiode, vil kravet som regel blive opfyldt ved en kombination af formtid efterfulgt af anden beskyttelse efter afformning.

I de situationer hvor der efter afformning er behov for at supplere beskyttelsen mod fordampning, er metoderne dækket af gennemgangen i dette kapitel. Ved afformning er det vigtigt, at der effektivt og hurtigt etableres beskyttelse mod fordampning, så krav beskrevet i kapitel 2 opfyldes.

Ved krav om kortere efterbehandlingsperioder (lav modenhed) vil kravet som oftest være opfyldt ved afformning.

### **3.2.1 Forme af lakeret træ/finér eller stål**

Forme af lakeret træ/finér eller stål giver beskyttelse mod fordampning, idet fladerne er tætte og ikke sugende.

### **3.2.2 Forme med ru støbebrædder**

Forme med ru støbebrædder beskytter mod fordampning, men brædderne kan være sugende, hvis de er tørret ud. Det er vigtigt at sikre sig, at forskalling med ru støbebrædder er tæt og ikke sugende forud for støbning for eksempel ved forvanding.

### **3.2.3 Forme med formdug**

Forme med formdug beskytter ikke bedre mod fordampning end andre tætte forme. Formålet med at anvende formdug er at få en blærefri og "vacuum-suget" betonoverflade, hvilket kan sammenlignes med den overflade, der fås ved brug af ru støbebrædder.

Anvendelse af formdug er i sig selv en ekstra omkostning, så valg af metoden skal være velovervejet. Montering af formdug skal gennemføres omhyggeligt, så dugen sidder fast på formen uden at folde. Formdug kan typisk kun anvendes til en støbning.

### **3.3 Forseglingsmidler**

Forseglingsmidler anvendes primært til beskyttelse mod fordampning fra friske betonoverflader. Der er typisk tale om vandrette flader, hvor etablering af anden form for afdækning er forbundet med gener.

Forseglingsmiddel er en væske, hvori der er opløst eller emulgeret organiske forbindelser, der danner en fugtbremsende hinde på betonoverfladen. Væsken kan være vandbaseret, hvor den fugtbremsende hinde er voks. Hvis væsken er et organisk opløsningsmiddel for eksempel alkohol, terpentin eller xylen, er den fugtbremsende hinde harpiks, acrylat, etc.

Forseglingsmidler skal tilbageholde 75% af fordampeligt vand, jf. kapitel 2.3.

Forseglingsmidler skal påføres i mængder, som angivet på produktets datablad, og de fleste forseglingsmidler er tilsat et farvepigment, som sandsynliggør og letter påføringen. Ved stærk blæst kan det være vanskeligt at udføre en effektiv forseglung med flydende forseglingsmidler. Det er også vanskeligt at opnå en effektiv forseglung af lodrette flader, hvor det ofte er nødvendigt at påføre forseglingsmidlet af flere omgange for at dosere den foreskrevne mængde.

Forseglingsmidler kan have betydning for en efterfølgende overfladebehandling ved at reducere bindeeffekten til underlaget. Det vil typisk ikke være tilladt at anvende forseglingsmidler, hvor overfladen senere skal forsegles med membraner. Effekten fra forseglingsmidlet aftager normalt med tiden, hvilket bør tages med i vurderingen ved valg af forseglingsmiddel. Forseglingsmidler må normalt ikke påføres støbeskel eller udragende armering/stødjern (rester skal fjernes, for eksempel ved sandblæsning).

### **3.4 Fugtigholdelse**

Fugtigholdelse i form af sprinkling af overfladen, vandfilm på overfladen eller udlægning af våde sække anvendes primært til beskyttelse mod fordampning fra hærdnende betonoverflader (1-2 modenhedsdøgn). Metoden må ikke anvendes på frisk beton, da der så er risiko for udvaskning af betonoverfladen. Metoden anvendes typisk på vandrette flader som supplement til andre efterbehandlingsmetoder, og den må ikke udføres, så den giver betonen temperaturchok [9].

Metoderne kræver løbende inspektion af effektiviteten for at hindre, at betonoverfladen udsættes for vekslende vanding og udtørring. Stærk blæst kan endvidere reducere effektiviteten, og vanding bør ikke anvendes ved risiko for frostvejr.

Vandfilm og sprinkling kan medføre gener for arbejdet i forbindelse med andre byggeafsnit, især hvis metoderne anvendes på overliggende byggeafsnit. I støbeskel er metoderne ofte velegnede i forhold til forseglingsmiddel. Metoderne giver risiko for skjolder/misfarvninger på betonoverfladen.

## **3.5 Klimastyring**

Klimastyring er en metode, hvor primært luftens temperatur og den relative luftfugtighed benyttes til at reducere fordampningen eller give kondensering på betonoverfladen.

Vinden har ikke nogen direkte indflydelse på selve fordampningen, når det drivende damptryk er nul eller negativt. Vindhastigheden har alene indflydelse på fordampningens hastighed ved at transportere det vand væk, som drives til at fordampe, når betonens damptryk er større end omgivelsernes (det drivende damptryk er positivt).

Tilsvarende effekt kan forekomme ganske naturligt i udendørs situationer, hvor lufttemperaturer kan være højere end betonens (for eksempel forår/efterår), og hvor der samtidig er en relativt høj luftfugtighed. Dette kan resultere i en reduceret fordampning fra betonoverfladen, eller en direkte kondensering på betonoverfladen, når betonens damptryk er mindre end damptrykket i den omgivende luft (det drivende damptryk er negativt).

Metoden benyttes ved industriproduktion ved fremstilling af betonelementer eller betonvarer, men den kan også benyttes på byggeplads - for eksempel ved støbning af konstruktionsdele i telt.

## **3.6 Tilsætningsmidler**

### *Polymerer:*

Ved tilsætning af polymerer opnås en indvendig forsegling, så vandet ikke så nemt fordamper fra betonens overflade. Der er tale om høje doseringer af polymerer, så metoden er ikke økonomisk, når det drejer sig om egentlig betonproduktion.

Det forekommer besnærrende blot at anvende et tilsætningsmiddel til at reducere fordampningen. Da metoden ikke er økonomisk, og der mangler viden vedrørende polymerers effekt på betonens konsistens og luftporestruktur, bør metoden ikke foreskrives.

### *Fibertilsætning:*

Til vandrette konstruktioner med stor udstrækning specificeres i stigende grad dosering af meget korte plastfibre. Fibertilsætningen er beskeden og medfører ingen reduktion af fordampningen, men eventuelle plastiske svindrevner fordeles på grund af plastfibrenes elasticitet, og revnerne kan herved blive usynlige for det blotte øje.

Det er selvfølgelig nødvendigt at efterbehandle beton, hvor der er tilsat plastfibre, men plastfibrene kan give en ekstra sikkerhed mod synlige plastiske svindrevner ved svigt i efterbehandlingen. Typen og mængden af fibre skal fastlægges i hvert enkelt tilfælde.

Ved tilsætning af plastfibre tager betonleverandører typisk forbehold med hensyn til især betonens luftporestruktur. Dette bør indgå i overvejelserne, når metoden anvendes.

## 4. Planlægning og inspektion

Planlægning af efterbehandling skal medvirke til, at alle de stillede krav til betonen i hærdningsperioden overholdes. Planlægningen kan foretages ved hjælp af en hærdeteknisk EDB-simulering.

Inspektionen skal sikre, at kravene til efterbehandlingen overholdes i løbet af hærdningsperioden, når betonen er udstøbt.

Der er krav til følgende - se også note 4.1:

1. Seneste tidspunkt for etablering af efterbehandlingen
2. Minimal varighed af efterbehandlingen

---

Note 4.1: Projektspecifikationen kan også indeholde krav til følgende:

- Betonen skal være frostsikker, før den udsættes for frost
- Maksimale temperaturforskelle over et tværsnit
- Maksimale temperaturforskelle ved sammenstøbning
- Maksimale trækspændinger i forhold til spaltetrækstyrke
- Minimal styrke ved afformning.

Ved hærdeteknisk EDB-simulering skal efterbehandlingen planlægges, så krav til disse punkter også overholdes. Emnerne er omtalt uddybende i [8] og [9].

---

I bilag 3 ses skemaer, som kan anvendes til planlægning af efterbehandlingen. Ved udfyldelse og brug heraf sikres det, at der er tilstrækkeligt med oplysninger til, at der kan udføres beregning, således at stillede krav overholdes i planlægningsfasen.

**Der er følgende skemaer til planlægning:**

Planlægningsblanket 1: Beton

Nødvendige oplysninger om betonsammensætning, miljøklasse og adiabatisk varmeudvikling.

Planlægningsblanket 2: Seneste tidspunkt for efterbehandling

Seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling kan bestemmes.

Planlægningsblanket 3: Varighed af efterbehandling

Mindste varighed af efterbehandling kan fastsættes.

Planlægningsblanket 4: Temperatur- og modenhedsberegning

Nødvendige oplysninger for at foretage hærdeteknisk EDB-simulering af temperaturer og modenhedsudvikling.

Efter planlægningen kan inspekionsblanketterne i bilag 3 anvendes.

### **Der er følgende skemaer til inspektion:**

#### **Inspektionsblanket 1: Planlagt efterbehandling**

Angiver, hvilke typer efterbehandling, der bør anvendes i løbet af hærdningsperioden.

#### **Inspektionsblanket 2: Udført efterbehandling**

Den udførte efterbehandling noteres og sammenholdes med de stillede krav.

#### **Inspektionsblanket 3: Modenhedsberegning**

Kan anvendes til modenhedsberegning på baggrund af udført temperaturmåling i efterbehandlingsperioden.

## **4.1 Planlægning**

I planlægningsfasen skal der tages stilling til en række forhold vedrørende beton, efterbehandlingsmetoder og klimaforhold. Dette omtales i det følgende.

### **4.1.1 Beton**

Kravene til efterbehandling afhænger blandt andet af betonsammensætningen. Såfremt der er mulighed for at anvende forskellige betoner, som opfylder kravene i projektspecifikationen, bør der udføres hærdeteknisk beregning for hver beton.

Til temperatur- og modenhedsberegning kræves blandt andet kendskab til betonens bindemiddelindhold og adiabatiske varmeudvikling. Ved forprøvning af beton indgår derfor bestemmelse af adiabatisk varmeudvikling.

Ved beregningen skal betonens udstøbningstemperatur også være kendt. Betonens udstøbningstemperatur kan muligvis oplyses af betonleverandøren. Betontemperaturen ved udstøbning kan også beregnes som anført i [8]. Alternativt kan følgende antages: På grund af betonens varmeudvikling vil betonens overfladetemperatur vanligt være på niveau med eller nogle få grader højere end lufttemperaturen ved udstøbning.

### **4.1.2 Efterbehandlingsmetoder**

Efterbehandlingsmetoder vurderes og bestemmes ud fra økonomiske og tekniske hensyn, som er omtalt i kapitel 3.

### **4.1.3 Klimaforhold**

Aktuelle data fra byggepladsens nærmeste vejrstation er optimalt til fastsættelse af lufttemperatur og vindhastighed. Såfremt disse data ikke er tilgængelige, kan skema 2.6 anvendes til bestemmelse af lufttemperatur, relativ luftfugtighed og vindhastighed.

Der bør gennemregnes forskellige vejsituationer, da klimaet kan have stor indflydelse på efterbehandlingen.

Ved indendørs støbning i et lukket rum kan der typisk anvendes en vindhastighed på 2 m/s.

#### 4.1.4 Transmissionskoefficient

Til temperatur- og modenhebsberegning kræves kendskab til efterbehandlingens isoleringsevne - den såkaldte transmissionskoefficient.

Transmissionskoefficienten  $k$  beregnes af formel (4.1).

$$k = \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_k} + \left( \frac{e}{\lambda} \right)_{isol(1)} + \left( \frac{e}{\lambda} \right)_{isol(2)} + \dots + \left( \frac{e}{\lambda} \right)_{isol(N)} + \left( \frac{e}{\lambda} \right)_{form} \right)} \quad (4.1)$$

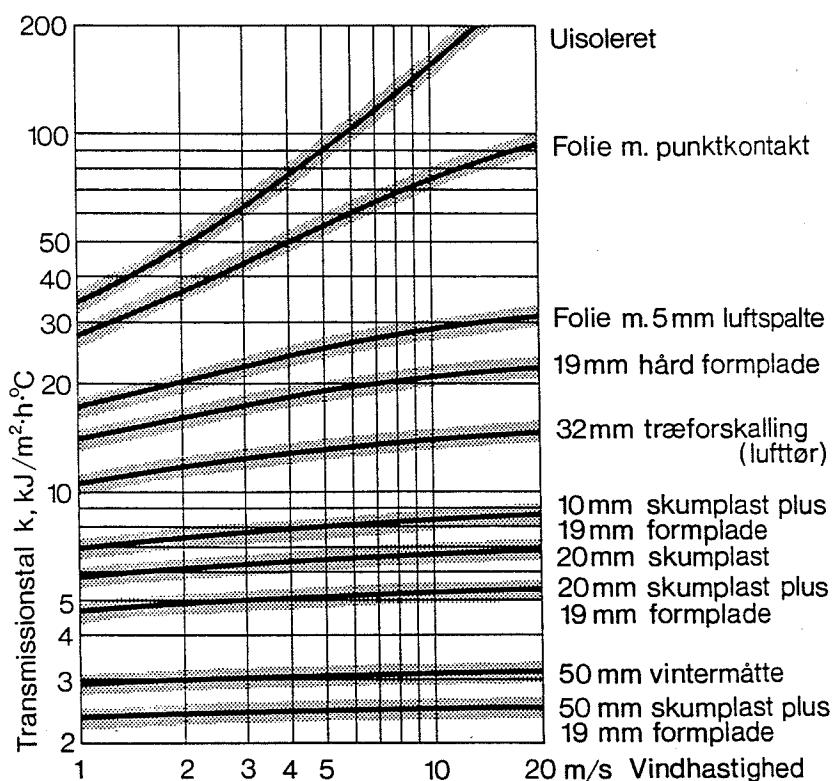
Det konvektive overgangstal  $\alpha_k$  for tvungen konvektion beregnes som funktion af vindhastigheden  $v$  ifølge [8] af formel (4.2):

$$\begin{aligned} \alpha_k &\approx 20 + 14 \cdot v & [kJ/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C] & \text{for } v \leq 5 \text{ m/s} \\ \alpha_k &\approx 25,6 \cdot v^{0,78} & [kJ/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C] & \text{for } v > 5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (4.2)$$

hvor:

$e$	=	Tykkelse af isolering, [m]
$isol(N)$	=	Antal isoleringslag
$k$	=	Transmissionskoefficient, [kJ/m <sup>2</sup> ·h·°C]
$v$	=	Vindhastighed, [m/s]
$\alpha_k$	=	Konvektivt varmeovergangstal, [kJ/m <sup>2</sup> ·h·°C]
$\lambda$	=	Varmeledningsevne, [kJ/m·h·°C].

I figur 4.1 ses beregnede transmissionskoefficienter  $k$  i afhængighed af vindhastigheden  $v$  for en række hyppigt anvendte form- og isoleringsmaterialer.



Figur 4.1. Transmissionskoefficient  $k$  i afhængighed af vindhastighed  $v$  for typiske form- og isoleringsmaterialer. Fra [8].

## 4.2 Inspektion

Inspektionen skal udføres i efterbehandlingsperioden for at sikre, at de stillede krav overholdes. Det skal dokumenteres, at krav til efterbehandlingens påbegyndelse og varigheden heraf er overholdt. Dette omtales herefter.

### 4.2.1 Seneste tidspunkt for efterbehandling

Benyttes skema 2.1 eller skema 2.2 for indendørsarbejde, skal betontemperaturen måles fra udstøbningstidspunktet og ind til, at efterbehandlingen påbegyndes. Temperaturen måles i en dybde på maksimalt 10 mm fra betonoverfladen. Temperaturmåling er beskrevet i [9].

Den gennemsnitlige målte betontemperatur for tidsrummet anvendes i skema 2.2 ved indendørsarbejde. Såfremt efterbehandlingen er etableret før de i skema 2.2 angivne tider, er krav til seneste tidspunkt for efterbehandling overholdt, og beregning er ikke nødvendig.

Anvendes derimod skema 2.1, beregnes fordampede vandmængder før etablering af efterbehandling af formel (4.3). Det skal eftervises, at den af (4.3) beregnede fordampede vandmængde er mindre end den aktuelle værdi i skema 2.1.

$$\text{Fordampet vandmængde} = w \cdot \Delta t, \quad [\text{kg/m}^2] \quad (4.3)$$

$\Delta t$  er tiden i timer fra udstøbning til efterbehandlingen etableres.  $w$  er fordampningshastigheden, der beregnes som beskrevet i eksempel 2.4. Ved beregningen anvendes den målte gennemsnitlige betontemperatur fra udstøbning til påbegyndelse af efterbehandling.

Lufttemperaturen er den målte gennemsnitlige for perioden fra udstøbning til efterbehandlings påbegyndelse. Relativ luftfugtighed er tilstrækkeligt dokumenteret ved brug af værdierne i skema 2.6. Den aktuelle vindhastighed måles eller oplyses af byggepladsens nærmeste vejrstasjon.

Betonens modenhed ved etablering af efterbehandling skal dokumenteres ved temperaturmåling. Det skal eftervises, at denne modenhed er mindre end eller lig med betonens afbindingstid  $\tau_0$  øget med 1 time.

### 4.2.2 Varighed af efterbehandling

Efterbehandlings varighed er altid udtrykt som et krav til modenhed i betonens overflade. Temperaturen, der benyttes til bestemmelse af modenhed, måles i en dybde på maksimalt 10 mm fra betonoverfladen.

Anvendes der udstyr til samtidig temperaturmåling og modenhedsberegnung, er dette tilstrækkelig dokumentation af betonens modenhed i overfladen.

Ved temperaturmåling uden samtidig modenhedsberegnning skal modenheten beregnes i betonens hærdningsperiode. Modenhedsberegnning omtales i det følgende eksempel.

**Eksempel 4.1. Beregning af betons modenhed.** En betons modenhed i overfladen ønskes beregnet ud fra en temperaturmåling, der er foretaget 5 mm fra overfladen. I skema 4.1 ses inspekionsblanket 3 udfyldt.

Betonens overfladetemperatur  $\theta_{\text{beton}}$  er målt til tiderne  $t$  [timer] efter udstøbning. Resultater fremgår af de to første kolonner i skema 4.1. I tredie kolonne beregnes tidsforskelle  $\Delta t$  mellem to temperaturmålinger. I fjerde kolonne bestemmes den gennemsnitlige betontemperatur  $\bar{\theta}_{\text{beton}}$  af to følgende målte temperaturer.

$H$  er hastighedsfaktoren, der kan aflæses eller beregnes af bilag 4.  $H$  beregnes på baggrund af gennemsnitstemperaturen  $\bar{\theta}_{\text{beton}}$ . Modenhedstilvæksten  $\Delta M$  i sjette kolonne findes af:  $H \cdot \Delta t$ . Betonens modenhed  $M$  i sidste kolonne bestemmes ved summation over  $\Delta M$ -kolonnen.

Af skema 4.1 aflæses det, at betonen for eksempel har opnået en modenhed  $M$  på 3,2 timer efter  $t = 6$  (klokke) timer. Efter 28 (klokke) timer er betonens modenhed 21 timer.

Efterbehandlingen må tidligst fjernes, når betonen har opnået den i kapitel 2.2 krævede modenhed  $M$ .

$t$ [timer]	$\theta_{\text{beton}}$ [°C]	$\Delta t$ [timer]	$\bar{\theta}_{\text{beton}}$ [°C]	$H$	$\Delta M$ [timer]	$M$ [timer]
0	10					0
6	12	6	11	0,54	3,2	3,2
9	13	3	12,5	0,62	1,9	5,1
12	14	3	13,5	0,67	2,0	7,1
15	15	3	14,5	0,72	2,2	9,3
19	16	4	15,5	0,77	3,1	12,4
21	17	2	16,5	0,83	1,7	14,1
25	19	4	18	0,90	3,6	17,7
26	21	1	20	1,00	1,0	18,7
28	25	2	23	1,15	2,3	21,0

Skema 4.1. Modenhedsberegnung ud fra udført temperaturmåling. Hastighedsfaktoren  $H$  bestemmes som anført i bilag 4.

# 5. Eksempler på planlægning

I dette kapitel vises to eksempler på planlægning af efterbehandling. I det ene tilfælde planlægges efterbehandlingen af et gulv - og i det andet planlægges efterbehandlingen af en væg.

## 5.1 Gulv støbt i august

Der skal udstøbes gulv i august måned. I planlægningsfasen undersøges både forskellige betoner og klimaforhold.

### 5.1.1 Beton

Fra projektspecifikationen haves, at gulvet skal opfylde kravene til aggressiv miljøklasse.

Der er mulighed for at anvende tre betontyper: A, B og C, som alle opfylder projektspecifikationen. Ud fra betonernes BBB-blanketter er skema 5.1 udfyldt angående indhold af mikrosilika MS og flyveaske FA.

For de aktuelle indhold af FA og MS er den maksimalt fordampede vandmængde før etablering af efterbehandling aflæst af skema 2.1. Tallene herfra er indsat i sidste kolonne i skema 5.1.

Beton-type	FA + MS, vægt-% af bindemiddel	MS, vægt-% af bindemiddel	Maksimalt fordampet vandmængde før efterbehandling, kg/m <sup>2</sup>
A	20,2	3,4	1,5
B	10	0	3,0
C	0	0	6,0

Skema 5.1. Indhold af FA og MS i betonerne: A, B og C. Krav til maksimalt fordampet vandmængde før efterbehandling er aflæst af skema 2.1.

Betonernes adiabatiske varmeudvikling er målt og fremgår af BBB-blanketten, og resultater fremgår af skema 5.2.

Betontype	Bindemiddel- indhold, [kg/m <sup>3</sup> ]	Q <sub>a</sub> , [kJ/kg bindemiddel]	τ <sub>e</sub> , [timer]	α
A	357	280	14,2	0,96
B	341	267	15,8	1,01
C	400	388	9,9	0,88

Skema 5.2. Beton A, B og C's varmeudvikling: Q<sub>a</sub>, τ<sub>e</sub> og α er bestemt ved forsøg.  
Bindemiddelindholdet = C + FA + MS er fra betonernes BBB-blanket.

Som eksempel fremgår data for beton A af skema B5.1.1 i bilag 5.1.

Betonleverandøren har oplyst, at betonen leveres i august måned med en temperatur på typisk 20°C.

### **5.1.2 Klimadata**

I dette eksempel planlægges der for følgende fem klimasituationer:

#### Situation 1:

Gulvet støbes i august, hvor typiske klimadata aflæses af skema 2.6. Luftens gennemsnitstemperatur for et augustdøgn er 15,7°C. Byggepladsen ligger i Odense, hvor der er en landstation, og vindhastigheden aflæses til 4 m/s. Gulvet planlægges støbt om morgen, hvor relativ luftfugtighed aflæses til 85% kl. 8. Disse data til beregning er som eksempel angivet i skema B5.1.2 i bilag 5.1. Denne situation betegnes i det følgende: "Typisk august-klima".

Betontemperatur	= 20°C
Lufttemperatur	= 15,7°C
Relativ luftfugtighed, RF	= 85%
Vindhastighed, v	= 4 m/s

#### Situation 2:

I planlægningen tages der højde for, at udstøbningen kan blive udskudt til om eftermidagen. Den relative luftfugtighed aflæses af skema 2.6 til 68% kl. 14. Beton- og lufttemperatur samt vindhastighed er identiske med situation 1.

Betontemperatur	= 20 °C
Lufttemperatur	= 15,7 °C
Relativ luftfugtighed	= 68%
Vindhastighed	= 4 m/s

#### Situation 3:

I planlægningen tages der højde for kraftigere vind end gennemsnitsværdien - svarende til vindstyrken "Stiv kuling". Ifølge skema 2.5 svarer dette til en vindhastighed på typisk 15 m/s. Dette undersøges, da vindhastigheden på udstøbningstidspunktet ofte er vanskelig at forudsige. Der planlægges udstøbt om morgen, hvor luft- og betontemperatur samt relativ luftfugtighed er identiske med situation 1.

Betontemperatur	= 20 °C
Lufttemperatur	= 15,7 °C
Relativ luftfugtighed	= 85%
Vindhastighed	= 15 m/s

#### Situation 4:

I planlægningen inddrages det, at der udstøbes om eftermiddagen, hvor relativ luftfugtighed er 68% kl. 14. (skema 2.6). Øvrige data svarer til situation 3 med forholdsvis høj vindhastighed på 15 m/s (Stiv kuling).

Betontemperatur	= 20 °C
Lufttemperatur	= 15,7 °C
Relativ luftfugtighed	= 68%
Vindhastighed	= 15 m/s

#### Situation 5:

Der tages højde for, at lufttemperaturen ved udstøbning bliver lavere end døgnmidletemperaturen. Ifølge skema 2.6 er der mulighed for, at lufttemperaturen er 10 °C, som anvendes i beregningen. Øvrige data svarer til situation 1.

Betontemperatur	= 20 °C
Lufttemperatur	= 10 °C
Relativ luftfugtighed	= 85%
Vindhastighed	= 4 m/s

### **5.1.3 Seneste tidspunkt for efterbehandling**

Der er flere muligheder for at bestemme seneste tidspunkt for påbegyndelse af efterbehandling. I de følgende 3 eksempler er der gennemgået forskellige måder til bestemmelse af seneste tidspunkt for efterbehandling. Som eksempel er der anvendt situation 1 med betontype A. Data ses i kapitel 5.1.2.

**Eksempel 5.1: Aflæsning af seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling.** Af skema 5.1 ses det, at der maksimalt må fordampe 1,5 kg/m<sup>2</sup> før etablering af efterbehandling af beton A. Kurven med følgende benævnelse i bilag 1 anvendes til aflæsning af tiden for fordampning af 1,5 kg/m<sup>2</sup>, da denne er nærmest de aktuelle klimaforhold:

$$\begin{aligned} \text{Betontemperatur} &= 20^{\circ}\text{C} \\ \text{Lufttemperatur} &\geq 15^{\circ}\text{C} \\ 80\% \leq \text{RF} &< 90\%. \end{aligned}$$

Med en vindhastighed på 4 m/s aflæses for en vandmængde på 1,5 kg/m<sup>2</sup>: 3,3 timer ≈ 3 timer og 20 minutter.

Resultatet er, at efterbehandlingen skal være etableret inden 3 timer og 20 minutter efter udstøbning ved de angivne klimaforhold for august.

**Eksempel 5.2: Beregning af seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling.** Af nomogrammet i figur 2.2 aflæses partialtryk P af vanddamp i beton og luft til følgende for situation 1:

$$\begin{aligned} P_{\text{beton}}(20^{\circ}\text{C}) &= 2,4 \text{ kPa} & (\text{RF} = 100\%) \\ P_{\text{luft}}(15,7^{\circ}\text{C}) &= 1,5 \text{ kPa} & (\text{RF} = 85\%) \end{aligned}$$

$$\text{Damptrykspotentialet } \Delta P = P_{\text{beton}} - P_{\text{luft}} = 0,9 \text{ kPa.}$$

Fordampningshastigheden w aflæses eller beregnes, for v = 4 m/s, af nederste figur 2.2 til 0,40 kg/m<sup>2</sup> · h.

Tiden fra udstøbning svarende til fordampning af  $1,5 \text{ kg/m}^2$  bestemmes ved brug af formel (2.5):

$$\text{Tid} = \frac{1,5 \text{ kg/m}^2}{0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}} = 3,8 \text{ timer} \quad (5.1)$$

Det vil sige, at efterbehandlingen skal være etableret inden 3,8 timer  $\approx 3$  timer og 50 minutter efter udstøbning ved de angivne typiske klimaforhold (situation 1).

Af eksempel 5.1 og 5.2 ses det, at der fås lidt kortere tid til etablering af efterbehandling ved brug af kurverne i bilag 1 i forhold til at udføre beregning. Dette skyldes, at kurverne i bilag 1 dækker et område af både lufttemperatur og relativ luftfugtighed, og ved beregning anvendes der konstante værdier.

Resultatet af eksempel 5.1 og 5.2 overføres til skema B5.1.2 i bilag 5.1.

**Eksempel 5.3: Skema til aflæsning af seneste tidspunkt for efterbehandling.** Skema 2.2 kan benyttes til bestemmelse af seneste tidspunkt for påbegyndelse af efterbehandling. Gulvet udstøbes udendørs. Med den anvendte betontype A skal gulvet senest efterbehandles 1 time efter udstøbning, da betonens indhold af FA + MS er 20,2%, og MS er 3,4%, jf. skema 5.1. Kravet anføres nederst i skema B5.1.2 i bilag 5.1.

Da der er udført beregning, foretages efterbehandling senest 3 timer og 50 minutter fra udstøbning for klimasituation 1 i august.

Af skema B5.1.2 fremgår det, at lagtykkelsen er større end 0,2 m. Tidsrummet på 3,8 timer (3 timer og 50 minutter) skal derfor ikke korrigeres (eksempel 5.2). Ved lagtykkelser mindre end 0,2 m korrigeres seneste tid for etablering af efterbehandling som anført i formel (2.6).

I skema 5.4 ses beregnede seneste tider for etablering af efterbehandling af betontype A, B og C ved de undersøgte fem klimaforhold for august måned. Resultater er angivet uden parentes i skema 5.4.

Forudsætningen for tiderne (uden parentes), som er anført i skema 5.4 er, at den relative fugtighed i betonoverfladen er 100%. Dette gælder kun i den tidlige hærdningsperiode (eksempel 2.4 og 5.2). Derfor undersøges følgende.

Som anført i kapitel 2.1 skal efterbehandlingen være påbegyndt, inden der er forløbet 1 modenhedstidsefter betonens afbindingstid  $\tau_0$ . Herefter kontrolleres det, om krav er overholdt. Af skema 5.3 fremgår betonernes afbindingstid  $\tau_0$  og tilhørende modenhed svarende til seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling.

Betontype	Afbindingstid, [Modenhedstimer]	Seneste tidspunkt for efterbehandling, [Modenhedstimer]
A	5,5	6,5
B	4,0	5,0
C	5,0	6,0

Skema 5.3. Betonernes afbindingstid og seneste tidspunkt for efterbehandling.

Hvornår betonerne opnår de i skema 5.3 angivne modenheder afhænger af temperaturforløbet i betonoverfladen. Til bestemmelse af disse tider er der foretaget hærdeteknisk EDB-simulering som omtales nærmere i kapitel 5.1.5. I skema 5.4 ses i parentes angivet tider for opnåelse af modenhederne i skema 5.3, sidste kolonne.

Det er mindste tidsangivelse, for hver beton og klimasituation i skema 5.4, der bestemmer seneste tidspunkt for påbegyndelse af efterbehandling.

Situation	Klimaforhold	Seneste tidspunkt for efterbehandling		
		Beton A	Beton B	Beton C
1 “Typisk for august”	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $\text{RF} = 85 \%$ $v = 4 \text{ m/s}$	3,8 timer  (6,8 timer)	7,5 timer	15,0 timer  (6,1 timer)
	$\Delta P = 0,9 \text{ kPa}$ $w = 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$			
2	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $\text{RF} = 68 \%$ $v = 4 \text{ m/s}$	2,8 timer  (6,8 timer)	5,7 timer	11,3 timer  (6,1 timer)
	$\Delta P = 1,2 \text{ kPa}$ $w = 0,53 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$			
3	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $\text{RF} = 85 \%$ $v = 15 \text{ m/s}$	1,3 timer  (7,2 timer)	2,5 timer	5,0 timer  (6,4 timer)
	$\Delta P = 0,9 \text{ kPa}$ $w = 1,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$			
4	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $\text{RF} = 68 \%$ $v = 15 \text{ m/s}$	0,9 timer  (7,2 timer)	1,9 timer	3,8 timer  (6,4 timer)
	$\Delta P = 1,2 \text{ kPa}$ $w = 1,60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$			
5	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $\text{RF} = 85 \%$ $v = 4 \text{ m/s}$	2,5 timer  (8,5 timer)	5,0 timer	10,0 timer  (6,8 timer)
	$\Delta P = 1,40 \text{ kPa}$ $w = 0,60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$			
Fra skema 2.2		1,0	2,0	4,0

Skema 5.4. Beregnede seneste tidspunkter for efterbehandling af betontype A, B og C. Der er undersøgt 5 klimasituationer og konstant betontemperatur på  $20^\circ\text{C}$ .

### **5.1.4 Varighed af efterbehandling**

Vælger entreprenøren at efterbehandle med forseglingsmiddel senest 3 timer og 50 minutter efter udstøbning ved typiske august-klimaforhold (situation 1), skal planlægningsblanket 3 ikke udfyldes. Ved efterbehandling med forseglingsmiddel inden dette tidspunkt er krav til varigheden overholdt.

Det vælges at efterbehandle med plastfolie, og planlægningsblanket 3 (skema B5.1.3) er derfor udfyldt for betontype A.

Da betontyperne A, B og C opfylder kravene til aggressiv miljøklasse, skal der efterbehandles indtil en reaktionsgrad på mindst 85 % er opnået, jf. skema 2.3. Af formel (2.3) beregnes for hver beton modenheten M for opnåelse af  $R = 85\%$ . Af skema B5.1.3 ses som eksempel, at betontype A opnår denne reaktionsgrad efter 94 modenhedstimer. Beregningen foretages ved hjælp af parametrene for den adiabatiske varmeudvikling, som fremgår af betonblanketten.

Såfremt denne beregning ikke er udført, skal for eksempel betontype A efterbehandles i minimum 120 modenhedstimer, jf. skema 2.4. Dette skyldes dels betonens v/c-forhold på 0,41 og dels miljøklassen, som er aggressiv.

Af skema B5.1.3 fremgår det som resultat, at betontype A skal efterbehandles i minimum 94 modenhedstimer.

Ved overslagsberegning kan det vurderes, hvor lang tid det varer, før betonoverfladen opnår en given modenhed, hvilket omtales i følgende eksempel 5.4.

**Eksempel 5.4. Tid for opnåelse af modenhedskrav - Overslagsberegning.** Betonen vil antageligt på grund af både ringe lagtykkelse og isolering relativt hurtigt opnå temperaturligevægt med luften, som typisk er  $15^{\circ}\text{C}$  for august.

Antages det, at betontemperaturen er konstant  $15^{\circ}\text{C}$ , beregnes det af følgende formel (5.2), at plastfolien tidligst må fjernes efter cirka 125 timer for betontype A.

$$\text{Tid} = \frac{\text{Tidspunkt for opnåelse af krævet reaktionsgrad}}{\text{Hastighedsfaktoren}} = \frac{94 \text{ timer}}{0,75} = 125 \text{ timer (5.2)}$$

Tallet 0,75 er hastighedsfaktoren H ved  $15^{\circ}\text{C}$ , hvor H er aflæst af temperaturfunktionen i bilag 4.

### **5.1.5 Temperatur- og modenhedsberegning**

Ønskes der en mere nøjagtig bestemmelse af, hvornår plastfolien tidligst må fjernes i forhold til eksempel 5.4, foretages der en hærdeteknisk EDB-simulering, som omtales heretter.

Ved beregningen afdækkes der med plastfolie efter de i skema 5.4 angivne tider. I skema 5.5 ses hvor lang tid det ved beregning varer, før betonerne A, B og C har opnået en reaktionsgrad R på 85 %, og plastfolien tidligst må fjernes. Anvendte klimadata er omtalt i kapitel 5.1.2. Transmissionskoefficenter  $k$  i skema 5.5 er bestemt i henhold til kapitel 4.1.4.

I skema B5.1.4 i bilag er som eksempel anvendt betontype A og klimasituation 1. Transmissionskoefficenter i skema B5.1.4 er aflæst af figur 4.1 ved en vindhastighed  $v = 4 \text{ m/s}$  for en fri betonoverflade og en med plastfolie.

Situation	Klimaforhold	Tidligste tidspunkt for fjernelse af plastfolie i timer		
		Beton A	Beton B	Beton C
1 og 2	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $v = 4 \text{ m/s}$	104	112	87
	Transmissionskoefficenter: $k(\text{fri overflade}) = 75 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{plastfolie}) = 50 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$			
3 og 4	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $v = 15 \text{ m/s}$	110	114	99
	Transmissionskoefficenter: $k(\text{fri overflade}) = 200 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{plastfolie}) = 85 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$			
5	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luf}}$ $v = 4 \text{ m/s}$	144	151	124
	Transmissionskoefficenter: $k(\text{fri overflade}) = 75 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{plastfolie}) = 50 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$			

Skema 5.5. Beregnede tidligste tidspunkter for fjernelse af efterbehandling (plastfolie) svarende til en reaktionsgrad R på 85% i betonoverfladen. Der er tildækket med plastfolie efter tiderne i skema 5.4 fra udstøbning.

Herefter kan inspekitionsblanket 1 udfyldes for hver beton og klimasituation. Den aktuelle inspekitionsblanket, som overdrages pladsformanden, svarer til forholdene vedrørende beton og klima på udstøbningstidspunktet. I skema B5.1.5 ses inspekitionsblanketten udfyldt for betontype A ved typiske klimaforhold i august (situation 1).

## 5.2 Væg støbt i oktober

I dette eksempel planlægges efterbehandlingen for en 700 mm tyk væg.

### 5.2.1 Overordnede krav til betonen

Fra projektspecifikationen haves, at væggen skal opfylde kravene til aggressiv miljø-kasse.

### **5.2.2 Beton**

Der er mulighed for at anvende betontype: A, B og C, som er beskrevet i forrige kapitel 5.1.1. Der udføres en hærdeteknisk EDB-simulering for disse betoner. Som eksempel ses data for betontype B i skema B5.2.1 i bilag 5.2.

Betonen udstøbes i form. Umiddelbart efter udstøbning afdækkes der med plastfolie fastgjort til vægtoppen. Krav til seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling er derfor overholdt. Dette er noteret i skema B5.2.4 for beton B.

Betonleverandøren har oplyst, at betontemperaturen følger lufttemperaturens variationer, og betontemperaturen er typisk nogle grader højere end lufttemperaturen i oktober måned.

### **5.2.3 Krav til varighed af efterbehandling**

Efterbehandlingens varighed er fastlagt ud fra kapitel 2.2. Af skema 2.3 og 2.4 aflæses for de anvendte betoner, at varigheden minimum skal svare til en reaktionsgrad på 85% eller 120 modenhedstimer. Oplysningerne er anført i skema B5.2.2 i bilag 5.2 for betontype B.

Heraf fremgår det, at beton B opnår en reaktionsgrad på 85% efter 95 modenhedstimer, og betonen skal derfor efterbehandles i minimum 95 modenhedstimer. Betontype C opnår  $R = 0,85$  efter 78 modenhedstimer. Betontype A opnår denne reaktionsgrad efter 94 modenhedstimer.

For alle tre betoner efterbehandles indtil reaktionsgraden som minimum er 85 %.

### **5.2.4 Efterbehandlingsmetoder**

Entreprenøren skal anvende 5/4" brædder (32 mm træforskalling) for at opnå den specifiserede overfladestruktur.

Forskallingen ønskes genanvendt så hurtigt som muligt svarende til afformning dagen efter udstøbning (18 timer efter udstøbning). Der er mulighed for at anvende forseglingsmiddel eller presenning efter afformning.

### **5.2.5 Klima og transmissionskoefficenter**

I planlægningsfasen undersøges her tre forskellige klimasituationer for oktober måned.

#### Situation 1:

Betontemperatur	= 15°C
Lufttemperatur	= 9,1°C
Vindhastighed	= 5 m/s

Typiske data for oktober måned fra skema 2.6. Væggen støbes i Roskilde, hvor der er en landstation, og vindhastigheden aflæses til 5 m/s.

Situation 2:

Betontemperatur	= 20°C
Lufttemperatur	= 16°C
Vindhastighed	= 5 m/s

Relativt høj temperatur og typisk vindhastighed jf. skema 2.6. Lufttemperaturen er oplyst af vejrmeldingen. (Let vind, jf. skema 2.5).

Situation 3:

Betontemperatur	= 20°C
Lufttemperatur	= 16°C
Vindhastighed	= 10 m/s

Som situation 2, men med højere vindhastighed, da denne typisk er meget vanskelig at forudsige for hærdningsperioden (Frisk vind, jf. skema 2.5).

I henhold til kapitel 4.1.4 fås følgende transmissionskoefficienter k med v = 5 m/s:

$$32 \text{ mm træforskalling: } k = 14 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Uisolert overflade

$$(\text{også med forseglingsmiddel}): k = 90 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Presenning:

$$k = 19 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

For v = 10 m/s fås:

$$32 \text{ mm træforskalling: } k = 15 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Uisolert overflade:

$$(\text{også med forseglingsmiddel}): k = 150 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Presenning:

$$k = 22 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

## 5.2.6 Temperatur- og modenhedsberegning

Af skema 5.6 ses beregnede tidligste tider i timer for fjernelse af efterbehandling (presenning) for betontyperne A, B og C ved de tre undersøgte klimaforhold.

Til hærdeteknisk EDB-simulering af betontype B's temperatur- og modenhedsforløb i overfladen er anvendt data fra skema B5.2.3, bilag 5.2 og adiabatisk varmeudvikling fra skema B5.2.1, bilag 5.2. Typiske klimadatal fra oktober fra kapitel 5.2.5 er som eksempel anført i skema B5.2.3, bilag 5.2.

I nogle beregningsprogrammer angives betondensitet, varmefyldte og varmeledningsevne som konstanter (skema B5.2.3), og i andre programmer beregnes disse størrelser automatiskt ud fra betonsammensætningen.

Situa-tion	Klima og beton	Tidligste fjernelse af presenning		
		Beton A	Beton B	Beton C
1	$\theta_{\text{beton}} = 15^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luft}} = 9,1^\circ\text{C}$ $v = 5 \text{ m/s}$	$\approx 72 \text{ timer}$ $\approx 3 \text{ døgn}$	$\approx 84 \text{ timer}$ $\approx 3,5 \text{ døgn}$	$\approx 36 \text{ timer}$ $\approx 1,5 \text{ døgn}$
	$k(\text{form}) = 14 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{fri overf.}) = 90 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{presenning}) = 19 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$			
2	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luft}} = 16,4^\circ\text{C}$ $v = 5 \text{ m/s}$	$\approx 53 \text{ timer}$ $\approx 2,2 \text{ døgn}$	$\approx 60 \text{ timer}$ $\approx 2,5 \text{ døgn}$	$\approx 31 \text{ timer}$ $\approx 1,3 \text{ døgn}$
	$k(\text{form}) = 14 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{fri overf.}) = 90 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{presenning}) = 19 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$			
3	$\theta_{\text{beton}} = 20^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{luft}} = 16,4^\circ\text{C}$ $v = 10 \text{ m/s}$	$\approx 60 \text{ timer}$ $\approx 2,5 \text{ døgn}$	$\approx 67 \text{ timer}$ $\approx 2,8 \text{ døgn}$	$\approx 36 \text{ timer}$ $\approx 1,5 \text{ døgn}$ *)
	$k(\text{form}) = 15 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{fri overf.}) = 150 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$ $k(\text{presenning}) = 22 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{C}$			

Skema 5.6. Beregnet tidligste tidspunkt for fjernelse af efterbehandling (presenning) svarende til en reaktionsgrad på 85%. Afformning 18 timer efter udstøbning. Der er afdækket med presenning 1 time efter afformning. \*) Der er afformet 2 døgn efter udstøbning, ellers overskrides krav til temperaturforskelle i projektspecifikationen.

## Begreber

*Adiabatisk  
varmeudvikling*

Betons varmeudvikling under hærdning som funktion af modenhed, når der ikke sker varmetab til omgivelserne.

*Aktivitetsfaktor*

Faktor, der anvendes ved omregning af flyveaske og mikrosilica til et ækvivalent cementindhold. Aktivitetsfaktoren multipliceres med betonens indhold af flyveaske eller mikrosilica efter vægt. For flyveaske er der anvendt en aktivitetsfaktor på 0,5, og for mikrosilica er der benyttet en aktivitetsfaktor på 2.

*Bindemiddelindhold*

Betonens samlede indhold af cement, flyveaske og mikrosilica, enhed [kg/m<sup>3</sup>].

*Efterbehandling*

Foranstaltung til mindskelse af vandtab fra betonoverflade. Eksempler på efterbehandlingsmetoder er:  
Forskallingsform, plastfolie, presenning, mineralulds- og polystyrencelleplast-måtter, vanding, forseglingsmiddel på betonoverfladen og klimastyring.

*Forseglingsmiddel*

Tyndtflydende væske, som påsprøjtes overfladen af nyudstøbt beton til mindskelse af vandfordampningen. Forseglingsmiddel betegnes ofte curing.

*Hastighedsfaktor*

Angiver forholdet mellem reaktionshastigheden ved en givne temperatur i forhold til reaktionshastigheden ved referencetemperaturen, som er 20°C. Ved multiplikation af hastighedsfaktoren med tiden, fås betonens modenhed.

*Hærdningsproces*

Overordnet beskrivelse af, at beton er plastisk ved udstøbing og med tiden bliver gradvist stærkere og stivere på grund af øget reaktion mellem cement, puzzolan og vand.

*Modenhed*

Hærdningstid, i døgn eller timer, ved 20°C for opnåelse af en given styrke eller reaktionsgrad i betonen. Ved andre hærdningstemperaturer beregnes betonens modenhed ved hjælp af den såkaldte hastighedsfaktor.

*Plastisk svind*

Vandfordampning kan give trækspændinger i overfladen af nyudstøbt, plastisk beton. Der fås plastiske svindrevner i overfladen, såfremt trækspændingerne overstiger betonens trækstyrke i tidlig alder.

*Udtørring af  
hærdnende beton*

Beton kan udtørre blandt andet ved vandtab til omgivelserne. Alene på grund af de kemiske reaktioner i beton vil den fordampelige, frie vandmængde mindskes med øget hærdningsgrad - såkaldt selvudtørring.

*Vandtab fra  
frisk beton*

Der vil fordampe vand fra fri, nyudstøbt beton til omgivelserne, såfremt damptrykket i betonoverfladen er større end damptrykket i omgivelserne. Vandtab fra en fri, nyudstøbt betonoverflade styres af vindhastighed og forskel i damptryk mellem betonoverflade og omgivelser.

*Vandtransport  
i beton*

Ved hærdningsprocessens fremadskriden mindskes betonens transport af blandevand til omgivelserne, da transportformen bliver mere diffusionskontrolleret i forhold til, at vandbevægelsen til start sker i et sammenhængende pore-system.

## Symboler

C	Betonens cementindhold, enhed [kg/m <sup>3</sup> ].
e	Tykkelse af et isoleringslag, enhed [m].
E	Aktiveringsenergi, enhed [J/mol]. Aktiveringsenergien E er et mål for temperaturens indflydelse på hastigheden af kemiske reaktioner. Jo større aktiveringsenergi en kemisk reaktion har, desto mere øges hastigheden ved en given temperaturstigning.
FA	Betonens flyveaskeindhold, enhed [kg/m <sup>3</sup> ].
h	Timer.
H	Hastighedsfaktor. H angiver reaktionshastigheden ved en given temperatur i forhold til reaktionshastigheden ved referencetemperaturen, vanligt 20°C. H anvendes til beregning af betonens modenhed M.
k	Transmissionskoefficient, enhed [kJ/m <sup>2</sup> ·h·°C].
M	Modenhed, enhed [timer] eller [døgn]. Hærdningstid ved 20°C for opnåelse af en given styrke eller reaktionsgrad i betonen. Ved andre hærdningstemperaturer beregnes betonens modenhed ved hjælp af den såkaldte hastighedsfaktor.
MS	Betonens indhold af mikrosilica, enhed [kg/m <sup>3</sup> ].
P <sub>beton</sub>	Vanddampryk i betonoverflade, enhed [kPa].
P <sub>luft</sub>	Vanddampryk i betonens omgivelser, enhed [kPa].
Q(M)	Adiabatisk varmeudvikling for beton til en given modenhedstid M, enhed [kJ/kg bindemiddel].
Q <sub>∞</sub>	Beregnet slutvarme for M → ∞, enhed [kJ/kg bindemiddel]. Beregningsstørrelse, der indgår i Freieslebens model til beskrivelse af varmeudvikling i afhængighed af modenhed.
R̄	Gaskonstanten. R̄ ≈ 8,314 J/mol · K.

R	Reaktionsgrad, hydratiseringsgrad eller hærdningsgrad, er dimensionsløs. R angiver, hvor stor en del af det oprindelige bindemiddel (for eksempel cement, flyveaske og mikrosilika), der er omdannet ved reaktion. R bestemmes i praksis som forholdet mellem udviklet varmemængde til modenheten M: Q(M) og slutvarme $Q_{\infty}$ , det vil sige: $R = Q(M)/Q_{\infty}$ .
RF	Relativ fugtighed. RF er dimensionsløs. RF er defineret som: Vanddamps aktuelle partialtryk i forhold til mætningsdamptrykket eller: Fugtindhold i forhold til mætningsfugtindholdet.
t	Tid, enhed [timer].
v	Vindhastighed, enhed [m/s].
w	Fordampningshastighed af vand fra betonoverflade, enhed [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ].
ækv. v/c	Ækvivalent vand/cement-forhold. v/c angiver vægtforholdet mellem vand og cement i betonen. Såfremt betonen indeholder flyveaske, medregnes denne som cement, efter at vægten af flyveaske er multipliceret med 0,5. Indeholder betonen mikrosilika, medregnes denne som cement, efter at vægten af mikrosilica er multipliceret med 2.
$\alpha$	Krumningsparameter, der indgår i Freieslebens beregningsudtryk for adiabatisk varme- eller styrkeudvikling som funktion af modenhed.
$\alpha_k$	Konvektivt varmeovergangstal, enhed [ $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ].
$\Delta M$	Modenhedstilvækst i et givet tidsrum, enhed [timer].
$\Delta P$	Damptrykspotential, enhed [kPa]. $\Delta P$ angiver forskel i damptryk mellem en betonoverflade og omgivelserne.
$\Delta t$	Tidsforskelt, enhed [timer].
$\lambda$	Varmeledningsevne, enhed [ $\text{kJ}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ].
$\theta_{\text{beton}}$	Temperatur i betonoverflade, enhed [ $^\circ\text{C}$ ].
$\bar{\theta}_{\text{beton}}$	Gennemsnitlig temperatur i betonoverflade, enhed [ $^\circ\text{C}$ ]
$\theta_{\text{luft}}$	Air temperature, enhed [ $^\circ\text{C}$ ].

$\tau_e$

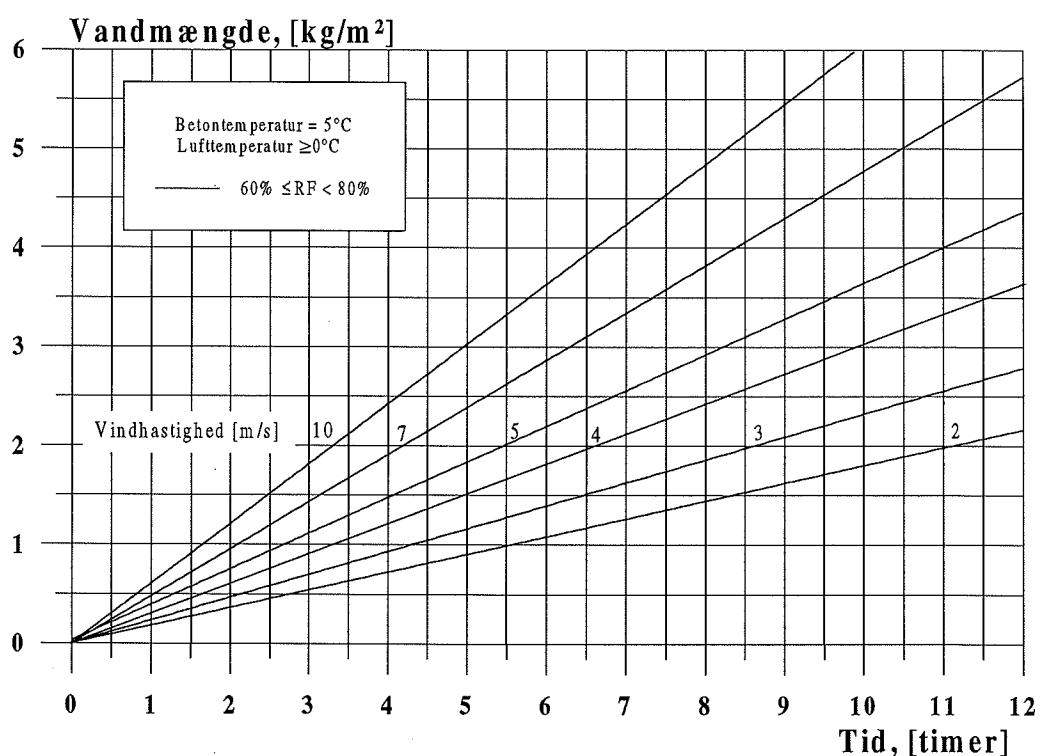
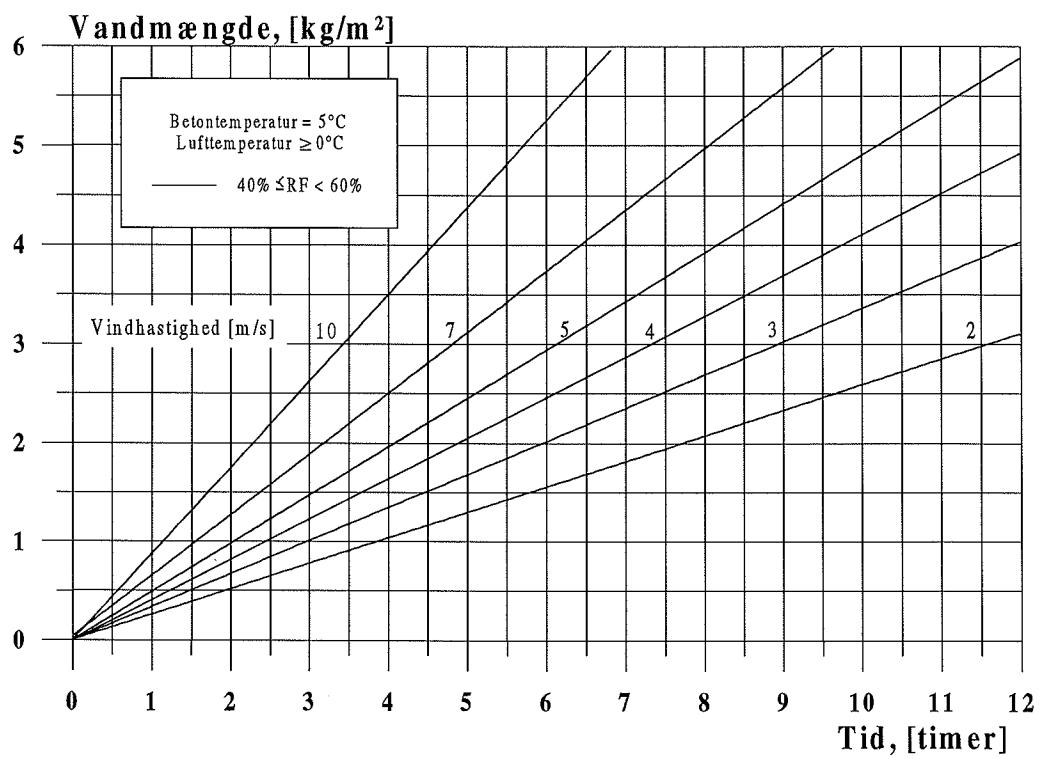
Tidskonstant, enhed [h]. Tidskonstanten  $\tau_e$  indgår i Freieslebens udtryk til beregning af adiabatisk varme- og styrkeudvikling som funktion af modenhed.

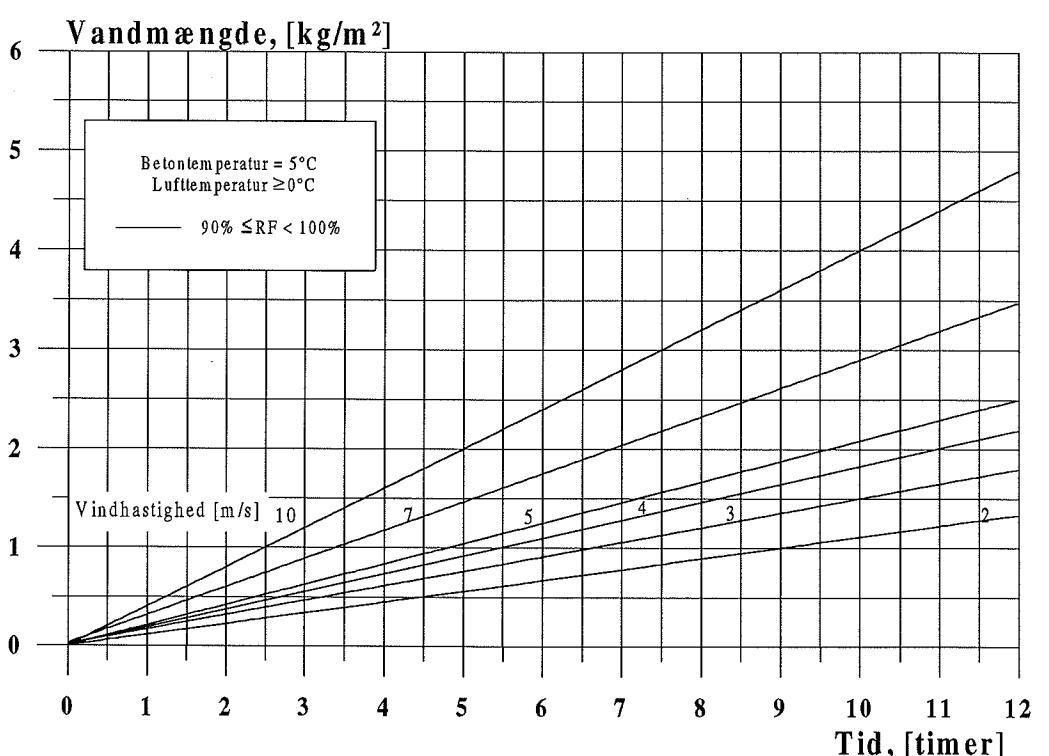
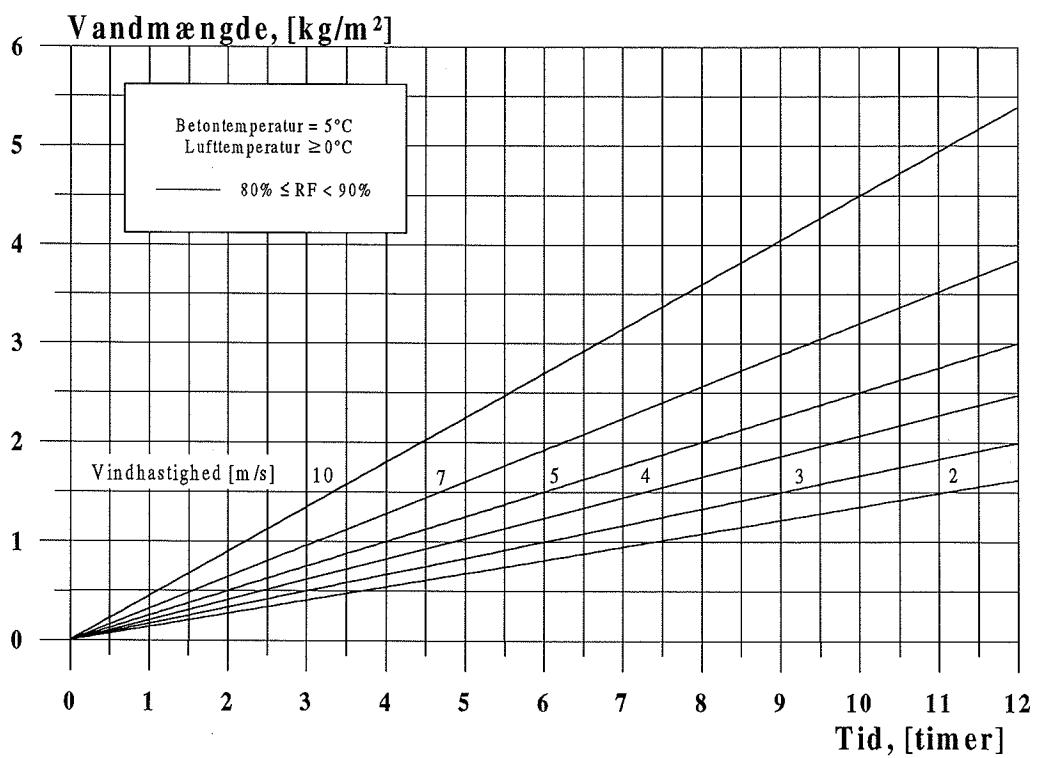
## **Litteratur**

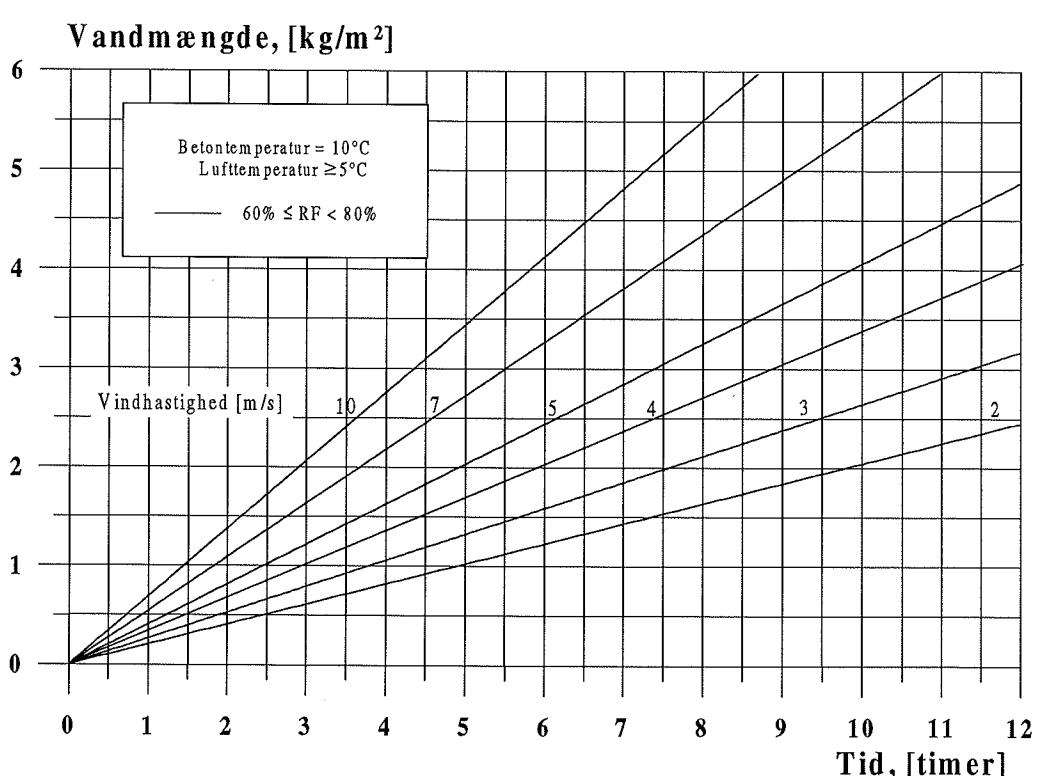
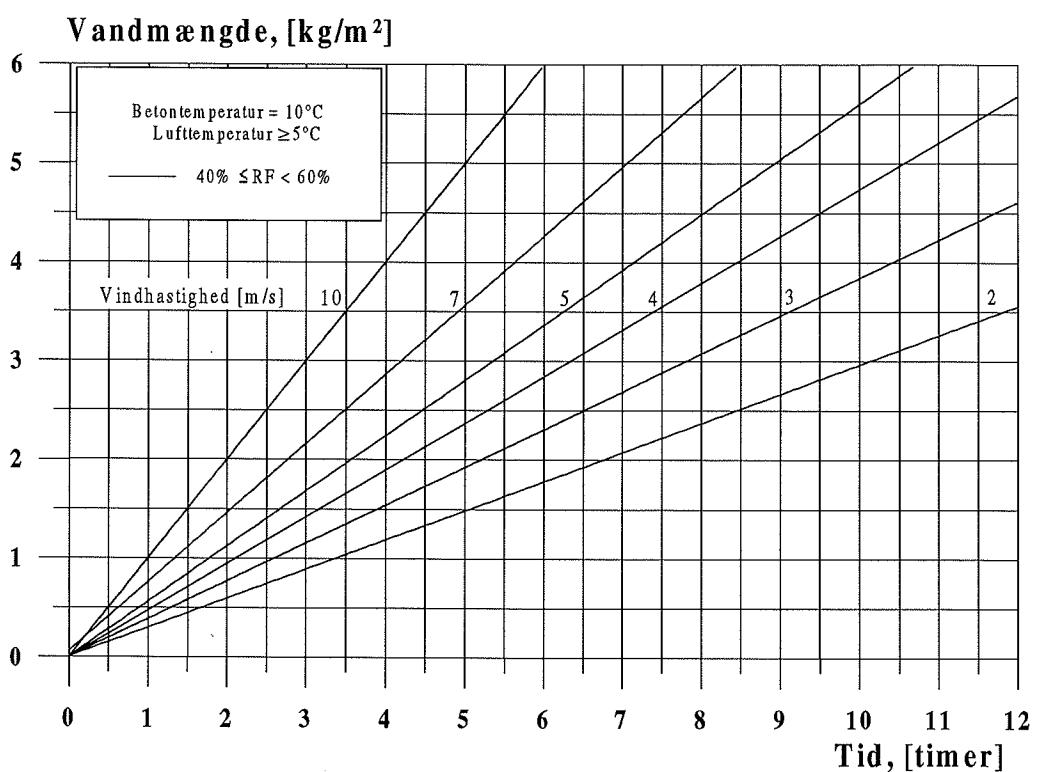
- [1] Berrig, A. & Haugaard M. & Fogh Jensen, P.: "HETEK, Curing, State of the Art", Rapport No. 37, ISBN 87 7491 6912, ISSN 0909 - 4288, UDK 624.012.4 621.795 693.548, Vejdirektoratet, 1996.
- [2] Riis, K. & Haugaard, M.: "HETEK - Curing - Phase 1: Laboratory Tests". Road Directorate report No. 73, 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.

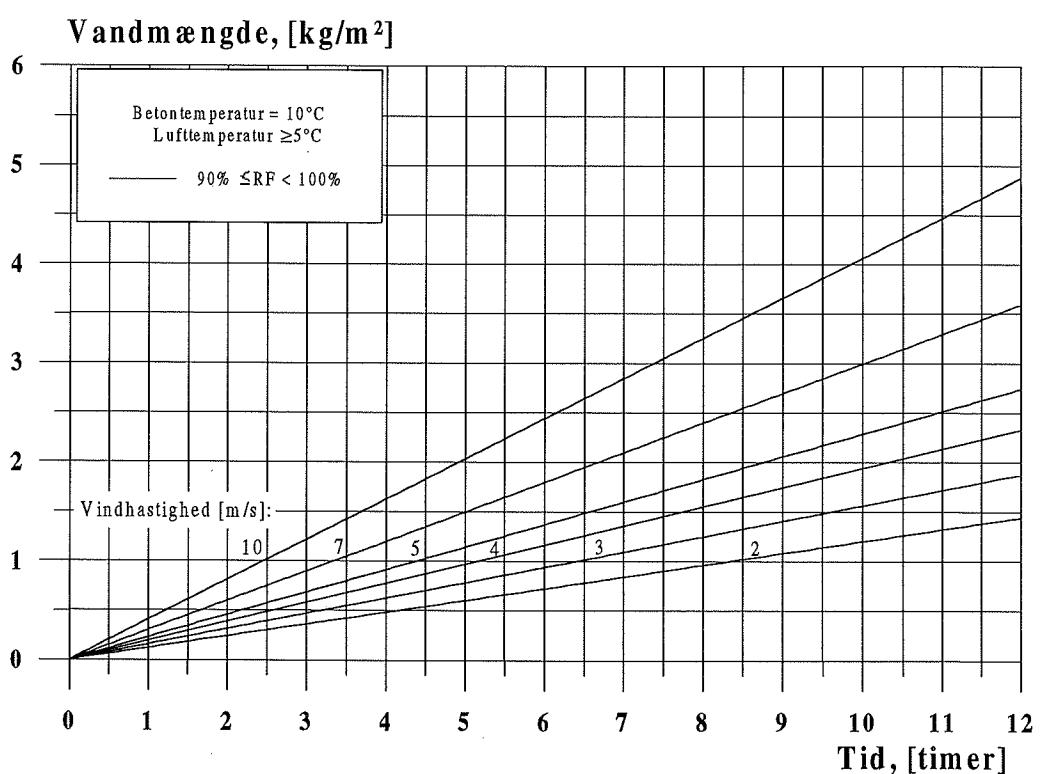
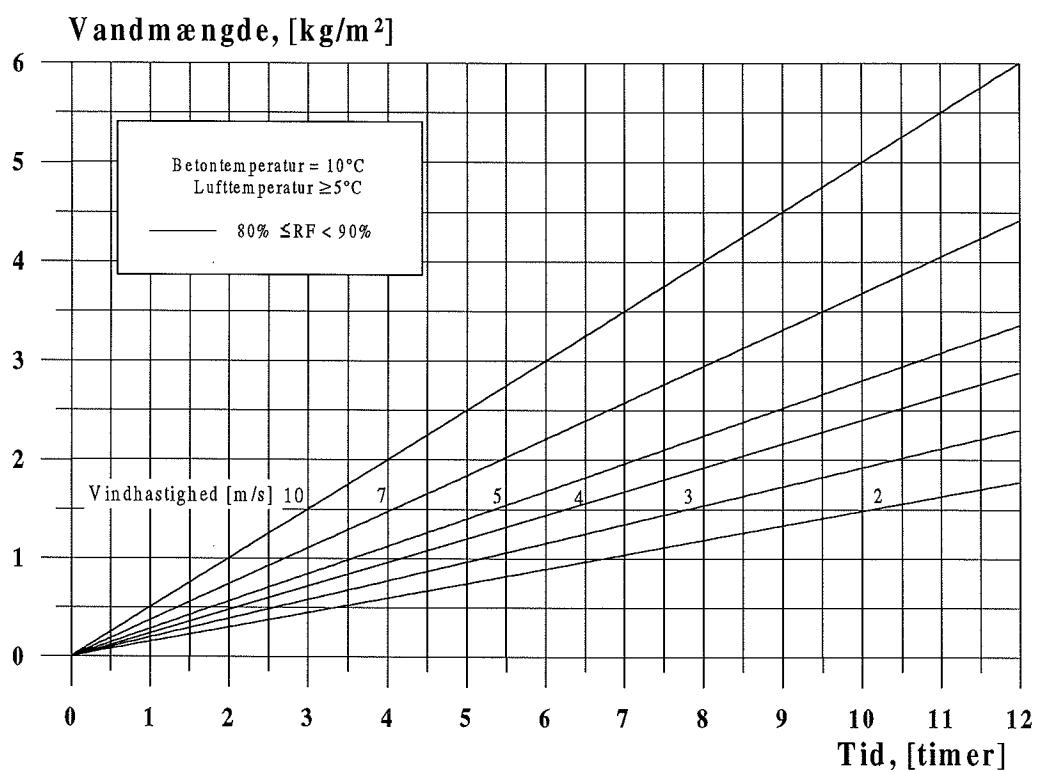
**Bilag 1:**

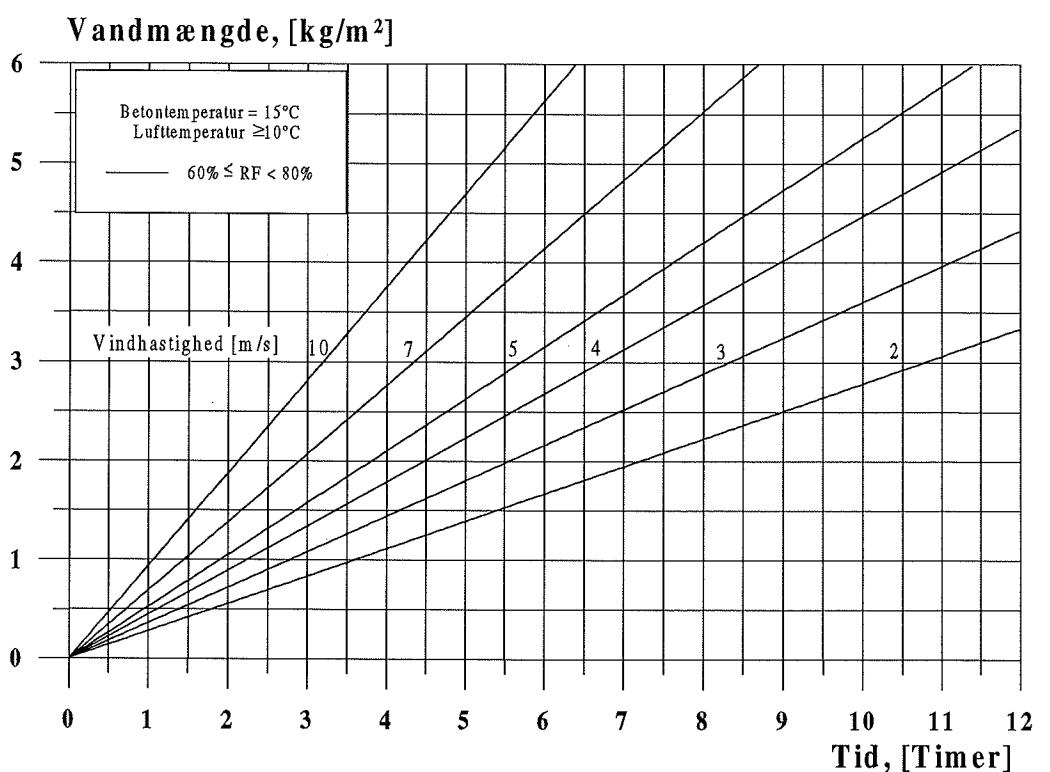
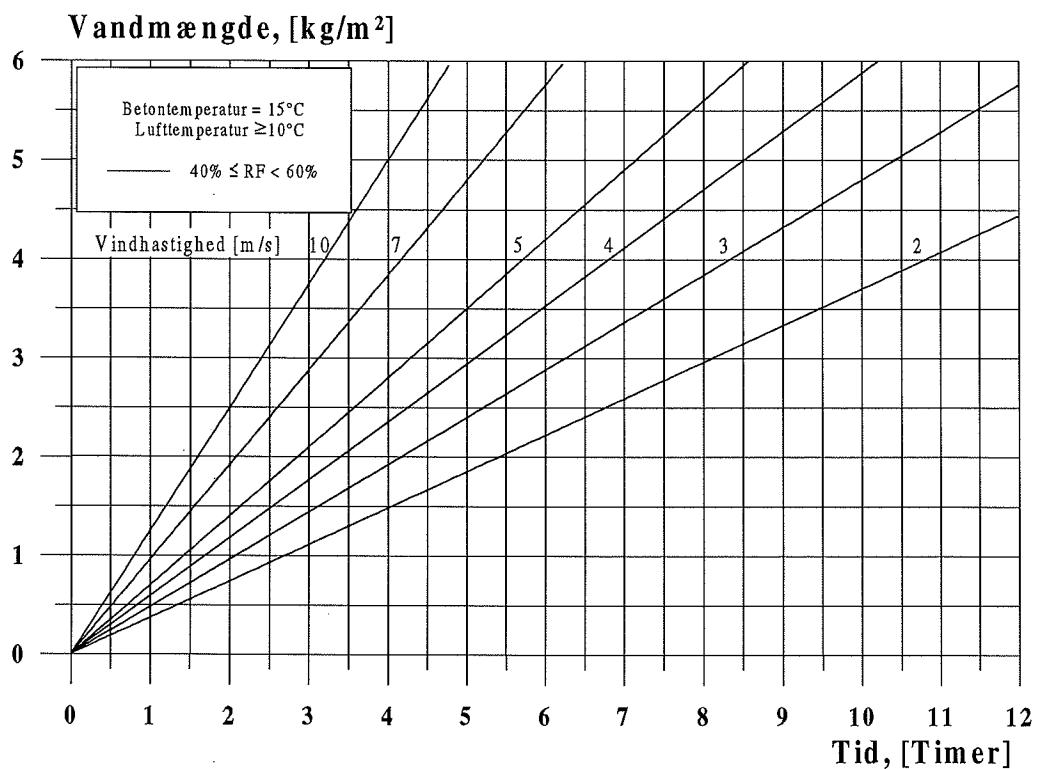
**Nomogrammer - Vandfordampning**

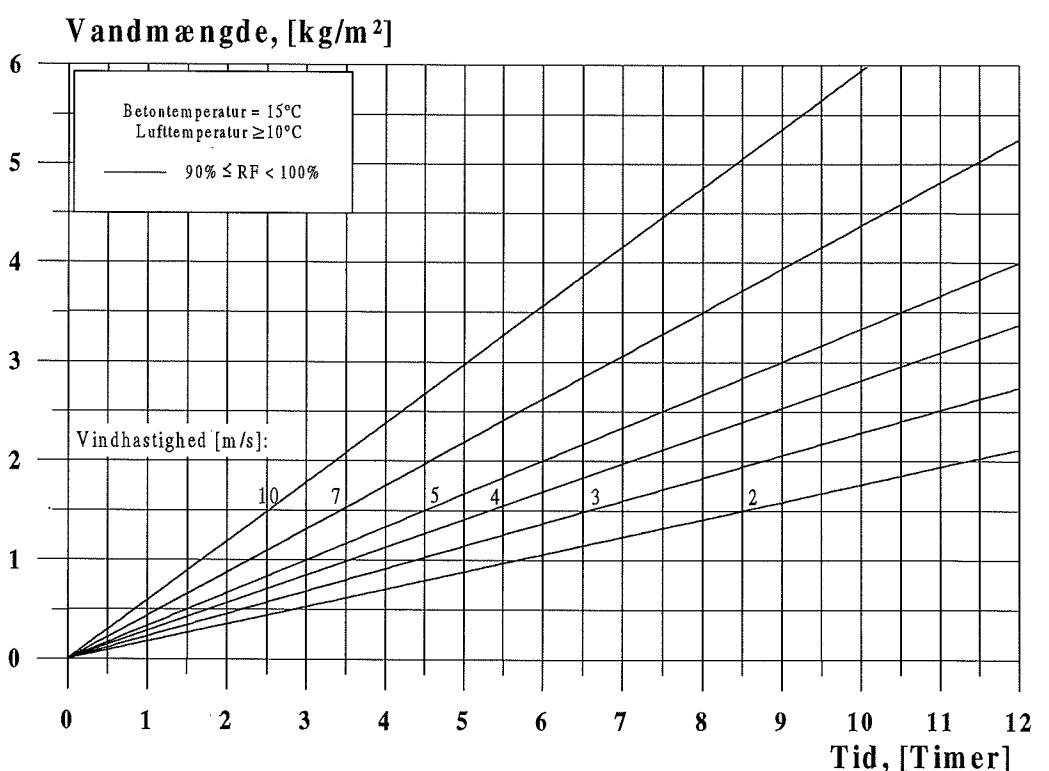
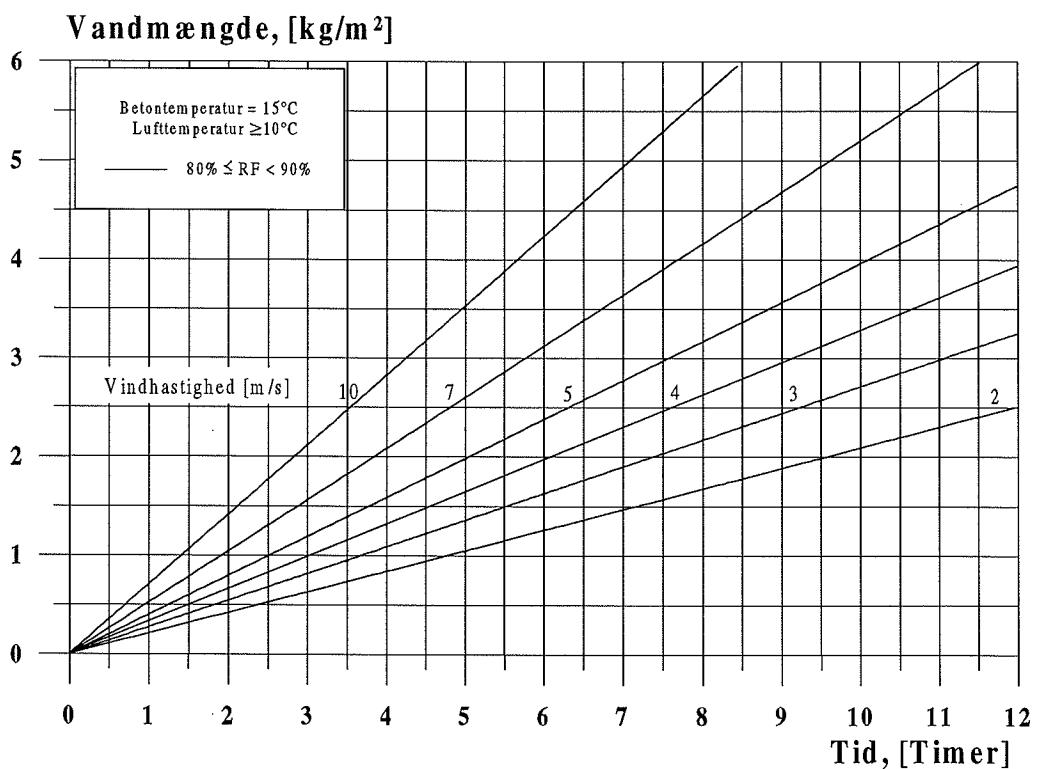


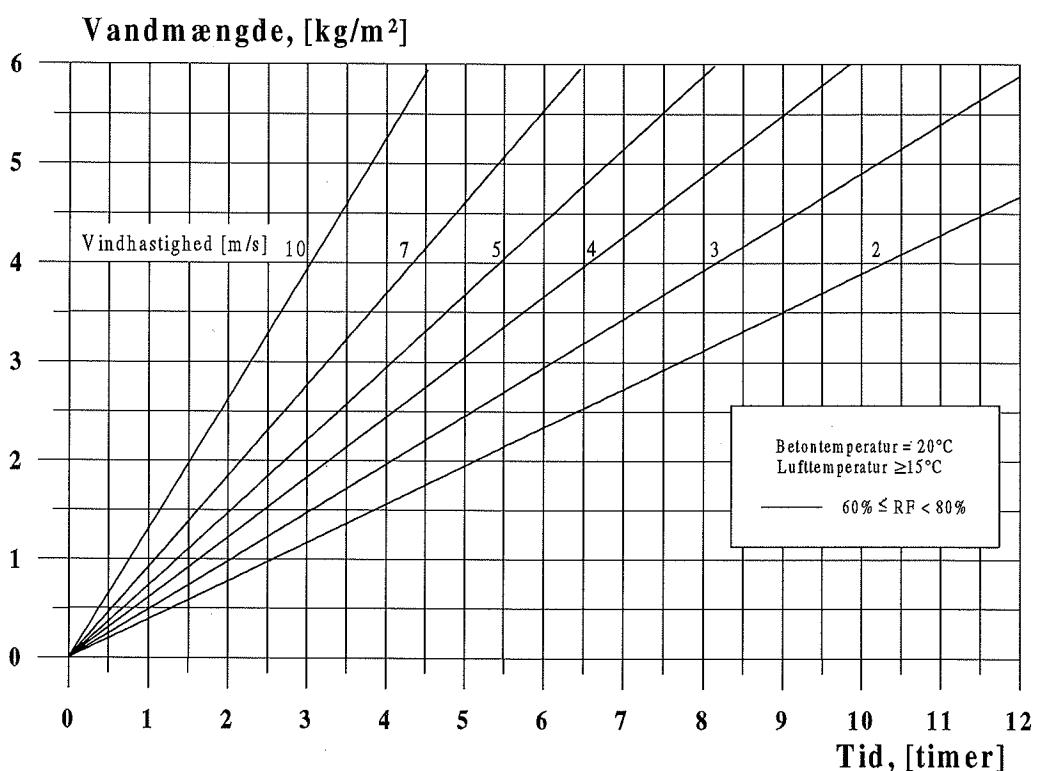
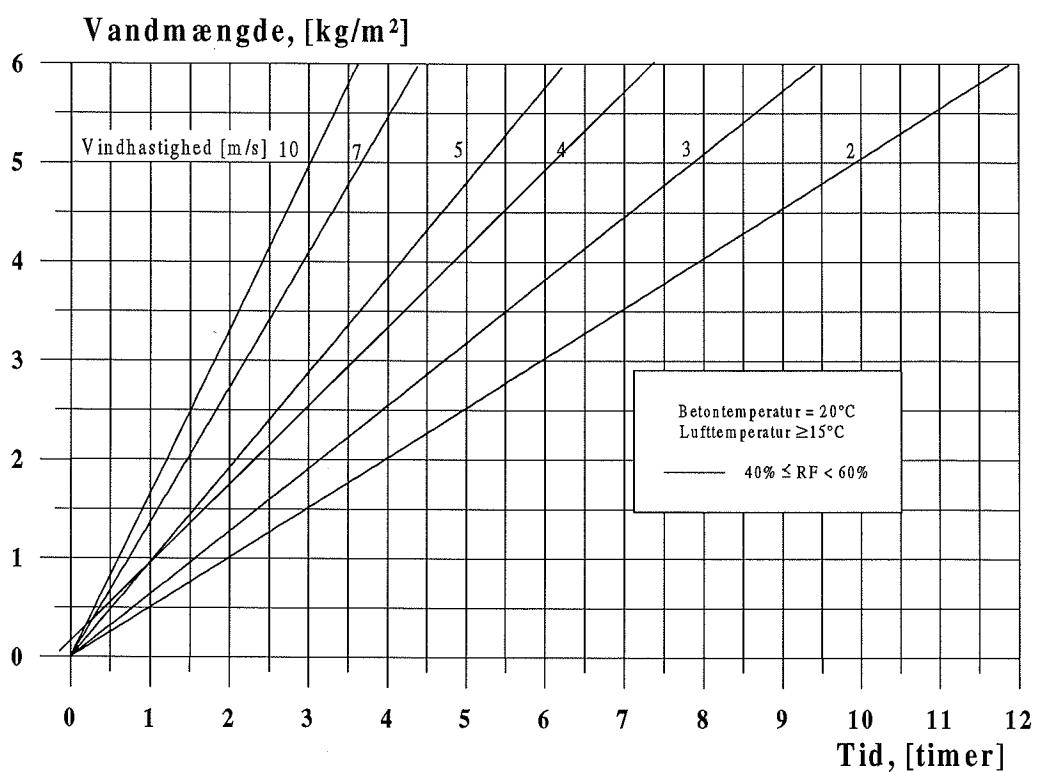


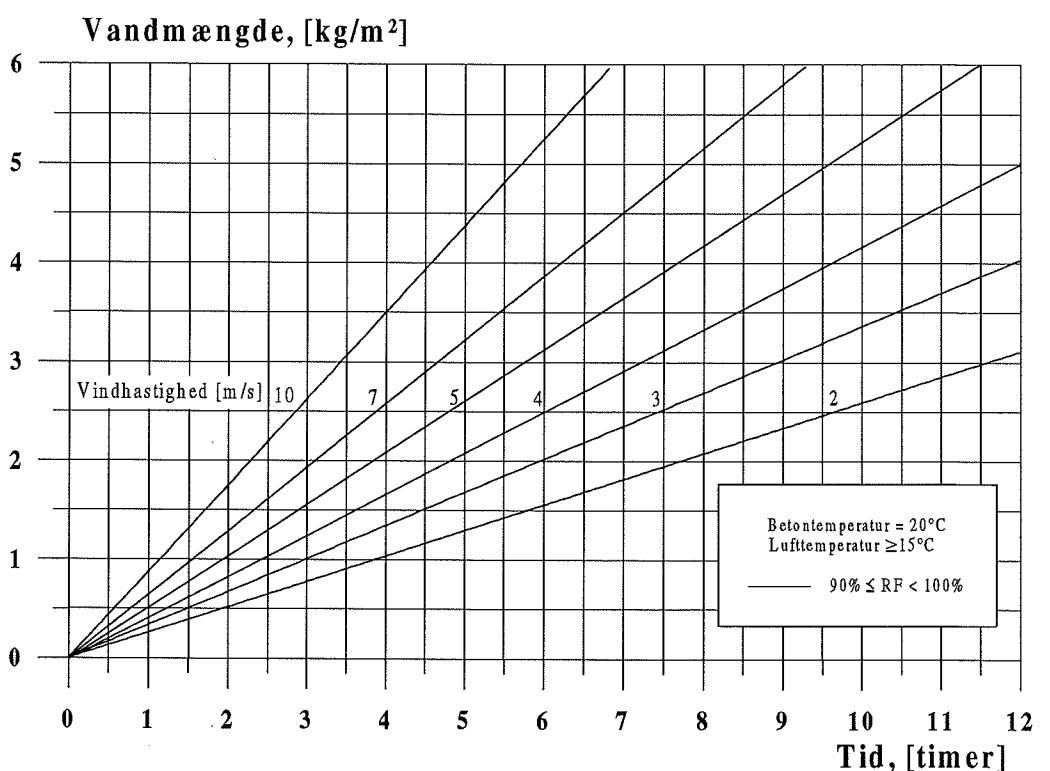
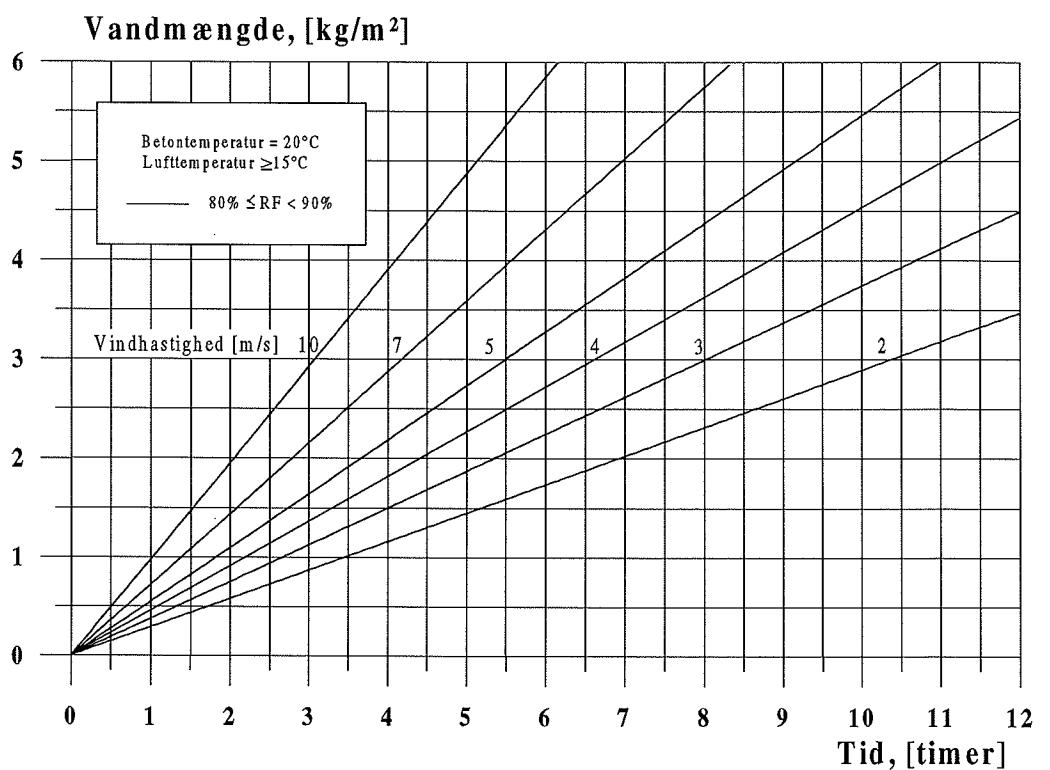


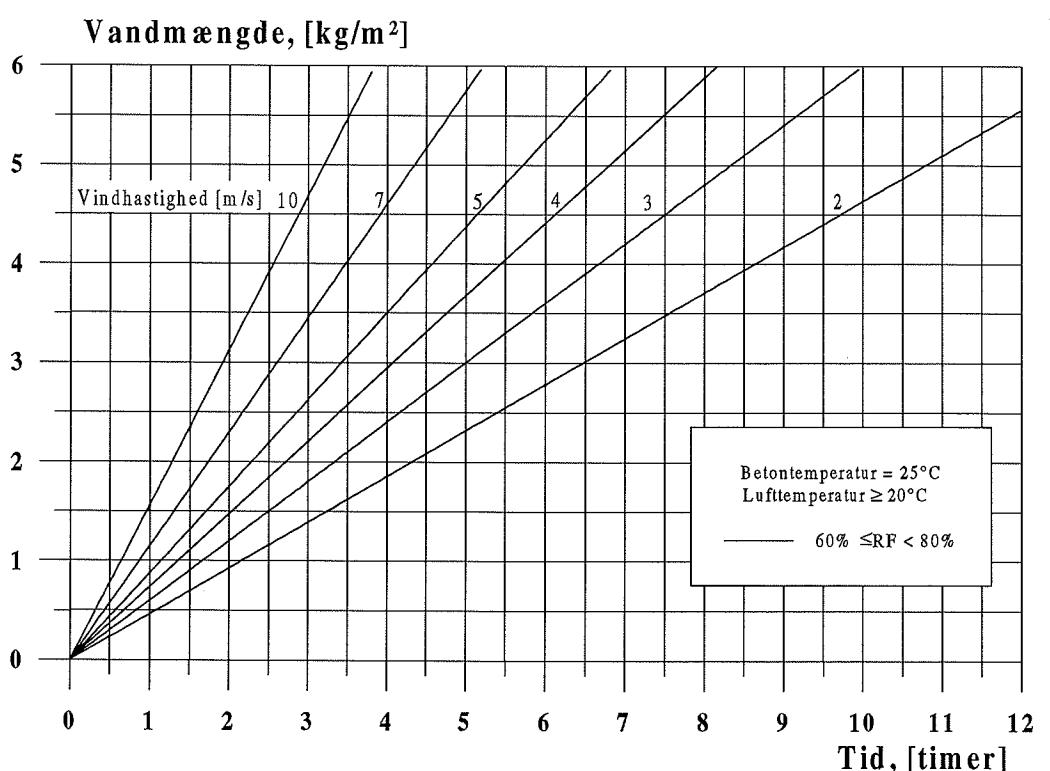
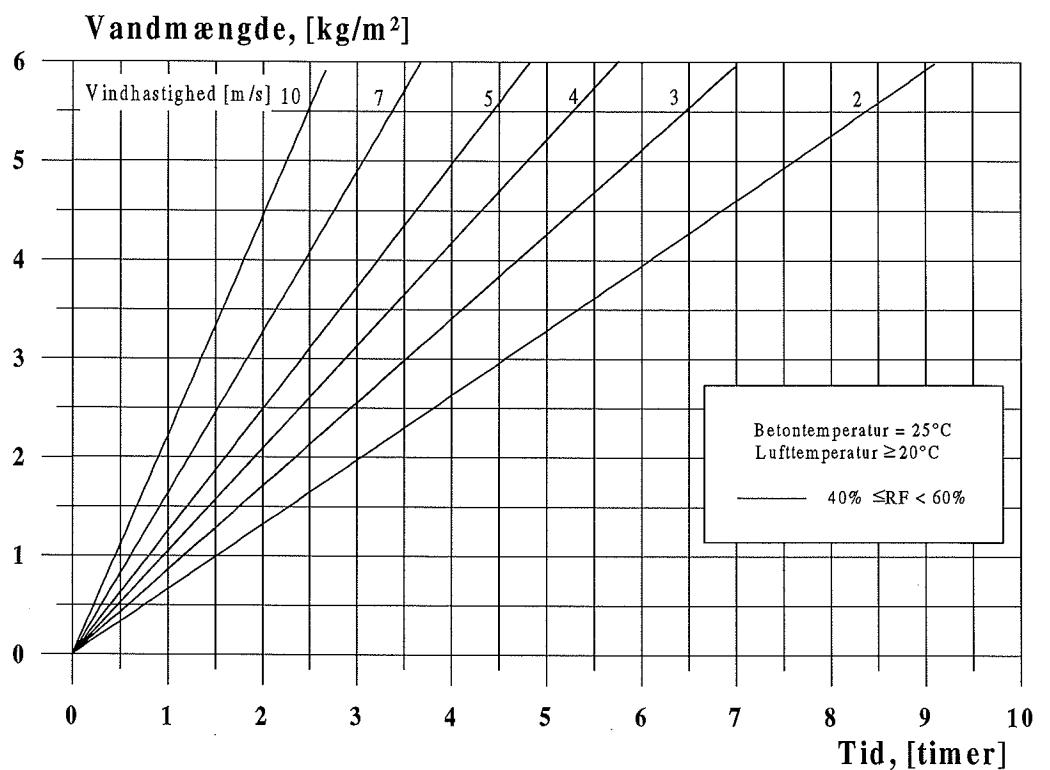


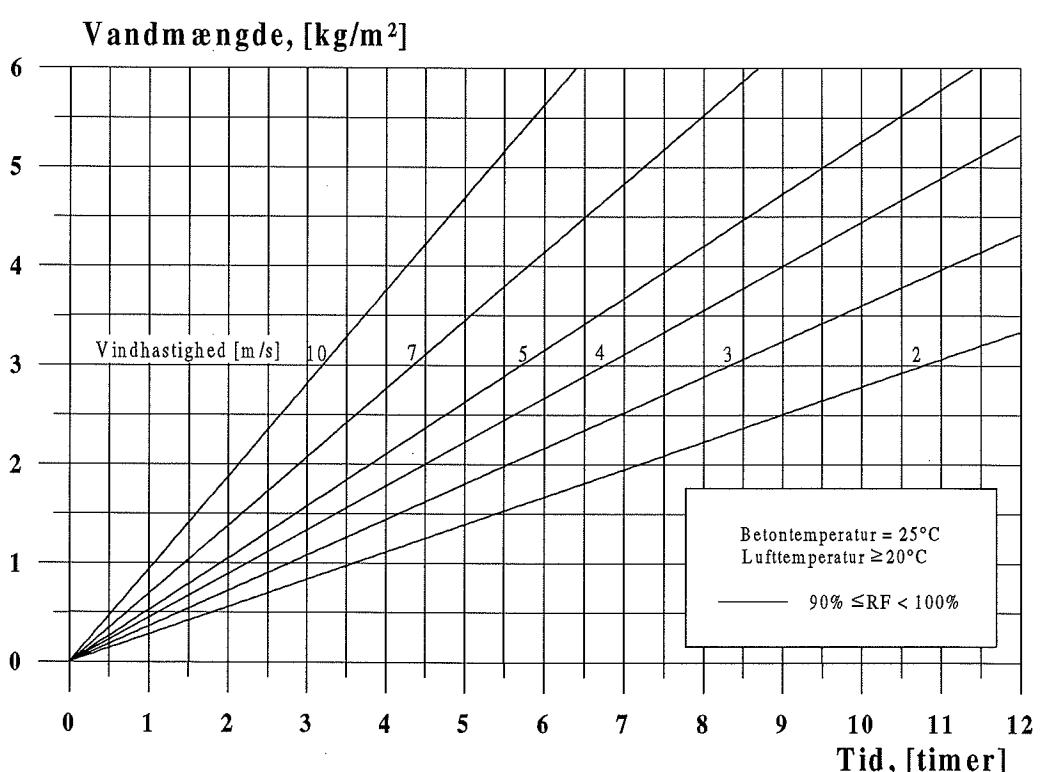
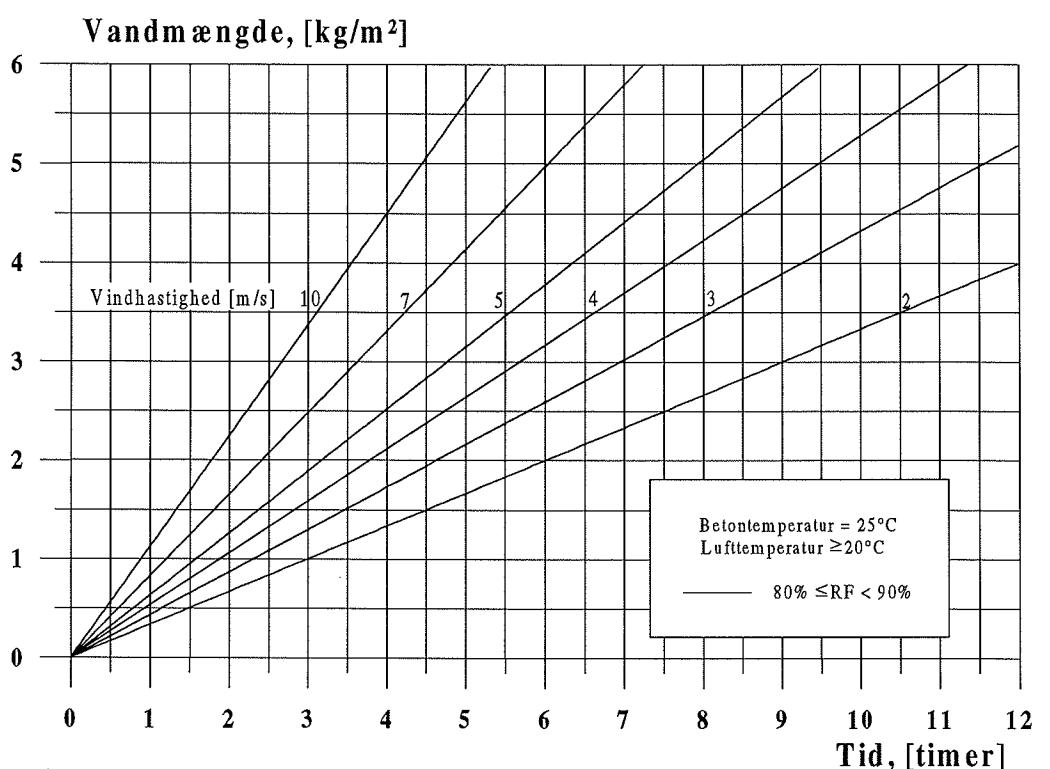


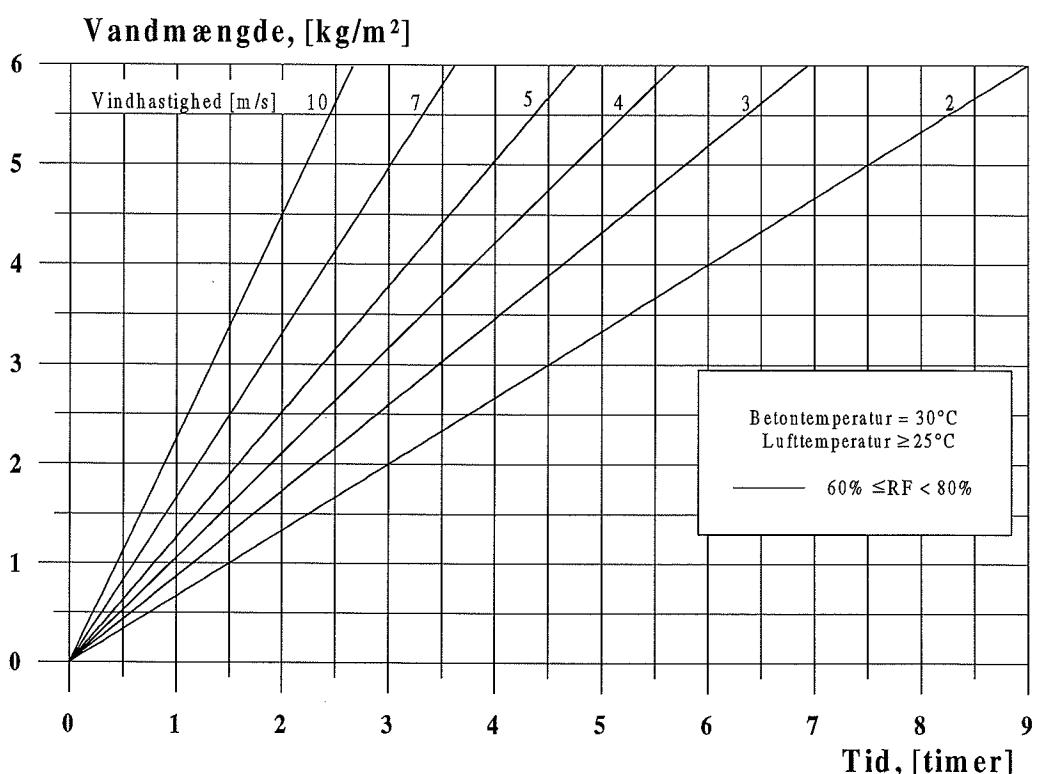
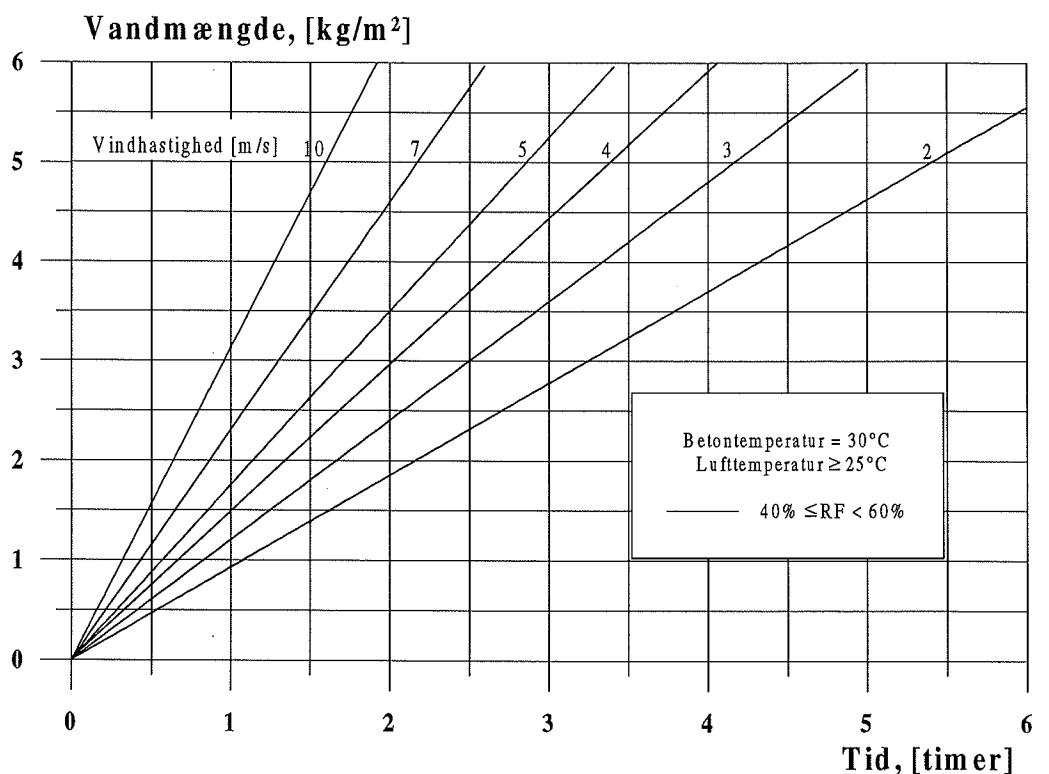


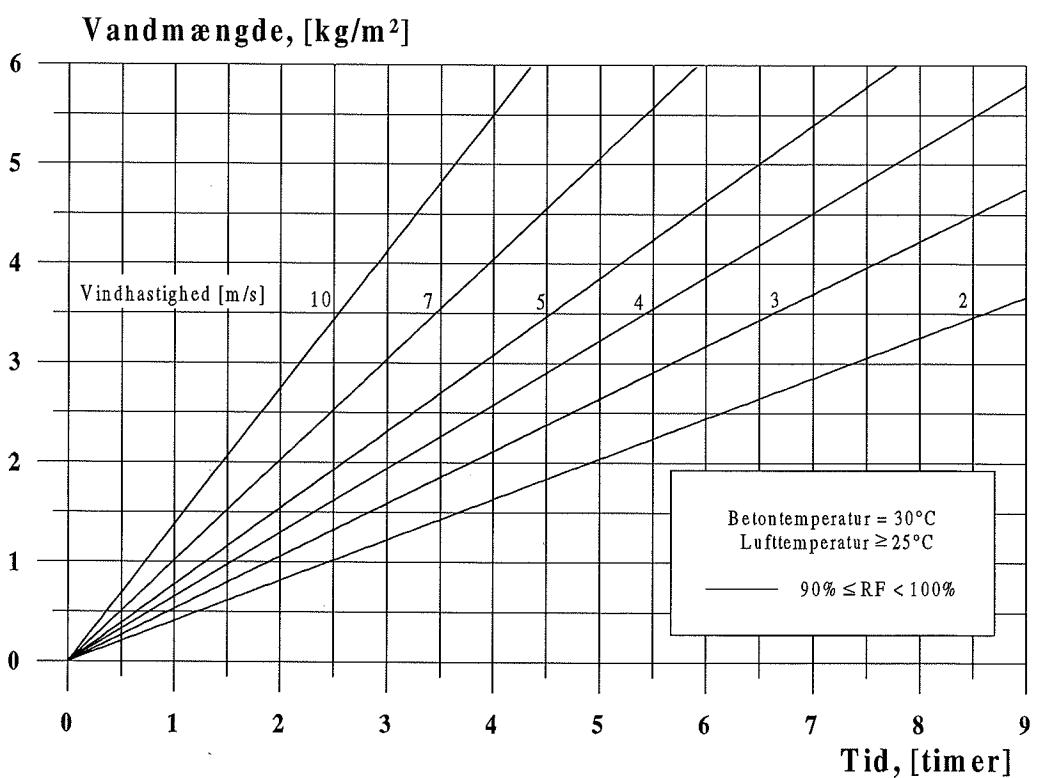
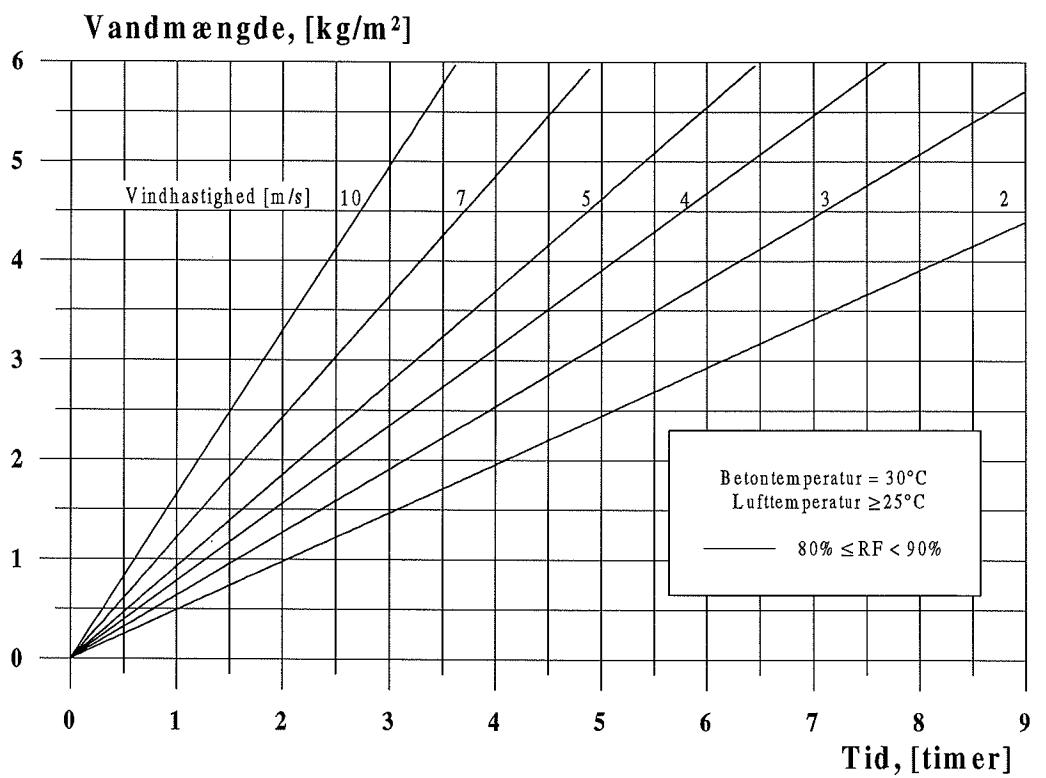


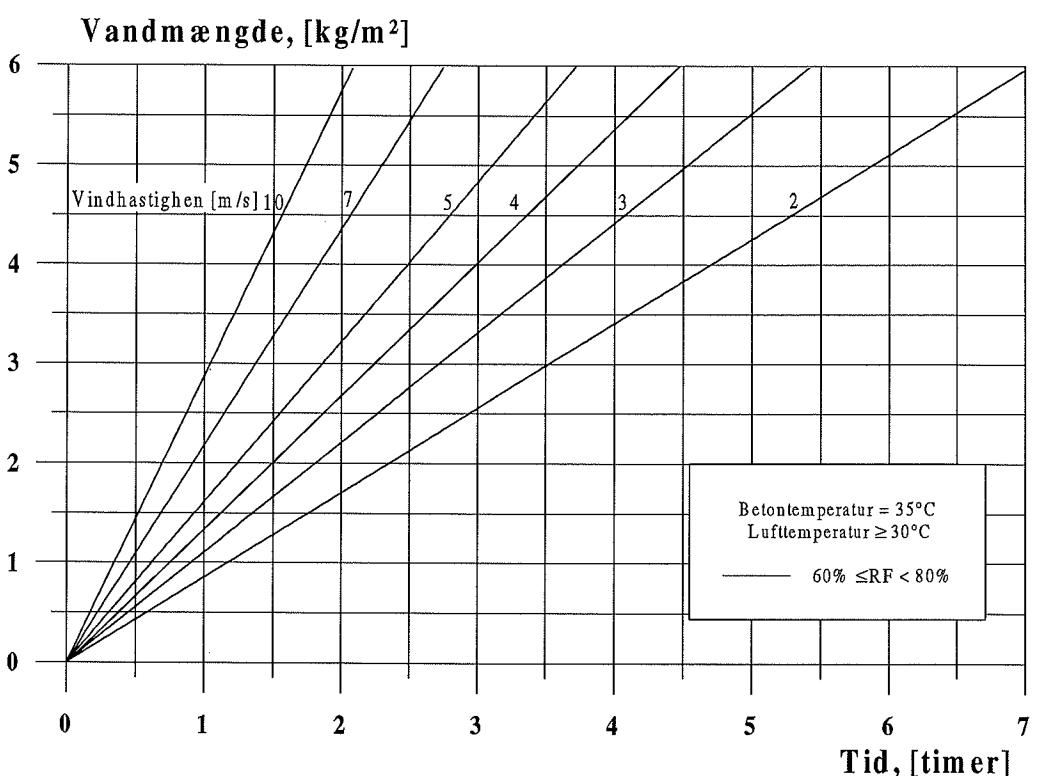
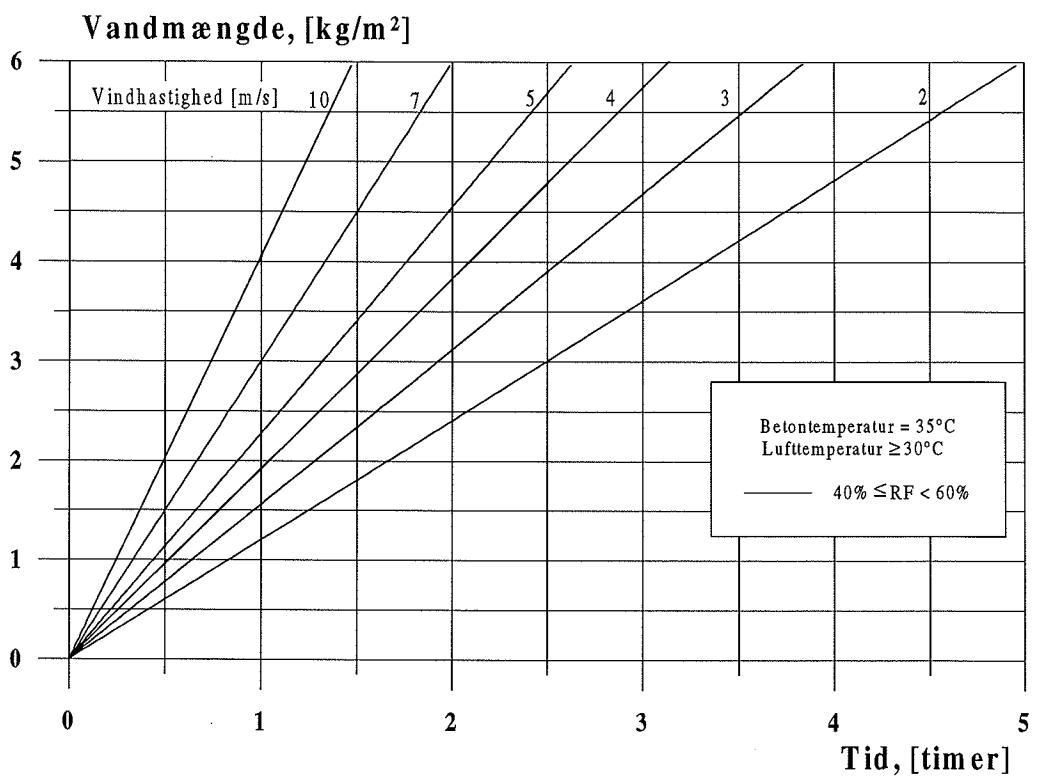


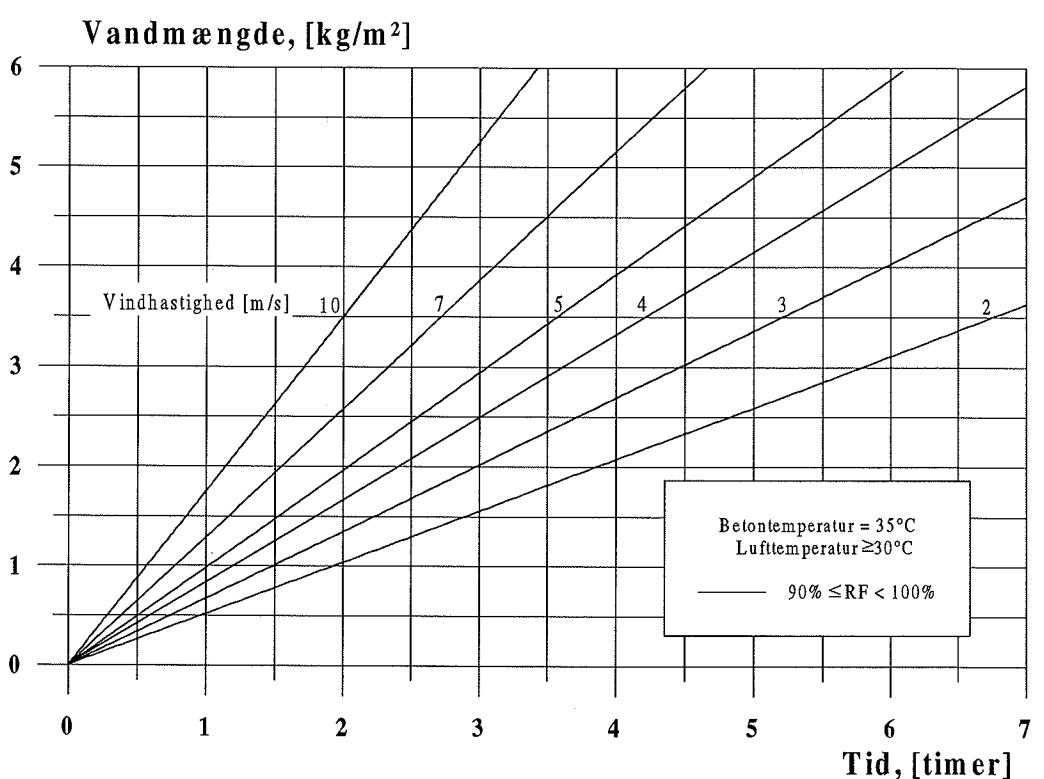
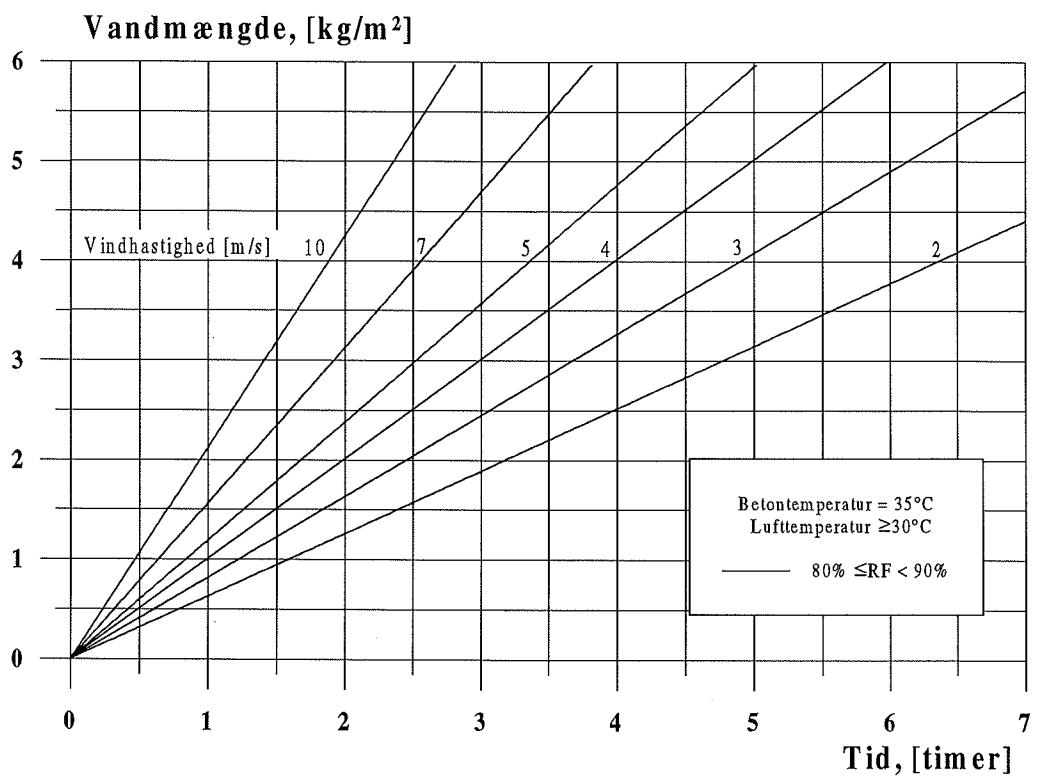












## **Bilag 2:**

### **Oversigt over efterbehandlingsmetoder**

Materiale/Metode	Fordele	Ulemper
Plastfolie Presenning Mineralulds- måtter Polystyren- celleplast	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fleksible metoder, bedst på vandrette flader. Presenning er også god på lodrette flader</li> <li>• Kan bruges på både hærdnende og hærdnede betonoverflader</li> <li>• Efterfølgende overfladebehandling uden gener</li> <li>• Arbejdsmiljø venlig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risiko for aftryk i frisk beton. Større risiko herfor ved brug af presenning i forhold til plastfolie.</li> <li>Mineraluldsmåtter kan ikke anvendes på frisk beton. Polystyrencelleplast er også vanskelig at anvende her</li> <li>• Uegnet på konstruktions undersider</li> <li>Plastfolie er mindst egnet på lodrette afformede flader</li> <li>• Giver kondensskjolder</li> <li>• Risiko for vindtunneler</li> </ul>
Presenning Mineralulds- måtter Polystyren- celleplast	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Let at håndtere</li> <li>• Stort genbrug</li> <li>• Stor holdbarhed, lavt vedligehold</li> </ul>	
Mineralulds- måtter Polystyren- celleplast		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der skal som regel etableres anden beskyttelse ved støbestart</li> </ul>
Plastfolie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vedligehold begrænset (kassation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrænset holdbarhed og genanvendelse</li> </ul>
Forme af lakeret træ/finér eller stål og forme med ru støbebrædder samt forme med formdug	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efterfølgende overfladebehandling uden gener</li> <li>• Arbejdsmiljø venlig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der skal som regel etableres anden beskyttelse for at opfylde krav til lang beskyttelsesperiode</li> <li>• Ved lang formtid kan form gro fast</li> <li>• Særlige forholdsregler ved støbeskel</li> </ul>
Forme af lakeret træ/finér eller stål og forme med ru støbebrædder	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effektive metoder</li> </ul>	
Forme med ru støbebrædder		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sårbar med hensyn til udtræring af form</li> </ul>
Forme med formdug	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forbedret overflade kvalitet/aestetik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vanskelig montage</li> <li>• Lav genanvendelse</li> <li>• Øgede omkostninger</li> </ul>

Skema B2.1. Fordele og ulemper ved dampætte membraner og form til efterbehandling.

Materiale/Metode	Fordeler	Ulemper
Forseglingsmiddel Fugtigholdelse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Let at gennemføre</li> <li>• Anvendes som supplerende beskyttelse efter afformning</li> <li>• Arbejdsmiljø venlig</li> <li>• Økonomiske metoder</li> </ul>	
Forseglingsmiddel		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gener ved efterfølgende overfladebehandling</li> <li>• Særlige forholdsregler ved støbeskel</li> </ul>
Fugtigholdelse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Giver en god hydratisering af betonoverfladen</li> <li>• Ingen gener ved efterfølgende overfladebehandling</li> <li>• God ved støbeskel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stiller skærpede krav til overvågning</li> <li>• Risiko for plastiske svindrevner pga. sen iværksættelse</li> <li>• Risiko for termorevner</li> <li>• Risiko for misfarvninger</li> <li>• Risiko for frysning</li> <li>• Risiko for udvaskning</li> </ul>
Klimastyring	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indendørs let at gennemføre</li> <li>• Ensartet hærdning</li> <li>• Ingen gener ved efterfølgende efterbehandling</li> <li>• Økonomisk ved udendørs støbing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stiller krav til styring</li> <li>• Specielt indrettede produktionsområder</li> <li>• Mindre arbejdsmiljø venlig</li> </ul>
Tilsætningsmidler (polymerer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Let at udføre</li> <li>• Ensartet hærdning</li> <li>• Arbejdsmiljø venlig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metoden er ikke gennemprøvet på beton</li> <li>• Måske gener for efterfølgende overfladebehandling</li> <li>• Uøkonomisk</li> </ul>
Fibre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Let at udføre</li> <li>• Arbejdsmiljø venlig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usikkerhed med hensyn til luftporestruktur</li> <li>• Mindre økonomisk betydning</li> <li>• Effektiviteten afhænger af fibertype og -mængde</li> <li>• Fibre kan fordele plastiske svindrevner, men hindrer ikke fordampning</li> <li>• Efterbehandling er påkrævet</li> </ul>

Skema B2.2. Fordeler og ulemper ved følgende materialer/metoder til efterbehandling: Forseglingsmittel, fugtigholdelse, klimastyring og tilsætningsmidler.

Materiale/ Metode	Planlægning	Dokumentation
Plastfolie Presenning Mineralulds- måtter Polystyren- celleplast	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beregning af hvornår tildækning skal på</li> <li>Beregning af nødvendig tildækningsperiode</li> <li>Intakt materiale til tildækning før støbestart</li> <li>Brædder til fastholdelse af materiale. Plastfolie kan også fastholdes med sand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Visuel inspektion af tildæknings effektivitet</li> <li>Registrering af tidspunkt for tildækning</li> <li>Registering af samlet periode for tildækning (måling af temperatur /beregnning af modenhed)</li> </ul>
Forme af lakeret træ/finér eller stål og forme med ruststøbebrædder samt forme med formdug	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beregning af om krav til beskyttelsesperiode er opfyldt med form på</li> <li>Fastlæggelse af forholdsregler efter afformning</li> <li>Kontroller formens tæthed før støbning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registrering af samlet formtid + beregning af modenhed</li> <li>Registrering af foranstaltninger efter afformning - art og omfang</li> </ul>
Forseglings- middel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beregning af hvornår forseglingsmiddel skal på</li> <li>Hvorledes sikres effektivitet ?</li> <li>Kontroller formens tæthed før støbning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registrering af doserede mængder</li> </ul>
Fugtigholdelse	<ul style="list-style-type: none"> <li>Valg af supplerende efterbehandling for at hindre plastisk svind</li> <li>Beregning af hvor lang tid metoden skal anvendes</li> <li>Hvorledes sikres effektiviteten ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registrering af foranstaltninger for fugtigholdelse - art og omfang</li> <li>Registrering af samlet vandingsperiode + beregning af modenhed</li> </ul>
Klimastyring	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beregning af hvor lang tid metoden skal anvendes</li> <li>Eftervisning af effektiviteten ved vejning af kontrolprøveemner</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registrering af luft- og betontemperatur samt relativ luftfugtighed og vindhastighed</li> <li>Beregning af modenhed</li> </ul>
Tilsætningsmidler (polymerer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eftervisning af effektiviteten ved vejning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dokumentation for tilsætning af polymerer</li> </ul>
Fibre	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efterbehandling planlægges som beskrevet ovenfor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dokumentation gennemført efter behandling</li> </ul>

Skema B2.3. Planlægning og dokumentation for efterbehandlingsmetoder/materialer.

**Bilag 3:**

**Blanketter til planlægning og inspektion**

Planlægningsblanket 1: Beton			
Sagsnavn:	Sagsnummer:		
Konstruktionsdel:			
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:		
Evt. bilagsreference:		Evt. tegningsreference:	
Dato:	Signatur:		
Betonsammensætning			
Komponent	kg/m <sup>3</sup>	% af bindemiddel	Bemærkninger
Cement, C			
Flyveaske, FA			
Mikrosilica, MS			
FA + MS			
Bindemiddel = C+FA+MS			
ækv. v/c =		Miljøklasse:	
Hærdnende beton			
Q <sub>∞</sub> , [K/kg bindemiddel]		τ <sub>e</sub> , [timer]	α
Adiabatisk varmeudvikling			
Afbindingstid, τ <sub>0</sub> =	timer		

**Planlægningsblanket 2: Seneste tidspunkt for efterbehandling**

Sagsnavn:	Sagsnummer:		
Konstruktionsdel:			
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:		
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:		
Dato:	Signatur:		
<b>Maksimal tid før efterbehandling</b>			
Krav til maksimalt fordampet vandmængde for efterbehandling =      kg/m <sup>2</sup>			
Beton temperatur =      °C	Lufitemperatur =      °C	Relativ luftfugtighed =      %	
Vindhastighed =      m/s	Betonens lagtykkelse =      m		
Bemærkning/beregning:			
Beregnet seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling =      timer			
Eller:			
Aflæst seneste tidspunkt for efterbehandling =      timer (Skema 2.2)	Indendørsarbejder	Udendørsarbejder	

### Planlægningsblanket 3: Varighed af efterbehandling

Sagsnavn:	Sagsnummer:																		
Konstruktionsdel:																			
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:																		
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:																		
Dato:	Signatur:																		
Krav til mindste reaktionsgrad R før fjernelse af efterbehandling = <span style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; width: 100px; height: 20px;"></span>																			
Den tilhørende modenhed M for tidligste fjernelse af efterbehandlingen bestemmes på en af følgende tre måder:																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Bemærkninger</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="width: 50%;"><math>M</math> beregnet af: <math>M = \tau_e / (-\ln(R))^{1/\alpha} =</math></td> <td style="width: 50%; text-align: right;">timer</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Eller:</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><math>M</math> aflæst af varmeudviklingskurven til:</td> <td style="text-align: right;">timer</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Eller:</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><math>M</math> aflæst af skema 2.4 til:</td> <td style="text-align: right;">timer</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;">Hvis afbindningstiden <math>\tau_0 \leq 5</math> timer</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><math>M = (M</math> bestemt ovenfor) + <math>(\tau_0 - 5</math> timer) =</td> <td style="text-align: right;">timer</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;">Hvis afbindningstiden <math>\tau_0 &gt; 5</math> timer</td> </tr> </tbody> </table>		Bemærkninger		$M$ beregnet af: $M = \tau_e / (-\ln(R))^{1/\alpha} =$	timer	Eller:		$M$ aflæst af varmeudviklingskurven til:	timer	Eller:		$M$ aflæst af skema 2.4 til:	timer	Hvis afbindningstiden $\tau_0 \leq 5$ timer		$M = (M$ bestemt ovenfor) + $(\tau_0 - 5$ timer) =	timer	Hvis afbindningstiden $\tau_0 > 5$ timer	
Bemærkninger																			
$M$ beregnet af: $M = \tau_e / (-\ln(R))^{1/\alpha} =$	timer																		
Eller:																			
$M$ aflæst af varmeudviklingskurven til:	timer																		
Eller:																			
$M$ aflæst af skema 2.4 til:	timer																		
Hvis afbindningstiden $\tau_0 \leq 5$ timer																			
$M = (M$ bestemt ovenfor) + $(\tau_0 - 5$ timer) =	timer																		
Hvis afbindningstiden $\tau_0 > 5$ timer																			
Bemærkninger:																			

**Planlægningsblanket 4: Temperatur- og modenhedsberegning**

Sagsnavn:	Sagsnummer:
Konstruktionsdel:	
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:
Dato:	Signatur:

Betonens udstøbningstemperatur [°C]	Betondensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Betonens varmefylde [kJ/kg · °C]	Betonens varmeledningsevne [kJ/m · h · °C]

Bindemiddelindhold [kg/m <sup>3</sup> ]	Vindhastighed [m/s]	Minimum lufttemperatur [°C]	Maksimum lufttemperatur [°C]

Tid [timer]	Isolering 1	Isolering 2	k1 [kJ/m <sup>2</sup> · h · °C]	k2 [kJ/m <sup>2</sup> · h · °C]

## Inspekitionsblanket 1: Planlagt efterbehandling

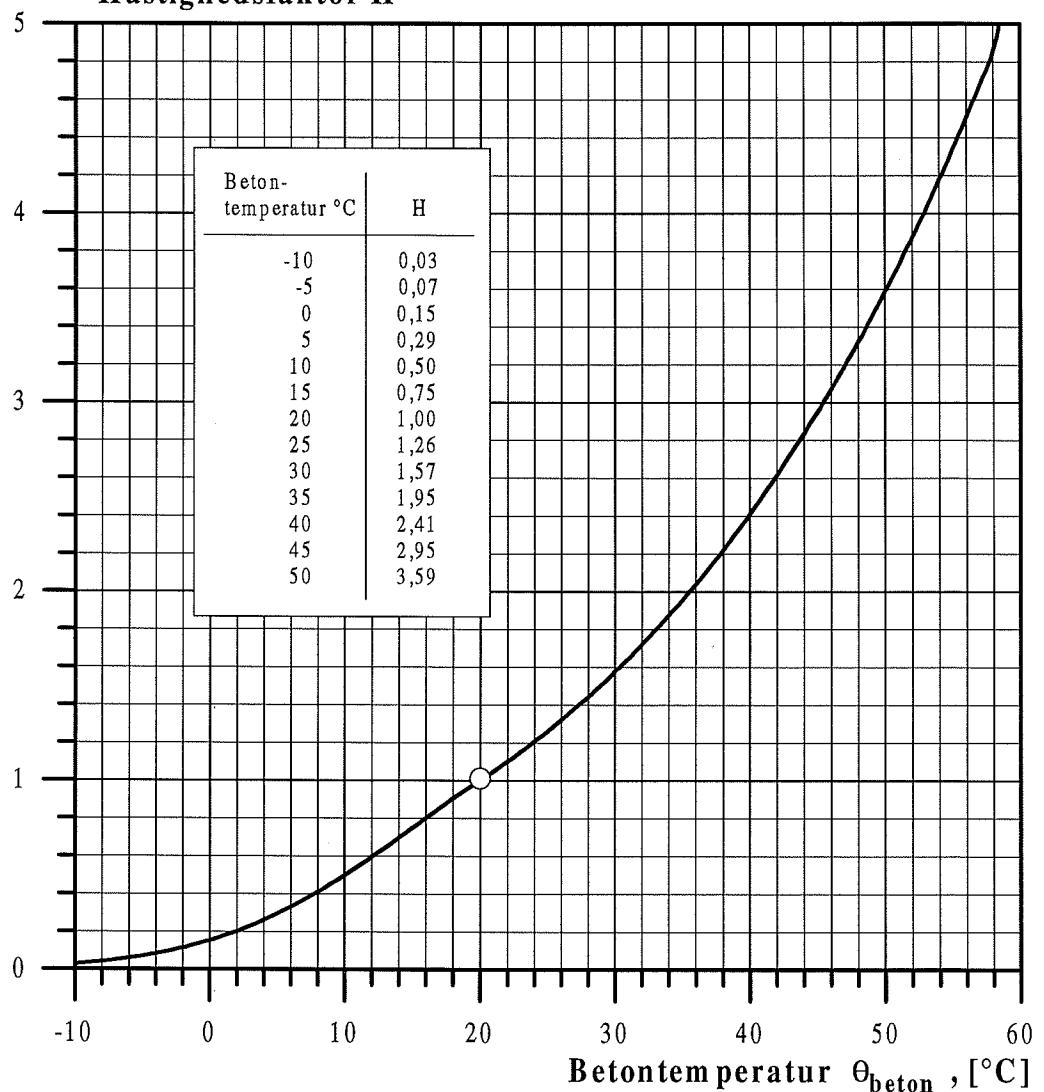
## **Inspektionsblanket 2: Udført efterbehandling**

## Inspektionsblanket 3: Modenhedsberegning

**Bilag 4:**

**Hastighedsfaktor H til modenhedsberegning**

### Hastighedsfaktor H



$$H = \exp\left(\frac{E}{8,314} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta_{\text{beton}}} \right)\right), \text{ hvor:}$$

$$E = \begin{cases} 33500 + 1470 (20 - \theta_{\text{beton}}), [\text{J/mol}], & \text{for } \theta < 20^\circ\text{C} \\ 33500, [\text{J/mol}], & \text{for } \theta \geq 20^\circ\text{C} \end{cases}$$

## **Bilag 5:**

### **Eksempler**

## **Bilag 5.1:**

**Gulv støbt i august**

**Planlægningsblanket 1: Beton (Skema B5.1.1)**

Sagsnavn: Hetek - Gulv	Sagsnummer: Hetek - eksempel 1. Gulv støbt i august: Typiske klimaforhold. Beton A.		
Konstruktionsdel: 0,25 m gulv			
Kontrolafsnit:		Ref. nr. kontrolplan:	
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:		
Dato: 14/3-1997	Signatur: JXS		

<b>Betonsammensætning</b>			
Komponent	kg/m <sup>3</sup>	% af bindemiddel	Bemærkninger
Cement, C	285		Oplysninger på denne side kan findes på betonens BBB-blanket.
Flyveaske, FA	60		
Mikrosilika, MS	12	3,4	
FA + MS	72	20,2	
Bindemiddel = C+FA+MS	357		Miljøklasse: Aggressiv
ækv. v/c = 0,41			

<b>Hærdnende beton</b>			
	Q <sub>so</sub> , [kJ/kg bindemiddel]	τ <sub>e</sub> , [timer]	α
Adiabatisk varmeudvikling	280	14,2	0,96
Afbindingstid, τ <sub>0</sub> = 5,5 timer			

**Planlægningsblanket 2: Seneste tidspunkt for efterbehandling (Skema B5.1.2)**

Sagsnavn: Hetek - Gulv	Sagsnummer: Hetek - eksempel 1. Gulv støbt i august: Typiske klimaforhold. Beton A.
Konstruktionsdel: 0,25 m gulv	
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:
Dato: 14/3-1997	Signatur: JXS

**Maksimal tid før efterbehandling**

Krav til maksimalt fordampet vandmængde før efterbehandling = 1,5 kg/m <sup>2</sup>		
Betontemperatur = 20 °C	Lufttemperatur = 15,7°C	Relativ luftfugtighed = 85 %
Vindhastighed = 4 m/s	Betonens lagtykkelse = 0,25 m ✓	

**Bemærkning/beregning:**

Seneste tidspunkt for efterbehandling på 3,8 timer er bestemt ved beregning ved brug af nomogram til fastlæggelse af fordampningshastighed.

Det skal kun dokumenteres, at efterbehandling er etableret inden det største tidsrum. Efterbehandling udføres derfor efter senest 3,8 time.

Det ses, at brug af skema 2.2 er restriktivt i forhold til at udføre beregning. Anvendes kurver i bilag 1, fås 3,3 timer før etablering af efterbehandling: Dvs. lidt kortere tid i forhold til at udføre beregning.

Beregnet seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling = 3,8 timer fra udstøbning.

Eller:

Aflæst seneste tidspunkt for efterbehandling = 1 timer (Skema 2.2)	Indendørsarbejder	Udendørsarbejder	x
--	-------------------	------------------	---

**Planlægningsblanket 3: Varighed af efterbehandling (Skema B5.1.3)**

Sagsnavn: Hetek - Gulv	Sagsnummer: Hetek - eksempel 1. Gulv støbt i august: Typiske klimaforhold. Beton A.	
Konstruktionsdel: 0,25 m gulv		
Kontrolafsnit:		Ref. nr. kontrolplan:
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:	
Dato: 14/3-1997	Signatur: JXS	

Krav til mindste reaktionsgrad R før fjernelse af efterbehandling = 85 %

Den tilhørende modenhed M for tidligste fjernelse af efterbehandlingen bestemmes på een af følgende tre måder:

Bemærkninger	
M beregnet af: $M = \tau_e / (-\ln(R))^{1/\alpha} = 94$	timer
Eller:	
M af læst af varmeudviklingskurven til:	timer
Eller:	
M af læst af skema 2.4 til: 120	timer
$M = (M \text{ bestemt ovenfor}) + (\tau_0 - 5 \text{ timer}) = 120,5$	timer
Bemærkninger: Krav till varighed af efterbehandling er 94 timer.	

**Planlægningsblanket 4: Temperatur- og modenhedsberegning (Skema B5.1.4)**

Sagsnavn: Hetek - Gulv	Sagsnummer: Hetek - eksempel 1. Gulv støbt i august: Typiske klimaforhold. Beton A.
Konstruktionsdel: 0,25 m gulv	
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:
Dato: 14/3-1997	Signatur: JXS

Betonens udstøbningstemperatur [°C]	Betondensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Betonens varmefyde [kJ/kg · °C]	Betonens varmeleddingssevne [kJ/m · h · °C]
20	2371	1,1	8

Bindemiddelindhold [kg/m <sup>3</sup> ]	Vindhastighed [m/s]	Minimum lufttemperatur [°C]	Maksimum lufttemperatur [°C]
357	4	15 (Jordtemperatur = 15)	15 (Jordtemperatur = 15)

Tid [timer]	Isolering 1	Isolering 2	k1 [kJ/m <sup>2</sup> · h · °C]	k2 [kJ/m <sup>2</sup> · h · °C]
0	Fri	Jord	75	Varmeleddingsevne = 6
3,8	Plastfolie	Jord	50	Densitet = 1700 kg/m <sup>3</sup>

**Inspektionsblanket 1: Planlagt efterbehandling (Skema B5.1.5)**

Sagsnavn: Hetek - Gulv	Sagsnummer: Hetek - eksempel 1. Gulv støbt i august: Typiske klimaforhold. Beton A.		
Konstruktionsdel: 0,25 m gulv			
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:		
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:		
Dato: 14/3-1997	Signatur: JXS		

Planlagt efterbehandling		Initialer: JXS		Bemærkninger	
Timer	Modenhedstimer	Efterbehandling			
		Beton beskyttes med	Overflade		
		Udstøbningstidspunkt	x		
0			x		
3		Plastfolie	x	Det kontrolleres dagligt, at plastfolien slutter til overfladen.	
104	94	Tidligste tidspunkt for fjernelse af plastfolie	x	Plastfolien holdes fast ved brug af sand.	
				Betonens modenhed i overfladen skal mindst være 94 timer,	
				før plastfolien fjernes.	

## **Bilag 5.2:**

**Væg støbt i oktober**

Planlægningsblanket 1: Beton (Skema B5.2.1)			
Sagsnavn: Hetek - Væg	Sagsnummer: Hetek - eksempel 2. Beton B. Typisk oktober-klima.		
Konstruktionsdel: 0,7 m væg			
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontroplan:		
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:		
Dato: 12/3-1997	Signatur: JXS		
Beton sammensætning			
Komponent	kg/m <sup>3</sup>	% af bindemiddel	Bemærkninger
Cement, C			Det er ikke nødvendigt at udfyldte disse kontrolpunkter, da væggen udstøbes i form. Krav til seneste tidspunkt for etablering af efterbehandling er derfor overholdt.
Flyveaske, FA			
Mikrosilika, MS			
FA + MS			
Bindemiddel = C+FA+MS	341		
ækv. v/c = 0,42			Miljøklasse: Aggressiv
Hærdnende beton			
	Q <sub>∞</sub> [kJ/kg bindemiddel]	τ <sub>e</sub> [timer]	α
Adiabatisk varmeudvikling	267	15,8	1,01
Afbindingstid, τ <sub>0</sub>	= 4 timer		

**Planlægningsblanket 3: Variighed af efterbehandling (Skema B5.2.2)**

Sagsnavn: Hetek - Væg	Sagsnummer: Hetek - eksempel 2. Beton B. Typisk oktober-klima.
Konstruktionsdel: 0,7 m væg	
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:
Evt. bilagstegningsreference:	Evt. tegningsreference:
Dato: 12/3-1997	Signatur: JXS

Krav til mindste reaktionsgrad R før fjernelse af efterbehandling = 85 % (Fra skema 2.3)

Den tilhørende modenhed M for tidligste fjernelse af efterbehandlingen bestemmes på een af følgende tre måder:

Bemærkninger	
M beregnet af: $M = \tau_e / (-\ln(R))^{1/\alpha} = 95$	timer
Eller:	Beregnet af: $M = 15,8 / (-\ln(0,85))^{1/1,01} = 95$ timer Data fra planlægningsblanket nr. 1 og ovennævnte reaktionsgrad = 0,85.
M af læst af varmeudviklingskurven til: 95	timer
Eller:	$Q(M) = 0,85 \cdot 267 \text{ kJ/kg} = 227 \text{ kJ/kg} \rightarrow M \approx 95$ timer Fra planlægningsblanket 1 og afleśning af betonens varmeudviklingskurve.
M af læst af skema 2.4 til: 120	timer
$M = (M \text{ bestemt ovenfor}) + (\tau_0 - 5 \text{ timer}) =$	timer
Hvis afbindingsstiden $\tau_0 \leq 5$ timer	Fra planlægningsblanket nr. 1
Hvis afbindingsstiden $\tau_0 > 5$ timer	
Bemærkinger: Krav til mindste reaktionsgrad før fjernelse af efterbehandling er af læst af skema 2.3 til 85 % for aggressiv miljøklasse.	
Dette svarer til M = 95 timer.	

**Planlægningsblanket 4: Temperatur- og modenhedsberegnning (Skema B5.2.3)**

Sagsnavn: Hetek - Væg	Sagsnummer: Hetek - eksempel 2. Beton B. Typiske oktober-klima.	
Konstruktionsdel: 0,7 m væg		
Kontrolafsnit:		Ref. nr. kontrolplan:
Evt. bilagstreference:	Evt. tegningstreference:	
Dato: 12/3-1997	Signatur: JXS	

Betonens udstøbningstemperatur [°C]	Betondensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Betonens varmefylde [kJ/kg · °C]	Betonens varmeledningsevne [kJ/m · h · °C]
15°C	2329	1,1	8

Bindemiddelindhold [kg/m <sup>3</sup> ]	Vindhastighed [m/s]	Minimum lufttemperatur [°C]	Maksimum lufttemperatur [°C]
341	5	6,1 (Nat, skema 2.6)	12,1 (Dag, skema 2.6)

Tid [timer]	Isolering 1	Isolering 2	k1 [kJ/m <sup>2</sup> · h · °C]	k2 [kJ/m <sup>2</sup> · h · °C]
0	32 mm træforskalling	Som 1	14	Som 1
18	Fri overflade	Som 1	90	Som 1
19	Præsening	Som 1	19	Som 1

**Inspektionsblanket 1: Planlagt efterbehandling (Skema B5.2.4)**

Sagsnavn: Hetek - Væg	Sagsnummer: Hetek - eksempel 2. Beton B. Typiske oktober-klima.
Konstruktionsdel: 0,7 m væg	
Kontrolafsnit:	Ref. nr. kontrolplan:
Evt. bilagsreference:	Evt. tegningsreference:
Dato: 12/3-1997	Signatur: JXS

Planlagt efterbehandling			Initialer: JXS		
Timer	Modenhedstimer	Afterbehandling	Bemærkninger		
		Beton beskyttes med	Overflade	Fri	Form
0		Udstøbningstidspunkt		x	
18	Min. xx	Afforming		x	Betonen må tidligst afformes efter xx
19		Presenning		x	xx modenhedstimer. Efter xx
84	Min. 95	Presenning fjernes		x	modenhedstimer er krav til af-formingsstyrke overholdt.
		Øvrige bemærkninger: Umiddelbart efter udstøbning afdækkes vægttoppen med plastfolie, som fastgøres.			Presenning må tidligst fjernes efter 95 modenhedstimer.