

# Jämförelse mellan verktyg för bedömning av uttorkning av betongkonstruktioner

SBUF-projekt 12389



## Förord

I detta projekt har en utvärdering gjorts av olika verktyg för bedömning av uttorkningstider hos betongkonstruktioner. Bakgrunden till projektet är ett medlemsmöte i Svenska Betongförbundet programråd väst hade 3 mars 2010 där olika verktyg för bedömning av uttorkningstider presenterades. De verktyg som presenterades var datorprogrammet **TorkaS v. 3**, datorprogrammet **BI Dry** samt ett **erfarenhetsbaserat koncept utvecklat av Dry-IT** som är baserat på erfarenheter från fuktmätningar som Dry-IT har gjort. Som en del av aktiviteten gjordes beräkningar av uttorkningstider med de olika verktygen för några olika beräkningsfall. Resultaten visade att bedömningar gjorda med de olika verktygen skiljde sig åt relativt mycket.

För att göra resultaten från mötet 3 mars 2010 mer allmänt tillgängliga har det aktuella projektet, SBUF-projekt 12389 ”Jämförelse mellan verktyg för bedömning av uttorkning av betongkonstruktioner”, genomförts.

Arbetet har utförts av Anders Lindvall, Thomas Concrete Group i Göteborg.

Projektets referensgrupp har varit sammansatt av:

- Jesper Arfvidsson, Lunds tekniska högskola.
- Jonas Carlswärd, Betongindustri.
- Oskar Esping, Thomas Concrete Group.
- Fredrik Gränne, NCC.
- Hans Hedlund, Skanska.
- Tang Luping, Chalmers tekniska högskola.
- Kristina Mjörnell, SP.

Projektet har finansierats SBUF, AB Färdig Betong, NCC samt Skanska.

Ett tack framförs till projektets finansiärer samt referensgruppens medlemmar.

Göteborg, December 2010.

Anders Lindvall, projektledare. Thomas Concrete Group.



## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Syfte och avgränsningar .....	2
1.3	Metod.....	2
<b>2</b>	<b>Verktyg för bedömning av uttorkningstider hos betongkonstruktioner .....</b>	<b>3</b>
2.1	Inledning.....	3
2.2	Undersökta verktyg för bedömning av uttorkning .....	3
2.2.1	Lathundar .....	3
2.2.2	TorkaS .....	4
2.2.3	BI Dry.....	5
2.2.4	Erfarenhetsbaserade prognoser av uttorkning.....	5
<b>3</b>	<b>Beräkningsfall.....</b>	<b>7</b>
3.1	Bedömning av erforderlig betongkvalitet.....	7
3.2	Prognostisering av erforderliga uttorkningstider.....	8
3.2.1	Beräkningsfall – laboratoriekonstruktioner.....	8
3.2.2	Beräkningsfall – verkliga konstruktioner.....	8
<b>4</b>	<b>Resultat och kommentarer .....</b>	<b>11</b>
4.1	Bedömning av erforderlig betongkvalitet.....	11
4.2	Prognostisering av erforderliga uttorkningstider.....	13
4.2.1	Gamla beräkningsfall – fall VI-VII.....	13
4.2.2	Nya beräkningsfall (laboratoriekonstruktioner) – fall A-D.....	14
4.2.3	Nya beräkningsfall (verkliga konstruktioner) – fall 1-36.....	17
4.2.4	Jämförelse TorkaS v. 2, v. 3 och BI Dry.....	24
4.2.5	Generella kommentarer till genomförda prognostiseringar .....	27
<b>5</b>	<b>Avslutning .....</b>	<b>31</b>
5.1	Avslutande kommentarer.....	31
5.2	Förslag på fortsatta undersökningar .....	32
<b>6</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>35</b>

Bilaga. Resultat från beräkningar



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Skador orsakade av höga fukttillstånd i betongkonstruktioner är ett relativt vanligt problem inom byggsektorn. En stor del av dessa skador orsakas av att betongen inte har tillåtits torka ut i tillräcklig omfattning innan täta ytskikt appliceras på betongens yta. Det finns därför ett behov av att kunna förutsäga hur lång uttorkningstiden blir för en betongkonstruktion innan tätskikt kan appliceras, för att undvika att skador uppstår.

I BBR (Boverkets Byggregler) kapitel 6:53 finns det numera också krav ställda på att byggnader ska utformas så att varken konstruktionen eller utrymmen i byggnaden kan skadas av för höga fukttillstånd, Boverket (2008). Det anges att fukttillståndet i en byggnadsdel alltid ska vara lägre än det högsta tillåtna fukttillståndet om det inte är orimligt med hänsyn till byggnadsdelens avsedda användning. Fukttillståndet ska beräknas utifrån de mest ogynnsamma förutsättningarna, där bland annat hänsyn ska tas till fuktbelastningar både under byggtiden och under bruksskedet.

Det finns alltså både krav och behov av att bedöma hur fukttillståndet varierar hos en betongkonstruktion både under byggtiden och under dess användning. Denna bedömning görs lämpligast genom en fuktsäkerhetsprojektering där hänsyn tas till samtliga fuktbelastningar (och temperaturlastningar) under konstruktionens användning och hur dessa påverkar samtliga ingående material och kombinationer av material. Exempel på metoder för att göra sådana bedömningar för betongkonstruktioner finns i Betonghandbok – Material (1994).

Det finns flera verktyg tillgängliga för prognostisering av hur fukt- och temperaturlastningar påverkar fukt- och temperaturtillståndet i olika typer av byggnadskonstruktioner. De flesta av dessa verktyg prognostiserar fukt- och temperaturtillståndet genom att endast ta hänsyn till fukt- och värmetransport som uppstår på grund av koncentrationsskillnader i konstruktionen. I många byggnadsmaterial ger detta en god bild över hur fukt- och temperaturtillstånd varierar över tiden. Dock finns det vissa byggnadsmaterial där fukttillståndet missbedöms om hänsyn endast tas till skillnader i fuktkoncentrationer och temperaturvariationer, där det i dessa material också sker en kemisk bindning av fukt. Ett exempel är cementbaserade material där en stor del av fukten kan bindas när cementen reagerar (huvudsakligen blandningsvatten), s.k. kemisk bindning. Hur mycket fukt som kan bindas kemiskt beror på cementhalten (och typen av cement) där mängden som binds ökar med ökande cementhalt. Dessutom inverkar torkklimatet, både fukt- och temperaturtillstånd, på uttorkningen, där speciellt en låg relativt fuktighet samt förhöjda temperaturer i omgivningen påskyndar uttorkningen.

Svenska Betongföreningens programråd väst hade 3 mars 2010 ett medlemsmöte där olika verktyg för bedömning av uttorkningstid för betongkonstruktioner presenterades. De verktyg som presenterades var datorprogrammet **TorkaS v. 3**, datorprogrammet **BI Dry** samt ett **erfarenhetsbaserat koncept utvecklat av Dry-IT** som är baserat på erfarenheter från fuktmätningar som Dry-IT har gjort. Som en del av aktiviteten gjordes beräkningar av uttorkningstider med de olika verktygen för några olika beräkningsfall. Totalt har sju beräkningsfall tagits fram, där beräkningsfallen var både fiktiva och baserade på data från verkliga konstruktioner. Resultaten som presenterades vid mötet 3 mars 2010 visade att bedömningar gjorda med de olika verktygen skiljde sig åt relativt mycket.

För att göra resultaten från mötet 3 mars 2010 mer allmänt tillgängliga har SBUF-projekt 12389 "Jämförelse mellan verktyg för bedömning av uttorkning av betongkonstruktioner" genomförts.

## 1.2 Syfte och avgränsningar

Syftet med SBUF-projekt 12389 "Jämförelse mellan verktyg för bedömning av uttorkning av betongkonstruktioner" är att på ett systematiskt och överskådligt sätt ställa samman resultaten från Svenska Betongföreningens medlemsmöte 3 mars 2010. Dessutom har ett antal nya beräkningsfall tagits fram för att ytterligare utvärdera de olika bedömningsverktygen. Totalt presenteras resultaten från 26 beräkningsfall i denna rapport, sju beräkningsfall framtagna för mötet 3 mars 2010 och 19 nya beräkningsfall som har tagits fram i det aktuella projektet.

Projektet har avgränsats till att behandla prognostiseringar av uttorkningstider med SBUF:s lathund samt datorverktygen TorkaS v. 2 och v. 3 samt BI Dry. För sju av de undersökta beräkningsfallen har också ett erfarenhetsbaserat konceptet utvecklat av Dry-IT behandlats. I projektet har endast uttorkningstider prognostiserade med de olika verktygen jämförts, dvs. ingen jämförelse har gjorts med mätningar av fuktillstånd och/eller uttorkningstider har genomförts. Det görs heller inga djupare analyser till vad eventuella skillnader i prognostiserade uttorkningstider mellan de olika bedömningsverktygen beror på.

Eftersom TorkaS inte är knutet till något företag, t.ex. betongtillverkar eller fuktkonsult, har det blivit något av en "branschstandard" när det gäller bedömningar av uttorkning av betongkonstruktioner. Därför har extra fokus lagts på TorkaS v.3 vid utvärderingen av de olika bedömningsverktygen.

## 1.3 Metod

Projektet har genomförts i fyra steg: (i) inledande litteraturstudie (ii) framtagande av beräkningsfall, (iii) prognostiseringar av uttorkningstider med de olika verktygen samt (iv) utvärdering och analys av resultaten från genomförda prognostiseringar. I den inledande litteraturstudien har information tagits fram om de olika verktygen för bedömning av uttorkningstider samt om det finns jämförelser mellan verktygen och uppmätta data. Ett antal beräkningsfall har tagits fram i projektet för att prova de olika bedömningsverktygen. Prognostiseringar har utförts med de olika bedömningsverktygen och resultaten har ställts samman. Slutligen har resultaten analyserats samt kommenterats och avslutande kommentarer ges. Dessutom ges förslag på fortsatta studier.



## 2 Verktyg för bedömning av uttorkningstider hos betongkonstruktioner

### 2.1 Inledning

Den huvudsakliga frågeställningen när det gäller fuktillstånd i betong är uttorkning av konstruktioner de första månaderna efter gjutning och när ytbeläggningar säkert kan appliceras på betongens yta utan att fuktrelaterade problem uppstår. Under de första månaderna har den kemiska bindningen av fukt en stor inverkan på fuktillståndet i betongen, speciellt för betonger med låga vct. Om vct väljs tillräckligt lågt går det att få en ”självtorkande” betong, dvs. fuktillståndet blir tillräckligt lågt så att en ytbeläggning kan appliceras endast genom den kemiska bindningen av fukt. För att prognostisera uttorkning av betongkonstruktioner krävs således ett verktyg som både tar hänsyn till uttorkning på grund av skillnader i fuktkoncentrationer och temperaturvariationer samt kemisk bindning av fukten.

För att undvika att fuktrelaterade problem uppstår vid applicering av ytbeläggningar får inte ytbeläggningar appliceras när fuktillståndet i betongen överskrider ett visst kritiskt fuktillstånd. Vad detta kritiska fuktillstånd är beror på typen av ytbeläggningen och vilken typ av fuktrelaterade problem som avses. I Nilsson (2006) finns en aktuell sammanställning över kritiska fuktillstånd för olika material och fuktrelaterade problem.

### 2.2 Undersökta verktyg för bedömning av uttorkning

Verktyg för bedömning av uttorkningstider hos betongkonstruktioner har varit tillgängliga sedan 1970-talet. De första verktygen var utformade som **lathundar**, se t.ex. Nilsson (1977) och SBUF (1995), med vilka användaren på ett enkelt sätt kan uttorkningstider för olika betongkonstruktioner. Under 1980- och 1990-talet utvecklades det datorbaserade verktyget **TorkaS** vid avdelningarna för Byggnadsmaterial och Byggnadsfysik vid Lunds tekniska högskola, se SBUF (1998) och SBUF (2002). Betongtillverkaren Betongindustri har tagit fram ett eget datorbaserat verktyg, **BI Dry**, för bedömning av uttorkningstider hos Betongindustri betonger, se Betongindustri (2008). Det finns även verktyg som inte är utformade som lathundar eller datorberäkningar, där bedömningar av uttorkningstid istället baseras på erfarenheter från tidigare undersökta konstruktioner, t.ex. det **erfarenhetsbaserade koncept** som fuktkonsulten Dry-IT har utvecklat.

I följande kapitel görs en kort genomgång av de olika undersökta verktygen.

#### 2.2.1 Lathundar

En lathund är ett enkelt verktyg för att bedöma uttorkningstider, som är framtaget baserat på erfarenheter från laboratorieförsök och fältmätningar. Exempel på tillgängliga lathundar finns beskrivna i t.ex. Nilsson (1977) samt i slutrapporten från SBUF-projekt 03107 ”Betongtorkning – lathund”, se SBUF (1995).

SBUF:s lathund är utformad så att uttorkningstiden bedöms genom att utgå från ett ”normalfall” som sedan korrigeras med ett antal ”multiplikatorer” vid avvikelser från normalfallet. Antalet multiplikatorer är fem, där hänsyn tas till (i) vct och RF-krav, (ii) tjocklek på konstruktionen, (iii) enkel- eller dubbelsidig uttorkning, (iv) torkklimatet (temperatur och relativ fuktighet) samt (v) härdningsförhållanden.

Den stora fördelen med SBUF:s lathund är att användaren kan göra en snabb bedömning av erforderliga uttorkningstider. Dock ger lathunden endast en grov uppskattning av erforderlig uttorkningstid, så resultaten får mer ses som en indikation på uttorkningstiden. En stor nackdel är att lathunden endast gäller för de förutsättningar, t.ex. betongkvaliteter, den är framtagen för, vilket betyder att om andra förutsättningar gäller ger lathunden inte tillförlitliga uppskattningar av uttorkningstid. Det går heller inte att göra skillnad när på året konstruktionen uppförs.

I litteraturen finns inget redovisat om jämförelser mellan prognostiseringar av uttorkning gjord med SBUF:s lathund och uppmätta uttorkningar.

### 2.2.2 TorkaS

**TorkaS** är utvecklat vid Lund tekniska högskola i samarbete med SBUF, Cementa, NCC, Swerock och Thyréns. Datorverktyget TorkaS är ett generellt verktyg för att bedöma uttorkningstider hos betongkonstruktioner, där hänsyn tas till konstruktionens utformning, betongens sammansättning och torkklimatet. Fram tills nu har tre olika versioner av TorkaS släppts – den senaste versionen (v. 3) släpptes under hösten 2009 (utvecklat i samarbete med SBUF, se SBUF-projekt 11970). Tidigare versioner av programmet finns beskrivna i SBUF-projekt 06005, SBUF (1998), TorkaS v. 1, och SBUF-projekt 10075, SBUF (2002), TorkaS v. 2. Eftersom TorkaS inte är knutet till något företag, t.ex. betongtillverkar eller fuktkonsult, har det blivit något av en ”branschstandard” när det gäller bedömningar av uttorkning av betongkonstruktioner.

I TorkaS v. 3 har bl.a. möjligheten att lägga till kiselstoff till betongen tagits bort och ytterligare möjligheter att variera randvillkoren vid torkning lagts till (olika typer av formmaterial samt inverkan av olika vindförhållanden) samt en möjlighet att exportera den prognostiserade fuktfördelningen som en textfil. Vidare har en nya klimatdata lagts till (från perioden 1995-2005) samt att modellering av uttorkning har uppraderats med en ny värmemodul och anpassning till nya mätdata, Arfvidsson (2010).

De stora fördelarna med TorkaS är att hänsyn tas till betongens självuttorkning och att användaren snabbt kan göra en bedömning av erforderliga uttorkningstider för olika betonger samt olika konstruktionsutformningar och torkklimat. En nackdel är att TorkaS endast gäller för de förutsättningar, t.ex. bindemedel, programmet är framtaget för, vilket betyder att om andra förutsättningar gäller ger TorkaS inte helt tillförlitliga uppskattningar. Ett exempel är betonger som är tillverkade med andra cement än Cementas Byggcement (CEM II/A-LL 42,5 R). En ytterligare nackdel med TorkaS är att dess beräkningsmodell inte är kända för användaren.

Det har även gjorts en del utvärderingar av prognostiseringar av uttorkning utförda med TorkaS v. 1 och TorkaS v. 2, där prognostiseringar har jämförts med verkliga fall, se exempelvis Hedenblad (1998), SBUF (2003), Johansson (2003) samt Andersson & Lundberg (2007). I Hedenblad (1998) har en jämförelse gjorts mellan uttorkningstider prognostiserade med TorkaS v. 1 och uppmätta uttorkningstider där överensstämmelse har konstaterats. I SBUF (2003), Johansson (2003) och Andersson & Lundberg (2007) har jämförelser gjorts mellan prognostiseringar av uttorkning gjorda TorkaS v. 2 och fuktmätningar i laboratorium och i fält. I Johansson (2003) visar resultaten att prognostiseringar med TorkaS v. 2 stämmer väl överens med uppmätta uttorkningstider (differensen mellan uppmätta och prognostiserade fukttillstånd är upp till 4 % RF), utom för låga vct (vct=0,38) där TorkaS v. 2 prognostiserar högre fukttillstånd än vad som mätts upp. Liknande resultat har Andersson & Lundberg (2007) kommit fram till, där prognoser med TorkaS v. 2 ger längre uttorkningstider än vad

som mätts upp vid försök (betonger med  $v_{ct}=0,35-0,55$ ). I dagsläget har det inte gjorts några utvärderingar av prognostiseringar av uttorkningstid utförda med TorkaS v. 3.

TorkaS v. 3 har laddats ned från SBUF:s hemsida. [www.sbuf.se](http://www.sbuf.se).

### 2.2.3 BI Dry

**BI Dry**, beskrivet i Betongindustri (2008) samt bakomliggande teorier i Jonasson et al (1998), Jonasson et al (2005) samt Jonasson et al (2006). Datorverktyget BI Dry är ett verktyg utvecklat av betongtillverkaren Betongindustri i samarbete med Luleå tekniska högskola för att bedöma uttorkningstider för sex av Betongindustri's betonger (benämnda TorkBI 1-5 samt C25/30) för olika konstruktionstyper och torkklimat. Betongerna TorkBI 1-5 ingår i konceptet BI Dry för fuktsäkert betongbyggande, där Betongindustri garanterar att den aktuella betongkonstruktionen blir tillräckligt torr innan ytbeläggningar appliceras. Detta betyder också att Betongindustri tar ansvar för att den aktuella betongkonstruktionen blir tillräckligt torr.

Trots att BI Dry är utvecklat att bedöma uttorkning hos betongerna TorkBI 1-5 går verktyget dock också att använda för att bedöma uttorkningstider för olika betongkvaliteter, genom att använda uppgifter om  $v_{ct}$  hos TorkBI 1-5 samt C25/30 ( $v_{ct}=0,34-0,66$ ). Sedan BI Dry introducerades första gången har det skett en kontinuerlig utveckling av programmet och den i dagsläget (december 2010) mest aktuella versionen är BI Dry v. 1.3.7.

De stora fördelarna med BI Dry är att hänsyn tas till betongens självuttorkning och att användaren snabbt kan göra en bedömning av erforderliga uttorkningstider för olika betonger samt olika konstruktionsutformningar och torkklimat. BI Dry är i första hand framtaget för att bedöma uttorkning av Betongindustri's betonger men kan också användas för bedömning av uttorkning av andra betonger, dock kan dessa bedömningar vara behäftade med vissa fel. En annan fördel med BI Dry är att de bakomliggande teorierna är kända för användaren, se Jonasson et al (1998). Jonasson et al (2005) samt Jonasson et al (2006). En nackdel är att BI Dry endast gäller för de förutsättningar, t.ex. bindemedel, programmet är framtaget för, vilket betyder att om andra förutsättningar gäller ger BI Dry inte helt tillförlitliga uppskattningar.

Det finns några utvärderingar av prognostiseringar av uttorkning gjorda med BI Dry v. 1, där prognostiseringar har jämförts med verkliga fall, se exempelvis Andersson & Lundberg (2007). Resultaten visar att prognoser med BI Dry v. 1 ger något längre uttorkningstider än vad som mätts upp vid försök (betonger med  $v_{ct}=0,35-0,55$ ).

BI Dry v. 1.3.7 har laddats ned från BI Dry:s hemsida: [www.bidry.se](http://www.bidry.se).

### 2.2.4 Erfarenhetsbaserade prognoser av uttorkning

**Erfarenhetsbaserade prognoser, t.ex. det koncept som Dry-IT utvecklat.** I Dry-IT:s koncept baseras bedömningar av uttorkningstider på erfarenheter från fuktmätningar. Resultat från fuktmätningar som utförs av Dry-IT lagras i en databas tillsammans med annan relevant information, t.ex. betongkvalitet, torkklimat och utformning av konstruktionen. Bedömningen av uttorkningstiden görs sedan av fuktsakkunnig hos Dry-IT.

Den stora fördelen med erfarenhetsbaserade prognoser är att de är baserade på uppmätta fukt-tillstånd och på så sätt borde vara nära verkligheten. En nackdel är att bedömningen av uttorkningstid görs av fuktsakkunnig hos Dry-IT, vilket betyder att uppdragsgivaren inte har någon direkt möjlighet att variera inverkan faktorer.



### 3 Beräkningsfall

Ett antal beräkningsfall har tagits fram för att utvärdera hur de olika verktygen för bedömning av uttorkningstider, där antingen erforderliga betongkvaliteter eller erforderliga uttorkningstider för betonger med olika vct prognostiserats utifrån givna förutsättningar rörande konstruktionens utformning och torrklimat. Beräkningsfallen har numrerats beroende på om de tagits fram för Svenska Betongföreningens medlemsmöte 3 mars (betecknade med romerska siffror) eller tagits fram i det aktuella projektet (betecknade med bokstäver samt arabiska siffror).

#### 3.1 Bedömning av erforderlig betongkvalitet

Fem beräkningsfall har tagits fram där erforderlig betongkvalitet skall bedömas utifrån givna förutsättningar rörande konstruktionens utformning och torrklimat. Samtliga beräkningsfall togs fram till Svenska Betongföreningens medlemsmöte 3 mars 2010.

Följande beräkningsfall har studerats.

	Fall I	Fall II
Typ	Platta på mark	Platta på mark
Plats	Göteborg	Göteborg
Tjocklek isolering	150 mm	150 mm
Tjocklek betong	320 mm	300 mm
Tidpunkter:		
Gjutning	v. 17 2009	v. 2 2009
Tätt hus	v. 30 2009	v. 6 2009
Lätt värme	v. 32 2009 (+20°C, 60 % RF)	v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)
Luftvärme	v. 36 2009 (+20°C, 60 % RF)	v. 9 2009 (+20°C, 60 % RF)
Sluttid	v. 47 2009	v. 14 2009

	Fall III
Typ	Platta på mark
Plats	Göteborg
Tjocklek isolering	150 mm
Tjocklek betong	300 mm
Tidpunkter:	
Gjutning	v. 21 2009
Tätt hus	v. 26 2009
Lätt värme	v. 28 2009 (+20°C, 60 % RF)
Luftvärme	v. 29 2009 (+20°C, 60 % RF)
Sluttid	v. 48 2009

	Fall IV	Fall V
Typ	Plattbärlag	Kvarsittande form
Plats	Göteborg	Göteborg
Tjocklek plattbärlag	70 mm	200 mm
Tjocklek betong	200 mm	
Tidpunkter:		v. 2 2009
Gjutning	v. 2 2009	v. 12 2009
Tätt hus	v. 6 2009	v. 14 2009 (+20°C, 60 % RF)
Lätt värme	v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)	v. 16 2009 (+20°C, 60 % RF)
Luftvärme	v. 9 2009 (+20°C, 60 % RF)	v. 26 2009
Sluttid	v. 14 2009	

För samtliga fem beräkningsfall har prognostiseringar av erforderlig betongkvalitet gjorts med SBUF:s lathund, TorkaS v. 3, BI Dry samt det erfarenhetsbaserade konceptet utvecklat av Dry-IT.

## 3.2 Prognostisering av erforderliga uttorkningstider

Prognostisering av erforderliga uttorkningstider har gjorts för ”laboratoriekonstruktioner” och ”verkliga konstruktioner”. Med ”laboratoriekonstruktion” avses en konstruktion där torkklimatet (temperatur- och fuktillstånd) är samma under hela torkperioden. Syftet är att undersöka erforderliga uttorkningstider prognostiserade för renodlade fall utan variationer i torkklimat. Med ”verklig konstruktion” avses en konstruktion torkklimatet varierar under den del av torkperioden där klimatet inte är styrt. Syftet är att undersöka erforderliga uttorkningstider prognostiserade för fall som efterliknar verkliga förhållanden.

Betongtemperaturen vid gjutning har valts till +15 °C för samtliga beräkningsfall.

### 3.2.1 Beräkningsfall – laboratoriekonstruktioner

Fyra beräkningsfall har tagits fram för bedömning av erforderliga uttorkningstider för ”laboratoriekonstruktioner” utifrån givna förutsättningar rörande konstruktionernas utformning, torkklimat med för olika betongkvaliteter (vct). Den konstruktion som har studerats är ett 200 mm tjockt mellanbjälklag med kvarsittande stålform. Fyra olika beräkningsfall har studerats:

- **Fall A.** T=+20°C och 60 % RF.
- **Fall B.** T=+10°C och 60 % RF.
- **Fall C.** T=0°C och 60 % RF.
- **Fall D.** T=+30°C och 60 % RF.

För samtliga fall har prognostiseringar av erforderliga uttorkningstider gjorts med TorkaS v. 2 och v. 3 samt BI Dry v. 1.3.7.

### 3.2.2 Beräkningsfall – verkliga konstruktioner

Tolv beräkningsfall har tagits fram för bedömning av erforderliga uttorkningstider för ”verkliga konstruktioner” utifrån givna förutsättningar rörande konstruktionernas utformning, torkklimat men för olika betongkvaliteter (vct). Sex olika konstruktioner har studerats, där varje konstruktion har studerats i ett sommarfall och i ett vinterfall. Två av beräkningsfallen togs fram till Svenska Betongföreningens medlemsmöte 3 mars 2010 och övriga åtta beräknings-

fall har tagits fram i det aktuella projektet. I Torås finns en möjlighet att variera randvillkoren för uttorkning, bl.a. typ av formmaterial, täckning vindförhållanden. För varje beräkningsfall har tre olika underfall undersökts där vindhastigheten vid ytan har varierats ("Vindstilla", "Vind" samt "Stark vind"). Detta betyder att totalt har 36 olika underfall beräknats, betecknade fall 1-36.

Sex olika konstruktioner har studerats:

- **Konstruktion A.** Platta på mark. Platta på mark (300 mm betong) med underliggande cellplastisolering (150 mm tjock) på en makadambädd. Fall 1-3 (sommarfall) och fall 31-33 (vinterfall).
- **Konstruktion B.** Plattbärlag. Plattbärlag (75 mm tjocklek) med pågjutning av betong (200 mm). Fall 4-6 (sommarfall) och fall 34-36 (vinterfall).
- **Konstruktion C.** Platta på mark. Platta på mark (200 mm betong) med underliggande cellplastisolering (100 mm tjock) på en makadambädd. Fall 7-9 (vinterfall) och fall 13-15 (sommarfall).
- **Konstruktion D.** Plattbärlag. Plattbärlag (75 mm tjocklek) med pågjutning av betong (100 mm). Fall 10-12 (vinterfall) och fall 16-18 (sommarfall).
- **Konstruktion E.** Mellanbjälklag med kvarsittande stålform. Platta (120 mm betong) på kvarsittande stålform. Fall 19-21 (vinterfall) och fall 22-24 (sommarfall).
- **Konstruktion F.** Mellanbjälklag utan kvarsittande form<sup>1</sup>. Platta (200 mm betong) med dubbelsidig uttorkning. Fall 25-27 (vinterfall) och fall 28-30 (sommarfall).

För samtliga fall har erforderliga uttorkningstider för betonger med  $v_{ct}=0,35-0,70$  (i steg om 0,05) prognostiserats. Följande fall har studerats:

Platta på mark – fall 1-3	Plattbärlag – fall 4-6
Tjocklek isolering: 150 mm	Tjocklek plattbärlag: 75 mm
Tjocklek betong: 300 mm	Tjocklek betong: 200 mm
Gjutning: v. 21 2009	Gjutning: v. 21 2009
Tätt hus: v. 25 2009	Tätt hus: v. 25 2009
Styrd torkning: v. 27 2009 (+20°C, 60 % RF)	Styrd torkning: v. 27 2009 (+20°C, 60 % RF)

Platta på mark – fall 7-9	Plattbärlag – fall 10-12
Tjocklek isolering: 100 mm	Tjocklek plattbärlag: 75 mm
Tjocklek betong: 200 mm	Tjocklek betong: 100 mm
Gjutning: v. 2 2009	Gjutning: v. 2 2009
Tätt hus: v. 6 2009	Tätt hus: v. 6 2009
Styrd torkning: v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)	Styrd torkning: v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)

<sup>1</sup> Detta fall går inte att behandla i BI Dry. Istället har ett mellanbjälklag (100 mm betong) med kvarsittande form behandlats. Uttorkningen av denna konstruktion (enkelsidig uttorkning av 100 mm betong) motsvarar uttorkningen av ett mellanbjälklag utan kvarsittande med dubbla tjockleken (dubbelsidig uttorkning av 200 mm betong).

<b>Platta på mark – fall 13-15</b>	<b>Plattbärlag – fall 16-18</b>
Tjocklek isolering: 100 mm	Tjocklek plattbärlag: 75 mm
Tjocklek betong: 200 mm	Tjocklek betong: 100 mm
Gjutning: v. 21 2009	Gjutning: v. 21 2009
Tätt hus: v. 25 2009	Tätt hus: v. 25 2009
Styrd torkning: v. 27 2009 (+20°C, 60 % RF)	Styrd torkning: v. 27 2009 (+20°C, 60 % RF)

<b>Kvarsittande stålform – fall 19-21</b>	<b>Kvarsittande stålform – fall 22-24</b>
Tjocklek betong: 120 mm	Tjocklek betong: 120 mm
Gjutning: v. 2 2009	Gjutning: v. 21 2009
Tätt hus: v. 6 2009	Tätt hus: v. 25 2009
Styrd torkning: v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)	Styrd torkning: v. 27 2009 (+20°C, 60 % RF)

<b>Dubbelsidig uttorkning – fall 25-27</b>	<b>Dubbelsidig uttorkning – fall 28-30</b>
Tjocklek betong: 200 mm	Tjocklek betong: 200 mm
Gjutning: v. 2 2009	Gjutning: v. 21 2009
Tätt hus: v. 6 2009	Tätt hus: v. 25 2009
Styrd torkning: v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)	Styrd torkning: v. 27 2009 (+20°C, 60 % RF)

<b>Platta på mark – fall 31-33</b>	<b>Plattbärlag – fall 34-36</b>
Tjocklek isolering: 150 mm	Tjocklek plattbärlag: 75 mm
Tjocklek betong: 300 mm	Tjocklek betong: 200 mm
Gjutning: v. 2 2009	Gjutning: v. 2 2009
Tätt hus: v. 6 2009	Tätt hus: v. 6 2009
Styrd torkning: v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)	Styrd torkning: v. 8 2009 (+20°C, 60 % RF)

Fall 31-33 och 34-36 har behandlats både vid Svenska Betongföreningens möte 3 mars 2010 (betecknade fall VI och VII) och i det aktuella projektet. För samtliga fall har prognostiseringar av erforderlig betongkvalitet gjorts med SBUF:s lathund, TorkaS v. 3 samt BI Dry v. 1.3.7. För fall V och VI har också prognostiseringar gjorts med konceptet utvecklat av Dry-IT.



## 4 Resultat och kommentarer

Två olika typer av beräkningsfall har behandlats i projektet:

- Bedömning av erforderliga betongkvaliteter utifrån givna förutsättningar om konstruktionen och uttorkningsklimat samt maximala uttorkningstider. Fall I-V.
- Bedömning av erforderliga uttorkningstider för betong med olika vct utifrån givna förutsättningar om konstruktionen och uttorkningsklimat. Fall 1-36 samt fall A-D.

För samtliga beräkningsfall har det kritiska fukttillståndet satts till 85 % RF. Nivån på kritiskt fukttillstånd är vald för att undvika mögelpåväxt samt emissioner från nedbrytning av golvbeläggningar, se Nilsson (2006). Vid bedömning av uttorkningstider i förhållande till kritiska fukttillstånd skall även hänsyn tas till osäkerhet i beräkningar och mätningar av fukttillstånd. I BBR avsnitt 6:52 finns följande skrivning:

*Vid bestämning av högsta tillåtna fukttillstånd ska kritiska fukttillstånd användas varvid hänsyn tas till osäkerhet i beräkningsmodell, ingångsparametrar (t.ex. materialdata) eller mätmetoder.*

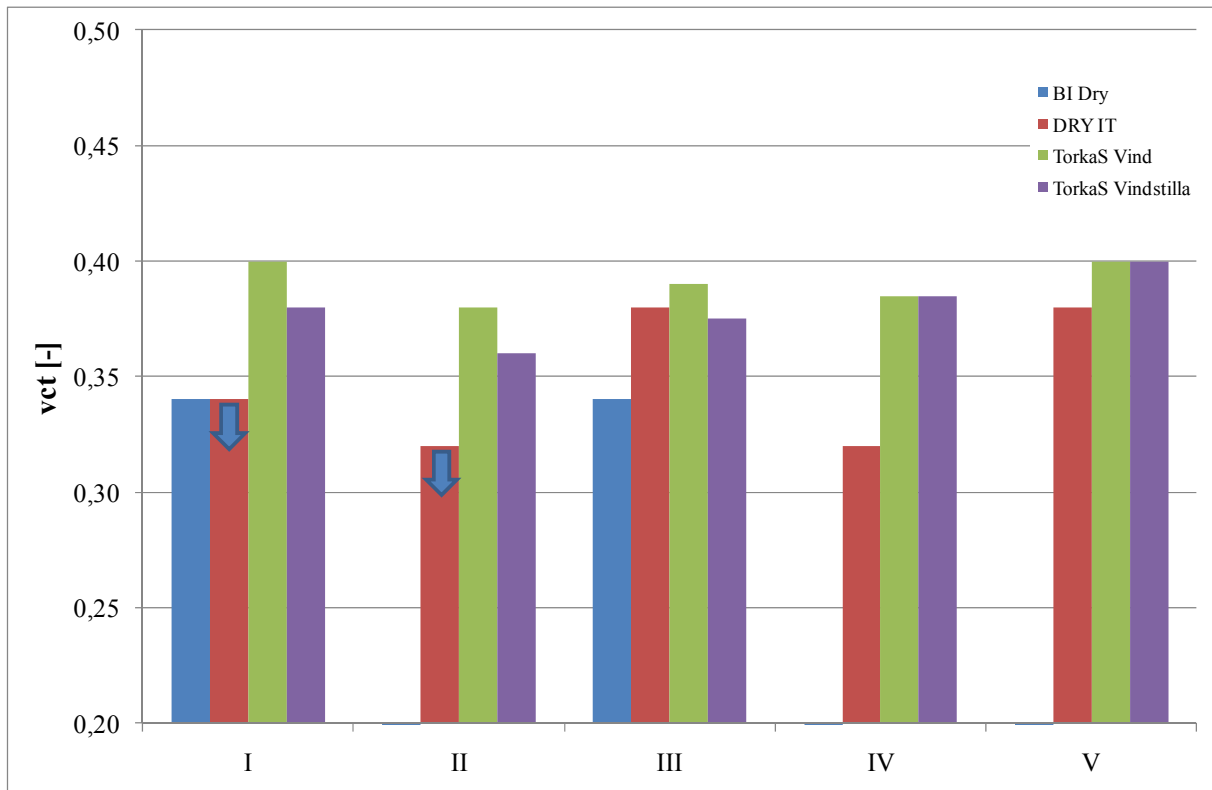
Detta betyder att en osäkerhet bör läggas på det kritiska fukttillståndet, som en extra säkerhetsmarginal. I detta projekt har denna säkerhetsmarginal satts till 2 % RF, dvs. det fukttillstånd som ska uppnås vid avslutad torkning är  $RF_{\text{krit}}=83\% \text{ RF}$  (dvs.  $85\% - 2\% = 83\%$ ).

För laboratoriekonstruktionerna (fall A-D) har också ett kritiskt fukttillstånd på 90 % använts. Således har åtta beräkningar av erforderliga uttorkningstider gjorts med respektive beräkningsverktyg för laboratoriefallen.

I följande två kapitel presenteras resultaten från genomförda beräkningar samt analys och kommentarer av resultaten.

### 4.1 Bedömning av erforderlig betongkvalitet

Bedömningar av erforderliga betongkvaliteter för givna uttorkningstider redovisas i Figur 1. Beräkningar av erforderliga uttorkningstider har gjorts med BI Dry, TorkaS v. 3 samt Dry-IT:s erfarenhetsbaserade koncept. I TorkaS v. 3 har två olika vindförhållanden studerats, Vindstill samt Vind. För fall I och II har bedömningar med Dry-IT:s koncept resulterat i att en betong med lägre vct än 0,34 (fall I) och 0,32 (fall II) erfordras – detta markeras med pilar i Figur 1.



Figur 1. Bedömning av erforderliga betongkvaliteter för fall I (platta på mark – 150 mm isolering och 320 mm betong), fall II (platta på mark – 150 mm isolering och 300 mm betong, vinterfall), fall III (platta på mark – 150 mm isolering och 300 mm betong, sommarfall), fall IV (plattbärlag – 70 mm plattbärlag och 200 mm pågjutning, vinterfall) och fall V (plattbärlag – 70 mm plattbärlag och 200 mm pågjutning, sommarfall).  $RF_{krit}=83\% RF$

I Figur 1 går det att observera att erforderliga betongkvaliteter för fall I-V är höga, där högsta  $vct=0,40$ . Av de fem undersökta beräkningsfallen är det endast fall I och III som har gett resultat i BI Dry (för betongen Tork BI 1,  $vct=0,34$ ) – fall II, IV och V har gett för långa uttorkningstider även om Tork BI 1 ( $vct=0,34$ ) används. För TorkaS v. 3 och Dry-IT:s koncept resulterar samtliga beräkningsfall i förslag på en betongkvalitet ( $vct<0,40$ ).

Det går att observera vissa skillnader mellan de olika bedömningsverktygen. TorkaS v. 3 ger generellt högst  $vct$ , BI Dry ger lägst  $vct$  medan Dry-IT:s koncept ger  $vct$  som ligger mellan BI Dry och TorkaS v. 3. En motsvarande trend går också att observera i bedömningen av erforderliga uttorkningstider för fall VI och VII, se Figur 2.

En förklaring till resultatet i Figur 1, där  $vct<0,40$ , är att fall I-V är utformade med stora tjocklekar på betongen och krav på relativt korta uttorkningstider. Med dessa förutsättningar har BI Dry visat sig ge pessimistiska prognoser (motsvarande observation kan göras i resultaten från beräkningsfall 1-36 som redovisas i kapitel 4.2.2). En förklaring är att Betongindustri tar ansvar för att Tork BI-betongerna, där erforderliga uttorkningstider bedömts med BI Dry, torkar tillräckligt snabbt och att det därför finns en extra säkerhetsmarginal inlagd i BI Dry. Motsvarande ansvar för att en viss betongkvalitet torkar tillräckligt fort finns inte om TorkaS har använts för att bedöma erforderliga uttorkningstider. I TorkaS finns det därför inget behov av att introducera extra säkerhetsmarginaler i bedömningarna av erforderliga uttorkningstider.

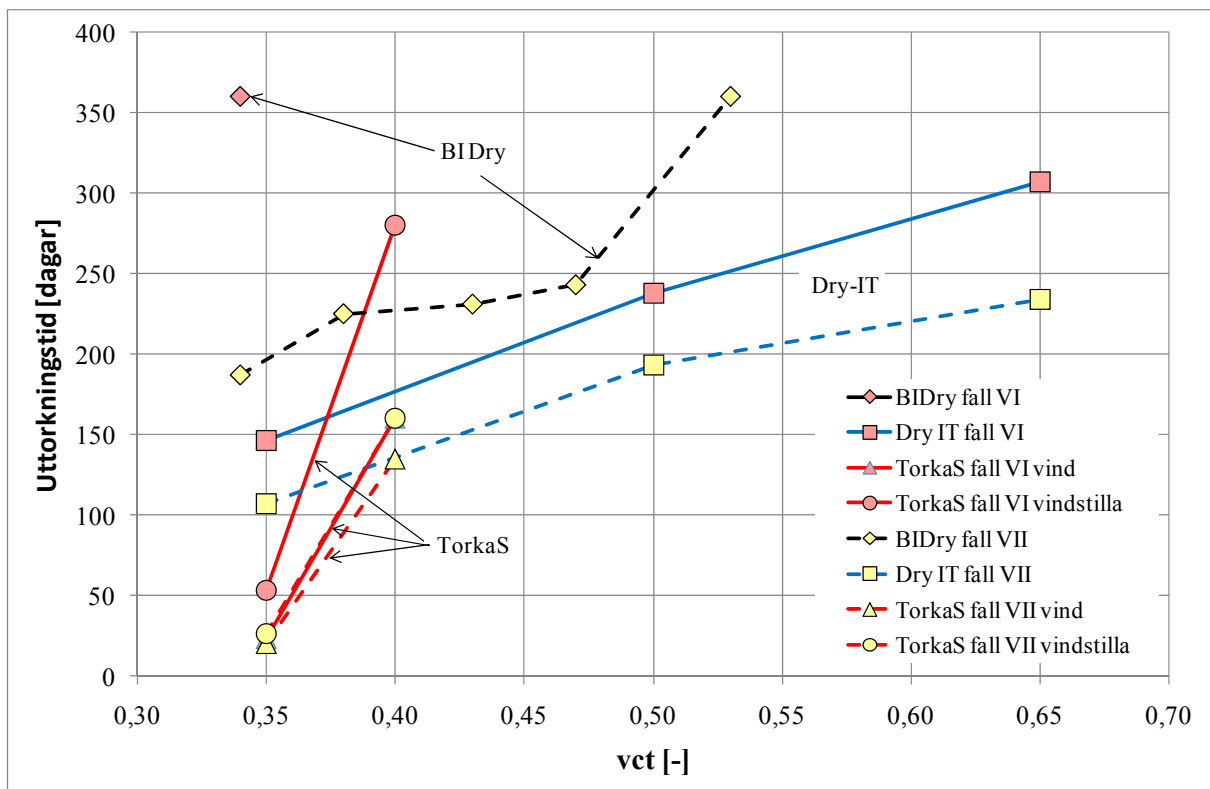
## 4.2 Prognostisering av erforderliga uttorkningstider

För fall 1-36 har prognostiseringar av erforderliga uttorkningstider har gjorts med TorkaS v.2 och v.3, BI Dry samt SBUF:s lathund. För fall VI och VII har TorkaS v. 3, BI Dry samt Dry-IT:s koncept använts för prognostisering av erforderlig uttorkningstid. Resultaten redovisas i kapitel 4.2.1 (fall VI-VII), 4.2.2 (fall 1-36) samt 4.2.4 (jämförelse av TorkaS v. 2 och v. 3 samt BI Dry). Erforderliga uttorkningstider på upp till 1 år redovisas – för uttorkningstider över 1 år är prognostiseringarna behäftade med allt för stora osäkerheter.

### 4.2.1 Gamla beräkningsfall – fall VI-VII

Bedömningar av uttorkningstider har gett följande resultat, se Figur 2 (platta på mark respektive plattbärlag). I Figur 2 redovisas endast uttorkningstider prognostiserade på upp till 1 år – längre prognostiserade uttorkningstider redovisas inte. Kritiskt fuktillstånd har satts till  $RF_{krit}=83\% RF$

Två olika vindförhållanden har studerats med TorkaS v. 3 där det antingen betongen är utsatt för en viss vind (betecknat ”vind”) eller att det är vindstilla (betecknat ”vindstilla”). I resultaten från TorkaS sammanfaller resultaten från fall VI vind och fall VII vindstilla.



Figur 2. Bedömning av erforderliga uttorkningstider för fall VI (platta på mark – 150 mm isolering och 300 mm betong) och fall VII (plattbärlag – 75 mm plattbärlag och 200 mm på-gjutning). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är för fall VI 40 % av betongens tjocklek, dvs. 120 mm, och för fall VII 25 % av betongens tjocklek, dvs. 50 mm.  $RF_{krit}=83\% RF$

I Figur 2 går det att observera stora skillnader i erforderliga uttorkningstider mellan de olika bedömningsverktygen. För betonger med  $vct < 0,40$  ger TorkaS v. 3 kortast erforderliga uttorkningstider medan för betonger med  $vct > 0,40$  ger det erfarenhetsbaserade konceptet ut-

vecklat av Dry-IT kortast erforderliga uttorkningstider. BI Dry ger längst erforderliga uttorkningstider för betonger med  $v_{ct} < 0,40$  medan TorkaS v. 3 ger längst erforderliga uttorkningstider för betonger med  $v_{ct} > 0,45$ .

Det är stora skillnader mellan prognostiserade erforderliga uttorkningstider för olika betongkvaliteter gjorda med de olika bedömningsverktygen. I TorkaS blir erforderliga uttorkningstider kortare än 1 år endast för betonger med  $v_{ct} = 0,35$  och  $v_{ct} = 0,40$ . För betonger med  $v_{ct} > 0,45$  blir erforderliga uttorkningstider över 1 år och redovisas därför inte i Figur 2. Med BI Dry ger endast TorkBI 1 ( $v_{ct} = 0,34$ ) erforderliga uttorkningstid som är mindre än 1 år för fall VI medan TorkBI 1-5 ( $v_{ct} = 0,34-0,53$ ) ger erforderlig uttorkningstid som är mindre än 1 år för fall VII. Dry-IT:s erfarenhetsbaserade koncept ger erforderliga uttorkningstider som är mindre än 1 år för betonger med  $v_{ct} = 0,35-0,70$ .

En annan sak som skiljer de olika bedömningsverktygen åt är skillnaden i prognostiserade erforderliga uttorkningstider när betongens  $v_{ct}$  ändras. Med TorkaS v. 3 ökar erforderliga uttorkningstider kraftigt när  $v_{ct}$  ökas och blir över 1 år för betonger med  $v_{ct} > 0,45$ . Resultaten från Dry-IT:s erfarenhetsbaserade koncept och fall VII i BI Dry visar en betydligt mindre ökning av erforderliga uttorkningstider när  $v_{ct}$  ökas.

#### 4.2.2 Nya beräkningsfall (laborariekonstruktioner) – fall A-D

Bedömningar av erforderliga uttorkningstider för ”laborariekonstruktioner” (200 mm tjock betongplatta med kvarstannande stålform, dvs. enkelsidig uttorkning) har gett följande resultat, se Figur 3 samt Figur 4. TorkaS v. 2 och v. 3 samt BI Dry har studerats. Fyra olika torkklimat har studerats (60 % RF för samtliga fall):

- $T = +20$  °C.
- $T = +10$  °C.
- $T = 0$  °C.
- $T = +30$  °C.

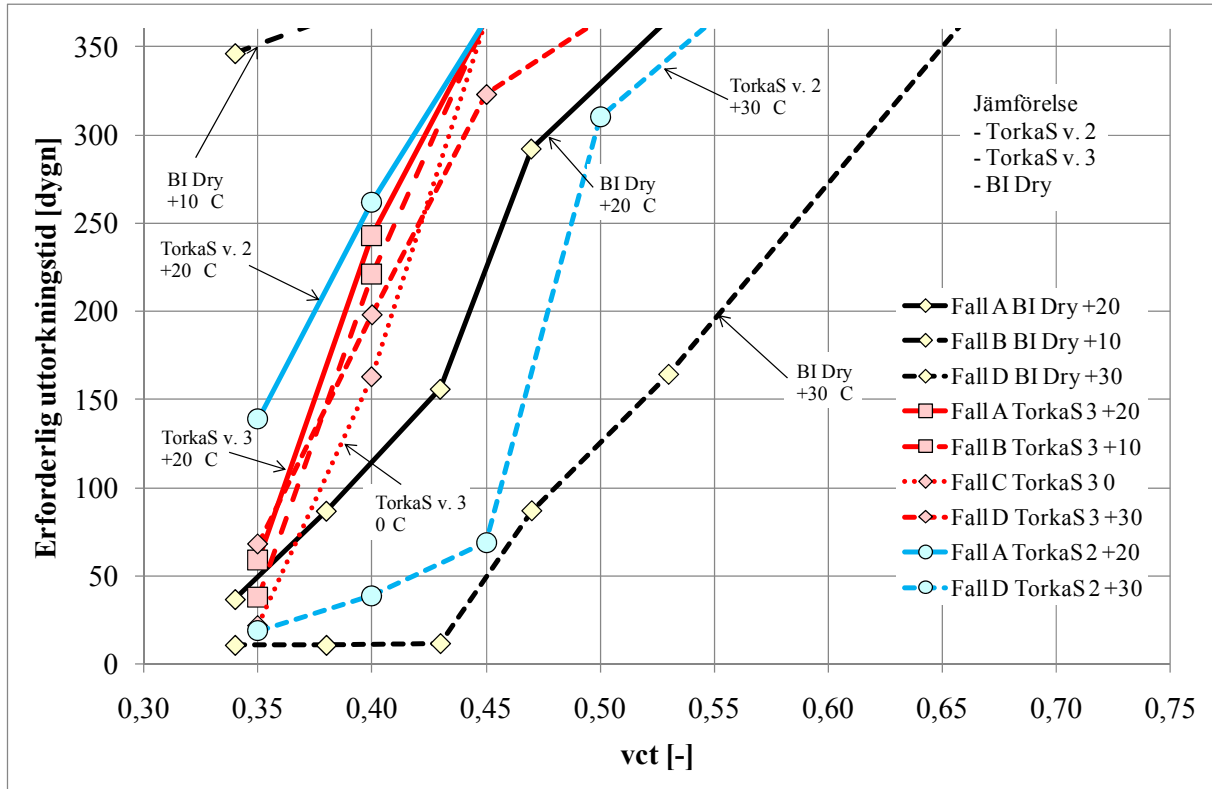
Låga  $v_{ct}$  i BI Dry (Tork BI 1-3) resulterade i uttorkningstider kortare än 28 dygn<sup>2</sup> för fall D ( $T = +30$  °C) – därav den horisontella linjen vid låga  $v_{ct}$  för BI Dry i figurerna. Beräkningsfall C ( $T = 0$  °C) i BI Dry gick inte att beräkna<sup>3</sup>. Beräkningsfall B ( $T = +10$  °C) samt C ( $T = 0$  °C) i TorkaS v. 2 gav erforderliga uttorkningstider över 1 år och redovisas därför inte i figuren.

Kritiskt fuktillstånd har satts till  $RF_{krit} = 83$  % i Figur 3 samt  $RF_{krit} = 90$  % i Figur 4.

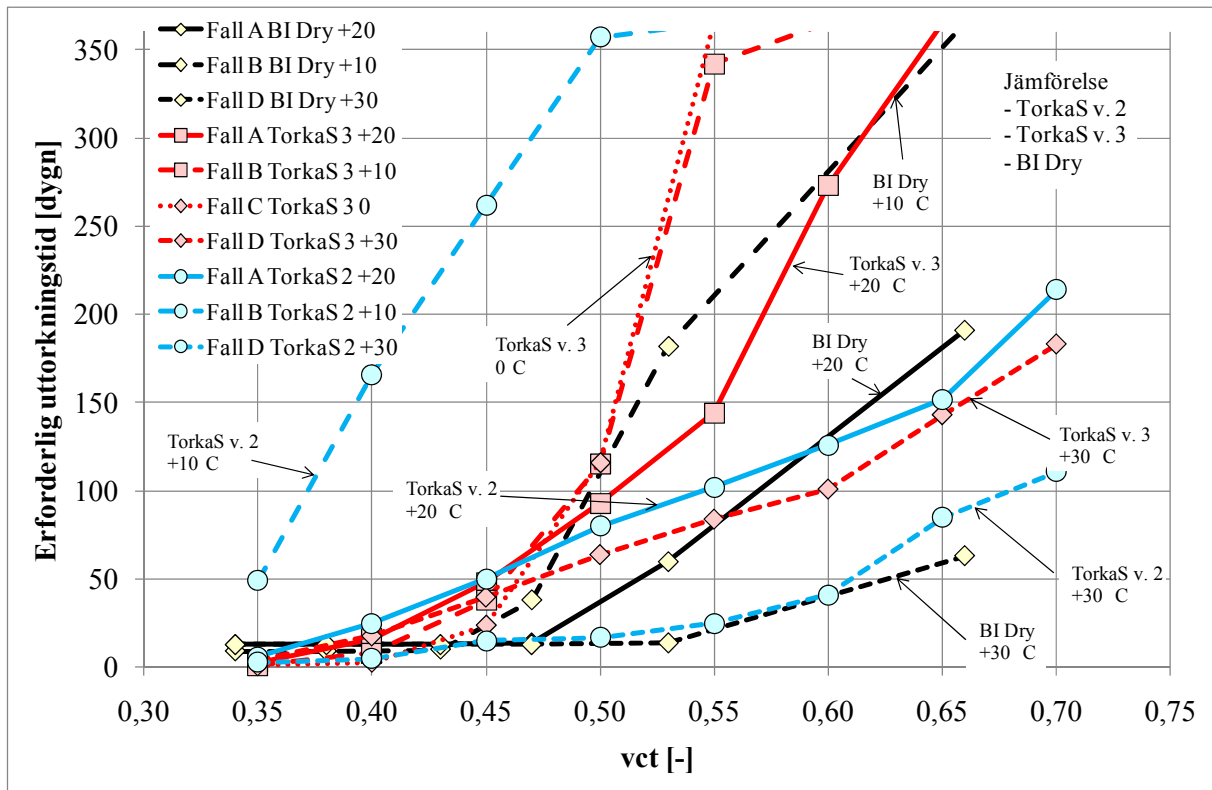
---

<sup>2</sup> I BI Dry är minsta möjliga uttorkningstid begränsad till 28 dygn.

<sup>3</sup> I BI Dry går det att variera temperaturen vid styrd torkning mellan +10 °C och +30 °C.



Figur 3. Erforderliga uttorkningstider för en 200 mm tjock betongplatta med kvarsittande form. Karakteristiskt djup är 40 % av betongens tjocklek, dvs. 80 mm.  $RF_{krit} = 83 \% RF$ .



Figur 4. Erforderliga uttorkningstider för en 200 mm tjock betongplatta med kvarsittande form. Karakteristiskt djup är 40 % av betongens tjocklek, dvs. 80 mm.  $RF_{krit}=90\%$  RF.

I Figur 3 och Figur 4 går det att observera stora skillnader i erforderliga uttorkningstider mellan de olika programmen och beräkningsfallen. BI Dry och TorkaS v. 2 har tydliga temperatureffekter där erforderliga uttorkningstider minskar med ökande temperatur. I TorkaS v. 3 finns inte samma tydliga temperatureffekt utan erforderliga uttorkningstider verkar påverkas i mindre utsträckning av omgivningens temperatur för  $vct < 0,50$ . För  $vct > 0,50$  finns det en temperatureffekt också i TorkaS v. 3.

Resultaten i Figur 3 och Figur 4 är något märkliga eftersom programmen borde ge ungefär samma uttorkningstider, då uttorkningsklimatet är väl definierat och inte heller varierar under uttorkningen. Resultaten från BI Dry och TorkaS v. 2 följer ungefär samma trend medan resultaten från TorkaS v. 3 avviker.

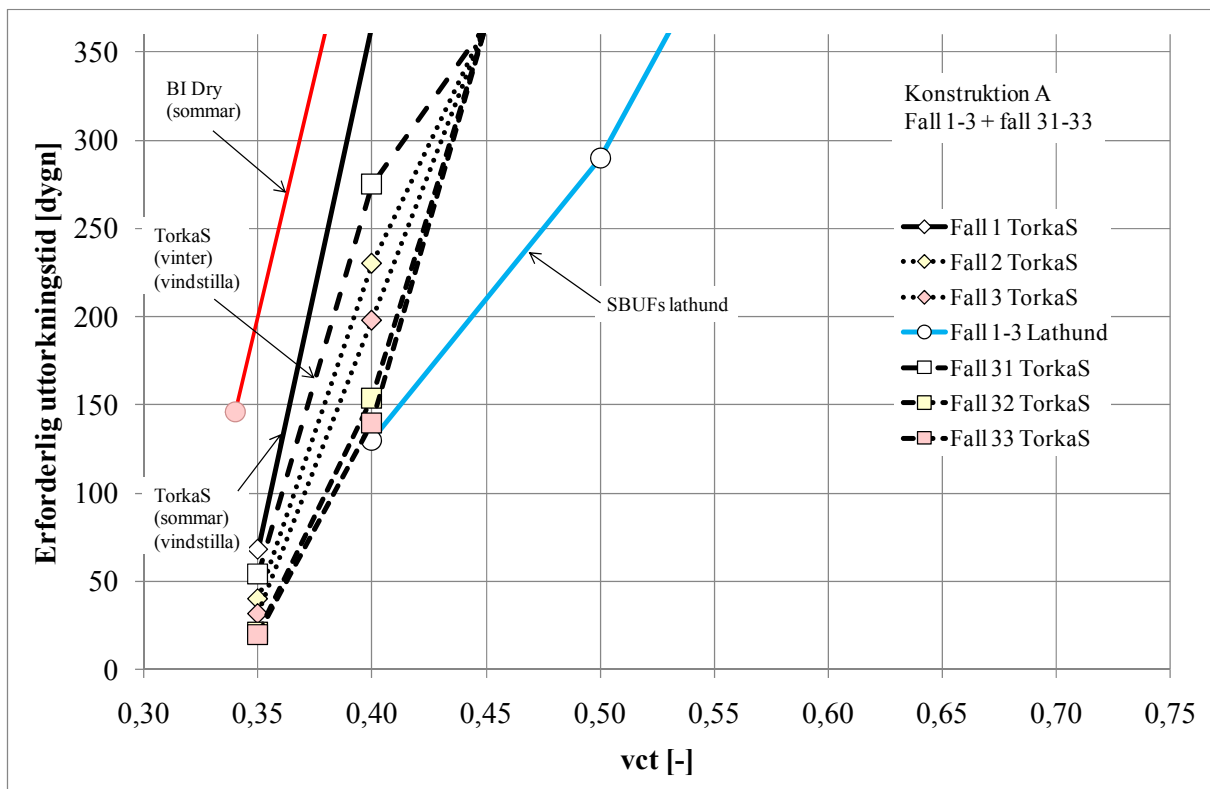
Resultaten som presenteras i Figur 3 och Figur 4 visar på effekter från temperaturen hos uttorkningsklimatet som kommenteras med följande.

- **BI Dry.** I BI Dry finns det en tydlig temperatureffekt där erforderliga uttorkningstider minskar. Om temperaturen höjs från +20 °C till +30 °C minskar erforderlig uttorkningstid med upp till 205 dygn!
- **TorkaS v. 2.** I TorkaS v. 2 finns också en tydlig temperatureffekt på erforderliga uttorkningstider. Om temperaturen höjs från +20 °C till +30 °C minskar erforderliga uttorkningstider med 120 dagar till 223 dagar!
- **TorkaS v. 3.** I TorkaS v. 3 finns ingen tydlig temperatureffekt. Vid  $vct < 0,42$  går uttorkningen fortast vid 0 °C medan vid  $vct > 0,42$  går uttorkningen fortast vid +30 °C.

Vad orsaken är till observerade skillnader i erforderliga uttorkningstider bör undersökas vidare, t.ex. genom ytterligare validering av verktygen mot uppmätta fuktillstånd. Se vidare i kapitel 5.2.

### 4.2.3 Nya beräkningsfall (verkliga konstruktioner) – fall 1-36

Bedömningar av uttorkningstider för ”verkliga konstruktioner” har gett följande resultat, se Figur 5 (Konstruktion A – platta på mark med underliggande cellplastisolering), Figur 6 (Konstruktion B - plattbärlag), Figur 7 (Konstruktion C – platta på mark med underliggande cellplastisolering), Figur 8 (Konstruktion D - plattbärlag), Figur 9 (Konstruktion E – mellanbjälklag med kvarsittande form) samt Figur 10 (Konstruktion F – mellanbjälklag utan kvarsittande form). Prognoser av uttorkning har endast gjorts för uttorkningstider upp till 1 år. För uttorkningstider över 1 år ger prognosverktygen alltför osäkra bedömningar och därför tas dessa resultat inte med i sammanställningen. Beräkningarna har gjorts med SBUF:s lathund, TorkaS v.3 samt BI Dry. Kritiskt fuktillstånd har satts till  $RF_{krit}=83\% RF$ .



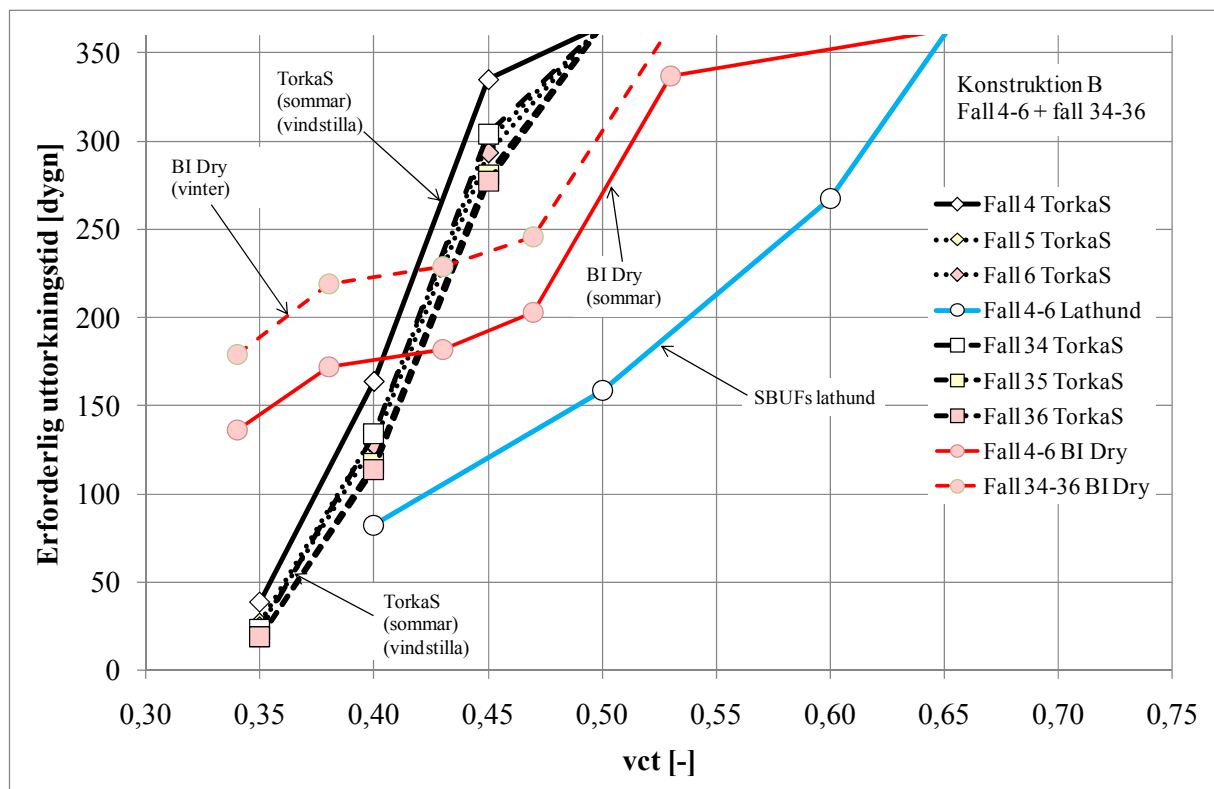
Figur 5. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion A (platta på mark – 150 mm isolering och 300 mm betong). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Prognostiseringar med BI Dry för vinterfallet gav uttorkningstider på över 1 år och redovisas därför inte. Karakteristiskt djup är 40 % av betongens tjocklek, dvs. 120 mm.  $RF_{krit}=83\% RF$ .

I Figur 5 framgår att det är relativt stora skillnader mellan de olika bedömningsverktygen för konstruktion A, där SBUF:s lathund är mest optimistiskt för  $vct > 0,4$  medan TorkaS v. 3 är mest optimistiskt för  $vct < 0,4$  och BI Dry är mest pessimistiskt. Vinterfallet med BI Dry gav en uttorkningstid på över 1 år och redovisas därför inte. I BI Dry är det endast en betong (sommarfallet med Tork BI 1 –  $vct=0,34$ ) som uppfyller ställda krav på tillräckligt snabb uttorkning. För övriga Tork BI-betonger blir erforderliga uttorkningstider över 1 år och resultaten redovisas inte i Figur 5. I TorkaS v. 3 ger betonger med  $vct=0,35-0,40$  (upp till  $vct \approx 0,44$ )

uttorkningstider som är under 1 år, medan betonger med högre vct ger uttorkningstider över 1 år. Snabbast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för vinterfallet med ”Stark vind” och långsammast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för sommarfallet med ”Vindstill”. För samtliga bedömningsverktyg ökar erforderliga uttorkningstider kraftigt när vct ökar. Det är också stora skillnader i prognostiserade erforderliga uttorkningstider för de olika beräkningsfallen i både BI Dry och TorkaS v. 3.

Skillnaderna mellan prognostiserade erforderliga uttorkningstider för sommar- och vinterfallen relativt små i TorkaS v. 3 vid låga vct. Vid ökande vct ökar också skillnaderna mellan erforderliga uttorkningstider för sommar- och vinterfallen. Exempelvis skiljer det endast upp till 14 dagar (Vindstill) mellan prognostiserade uttorkningstider för sommar- och vinterfallet för en betong med vct = 0,35 medan skillnaden vid vct = 0,40 är upp till 90 dagar (Vindstill). Dessutom ger vinterfallet kortast erforderliga uttorkningstider för samtliga undersökta betonger i TorkaS v. 3, vilket kan tyckas något märkligt. Det är också stora skillnader i erforderliga uttorkningstider om vct ändras i TorkaS v. 3, där ökande vct ger en dramatisk ökning i erforderlig uttorkningstid.

En förklaring till de stora variationerna i erforderliga uttorkningstider i BI Dry, vid förändring av vct, samt TorkaS v. 3 beroende på vind och förändringar av betongens vct, är att kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup är flack (speciellt för betonger med vct > 0,40). Resultatet blir att små förändringar i RF ger stora förändringar i erforderliga uttorkningstider. Detta diskuteras vidare i Figur 15.



Figur 6. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion B (plattbärlag – 75 mm plattbärlag och 200 mm pågjutning). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 25 % av betongens tjocklek, dvs. 50 mm.  $RF_{krit} = 83 \% RF$ .

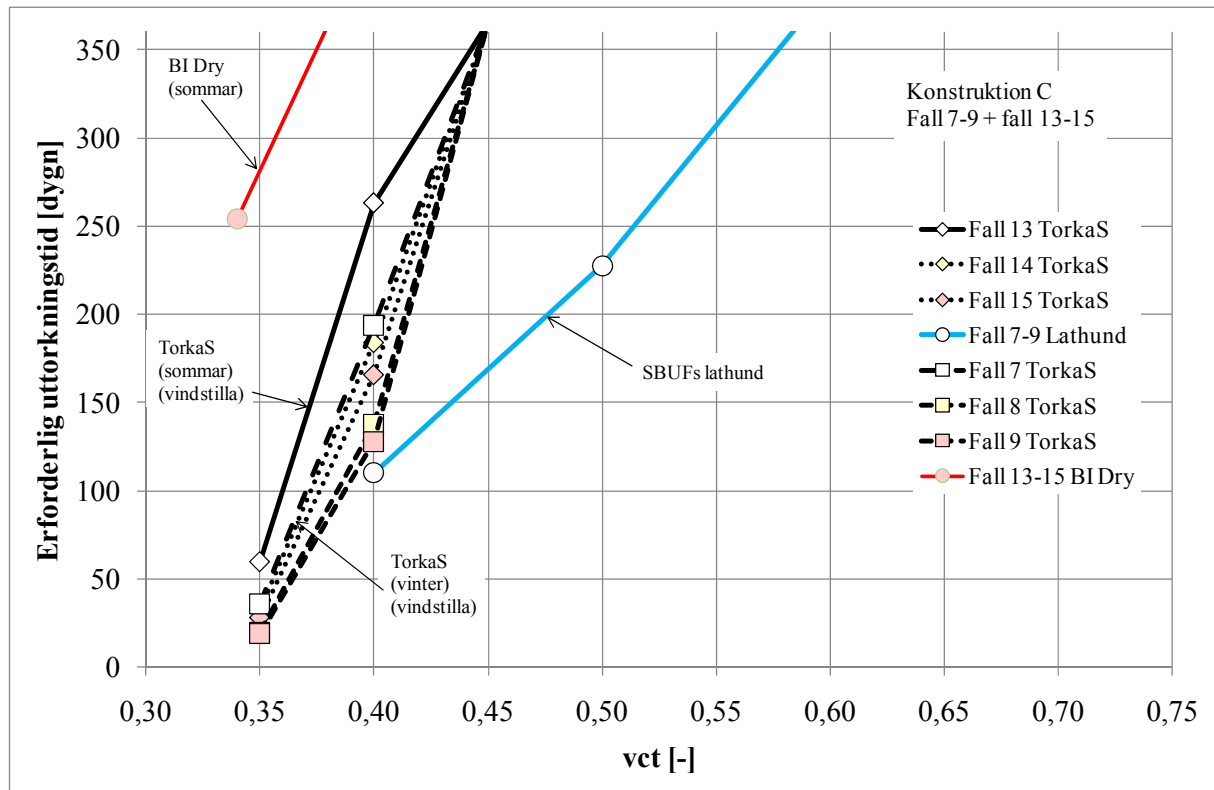


I Figur 6 framgår att det är relativt stora skillnader mellan de olika prognostiseringsverktygen för konstruktion B, där SBUF:s lathund är mest optimistiskt och BI Dry är mest pessimistiskt för vct upp till ca 0,43 medan TorkaS v. 3 är mest pessimistiskt för högre vct. I BI Dry fås längre uttorkningstider för vinterfallet än för sommarfallet för samtliga vct. När vct överstiger 0,52 ger BI Dry att erforderlig uttorkningstid överstiger 1 år (dvs. för betongerna Tork BI 5 samt C 25/30) och resultaten redovisas inte i Figur 6. I TorkaS v. 3 ger betonger med vct=0,35-0,45 uttorkningstider som är under 1 år. Snabbast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för vinterfallet med ”Stark vind” och långsammast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för sommarfallet med ”Vindstill”.

Skillnaden mellan prognostiserade erforderliga uttorkningstider för samma vct är relativt små i TorkaS v. 3, speciellt för betonger med vct=0,35 där det endast skiljer upp till 16 dagar (Vindstill) mellan sommar- och vinterfallet. När vct=0,40 är skillnaden mellan sommar- och vinterfallet upp till 30 dagar (Vindstill). Dessutom ger vinterfallet kortast erforderliga uttorkningstider för samtliga undersökta betonger i TorkaS v. 3, vilket kan tyckas något märkligt.

Det finns också en skillnad mellan BI Dry och TorkaS v. 3 vad gäller erforderliga uttorkningstider för samma beräkningsfall om vct varierar, där skillnaden är mindre i BI Dry än i TorkaS v. 3. Exempelvis om vct ökar från 0,35 till 0,40 ökar erforderlig uttorkningstid med 100-120 dagar i TorkaS v. 3 och 10-20 dagar i BI Dry. Om däremot vct ökar från 0,40 till 0,45 ökar erforderlig uttorkningstid med ca 200 dagar i TorkaS v. 3 och 20-30 dagar i BI Dry. En annan intressant observation som kan göras i Figur 6 är att trenden hos variationerna i erforderliga uttorkningstider när vct varierar är samma för SBUF:s lathund och BI Dry, där dock uttorkningstiden är ca 200 dagar längre för BI Dry (sommarfallet) än för SBUF:s lathund.

En förklaring till att erforderliga uttorkningstider ökar dramatiskt vid ökning av vct i TorkaS v. 3 är att kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup är flack (speciellt för betonger med vct>0,40). Resultatet blir att små förändringar i RF ger stora förändringar i erforderliga uttorkningstider. Detta diskuteras vidare i Figur 15.



Figur 7. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion C (platta på mark – 100 mm isolering och 200 mm betong). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 40 % av betongens tjocklek, dvs. 80 mm.  $RF_{krit}=83\%$  RF.

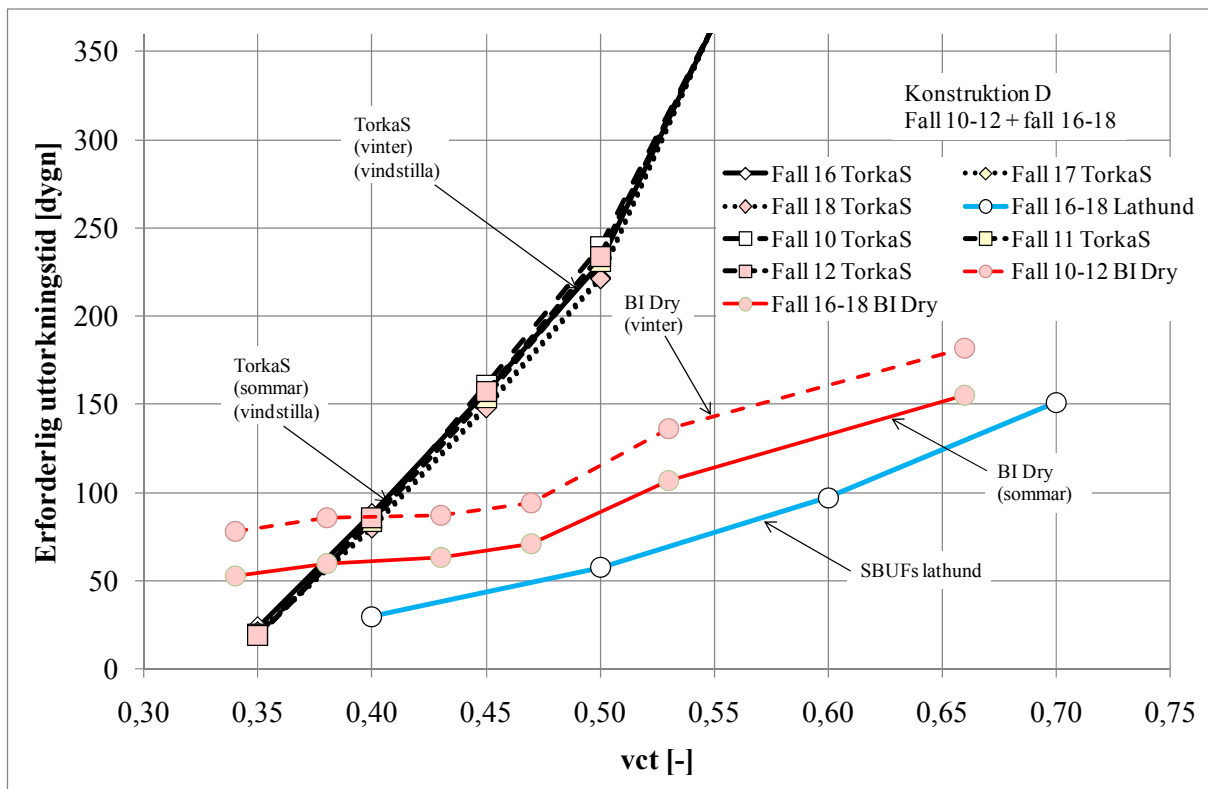
I Figur 7 framgår att det är relativt stora skillnader mellan de olika bedömningsverktygen för konstruktion C, där TorkaS v. 3 är mest optimistiskt för  $vct < 0,40$  medan SBUF:s lathund är mest optimistiskt för  $vct > 0,40$ . BI Dry är mest pessimistiskt för samtliga undersökta betongkvaliteter, där endast sommarfallet för Tork BI 1 ( $vct=0,34$ ) ger en uttorkningstid som är kortare än 1 år. För övriga Tork BI betonger blir erforderliga uttorkningstider över 1 år och redovisas därför inte i Figur 7. I TorkaS v. 3 ger betonger med  $vct=0,35-0,45$  uttorkningstider som är under 1 år. Snabbast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för vinterfallet med "Stark vind" och långsammast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för sommarfallet med "Vindstill". Det är också stora skillnader i prognostiserade erforderliga uttorkningstider för de olika beräkningsfallen i både BI Dry och TorkaS v. 3.

Skillnaden mellan erforderliga uttorkningstider prognostiserade med TorkaS v. 3 är relativt små för de olika beräkningsfallen vid samma vct. Detta gäller speciellt för betonger med  $vct=0,35$ , där skillnaden i erforderlig uttorkningstid för de olika beräkningsfallen är upp till 24 dagar (Vindstill). Om vct ökas till 0,40 blir skillnaden i erforderlig uttorkningstid upp till 97 dagar (Vindstill). Dessutom ger vinterfallet kortast erforderliga uttorkningstider för samtliga undersökta betonger i TorkaS v. 3, vilket kan tyckas något märkligt. Det är också stora skillnader i erforderliga uttorkningstider om vct ändras i TorkaS v. 3, där ökande vct ger en dramatisk ökning i erforderlig uttorkningstid.

Vad som också kan tyckas något märkligt är att BI Dry visar att uttorkningen går långsammare i konstruktion C än i konstruktion A (där konstruktion C är tunnare än konstruktion A). Det skiljer 120 dagar i erforderlig uttorkningstid vilket är något märkligt eftersom uttorkning av betonger med låga vct huvudsakligen sker som självuttorkning, dvs. vattnet binds upp vid

cementreaktioner. Detta betyder att betongens tjocklek inte skall påverka uttorkningshastigheten. Således bör uttorkningen för konstruktion A och C gå ungefär lika fort och erforderliga uttorkningstider bör vara ungefär samma.

En förklaring till de stora variationerna i erforderliga uttorkningstider i BI Dry, vid förändring av vct, samt TorkaS v. 3 beroende på vind och förändringar av betongens vct, är att kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup är flack (speciellt för betonger med  $vct > 0,40$ ). Resultatet blir att små förändringar i RF ger stora förändringar i erforderliga uttorkningstider. Detta diskuteras vidare i Figur 15.

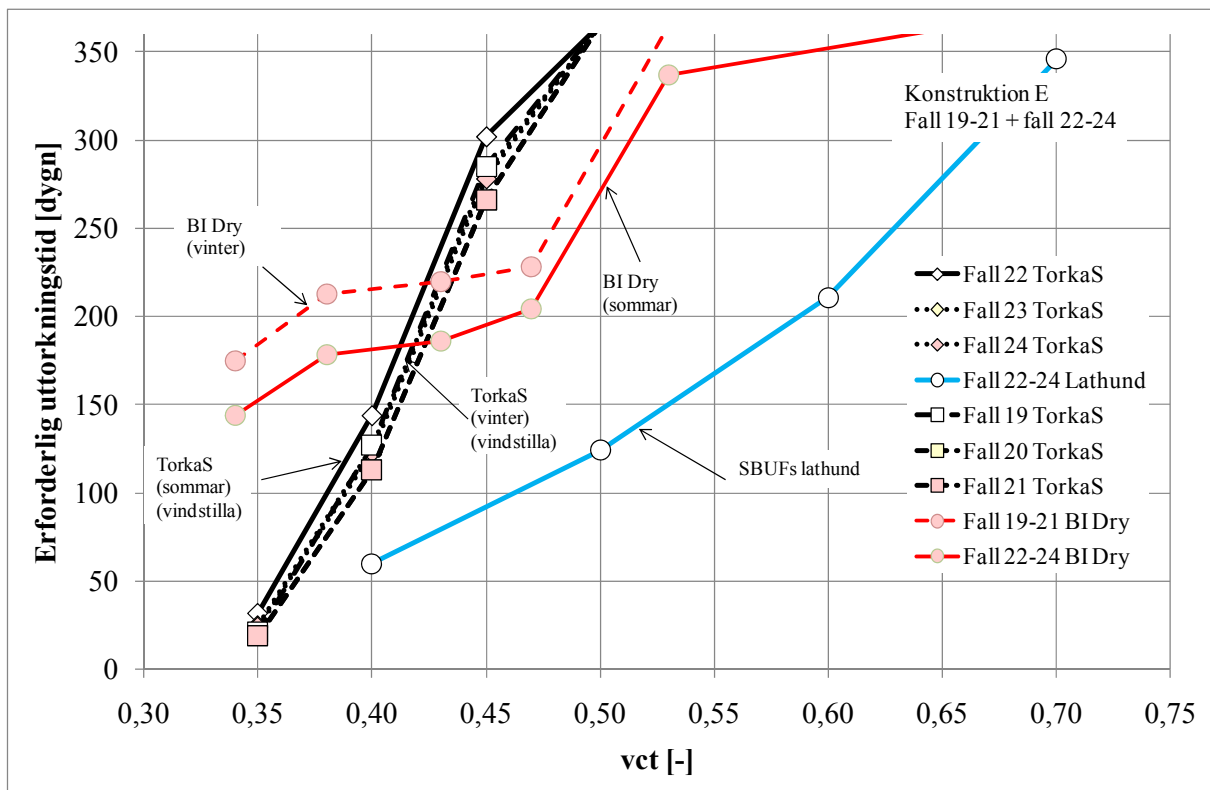


Figur 8. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion D (plattbärlag – 75 mm plattbärlag och 100 mm pågjutning). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 25 % av betongens tjocklek, dvs. 25 mm.  $RF_{krit} = 83\% RF$ .

I Figur 8 går det att observera att TorkaS är mest optimistiskt för  $vct < 0,40$  medan SBUF:s lathund är mest optimistiskt för  $vct > 0,40$ . BI Dry är mest pessimistiskt för  $vct < 0,40$  (Tork BI 2) men blir därefter mer optimistiskt än TorkaS v. 3 och följer samma trend som SBUF:s lathund. I TorkaS v. 3 ger betonger med  $vct < 0,55$  uttorkningstider som är under 1 år. Snabbast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för vinterfallet med ”Stark vind” och långsammast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för sommarfallet med ”Vindstill”, även om skillnaderna mellan de olika beräkningsfallen är små för konstruktion D.

Skillnaden mellan erforderliga uttorkningstider prognostiserade med TorkaS v. 3 är relativt små för de olika beräkningsfallen vid samma vct. Skillnaden i erforderliga uttorkningstider för de olika beräkningsfallen är upp till 4-13 dagar, beroende på vct. Dessutom ger vinterfallet kortast erforderliga uttorkningstider för samtliga undersökta betonger, vilket kan tyckas något märkligt. Det är också stora skillnader i erforderliga uttorkningstider om vct ändras i TorkaS v. 3, där ökande vct ger en dramatisk ökning i erforderlig uttorkningstid.

En förklaring till att ökningen i erforderliga uttorkningstider vid ökande vct för BI Dry och TorkaS v. 3 samt skillnaden mellan sommar- och vinterfallet i TorkaS v. 3 är relativt små är att kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup har en viss lutning. När RF-kurvan har en viss lutning blir inte prognostiseringen av erforderliga uttorkningstider lika känslig för små förändringar i RF. Förklaringen till att RF-kurvan har en viss lutning är att konstruktionen har en relativt liten tjocklek (75 mm plattbärlag + 100 mm betong med ”1,5-sidig” uttorkning) vilket i sin tur medför att betongen kan torka ut relativt snabbt. Detta diskuteras vidare i Figur 15.



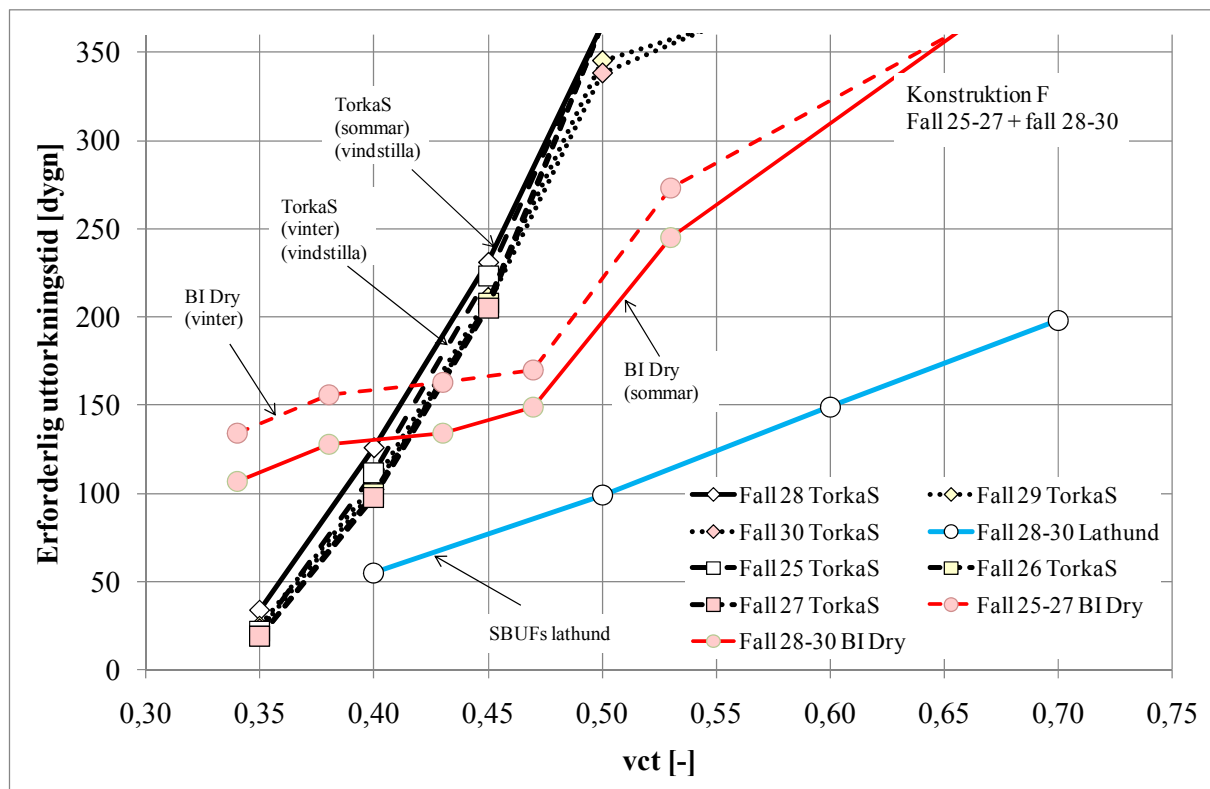
Figur 9. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion E (mellanbjälklag med enkelsidig uttorkning – 120 mm betong på kvarsittande stålform). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 40 % av betongens tjocklek, dvs. 48 mm.  $RF_{krit} = 83\% RF$ .

I Figur 9 går det att observera att TorkaS är mest optimistiskt för  $vct < 0,40$  medan SBUF:s lathund är mest optimistiskt för  $vct > 0,40$ . BI Dry är mest pessimistiskt för  $vct < 0,43$  (Tork BI 3) men blir därefter mer optimistiskt än TorkaS och följer samma trend som SBUF:s lathund. I TorkaS ger betonger med  $vct < 0,50$  uttorkningstider som är under 1 år. Snabbast uttorkning i TorkaS fås för vinterfallet med ”Vind” respektive ”Stark vind” och långsammast uttorkning i TorkaS fås för sommarfallet med ”Vindstill”, även om skillnaderna mellan de olika beräkningsfallen är små för konstruktion E.

Det är relativt små skillnader i erforderliga uttorkningstider för de olika beräkningsfallen vid samma vct i både TorkaS v. 3 och BI Dry. Skillnaden i erforderlig uttorkningstid mellan sommar- och vinterfallet är upp till 17 dagar i TorkaS v. 3 och 35 dagar i BI Dry. Dessutom ger vinterfallet kortast erforderliga uttorkningstider för samtliga undersökta betonger i TorkaS v. 3, vilket kan tyckas något märkligt. Det är också stora skillnader i erforderliga uttorknings-

tider i TorkaS v. 3 om vct ändras, där ökande vct ger en dramatisk ökning i erforderliga uttorkningstider.

En förklaring till att ökningen i erforderliga uttorkningstider vid ökande vct för BI Dry och speciellt TorkaS v. 3 samt skillnaden mellan sommar- och vinterfallet i TorkaS v. 3 är relativt små är att kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup har en viss lutning. När RF-kurvan har en viss lutning blir inte prognostiseringen av erforderliga uttorkningstider lika känslig för små förändringar i RF. Förklaringen till att RF-kurvan har en viss lutning är att konstruktionen har en relativt liten tjocklek (120 mm betong med enkelsidig uttorkning) vilket i sin tur medför att betongen kan torka ut relativt snabbt. Detta diskuteras vidare i Figur 15.



Figur 10. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion F (mellanbjälklag med dubbelsidig uttorkning– 200 mm utan kvarsittande form). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 20 % av betongens tjocklek, dvs. 40 mm.  $RF_{krit}=83\%$  RF.

I Figur 10 går det att observera att TorkaS v. 3 är mest optimistiskt för  $vct < 0,40$  medan SBUF:s lathund är mest optimistiskt för  $vct > 0,40$ . BI Dry är mest pessimistiskt för  $vct < 0,42$  (ca Tork BI 3) men blir därefter mer optimistiskt än TorkaS v. 3 och följer samma trend som SBUF:s lathund. I TorkaS v. 3 ger betonger med  $vct < 0,50$  uttorkningstider som är under 1 år. Snabbast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för vinterfallet med "Vind" respektive "Stark vind" och långsammast uttorkning i TorkaS v. 3 fås för sommarfallet med "Vindstill", även om skillnaderna mellan de olika beräkningsfallen är små för konstruktion E.

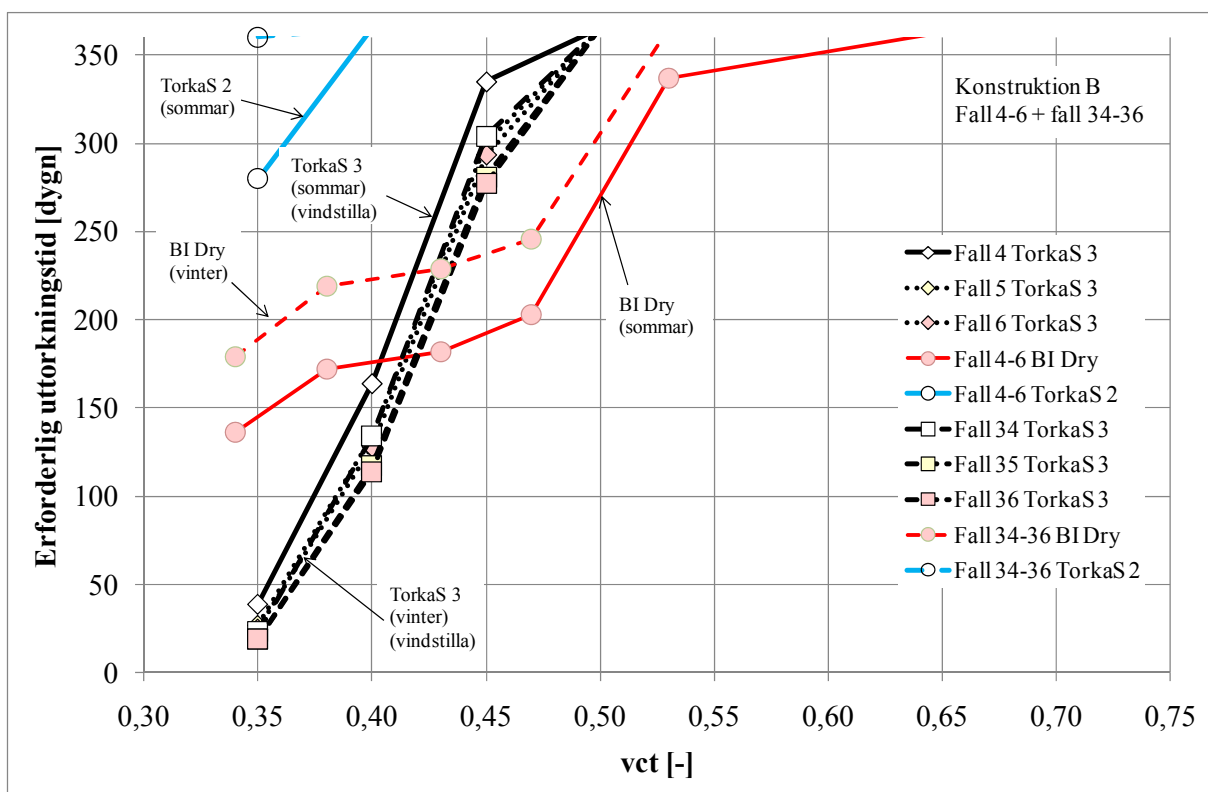
Det är relativt små skillnader i erforderliga uttorkningstider för de olika beräkningsfallen vid samma vct i både TorkaS v. 3 och BI Dry. Skillnaden i erforderlig uttorkningstid mellan sommar- och vinterfallet är upp till 28 dagar i TorkaS v. 3 och 29 dagar i BI Dry. Dessutom ger vinterfallet kortast erforderliga uttorkningstider för samtliga undersökta betonger i TorkaS

v. 3, vilket kan tyckas något märkligt. Det är också stora skillnader i erforderliga uttorkningstider i TorkaS v. 3 om vct ändras, där ökande vct ger en dramatisk ökning i erforderliga uttorkningstider.

En förklaring till att ökningen i erforderliga uttorkningstider vid ökande vct för BI Dry och speciellt TorkaS v. 3 samt skillnaden mellan sommar- och vinterfallet i TorkaS v. 3 är relativt små är att kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup har en viss lutning. När RF-kurvan har en viss lutning blir inte prognostiseringen av erforderliga uttorkningstider lika känslig för små förändringar i RF. Förklaringen till att RF-kurvan har en viss lutning är att konstruktionen har en relativt liten tjocklek (200 mm betong med dubbelsidig uttorkning) vilket i sin tur medför att betongen kan torka ut relativt snabbt. Detta diskuteras vidare i Figur 15.

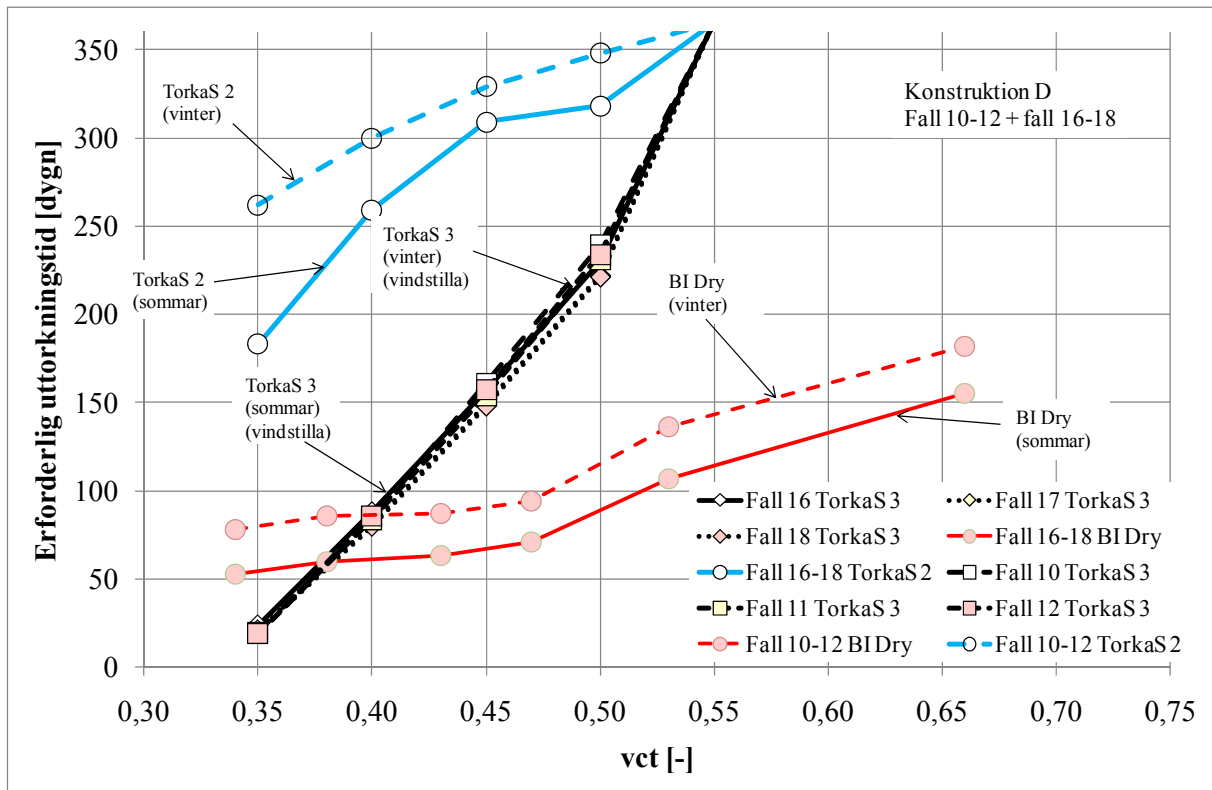
#### 4.2.4 Jämförelse TorkaS v. 2, v. 3 och BI Dry

För några av de framtagna konstruktionerna (konstruktion B, D, E och F) har en jämförelse gjorts mellan erforderliga uttorkningstider prognostiserade med TorkaS v.2 och v.3 samt BI Dry. Resultaten från prognostiseringar av erforderliga uttorkningstider redovisas i Figur 11 (konstruktion B), Figur 12 (konstruktionen D), Figur 13 (konstruktion E) och Figur 14 (konstruktion F). Kritiskt fuktillstånd har satts till  $RF_{krit}=83\%$  RF.



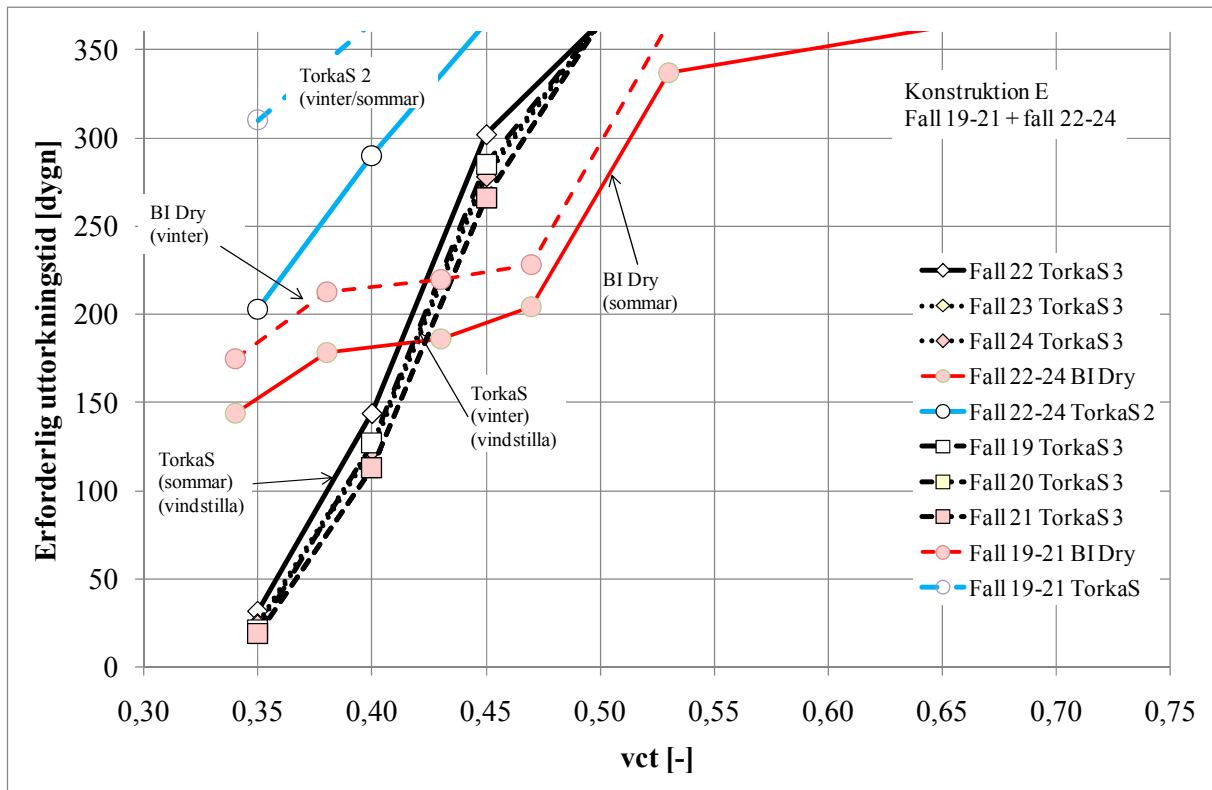
Figur 11. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion B (plattbärlag – 75 mm plattbärlag och 200 mm pågjutning). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 25 % av betongens tjocklek, dvs. 50 mm. Jämförelse mellan TorkaS v. 2 och v.3 samt BI Dry.  $RF_{krit}=83\%$  RF.

I Figur 11 går det att observera stora skillnader i erforderliga uttorkningstider mellan de olika bedömningsverktygen. Mest optimistiska är TorkaS v.3 (för  $vct < 0,43$ ) och BI Dry ( $vct > 0,43$  och sommarfall). TorkaS v.2 ger avsevärt längre erforderliga uttorkningstider än TorkaS v.3, där skillnaden är upp till 340 dagar ( $vct=0,35$  och vinterfallet)!



Figur 12. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion D (plattbärlag – 75 mm plattbärlag och 100 mm pågjutning). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 25 % av betongens tjocklek, dvs. 25 mm. Jämförelse mellan TorkaS v. 2 och v.3 samt BI Dry.  $RF_{krit} = 83 \% RF$ .

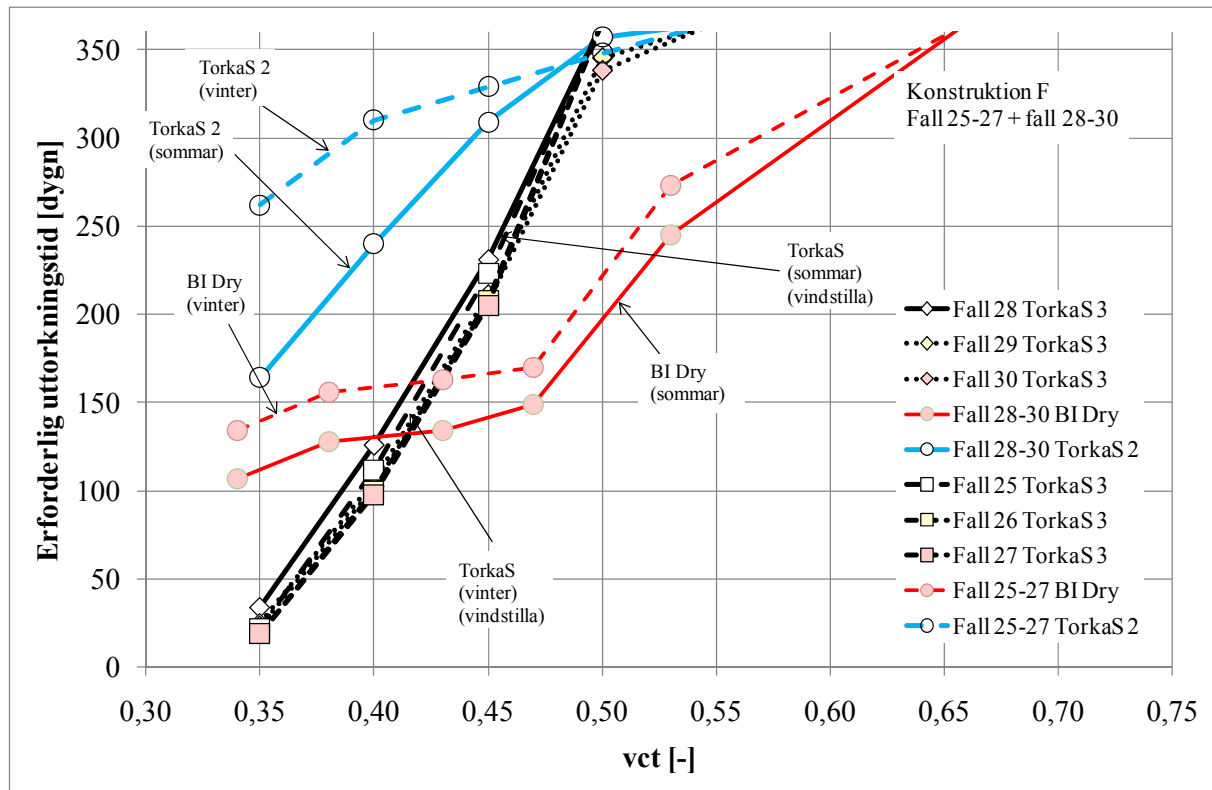
I Figur 12 framgår att det är stor skillnad i erforderliga uttorkningstider beroende på vilket bedömningsverktyg som används. Mest optimistiska är TorkaS v.3 (för  $vct < 0,40$ ) och BI Dry ( $vct > 0,40$  och sommarfall). TorkaS v.2 ger avsevärt längre erforderliga uttorkningstider än TorkaS v.3, där skillnaden är upp till 170 dagar ( $vct = 0,35$  och vinterfallet)!



Figur 13. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion E (mellanbjälklag med enkelsidig uttorkning – 120 mm betong på kvarsittande stålform). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 40 % av betongens tjocklek, dvs. 48 mm. Jämförelse mellan TorKaS v. 2 och v.3 samt BI Dry.  $RF_{krit} = 83 \% RF$ .

I Figur 13 går det att observera stora skillnader i erforderliga uttorkningstider mellan de olika bedömningsverktygen. Mest optimistiska är TorKaS v.3 (för  $vct < 0,43$ ) och BI Dry ( $vct > 0,43$  och sommarfall). TorKaS v.2 ger avsevärt längre erforderliga uttorkningstider än TorKaS v.3, där skillnaden är upp till 291 dagar ( $vct = 0,35$  och vinterfallet)!





Figur 14. Bedömning av uttorkningstider för konstruktion F (mellanbjälklag med dubbelsidig uttorkning– 200 mm utan kvarstående form). Prognoser har endast gjorts för uttorkningstider på upp till 1 år. Karakteristiskt djup är 20 % av betongens tjocklek, dvs. 40 mm. Jämförelse mellan TorKaS v. 2 och v.3 samt BI Dry.  $RF_{krit}=83\%$  RF.

I Figur 14 framgår att det är stor skillnad i erforderliga uttorkningstider beroende på vilket bedömningsverktyg som används. Mest optimistiska är TorKaS v.3 (för  $vct < 0,40$ ) och BI Dry ( $vct > 0,40$  och sommarfall). TorKaS v.2 ger avsevärt längre erforderliga uttorkningstider än TorKaS v.3, där skillnaden är upp till 240 dagar ( $vct=0,35$  och vinterfallet)!

En annan sak som går att observera i Figur 11-Figur 14 är att både BI Dry och TorKaS v. 2 ger kortare erforderliga uttorkningstider för sommarfallet än för vinterfallet. I TorKaS v.3 ger vinterfallet de kortaste erforderliga uttorkningstiderna. Det är också betydligt mindre skillnader mellan sommar- och vinterfallen i TorKaS v. 3 jämfört med BI Dry och TorKaS v. 2.

#### 4.2.5 Generella kommentarer till genomförda prognostiseringar

Från resultaten som presenteras ovan kan ett antal generella kommentarer ges. Dessa redovisas nedan.

##### Erforderliga uttorkningstider med olika bedömningsverktyg

Genomförda prognostiseringar av uttorkningstider visar att det finns några generella skillnader mellan de olika undersökta verktygen. Generellt ger SBUF:s lathund kortast erforderliga uttorkningstider. Detta är inte oväntat eftersom lathunden endast gör en väldigt enkel bedömning av erforderlig uttorkningstid. I SBUF:s lathund görs heller ingen skillnad om uttorkningen sker sommar- eller vintertid.

Vad gäller undersökta datorprogram ger generellt TorKaS v. 3 kortare uttorkningstider än BI Dry för betonger med låga vct ( $vct < 0,40$ ) medan BI Dry ger kortare uttorkningstider än TorKaS v. 3 för betonger med högre vct ( $vct > 0,40$ ). TorKaS v. 2 ger betydligt längre uttorkningstider än TorKaS v. 3.

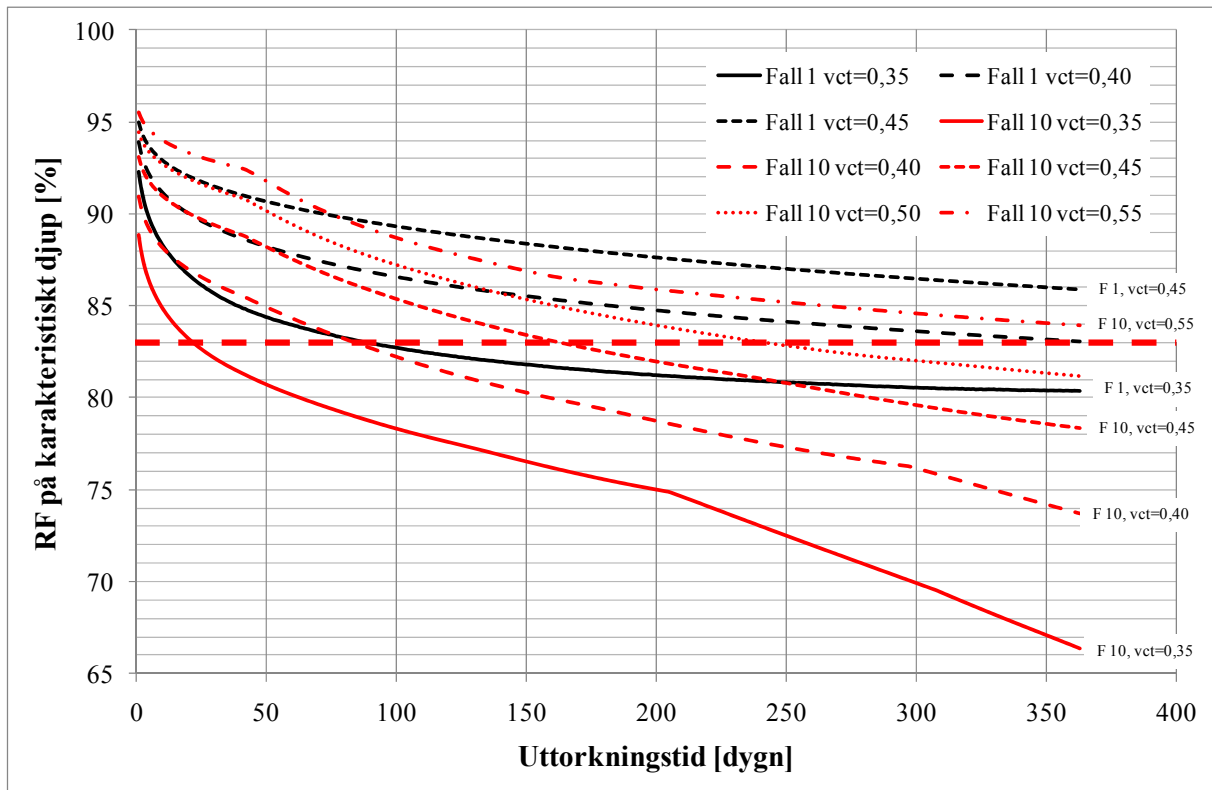
I inget av de undersökta beräkningsfallen har TorKaS v. 3 prognostiserat erforderliga uttorkningstider på under 1 år för betonger med  $vct > 0,55$ , ens för relativt tunna konstruktioner (t.ex. konstruktionerna D och F). I BI Dry har erforderliga uttorkningstider under 1 år prognostiserats för fall D (erforderliga uttorkningstider för betong med  $vct = 0,66$  är 155 dygn respektive 182 dygn för sommar- respektive vinterfallet) samt fall F (erforderliga uttorkningstider för betong med  $vct = 0,53$  är 245 dygn respektive 273 dygn för sommar- respektive vinterfallet).

En förklaring till att det blir skillnader i erforderliga uttorkningstider mellan BI Dry och TorKaS är att Betongindustri tar ansvar för att Tork BI-betongerna, där erforderliga uttorkningstider bedömts med BI Dry, torkar tillräckligt snabbt och att det därför finns en extra säkerhetsmarginal inlagd i BI Dry. Motsvarande ansvar för att en viss betongkvalitet torkar tillräckligt fort finns inte om TorKaS har använts för att bedöma erforderliga uttorkningstider. I TorKaS finns det därför inget behov av att introducera extra säkerhetsmarginaler i bedömningarna av erforderliga uttorkningstider.

### **Skillnader i erforderliga uttorkningstider för olika vct**

Skillnader i erforderliga uttorkningstider vid olika vct har observerats mellan de olika bedömningsverktygen. Vid en ökning av vct i TorKaS V. 3 ökar också erforderliga uttorkningstider dramatiskt, där betonger med  $vct > 0,55$  har visat sig få erforderliga uttorkningstider som överstiger 1 år för de studerade beräkningsfallen. Motsvarande dramatiska ökning av erforderliga uttorkningstider finns inte i de andra bedömningsverktygen. Om högre kritiska relativa fuktigheter används går det dock att klara 1 års uttorkningstid även för betonger med  $vct > 0,55$  i TorKaS v. 3.

En förklaring till ökningen är erforderliga uttorkningstider är lutningen på kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup är olika för de olika fallen. Detta illustreras i Figur 15 där RF på karakteristiskt djup för konstruktionen A (beräkningsfall 1) och konstruktion D (beräkningsfall 10) för betonger med  $vct = 0,35-0,50$  redovisas. Det intressant i Figur 15 är lutningen hos RF-kurvorna vid kritiskt RF – i figuren har därför också kritisk relativ fuktighet lagts in ( $RF_{krit} = 83\% RF$  – markerat med en horisontell streckad röd linje i figuren).



Figur 15. RF på karakteristiskt djup för konstruktionen A (beräkningsfall 1) och konstruktion D (beräkningsfall 10) för betonger med  $vct=0,35-0,55$ . Den streckade horisontella linjen visar kritiskt RF ( $RF_{krit}=83\%$  RF). Fall 1 och 10 betecknas "F1" respektive "F10". Beräkningar gjorda i TorkaS v. 3.

I Figur 15 framgår att lutningen hos kurvorna för fall 1 och 10 vid 83 % RF skiljer sig åt en del. Störst lutning har RF-kurvorna för fall 10 vid 83 % RF, där lutningen minskar med ökande vct. Detta återspeglas i variationerna i erforderliga uttorkningstider mellan fall 10-12 och fall 16-18 som är små, speciellt vid låga vct. Vid  $vct=0,55$  överskrider erforderlig uttorkningstid för att nå 83 % RF 1 år för fall 10. Lutningen för RF-kurvorna för fall 1 vid 83 % RF är mindre än för fall 10, vilket också återspeglas i variationerna i erforderliga uttorkningstider mellan fall 1-3 och fall 31-33.

### Temperaturens inverkan på erforderliga uttorkningstider

TorkaS v. 3 visar också att uttorkning går något fortare för vinterfallet än för sommarfallet medan BI Dry visar att uttorkningen går betydligt fortare för sommarfallet än för vinterfallet. I TorkaS v. 3 går uttorkningen fortare ju lägre betongens temperatur är (så länge den överstiger  $0^{\circ}\text{C}$ , för att undvika frysning av betongen), vilket kan tyckas något märkligt. Både självuttorkning (kemisk uppbindning av fukt vid cementreaktioner) och fysikalisk uttorkning är temperaturberoende, se t.ex. Betonghandboken – Material (1994), där uttorkningshastigheten enligt teorin ökar med ökande temperatur.



## 5 Avslutning

### 5.1 Avslutande kommentarer

Av resultaten från beräkningar av erforderliga betongkvaliteter och uttorkningstider kan följande avslutande kommentarer ges:

- Resultaten som presenteras i denna rapport visar på stora skillnader i prognostiserade erforderliga uttorkningstider mellan de undersökta bedömningsverktygen. Motsvarande skillnader mellan bedömningsverktygen finns också om erforderliga betongkvaliteter har prognostiserats. Eftersom dessa stora skillnader i resultat från de olika bedömningsverktygen har observerats är frågan ”Vad skall man lita på?” relevant.
- Stora skillnader i prognostiserade erforderliga uttorkningstider har observerats mellan de olika undersökta bedömningsverktygen, när förutsättningar rörande konstruktionens utformning och torkklimat givna.
  - Generellt ger SBUF:s lathund mest optimistiska prognostiseringar av erforderliga uttorkningstider.
  - För de dator baserade verktygen ger TorkaS v. 3 mest optimistiska prognostiseringar av erforderliga uttorkningstider för betonger med låga vct ( $vct < 0,40-0,45$ ) medan BI Dry ger mest optimistiska prognostiseringar av erforderliga uttorkningstider för betonger med höga vct ( $vct > 0,40-0,45$ ).
  - Erforderliga uttorkningstider med det erfarenhetsbaserade konceptet utvecklat av Dry-IT ligger mellan TorkaS v. 3 och BI Dry för  $vct < 0,40$ , För  $vct > 0,40$  ger Dry-IT:s koncept erforderliga uttorkningstider som ligger under både BI Dry och TorkaS v. 3. TorkaS v. 2 är betydligt mer pessimistiskt än TorkaS v. 3 och BI Dry.
- Skillnader i prognostiserade erforderliga betongkvaliteter har observerats mellan de olika undersökta bedömningsverktygen, när förutsättningar rörande konstruktionens utformning och torkklimat givna. För de datorbaserade verktygen prognostiserar TorkaS betonger med högst vct medan BI Dry prognostiserar betonger med lägst vct. Dry-IT:s koncept ger betonger med vct mellan prognostiseringar med BI Dry och TorkaS.
- Några generella observationer har gjorts i resultaten från de olika undersökta bedömningsverktygen, rörande inverkan av temperatur och konstruktioner med stora tjocklekar:
  - Temperaturen inverkan på uttorkningen verkar behandlas olika i de olika bedömningsverktygen. I BI Dry och TorkaS v. 2 ger ökande temperaturer betydligt kortare uttorkningstider, medan i TorkaS v. 3 är inte temperatur-effekten lika tydlig. I TorkaS v. 3 Uttorkningstiden blir kortare för betonger med låga vct ( $vct < 0,45$ ) vid minskande temperatur medan den blir kortare för betonger med höga vct ( $vct > 0,45$ ) vid ökande temperatur.
  - Bi Dry och TorkaS v. 3 förefaller vara känsliga vid bedömning av erforderliga uttorkningstider för betong med stora tjocklekar. Kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup blir då flack vilket medför att små förändringar i RF ger stora förändringar i uttorkningstid. Vid mindre tjocklekar på betongen blir RF-

kurvan mer brant och små förändringar i RF ger mindre förändringar i uttorkningstid.

- En förklaring till skillnader i prognostiserade erforderliga betongkvaliteter och uttorkningstiden mellan BI Dry och TorkaS är att det finns en extra säkerhetsmarginal på prognostiserade uttorkningstider och betongkvaliteter i BI Dry. Bakgrunden är att Betongindustri tar ansvar för att Tork BI-betongerna torkar tillräckligt mycket. Därför finns det en säkerhetsmarginal i BI Dry så att prognostiserade uttorkningstider blir tillräckligt långa. Motsvarande ansvar vid prognostiseringar med TorkaS finns inte och därför finns heller inget behov av någon extra säkerhetsmarginal på prognostiserade uttorkningstider.

Eftersom TorkaS inte är knutet till något företag, t.ex. betongtillverkare eller fuktkonsult, har det blivit något av en ”branschstandard” när det gäller bedömningar av uttorkning av betongkonstruktioner. TorkaS v. 3 har givit en del märkliga resultat jämfört med övriga undersökta bedömningsverktygen, bl.a.:

- Prognostiserade erforderliga uttorkningstider är mycket vct-beroende. Betonger med låga vct ( $vct=0,35$ ) ger väldigt korta erforderliga uttorkningstider. När vct ökas ökar erforderliga uttorkningstider dramatiskt. Detta har resulterat i att även för tunna konstruktioner (t.ex. konstruktion D, se Figur 8) måste betongens  $vct < 0,55$  för att erforderliga uttorkningstider skall understiga 1 år.
- Uttorkningshastigheten ökar (och erforderliga uttorkningstider minskar) ju lägre betongens temperatur är (så länge den överstiger  $0^{\circ}\text{C}$ , för att undvika frysning av betongen) för betonger med låga vct ( $vct < 0,45$ ). För betonger med högre vct ( $vct > 0,45$ ) är temperatureffekten motsatt där uttorkningen går snabbare vid ökande temperaturer.

## 5.2 Förslag på fortsatta undersökningar

Från resultaten presenterade i denna rapport framgår att det finns en del oklarheter kring de olika studerade verktygen för bedömning av erforderliga uttorkningstider. Därför föreslås följande för fortsatta undersökningar:

- **Ytterligare jämförelser av bedömningsverktygen.** Genomförda bedömningar visar att erforderliga uttorkningstider ökar mycket vid variationer i vct. En förklaring är att kurvan som beskriver RF på karakteristiskt djup är flack vid det valda kritiskt fuktillståndet ( $RF_{krit}=83\%$  RF). Resultaten kan bli annorlunda om bedömningarna av erforderliga uttorkningstider för de olika bedömningsverktygen görs vid andra kritiska fuktillstånd. Detta har gjorts för fall A-D där prognostiseringar har gjorts för  $RF_{krit}=90\%$  RF med delvis andra resultat än vid prognostiseringar vid  $RF_{krit}=83\%$  RF som följd.
- **Ytterligare validering av bedömningsverktyg.** Stora skillnader i prognostiserade erforderliga uttorkningstider har observerats mellan de olika bedömningsverktygen. Detta projekt har inte haft som syfte att validera de olika bedömningsverktyg eller förklara vad skillnader i resultaten beror på. Därför finns det ett behov för validering av tillgängliga bedömningsverktyg, speciellt för TorkaS v. 3. Detta föreslås göras både

genom laboratoriestudier, med kontrollerade torkklimat, och fältstudier, där torkklimatet bör loggas. En del data med uppmätta fukttillstånd finns också redan tillgängliga i litteraturen och dessa kan utnyttjas för sådana jämförelser.

En del mer generella synpunkter på utveckling av bedömningsverktygen och inverkan av faktorer har också framkommit under arbetets gång, bland annat föreslås följande:

- **Framtagande av mer allmänna bedömningsverktyg.** Behov av ett mer allmänt bedömningsverktyg för prognostisering av uttorkningstider, där det finns större möjligheter för användaren att bestämma egna indata, t.ex. vad gäller egenskaper hos bindemedel. I både TorkaS v. 2 och 3 samt BI Dry v. 1.3.7 går det endast att prognostisera uttorkningen för betonger tillverkade av Cementas Byggcement (CEM II/A-LL 42,5 R). I dagsläget används även andra cement än Byggcement till huskonstruktioner, t.ex. cement från CEMEX, och i framtiden kommer ytterligare nya cement att introduceras på den svenska marknaden. Således finns det också ett behov av att prognostisera uttorkning av betonger tillverkade med andra bindemedel än Cementas Byggcement.
- **Ytterligare kvantifiering av kritiska fukttillstånd.** En faktor som är avgörande för bedömning av uttorkningstider är nivån på kritiska fukttillstånd. Enligt BBR skall kritiska fukttillstånd vara ”väl undersökta och dokumenterade” och om så inte är fallet föreskrivs i BBR att 75 % RF skall användas som kritiskt fukttillstånd. I Nilsson (2006) samt Nilsson (2007) finns aktuella sammanställningar av kritiska fukttillstånd men som det påpekas i Nilsson (2007) är dock många redovisade kritiska tillstånd inte alltid ”väl undersökta och dokumenterade”. Således finns det ett behov av att genomföra ytterligare kvantifieringar av kritiska fukttillstånd.





## 6 Referenser

Andersson, P. & Lundberg, N. (2007), Analysjämförelse mellan dataprogram och uppmätt RF i betong, Examensarbete 2007:188, Luleå tekniska universitet, Väg- och vattenbyggnadsteknik, Luleå, 2007.

Betonghandboken – Material (1994), redigerad av C. Ljungkrantz, G. Möller and N. Petersons, Svensk Byggtjänst, Stockholm, 1994.

Betongindustri (2008), Datorprogrammet BI Dry –Handledning för framtagning av uttorkningsprognoser, Betongindustri, Stockholm, 2008.

Boverket (2008), Regelsamling för byggande, BBR, Boverket, Karlskrona, 2008.

Hedenblad, G. & Arfvidsson, J. (2001), Fuktdimensionering av betong med TorKaS, *Bygg & Teknik*, Nr 5, 2001. sid. 37-42.

Hedenblad, G. (1998), Jämförelse mellan uppmätta uttorkningstider och uttorkningstider beräknade med ”TorKaS 1.0”, Rapport TVBM 7133, Lunds tekniska högskola, Byggnadsmateriallära, Lund, 1998.

Johansson, N. (2003), Fältstudie av olika metoder att påskynda betongs uttorkning, Rapport TVBM-7172, Lunds tekniska högskola, Avdelningen för byggnadsmaterial, Lund 2003.

Jonasson, J.-E., Carlsson, C.-A. & Mjörnell, K. (2005), Modell för beräkning av fuktighet i moderna betonger vid variabel temperatur, *Bygg & Teknik*, Nr 7, 2005. sid. 36-41.

Jonasson, J.-E., Carlsson, C.-A. & Mjörnell, K. (2006), Beräkning av uttorkning för betong med Byggcement, *Bygg & Teknik*, Nr 7, 2006. sid. 56-59.

Jonasson, J.-E., Mjörnell, K. & Carlsson, C.A. (2008), Modelling of simultaneous temperature and moisture transportation in modern concrete, i proceedings från *International RILEM Symposium on Concrete Modelling – CONMOD '08*, 26-28 maj 2008, Delft, 2008. sid. 665-672.

Nilsson, L.-O. (1977), Fuktproblem vid betonggolv, Rapport TVBM 3002, Lunds tekniska högskola, Byggnadsmateriallära, Lund. 1977.

Nilsson, L.-O. (2006), Fuktpåverkan på material – Kritiska fuktnivåer, Fuktcentrums Informationskrift, Fuktsäkerhet i byggnader, Forskningsrådet FORMAS, Stockholm, 2006.

Nilsson, L.-O. (2007), Fukt – Byggvägledning 9. En handbok i anslutning till Boverkets byggregler, Svenska Byggtjänst, Stockholm, 2007.

SBUF (1995), Betongtorkning – lathund, SBUF Informerar nr 95:14, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 1995.

SBUF (1998), Bedömning av betongs uttorkningstid – programvara, SBUF Informerar nr 98:24, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 1998.

SBUF (2002), Bedömning av betongs uttorkningstid – ny version av TorKaS, SBUF Informerar nr 02:25, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 2002.

SBUF (2003), Metoder att påskynda torkning av betong, SBUF Informerar nr 03:23, Svenska

Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 2003.

Arfvidsson, J. (2010), E-post skickat 2010-10-22.

Resultat från beräkningar

## A. Erforderliga uttorkningstider – laboratoriekonstruktioner

Den konstruktion som har studerats är en 200 mm tjockt mellanbjälklag med kvarsittande stålform. Fyra olika torkklimat har studerats:

- **Fall A.** T=+20°C och 60 % RF.
- **Fall B.** T=+10°C och 60 % RF.
- **Fall C.** T=0°C och 60 % RF.
- **Fall D.** T=+30°C och 60 % RF.

För samtliga fall har prognostiseringar av erforderliga uttorkningstider gjorts med TorkaS v. 2 och v. 3, BI Dry v. 1.3.7 samt SBUF:s lathund.

### A.1 Resultat – TorkaS v.2

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med TorkaS v. 2 ( $RF_{krit}=83\%$ ). Resultat redovisas endast för betonger upp till  $vct=0,55$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Fall	Temp	vct [-]				
		0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
A	+20°C	139	262	>365	>365	>365
B	+10°C	>365	>365	>365	>365	>365
C	0°C	>365	>365	>365	>365	>365
D	+30°C	19	39	69	310	>365

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med TorkaS v. 2 ( $RF_{krit}=90\%$ ). Resultat redovisas endast för betonger upp till  $vct=0,55$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Fall	Temp	vct [-]				
		0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
A	+20°C	6	25	50	80	102
B	+10°C	49	166	262	357	>365
C	0°C	>365	>365	>365	>365	>365
D	+30°C	3	5	15	17	25

### A.2 Resultat – TorkaS v.3

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med TorkaS v. 3 ( $RF_{krit}=83\%$ ). Resultat redovisas endast för betonger upp till  $vct=0,55$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

## Bilaga – Resultat från beräkningar

Fall	Temp	vct [-]				
		0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
A	+20°C	59	243	>365	>365	>365
B	+10°C	38	221	>365	>365	>365
C	0°C	22	163	>365	>365	>365
D	+30°C	68	198	323	>365	>365

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med TorkaS v. 3 ( $RF_{krit}=90\%$ ). Resultat redovisas endast för betonger upp till vct=0,55 samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Fall	Temp	vct [-]				
		0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
A	+20°C	3	16	48	93	144
B	+10°C	1	8	38	115	342
C	0°C	1	3	24	116	>365
D	+30°C	4	18	40	64	84

### A.3 Resultat – BI Dry

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med BI Dry ( $RF_{krit}=83\%$ ). Resultat redovisas endast för betonger upp till vct=0,66 (Tork BI 1-5 samt C25/30) samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Fall	Temp	vct [-]					
		0,34	0,38	0,43	0,47	0,53	0,66
A	+20°C	37	87	156	292	>365	>365
B	+10°C	346	>365	>365	>365	>365	>365
C*	0°C	-	-	-	-	-	-
D	+30°C	<11 <sup>+</sup>	<11 <sup>+</sup>	12 <sup>+</sup>	87	164	>365

\*. Detta fall går ej att köra i BI Dry. I BI Dry går omgivningens temperatur att variera mellan +10°C och +30°C.

<sup>+</sup>. I BI Dry är minsta möjliga uttorkningstid begränsad till 28 dygn. Kortare prognostiserade uttorkningstider är inte tillförlitliga.

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med BI Dry ( $RF_{krit}=90\%$ ). Resultat redovisas endast för betonger upp till vct=0,66 (Tork BI 1-5 samt C25/30) samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Fall	Temp	vct [-]					
		0,34	0,38	0,43	0,47	0,53	0,66
A	+20°C	<13 <sup>+</sup>	13 <sup>+</sup>	13 <sup>+</sup>	14 <sup>+</sup>	60	191
B	+10°C	<9 <sup>+</sup>	9 <sup>+</sup>	10 <sup>+</sup>	38	182	>365
C*	0°C	-	-	-	-	-	-
D	+30°C	<13 <sup>+</sup>	<13 <sup>+</sup>	<13 <sup>+</sup>	13 <sup>+</sup>	14 <sup>+</sup>	63

## Bilaga – Resultat från beräkningar

\*. Detta fall går ej att köra i BI Dry. I BI Dry går omgivningens temperatur att variera mellan +10°C och +30°C.

+. I BI Dry är minsta möjliga uttorkningstid begränsad till 28 dygn. Kortare prognostiserade uttorkningstider är inte tillförlitliga.

**A.4 Resultat – SBUF:s lathund**

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med SBUF:s lathund ( $RF_{krit}=83$  %). Resultat redovisas endast för betonger upp till  $vct=0,70$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Fall	Temp	vct [-]			
		0,40	0,50	0,60	0,70
A	+20°C	110	228	>365	>365
B	+10°C	143	296	>365	>365
C	0°C	>365	>365	>365	>365
D	+30°C	77	159	270	>365

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med SBUF:s lathund ( $RF_{krit}=90$  %). Resultat redovisas endast för betonger upp till  $vct=0,70$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Fall	Temp	vct [-]			
		0,40	0,50	0,60	0,70
A	+20°C	44	114	186	>365
B	+10°C	57	148	242	>365
C	0°C	>365	>365	>365	>365
D	+30°C	31	80	130	255

## Bilaga – Resultat från beräkningar

## B. Erforderliga uttorkningstider – verkliga konstruktioner

Följande fall har behandlats, där erforderliga uttorkningstider skall prognostiseras:

- **Konstruktion A.** Uttorkning platta på mark. Platta på mark (300 mm betong) med underliggande cellplastisolering (150 mm tjock) på en makadambädd. Fall 1-3 (sommarfall) och fall 31-33 (vinterfall).
- **Konstruktion B.** Uttorkning plattbärlag. Plattbärlag (75 mm tjocklek) med pågjutning av betong (200 mm). Fall 4-6 (sommarfall) och fall 34-36 (vinterfall).
- **Konstruktion C.** Uttorkning platta på mark. Platta på mark (200 mm betong) med underliggande cellplastisolering (100 mm tjock) på en makadambädd. Fall 7-9 (vinterfall) och fall 13-15 (sommarfall).
- **Konstruktion D.** Uttorkning plattbärlag. Plattbärlag (75 mm tjocklek) med pågjutning av betong (100 mm). Fall 10-12 (vinterfall) och fall 16-18 (sommarfall).
- **Konstruktion E.** Uttorkning av mellanbjälklag med kvarsittande stålform. Platta (120 mm betong) på kvarsittande stålform. Fall 19-21 (vinterfall) och fall 22-24 (sommarfall).
- **Konstruktion F.** Uttorkning mellanbjälklag utan kvarsittande form<sup>4</sup>. Platta (200 mm betong) med dubbelsidig uttorkning. Fall 25-27 (vinterfall) och fall 28-30 (sommarfall).

I avsnitten nedan presenteras resultat från TorkaS v.2 och v. 3, BI Dry samt SBUF:s lathund.

### B.1 Resultat – Torkas v. 2

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med TorkaS v. 2. Resultat redovisas endast för betonger upp till  $vct=0,55$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Konst.	Årstid	Fall	vct [-]				
			0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
A	Sommar	1-3	347	>365	>365	>365	>365
A	Vinter	31-33	>365	>365	>365	>365	>365
B	Sommar	4-6	280	>365	>365	>365	>365
B	Vinter	34-36	360	>365	>365	>365	>365
C	Sommar	13-15	290	>365	>365	>365	>365
C	Vinter	7-9	360	>365	>365	>365	>365
D	Sommar	16-18	183	259	309	318	>365
D	Vinter	10-12	262	300	329	348	>365
E	Sommar	22-24	203	290	>365	>365	>365
E	Vinter	19-21	310	>365	>365	>365	>365
F	Sommar	28-30	164	240	309	357	>365
F	Vinter	25-27	262	310	329	348	>365

<sup>4</sup> Detta fall går inte att behandla i BI Dry. Istället har ett mellanbjälklag (100 mm betong) med kvarsittande form behandlats.

## Bilaga – Resultat från beräkningar

**B.2 Resultat – Torkas v. 3**

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med TorkaS v. 3. Resultat redovisas endast för betonger upp till  $v_{ct}=0,55$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Konst.	Årstid	Fall	vct [-]				
			0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
A	Sommar	1	68	>365	>365	>365	>365
A	Sommar	2	40	230	>365	>365	>365
A	Sommar	3	32	198	>365	>365	>365
A	Vinter	31	54	275	>365	>365	>365
A	Vinter	32	21	154	>365	>365	>365
A	Vinter	33	20	140	>365	>365	>365
B	Sommar	4	39	164	335	>365	>365
B	Sommar	5	27	134	300	>365	>365
B	Sommar	6	25	128	293	>365	>365
B	Vinter	34	23	134	304	>365	>365
B	Vinter	35	19	117	281	>365	>365
B	Vinter	36	19	114	277	>365	>365
C	Sommar	13	60	263	>365	>365	>365
C	Sommar	14	33	184	>365	>365	>365
C	Sommar	15	28	166	>365	>365	>365
C	Vinter	7	36	194	>365	>365	>365
C	Vinter	8	20	138	>365	>365	>365
C	Vinter	9	19	128	>365	>365	>365
D	Sommar	16	24	88	157	230	>365
D	Sommar	17	21	81	149	222	>365
D	Sommar	18	20	80	148	221	>365
D	Vinter	10	20	84	161	239	>365
D	Vinter	11	19	84	154	231	>365
D	Vinter	12	19	86	157	234	>365
E	Sommar	22	32	144	302	>365	>365
E	Sommar	23	25	126	281	>365	>365
E	Sommar	24	24	123	278	>365	>365
E	Vinter	19	21	127	285	>365	>365
E	Vinter	20	19	113	266	>365	>365
E	Vinter	21	19	113	266	>365	>365
F	Sommar	28	34	126	231	>365	>365
F	Sommar	29	25	106	211	345	>365
F	Sommar	30	23	102	207	338	>365
F	Vinter	27	19	98	205	>365	>365
F	Vinter	25	22	112	223	>365	>365
F	Vinter	26	19	100	208	>365	>365

## Bilaga – Resultat från beräkningar

**B.3 Resultat – BI Dry**

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med BI Dry. Resultat redovisas endast för betonger upp till  $v_{ct}=0,66$  (Tork BI 1-5 samt C25/30) samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Konst.	Årstid	Fall	vct [-]					
			0,34	0,38	0,43	0,47	0,53	0,66
A	Sommar	1-3	146	365	365	365	365	365
A	Vinter	31-33	365	365	365	365	365	365
B	Sommar	4-6	136	172	182	203	337	365
B	Vinter	34-36	179	219	229	246	365	365
C	Sommar	13-15	254	365	365	365	365	365
C	Vinter	7-9	365	365	365	365	365	365
D	Sommar	16-18	53	60	63	71	107	155
D	Vinter	10-12	78	86	87	94	136	182
E	Sommar	22-24	144	178	186	204	337	365
E	Vinter	19-21	175	213	220	228	365	365
F	Sommar	28-30	107	128	134	149	245	365
F	Vinter	25-27	134	156	163	170	273	365

**B.4 Resultat – SBUF:s lathund**

I tabellen nedan redovisas resultaten från prognostiseringar med SBUF:s lathund. Resultat redovisas endast för betonger upp till  $v_{ct}=0,55$  samt för uttorkningstider upp till 365 dagar.

Konst.	Årstid	Fall	vct [-]			
			0,40	0,50	0,60	0,70
A	Sommar	1-3	130	290	365	365
A	Vinter	31-3	130	290	365	365
B	Sommar	4-6	83	158	267	365
B	Vinter	34-36	83	158	267	365
C	Sommar	13-15	110	228	365	365
C	Vinter	7-9	110	228	365	365
D	Sommar	16-18	30	58	97	151
D	Vinter	10-12	30	58	97	151
E	Sommar	22-24	60	124	211	346
E	Vinter	19-21	60	124	211	346
F	Sommar	28-30	55	99	149	198
F	Vinter	25-27	55	99	149	198