

UTTORKNING AV BETONG

**Inverkan av cementtyp, betongkvalitet
och omgivande fuktförhållanden**

Niklas Johansson

UTTORKNING AV BETONG

**Inverkan av cementtyp, betongkvalitet
och omgivande fuktförhållanden**

DRYING OF CONCRETE

**Effect of cement type, concrete quality
and outer moisture conditions**

Niklas Johansson

ISRN: LUTVDG/TVBM-05/3124-SE (1-164)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

221 00 LUND

Förord

Detta Licentiatarbete har utförts vid Avd. Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola och ingått i forskarskolan Byggnaden och Innemiljön. Arbetet har finansierats av KK-stiftelsen och Cements AB.

Jag vill först och främst tacka min handledare Prof. Göran Fagerlund för all hjälp och vägledning under arbetets gång. Ett stort tack även till min biträdande handledare Lars Wadsö, LTH, min industrihandledare Christer Ljungkrantz, Cements samt Prof. Lars-Olof Nilsson vid Avd. Byggnadsmaterial LTH.

Det är många som hjälpt mig med mitt arbete. Jag vill tacka Stefan, Bosse och Ingemar i labbet för all teknisk support. Jag vill även tacka mina examensarbetare Andreas, Kristian och Refik för alla värdefulla resultat ni levererat till mitt arbete.

Mina kollegor vid Avd Byggnadsmaterial har varit ett stort stöd och har bidragit till mitt sociala välbefinnande. Även kollegorna på Cements och Cements Research vill jag tacka för uppmuntran och förståelse under arbetet.

Slutligen vill jag tacka min familj och framförallt Linda för allt stöd ni gett mig.

Lund, februari 2005

Niklas Johansson

Sammanfattning

Uttorkning av betong är ett ämnesområde som under lång tid varit i fokus. Genom åren har många skadefall kunnat kopplas till alltför fuktiga betonggolv. Det är inte betongen som tar skada utan vissa material som placerats i direkt anslutning till betongen. Exempel är kemisk nedbrytning av lim under plastmattor, vilket skapat kemiska emissioner som vandrat ut till inomhusluften, eller som lett till att mattorna lossnat och blivit bubbliga. Mikrobiell påväxt på trä som varit i kontakt med betongen är en annan vanlig skada.

Alla skadefall har inneburit att kraven på uttorkning av betongen innan golv monteras skärpts. Fuktmätning är numera ett måste innan man får applicera fuktkänsliga golvmaterial. Det har därför blivit mycket viktigt att utveckla uttorkningsmetoder som är robusta och ger den uttorkning som krävs inom tillgänglig byggtid.

Syftet med detta licentiatarbete har varit att komplettera tidigare forskning inom ämnesområdet. Praktiska frågeställningar från byggbranschen har legat till grund för de studier som utförts. Arbetet består av sju delstudier varav sex är utförda i laboratoriemiljö och en i fält. Nedan följer en sammanfattning av licentiatuppsatsen.

Kap. 1: Introduktion

I kapitlet görs en kort genomgång av bakgrunden till projektet och en beskrivning av syftet med detta.

Kap. 2: Betongs fuktegenskaper

I kapitlet beskrivs kortfattat betongens strukturutveckling och fuktegenskaper.

Kap. 3: Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong

Hösten 1999 introducerades Byggcement på den svenska marknaden för att ersätta det tidigare använda Std P-cementet. Byggcement innehåller en större andel icke reaktiv kalkstensfyller. Detta kompenseras ur hållfasthetssynpunkt med en högre specifik yta och en förändrad klinkersammansättning. Det var viktigt att uttorkningsegenskaperna inte försämrades genom bytet av cementsort.

Resultaten visar att skillnaden i uttorkningsegenskaper mellan Byggcement och Std P-cement vid samma vct är liten. Byggcement kan således ersätta Std P-cement utan att uttorkningsegenskaperna försämrats.

Kap. 4: Inverkan av cementtyp, vattencementtal och silikastoft på betongens självuttorkning

Låga vattencementtal ($vct \leq 0,40$) ger stor RF-sänkning i betong till följd av självuttorkning. Andra faktorer som också kan påverka självuttorkningen är cementtyp samt inblandning av silikastoft. I studien jämförs självuttorkningen hos cementbruk där 3 cementtyper och 3 vct varierar. Inverkan av silikastoft undersöks för ett vct.

Resultaten visar att RF-sänkningen till följd av självuttorkning är helt beroende av betongens vct. SH-cement ger något större självuttorkningseffekt än Byggcement. Anläggningscement har klart sämst självuttorkning av de undersökta cementtyperna. Silikastoft har enbart positiv inverkan på självuttorkning tillsammans med Anläggningscement. Delvis kan skillnaden i självuttorkning mellan cementen förklaras med så kallade ”alkalieffekten”.

Kap. 5: Inverkan av simulerat regn på uttorkning av nygjuten betong

Betong utsätts ofta för regn då den är nygjuten. Det har varit dåligt känt hur detta vatten påverkar den fortsatta uttorkningen av betongen. Det fanns misstankar att betong med lågt vct skulle suga in fukt då den var ung. Denna fukt skulle sedan bli svår att torka ut då betongen härdat och därvid blivit mycket tät. Fem olika vct provades tillsammans med fyra olika varaktigheter på det simulerade regnet.

Resultaten visar att vattenbelastning på nygjuten betong med $vct \leq 0,40$ inte har någon väsentlig inverkan på uttorkningstiden. För betong med högre vct har vattenbelastningen negativ inverkan. Den negativa inverkan ökar med ökat vct och ökad varaktighet hos vattenbelastningen. För vct 0,70 kan uttorkningstiden fördubblas vid sju dygns vattenbelastning om RF-kravet är 85 %.

Kap. 6: Vatteninsugning i betong i samband med vattenskada

Vattenläckage i en byggnad medför ofta att stora vattenmängder sugs in i betongstommen. Uttorkningen tar lång tid. Genom att välja lämplig betongkvalitet som tar upp liten mängd vatten kan torkinsatsen möjligen minskas. I denna studie jämfördes betong med fem olika vct vid fyra olika vattenbelastningar.

Resultaten visar att insugen vattenmängd minskar kraftigt med minskat vct. Vattenbelastningens varaktighet har liten betydelse för totalt uppsugen vattenmängd. Det tar ca. 1 månad för betong med vct 0,40 att torka ut till ursprunglig fuktnivå i klimatet +20°C och 60 % RF. Motsvarande torktid för en betong med vct 0,70 är ca. 4 månader. En golvkonstruktion av högvärdig betong är alltså betydligt mindre känslig för vattenläckage än en golvkonstruktion av normalbetong.

Kap. 7: Inverkan av avjämningsmassa på uttorkning av betonggolv

Betonggolv avjämnas ofta med en avjämningsmassa för att man skall erhålla en slät yta att applicera golvmaterial på. Det är dåligt känt vilket fukttillskott avjämnningen ger till betongen och hur betongens uttorkning påverkas av det påförda skiktet avjämningsmassa. En undersökning av inverkan av avjämningsmassa på uttorkningsförloppet studerades därför. Inverkan av tidpunkt för avjämnningen undersöktes också.

Resultaten visar att 10 mm golvavjämnning höjer RF i betongen ned till ett djup av några cm. RF-ökningen är större ju högre vct betongen har. På 50 mm djup i betongen sker ingen RF-ökning. Betongen fortsätter att torka även efter golvavjämnningen, men med något lägre hastighet. Fördröjningen av uttorkningen är dock tämligen liten. Ju tidigare avjämningsmassan appliceras desto mindre blir påverkan på den fortsatta uttorkningen.

Kap. 8: Uttorkning av prefabricerade betongbjälklag

Vid produktion av kontorshus, men ibland även av bostadshus, används ofta prefabricerade håldäcksbjälklag i kombination med massiva prefabricerade bjälklag. Hanteringen av prefabricerade bjälklag från tillverkning till inbyggnad kan variera starkt. Sättet att hantera elementen skulle kunna ha stor inverkan på uттorkningsförloppet. Syftet med denna studie var att studera uттorkning av de båda typerna av bjälklagselement under varierande klimatförhållanden (RF, regn, temperatur) före och efter montering. Klimaten valdes med utgångspunkt från hur bjälklagselement normalt hanteras.

Resultaten visar att uттorkningen sker långsammare i de massiva bjälklagen än i håldäcken. Klimatet som bjälklagen utsätts för innan de byggs in visade sig inte ha så stor inverkan. Bjälklagens uттorkning når ungefär samma RF-nivå efter ungefär samma tid när de placeras i ett varmt och torrt klimat oavsett de tidigare klimatförhållandena.

Kap. 9: Fältstudie av olika metoder att påskynda uттorkning av betong

I samband med ett verkligt byggprojekt undersöktes effekten av olika uттorkningsmetoder. Dessa var:

- Användning av betong med lågt vct ("självтorkande betong")
- Värmning av betong med elslinga
- Inblåsning av varm, torr luft under platta på mark
- Sorptionsavfuktning av luften i rummet över betongplattan
- Infravärmning av betongplattan

Resultaten visar att betong med lågt vct (0,38) gav snabb och säker uттorkning utan någon särskild insats av arbetsplatsens personal. Värmning med elslinga gav också snabb uттorkning men metoden uppfattades som mera arbetskrävande. Flera av elslingorna gick sönder under byggtiden. De övriga metoderna gav inte tillfredsställande uттorkningsresultat.

Kap. 10: Slutsatser

Sammanfattningsvis visar alla de delstudier som genomförts i detta arbete att en sänkning av betongens vattencementtal till $\leq 0,40$ har en mycket positiv inverkan på betongens uттorkning. Detta gäller såväl torkning av nygjuten betong som torkning av hårdnad betong efter en längre tids vattenläckage.

Summary

Drying of concrete is an issue that has been in focus for a long time. Through the years many damages have been linked to too damp concrete floors. It is not the concrete that is damaged but the material placed in contact with the concrete. One example is chemical decomposition of adhesive underneath PVC-flooring, which has led to chemical emissions in the indoor air. Microbial growth on wood that has been in contact with the concrete is another common damage.

All these cases of damage have amounted to the fact that the demands on drying have increased and moisture measurements are nowadays compulsory before you are to apply a moist sensitive floor material. It has become utterly important to develop drying methods that are robust and reaches the level of dryness required within the construction time.

The aim of this licentiate thesis has been to complement earlier research within the field of subject. Practical problems from the construction business have been the base for the studies concluded. The thesis consists of seven studies of which six have been concluded in the laboratory and one is a field study. Below you will find a conclusion of the licentiate thesis.

Chapter 1: Introduction.

This chapter gives a background to this licentiate project and a description of the aim.

Chapter 2: Moisture properties of concrete.

In this chapter the structure development and the moisture properties of concrete are described.

Chapter 3: Comparison between Portland Limestone cement and Ordinary Portland cement concerning drying of concrete.

In the fall of 1999 Portland Limestone cement (PLC) was introduced on the Swedish market to replace the earlier used Ordinary Portland cement (OPC). The PLC contains a greater part of non-reactive limestone filler. In strength this is compensated by a larger specific surface and an altered composition of the cement clinker. It was important that the drying properties were not deteriorated by the change of cement type.

The results show that the difference in drying properties between Portland Limestone cement and Ordinary Portland cement at the same water cement ratio is small. Therefore PLC can replace OPC without any impairments of the drying properties.

Chapter 4: The influence of cement type, water cement ratio and silica fume on the self-desiccation of concrete.

Low water cement ratio ($w/c \leq 0,40$) lower the RH in concrete due to self-desiccation. Other factors that also influence the self-desiccation are cement type and addition of silica fume. This study compares self-desiccation in cement mortar where three cement types and three water cement ratios are varied. The influence of silica fume on one water cement ratio is also studied.

The results show that lower RH due to self-desiccation is completely depending on the water cement ratio of the concrete. Rapid hardening Portland cement provides a somewhat greater self-desiccation effect than Portland Limestone cement. The low alkali and sulphate resistant Portland cement has clearly the lowest self-desiccation of the studied cement types. Silica fume has only positive effects on self-desiccation in combination with the low alkali and sulphate resistant Portland cement. The difference between the cements can partly be explained by the so called alkali effect.

Chapter 5: The influence of simulated rain on desiccation of newly cast concrete.

Concrete is often exposed to rain when it is newly cast. There has been little knowledge of how this water affects the drying of the concrete. It was suspected that concrete with low water cement ratio was to absorb water when it is young. This water would then be difficult to dry out when the concrete has cured and has become highly dense. Concrete with five different water cement ratios were tested together with four different durations of the simulated rain.

The result shows that exposure to water on newly cast concrete with a water cement ratio $\leq 0,40$ does not have any significant influence on the drying time. However early water exposure has a negative effect on concrete with $w/c \geq 0,45$. This effect increases with increased w/c-ratio and increased duration of the water exposure. For w/c 0,70 the drying time at seven days of water exposure may be doubled if the RH-requirement is 85 %.

Chapter 6: Water absorption in concrete due to water leakage

Water leakage in a building often leads to uptake of a great amount of water in the concrete structure. The drying takes long time. By choosing a concrete quality, which absorbs a small amount of water, the drying process might be shortened. In this study five different water cement ratios at four different water durations were compared.

The result shows that the water absorption decreases significantly with a lower w/c-ratio. The duration of the water leakage has small influence on the total amount of absorbed water. It takes approximately one month at 20°C and 60 % RH for concrete with w/c 0,40 to dry to the original moisture level. The corresponding drying time for concrete with w/c 0,70 is approximately 4 months. A floor structure with high-quality concrete is thus considerably less sensitive to water leakage than a floor structure with normal concrete.

Chapter 7: The influence of self-levelling flooring screed on the drying of concrete floor structures

Concrete floors are often levelled with a self-levelling screed in order to retain an even surface that can be used for application of a flooring material. It was previously unknown how much moisture the levelling screed gave to the concrete and how the drying of this was affected. These factors were studied. The influence of the time when the levelling was done was also studied.

The result shows that a 10 mm screed raises the RH in the concrete somewhat down to a depth of a few centimeters. The increase of RH is greater the higher the w/c-ratio of the concrete. At a depth of 50 mm there is no increase of RH. The concrete continues to dry even after the levelling. The earlier the self levelling screed is applied the lesser is the effect on the continued drying.

Chapter 8: Drying of prefabricated concrete slabs

In the production of office buildings, but sometimes also of multi-dwelling buildings, prefabricated hollow core slabs are often used in combination with homogeneous prefabricated slabs. The treatment of prefabricated slabs from production to construction may vary considerably. This might have great influence on the drying time. The aim of this study was to compare the drying time between the two types of slabs during various climate conditions (RH, rain, temperature). The different types of climates were chosen in consideration to how the slabs are normally treated.

The results show that drying is slower in the homogeneous slabs than in the hollow core slabs. The climate that the slabs are exposed to before they are built in does not have any considerable effect. The drying of the slabs will reach almost the same RH level after the same time when they are placed in a warm and dry environment irrespective of the earlier climate conditions.

Chapter 9: A field study of different methods to increase the drying rate of concrete

This field study was carried out at an actual construction site. The following drying methods were tested.

- The use of concrete with low water cement ratio
- Heating of concrete with heat cable
- Blowing in warm and dry air underneath slab on ground
- Sorption drying of air above the concrete slab
- Infra-heating of the concrete slab

The results show that concrete with a low water cement ratio (0,38) gave a rapid and safe drying without any particular effort by the construction workers. The use of heat cable also produced rapid drying, but the method was considered to be more labour-intensive. Moreover, several of the heat cables broke during construction. The other methods did not produce any satisfactory results.

Chapter 10: Conclusions

In conclusion all the studies made in this work show that lowering the water cement ratio of the concrete to $\leq 0,40$ has a very positive effect on drying. This is valid both for drying of newly cast concrete and for drying of hardened concrete after exposure to water leakage.

Innehåll

1. Introduktion	1
1.1 Inomhusmiljö	1
1.2 Fukt i betong	1
1.3 Skadefall kopplade till betonggolv	2
1.4 Kritiska fuktnivåer	4
1.5 Fuktmätning	5
1.6 Tidigare forskning	8
1.7 Bakgrund och syfte	10
2. Betongs fuktegenskaper	13
2.1 Allmänt	13
2.2 Cementhydratation och strukturutveckling	13
2.3 Fuktfixering	16
2.4 Fuktkällor, byggfukt	18
2.5 Självuttorkning	21
2.6 Fuktktransport i betong och torkning utåt	23
2.7 Vatteninsugning i betong	25
2.8 Inverkan av betongtemperatur på uttorkning	27
2.9 Inverkan av vattenlöslig alkali på RF hos vattenmättad betong	27
3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong	31
3.1 Bakgrund	31
3.2 Syfte	31
3.3 Försöksuppläggning	31
3.4 Betongtillverkning	32
3.5 Tillverkning av provkroppar	34
3.6 Lagring av provkroppar	35
3.7 Fuktmätning	36
3.8 Resultat	37
3.9 Slutsatser	45
3.10 Diskussion	45

4. Inverkan av cementtyp, vattencementtal och silikastoft på betongens självuttorkning	47
4.1 Bakgrund	47
4.2 Syfte	47
4.3 Försöksuppläggning	47
4.4 Tillverkning av cementbruk	48
4.5 Tillverkning och lagring av provkroppar	50
4.6 Fuktmätning	50
4.7 Resultat	51
4.8 Slutsatser	56
4.9 Diskussion	56
 5. Inverkan av simulerat regn på uttorkning av nygjuten betong	 59
5.1 Bakgrund	59
5.2 Syfte	60
5.3 Försöksuppläggning	60
5.4 Betongtillverkning	61
5.5 Tillverkning av provkroppar	62
5.6 Lagring av provkroppar	64
5.7 Fuktmätning	64
5.8 Resultat	65
5.9 Slutsatser	73
5.10 Diskussion	73
 6. Vatteninsugning i betong i samband med vattenskada	 75
6.1 Bakgrund	75
6.2 Syfte	75
6.3 Försöksuppläggning	75
6.4 Provkroppar	76
6.5 Vattenbelastning och vägning	77
6.6 Fuktmätning	77
6.7 Resultat	77
6.8 Slutsatser	91

7. Inverkan av avjämningsmassa på uttorkning av betonggolv	93
7.1 Bakgrund	93
7.2 Syfte	93
7.3 Avjämningsmassa	93
7.4 Försöksuppläggning	94
7.5 Betongtillverkning	94
7.6 Tillverkning och lagring av provkroppar	94
7.7 Applicering av avjämningsmassa	95
7.8 Fuktmätning	96
7.9 Resultat	97
7.10 Slutsatser	103
8. Uttorkning av prefabricerade betongbjälklag	105
8.1 Bakgrund	105
8.2 Syfte	105
8.3 Försöksuppläggning	106
8.4 Tillverkning av betongbjälklag	106
8.5 Tillverkning och preparering av provkroppar	106
8.6 Lagring av provkroppar	108
8.7 Avjämning av provkroppar	109
8.8 Fuktmätning	110
8.9 Resultat	111
8.10 Slutsatser	119
9. Fältstudie av olika metoder att påskynda uttorkning av betong	121
9.1 Bakgrund	121
9.2 Syfte	121
9.3 Byggnadsbeskrivning	121
9.4 Uttorkningsmetoder	124
9.5 Uttorkningsbedömningar med datorprogram före byggstart	130
9.6 Mätning och registrering av temperatur och fukt	132
9.7 Betonggjutning	134
9.8 Torkklimat	135
9.9 Resultat	141

9.10 Jämförelse mellan uppmätta resultat och simuleringsresultat från datorprogrammet TorkaS 2.0	149
9.11 Slutsatser	152
10. Slutsatser	157
Referenser	161
Appendix	

1. Introduktion

1.1 Inomhusmiljö

Den genomsnittlige europén spenderar cirka 90 % av sin tid inomhus (Mølhav 1999). Inomhusluftens kvalitet har därför stor betydelse för människors välbefinnande. Inomhusluften är inte alltid sund vilket kan medföra problem. Begreppet ”sjuka-hus-sjukan” används ofta för att beskriva att folk mår dåligt inomhus i vissa lokaler. Typiska symptom är irritation i ögon, näsa och hals samt trötthet och huvudvärk. Någon direkt koppling till vad det är i luften som skapar besvären har dock inte hittats inom den medicinska forskningen.

Det finns misstankar om att problemen skulle kunna orsakas av organiska ämnen i inomhusluften (Andersson et al. 1997). Eftersom det är okänt vilka ämnen eller kombinationer av ämnen som orsakar problemen tillämpas ofta försiktighetsprincipen. Exempel på detta är att man genom lämpliga materialval försöker se till att de kemiska emissionerna från material som är i kontakt med inomhusluften är så små som möjligt. En sammanställning av epidemiologiska studier (Bornehag et al. 2001) visar också att det finns ett samband mellan fukt i byggnader och ohälsa. En viktig orsak till detta kan vara att fukt stimulerar emission av skadliga ämnen från material. I Boverkets byggregler (BBR 2002) står följande att läsa angående skadlig fukt:

”Byggnader skall utformas så att skador, mikrobiell tillväxt, elak lukt eller andra hygieniska olägenheter till följd av byggfukt eller inträngande fukt inte uppkommer.”

Det är framförallt i nordliga länder som Skandinavien, USA och Kanada som man fokuserat på emissionsproblematiken. En viktig orsak till detta kan vara att man i dessa länder tillbringar stor del av tiden inomhus samtidigt som man har höga krav på täthet och värmeisolering hos byggnaderna.

Betong är ett material som ofta innehåller stor mängd byggfukt vilken kan ge upphov till emission från material som den står i kontakt med. Den möjliga kopplingen mellan fukt i betong och inomhusmiljöproblem har därför uppmärksamats under de senaste decennierna. Detta gäller framförallt Sverige men även övriga nordiska länder. I Sverige ställer man i dag strikta krav på uttorkning av betong.

1.2 Fukt i betong

Vid uppförande av flerbostadshus och kontorsbyggnader är betong det mest använda stommaterialet. Betong används på grund av dess goda hållfasthetsegenskaper, ljudisolerande förmåga, brandbeständighet och andra positiva egenskaper. En översikt över betong som husbyggnadsmaterial ges i (Öberg 2002).

Som nämndes ovan kan betong dock även medföra problem som främst sammanhänger med dess innehåll av byggfukt, men även på fukt som sugas in under byggskedet eller bruksskedet. Byggfukt, vilken består av det vatten som tillförs vid betongtillverkningen och vid den efterföljande härdningen, kan ta mycket lång tid att torka ut. Uttorkningen kan snabbas på genom val av hög betongkvalitet eller genom värmning av den gjutna konstruktionen. Under byggskedet kan ibland betongen utsättas för regn vilket förlänger uttorkningen ytterligare.

Vid golvläggning tillförs ofta vatten. I äldre byggnader kan ibland vattenläckage förekomma vilket medför att vatten sugas in i den torra betongen. Den nödvändiga uttorkningen kan gå mycket långsamt. Dessa olika källor till fukt i betong beskrivs närmare i kapitel 2.

1.3 Skadefall kopplade till betonggolv

Många skadefall finns där fuktiga betonggolv orsakat problem. Det är dock aldrig betongen som tar skada utan de material som placeras i direkt anslutning till betongen.

Skador hos dessa material kan delas in i tre kategorier:

- Kemisk nedbrytning
- Biologisk påväxt
- Fuktrörelser

1.3.1 Kemisk nedbrytning

Många skadefall med limmade plastmattor på betong har förekommit genom åren. Nedbrytning av lim eller plastmatta kan orsaka förhöjd halt av kemiska emissioner i inomhusluften (Wengholt-Johnsson 1995). Vid täta golvbeläggningar kan nedbrytningsprodukterna även vandra ner i betongen och lagras upp i denna (Sjöberg 2001). Detta kan leda till ökade emissioner till inomhusluften då man byter det tidigare golvmaterialet mot ett mera diffusionsöppet golvmaterial. En sammanställning av fem olika laboratoriestudier (Gustafsson 1996) redovisar följande samband avseende plastmattor limmade direkt på betong:

- Golvbeläggning med plastmatta på fuktig betong medför risk för kemisk nedbrytning av limskikt och matta.
- Hög relativ fuktighet i underlaget/betongen ökar generellt risken för förhöjd emission.
- Emissionen utgörs huvudsakligen av nedbrytningsprodukter från golvlimet.

Den kemiska nedbrytningen leder också ofta till att mattan lossnar från underlaget vilket visas i figur 1.1.



Figur 1.1 Mattlossning till följd av kemisk nedbrytning av limmad plastmatta. (Foto Leif Erlandsson 1976)

1.3.2 Mikrobiell påväxt

För att mögeltillväxt skall ske krävs tillgång på lättillgänglig näring. Dessutom finns krav på syretillgång, pH, fukt och temperatur. Näring finns i de flesta byggnadsmaterial eller tillförs via föroreningar. Mögeltillväxt på ren betong är ovanligt eftersom betongen består av oorganiska material. Man har dock funnit att vissa biologiskt nedbrytbara formoljor kan orsaka mögeltillväxt även på betong (Blomsterberg et al. 1997). Enligt Nielsen et al. (2004) kan mikrobiell tillväxt på betong förekomma då RF överstiger 95 % och temperaturen är 10°C.

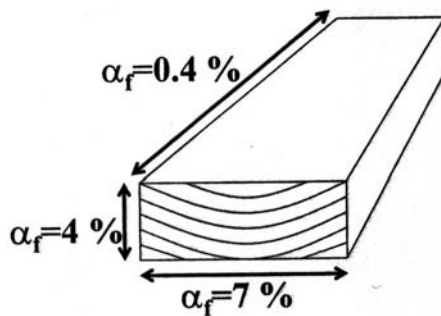
I betonggolv skall man undvika direktkontakt mellan betong och trä, eftersom trä är ett material som lätt utsätts för mögelpåväxt även vid tämligen låga värden på RF. Parkettgolv bör därför förses med underliggande plastfolie för att bli en säker lösning ur mögelsynpunkt. Det slarvas dock ofta med rengöringen av betongplattan innan plastfolien läggs på, vilket kan leda till att kvarliggande sågspån och annat organiskt material möglar under plastfolien.

Limmad linoleummatta direkt på otillräckligt uttorkad betong kan leda till mögeltillväxt i väven på undersidan av mattan.

Träreglar som gjuts in i betong som gränsar mot fuktig miljö, t.ex. mark, har ofta visat sig ge mögelproblem. Man kan alltid förvänta att RF i sådan betong trots fuktskydd blir tillräckligt hög för mögelpåväxt.

1.3.3 Fuktrörelser

Fuktrörelser sker när ett material avger fukt eller tar upp fukt. Träbaserade material har stora fuktrörelser jämfört med andra material. Fuktrörelserna varierar med träets riktning, se figur 1.2.



Figur 1.2 Maximal krympning/svällning för massiv furu vid torkning från vattenmättat tillstånd. (Nilsson 2004)

Fuktrörelserna kan dämpas genom att träet lamineras. Moderna parkettgolv är därför i dag oftast uppbyggda i skikt där träet lagts i lager med vinkelräta fiberriktningar. Trots detta finns vissa fuktrörelser.

Det krävs rörelsefogar i trägolv som kan ta upp den svällning/krympning som sker när träet uppfuktas/torkas. Även de fuktrörelser som sker på grund av inneluftens naturliga RF-variation måste kunna tas upp. Rörelsefogar måste vara särskilt stora vid användning av massiva trägolv och vid anslutning mellan golv och vägg.

Skador kan uppstå då trägolv limmas direkt på betong som är ofullständigt uttorkad (Follin 2004). Man kan få problem med kantresning till följd av ojämna fuktfördelning i trägolvet. Träets undersida är fuktigare än ovansidan vilket gör att golvet böjs uppåt vid ytterkanterna.

Trägolv på betong med golvvärme kan också leda till problem orsakade av fuktrörelser. I detta fall kan trägolvet undre del bli torrare än den övre. Detta leder till krympning i underkant vilket gör att golvet buktar uppåt.

Även PVC-baserade plastmattor kan ha avsevärda fuktrörelser (Hedenblad & Nilsson 1987), särskilt om de utsätts för fukt med högt pH-värde. Sådan fukt finns i bristfälligt uttorkad betong. Man kan då få mjukgörarvandring från mattan (kemisk nedbrytning) vilket leder till stor krympning. Vid lång tids exponering för vatten kan plastmattor få fuktsvällning. Svällning i kombination med att limmet bryts ned kan ge sådana bubblor som visas i figur 1.2.

1.4 Kritiska fuktnivåer

Till följd av alla skadefall som förekommit har rekommendationer utarbetats vad det gäller uttorkning av betonggolv. I HusAMA 98 (1998) redovisas följande högsta tillåtna fuktnivåer för RF i underlaget vid applicering av olika typer av golvmaterial:

60 % RF	Trägolv utan fuktskydd av plastfilm
85 % RF	Plastmatta, Gummimatta
90 % RF	Linoleummatta
95 % RF	Trägolv med fuktskydd av plastfilm

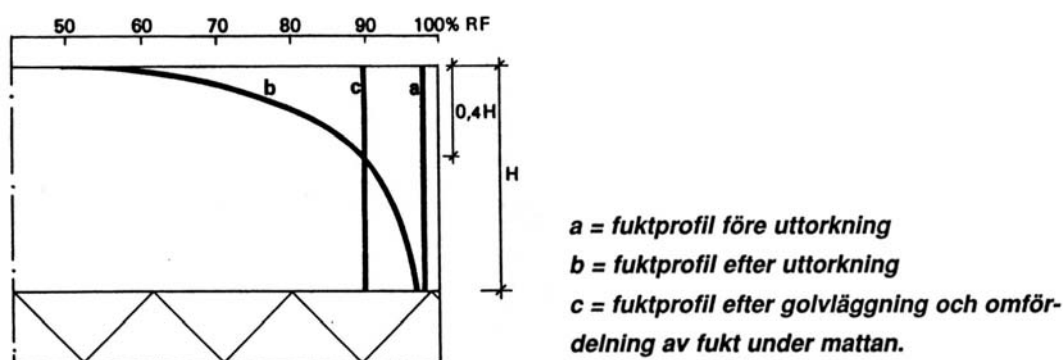
Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut har på uppdrag av Boverket gjort en sammanställning av kritiska fukttillstånd med avseende på tillväxt av mikroorganismer, (Samuelsson 2004). Sammanställningen baseras på nyare litteratur. Resultatet från sammanställningen visar att kritisk relativ fuktighet för mikrobiell tillväxt på trä och smutsade material är ca. 75 % RF. Det finns dock materialgrupper som, förutsatt att de ej är förorenade med organiskt material, har högre kritiskt fukttillstånd. Exempel på detta är cellplast där kritisk RF är ca. 90-95 % RF för mikrobiell tillväxt.

1.5 Fuktmätning

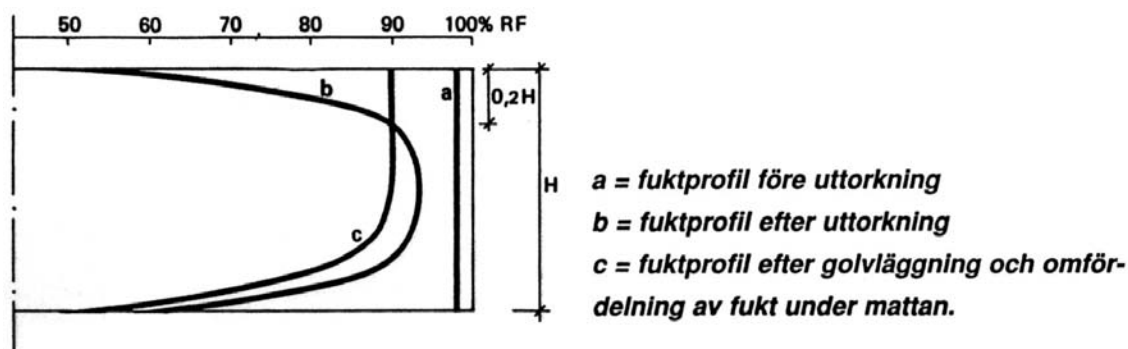
För att beskriva fuktillståndet i ett betonggolv mäts den relativa fuktigheten, RF. RF kan bestämmas med hjälp av olika mätmetoder. I detta avsnitt kommer begreppet ekvivalent mätdjup att definieras och de vanligaste mätprinciperna att beskrivas. Informationen är hämtad ur RBK:s manual för fuktmätning i betong (RBK 2001).

1.5.1 Ekvivalent mätdjup

Mätning av RF skall normalt utföras på ekvivalent mätdjup. Fuktnivån på det ekvivalenta djupet motsvarar den fuktnivå man efter lång tid kommer att uppnå i betongens överyta då man belagt denna med ett helt tätt ytmaterial. Det ekvivalenta mätdjupet beror på om uttorkningen är enkelsidig, se figur 1.4 eller dubbelsidig, se figur 1.5.



Figur 1.4 Bestämning av ekvivalent mätdjup vid enkelsidig uttorkning. (Hedenblad 1995)

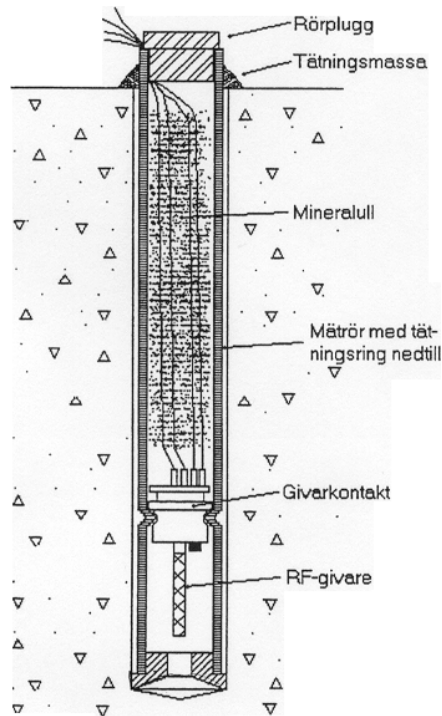


Figur 1.5 Bestämning av ekvivalent mätdjup vid dubbelsidig uttorkning. (Hedenblad 1995)

Vid enkelsidig uttorkning skall således mätning utföras på 40 % av plattjockleken och vid dubbelsidig på 20 % av plattjockleken.

1.5.2 Borrhålsmätning med kvarsittande givare

Borrhålsmätning innebär att ett hål borrar i betongen. Hålets djup bestäms av vilket mätdjup som RF skall redovisas på. Ett mätrör placeras i borrhålet för att förhindra att fukt från betong över mätdjupet når givaren. Därefter placeras den kvarsittande givaren i mätröret, se figur 1.6. Figuren visar en givare av typ Humi-Guard.



Figur 1.6 Kvarsittande RF-givare av typ Humi-Guard vid borrhålsmätning. (RBK 2001)

I stället för att borra in ett mät rör i den hårdnade betongen kan mät röret med givare placeras i formen före gjutning. Kvarsittande givare innebär därför att RF-givaren kan sitta monterad i betongen från gjutning fram till slutmätning. Vid kvarsittande givare kan avläsning ske när som helst och mätresultaten kan registreras under mätperioden.

RF-mätningen kompletteras alltid med en temperaturmätning på samma djup. Givarens utslag kan nämligen vara temperaturberoende varför korrektion kan bli nödvändig. Om temperaturen i betongen skulle ändras kort tid efter RF-mätningen kommer dessutom RF i betongen att ändras utan att någon fortsatt uttorkning skett. Genom kännedom om temperaturen kan justering för detta ske.

Mätprincipen kan även användas för andra mätartyper än Humi-Guard.

1.5.3 Borrhålsmätning med icke kvarsittande givare

Även vid denna metod används ett mät rör som kan borrar in eller som fästs i formen före gjutning. RF-givaren placeras i mät röret då det är dags för mätning. Innan avläsning kan ske måste givaren sitta i borrhålet under så lång tid att den har uppnått jämvikt med betongens RF. Den erforderliga tiden beror på betongens täthet, d.v.s. på dess vct, och på givarens fuktkapacitet, d.v.s. på givarens egna fuktabsorberande förmåga.

Kapacitiva givare av typ Vaisala måste monteras minst 12 timmar före mätning för betong med vct $\geq 0,40$, och 48 timmar för betong med vct $< 0,40$.

Erforderlig tid före mätning beror också på hur stor den avdunstande betongarean är, d.v.s. på rörets fria yta exponerad för betong. Röret bör utformas så att största möjliga yta erhålls.

För övrigt gäller samma förfarande som vid borrhålsmätning med kvarsittande givare.

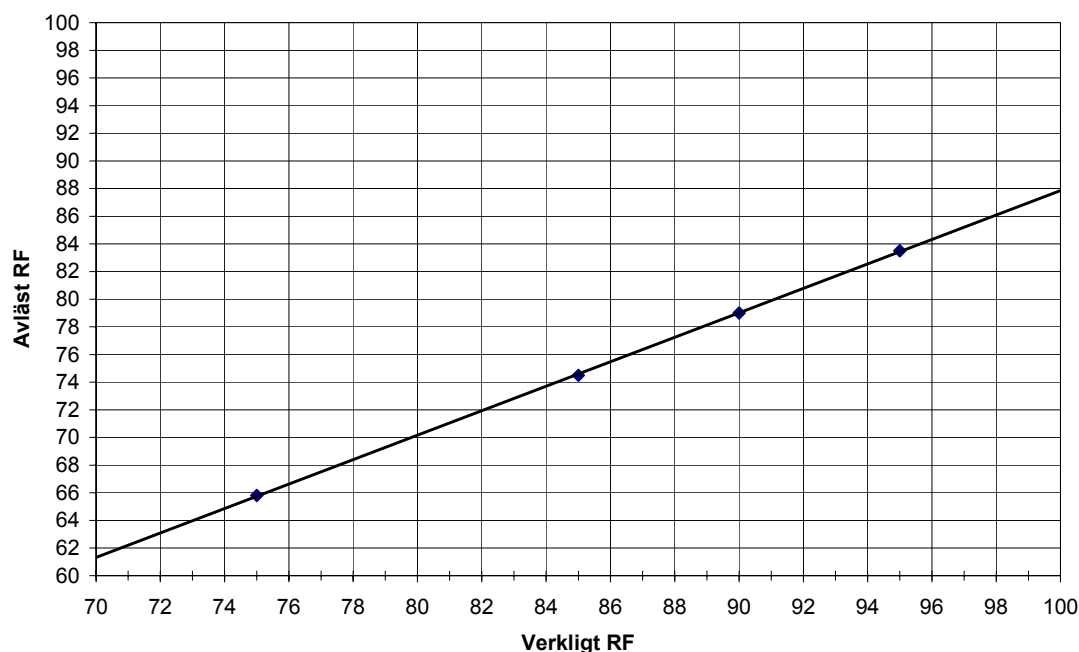
1.5.4 Mätning på uttaget prov

Uttaget prov innebär att man tar ut betongbitar från det aktuella mätdjupet. Uttagningen måste ske med en metod som inte ändrar betongens fukttillstånd. Betongbitarna placeras i täta mätrör och transporteras till laboratorium för fuktmätning. Laboratoriet skall ha stabil och känd temperatur. RF-mätningen sker med givare som sticks in i provröret och som registrerar RF hos luften i röret. Denna kommer en viss tid efter det givaren monterats att nå jämvikt med de uttagna betongbitarna. Ofta måste man vänta några dygn innan en säker mätning kan göras.

Med uttaget prov finns det möjlighet att bestämma en RF-profil ur samma mäthål genom att ta ut betongbitar från olika nivåer.

1.5.5 Kalibrering av RF-givare

För att man skall erhålla korrekta mätvärden är det viktigt att man kontinuerligt kalibrerar sina RF-givare. Varje givare har sin egen kalibreringskurva. Kalibreringen görs genom att givaren placeras i en känd relativ fuktighet under konstant och känd temperatur. Det avlästa RF-värdet markeras som en punkt i ett diagram med avläst RF på ena axeln och verkligt RF på den andra. Genom att placera givaren i flera olika RF erhålls givarens kalibreringskurva, se figur 1.7. Olika temperatur ger olika kalibreringskurvor. Därför måste kalibrering göras vid olika intressanta temperaturnivåer.



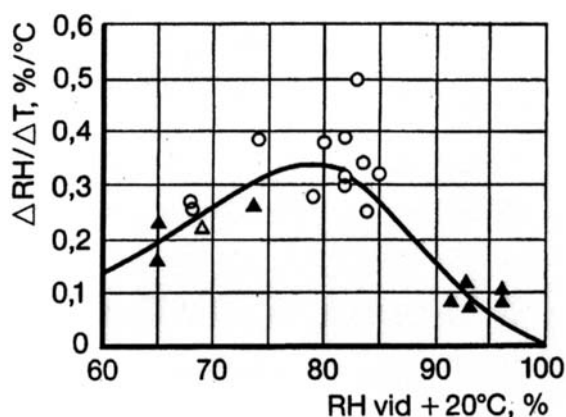
Figur 1.7 Kalibreringskurva för RF-givare av typ Vaisala HMP 44 vid 20°C

Kalibrering av givare kan utföras med hjälp av saltlösningar eller fuktgenerator. För mätning i betong före ytbeläggning av olika slag bör kalibrering ske inom intervallet 75-100 % RF.

Vid RF-mätning måste avlästa mätvärden korrigeras med hjälp av kalibreringskurvan innan de presenteras.

1.5.6 Temperaturkorrigering av uppmätt RF

Ofta genomförs RF-mätningen vid annan temperatur än den som konstruktionen har vid mättillfället, eller kommer att få tämligen kort tid därefter. Det innebär att det uppmätta mätvärdet skiljer sig från det verkliga värdet. Om temperaturen vid mätning är högre än i konstruktionen erhålls ett alltför högt mätvärde, och vice versa. Orsaken till detta är att betongens jämviktsfuktkurva har ett visst temperaturberoende. Korrektur kan göras med hjälp av diagrammet i figur 1.8.



Figur 1.8 Korrektur av RF beroende på temperaturavvikelser från 20°C. (Nilsson 1988)

1.5.7 Mätosäkerhet

Vid RF-mätning i betong finns det flera faktorer som bidrar till osäkerheten i fuktmätningen. Enligt Hus AMA 98 (1998) får mätosäkerheten inte överstiga 2 % i RF vid uttaget prov och 3 % vid mätning i borrhål. Dessutom skall det redovisas hur mätosäkerheten bestämts. Ytterligare information om mätosäkerhet finns i rapporten "Mätosäkerhetsberäkningar för relativ fuktighet i betong" (Hedenblad 1999).

1.6 Tidigare forskning

I detta avsnitt kommer viktiga delar av tidigare forskning inom området "uttorkning av betong" att presenteras mycket kortfattat. Presentationen begränsas till forskning genomförd i Sverige och Finland.

Pionjär inom området var den finske forskaren *Sven Pihlajavaara* som studerade fukttransport i betong teoretiskt och experimentellt. Han undersökte även betongens uttorkning. Arbetet resulterade i en doktorsavhandling (Pihlajavaara 1965) som var ett pionjärbete, och som haft stor betydelse för den fortsatta forskningen inom fuktområdet.

Pihlajavaaras forskning uppmärksammades av forskare vid avdelning Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola i mitten på 1960-talet. Alltsedan dess har betonguttorkning utgjort ett viktigt forskningsområde vid LTH. Under ledning av dåvarande professor *Sven Gabriel Bergström* bedrev avdelningen teoretiskt och experimentellt arbete kombinerat med skadeutredningar och branschinformation. *Lennart Ahlgren*, som var en av de första fuktforskarna vid LTH, bedrev allmän forskning om fukt i byggnadsmaterial och då särskilt betong. Hans specialområde var fuktfixering i material inom vilket han också presenterade sin

doktorsavhandling (Ahlgren 1972). I en artikel (Ahlgren 1973) som handlar om fukt i betonggolv med tät ytbeläggning presenteras följande slutsatser:

- Vid jämförelse mellan olika betongkvaliteter ger fuktkvotvärden och värden på relativa fuktigheten (RF) ofta en motsatt bild av fukttillståndet. En betong med hög fuktkvot kan ibland vara torrare, d.v.s. ha lägre RF, än en betong med lägre fuktkvot.
- Relativa fuktigheten, och inte fuktkvoten, bör därför användas som mått på fuktnivå och bedömning av t. ex. uttorkningsnivå måste ske med utgångspunkt från RF.
- Uttorkningstiden för betong före beläggning med t. ex. fuktkänsligt golvmaterial kan förkortas avsevärt genom att en högre betongkvalitet används.

Denna artikel var en av de första som visade att uttorkningstiden kunde förkortas vid val av högre betongkvalitet. Högre kvalitet än K 40 (vct ca. 0,50) användes dock mycket sällan vid den här tiden.

I Ahlgrens fotspår följde många LTH-forskare som arbetade med fukt i byggnadsmaterial. En av dessa var *Lars-Olof Nilsson* som 1972 började sin forskning inom området betonguttorkning. I sin doktorsavhandling (Nilsson 1980) presenteras en beräkningsmetod, inkluderande erforderliga materialdata, för beräkning av uttorkningen hos hydratiserande betong.

Göran Hedenblad genomförde omfattande undersökningar av fukttransport i hårdnad betong. Resultaten presenterades i hans doktorsavhandling (Hedenblad 1993a). Därefter genomförde han studier av uttorkning av varierande betongkvaliteter, alltifrån snabbtorkande betong med lågt vct och silikastoft till vanlig ”husbyggnadsbetong” (Hedenblad 1994). Han utvecklade också ett teoretiskt beräkningsprogram för uttorkning av betong. Detta verifierades med hjälp av de ovannämnda uttorkningsförsöken (Hedenblad 1996a). Beräkningsprogrammet utvecklades av Hedenblad tillsammans med *Jesper Arfvidsson* till ett praktiskt användbart datorprogram, TorkaS (Hedenblad & Arfvidsson 1998). Detta är ett beräkningsverktyg som används för att förutse uttorkningstider för nygjuten betong, och för att välja lämplig betongkvalitet. Programmet har fått stor spridning inom byggbranschen.

Bertil Persson gjorde omfattande jämförelser mellan normal betong och högpresterande betong, med avseende på självuttorkning. Dessa resultat finns redovisade i hans licentiatavhandling (Persson 1992). Under åren därefter har Persson gjort omfattande fält- och labundersökningar av uttorkning av olika typer av betong belagda med olika golvmaterial. Även emissioner från belagda golvkonstruktioner har undersökts (Persson 2000, 2003).

Forskning om uttorkning, delvis inom det nationella forskningsprogrammet ”högpresterande betong”, har även utförts utanför LTH. *Kristina Norling Mjörnell* vid Chalmers beskrev den högpresterande betongens fuktegenskaper som funktion av åldern i sin doktorsavhandling (Norling-Mjörnell 1997). Emissioner och uttorkning från belagda betonggolv studerades av *Helen Wengholt-Johnsson* vid Chalmers (Wengholt Johnsson 1995). I Luleå studerade *Hans Hedlund* fukttillstånd hos högpresterande betong vid tidig ålder (Hedlund 1996).

Kunskap som kommit fram genom all denna forskning, och då framförallt forskningen om den högvärdiga betongens uttorkning, har fått mycket stor betydelse i dagens byggande, där det ställs krav på snabb uttorkning.

1.7 Bakgrund och syfte

1.7.1 Bakgrund

Trots all tidigare forskning ansågs det vid projektets start att det kvarstod vissa oklarheter som gjorde att förutsägelser om betongens uttorkning var osäkra:

- Datorprogrammet TorkaS var inte generellt tillämpbart på alla tänkbara cementtyper. Det var begränsat till Standard Portlandcement. Ett nytt cement, Byggcement, var på väg att introduceras. Det var därför viktigt att få en jämförelse med det tidigare cementet.
- Självuttorkningseffekten är inte med säkerhet behandlad på ett helt tillfredsställande sätt i programmet TorkaS. Det finns tecken som tyder på att programmet underskattar självuttorkningseffekten hos betong med lågt vct. Beräknade uttorkningstider är möjligen alltför långa för sådan betong. Därför fanns det behov av att än en gång undersöka självuttorkningen experimentellt med en metod som gav en direkt jämförelse mellan olika vct och cementtyper.
- I nästan alla tidigare uttorkningsförsök har betongen skyddats från fukt efter det att den gjutits. Oftast har den skyddats mot uttorkning utåt under de första dygnet men den har inte exponerats för vatten omedelbart efter gjutning. I verkligheten förekommer det ofta att nygjuten betong utsätts för regn. Det ansågs vara viktigt att undersöka hur varaktigheten av regn påverkar uttorkningsförloppet hos betong av olika kvalitet.
- Hög betongkvalitet ger snabb uttorkning av en ny betongkonstruktion. Däremot är det inte säkert att en hårdnad högvärdig betong klarar en fuktskada lika bra som en normal betong. Den stora tätheten gör nämligen att vatten torkar långsammare. Å andra sidan kanske den högvärdiga betongen tar upp en mindre mängd vatten. Nettoeffekten är oklar. Det ansågs vara viktigt att undersöka hur olika betongtyper torkar efter ett vattenläckage.
- I dag är det vanligt att betongen beläggs med en cementbaserad avjämningsmassa någon vecka innan golvläggning sker. Vatten från avjämningsmassan kan sugas in i den delvis uttorkade betongen varvid fuktnivån möjligen blir alltför hög. Samtidigt kan det tänkas att avjämningsmassan försvårar den fortsatta uttorkningen. Därför ansågs det vara viktigt att undersöka hur avjämningsmassa påverkar uttorkningstiden hos betong med olika kvalitet.
- Ofta används prefabricerade håldäckselement i kombination med massiva bjälklag. Dessa två bjälklagstyper är inte tillverkade på samma sätt och hanteringen av bjälklagen kan också variera. Uttorkningen behövde därför jämföras för att få reda på i vilken bjälklagstyp fuktmätning bör utföras hur hanteringen påverkar uttorkningen.
- Byggherren ställer ofta strikta krav på uttorkning av betong. Entreprenören kan ha svårigheter att uppfylla dessa krav. Hans alternativ är inte så många; han kan värma betongen på olika sätt och därmed forcera uttorkningen, eller han kan välja betong som torkar mycket snabbt. Effekten av olika torkmetoder och praktiska frågor i samband med dessa var dåligt utredda under verkliga fältförhållanden. Därför ansågs det vara viktigt att genomföra en större fältstudie av torkmetoder.

1.7.2 Syfte

Syftet med detta forskningsarbete har varit att öka kunskapen om de frågeställningar som beskrivs i föregående avsnitt, d.v.s.:

1. Klargöra uttorkningsegenskaper hos det nyintroducerade Byggcementet för att därmed göra det möjligt att förhandsberäkna uttorkning vid användning av detta cement. Kapitel 3.
2. Klargöra hur självuttorkning påverkas av cementtyp, mängd silikastoft och vattencementtal. Kapitel 4.
3. Undersöka hur regnbelastning under byggtiden påverkar uttorkningstiden hos betong av olika kvalitet. Kapitel 5.
4. Undersöka hur lång tid det tar att torka hårdnad betong som utsatts för vattenläckage. Kapitel 6.
5. Undersöka hur en avjämning med cementbaserad avjämningsmassa påverkar det fortsatta uttorkningsförloppet. Kapitel 7.
6. Undersöka uttorkningsförloppet hos prefabricerade håldäckselement som fuktbelastats på olika sätt före och efter montage. Kapitel 8.
7. Genom en fältundersökning studera effektiviteten hos olika metoder att snabba på uttorkning. Kapitel 9.

Arbetet skall ses som ett komplement till tidigare forskning inom området. Resultaten som framkommit skall vara tillämpbara i byggbranschen och underlätta vid valet av betongkvalitet och andra uttorkningsåtgärder. Resultaten bör kunna användas vid en eventuell kommande revidering av datorprogrammet TorkaS.

2. Betongs fuktegenskaper

2.1 Allmänt

Vid nyproduktion av lokaler och bostäder är uttorkningskravet ofta dimensionerande vid valet av betongkvalitet till stomsystemet. Tidplanen avgör hur lång uttorkningstid som är tillgänglig och valet av golvmaterial avgör hur torr betongen måste vara vid golvläggningen.

Betongs uttorkningshastighet och uttorkningstid påverkas av många faktorer. Nedan följer en lista på faktorer som har stor inverkan.

- Vattencementtal / vattenbindemedelstal, vct / vbt
- Cementtyp
- Tillsats av mineraliska tillsatsmaterial (silikastoft, flygaska, slagg.)
- Temperatur hos betong och omgivning
- Relativ fuktighet hos omgivning
- Härdningsmetod
- Nederbörd
- Konstruktionstyp

Den egenskap som har störst inverkan är vct / vbt som påverkar porstrukturen hos betongen. I avsnitt 2.2 beskrivs betongens porstrukturutveckling.

Uttorkning av betong beskrivs ofta genom mätning av den relativa fuktigheten i materialet. RF-förändringen som sker beror på två olika principer. RF-sänkning till följd av inre självuttorkning, se avsnitt 2.5, samt RF-ändring till följd av fukttransport utåt, se avsnitt 2.6. Uttorkningen sker som en kombination av dessa båda uttorkningsförlopp.

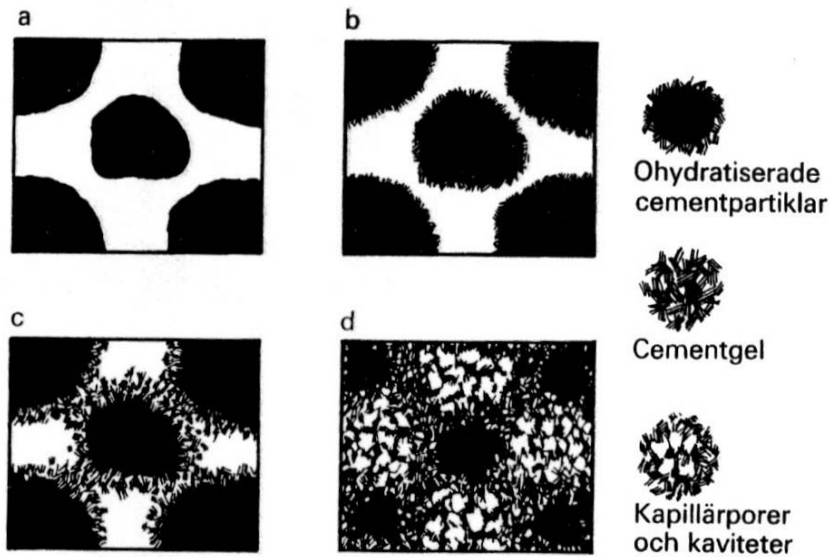
Betong utsätts för olika typer av vattenbelastning. Regn förekommer under produktionsskedet och vattenskador är relativt vanliga under en byggnads bruksskede. Vatteninsugning beskrivs i avsnitt 2.7.

I avsnitt 2.8 beskrivs betongtemperaturens inverkan på uttorkningen.

Porvattnet i betongen har hög alkalitet pH 12-14. Detta påverkar RF i betongen vilket beskrivs i avsnitt 2.9.

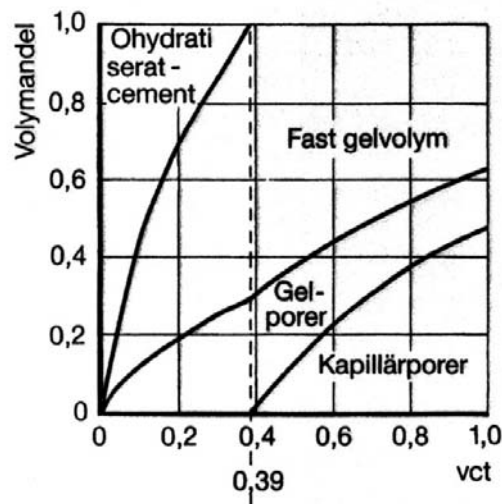
2.2 Cementhydratation och strukturutveckling

När vattnet tillsätts i betongblandaren startar omedelbart en reaktion mellan cement och vatten varvid reaktionsprodukter bildas. De viktigaste reaktionsprodukterna kallas cementgel eftersom de består av en extremt finkornig porös massa, en s.k. ”fast gel”. Dessutom bildas en stor mängd kalciumhydroxid. Reaktionen sker först på cementkornens yta. Därefter ökar cementgelskiktet i tjocklek allteftersom reaktionsprocessen fortskrider. Figur 2.1 visar schematiskt hur cementgelen utvecklas. Reaktionshastigheten avtar efter hand då gelen blir tätare och vattnet får svårare att nå den ohydratiserade cementen.



Figur 2.1 Strukturutveckling hos cementpasta enligt Powers modell. (Fagerlund 1997a)

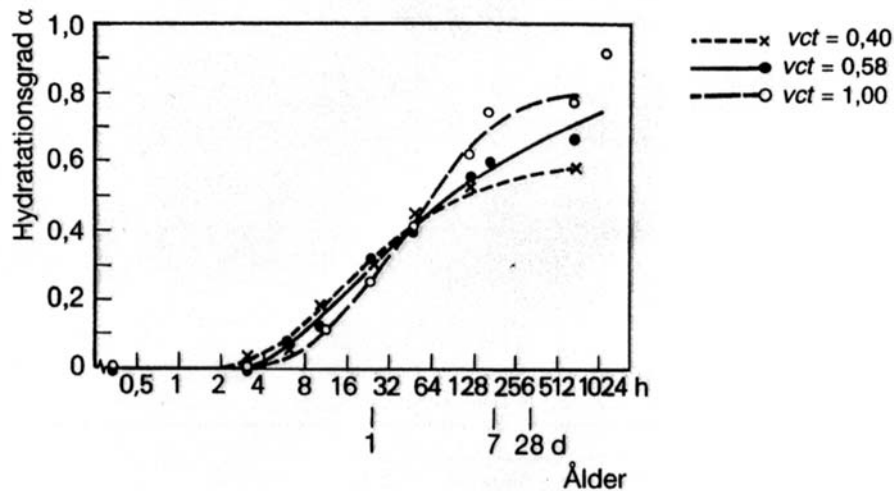
Cementgelens porositet är 28 %. Den utgörs av fina partiklar åtskiljda av fina gelporer. Normalt räcker inte volymen cementgel till för att fylla allt utrymme mellan cementkornen. Därför bildas ett grövre porsystem bestående av sk kapillärporer. Detta kapillärporsystem blir mindre i volym och tätare ju längre hydrattionen fortskrider. Teoretiskt sett kan all cement hydratiseras då $v_{ct} > 0,39$. Exakt vid $v_{ct} 0,39$, och när all cement reagerat, består cementpastan av enbart cementgel och kapillärporositeten är noll, se figur 2.2.



Figur 2.2 Fördelning av cementpastans volym på olika fasta faser och olika portyper vid maximalt möjlig hydrattion. (Fagerlund 1997a)

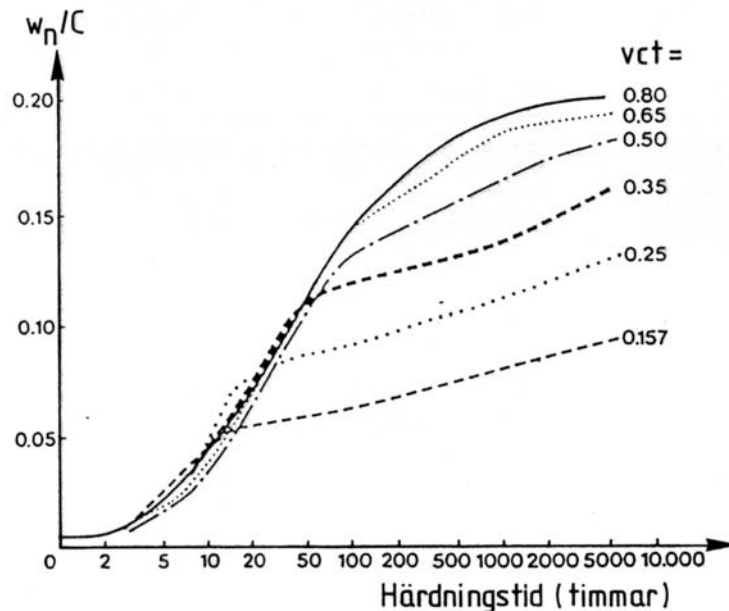
Då v_{ct} understiger 0,39 saknas utrymme för all cement att hydratiseras. Därför kommer sådan betong alltid att innehålla en viss mängd oreagerad cement. Vid $v_{ct} > 0,39$ kommer det alltid att finnas en viss mängd kapillärporer även när all cement reagerat. Kapillärporositeten ökar med ökande v_{ct} .

Begreppet hydratationsgrad (α) används för att beskriva hur stor andel av cementen som reagerat. Den är 0 för den färska betongen och maximalt 1 efter oändligt lång tid för betong som har $vct > 0,39$. Utvecklingen av hydratationsgraden bestäms av vct . I figur 2.3 visas hur hydratationsgraden hos en typ av svenskt portlandcement utvecklas vid olika vct (Byfors 1980). Lägre vct ger högre hydratationsgrad vid låg ålder men lägre hydratationsgrad vid hög ålder.



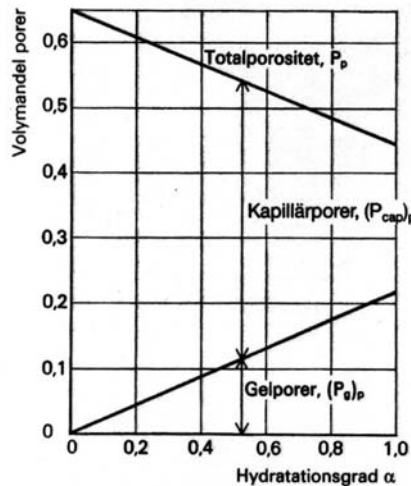
Figur 2.3 Hydratationsgradens tillväxt hos betong tillverkad med portlandcementet Skövde Std P. Inverkan av vct . Temperatur $+20^{\circ}\text{C}$. Vattenlagring. (Byfors 1980)

Som nämndes ovan stannar hydratationen av vid mycket låga vct . Exempel på detta visas i figur 2.4. Hydratationsgrad $\alpha = 4 \cdot w_n / C$.



Figur 2.4 Hydratationsgradsutveckling hos rena portlandcementpastor. (Taplin 1959)

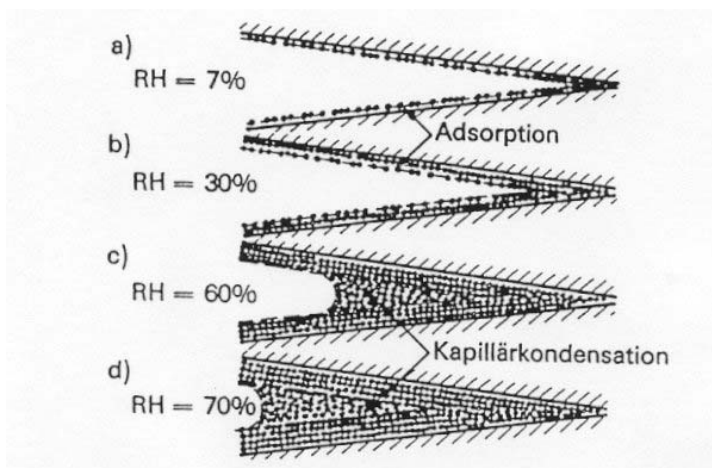
Figur 2.5 visar hur porositetsförhållandena påverkas av hydratationsgraden hos en cementpasta med vct 0,60. Den totala porositeten minskar, andelen gelporer ökar och andelen kapillärporer minskar med ökad hydratationsgrad. Porstorleken minskar dessutom med ökad hydratationsgrad, d.v.s. med ökad tid. Detta innebär att samtidigt som den totala porositeten minskar med tiden så förfinas det kvarvarande porsystemet. Cementpastan blir därför tätare med tiden.



Figur 2.5 Porositetsförhållanden hos en cementpasta med vct 0,60 vid olika hydratationsgrader. (Fagerlund 1997a)

2.3 Fuktfixering

Det vatten som inte binds kemiskt kommer att vara fysikaliskt bundet i betongens porsystem. Det fysikaliskt bundna vattnet kommer dels att vara adsorberat på porytorna och dels vara bundet i porsystemet på grund av kapillärkondensation, se figur 2.6. Ju högre RF desto större mängd vatten binds.



Figur 2.6 Adsorption och kapillärkondensation. (Ahlgren et al. 1976)

Hur hårt det fysikaliskt bundet vattnet är beror på porstorleken. Ju mindre porerna är desto hårdare bundet är vattnet, och vid desto lägre RF sker adsorption och kapillärkondensation.

Följande ekvation visar sambandet mellan porradie och den RF vid vilken kapillärkondensation sker. Ekvationen gäller vid +20°C och förutsätter cylinderformade porer. Ekvationen gäller enbart inom kapillärkondensationsområdet, d.v.s. ned till ca. 45 % RF.

$$\ln \Phi = - \frac{1,1 \cdot 10^{-9}}{r}$$

Φ = Relativ fuktighet

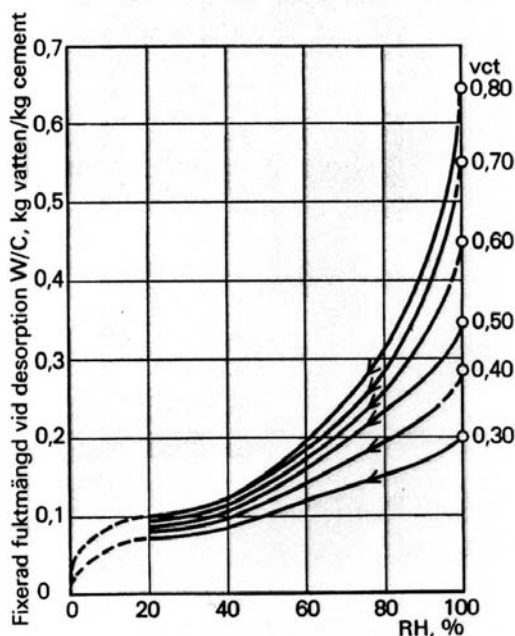
r = Porradien (m)

Några samhörande värden på porradie och RF ges i tabell 2.1

Tabell 2.1 Samband mellan porradie och RF

r (m)	r (Å)	Φ (%)
$1 \cdot 10^{-7}$	1000	99
$5 \cdot 10^{-8}$	500	98
$1 \cdot 10^{-8}$	100	90
$5 \cdot 10^{-9}$	50	80
$2 \cdot 10^{-9}$	20	58

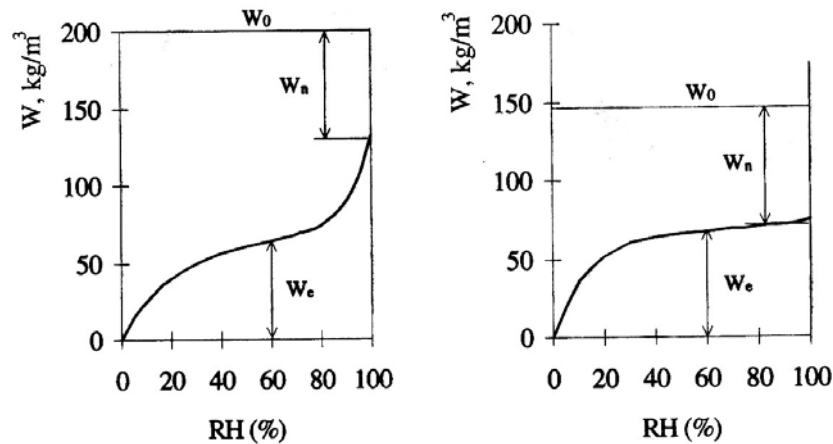
Porstorleksfördelningen avgör alltså hur mycket vatten som binds i betongen vid jämvikt med olika värden på RF. Sambandet mellan betongens fukttinnehåll och dess RF beskrivs av jämviktsisotermen. Eftersom porstorleksfördelningen är olika för olika vct, kommer olika jämviktsfuktkurvor att gälla för olika vct. I figur 2.7 visas jämviktsfuktkurvor för betong vid uttorkning av denna.



Figur 2.7 Desorptionsisotemer för betong. Kurvorna gäller för följande hydratationsgrader: 0,50 för vct 0,30; 0,60 för vct 0,40; 0,80 för vct 0,50-0,80. (Nilsson 1980)

Figur 2.7 gäller för betong som är någon månad gammal. När betongen är ung har kurvorna annan form. Fukthalten är högre vid höga RF men lägre vid låga RF. Jämviktsfuktkurvor vid olika hydratationsgrad har redovisats i (Norling-Mjörnell 1997).

Figur 2.8 visar principiellt hur jämviktsfuktkurvorna skiljer sig åt mellan en normal husbyggnadsbetong (vct 0,6-0,7) och en högpresterande betong (vct 0,3-0,4).



Figur 2.8 Principiella jämviktsfuktkurvor för normalbetong (vänster) och högpresterande betong (höger). W_e är mängden fysikaliskt bundet vatten, W_0 är mängden blandningsvatten, W_n är mängden kemiskt bundet vatten. (Nilsson et al 2000)

Jämviktsfuktkurvan är mycket flack i området 80-100 % RF hos betong med lågt vct. Normalbetongens kurva lutar betydligt mer inom detta RF-område. Detta innebär att en viss sänkning av vattenhalten ger mycket större RF-sänkning för betong med lågt vct.

2.4 Fuktkällor. Byggfukt

2.4.1 Fukt som tillförs vid betongtillverkning

Vid tillverkning av betong tillsätts vatten. Totala vattenhalten uppgår normalt till ca. 160-180 liter per kubikmeter betong. En viss mängd vatten behövs för att cementen skall kunna reagera och utveckla betongens egenskaper. Ytterligare vatten behövs för att betongen skall kunna komprimeras. Total vattenmängd bestäms av vattencementtalet och cementhalten.

Vatten i den färska betongen kommer från följande fuktkällor:

- Tillsatt blandningsvatten exklusive spädvatten
- Ballastfukt
- Vatten från tillsatsmedel
- Spädvatten som tillsätts i blandaren för att justera konsistensen

Ballast (grus och sten) utgör en stor del av betongmassan, ca. 60-70 % av volymen. Ballastmaterialen lagras normalt utomhus. Detta innebär att de utsätts för nederbörd och blir fuktiga. Vid tillverkning av betong måste ballastens fuktkvot bestämmas. Det är framförallt grusmaterialet som kan ha hög fuktkvot. Den fuktmängd som kommer via ballasten skall man ta hänsyn till vid uppvägningen av blandningsvattnet.

Exempel:

*Grusets fuktkvot är 4,0 %. Grushalten är 950 kg/m³
Stenens fuktkvot är 0,2 % Stenhalten är 800 kg/m³*

$$W_{ballast} = 950 \cdot 0,04 + 800 \cdot 0,002 = 39,6 \text{ liter}$$

De flytande tillsatsmedel som används vid betongtillverkning har ett visst vatteninnehåll. Tillsatsmedlets koncentration anges i form av torrhalt (%). Detta innebär att vatteninnehållet är 65 % om torrhalten är 35 %. Enligt betongstandard (SS EN 206-1 2001) skall vatteninnehållet tas med vid beräkningen av vct om tillsatsmedelsmängden överstiger 3 liter per kubikmeter betong.

Exempel:

*Tillsatsmedelshalt 1,5 % av cementvikten. Cementhalt 400 kg/m³
Torrhalt 35 %.*

$$W_{tillsatsmedel} = 0,015 \cdot 400 \cdot 0,65 = 3,9 \text{ liter}$$

Spädvatten kallas den vattenmängd som tillsätts under pågående blandning för att justera blandningens konsistens. Mängden spädvatten är ofta av storleksordningen 10 à 15 l/m³. Vid tillsats av blandningsvatten måste man ta hänsyn till mängden spädvatten för att betongen skall få rätt hållfasthet och vct.

Det uppvägda blandningsvattnet är det vatten som återstår att tillföra betongen då hänsyn tagits till de andra fuktkällorna.

$$W_{blandning} = W_{total} - W_{ballast} - W_{tillsatsmedel} - W_{späd}$$

En felaktig bedömning av fuktnivån i ballasten kan leda till stort fel i vct. Antag att cementhalten är 400 kg/m³ i en betong med avsett vct 0,40. Total vattenhalt skall då vara 160 liter/m³. Vid blandningen antar man att fukthalten i gruset (950 kg/m³) är 3,5 %. Verklig fukthalt i gruset är 5 %. Det innebär att den verkliga vattenhalten blir:

$$160 + 0,015 \cdot 950 = 174 \text{ liter/m}^3$$

Verkligt vct blir därför 0,44. Uttorkningstiden blir därför förlängd.

Om man dessutom försummar att ta hänsyn till vatten i tillsatsmedlet och använder mer spädvatten än vad som undanhållits från blandningsvattnet blir felet ändå större. Nya undersökningar (Nilsson & Olsson 2005) visar att hanteringen av spädvatten och ballastfukt kan ha negativ inverkan på den levererade fabriksbetongen.

2.4.2 Fuktkällor under byggskedet

Vattenhärdning

Nygjuten betong vattenhärdas för att betongen skall få hög hållfasthet och täthet och för att minska risken för plastiska krympsprickor. För att undvika att betongytans jämnhet och utseende försämrats bör vattnet tillföras i form av dimma (Möller 1997).

Nederbörd

En betongstomme kan utsättas för mycket nederbörd i form av regn och snö de första månaderna efter gjutning. Det är mycket ovanligt att betongen skyddas mot sådan nedfuktning. Under senare år har det förekommit att hela huskroppar tillverkats inuti plasttält. Det normala är dock att det dröjer ca. 2 månader innan betongstommen är helt väderskyddad och man har möjlighet att styra uttorkningsklimatet. Nederbörd medför att starten av uttorkning fördröjs.

Golvavjämning

Före golvläggning avjämnas många betonggolv med cementbaserad avjämningsmassa för att man skall erhålla en jämn yta att applicera golvmaterialet på. Avjämningsmassan som används är oftast lågalkalisk vilket anses minska risken för kemiska reaktioner med limmade golvmaterial (Alexandersson 2004). Avjämningsmassan innehåller vatten som kan öka betongens fuktnivå i överytan i samband med appliceringen.

Limfukt

Vattenbaserade limmer innehåller en viss mängd vatten. Vid limning på en betongyta är den tillförda vattenmängden ca. 0,07-0,10 kg vatten per kvadratmeter betongyta (Svenska Betongföreningen 1997). Fuktnivån i betongens överyta kan därför bli så hög att fuktproblem uppstår hos golvmaterialet.

2.4.3 Fuktkällor under en byggnads bruksskede

Vattenläckage

Fuktskador till följd av vattenläckage är vanligt förekommande och kostar årligen miljardbelopp att åtgärda. Läckande rör är den vanligaste orsaken. I många fall drabbas betongkonstruktionen. Ofta upptäcks inte läckaget förrän stor mängd vatten hunnit sugas in i betongen.

Byggnadstekniska fuktskador

På grund av byggnadstekniska brister eller slarv kan betong utsättas för icke önskvärd fukt. Ett exempel är att avsaknad av kapillärbrytande skikt under en bottenplatta av betong på mark, i kombination med att värmeisolering saknas eller har placerats på ovansidan av plattan, kan leda till att markfukt sugas in i betongen.

2.4.4 Byggfukt

För att betongen skall vara gjutbar krävs mer vatten än vad som förbrukas i cementreaktionen. Detta överskottsvatten tillsammans med tillfört vatten under byggandet kallas byggfukt och kan påverka material som befinner sig i kontakt med betongen. I Fukthandboken (Nevander & Elmarsson 1994) definieras byggfukt som den mängd vatten som måste avges för att materialet skall komma i fuktjämvikt med sin omgivning. Detta är den s.k. ”totala byggfukten”.

För betonggolv är det aldrig aktuellt att låta betongen komma helt i jämvikt med omgivande luft före golvläggning. Detta skulle vara alldeles för tidskrävande. Istället anges en kritisk RF som beror på det golvmaterial som skall appliceras på betongen, se avsnitt 1.4. Man kan då definiera en ”farlig byggfukt” som den fuktmängd som måste avgå från betongen för att denna skall komma ner till kritisk RF.

Den farliga byggfukten, W_B kan beräknas med följande formel:

$$W_B = W_0 + \Delta W - W_n - W_{\text{krit}} \quad (\text{kg/m}^3)$$

W_0 = Färska betongens vattenhalt

ΔW = Härdningsvatten och nederbörd

W_n = Kemiskt bundet vatten

W_{krit} = Jämviktsfukthalten vid kritisk RF

2.5 Självvuttorkning

Mängden kemiskt bundet vatten, W_n , kan beskrivas med följande formel enligt (Powers & Brownyard 1948).

$$W_n = 0,25 \cdot \alpha \cdot C \quad \text{kg/m}^3$$

α = hydratationsgrad kg/kg

C = cementmängd kg/m³.

Cementhalten vid betongtillverkning ökar med minskande vct. Vid vct 0,70 används ca. 260 kg cement per m³ och vid vct 0,40 ca. 440 kg/m³.

Enligt figur 2.3 gäller följande hydratationsgrader efter 1 månad. Hydratationsgraden vid vct 0,70 har bestämts genom interpolation.

- ca. 0,80 vid vct 1,00
- ca. 0,70 vid vct 0,70
- ca. 0,65 vid vct 0,58
- ca. 0,55 vid vct 0,40

Detta innebär att mängden kemiskt bundet vatten är relativt oberoende av vct vilket illustreras med följande räkneexempel baserat på hydratationsgrader och cementhalter enligt ovan. Effekten av lägre vct kompenseras av effekten av lägre hydratationsgrad.

$$vct\ 0,70: \quad W_n = 0,25 \cdot 0,70 \cdot 260 = 45,5 \text{ kg/m}^3$$

$$vct\ 0,58: \quad W_n = 0,25 \cdot 0,65 \cdot 320 = 52,0 \text{ kg/m}^3$$

$$vct\ 0,40: \quad W_n = 0,25 \cdot 0,55 \cdot 440 = 60,5 \text{ kg/m}^3$$

Då vattnet binds kemiskt minskar dess volym med ca. 25 %. Det innebär att cementreaktionen skapar ett luftfyllt porutrymme i en betong som är fuktisolerad från omgivningen (membranhärdad). Fenomenet kallas ”självuttorkning”.

De luftfyllda porer som skapas kallas ibland ”självuttorkningsporer”. De är dock inga särskilda porer utan utgör endast en del av det vanliga kapillärporsystemet.

Volymen självuttorkningsporer är:

$$V_s = 0,25 \cdot W_n = 0,25 \cdot 0,25 \cdot \alpha \cdot C = 0,0625 \cdot \alpha \cdot C \quad (\text{liter/m}^3)$$

Självuttorkningen är alltså direkt proportionell mot hydratationsgraden. Den ökar därför med ökande betongålder.

Följande värden gäller för exemplet ovan (ca. 1 månads ålder):

$$vct\ 0,70: \quad V_s = 0,25 \cdot 45,5 = 11,4 \text{ liter/m}^3$$

$$vct\ 0,58: \quad V_s = 0,25 \cdot 52,0 = 13,0 \text{ liter/m}^3$$

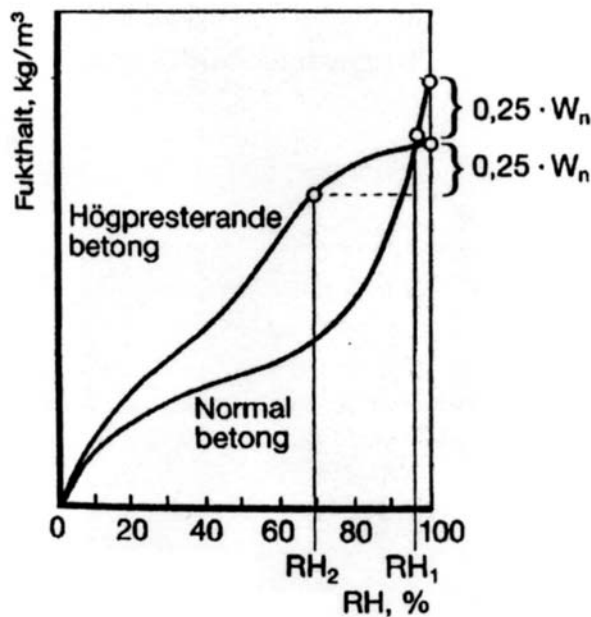
$$vct\ 0,40: \quad V_s = 0,25 \cdot 60,5 = 15,1 \text{ liter/m}^3$$

Storleken hos den tömda porvolymen är således ungefär densamma oavsett betongkvalitet.

Den gradvisa tömningen av porsystemet orsakad av självuttorkningen medför att fukthalten i betongen blir lägre än den som motsvarar fullständig vattenmättnad. Följaktligen minskar RF i betongen. Storleken på RF-sänkningen ges av jämviktsfuktkurvan.

Betong med lågt vct har en mera flack kurva än en betong med högt vct, se Figur 2.8. Följaktligen blir RF-sänkningen betydligt större hos betong med lågt vct trots att mängden självuttorkningsporer inte är större hos sådan betong.

Principen för RF-sänkning till följd av självuttorkning visas i figur 2.9 för en högpresterande betong och en normal betong.



Figur 2.9 RF-sänkning till följd av inre självuttorkning. (Fagerlund 1997b)

En självuttorkad betong har möjlighet att suga in en vattenvolym som motsvarar volymen självuttorkningsporer. Detta kan t.ex. ske vid långvarig fukthärdning eller vid nederbörd. Maximal total mängd insuget vatten första månaden begränsas enligt beräkningen ovan till ca. 11 å 15 liter/m³.

Vid tillsats av silikastoft förändras jämviktsfuktkurvans utseende. Detta behandlas i (Helsing-Atlassi & Kjellsen 2000).

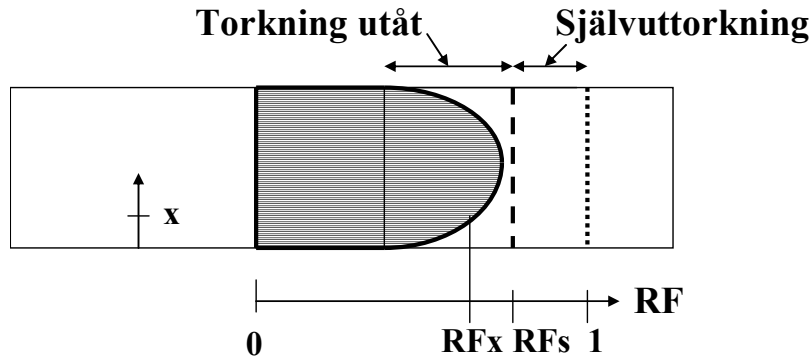
2.6 Fuktransport i betong och torkning utåt

2.6.1 Allmänt

Självuttorkning beror på hydratation. Eftersom denna sker ungefär lika snabbt i alla delar av tvärsnittet kommer även RF-sänkningen att bli ungefär lika hög över hela tvärsnittet, se RF-nivå RFs i figur 2.10.

Enbart självuttorkning kan ge tillräckligt låga RF-nivåer hos betong med lågt vct vilket visas i kapitel 4. Självuttorkningen sker snabbt eftersom cementreaktionen normalt är snabb. Figur 2.3 visar att 50 % hydratationsgrad kan uppnås redan inom 1 vecka.

Torkning sker även utåt mot omgivande luft. Förutom av yttre klimat och betongens temperatur bestäms torkhastigheten av betongens fuktransportegenskaper. Uttorkningen utåt leder till att en ojämn fuktprofil uppstår över tvärsnittet, se RF-nivå RFx i figur 2.10.



Figur 2.10 Fuktprofiler förorsakade av självtorkning (RFs) och kombination av självtorkning och torkning utåt (RFx).

Hos betong med högt vct är självtorkningen nästan försumbar och så gott som all uttorkning måste ske utåt. Eftersom uttorkning utåt bestäms av hur fort fukt kan vandra i betongen kan det ta lång tid innan betongen torkat så mycket att det kritiska RF-värdet underskrids.

2.6.2 Fukttransport i betong

Fukttransport i betong sker i huvudsak i ång- och vätskefas. Den totala fukttransporten utgörs av en kombination av dessa båda transporttyper. Diffusion dominerar vid låga RF och vätsketransport vid höga. Den totala fukttransporten, q , kan beskrivas med följande formel.

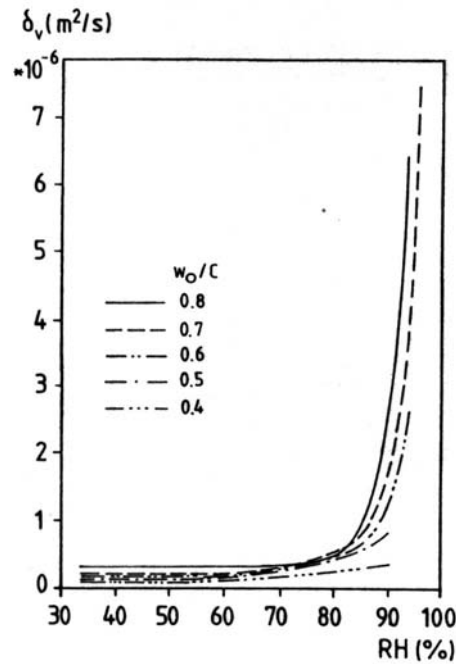
$$q = -\delta \cdot \frac{dv}{dx} \quad \text{kg/(m}^2\text{s)}$$

δ = fukttransportkoefficienten m^2/s
 dv/dx = ånghaltsgradienten $\text{kg/m}^3/\text{m}$

Fukttransportkoefficienten är en materialparameter som beror på betongens vct och hydratationsgrad. Ju lägre vct och ju högre hydratationsgrad desto tätare är betongen, och desto lägre är fukttransportkoefficienten. Denna beror också på RF i betongen. Vid höga RF (> 80 %) dominerar vätsketransport och därmed ökar fukttransportkoefficienten kraftigt när RF överstiger ca. 80 %.

Figur 2.11 visar fukttransportdata för betong med hög hydratationsgrad (Hedenblad 1993a). Av figuren framgår att vct spelar stor roll för fukttransporten inom RF-området över 80 % vilket är det mest intressanta området ur uttorkningssynpunkt. Vid lägre RF-nivåer är fukttransportkoefficienten mindre beroende av vct.

Tillsats av silikastoft torde minska fukttransportkoefficienten vid bibehållet vbt, d.v.s. uttorkningen utåt fördröjs.



Figur 2.11 Fukttansportkoefficienten för betong vid varierande vct. (Hedenblad 1993a)

För att man skall kunna göra beräkningar av uttorkning måste man också känna till hur fukttansportkoefficienten förändras med ökad hydratationsgrad. Uttorkning startar nämligen i de flesta fallen när betongen är ung. Att göra direkta mätningar för att bestämma hur fukttansportkoefficienten ändras med åldern är mycket svårt. I datorprogrammet TorkaS görs beräkningar av uttorkning ända från första dagen efter gjutning. För att kunna göra detta används fukttansportkoefficienter som beräknats teoretiskt från en modell över betongens strukturutveckling.

2.7 Vatteninsugning i betong

Betong utsätts ofta för fritt vatten som kan sugas in och därmed påverka uttorkningen. Vattenhärdning, regn och vattenläckage är vanligt förekommande.

Betongens förmåga att suga vatten kan beskrivas genom motståndstalet, m (s/m^2). Motståndstalet anger hastigheten med vilken vattenfronten tränger in. Det är beroende av betongens porstruktur men inte av dess totala porositet. Det är dessutom tämligen oberoende av fukttillståndet när insugningen startar.

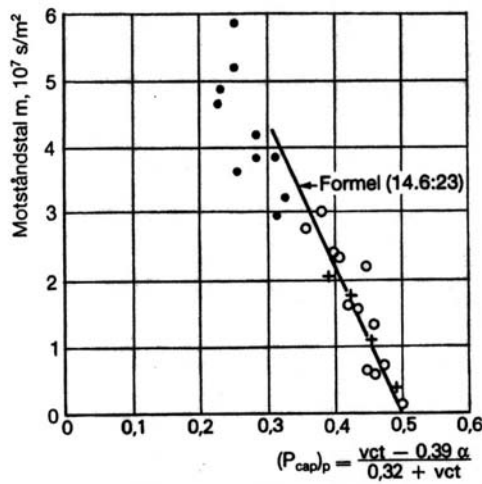
Motståndstalet definieras av:

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (s/m^2)$$

t = tiden från start av vattensugningen (s)

z = vattenfrontens djup från exponerad yta (m)

Ju finare porsystem desto långsammare vandrar fuktfronten in och desto högre blir motståndstalet. Figur 2.12 visar motståndstalet m för cementbruk som funktion av den kapillära porositeten. Före provningen hade provkropparna konditionerats vid 50 % RF.



Figur 2.12 Motståndstal hos cementbruk. (Fagerlund 1982)

Den insugna vattenmängden kan beskrivas med kapillaritetstalet, k ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$). Kapillaritetstalet bestäms av porstrukturen, totala porositeten samt fuktillståndet då vatteninsugningen startar. Det definieras av:

$$k = \frac{W}{\sqrt{t}} = \frac{1000 \cdot P_k}{\sqrt{m}} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}))$$

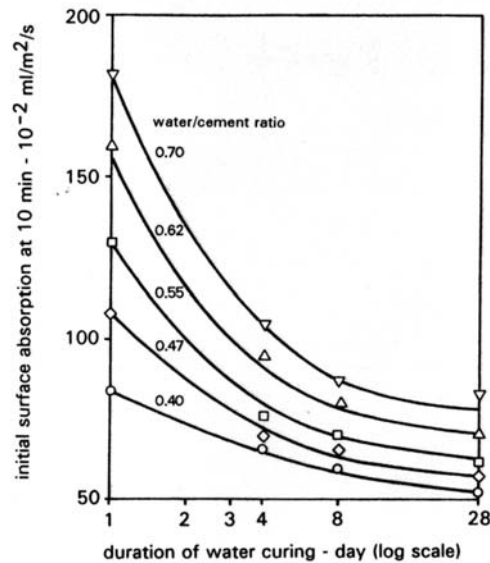
W = uppsugen vattenmängd (kg/m^2)

1000 = vattnets densitet (kg/m^3)

P_k = den porvolym som helt fyllts med vatten från det att sugningen startade (m^3/m^3)

Genom användning av koefficienterna m och k och med kännedom om porvolymen P_k kan man beräkna vattenabsorption i betong med olika vct och hydratationsgrader.

Ofta är man mest intresserad av absorptionen i de yttersta millimetrarna av betongytan. Detta gäller t. ex. när man tillför fukt vid limning eller avjämnning. Figur 2.13 visar mätningar av en sådan snabb ytabsorption hos betong med varierande vct och varierande vattenlagring före försöket. Betongen ålder vid provningen var 28 dygn. Figuren visar insugen vattenmängd per kvadratmeter och sekund, 10 minuter efter det att provkropparna vattenbelastades. Resultaten visar tydligt betydelsen av vct och initieellt fuktillstånd.



Figur 2.13 Initiell vattenabsorption vid varierande vct och vattenlagring. (Dühr et al. 1987)

2.8 Inverkan av betongtemperatur på uttorkning

Betongtemperaturen har stor inverkan på uttorkningshastigheten. Hög temperatur är generellt positivt. Cementhydratationens hastighet ökar med ökande temperatur. En snabb hydratationsgradsutveckling leder därför till snabb RF-sänkning på grund av självuttorkning, framförallt för betong med vct < 0,40.

Den drivande potentialen för fukttransport via diffusion är skillnaden i ånghalt mellan betong och omgivande luft. Höjs temperaturen i betongen höjs också ånghalten i betongen vilket gör att uttorkningshastigheten ökar.

2.9 Inverkan av vattenlöslig alkali på RF hos vattenmättad betong

Den relativa fuktighet som uppmäts i betong, som har en viss konstant fukthalt, påverkas av porvattnets alkalitet (Hedenblad & Janz 1994). Alkaliteten, d.v.s. koncentrationen av OH⁻ joner, bestäms främst av mängden kaliumhydroxid (KOH) och natriumhydroxid (NaOH) som finns löst i porvatskan. Om två betonger innehåller samma mängd fukt i kg/m³ så erhålls lägst uppmätt RF i den betong som har högst alkaliinnehåll.

Betongens innehåll av vattenlöslig alkali bestäms av cementtyp, cementshalt och eventuell användning av mineraliska tillsatsmaterial. Anläggningscement har lägre vattenlöslig alkaliinnehåll än Byggcement och SH-cement. De båda sistnämnda cementen har ungefär samma alkaliinnehåll eftersom de tillverkas av samma klinker.

Ju lägre vct betongen har, desto högre blir porvattnets alkalitet förutsatt att samma cementtyp används. Detta beror på att mängden cement ökar medan mängden porvatten är oförändrat eller något lägre. Därmed ökar alkalikoncentrationen.

Inblandning av silikastoft innebär däremot att porvattnets alkalitet sjunker eftersom SiO₂ i silikastoftet mycket snabbt reagerar kemiskt med OH⁻ joner från cementet.

RF-sänkningen till följd av alkali kan beräknas med Raoult's lag som kan skrivas på följande sätt när det gäller RF hos en vattenlösning:

$$RF_{\text{lösning}} = 100 \cdot (1-v) \quad (\%)$$

$RF_{\text{lösning}}$: porlösningens RF
 100 : RF (%) för det rena lösningsmedlet (vatten)
 v : molandel lösta joner i porlösningen

Molandelen lösta joner beräknas utifrån cementets vattenlösliga alkalihalt. Denna uttrycks normalt som löslig $(Na_2O)_{\text{ekv}}$ och anges i viktprocent. Följande exempel visar en beräkning av RF-sänkningen hos vattenmättad betong.

Exempel:

Byggcement: Vattenlöslig $(Na_2O)_{\text{ekv}} = 0,7 \%$; Molmassa: $Na = 23 \text{ g/mol}$, $O = 16 \text{ g/mol}$, $H = 1 \text{ g/mol}$.

I verkligheten innehåller cementet såväl K_2O som Na_2O vilka i vattenlösning övergår till $NaOH$ resp. KOH . Genom att använda begreppet $(Na_2O)_{\text{ekv}}$ har alla OH joner som är kopplade till kaliumjoner i stället kopplats till fiktiva natriumjoner.

$$\text{Mängden } Na = \frac{2 \cdot 23}{(2 \cdot 23 + 16)} \cdot 0,7 = 0,52\%$$

$$\text{Antal mol } Na = \frac{0,0052 \cdot 1000 \cdot C}{23} = 0,23 \cdot C \quad \text{där } C \text{ är cementvikten i } \text{kg/m}^3$$

I porlösningen finns både lösta Na^+ och OH^- joner. Detta innebär att det totala antalet mol i lösningen är

$$\text{Antal mol } (Na + OH) = 2 \cdot 0,23 \cdot C = 0,46 \cdot C$$

Antal mol vatten vid vattenmättnad bestäms av betongens porositet $-C \cdot (vct - 0,19 \cdot \alpha)$ - och vattens molmassa.

$$\text{Antal mol } H_2O = \frac{1000 \cdot C \cdot (vct - 0,19 \cdot \alpha)}{(16 + 2 \cdot 1)} = 55,6 \cdot C \cdot (vct - 0,19 \cdot \alpha) \quad \alpha \text{ är hydratationsgraden}$$

Molandelen joner i porlösningen kan nu beräknas

$$v = \frac{0,46}{(55,6 \cdot (vct - 0,19 \cdot \alpha) + 0,46)}$$

Om $vct = 0,40$ och hydratationsgraden antas vara $0,50$ blir $v = 0,026$

Porlösningens RF blir då

$$RF_{\text{lösning}} = 100 \cdot (1 - 0,026) = 97,4\%$$

RF minskar med 2,6 % på grund av betongens alkalitet. Värdet gäller helt vattenmättad betong. Om betongen inte är helt vattenmättad ökar effekten av alkali något eftersom mängden porvatten därvid minskar. Följaktligen ökar molandelen OH^- joner i kvarvarande porvatten.

En beräkning av RF hos vattenmättad betong med olika vct och tillverkad av olika cementtyper redovisas i kapitel 4, tabell 4.4.

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong.

3.1 Bakgrund

Hösten år 1999 introducerades ett nytt svensktillverkat cement på den svenska marknaden. Det nya cementet fick namnet Byggcement och ersatte det befintliga Std P-cementet. Till skillnad från Std P-cementet innehåller Byggcementet ca. 12 % inmalt kalkstensfiller räknat på de så kallade huvudbeståndsdelarna, vilka utgörs av alla komponenter i cementet förutom gips och andra tillsatser. I Std P-cementet var mängden kalkstensfiller ca. 5 %.

Det nya cementet klassas enligt cementstandard (SS-EN 197-1 2001) som ett CEM II/A-LL cement och går under det officiella namnet Portland-kalkstencement. Std P-cementet klassas som CEM I cement med det officiella namnet Portlandcement. Det kan nämnas att man enligt cementstandarden i ett CEM II/A-LL cement får ha upp till 20 % kalkstensfiller. I Sverige har man dock valt den lägre halten 12 %.

Skälen till bytet av cementtyp var flera. Det starkaste skälet var att Byggcementet har miljömässiga fördelar eftersom koldioxidutsläppen minskar i samband med cementtillverkningen. Tekniskt sett skulle cementen vara likvärdiga för att bytet inte skulle orsaka produktionsstörningar hos betongleverantörerna.

Uttorkning av nygjuten betong har blivit ett mycket viktigt och uppmärksammat område i samband med husproduktion. Korta byggtider ställer höga krav på snabb uttorkning av betongen. Det var därför av största vikt att Byggcementet inte försämrade betongens uttorkningsegenskaper jämfört med Std P-cementet.

3.2 Syfte

Syftet med denna studie var att jämföra Byggcement och Std P-cement, med avseende på uttorkning av betong.

3.3 Försöksuppläggning

I denna studie jämfördes uttorkningen för 6 olika betongkvaliteter baserade på Byggcement respektive Std P-cement. De undersökta vattencementtalen var 0,37; 0,40; 0,42; 0,45; 0,47 samt 0,50. En provkropp tillverkades för varje vct och cementtyp, vilket totalt gav 12 provkroppar.

Efter gjutning vattenlagrades provkropparna i två veckor för att därefter membranhärda ytterligare två veckor. Membranhärdning innebär att provkropparna förvaras inneslutna i plast. Efter detta torkade provkropparna dubbelsidigt i klimatet 20°C och 35 % RF. Temperaturen vid vattenlagring och membranhärdning var 20°C.

Provkropparnas uttorkning registreras med kvarsittande RF-givare av typen Humi-Guard. Dessa var placerade på sex olika mätdjup i varje provkropp.

3.4 Betongtillverkning

3.4.1 Delmaterial

Cement

Båda de studerade cementtyperna var producerade vid cementfabriken i Slite. Enligt cementstandarden EN 196-1 (2001) betecknas Slite Byggcement CEM II/A-LL 42,5R och Slite Standard Portlandcement CEM I 42,5R. Kombinationen 42,5R avser cementets hållfasthetsklass.

Den stora skillnaden mellan cementen är som nämnts att Byggcement innehåller en större andel kalksten som tillsätts i samband med malningen av klinker till cement. Byggcementet har således en mindre mängd reaktiv klinker. Detta kompenseras dock genom att Byggcementet mals till en högre specifik yta. Dessutom är klinkerns kemiska sammansättning något annorlunda. I tabell 3.1 redovisas riktvärden enligt Cementas produktinformation för de båda cementtyperna.

Tabell 3.1 Riktvärden för Slite Byggcement och Slite Standardcement

	CEM II A-LL 42,5 R	CEM I 42,5 R
Specifik yta	470 m ² /kg	360 m ² /kg
Bindetid	150 min	150 min
Lösningsvärme 7 dygn	320 kJ/kg	340 kJ/kg
Kalkstenshalt	ca. 12 %	ca. 5 %
Klinkersammansättning:		
C ₂ S	14,5 %	11,0 %
C ₃ S	58,3 %	61,2 %
C ₃ A	5,7 %	6,4 %
C ₄ AF	9,2 %	7,8 %

Ballast

Ballasten som användes, levererades av Sydsten, och är den ballast som används som standard vid betonggjutningar vid avd. Byggnadsmaterial vid LTH.

Grus, Åstorp	0- 8 mm
Krossad Kvartsit, Hardeberga	8-12 mm, 12-16 mm

Tillsatsmedel

För att erhålla gjutbar betong användes Cementa Flyttillsats V33 som består av 33 % torrsustans och 67 % vatten. V33 är ett vattenreducerande tillsatsmedel och är baserat på sulfonerad melaminpolykondensat.

Vatten

Normaltempererat kranvatten användes till gjutningarna.

3.4.2 Betongrecept

Betongrecepten som användes i denna studie varierar vct mellan 0,37 - 0,50. Totalt undersöktes 6 olika vct. Recepten konstruerades genom att behålla vattenhalten konstant (190 liter/m³) och variera cementhalten. Ballastfördelningen utgjordes av 50 % grus, 25 % sten 8-12 mm samt 25 % sten 12-16 mm. Fullständiga betongrecept redovisas i tabell 3.2. Vattencementtalen är inte justerade med avseende på flyttillsatsens vatteninnehåll. Den fukt som fanns i gruset ingår i redovisad mängd blandningsvatten.

Tabell 3.2 Betongrecept angivet i kg/m³

	vct 0,37	vct 0,40	vct 0,42	vct 0,45	vct 0,47	vct 0,50
Cement	514	475	452	422	404	380
Vatten	190	190	190	190	190	190
Grus 0-8	827	844	854	866	874	897,5
Sten 8-12	414	422	427	433	437	449
Sten 12-16	413	422	427	433	437	448
Flyttillsats V33	1,1 %	1,0 %	0,9 %	0,8 %	0,6 %	0,4 %

Tillsatt mängd flyttillsatsmedel anges i % av cementvikten.

3.4.3 Justerat vct med hänsyn till vattenhalt i tillsatsmedlet

Eftersom det använda tillsatsmedlet består av 67 % vatten så kan detta ha en viss inverkan på vct. Tabell 3.3 visar hur stor denna inverkan är.

Tabel 3.3 Justerat vct med hänsyn till vattenhalt i tillsatsmedlet

	vct 0,370	vct 0,400	vct 0,420	vct 0,450	vct 0,470	vct 0,500
Justerat vct	0,377	0,407	0,426	0,456	0,474	0,503

Tabellen visar att vattenhalten i flyttillsatsen har liten inverkan på betongens vct.

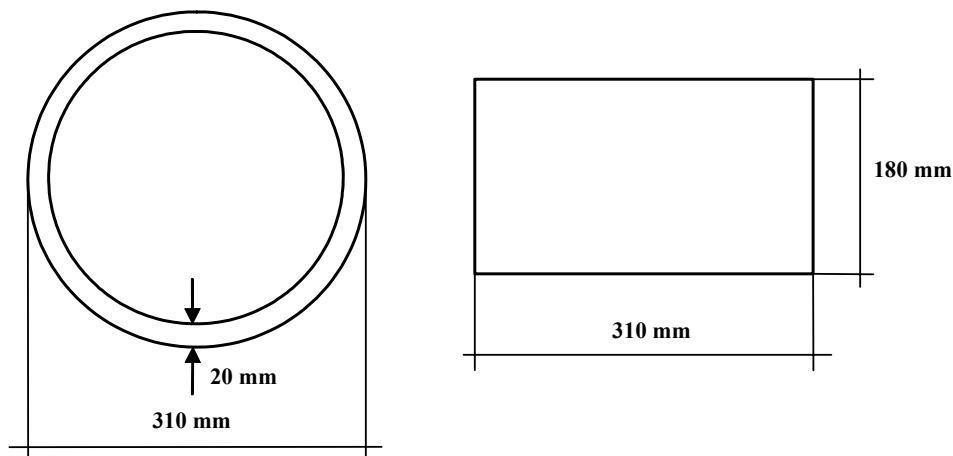
3.4.4 Blandningsmetod

30 liter betong tillverkades i en frifallsblandare. De torra delmaterialen blandades först i ca. 30 sekunder. Därefter tillsattes vatten och flyttillsats och blandningen fortsatte i ca. 3 minuter.

3.5 Tillverkning av provkroppar

3.5.1 Gjutformar

Den kvarsittande formen till provkropparna utgjordes av ett polypropenrör med 310 mm i diameter och en godstjocklek som var 20 mm. Höjden var 180 mm, se figur 3.1. Under gjutningen var formen placerad på en bottenplatta. Denna platta togs bort efter ca. 1 dygn då betongen härdat.



Figur 3.1 Gjutformens dimensioner.

I formen borrades hål genom rörväggen på de aktuella mätdjupen (20;36;65;90;144;160 mm), se figur 3.2. Hålen försköts i sidled för att inte RF-givarna skulle störa varandra. I hålen monterades mätrör av plast och i mätrören monterades bultar för att förhindra betong att tränga in i röret i samband med gjutningen. Då provkroppen var gjuten och härdad tog man bort bultarna ur rören varvid betongytor blev exponerade i det uppkomna hålet.

Kvarsittande RF-givare monterades ca. 1 månad efter gjuttillfället.



Figur 3.2 Kvarsittande form med monterade mätrör.

3.5.2 Gjutning

Vid varje gjuttillfälle tillverkades två betongsatser med samma vct. En blandning med Byggcement och en med Std P-cement.

Efter avslutad blandning mättes sättmått, densitet samt lufthalt på den färska betongmassan. I samband med gjutningen registrerades sättmått, lufthalt och densitet hos den färska betongen. Resultaten redovisas i tabell 3.4.

Tabell 3.4 Den färska betongens egenskaper

	vct 0,37		vct 0,40		vct 0,42	
	Bygg	Std P	Bygg	Std P	Bygg	Std P
Sättmått (mm)	65	75	85	90	120	110
Lufthalt (%)	2,3	1,9	1,7	1,6	1,4	1,6
Densitet (kg/m ³)	2380	2400	2420	2400	2410	2410

	vct 0,45		vct 0,47		vct 0,50	
	Bygg	Std P	Bygg	Std P	Bygg	Std P
Sättmått (mm)	80	100	70	80	70	70
Lufthalt (%)	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,3
Densitet (kg/m ³)	2400	2390	2390	2400	2370	2400

Skillnaden i konsistens mellan de båda cementtyperna är anmärkningsvärt liten.

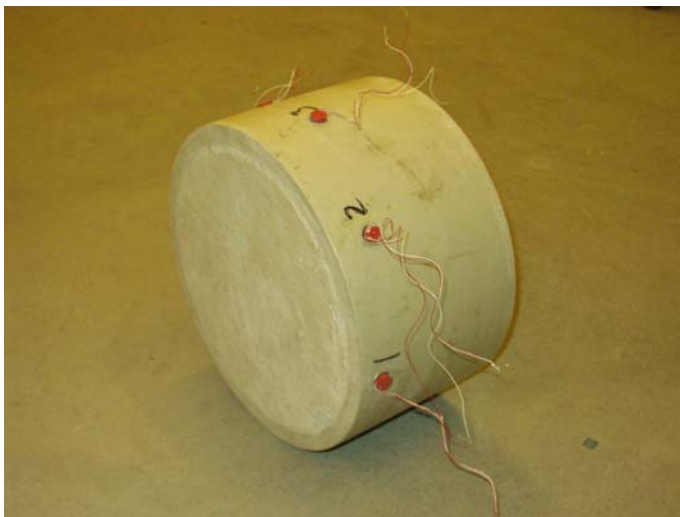
Därefter göts provkroppen som skulle användas i försöket. Betongen fylldes i formen i två lager som båda bordvibrerades. Provkroppens ovansida försågs med plast direkt efter gjutningen för att förhindra avdunstning och uttorkningskrypning. Undersidan utgjordes av den täta bottenplattan.

3.6 Lagring av provkroppar

Bottenplattan och plasten på ovansidan avlägsnades efter ca. 1 dygn då provkropparna härdat. Därefter vattenlagrares de i 2 veckor i 20°C. Vid vattenlagringen placerades provkropparnas botten i vattenbad medan överytan täcktes med vattenmättade Wettex-dukar och plastades in.

Efter avslutad vattenlagring avlägsnades vattenbad och Wettex-dukar och provkropparna plastades in och membranhärdades ytterligare 2 veckor vid samma temperatur. En månad efter gjutning togs plasten bort och de fick torka dubbelsidigt i klimatet 20°C och 35 % RF.

Under uttorkningen förvarades provkropparna liggande på sidan så att både överytan och underytan blev exponerade för omgivande luft. I figur 3.3 visas en provkropp med monterade RF-givare.



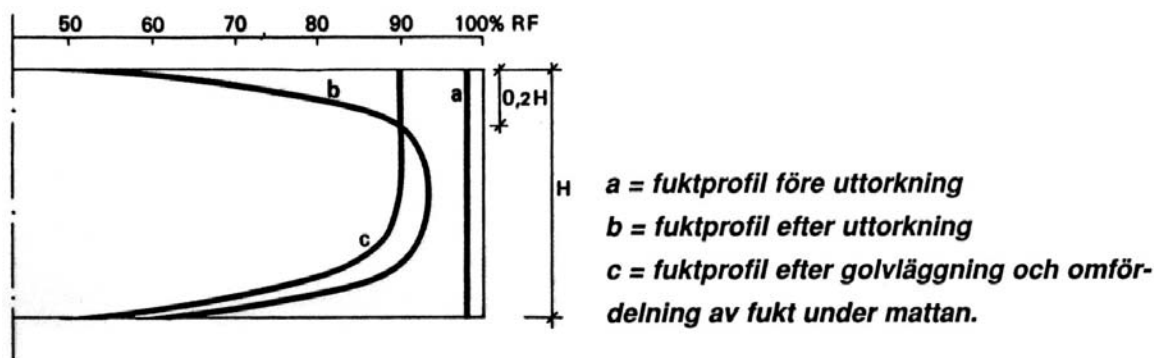
Figur 3.3 Provkropp med RF-givare monterade på olika mätdjup.

3.7 Fuktmätning

Kvarsittande RF-givare av märket Humi-Guard användes för att mäta den relativa fuktigheten. Givarna monterades ca. 1 månad efter gjutning. Givarens mätområde är begränsat till 75-95 % RF.

Alternativet hade varit att använda RF-givare av typ Vaisala. Det stora antalet mätningar som måste ske samtidigt gjorde detta praktiskt omöjligt eftersom tillgången på Vaisala-givare var begränsad.

RF mättes på 6 djup per provkropp, 20; 36; 65; 90; 144 samt 160 mm från provkroppens yta. 36 mm och 144 mm motsvarade det ekvivalenta mätdjupet från vardera sidan. Med ekvivalent mätdjup avses det djup från ytan på vilket RF är lika högt som den RF som efter lång tid skulle uppnås i överytan av betongen om denna direkt efter mätningen av RF på ekvivalent djup beläggs med en fullständigt tät beläggning. Begreppet ekvivalent djup åskådliggörs i figur 3.4.



Figur 3.4 Definition av ekvivalent mätdjup vid dubbelsidig uttorkning. (Hedenblad 1995)

För en tvåsidigt torkande platta anses ekvivalenta djupet vara ca. 20 % av plattjockleken. Mätdjupet 90 mm motsvarar halva betongtjockleken.

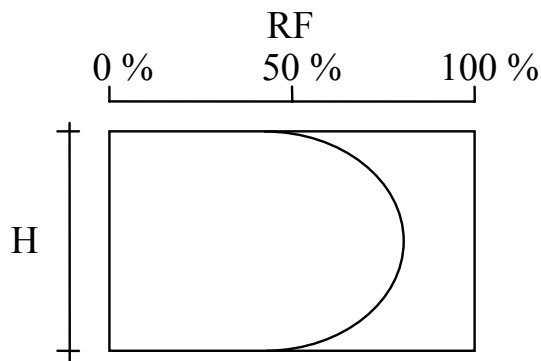
3.8 Resultat

Mätning av RF i provkropparna startades ca. 50 dygn efter gjutning. All avläsning skedde manuellt. De erhållna mätresultaten matades in i ett medföljande datorprogram för omräkning till RF vid 20°C. Det är dessa resultat som redovisas i detta kapitel.

Mätosäkerhet inkluderas inte i de redovisade resultaten. Den bedöms vara ca. ± 2 procentenheter i RF (RBK 2001).

3.8.1 Uttorkningsprofiler

Enligt teorin skall fuktprofilen vid dubbelsidig uttorkning principiellt se ut enligt figur 3.5, d.v.s. den skall vara symmetrisk kring mittsnittet. Ytorna har under hela uttorkningsförloppet samma RF som omgivande luft, d.v.s. i det aktuella försöket 35 %.

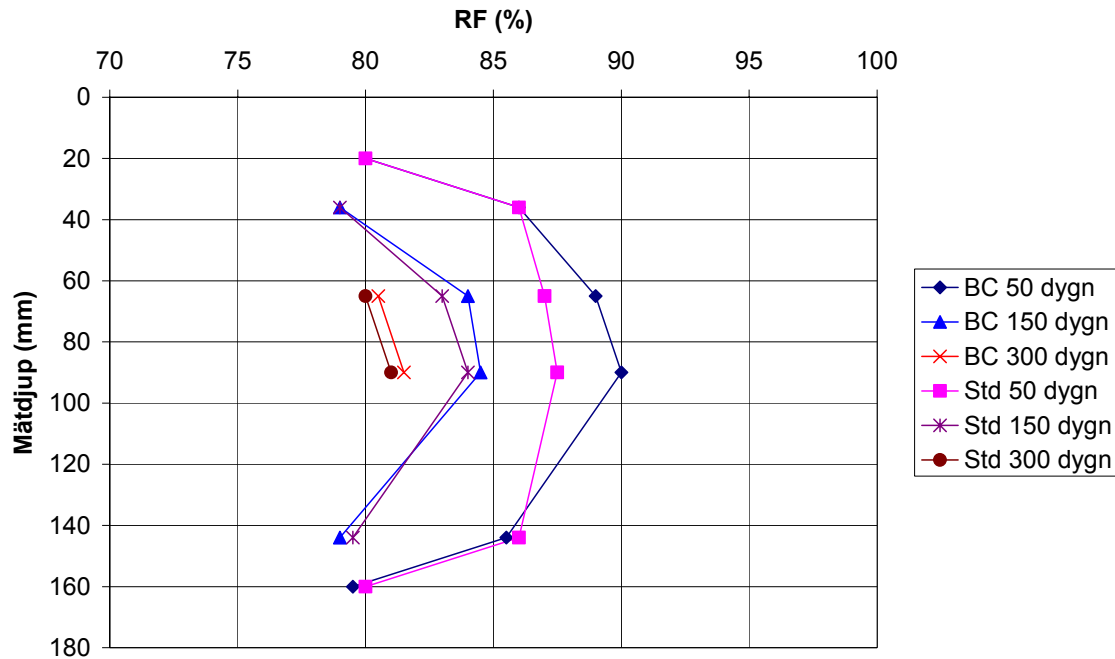


Figur 3.5 Principiell fuktprofil vid dubbelsidig uttorkning.

I figurer 3.6 till 3.11 presenteras uppmätta uttorkningsprofiler för Byggcement och Std P-cement.

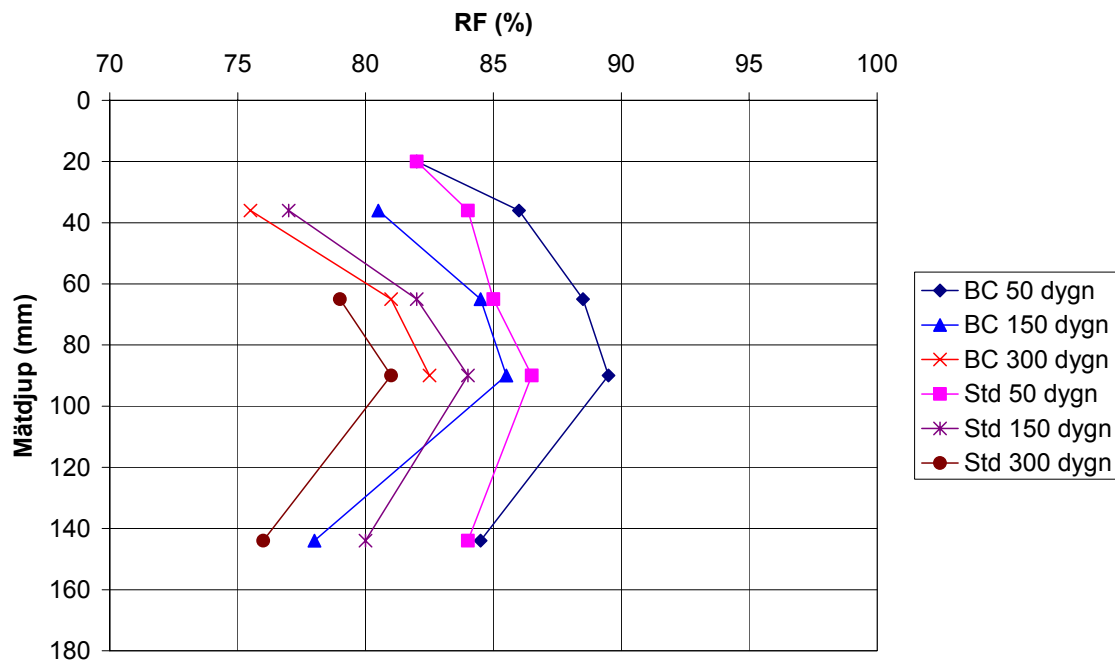
De uppmätta fuktprofilerna redovisas vid 3 olika tidpunkter 50; 150 samt 300 dygn efter gjutning. Eftersom RF-givaren inte kan mäta lägre än 75 % RF så minskar mängden mätdata med tiden. Detta innebär att där mätdata saknas i uttorkningsprofilerna så understiger RF 75 %. I samtliga figurer utgör den övre ytan i figuren överytan vid gjutningen.

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong



Figur 3.6 Uttorkningsprofiler för Byggcement och Std P-cement, vct 0,37.

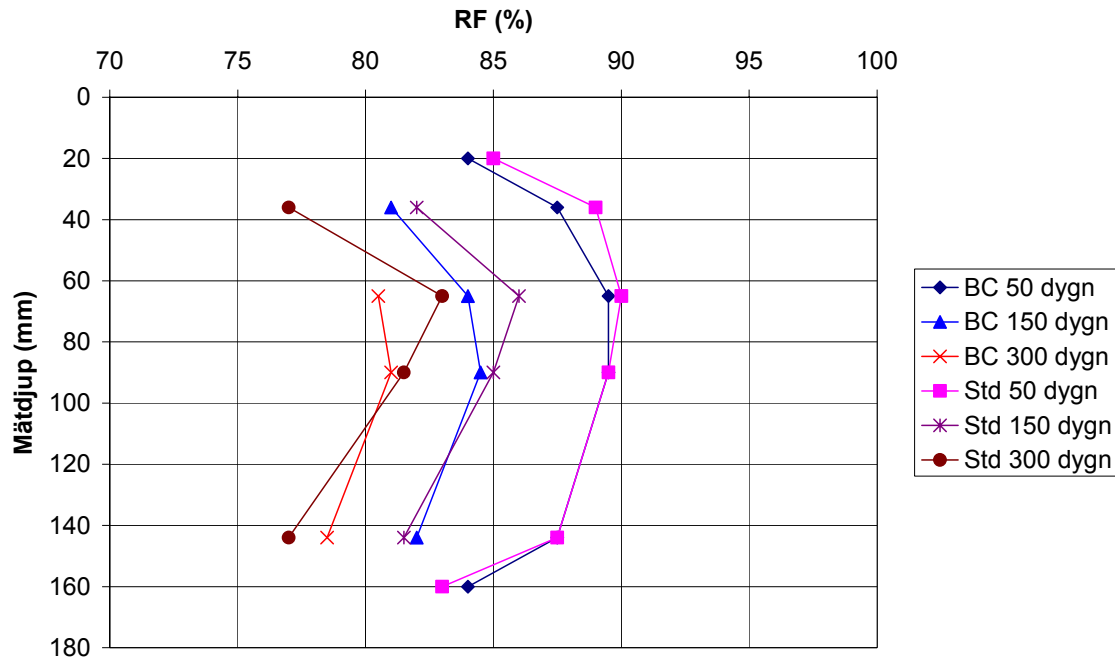
Figur 3.6 visar att uttorkningen mitt i provkroppen sker något snabbare hos Std P-cementet. Efter 150 dygn är dock uttorkningsprofilerna lika för de båda cementtyperna vilket också är fallet efter 300 dygn. Uttorkningsprofilerna har ett normalt utseende med symmetri kring mittnittet.



Figur 3.7 Uttorkningsprofiler för Byggcement och Std P-cement, vct 0,40.

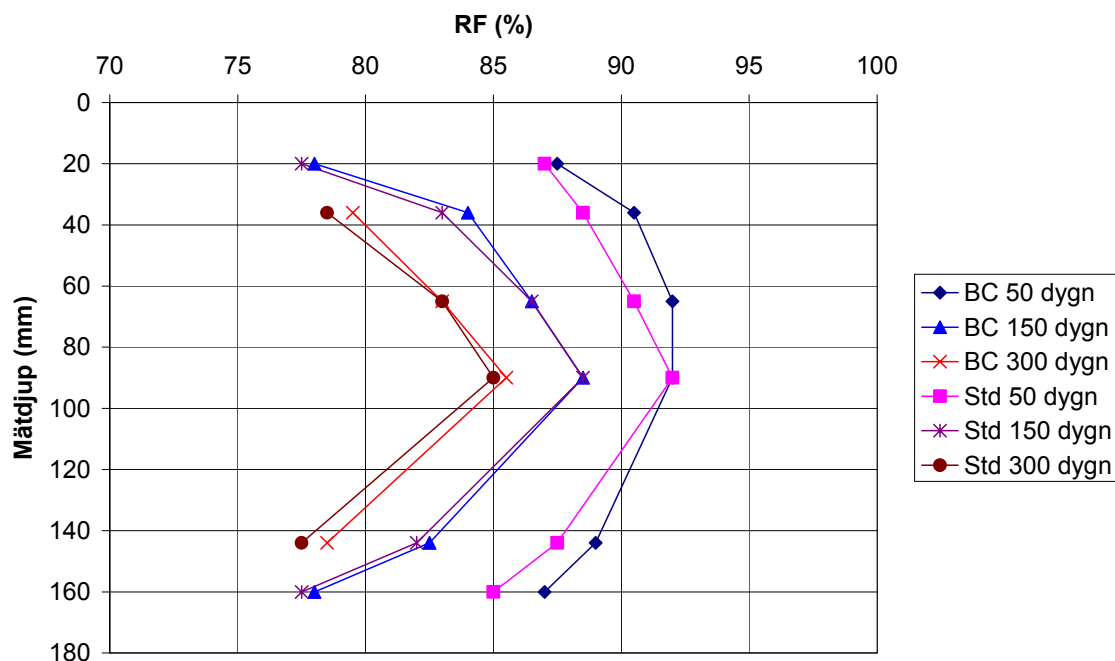
Figur 3.7 visar att vid vct 0,40 är uttorkningen större för Std P-cementet under hela mätperioden. Skillnaden minskar dock något med tiden. Uttorkningsprofilen är symmetrisk.

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong



Figur 3.8 Uttorkningsprofiler för Byggcement och Std P-cement, vct 0,42.

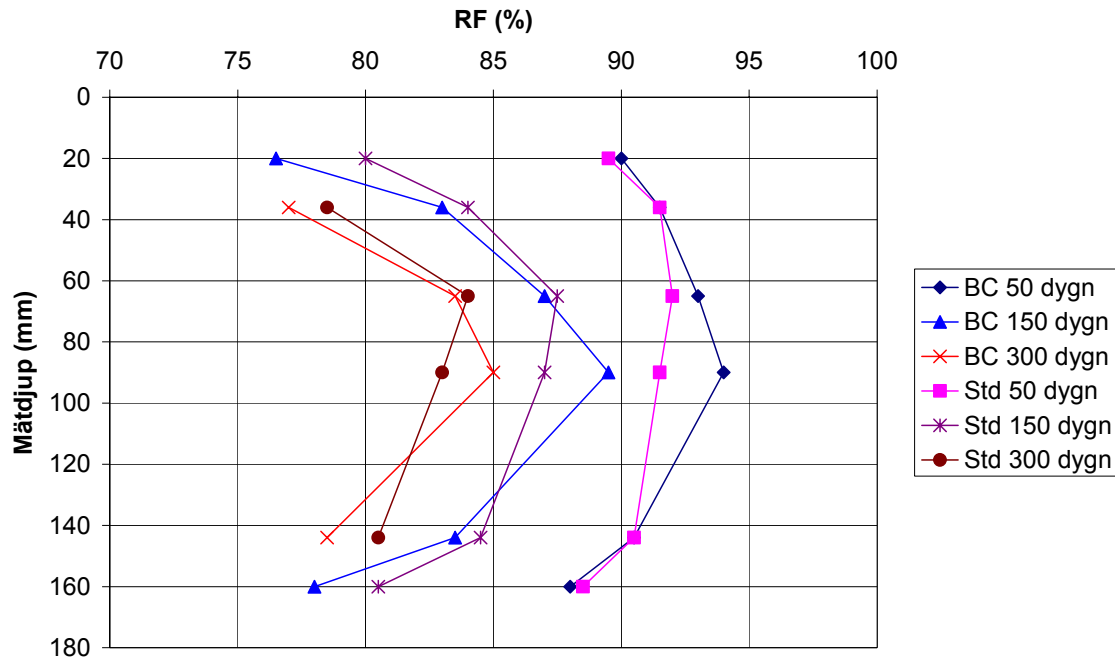
Figur 3.8 visar att vid vct 0,42 är uttorkningen ungefär densamma för de båda cementen. Anmärkningsvärt är dock att högst RF inte erhålls på halva höjden utan något högre upp. Torkningen sker alltså snabbare mot den undre ytan.



Figur 3.9 Uttorkningsprofiler för Byggcement och Std P-cement, vct 0,45.

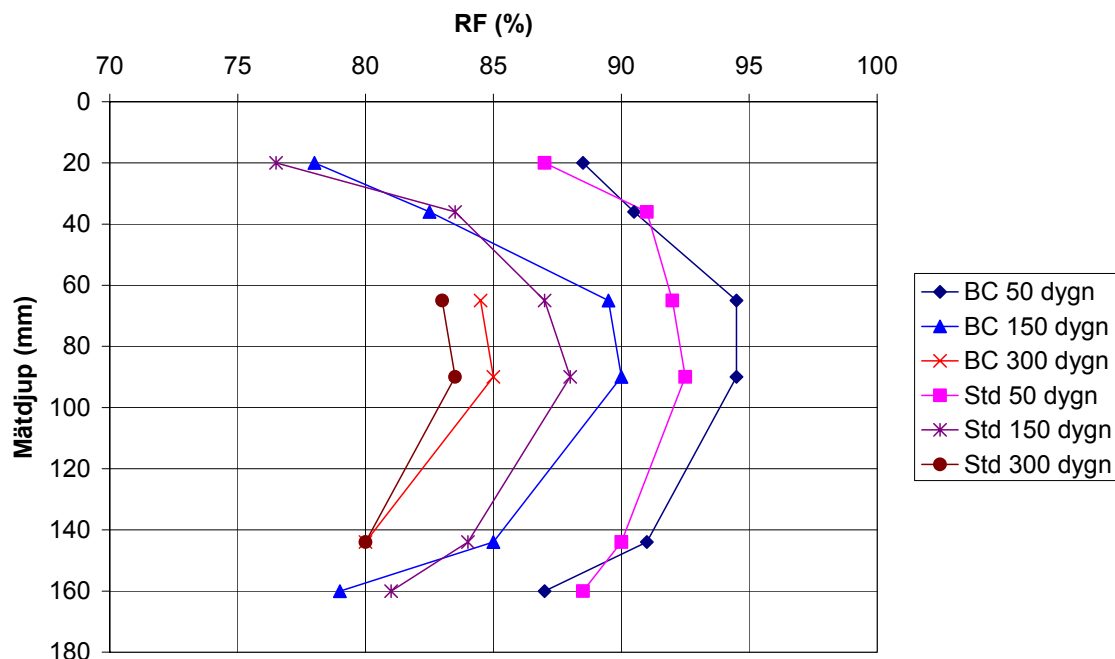
Figur 3.9 visar att även för vct 0,45 följs uttorkningsprofilerna för de båda cementtyperna väl åt. Profilerna är symmetriska.

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong



Figur 3.10 Uttorkningsprofiler för Byggcement och Std P-cement, vct 0,47.

Figur 3.10 visar att det för vct 0,47 är en viss skillnad i uttorkning på halva höjden mellan de båda cementtyperna. Profilerna för Std P-cementet är dessutom något osymmetriska.



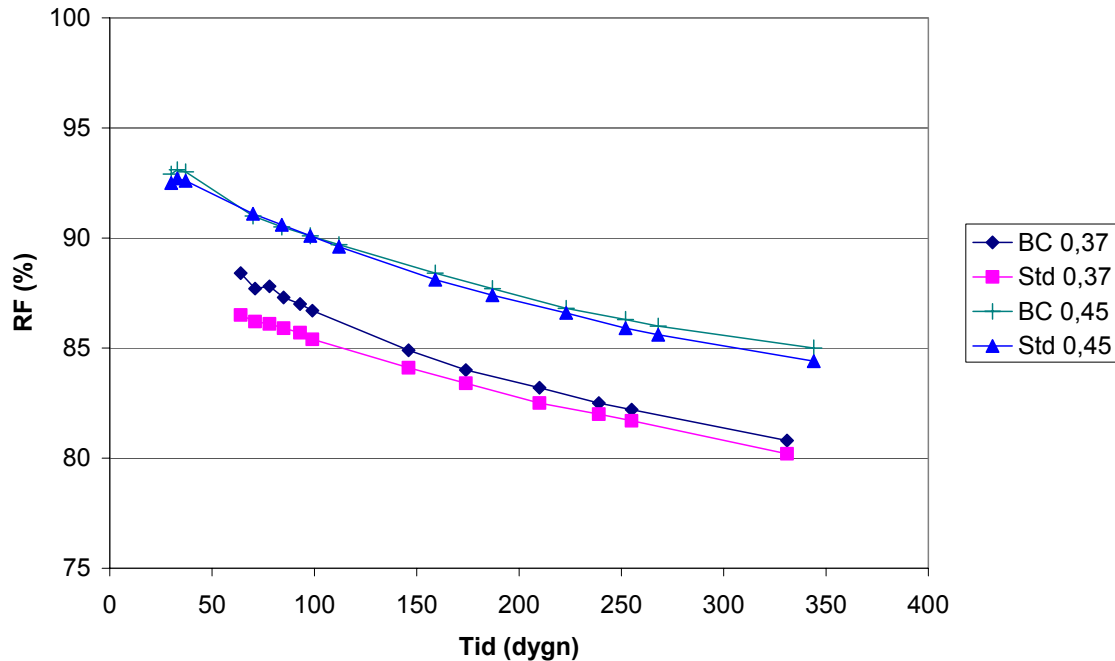
Figur 3.11 Uttorkningsprofiler för Byggcement och Std P-cement, vct 0,50.

Figur 3.11 visar att vid vct 0,50 torkar Std P-cementet något snabbare under hela mätperioden. Detta gäller framförallt mätpunkterna mitt i betongen.

3.8.2 Uttorkning på halva betongtjockleken

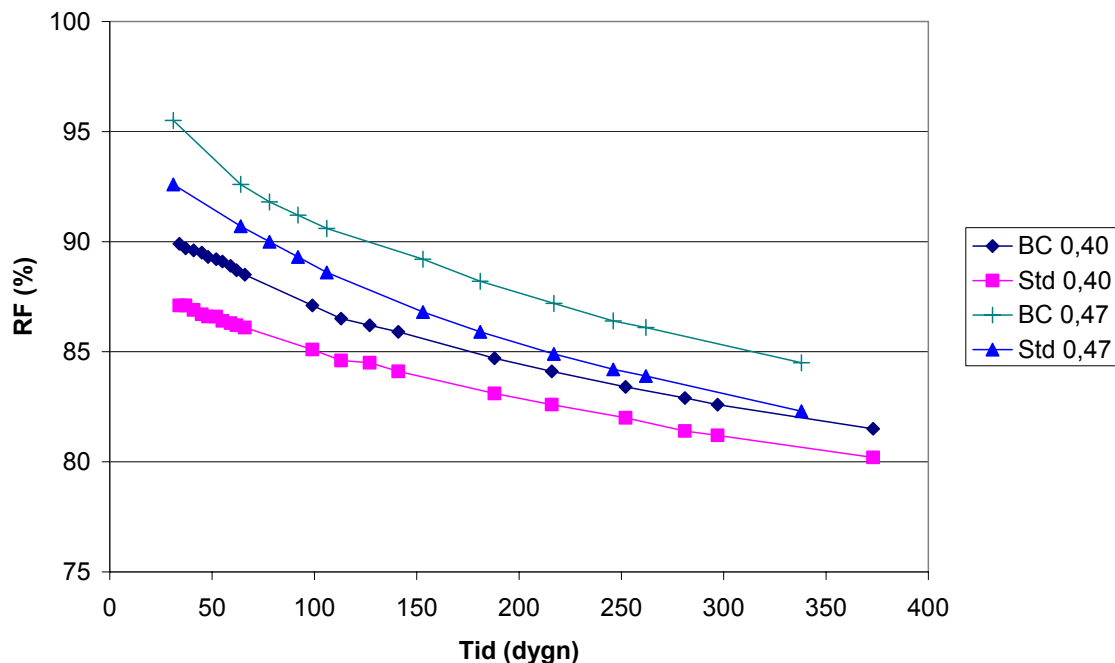
Genom att jämföra uttorkningen mitt i betongen så får man en bild av hur stor effekten av självuttorkning är hos de båda cementtyperna. I följande figurer redovisas resultat för samtliga vct.

För att spara utrymme så redovisas resultaten parvis, med två vct i varje figur. För att figurerna skall bli så lättlästa som möjligt så kombineras följande vct: 0,37 och 0,45 ; 0,40 och 0,47 ; 0,42 och 0,50.



Figur 3.12 Uppmätt RF på halva plattjockleken, vct 0,37 och 0,45.

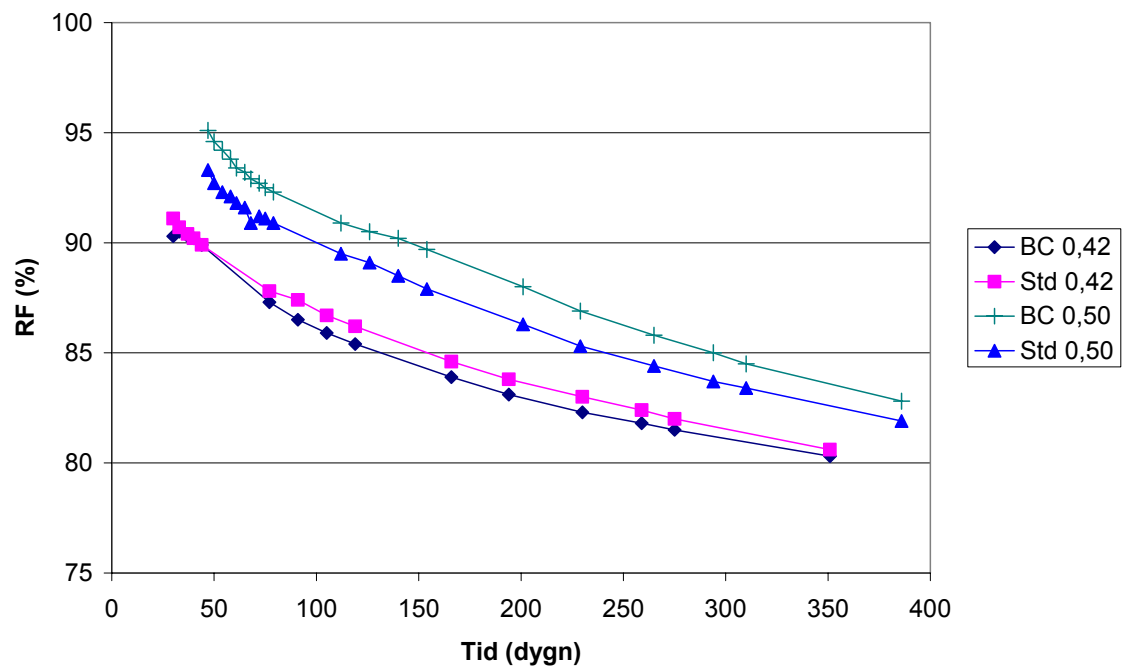
Figur 3.12 visar att vid vct 0,37 och 0,45 är uttorkningen i stort sett lika för de båda cementen.



Figur 3.13 Uppmätt RF på halva plattjockleken, vct 0,40 och 0,47.

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong

Enligt figur 3.13 är RF 2 -3 % lägre hos betong med Std P-cement. Detta kan tyckas vara en liten skillnad, men uttryckt i erforderlig uttorkningstid för att nå en viss RF-nivå, t. ex. 90 % eller 85 %, är skillnaden tämligen stor.

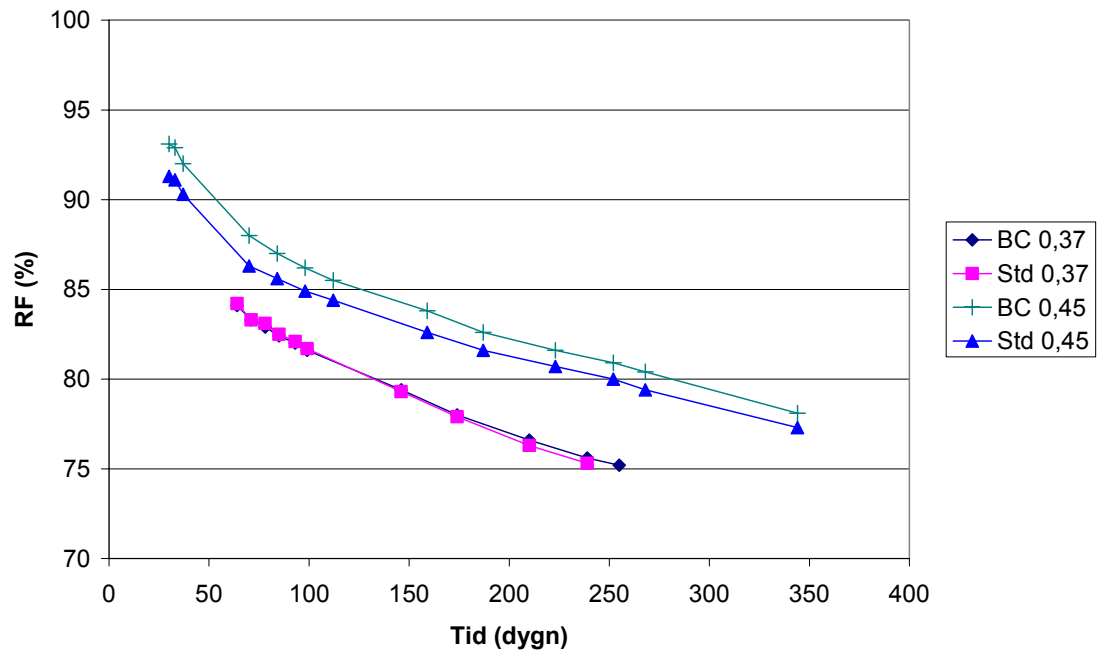


Figur 3.14 Uppmätt RF på halva plattjockleken, vct 0,42 och 0,50.

Figur 3.14 visar att vid vct 0,50 torkar Std P-cementet något snabbare. Vid vct 0,42 är skillnaden mellan de båda cementtyperna liten.

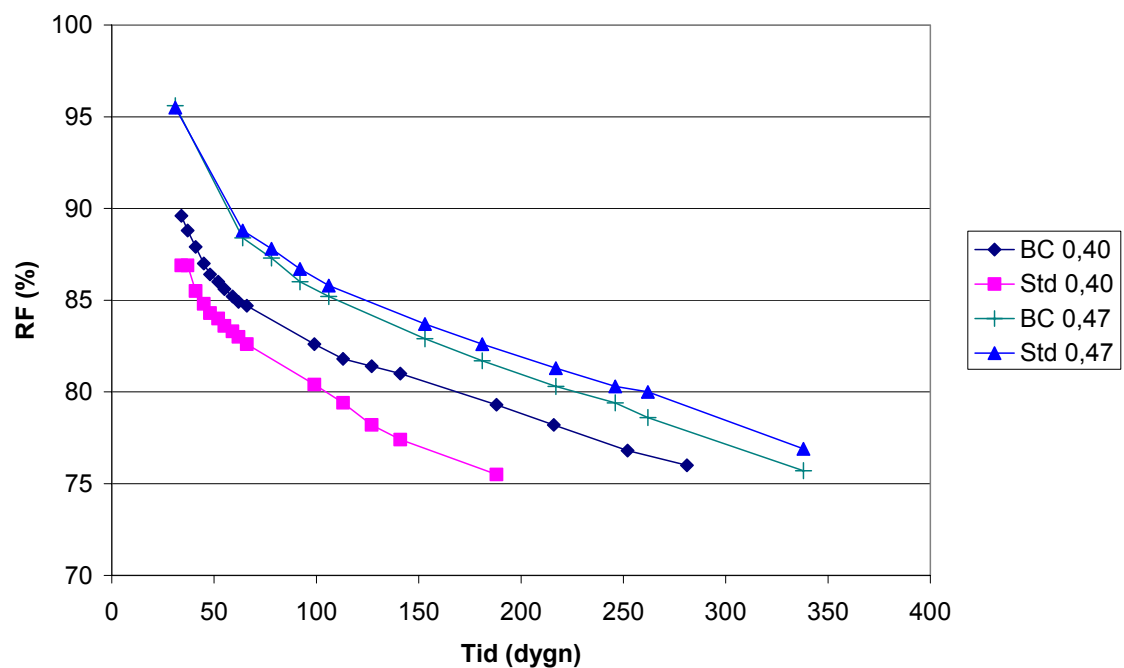
3.8.3 Uttorkning på ekvivalent djup

Ur praktisk synpunkt är det intressant att jämföra uttorkningen på ekvivalent mätdjup. I följande figurer redovisas uppmätt RF på mätdjupet 36 mm för samtliga vct. Även i detta avsnitt redovisas resultaten parvis.



Figur 3.15 Uppmätt RF på ekvivalent mätdjup 36 mm, vct 0,37 och 0,45.

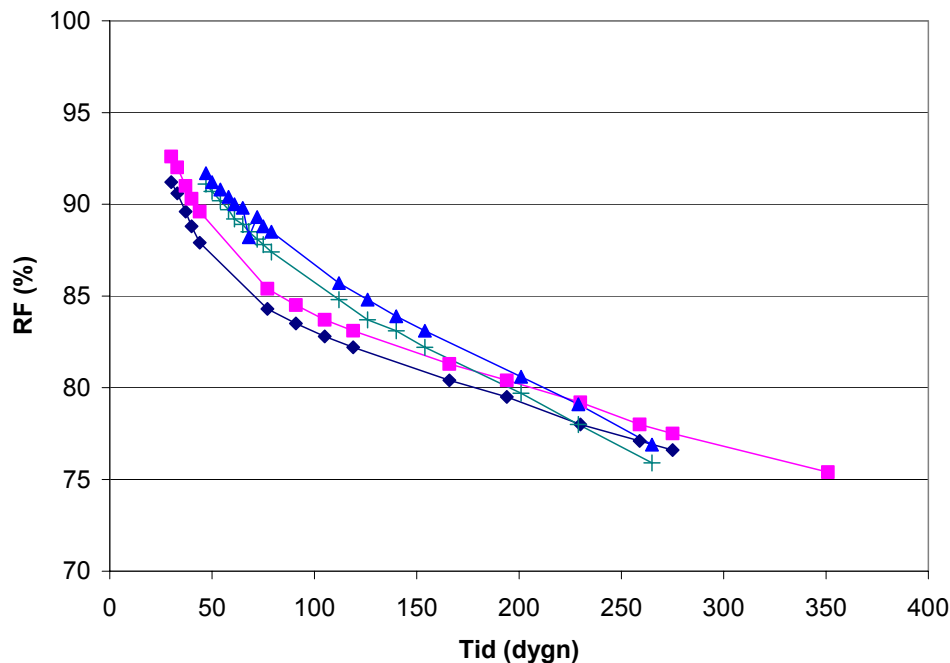
Figur 3.15 visar att det inte är någon större skillnad mellan cementen vid vct 0,37 och 0,45.



Figur 3.16 Uppmätt RF på ekvivalent mätdjup 36 mm, vct 0,40 och 0,47.

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong

Resultaten i figur 3.16 visar att skillnaden mellan cementen är liten vid vct 0,47. Vid vct 0,40 är skillnaden ganska liten i början men ökar med tiden. Det är betongen med Std P-cement som torkar snabbast.



Figur 3.17 Uppmätt RF på ekvivalent mätdjup 36 mm, vct 0,42 och 0,50

Resultaten i figur 3.17 visar en liten skillnad i uttorkning mellan de båda cementen. Det är dock uppenbart att betongen med vct 0,50 torkar mycket snabbare än den med vct 0,42 på detta mätdjup. Detta tyder på att diffusion dominerar uttorkningen vid högre vct.

3.8.4 Erforderlig uttorkningstid

Ekvivalent mätdjup

Erforderlig uttorkningstid för att nå 85 % RF på ekvivalent djup redovisas i tabell 3.5. Värdena baseras på uppmätta RF-värden på 36 mm djup från överytan.

Tabell 3.5 Ungefärlig erforderlig tid till att nå 85 % RF på ekvivalent djup.

Cementtyp	Uttorkningstid till 85 % RF (dygn)					
	0,37	0,40	0,42	0,45	0,47	0,50
Byggcement	55	60	70	125	110	110
Std P-cement	55	45	85	95	125	120

Resultaten i tabell 3.5 visar att skillnaden i uttorkningstid är liten mellan de båda cementsorterna. Tar man dessutom hänsyn till 2 % mätosäkerhet så kan man på detta mätdjup inte se någon skillnad mellan cementen.

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong

Halva plattjockleken

Erforderlig uttorkningstid för att nå 85 % RF i betongens mitt redovisas i tabell 3.6. Värdena baseras på uppmätta RF-värden på 90 mm djup från överytan.

Tabell 3.6 Ungefärlig erforderlig tid till att nå 85 % RF på halva plattjockleken.

Cementtyp	Uttorkningstid till 85 % RF (dygn)					
	0,37	0,40	0,42	0,45	0,47	0,50
Byggcement	140	175	130	345	315	295
Std P-cement	115	100	155	305	215	240

Vid en jämförelse på halva plattjockleken så får man en mycket större skillnad i uttorkningstid mellan de båda cementen. Detta kan delvis förklaras med att uttorkningskurvorna är mycket flacka, vilket gör att små ändringar i RF ger stor effekt på torktiden. Verkliga tider kan skilja sig avsevärt från tabellvärdena eftersom osäkerheten i uppmätta RF-värden antas vara ca. ± 2 procentenheter.

3.9 Slutsatser

Slutsatserna från denna studie kan summeras i följande punkter.

- Resultaten visar att skillnaden i uttorkningsförlopp mellan de båda cementen är liten. Std P-cementet torkar visserligen något snabbare på halva plattjockleken vid några vct (0,40; 0,47; 0,50). Skillnaden är dock inte större än den mätosäkerhet man normalt har i denna typ av mätningar (ca. 2 % RF).
- RF-givare av typen Humi-Guard visade sig fungera bra. Det är dock störande att givaren slås ut vid RF < 75 %. Å andra sida är sådana låga RF-nivåer inte av praktiskt intresse eftersom fuktskador då inte torde kunna uppstå.

3.10 Diskussion

Orsaken till att skillnaden i torkförlopp mellan de båda cementtyperna är så liten är inte alldeles lätt att förklara. Den ökade fillerinblandningen i Byggcement borde nämligen teoretiskt medföra en ökning av det ”effektiva” vct eftersom man kan förvänta sig att fillern är inert. I Std P-cement används 5 % filler. I Byggcement används 12 %. Rent teoretiskt innebär detta att förhållandet i effektivt vct mellan de båda cementtyperna är:

$$\frac{vct_{eff, Bygg}}{vct_{eff, Std}} = \frac{0,95}{0,88} = 1,08$$

Effektivt vct definieras av att enbart cementklinkern antas vara reaktiv:

$$vct_{eff} = \frac{vatten}{klinker}$$

3. Jämförelse mellan Byggcement och Std P-cement med avseende på uttorkning av betong

Exempel:

Betong med uppmätt $v_{ct} = 0,40$

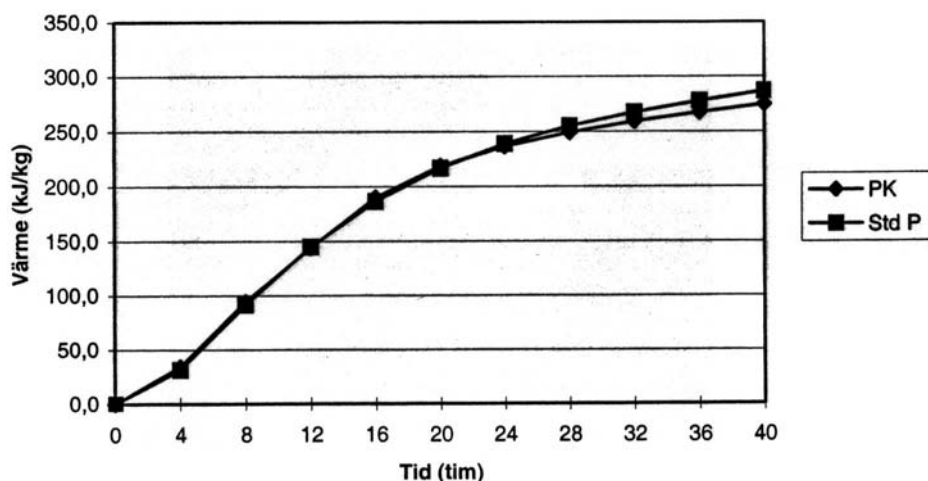
Std P-cement med 5 % filler: $v_{ct_{eff},Std} = 0,40 / 0,95 = 0,42$

Byggcement med 12 % filler: $v_{ct_{eff},Bygg} = 0,40 / 0,88 = 0,45$

Rimligen borde en betong med 8 % högre effektivt v_{ct} torka något långsammare. Att skillnaden trots detta är så pass liten kan bero på någon av följande orsaker:

- Klinkerns finmalningsgrad har ökats, se tabell 3.1, vilket innebär att hydratationsgraden hos själva klinkern tillväxer snabbare.
- Klinkerns mineralogiska sammansättning är något annorlunda i Byggcement; se tabell 3.1. Denna åtgärd i produktionen gjordes för att kompensera för att fillerinblandningen minskar klinkermängden och därmed mängden reaktivt material.
- Fillern aktiverar cementreaktionen genom att tillhandahålla sk kärnbildningsställen för cementreaktionen.
- Fillern är inte helt inert utan bidrar i viss mån till reaktionen och därmed till strukturutvecklingen i cementpastan.

Att Byggcement trots fillerinblandning har ungefär samma reaktivitet som Std P-cement bekräftas av att den isoterma värmeutvecklingen är ungefär densamma för de båda cementtyperna vid samma v_{ct} , se figur 3.18.



Figur 3.18 Värmeutveckling hos Std P-cement och Byggcement vid +20°C (PK-cement var beteckningen på Byggcement under utvecklingsarbetet). (Johansson 1999)

4. Inverkan av cementtyp, vattencementtal och silikastoft på betongens självuttorkning

4.1 Bakgrund

Högt byggt tempo i kombination med krav på låga RF-nivåer i betonggolvet i samband med golvläggning skapar ökad medvetenhet angående val av betongkvalitet hos dagens byggtreprenörer. Det har blivit mycket viktigt att kunna säkerställa den uttorkningshastighet som krävs. Många faktorer påverkar uttorkningen, men det är väl säkerställt att den enskilt viktigaste faktorn är betongens vattencementtal, vct. Detta framgår av tidigare undersökningar (Hedenblad 1994).

Självuttorkning är den dominerande orsaken till RF-sänkning i betongen vid låga vct (0,30-0,40). Andra faktorer som också kan påverka självuttorkningen är cementtyp samt inblandning av silikastoft. Exakt vilken inverkan olika faktorer har på självuttorkningen är dåligt känd vilket är orsaken till denna undersökning.

Vid högre vct är uttorkning utåt via diffusion den dominerande orsaken till minskningen av betongens RF-nivå. Denna typ av uttorkning har tidigare studerats systematiskt i en stor undersökning (Hedenblad 1995).

4.2 Syfte

Syftet med studien var att undersöka självuttorkningen hos cementbruk där cementtyp och vct varierades. Inverkan av silikastoft undersöktes också för ett vct. Resultaten är avsedda att användas till att utveckla betongsammansättningar som ger önskat uttorkningsförlopp.

Med begreppet "självuttorkning" menas i detta kapitel den utveckling av inre RF som sker i cementbruket. En viss del av den uppmätta RF-minskningen beror på att porlösningen i cementbruket innehåller lösta joner, främst Na^+ , K^+ och OH^- . Denna RF-sänkande effekt inkluderas således i redovisade självuttorkningsförlopp.

4.3 Försöksuppläggning

I studie jämfördes tre olika cementtyper och fyra olika betongrecept med varierande vct/vbt (vattencementtal/vattenbindemedelstal). Detta innebar att totalt 12 blandningar provades enligt variationer i tabell 4.1.

Tabell 4.1 Försöksmatris

Cementtyp	vct 0,30	vct 0,40	vct 0,50	vbt 0,30
Byggcement ¹⁾	X	X	X	X
SH-cement ²⁾	X	X	X	X
Anläggningscement ³⁾	X	X	X	X

1) Slite Portland-kalkstensfillercement typ CEM II/A-LL, med 12 % kalkstensfiller.

2) Slite Portlandcement (snabbcement) typ CEM I, utan kalkstensfiller.

3) Degerhamn Portlandcement typ CEM I, lågalkaliskt sulfatresistent, utan kalkstensfiller.

I betongblandningar betecknade vbt 0,30 hade 10 % av cementvikten ersatts med silikastoft. Effektivitetsfaktorn för silikastoftet antogs vara 1, d.v.s. vbt definieras:

$$vbt = \frac{\text{vatten}}{\text{cement} + \text{silika}} = 0,30$$

Direkt efter blandning placerades cementbruket i väl förslutna plåtburkar för att inget fuktutbyte skulle ske med omgivningen. Dubbelprov tillverkades av varje recept, och samtliga prover lagrades i 20°C.

Fuktmätning utfördes med hjälp av kalibrerade RF-givare av typen Vaisala HMP 44. Kalibreringar genomfördes med hjälp av en fuktkgenerator som finns vid avdelningen. Mätningarna påbörjades 4 dygn efter tillverkning och slutmätningen utfördes efter ca. 28 dygn.

4.4 Tillverkning av cementbruk

4.4.1 Delmaterial

Cement

Tre olika cementsorter från Cementa användes i denna studie. Byggcement från Slitefabriken på Gotland som sedan år 1999 är det vanligast förekommande cementet för husbyggnad. SH-cement (snabbcement) från Slitefabriken som med fördel används vintertid samt när det är krav på tidig formrivning. Anläggningscement från Degerhamnsfabriken på Öland som används till anläggningsbyggande där det ställs krav på låg värmeutveckling, låg alkalitet samt sulfatresistens. I tabell 4.2 redovisas 2003 års typvärden för de tre cementsorterna.

Tabell 4.2 2003 års typvärden.

	Byggcement	SH-cement	Anläggningscement
Beteckning	CEM II/A-LL 42,5 R	CEM I 52,5 R	CEM I 42,5 N BV/SR/LA
Tryckhållfasthet			
1 dygn	20 MPa	36 MPa	10 MPa
28 dygn	55 MPa	64 MPa	54 MPa
Bindetid	170 min	120 min	150 min
Specifik yta	460 m ² /kg	540 m ² /kg	320 m ² /kg
Densitet	3080 kg/m ³	3140 kg/m ³	3210 kg/m ³
Kalkfillerhalt	12 %	0 %	0 %
Löslig (Na ₂ O) _{ekv}	0,7 %	0,8 %	0,4 %
Klinkerkomponenter			
C ₃ S	58,3 %	58,3 %	52,6 %
C ₂ S	14,5 %	14,5 %	25,3 %
C ₃ A	5,7 %	5,7 %	2,0 %
C ₄ AF	9,2 %	9,2 %	12,9 %

Silikastoft

Silikastoft av fabrikatet Elkem Microsilica användes i denna studie. Det är ett mycket finkornigt pulver huvudsakligen bestående av amorf kiselsyra. Det har en specifik yta på 15 000 -30 000 m²/kg.

Normsand

Som ballastmaterial användes normerad sand enligt SS-EN 196-1 (2001). Sanden har maximal stenstorlek 2 mm och levereras i plastpåsar om 1350 gram.

Tillsatsmedel

För att vissa recept skulle vara möjliga att gjuta användes Cementas flyttillsats 92 M som är baserad på sulfonerad melaminpolykondensat. Torrhalt 35 %.

Vatten

Normaltempererat kranvatten användes i blandningarna.

4.4.2 Recept

I samtliga recept hölls vattenhalten konstant och cementhalten varierades för att åstadkomma skillnader i vct/vbt. Förförsök utfördes för att erhålla gjutbara recept. Flyttillsatsmedel tillsattes där det var nödvändigt för cementbrukets arbetbarhet. I tabell 4.3 redovisas de recept som användes i studien

Tabell 4.3 Cementbruksrecept

Delmaterial	vct 0,30	vct 0,40	vct 0,50	vbt 0,30
Cement	750 g	565 g	450 g	675 g
Silikastoft	-	-	-	75 g
Vatten	225 g	225 g	225 g	225 g
Flyttillsats F 92 M	10 g	5 g		10 g
Normsand	1120 g	1260 g	1350 g	1120 g

4.4.3 Blandning

Blandningen av cementbruket utfördes med hjälp av en Hobart-blandare, se figur 4.1, och i enlighet med SS-EN 196-1 (2001). Vattnet hälldes i blandaren och cementet tillsattes. Därefter blandades vatten och cement under 30 sekunder på låg fart. Under de följande 30 sekunderna tillsattes normsanden och därefter ökades blandningshastigheten under de kommande 30 sekunderna.



Figur 4.1 Hobart-blandare för tillverkning av cementbruk.

Efter detta stannades blandningen och torrt material som fastnat på kanterna och i botten av blandningskärlet skrapades loss med en gummiskrapa. Därefter fortsatte blandningen på hög hastighet i 60 sekunder. Då tillsatsmedel användes tillsattes detta via blandningsvattnet.

4.5 Tillverkning och lagring av provkroppar

Fuktmätningen utfördes i 1-liters plåtburkar med tätslutande lock. Direkt efter blandning applicerades 800 gram cementbruk i varje plåtburk. Detta motsvarar ca. 40 % av satsens totala vikt. Därefter vibrerades burken och det tätslutande locket sattes på. Två burkar tillverkades av varje blandning så att dubbelprov erhöles. 800 gram cementbruk innebar att plåtburken var fylld till ca. en tredjedel.

Efter tillverkning märktes provkropparna och placerades i klimatrums (+20°C, 55 % RF) för lagring.

4.6 Fuktmätning

Genom att cementbruket var helt fuktisolerat kunde ingen uttorkning ske. Uppmätt RF i plåtburkarna återger därför den självuttorkning som sker när cementbruket hydratiserar.

Som nämndes i avsnitt 4.2 inkluderas den RF-sänkande effekten av lösta joner i de uppmätta RF-värdena. Denna effekt är störst för cement med högst mängd löslig alkali och ökar med ökad cementshalt. Den minskar med mängden silikastoft. Effekten av alkali diskuteras i avsnitt 4.9 och i kapitel 2.

RF-givare Vaisala HMP 44 användes för att mäta RF. RF och temperatur avlästes med hjälp av ett avläsningsinstrument kopplat till givaren. Innan mätningarna påbörjades kalibrerades givarna i intervallet 79-95 % RF vid temperaturerna 5°C och 20°C.

RF-givarna monterades två dygn efter tillverkningen. Vid montering öppnades locken till plåtburkarna under ca. 30 sekunder och RF-givaren monterades via en tätande gummi-packning genom burkloppet. Figur 4.2 visar en provkropp med tillhörande RF-givare.



Figur 4.2 Provkropp för mätning av självuttorkning.

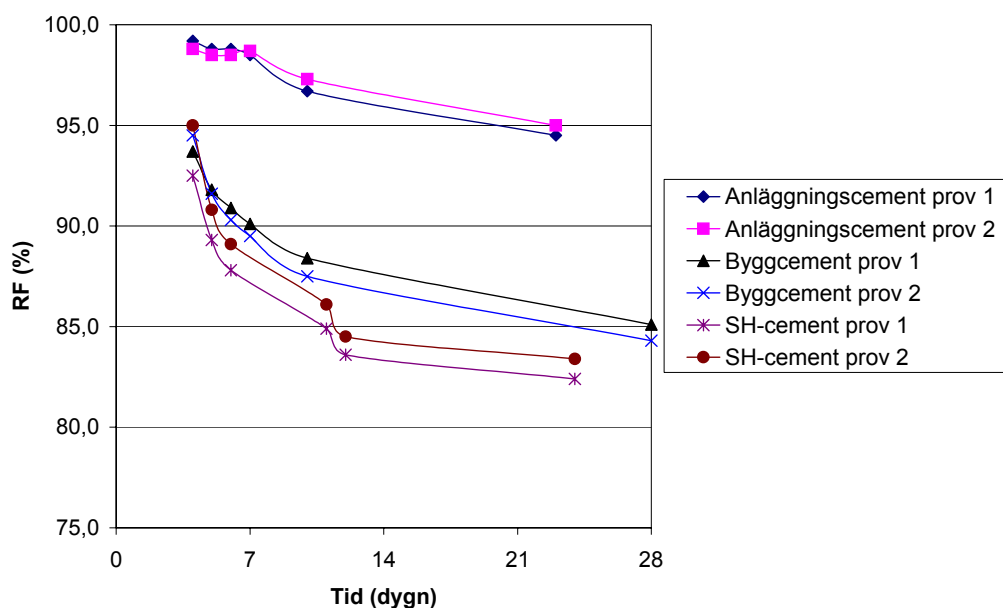
Många av plåtburkarna hade kondens på lockets undersida som torkades bort i samband med monteringen av RF-givarna. Problem med kondens återfanns främst vid vct 0,50 och i de burkar där anläggningscement användes.

Det borttorkade kondensvattnet uppgick till ca. 0,5 g - 2,0 g, vilket enbart motsvarar ca. 0,6 å 2,3 % av total vattenhalt i provet.

Mätningen av RF utfördes i luften mellan lock och cementbruk. Mätningarna startade efter 4 dygn och pågick under ca. 28 dygn.

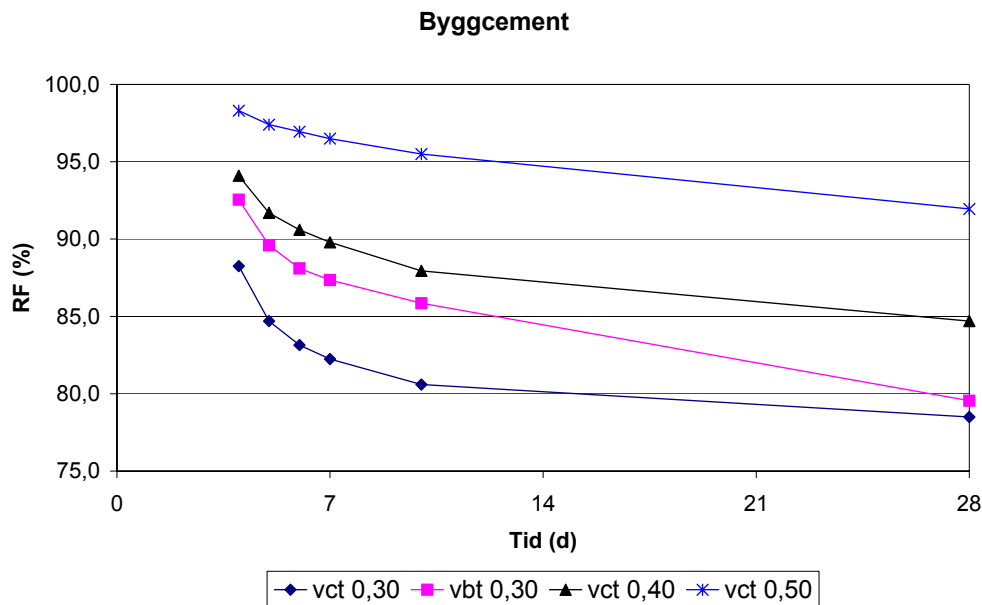
4.7 Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten av självuttorkningsmätningarna. De resultat som presenteras är uppmätta värden. Ingen hänsyn har tagits till mätosäkerhet vilken bedöms vara ± 2 procentenheter i RF (RBK 2001). Kurvorna baseras på medelvärden av de dubbelprov som utfördes. Dubbelprovets enskilda resultat sammanföll väl ± 1 %, se figur 4.3.



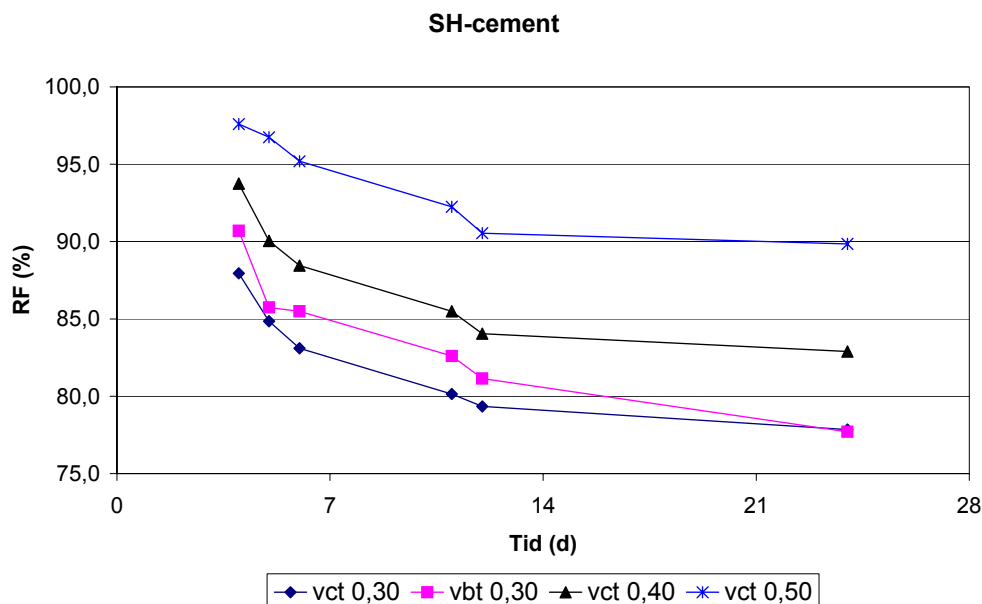
Figur 4.3 Självuttorkning hos cementbruk vct 0,40. Dubbelprov.

4.7.1 Inverkan av vct och silikastoft



Figur 4.4 Inverkan av vct och silikastoft på självuttorkning hos cementbruk baserat på Byggcement (vbt 0,30 innehåller 10 % silikastoft, övriga saknar silikastoft).

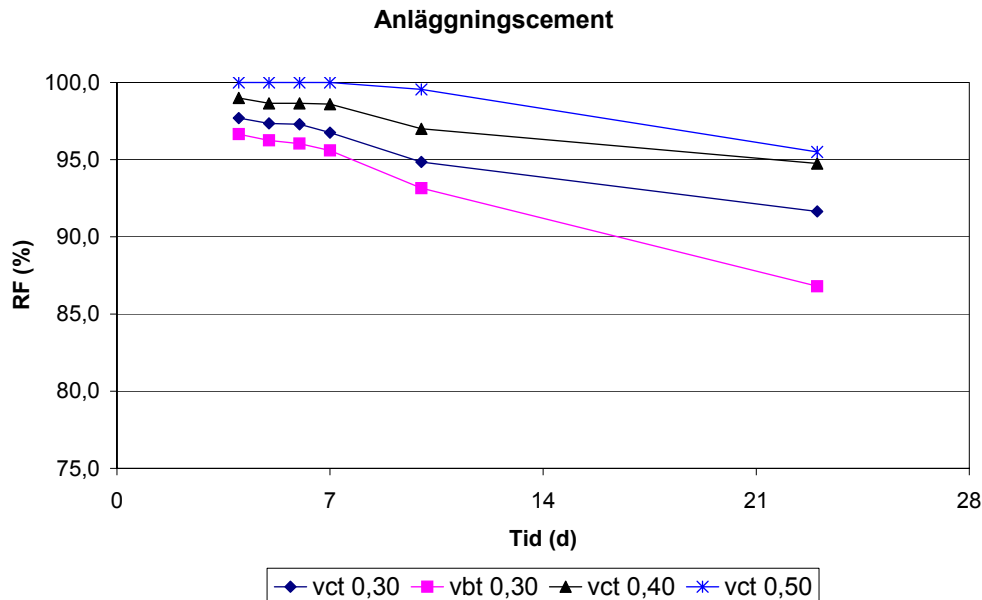
Figur 4.4 visar att valet av vattencementtal är mycket starkt avgörande för hur stor effekten av självuttorkning blir. Inblandning av silikastoft har ingen positiv effekt under den uppmätta perioden, snarare verkar det minska självuttorkningseffekten. En orsak kan vara att silikastoftet minskar cementets alkalisänkande effekt genom att reagera kemiskt med alkali. Kurvans lutning för vbt 0,30 tyder dock på att silikastoftet på sikt kan vara gynnsam för självuttorkningen ned till mycket låga RF-nivåer. För övrigt kan man konstatera att det krävs vct 0,40 för att nå 85 % RF via självuttorkning under den första månaden. Vid vct 0,50 har inte ens 90 % RF nåtts inom en månad.



Figur 4.5 Inverkan av vct och silikastoft på självuttorkning hos cementbruk baserat på SH-cement.

4. Inverkan av cementtyp, vattencementtal och silikastoft på betongens självuttorkning

Resultaten för SH-cement är principiellt lika med resultaten för Byggcementet. Silikastoftet ger även i detta fall en fördröjd uttorkningseffekt. Denna är dock mindre än för Byggcement. Vid vct 0,40 når cementbruk med SH-cement nivån 85 % RF snabbare än bruk med Byggcement.

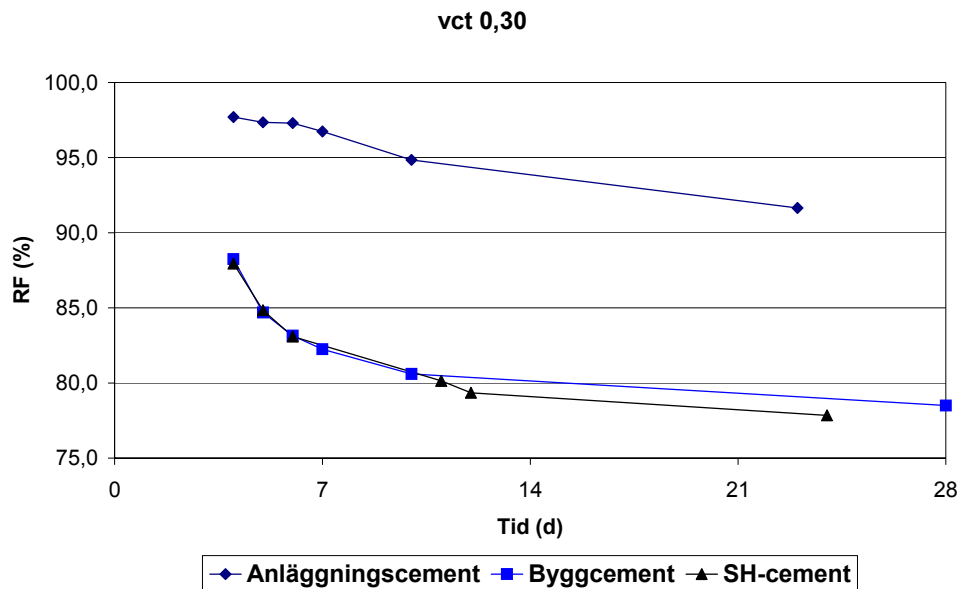


Figur 4.6 Inverkan av vct och silikastoft på självuttorkning hos cementbruk baserat på Anläggningscement.

Vid användning av Anläggningscement har silikastoftet en stor inverkan redan under de första tre veckorna. Tendensen är också att effekten blir större med tiden. Anläggningscement ger redan i sig en låg mängd löslig alkali. Följaktligen får inte silikastoftet lika stor RF-höjande effekt som de mer högalkaliska Byggcementet och SH-cementet.

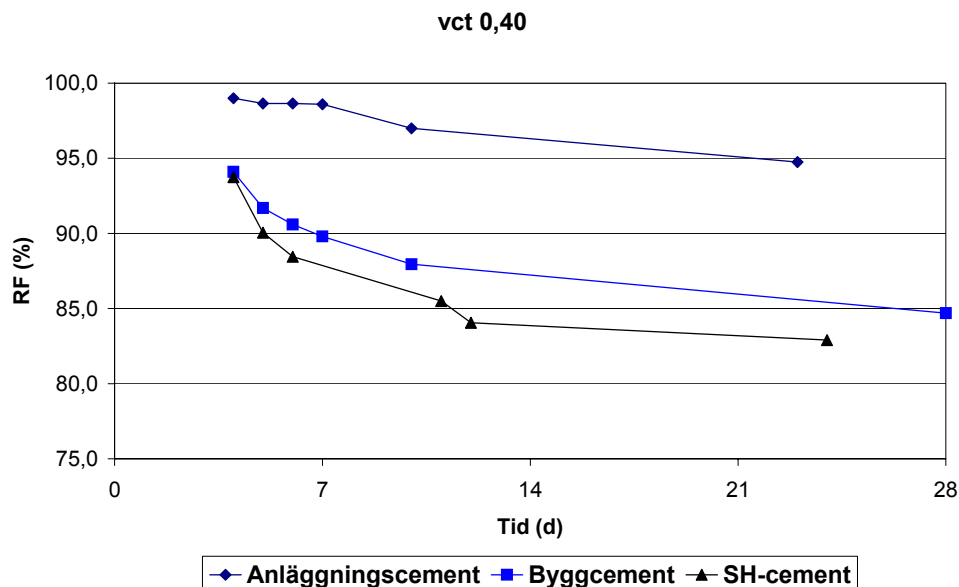
För inget av de provade vattencementtalen nås gränsen 85 % RF under mätperioden. Detta beror med säkerhet på den långsammare hydratationen hos Anläggningscementet.

4.7.2 Inverkan av cementtyp



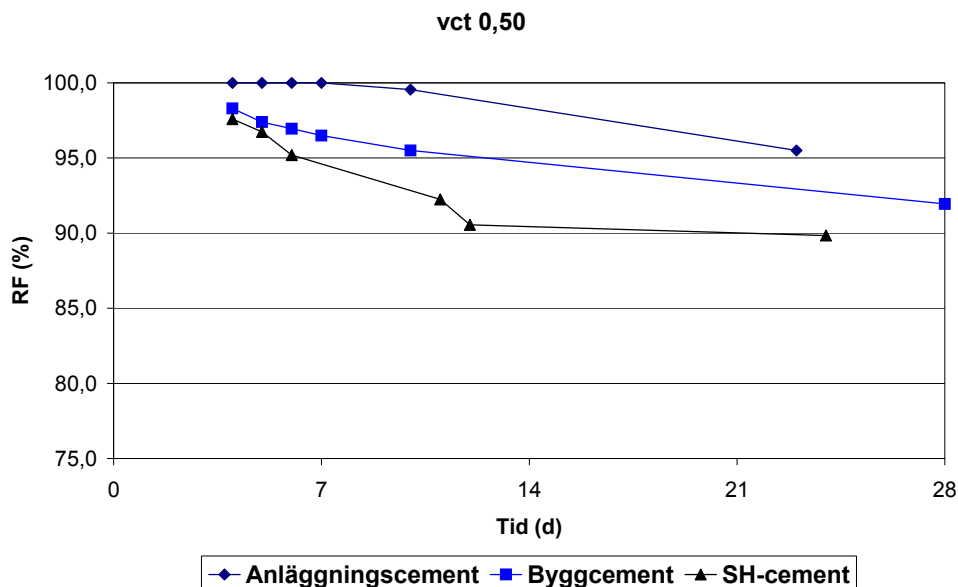
Figur 4.7 Cementtypens betydelse för självuttorkning vid vct 0,30.

Vid vct 0,30 är självuttorkningen hos cementbruket med Anläggningscement mycket lägre än för övriga cement. Skillnaden i RF är nästan 15 % under hela första månaden. Byggcement och SH-cement ger ungefär samma självuttorkningsförlopp.



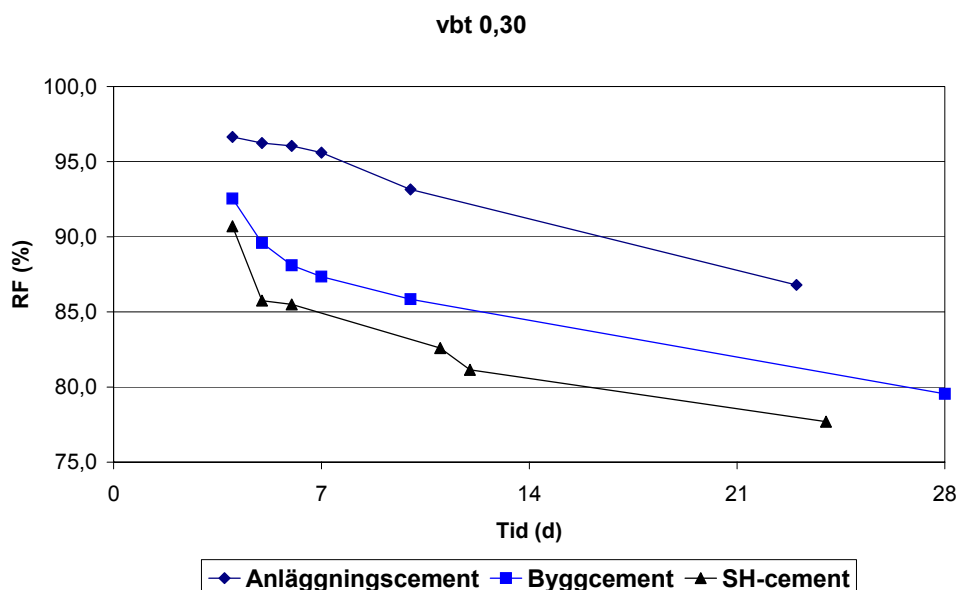
Figur 4.8 Cementtypens betydelse för självuttorkning vid vct 0,40.

Anläggningscementet ger fortfarande klart lägst självuttorkning men skillnaden till andra cement har minskat. SH-cementet ger vid detta vct något högre självuttorkning än Byggcementet. En bidragande orsak till detta kan vara att SH-cementet har något högre alkalitet, 0,8 % jämfört med 0,7 % för Byggcement.



Figur 4.9 Cementtypens betydelse för självuttorkning vid vct 0,50.

Vid vct 0,50 är självuttorkningen mycket lägre än vid de båda lägre vct-nivåerna. Detta gäller för såväl Byggcement som SH-cement. Anläggningscementets uttorkningskurva är tämligen oförändrad jämfört med vad den var vid vct 0,40. SH-cement ger även vid detta vct en större självuttorkning än Byggcement.



Figur 4.10 Cementtypens betydelse för självuttorkning vid vbt 0,30 med 10 % silikastoft.

I likhet med vad som gäller för samtliga bruk utan silikastoft är självuttorkningen lägst hos cementbruket med Anläggningscement. Skillnaden mellan Anläggningscement och Byggcement resp. SH-cement är dock mindre än när silikastoft saknas (se blandningar med vct 0,30, figur 4.7), vilket visar att silikastoftet har en positiv effekt tillsammans med Anläggningscement. Detta framgår även tydligt av figur 4.6 enligt vilken självuttorkningen i bruk med Anläggningscement sker mycket snabbare när silikastoft används. Även SH-cement visar större självuttorkning än Byggcement.

4.8 Slutsatser

Slutsatserna från denna studie kan summeras i följande punkter.

- Vattencementtalet har mycket stor inverkan på självuttorkningen hos cementbruk, och därmed med säkerhet även hos betong. För att kunna uppfylla kravet 85 % RF med hjälp av enbart självuttorkning krävs ett vct som är lägre än 0,40. Detta gäller för Byggcement och SH-cement. Vid användning av Anläggningscement krävs ännu lägre vct samt inblandning av silikastoft för att nå 85 % gränsen.
- SH-cement ger något snabbare självuttorkning än Byggcement.
- Inblandning av silikastoft vid låga vct har stor effekt tillsammans med Anläggningscement. Ingen positiv effekt av silikastoft syns under den första månaden vid användning av Bygg- eller SH-cement. Snarare verkar silikastoft minska självuttorkningen under denna period. Detta gäller särskilt vid användning av Byggcement. Uttorkningskurvornas lutning tyder dock på att en positiv effekt av silikastoft kan uppkomma i ett senare skede när RF redan är lågt.
- Metoden att mäta självuttorkning med hjälp av fuktgivare, i detta fall av typ Vaisala, placerade i delvis cementbruksfyllda plåtburkar är mycket enkel att använda. Det enda negativa som observerats med metoden är den kondens som bildas under de första dygnet. I detta skede är emellertid även RF i betongen närmare 100 % varför kondensen saknar praktisk betydelse. Kondensvattnet måste dock avlägsnas för att de fortsatta RF-mätningarna, som ju sker i luften i burken, skall bli riktiga.

4.9 Diskussion

Silikastoft

Orsaken till att silikastoft har olika effekt på olika cementtyper är inte klarlagd. Några icke verifierade hypoteser kan framföras:

1. Silikastoft reagerar med kalciumhydroxid som frisätts när portlandklinker reagerar med vatten. Därvid skapas cementgel som medför en förfining av porstrukturen. Denna effekt har i vissa undersökningar noterats genom en förändring av betongens sorptionsisoterm på så sätt att denna blir flackare vid höga RF. Detta skulle medföra att en viss given hydratation ger större RF-sänkning. Sorptionsisoterner har inte bestämts i denna undersökning vilket gör att mekanismen varken kan verifieras eller tillbakavisas. Eftersom samtliga testade cement producerar kalciumhydroxid, men silikastoftet enbart ger positiv effekt på Anläggningscement, verkar mekanismen inte helt sannolik.

2. Silikastoft ger en "fillereffekt" vilken kan tolkas så att det tillhandahåller ett mycket stort antal nukleeringsplatser för cementreaktionen. Detta skulle kunna tänkas leda till att en mera välordnad struktur hos cementgelen utvecklas och att därmed porstrukturen förfinas. En liknande fillereffekt bör emellertid även andra typer av fyller ha. SH-cementet och Byggcementet har i sig själva mycket hög specifik yta med ett stort antal fina partiklar (se tabell 4.2) vilket möjligen gör att silikastoftets fillereffekt vid dessa cement blir liten eller noll.

Alkalieffekten

Den s.k. "alkalieffekten" kan delvis förklara varför skillnaden i självuttorkning är så stor mellan Anläggningscement och Bygg/SH-cement. Tabell 4.4 visar hur stor RF-sänkningen blir på grund av alkaliteten för de tre cementen och vid de tre vattencementtalen då cementbruket är 3 dygn gammalt och vattenmättat. Resultaten är beräknade enligt avsnitt 2.9. Värden på hydratationsgraden α är inte mätta utan antagna på basis av andra undersökningar.

Tabell 4.4 RF-sänkning efter 3 dygn hos vattenmättat cementbruk till följd av löslig alkali.

Cementtyp	vct	α	RF-sänkning
Anläggningscement	0,30	0,20	1,8 %
Löslig (Na ₂ O) _{ekv} = 0,4 %	0,40	0,30	1,3 %
	0,50	0,40	1,1 %
Byggcement	0,30	0,30	3,3 %
Löslig (Na ₂ O) _{ekv} = 0,7 %	0,40	0,40	2,5 %
	0,50	0,50	2,0 %
SH-cement	0,30	0,35	3,9 %
Löslig (Na ₂ O) _{ekv} = 0,8 %	0,40	0,45	2,9 %
	0,50	0,55	2,3 %

Alkalieffekten innebär alltså att en viss del av uppmätt RF-sänkning hos cementbruket inte behöver bero på verklig självuttorkning. Den stora skillnad i självuttorkning som finns mellan Anläggningscement och Bygg / SH-cement kan till viss del förklaras genom skillnaden i löslig alkali.

Inblandning av silikastoft medför att alkaliteten minskar genom reaktion med porlösningens OH⁻ joner. Vattenmättad betong med 10 % silikastoft kan förväntas ha RF 100 %.

5. Inverkan av simulerat regn på uttorkning av nygjuten betong

5.1 Bakgrund

Dagens krav på uttorkning av betong i kombination med ett högt byggtempo gör att det är viktigt att eliminera alla faktorer som kan fördröja uttorkningen. En sådan faktor är att bottenplattor och bjälklag av betong ofta utsätts för regn i samband husproduktion.

Det är ovanligt att åtgärder vidtas för att skydda betongen mot nederbörd. Det är därför vanligt förekommande att regn ansamlas under en längre tid på betongytan, se figur 5.1. Detta innebär att betongen fritt kan suga in vatten som kan ta lång tid att torka ut.



Figur 5.1 Vattenansamling i samband med nyproduktion.

Det är allmänt känt att en väl härdad betong med lågt vattencementtal ($< 0,40$) är mycket tät och att den därför suger in liten mängd vatten jämfört med en normal husbyggnadsbetong ($v_{ct} > 0,65$). Det innebär att om en redan uttorkad betong utsätts för vatten så kommer vatteninsugningen att bli mindre i den högvärdiga betongen. I båda betongtyperna höjs dock den inre RF i betongen på grund av insugningen, ofta till samma höga nivå. Uttorkningen går sedan långsamt. Fallet behandlas i kapitel 6.

I en nygjuten betong är förhållandena annorlunda. I sådan betong finns det inget utrymme för vatteninsugning eftersom alla porer redan är vattenfyllda med blandningsvatten. Därför kan i princip inte vattenhalten öka om betongen direkt efter gjutning skulle utsättas för regn. Genom cementreaktionen uppstår dock successivt en viss luftfylld porvolym. Denna är direkt proportionell mot hydratationsgraden. För betong med portlandcement gäller följande för dessa s.k. ”självuttorkningsporer”. Se även avsnitt 2.5.

$$L=0,0625 \cdot \alpha \cdot C$$

Där L är volymen skapade självuttorkningsporer (liter/m^3), α är hydratationsgraden och C är cementhalten (kg/m^3).

Exempel: vct 0,40: $C = 420 \text{ kg/m}^3$

$\alpha=0,25$ (ungefär 3 dygns ålder vid $+5^\circ\text{C}$)
 $L=6 \text{ liter/m}^3$

$\alpha=0,45$ (ungefär 7 dygns ålder vid $+5^\circ\text{C}$)
 $L=12 \text{ liter/m}^3$

Exempel: vct 0,70: $C = 250 \text{ kg/m}^3$

$\alpha=0,25$ (ungefär 3 dygns ålder vid $+5^\circ\text{C}$)
 $L=4 \text{ liter/m}^3$

$\alpha=0,50$ (ungefär 7 dygns ålder vid $+5^\circ\text{C}$)
 $L=8 \text{ liter/m}^3$

Beräkningen visar att 4 à 6 liter vatten per m^3 teoretiskt sett skulle kunna sugas in under de första tre dygna och 8 à 12 liter per m^3 under den första veckan om temperaturen är $+5^\circ\text{C}$. Vid högre temperatur är den möjliga insugningen några liter högre. Mera vatten kan i princip sugas in i den högvärdigare betongen. Insugningen får två negativa effekter:

1. Den självuttorkning i högvärdig betong som normalt skulle ha skett om betongen inte utsatts för vatten (se kapitel 4) kan eventuellt minska eller helt utebli.
2. Vatteninsugningen fördröjer starten av uttorkning utåt. Detta innebär även att betongen är tätare på grund av ökad hydratation när uttorkning väl startar.

Kunskapen om hur stor effekt en tidig nederbörd har på betongens uttorkning är dåligt känd vilket är bakgrunden till denna studie.

Det experimentella arbetet i denna studie har utförts av Andreas Abrahamsson och Kristian Tammo. Resultaten finns publicerade i examensarbetet (Abrahamsson & Tammo 2003).

5.2 Syfte

Syftet med denna studie var att undersöka hur betong med olika vct påverkas av regn i samband med gjutning. Inverkan av regnets varaktighet studerades också. Särskilt intressant ansågs det vara att undersöka mängden vatten som betong med låga vct tar upp innan den hunnit bli ”tät” på grund av hydratation.

5.3 Försöksuppläggning

I denna studie provades betong med 5 olika vattencementtal, vct. Dessa var 0,35; 0,40; 0,45; 0,55 samt 0,70. Av varje betong tillverkades 5 provkroppar. En av dessa fungerade som referens utan att utsättas för vatten. Övriga fyra provkroppar utsattes för vatten med olika varaktighet.

Vattnet påfördes 3 tim efter gjutning och hade en varaktighet av 1, 2, 4 resp. 7 dygn. Provkropparna lagrades i 5°C och 80 % RF under de första fyra veckorna, därefter skedde lagring i 20°C och 60 % RF.

Uttorkningen av provkropparna registrerades med RF-givare placerade 15 mm från ytan samt på ekvivalent mätdjup vilket var 48 mm (Begreppet ekvivalent mätdjup definieras i avsnitt 1.5.1).

5.4 Betongtillverkning

5.4.1 Delmaterial

Cement:	Slite Byggcement	(CEM II/A-LL 42,5 R)
Ballast:	Grus, Åstorp	0- 8 mm
	Krossad kvartsit, Hardeberga	8-12 mm
	Krossad kvartsit, Hardeberga	12-16 mm
Tillsatsmedel:	Flyttillsats, Cementa F 92 M, Torrhalt 35 %	

5.4.2 Betongrecept

Betongrecepten som användes presenteras i tabell 5.1. De baserades på recept som erhöles från en av Sveriges största betongtillverkare. De nominella vattencementtalen är inte justerade med avseende på flyttillsatsens vatteninnehåll. Verkligt vct som justerats med avseende på tillsatsmedlets vattenhalt framgår också av tabellen.

Tabell 5.1 Betongrecept angivet i kg/m^3 .

	Nominellt vct				
	vct 0,35	vct 0,40	vct 0,45	vct 0,55	vct 0,70
Cement	500	435	400	340	260
Blandningsvatten	175	174	180	185	182
Vatten från tillsatsmedel	4,55	3,39	3,12	2,21	1,69
Verkligt vct	0,359	0,408	0,458	0,551	0,707
Grus 0-8	853	882	889	908	972
Sten 8-12	426	441	444	454	486
Sten 12-16	426	441	444	454	486
Flyttillsats 92 M	1,4 %	1,2 %	1,2 %	1,0 %	1,0 %

Tillsatt mängd flyttillsatsmedel (inklusive vatten) anges i % av cementvikten

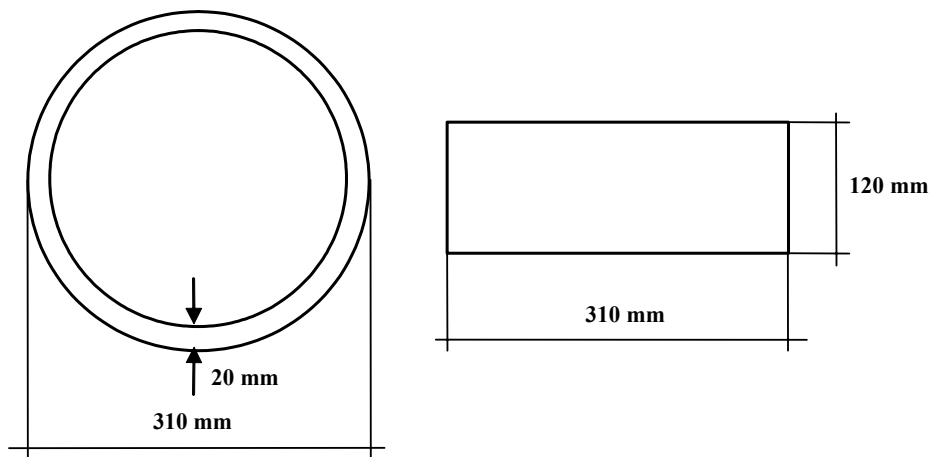
5.4.3 Betongblandning

Betongen blandades i satser om 90 liter i en 150-liters tvångsblandare. Först blandades de torra delmaterialen i ca. 2 minuter. Därefter tillsattes vatten och tillsatsmedel och blandningen fortsatte ca. 5 min. Betongkonsistensen vid avslutad blandning var halvflyt, vilket motsvarade ett sättmått mellan 150 och 200 mm.

5.5 Tillverkning av provkroppar

5.5.1 Gjutformar

Den kvarsittande gjutformen bestod av ett polypropenrör med dimensioner enligt figur 5.2.



Figur 5.2 Gjutformens dimensioner.

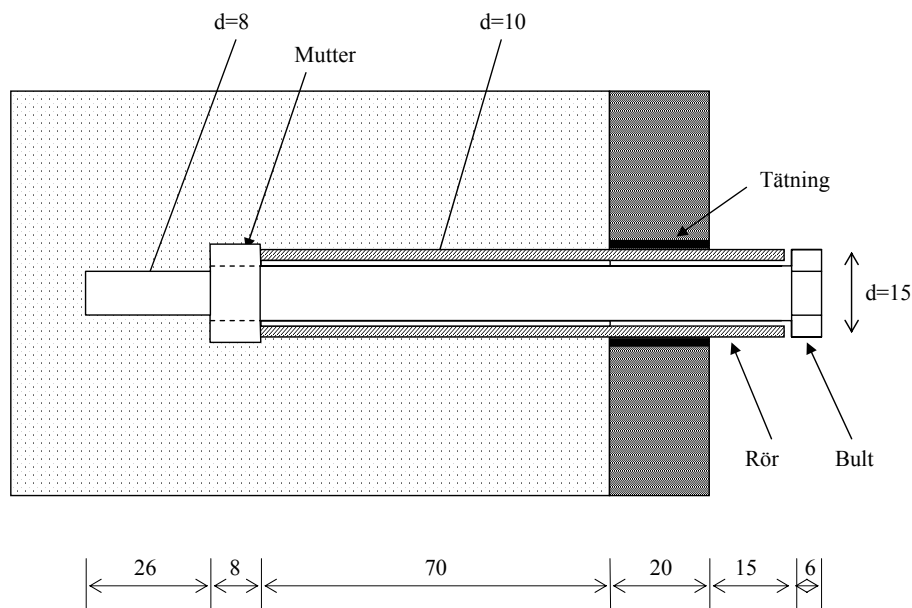
Röret var fastskruvat i en bottenplatta av formplyfa, se figur 5.3. Skarven mellan rör och bottenplatta tätades med silikon. Med den kvarsittande bottenplattan skapades enkelsidig uttorkning för provkropparna. Höjden 120 mm motsvarar därför ett bjälklag som torkar dubbelsidigt och är 240 mm tjockt, vilket är representativt för ett normalt betongbjälklag i dagens byggande.



Figur 5.3 Gjutform på bottenplatta med monterade mätrör och bultar.

I varje gjutform monterades mätrören till RF-givarna genom polypropenröret. Två mätrör placerades 15 mm respektive 48 mm från formens överkant. De försköts ca. 100 mm i horisontalled för att förhindra att givarna störde varandra.

För att undvika att betong trängde in i mätröret i samband med gjutning monterades en lång bult genom varje mätrör, se figur 5.4. Bultarna avlägsnades genom att skruvas ut då betongen hårdnat.



Figur 5.4 Principskiss över mätrörets montering. (Abrahamsson & Tammo 2003)

5.5.2 Gjutning

Vid gjutningen fylldes gjutformarna med betong. Provkropparna bordvibrerades och överytan jämnades av. Ett plåtrör, 250 mm i diameter och ca. 40 mm högt, placerades centriskt på de provkroppar som skulle vattenbegjutas, se figur 5.5. Plåtröret trycktes ned ca. 5 mm i betongen för att förhindra att vatten som sedan hälldes i röret rann ut. Därefter vibrerades provkroppen på nytt så att betongen slöt tätt kring plåten.



Figur 5.5 Provkroppar med vattenfyllda plåtrör.

5.6 Lagring av provkroppar

Direkt efter gjutningen placerades provkropparna i klimatrum för lagring. Plåtrören fylldes med vatten ca. 30 minuter efter gjutningen för de provkroppar som skulle utsättas för vatten. Vattnets varaktighet var 1, 2, 4 respektive 7 dygn. Referensproverna membranhårdades första dygnet genom att svepas in i tät plast, se figur 5.6. Därefter togs plasten bort och referensproverna fick torka fritt.



Figur 5.6 Membranhärdning av referensprovkroppar.

För att efterlikna verkliga förhållanden på svenska byggplatser under kalla årstiden lagrades provkropparna de första fyra veckorna i klimatet 5°C och 80 % RF. Vissa bekymmer med klimatanläggningen förekom vilket gjorde att klimatet under vissa perioder blev något annorlunda. Det verkliga klimatet redovisas i appendix 1.

Efter 4 veckor flyttas provkropparna och placeras i klimatet 20°C och 60 % RF

5.7 Fuktmätning

RF-givare av typ Vaisala HMP 44 användes för att mäta RF i provkropparna. RF och temperatur avläses med hjälp av ett avläsningsinstrument kopplat till givaren. Innan mätningarna påbörjades kalibrerades givarna i intervallet 75 - 95 % RF vid temperaturerna 5°C och 20°C. Kalibreringen gjordes i en fuktgenerator vid avd. Byggnadsmaterial vid LTH.

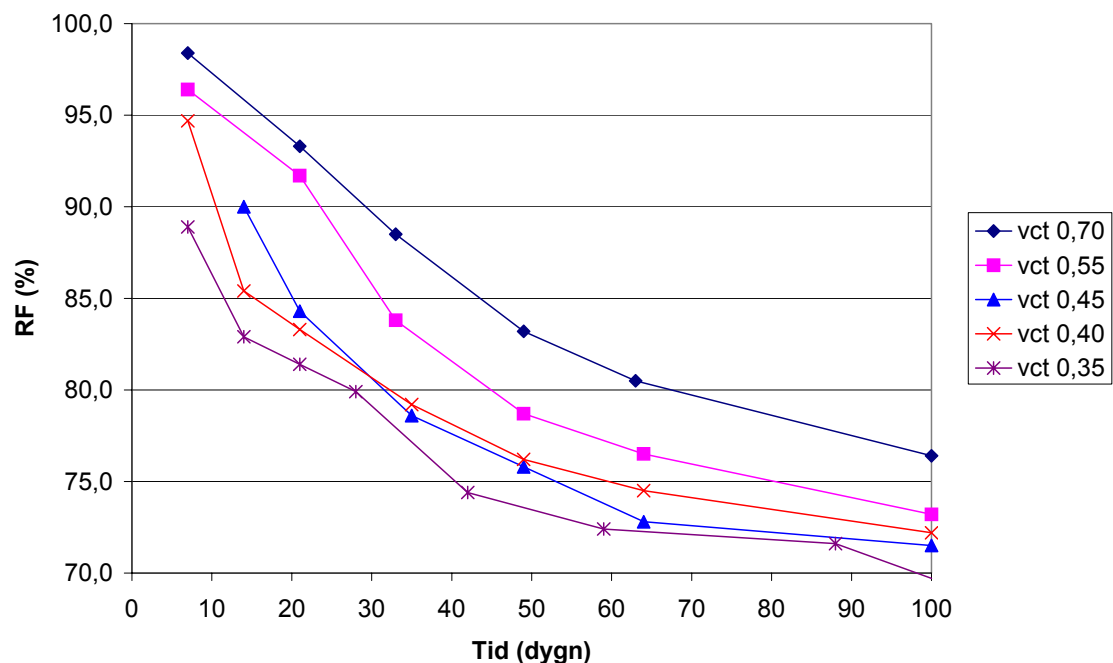
Givarna monterades i mätrören ca. 1 vecka efter gjutningen. På mät djupet 15 mm fick givarna sitta kvar under hela tiden. På grund av att antalet givare var begränsat var det nödvändigt att flytta de givare som användes på mät djupet 48 mm. Detta gjordes efter ett förutbestämt mätschema.

Givarna som flyttades monterades 24 timmar före avläsning vid de två högsta vct-talen (0,55 och 0,70). Vid övriga vct monterades givarna 48 timmar före avläsning. Skillnaden i tid berodde på att det tog längre tid för en betong med lågt vct att komma i jämvikt med den luft i mätröret vilken fuktmätningen utfördes.

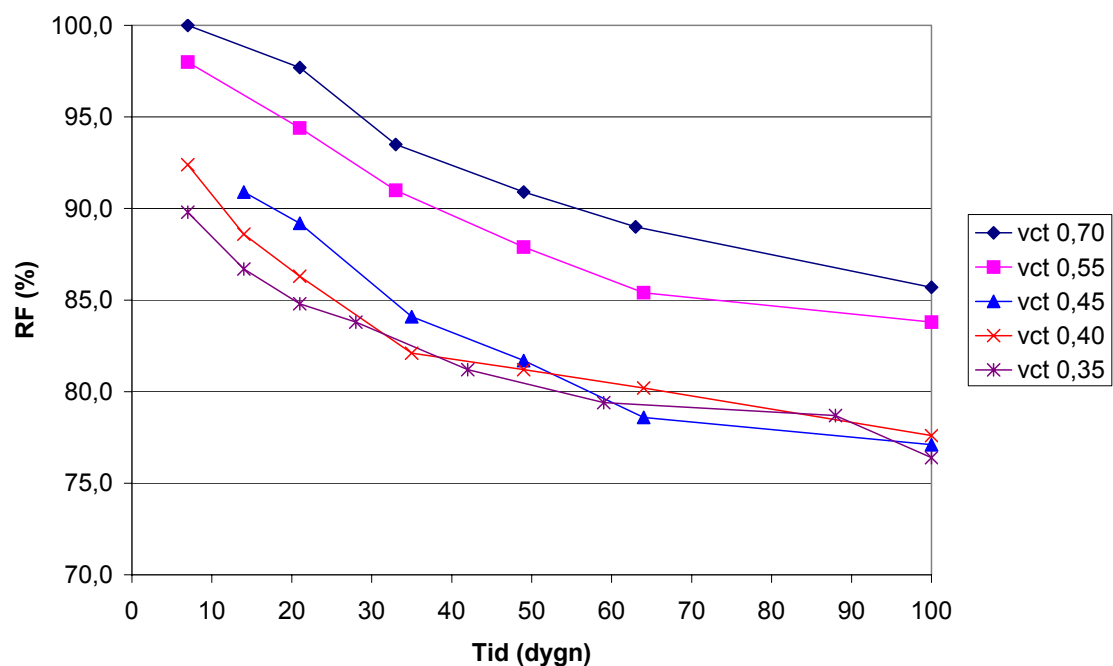
5.8 Resultat

5.8.1 Uttorkning av icke fuktbelastade referensprover

I figurerna 5.7-5.8 redovisas uttorkningen för referensprovkropparna, vilka inte utsatts för vatten. Samtliga referensprovkroppar membranhärdades första dygnet för att undvika tidig torkning och plastiska krympsprickor. Därefter fick de torka fritt.



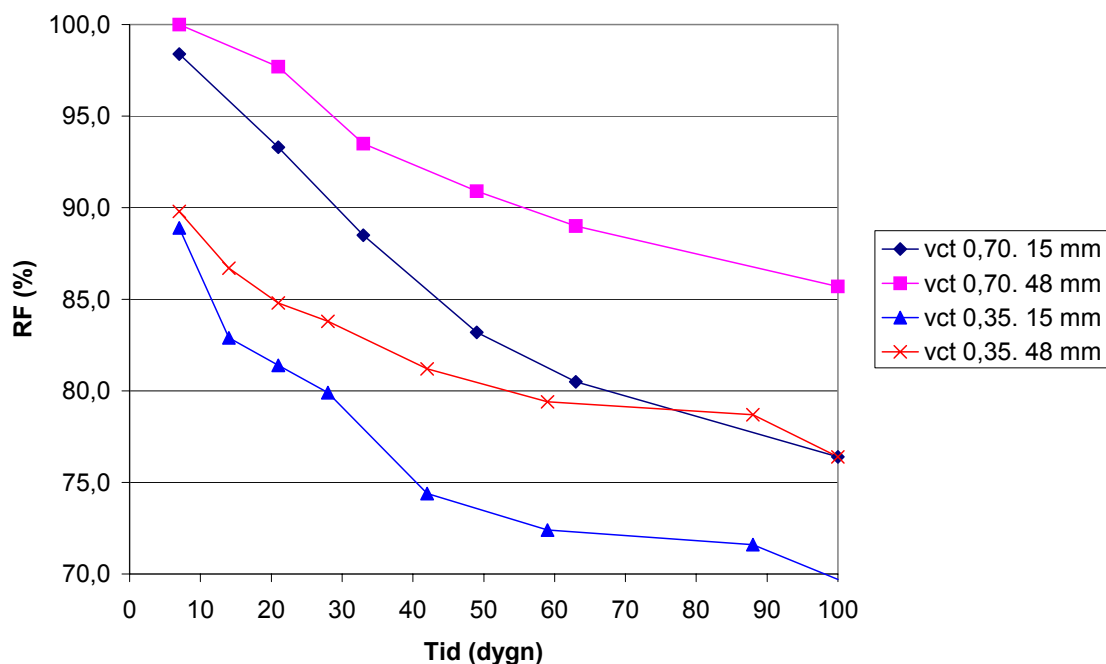
Figur 5.7 Uttorkningsförlopp hos icke regnbelastade provkroppar, mätdjup 15 mm.



Figur 5.8 Uttorkningsförlopp hos icke regnbelastade provkroppar, mätdjup 48 mm.

Resultaten visar att valet av vattencementtal har mycket stor betydelse för uttorkningsförloppet. De normala husbyggnadsbetongerna (0,55 och 0,70) torkar betydligt långsammare än betongerna med vct 0,45 eller lägre. På det ekvivalenta djupet 48 mm är betydelsen av vct tydligast. Denna effekt av vct bekräftar resultaten i kapitel 4.

I Figur 5.9 visas uttorkningen på båda mätnivåerna för det högsta och lägsta undersökta vct (0,70 respektive 0,35).



Figur 5.9 Jämförelse av uttorkningsförlopp för icke regnbelastade provkroppar med vct 0,35 och 0,70.

Figuren visar tydligt effekten av självuttorkning. Skillnaden är ca. 10 % de första 50 dygnen. Därefter lutar kurvorna mindre för betongen med lågt vct, vilket tyder på att självuttorkningen avstannat och uttorkning genom diffusion dominerar.

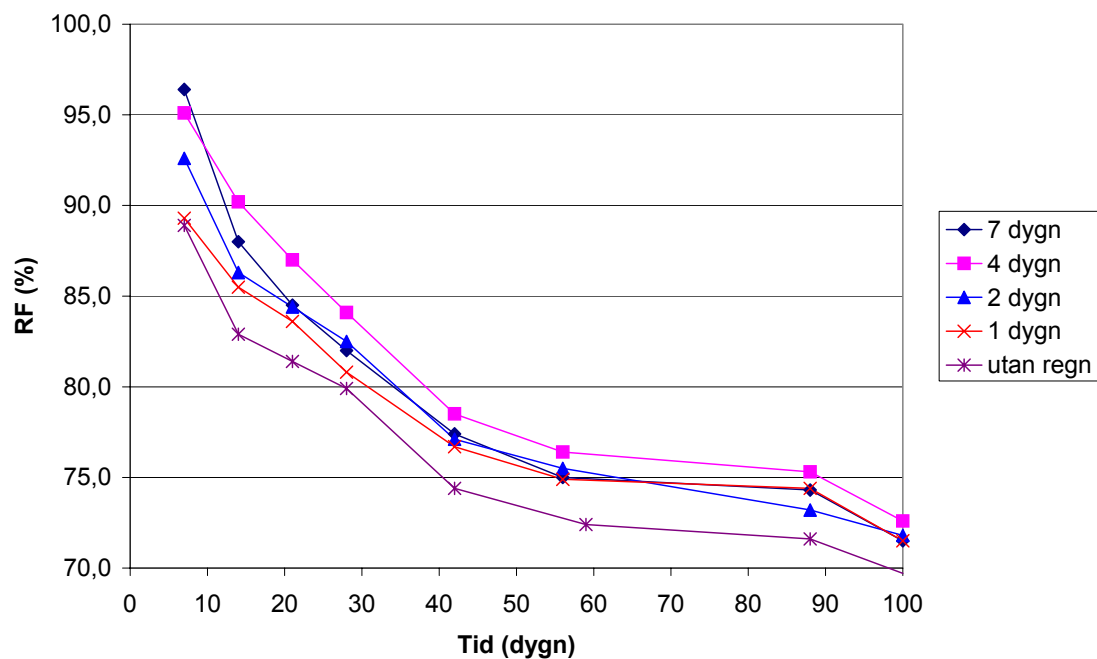
På grund av den öppnare porstrukturen har betongen med vct 0,70 högre ångpermeabilitet än betong med vct 0,35 vilket gör att uttorkningen utåt är snabbare. Det kommer dock att dröja mycket lång tid innan RF är lika för de båda betongerna.

OBS: Minskat vct innebär att porlösningens alkalitet ökar, vilket i sin tur medför att RF minskar. En viss del av RF-sänkningen vid sänkt vct beror på denna effekt. Denna kommentar gäller även resultaten som redovisas nedan.

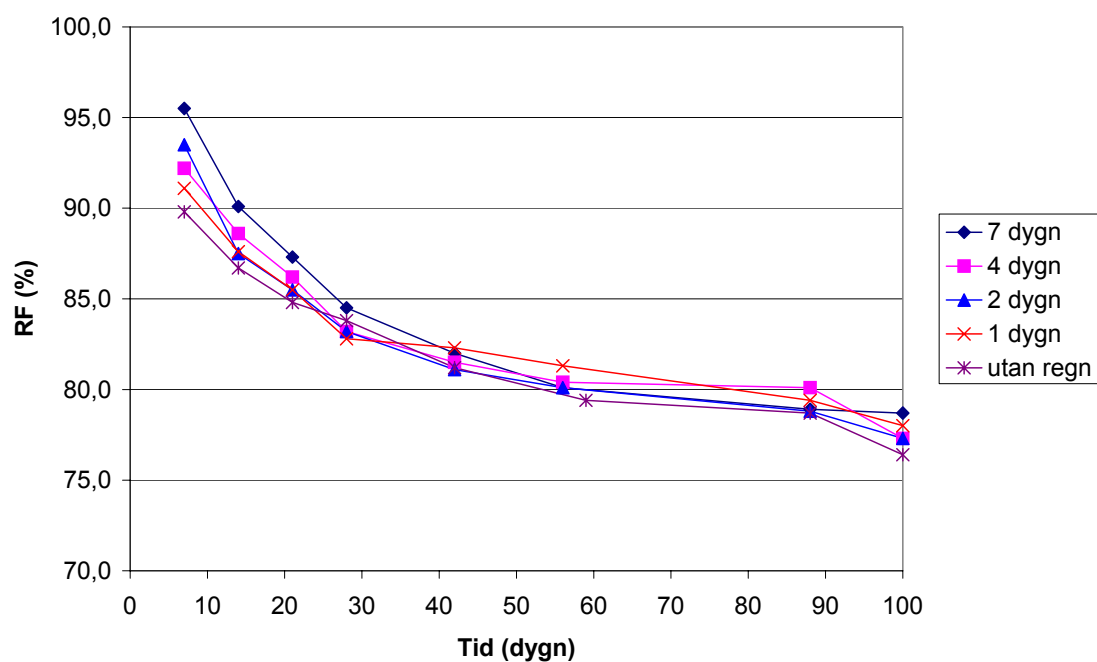
5.8.2 Uttorkning av fuktbelastade prover

I detta avsnitt redovisas hur simulerat tidigt regn inverkar på betongens uttorkning. Proverna utsattes redan 3 timmar efter gjutning för fritt vatten under olika lång tid (1, 2, 4 resp. 7 dygn).

I figurerna 5.10 – 5.19 visas även resultatet för de ej fuktbelastade referensproverna för att åskådliggöra effekten av fukt.

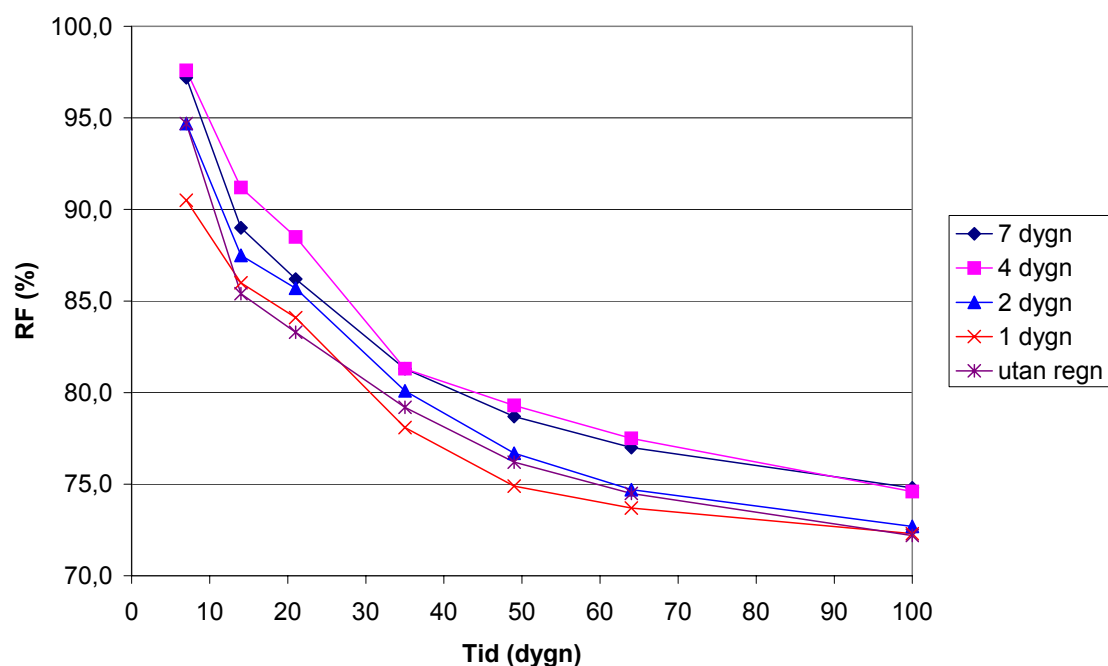


Figur 5.10 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,35, mätdjup 15 mm.

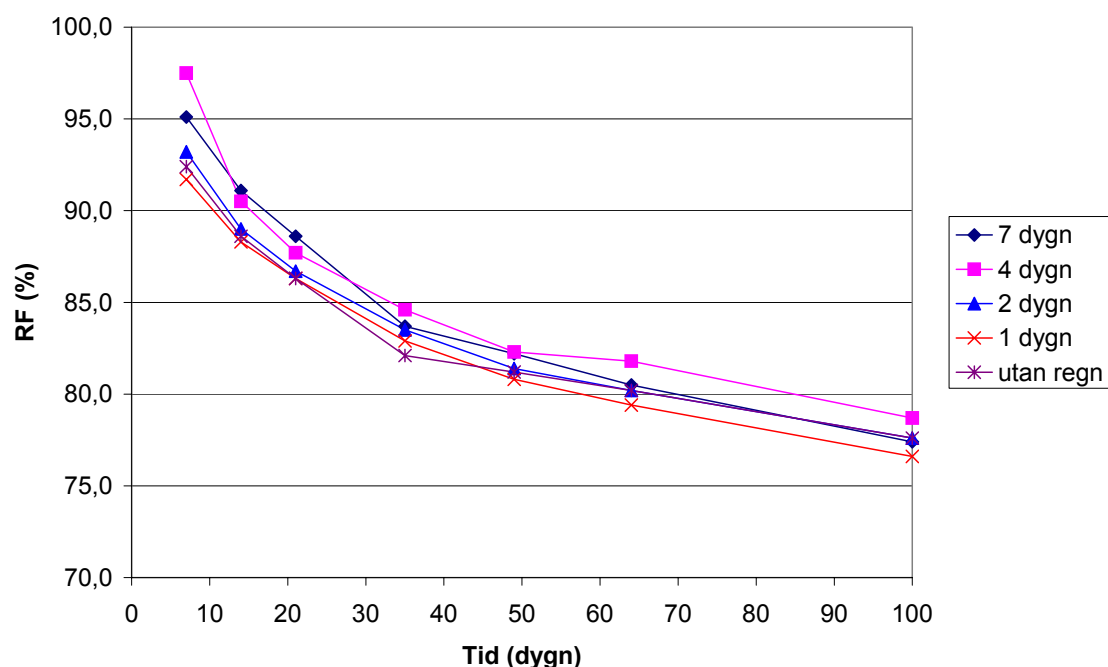


Figur 5.11 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,35, mätdjup 48 mm.

Vid vct 0,35 är inverkan av regnet påtaglig på 15 mm mätdjup. RF ökar med i förhållande till referensprovet med ca. 5 %. Ökad varaktighet hos "regnet" ger ökad RF-nivå. Däremot är inverkan mera begränsad på 48 mm djup.

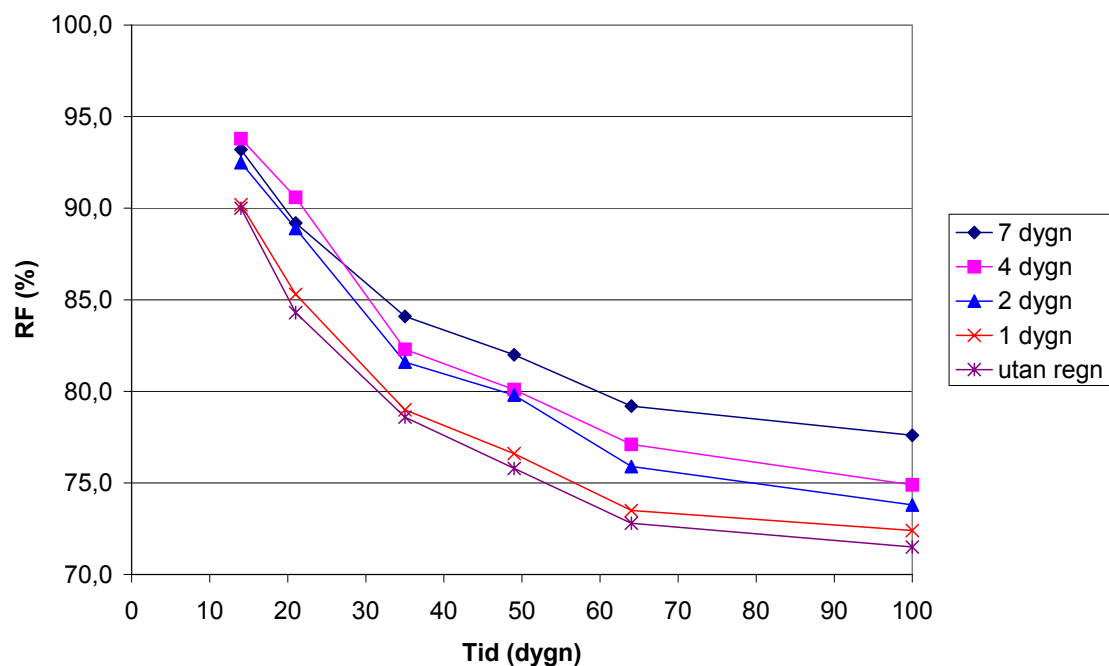


Figur 5.12 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,40, mätdjup 15 mm.

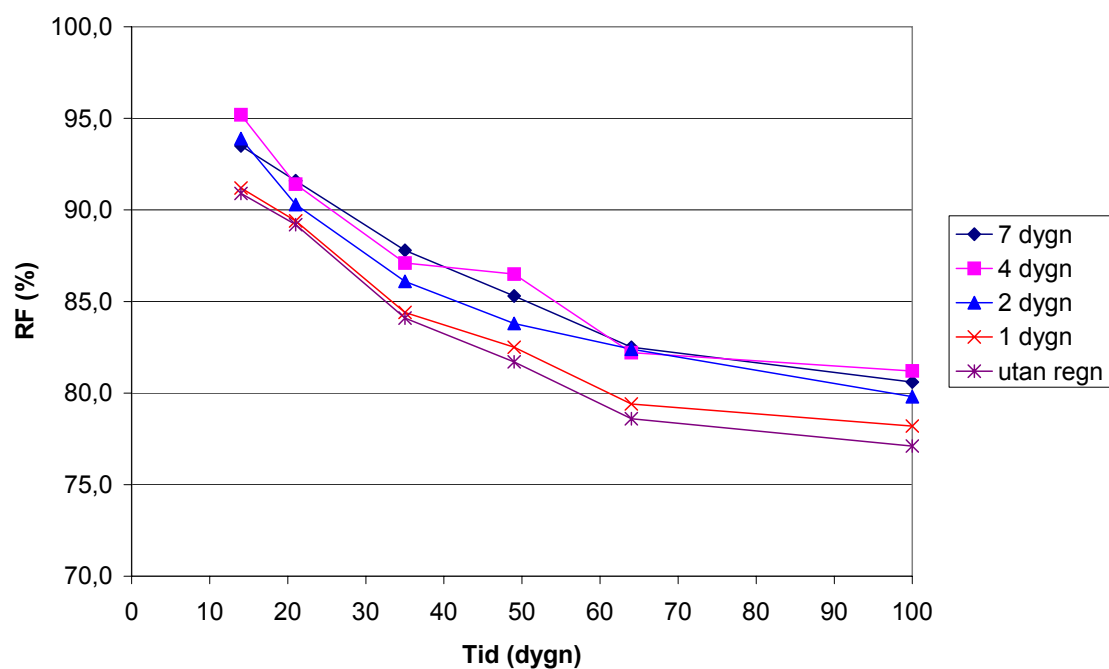


Figur 5.13 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,40, mätdjup 48 mm.

Vid vct 0,40 ger inverkan av regnet ca. 3 % RF-höjning vid 4 och 7 dygns belastning på 15 mm mätdjup. På 48 mm mätdjup är inverkan liten.

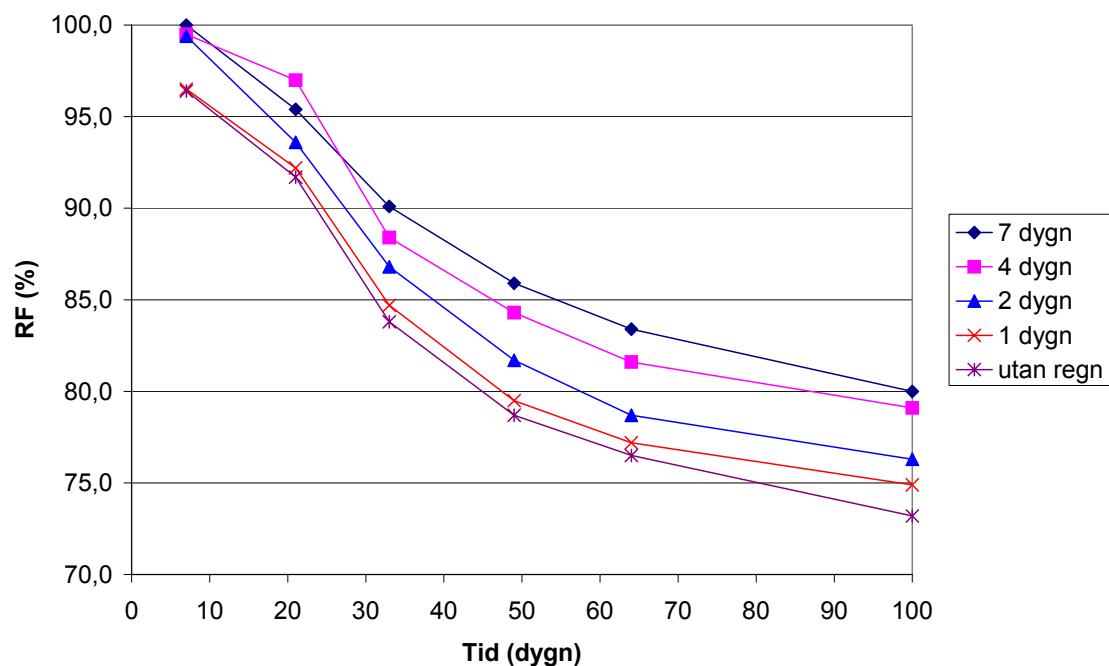


Figur 5.14 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,45, mätdjup 15 mm.

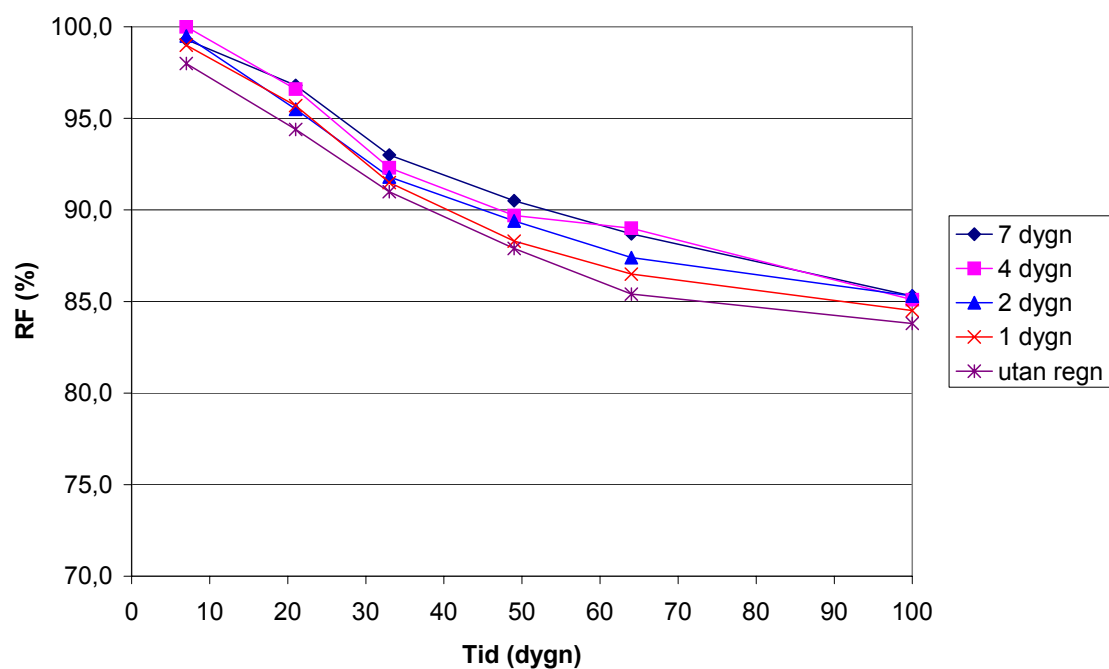


Figur 5.15 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,45, mätdjup 48 mm.

Vid vct 0,45 är inverkan av regn mer beroende av varaktigheten än vad som gäller för vct 0,35. 7 dygns nederbörd ger ca. 7 % ökning av RF på 15 mm mätdjup. Även på det ekvivalenta djupet 48 mm märks ”regnbelastningen” genom en RF ökning på ca. 3 %.

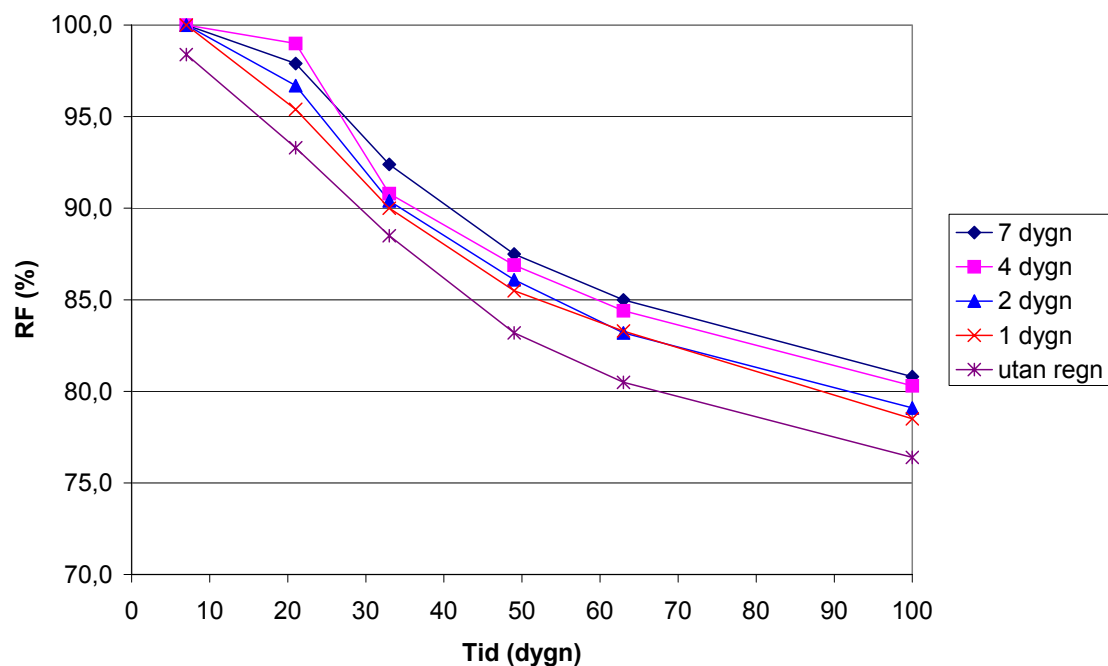


Figur 5.16 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,55, mätdjup 15 mm.

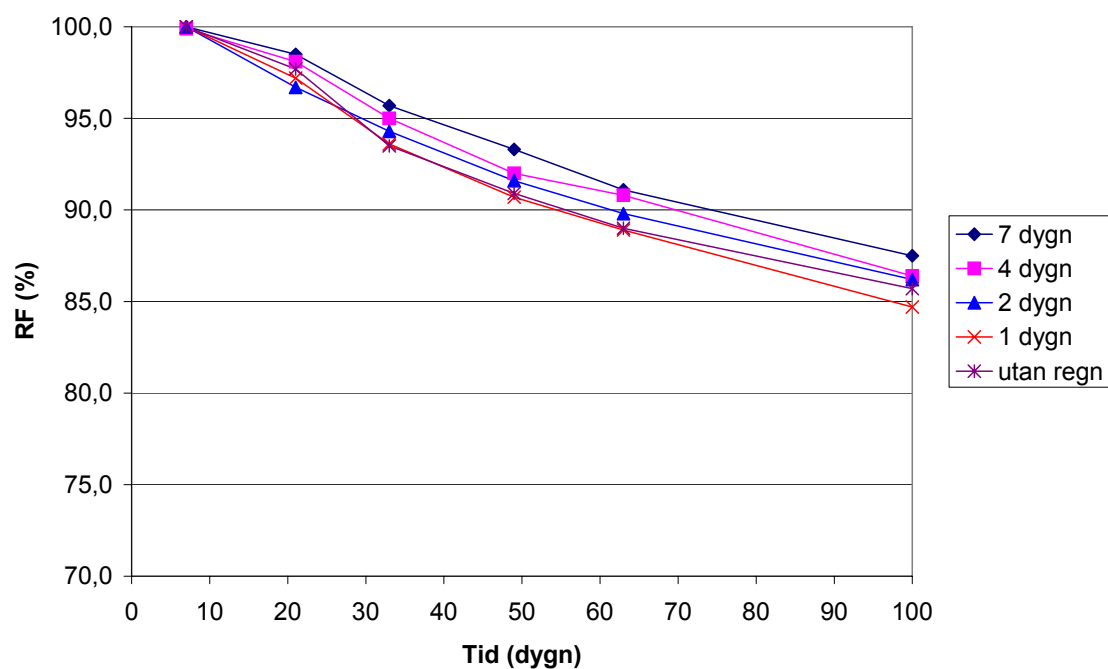


Figur 5.17 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,55, mätdjup 48 mm.

Vid vct 0,55 är regnets varaktighet av stor betydelse. På 15 mm mätdjup är RF-ökningen ca. 7 % vid 7 dygns regnbelastning. Även på 48 mm mätdjup har regnbelastningen en viss inverkan.



Figur 5.18 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,70, mätdjup 15 mm.

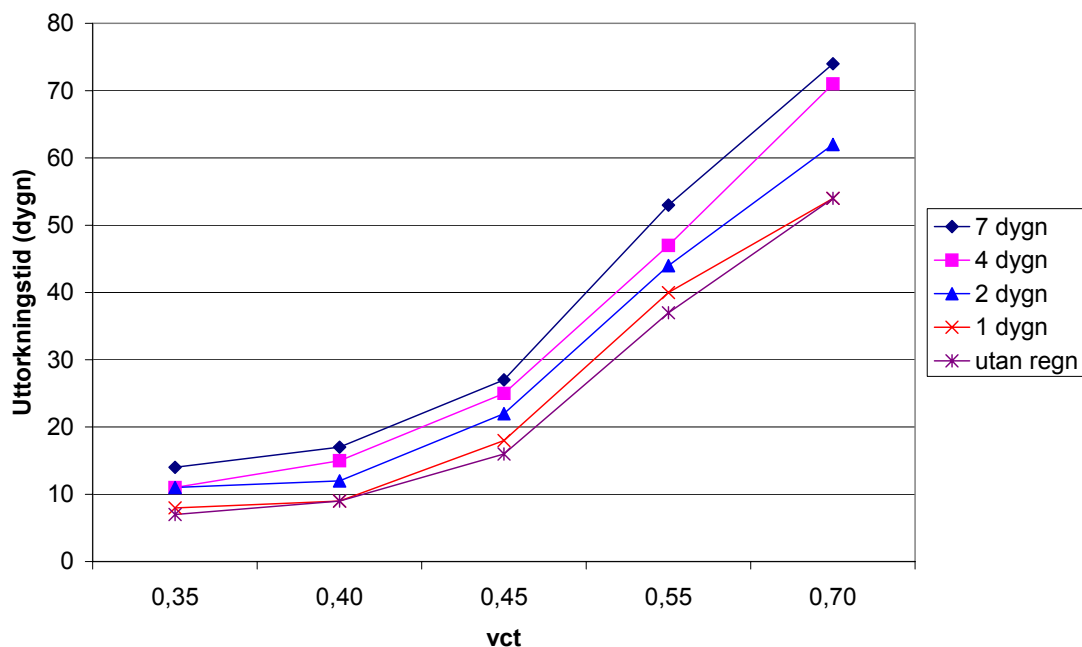


Figur 5.19 Inverkan av simulerad regnbelastning på uttorkningen för vct 0,70, mätdjup 48 mm.

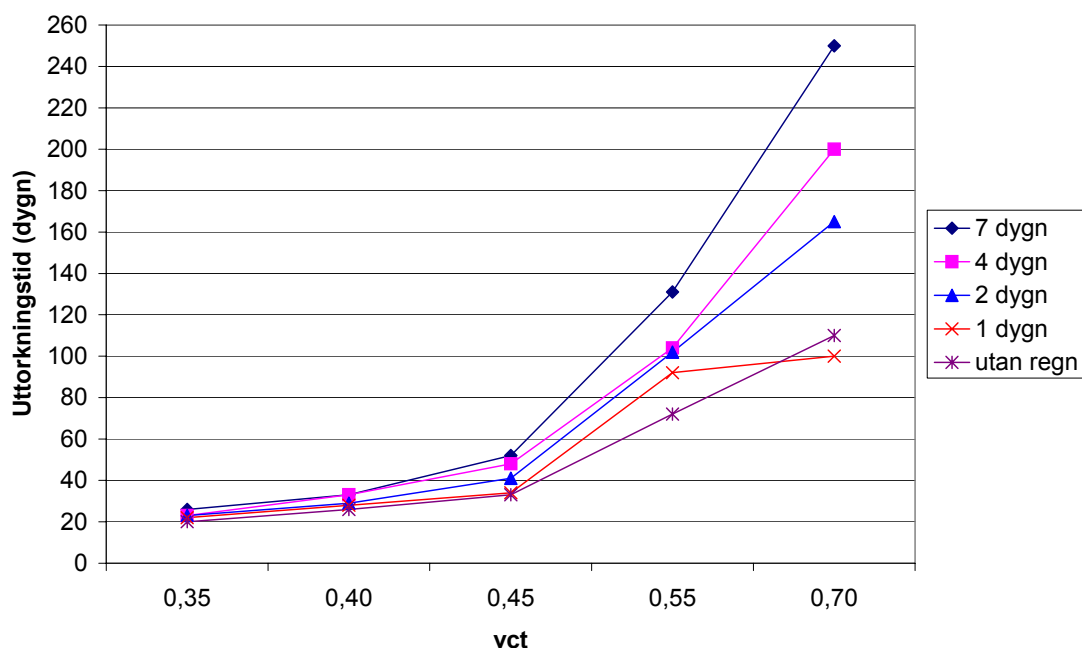
Sju dygns regn vid vct 0,70 ger ca. 5 % ökning av RF på 15 mm djup i förhållande till icke regnbelastat prov, samt ca. 3 % på 48 mm djup. Även för detta vct ger den längsta fuktbelastningen störst inverkan på uttorkningen.

5.8.3 Förlängd erforderlig uttorkningstid orsakad av regnbelastning

I detta avsnitt presenteras hur stor inverkan regnet har på uttorkningstiden för att nå de normalt tillämpade uttorkningskraven 90 % respektive 85 % RF på det ekvivalenta mätdjupet 48 mm.



Figur 5.20 Erforderlig uttorkningstid för att nå 90 % RF på ekvivalent djup.



Figur 5.21 Erforderlig uttorkningstid för att nå 85 % RF på ekvivalent djup.

Figuren visar att när RF-kravet är 85 % RF så är regnets inverkan mycket stor för vct 0,55 och 0,70. Detta beror på att uttorkningskurvorna vid dessa vct är mycket flacka i området kring 85 % RF. En liten ökning av RF förorsakad av regn får därför en stor effekt på uttorkningstiden. För vct 0,35 och 0,40 är fördröjningen ungefär lika lång som regnets varaktighet.

5.9 Slutsatser

Slutsatserna från denna studie kan summeras i följande punkter.

- Betongens vattencementtal, vct, är den parameter som har störst inverkan på uttorkningen. Detta gäller oavsett hur lång tid betongen utsatts för ”regnbelastning”.

Erforderlig uttorkningstid för att nå 90 % RF på ekvivalent djup är mindre än 3 veckor för vct 0,35 och 0,40. För vct 0,70 erfordras upp till 10 veckor vid lång regnbelastning.

Motsvarande torktider för att nå 85 % RF är 4 veckor resp 36 veckor.

- Vattenbelastning på betongytan i mycket tidig ålder (redan innan betongen härdat), t. ex. av regn, skapar inga väsentliga uttorkningsproblem hos betong med lågt vct ($\leq 0,40$). Det bör därför inte ge några uttorkningsproblem om man vattenhärdat denna typ av betong för att t ex undvika plastiska krympsprickor. Denna slutsats bekräftas av en annan studie (Gränne 2004) som undersökt vatteninsugning i betong med låga vattenbindemedelstal.
- Regn eller annan vattenbelastning i mycket tidig ålder har stor inverkan om fuktbelastningen har några dygns varaktighet, och betongens vct är lika med eller högre än 0,45.
- Vid högt vct (0,70), och när kravet på RF är 85 %, kan uttorkningstiden fördubblas i förhållande till referensbetongen om konstruktionen utsätts för 7 dygns vattenbelastning.
- Vid låga vct (0,35-0,40) motsvaras fördröjningen i uttorkningstid ungefär av vattenbelastningens varaktighet.

5.10 Diskussion

Låga vct

Orsaken till att regnpåverkan är så liten vid låga vct torde bero på att självuttorkningen är den dominerande torkmekanismen hos dessa betonger. Teoretiskt kan, som visades i avsnitt 5.1, maximalt ca. 6 liter vatten sugas in i sådan betong under 3 dygn och 12 liter under 7 dygn. I verkligheten torde enbart den övre delen av betongen kunna nå dessa insugningsnivåer eftersom betongens snabbt ökande täthet gör det svårt för allt vatten som teoretiskt skulle kunna sugas in verkligen sugas in över hela betongtvärsnittet.

När fuktbelastningen avbryts kommer fortfarande en stor självuttorkning att ske eftersom en stor del av hydratationen återstår. Inverkan av fuktbelastning på erforderlig uttorkningstid tycks vara i stort sett identisk med varaktigheten hos fuktbelastningen. Detta tyder på att självuttorkning fortgår trots att överytan hålls fuktig.

Höga vct

Vid högre vct är den möjliga insugningen under 3 respektive 7 dygn enbart vara ca. 4 à 8 liter per m³. Den öppna strukturen i ung betong med högt vct gör att detta vatten troligen också sugas in varvid RF i betongen blir ca. 100 % under hela fuktbelastningstiden. Fuktbelastningen gör att verklig torkstart därför förskjuts motsvarande fuktbelastningens varaktighet. När fuktbelastningen avbryts och betongen därför börjar torka utåt har strukturen hunnit bli tämligen tät varför uttorkningshastigheten blir lägre än i referensbetongen, som ju torkar redan efter 1 dygn.

Ju längre betongytan varit fuktig, desto tätare är betongen vid torkstart, och desto långsammare går därför uttorkningen. Detta förklarar den stora effekten av fuktbelastningens varaktighet på erforderlig RF när vct är högt.

I betong med högt vct är dessutom självuttorkningseffekten obetydlig, se kapitel 4.

6. Vatteninsugning i betong i samband med vattenskada

6.1 Bakgrund

Under en byggnads bruksskede är risken stor att konstruktionen vid något tillfälle utsätts för någon typ av vattenbelastning. Vattenläckage från läckande rörledningar och vitvaror är vanligt förekommande. Konsekvensen av den uppkomna vattenskadan kan bli kostsam och tidsödande att åtgärda. En vattenskada på ett betonggolv innebär normalt att man måste avlägsna golvbeläggningen för att kunna torka betongen. Betongen torkas med hjälp av tillförd värme till betongen och/eller avfuktning av omgivande luft. Torkåtgärden bestäms av vattenskadans omfattning och varaktighet samt av vilken ny typ av golvbeläggning som skall appliceras.

Genom att välja lämplig betongkvalitet som tar upp liten mängd vatten vid skadetillfället, kan man minska torkinsatsen vid en uppkommen vattenskada. En annan fördel med en betong som inte suger in vatten är att vattenskadan kan upptäckas tidigare vilket gör att den kan begränsas. En tänkbar nackdel med en tät betong kan emellertid vara att omgivande material kan utsättas för en högre fuktbelastning om inte vattenläckaget upptäcks i tid.

En delvis teoretisk analys av erforderliga torktider efter vattenskada har genomförts tidigare (Hedenblad 1993b). De torktider som anges där är oftast mycket långa, främst beroende på att man vid analysen antagit att skadan pågått så länge att hela eller en stor andel av betongkonstruktionen blivit vattenmättad över hela sin tjocklek. Dessutom analyseras endast betong med vct 0,6 och 0,7 i ovan nämnda skrift. Det fanns därför behov att ta fram torktider för mer realistiska fall vilket var orsaken till att undersökningen startades.

6.2 Syfte

Syftet med denna studie var att undersöka storleken på vatteninsugningen och därefter uttorkningen hos gammal, välhydratiserad betong av olika kvalitet. Syftet var även att undersöka inverkan av vattenbelastningens varaktighet.

6.3 Försöksuppläggning

I denna studie användes samma provkroppar som tidigare hade använts i undersökningen av regnets inverkan på betongens uttorkning, se kapitel 5. Provkropparna var ca. 5 månader gamla vid starten av detta försök. Enbart provkroppar från kapitel 5 vilka i tidigt skede utsatts för viss tids fuktbelastning före torkning under de ca. 5 månader de lagrats i laboratorieluft användes. Hydratationsgraden var därför hög i samtliga prover. Möjligen var hydratationsgraden något högre i de prover som fukthärdats under 7 dygn och något lägre i de prover som bara fukthärdades under 1 dygn. För beskrivning av fukthärdning hänvisas till kapitel 5. Fukthärdning kallas där ”regnbelastning”.

Betongerna i undersökningen hade följande vct: 0,35; 0,40; 0,45; 0,55 samt 0,70. Provkroppstjockleken var 120 mm. Vattnets varaktighet var 3, 7, 14 samt 28 dygn. Provkropparna lagrades i 20°C och 60 % RF under hela försöket. Fuktbelastning och uttorkning skedde ensidigt, mot överytan eftersom provkropparnas sidor och undersida var täckta med tät form. Uppfuktningen och uttorkningen av provkropparna registrerades med RF-givare placerade 15 mm från ovanytan samt på ekvivalent mätdjup 48 mm. Dessutom vägdes provkropparna kontinuerligt för att registrera insugen och uttorkad vattenmängd.

6.4 Provkroppar

Till detta försök användes samma provkroppar som i ett tidigare försök med simulerat regn, se kapitel 5. Där framgår också betongrecept samt hur provkropparna tillverkades. Provkropparna hade tät botten och täta sidor. På överytan var en plåtring monterad vilken hade använts som vattenbassäng vid det simulerade regnförsöket. Provkroppstjockleken var 120 mm. Eftersom uttorkningen är ensidig uppåt motsvarar proverna ett bjälklag med 240 mm tjocklek.

Varje form var försedd med två horisontella rör för RF-mätning. De var belägna på 15 resp. 48 mm avstånd från överytan. 48 mm motsvarar det s.k. ekvivalenta djupet, se avsnitt 1.5.1.

Exempel på provkroppar visas i figur 6.1. Totalt användes 20 st. provkroppar, fyra per vct.



Figur 6.1 Provkropparmed vattenbassänger till vatteninsugningsförsök.

Provkropparna var placerade i klimatet 20°C och 60 % RF under hela försöket.

6.5 Vattenbelastning och vägning

Fuktskadan simulerades genom att vatten hälldes i bassängerna ovanpå provkropparna. Innan vattnet hälldes på vägdes samtliga provkroppar. Resultatet användes som ”startvärde” vid uträkningen av insugen vattenmängd. Bassängerna ovanpå betongen vattenfylldes samtidigt för samtliga provkroppar. 48 timmar efter det att vattnet applicerats vägdes provkropparna för beräkning av vattenupptagningen. Före vägningen avlägsnades vattnet som stod i bassängen på provkroppen och betongytan torkades av med papper. Vikten noterades och bassängerna vattenfylldes återigen. Vägningarna fortsatte därefter enligt ett visst tidsschema.

Vägningarna fortsatte efter det att vattnet avlägsnats och provkropparna torkade ut.

Genom alla dessa vägningar kunde såväl vattenupptagningen som uttorkningsförloppet beräknas.

6.6 Fuktmätning

RF-givare av typ Vaisala HMP 44 användes för att mäta RF i provkropparna. RF och temperatur avlästes med hjälp av ett avläsningsinstrument kopplat till givaren. Innan mätningarna påbörjades kalibrerades givarna i intervallet 70-95 % RF vid temperaturen 20°C.

Givarna monterades i mätören belägna på 15 och 48 millimeters djup tre dygn före avläsning av start-RF. Detta värde avlästes strax innan provkropparna utsattes för vatten.

6.7 Resultat

6.7.1 Fuktnivå före vattenbelastning

Provkropparna som användes till denna studie hade olika förhistoria eftersom de hade använts i en tidigare undersökning redovisad i kapitel 5. Det som skiljde dem åt var att de tidigare utsatts för vattenbelastning med varierande varaktighet och med start redan 3 timmar efter gjutning. Den varierande fukthärdningstiden kan ha en viss påverkan på resultaten.

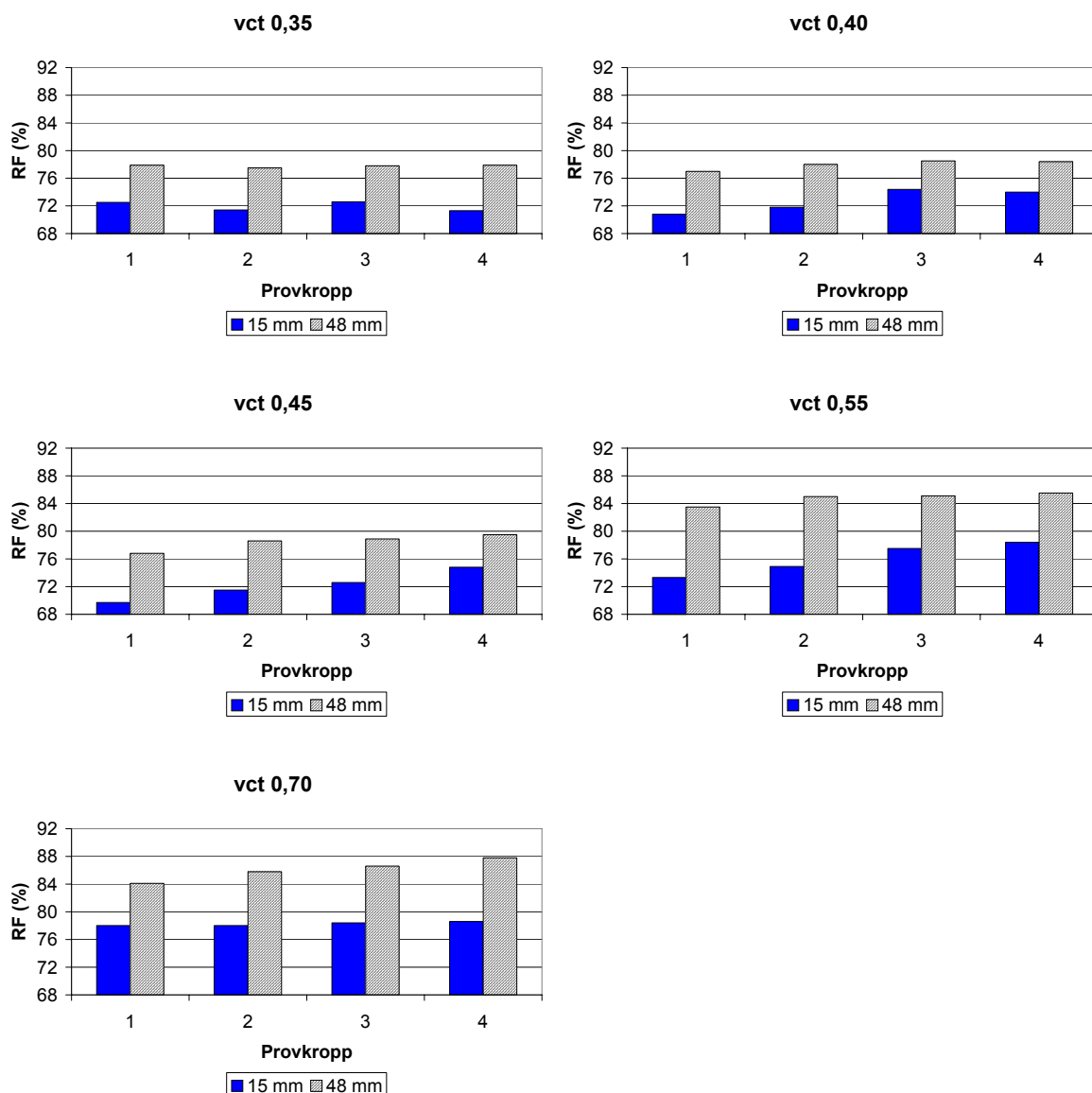
Följande tabell visar hur provkropparna var numrerade samt vilken vattenbelastning de tidigare haft och kom att ha i detta projekt. Tabellen gäller för samtliga vct.

Tabell 6.1 Beskrivning av provkroppar

Provkropp nr	Tidigare vattenbelastning ¹⁾	Denna studies vattenbelastning
1	1 dygn	3 dygn
2	2 dygn	7 dygn
3	4 dygn	14 dygn
4	7 dygn	28 dygn

1) Vattenbelastningen (d.v.s. vattenhärdningen) startade 3 timmar efter gjutning.

I figur 6.2 redovisas RF för samtliga provkroppar omedelbart före vattenbelastning.



Figur 6.2 RF för samtliga provkroppar på mätdjupen 15 och 48 mm omedelbart före vattenbelastning.

Av figuren framgår att prover som haft längst varaktighet av tidig fuktbelastning har högsta begynnelse-RF. Detta gäller alla vct utom 0,35 och i viss mån 0,40 vilket troligen beror på att självuttorkningen i dessa betongtyper är den dominerande uttorkningsmekanismen.

Skillnaden i fuktnivå mellan de 4 proverna av varje vct är emellertid inte anmärkningsvärt stor för någon betongtyp. Som mest skiljer RF på samma nivå med ca. 4 % mellan prov 1 och prov 4. Detta innebär att den initiella porfyllnadsgraden, vilken är mer intressant vid vattenuppsugning än RF, är ungefär lika hög i alla de fyra proverna på samma nivå.

För samtliga betongtyper gäller att ”ytan” (15 mm djup) är torrare än ”det inre” (48 mm) vilket visar att proverna inte är helt i fuktjämvikt när insugningen startar. Skillnaden i RF mellan ”yta” och ”det inre” uppgår som mest till ca. 7 % vid låga vct (0,45 och lägre) och ca. 10 % för de högre vct. Denna differens i RF ger en viss skillnad i initieffektiv porfyllnadsgrad.

Med hjälp av desorptionsisotermen, se figur 2.7, kan man räkna ut porfyllnadsgraden utifrån de start RF som presenterades i figur 6.2. Här följer ett par exempel.

Exempel:

- Vid vct 0,70 är RF för prov 4 ca. 88 % för ”inre” och 78 % för ”yta”.

Detta ger porfyllnadsgrader av ca. 65 % och 49 %.

- Vid vct 0,40 prov 2 gäller följande värden: RF ca. 78 % (inre) och 72 % (yta).

Motsvarande porfyllnadsgrader är ca. 68 % och 61 %.

Betongen med vct 0,70 har således något högre porfyllnadsgrad då vatteninsugningen startar.

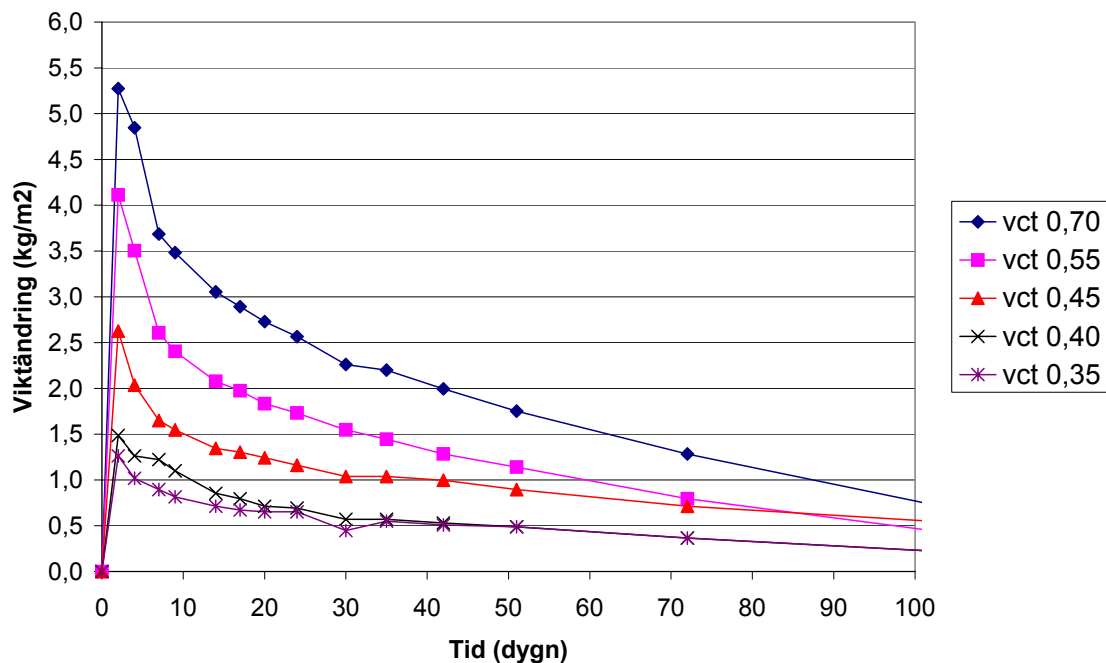
Startfuktnivåerna och -profilerna är inte helt representativa för en gammal betongkonstruktion eftersom denna före vattenskadan kan förväntas ha kommit i jämvikt med omgivningen. När det gäller fuktnivån är emellertid skillnaden mellan prov och verklig konstruktion inte så stor. Medel-RF i prover på 48 mm djup är ca. 80 %. I en gammal konstruktion kan man förvänta sig något lägre RF.

6.7.2 Insugen och uttorkad vattenmängd

I detta avsnitt redovisas resultatet av de vägningar som utfördes för att undersöka dels hur mycket vatten som sögs in, och dels hur mycket vatten som därefter torkade ut. Mängden vatten uttrycks i kg/m^2 . Ytan har därvid antagits motsvara arean hos ”vattenbassängen” d.v.s. plåt cylindern. Denna är $0,049 \text{ m}^2$.

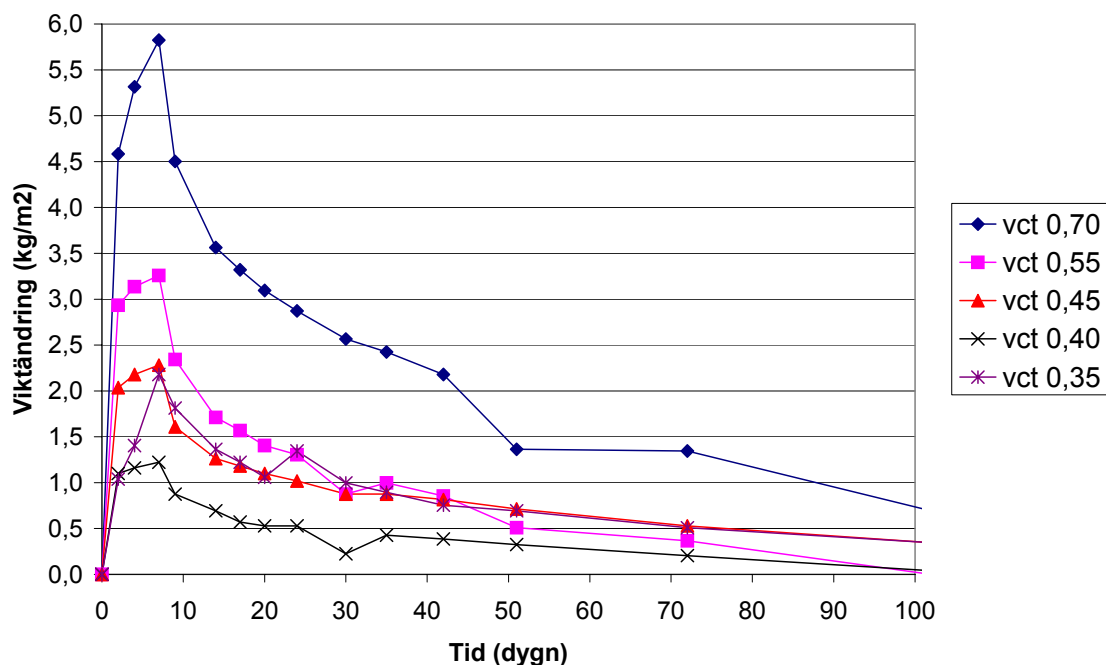
I verkligheten är effektiv sugyta något större eftersom vatten även sugas snett in i betongen som befinner sig utanför själva bassängen. Vid insugningen kan viss avdunstning ske genom betongytan som befinner sig utanför plåtröret. Betongytan utanför plåtröret borde ha varit förseglad vid försöket. Vid uttorkningen efter avslutad vatteninsugning är effektiv yta hela provkroppsytan d.v.s. $0,057 \text{ m}^2$.

Resultaten bör justeras med avseende på effektiv sugarea om de skall användas i beräkningssammanhang i framtiden. Justeringen kan utföras med hjälp av datorverktyg som beräknar fuktflöden i två eller tre dimensioner. Liknande justering har gjorts i (Hedenblad 1993a).



Figur 6.3 Vattenabsorption och vattenavgång vid 3 dygns vattenbelastning.

Figur 6.3 visar att den insugna vattenmängden är vct-beroende. Ju högre vct betongen har desto större mängd vatten suger den in. Vct 0,70 suger in nästan 5,5 liter per kvadratmeter. Denna effekt av vct beror naturligtvis på att den för vatteninsugning tillgängliga porvolymen ökar med ökat vct.

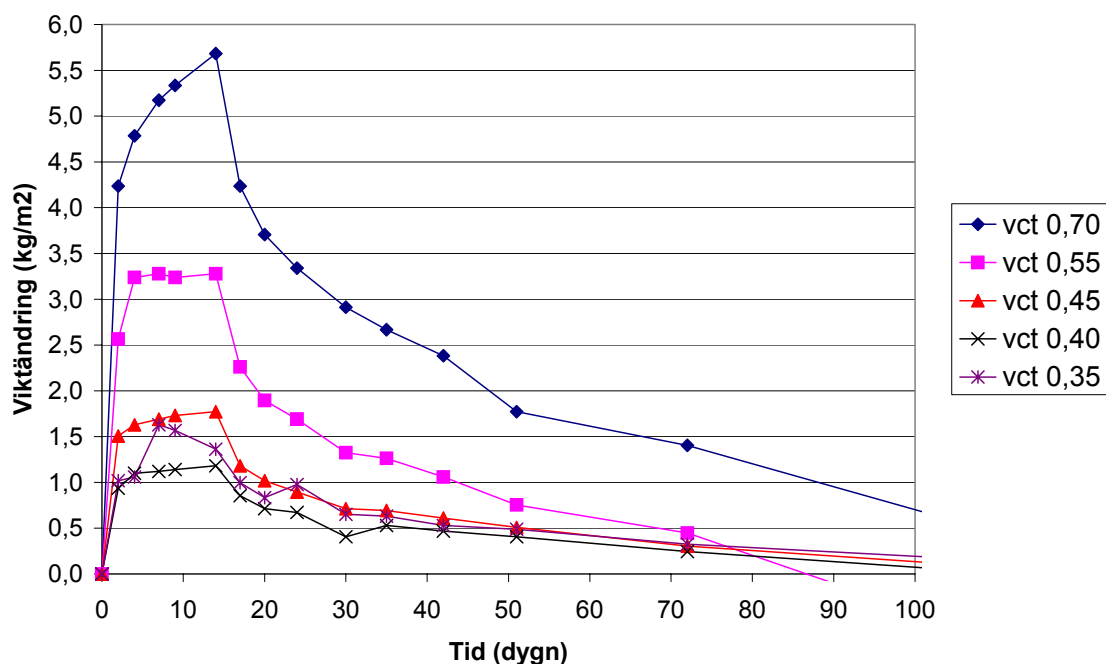


Figur 6.4 Vattenabsorption och vattenavgång vid 7 dygns vattenbelastning.

Vid 7 dygns vatteninsugning är inverkan av vct principiellt densamma som för 3 dygns vatteninsugning bortsett från betong med vct 0,35 som har större vatteninsugning än betong med vct 0,40. En förklaring till detta kan vara mikro-sprickbildning. En annan möjlighet är att betongen med vct har en högre initiell uttorkningsgrad på grund av en högre självuttorkning. Det finns helt enkelt mer porutrymme för vattenupptagning. Förklaringen är dock osannolik vilket visas av följande beräkning: Skillnaden i upptagen vattenmängd mellan vct 0,35 och 0,40 är ca. $0,6 \text{ kg/m}^2$. Den maximalt möjliga självuttorkningen är ca. 20 liter/m^3 vid vct 0,35 och ca. 18 liter/m^3 för vct 0,40. Det innebär att skillnaden i tillgänglig porvolym i provet understiger 0,02 liter.

Huvuddelen av vattenabsorptionen sker redan under det första dygnet. Därefter sker en långsam absorption som pågår under hela sugtiden.

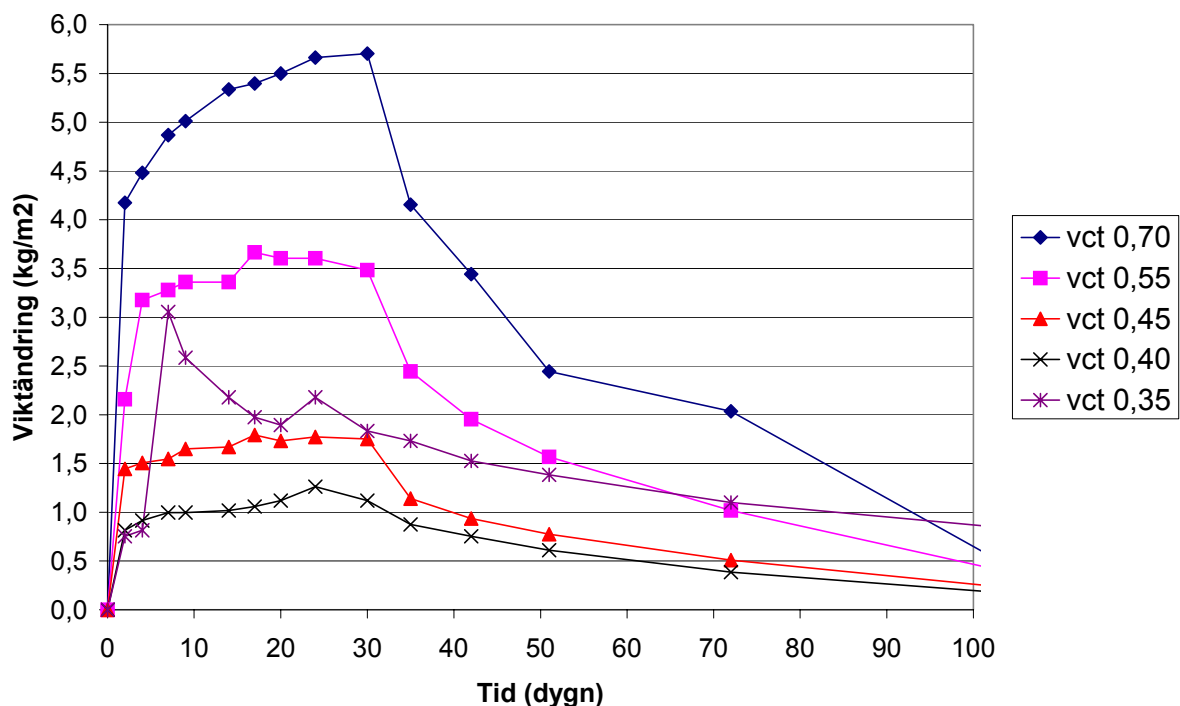
För de tre lägsta vct-nivåerna är totala vattenabsorptionen högre än vid tre dygns vattenbelastning. För betongerna med de båda högsta vct-nivåerna är insugningen ungefär densamma vilket visar att 3 dygn kan vara tillräckligt för att vattenmätta dessa mer öppna betonger.



Figur 6.5 Vattenabsorption och vattenavgång vid 14 dygns vattenbelastning.

Vatteninsugningen följer samma mönster som för sugtider 3 och 7 dygn. Även vid 14 dygns vattenbelastning suger betongen med vct 0,35 in mer vatten än betongen med vct 0,40.

För de båda högsta och båda lägsta vct är maximal fuktupptagning är ungefär densamma som för de kortare sugtiderna. För vct 0,45 är vattenupptagningen något lägre vilket inte är helt logiskt men kan förklaras om den initiella fuktnivån är högre. Figur 6.2 talar dock mot denna förklaring.



Figur 6.6 Vattenabsorption och vattenavgång vid 28 dygns vattenbelastning.

Vid 28 dygns vattenbelastning suger betong med vct 0,35 betongen in mer vatten än betong med såväl vct 0,40 som vct 0,45. Ett annat svårförklarigt fenomen är att betongen med vct 0,35 minskar i vikt trots pågående vattenbelastning. Någon rimlig förklaring till dessa fenomen har inte hittats.

Uppsugen vattenmängd kan översättas till ökning av porfyllnadsgrad. Denna kan beräknas ur:

$$\Delta S = \frac{Q_w}{V_p} = \frac{Q_w}{C \cdot (vct - 0,19 \cdot \alpha) \cdot 0,12}$$

ΔS = ökning av porfyllnadsgraden (m^3/m^3)

V_p = total porvolym i betongen (m^3)

Q_w = upptagen vattenmängd (kg/m^2)

C = cementhalten (kg/m^3)

α = hydratationsgraden

0,12 = provets tjocklek (m)

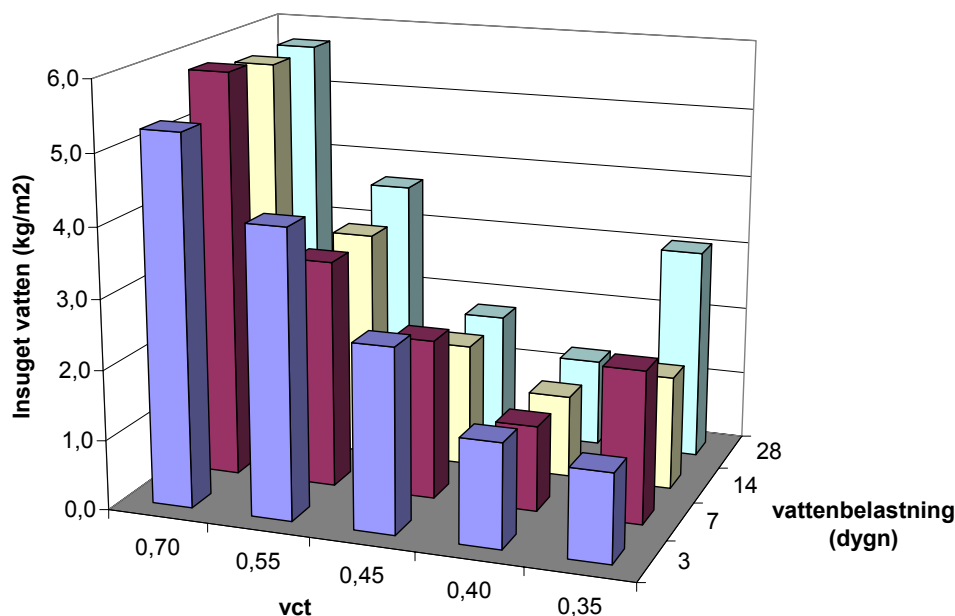
Förutsättningen bakom ekvationen är att allt upptaget vatten fördelas jämnt över hela provkroppstjockleken vilket knappast är riktigt, åtminstone inte för betongerna med låga vct. Dessutom antas att insugning sker över en betongarea som motsvarar den sugarea som använts vid beräkningen av vattenupptagningen, d.v.s. "bassängarean".

Exempel:

- Vattenupptagningen $5,5 \text{ kg}/\text{m}^2$ för prov 1 av vct 0,70 ger $\Delta S = 0,31$ (C är $260 \text{ kg}/\text{m}^3$ enligt blandningsreceptet, α antas vara 0,70). Beräkningsmässigt enligt avsnitt 6.7.1 är tillgänglig porfyllnadsgrad baserat på 48 mm djup ca. **0,35**. Den observerade vattenupptagningen är därför rimlig och provet har nästan blivit vattenmättat.

- Vattenupptagningen $1,5 \text{ kg/m}^3$ för prov 1 av vct 0,40 ger $\Delta S=0,10$ (C är 435 kg/m^3 enligt blandningsreceptet, α antas vara 0,60). Tillgänglig porfyllnadsgrad baserat på 48 mm djup är ca. **0,32**. I denna täta betong räcker därför inte 3 dygns vattenabsorption till att mätta porsystemet.

Figur 6.7 visar en sammanställning av den maximala vatteninsugningen för alla provkroppar.



Figur 6.7 Maximalt insugen vattenmängd vid olika lång tids vattenbelastningar för betong med olika vct.

Figur 6.7 visar att vattenbelastningens varaktighet inte har så stor betydelse eftersom vatteninsugningen sker snabbt. Betongens vct har stor betydelse för vatteninsugningens storlek; minskat vct ger minskad vattenabsorption. Vissa vct suger in mer vatten vid kort vattenbelastning än vid lång, vilket kan tyckas onaturligt. Detta kan dock förklaras med att fukttillståndet i provkropparna varierade vid vattenbelastningens start, se figur 6.2. Betongen med vct 0,35 har ett svårförklarligt beteende. Denna betong visade sig kunna ta upp stora mängder vatten vid långvarig vattenbelastning.

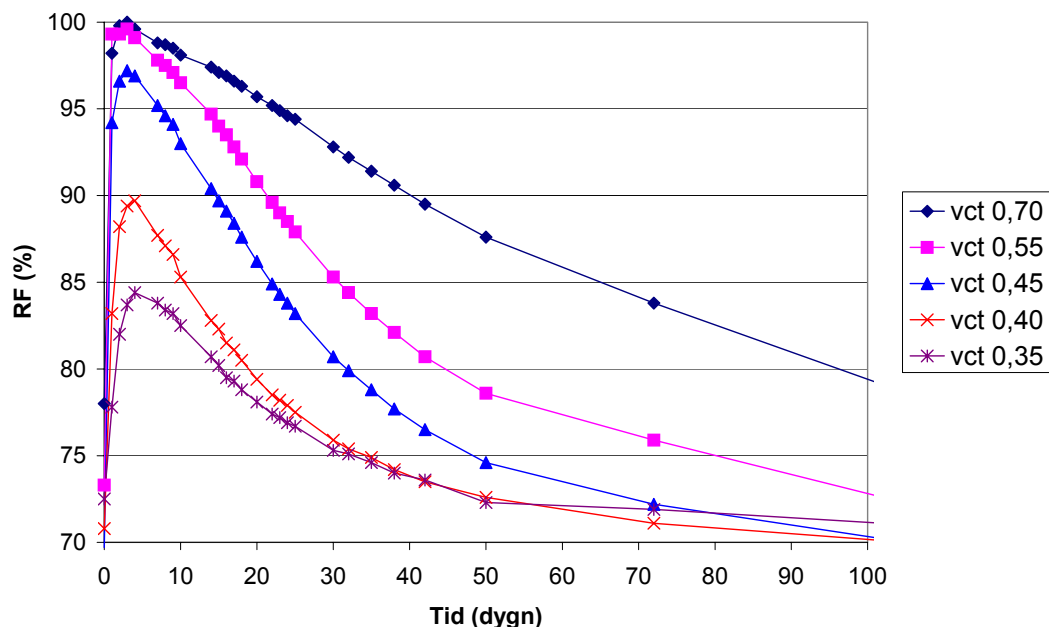
Följande tabell visar hur mycket vatten som kan tas upp av respektive betongtyp vid upp till 28 dygns vattenbelastning. Värdena baseras på en viss uttorkningsgrad när försöket startade. Om torkningen drivits längre hade säkerligen vattenabsorptionen ökat något medan en lägre uttorkningsgrad hade gett mindre mängd uppsuget vatten.

Tabell 6.2 Vattenuppsugningsförmåga hos olika betongtyper vid torknivå före absorptionens start enligt figur 6.2.

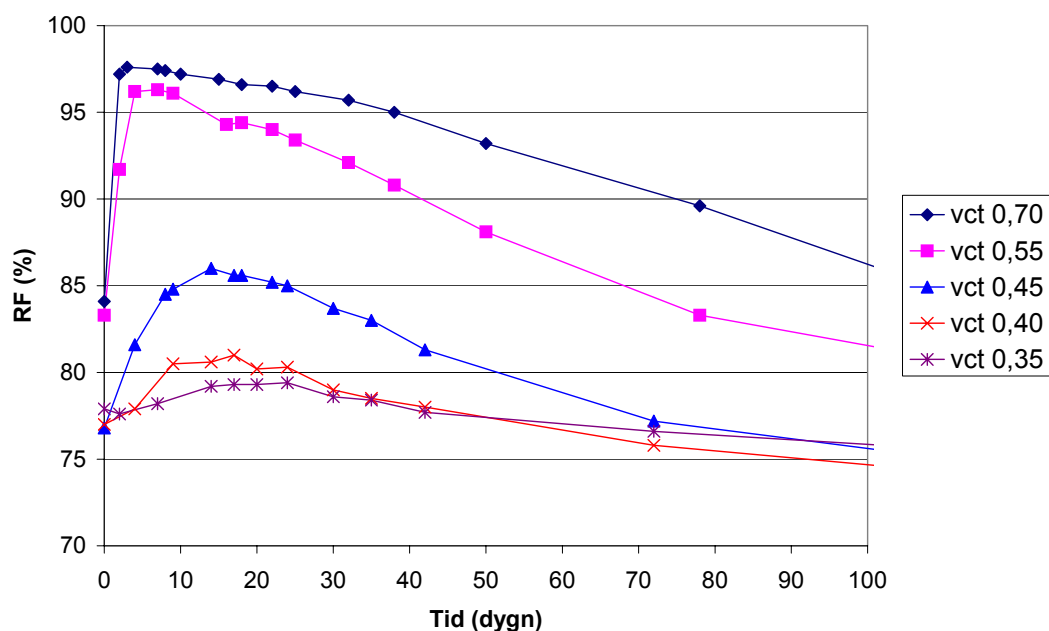
Betongtyp	Uppsugningsförmåga (l/m^2)
vct 0,70	5,0-6,0
vct 0,55	3,0-4,0
vct 0,45	1,5-2,5
vct 0,40	1,0-1,5
vct 0,35	1,5-3,0

6.7.3 Förändring av relativ fuktighet, RF

Figur 6.8-6.15 visar hur betongens RF påverkades av vattenbelastningen och den omedelbart därefter följande uttorkningen. Mätningarna är utförda på två olika mätdjup, 15 respektive 48 mm från den vattenbelastade betongytan.



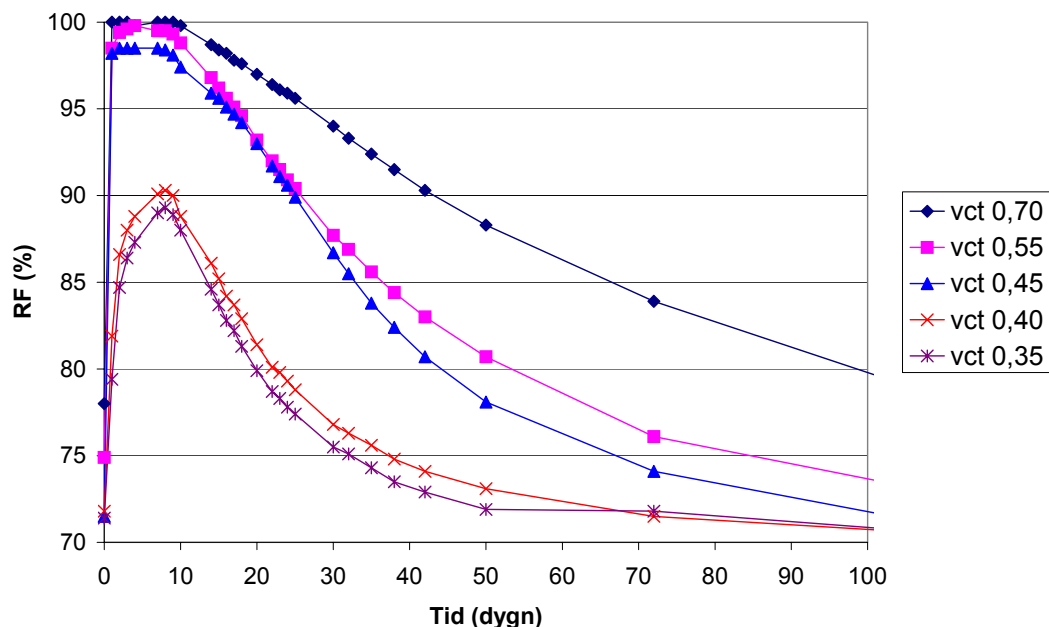
Figur 6.8 RF-förlopp vid 3 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 60 % RF, mätdjup 15 mm



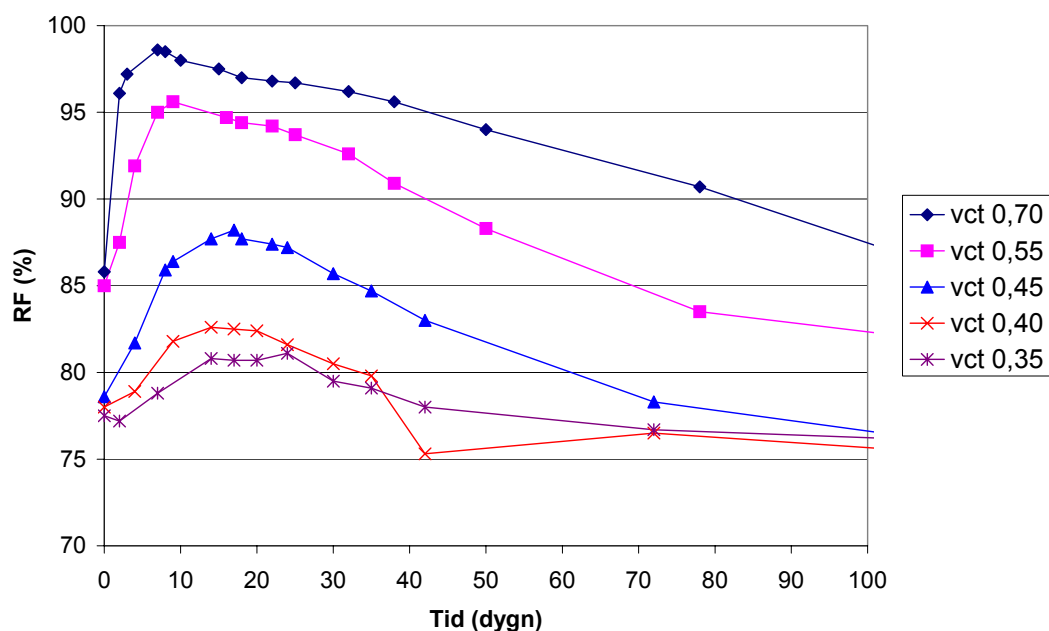
Figur 6.9 RF-förlopp vid 3 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 60 % RF, mätdjup 48 mm.

Vid 3 dygns vattenbelastning sker en kraftig RF-ökning på 15 mm mätdjup. För betongerna med de tre högsta vattencementtalen stiger RF till mer än 95 %. På 48 mm mätdjup är RF ökningen mindre, men även på detta djup passeras RF 95 % för betongerna med vct 0,55 och 0,70.

Vid den efterföljande uttorkningen når betong med samtliga vct, förutom vct 0,70, tillbaka till sitt ursprungliga RF inom 100 dygn. Den kritiska fuktnivån 85 % på ekvivalent djup (48 mm) nås för betong med vct 0,45 redan inom 2 à 3 veckor efter torkstart. För betong med vct 0,55 och 0,70 dröjer det ca. 1,5 månader resp. ca. 3,5 månader (extrapolerat värde). Betong med vct 0,40 och lägre nådde aldrig upp till 85 % RF under vatteninsugningen.



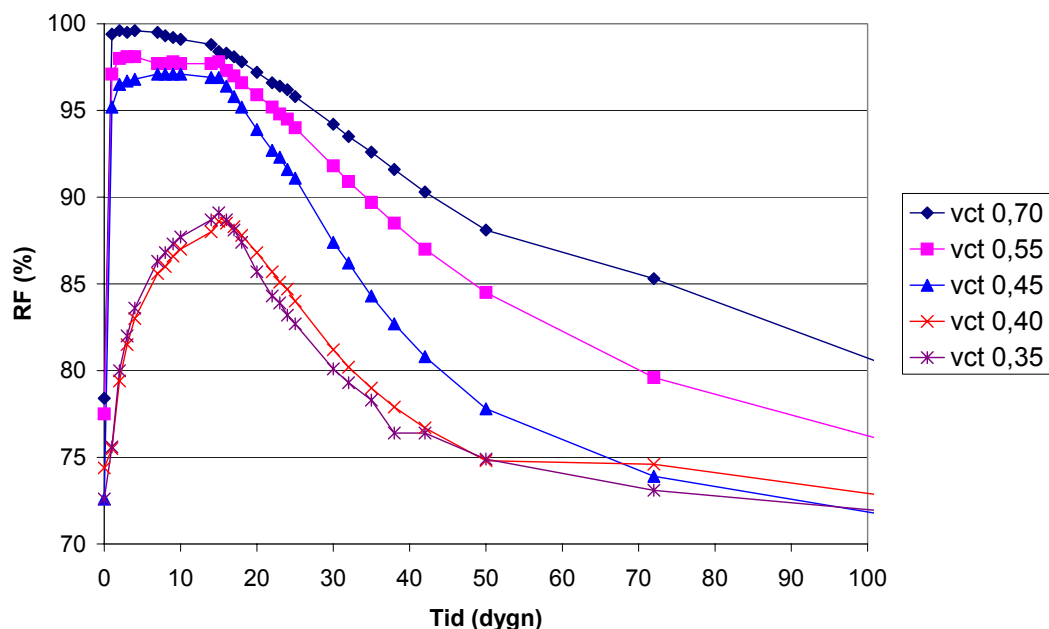
Figur 6.10 RF-förlopp vid 7 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 60 % RF, mätdjup 15 mm.



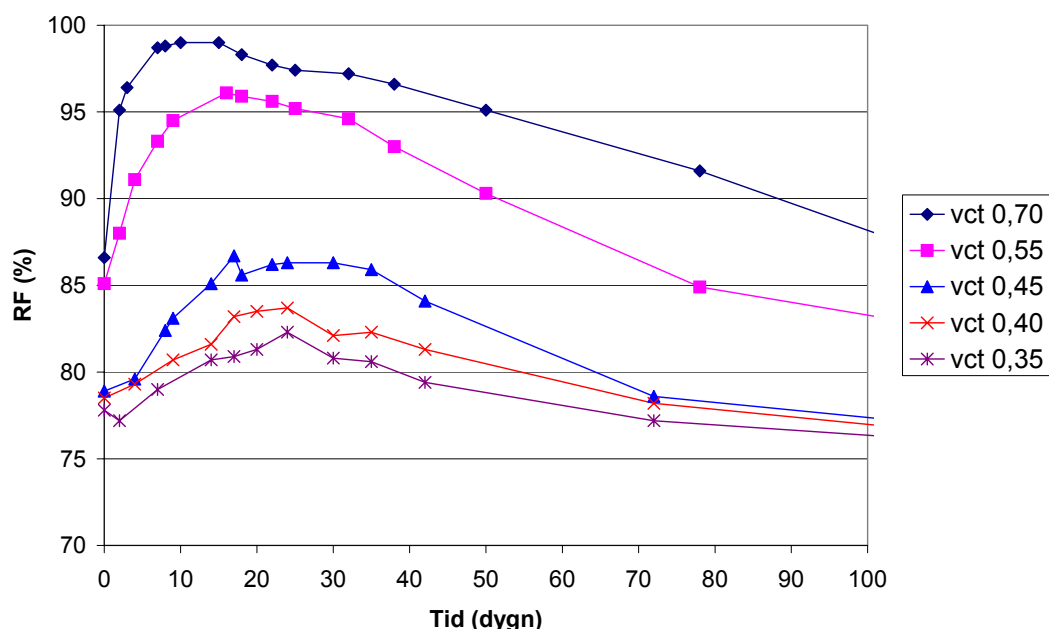
Figur 6.11 RF-förlopp vid 7 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 60 % RF, mätdjup 48 mm.

RF-ökningen under vatteninsugningen är stor på båda mätdjupen för betongerna med vct 0,70 och 0,55. Betongen med vct 0,45 har låg RF-ökning på ekvivalent djup men stor RF-ökning på 15 mm djup. Betong med de två lägsta vattencementtalen uppvisar en viss RF-ökning på 15 mm djup medan ökningen på 48 mm djup är liten.

Liksom för 3 dygns vattenbelastning återgår alla betongerna, förutom den med vct 0,70, till sin ursprungliga fuktnivå inom 100 dygn. Kritiska nivån 85 % RF på ekvivalent djup nås för betong med vct 0,45 inom 1 månad och för betong med vct 0,55 och 0,70 inom 2 månader respektive ca. 4 månader (extrapolerat värde). Dessa tider är desamma som för 3 dygns vatteninsugning vilket troligen beror på att vatteninsugningen var ungefär lika stor i båda fallen. Betong med vct 0,40 och 0,35 nådde inte upp till nivån 85 % under vattenabsorptionsskedet.



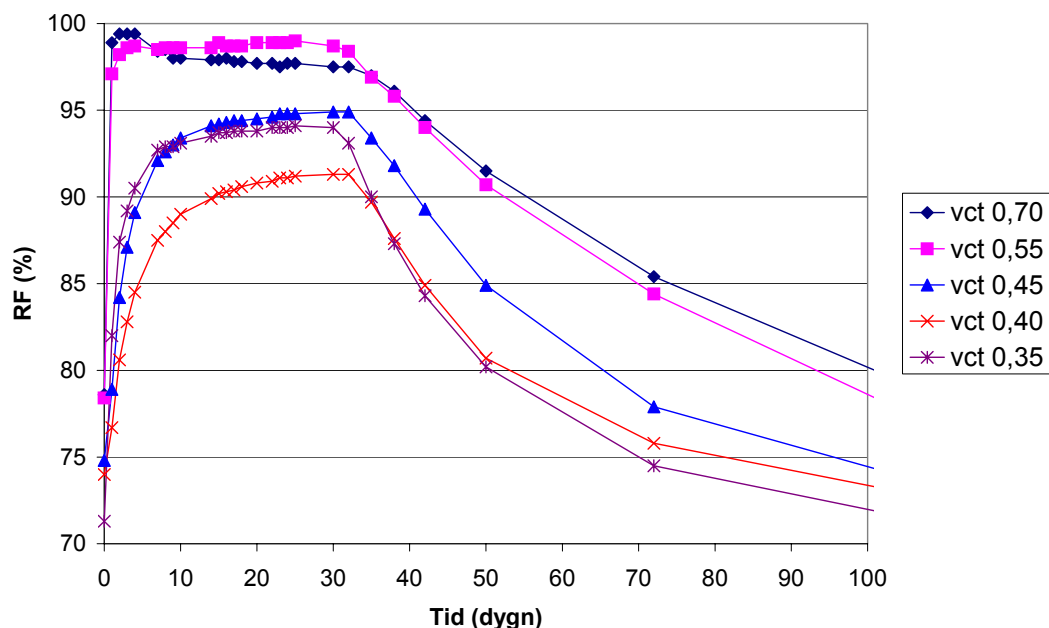
Figur 6.12 RF-förlopp vid 14 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 6 0% RF, mätdjup 15 mm.



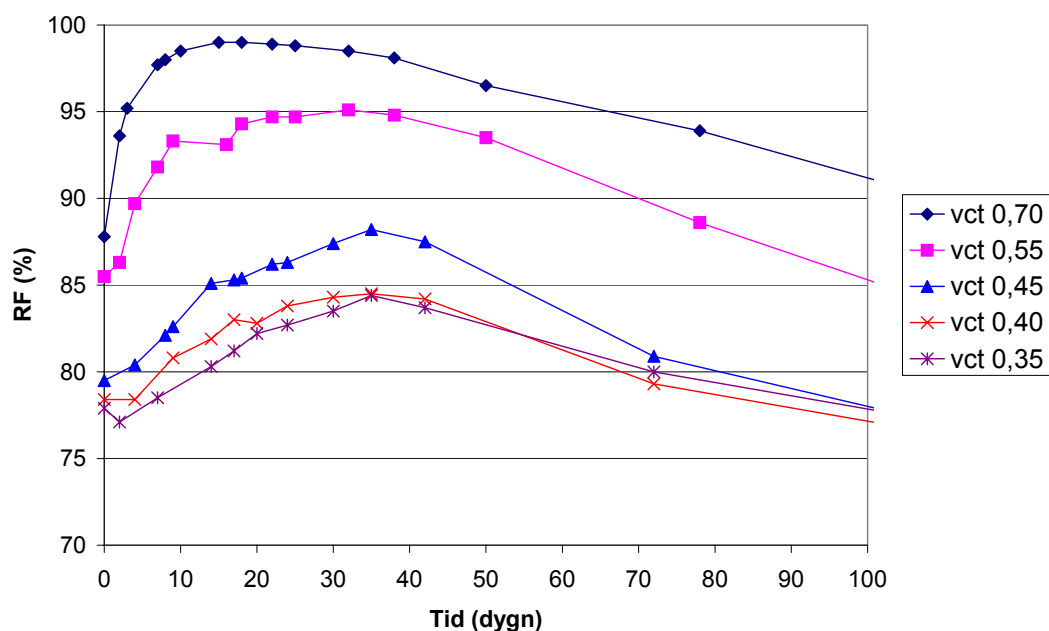
Figur 6.13 RF-förlopp vid 14 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 60 % RF, mätdjup 48 mm.

Resultaten från försöken med 14 dygns vattenbelastning följer samma mönster som för 3 respektive 7 dygns vattenbelastning. RF ökar mest för vct 0,55 och 0,70.

Den kritiska nivån 85 % RF på ekvivalent djup nås inom ca. 1 månad för betong med vct 0,45, 2 månader för vct 0,55 och ca. 4 månader för vct 0,70. Tiderna är räknade från torkstart. Betong med vct 0,35 och 0,40 når inte upp till 85 % RF under vattenupptagningen.



Figur 6.14 RF-förlopp vid 28 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 60 % RF, mätdjup 15 mm.



Figur 6.15 RF-förlopp vid 28 dygns vattenbelastning följt av uttorkning i 60 % RF, mätdjup 48 mm.

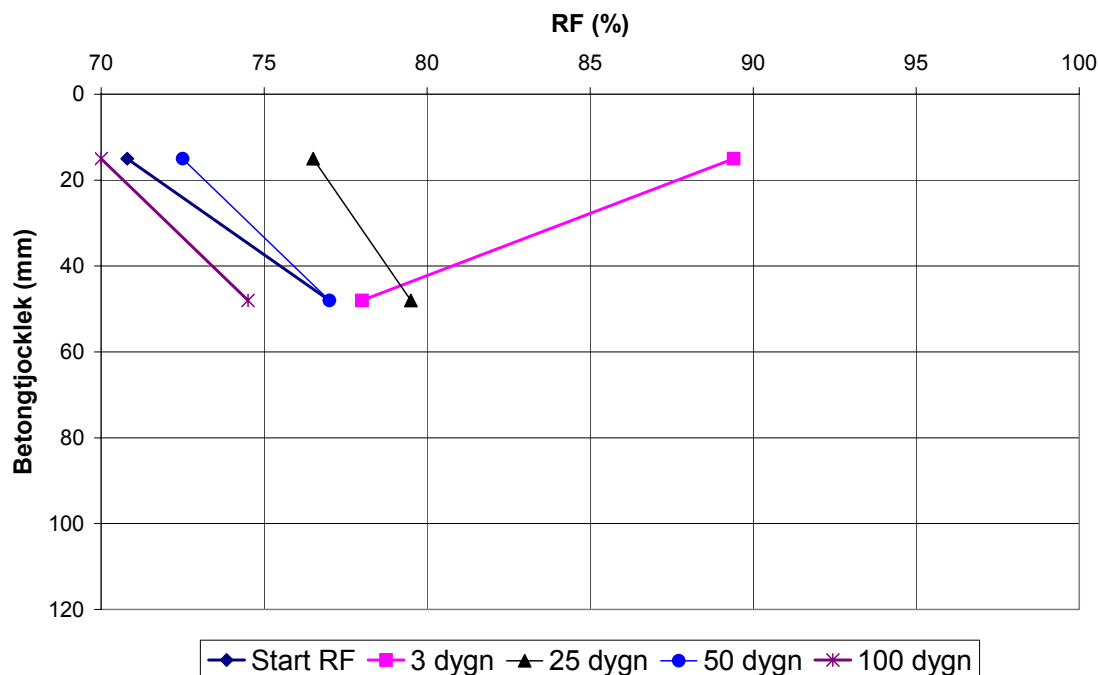
Vid 28 dygns vattenbelastning ökar RF i samtliga betonger kraftigt på 15 mm mätdjup. Även på mätdjupet 48 mm ökar RF mer än vid kortare tids vattenbelastning. För övrigt följer resultaten samma mönster som vid de andra vattenbelastningarna.

Den kritiska nivån 85 % RF nås inom 1 månad för vct 0,45, ca. 2,5 månader för vct 0,55 och mer än 4 å 5 månader för vct 0,70. Betong med vct 0,35 och 0,40 nådde inte upptill kritisk RF 85 % under vattenabsorptionsskedet.

6.7.4 Fuktprofiler

Genom att använda uppmätta RF från båda mätdjupen kan man visa hur fuktprofilen förändras med tiden. Fuktprofiler för samtliga vct och vattenbelastningar finns redovisade i appendix 2. Nedan ges några exempel för betong med hög resp. normal kvalitet (vct 0,40 respektive 0,70).

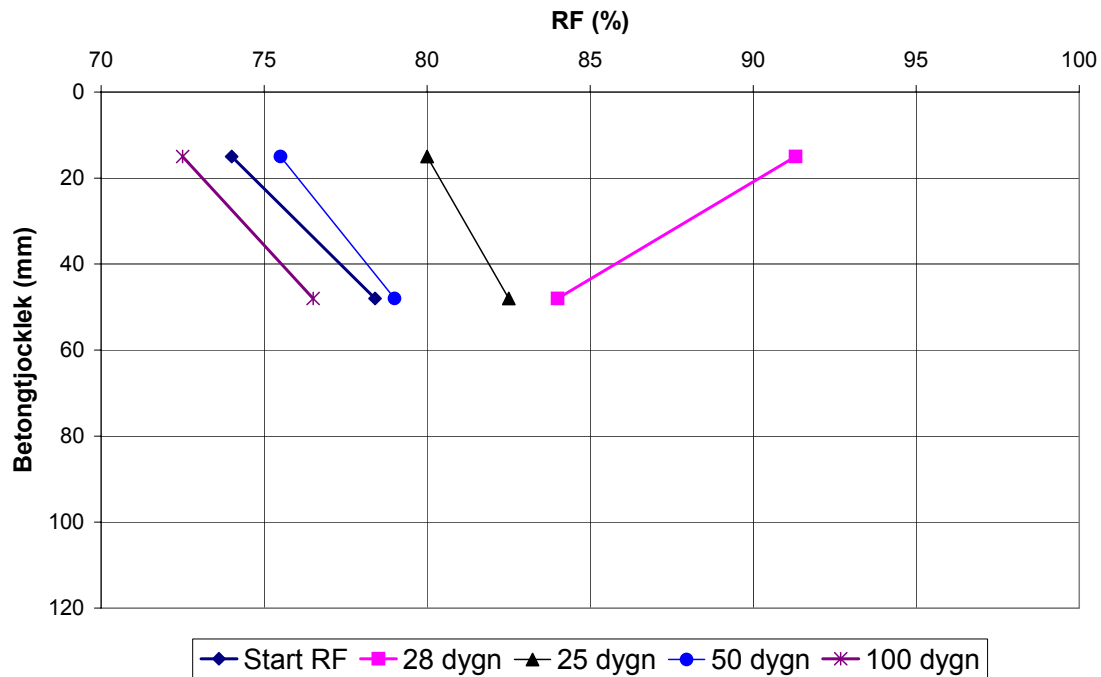
Figur 6.16 och 6.17 visar hur fuktprofilen förändras vid 3 respektive 28 dygns vattenbelastning för betong med vct 0,40.



Figur 6.16 Vct 0,40, vattenbelastning 3 dygn. Fuktprofilens utseende före vattenbelastning (Start RF), efter 3 dygns vattenbelastning samt 25, 50 resp. 100 dygn efter påbörjad uttorkning.

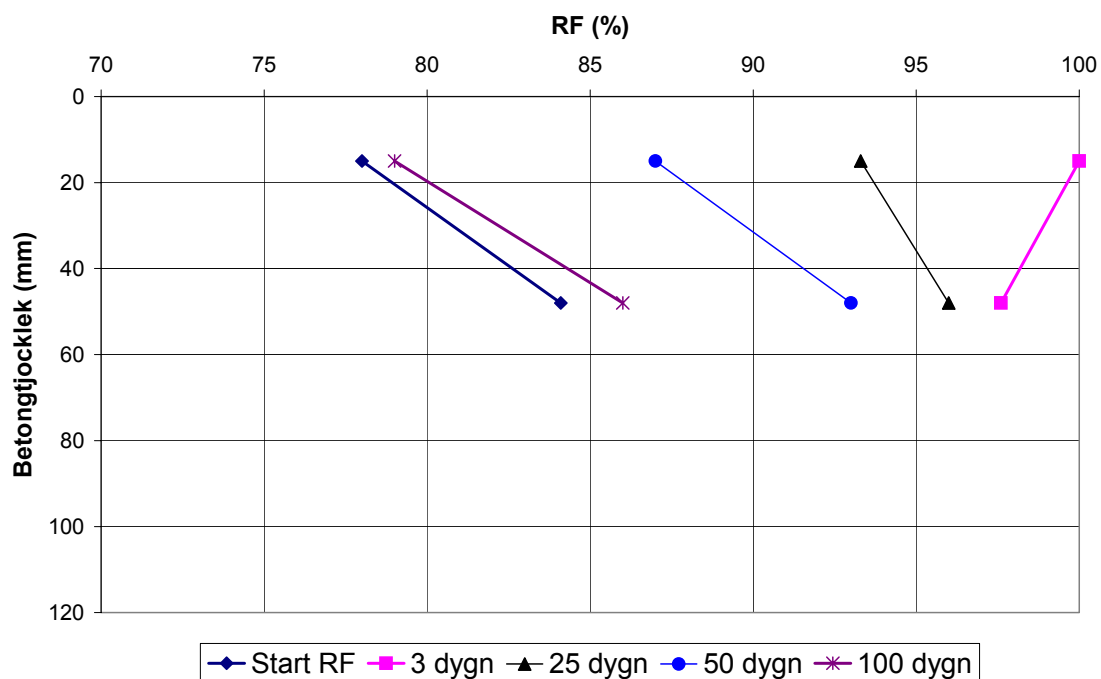
Enligt figur 6.16 ökar RF till 89 % på 15 mm mätdjup efter 3 dygns vattenbelastning. Vid samma tidpunkt har RF på 48 mm djup enbart ökat med 1 % vilket innebär att insugning under 3 dygn enbart sker i de översta centimetrarna. 25 dygns uttorkning har medfört att RF på 15 mm djup har minskat medan RF på det ekvivalenta djupet har ökat något vilket visar på en viss fortsatt omfördelning av insuget vatten nedåt i betongen. Efter 50 dygns uttorkning är RF-nivåerna över hela betongtvärsnittet ungefär desamma som omedelbart före fuktbelastningen. Efter 100 dygns uttorkning har RF sjunkit ytterligare och betongen är torrare än när försöket startades.

Vid 28 dygns vattenbelastning ökar RF till 91 % på 15 mm djup. Det sker även en RF-ökning på ekvivalent mätdjup med ca. 6 %. RF är emellertid fortfarande bara 84 %, d.v.s. den understiger normala kritiska fuktnivåer. Efter 25 dygns torkning har RF sjunkit med ca. 11 % på 15 mm djup. På ekvivalent mätdjup har RF bara sjunkit 1 %. Efter 50 dygns uttorkning är RF-nivån något högre än när försöket startades. Efter 100 dygns uttorkning är betongen torrare än när försöket startades.



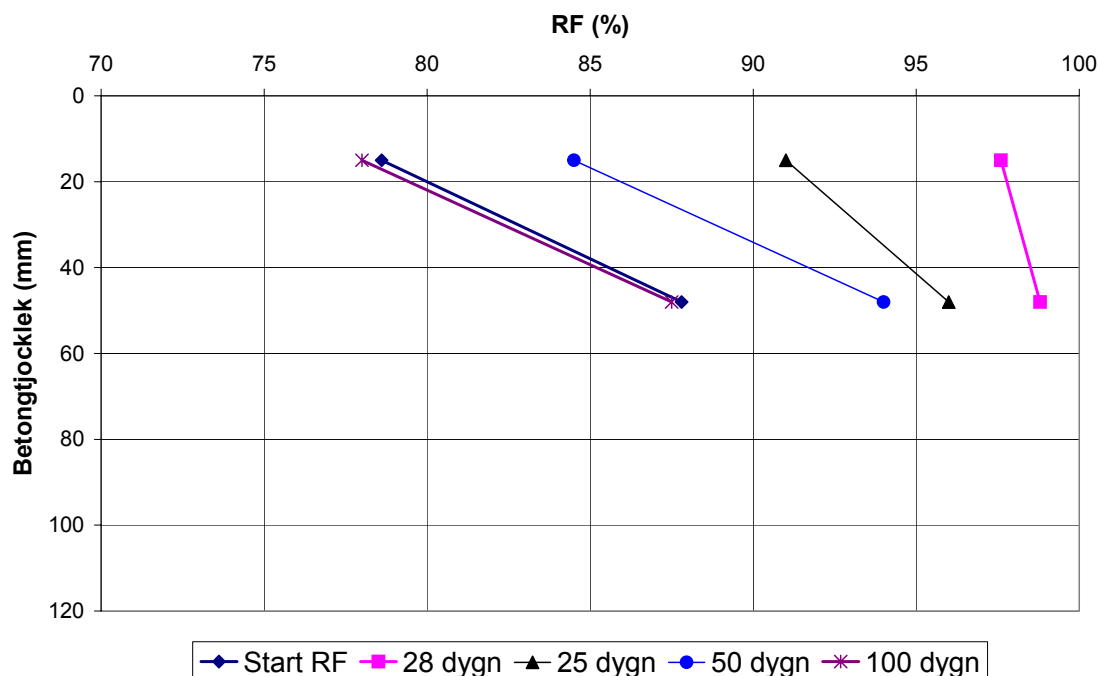
Figur 6.17 Vct 0,40, vattenbelastning 28 dygn. Fuktprofilens utseende före vattenbelastning (Start RF), efter 28 dygns vattenbelastning samt 25, 50 resp. 100 dygn efter påbörjad uttorkning.

Figur 6.18 och 6.19 visar hur fuktprofilen förändras vid 3 respektive 28 dygns vattenbelastning för betong med vct 0,70.



Figur 6.18 Vct 0,70, vattenbelastning 3 dygn. Fuktprofilens utseende före vattenbelastning (Start RF), efter 3 dygns vattenbelastning samt 25, 50 resp. 100 dygn efter påbörjad uttorkning.

Figur 6.18 visar att redan efter 3 dygns vattenbelastning har RF stigit till 100 % på 15 mm mätdjup och till 98 % på ekvivalent djup. RF-ökningen är alltså mycket högre än vid vct 0,40. 25 dygn efter torkstart har RF sjunkit på båda mätdjupen. Det krävs dock mer än 100 dygns torkning för att RF skall återgå till sin ursprungliga nivå.



Figur 6.19 Vct 0,70, vattenbelastning 28 dygn. Fuktprofilens utseende före vattenbelastning (Start RF), efter 28 dygns vattenbelastning samt 25, 50 resp. 100 dygn efter påbörjad uttorkning.

Efter 28 dygns vattenbelastning har RF stigit till ca. 98 à 99 % både på 15 mm djup och på ekvivalent djup. 25 dygn efter torkstart har RF sjunkit på båda mätdjupen men fortfarande är värdet mycket högt (>90 % RF). Det krävs 100 dygns torkning för att RF skall återgå till sin ursprungliga nivå. Trots 28 dygns vatteninsugning nås inte 100 % RF i betongen. Orsaken är troligen den s.k. alkalieffekten, se avsnitt 2.9 och tabell 4.4. Enligt figur 6.14 når RF nästan 100 % omedelbart när betongen utsätts för vatten. Därefter sjunker RF ned till en konstant nivå av ca. 98 à 99 %, troligen beroende på alkali som lösts i porvattnet.

Samtliga figurer ovan och i appendix 2 visar att fuktprofilen snabbt återfår sin normala lutning när betongen börjat torka oavsett betongkvalitet eller varaktighet hos vattenbelastningen. Detta innebär att RF-värdet på ekvivalent mätdjup även bör kunna användas för betong som utsatts för vattenläckage när det gäller att bedöma risken för kommande fuktskador på täta golvmaterial.

Fuktprofilerna visar att vattenbelastningens varaktighet inte har någon större betydelse vid vct 0,70 eftersom vatteninsugningen sker snabbt. För betong med vct 0,40 har varaktigheten större betydelse eftersom vatteninsugningen sker långsamt. Den praktiska betydelsen är dock liten eftersom 85 % RF aldrig passerar på ekvivalent mätdjup trots 28 dygns kontinuerlig vattenupptagning.

6.8 Slutsatser

Slutsatserna från denna studie kan summeras i följande punkter.

- Betongens vct avgör hur mycket vatten som kan sugas in i en delvis uttorkad betong. Vid en tjocklek av 12 cm kan betong med vct 0,70 som torkat i laboratorieluft under 5 månader absorbera ca. 6 liter vatten per kvadratmeter. Initiella fuktnivån motsvarar ca. 85 % RF 5 cm från fuktexponerade ytan. Betong med vct 0,40 tar under samma förhållanden upp ca. 1,5 liter/m².
- Vattenbelastningens varaktighet har liten betydelse för totalt uppsugen vattenmängd eftersom vattnet sugs in snabbt i betongen.
- Betong med vct 0,35 tar i denna undersökning ofta upp mer vatten än betong med vct 0,40. Orsaken är okänd men kan möjligen bero på mikrosprickbildning till följd av en ökad inre självkrympning. Sprickorna har i sig ingen större volym men de kan ”öppna” betongen för en snabbare absorption.
- För betong med vct 0,70 (vanlig ”Husbyggnadsbetong”) tar det mer än 100 dygn för RF att återgå till den ursprungliga nivå som rådde före vattenbelastningen. För betong med lägre vct är tiden något kortare
- Av större intresse i praktiken är tiden det tar till dess RF på ekvivalenta djupet når ner till en kritisk nivå. Om denna sätts till 85 % RF krävs följande erforderliga torktider räknade från när vattenbelastningen avbryts:

Vattenbelastningstid	Erforderlig torktid, månader				
	0,35	0,40	0,45	0,55	0,70
3 dygn	0	0	<1	1,5	3
7 dygn	0	0	1	2	4
14 dygn	0	0	1	2	4
28 dygn	0	0	1	2,5	4,5

Resultatet är intressant eftersom det dels visar att vattenbelastningstiden har rätt marginell betydelse för uttorkningstiden, dels att denna ökar med ökat vct. Betong med mycket låga vct kräver i princip torktiden noll eftersom den kritiska fuktnivån inte hinner uppnås.

- De erforderliga torktiderna är betydligt kortare än de tider som anges i (Hedenblad 1993b) vilket framgår av följande exempel:

12 cm ensidigt torkande golv. Helt vattenmättad betong vid torkstart. Torkklimat 60 % RF. Betong med vct 0,7.

Torktid enligt Hedenblad (1993b): 856 dygn $\approx$ 2,3 år.

En viktig orsak till denna stora skillnad mellan nu genomförda försök och den teoretiska beräkningen är att betongen antas vara fullständigt vattenmättad. En noggrannare analys har inte kunnat göras eftersom beräkningsprinciperna bakom tabeller i Hedenblad (1993b) inte är kända.

7. Inverkan av avjämningsmassa på uttorkning av betonggolv

7.1 Bakgrund

Det är idag vanligt förekommande att betonggolv avjämnas med en avjämningsmassa för att det skall få en tillräckligt jämn yta för att golvmaterial skall kunna appliceras. En annan positiv effekt är att man med avjämningsmassan får ett lågalkaliskt skikt som minskar risken för kemisk nedbrytning av limmade golvmaterial. Detta förutsätter dock att avjämningsmassan baseras på bindemedel med låg alkalitet, t.ex. aluminatcement.

Vid avjämnningen av golvet används en cementbaserad avjämningsmassa med en underliggande ”primer”. Både primer och avjämningsmassa innehåller vatten som kan påverka fukttillståndet i den underliggande betongen. Dessutom kan den uttorkning som sker genom diffusion utåt försvåras av det nya skikt som påförs.

Avjämnningen utförs normalt efter det att man monterat ytterväggar och tak. Detta innebär att regn inte påverkar uttorkningen i detta skede. En tidig avjämnning innebär att stora ytor kan avjämnas innan man monterat innerväggar, vilket ger tids- och kostnadsbesparingar. Det är dock inte helt klart när det ur uttorkningssynpunkt är mest lämpligt att applicera avjämnningen. Man vet inte heller om avjämnning medför att betongens uttorkning fördröjs eller till och med avbryts.

Det experimentella arbetet i denna studie har utförts av Andreas Abrahamsson och Kristian Tammo. Resultaten finns publicerade i examensarbetet (Abrahamsson & Tammo 2003).

7.2 Syfte

Syftet med denna studie var att undersöka hur golvavjämnning påverkar uttorkningen av betong med olika vct. Även inverkan av tidpunkten då avjämnningen utförs skulle undersökas.

7.3 Avjämningsmassa

Avjämningsmassa, tidigare kallat flytspackel, är en cementbaserad produkt med mycket höga flytegenskaper som används för att avjämnas golvytor. Dagens produkter är oftast baserade på en kombination av Aluminatcement och Portlandcement. För ytterligare information om avjämningsmassans innehåll och uppbyggnad hänvisas till (Harbron 2001).

Avjämningsmassan blandas på byggarbetsplatsen och appliceras oftast genom pumpning enligt figur 7.1. Vattenbindemedelstalet är ca. 1,0 för en normal avjämningsmassa s.k. ”finavjämnning”.



Figur 7.1 Applicering av avjämningsmassa på HD/F-bjälklag. (Foto Anders Anderberg 2003)

Det finns även en avjämningsmassa som går under benämningen ”snabb finavjämning”. Den har ett vbt av ca. 0,7. Avjämningsmassan som användes i denna studie var Optiroc finavjämning ABS 148 baserad på Aluminatcement och Portlandcement.

7.4 Försöksuppläggning

I denna studie provades betong med 5 olika vct. De vct som användes var 0,35; 0,40; 0,45; 0,55 samt 0,70. Av varje betong tillverkades 3 provkroppar. En av dessa fungerade som referens, vilket innebär att den inte avjämnades. De andra två provkropparna avjämnades vid två olika tillfällen, 1 månad respektive 2 månader efter gjutning.

Alla tre provkropparna membranhärdades i 14 dygn. Provkropparna lagrades därefter i 5°C och 80 % RF i fyra veckor. Därefter lagrades de i 20°C och 60 % RF. Uttorkningen av provkropparna registrerades med RF-givare placerade 15 mm från ovanytan av betongen samt på ekvivalent mätdjup 48 mm.

7.5 Betongtillverkning

Betongen till denna studie tillverkades vid samma tillfälle som betongen till studien angående inverkan av simulerat regn, se kapitel 5. Läsaren hänvisas därför till kapitel 5 för information om delmaterial, betongrecept samt blandningsmetod.

7.6 Tillverkning och lagring av provkroppar

Även här hänvisas läsaren till kapitel 5 eftersom gjutformar och gjutningsförfarande är detsamma i denna studie.

Direkt efter gjutningen förseglades provkropparnas överyta med tjock plastfolie varefter proverna placerades i ett klimatrums (+5°C, 80 % RF) för lagring, se figur 7.2. Vissa bekymmer med klimatanläggningen förekom. Det verkliga klimatet redovisas i appendix 1.



Figur 7.2 Membranhärdning av provkroppar genom försegling av överytan

Provkropparna membranhärdades under 14 dygn. Därefter togs plasten bort och de fick torka fritt uppåt. Efter ytterligare 2 veckor flyttades provkropparna och placerades i klimatet 20°C och 60 % RF.

För varje vct tillverkades 3 provkroppar varav en var referensprov som inte avjämnades och 2 användes för avjämnning vid 28 respektive 56 dygns ålder. Såväl före som efter avjämnning lagrades proverna i 20°C och 60 % RF.

7.7 Applicering av avjämningsmassa

Avjämningsmassan applicerades 28 dygn respektive 56 dygn efter gjutningen av provkropparna. Uttorkningsgraden hos betongen var alltså något olika vid de två tillfällena. Provkropparna belades ca. 4 timmar före avjämnningen med en primer av typ Primer MD 16. Primern avses öka vidhäftningen mellan betong och avjämningsmassa och minska vatteninsugningen från avjämningsmassan i betongen.



Figur 7.3 Blandning av avjämningsmassa i Hobart-bruksblandare.

Avjämningsmassan blandades i en Hobart-bruksblandare, se figur 7.3. Vid blandningen tillsattes vatten enligt tillverkarens anvisning till en färdig mix av det torra materialet. Den lättflytande avjämningsmassan applicerades därefter på den primerbelagda provkroppen.

En ”krage” i form av ett löst polypropenrör fungerade som gjutform för avjämningsmassan, se figur 7.4. Detta rör avlägsnades då avjämningsmassan stelnat. Avjämningsmassans tjocklek var 10 mm vilket är en normal tjocklek vid praktisk användning.



Figur 7.4 Applicering av avjämningsmassa på betongprover.

7.8 Fuktmätning

RF-givare av typ Vaisala HMP 44 användes för att mäta RF i de rör som är ingjutna i provkropparna. RF och temperatur avläses med hjälp av ett avläsningsinstrument kopplat till givaren. Innan mätningarna påbörjades kalibrerades givarna i intervallet 75-95 % RF vid temperaturerna 5°C och 20°C.

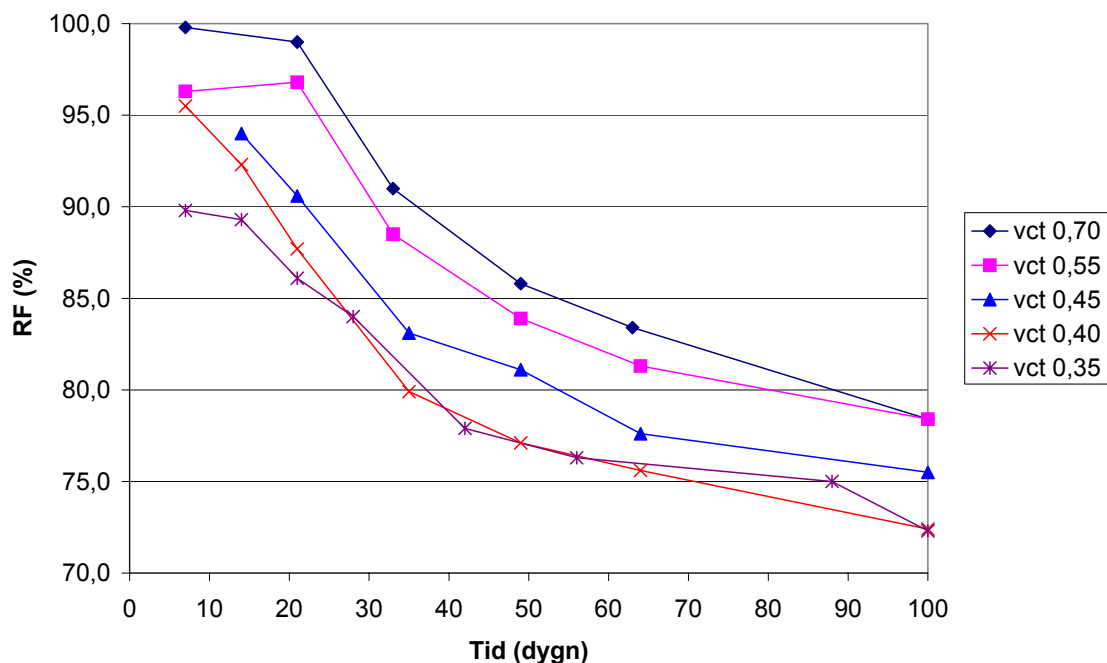
Givarna monterades i mätören ca. 1 vecka efter gjutningen. Givare på mätdjupet 15 mm satt kvar under hela försökstiden. På grund av att antalet givare var begränsat var det nödvändigt att flytta de givare som användes på mätdjupet 48 mm. Detta gjordes dock efter ett förutbestämt mätschema.

Givarna som flyttades monterades 24 timmar före avläsning för de två högsta vct-talen (0,55 och 0,70). För övriga vct monterades givarna 48 timmar före avläsning. Detta berodde på att det tar längre tid för en betong med lågt vct att komma i jämvikt med den luft i röret i vilken fuktmätningen sker.

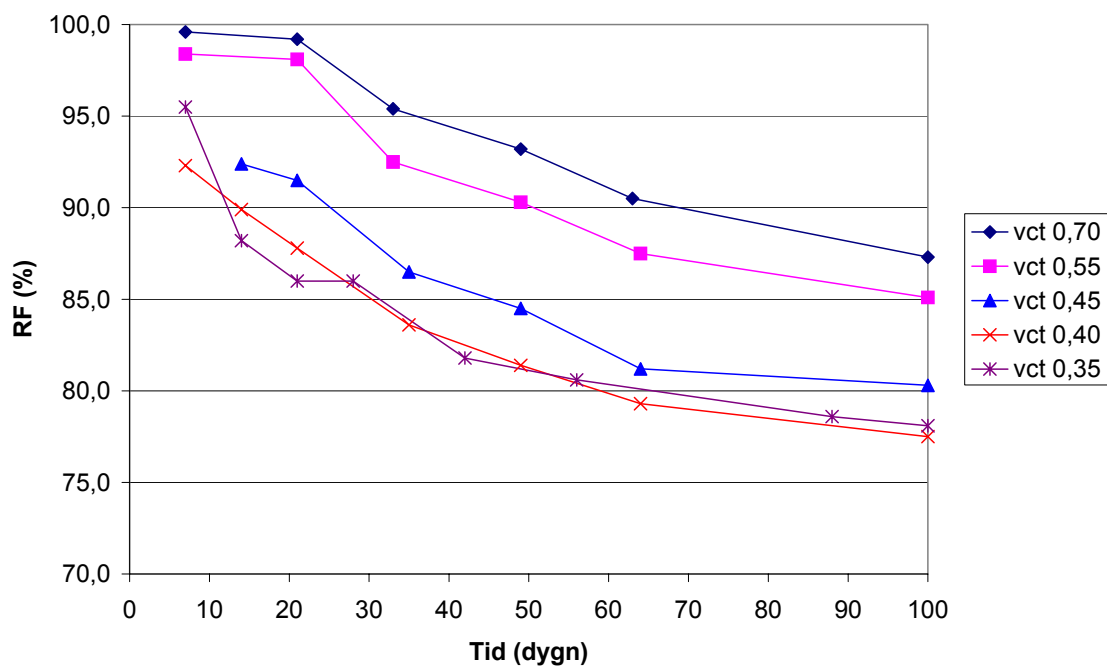
7.9 Resultat

7.9.1 Inverkan av vct på uttorkning av obelagd betong

I figurerna 7.5 – 7.6 redovisas uttorkningen för de referensprovkroppar som inte avjämnades. Samtliga referensprovkroppar membranhärdades i 14 dygn. Resultatet kan jämföras med referensprover i kapitel 5. Proverna där var dock membranhärdade enbart 1 dygn.



Figur 7.5 Uttorkning av referensprovkroppar membranhärdade i 14 dygn, mätdjup 15 mm.



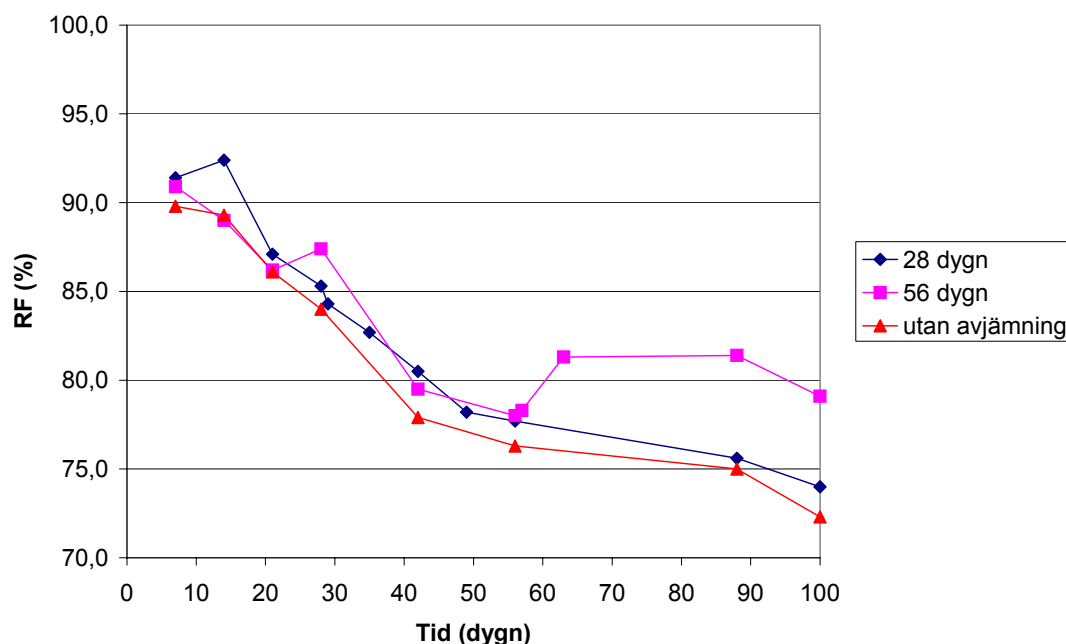
Figur 7.6 Uttorkning av referensprovkroppar membranhärdade i 14 dygn, mätdjup 48 mm.

Figur 7.5 och 7.6 visar liksom resultaten i kapitel 5 (figur 5.7-5.8) den stora betydelse vct har för betongens uttorkning. Betong med låga vattencementtal torkar mycket snabbt på grund av självuttorkning. Även betong med höga vattencementtal torkar ganska snabbt. Detta beror troligtvis på att mätpunkten är placerad nära ytan.

På ekvivalent mätdjup är skillnaden mellan höga och låga vct tydligare än på mätdjupet 15 mm. Detta är logiskt eftersom fuktens transportväg är längre. Detta får större betydelse för betong med högt vct, vars uttorkning i huvudsak baseras på diffusion.

7.9.2 Inverkan av golvavjämning på uttorkning av betongproverna

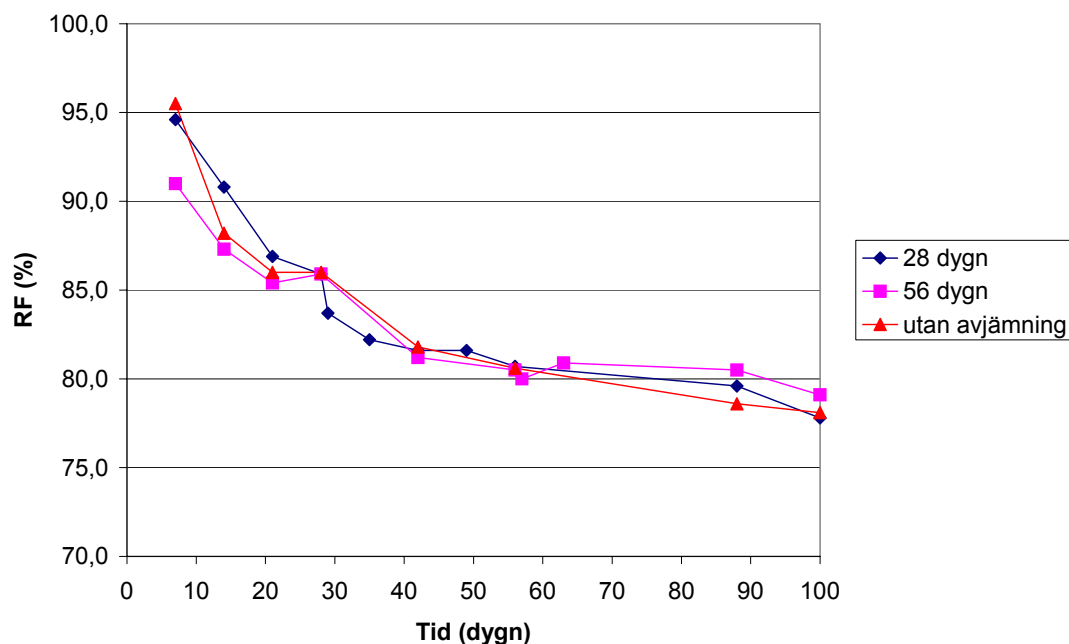
Figurer 7.7-7.16 visar hur avjämningsmassan påverkar uttorkningen av betongen på de båda mätdjupen.



Figur 7.7 Inverkan av golvavjämning på RF på mätdjupet 15 mm i betong med vct 0,35.

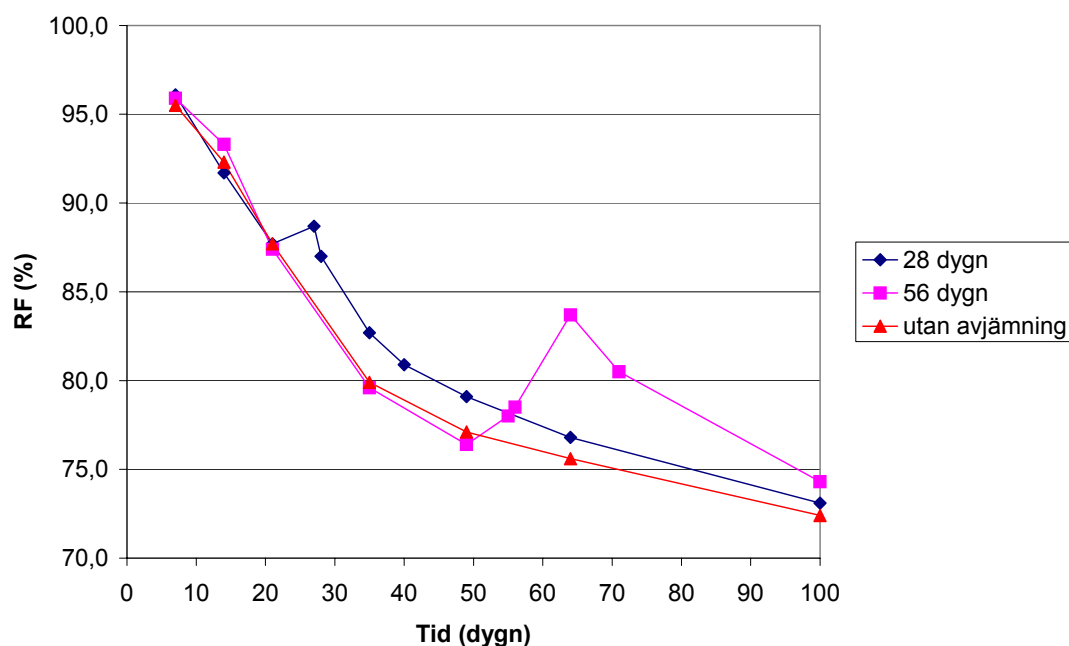
För betong med vct 0,35 ses på mätdjupet 15 mm ingen RF-höjning vid avjämning efter 28 dygn. Vid avjämning efter 56 dygn ses en RF-ökning med ca. 5 %. Den fortsatta uttorkningen av betongen sker med viss fördröjning efter avjämning. 80 % RF nås med ca. 3 dygns fördröjning när avjämning sker efter 28 dygn och med ca. 2 månaders fördröjning när den sker efter 56 dygn.

En kritisk RF-nivå av 85 % RF underskrids redan innan 56 dygn och uppnås inte genom avjämning.



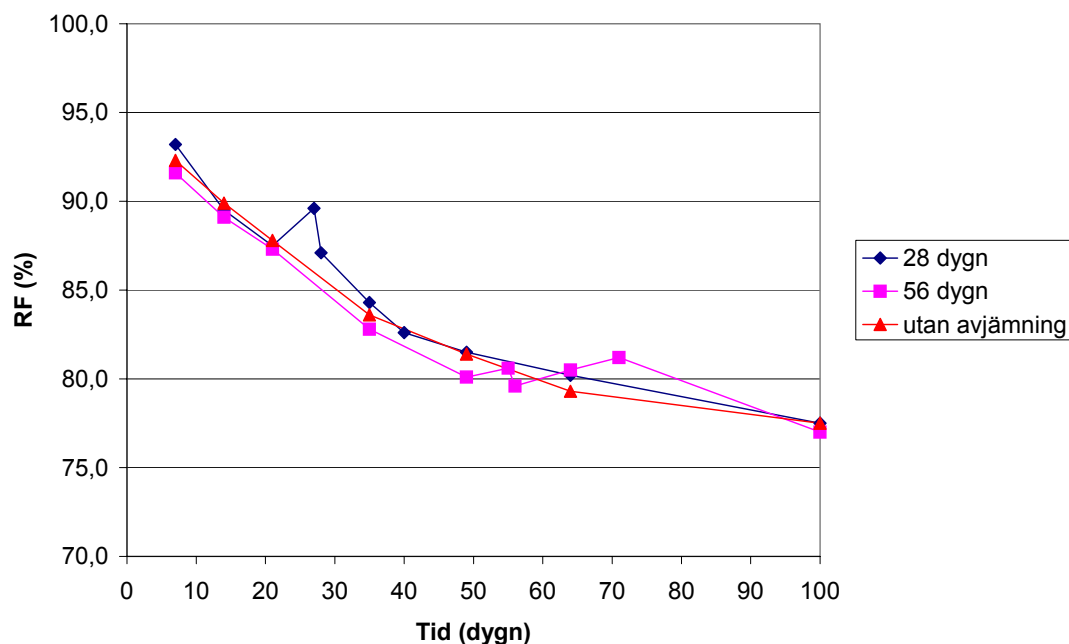
Figur 7.8 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 48 mm i betong med vct 0,35.

Även på 48 mm djup sker en viss begränsad uppbromsning av uttorkningen när avjämningsmassan appliceras efter 56 dygn. RF-ökningen är däremot försumbar.



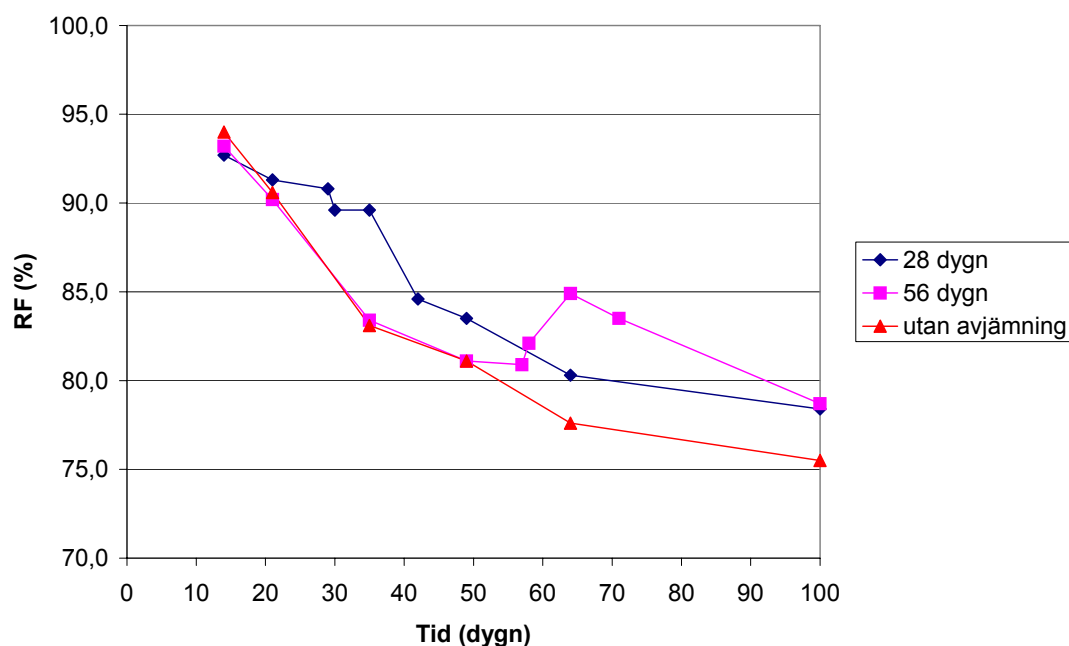
Figur 7.9 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 15 mm i betong med vct 0,40.

För betong med vct 0,40 ses en RF-höjning vid avjämnning efter både 28 och 56 dygn. Vid avjämnning efter 28 dygn är RF-ökningen ca. 3 % och vid avjämnning efter 56 dygn ca. 7 %. Efter 100 dygn skiljer dock inte mer än ca. 2 % mellan de tre provkropparna. Inte heller vid detta vct överskrider den kritiska RF-nivån 85 %.



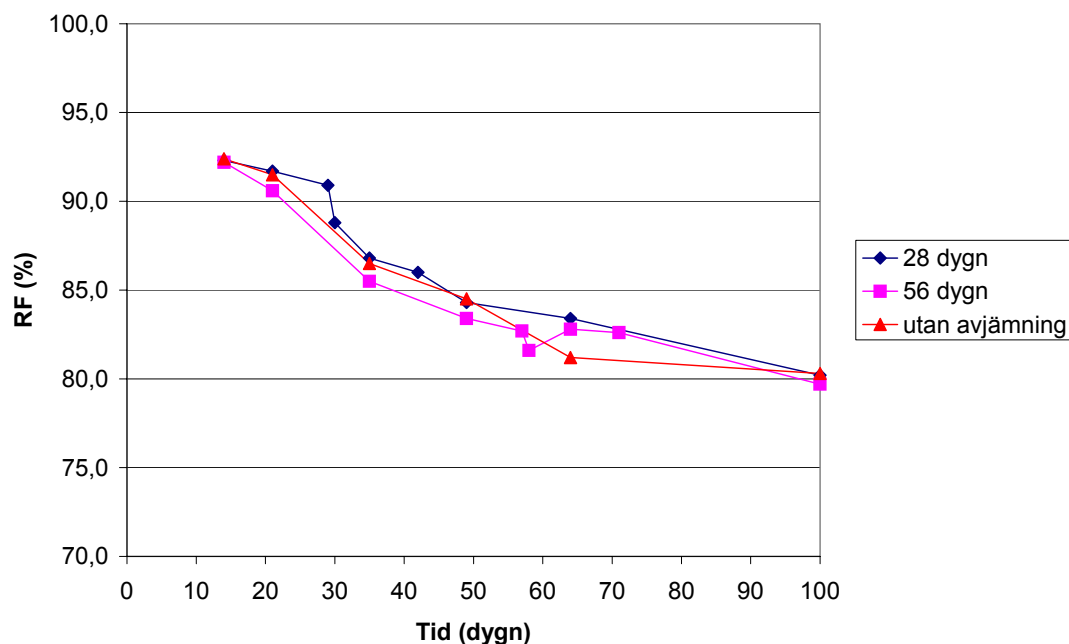
Figur 7.10 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 48 mm i betong med vct 0,40.

På 48 mm mätdjup syns en liten RF-höjning i samband med avjämnningen. Inverkan är dock liten. Efter 100 dygn har provkropparna samma RF på ekvivalenta mätdjupet.



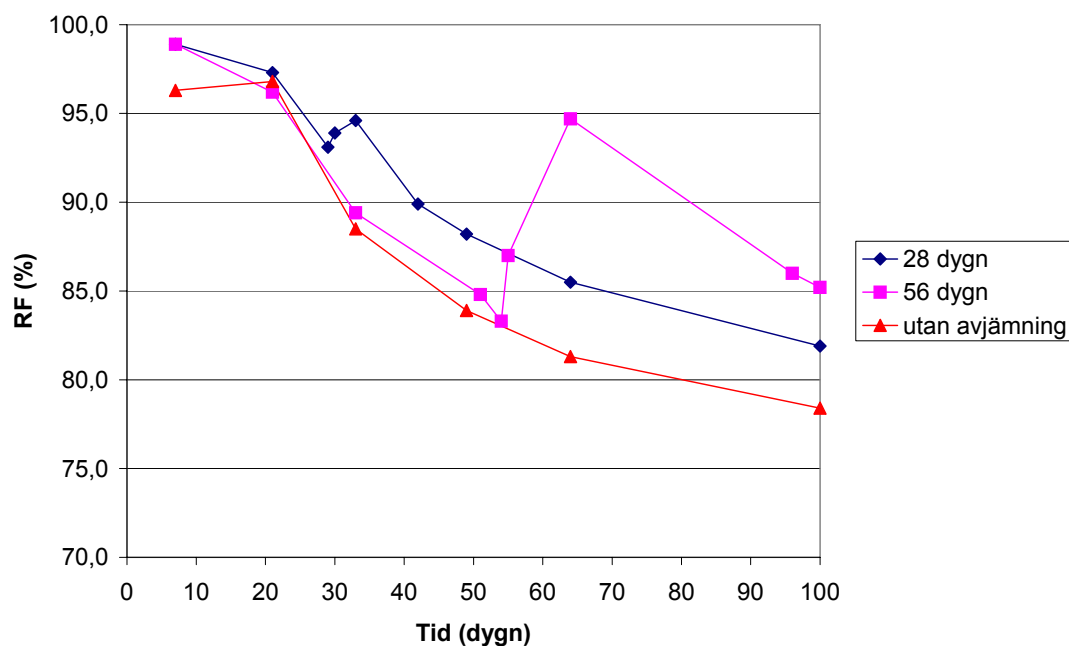
Figur 7.11 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 15 mm i betong med vct 0,45.

För vct 0,45 sker en viss liten RF-ökning på 15 mm djup, såväl när avjämnning sker efter 28 dygn, som när den sker efter 56 dygn. Ökningen är dock tydligare vid 56 dygn. Utan avjämnning nås en kritisk RF-nivå av 85 % RF efter ca. 30 dygn (från gjutning). Vid avjämnning efter 28 dygn nås 85 % RF först efter ca. 70 dygn. Vid avjämnning efter 56 dygn är betongen så torr att fuktillskottet inte räcker för att 85 % RF skall uppnås. Däremot ger avjämnning en klar fördröjning av den fortsatta uttorkningen.



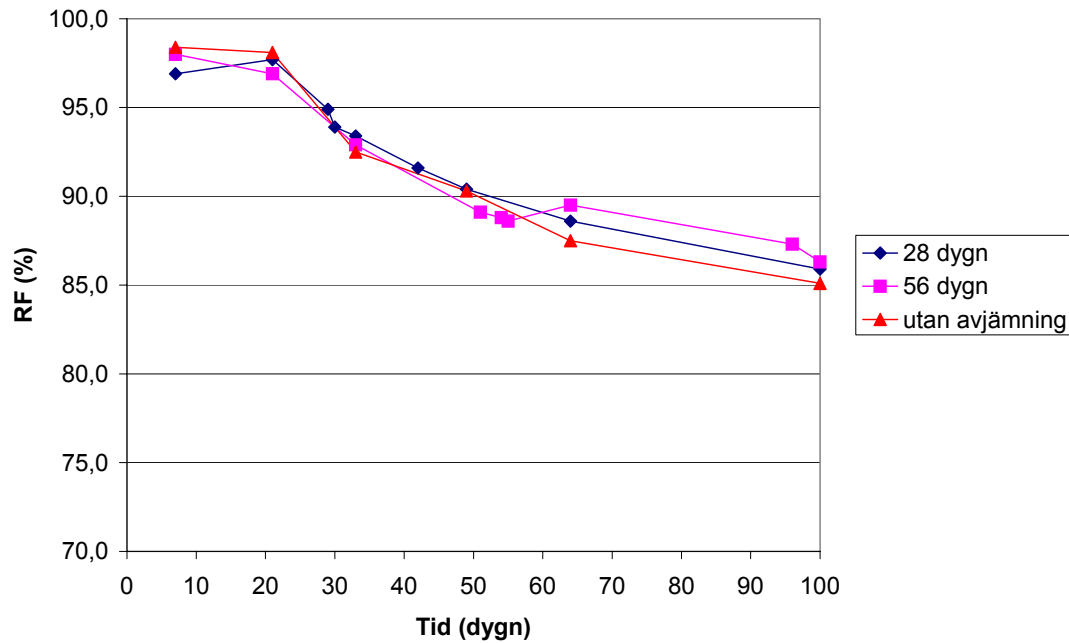
Figur 7.12 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 48 mm i betong med vct 0,45.

En liten påverkan på RF av avjämnningen kan också ses på det ekvivalenta mätdjupet.



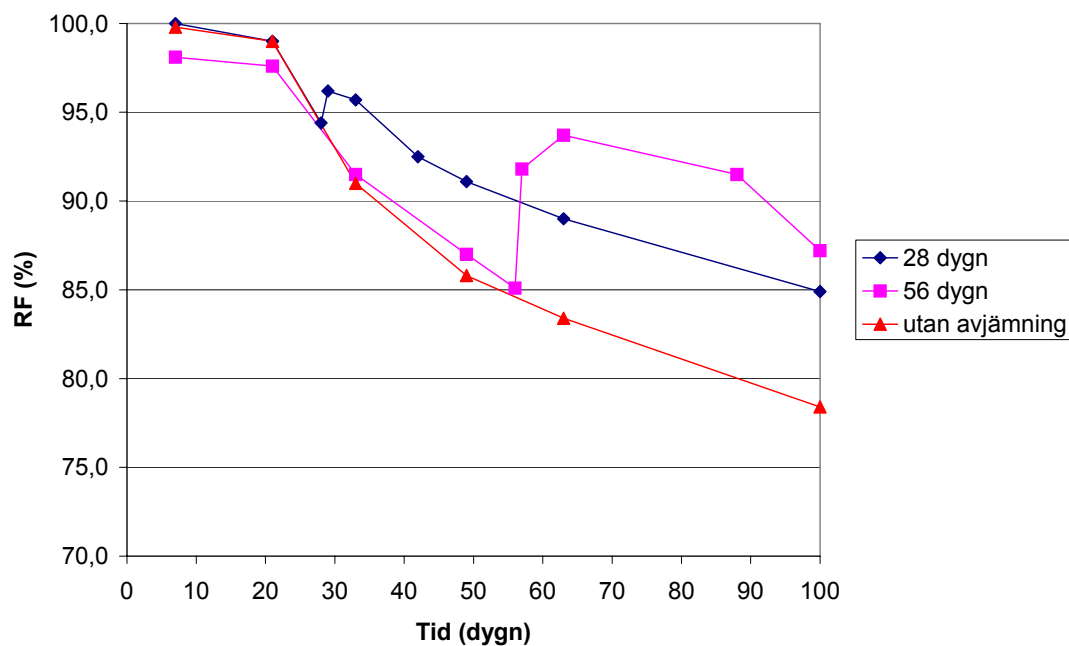
Figur 7.13 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 15 mm i betong med vct 0,55.

Inverkan av avjämnningen är stor hos betong med vct 0,55 oavsett när avjämnningen sker. Vid applicering efter 28 dygn är RF-höjningen ca. 5 % och efter 56 dygn ca. 9 %. Utan avjämnning nås en kritisk RF-nivå av 85 % RF efter ca. 45 dygn. Vid avjämnning efter 28 dygn nås 85 % RF först efter ca. 70 dygn och vid avjämnning efter 56 dygn efter ca. 100 dygn.



Figur 7.14 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 48 mm i betong med vct 0,55.

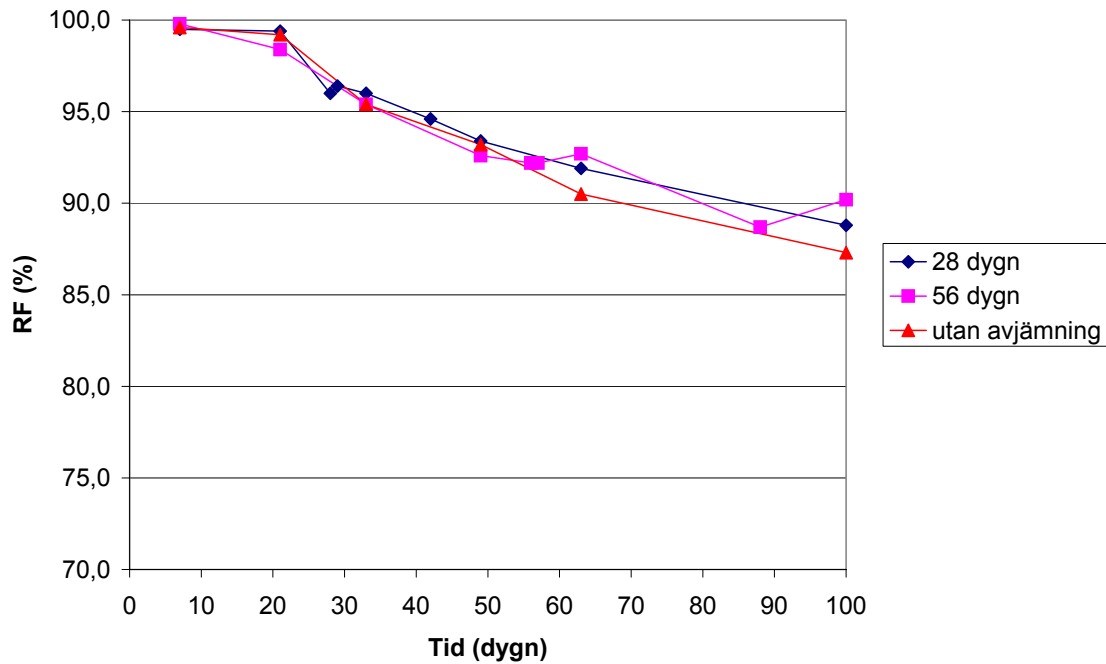
På ekvivalent mätdjup märks enbart en liten RF-höjning vid avjämnning efter 56 dygn. RF-höjningen är ca. 2 %.



Figur 7.15 Inverkan av golvavjämnning på RF på mätdjupet 15 mm i betong med vct 0,70.

För vct 0,70 ses en påtaglig ökning av RF på mätdjupet 15 mm. Ökningen är som störst då avjämnningen utförs efter 56 dygn (ca. 8 % i RF). På ekvivalent mätdjup är ökningen betydligt mindre (ca. 3 % i RF).

Avjämnning vid 28 dygn innebär att tiden att nå en kritisk RF av 85 % fördröjs från 55 dygn hos obelagd betong till 100 dygn när avjämnning sker efter 28 dygn, och 110 dygn (extrapolerat värde) när den sker efter 56 dygn.



Figur 7.16 Inverkan av golvavjämning på RF på mätdjupet 48 mm i betong med vct 0,70.

På ekvivalent mätdjup är inverkan av avjämning på RF begränsad, såväl när den sker vid 28 dygn som vid 56 dygn.

7.10 Slutsatser

Slutsatserna från denna studie kan summeras i följande punkter.

- 10 mm golvavjämning av aktuell typ ger ett begränsat fukttillskott som höjer RF på ett djup av någon cm ner i betongen. RF ökningen är större ju högre vct betongen har.
- På 50 mm djup (ekvivalent djup) märks i stort sett ingen RF ökning oavsett betongkvalitet. Maximalt uppmät RF-höjning är 2,5 %.
- Betongen fortsätter att torka även efter applicering av 10 mm golvavjämning av aktuell typ. Avjämningsmassan förhindrar alltså inte betongens torkning. Däremot minskar uttorkningshastigheten något efter avjämning.
- Ju tidigare avjämningsmassan appliceras desto mindre blir påverkan på det fortsatta torkförloppet. Det tycks därför vara gynnsamt att avjämna betonggolvet så snart det är möjligt.
- Maximalt tycks fördröjningen av torktiden ned till en viss konstant RF uppgå till ca. 1 månad.

OBS: Resultaten gäller för aktuell avjämningsmassa. Det är inte självklart att andra avjämningsmassor baserad på andra delmaterial ger samma resultat.

8. Uttorkning av prefabricerade betongbjälklag

8.1 Bakgrund

Prefabricerade betongbjälklag används ofta i kontorshus och andra offentliga lokaler. Håldäcksbjälklag HD/F, se figur 8.1, är den vanligaste typen av prefabricerade betongbjälklag. HD/F tillverkas av jordfuktig betong med lågt vct och är förspända. Vid användning av HD/F är det oftast nödvändigt att i vissa begränsade partier komplettera bjälklaget med massiva prefabricerade betongbjälklag D/F. Dessa förspända kompletterande ”passbitar” har samma tjocklek som håldäcket och tillverkas ofta av självkompakterande betong.



Figur 8.1 Prefabricerade håldäcksbjälklag HD/F. (Foto Skanska Prefab)

Det är viktigt att utföra fuktmätning innan golvmaterialet appliceras för att man skall undvika framtida fuktproblem. Då två olika bjälklagstyper kombineras är det viktigt att man mäter i den bjälklagstyp som torkar långsammast. Tidigare studier (Blixt et al. 1998) har visat att HD/F-bjälklag har snabb uttorkning.

Hanteringen av prefabricerade bjälklag från tillverkning till färdig byggnad kan variera kraftigt. Det är därför viktigt att man känner till hur hanteringen påverkar uttorkningen av betongbjälklaget.

Det experimentella arbetet i denna studie har utförts av Refik Salievski. Resultaten finns publicerade i examensarbetet (Salievski 2003).

8.2 Syfte

Syftet med denna studie var att studera uttorkningen hos två olika prefabricerade bjälklagstyper (håldäck och massiva) för att dels klargöra hur snabbt de torkar, dels klargöra var man bör utföra fuktmätning före golvläggning. Inverkan av omgivande klimat på uttorkningsförloppet skulle också undersökas.

8.3 Försöksuppläggning

I denna studie provades två olika prefabricerade betongbjälklag, håldäcksbjälklag HD/F samt homogent bjälklag D/F. Båda bjälklagen tillverkades i fabrik och skickades till avd. Byggnadsmaterial, LTH för provning. HD/F-bjälklaget tillverkades av jordfuktig betong, vct 0,38. D/F-bjälklaget tillverkades av självkompakterande betong, vct 0,40.

Ur de två levererade bjälklagen utsågades totalt 16 provkroppar som lagrades i olika klimat. Klimaten valdes realistiskt med avseende på hur denna typ av bjälklag hanteras från tillverkning till matläggning. Temperatur, RF samt regn valdes som klimatvariabler. Samtliga provkroppar belades med avjämningsmassa ca. 6 veckor efter tillverkningen.

RF i representativa punkter i proverna registrerades kontinuerligt under ca. 2 månader med givare av typ Vaisala HMP 44.

8.4 Tillverkning av betongbjälklag

Betongbjälklagen som användes i denna studie tillverkades vid en av Skanska Prefabs fabriker i Sverige. Ett HD/F-bjälklag samt ett D/F-bjälklag togs direkt ur ordinarie produktion för användning i denna studie.

Tabell 8.1 Teknisk specifikation (enligt uppgift från Skanska Prefab)

	Håldäcksbjälklag HD/F H=185 mm	Homogen bjälklagsplatta D/F H=185 mm
Betongtyp	Jordfuktig betong	Självkompakterande betong
Vct	0,38	0,40
Betongkvalitet	K 50	K 60
Cementtyp	SH-cement	Byggcement
Cementhalt	382 kg/m ³	448 kg/m ³
Vattenhalt	144 kg/m ³	178 kg/m ³
Storlek	Längd 5-9 m	Längd 5 m
	Bredd 1,1 m	Bredd 1,0 m
Vikt	283 kg/m ²	444 kg/m ²

8.5 Tillverkning och preparering av provkroppar

8.5.1 Åtgärder vid fabrik

Ur produktionen utvaldes ett HD/F- samt ett D/F-bjälklag som skulle användas i denna studie. Ur de aktuella bjälklagen tillverkades de provkroppar som skulle skickas till LTH. Utsågningen av provkropparna gjordes direkt efter avformningen ca. 16 timmar efter gjutningen.

Ur HD/F-bjälklaget sågades 8 provkroppar ut. Provkropparnas bredd valdes så att de innehöll två kanaler vardera. Provkropparnas dimensioner var B=284 mm, H=185 mm, L=300 mm.

Ur D/F-bjälklaget sågades 8 provkroppar ut. Provkropparnas dimensioner var B=250 mm, H=185 mm, L=250 mm.

Omedelbart efter sågning förseglades provkropparna med plast för vidare transport till LTH.

8.5.2 Åtgärder vid LTH

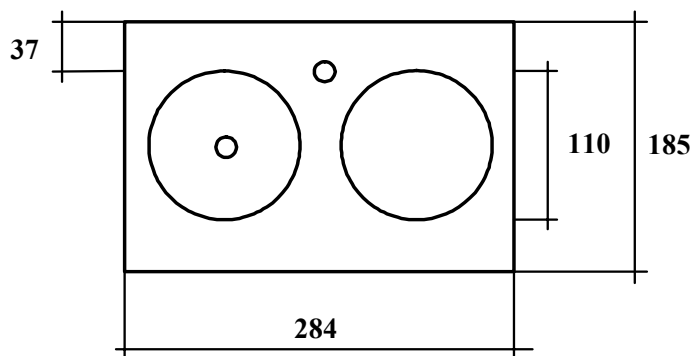
Provkropparna levererades med lastbil ca. 2 dagar efter gjutningen. Vid LTH avlägsnades först plastförseglingen. Därefter försågs HD/F-provkropparna med plexiglasskivor på kortsidorna, se figur 8.2. Plexiglasskivornas kanter förseglades med tät aluminiumtejp för att förhindra att uttorkning kunde ske genom kanalerna. Långsidorna av provkropparna förseglades med polyetenfolie, 0,2 mm. Ovansida och undersida lämnades fria för att efterlikna dubbelsidig uttorkning.



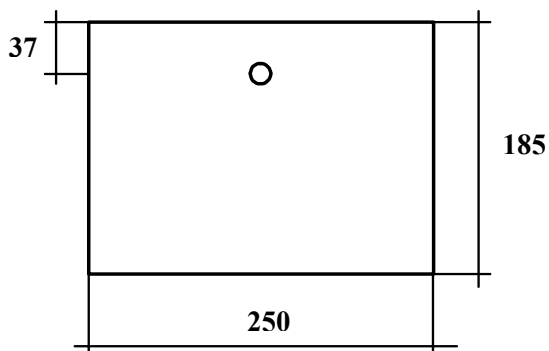
Figur 8.2 Provkropp av HD/F med plexiglasskivor och mätrör för RF-mätning.

D/F-provkropparna fuktspärrades genom att samtliga sidor bortsett från ovan- och undersidan förseglades med plast.

90 mm djupa borrhål för RF-mätning borrades horisonellt från ”provkroppsgaveln”, 37 mm, under ovanytan på samtliga provkroppar. Detta motsvarar 20 % av bjälklagstjockleken vilket är det ekvivalenta mätdjupet vid dubbelsidig uttorkning. I HD/F-provkropparna placerades även en mätpunkt för mätning av RF i kanalluften. Placeringen av borrhålen i HD/F- och D/F-proverna ses i figur 8.3 och figur 8.4.



Figur 8.3 Måttsett HD/F- provkropp med markerade mätpunkter.



Figur 8.4 Måttsett D/F- provkropp med markerad mätpunkt.

De provkroppar som skulle vattenbelastas försågs med en ram av plexiglas runt randen på ovansidan så att en "bassäng" bildades. De provkroppar som skulle membranhärdas var under den aktuella membranhärdningsperioden täckta med plast på ovansidan och undersidan.

8.6 Lagring av provkroppar

Direkt efter prepareringen hölls vatten i bassängerna på vissa prover varefter samtliga provkroppar placerades i klimatrum för lagring. Proverna var då 3 dygn gamla. Två olika klimatrum användes:

Klimatrum 1: +5°C, 80 % RF

Klimatrum 2: +20°C, 60 % RF

Det visade sig vara svårt att hålla konstant temperatur i klimatrum 1. Klimatdata från detta klimatrum redovisas i appendix 1.

8.6.1 Klimatvariationer

Provkropparna utsattes för olika "klimat" vilka avsåg att simulera vanliga lagringsförhållanden i fält. Variation gjordes därför med avseende på följande parametrar:

1. Temperatur; +5°C och +20°C.
2. Relativ fukt hos omgivande luft; 60 % RF under 14 eller 28 dygn, 80 % RF under 28 dygn, membranhärdning under 14 dygn.
3. Simulerat regn under 14 dygn eller 28 dygn.

Den tidsmässiga ordningsföljden mellan olika typ av exponering varierades.

Totalt användes 8 olika klimat. Dessa visas grafiskt i figur 8.5.

Klimat	0	14d	28d	
	1	+5, regn	+5, regn	+20, 60%RF
	2	+5, 80%RF	+5, 80%RF	+20, 60%RF
	3	+20, regn	+20, regn	+20, 60%RF
	4	+20, 60%RF	+20, 60% RF	+20, 60%RF
	5	+5, regn	+20, 60%RF	+20, 60%RF
	6	+20, regn	+20, 60%RF	+20, 60%RF
	7	+20, regn	+20, membran	+20, 60%RF
	8	+20, 60%RF	+20, regn	+20, 60%RF

Figur 8.5 Grafisk översikt över klimatvariationer.

8.7 Avjämning av provkroppar

Vid byggande med prefabricerade betongbjälklag av typen HD/F och D/F måste golven avjämnas. Detta beror på att bjälklagen alltid blir överhöjda på grund av de förspända linorna som är placerade i bjälklagets underkant. Överhöjningen kan vara något olika stor hos olika element vilket gör det färdiga bjälklaget ojämnt. Dessutom blir det skarvar mellan bjälklagen som man vill bli av med före golvläggning.

För att efterlikna verkligheten avjämnades samtliga provkroppar ca. 6 veckor efter tillverkningen. Avjämningsmassan som användes var Optiroc ABS 148 vilken är baserad på en blandning av Aluminatcement och Portlandcement. Primern som applicerades ca. 4 timmar före avjämning var av typ Optiroc MD 16. Avjämningen var ca. 10 mm tjock. För att kunna applicera avjämningen monterades en sarg på provkroppen, se figur 8.6.



Figur 8.6 Avjämning av provkroppar.

8.8 Fuktmätning

RF-givare av typ Vaisala HMP 44 användes för att mäta RF i provkropparna. RF och temperatur avläses med hjälp av ett avläsningsinstrument kopplat till givaren. Innan mätningarna påbörjades kalibrerades givarna i intervallet 79-95 % RF vid temperaturerna 5°C och 20°C.

Mätningen av RF utfördes på normenligt djup (20 % av betongtjockleken) på samtliga provkroppar. I håldäcksbjälklagen registrerades även RF i kanalerna, se figur 8.7.

Givarna monterades ca. 1 vecka efter tillverkningen av provkropparna. All fuktmätning har skett i enlighet med RBK:s manual fuktmätning i betong (RBK 2001).



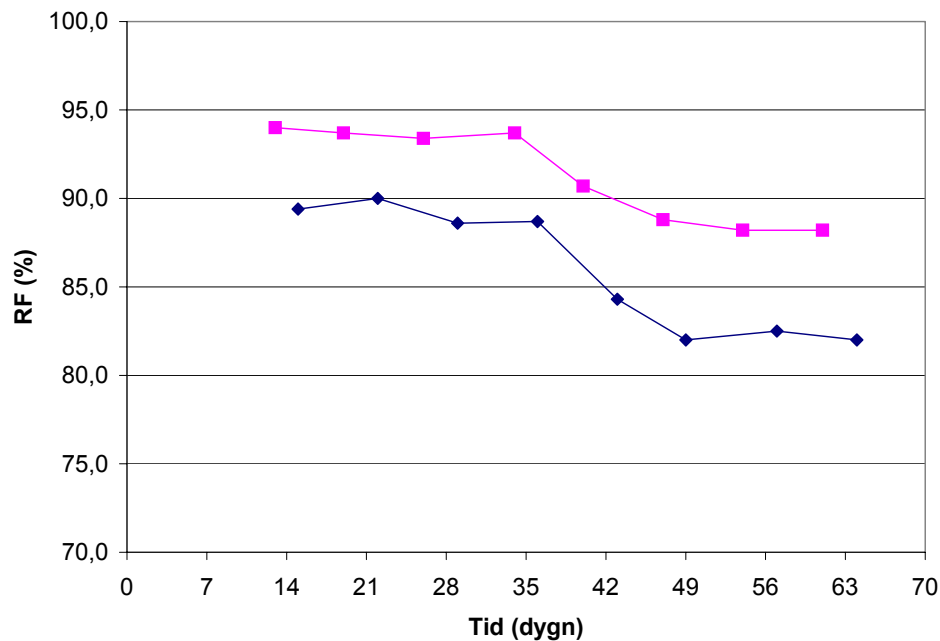
Figur 8.7 Placering av RF-givare i HD/F-bjälklag.

8.9 Resultat

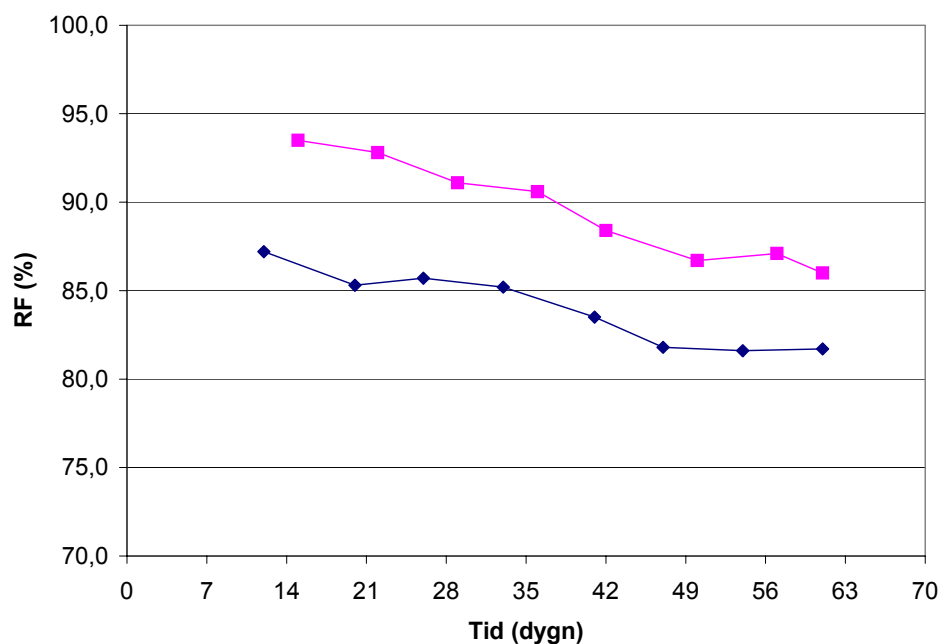
Samtliga resultat som presenteras i detta kapitel är baserade på klimat 1-4. Resultat ifrån mätningar utförda i klimat 5-8 presenteras i appendix 3.

De resultat som presenteras är avlästa värden. Ingen hänsyn har tagits till eventuell mätosäkerhet vilken bedöms vara högst ± 2 % i RF (RBK 2001).

8.9.1 Jämförelse av uttorkning mellan HD/F och D/F

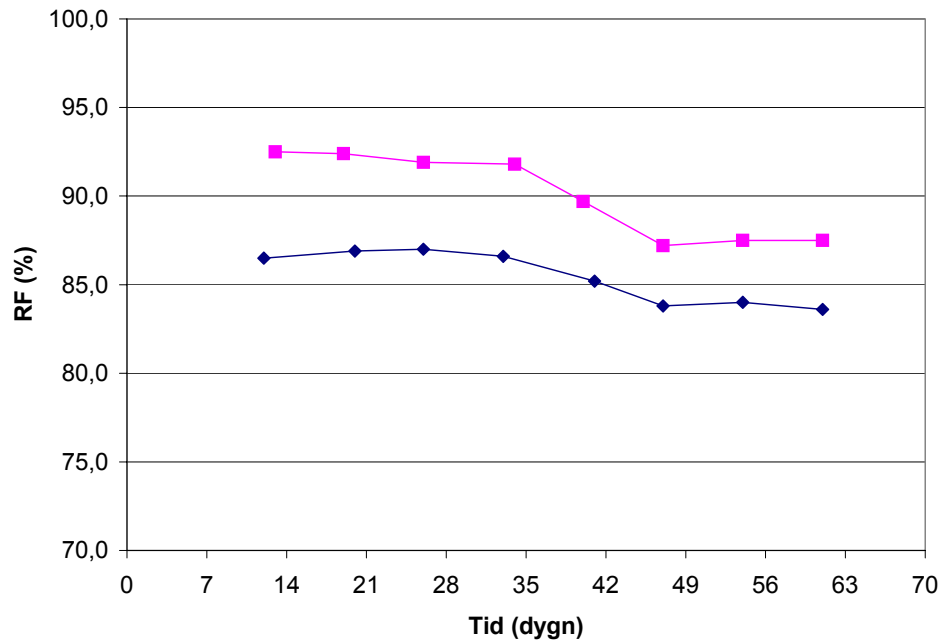


Figur 8.8 Uttorkning på ekvivalent djup av HD/F och D/F placerade i klimat 1.

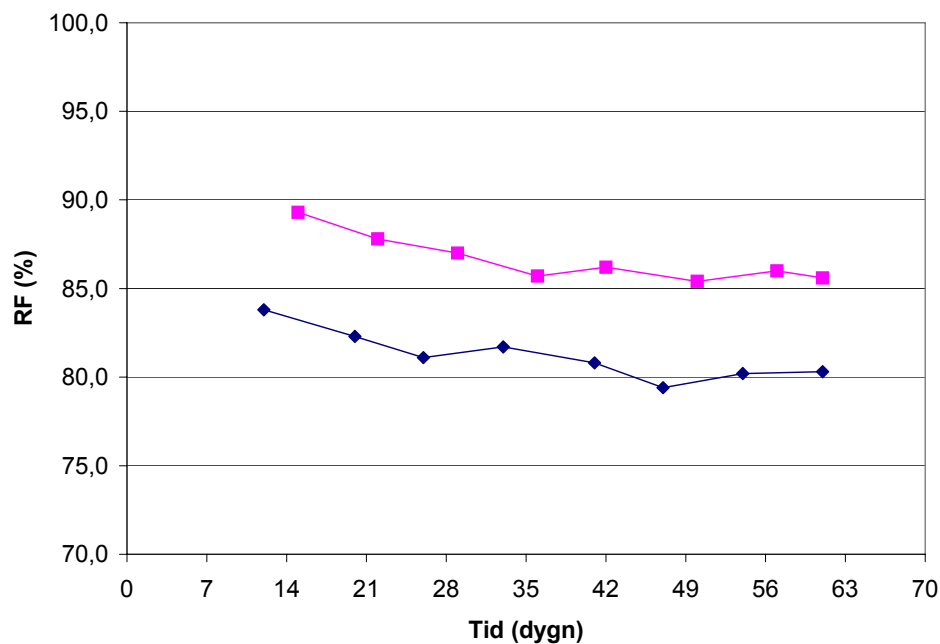


Figur 8.9 Uttorkning på ekvivalent djup av HD/F och D/F placerade i klimat 2.

8. Uttorkning av prefabricerade betongbjälklag



Figur 8.10 Uttorkning på ekvivalent djup av HD/F och D/F placerade i klimat 3.



Figur 8.11 Uttorkning på ekvivalent djup av HD/F och D/F placerade i klimat 4.

Vid samtliga klimat sker uttorkningen snabbare hos HD/F-bjälklaget. Skillnaden i RF är genomgående ca. 5 % vid alla tidpunkter. Redan vid första mätningen, som sker efter cirka 14 dygn är RF i HD/F-elementet ca. 5 % lägre vilket inte är helt lätt att förklara. Båda betongtyperna har ungefär samma vct så hela skillnaden bör inte bero på olika grad av självuttorkning.

HD/F-elementet är visserligen tillverkat med SH-cement som har något snabbare hydratationsgradsutveckling än det Byggcement som använts för D/F-elementet, men den skillnad som detta medför i självuttorkning borde i stort sett ha försvunnit efter 14 dygn och i varje fall ha helt försvunnit efter 28 dygn.

En annan tänkbar förklaring är skillnad i porlösningens alkalitet. I det aktuella fallet är emellertid de olika elementen tillverkade med cement med samma portlandklinker varför alkaliteten är ungefär densamma, se tabell 4.4. Den lilla skillnad som finns borde dessutom utjämnas av att cementhalten är lägre i HD/F-elementet.

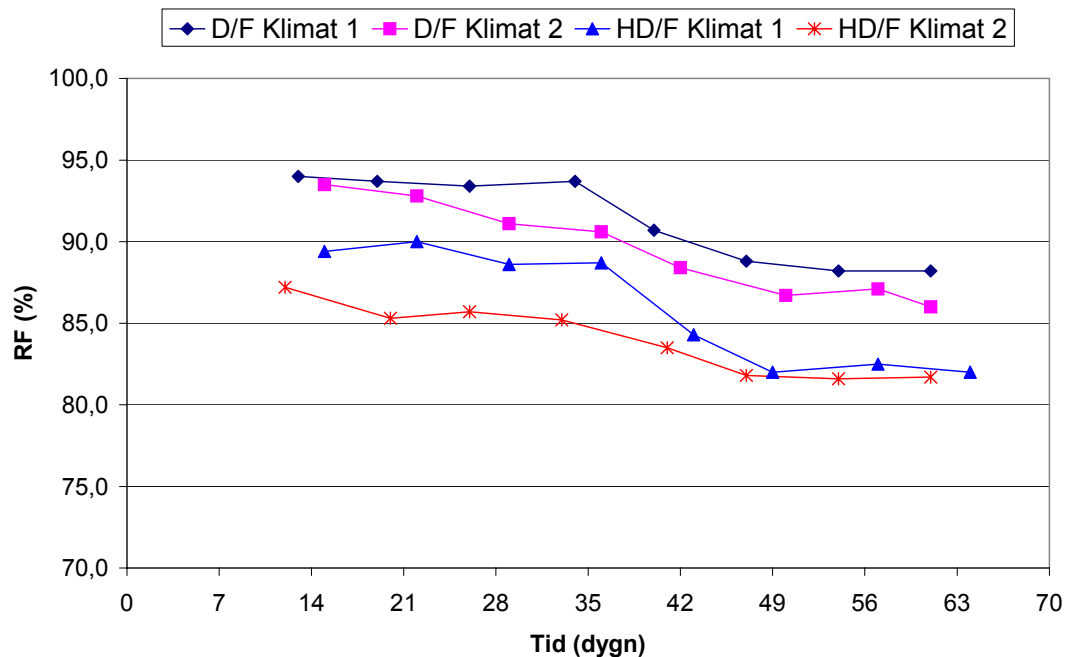
Den snabbare torkningen hos HD/F-elementet skulle möjligen kunna bero på att volymen betong i HD/F-elementet är betydligt mindre på grund av kanalerna. Det innebär att torkning även sker mot hålen och därifrån mot ytan. Hypotesen motbevisas dock av att torkningen sker snabbare även i klimat 1 och 3 med långvarig fuktbelastning.

Ytterligare en teoretiskt möjlig förklaring till skillnaden i RF är att det utbildas olika porstruktur vid de två typerna av tillverkning. HD/F-bjälklagen tillverkas med jordfuktig betong medan D/F-elementen gjuts med flytbetong som är självkompakterande.

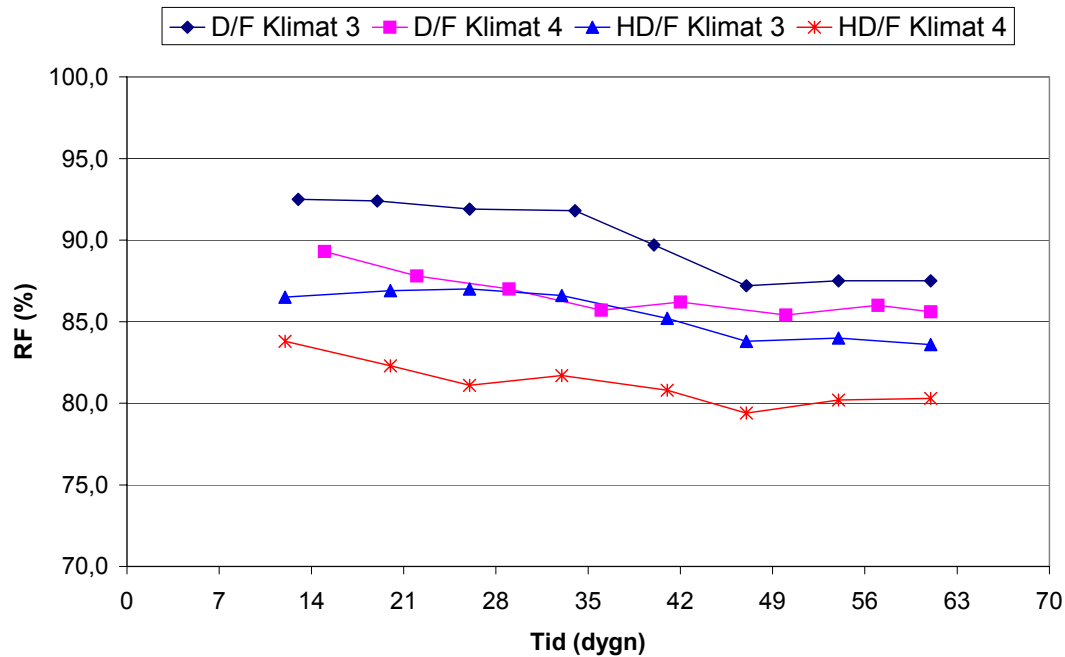
Frågan om orsaken till varför HD/F-elementen vid alla klimat torkar snabbare får anses vara olöst.

Massiva plattor som utsätts för klimat 1 och 3 (regnbelastning) når inte ner till RF 85 % inom 2 månader. Ytterligare lång tids torkning i torrt klimat krävs för att 85 % RF skall nås. Håldäck som regnutsätts når däremot 85 % RF inom ca. 1,5 månader.

8.9.2 Inverkan av simulerat regn



Figur 8.12 Uttorkning vid +5°C. Klimat 1 ("regn") jämfört med klimat 2 (80 % RF).



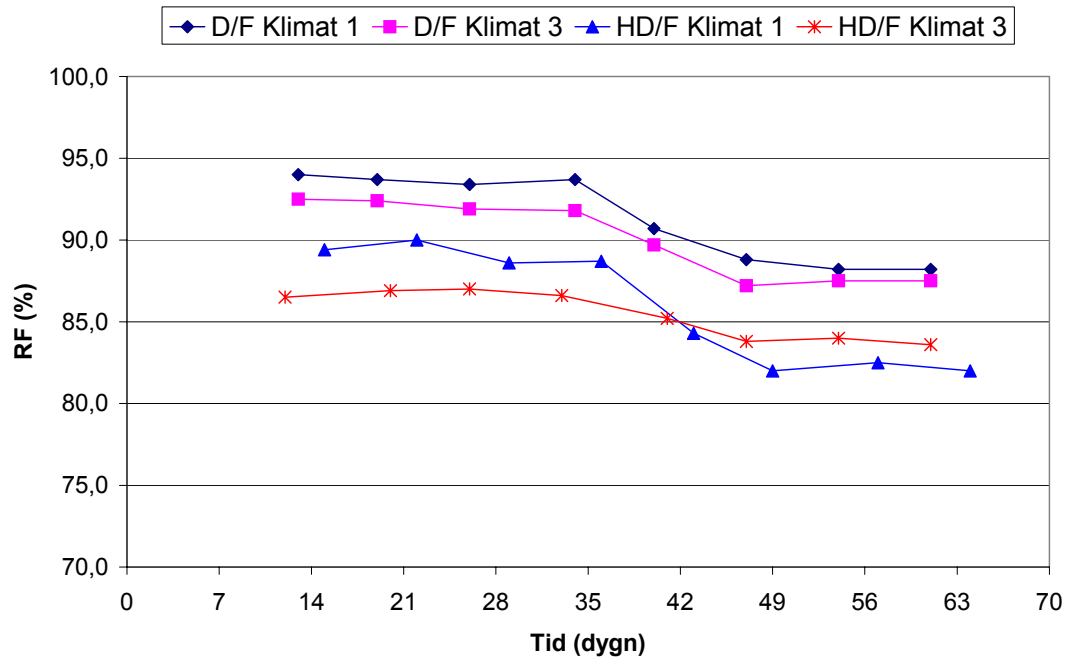
Figur 8.13 Uttorkning vid +20°C. Klimat 3 ("regn") jämfört med klimat 4 (60 % RF).

Resultaten visar som förväntat att tidig exponering för vatten (simulerat regn) har starkt fördröjande inverkan på betongens uttorkning under själva regnperioden oavsett den omgivande temperaturen. Det är märkligt att RF inte ökar trots 4 veckors kontinuerlig fuktbelastning. Enda sannolika förklaringen är att självuttorkningen dominerar över vattenupptagningen vilket kan bero på de låga vet.

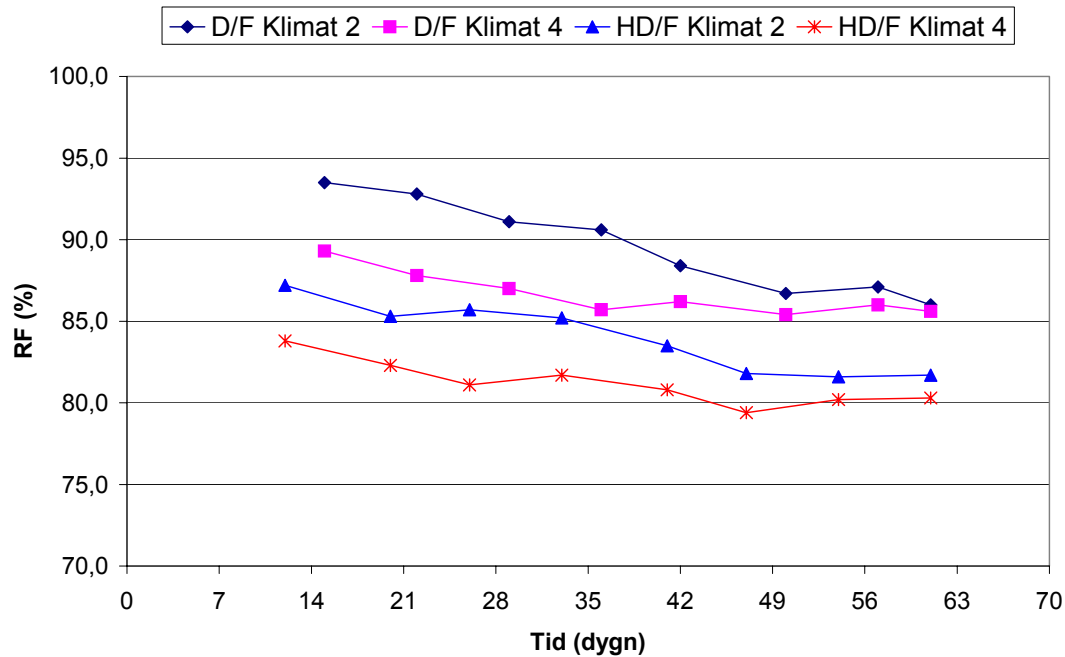
En annan orsak till att RF är lägre än 100 % trots 28 dygns vattenbelastning kan vara alkalieffekten. Enligt kapitel 4 (tabell 4.4) kan man förvänta sig att RF blir ca. 97 % även i vattenmättad betong. Alkalieffekten kan därför inte vara hela förklaringen eftersom så låga värden som 87 à 94 % RF uppmäts i de "regnbelastade" proverna.

När samtliga provkroppar efter avslutad regnbelastning placerades i ett normalt inomhusklimat (+20°C, 60 % RF) fortsätter de att torka. För HD/F-bjälklaget som inte utsatts för "regn", utan som hela tiden lagrats i 20°C är dock RF-minskningen i inomhusklimatet inte lika stor som för de övriga provkropparna. Orsaken är oklar.

8.9.3 Inverkan av temperatur



Figur 8.14 Uttorkning vid +5°C respektive +20°C för prover utsatta för 4 veckors simulerat regn (klimat 1 och 3).



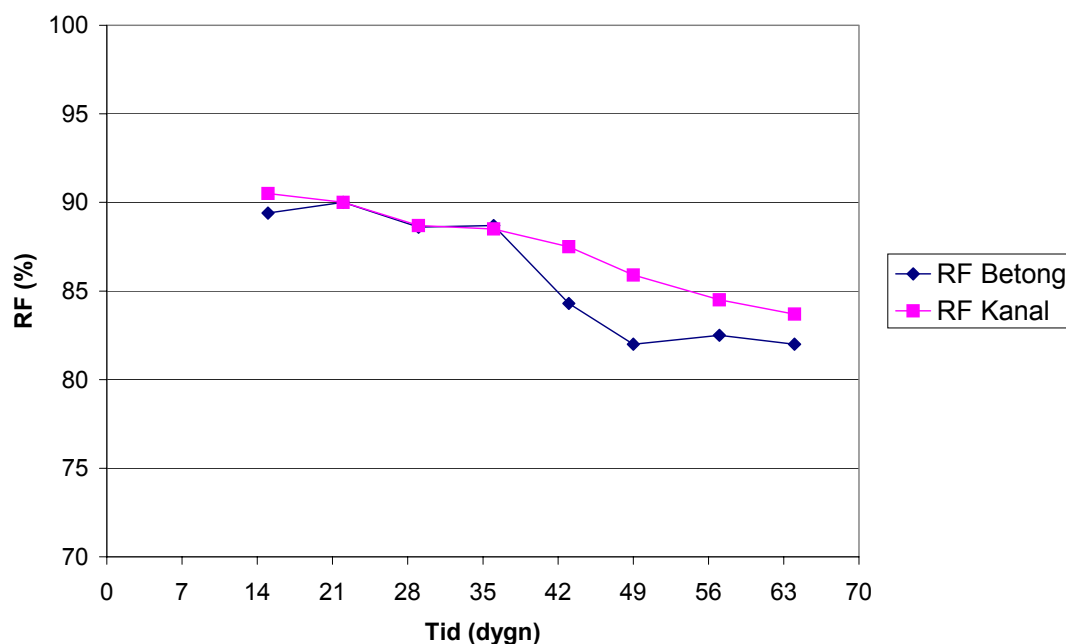
Figur 8.15 Uttorkning vid +5°C respektive +20°C för prover som hela tiden exponerats för luft med 80 % RF (klimat 2) och 60 % RF (klimat 4).

Temperaturen har en viss betydelse för uttorkningen, särskilt vid 60 % RF då RF-skillnaden efter 28 dygn är ca. 3-4 %. När alla betongprover placeras i samma klimat efter 28 dygn (60 % RF, 20°C) närmar sig dock uttorkningskurvorna varandra.

Man kan göra en viss kvantitativ analys av temperaturinverkan på uttorkning. I det aktuella försöket har såväl provkropp som omgivande luft samma temperatur. Om denna är +5°C blir ångtrycksskillnaden mellan betong (100 % RF) och luft (60 % RF) 360 Pa. Om temperaturen är +20°C blir skillnaden i stället 935 Pa. Följaktligen går uttorkning förorsakad av diffusion snabbare vid +20°C. En annan orsak är att transportkoefficienten ökar något med ökande temperatur. Materialdata i (Hedenblad 1996b) visar att man kan förvänta sig att transportkoefficienten vid +5°C enbart är ca. 65 % av koefficienten vid +20°C.

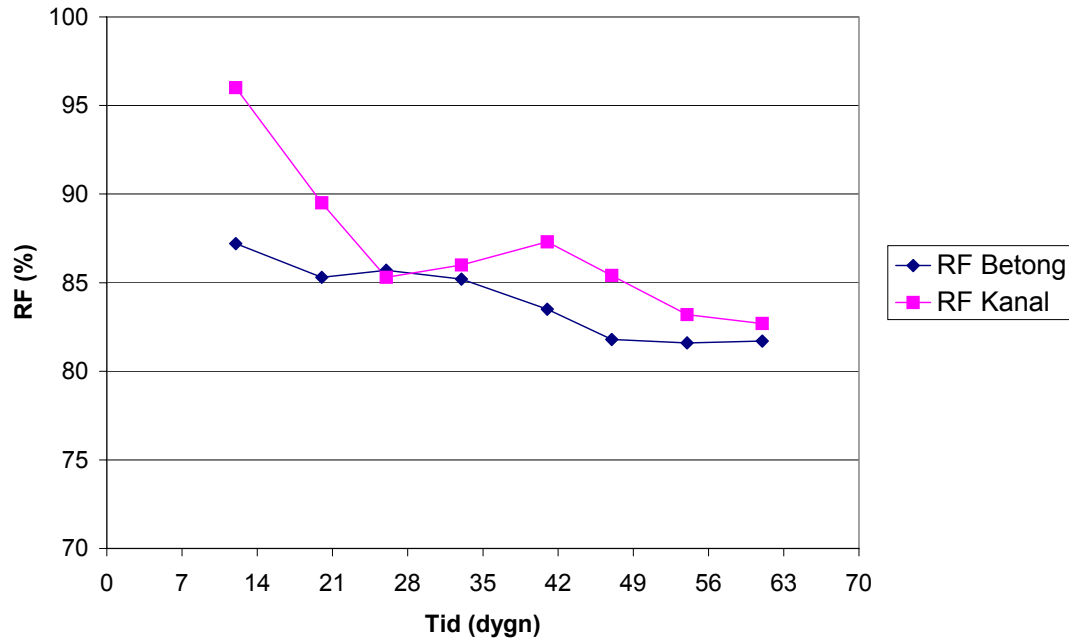
En annan orsak till att uttorkning går snabbare vid högre temperatur är att hydratationsutvecklingen och därmed självuttorkningen går snabbare.

8.9.4 RF i kanaler i håldäck



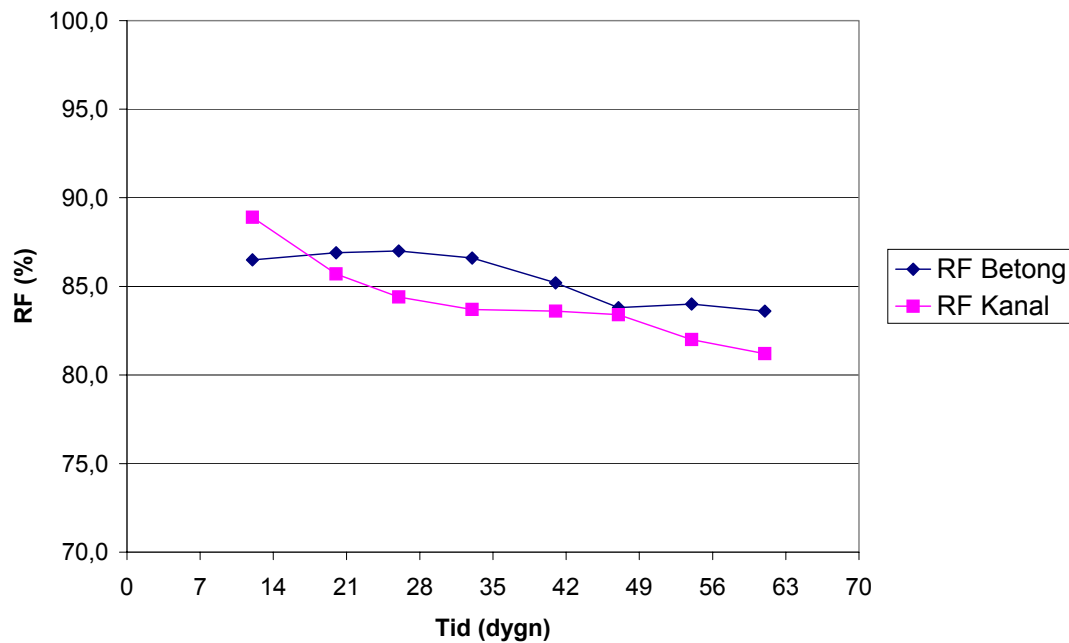
Figur 8.16 Jämförelse mellan RF på ekvivalent djup i betongen och RF i kanalluften, HD/F klimat 1.

Figur 8.16 visar att RF som mäts på ekvivalent mätdjup i betongen stämmer väl överens med den som mäts i kanalluften under de första 35 dygna. Därefter sjunker RF i betongen snabbare under ett par veckor. Skillnaden kan bero på att provkropparna flyttas från +5°C till +20°C samt att vattenbelastningen avslutas efter 28 dygn. Efter 9 veckor är RF-skillnaden ca. 2,5 %.



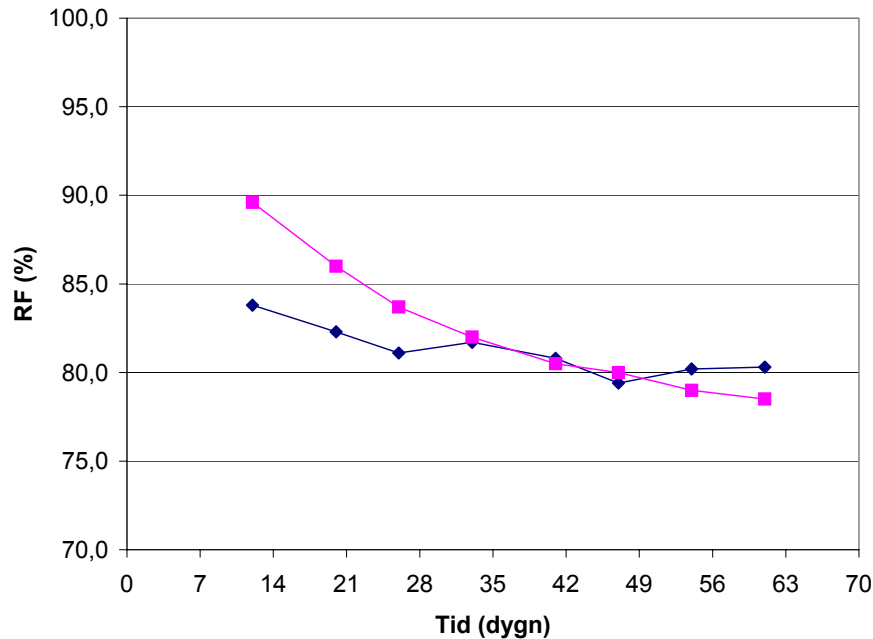
Figur 8.17 Jämförelse mellan RF på ekvivalent djup i betongen och RF i kanalluften, HD/F klimat 2.

I klimat 2 är RF mycket högre i kanalluften än i betongen under de första 3 veckorna. Därefter följer mätningarna samma utveckling som i klimat 1. RF i betongen sjunker snabbt när provkropparnas temperatur ökas. RF i kanalluften sjunker också men med en viss fördröjning i tid. Efter 9 veckor är RF-skillnaden ca. 1 %.



Figur 8.18 Jämförelse mellan RF på ekvivalent djup i betongen och RF i kanalluften, HD/F klimat 3.

Figur 8.18 visar att RF i betongen och i kanalluften följs åt ganska väl under hela mätperioden. Dessa provkroppar har befunnit sig i +20°C under hela mätperioden. Efter 9 veckor är RF-skillnaden ca. 3 %.



Figur 8.19 Jämförelse mellan RF på ekvivalent djup i betongen och RF i kanalluften, HD/F klimat 4.

Bortsett från de fyra första veckorna så är RF i betongen i stort sett lika med RF i kanalluften. Efter 9 veckor är RF-skillnaden ca. 1,5 %.

Resultaten i detta avsnitt visar att RF i kanalluften stämmer väl överens med den RF man mäter på ekvivalent mätdjup i betongen, under förutsättning att temperaturen är stabil under en längre period samt att kanalluften ej står i kontakt med omgivande luft. I verkligheten sker alltid håltagningar i kanalerna (Brander 2003) vilket gör att det omgivande klimatet kommer att påverka kanalluftens RF. Dessutom är det vanligt med fritt vatten i håldäckens kanaler. Man kan därför inte ersätta RF-mätningar i betongen med mätningar i kanalerna.

8.9.5 Inverkan av golvavjämning

Golvavjämningen hade ingen inverkan på RF i betongen på ekvivalent mätdjup. Detta stämmer väl överens med resultaten i kapitel 7.

8.10 Slutsatser

Slutsatserna från denna studie kan summeras i följande punkter.

- Uttorkning sker långsammare i prefabricerade massiva betongplattor än i håldäck. Därför är det särskilt viktigt att mäta RF i massiva plattor före golvläggning när dessa används som komplement till håldäck. Av säkerhetsskäl bör man emellertid även mäta RF i håldäck.
- Håldäck visade sig nå en RF-nivå av 85 % på ekvivalent djup inom 1,5 månader trots att de utsattes för simulerat regn under de första 4 veckorna. För massiva plattor som tidigt utsatts för regn krävs ytterligare torkning under torra förhållanden och under rätt lång tid för att de skall nå 85 % RF.
- Klimatet som bjälklagen utsätts för innan de byggs in visade sig inte spela så stor roll för den praktiska uttorkningen i fält, eftersom bjälklagens uttorkningskurvor oavsett förhistorien vad avser fuktbelastning går mot samma nivå då de placeras i ett varmt och torrt inneklimat, d.v.s. efter det att väggar och tak monterats på bygget. Dock har temperaturförhållandena under lagring av elementen en viss betydelse. Under den kalla årstiden går torkningen något långsammare.
- Den betydligt snabbare observerade uttorkningen av håldäck jämfört med massiva element har inte fått någon teoretisk förklaring. Inte heller har det kunnat klarläggas varför håldäck kan få så låga RF-nivåer trots att de utsätts för kontinuerlig vattenbelastning från tidig ålder.

9. Fältstudie av olika metoder att påskynda uttorkning av betong

9.1 Bakgrund

Fältstudien avser byggprojektet Järavallens konferenscenter vid Barsebäcks golfklubb i Skåne. Byggnaden beskrivs i avsnitt 9.3. Beställaren ställde hårda krav vad det gällde uttorkningen av betonggolven före golvläggning. Enligt beställarens allmänna anvisningar måste den relativa fuktigheten i betongplattan vara lägre än 85 % på halva plattjockleken. I dessa anvisningar föreskrevs också att betong K 35 skulle användas i bottenplattan. Betongkvaliteten i bjälklaget fick väljas fritt efter samråd med plattbärlagsleverantören.

Med tanke på den föreskrivna byggtiden, samt med tanke på de hårt ställda kraven, valde byggtreprenören att kontakta avd. Byggnadsmaterial vid LTH för att söka råd avseende hur betongens uttorkning kunde påskyndas. Denna kontakt resulterade i att ett uttorkningsprojekt finansierat av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) knöts till bygget vid Järavallen.

9.2 Syfte

Syftet med uttorkningsprojektet var att studera olika metoder att påskynda betongs uttorkning, för att därmed anvisa vilka valmöjligheter entreprenören kan ha i samband med byggnation. Om entreprenören har tillgång till flera alternativa uttorkningsalternativ kan kostnaderna för uttorkningen minskas genom att han kan välja den i varje enskilt fall ekonomiskt mest gynnsamma metoden.

Alternativa torkmetoder är betongtyper med snabbtorkande eller självtorkande egenskaper, värmning av golvet med elslingor eller infravärme samt sorptionsavfuktning av omgivande luft. Alla dessa metoder studerades i projektet.

Vidare var ett övergripande syfte med projektet att de inblandade parterna skulle få ökad kunskap som kunde utnyttjas i framtida projekt och att denna kunskap skulle föras vidare till hela byggbranschen genom rapportering till SBUF och spridning av information till branschen

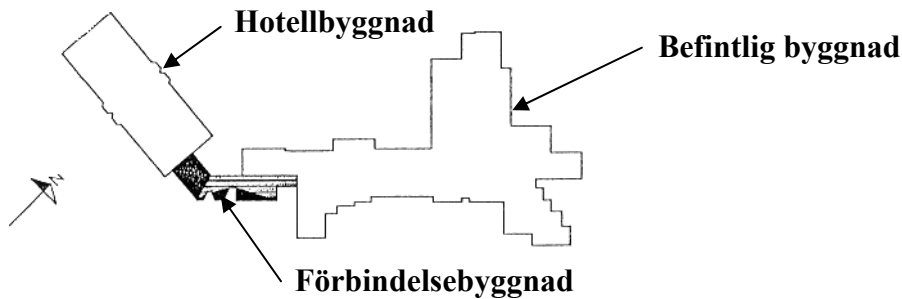
9.3 Byggnadsbeskrivning

9.3.1 Allmänt

Järavallens Conference & Country Club är belägen i sydvästra Skåne i anslutning till Barsebäcks golfklubb. Före tillbyggnaden bestod konferensanläggningen av en enplans huvudbyggnad samt ett antal stugor för boende. Byggtreprenören fick i uppdrag att uppföra ett hotell som skulle anslutas till huvudbyggnaden. Följande avsnitt beskriver tillbyggnadens utformning samt ger detaljbeskrivningar av de byggnadsdelar som var relevanta i detta uttorkningsprojekt.

9.3.2 Tillbyggnadens utformning

Tillbyggnaden kan delas upp i en hotellbyggnad samt en förbindelsebyggnad mellan hotelldelen och den befintliga huvudbyggnaden, se figur 9.1.



Figur 9.1 Planskiss av Järavallens tillbyggnad.

Hotelldelen var en tvåplansbyggnad som skulle rymma 36 dubbelrum. De yttre måtten var ca. 42 x 17 m, vilket gav en yta av ca. 700 m² per våningsplan. Hotelldelen bestod även av en ca. 50 m² källare. I appendix 4.1 presenteras plan- och sektionsskisser för hotellbyggnaden. Figur 9.2 visar hotellbyggnaden under byggskedet.



Figur 9.2 Hotelldelen under byggnation. Plattbärlaget har just monterats.

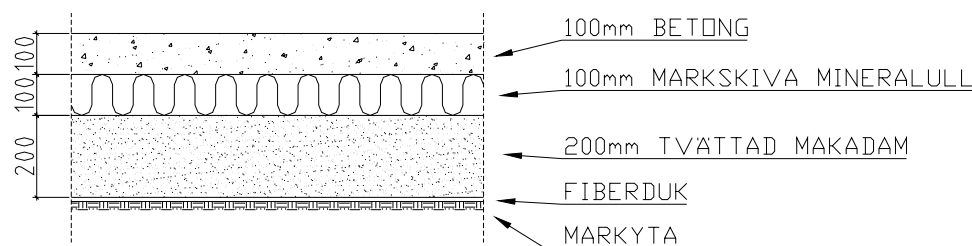
Grunden utgjordes av en platsgjuten platta på mark med underliggande markisolering av stenull. Källarbjälklaget bestod av platsgjuten betong på ett prefabricerat plattbärlag. Även mellanbjälklaget i byggnaden bestod av denna konstruktionstyp. Alla bärande väggar var av platsgjuten betong. De bestod av tvärgående väggar som begränsade varje hotellrum och två hjärtväggar längs med den centrala korridoren. Kortsidorna på byggnaden murades upp med Lecablock som putsades utvändigt. Långsidorna täcktes av prefabricerade glaspartier och takkonstruktionen var av trä.

9.3.3 Tillbyggnadens golvkonstruktioner

Nedan följer en detaljerad beskrivning av de golvkonstruktioner som förekom i projektet. I appendix 4.1 framgår var de olika golvkonstruktionerna förekom. Samtliga betonggolv avjämnades före golvläggning med ca. 10 mm finavjämning.

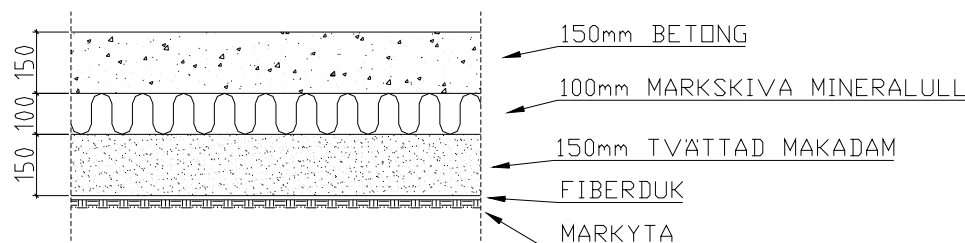
Bottenplan i hotell del

Tre olika golvkonstruktioner förekom i hotellets bottenvåning. Den vanligast förekommande var 100 mm platsgjuten betong med 100 mm underliggande markskiva av mineralull, se figur 9.3.



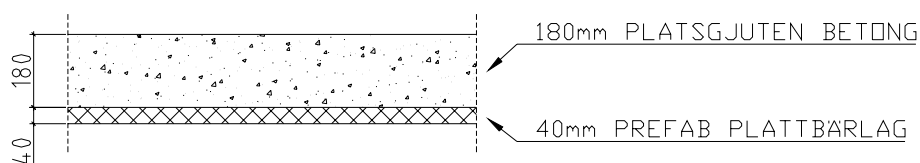
Figur 9.3 Platta på mark 100 mm.

I korridoren som löpte genom byggnaden bestod golvet av 150 mm platsgjuten betong med 100 mm underliggande mineralull, se figur 9.4.



Figur 9.4 Platta på mark 150 mm.

Golvet över källaren, se appendix 4.1, bestod av 40 mm prefabricerat plattbärlag som pågöts med 180 mm platsgjuten betong, se figur 9.5.

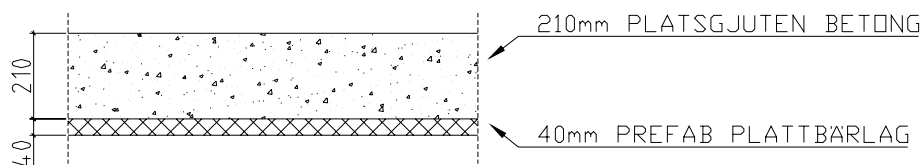


Figur 9.5 Bjälklag 220 mm.

Som golvbeläggning användes klinker i badrum och städrum samt parkettgolv med underliggande plastfolie i övriga utrymmen.

Plan 2 i hotelldel

Två olika golvtyper förekom på plan 2. Bjälklaget över den öppna ytan vid trappen bestod av 40 mm prefabricerat plattbärlag som pågöts med 210 mm platsgjuten betong, se figur 9.6.



Figur 9.6 Bjälklag 250 mm.

Resten av plan 2 bestod av samma bjälklag som användes över källaren, se figur 9.5.

Som golvbeläggning användes klinker i badrum och städrum samt parkettgolv med underliggande plastfolie i övriga utrymmen.

Voter och kantförstyvningar

Voter i botteplattan förekom under alla bärande väggar och kantförstyvningar fanns längs med ytterkanterna av plattan. Betongtjockleken i dessa varierade mellan 250 och 460 mm. Voter och kantförstyvningar isolerades på undersidan med 50 mm cellplast.

9.4 Uttorkningsmetoder

9.4.1 Allmänt. Krav på uttorkning

De ursprungliga förutsättningarna för byggprojektet bestämdes av konstruktören. I de allmänna anvisningarna angavs följande konstruktionsförutsättningar.

- Golv på mark utförs i hållfasthetsklass K 35.
- Betong till bjälklaget väljs i samråd med plattbärlagsleverantören. Uttorkningstiden skall beaktas.
- Övriga platsgjutna konstruktioner utförs i hållfasthetsklass K 35.
- Fukthalten i betonggolv får ej vara högre än 85 % RF vid mattläggning.
- Fuktmätning skall utföras på halva plattjockleken.

I enlighet med praxis ställdes inga uttorkningskrav på bärande innerväggar av betong, vilket egentligen var ologiskt, eftersom även dessa i det aktuella fallet skulle beklädas med fuktkänslig målad träpanel.

Gjutningen av bottenplattan var planerad att ske i början av september och bjälklaget skulle gjutas i slutet av oktober. Mattläggning var planerat till början av april. Tillgänglig planerad uttorkningstid före avjämning av betongen var således ca. 6 månader.

Det konstaterades snabbt att det skulle bli svårt att uppfylla uttorkningskravet med de förutsättningar som gavs, i synnerhet kravet att fukt skulle mätas på halva plattans tjocklek.

Det fanns därför ett intresse hos medverkande parter att vidta uttorkningsåtgärder som förväntades uppfylla kraven. Många metoder att klara uttorkningstiden var möjliga men flera av dem var oprövade. Det beslöts därför att använda projektet för att studera olika metoders effektivitet.

De uttorkningsmetoder som användes presenteras nedan. Flertalet torkåtgärder provades på bottenbjälklaget och framförallt då på bottenplattan på mark. Denna var indelad i fack motsvarande hotellrummen. Facken begränsades av bärande väggar och av voterna under dessa. Varje sådant fack utsattes för en och samma torkåtgärd. Åtgärder vidtogs för att förhindra att torkåtgärden i ett visst fack påverkade uttorkningen i angränsande fack. En skiss över var och hur olika uttorkningsmetoder användes redovisas i appendix 4.2 och i appendix 4.7.

9.4.2 Ökad betongkvalitet

Betongens vattencementtal, vct är den viktigaste betongparametern som påverkar uttorkningstiden. Detta framgår klart av kapitel 4, 5 och 6 i denna rapport. Normal husbyggnadsbetong i hållfasthetsklasser mellan K 25 och K 45 har normalt ett vct som ligger mellan 0,70 och 0,50. Uttorkningen av denna typ av betong domineras av ångtransport utåt via diffusion genom betongens porsysystem. Detta är mera öppet ju högre vct är. Därför är torkhastigheten högre vid högre vct. Torkhastigheten blir alltså högre vid vct 0,70 än vid 0,50, men å andra sidan är mängden fukt som måste torka ut för att erforderlig RF-nivå skall nås betydligt högre vid vct 0,70. Nettoeffekten blir att uttorkningstiden minskar med sänkt vct.

Eftersom uttorkning sker utåt styrs uttorkningshastigheten, förutom av betongens täthet, av ånghaltsskillnaden mellan betong och omgivande luft.

Betong med $vct \leq 0,40$ kallas ofta för snabbtorkande eller självtorkande betong. Denna typ av betong har mindre mängd sk farlig byggfukt än normal husbyggnadsbetong. Farlig byggfukt är fukt som måste avgå för att golvet skall kunna beläggas med fuktkänsligt material. I det aktuella fallet är det enligt beställaren all fukt som överstiger 85 % RF inne i betongen. Orsaken till den minskande mängden farlig byggfukt är att porstrukturen är mycket fin hos betong med lågt vct. Detta gör att den sk jämviktsfuktkurvan blir flack vid höga RF-nivåer, se kapitel 2. En liten uttorkning ger därför en stor sänkning av RF. Detta medför att enbart den uttorkning som skapas av cementraktionen, se kapitel 2, kan räcka för att sänka RF till ofarlig nivå. Ingen uttorkning av fukt utåt behövs alltså. Detta är bakgrunden till begreppet ”självtuttorkning”.

I fältprojekt Järavallen användes betong med tre olika vct enligt följande:

- vct 0,38 (K 60) Voter och kantförstyvningar
Halva mellanbjälklaget
- vct 0,50 (K 45) Korridoren i bottenplanet
Halva mellanbjälklaget
- vct 0,62 (K 35) Bottenplattan i hotelldelen bortsett från korridoren

Fullständiga betongrecept redovisas i appendix 4.3.

Genom att först gjuta voter och kantförstyvningar med en hög betongkvalitet, se figur 9.7, och därpå gjuta bottenplattan med en lägre kvalitet, kunde man ur uttorkningssynpunkt behandla hela bottenplattan som en enhet med konstant tjocklek och med enkelsidig uttorkning uppåt. Vid bestämning av RF togs därför ingen hänsyn till betongen i voten, då man ansåg att den torkade genom inre självuttorkning. Det innebar också att voten vid fuktmätning antogs ha samma sk ekvivalenta djup som plattan.

Att uttorkningen ansågs vara ensidig uppåt trots att värmeisoleringen under plattan var genomsläpplig beror på att marken och isoleringen under hela uttorkningstiden antogs vara mycket fuktig (100 % RF). Detta är ett antagande på ”säkra sidan”.



Figur 9.7 Gjutning av voter och kantförstyvningar dagen före gjutning av bottenplattan.

9.4.3 Värmning med elslinga

En direkt uppvärmning av betongen är positiv på flera sätt när det gäller uttorkningshastigheten. För betong med lågt vct ger den tillförda värmen en snabb hydratations- och strukturutveckling i betongen. Det medför att relativa fuktigheten sjunker snabbt i betongen på grund av sk självuttorkning.

Den ökade värmen ger också upphov till ett ökat ångtryck i betongen. Den drivande potentialen för ångtransport genom diffusion ökar således. Denna effekt är störst i vanlig husbyggnadsbetong där porsystemet är öppet.

Vid Järavallen användes elslingor i källarbjälklaget, halva mellanbjälklaget samt i ca. 200 m² av bottenplattan i hotelldelen. De golvparterier där elslingor användes visas i appendix 4.2. I bottenplattan varierades slingornas placering. Vissa placerades i underkant medan andra fästes i den mittplacerade armeringen. I bjälklagen placerades samtliga slingor i underkant direkt på plattbärlaget.

Elslingor monterades före gjutning, se figur 9.8. Avståndet mellan kablarna var ca. 25 cm och varje slinga täckte ca. 30 m². Kablarna monterades från långsida till långsida. Styrningen av elslingorna skedde via en termostats med noggrannheten 0,5°C. Termostaten ställdes in för en kontinuerlig temperatur på 25°C.

I rum 1:19, se appendix 4.2, värmdes plattan intermittent. Detta innebar att elslingan var påslagen under natten och avstängd under dagen.



Figur 9.8 Elslingor i bottenplattan.

Elslingorna startades efter ca. 6 veckor i samband med att provisoriskt tätt hus erhöles, d.v.s. 2001-11-20 (bottenplan) och 2001-12-21 (plan 2).

En slinga var ur funktion redan innan värmning skulle startas och ytterligare tre gick sönder senare under byggskedet. Uppgift om tidpunkter för uppkomsten av dessa skador saknas.

9.4.4 HP-torkning (High Pressure)

Denna metod är vanligt förekommande i samband med sanering av fuktskador i befintliga byggnader. Det fanns därför ett intresse att undersöka om tekniken gick att använda även vid nyproduktion.

HP-torkning provades på bottenplattan i ett antal begränsade ”fack”. Totalt användes metoden på ca. 190 m² av bottenplattan, se appendix 4.2.

Rör för inblåsning av torkad värmd luft monterades före gjutning genom det kvarsittande kantelementet, se figur 9.9. Rör för utblåsning placerades mitt i plattan i den tilltänkta korridoren i husets mitt.



Figur 9.9 Montering av inblåsningsrör för HP-torkning.

Varm torr luft blåstes in genom rören i makadamlagret under plattan för att torka markisoleringen samt för att värma betongen. Fiberduken som fanns under bottenplattan och makadamlagret ansågs vara tillräckligt tät för att hindra oönskat luftläckage nedåt i marken. Där HP-torkning var aktuellt placerades cellplast mellan voter och fiberduk, se figur 9.10, för att förhindra luftläckage i sidled mellan det fack där HP-torkning utfördes och angränsande fack. Det visade sig ganska tidigt att luften trots dessa åtgärder tog andra vägar än de tänkta. All tillförd luft spreds dock inte åt sidan eller nedåt eftersom ett visst flöde kunde mätas vid utblåsningsrören.



Figur 9.10 Placering av cellplast under voter för att förhindra luftläckage mellan fack.

I ett av facken, se figur 9.11, startade torkningen direkt efter gjutning. Övrig HP-torkning startades ca. 6 veckor efter gjutning i samband med att man erhöll provisoriskt tätt hus.



Figur 9.11 HP-systemet. Bilden visar turbinen som blåste in varm torr luft genom inblåsningsrören. Utblåsningsrören kan skimras vid plattans mitt.

9.4.5 Sorptionsavfuktning

Sorptionsavfuktning innebär att RF i luften ovanför bottenplattan/bjälklaget sänks genom avfuktning och/eller värmning. Denna åtgärd får ingen högre effektivitet förrän man erhållit tätt hus.

Sorptionsavfuktning av omgivande luft användes i samtliga utrymmen. Två aggregat placerades på bottenplanet 2 månader efter gjutning. Den torra varma luften från aggregaten spreds naturligt i byggnaden för att ge ett gynnsamt uttorkningsklimat. På ovanvåningen placerades ett aggregat 2,5 månader efter gjutning. Figur 9.12 visar en sorptionsavfuktare.



Figur 9.12 Sorptionsavfuktare.

9.4.6 Torkning med infravärme

Infravärme ökar uttorkningshastigheten enligt samma princip som användning av elslingor, d.v.s. genom att värma betongen öka ångtrycket i betongens porer. Infravärmaren placeras oftast på betongytan och används vanligtvis i samband med uttorkning av betong efter vattenskador.

I den aktuella undersökningen var värmning av betongen med hjälp av infravärme en metod som lades till i projektets slutskede för att forcera uttorkningen på vissa kritiska partier av byggnaden där fuktnivån några veckor före golvläggning bedömdes vara för hög. Värmaren var ca. en meter lång, se figur 9.13, och värmdde upp ett område på ca. 2 m². Betongens temperatur var över 30°C vid uppvärmningen.



Figur 9.13 Infravärmare.

9.5 Uttorkningsbedömningar med datorprogram före byggstart

9.5.1 Allmänt

Valet av uttorkningsåtgärder baserades på tidigare erfarenheter samt genom en förhandsbedömning av trolig uttorkningstid. Uttorkningsbedömningen gjordes med hjälp av beräkningsprogrammet TorkaS 1.0. Det är ett hjälpmedel som utvecklats för att bedöma uttorkningstiden hos vanliga konstruktionstyper av betong tillverkad med svensktillverkat portlandcement. Programmet har utvecklats vid Lunds Tekniska Högskola (Hedenblad & Arfvidsson 1998).

Det i förhandsbedömningen använda programmet TorkaS 1.0 har under projektiden utvecklats till version TorkaS 2.0. Simuleringsresultaten är dock snarlika i de båda versionerna. Dessa baseras nämligen på samma materialdata. Den största skillnaden mellan programmen består av ändrad layout vad det gäller inmatning av indata och redovisning av utdata. Dessutom har materialdata för ett nytt cement av typ CEM II/A-L (Byggcement) inlagts.

9.5.2 Beräkningsförutsättningar

Beräkning med TorkaS förutsätter följande indata:

- Konstruktionstyp Alternativ: platta på mark eller fribärande bjälklag.
- Ensidig eller dubbelsidig uttorkning
- Betongtjocklek
- Cementshalt i betongen
- Tillsats av silikastoft
- Betongens vattencementtal, vct
- Gjutdatum
- Datum för ”tätt hus” Tätt hus erhålls då man skyddat betongen från nederbörd
- Torkstart Torkstart innebär ett styrt omgivande klimat
- Slutdatum Det datum då man anser att beräkning kan avslutas
- Klimatdata Det omgivande klimatet under torktiden, temperatur och RF. Antingen används normala klimatdata för orten i fråga (inlagda i programmet) eller också anges egna data

9.5.3 Simuleringsresultat

De aktuella simuleringarna utfördes vid LTH i samverkan med personal från byggentreprenören, vilkas uppgift var att ge relevanta kronologiska data för byggprocessen. Fallen med elslinga samt HP-torkning gick ej att simulera med TorkaS 1.0. Vid förhandsbedömningen ansågs dock dessa metoder vara gynnsammare än fallet med enbart sorptionsavfukning, vilket var ett fall som kunde simuleras

Konstruktionstyperna som valdes för simulering var ”platta på mark med underliggande mineralull” samt ”plattbärlag”. I tabell 9.1 redovisas de byggtider som låg till grund för simuleringarna. De verkliga tiderna skiljer sig från de i tabell 9.1. Verkliga tider framgår av avsnitt 9.10.

Tabell 9.1 Förutsatta byggtider som användes vid uttorkningsbedömningen.

	Bottenplatta	Mellanbjälklag
Gjutning	2001-09-10	2001-10-27
Tätt hus	3 veckor efter gjutning	7 veckor efter gjutning
Torkstart	8 veckor efter gjutning	8 veckor efter gjutning
Slutdatum	28 veckor efter gjutning	22 veckor efter gjutning

I programmet användes i programmet inlagda normala klimatdata gällande Sturup. Dessa klimatdata är baserade på SMHI:s väderstatistik och utgör medelvärden för ett stort antal år. Det styrda torkklimatet sattes till 21°C och 35 % RF. Inlagda värden på vct, cementhalt och plattjocklek anges i tabell 9.2.

TorkaS 1.0 redovisar RF på det så kallade ”ekvivalenta djupet”, d.v.s. 40 % av plattjockleken för ensidigt torkande bottenplatta och 20 % av plattjockleken för dubbelsidigt torkande bjälklag. Det innebär att de beräknade RF-värdena är något högre än RF på det mätdjup som angavs av beställaren, nämligen 50 % av plattjockleken oavsett konstruktionstyp. Den största skillnaden gäller framförallt mellanbjälklaget.

Tabell 9.2 redovisar resultaten av simuleringen med TorkaS 1.0.

Tabell 9.2 Resultat av TorkaS 1.0-simulering. RF vid antaget slutdatum 2002-04-01

Konstruktionstyp	vct	Cementhalt (kg/m ³)	Betongtjocklek (mm)	RF vid slutdatum (%)
Platta på mark	0,62	295	100	83
Platta på mark	0,50	360	150	85
Mellanbjälklag	0,38	410	220	86
Mellanbjälklag	0,38	410	250	86

En grafisk presentation av TorkaS-simuleringen återfinns i appendix 4.4.

Resultaten visade att det skulle vara möjligt att nå målet 85 % RF på det ekvivalenta mätdjupet med de angivna förutsättningarna vad avser val av klimat och byggtider. Däremot visar beräkningen att det kan vara svårt att helt nå målet 85 % RF på halva plattjockleken. Detta gäller särskilt för mellanbjälklaget. Man kommer dock mycket nära, nämligen 86 %.

9.6 Mätning och registrering av temperatur och fukt

9.6.1 Temperatur och RF-mätning i luft

Ett datalagringssystem bestående av ett antal separata enheter var monterat på byggarbetsplatsen. Detta system registrerade uppmätta värden på temperatur och relativ fuktighet i luften i rummen ovanför bjälklagen. En enhet var placerad utomhus alltsedan byggstarten. Ytterligare 12 enheter var placerade inne i byggnaden, 10 på bottenplanet och 2 på ovanvåningen.

9.6.2 RF-mätning i betong

Fuktmätningarna i betong påbörjades i mitten av januari 2002 ca. 3 månader efter gjutning, och avslutades tre månader senare. Personal från avd. Byggnadsmaterial vid LTH utförde trendmätningar av RF-utvecklingen under byggets gång, medan en RBK-auktoriserad fuktkontrollant utförde slutmätningarna, vilka av kontraktssenliga skäl erfordrades för att verifiera att fuktnivåer enligt bygghandlingar uppnåts.

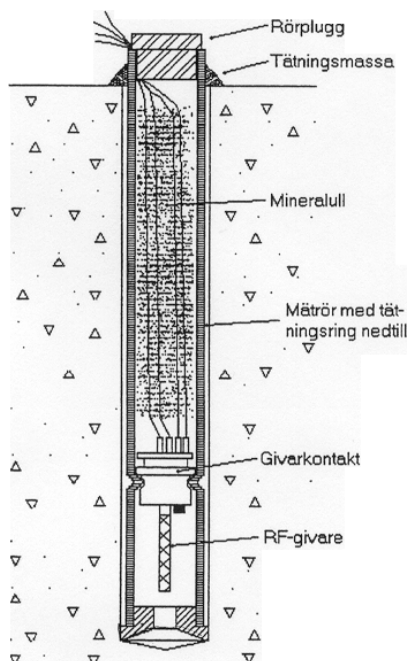
RBK är en förkortning av Rådet för Byggkompetens. Rådet har utvecklat ett system för mätning av fukt i betong och godkänner fuktkontrollanter och laboratorier. Förfarandet vid trendmätningarna följde RBK:s manual för fuktmätning i betong (RBK 2001).

Trendmätning med kvarsittande givare av typ Humi-Guard

Trendmätningen genomfördes med RF-givaren monterad i rör som monterats i borrhål och som slutar med en öppning på fastställt djup i betongen, se figur 9.14. Mätningarna utfördes, som nämnts ovan, i enlighet med vad som föreskrivs i (RBK 2001). Givaren satt kvar i röret så länge man önskade att mätningen skulle fortgå.

Avläsningen av RF och temperatur gjordes med ett lättskött handinstrument. Avlästa värden matades in i ett datorprogram som innehöll givarens kalibreringskurva varvid man erhöll aktuell RF omräknad till det värde som gällt om temperaturen i betongen varit +20°C. Denna omräkning tar hänsyn dels till givarens egen temperaturkänslighet, dels till att betongens jämviktsfuktkurva har ett visst temperaturberoende.

Att omräkning till 20°C gjordes beror på att det är den temperatur som betongen kommer att få när byggnaden tas i bruk. Om omräkning inte skett hade uppmätt RF-värde underskattat verklig RF eftersom mindre vatten binds i betongen vid jämvikt vid högre temperatur.



Figur 9.14 Borrhålsmätning med kvarsittande givare av typ Humi-Guard. (RBK 2001)

35 mätpunkter i 12 olika rum utnyttjades i detta projekt. Mätpunkternas placering framgår av appendix 4.5. RF på halva plattjockleken registrerades i samtliga rum. Mätpunkterna skyddades under byggtiden med mineralull som täcktes med ett lock av Plywood enligt figur 9.15.



Figur 9.15 Skydd av mätpunkter under byggtiden.

Trendmätning på uttaget prov med Vaisala-givare

Mätningen utfördes enligt manualen (RBK 2001). Mätningen innebar att man med hjälp av bilning utan användning av vatten tog ut små betongbitar från önskat djup i konstruktionen. Bitarna fuktisolerades genom att placeras i förseglade provrör som togs direkt till LTH:s laboratorium för RF-bestämning i stabilt rumsklimat. Fuktgivare av typ Vaisala HMP 44 stacks ned i provröret som därefter återigen förseglades. Mätning gjordes när givaren kommit i jämvikt med provbitarna.

Enligt planerna skulle uttaget prov enbart utföras där elslingor används för uttorkning. Det genomfördes dock betydligt fler mätningar eftersom det ansågs vara viktigt att använda mätning på uttaget prov även för jämförelse med mätresultat från kvarsittande givare av typ Humi-Guard.

Slutmätningar på uttaget prov med Protimeter-givare

Slutmätningen i projektet utfördes av RBK-auktoriserad fuktkontrollant. Av kontrollanten uttagna prov sändes av kontrollanten till auktoriserat laboratorium för RF-bestämning med RF-givare av typ Protimeter vilken baseras på dagpunktsbestämning. Slutmätningen omfattade 13 mätpunkter placerade enligt appendix 4.6.

9.7 Betonggjutning

Betonggjutningarna påbörjades i slutet av september 2001 med gjutning av källare och källarbjälklag. Bottenplattan göts 1 vecka därefter och bjälklaget ytterligare 2 veckor senare. Förbindelsegången göts i slutet av oktober, d.v.s. ca. 5 veckor efter första gjutningen.

Samtliga voter och kantförstyvningar göts normalt en dag innan bottenplattan, se figur 9.16. Orsaken till den högre betongkvaliteten var att det inte var realistiskt att klara beställarens mycket höga uttorkningskrav vid användning av normal betongkvalitet.



Figur 9.16 Gjutning av voter och kantförstyvningar i betong K 60.

I tabell 9.3 redovisas gjutdatum och klimat för de olika gjutetapperna. Gjutetappens position framgår av appendix 4.2. Uppgifterna i tabellen baseras på dagbok som fördes på bygget av arbetsledningen.

Tabell 9.3 Gjutdatum och klimat i samband med gjutning.

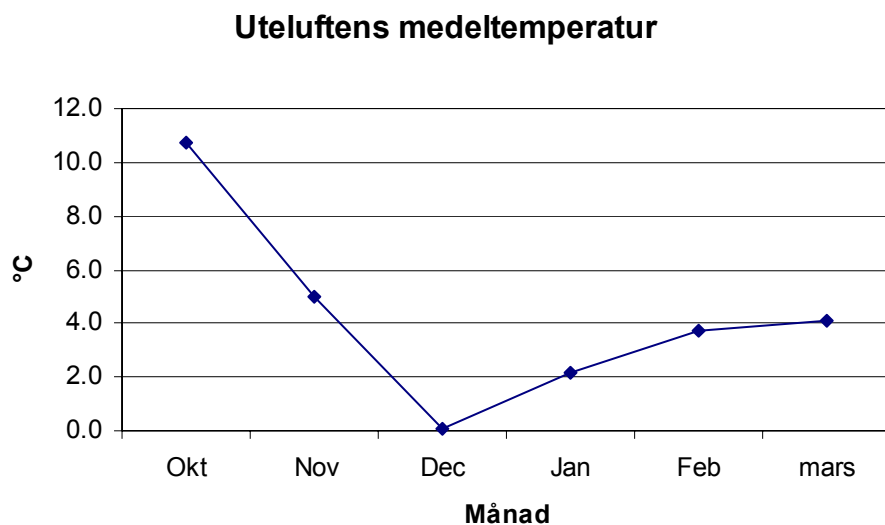
Konstruktionsdel	Gjutetapp	Gjutdatum	Temperatur	Nederbörd
Källarbjälklag	A-B	2001-09-26	12°C	-
Bottenplatta	K-M	2001-10-01	15°C	25 mm
Bottenplatta	F-H	2001-10-03	14°C	20 mm
Bottenplatta	B-D	2001-10-05	13°C	-
Bottenplatta	H-K	2001-10-08	12°C	-
Bottenplatta	D-F	2001-10-09	13°C	-
Bottenplatta	A-B	2001-10-09	13°C	-
Mellanbjälklag	H-M	2001-10-19	12°C	-
Mellanbjälklag	D-H	2001-10-26	11°C	-
Mellanbjälklag	A-D	2001-11-01	10°C	-

Den nederbörd som redovisas i tabellen gäller i samband med gjutning eller under natten före gjuttillfället. Ett kraftigt regnande i början av oktober innebar att markisoleringen var mycket blöt i samband med gjutningen av de första etapperna av bottenplattan.

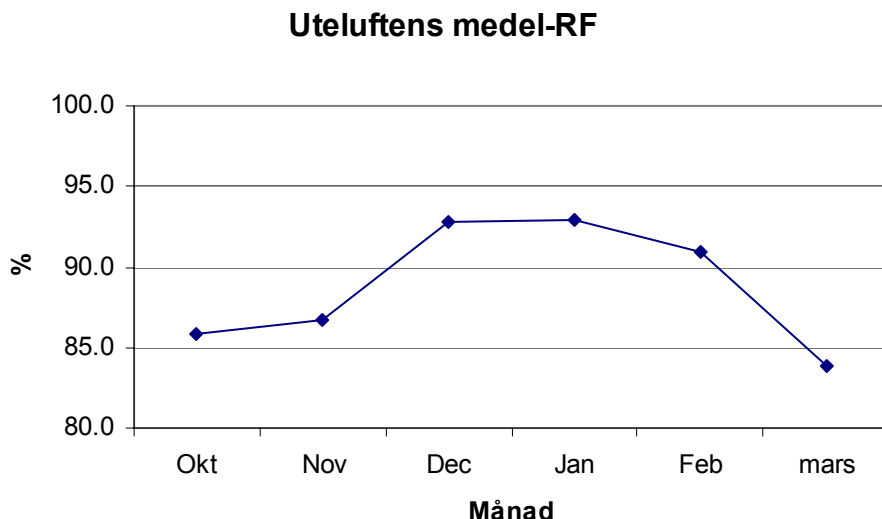
9.8 Torkklimat

9.8.1 Utomhusklimatet

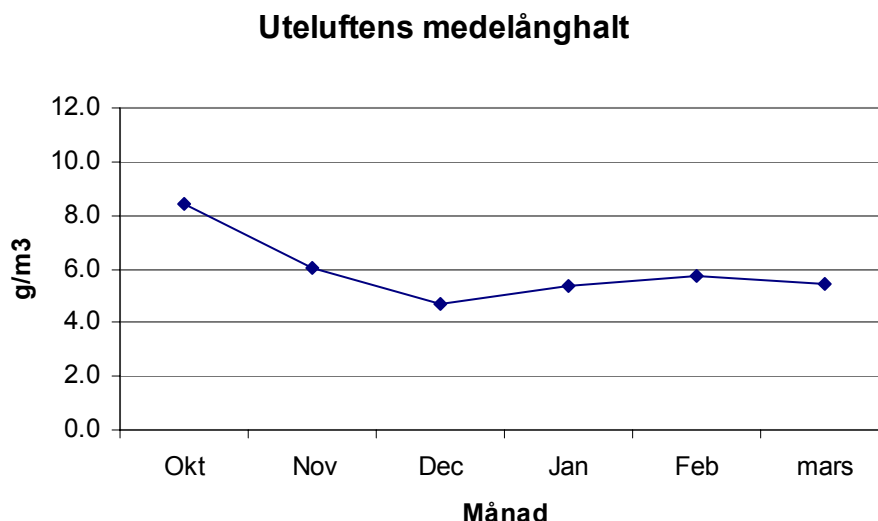
Uteluftens temperatur, relativa fuktighet och ånghalt registrerades från mitten av oktober till mitten av mars, d.v.s. från det den sista betonggjutningen gjorts och 5 månader framåt. Resultatet presenteras som månadsmedelvärden i figur 9.17-9.19. Noggrannheten i denna mätning var ± 3 % RF och $\pm 0,4^\circ\text{C}$.



Figur 9.17 Månadsmedeltemperatur utomhus.



Figur 9.18 Månadsmedel-RF utomhus.



Figur 9.19 Månadsmedelånghalten utomhus.

9.8.2 Inomhusklimatet

Tidpunkt för tätt hus

Målsättningen i uttorkningsprojektet var att erhålla ett provisoriskt tätt hus så tidigt som möjligt. Genom att klä in ytterväggarna på långsidorna med plast och använda mellanbjälklaget som tak hoppades man kunna skydda bottenplattan från nederbörd. Det visade sig dock att det läckte in vatten via installationsschakt i bjälklaget och via ytterväggarna så fort det regnade ute. Förbättringar gjordes under tiden men helt regnskyddad blev inte bottenplattan förrän yttertaket var på, ca. 12 veckor efter första gjutningen, d.v.s. i mitten av december 2001.

De teoretiska uttorkningsberäkningar med TorkaS 2.0 som redovisas i avsnitt 9.8 kommer därför att baseras på att tätt hus erhöles då yttertaket var tätt, d.v.s. i mitten av december.

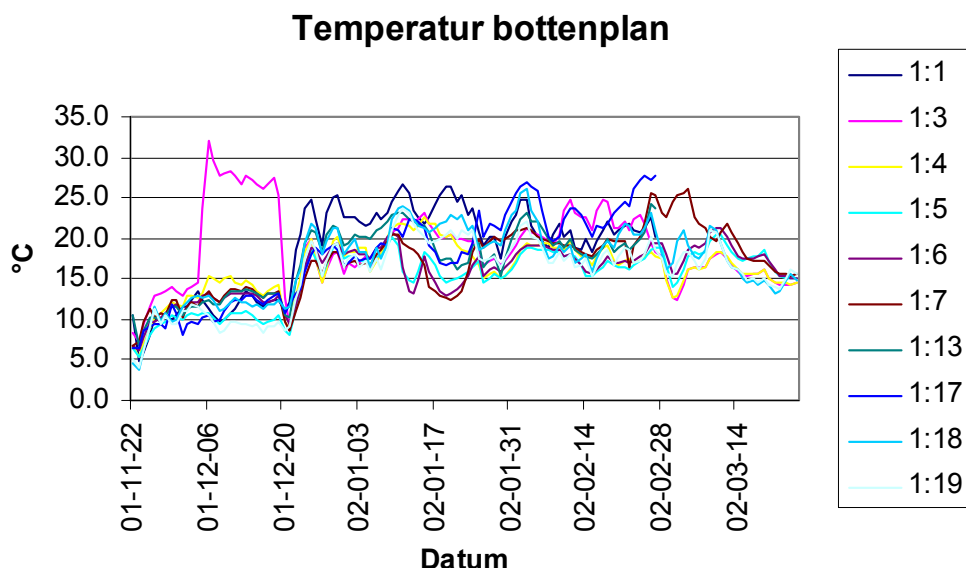
Möjligheten att styra torkklimatet

Den provisoriska plastinklädningen av väggarna gav en dålig värmeisolering. Detta innebar att inomhustemperaturen var starkt påverkad av utomhusklimatet eftersom värmning saknades inne i huset. Först när sorptionsavfuktarna var på plats fick man ett gynnsamt inomhusklimat. De permanenta glaspartierna som monterades på bottenplan i mitten av januari och på plan 2 i mitten av februari gav ytterligare positiv effekt.

Inomhusklimatet, temperatur och RF

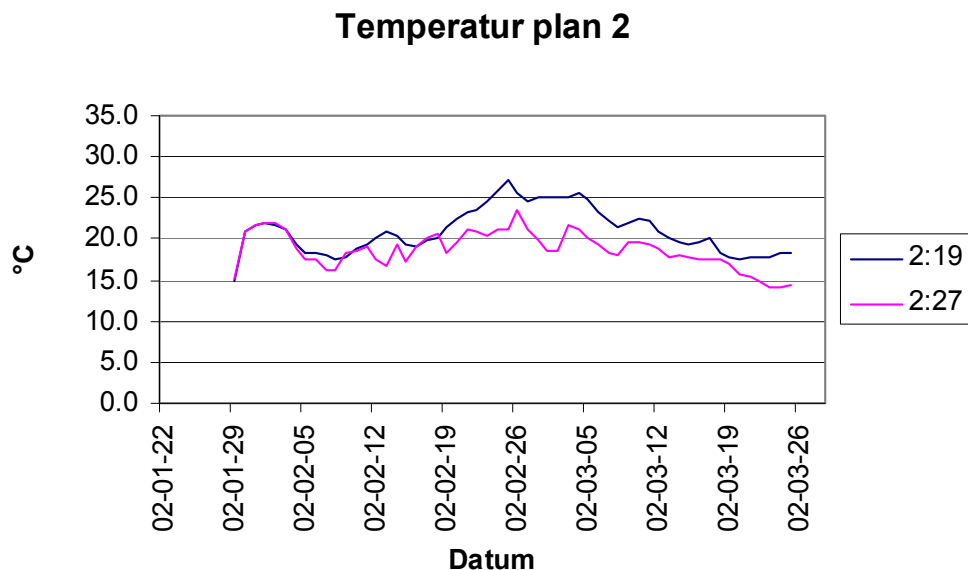
Temperatur och RF hos inneluften registrerades i hotellbyggnaden via 12 st. givare. Noggrannheten hos dessa givare var $\pm 5\%$ RF och $\pm 0,7^\circ\text{C}$. 10 givare var placerade på bottenplanet och 2 var placerade på plan 2. Följande figurer redovisar hur temperatur, RF och ånghalt varierade över tiden i hotellbyggnaden. Kurvorna redovisar dygnsmedelvärden.

Registrering av inomhusluftens temperatur ger värdefull information för bedömning av betongens uttorkning. Temperaturen ger också information om arbetsmiljön.



Figur 9.20 Dygnsmedeltemperatur på bottenplanet.

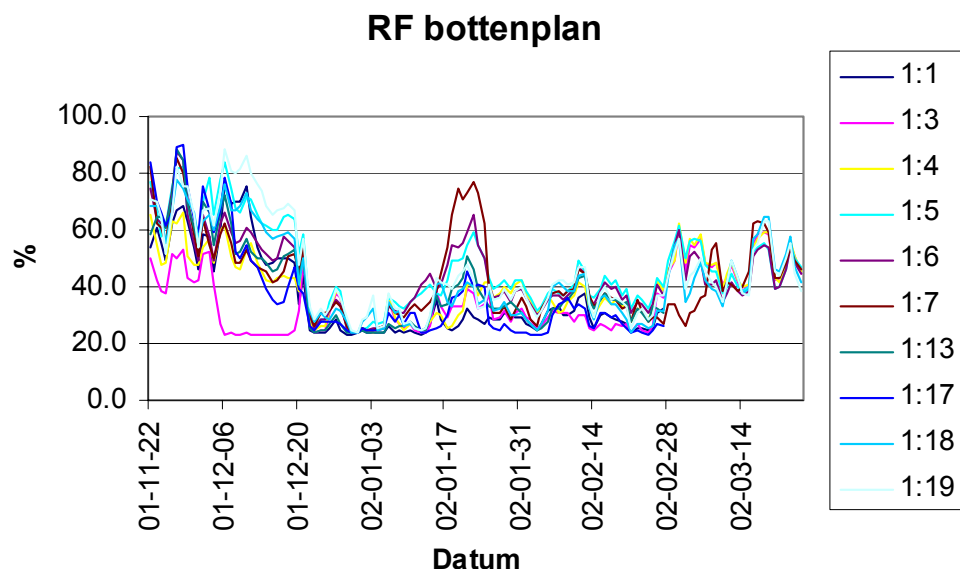
Figur 9.20 visar tydligt effekten av att tätt hus erhöles på bottenplanet i slutet av december. Den höga temperaturen i rum 1:3 under december berodde på att värmefläkten var placerad i detta rum. Värmefläkten flyttades ut i korridoren när tätt hus erhöles. Temperaturen varierade mellan $+15^\circ\text{C}$ och 25°C efter det att tätt hus erhöles.



Figur 9.21 Dygnsmedeltemperatur på plan 2.

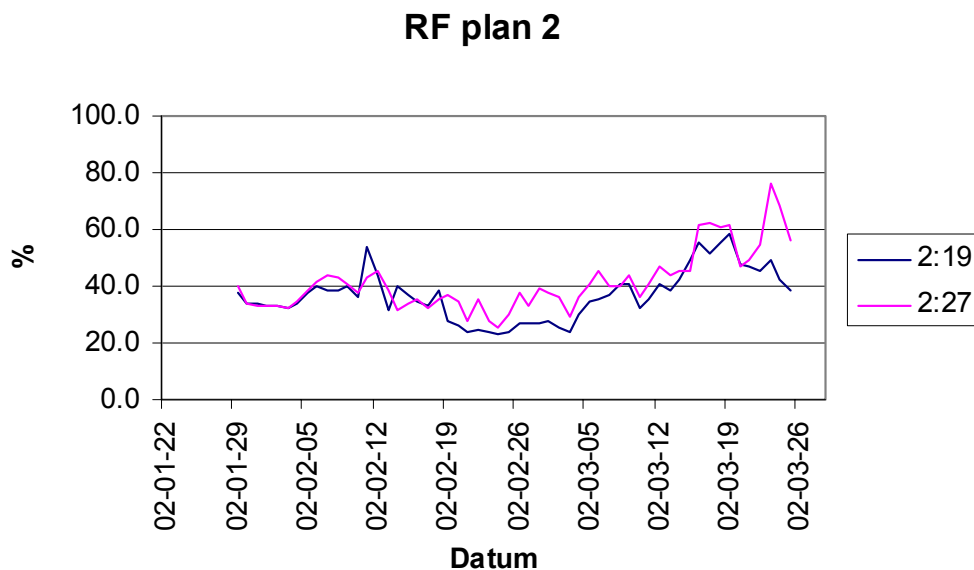
Klimatet på plan 2 började registreras i samband med att ytterväggar och yttertak monterats. Temperaturen varierade mellan +15°C och 25°C.

Registrering av relativ fuktighet, RF ger information om kondensrisk, arbetsmiljö samt uttorkningsklimat.



Figur 9.22 Dygnsmedel-RF på bottenplanet.

Figur 9.22 visar att den relativa fuktigheten på bottenplanet var mycket låg efter det att man fått huset tätt och temperaturen därmed ökat. Ökningen av RF i mitten av januari kan förklaras med ett fukttillskott orsakat av målningsarbeten. Ökningen i mars beror på fukttillskott i samband med golvavjämning.

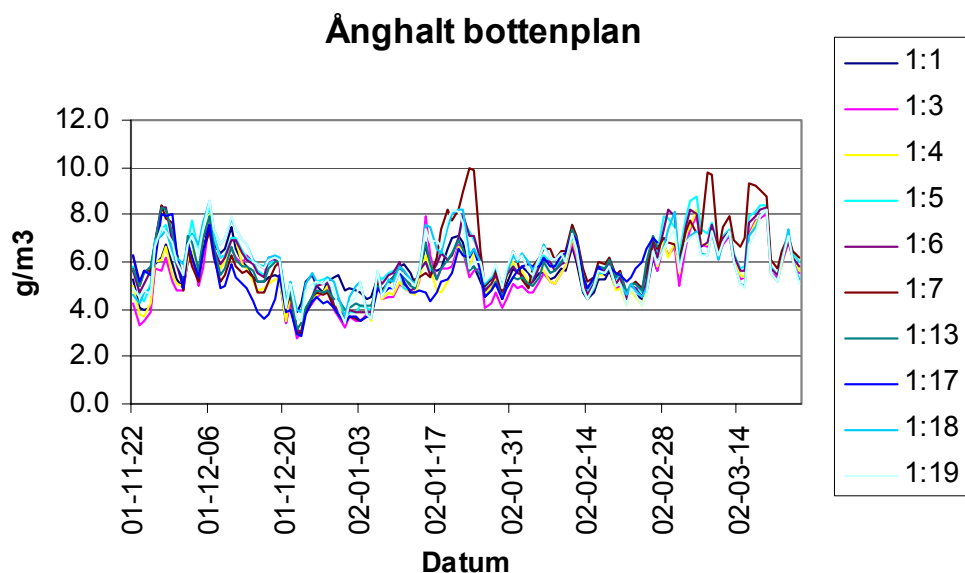


Figur 9.23 Dygnsmedel-RF på plan 2.

Även på plan 2 har RF varit lågt under byggtiden. De RF ökningarna som förekommer kan förklaras med fukttillskott i samband med målning och golvavjämning.

Ånghalt

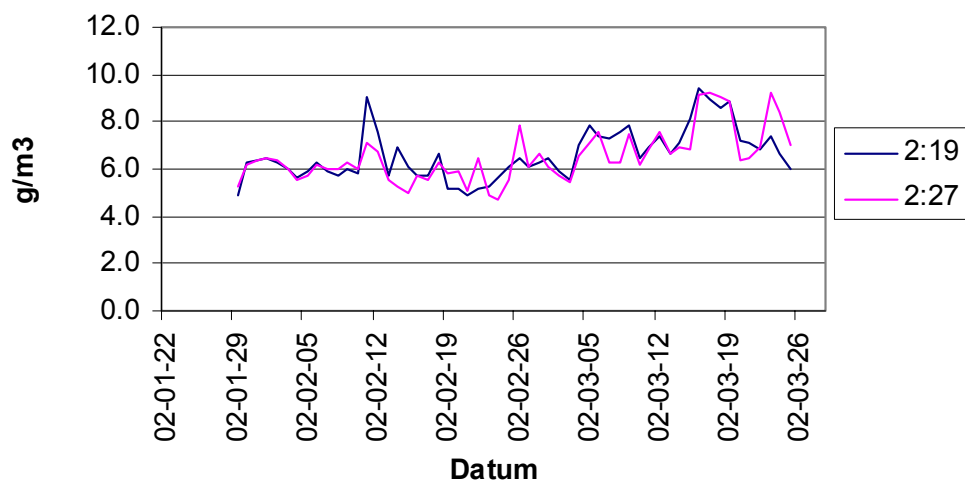
Genom att jämföra ånghalten utomhus och inomhus kan man bestämma fukttillskottet inomhus eftersom ett högre värde inomhus beror på sådant fukttillskott. Ånghalten i omgivande luft har stor betydelse för betongens uttorkning eftersom det är ånghaltsskillnaden mellan betong och omgivande luft som driver ångtransporten.



Figur 9.24 Dygnsmedelånghalt bottenplan.

Efter det att tätt hus erhållits var ånghalten inomhus ungefär lika hög som ånghalten utomhus. Detta visar att sorptionsavfuktningen tog hand om fukttillskottet från det torkande golvet. Vissa stora fukttillskott i samband med målning och golvavjämning har dock inte kunnat avfuktas helt och hållet.

Ånghalt plan 2



Figur 9.25 Dygnsmedelånghalt på plan 2.

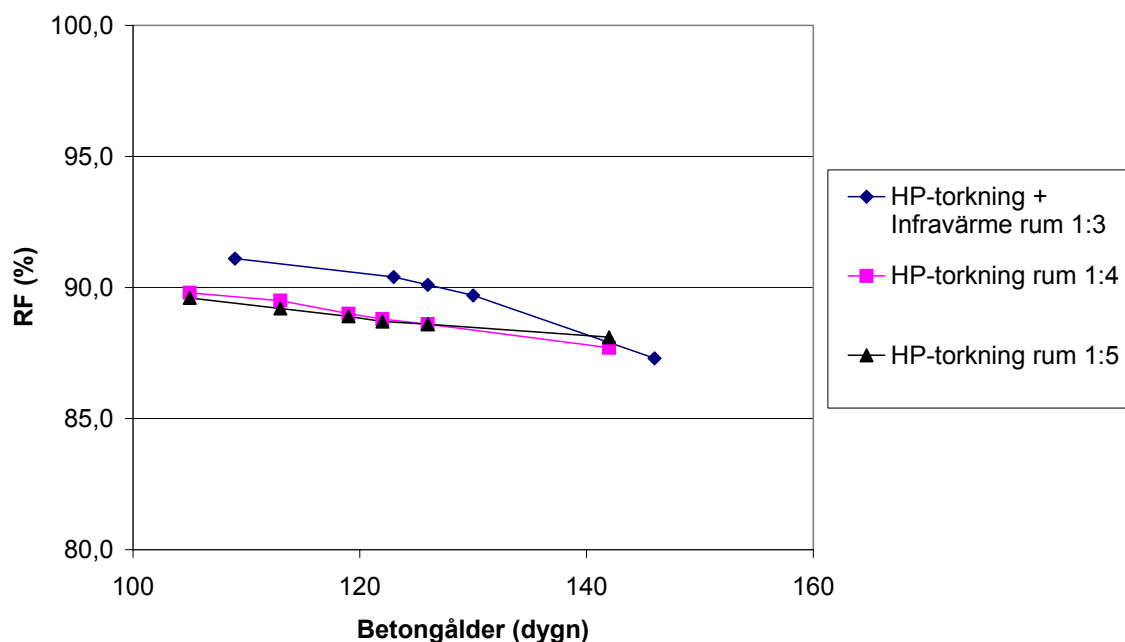
Ånghalten på plan 2 ligger generellt något högre än på bottenplanet. Detta kan förklaras av att endast en sorptionsavfuktare fanns på plan 2. På bottenplanet fanns två avfuktare.

9.9 Resultat

9.9.1 Trendmätningar med kvarsittande givare av typ Humi-Guard

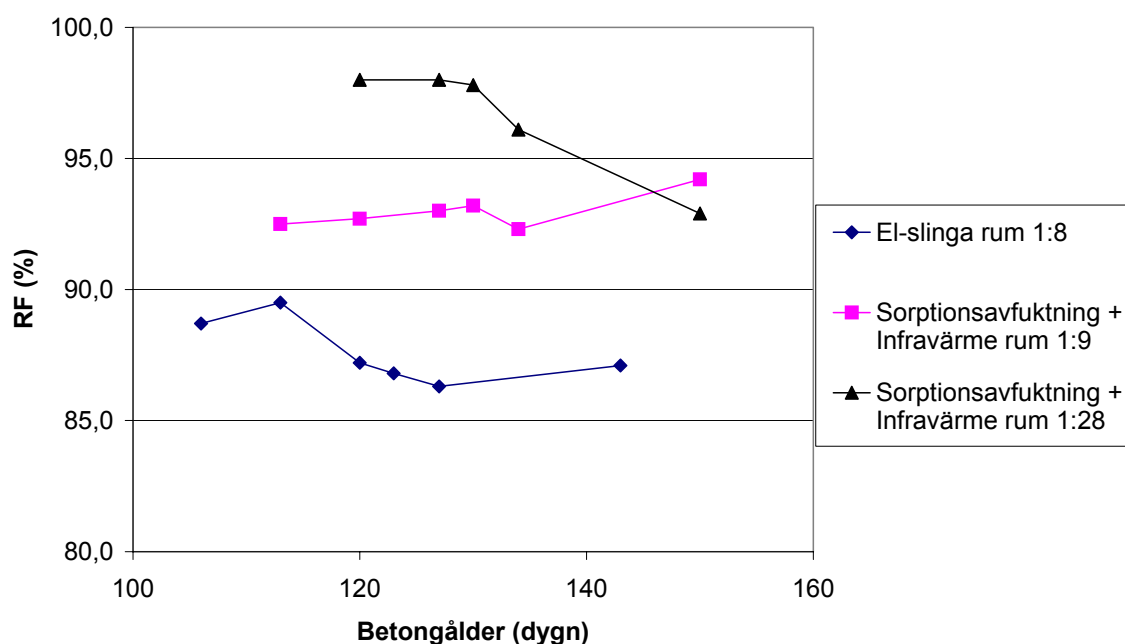
Nedan presenteras mätresultat från Humi-Guard mätningar uppdelade efter de olika golvkonstruktionerna. Resultaten som presenteras gäller halva plattjockleken och är ej justerade med avseende på mätosäkerhet, d.v.s. det är avlästa värden korrigerade för temperatur enligt avsnitt 9.6.2 som anges.

Platta på mark 100 mm



Figur 9.26 Uppmätt RF på halva plattjockleken i mätpunkt 1:3; 1:4 och 1:5.

Resultaten i figur 9.26 visar uttorkningen i de golv där HP-torkning använts. Det ser inte ut att spela någon roll om man startar HP-torkningen direkt efter gjutning (rum 1:5) eller i samband med tätt hus (rum 1:3-4). I rum 1:3 började betongen värmas med infravärme efter 125 dygn.



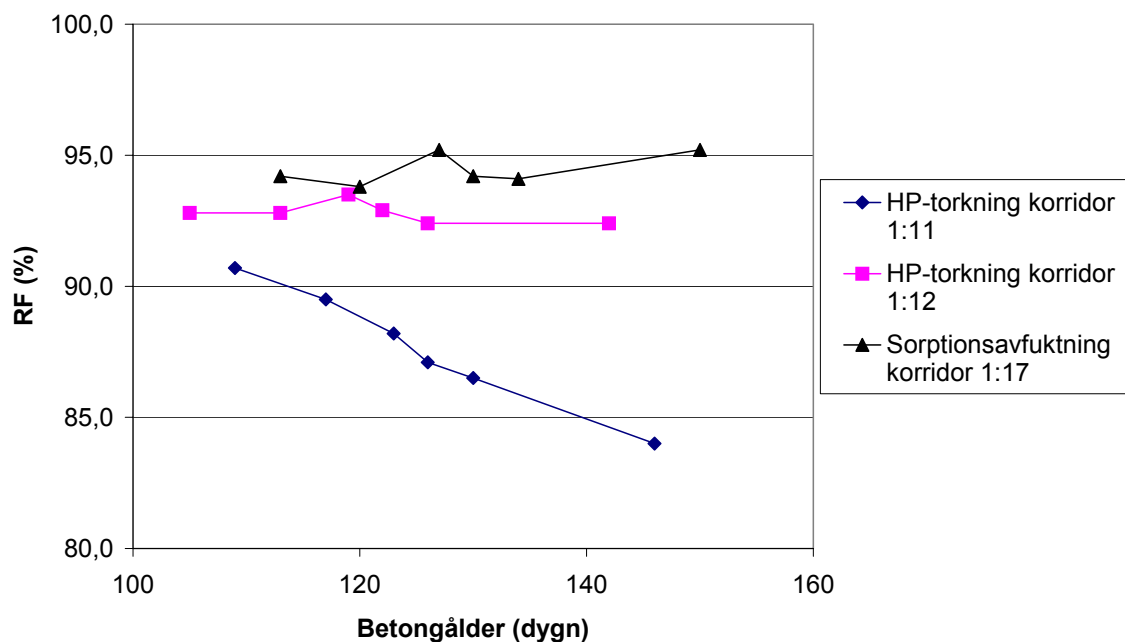
Figur 9.27 Uppmätt RF på halva plattjockleken i mätpunkt 1:8; 1:9 och 1:28.

I rum 1:8 värmdes betongen med värmeslinga. Här skedde en snabb uttorkning som ligger i närheten av målvärdet 85 % RF.

Mätpunkten i rum 1:9 var placerad över kantförstyvningen. Betongen saknade uttorkningsåtgärd från gjutstart bortsett från sorptionsavfuktning. Efter ca. 130 dygn började betongen värmas med infravärme. Uppmätt RF i 1:9 ligger på en jämn nivå och stiger något under mätperioden.

Betongplattan i rum 1:28 saknade torkåtgärd från start bortsett från sorptionsavfuktning. Denna mätpunkt uppvisade mycket hög RF-nivå vid de tre första mätningarna. Därför beslutades att betongen skulle torkas med hjälp av infravärme. Infravärmen startades ca. 130 dygn efter gjutning och fick RF att sjunka med ca. 5 % på 30 dagar.

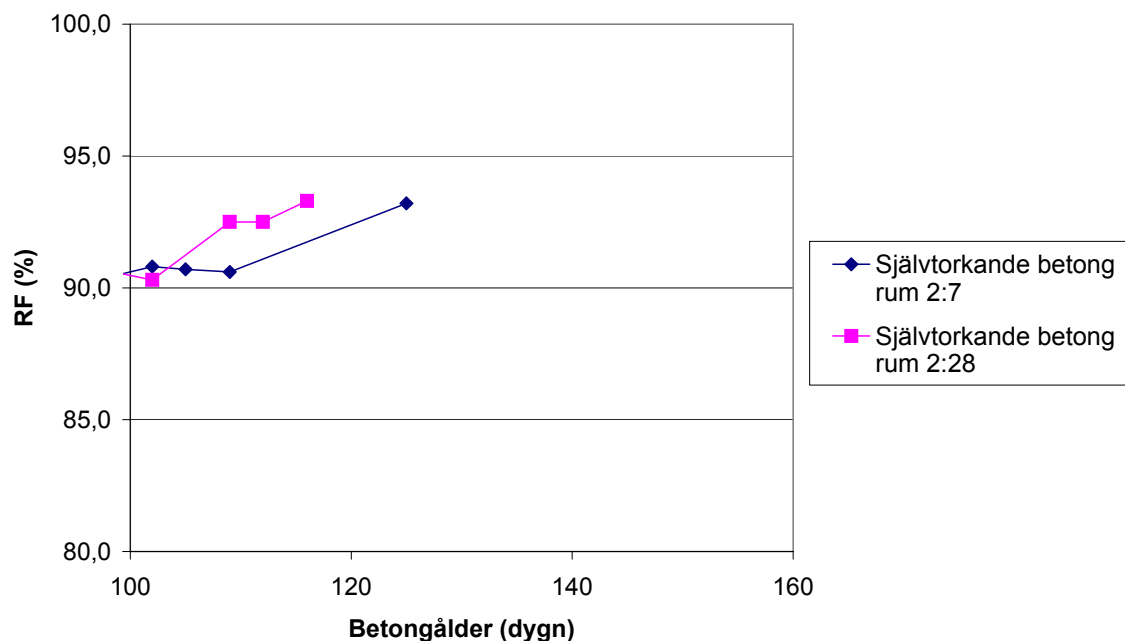
Platta på mark 150 mm



Figur 9.28 Uppmätt RF på halva plattjockleken i mätpunkt 1:11; 1:12 och 1:17.

I mätpunkterna i 1:11 och 1:12 borde uttorkningsförloppet ha varit lika eftersom båda betongplattorna haft HP-torkning som startats samtidigt. I mätpunkt 1:17 där betongen enbart torkas med sorptionsavfuktning sker enligt mätningarna ingen uttorkning.

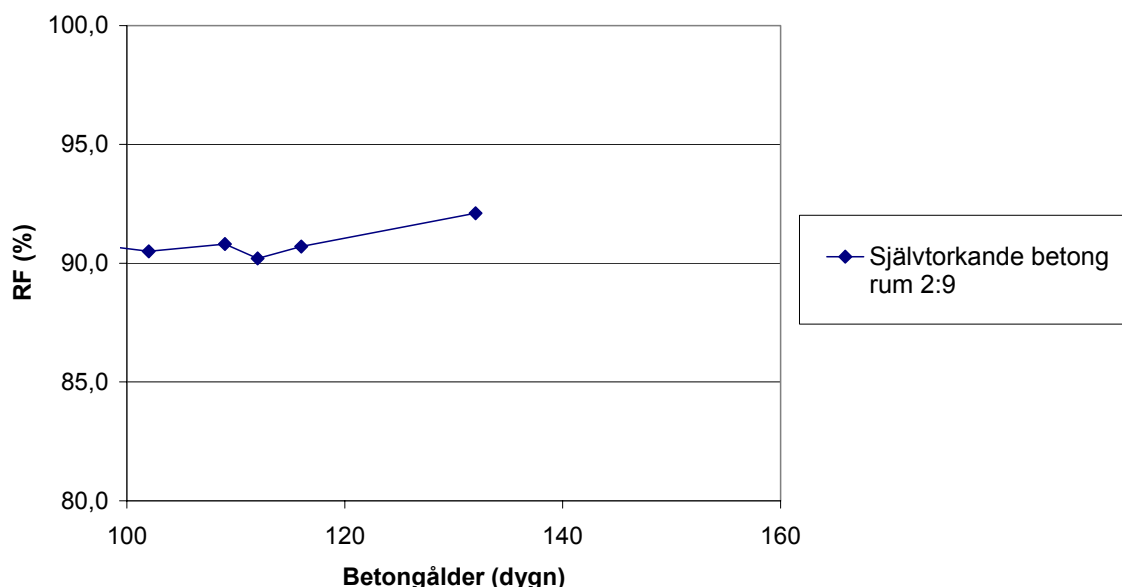
Mellanbjälklag 220 mm



Figur 9.29 Uppmätt RF på halva bjälklagstjockleken i mätpunkt 2:7 och 2:28.

Mätningarna i 2:7 och 2:28 visar båda ett ologiskt beteende, där RF ökar med tiden. Betong med vct 0,38 borde dessutom ha en snabbare uttorkning än vad mätningarna med Humi-Guard visar.

Mellanbjälklag 250 mm



Figur 9.30 Uppmätt RF på halva bjälklagstjockleken i mätpunkt 2:9.

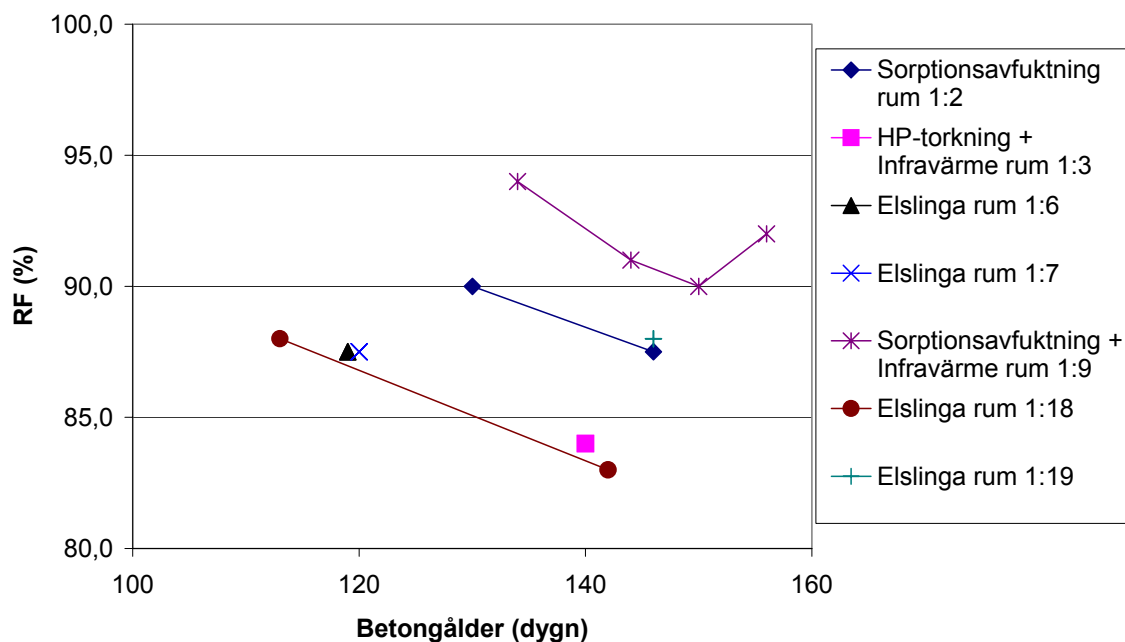
Även i mätpunkt 2:9 sker en svårförklarlig ökning av RF.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att de flesta mätningarna som utförts med kvarsittande Humi-Guard givare i självtorkande betong har gett resultat som måste vara felaktiga. Vad detta beror på har inte kunnat fastställas, men det finns misstankar om att givarna inte klarar de temperaturvariationer som förekommer på byggarbetsplatsen. De misslyckade fuktmätningarna med Humi-Guard innebar att fuktmätningar med uttaget prov ersatte mätningarna med kvarsittande givare, se nästa avsnitt.

9.9.2 Trendmätningar på uttaget prov med Vaisala-givare

Nedan presenteras mätresultat från RF-mätningar på uttaget prov, uppdelat efter de olika golvkonstruktionerna. Resultaten som presenteras gäller halva plattjockleken och är inte justerade med avseende på mätosäkerhet. Fuktmätningarna utfördes i klimatrum, +20°C.

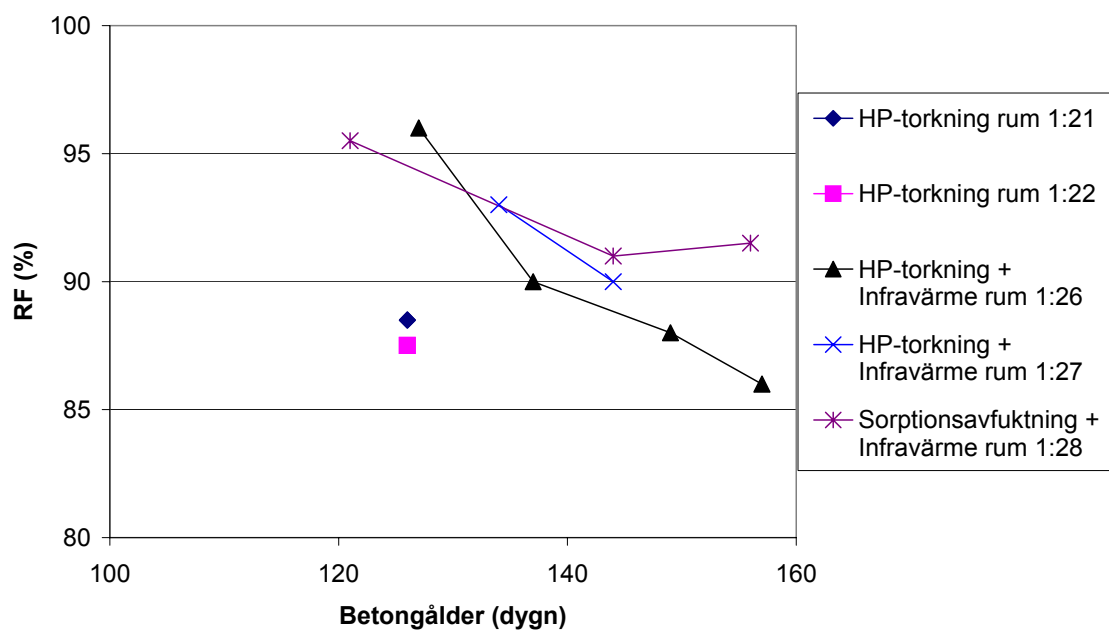
Platta på mark 100 mm



Figur 9.31 RF på halva plattjockleken i rum 1:2; 1:3; 1:6; 1:7; 1:9; 1:18 och 1:19.

De mätningar som utfördes i betong som värmdes med värmeslinga visade en snabb uttorkning (rum 1:6; 1:7; 1:18). Undantaget var mätpunkt 1:19 som torkad långsammare än de övriga. Detta kan förklaras av att värmeslingan i 1:19 var tidstyrd och enbart var i drift mellan kl.18.00-06.00 under dygnet.

Den goda uttorkningen i rum 1:3 där HP-torkning användes kan delvis bero på att betongen värmdes med infravärme under 10 dagar före fuktmätningen. Det som skiljde mätpunkterna 1:2 och 1:9 är att den sistnämnda fanns i betong som göts på fuktig mineralull och där betongen utsattes för mycket nederbörd strax efter gjutningen. Dessutom torkades betongen i 1:9 med infravärme efter ca. 130 dygn. Varför RF ökade vid sista mätningen i rum 1:9 är oklart.

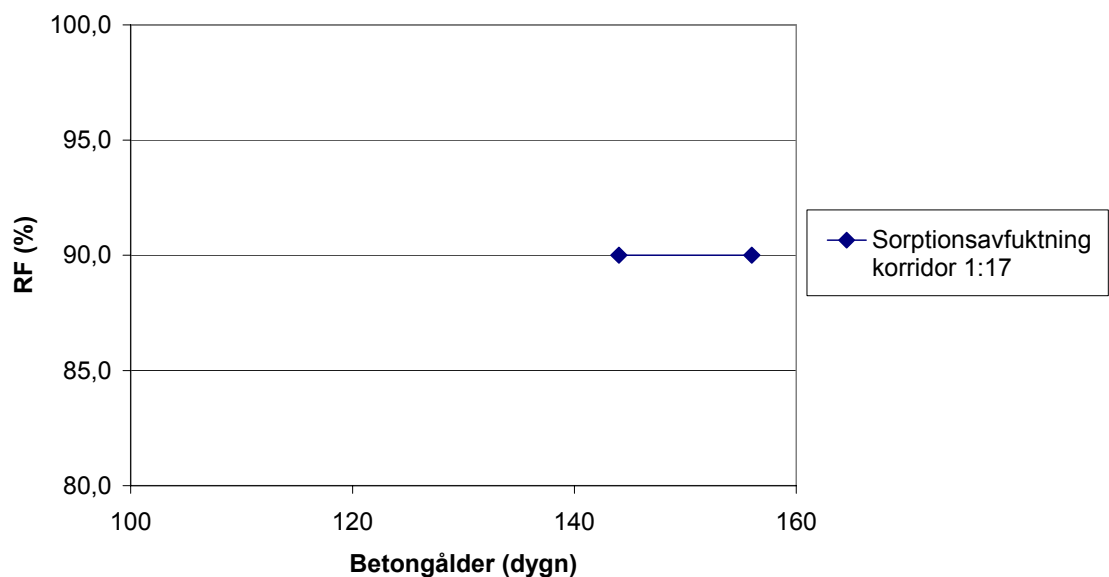


Figur 9.32 Uppmätt RF på halva plattjockleken i rum 1:21; 1:22; 1:26; 1:27 och 1:28.

I rum 1:26; 1:27 och 1:28 tvingades man använda infravärme för att påskynda uttorkningen av betongen. Infravärmen startades ca. 130 dygn efter gjutning. I rum 1:26 och 1:27 kombinerades infravärmen med HP-torkning som startades samtidigt som infravärmen. Detta gav enligt figur 9.32 en mycket god uttorkning.

HP-torkningen i rum 1:21-22 gav också bra resultat och visar återigen att det inte gav snabbare uttorkning att starta HP-torkningen direkt efter gjutning (rum 1:22).

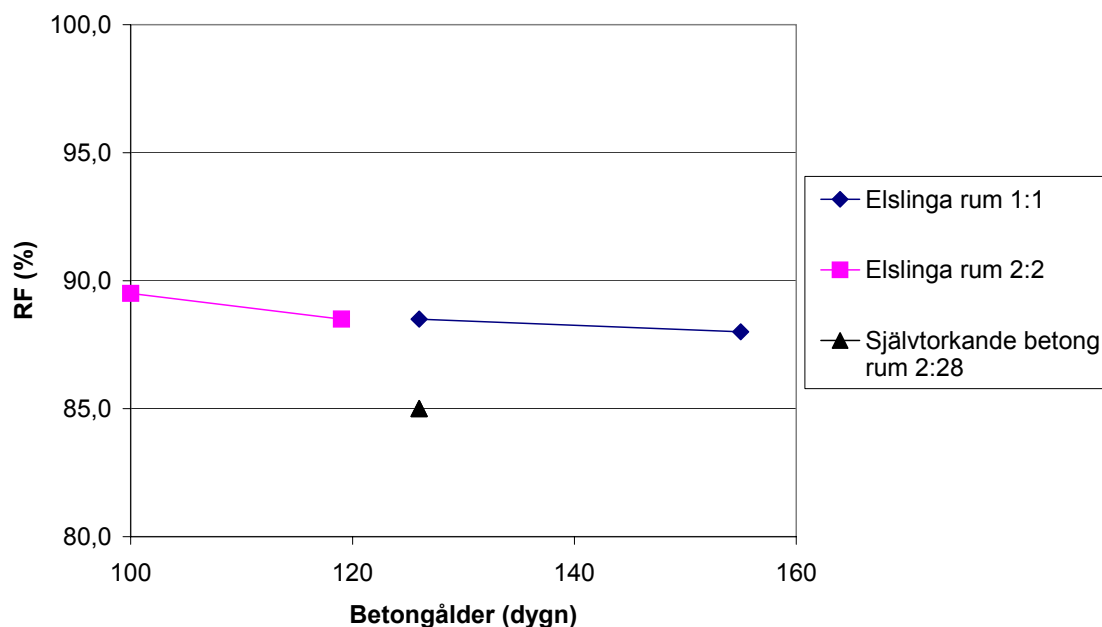
Platta på mark 150 mm



Figur 9.33 Uppmätt RF på halva plattjockleken i korridor 1:17.

Den del av korridoren som har beteckningen 1:17 göts på fuktig markisolering. Betongen har inte torkat på ett tillfredställande sätt och infravärmare kunde inte användas på denna del av plattan på grund av att de försvårade framkomligheten i byggnaden.

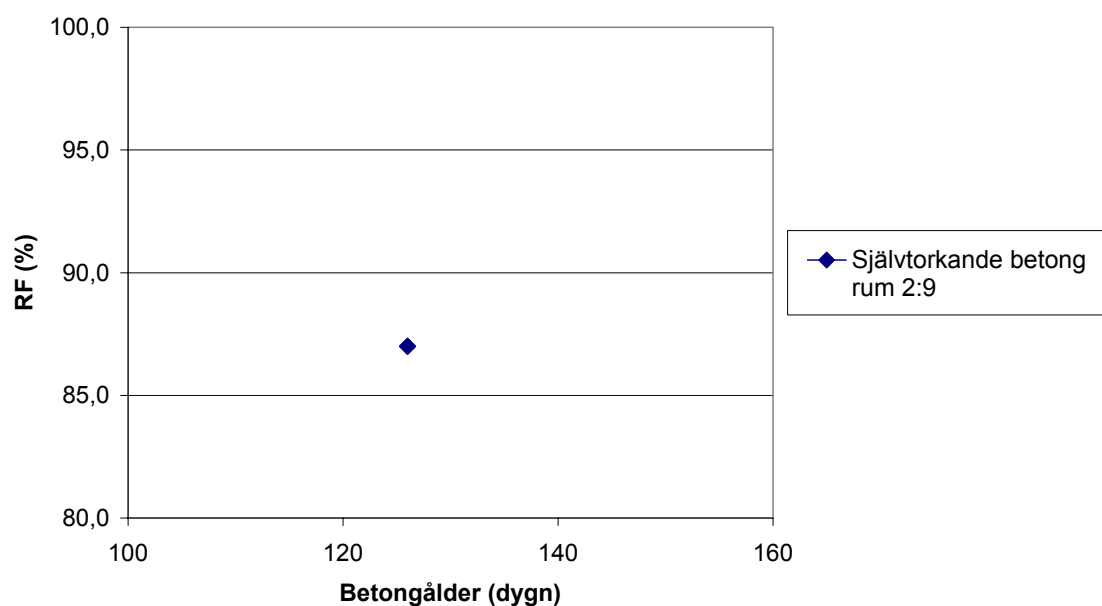
Mellanbjälklag 220 mm



Figur 9.34 Uppmätt RF på halva bjälklagstjockleken i rum 1:1; 2:2 och 2:28.

Bjälklagen med värmeslingor torkade på ett likartat sätt. Bjälklaget med högvärdig betong (vct 0,38) torkade dock snabbare.

Mellanbjälklag 250 mm

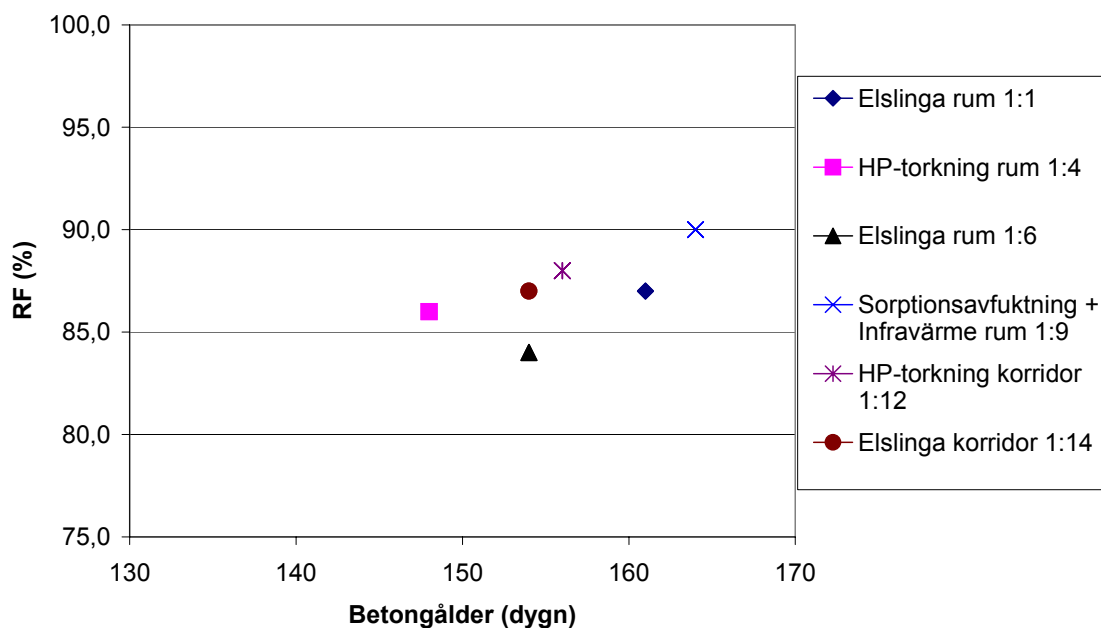


Figur 9.35 Uppmätt RF på halva bjälklagstjockleken i rum 2:9.

Höjd betongkvalitet till vct 0.38 gjorde att även det tjockare bjälklaget torkade snabbt trots att inga uppvärmningsinsatser gjordes.

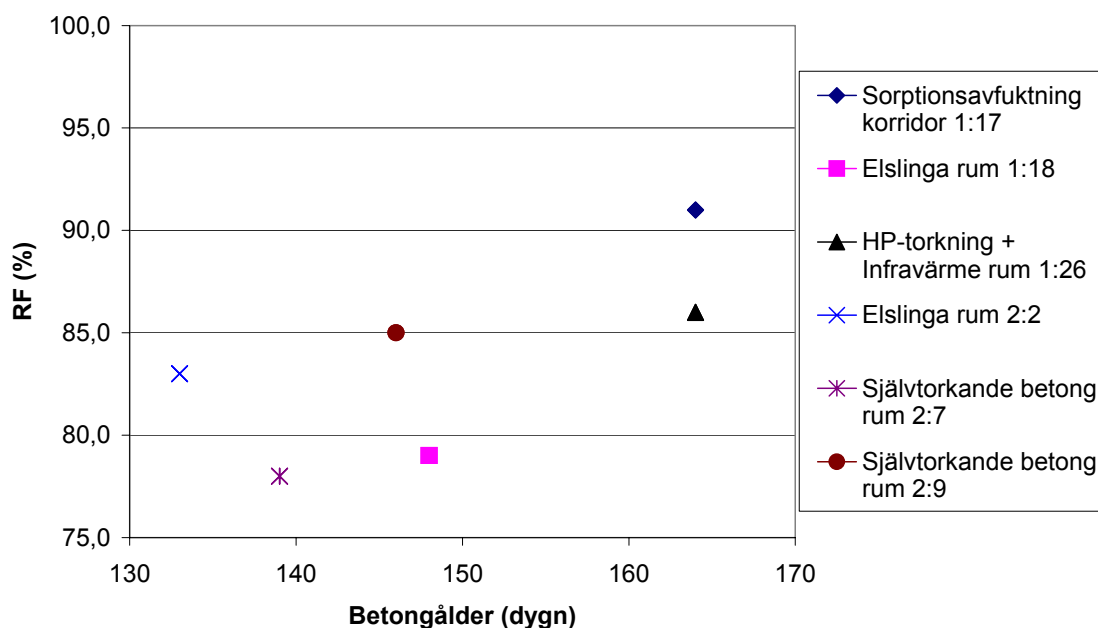
9.9.3 Slutmätningar på uttaget prov med Protimeter-givare

Nedan presenteras mätresultat från den officiella slutmätningen av RF på uttaget prov. Resultaten som presenteras gäller halva plattjockleken och är inte justerade med avseende på mätosäkerhet. Mätningarna gjordes vid rumstemperatur (20°C).



Figur 9.36 Uppmätt RF i samband med slutmätning på halva bjälklagstjockleken i rum/korridor 1:1; 1:4; 1:6; 1:9; 1:12 och 1:14.

Av resultaten i figur 9.36 är det enbart betongplattan på 100 mm med värmeslingor (rum 1:6) som når det uppsatta kravet 85 % RF på halva plattjockleken. Övriga uppmätta betongplattor ligger dock mellan 85 – 90 % RF. Högst RF (90 %) har den betong (rum 1:9) som göts på fuktig markisolering och som utsattes för mycket regn dygnet efter gjutning.



Figur 9.37 Uppmätt RF i samband med slutmätning på halva betongtjockleken i rum/korridor 1:17; 1:18; 1:26; 2:2; 2:7 och 2:9 (1:x avser bottenbjälklag. 2:x avser mellanbjälklag).

Resultaten i figur 9.37 visar att den självttorkande betongen når det uppsatta kravet 85 % RF. Det gör även betongen som torkats med elslinga. Torkningen med både HP-torkning och infravärme i rum 1:26 lyckades nästan sänka betongens RF till 85 %. Sämst uttorkning visar betongen i mät punkt 1:17 i korridoren som enbart torkats med sorptionsavfuktning. Betongen göts dessutom på den blöta markisoleringen.

9.10 Jämförelse mellan uppmätta resultat och simuleringsresultat från datorprogrammet TorkaS 2.0

9.10.1 Allmänt

Uppmätta klimatdata ligger till grund för de simuleringar som i efterhand gjorts med datorprogrammet TorkaS 2.0. Simuleringar med TorkaS 2.0 har dock inte varit möjliga där elslingor eller HP-torkning använts för att torka betongen eftersom programmet inte klarar av att ta hänsyn till starkt varierande temperatur. Samtliga TorkaS 2.0-simuleringar redovisas i appendix 4.8.

Simulerade RF-värden jämförs med uppmätta värden. Samtliga redovisade mätresultat är mätta med metoden uttaget prov, se avsnitt 9.9.2 och 9.9.3. Mätosäkerhet inkluderas inte i mätresultaten.

Observera att mätdjupen varierar för de resultat som presenteras i detta kapitel. TorkaS 2.0 redovisar RF på det ekvivalenta djupet, medan de flesta av de verkliga mätningarna utförts på halva plattjockleken. Ekvivalenta djupet är 40 % av tjockleken för platta på mark och 20 % av tjockleken för mellanbjälklaget och bjälklaget över källare.

9.10.2 Platta på mark

Tabell 9.4 visar jämförelser av uppmätta resultat och resultat som erhållits genom simuleringar med TorkaS 2.0. Flertalet mätningar utfördes som trendmätningar vid LTH. Vid beräkningen användes TorkaS-fallet platta på mineralullsisolering på mark.

Tabell 9.4 Platta på mark, 100 mm betong på underliggande mineralull.

Mät punkt	Mätddatum	Uppmätt resultat 50 % mätdjup	Simulerat resultat 40 % mätdjup	Skillnad verklig-beräknad
1:9 Infravärme	2002-02-11	94	89	+5
	2002-02-21	91	88	+3
	2002-02-27	90	88	+2
	2002-03-05	92	87	+5
	2002-03-13*	90	86	+4
1:26 HP-torkning + Infravärme	2002-02-11	96	89	+7
	2002-02-21	90	88	+2
	2002-03-05	88	87	+1
	2002-03-13*	86	86	0

* Slutmätning

De uppmätta resultaten ligger generellt högre än de simulerade. Detta förklaras till viss del med skillnaden mellan mätdjup och beräkningsdjup. En annan trolig orsak är att delar av bottenplattan är gjutna på blöt mineralull vilket gör att betongen kan uppfuktas under några månaders tid i stället för att torka nedåt, vilket är förutsättningen för det aktuella TorkaS-fallet.

Den snabba uttorkningen i rum 1:26 jämfört med rum 1:9 kan förklaras med att både HP-torkning och infravärme användes för att forcera uttorkningen den sista månaden, se appendix 4.7. I rum 1:9 användes enbart infravärme för att påskynda uttorkningen.

Det regnade kraftigt i samband med gjutningen av bottenplattan till rum 1:9 samt 1:26. Enligt manualen till TorkaS 2.0 så skall detta beaktas genom att välja konstruktionstypen platta på mark med underliggande fuktspär. Tabell 9.5 visar resultaten som erhöles med den nya förutsättningen.

Tabell 9.5 Platta på mark, 100 mm betong på underliggande fuktspär.

Mät punkt	Mätddatum	Uppmätt resultat 50 % mätdjup	Simulerat resultat 40 % mätdjup	Skillnad verklig-beräknad
1:9 Infravärme	2002-02-11	94	90	+4
	2002-02-21	91	90	+1
	2002-02-27	90	89	+1
	2002-03-05	92	89	+3
	2002-03-13*	90	89	+1
1:26 HP- torkning + Infravärme	2002-02-11	96	90	+6
	2002-02-21	90	90	0
	2002-03-05	88	89	-1
	2002-03-13*	86	89	-3

* Slutmätning

En jämförelse mellan tabell 9.4 och 9.5 visar att antagandet om förhindrad uttorkning nedåt när mineralullen är fuktig ger betydligt bättre överensstämmelse med mätvärdena. Avvikelsen är ofta 1 % vilket lätt kan förklaras med skillnaden mellan mätdjup och beräkningsdjup. De större avvikelserna 3 och 4 % kan bero på att den våta mineralullen inte bara förhindrar uttorkning nedåt utan att den även ger ett fuktillskott till betongen.

Trots allt är överensstämmelsen överraskande god med tanke på att beräkningsprogrammet bygger på komplicerade teoretiska antaganden om hydratationsprocess och egenskaps-utveckling hos betongen.

En jämförelse av samma typ mellan mätning och beräkning har även gjorts för mätpunkt 1:17. Även denna del av plattan göts när det regnade. Tabell 9.6 samt 9.7 visar resultaten av denna jämförelse.

Tabell 9.6 Platta på mark, 150 mm betong på underliggande mineralull.

Mätpunkt	Mätddatum	Uppmätt resultat 50 % mätdjup	Simulerat resultat 40 % mätdjup	Skillnad verklig-beräknad
1:17 Sorptions- avfuktning	2002-02-21	90	90	0
	2002-03-05	90	89	+1
	2002-03-13*	91	88	+3

* Slutmätning

Tabell 9.7 Platta på mark, 150 mm betong på underliggande fuktspärr.

Mätpunkt	Mätddatum	Uppmätt resultat 50 % mätdjup	Simulerat resultat 40 % mätdjup	Skillnad verklig-beräknad
1:17 Sorptions- avfuktning	2002-02-21	90	90	0
	2002-03-05	90	90	0
	2002-03-13*	91	89	+2

* Slutmätning

De uppmätta resultaten stämmer väl överens med de simulerade, både i tabell 9.6 och 9.7. Den första mätningen i punkt 1:17 genom uttaget prov utfördes dock 10 dagar efter att torkningen med infravärme startats. Det kan förklara att man inte ser den stora avvikelse som gäller för mätpunkterna 1:9 och 1:26.

9.10.3 Mellanbjälklag

Uppmätt RF i mellanbjälklaget som göts med betong vct 0,38 har också jämförts med beräknade RF enligt TorkaS 2.0. Resultaten av denna jämförelse visas i tabell 9.8 och 9.9. Observera skillnaden mellan mätningarnas mätdjup och beräkningsdjupet. I TorkaS 2.0 anses det ekvivalenta mätdjupet vara 25 % av bjälklagstjockleken vid användning av plattbärlag. Plattbärlaget bedöms vara något hämmande för uttorkningen nedåt.

Tabell 9.8 Mellanbjälklag 180 mm betong på 40 mm plattbärlag.

Mätpunkt	Mätddatum	Uppmätt resultat 50 % mätdjup	Simulerat resultat 25 % mätdjup	Skillnad verklig-beräknad
2:28	2002-02-21	85	87	-2
2:7	2002-03-13*	78	86	-8

* Slutmätning

Trots att mätningarna utförts på halva plattjockleken så är den uppmätta relativa fuktigheten lägre än de simulerade resultaten på ekvivalent djup. Detta tyder på att TorkaS 2.0 underskattar uttorkningen hos betong med lågt vct.

Tabell 9.9 Mellanbjälklag 210 mm betong på 40 mm plattbärlag.

Mätpunkt	Mättdatum	Uppmätt resultat 50 % mätdjup	Simulerat resultat 25 % mätdjup	Skillnad verklig-beräknad
2:9	2002-02-21	87	87	0
	2002-03-13*	85	86	-1

* Slutmätning

De uppmätta resultaten på 50 % djup stämmer här väl överens med de simulerade resultaten på 25 % djup. Även detta tyder på att TorkaS 2.0 underskattar uttorkningen hos betong med lågt vct.

9.11 Slutsatser

9.11.1 Generellt

Den genomförda uttorkningsundersökningen är en av de största fältundersökningar av denna typ som genomförts och med all säkerhet den undersökning där flest torkmetoder studerats. I undersökningen har det nämligen varit möjligt att jämföra olika metoder att påskynda betongs uttorkning. Det har också varit möjligt att undersöka och värdera olika metoder att mäta fukt i betong. Datorprogram för förhandsbedömning av uttorkning i betong har kunnat kalibreras med verkliga mätdata. Projektet har därför tillfört mycket ny kunskap.

Som i alla fältundersökningar kan inte allt som sker på byggarbetsplatsen förutses. Klimatförhållandena blir inte vad man önskat eller förutspått, byggtiderna följer inte planen etc. Trots detta har mycket värdefull information kommit fram från försöket. Det mest betydelsefulla är att det visat sig vara möjligt att nå låg RF-nivå i betongen trots svåra klimatförhållanden. Detta har varit möjligt genom användning av hög betongkvalitet eller genom värmning av betongen.

Visserligen har inte beställarens krav på 85 % RF i mitten av plattan uppfyllts i alla mätpunkter, men värdet har där endast överskridits med ett par procentenheter. Det måste påpekas att det uppställda kravet att RF skall mätas på halva plattjockleken är mycket hårt och på säkra sidan. Golvläggning kunde därför ske utan att riskera skador på golvmaterialen.

De följande avsnitten diskuterar de olika resultaten något mera i detalj.

9.11.2 Uttorkningsmetoder

Ökad betongkvalitet

Jämfört med de andra uttorkningsmetoderna så ger en betong med vct 0,38 en snabb uttorkning. Detta noteras framförallt vid RF-mätningar gjorda på uttaget prov, den mätmetod som borde ge säkrast resultat. Alla mätningar visade att nivån 85 % RF i plattmitt kunde nås inom utsatt tid. Fältstudien bekräftar således laboratorieundersökningarna som redovisa i kapitel 4 och 5.

Användning av betong med lågt vct skapar trygghet för produktionsledningen eftersom metoden är robust och ej fordrar tillsyn och merarbete i form av installationer och drift vilket de andra provade uttorkningsmetoderna gör.

Produktionsledningen hade tidigare erfarenheter av betong med lågt vct och hade därvid fått uppfattningen att sådan betong kan vara svår att gjuta. Detta beror på att sådan betong ofta har en kletigare konsistens än normal husbyggnadsbetong beroende på den högre cementhalten. Betongen som levererades till Järvallen upplevdes dock av yrkesarbetarna som oväntat lättarbetad. Detta förklaras av att betongen hade en god sammansättning samt att det gavs bra information till yrkesarbetarna före gjutningen.

Värmning med elslinga

Mätningarna visar på snabb uttorkning vid användning av elslinga. Kravet på 85 % RF uppfylldes i tre av fem fall vid slutmätningen. De övriga två mätningarna visade båda 87 % RF. Värmen som avges av betongen ger också en gynnsam påverkan på inomhusklimatet.

Risken med att förlita sig på elslingor är att de lätt skadas vid gjutningen eller under byggtiden till exempel i samband med håltagningar i betongen. I det aktuella projektet förstördes flera slingor.

Produktionsledningen ansåg att man fick lägga mycket tid och kraft på att kontrollera slingornas funktion, eftersom elsäkringar löste ut vid ett flertal tillfällen.

För att lokalisera elslingorna när de var ingjutna gjordes en termografering med hjälp av värmekamera. Denna termografering fungerade mycket bra. Termografering kan därför användas som metod att undvika att skada värmeslingorna i samband med håltagning. Metoden medför dock vissa kostnader.

HP-torkning

HP-torkningen gav ett visst positivt bidrag till uttorkningen av bottenplattan. Ingen av mätningarna uppfyllde dock uttorkningskravet. Resultaten från slutmätningen visade 86 - 88 % RF. Systemet bör dock utvecklas vidare för att effekten skall bli ännu större. Det visade sig att luftläckaget till omgivande mark var betydande.

HP-torkning värmer marken. Man kan därför få ett fuktflöde från fuktig varm mark upp i plattan när systemet stängs av. Genom att blåsa in kall luft under plattan innan man avslutar torkningen bör man kunna undvika detta problem.

Sorptionsavfuktning

Kombinationen av värmefläkt och sorptionsavfuktare gav ett gynnsamt uttorkningsklimat. Inomhusluftens ånghalt kunde därvid hållas på ungefär samma nivå som uteluftens. Det fukttillskott som kom från betongen togs omhand av sorptionsavfuktaren. Därmed minskade man även risken för kondensbildning på kalla byggnadsdelar såsom yttertakskonstruktionen.

Enbart sorptionsavfuktning var inte tillräckligt för att klara uttorkningskraven. Det krävdes kostsamma extra insatser i form av infravärme för att sänka RF till en rimlig nivå (90 %).

Nackdelen med avfuktningen var att man skapade en arbetsmiljö med mycket torr luft (låg RF). Detta uppfattades som irriterande av vissa arbetare.

Torkning med infravärme

Infravärmarna användes inte från början utan sattes in under de sista veckorna för att kravnivån 85 % RF skulle uppfyllas i de delar av golv på mark som gjutits på fuktig mineralull och/eller där tidigare insatta torkåtgärder (HP-torkning, sorptionsavfuktning) inte räckte.

Uttorkningsresultaten tyder på att infravärmarna hade en positiv effekt på uttorkningen. Betongtemperaturen höjdes kraftigt vilket gav upphov till en stor fuktutdrivande ångtryckspotential. 85 % RF nåddes aldrig på den månad som infravärmen användes.

Infravärmarna värmer en ganska begränsad yta (ca. 2 m²). Detta innebär att de fick flyttas med jämna mellanrum. På så sätt skapades merarbete. En annan negativ effekt var att de var i vägen och störde byggnadsarbete i lokalen.

Jämförelse mellan olika torkmetoder

I tabell 9.10 och 9.11 görs en jämförelse mellan olika torkmetoder. Tabellen baseras på resultaten av de slutmätningar som utfördes av RBK-auktoriserad fuktkontrollant.

Tabell 9.10 Sammanfattning av torkmetoder för platta på mark.

Typ av golv	Torkmetod	Uppnådd RF	Fördelar	Nackdelar
Platta på mark	Sorptionsavfuktning	91 %	Skapar god miljö för uttorkning	Ej tillräcklig för att nå låga RF-nivåer. Skapar alltför torr arbetsmiljö Energikrävande
	HP-torkning	86-88 %	Ger ganska god uttorkning	Energikrävande Kräver mycket utrustning
	Elslinga	79-87 %	Ger god uttorkning	Energikrävande Lätt att förstöra Kräver mycket kontroll
	Infravärme	90 %	Ger snabb uttorkning	Torkar begränsad yta Skapar alltför varm arbetsmiljö Energikrävande

Tabell 9.11 Sammanfattning av torkmetoder för mellanbjälklag.

Typ av golv	Torkmetod	Uppnådd RF	Fördelar	Nackdelar
Mellan- bjälklag	Elslinga	83 %	Ger god uttorkning	Energikrävande Lätt att förstöra Kräver mycket kontroll
	Självtorkande betong	78-85 %	Ger god uttorkning Är robust och torkar utan extra åtgärder	Dyrare betong

9.11.3 Fuktmätning

Borrhålsmätning med kvarsittande givare

Resultaten från mätningarna med Humi-Guard givarna har inte varit tillfredsställande. Det verkar som om enstaka avläsningar ger felaktiga resultat när temperaturvariationerna i betongen är stora. Loggning av mätningarna vilket hade gett möjlighet till medelvärdesbildning under längre tid hade möjligen givit mer riktiga mätvärden.

RF-mätning genom uttaget prov

Uttaget prov har i de flesta fall givit resultat som överensstämmer väl med värden som kunde förväntas på basis av beräkningar, av labundersökningar och av tidigare erfarenheter från mätning på byggen. Spridningen i uppmätt RF har dock varit stor i betong med lågt vct. Orsaken till detta är oklar och bör undersökas vidare. Möjligen är tiden mellan applicering av RF-givaren och avläsningen för kort för den mycket täta betongen.

Metoden är tyvärr ganska tids och arbetskrävande och är således svår att använda om man kontinuerligt vill följa uttorkningen under en längre tid.

9.11.4 Jämförelser med datorprogrammet TorkaS 2.0

De simuleringar som gjorts mellan beräkningar med TorkaS 2.0 och de verkliga uttorkningstiderna med användning av verkligt uppmätta klimatdata, visar tämligen god överensstämmelse. De största avvikelserna har observerats för betong med vct 0,38, där flertalet uppmätta resultat legat långt under de simulerade. Det förefaller därför som om TorkaS 2.0 inte är så väl tillämpbart för mycket högvärdiga betongtyper.

9.11.5 Övriga slutsatser

Regn i samband med gjutning av platta på mark med underliggande mineralullsisolering verkar fördröja uttorkningen mycket starkt, tydligen pga. att mineralullen tillhandahåller ett "vattenmagasin" till plattan. Detta fick i det aktuella projektet konsekvensen att man tvingades torka sådana "fuktskadade" delar av bottenplattan med hjälp av infravärmare. Resultatet visar den stora vikten av att skydda markisolering från regn.

Möjligen hade inte den negativa effekten uppkommit om betongen hade haft mycket lågt vct eftersom insugning av fukt från isoleringen då blivit försumbar.

10. Slutsatser

Följande slutsatser kan dras av detta Licentiatarbete. Slutsatserna är kopplade till de frågeställningar som presenterades i avsnitt 1.7.2.

1. *Uttorkningsegenskaper hos Byggcement jämfört med Std Portlandcement*

- Skillnaden i uttorkningsegenskaper mellan Byggcement och Std P-cement vid samma vct är liten.
- RF-utvecklingen på ekvivalent djup i en tvåsidigt torkande 18 cm tjock betongplatta är nästan identisk för de båda cementtyperna.
- RF-utvecklingen på halva plattjockleken sker något långsammare vid Byggcement men skillnaden vid samma torktid är mindre än 2,5 % RF.

2. *Självtuttorkning*

- Självtuttorkning hos betong är starkt beroende av vattencementtalet.
- Vid Byggcement och SH-cement kan 85 % RF uppnås efter mindre än 1 månads torktid enbart genom användning av betong med $vct \leq 0.40$.
- SH-cement ger något större självtuttorkningseffekt än Byggcement. Skillnaden kan delvis förklaras med den s.k. alkalieffekten, d.v.s. effekten av att porvattnet innehåller lösta joner; K^+ , Na^+ och OH^- .
- Vid Anläggningscement räcker inte ens en vct-sänkning till 0,30 för att självtuttorkning skall ge 85 % RF. Däremot kan 90 % RF uppnås inom en månad. Skillnaden i självtuttorkning mellan anläggningscement och övriga cement minskar dock med ökande vct.
- Inblandning av 10 % silikastoft ger ingen effekt på den första månadens självtuttorkning vid Byggcement och SH-cement. Snarare minskar självtuttorkningen.
- Inblandning av 10 % silikastoft ger stor effekt på självtuttorkningen vid Anläggningscement. 85 % RF kan uppnås enbart på grund av självtuttorkning om $vct \leq 0,30$.

3. Inverkan av regnbelastning direkt efter gjutning på uttorkningen

- Vattenbelastning på nygjutna betongytor, av t ex regn, skapar inga väsentliga uttorkningsproblem för betong med $v_{ct} \leq 0,40$. 85 % RF kan uppnås redan efter 4 veckor från gjutning trots 1 veckas regn. En viss fördröjning sker, men den motsvarar i stort sett regnets varaktighet, d.v.s. ca. 1 vecka vid 1 veckas regn.
- Vid $v_{ct} \geq 0,45$ förlängs uttorkningstiden väsentligt om betongen utsätts för några dagars regn. 7 dygns vattenbelastning på en betong med $v_{ct} 0,70$ innebär att uttorkningstiden för att nå 85 % RF på ekvivalent mätdjup fördubblas till ca. 36 veckor.

4. Uttorkning av hårdnad betong efter vattenskada

- Insugen vattenmängd minskar kraftigt med minskat v_{ct} . Vid $v_{ct} \leq 0,40$ är insugen vattenmängd enbart ca. 25. % av den mängd som sugs in i normal husbyggnadsbetong med $v_{ct} 0,70$.
- Vid $v_{ct} \leq 0,40$ räcker inte ens 1 månads vatteninsugning för att 85 % RF skall uppnås på ekvivalent djup i en 120 mm platta.
- Vattenbelastningens varaktighet har begränsad betydelse för totalt uppsugen vattenmängd. Även en kort vattenabsorptionstid (3 dygn) ger avsevärd insugning i betong med högt v_{ct} .
- Uttorkning till ursprunglig fuktnivå i en 120 mm tjock platta tar mer än 4 månader vid $v_{ct} 0,70$. Vid $v_{ct} \leq 0,40$ krävs enbart ca. 1 månads torkning.
- Resultatet visar alltså att en golvkonstruktion baserad på högvärdig betong med lågt v_{ct} är betydligt mindre känslig för vattenläckage än om den baseras på en normalbetong.

5. Inverkan av avjämningsmassa på uttorkning

- 10 mm golvavjämnning ger ett begränsat fukttillskott som höjer RF på ett djup av någon cm ner i betongen. RF-ökningen är större ju högre v_{ct} betongen har.
- Betongen fortsätter att torka även efter det att avjämnningen applicerats. Uttorkningshastigheten minskar dock något.
- Ju tidigare avjämningsmassan appliceras desto mindre blir påverkan på det fortsatta torkförloppet.
- Maximalt kan fördröjningen av uttorkningen uppgå till ca. 1 månad.

6. Uttorkning av prefabricerade bjälklagselement

- Uttorkning sker betydligt snabbare i prefabricerade håldäcksbjälklag än i prefabricerade massiva bjälklagselement med samma vct. Orsaken till detta är inte klarlagd.
- Trots att håldäcket utsätts för två veckors regn med start nästan direkt efter tillverkning nås 85 % RF på ekvivalent djup inom mindre än 1,5 månad. För massiva plattor nås 90 % RF efter ungefär samma tid.
- Klimatet som håldäcksbjälklag av aktuell kvalitet (vct $\approx 0,38$) utsätts för innan de byggs in spelar därför inte så stor roll för den praktiska uttorkningen i fält. Oavsett förhistorien vad avser fuktbelastning under lagring, leverans och montering går RF snabbt mot samma nivå då elementen placeras i ett varmt och torrt inneklimat, d.v.s. efter det att väggar och tak monterats på bygget.
- Fuktmätning i kanalerna i håldäcket ger ungefär samma RF som på ekvivalent djup. Av säkerhetsskäl bör man dock göra mätningen på ekvivalent djup.

7. Metoder att påskynda betongen uttorkning i fält

- Höjning av betongkvaliteten till vct 0,38 gav snabb och säker uttorkning. Metoden är robust krävde ingen särskild insats av byggarbetsplatsens personal. Erforderlig uttorkningsnivå 85 % RF på halva tjockleken kunde nås inom stipulerad tid trots att denna var tämligen kort.
- Värmning av betongen med elslinga gav också snabb uttorkning. Metoden befanns dock vara känslig eftersom elslingor lätt går sönder under gjutning. Byggarbetsplatsen upplevde dessutom metoden som arbetskrävande och i viss mån störande.
- Övriga metoder som provades, inblåsning av luft i mark under platta på mark och sorptionsavfuktning, gav inte tillfredställande uttorkningsresultat.
- Fuktmätning med kvarsittande HumiGuard-givare visade sig fungera dåligt vilket möjligen kan bero på variationer i betongtemperaturen.

Sammanfattningsvis visade alla de delstudier som genomfördes att en sänkning av betongens vattencementtal har en mycket positiv inverkan på betongens uttorkning. Detta gäller såväl torkning av nygjuten betong som torkning av hårdnad betong efter en längre tids vattenläckage. Den verkligt stora effekten nås om vct sänks till 0,40 eller lägre. Då kommer enbart självuttorkningen att vara tillräcklig för att tillräckligt lågt RF skall uppnås inom kort tid. Detta gäller även vid ogynnsamma fuktförhållanden under byggtiden.

Referenser

- Abrahamsson, A., Tammo, K. Inverkan av regn och avjämningsmassa på uttorkning av betong. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-5053. 2003
- Ahlgren, L. Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Rapport 36. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund. 1972
- Ahlgren, L. Fukt i betonggolv med tät beläggning. Husbyggaren 6. Sid 17-19. 1973
- Ahlgren, L., Bergström, S.G., Fagerlund, G., Nilsson, L.-O. Fukt i betong. CBI kursverksamhet. 1976
- Alexandersson, J. Secondary emissions from alkali attack on adhesives and PVC floorings. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-3115. 2004
- Andersson, K., Bakke, J.V., Bjørseth, O., Bornehag, C.G., Clausen, G., Hongso, J.K., Kjellman, M., Kjærsgaard, S., Levy, F., Møhlave, L., Skerfving, S., Sundell, J. TVOC and health in non-industrial indoor environments. Indoor Air 7. Sid 78-91. 1997
- BBR. Boverkets byggregler-föreskrifter och allmänna råd. Boverket, Karlskrona. 2002
- Blixt, M., Johansson, J., Graad, S. Uttorkning av byggfukt i ej pågjutet HDF-bjälklag. Projektarbete. Chalmers Tekniska Högskola. 1998
- Blomsterberg, Å., Sikander, E., Ruud, S. Moderna självdragsventilerade skolor – utvärdering av ventilation och fukt. Rapport A13. Byggnadsfysik, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. 1997
- Bornehag, C.G., Blomquist, G., Gyntelberg, F., Järvholm, B., Malmberg, P., Nordvall, L., Nielsen, A., Pershagen, G., Sundell, J. Dampness in buildings and health. Indoor Air 11. Sid 72-86. 2001
- Brander, P. Fuktrisker i håldäcksbjälklag – Förstudie. SBUF-rapport. Skanska Teknik, Malmö. 2003
- Byfors, J. Plain concrete at early ages. CBI Research Fo 3:80. 1980
- Dihl, R.K., Hewlett, P.C., Chan, Y.N. Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. Magazine of Concrete Research, Vol 39, No. 141. Sid. 183-195. 1987
- Fagerlund, G. On the capillarity of concrete. Nordic Concrete Research. Nordiska Betongförbundet, Oslo. Publication No1. 1982
- Fagerlund, G. Struktur och strukturutveckling. Betonghandbok, Material. Kap 10. Svensk Byggtjänst, Stockholm. Sid. 273-305. 1997a

- Fagerlund, G. Högpresterande betong. Betonghandbok, Material. Kap 28. Svensk Byggtjänst, Stockholm. Sid. 925-963. 1997b
- Follin, T. Fuktproblem i golv. Bygg & Teknik 8. Sid 15-17. 2004
- Gränne, F. Insugning av fukt i betong med lågt vattenbindemedelstal. SBUF Rapport. NCC Teknik, Stockholm. 2004
- Gustafsson, H. Golvmaterial på olika typer av fuktiga betonggolv-översikt och kommentarer till undersökningar med inriktning på kemisk nedbrytning och emission. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås. Rapport 25. 27 sidor. 1996
- Harbron, R. A general description of flow-applied floor screeds: An important application for complex formulations based on CAC. Proceedings, International Conference on Calcium Aluminate Cements. Edinburgh, Scotland. Sid. 597-604. 2001
- Hedenblad, G. Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-1014. 1993a
- Hedenblad, G. Torktider för betong efter vattenskada. Fuktsäkerhet i byggnader, T27. Svensk Byggtjänst, Stockholm. 1993b
- Hedenblad, G. Uttorkning av betongfukt/byggfukt. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-7076. 1994
- Hedenblad, G. Uttorkning av byggfukt i betong – Torktider och fuktmätning. Fuktsäkerhet i byggnader, T12. Svensk Byggtjänst, Stockholm. 1995
- Hedenblad, G. Uttorkning av betong – en jämförelse mellan beräknade och uppmätta fuktprofiler. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-7098. 1996a
- Hedenblad, G. Materialdata för fukttransportberäkningar. Fuktsäkerhet i byggnader, T19. Svensk Byggtjänst, Stockholm. 1996b
- Hedenblad, G. Mätosäkerhetsberäkningar för relativ fuktighet i betong. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-7146. 1999
- Hedenblad, G., Arfvidsson, J. TorkaS 1.0. Datorprogram för bedömning av uttorkning av betonggolv. Lunds Tekniska Högskola. 1998
- Hedenblad, H., Janz, M. Inverkan av alkali på uppmätt RH i betong. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-3057. 1994
- Hedenblad, G., Nilsson, L-O. Kritiska fukttillstånd för några byggnadsmaterial. Preliminär undersökning. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-3028. 1987
- Hedlund, H. Stresses in high performance concrete due to temperature and moisture variations at early ages. Avd. för Konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet. Rapport 38L. 1996

Helsing-Atlassi, E., Kjellsen, K. Hydratationskinetik och strukturutveckling. Betonghandbok: Högpresterande betong-material och utförande. Kap. 11. Svensk Byggtjänst, Stockholm. Sid. 107-139. 2000

HusAMA 98. Allmän material- och arbetsbeskrivning för husbyggnadsarbeten. Svensk Byggtjänst, Stockholm. 1998

Johansson, N. Hållfasthet och värmeutveckling hos betong med Portlandkalkstencement. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-5037. 1999

Mølhave, L. The TVOC concept. Organic indoor air pollutants – occurrence, measurement, evaluation. Wiley-VCH. 1999

Möller, G. Härdning av betong. Betonghandbok: Arbetsutförande - projektering och byggande. Kap 15. Svensk Byggtjänst, Stockholm. Sid.347-402. 1997

Nevander, L.-E., Elmarsson, B. Fukthandbok – praktik och teori. Svensk Byggtjänst, Stockholm. 1994

Nielsen, K.F., Holm, G., Uttrup, L.P., Nielsen, P.A. Mould growth on building materials under low water activities – influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. International Biodeterioration & Biodegradation 54. Sid 325-336. 2004

Nilsson, A., Olsson, O. Konsistensförändringar hos fabriksbetong. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-5056. 2005

Nilsson, L.-O. Hygroscopic moisture in concrete – drying measurements & related material properties. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-1003. 1980

Nilsson, L.-O. Temperature effects in relative humidity measurements on concrete – some preliminary studies. Byggforskningsrådet. Rapport D 13. Sid 456-462. 1988

Nilsson, L.-O. Fukt och betong. Betonghandbok: Material. Kap. 14. Svensk Byggtjänst, Stockholm. Sid. 485-524 1997

Nilsson, L-O. Fuktpåverkan på material, kritiska fuktnivåer – en informationsskrift. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-7178. 79 sidor. 2004

Nilsson, L-O., Hedenblad, G., Norling-Mjörnell, K. Fuktegenskaper. Betonghandbok: Högpresterande betong-material och utförande. Kap. 11. Svensk Byggtjänst, Stockholm. Sid.209-226. 2000

Norling-Mjörnell, K. Moisture conditions in high performance concrete – mathematical modelling and measurements. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola. Rapport P-97:6. 1997

Persson, B. Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-1009. 1992

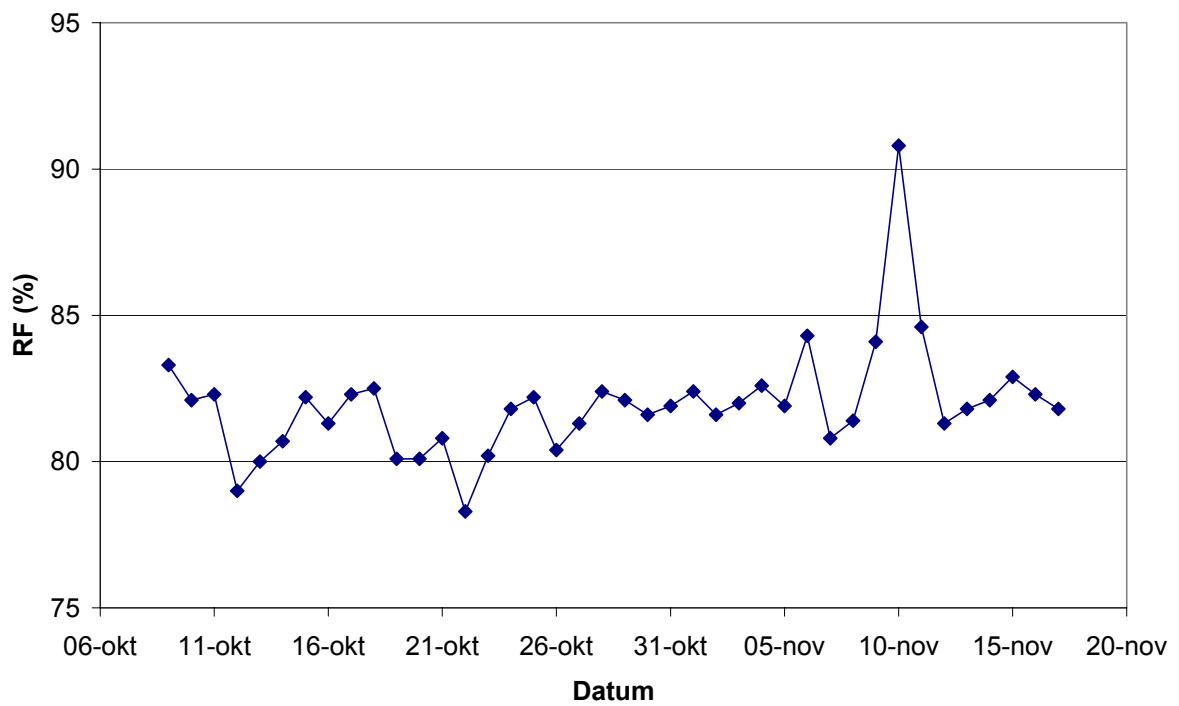
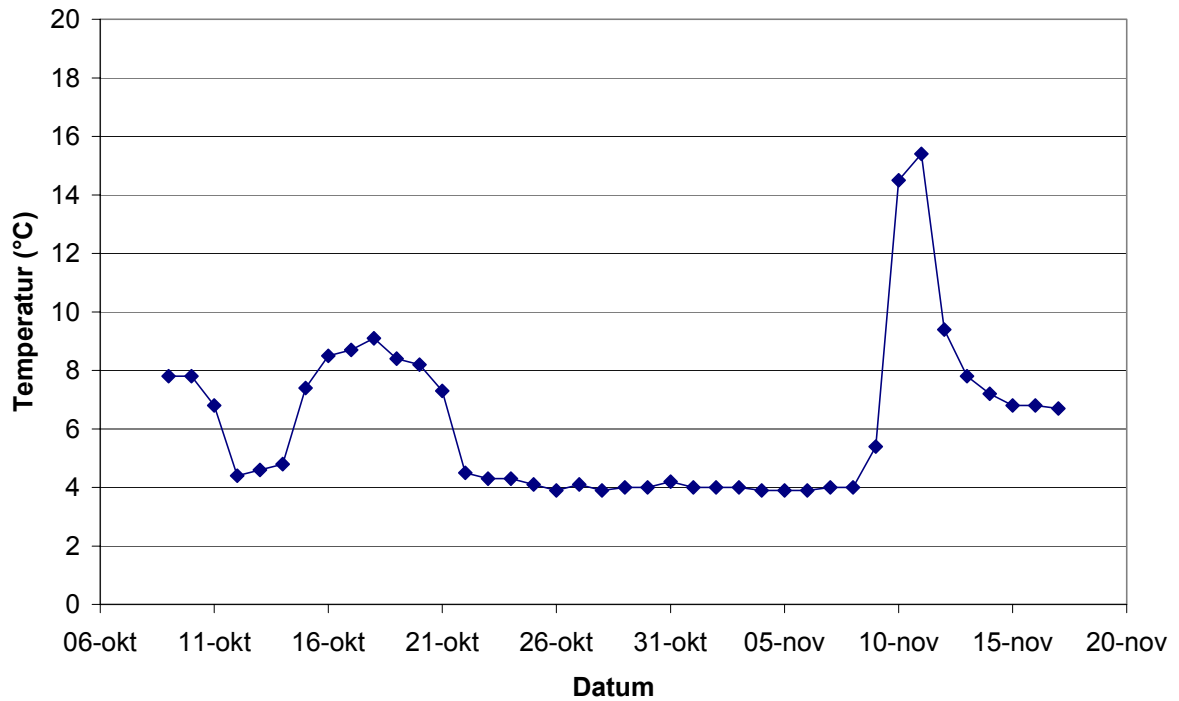
- Persson, B. Kompabilitet mellan golvbeläggningar på betong med avseende på emissioner, fukt och karbonatisering – inverkan av produktionsmetoder på innemiljön. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-7149. 2000
- Persson, B. Golvsystem på betong – fuktpåverkan, kemisk emission och vidhäftning. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-7165, upplaga 2. 2003
- Pihlajavaara, S.E. On the main features and methods of investigation of drying and related phenomena in concrete. Statens Tekniska Forskningsanstalt, Finland. 1965
- Powers, T.C., Brownyard, T.L. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. Bulletin 22. PCA Research Laboratories, Chicago. 1948
- RBK. Manual - Fuktmätning i betong, version 3. Sveriges Byggindustrier, Stockholm. 2001
- Salievski, R. Uttorkning av prefabricerade bjälklag. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-5052. 2003
- Samuelsson, I. Kritiskt fukttillstånd för mikrobiell tillväxt på byggnadsmaterial – kunskapssammanfattning och förslagstext. Rapport P 40:2570. Byggnadsfysik, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås. 2004
- Sjöberg, A. Sekundära emissioner från betonggolv med limmade golvmaterial: effekter av alkalisk hydrolys och deponerade nedbrytningsprodukter. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola. Rapport P-01:4. 2001
- SS-EN 196-1 Cement-Provning-Del 1: Bestämning av hållfasthet. Swedish Standard Institute, Stockholm. 2001
- SS-EN 197-1 Cement-Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement. Swedish Standard Institute, Stockholm. 2001
- SS-EN 206-1 Betong-Del 1: Fordringar, egenskaper, tillverkning och överrensställelse. Swedish Standard Institute, Stockholm. 2001
- Svenska Betongföreningen. Betong för sunda golv – fuktdimensionering, materialval, produktion. Betongrapport nr 6. 1997
- Taplin, J.H. A method of following the hydration reaction in Portland cement paste. Australian journal of applied science. Vol 10, no 3. 1959
- Wengholt-Johnsson, H. Kemisk Emission från golvsystem: effect av olika betongkvalitet och fuktbelastning. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola. Rapport P-95:4. 1995
- Öberg, M. Integrated life cycle design – Application to concrete multi-dwelling buildings. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-3103. 2002

Appendix 1

Lagringsklimat för betongprover
Kap. 5, 7 och 8

Appendix 1

Uppmätt temperatur och RF i klimatrum



Appendix 1

Appendix 2

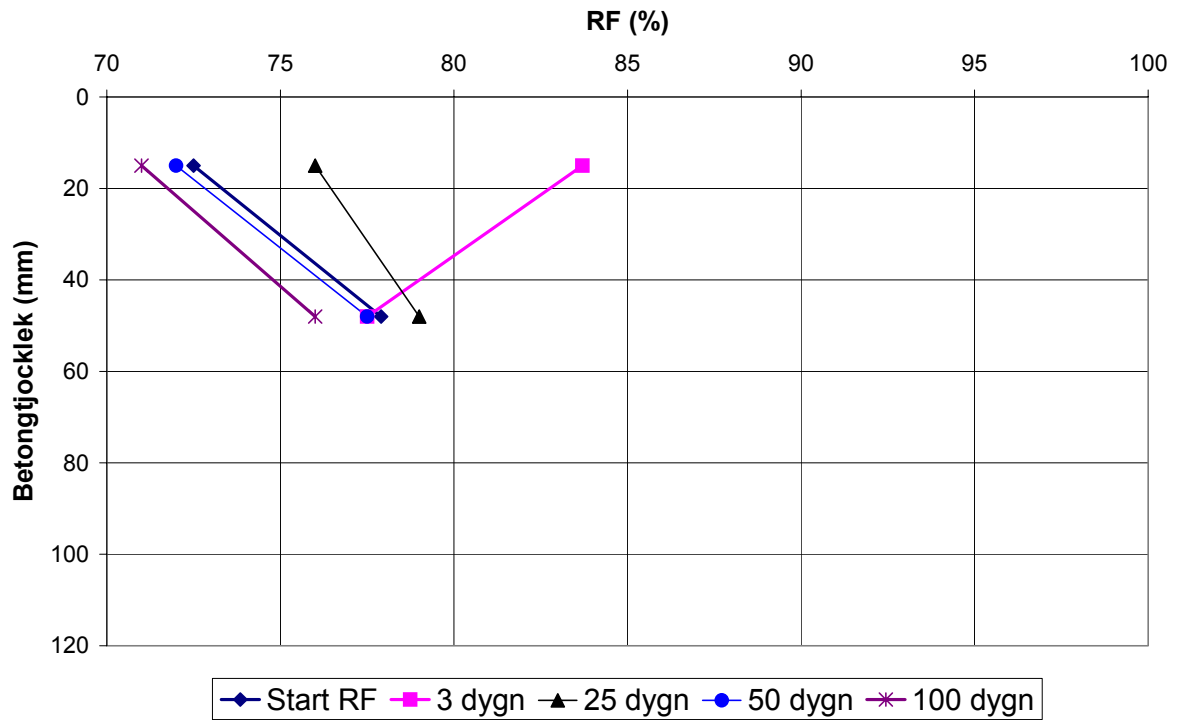
**Fuktprofiler
Kap. 6**

Appendix 2

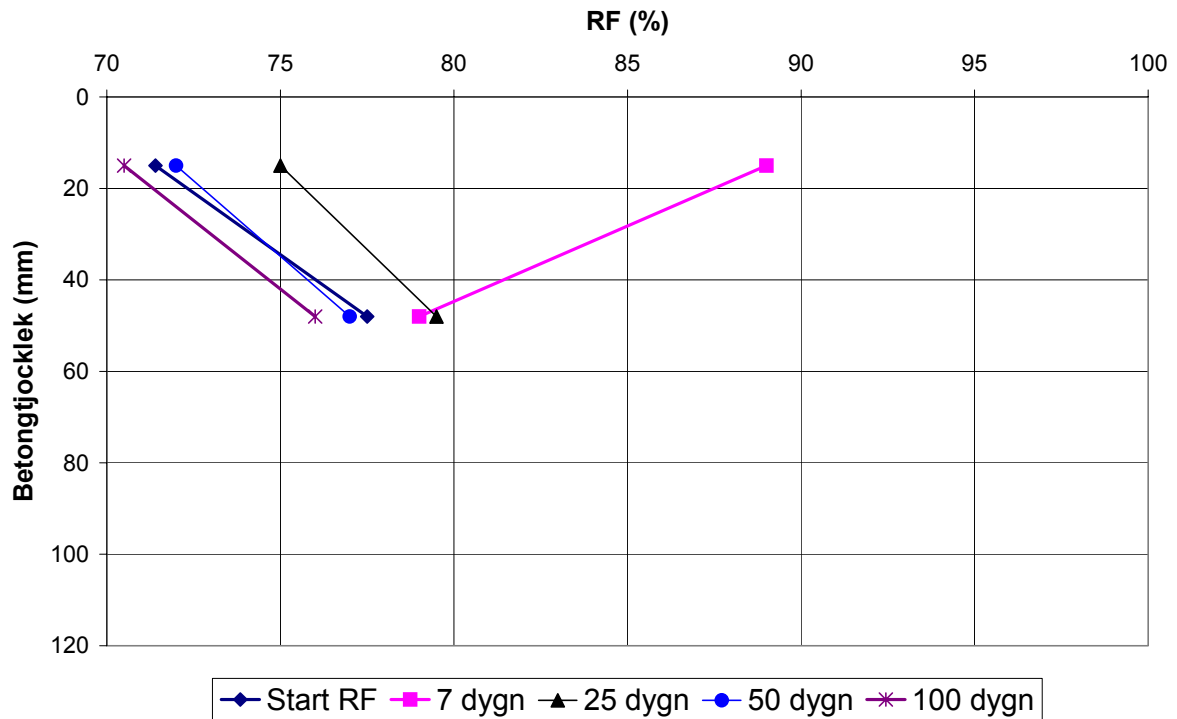
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,35 3 dygns vattenbelastning



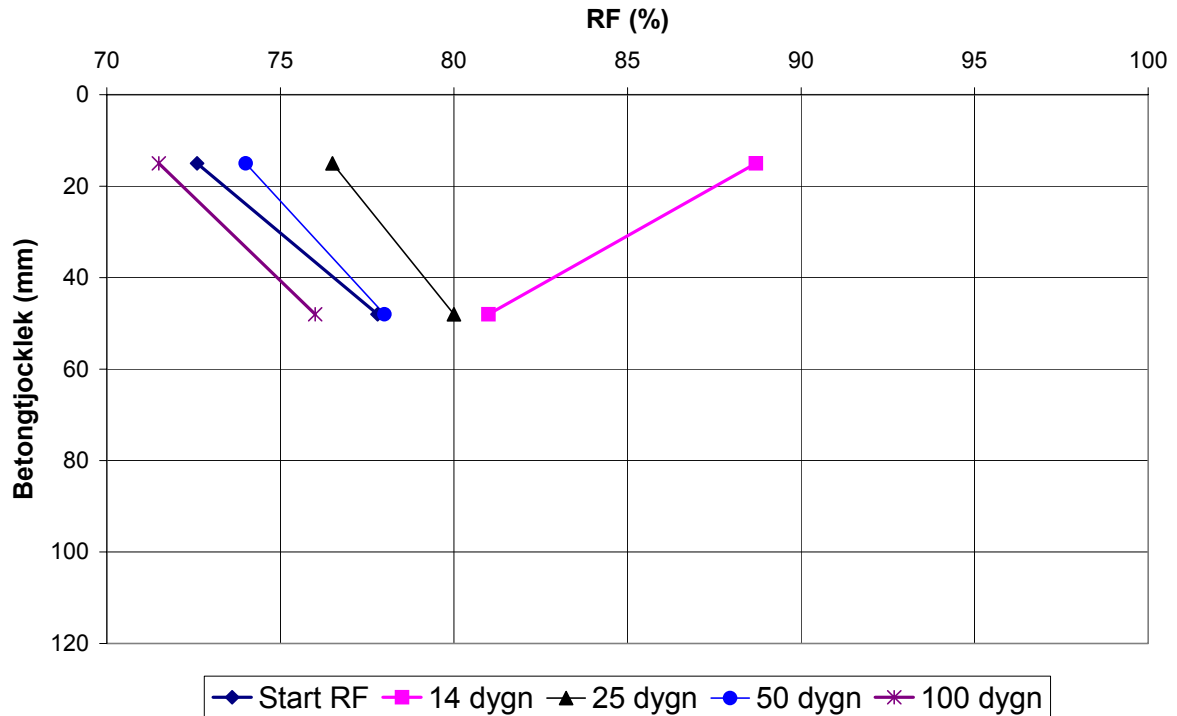
Vct 0,35 7 dygns vattenbelastning



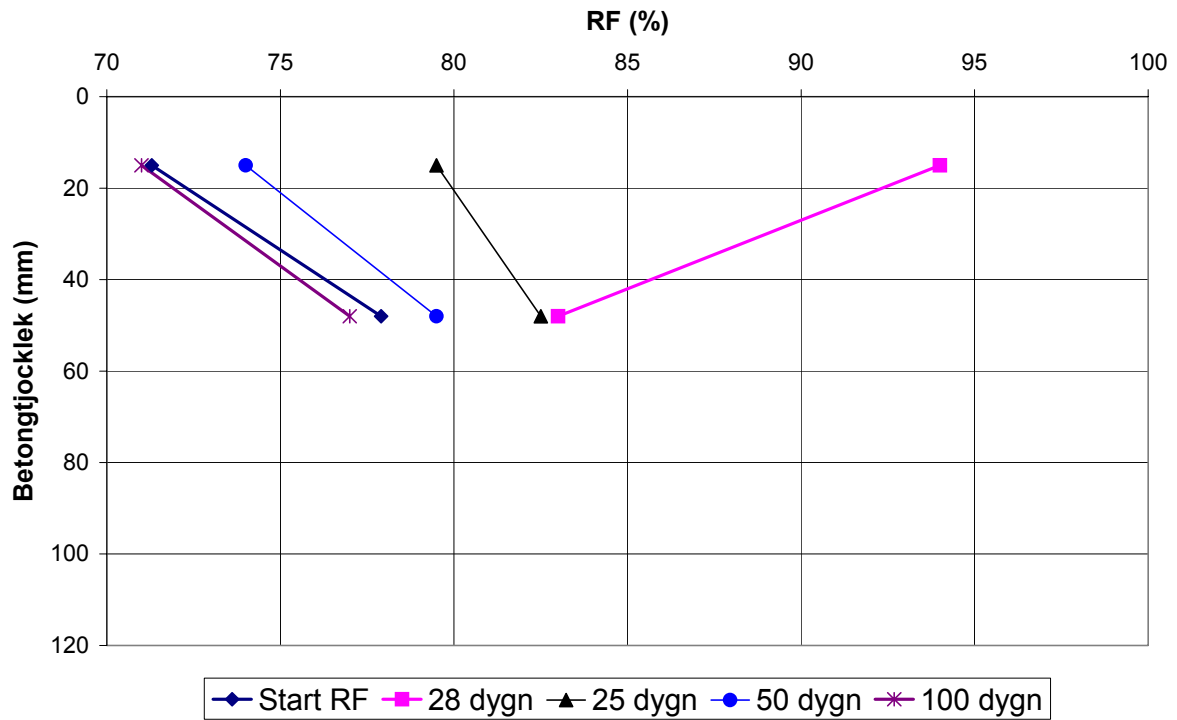
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,35 14 dygns vattenbelastning



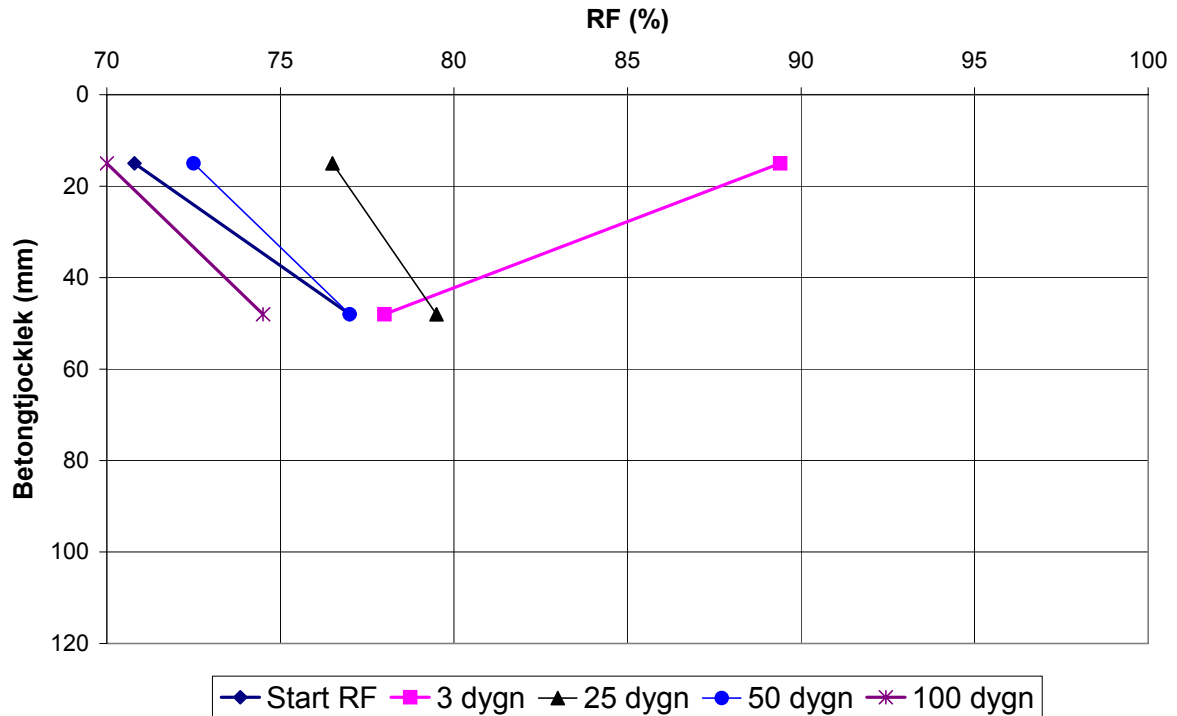
Vct 0,35 28 dygns vattenbelastning



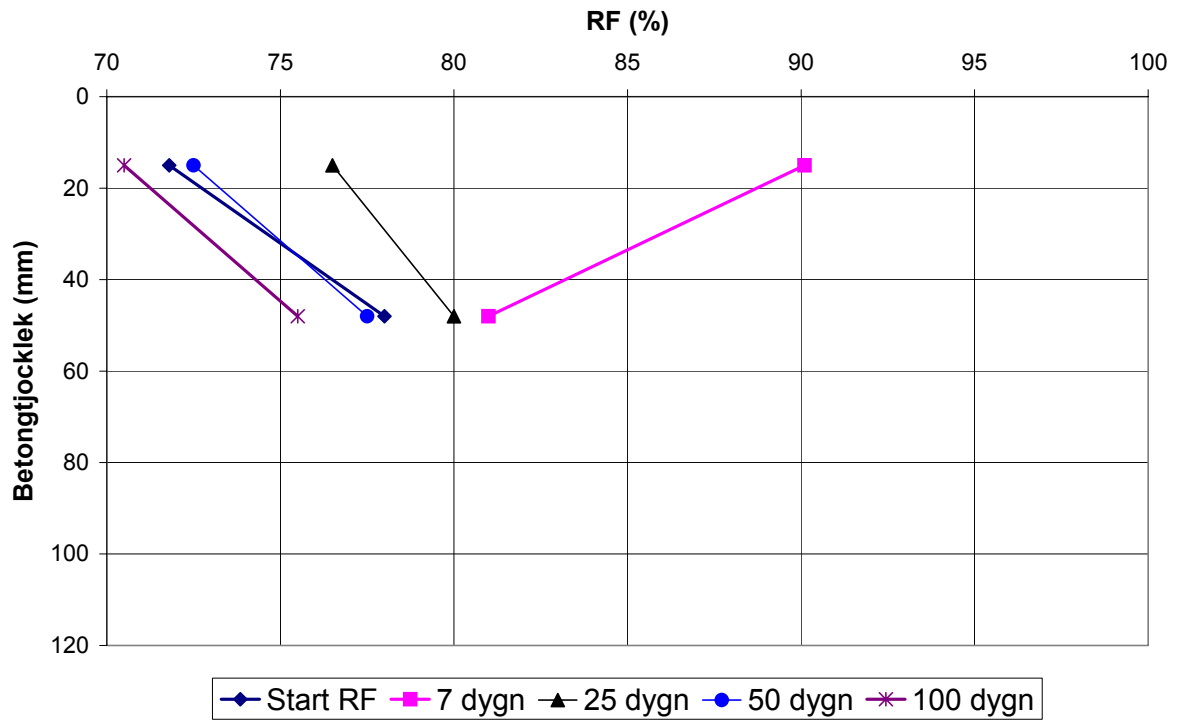
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,40 3 dygns vattenbelastning



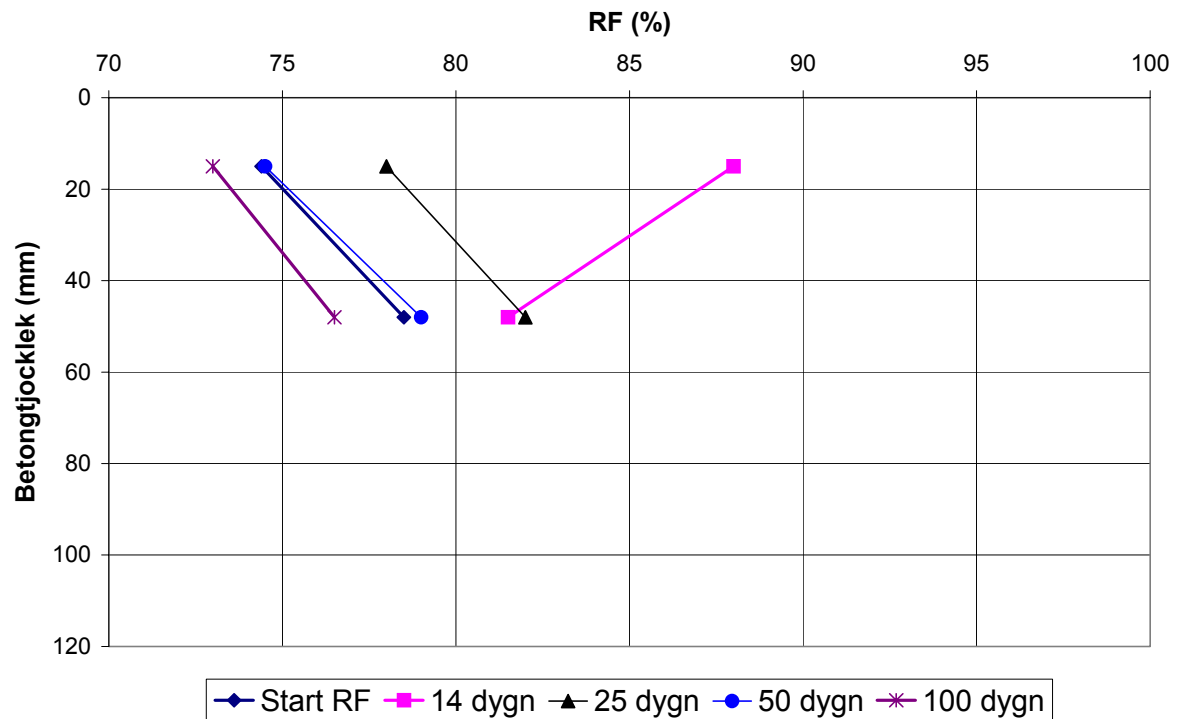
Vct 0,40 7 dygns vattenbelastning



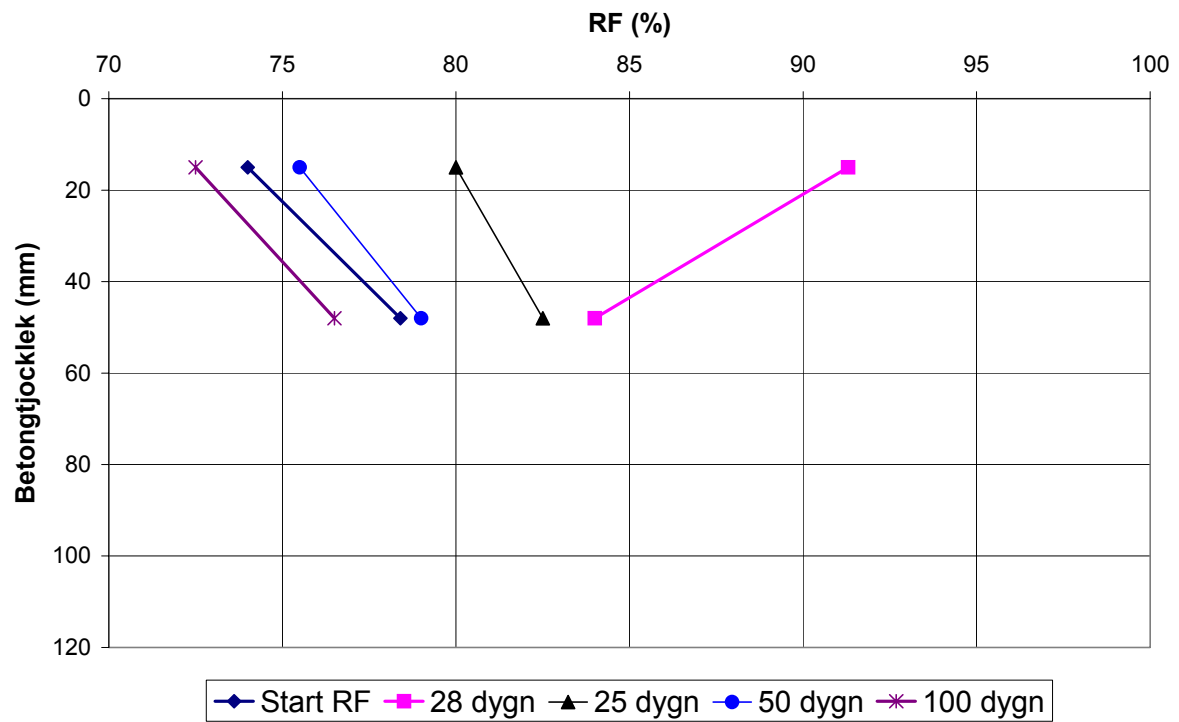
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,40 14 dygns vattenbelastning



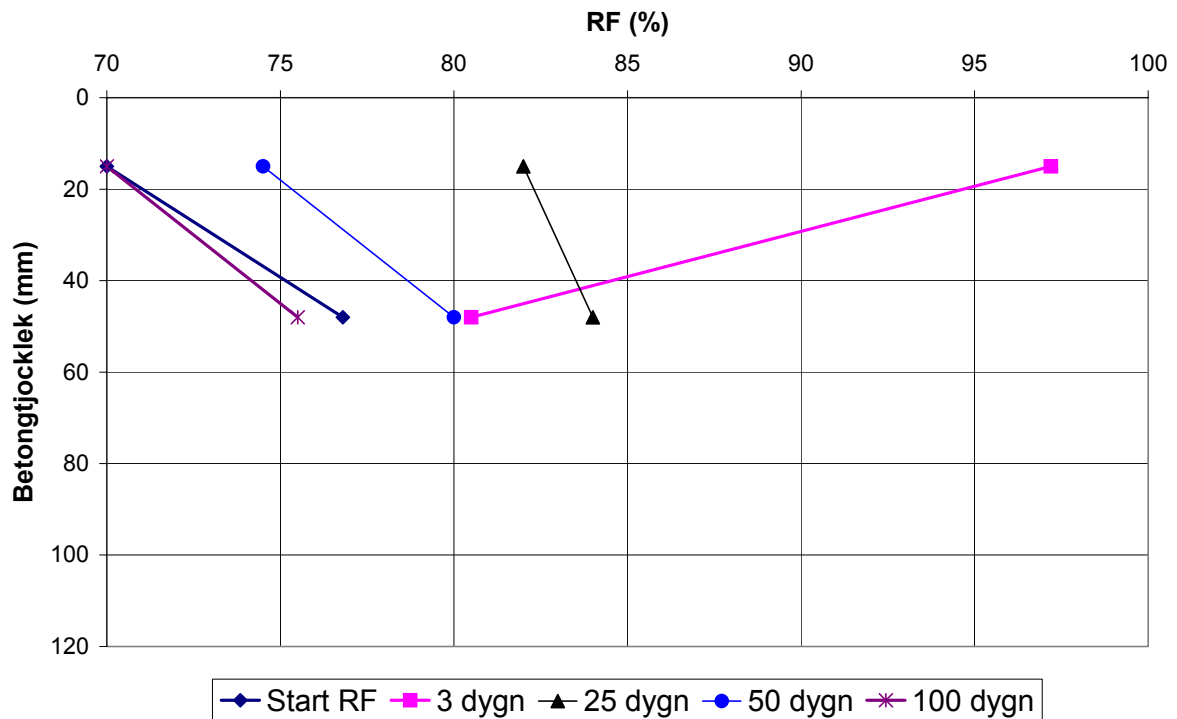
Vct 0,40 28 dygns vattenbelastning



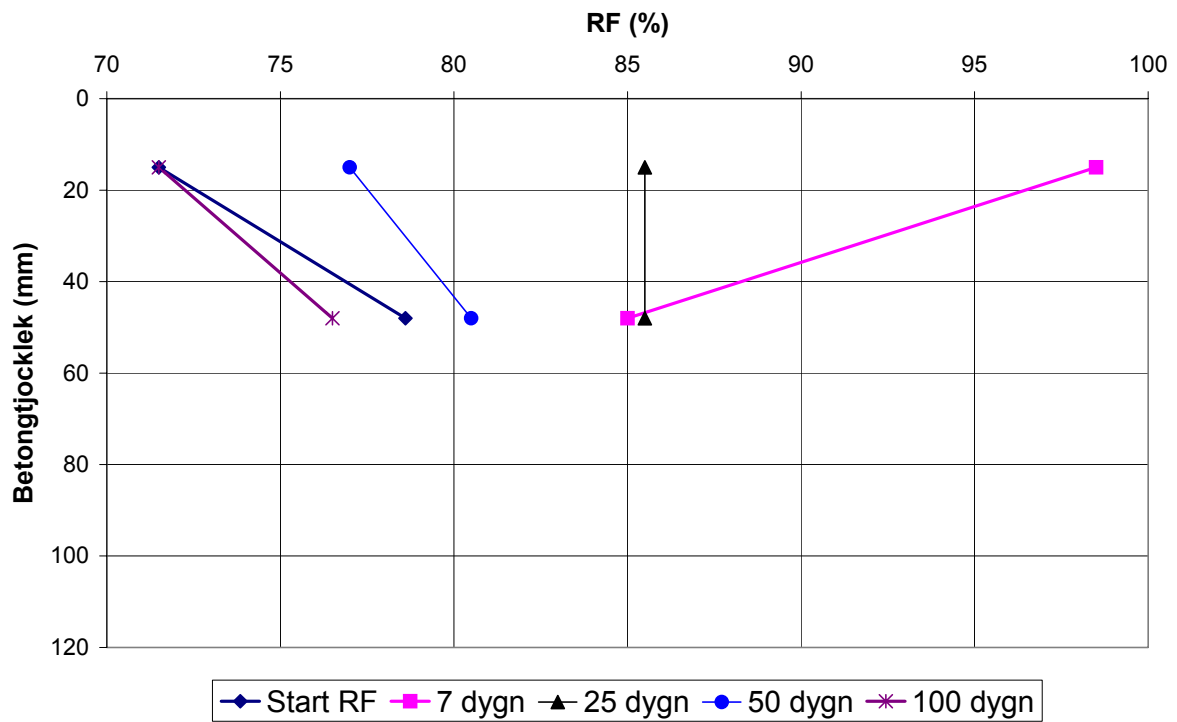
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,45 3 dygns vattenbelastning



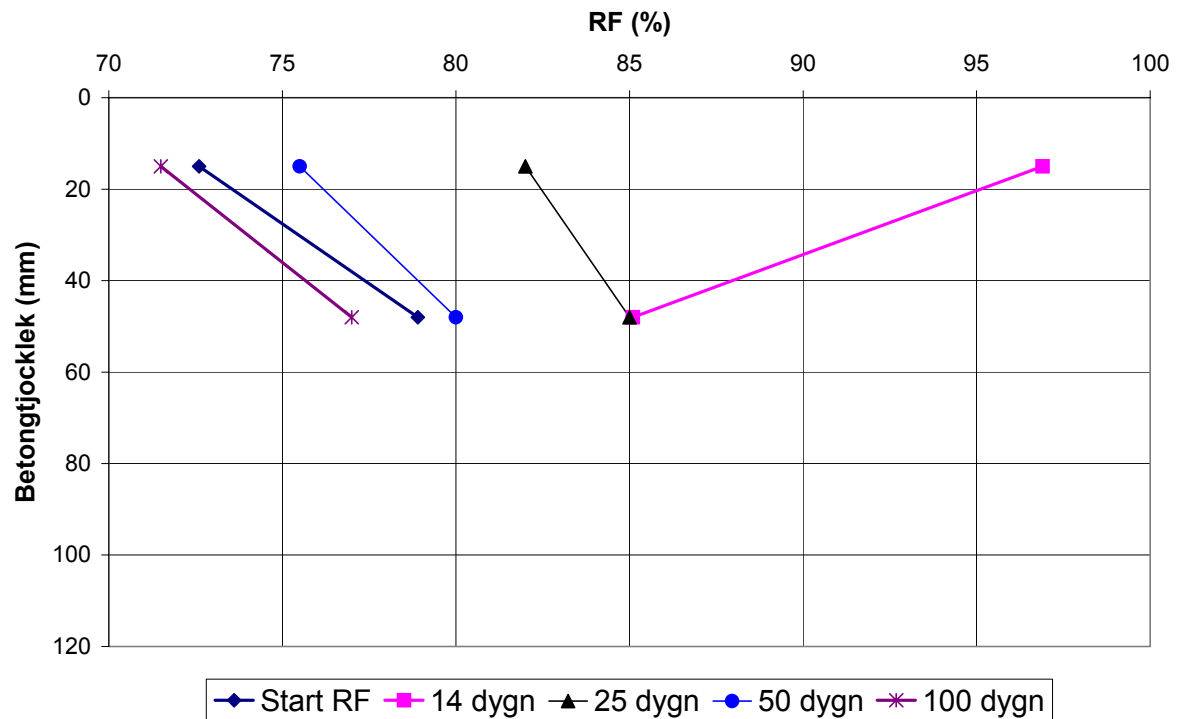
Vct 0,45 7 dygns vattenbelastning



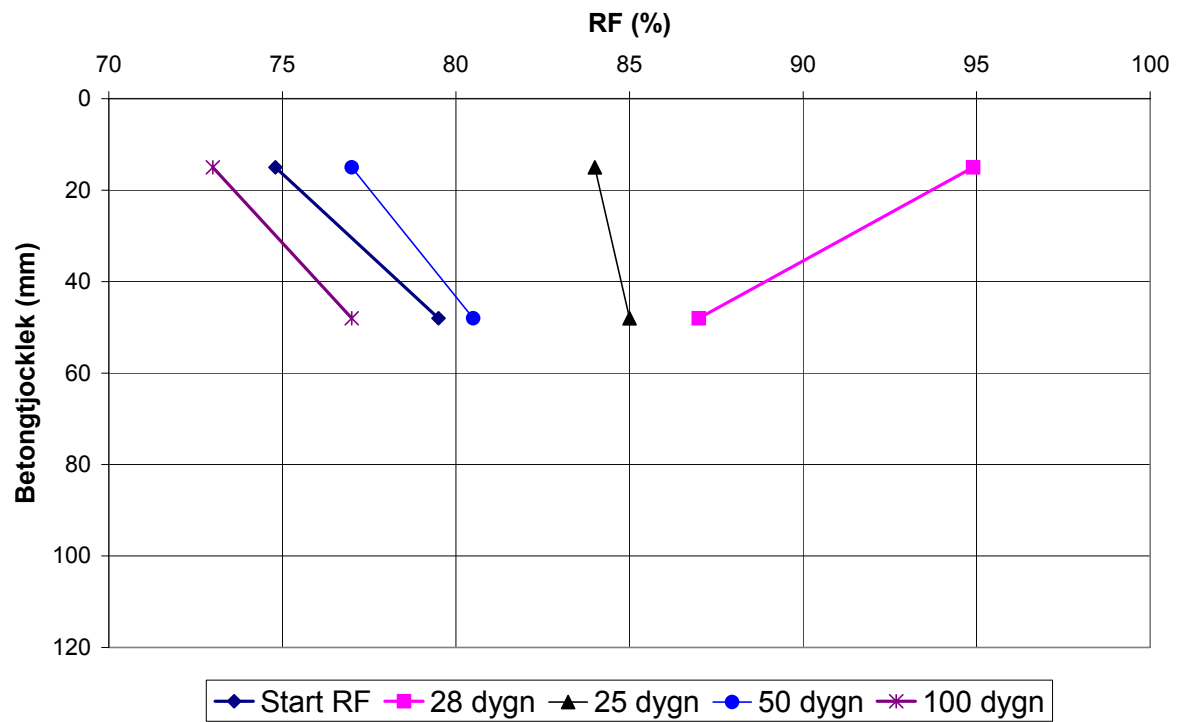
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,45 14 dygns vattenbelastning



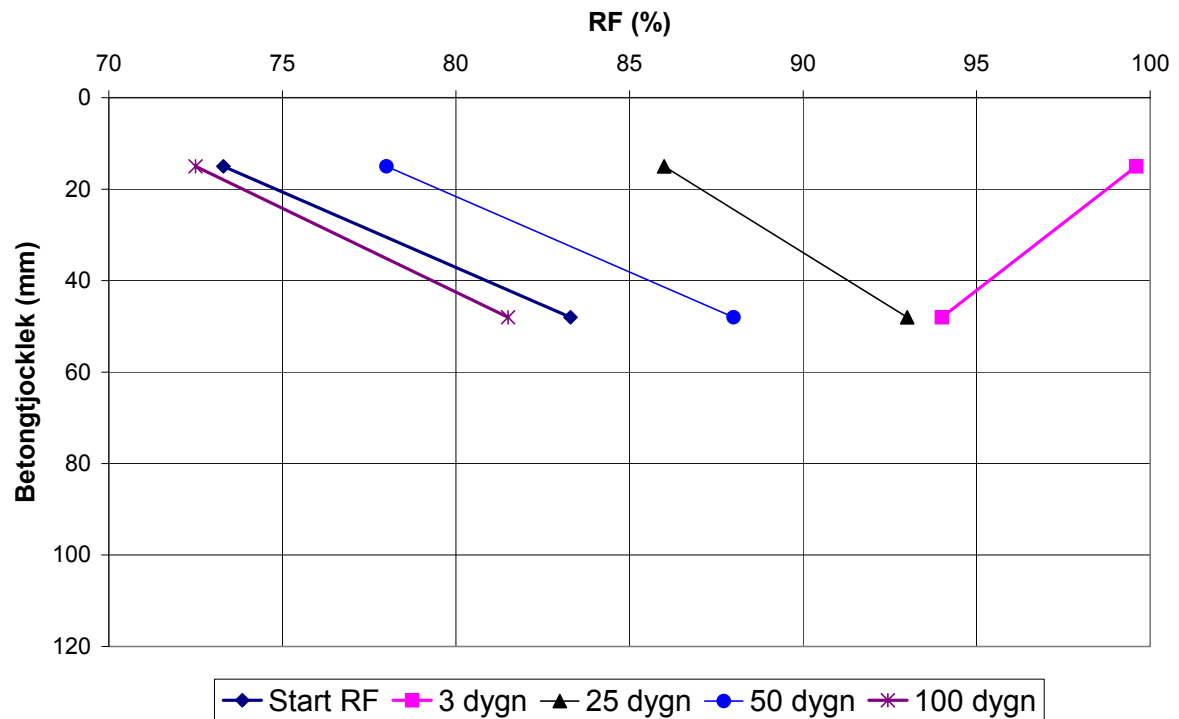
Vct 0,45 28 dygns vattenbelastning



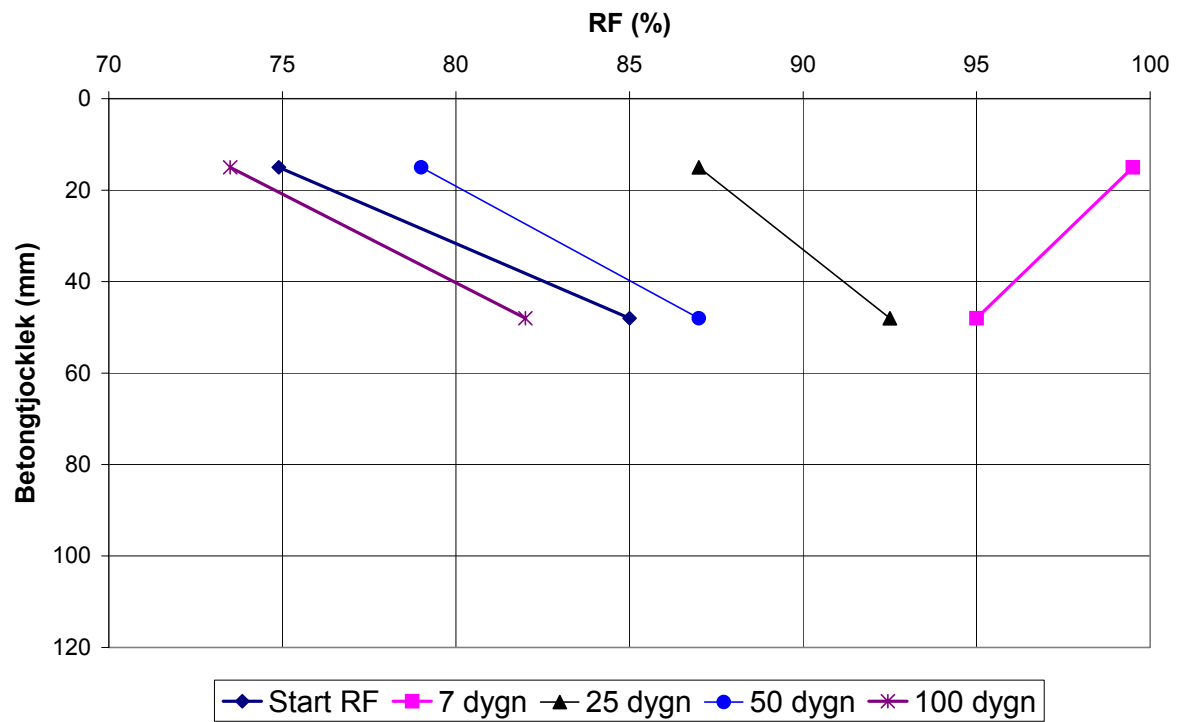
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,55 3 dygns vattenbelastning



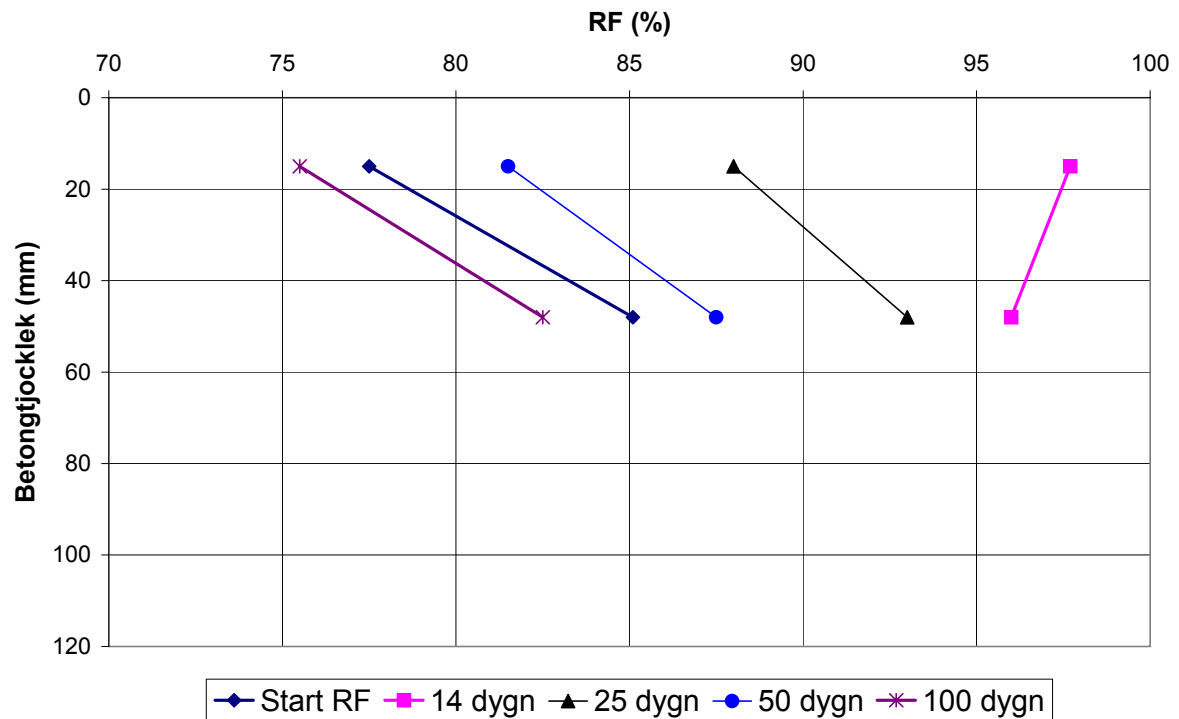
Vct 0,55 7 dygns vattenbelastning



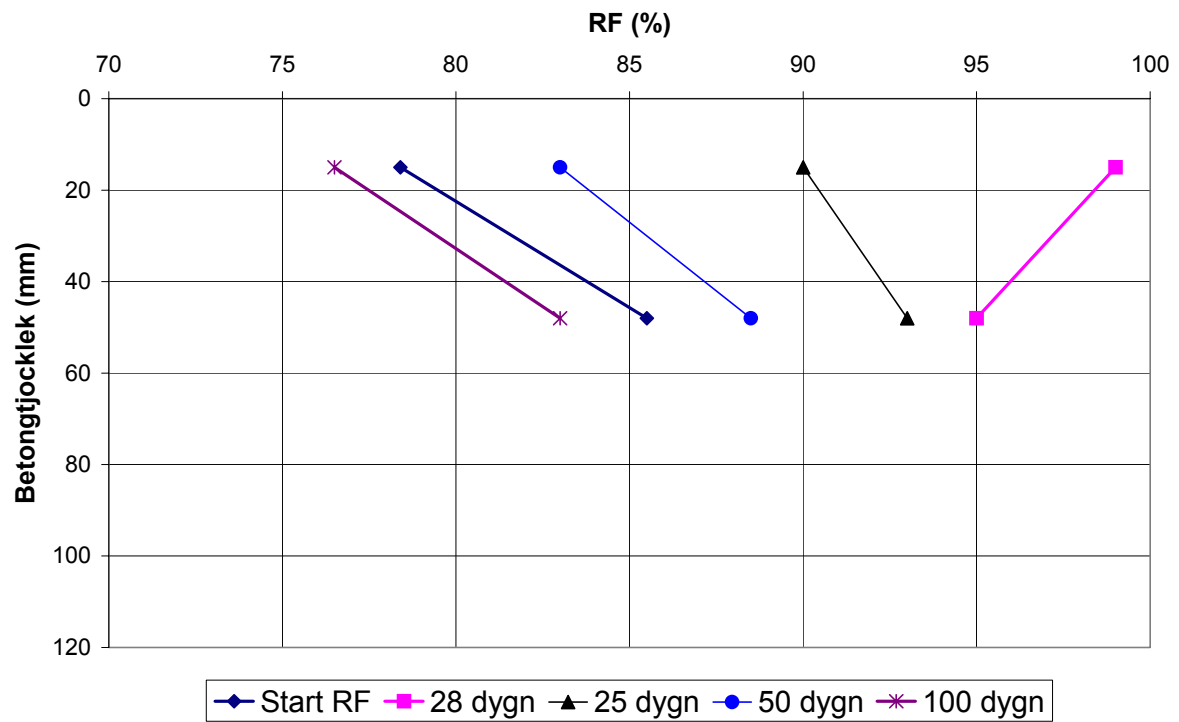
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,55 14 dygns vattenbelastning



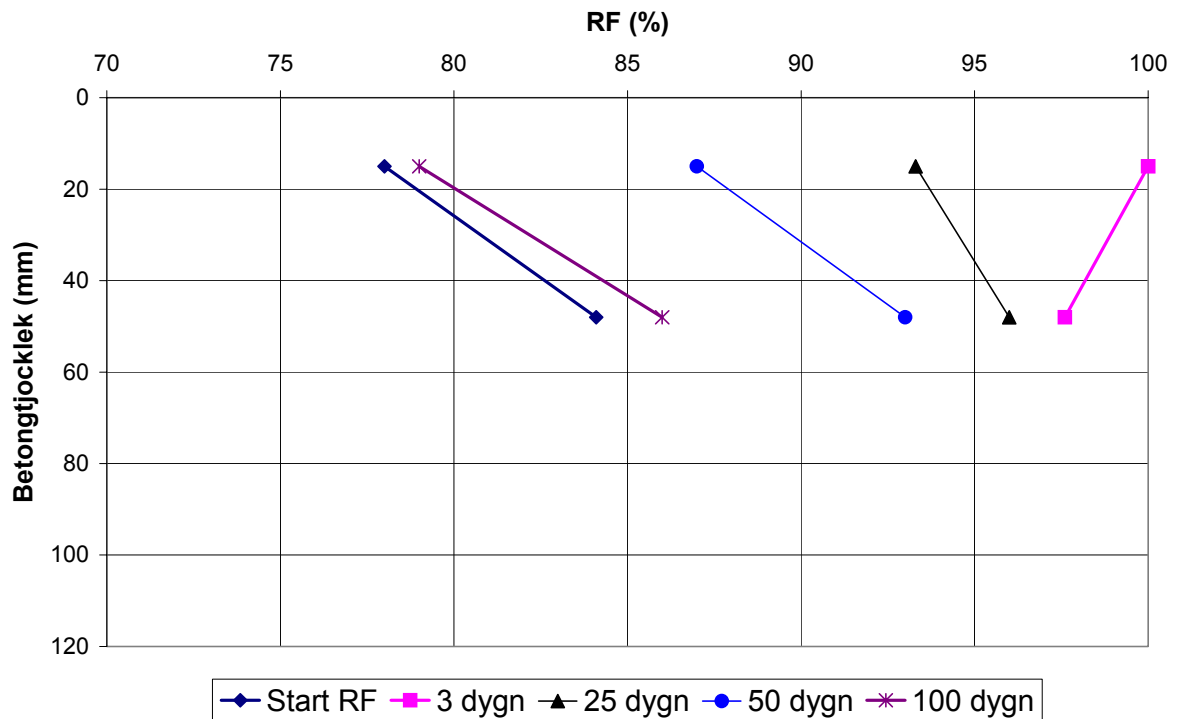
Vct 0,55 28 dygns vattenbelastning



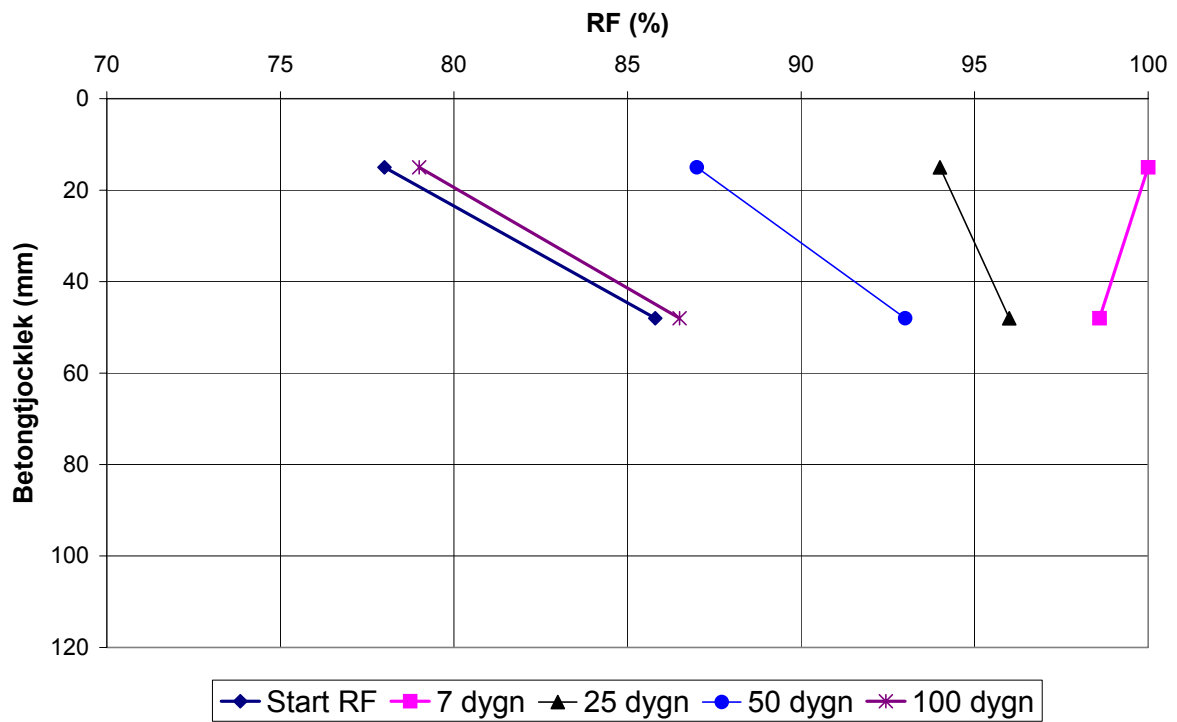
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,70 3 dygns vattenbelastning



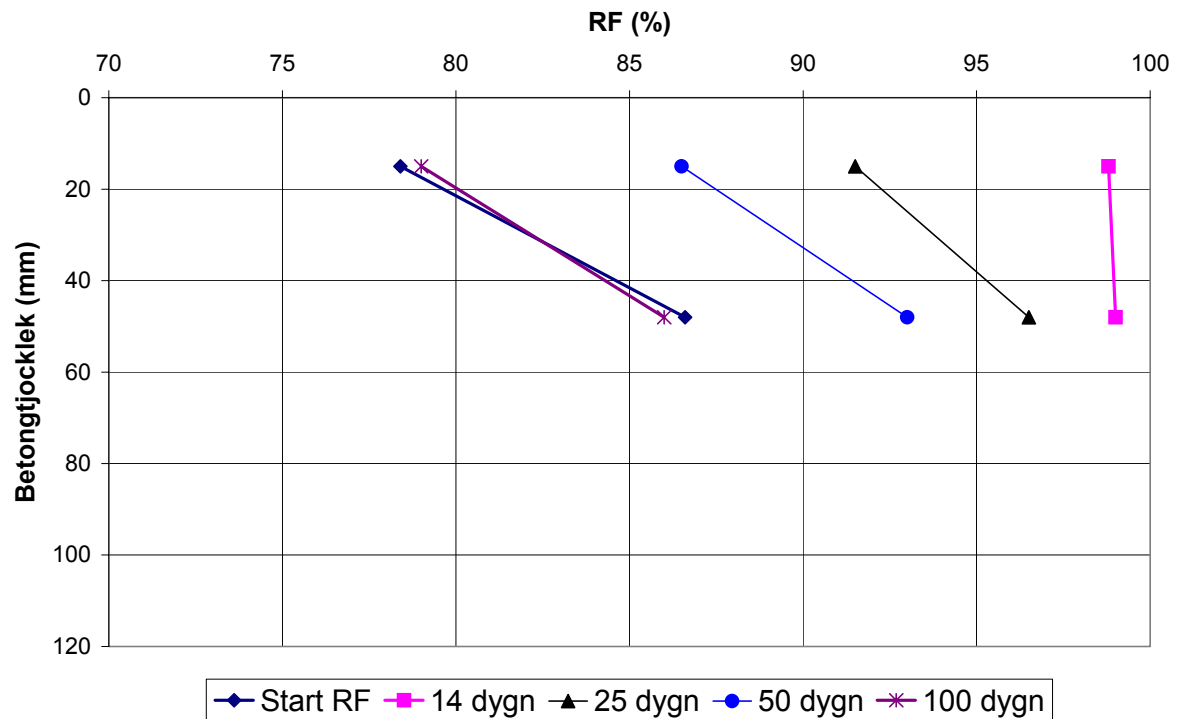
Vct 0,70 7 dygns vattenbelastning



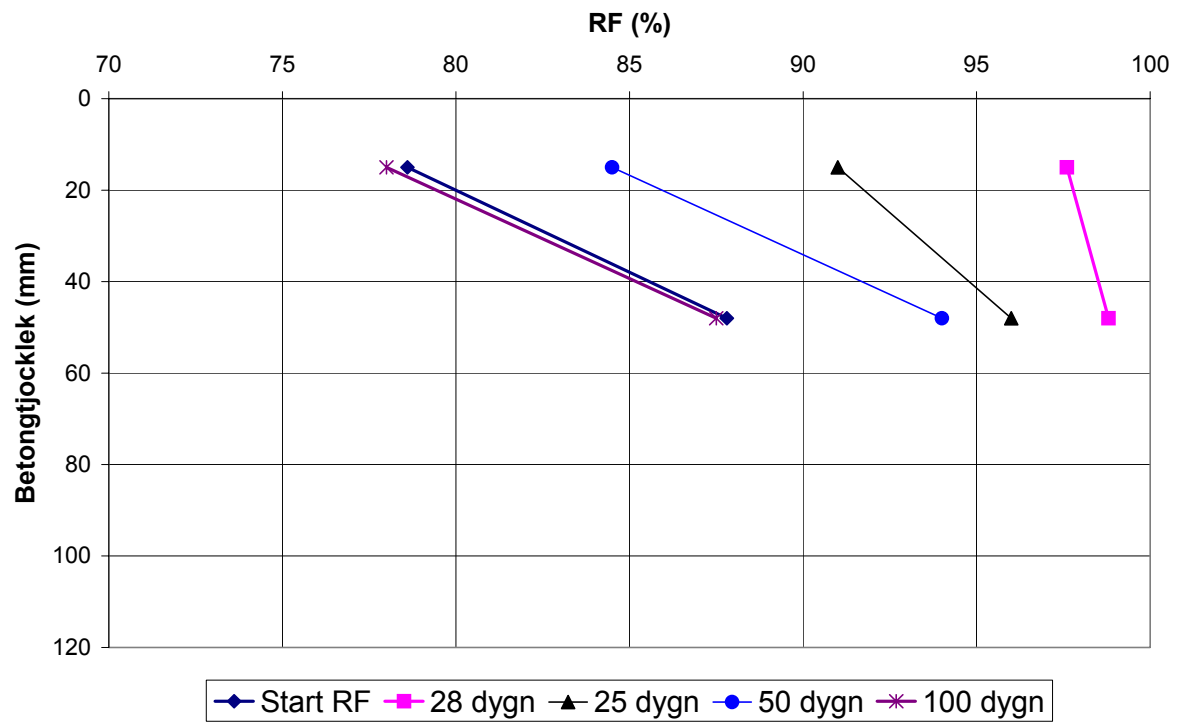
Appendix 2

Fuktprofiler vid vatteninsugning och uttorkning

Vct 0,70 14 dygns vattenbelastning



Vct 0,70 28 dygns vattenbelastning



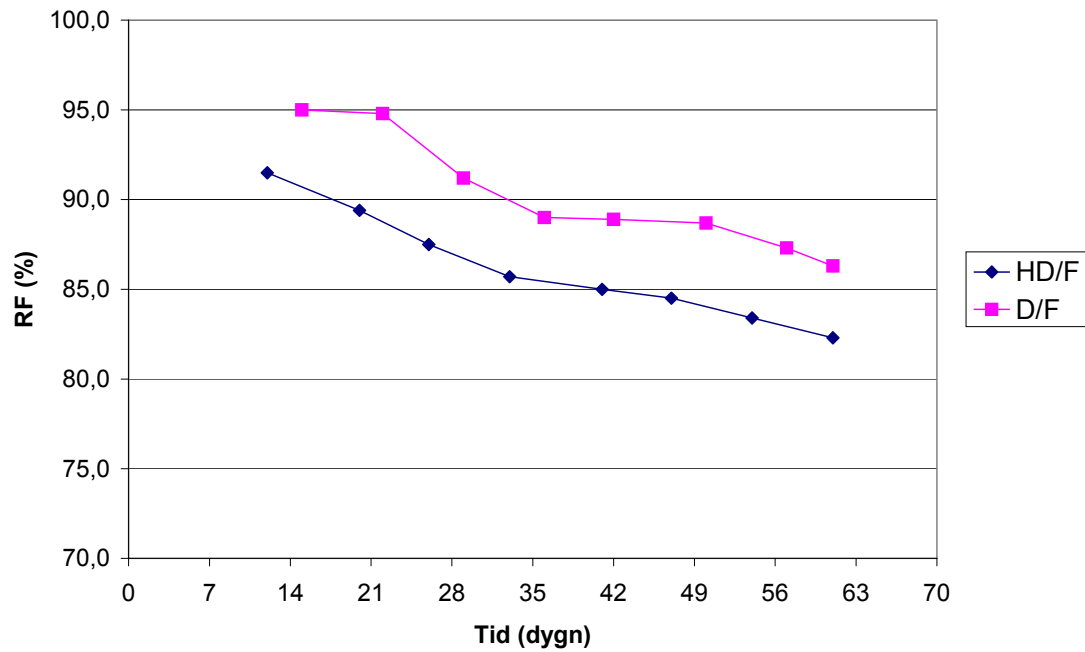
Appendix 3

**Uttorkning av bjälklagselement
Kap. 8**

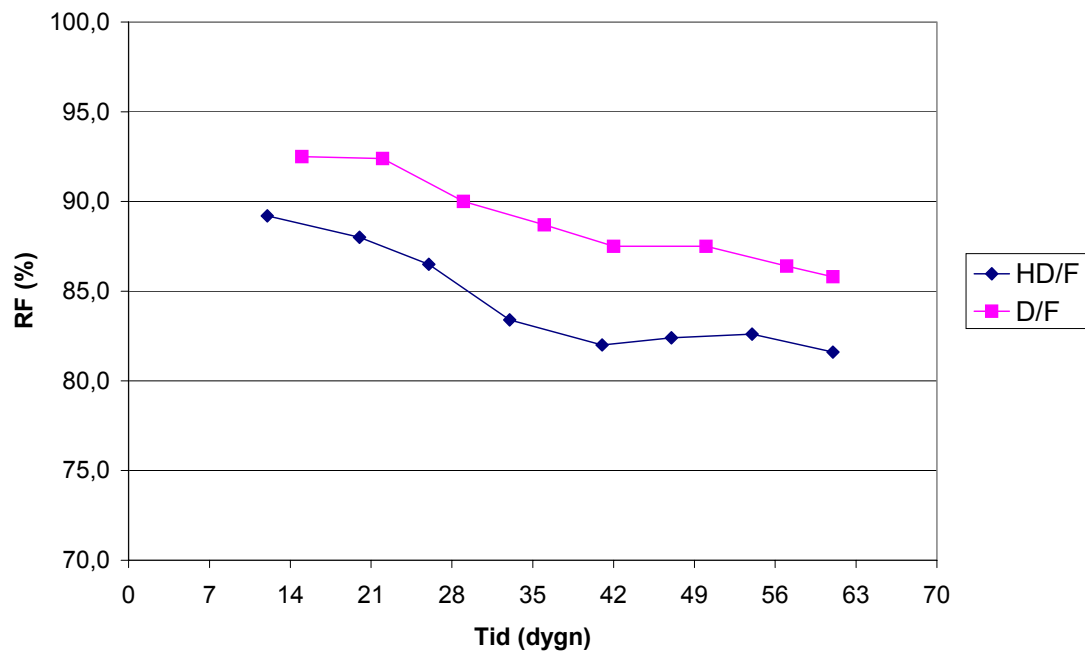
Appendix 3

Jämförelse av uttorkning mellan HD/F och D/F

Klimat 5

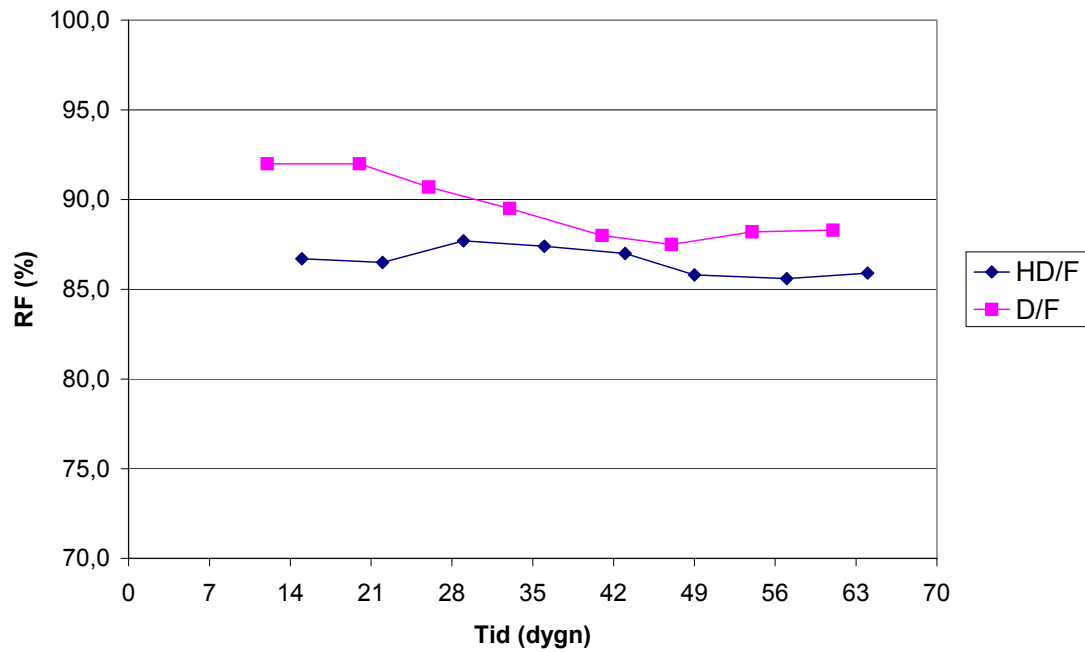


Klimat 6

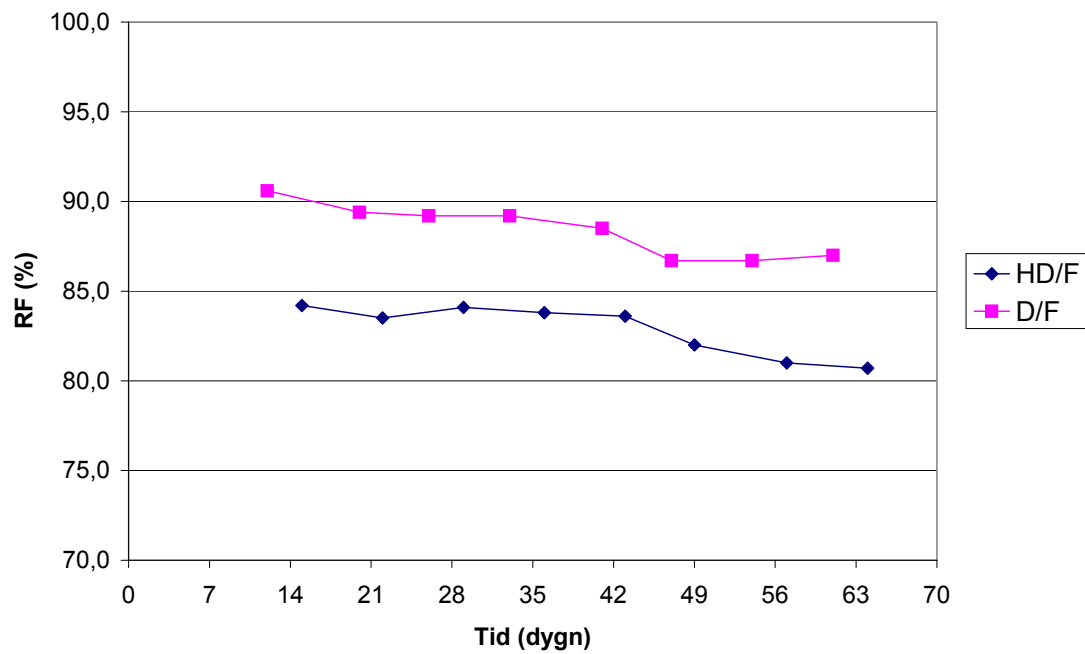


Jämförelse av uttorkning mellan HD/F och D/F

Klimat 7

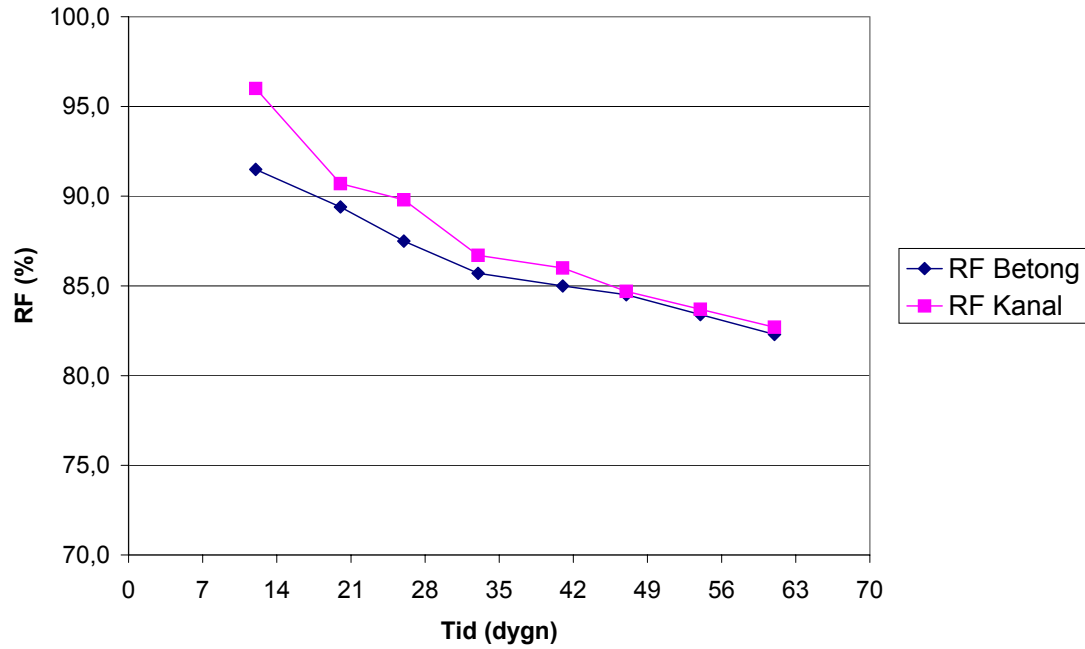


Klimat 8

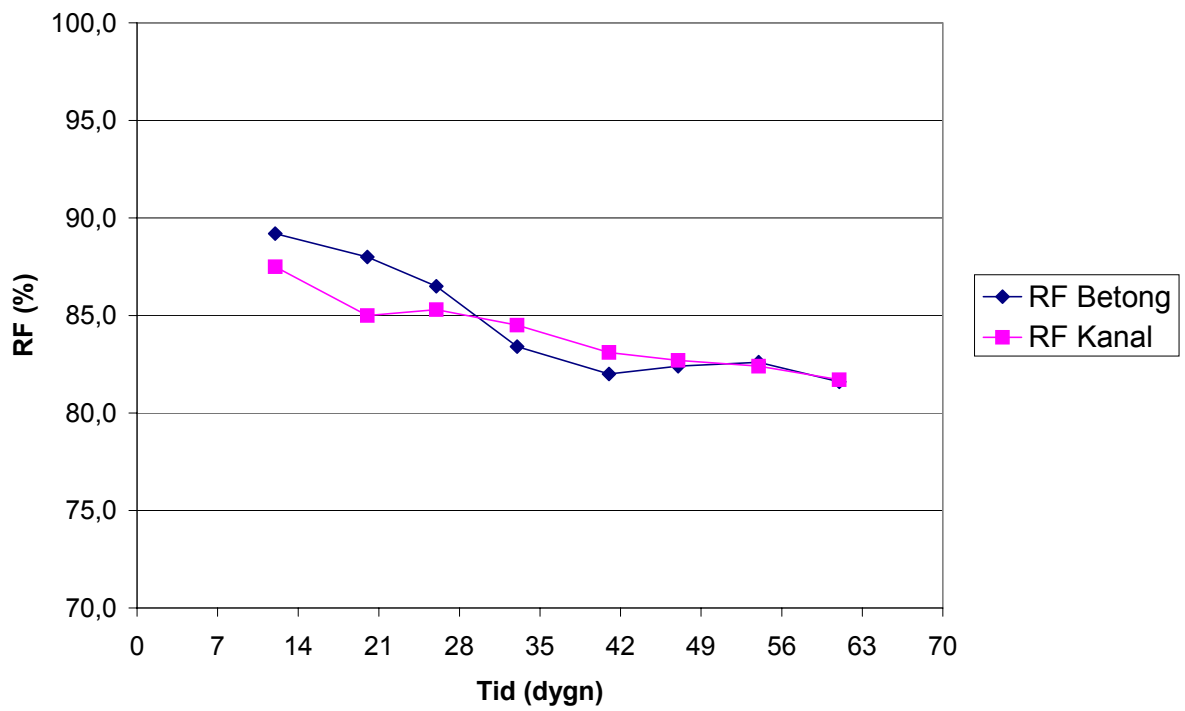


RF i kanaler i håldäck

Klimat 5

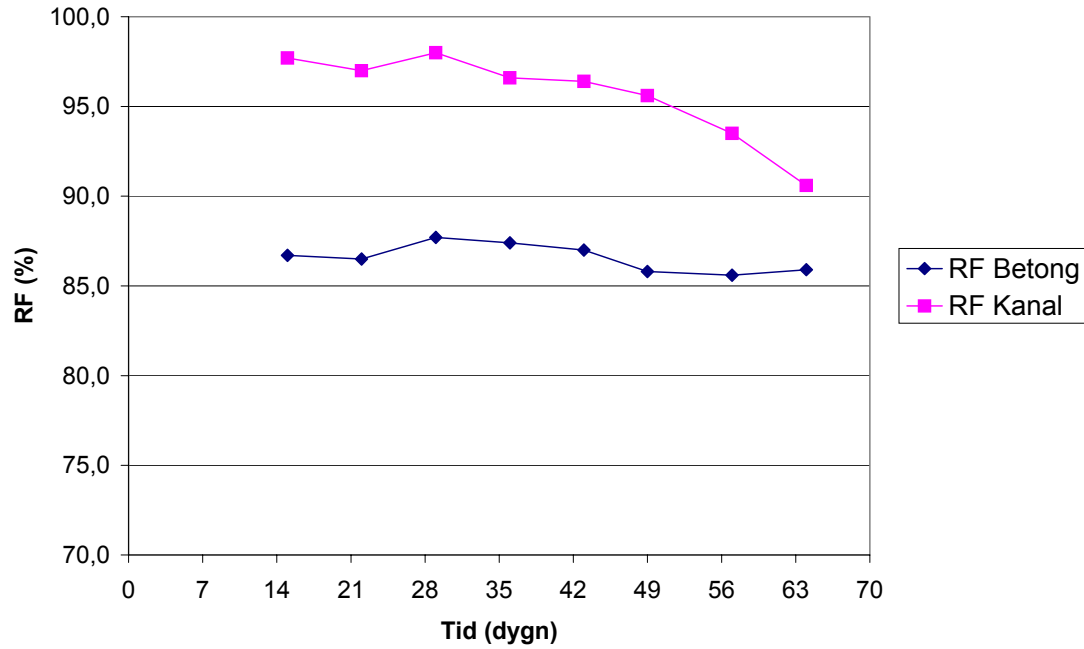


Klimat 6

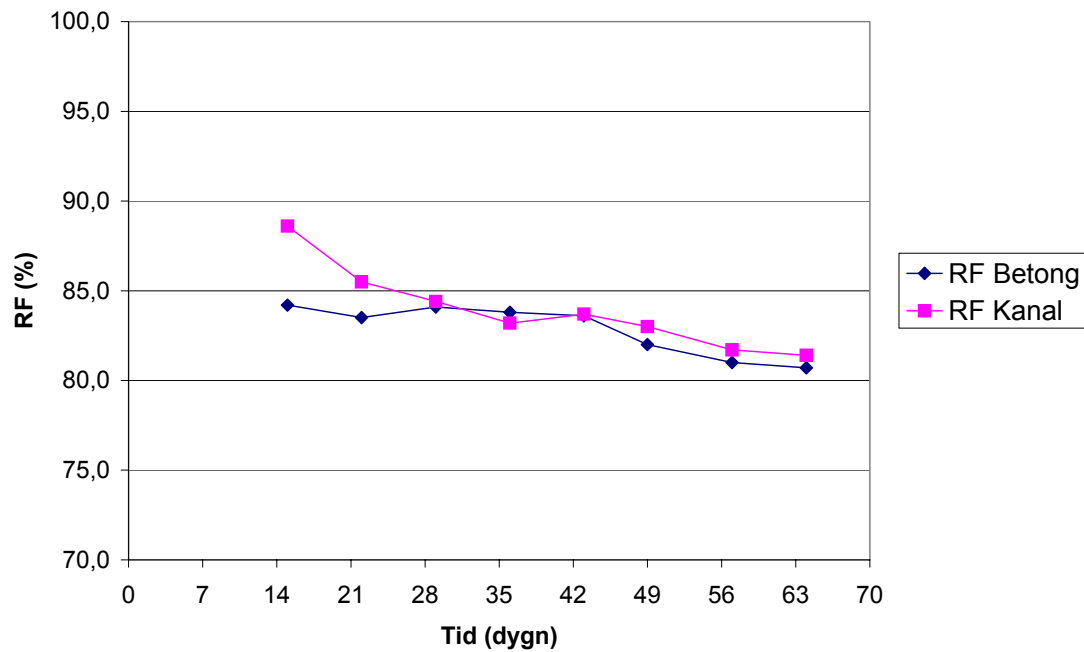


RF i kanaler i håldäck

Klimat 7



Klimat 8

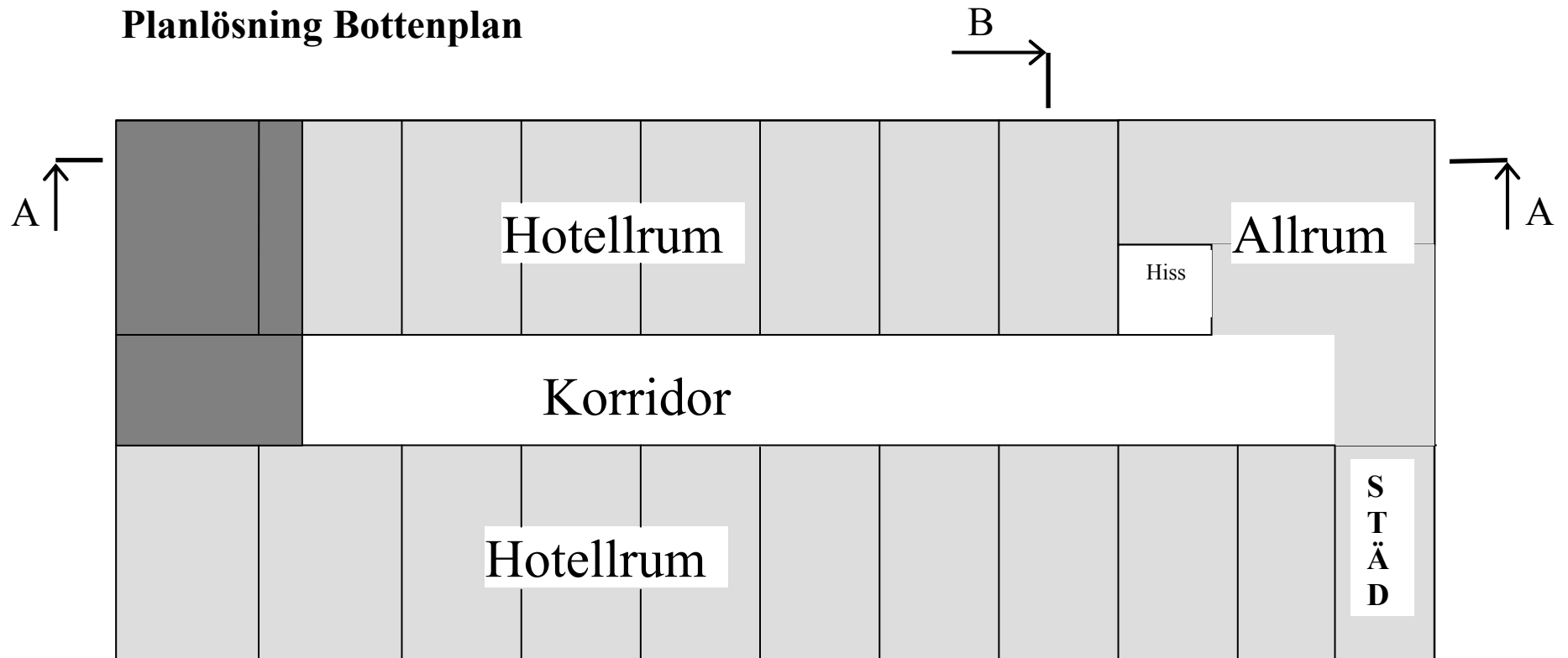


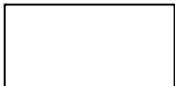
Appendix 4

Fältstudie av uttorkningsmetoder Kap. 9

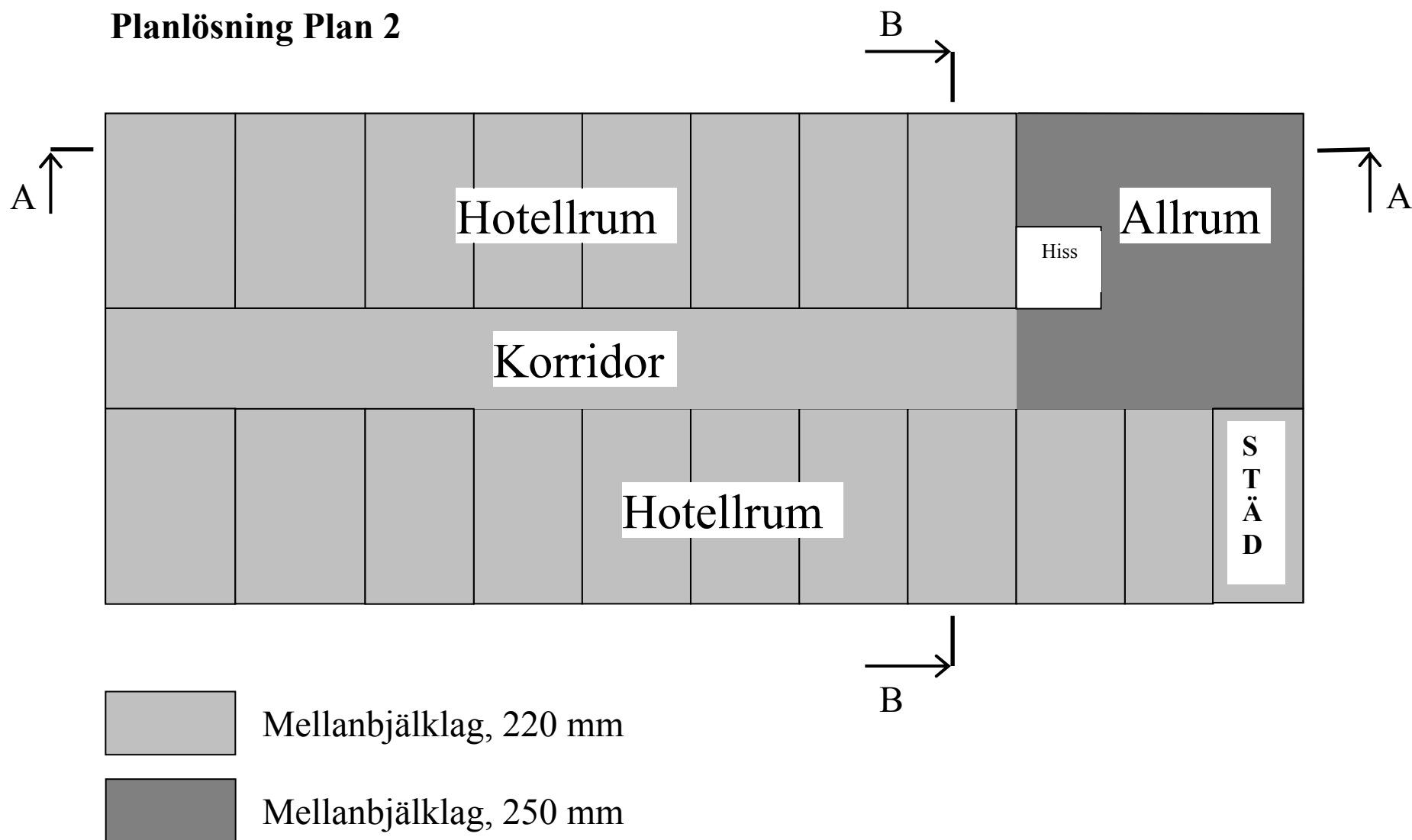
Appendix 4

Planlösning Bottenplan

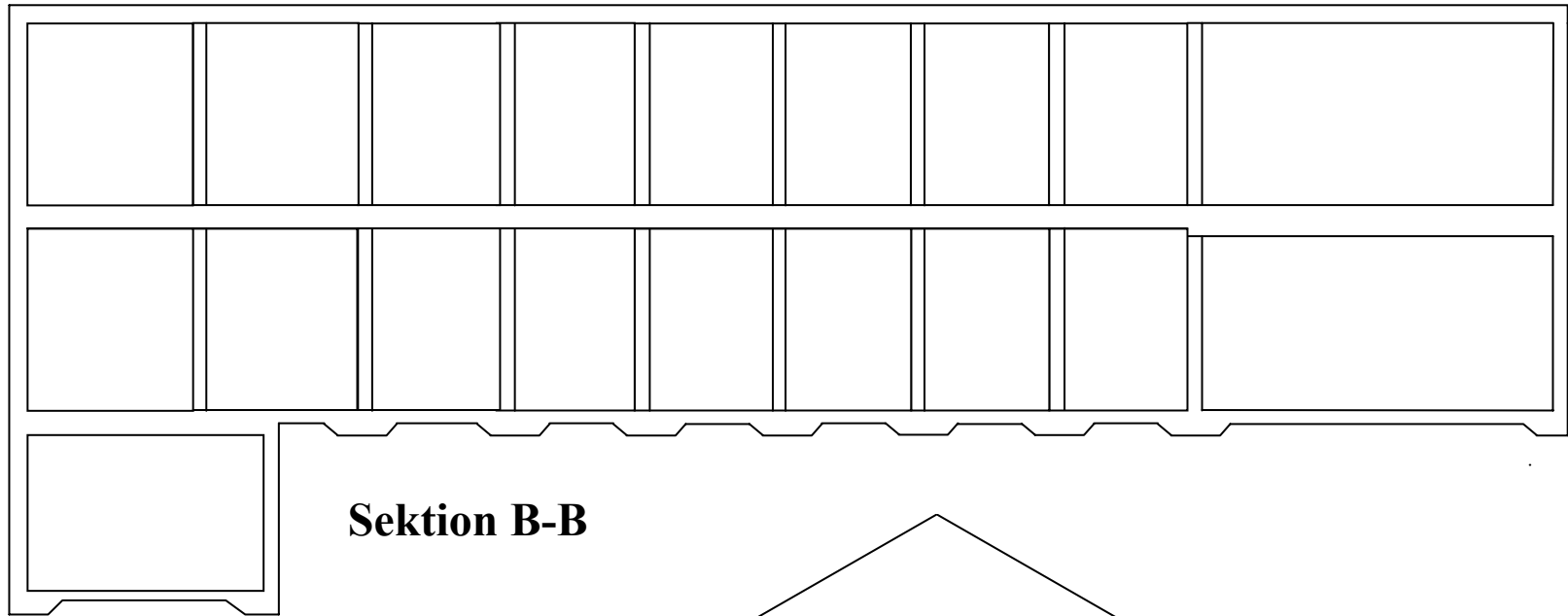


-  Källarbjälklag, 220 mm
-  Platta på mark, 100 mm
-  Platta på mark, 150 mm

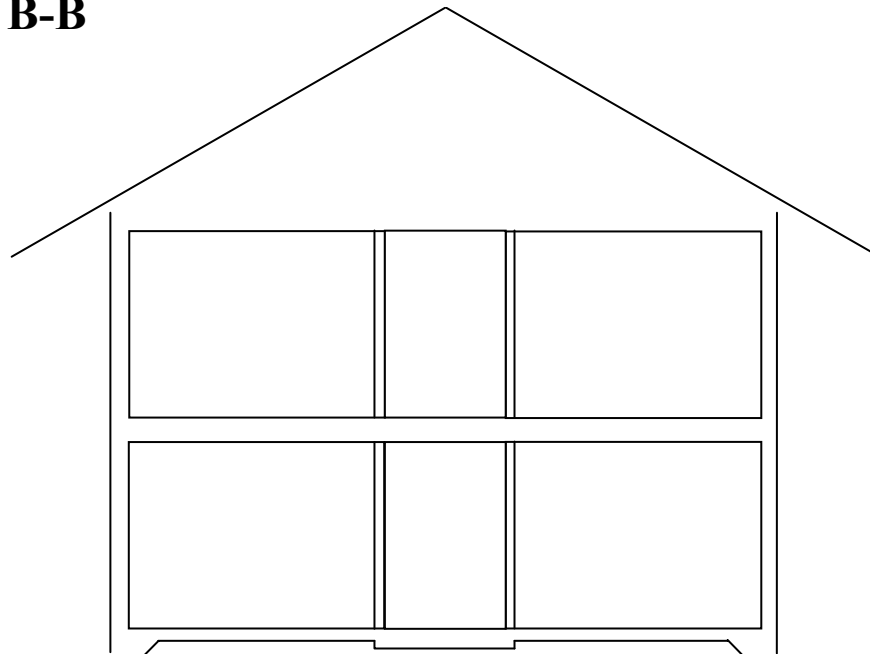
Planlösning Plan 2



Sektion A-A



Sektion B-B



Rumsnumrering, Bottenplan. Använda torkmetoder

1:1 K 45 El-uk	1:2 K 35	1:3 K 35 HP-1	1:4 K 35 HP-1	1:5 K 35 HP-2	1:6 K 35 El-m	1:7 K 35 El-uk	1:8 K 35 El-uk	1:9 K 35			
								Hiss			
	1:10 K 45	1:11 K 45 HP-1	1:12 K 45 HP-1	1:13 K 45 HP-2	1:14 K 45 El-m	1:15 K 45 El-uk	1:16 K 45 El-uk	1:17 K 45			
1:18 K 35 El-m	1:19 K 35 El-m	1:20 K 35 HP-1	1:21 K 35 HP-1	1:22 K 35 HP-2	1:23 K 35 El-m	1:24 K 35 El-uk	1:25 K 35 El-uk	1:26 K 35	1:27 K 35	1:28 K 35	
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M

Plattjocklekar: 1:1 (källarbjälklag) = 220 mm ; 1:2 – 1:9 = 100 mm ; 1:10 – 1:17 (korridor) = 150 mm ;
1:18 – 1:28 = 100 mm

Teckenförklaringar

K 35	Betong med vct 0,62
K 45	Betong med vct 0,50
El-m	Elslingor placerade på halva betongtjockleken
El-uk	Elslingor placerade i underkant på betongen
HP-1	Varm torr luft blåses in under plattan, startas när tätt hus erhållits
HP-2	Varm torr luft blåses in under plattan, startas snarast möjligt efter gjutning

Rumsnumrering, Plan 2. Använda torkmetoder

2:1 K 45 El-uk	2:2 K 45 El-uk	2:3 K 45 El-uk	2:4 K 45 El-uk	2:5 K 45 El-uk	2:6 K 60	2:7 K 60	2:8 K 60	2:9 K 60			
											Hiss
2:10 K 45 El-uk	2:11 K 45 El-uk	2:12 K 45 El-uk	2:13 K 45 El-uk	2:14 K 45 El-uk	2:15 K 60	2:16 K 60	2:17 K 60				
2:18 K 45 El-uk	2:19 K 45 El-uk	2:20 K 45 El-uk	2:21 K 45 El-uk	2:22 K 45 El-uk	2:23 K 60	2:24 K 60	2:25 K 60	2:26 K 60	2:27 K 60	2:28 K 60	
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M

Plattjocklekar: 2:1 – 2:8 = 220 mm ; 2:9 = 250 mm ; 2:10 – 2:28 = 220 mm

Teckenförklaringar

K 45	Betong med vct 0,50
K 60	Betong med vct 0,38
El-uk	Elslingor placerade i underkant på betongen

Betongrecept Järavallen

Betongtyp

vct

K 35	K 45	K 60
0,62	0,50	0,38

Material

Slite Byggcement

Silikastoft

Vatten

Ballast

Grus 0-8

Sten 8-16

Flyttillsatsmedel

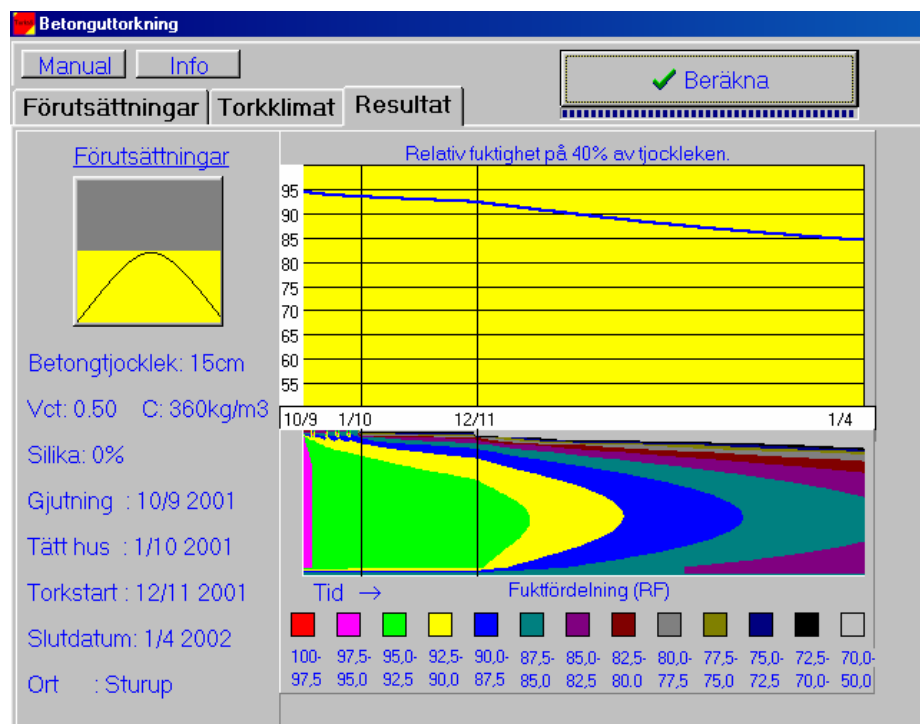
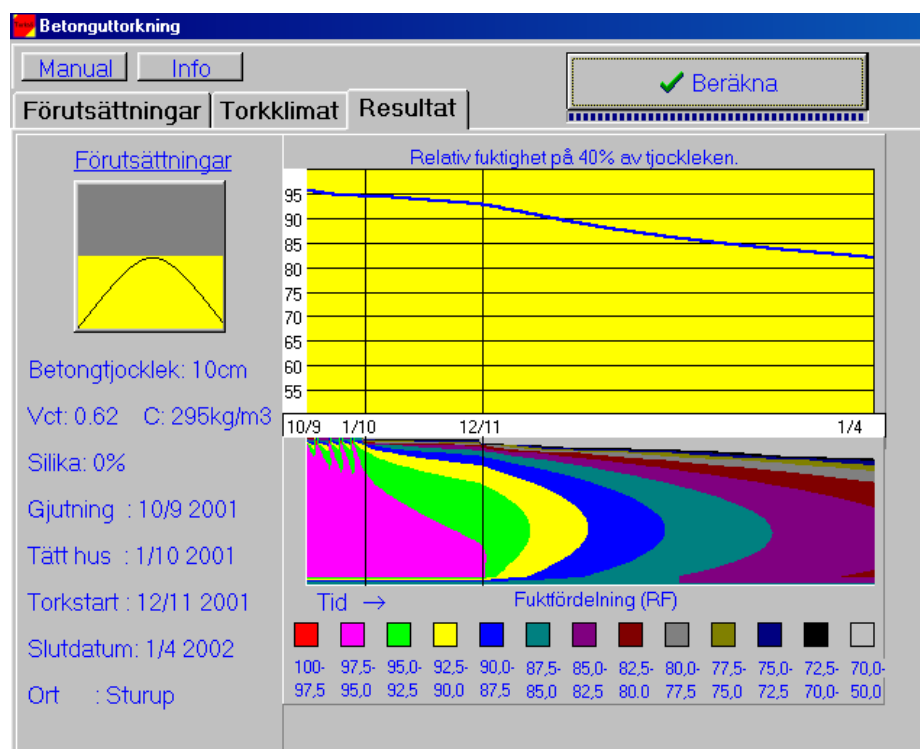
Peramin F

Peramin Compac 30

kg/m3	kg/m3	kg/m3
295	360	410
-	-	20
182	180	154
980	952	849
836	813	922
4	5	-
-	-	4

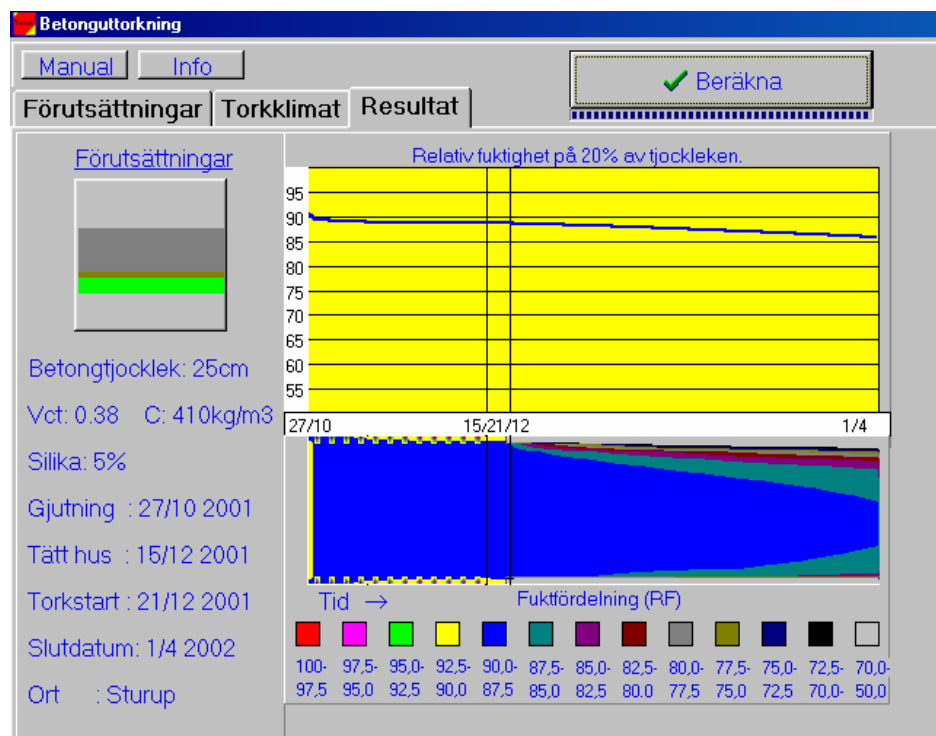
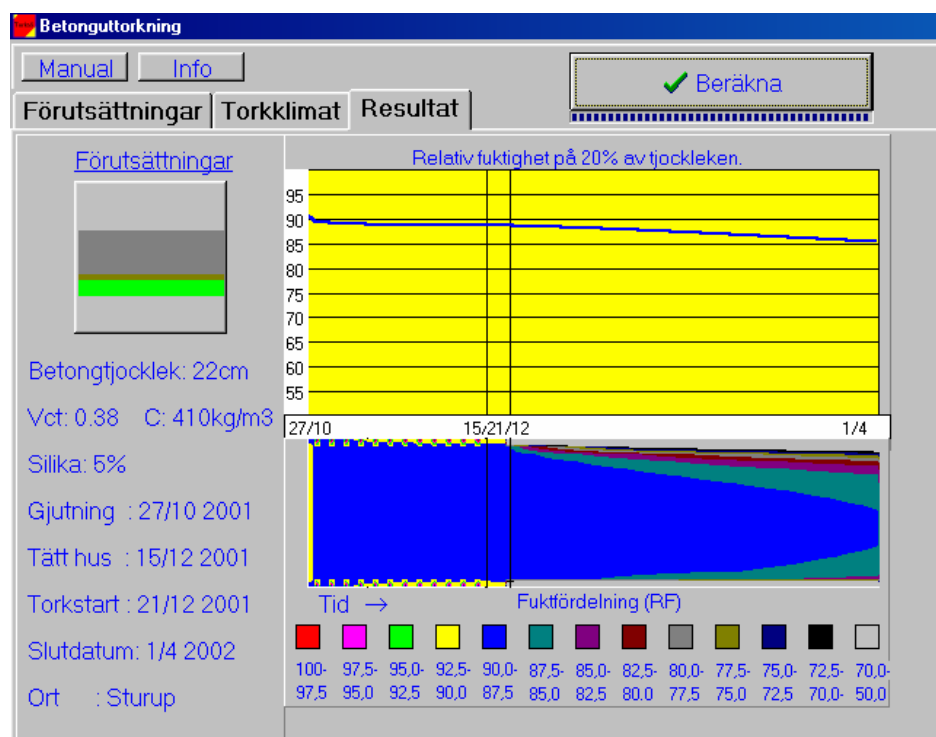
Uttorkningssimuleringar med TorkaS 1.0

Platta på mark



Uttorkningssimuleringar med TorkaS 1.0

Mellanbjälklag



Placering av Humi-Guard kvarsittande givare, Bottenplan

1:1 K 45 El-uk	1:2 K 35	1:3 K 35 HP-1	1:4 K 35 HP-1	1:5 K 35 HP-2	1:6 K 35 El-m	1:7 K 35 El-uk	1:8 K 35 El-uk	1:9 K 35		
	1:10 K 45	1:11 K 45 HP-1	1:12 K 45 HP-1	1:13 K 45 HP-2	1:14 K 45 El-m	1:15 K 45 El-uk	1:16 K 45 El-uk	1:17 K 45		
1:18 K 35 El-m	1:19 K 35 El-m	1:20 K 35 HP-1	1:21 K 35 HP-1	1:22 K 35 HP-2	1:23 K 35 El-m	1:24 K 35 El-uk	1:25 K 35 El-uk	1:26 K 35	1:27 K 35	1:28 K 35

A B C D E F G H J K L M

Plattjocklekar: 1:1 = 220 mm ; 1:2 – 1:9 = 100 mm ; 1:10 – 1:17 = 150 mm ; 1:18 – 1:28 = 100 mm

Mätdjup: Halva plattjockleken

Placering av Humi-Guard kvarsittande givare, Plan 2

2:1 K 45 El-uk	2:2 K 45 El-uk	2:3 K 45 El-uk	2:4 K 45 El-uk	2:5 K 45 El-uk	2:6 K 60	2:7 K 60 ⊗	2:8 K 60	⊗ 2:9 K 60			
								Hiss			
2:10 K 45 El-uk	2:11 K 45 El-uk	2:12 K 45 El-uk	2:13 K 45 El-uk	2:14 K 45 El-uk	2:15 K 60	2:16 K 60	2:17 K 60				
2:18 K 45 El-uk	2:19 K 45 El-uk	2:20 K 45 El-uk	2:21 K 45 El-uk	2:22 K 45 El-uk	2:23 K 60	2:24 K 60	2:25 K 60	2:26 K 60	2:27 K 60	2:28 K 60 ⊗	
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M

Plattjocklekar: 2:1 – 2:8 = 220 mm ; 2:9 = 250 mm ; 2:10 – 2:28 = 220 mm

Mätdjup: Halva plattjockleken

Mätpunkter för slutmätning, Bottenplan. Mättdjup = halva plattjockleken

1:1 K 45 El-uk ⊕	1:2 K 35	1:3 K 35 HP-1	1:4 K 35 HP-1 ⊕	1:5 K 35 HP-2	1:6 K 35 El-m ⊕	1:7 K 35 El-uk	1:8 K 35 El-uk	1:9 K 35 ⊕			
	1:10 K 45	1:11 K 45 HP-1	1:12 K 45 HP-1 ⊕	1:13 K 45 HP-2	1:14 K 45 El-m ⊕	1:15 K 45 El-uk	1:16 K 45 El-uk	Hiss	1:17 K 45 ⊕		
1:18 K 35 El-m ⊕	1:19 K 35 El-m	1:20 K 35 HP-1	1:21 K 35 HP-1	1:22 K 35 HP-2	1:23 K 35 El-m	1:24 K 35 El-uk	1:25 K 35 El-uk	1:26 K 35 ⊕	1:27 K 35	1:28 K 35	
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M

Plattjocklekar: 1:1 = 220 mm ; 1:2 – 1:9 = 100 mm ; 1:10 – 1:17 = 150 mm ; 1:18 – 1:28 = 100 mm

Teckenförklaringar

K 35	Betong med vct 0,62
K 45	Betong med vct 0,50
El-m	Elslingor placerade på halva betongtjockleken
El-uk	Elslingor placerade i underkant på betongen
HP-1	Varm torr luft blåses in under plattan, startas när tätt hus erhållits
HP-2	Varm torr luft blåses in under plattan, startas snarast möjligt efter gjutning

Mätpunkter för slutmätning, Plan 2. Mättdjup = halva plattjockleken

2:1 K 45 El-uk	2:2 K 45 El-uk ⊕	2:3 K 45 El-uk	2:4 K 45 El-uk	2:5 K 45 El-uk	2:6 K 60	2:7 K 60 ⊕	2:8 K 60	⊕ 2:9 K 60			
								Hiss			
2:10 K 45 El-uk	2:11 K 45 El-uk	2:12 K 45 El-uk	2:13 K 45 El-uk	2:14 K 45 El-uk	2:15 K 60	2:16 K 60	2:17 K 60				
2:18 K 45 El-uk	2:19 K 45 El-uk	2:20 K 45 El-uk	2:21 K 45 El-uk	2:22 K 45 El-uk	2:23 K 60	2:24 K 60	2:25 K 60	2:26 K 60	2:27 K 60	2:28 K 60	
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M

Plattjocklekar: 2:1 – 2:8 = 220 mm ; 2:9 = 250 mm ; 2:10 – 2:28 = 220 mm

Teckenförklaringar

K 45	Betong med vct 0,50
K 60	Betong med vct 0,38
El-uk	Elslingor placerade i underkant på betongen

Sammanställning av uttorkningsmetoder. Startdatum samt ungefärlig varaktighet

Rum	Betong	Plattjocklek	Gjutdatum	Sorptionsavfuktning	Elslingor	HP-torkning	Infravärme
1:1	K 45	220 mm	2001-09-26	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (2)	-	-
1:2	K 35	100 mm	2001-10-05	2001-12-18 +12 v	-	-	-
1:3	K 35	100 mm	2001-10-05	2001-12-18 +12 v	-	2001-11-20 +16 v	2002-02-11 +2 v
1:4	K 35	100 mm	2001-10-09	2001-12-18 +12 v	-	2001-11-20 +12v	-
1:5	K 35	100 mm	2001-10-09	2001-12-18 +12 v	-	2001-10-10 +17 v	-
1:6	K 35	100 mm	2001-10-03	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (2)	-	-
1:7	K 35	100 mm	2001-10-03	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (1)	-	2002-02-25 +2 v
1:8	K 35	100 mm	2001-10-08	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (2)	-	-
1:9	K 35	100 mm	2001-10-01	2001-12-18 +12 v	-	-	2002-02-11 +5 v
1:10	K 45	150 mm	2001-10-05	2001-12-18 +12 v	-	-	-
1:11	K 45	150 mm	2001-10-05	2001-12-18 +12 v	-	2001-11-20 +16 v	-
1:12	K 45	150 mm	2001-10-09	2001-12-18 +12 v	-	2001-11-20 +12 v	-
1:13	K 45	150 mm	2001-10-09	2001-12-18 +12 v	-	2001-10-10 +17 v	-
1:14	K 45	150 mm	2001-10-03	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (2)	-	-
1:15	K 45	150 mm	2001-10-03	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (1)	-	-
1:16	K 45	150 mm	2001-10-08	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (2)	-	-
1:17	K 45	150 mm	2001-10-01	2001-12-18 +12 v	-	-	2002-02-11 +5 v
1:18	K 35	100 mm	2001-10-09	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v	-	-
1:19	K 35	100 mm	2001-10-05	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (3)	-	-
1:20	K 35	100 mm	2001-10-05	2001-12-18 +12 v	-	2001-11-20 +16 v	2002-02-11 +2 v
1:21	K 35	100 mm	2001-10-09	2001-12-18 +12 v	-	2001-11-20 +12 v	-
1:22	K 35	100 mm	2001-10-09	2001-12-18 +12 v	-	2001-10-10 +17 v	-
1:23	K 35	100 mm	2001-10-03	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (2)	-	-
1:24	K 35	100 mm	2001-10-03	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (1)	-	2002-02-25 +2 v
1:25	K 35	100 mm	2001-10-08	2001-12-18 +12 v	2001-11-20 +16 v (2)	-	-
1:26	K 35	100 mm	2001-10-08	2001-12-18 +12 v	-	2002-02-11 +4 v	2002-02-11 +4 v
1:27	K 35	100 mm	2001-10-01	2001-12-18 +12 v	-	2002-02-11 +4 v	2002-02-11 +4 v
1:28	K 35	100 mm	2001-10-01	2001-12-18 +12 v	-	-	2002-02-11 +4 v

(1) : En elslinga ur funktion sedan byggstart.

(2) : En elslinga har gått sönder under byggskedet. Oklart när det hände.

(3) : Värmning enbart mellan 18.00 – 06.00

Sammanställning av uttorkningsmetoder. Startdatum samt ungefärlig varaktighet

Rum	Betong	Plattjocklek	Gjutdatum	Sorptionsavfuktning	Elslingor	HP-torkning	Infravärme
2:1	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:2	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:3	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:4	K 45	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:5	K 45	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:6	K 60	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:7	K 60	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:8	K 60	220 mm	2001-10-19	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:9	K 60	250 mm	2001-10-19	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:10	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:11	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:12	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:13	K 45	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:14	K 45	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:15	K 60	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:16	K 60	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:17	K 60	220 mm	2001-10-19	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:18	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:19	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:20	K 45	220 mm	2001-11-01	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:21	K 45	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:22	K 45	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	2001-12-21 +12 v	-	-
2:23	K 60	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:24	K 60	220 mm	2001-10-26	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:25	K 60	220 mm	2001-10-19	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:26	K 60	220 mm	2001-10-19	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:27	K 60	220 mm	2001-10-19	2002-01-14 +8 v	-	-	-
2:28	K 60	220 mm	2001-10-19	2002-01-14 +8 v	-	-	-

Appendix 4.8

Resultat från uttorkningsberäkning med TorkaS, 2.0

Projekt: Järavallen

Namn: Rum 1:9

Företag:

2002-11-05

Byggnadsmaterial LTH

Förutsättningar

Platta på mark med underliggande mineralull

Gjutning : 1/10 2001

Betongtjocklek: 10 cm

Tätt hus : 16/12 2001

V_{ct}: 0,62

Torkstart : 16/12 2001

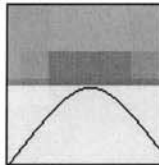
Silika: 0 %

Slutdatum : 13/3 2002

Vattenhalt: 183 l/m³

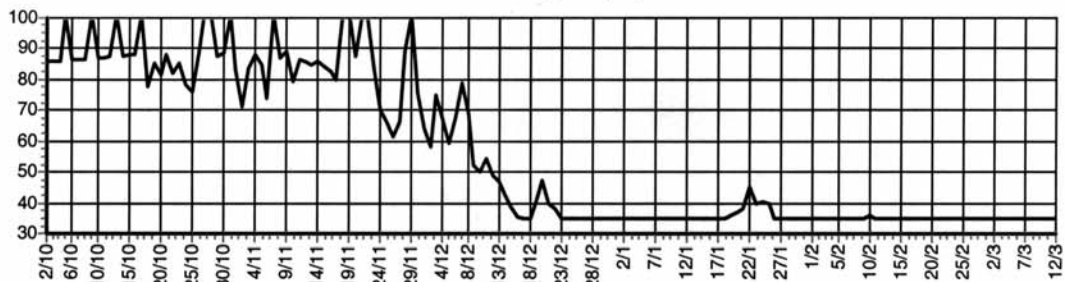
Ort : Sturup

Cementhalt: 295 kg/m³

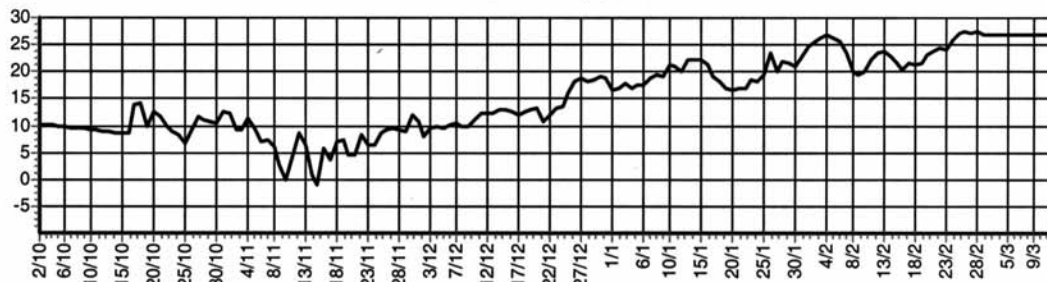


Torkklimat

Relativ fuktighet (%)

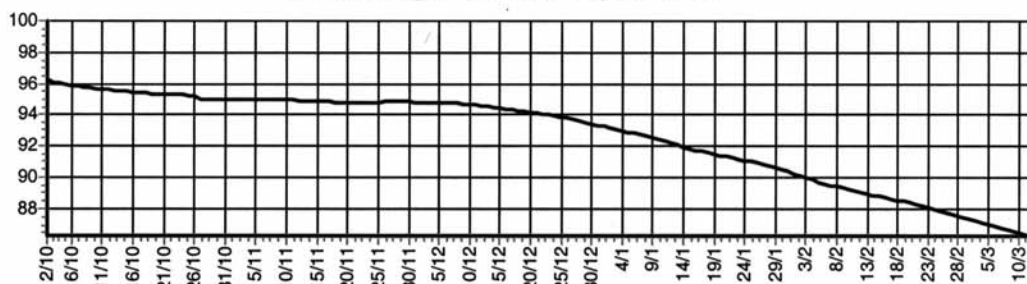


Temperatur (C)



Resultat från beräkning

Relativ fuktighet på 40% av tjockleken.



Appendix 4.8

Resultat från uttorkningsberäkning med TorkaS, 2.0

Projekt: Järvallen

Namn: Rum 1:9

Företag:

2002-11-05

Byggnadsmaterial LTH

Förutsättningar

Platta på mark med underliggande tätt skikt

Gjutning : 1/10 2001

Betongtjocklek: 10 cm

Tätt hus : 16/12 2001

Vct: 0,62

Torkstart : 16/12 2001

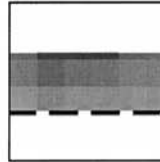
Silika: 0 %

Slutdatum : 13/3 2002

Vattenhalt: 183 l/m³

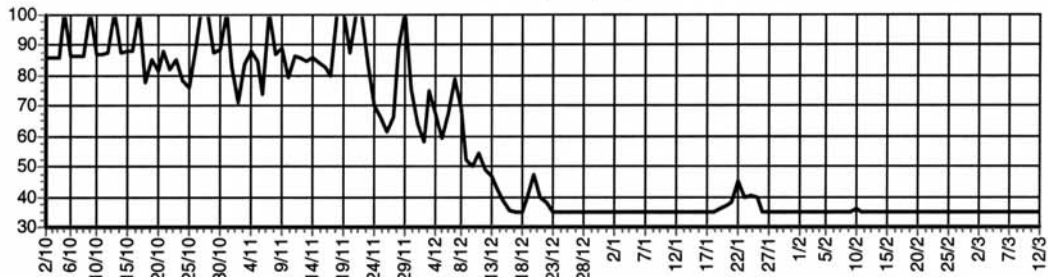
Ort : Sturup

Cementhalt: 295 kg/m³

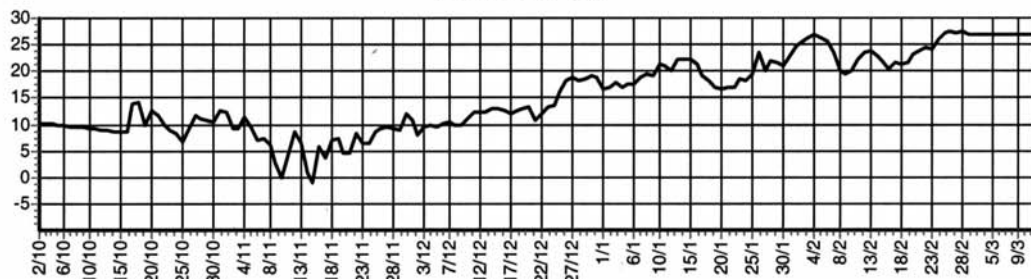


Torkklimat

Relativ fuktighet (%)

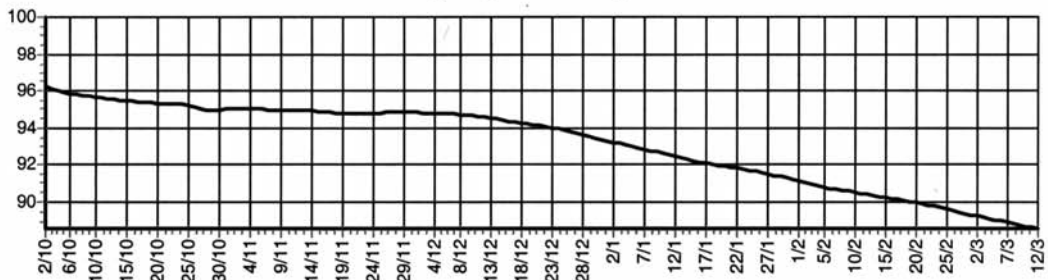


Temperatur (C)



Resultat från beräkning

Relativ fuktighet på 40% av tjockleken



Appendix 4.8

Resultat från uttorkningsberäkning med TorkaS, 2.0

Projekt: Järvallen

Namn: Rum 1:17

Företag:

2002-11-05

Byggnadsmaterial LTH

Förutsättningar

Platta på mark med underliggande mineralull

Gjutning : 1/10 2001

Betongtjocklek: 15 cm

Tätt hus : 16/12 2001

Vct: 0,50

Torkstart : 16/12 2001

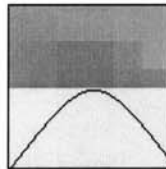
Silika: 0 %

Slutdatum : 13/3 2002

Vattenhalt: 180 l/m³

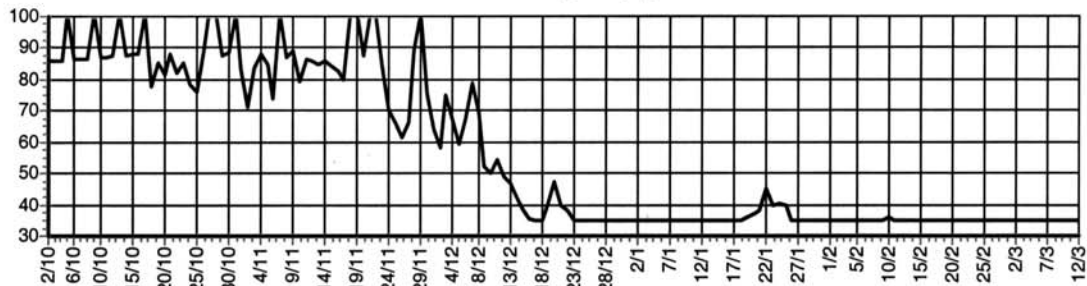
Ort : Sturup

Cementhalt: 360 kg/m³

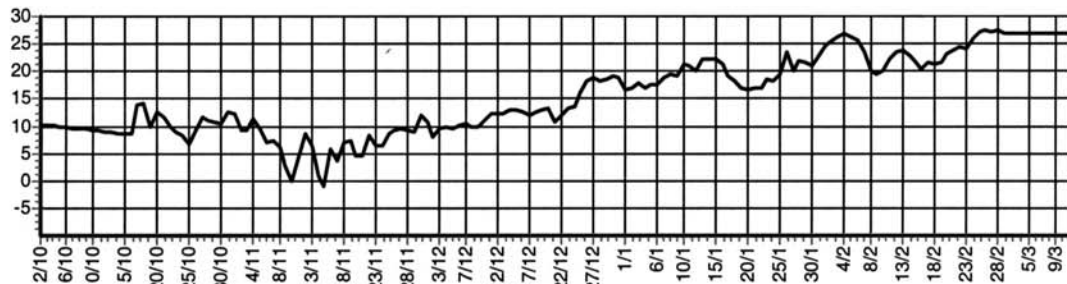


Torkklimat

Relativ fuktighet (%)

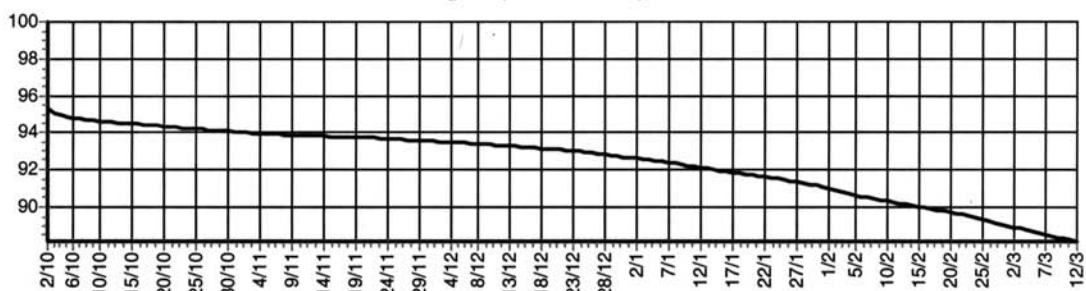


Temperatur (C)



Resultat från beräkning

Relativ fuktighet på 40% av tjockleken.



Appendix 4.8

Resultat från uttorkningsberäkning med TorkaS, 2.0

Projekt: Järavallen

Namn: Rum 1:17

Företag:

2002-11-05

Byggnadsmaterial LTH

Förutsättningar

Platta på mark med underliggande tätt skikt

Gjutning : 1/10 2001

Betongtjocklek: 15 cm

Tätt hus : 16/12 2001

Vct: 0,50

Torkstart : 16/12 2001

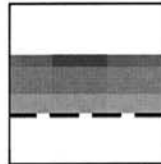
Silika: 0 %

Slutdatum : 13/3 2002

Vattenhalt: 180 l/m³

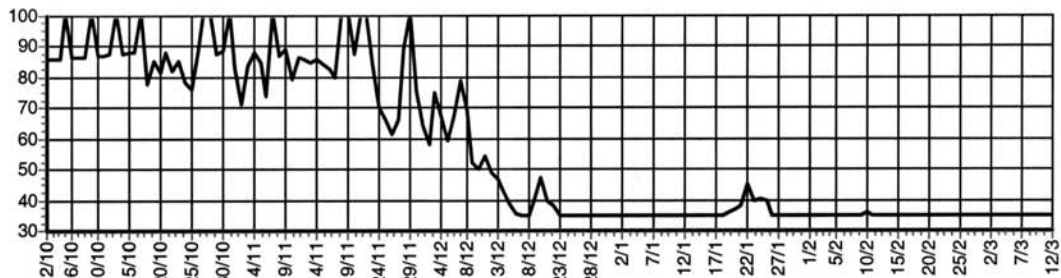
Ort : Sturup

Cementhalt: 360 kg/m³

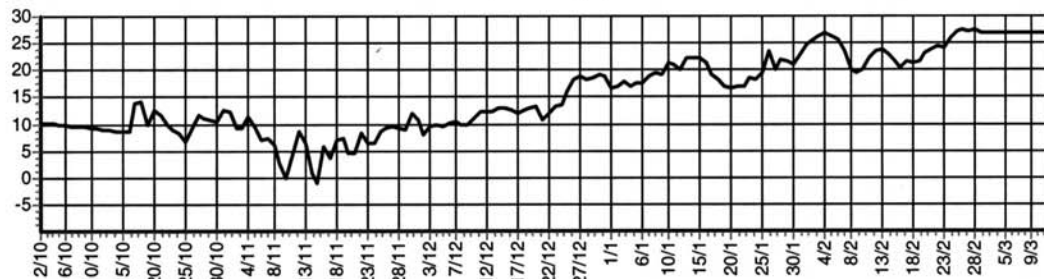


Torkklimat

Relativ fuktighet (%)

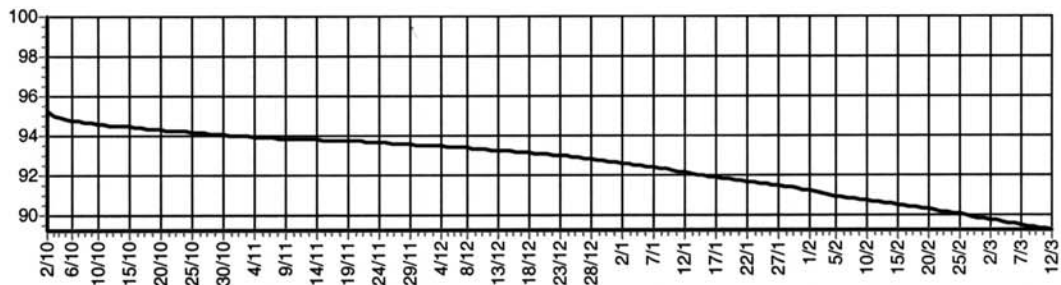


Temperatur (C)



Resultat från beräkning

Relativ fuktighet på 40% av tjockleken



Appendix 4.8

Resultat från uttorkningsberäkning med TorkaS, 2.0

Projekt: Järavallen

Namn: Rum 2:7

Företag:

2002-11-27

Byggnadsmaterial LTH

Förutsättningar

Mellanbjälklag med plattbärlag

Gjutning : 19/10 2001

Tätt hus : 14/1 2002

Torkstart : 14/1 2002

Slutdatum : 13/3 2002

Ort : Sturup

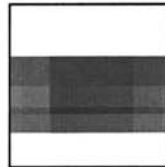
Betongtjocklek: 18 cm

Vct: 0,38

Silika: 5 %

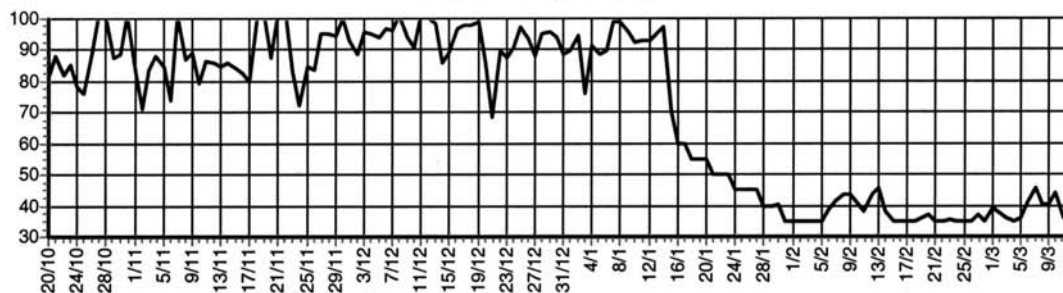
Vattenhalt: 160 l/m³

Cementhalt: 421 kg/m³

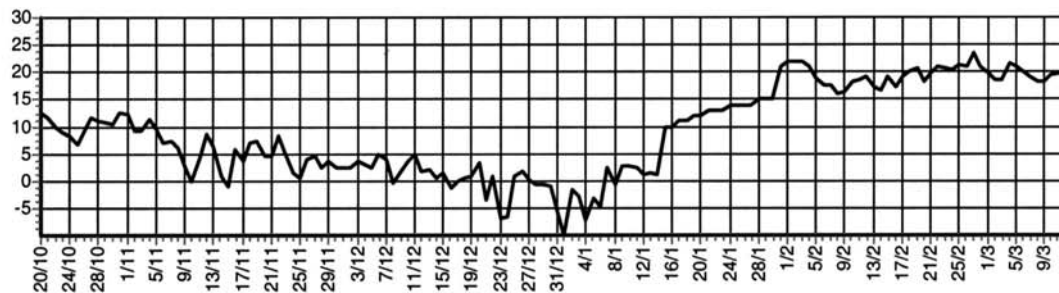


Torkklimat

Relativ fuktighet (%)

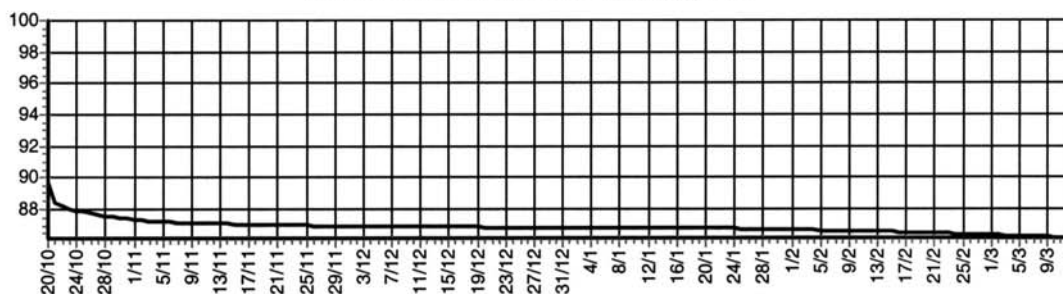


Temperatur (C)



Resultat från beräkning

Relativ fuktighet på 25% av tjockleken.



Appendix 4.8

Resultat från uttorkningsberäkning med TorkaS, 2.0

Projekt: Järavallen

Namn: Rum 2:9

Företag:

2002-11-27

Byggnadsmaterial LTH

Förutsättningar

Mellanbjälklag med plattbärlag

Gjutning : 19/10 2001

Tätt hus : 14/1 2002

Torkstart : 14/1 2002

Slutdatum : 13/3 2002

Ort : Sturup

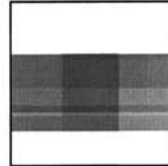
Betongtjocklek: 21 cm

Vct: 0,38

Silika: 5 %

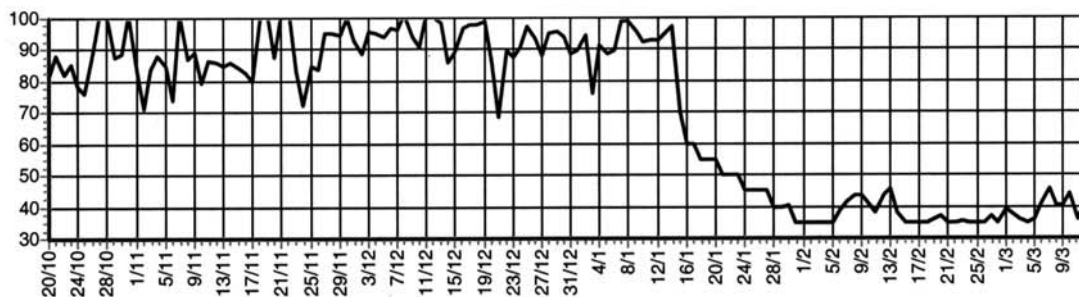
Vattenhalt: 160 l/m3

Cementhalt: 421 kg/m3

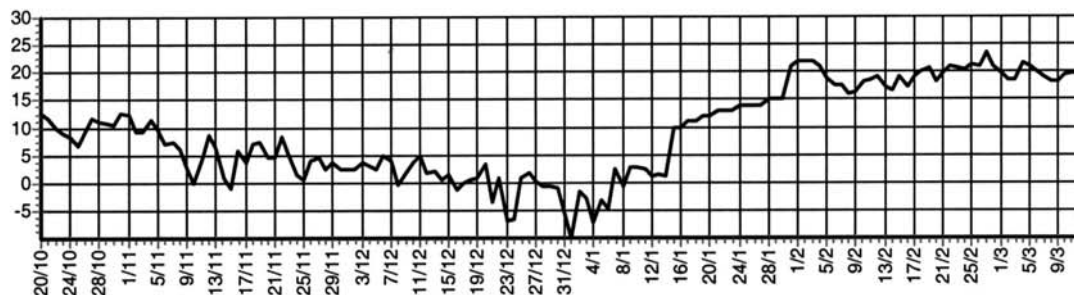


Torkklimat

Relativ fuktighet (%)



Temperatur (C)



Resultat från beräkning

Relativ fuktighet på 25% av tjockleken.

