

**Inverkan av urlakning och nötning på  
betongytans frostbeständighet**  
– En experimentell studie om synergieffekter

**Effects of leaching and abrasion on the  
scaling resistance of concrete**  
– An experimental study on synergy effects

Long-Wei Pham

Adnan Terzic

ISRN: LUTVDG/TVBM--13/5093--SE(1-119)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola  
Byggnadsmaterial  
Box 118  
221 00 LUND

Tel: 046-222 74 15  
Fax: 046-222 44 27  
[www.byggnadsmaterial.lth.se](http://www.byggnadsmaterial.lth.se)

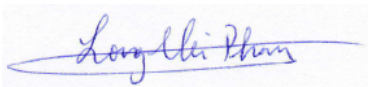
## Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och utgör den avslutande delen av utbildningen på civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet är utfört under vårterminen 2013 vid Vattenfall Research & Development AB i Älvkarleby samt vid Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, Avdelning för Byggnadsmaterial på Lunds Tekniska högskola. Examensarbetet har finansierats av Vattenfall AB.

Handledare för examensarbetet har varit Martin Rosenqvist, industridoktorand vid Vattenfall R & D, och Katja Fridh, lektor vid Avdelning för Byggnadsmaterial på LTH. Först och främst vill vi rikta ett stort tack till Martin, som med ett stort engagemang varit den drivande kraften bakom examensarbetet, men även till Katja för all värdefull hjälp. Utan deras stöd och vägledning hade detta examensarbete inte kunnat genomföras. Vi vill även tacka examinatorn Lars Wadsö och alla vid Avdelning för Byggnadsmaterial.

Slutligen vill vi tacka alla på Vattenfall R & D; Anne Jakobsson, Niklas Hansson, Ulf Jansson, Erik Liljeby, Mikael Malm, Sune Andersson och Tomas Persson för all hjälp och visat intresse under examensarbetets gång.

Lund, juni 2013



Long-Wei Pham



Adnan Terzic



## Sammanfattning

- Titel:** Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet
- En experimentell studie om synergieffekter
- Författare:** Long Wei Pham och Adnan Terzic
- Handledare:** Martin Rosenqvist, Vattenfall Research and Development AB, Älvkarleby.
- Katja Fridh, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, Lunds Tekniska Högskola, Lund.
- Examinator:** Lars Wadsö, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, Lunds Tekniska Högskola, Lund.
- Problembeskrivning:** Vid inspektioner av betong i vattenkraftverksdammar har det upptäckts skador på betongen längs vattenlinjen i form av avskalningar av ytan. Vid närmare undersökning konstaterades att skadorna endast var av ytlig karaktär. Skadorna bedömdes bero på frostsprängning, urlakning och nötning. Om skademekanismerna verkar ensamma eller i kombination, med eventuella synergieffekter som följd kunde emellertid inte fastställas.
- Resultat från tidigare utförda laboratoriestudier visar att frostsprängning som ensam verkande skademekanism leder till skador på betongytan liknande de observerade avskalningarna på dammkonstruktioner. Avskalningarna är dock inte av lika stor omfattning, vilket kan ses som en indikation på att även urlakning och nötning har en betydande inverkan på betongytans frostbeständighet.
- Syfte:** Syftet med detta examensarbete är att utreda den inverkan som olika kombinationer av skademekanismer har på betongytans frostbeständighet.
- Specifikt inriktar sig studien på att undersöka ifall hypotesen att synergieffekter uppstår då frostsprängning kombineras med urlakning och nötning.

**Metod:** Examensarbetet inleddes med en litteraturstudie varefter en provningsmetod för respektive skademekanism togs fram. Utifrån provningsmetoderna har det i laboratoriemiljö utformats en experimentell studie där provkroppar av betong utsatts för veckovisa påfrestningar av olika kombinationer av skademekanismerna.

Efter varje avslutad frostprovningsvecka har avskalningar samlats upp från provkropparnas yta och vägts. Genom att jämföra mängden avskalningar som respektive kombination av skademekanismerna har genererat kunde det fastställas om skademekanismerna samverkat till den grad att synergieffekter har uppstått.

**Slutsatser:**

- Vid frysning av betong enligt Boråsmetoden har skadegraden ökat då provkroppar även utsatts för urlakning och/eller nötning jämfört med provkroppar som bara har utsatts för frysning.

- Synergieffekter mellan skademekanismerna frysning, urlakning och nötning har påvisats i form av en ökning av mängden avskalningar för prover som utsatts för de tre typerna av nedbrytning jämfört med summan av avskalningar från provkroppar som enbart utsatts för en typ av nedbrytning vilket betyder att de tre skademekanismerna har samverkat.

- Provkroppar med vct 0,62, vilka representerade betong som användes till vattenkraftverk mellan åren 1930-1950, fick större avskalningar än provkroppar med vct 0,54 och luftporbildande medel, vilka representerade betong som användes till vattenkraftverk mellan åren 1950-1970.

- Skador på provkropparnas yta påminner till utseendet om de skador som observerats på betong längs vattenlinjen i verkliga dammkonstruktioner vilket ökar sannolikheten för att de har uppstått på samma sätt.

- Urlakning av kalciumjoner har ägt rum samtidigt som endast ringa nedbrytning av C-S-H gelen har kunnat påvisas. Resultaten gäller både för urlakning med pH 7 och accelererad urlakning med pH 4 vilket visar på att den framtagna urlakningsmetoden kan sägas stämma överens med angreppets tidiga stadium.

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

**Nyckelord:** Vattenfall AB, vattenkraftverk, kraftverksdammar, betong, avskalning, frostsprängning, Boråsmetoden, urlakning, salpetersyra, pH, kalciumhydroxid, nötning, experiment, synergieffekt.





## Abstract

- Title:** Effects of leaching and abrasion on the scaling resistance of concrete
- An experimental study on synergy effects
- Authors:** Long Wei Pham and Adnan Terzic
- Supervisors:** Martin Rosenqvist, Vattenfall Research and Development AB, Älvkarleby.
- Katja Fridh, Division of Building Materials, Department of Building and Environmental Technology, Faculty of Engineering, Lund.
- Examiner:** Lars Wadsö, Division of Building Materials, Department of Building and Environmental Technology, Faculty of Engineering, Lund.
- Issues:** Superficial damage at the waterline of concrete structures has been discovered during inspections of hydroelectric power plants. Investigations showed that scaling was the result of three major deterioration processes; frost action, leaching and abrasion. It was, however, not possible to determine the dominant deterioration process, nor was it possible to determine the extent of the contribution from each deterioration process.
- The connection between frost action and scaling of concrete surfaces at the waterline has been investigated in previous studies. The results have shown that it is possible to re-create scaling, similar to damage observed on concrete in hydroelectric power structures, on small concrete specimens. However, the amount of damage was much smaller which indicates that leaching and abrasion contribute to the damage process.
- Purpose:** The purpose of this study was to investigate what effects of different combinations of the three deterioration processes have on scaling resistance of concrete.

Specifically, the study focused on investigating the hypothesis that synergy effects occur when frost action is combined with leaching and abrasion.

**Method:**

The project began with a literature review. The theories of each deterioration process was studied and then used for developing a laboratory experiment where concrete specimens were subjected to different combinations of the three deterioration processes. Loose materials were collected from the surfaces by the end of each week and then weighed. The amount of loose materials caused by each combination was then compared at the end of the experiment. By doing so it was possible to determine whether or not synergy effects had occurred between the three deterioration processes.

**Conclusions:**

– The amount of damage increased when concrete specimens, subjected to frost action, also were subjected to leaching and/or abrasion in comparison with specimens only subjected to frost action.

– Synergy effects between the three deterioration processes frost action, leaching and abrasion have been discovered in form of an increase in loose materials. This fact shows that the three deterioration processes have interacted with each other.

– Concrete specimens with w/c-ratio 0,62, which represent concrete used for hydroelectric power plants between the years 1930-1950, showed greater damage than specimens with w/c-ratio 0,54 and air entrainment admixture, which represent concrete used for hydroelectric power plants between the years 1950-1970.

– Damage to the concrete specimens was similar in appearance to damaged concrete at the waterline of hydroelectric power structures. This fact increases the probability that the damage has occurred in the same way.

– Leaching of calcium ions from the concrete surface was measured whereas only minor degradation of the C-S-H gel could be detected. Similar results were obtained both for concrete specimens subjected to de-ionized water with pH 7 and pH 4. The results indicate that the developed leaching

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---

method accords with the early stages of leaching from a concrete surface.

**Keywords:**

Vattenfall AB, hydroelectric power plant, hydroelectric power dams, concrete, frost damage, scaling, leaching, nitric acid, pH, calcium hydroxide, abrasion, experiment, synergy.



## Innehållsförteckning

Förord.....	3
Sammanfattning.....	5
Abstract.....	9
1 Inledning .....	17
1.1 Bakgrund.....	17
1.2 Bakgrund – projektspecifikt.....	18
1.3 Syfte .....	18
1.4 Mål .....	18
1.5 Metod .....	19
1.6 Avgränsningar .....	19
2 Problembeskrivning .....	21
3 Teori .....	25
3.1 Allmänt om betong.....	25
3.1.1 Cements uppbyggnad.....	25
3.1.2 Bindemedelskemi .....	26
3.1.3 Kalciumhydroxidens betydelse.....	27
3.1.4 Vattencementtalets betydelse .....	27
3.1.5 Porositet .....	28
3.1.6 Lufthaltens betydelse .....	29
3.1.7 Vattenmättnadsgrad .....	30
3.2 Skademekanismer.....	33
3.2.1 Frostsprängning.....	33
3.2.1.1 Inre frostsprängning.....	34
3.2.1.2 Yttre frostsprängning .....	34
3.2.1.3 Hydrauliskt tryck .....	35
3.2.1.4 Istryck i en sluten behållare .....	36
3.2.1.5 Islinsbildning.....	37
3.2.1.6 Osmotiskt tryck .....	40
3.2.2 Karbonatisering .....	41
3.2.3 Urlakning .....	42
3.2.3.1 Löslighet av kalciumhydroxid i vatten .....	43
3.2.3.2 Urlakning av kalciumhydroxid i betong.....	44
3.2.3.3 Inverkan av sura vatten och pH.....	46
3.2.3.4 Urlakningens inverkan på betong .....	47
3.2.3.5 Olika angreppsformer vid kalkurlakning .....	48
3.2.4 Nötning.....	51
3.3 Synergi .....	53
4 Försök.....	55
4.1 Val av frostprovningmetod .....	55
4.2 Val av urlakningsmetod .....	58

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---

4.2.1	Urlakningskontroll .....	61
4.3	Val av nötningsmetod .....	62
4.4	Kombination av provningsmetoder .....	64
4.5	Provningsmatris .....	66
4.6	Material .....	69
4.6.1	Betong .....	69
4.6.2	Provkroppar .....	70
4.7	Utrustning .....	71
4.7.1	Titratortrustning .....	71
4.7.2	Klimatskåp .....	71
4.8	Huvudstudie .....	72
4.8.1	Metod – veckovis provning .....	72
4.8.2	Metod – urlakningskontroll .....	73
4.8.3	Metod – yttre skador .....	74
4.8.4	Metod – tunnslipsanalys .....	74
5	Resultat .....	75
5.1	Veckovis provning .....	75
5.1.1	Inverkan av skademekanismer .....	75
5.1.2	Inverkan av betongkvalitet .....	79
5.1.3	Inverkan av urlakningsmetod .....	80
5.1.4	Inverkan av synergieffekter .....	83
5.1.5	Jämförelse mellan sågad yta och formyta .....	85
5.1.6	Yttre skador .....	86
5.2	Vätskeanalys - urlakningskontroll .....	88
5.3	Tunnslipsanalys .....	92
6	Diskussion .....	95
6.1	Allmänt .....	95
6.2	Veckovis provning .....	95
6.2.1	Inverkan av betongkvalitet .....	95
6.2.2	Frostbeständighet .....	95
6.2.3	Urlakningens inverkan på frostbeständighet .....	96
6.2.4	Nötningens inverkan på nedbrytningsprocessen .....	96
6.2.5	Synergieffekter .....	97
6.2.6	Jämförelse mellan sågad yta och formyta .....	98
6.2.7	Inverkan av salt .....	98
6.2.8	Yttre skador .....	99
6.3	Vätskeanalys - urlakningskontroll .....	99
6.4	Tunnslipsanalys .....	100
7	Slutsatser .....	103
8	Förslag på fortsatta studier .....	105
9	Referenser .....	107
	Bilaga A – Betongrecept för vct 0,62 .....	113

Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Bilaga B – Betongrecept för vct 0,54.....	114
Bilaga C – Provningschema.....	115
Bilaga D – Vätskeanalys.....	116
Bilaga E – Enhetsomvandling .....	119
Bilaga F – Tunnslipsanalys.....	120





## 1 Inledning

### 1.1 Bakgrund

I Sverige har vattenkraften använts för elproduktion i över hundra år. Den första vattenkraftstationen uppfördes i slutet på 1800-talet, vilket utgjorde början på den svenska vattenkraftutbyggnaden som sedan pågick fram till en bit in på 1970-talet. I början av förra århundradet var betong som byggnadsmaterial relativt nytt och kunskapen om dess egenskaper var inte lika stor som idag. I de allra första dammarna och kraftstationerna användes låga cementhalter vilket resulterade i otät betong. Dessa konstruktioner drabbades av både frostsador och urlakning (Fridh 2005).

Merparten av de stora vattenkraftverken byggdes på 1940-, 1950- och 1960-talen då vattenkraftutbyggnaden var som intensivast. Fram till denna period hade flertalet stora framsteg inom betongtekniken uppnåtts. Som exempel kan nämnas vattencementtalets koppling till tät betong samt luftporers betydelse för god frostbeständighet. Vattenbyggnadskonstruktioner anlades med betong av högre kvalitet och det fanns en föreställning om att de största problemen var lösta (Rosenqvist 2013).

Emellertid har det vid inspektioner observerats skador på dammkonstruktioner. Dessa har bland annat upptäckts på betong i och närmast vattenlinjen i form av avskalning av betongens yta vilket resulterat i en minskning av det skyddande täcksiktet. På några enstaka ställen var avskalningen så långt framskriden att synlig armering kunde observeras. Vid noggrannare tillståndsbedömningar fastslogs emellertid att skadorna endast var av ytlig karaktär och att konstruktionernas bärförmåga inte hade påverkats. På lång sikt skulle avskalningarna dock leda till mer omfattande skador med höga reparationskostnader som följd. Orsaken till de ytliga avskalningarna bedömdes bero på tre skademekanismer, nämligen frostsprängning, urlakning och nötning. Om mekanismerna verkat ensamma eller i kombination, med eventuella synergieffekter som följd, kunde inte fastställas. Däremot var det säkert att skademekanismerna på vissa få ställen helt orsakat det täckande skiktets bortfall innan den tekniska livslängden hade uppnåtts (Hassanzadeh 2010).

Genom att studera den inverkan som olika kombinationer av skademekanismerna har på betongytor kan samverkan mellan dessa kartläggas och eventuella synergieffekter upptäckas. Med en ökad förståelse kan bättre och effektivare lösningar mot problemen med avskalningar utvecklas.

## 1.2 Bakgrund – projektspecifikt

Som bakgrund till denna studie ligger ett examensarbete med titeln *Frostsprängning i betongdammar - Inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen hos betong i vattenkraftverk*. I arbetet användes vattenkraftverket Porsi som referensobjekt. Hypotesen i arbetet var att frostsprängning gav upphov till de observerade avskalningarna.

I laboratoriemiljö genomfördes lyckade försök med att återskapa skador på ytan av betong liknande de som observerats längs vattennivån i vattenkraftverket Porsi. Experimenten utformades så att inverkan av andra skademekanismer uteblev varvid slutsatsen blev att frostsprängning var huvudorsaken till skadorna (Rosenqvist & Persson 2009).

Som en fortsättning på arbetet har Rosenqvist vidare undersökt sambandet mellan frostsprängning och avskalningar vid vattenytan. Arbetet omfattar nu också betong med olika vct. Avskalningarna som erhållits i laboratoriemiljö är inte av lika stor omfattning som de första studierna indikerade (Rosenqvist et al. 2013). Inverkan från andra skademekanismer kan därmed vara större än vad som tidigare antagits. Detta påstående ska undersökas i detta examensarbete genom experimentella studier av nedbrytning genom frostsprängning, urlakning samt nötning på en och samma provkropp. Dessa jämförs sedan med prover som utsatts för endast en eller två av dessa nedbrytningsmekanismer.

## 1.3 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka och kartlägga den inverkan på ytan hos provkroppar av betong som olika kombinationer av skademekanismerna frostsprängning, urlakning och nötning har. Detta utförs för att ge en ökad förståelse för hur verkliga skador uppkommer på ytan hos betong längs vattenlinjen i vattendammkonstruktioner.

Specifikt inriktar sig studien på att undersöka ifall hypotesen att synergieffekter uppstår då frostsador kombineras med urlakning och nötning.

## 1.4 Mål

För att uppnå syftet med examensarbetet har ett antal delmål identifierats som alla i tur och ordning måste uppfyllas för att hypotesen skall kunna bekräftas eller förkastas. Dessa är:

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

- Delmål 1: Att i laboratoriemiljö skapa en nedskalad representativ provningsmetod för varje skademekanism, samt anpassa dem så att de kan användas på en och samma provkropp.
- Delmål 2: Att genom en experimentell studie utsätta provkroppar för olika kombinationer av de tre skademekanismerna i syfte att kartlägga deras inverkan på mängden avskalningar.
- Delmål 3: Att genom att jämföra mängden uppmätta avskalningar från olika kombinationer undersöka om skademekanismerna samverkar med varandra till den grad att synergieffekter uppstår.

### **1.5 Metod**

Examensarbetet inleddes med en litteraturstudie där teori om de olika skademekanismerna inhämtades. Vid valet av provningsmetoder för de olika skademekanismerna har inledningsvis olika provningsstandarder undersökts. För de fall då dessa inte kunnat användas eller då det inte gått att hitta någon provningsstandard har egna provningsmetoder utformats. Vid utformandet av egen provningsmetod har försöksupställningar från andra studier använts som underlag och som inspirationskälla.

Experimentet i detta examensarbete har utförts i laboratoriemiljö där provkroppar av betong utsatts för veckovisa påfrestningar av de olika skademekanismerna. Under experimentet har urlakning varvats med frostprovning och nötning. Olika provkroppar har utsatts för olika kombinationer av skademekanismerna, vilket innebär att vissa provkroppar endast har utsatts för frostprovning medan andra har utsatts för frostprovning i kombination med urlakning och/eller nötning.

Efter varje avslutad frostprovningsvecka har avskalningar samlats upp från provkropparnas yta och vägts. Genom att jämföra mängden avskalningar som respektive kombination av skademekanismerna har genererat kunde det fastställas om skademekanismerna samverkar till den grad att synergieffekter uppstår.

Avslutningsvis har ett antal analyser gjorts i syfte att undersöka den inverkan som den framtagna urlakningsmetoden har haft på provkropparna.

### **1.6 Avgränsningar**

Att ta fram en modell i laboratoriemiljö, vilken efterliknar den samverkan av olika skademekanismer som en betongyta naturligt utsätts för skulle bli en oerhörd

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

komplicerad och tidskrävande uppgift. Av denna anledning har det gjorts ett antal förenklingar och avgränsningar.

Av praktiska skäl har de tre olika skademekanismerna som behandlas i studien delats upp i isolerade händelser. Provkropparna har utsatts för återkommande perioder av dessa skademekanismer. I verkligheten kan dock flera skademekanismer verka samtidigt.

För frostförsöken har standardmetoden SS 13 72 44 använts, vilken i dagligt tal kallas för Boråsmetoden. Frostprovningssmetoden arbetar med väldigt korta frys- och upptiningsperioder vilket inte motsvarar verkliga förlopp. Metoden är dock väl kalibrerad mot svenska förhållanden.

För att på kort tid efterlikna naturlig urlakning, vilket är en väldigt långsam nedbrytningsprocess, har syror använts för att accelerera urlakningsförloppet. Valet av urlakningsmetod kan ses som en starkt forcerad variant av verkligheten.

För nötning av betongytan hos provkroppar har en metod använts för att efterlikna den friktion som uppstår mellan isflak och betongytan. I verkliga konstruktioner utsätts betong för flera typer av nötning förutom den nämnda friktionen. Denna förenkling har gjorts då övriga typer av nötning visade sig vara svårare att återskapa i laboratoriemiljö.

## 2 Problembeskrivning

Vid inspektioner har det hos många dammkonstruktioner observerats skador på betong längs vattenlinjen i form av en minskning av det skyddande täcksiktet. Under fördjupade tillståndsbedömningar fastslogs att avskalningarna var begränsade till ett område närmast vattenytan och att de endast var av ytlig karaktär. De skademekanismer som bedömdes ligga bakom avskalningarna var frostsprängning, urlakning och nötning (Hassanzadeh 2010).

I figur 2.1 visas betongytan på uppströmssidan hos en vattendammkonstruktion som drabbats av nämnda skador. Av figuren framgår det tydligt att skador endast drabbat betong i nivå med vattenytan och att täcksiktet en bit under fortfarande är intakt.



*Figur 2.1 - Skador på betong i nivå med vattenytan (Rosenqvist 2013).*

Skador på betong längs vattenlinjen har observerats både på uppströms- och på nedströmssidan av dammkonstruktioner. Vid jämförelse ter sig skadorna vara av lika stor omfattning på bägge sidor om dammkonstruktionerna. Exempel på de båda fallen visas i figur 2.2 – 2.5.

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---



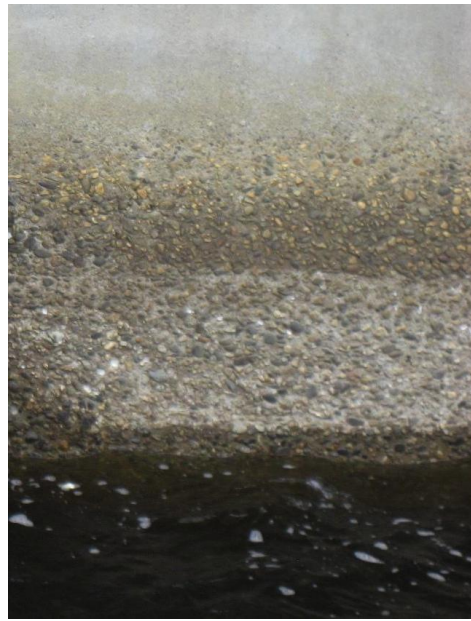
*Figur 2.2 - Avskalning av täckskikt på uppströmssidan (Rosenqvist 2013).*



*Figur 2.3 - Närbild på avskalningar längs vattenlinjen på uppströmssidan (Rosenqvist 2013).*



*Figur 2.4 - Avskalning av täckskikt på nedströmssidan (Rosenqvist 2013).*



*Figur 2.5 - Närbild på avskalningar längs vattenlinjen på nedströmssidan (Rosenqvist 2013).*

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Tidigare utförda studier har visat att frostsprängning som enskild skademekanism inte varit tillräcklig för att generera lika omfattande skador på provkroppar av betong som de skador som observerats i verkliga dammkonstruktioner. Av denna anledning måste inverkan från urlakning och nötning vara större än vad som tidigare antagits (Rosenqvist et al. 2013).

Att fler skademekanismer bedömdes ligga bakom skadorna har sin förklaring i att betong längs vattenytan utsätts för olika skademekanismer under olika årstider. Vinterhalvåret karakteriseras av låga temperaturer vilket leder till frysning av betong samt bildning av is på betongytan längs vattenlinjen, exempel på detta visas i figur 2.1. Vid övergångsperioden mellan vinter och vår samt höst och vinter kan stora temperaturvariationer ske med plusgrader på dagen och minusgrader på natten. Varierande temperatur under dessa övergångsperioder utsätter betongen för upprepande frys- och upptiningscykler vilket leder till frostsador på betongen (Rosenqvist 2013).

Vidare leder övergången från vinter till vår till att istäcken som bildats på vattnet under vintern börjar smälta, från dessa kommer isflak att lossna och följa med vattenflödet. Vid sammanstötning med betong på uppströmssidan leder detta till nötning av betongytan längs vattenlinjen. Liknande isflak som lossnar på nedströmssidan rör sig emellertid bort från betongytan varför nötning från is generellt borde vara mindre på betong på nedströmssidan. Dock så är vattnet mer turbulent på nedströmssidan vilket kan väga upp skillnaden i nötning då strömmande vatten också har en eroderande effekt. Urlakning av betongytan sker så länge betongen är i kontakt med vatten. Denna form av nedbrytning kan möjligtvis vara lägre under vintern då det bildats is på ytan längs vattenlinjen (Rosenqvist 2013).

I detta examensarbete skall det genom experiment i laboratoriemiljö undersökas vilken inverkan de tre skademekanismerna frostsprängning, urlakning och nötning har på ytan på provkroppar av betong samt om någon synergieffekt mellan dessa tre uppkommer.





## 3 Teori

### 3.1 Allmänt om betong

Att använda betong som byggnadsmaterial är en teknik som har sitt ursprung flera hundra år före vår tideräkning. Både etruskerna och de gamla grekerna byggde med material liknande dagens moderna betong. Grekerna i synnerhet insåg fördelarna med materialet och använde det till att uppföra allt från bostadshus och amfiteatrar till akvedukter, rörledningar och dammar (Fagerlund 1999a).

Betong är ett kompositmaterial bestående av cement, vatten och ballastmaterial (sten, grus och sand). Dessutom tillsätts olika tillsatsmedel och tillsatsmaterial för att förbättra betongens egenskaper. Som exempel kan nämnas luftporbildande tillsatsmedel och silikastoft. Tillsammans skapar beståndsdelarna ett mycket beständigt material vilket kännetecknas av god formbarhet, hög hållfasthet och lång livslängd (Burström 2008).

Vid rätt utförande uppvisar materialet god täthet mot stora ensidiga vattentryck och stor motståndsförmåga mot strömmande vatten. Tillsammans med hög beständighet och god formbarhet är materialet speciellt lämpligt för konstruktioner som utsätts för stora påfrestningar såsom vattenkraftverksdammar och brokonstruktioner.

#### 3.1.1 Cements uppbyggnad

Cement består av en blandning av kalk och kiselsyra och är ett hydrauliskt bindemedel vilket karakteriseras av att det reagerar spontant med vatten till en produkt som är beständig mot vatten. Vid kontakt med vatten sker en kemisk reaktion där cementgel bildas. Denna ökar i volym under reaktionsförloppet och förbinder ballastkornen till ett sammanhängande material (Burström 2008).

Det cement som används i Sverige vid byggnation av konstruktioner med höga krav på beständighet är ett Portlandcement. Det tillverkas genom att bränna finmald kalksten och kiselhaltig lera varvid kulformade klumpar (portlandklinker) erhålls. Dessa mals sedan ner till ett fint pulver och blandas med en begränsad mängd gips och kalk för att få slutprodukten (Fagerlund 1999a).

Huvudbeståndsdelarna i Portlandcement är oxider av kalcium (CaO), kisel (SiO<sub>2</sub>), aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) och järn (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Olika föreningar av dessa beståndsdelar bildas under bränning och benämns som klinkermineral (Fagerlund 1999a).

I Portlandcement finns fyra viktiga klinkerkomponenter:

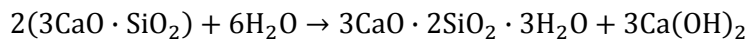
– $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	= $\text{C}_3\text{S}$	Trialkciumsilikat
– $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	= $\text{C}_2\text{S}$	Dikalciamsilikat
– $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	= $\text{C}_3\text{A}$	Trialkciumsilikat
– $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	= $\text{C}_4\text{AF}$	Tetralkciumaluminatferrit

### 3.1.2 Bindemedelskemi

Vid gjutning av betong blandas cement med vatten och ballast. På cementkornens yta startar ett antal kemiska reaktioner mellan klinkerkomponenter och vattenmolekyler. Reaktionerna benämns med ett gemensamt namn för hydratation (Burström 2008).

Av de fyra klinkerkomponenterna läggs fokus på  $\text{C}_3\text{S}$  och  $\text{C}_2\text{S}$  eftersom det är dessa komponenter som har störst betydelse för betongens mognadsutveckling. Under hydratationen binder klinkerkomponenterna till sig vattenmolekyler och bildar en väldigt finporös cementgel. Denna utgörs av kalciumsilikathydrater med den kemiska formeln  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (förkortas oftast C-S-H). Som en biprodukt bildas även kalciumhydroxid (även kallad Portlandit) med den kemiska formeln  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se reaktioner nedan (Fagerlund 1999b).

$\text{C}_3\text{S}$ -reaktionen:



$\text{C}_2\text{S}$ -reaktionen:



Som reaktionsformlerna visar bildar bägge komponenterna samma reaktionsprodukter. Dock är reaktionshastigheten mycket högre för  $\text{C}_3\text{S}$ , som dessutom bildar en större mängd kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). I tabell 3.1 presenteras andelen utvecklad kalciumhydroxid per klinkerkomponent. Kalciumhydroxid är den mest lösliga av reaktionsprodukterna och är den förening av de kalkhaltiga komponenterna som först urlakas från betong (Fagerlund 1999b). Urlakning presenteras närmare i avsnitt 3.2.3.

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Tabell 3.1 - Andelen utvecklad kalciumhydroxid, Fagerlund (1999)

Komponent	Utvecklad Ca(OH) <sub>2</sub> [kg/kg]
C <sub>3</sub> S	0,49
C <sub>2</sub> S	0,21
C <sub>3</sub> A	0
C <sub>4</sub> AF	- 0,31

I snitt bildas 0,28 kg kalciumhydroxid per kg fullständig hydratiserat cement vilket inlagras över hela betongvolymen (VAST 1991).

### 3.1.3 Kalciumhydroxidens betydelse

I takt med att hydratiseringen fortskrider når vattenmolekyler allt djupare i cementkornen, fler klinkerkomponenter reagerar och mer cementgel bildas. Vid slutskedet har gelen helt omslutit ballastkornen och bildat en tät och hållfast sammanhängande struktur. Den bildade kalciumhydroxiden visar emellertid inte alls upp samma goda tätande och lastbärande förmåga som C-S-H gelen. Istället för att skapa en sammanhängande struktur bildas den som enskilda kristaller spridda över hela betongvolymen vilket lokalt kan minska gelens hållfasthet (Fagerlund 1999a).

Kalciumhydroxid må inte spela en viktig roll för hållfastheten men uppfyller däremot en viktig funktion i betong då föreningen verkar som ett skydd mot korrosion. Kalciumhydroxid är en bas vilket ger betong ett pH-värde på minst 12,6 då det löses i porvatten. Den starka alkaliska miljön passiverar ingjuten armering vilket hindrar korrosionsprocessen från att starta (Fagerlund 2011a).

Processen som minskar betongens pH värde och möjliggör korrosion presenteras närmare under rubriken karbonatisering, avsnitt 3.2.2.

### 3.1.4 Vattencementtalets betydelse

Förhållandet mellan vikten vatten och vikten cement är den enskilt viktigaste parametern för karakterisering av betongens kvalitet. Förhållandet kallas för vattencementtalet, vct och definieras som:

$$vct = \frac{W}{C}$$

vct = vattencementtal [kg/kg]

W = mängden blandningsvatten [kg] eller [kg/m<sup>3</sup>]

C = mängden cement [kg] eller [kg/m<sup>3</sup>]

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Vct har en direkt inverkan på i stort sett alla egenskaper hos den färdiga betongen. Detta beror på att mängden cement i förhållande till vatten har en helt avgörande roll för den färdiga cementgelens struktur och egenskaper.

Ett lägre vct innebär en ökad koncentration av cementpartiklar i blandningsvattnet vilket leder till en tätare och därmed en mer hållfast betong. På motsvarande sätt gäller att cementpastan späds ut med mer blandningsvatten vid en ökning av vct. Detta leder till en mer porös och mindre hållfast betong (Burström 2008).

Ökad täthet leder dessutom till långsammare vattenupptagning. För frostbeständigheten är detta av oerhört stor vikt. Den ökade tätheten minskar också mängden frysbart vatten vilket direkt leder till ökad frostbeständighet (Fagerlund 1987).

Det finns emellertid en gräns för hur lågt vct som kan användas innan mängden blandningsvatten inte räcker till för fullständig hydratation, denna gräns går vid vct  $\approx$  0,39. Förklaringen ligger i den volymminskning på 25% som vattnet genomgår vid övergången från fritt blandningsvatten till kemiskt bundet vatten. Utrymmet som frigörs fylls successivt ut av den bildade C-S-H gelen. Vid vct = 0,39 frigörs precis tillräckligt med utrymme för att fullständig hydratisering skall kunna uppnås.

För vct > 0,39 blir det blandningsvatten över efter cementreaktionen. Volymen på överskottsvattnet leder till bildningen av kapillärporer. För vct < 0,39 gäller däremot att den bildade gelen fyller ut allt fritt utrymme innan all cement har hydratiserats färdigt varför det blir kärnor av ohydratiserade cementkorn över (Fagerlund 1999c).

### **3.1.5 Porositet**

Betongens totala porositet utgörs av flera typer av porer. Dessa ligger fördelade över hela betongvolymen och bildar tillsammans ett mycket oregelbundet system av öppna och slutna porer. Porsystemet kan brytas ned i gelporer, kapillärporer och luftporer (Burström 2008).

Gelporer utgör materialets allra minsta porer och är av storleksordningen 1-7 nm. Porernas storlek motsvarar några få vattenmolekyler i diameter vilket möjliggör för porerna att binda fukt direkt från luften, så kallad hygroskopisk fukt. I gelporerna är vattenfixeringen så stark att dessa inte bidrar till fukttransporten (Nilsson 1994).

Kapillärporer bildar ett system av långa och sammanhängande porer. Dessa har en storlek som varierar mellan 0,1-100  $\mu\text{m}$  och är därmed mycket större än gelporerna. I kapillärporer sker huvuddelen av materialets fukttransport (Burström 2008).

Fukttransporten kan liknas vid den uppsugning av vatten som sker i små raka cylindriska rör (kapillärrör) vid direktkontakt med en fri vattenyta. Vid

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---

kontaktpunkten mellan den krökta vattenytan och röret bildas två motverkande krafter. En adhesionskraft som strävar efter att dra upp vattnet längs rörväggen och en kohesionskraft som vill hålla ihop vätskan (Fagerlund 1998a). För betong och många andra finporösa byggnadsmaterial är adhesionskraften mångdubbelt större än kohesionskraften (s.k. hydrofila material). Den negativa kraftresultanten leder till undertryck vilket driver den kapillära sugningen. Porvattenundertrycket kan beskrivas med Laplaces ekvation (Burström 2008).

$$s = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r}$$

s = kapillärt undertryck, porvattenundertryck eller sugning [Pa]

$\sigma$  = ytspänningen mellan vätska och rörvägg [N/m]

$\theta$  = randvinkeln mellan vätska och rörvägg [°]

r = rörets radie [m]

Ekvationen beskriver att undertrycket ökar med minskad radie på porerna. Vidare gäller att ju finare betongens porer är desto större är den kapillära stighöjden (Burström 2008).

Förutom gel- och kapillärporer återfinns även luftporer i betong. Dessa bildas under gjutningen på grund av ofullständig komprimering av betongmassan. Luftporer benämns även som bearbetnings- eller komprimeringsporer och har en storlek mellan 0,3 och 1 mm (Fagerlund 1999b). Luftporernas betydande storlek gör att dessa normalt inte vattenfylls. Porerna är i regel förbundna med kapillärporsystemet där de verkar kapillärbrytande d.v.s. hindrar fukttransporten (Burström 2008).

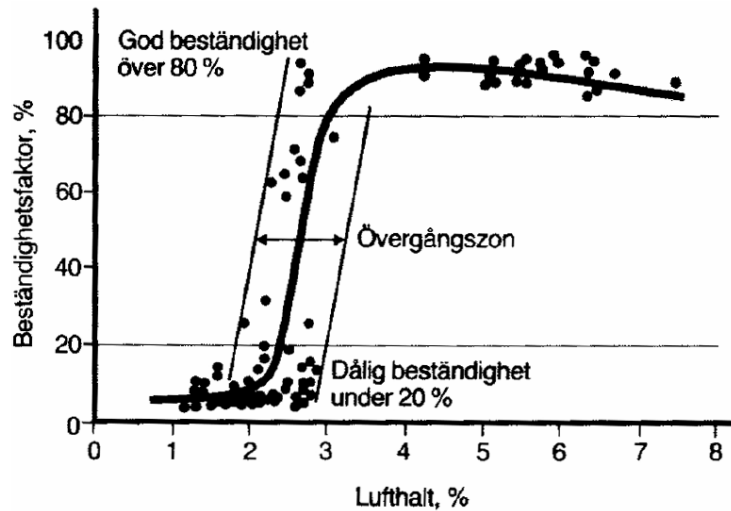
#### 3.1.6 Lufthaltens betydelse

Luftporbildande medel som tillsätts den färska betongen ökar betongens frostbeständighet. I cementpastan skapas små och jämnt fördelade luftblåsor med 0,05-0,3 mm i storlek. Lufthaltens funktion är att vid frysning ta hand om det undanpressade vattnet som orsakas av isbildningen. På så sätt förhindras betongen att sprängas sönder av isen (Burström 2008).

Normalt har betong utan luftinblandning en naturlig lufthalt på 1-2%. Denna lufthalt är inte tillräcklig för att skydda betongen mot att frysa sönder. För att betongen ska betraktas vara frostbeständig ska lufthalten ligga mellan 4-5% av betongvolymen (Vattenfalls betonghandbok 1972). Lufthaltens inverkan på frostbeständigheten hos betong visas i figur 3.1. Dessa lufthalter gäller för betong i sötvatten. När frysning sker vid närvaro av salthaltigt vatten krävs en ännu större mängd inblandad lufthalt (Fagerlund 1987).

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Emellertid räcker det inte med att endast ha hög volymandel luftporer. För att förbättra frostbeständigheten bör betongen ha ett finfördelat luftporsystem med små och många porer (Fagerlund 2006).



Figur 3.1 - Lufthaltens inverkan på frostbeständighet (Burström 2008).

Trots att lufthalten har en positiv inverkan på frostbeständigheten har den en negativ inverkan på betongens hållfasthet. När betongens vattenhalt och vct hålls oförändrade, kommer en ökad luftinblandning att leda till en minskning av tryckhållfastheten. För varje procent tillförd luft minskar tryckhållfastheten med 3-5%. När lufthalten överstiger 7% minskar tryckhållfastheten betydligt mer (Byfors 1997).

#### 3.1.7 Vattenmättnadsgrad

Vattenmättnadsgraden anger hur stor andel av den totala porvolymen som är vattenfylld och har stor betydelse för materialets frostbeständighet. Vattenmättnadsgraden kan allmänt definieras enligt följande (Fagerlund 1998b):

$$S = \frac{W_e}{\rho_w \cdot V_p}$$

$S$  = vattenmättnadsgrad [-]

$W_e$  = mängden vatten i provet [kg]

$V_p$  = totala porvolymen i materialet [ $m^3$ ]

$\rho_w$  = porvattnets densitet [ $kg/m^3$ ]

För ett helt uttorkat material är  $S = 0$  och när betongen är helt vattenmättad, det vill säga då alla porer är vattenfyllda, är  $S = 1$ . Vattenhalten i betong uttrycks vanligtast

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

med total vattenmättnadsgrad eller effektiv vattenmättnadsgrad. Den totala vattenmättnadsgraden tar hänsyn till allt porvatten som finns i betongen och kan beräknas med följande formel (Fagerlund 2006):

$$S = \frac{W_e}{P}$$

S = total vattenmättnadsgrad [-]

$W_e$  = total vattenhalt [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

P = totala porositeten [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

För att beräkna den effektiva vattenmättnadsgraden behövs det frysbara vattnets volym vilket är svårare att få fram. Den effektiva vattenmättnadsgraden kan beräknas enligt följande formel (Fagerlund 2006):

$$S_f = \frac{W_f}{W_f + a}$$

$S_f$  = effektiv vattenmättnadsgrad [-]

$W_f$  = frysbar vattenhalt [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

a = luftfylld porvolym [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

Andelen frysbart vatten är beroende av temperaturen och porernas radie i betongen. Adsorberat och kapillärkondenserat vatten har en frystemperatur som är lägre än 0°C eftersom det är utsatt för ett kapillärt undertryck. Ju mindre poren är, desto större undertryck och desto lägre fryspunkt, se tabell 3.2 (Fagerlund 2006).

Tabell 3.2 - Samband mellan porradie och fryspunkt där  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ mm}$  (Fagerlund 2006).

Porradie [ $\text{\AA}$ ]	Fryspunkt [ $^{\circ}\text{C}$ ]
634	-2
222	-6
137	-10
95	-15
74	-20
53	-30
43	-40

För betong sker vanligtvis frysning vid temperaturen -2°C och lägre. Men även vid -30°C är det normalt att ofrusat vatten kvarstår i betongen. Jämfört med andra material har betong en stor andel ofrysbart vatten vilket har en stor positiv inverkan på frostbeständigheten. Andra material, som exempelvis tegel är mer grovporösa och har därför en liten mängd ofrysbart vatten (Fagerlund 2006).

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---

I verkligheten är det en ännu mindre mängd vatten som kan frysa hos betong. Förklaringen ligger i att vattnet i den lilla poren inte kan nås av en isfront (Fagerlund 2006). För att vatten ska kunna frysas vid den givna temperaturen måste en iskristall beröra vattenvolymen. Fenomenet kallas kristallationskärna. Vid  $-40^{\circ}\text{C}$  är temperaturen tillräcklig låg för att isbildningen kan ske självmant utan närvaro av kristallationskärnor (Fagerlund 2011b).

För att betong inte ska skadas vid frysning måste den frysbara vattenvolymen teoretiskt ha ett expansionsutrymme som är lika stort som isens expansion på 9%. Den kritiska mättnadsgraden  $S_{kr}$  motsvarar sålunda den högsta vattenhalt som inte leder till skador vid en enda frysning (Fagerlund 1972).

$$S_{kr} = \frac{w_f}{w_f + 0,09w_f} = 0,917$$

$S_{kr}$  = kritisk vattenmättnadsgrad [-]

$w_f$  = frysbart vatten [ $\text{m}^3$ ]

Teoretiskt kan den kritiska vattenmättnadsgraden uppgå till högst 0,917, dock är det praktiska värdet oftast lägre (Burström 2008). Den kritiska vattenmättnadsgraden är unik för varje betong. Det har även visat sig att den kritiska vattenmättnadsgraden inte påverkas av fryshastigheten eller antalet frostcykler. Det räcker med att ha en vattenmättnadsgrad som överstiger den kritiska vid frysning för att skador ska uppstå (Fagerlund 2006).



## 3.2 Skademekanismer

Allmänt betraktas betong som ett starkt och beständigt material vilket under gynnsamma förhållanden kan uppnå en närmast obegränsad livslängd. Det existerar emellertid ingen optimal miljö i naturen sådan att betongkonstruktioner lämnas orörda från påverkan. Denna miljöpåverkan kan vara ett beständighetsproblem. Beroende på miljö kan betong utsättas för bland annat frostangrepp, urlakning, nötning, armeringskorrosion, sura angrepp, sulfatangrepp och saltangrepp. Dessa begränsar både betongkonstruktioners funktionsduglighet och totala livslängd (VAST 1991). Fokus i detta examensarbete läggs på frostangrepp, urlakning och nötning då det var dessa tre skademekanismer som bedömdes ligga bakom de observerade skadorna på betong längs vattenlinjen.

### 3.2.1 Frostsprängning

Frostangrepp är en skademekanism som enbart förekommer hos porösa och spröda byggnadsmaterial som till exempel betong, lättbetong, tegel, murbruk, putsbruk och gips. Under normala förhållanden vattenfylls porerna om betongen utsätts för fritt vatten. När vattnet i porerna fryser sker en volymökning om 9%. Om betongen har en alltför hög fuktnivå samtidigt som frystemperaturen är tillräckligt låg kan materialet skadas. Nedbrytning av betong som orsakas av frostangrepp kan ske på två olika sätt; inre- och yttre frostsprängning (Fagerlund 2006).

I början på 1900-talet undersöktes konstruktioner, framför allt vattenkraftsdammar, som var särskilt utsatta för frostpåverkan i Sverige. Anledningen till dessa frostsador hade sin grund i den då bristande kunskapen om vattentät betong, som ofta ledde till ett alltför högt vct. På grund av för högt vct har dammkonstruktionerna följaktligen drabbats av urlakning och frostsprängning (Fridh 2005).

Vattenfall AB använde år 1937 ett tillsatsmedel i betongen i ett syfte att förbättra betongens arbetbarhet. Detta tillsatsmedel utgjordes av ett äggviteämne som gav betongmassan en mängd små luftblåsor som uppgick till 3-5% av betongvolymen. Vid användning av tillsatsmedlet upptäcktes det att betongen fick en liten minskning av tryckhållfastheten, men å andra sidan blev betongen mer vattentät och dessutom frostbeständig. Under detta årtionde fick lufthaltens betydelse för frostbeständigheten hos betong ett stort genombrott i USA (Kungl. Vattenfallstyrelsen 1948).

År 1966 började luftporbildande tillsatsmedel användas generellt i Sverige i syfte att förbättra frostbeständigheten hos de mest utsatta betongkonstruktionerna. Antalet frostsadade konstruktioner i samband med sötvatten har efter denna period blivit mindre vanliga (Fridh 2005).

### **3.2.1.1 Inre frostsprängning**

Inre frostsprängning inträffar vid frysning då vattenmättnadsgraden i de inre delarna av betongen överstiger den kritiska vattenmättnadsgraden. De skador som uppkommer på betongen är kraftig inre sprickbildning, varvid permeabiliteten i betongen ökar, E-modulen och hållfastheten minskar. Vidare försämras även armeringens vidhäftning (Fagerlund 2006). Det besvärliga med inre sprickbildning är att skadorna inte upptäcks förrän det är försent (VAST 1991).

För att minimera risken för inre frostsprängning bör det användas en betong med lågt vct och luftporbildande medel. Ett lågt vct innebär en tätare betong, långsammare vattenupptagning och en mindre mängd frysbart vatten (Fagerlund 1989).

De destruktiva mekanismerna som ligger bakom inre frostsprängning kommer att förklaras i avsnitten som följer.

### **3.2.1.2 Yttre frostsprängning**

Om betongytan har en vattenmättnadsgrad som är högre än den kritiska vattenmättnadsgraden i samband med frysning kommer betongen att utsättas för yttre frostsprängning. När frysningen sker i närvaro av salthaltigt vatten ökar skadorna avsevärt. Normalt förekommer skadeangreppen i form av avskalningar på betongytan medan betongens inre delar fortfarande är välbehållna (Fagerlund 2006).

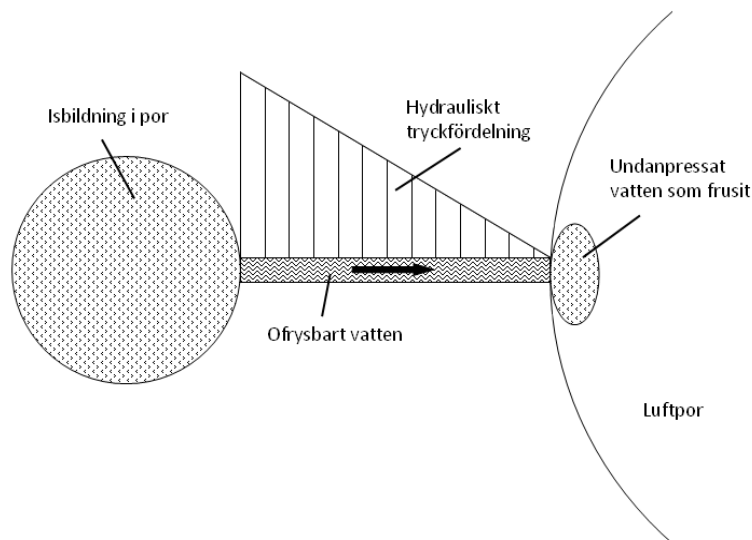
Ytavskalning karakteriseras av att cementpastan förstörs och lossnar från ytan. Efter en period har avskalningen trängt så djupt in i materialet att även ballastkornen lossnar. Slutligen är avskalningens omfattning så stor att hela betongens täcksikt är borta. Som följd erhåller betongen en sämre armeringsvidhäftning och risken för armeringskorrosion ökar (Hassanzadeh 2010).

Trots att det har studerats mycket kring frostangrepp är det fortfarande inte helt klarlagt vilka mekanismer som ligger bakom ytavskalning. Det finns en hypotes om att ytavskalningar orsakas av samma destruktiva mekanismer som inre frostsprängning (Fridh 2005).

### 3.2.1.3 Hydrauliskt tryck

Rent teoretiskt behöver luftporerna ha en volym motsvarande det frysbara vattnets volymökning på 9% för att förhindra frostsador. I verkligheten behövs emellertid en betydligt större mängd luftporer. Detta kan förklaras med det hydrauliska trycket (Fagerlund 2006).

Hydrauliskt tryck uppstår vid frysning av betong då isbildningen ökar det ursprungliga vattnets volym och ofruset vatten pressas vidare till närmaste luftpor. Vattentransporten sker genom ett trångt nät av gel- och kapillärporer. Detta leder till ett strömningsmotstånd varvid höga hydrauliska tryck kan uppstå. Om avståndet till närmsta por är för stort kan det bildade trycket överskrida betongens draghållfasthet vilket leder till frostsprängning, se figur 3.2. Andra faktorer som ger större hydrauliskt tryck är högre isbildningshastighet och en mindre permeabilitet (Fagerlund 1997).



Figur 3.2 - Hydraulisk tryckbildning (Fagerlund 2006).

Det hydrauliska trycket kan förklaras med Darcys lag om vattenströmning, varvid en längre vätsketransport ger ett högre tryck (Nilsson 2006).

$$g = -\frac{k_p}{\eta} \frac{dP}{dx}$$

$g$  = vattenflödet [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$P$  = trycket [Pa]

$k_p$  = permeabilitetskonstanten [ $\text{m}^2$ ]

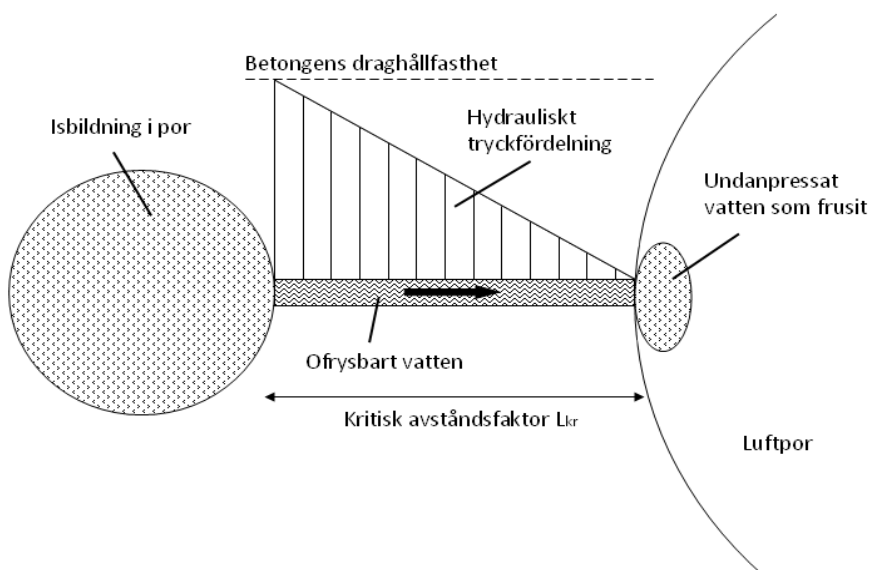
$\eta$  = vätskans viskositet [ $\text{Ns}/\text{m}^2$ ]

$x$  = avståndet [m]

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

För att luftporerna ska uppfylla sin funktion får avståndet mellan dem inte vara för stort. Avståndet beror på porernas storlek och volymandelen luftporer i betongen. Stora porer innebär färre porer och ett större avstånd fås vid en konstant lufthalt. Detta innebär att risken för frostsador ökar. Det eftersträvas istället att ha små men många porer vilket ger kortare avstånd vid samma lufthalt. Således kommer ett mindre hydrauliskt tryck att erhållas (Fagerlund 2006).

Det avstånd som krävs för att trycket ska överskrida betongens draghållfasthet kallas för kritiska avståndsfaktorn  $L_{kr}$ , se figur 3.3. Vid frysning av betong i sötvatten ligger den kritiska avståndsfaktorn mellan 0,37-0,43 mm (Fridh 2005).



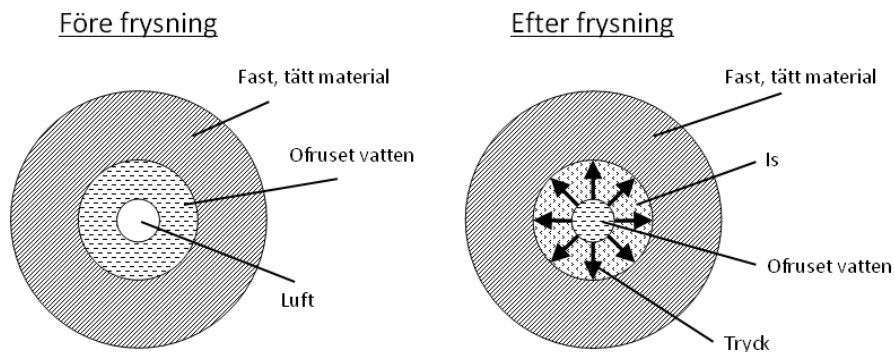
Fiur 3.3 - Kritisk avståndsfaktor (Persson & Rosenavist 2009).

Medelavståndet mellan porerna är emellertid beroende av den effektiva mätnadsgraden  $S_f$ . En hög vattenmättnadsgrad innebär att en stor del av porsystemet är vattenfyllt och avstånden mellan de luftfyllda porerna har ökat (Fagerlund 2006).

Den teoretiska kritiska vattenmättnadsgraden är  $S_{kr} = 0,917$ . Hydrauliskt tryck kan endast uppstå då  $S_f > S_{kr}$ , d.v.s. då volymandelen luftporer är mindre än isbildningens volymökning vid frysning. Om  $S_f < S_{kr}$  kan luftporerna ta hand om allt vatten utan att tryck orsakas på porväggarna (Fridh 2005).

### 3.2.1.4 Istryck i en sluten behållare

Denna frostskaademekanism är ett specialfall av hydrauliskt tryck och inträffar i material där permeabiliteten är noll, exempelvis porösa ballastkorn ingjutna i betong, se figur 3.4. Dessa korn kan betraktas som slutna behållare, varav vattentransport in i omgivande cementpasta är omöjlig vid frysning (Fagerlund 1997).



Figur 3.4 - Poröst ballastkorn omgiven av cementpasta bildar en slutna behållare (Fagerlund 1997).

Vid frysning finns ingen möjlighet för vattnet att pressas undan till närliggande porer. Om volymökningen vid isbildning överskrider den inträngda luftens volym uppstår en tryckökning i den slutna behållaren vilket leder till frostsprängning (Fagerlund 1997).

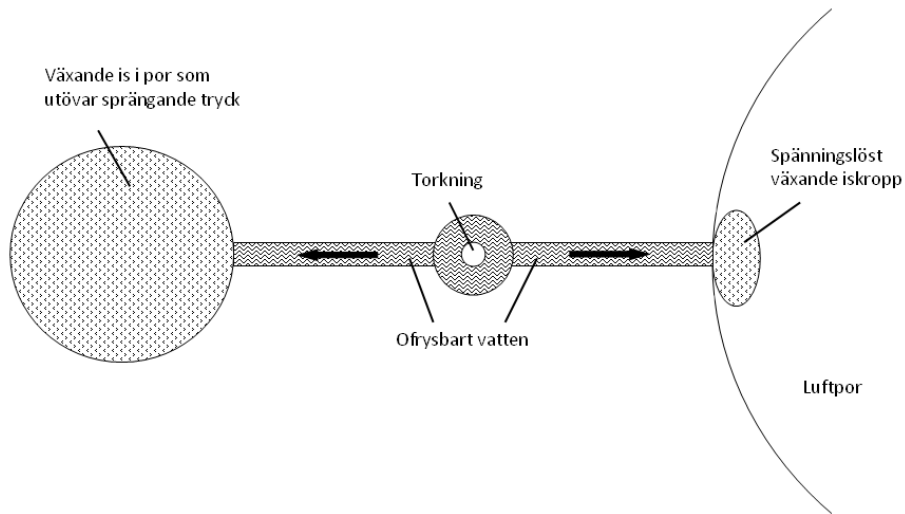
### 3.2.1.5 Islinsbildning

Islinsbildning är en frostskaademekanism som under vissa förhållanden kan ge större skador än hydrauliskt tryck. Betong som är ett poröst material innehåller en stor mängd ofrysbart vatten i de små porerna och isroppar i de större porerna (Fagerlund 2006). Vattnet i de små porerna är inte frysbart vid normal frystemperatur. Ju mindre porerna är desto lägre är vattnets fryspunkt (Fagerlund 1997). Ofruset vatten vid minusgrader har alltid ett högre energiinnehåll än is vid samma temperatur. Således kommer en vattentransport att ske mot isropparna som kommer att växa. Det finns två mekanismer för islinsbildning; mikroskopisk- och makroskopisk islinsbildning (Fagerlund 2006).

#### Mikroskopisk islinsbildning

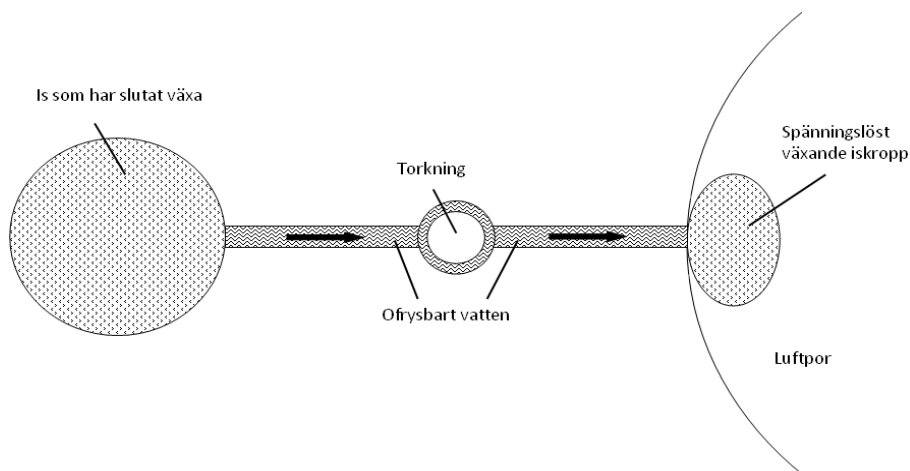
Som tidigare nämnts sker en vattentransport mot isropparna på grund av skillnader i energiinnehåll. Det ofrusna vattnet kommer att transporteras till is i helt isfyllda porer och delvis luftfyllda porer, se figur 3.5. Vattnet som kommer fram till isbildningen leder till att isen blir större och fortsätter att växa. Därav kommer isen i den helt isfyllda poren att skapa ett tryck mot porväggen. Om trycket är större än draghållfastheten skadas betongen (Fagerlund 2006). Isen som utövar ett tryck mot porväggarna får ett ökat energiinnehåll, samtidigt som det ofrusna vattnets energiinnehåll minskar och det sker en uttorkningseffekt varvid en krympning av betong inträffar (Fagerlund 1997). Vattnet som transporteras till is i luftfyllda porer kan däremot växa spänningslöst (Fagerlund 2006).

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet



Figur 3.5 - Mikroskopisk islinsbildning i ett tidigt skede (Fagerlund 2006).

Energiinnehållet hos isen kommer att öka tills jämvikt uppnås, det vill säga då isens energiinnehåll är lika stort som vattnets energiinnehåll. När energiinnehållet hos isen är tillräckligt högt så kommer vattentransporten så småningom att avstanna. Isen i luftporen har fortfarande ett lågt energiinnehåll eftersom den fått växa utan mottryck. Följaktligen kommer vattnet att byta riktning och endast transporteras till isen i luftporen som växer spänningslöst, se figur 3.6. Efter en tid kommer is kropparna i de helt isfyllda porerna att delvis smälta varvid trycket minskar. Hur stora tryck som kan uppstå innan vattentransporten ändrar riktning beror på avståndet mellan de helt isfyllda och delvis luftfyllda porerna. Sålunda finns även kritiska avstånd mellan luftporer för islinsbildning (Fagerlund 2006).



Figur 3.6 - Mikroskopisk islinsbildning i ett senare skede (Fagerlund 2006).

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

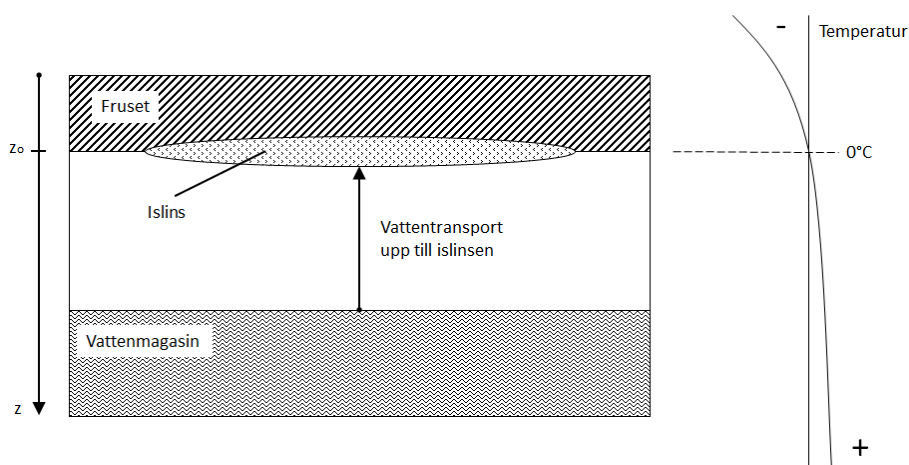
Vid stora avstånd mellan luftporerna erhålls en volymökning hos cementpastan på grund av trycket från isbildningen. Vid mycket små luftporavstånd sker istället en volymminskning hos cementpastan. Detta beror på att uttorkningen från vattentransporten dominerar över trycket från isbildningen i den helt isfyllda poren (Fagerlund 1997).

Om det ofrusna vattnet innehåller salt kommer trycket i porsystemet att öka ytterligare vid mikroskopisk islinnbildning. Denna mekanism kallas osmotiskt tryck och kommer att förklaras utförligare i avsnitt 3.2.1.6 (Fagerlund 1997).

### Makroskopisk islinnbildning

Makroskopisk islinnbildning kan jämföras med de islinser som inträffar vid tjällyftning i mark, fast för mycket porösa material i fuktig miljö. Konstruktioner som är utsatta för makroskopisk islinnbildning kan exempelvis vara betongdammar. Betong är ett poröst material vilket innebär att det kan ske stora fuktflöden in i betongen så att islinser teoretiskt kan växa på den kalla sidan av dammen. Ett sådant fall skulle leda till uppluckring av betongen (Fagerlund 2006).

För att makroskopiska islinser ska kunna bildas måste det finnas temperaturskillnader i betongen. I figur 3.7 illustreras tjällyftningsmekanismen. Ett villkor för att islinnen ska kunna bildas är att frystemperaturen uppnås i materialet. För att islinnen senare ska växa måste dessutom temperaturen hållas konstant under en längre period. Om fryszonen ligger vid samma djup tillräckligt länge tillåts islinnen att växa vilket leder till skador i betongen. Dessutom måste betongen ha fri tillgång till vatten för att islinnen ska kunna växa. Det innebär att betongens permeabilitet måste vara tillräckligt hög så att islinnen hela tiden kan förses med vatten. Drivkraften för makroskopisk islinnbildning är densamma som för mikroskopisk islinnbildning, det vill säga skillnader i energiinnehåll. Ofuset vatten har alltid ett högre energiinnehåll än is vid samma temperatur, vilket leder till att en vattentransport sker från vattnet till iskroppen (Fagerlund 2006).



Figur 3.7 - Tjällyftningsmekanismen med en temperaturprofil och fuktflöde (Fagerlund 2006).

### 3.2.1.6 Osmotiskt tryck

Osmotiskt tryck är det tryck som uppstår mellan två vätskelösningar av olika koncentrationer som är åtskilda av ett semipermeabelt membran. Membranet är genomträngligt för vätskor men inte för salter. Drivkraften är skillnaden i koncentration för att uppnå jämvikt. Vattentransporten sker således från lösningen med en låg koncentration till lösningen med en hög koncentration (NE 2013).

Detta fenomen kan förekomma i betong mellan två porer, en liten por med ofrusen saltlösning och en stor por innehållande delvis is och ofrusen saltlösning. Dessa porer är åtskilda av cementpastan som i detta fall är det semipermeabla membranet. Vid frysning kommer det att bildas mer is i den stora poren vilket ökar koncentrationen av saltlösningen. För att jämna ut koncentrationsskillnader sker en vattentransport från den lilla poren. Det osmotiska trycket ger således ett trycktillskott som bidrar till de destruktiva mekanismerna; hydrauliskt tryck (Jacobsen 1995) och islinsbildning (Fagerlund 1997).

Osmotiskt tryck kan beskrivas med Van't Hoffs ekvation. Eftersom temperaturen vid frysning påverkar isbildningen kommer en låg temperatur att ge en hög koncentration i poren, vilket leder till ett högre osmotiskt tryck. Det omvända gäller för en hög temperatur vilket inte ger någon ytterligare isbildning och därmed bibehålls en låg koncentration (Jacobsen 1995).

$$P = \frac{RT}{V} \log x$$

P = tryck [Pa]

R = allmänna gaskonstanten [8,314 J/mol·K]

T = absolut temperatur [K]

V = molvolym hos rent vatten [m<sup>3</sup>/mol]

x = koncentrationen av lösta joner [mol/m<sup>3</sup>]

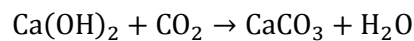
Med Van't Hoffs ekvation beräknas det osmotiska trycket kunna uppgå till 32 MPa. I detta sammanhang ska det anmärkas att de destruktiva mekanismernas bidrag inte är inräknat men att betongens draghållfasthet ändå överskrids (Jacobsen 1995).

För att det osmotiska trycket ska kunna uppstå får inte temperaturen sjunka för fort under frysningen. Som med islinsbildningen måste det osmotiska trycket kunna verka under en längre period för att kunna uppstå och leda till skador i betongen. Det eftersträvas att ha ett stationärt flöde, det vill säga ett flöde med små variationer som betraktas vara oföränderligt med tiden. Tiden för att uppnå detta kan ta mellan mindre än 1 dag och upp till 8 dagar beroende på betongen. Tidsvariationen beror på olikheter i porositeten och porsystemet i cementpastan hos olika betonger (Jacobsen 1995).



### 3.2.2 Karbonatisering

Karbonatisering är en process som startar direkt i det ögonblick då den nygjutna betongen avformas och kommer i kontakt med koldioxid i den omgivande luften. Koldioxid diffunderar och reagerar i första hand med kalciumhydroxid i betongen och bildar kalciumkarbonat (kalksten). Reaktion leder till en minskning av pH-värdet i betongen eftersom kalciumhydroxiden förbrukas (Halvorsen 1968).



I början sker karbonatiseringen snabbt men avtar sedan med tiden. Detta beror på att koldioxiden måste tränga igenom betong som redan blivit karbonatiserad. Med tiden tränger karbonatiseringen ännu djupare in i betongen med en tydlig front. Denna skiljs åt med en yttre zon av karbonatiserad betong (pH < 9) och en inre zon av okarbonatiserad betong (pH > 12,5). Hastigheten för karbonatiseringen beror på ett antal faktorer (Fagerlund 1987):

**Mängden karboniserbart material** – ju högre mängd kalciumhydroxid i betongen desto långsammare blir karbonatiseringen. Karboniseringshastigheten beror därmed på vilket sorts cement och mineraliska tillsatsmedel som har används.

**Halten koldioxid hos omgivande luft** - en högre halt koldioxid i omgivningen leder till en snabbare karbonatisering.

**Betongens täthet** - en tät betong (låg diffusionskonstant för koldioxid) försvårar för koldioxiden att nå okarbonatiserad betong. Ett sänkt vct leder till en tätare betong och därmed blir karboniseringshastigheten lägre.

**Täckskiktets fuktillstånd** - för att karbonatisering ska kunna ske måste täckskiktet ha en viss fuktnivå. I en torr betong sker sålunda en väldigt långsam karbonatisering. I normal inomhusmiljö är RF mellan 50-60% vilket ger den högsta karboniseringshastigheten. I en betong med en RF utöver 50-60% så sker karbonatiseringen långsammare. Detta beror på att fukthalten har ökat i porerna och diffusion av koldioxid sker långsammare i vatten än i luft.

**Fukthärddningen före karbonatisering** – betong som inte har fukthärdats tillräckligt länge får en ökad permeabilitet vilket leder till en högre karboniseringshastighet. Betongens täckskikt utsätts dessutom för en snabbare uttorkning vilket också ökar karboniseringshastigheten.

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Karbonatiserad betong är vanligtvis lika stark som den ursprungliga betongen (Lagerblad 2009). Det är först när karbonatiseringsfronten når armeringsstålet som korrosionsprocessen initieras. Tiden detta tar beror på karbonatiseringshastigheten och täcksiktets tjocklek (Byfors & Tuutti 1997).

Armeringskorrosion leder till en minskning av armeringens tvärsnittsarea vilket påverkar konstruktionens bärförmåga (Byfors & Tuutti 1997). Därtill bildas även korrosionsprodukter, exempelvis rost, som upptar en större volym än det ursprungliga stålet. Det leder till att tryck uppstår mellan stålet och betongen. Det skyddande täcksiktet kan då sprängas loss om trycket är tillräckligt högt (Fagerlund 1987).

Trots karbonatiseringens inverkan på armeringskorrosion har karbonatiseringen likväl en fördelaktig tillämpning. Fronten som har karbonatiserats utgör ett väldigt bra skydd mot urlakning. Detta beror på att kalciumkarbonat som bildas vid karbonatiseringen är mer svårslöslig än kalciumhydroxid (Halvorsen 1968).

#### **3.2.3 Urlakning**

Urlakning är en process som startas då ett fast material innehållande lösliga ämnen kommer i kontakt med en vätska. Under processens gång löses ämnena successivt upp i vätskan och transporteras bort från det fasta materialet, ämnena urlakas (Setunge et al. 2009).

Som exempel kan nämnas den urlakning av viktiga växtnäringsämnen som sker i många marker och odlingsjordar. Lättlösliga metaller i jorden löses upp av vatten på dess väg ned till grundvattnet och transporteras sedan bort från jorden med flödet. Detta leder till en successiv utarmning av näringsämnen (NE 2013).

Den gemensamma nämnaren för alla typer av urlakning är vatten. Vatten är ett lösningsmedel med förmåga att lösa fler ämnen än någon annan vätska. Av denna anledning brukar det ofta refereras till som det universella lösningsmedlet (USGS 2013). Hemligheten till dess goda lösande egenskaper ligger i molekylernas uppbyggnad. Vattenmolekyler är dipoler vilket innebär att det i molekylerna existerar en negativt laddad och en positivt laddad ände. Den ojämna laddningsfördelningen skapar en attraktionskraft mellan vattenmolekyler och andra laddade föreningar (hit räknas alla typer av jonföreningar och molekyler med dipoler) vilket möjliggör upplösning (Visionlearning 2013). Detta innebär att vatten på sin väg genom exempelvis odlingsmarker och betongkonstruktioner löser upp och för med sig viktiga föreningar och mineraler (USGS 2013).

Betong är ett kompositmaterial vars beståndsdelar till viss del är lösliga i vatten. Detta gäller i första hand cementpasta men även vissa typer av ballast. I cementpastan är det i huvudsak de kalkhaltiga reaktionsprodukterna från cementets

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

hydratation som löses upp av vatten, d.v.s. reaktionsprodukter innehållande kalcium. Vatten har en stor kalklösande förmåga och kalk återfinns i stora kvantiteter i alla typer av Portlandcement varför urlakning av betong ofta kallas för kalkurlakning (Ekström 2003).

Urlakning av betong är normalt en väldigt långsam nedbrytningsprocess vars inverkan på de flesta betongkonstruktioner leder till obetydliga skador. Dock kan urlakning ha stor betydelse för konstruktioner med lång förväntad livslängd, såsom vattenkraftverksdammar och konstruktioner för slutförvaring av radioaktivt avfall (Marionni et al. 2008).

#### 3.2.3.1 Löslighet av kalciumhydroxid i vatten

Urlakning av kalk i betong sker i första hand genom urlakning av kalciumhydroxid vilket är den mest lösliga föreningen i betong. Lösligheten av kalciumhydroxid är störst i rent vatten och minskar med ökande temperatur. För rent vatten med neutralt pH och inget löst koldioxid gäller följande värden (Fagerlund 2000):

Tabell 3.3 - Lösligheten av kalciumhydroxid med avseende på temperatur.

Temperatur [°C]	Löst Ca(OH) <sub>2</sub> [g/l]
0	1,85
20	1,65
100	0,71

Helt rent vatten återfinns sällan i naturen då vattnet på sin väg genom jord löser upp mineraler och andra biologiska föreningar. Vatten med en väldigt låg koncentration löst kalcium, s.k. mjuka vatten, är däremot vanligt förekommande i norra Sverige. Orsaken till detta är att de nordliga älvarna får en stor del av sitt tillrinningsvatten från smält snö (Fagerlund 2000).

Ett vattenledningsvatten bedöms enligt Medicinalstyrelsen (1968) vara mjukt utefter en tregradig skala (Rombén 1997):

Tabell 3.4 - Bedömning av mjukt vatten.

Bedömning	Konc. Ca <sup>2+</sup> [mg/l]
Mycket mjukt	0 - 15
Mjukt	15 - 35
Hårt	> 35

Som exempel kan tas Stora Lule älv där koncentrationen lösta kalciumjoner under ett år uppmättes till 2-4 mg/l. Vattnet i Stora Lule älv var då per definition enligt Medicinalstyrelsen mycket mjukt. För att få en bättre uppfattning kan

koncentrationen lösta kalciumjoner även jämföras med medelkoncentrationen i flodvatten i Europa vilket ligger på ungefär 32 mg/l (Drugge 2001).

### 3.2.3.2 Urlakning av kalciumhydroxid i betong

Kalciumhydroxid är en starkt basisk förening som återfinns i stora koncentrationer dels löst i porvattnet och dels i cementpastan som utgör porväggarna. Den höga koncentrationen av kalciumjoner i kombination med ett högt pH i porvattnet leder till att föreningen enkelt urlakas av mjukt vatten men även av relativt svaga syror som till exempel ättiksyra och myrsyra (Grattan-Bellew 1995).

Den drivande mekanismen vid urlakning är den stora koncentrationsgradienten som uppstår mellan porvatten och externt vatten som kommer i kontakt med betongen. Initialt existerar en lokal jämvikt mellan porvatten och porväggar med en hög koncentration av kalciumhydroxid. Vid kontakt med mjukt vatten transporteras de lösta föreningarna bort från porvattnet varför koncentrationen minskar (de Larrard et al. 2010). Transporten av lösta föreningar sker antingen genom ren diffusion, med vattnets flöde genom porsystemet eller som en blandning av de båda. Ju tätare en betong är desto mindre är vattenflödet genom materialet varför transporten av lösta föreningar i tät betong huvudsakligen sker genom diffusion (Ekström 2003).

Diffusion är en process som drivs av koncentrationsgradienten och kan förklaras med Ficks första lag för diffusion vilket beskriver hur lösta ämnen vandrar från platser med hög koncentration till platser med lägre koncentration (Nilsson 2006).

$$g = -D_c \cdot \frac{dc}{dx}$$

$g$  = flödet [mol/(m<sup>2</sup>s)] eller [kg/(m<sup>2</sup>s)]

$c$  = koncentrationen av lösta ämnen [mol/(m<sup>3</sup>)] eller [kg/m<sup>3</sup>]

$D_c$  = diffusionskoefficienten [m<sup>2</sup>/s]

$x$  = position [m]

Lösta kalciumjoner som diffunderar bort från porvattnet leder till att den lokala jämvikten mellan porvatten och porväggar störs. Mer kalciumhydroxid löses därför i porvattnet ända tills en ny, lägre jämvikt har uppnåtts. Urlakning av kalk i betong kan således beskrivas som en kombinerad diffusions- och upplösningsprocess. Upplösning av kalcium sker fortare än diffusionen varför det alltid kommer att finnas en koncentrationsgradient så länge det existerar kalcium i porväggarna (de Larrard et al. 2010).

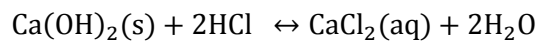
Upplösningsprocessen startar då koncentrationen av löst kalciumhydroxid i porvattnet understiger 22 mol/m<sup>3</sup>, vilket motsvarar ungefär 0,88 g/l och fortsätter så



### 3.2.3.3 Inverkan av sura vatten och pH

Som det har nämnts tidigare löses kalciumhydroxid inte enbart av mjuka vatten utan också av relativt svaga syror. Cementpastan är väldigt basisk med ett pH-värde på över 12,6 vilket gör den mottaglig för angrepp av sura vatten. Angreppet liknar i hög grad urlakningens nedbrytning av cementpastan men är mångdubbelt intensifierad (Taylor 1997).

Den drivande mekanismen vid sura angrepp är den neutralisationsreaktion som sker då vätejoner ( $H^+$ ) från syror kommer i kontakt med hydroxidjoner ( $OH^-$ ) från de kalkhaltiga komponenterna. Vätejoner reagerar med hydroxidjoner i porvattnet och omvandlar dessa till vattenmolekyler samtidigt som syrans anjoner reagerar med kalcium och bildar lösliga salter. Som exempel visas saltsyras reaktion med kalciumhydroxid:

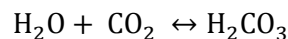


Upplösningen av kalciumhydroxid och därmed nedbrytningen av cementpasta ökar med ökande koncentration av vätejoner d.v.s. en ökande surhetsgrad. Lösningars surhetsgrad anges med begreppet pH-värde, se formel nedan. En neutral lösning har  $pH = 7$ , sura lösning har  $pH < 7$  och alkaliska lösning  $pH > 7$  (Halvorsen 1968).

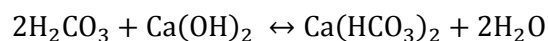
$$pH = -\log [H_3O^+]$$

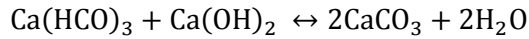
I takt med att hydroxidjonerna reagerar med vätejoner sjunker pH-värdet i betongen vilket leder till en successiv upplösning av de kalkhaltiga komponenterna. Kalciumhydroxid börjar upplösas från porväggarna då pH-värden understiger 12,6 medan motsvarande nedbrytning av C-S-H startar vid ungefär 10,5. Tillåts angreppet fortsätta obehindrat kommer cementpastan, vid  $pH \approx 2$ , ha reducerats till ett skelett bestående av endast kiselgel (Beddoe & Dorner 2005).

Syror förekommer oftast i industriella sammanhang i form av salt-, svavel- och salpetersyra men också i naturliga vatten i form av kolsyra (Rombén 1997). För betong i vattenkraftverksdammar är normalt endast inverkan från kolsyra relevant. Kolsyra i naturliga vatten bildas då atmosfäriskt koldioxid ( $CO_2$ ) löses och reagerar med vattenmolekyler enligt:

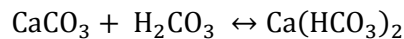


Den bildade kolsyran reagerar med kalciumhydroxid i porvattnet och bildar kalciumbikarbonat vilket i sin tur antingen transporteras bort genom diffusion eller reagerar med mer kalciumhydroxid varvid kalciumkarbonat bildas (Ekström 2003):



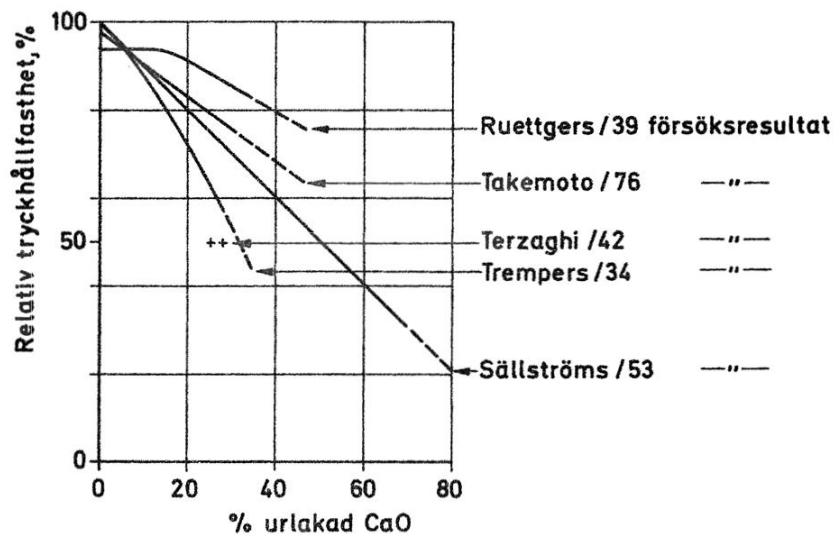


Kalciumkarbonat är mer svårslösligt än kalciumhydroxid vilket leder till motsatt effekt än den från nedbrytning, nämligen att ett svårslösligt tätande skikt bildas vilket förhindrar vidare urlakning. Kalciumkarbonatet varar emellertid inte länge ifall vattnet innehåller en stor koncentration löst kolsyra (s.k. aggressiv kolsyra) vilket enkelt omvandlar denna till mer lösligt kalciumbikarbonat enligt reaktionsformeln nedan (Halvorsen 1966).



### 3.2.3.4 Urlakningens inverkan på betong

Urlakning av kalk från betong leder således till en successiv nedbrytning av cementpastan. I takt med att de kalkhaltiga komponenterna frigörs i porvattnet lämnar de ett tomrum efter sig i cementpastan vilket leder till en ökning av porositet och därmed till en ökad permeabilitet. Vidare leder upplösningen av kalcium från C-S-H till en förlust av hållfasthet vilket presenteras i figur 3.9 (Halvorsen 1966).



Figur 3.9 - Sambandet mellan kalkurlakning och tryckhållfasthet. Sammanställning av resultat från olika undersökningar (Halvorsen 1966).

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Vid urlakningsförsök med mycket porösa provkroppar har det fastställts att följande faktorer inverkar på cementpastans nedbrytningshastighet:

- Cementets kalkhalt och mängden fri kalciumhydroxid i betongen
- Vattnets hårdhet
- Inverkan av karbonatisering
- Vattnets innehåll av aggressiv kolsyra

I verkliga betongkonstruktioner tillkommer även faktorer som konstruktionens täthet, betongytans tillstånd, förekomsten av sprickor i konstruktionen samt det strömmande vattnets hastighet (Halvorsen 1966).

Nedbrytningshastigheten är störst i otäta konstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck. Som exempel kan nämnas äldre vattenkraftverksdammar, vilka ofta brukar utmärkas av en dåligt komprimerad betong med ett för högt vct. Dessa har visat sig drabbas av mycket stora urlakningsskador koncentrerade till partier där vattentransporten varit störst (VAST 1991).

#### **3.2.3.5 Olika angreppsformer vid kalkurlakning**

Urlakning av betong i vattenkraftverksdammar kan delas upp i ett antal angreppsformer vilka huvudsakligen beror på betongens kvalitet, d.v.s. ifall konstruktionen är vattentät eller inte, men även existensen av genomgående sprickor samt vattnets sammansättning och omsättning har en betydande inverkan. Följande urlakningsfall kan urskiljas (Hassanzadeh 2010):

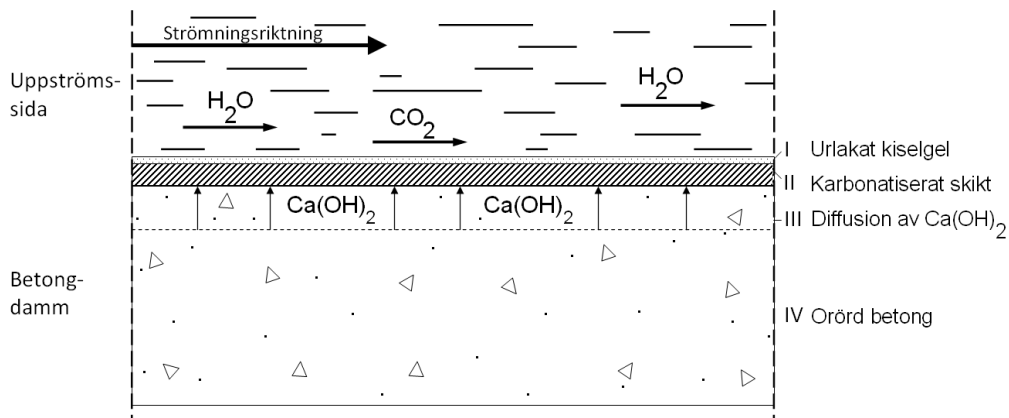
- Fri urlakning av betongens yta
- Fri urlakning av betongens yta i kombination med nötning
- Homogen urlakning genom hela konstruktionen
- Semihomogen urlakning genom hela konstruktionen
- Urlakning genom sprickor och defekta områden

#### **Fri urlakning från betongens yta**

För vattenkraftverksdammar byggda med betong av hög kvalitet och relativt god täthet, utsatta för vatten utan tryckgradient, sker urlakning huvudsakligen från betongens yta. I figur 3.10 illustreras yturlakningsförloppet på en tät konstruktion utsatt för strömmande vatten. Av figuren kan fyra olika skikt urskiljas; skikt I utgörs av urlakat kiselgel, skikt II av karbonatiserad betong, skikt III av kalciumhydroxid som diffunderar mot ytan och skikt IV som utgörs av opåverkad betong (Halvorsen 1966).



## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet



Figur 3.10 - Urlakningszoner vid en fri betongyta utsatt för strömmande vatten (Halvorsen 1966).

Som det tidigare har nämnts leder atmosfäriskt koldioxid till karbonatisering av betong vilket rör sig som en front från ytan och djupare in i materialet. Kalciumkarbonat är som sagt tidigare betydligt mer svårslösligt än kalciumhydroxid varför det karbonatiserade skiktet (skikt II) kommer att skydda orörd betong (skikt IV) från urlakning. Det karbonatiserade skiktet närmast vattnet kan emellertid enkelt lösas upp av aggressiv kolsyra (om vattnet innehåller ett överskott av löst koldioxid) vilket gör betongen närmast vattenytan återigen mottaglig för vattnets upplösande förmåga, kalciumhydroxid kommer då att urlakas från betongens yta (skikt I). Vidare leder urlakningen till att kalciumhydroxid från opåverkad betong diffunderar mot ytan för att jämna ut koncentrationskillnaden (skikt III) (Halvorsen 1966).

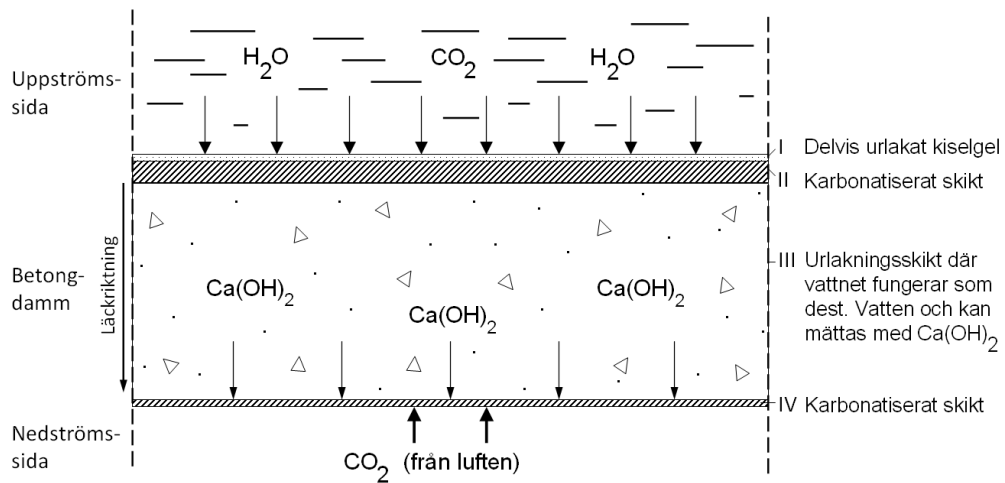
### Fri urlakning av betongens yta i kombination med nötning

Urlakningsförloppet är nästintill identiskt med ovanstående förlopp med den skillnaden att ytan även utsätts för nötning (se avsnitt 3.2.4) vilket ökar hastigheten på urlakningsförloppet (Hassanzadeh 2010).

### Homogen urlakning genom hela konstruktionen

Den här formen av urlakning sker huvudsakligen i porös (otät) betong som utsätts för ensidigt vattentryck. Urlakningsförloppet illustreras i figur 3.11 och kan enkelt förklaras med att tryckskillnaden gör att vatten tränger igenom betong på uppströmssidan och löser kalciumhydroxid på sin väg genom dammkonstruktionen (Halvorsen 1966).

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet



Figur 3.11 - Urlakningszoner vid direkt genomströmning av betong utsatt för ensidigt vattentryck (Halvorsen 1966).

Stor tryckskillnad i kombination med otät betong gör att vatten tränger in i uppströmssidan av konstruktionen. Atmosfärisk koldioxid som finns löst i vattnet reagerar med kalciumhydroxid och omvandlar denna till mer svårslösligt kalciumkarbonat vilket faller ut i ett skikt nära ytan (skikt II). Vatten som passerar vidare genom materialet kommer då att ha en låg kalkhalt och lösa upp mer kalciumhydroxid på dess väg mot nedströmssidan. Vid luftsidan kommer vattnet att avdunsta varför ett nytt lager med kalciumkarbonat bildas. Vid större genomströmning kan urlakningen leda till att tjocka lager med urlakad kalk bildas på nedströmssidan s.k. kalkridåer, se figur 3.12 för exempel. Beroende på om vattnet innehåller aggressiv kolsyra kommer skikt II att lösas upp och urlakningsprocessen att kunna fortsätta (Halvorsen 1966).



Figur 3.12 - Nedströmssidan hos en äldre dammkonstruktion som drabbats av omfattande urlakning (Rosenqvist 2013).

### **Semihomogen urlakning genom hela konstruktionen**

Denna urlakningsform kan sägas vara en blandning av urlakning från ytan och homogen urlakning av hela konstruktionen och drabbar betong med en täthet som ligger mellan fall 1 och fall 2 (Hassanzadeh 2010).

### **Urlakning genom sprickor och defekta områden**

Principiellt är urlakningsformen samma som fri urlakning från ytan med den skillnaden att urlakning nu utgår ifrån sprickornas ytor och inte konstruktionens yta.

## **3.2.4 Nötning**

Nötning är en nedbrytningsmekanism som innebär förlust av material från ytor genom friktion. Nedbrytning p.g.a. nötning av betong sker på flera olika sätt. På vattenbyggnader utsätts betongen vanligtvis för erosion och nötning av is (Möller 1997).

Nötning av is innebär att flytande isblock i vattnet krockar och nöter på betongytan. Hur stora skador som uppkommer beror på isens storlek och egenskaper (Huovinen 1992). Även isblock som frusit fast på betongytan kan lossna med tiden och ta med sig delar av betongen (Hassanzadeh 2010).

Erosion är en form av nötning och förekommer då strömmande vatten, antingen med eller utan partiklar, sliter på betongytan. Partiklarna i detta fall kan vara silt, sand, sten eller annat restmaterial som vattnet har fört med sig. Nedbrytningshastigheten för erosion på betongen beror på storleken, formen, kvantiteten och hårdheten hos partiklarna samt på hastigheten hos vattnet (Graham 1987).

Kavitation är en annan form av erosion som är skadlig för betong. Denna uppkommer vid höga hastigheter av vatten i exempelvis vattenvirvlar. Luftbubblor bildas och slås snabbt sönder vilket leder till att tryckkrafter bildas (VAST 1991). Det höga trycket som bildas när en luftbubbla imploderar är stark nog att skada många solida material. Tester som utförts har visat att även metall tar skada av kavitationsmekanismen (Graham 1987).

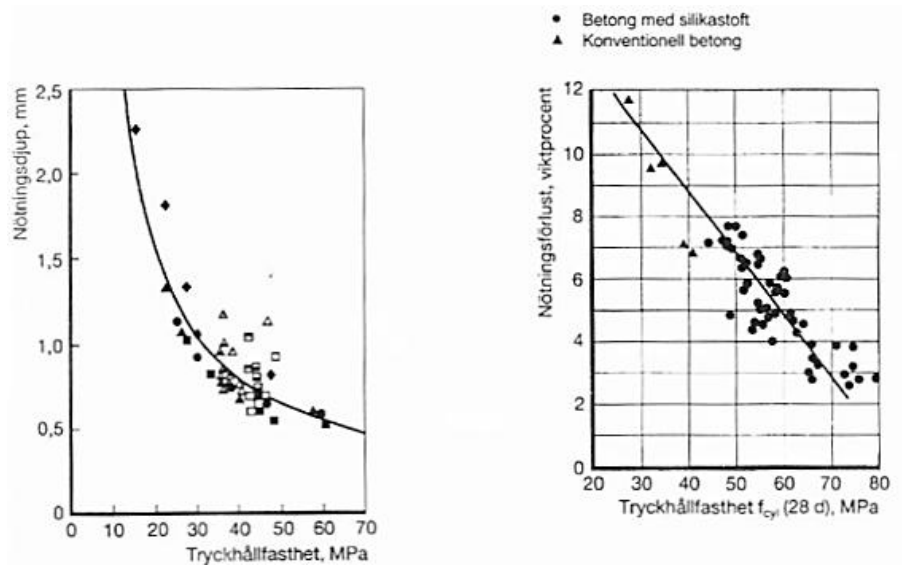
Det finns olika standardiserade provningsmetoder för att bestämma betongens nötningsmotstånd. Någon provningsmetod som är lämplig och användbar för alla förhållanden finns inte. Vid val av metod bör provningsmetoden väljas efter det som liknar de verkliga förhållandena. Generellt gäller att nötning blir större i en våt betong än i en torr. Konstruktionens fuktillstånd måste därför tas till hänsyn vid provning (Möller 1997).

Vid utformning av vattenbyggnader finns inget generellt kriterium för att definiera nötningsmotståndet. Oftast används olika betongparametrar som till exempel

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

tryckhållfastheten, draghållfastheten, ballastens hållfasthet, E-modulen och vct (Kryzanowski et al. 2009).

Experiment och praktiska erfarenheter visar att tryckhållfastheten har störst betydelse för nötning motståndet. En ökande tryckhållfasthet förbättrar nötning motståndet. Samband mellan tryckhållfasthet och nötning för två olika provningsmetoder visas i figur 3.13 (Möller 1997). För att betong ska ha god beständighet mot nötning borde denna vara minst 70 MPa (Huovinen 1992).



Figur 3.13 - Sambandet mellan tryckhållfasthet och nötning (Möller 1997).

### 3.3 Synergi

Ordet synergi härstammar från det grekiska ordet synergeo och betyder "hjälpa någon i arbetet". Synergi beskrivs som en effekt som uppstår då två eller fler faktorer samverkar med följd att summan av faktorernas totala verkan överstiger summan av varje enskild faktors verkan (NE 2013).

Då det talas om synergieffekter i detta arbete menas den eventuella ökning av skador på betong som kan uppkomma då betongen utsätts för två eller fler skademekanismer. Några exempel på synergieffekter som kan uppstå mellan olika skademekanismer presenteras i tabell 3.5 (Hassanzadeh 2010).

*Tabell 3.5 – Exempel på möjliga synergieffekter mellan skademekanismer (Hassanzadeh 2010).*

Kombination av mekanismer	Möjlig synergieffekt
Avskalning orsakad av frost och korrosion	Successiv minskning av det täckande betongskiktet vilket kan öka risken för armeringskorrosion
Frost och urlakning	Urlakning kan medföra en ökning av vattenhalten i betong vilket ökar risken för frostsador.

---



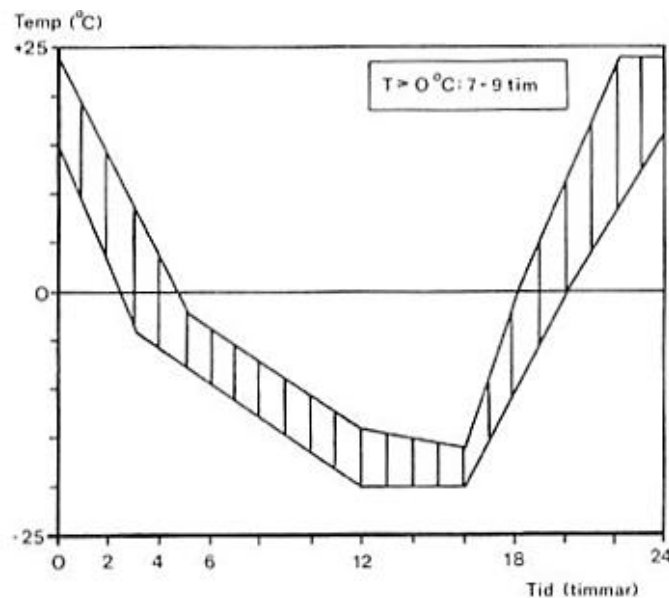
## 4 Försök

För att undersöka den inverkan som urlakning och nötning har på betongytans frostbeständighet har en experimentell studie utformats i laboratoriemiljö där provkroppar av betong utsätts för olika kombinationer av de tre skademekanismerna. Av praktiska skäl har de tre skademekanismerna delats upp i isolerade händelser vilket innebär att det togs fram en representativ provningsmetod för varje skademekanism. Då urlakning och nötning skulle kombineras med frostprovning togs det först fram en metod för frostprovning. Provningsmetoder för urlakning och nötning utformades sedan för att passa den valda frostprovningensmetoden. Slutligen utfördes en kontroll för att se om de valda provningsmetoderna verkligen kunde kombineras utan att inverka på varandra.

### 4.1 Val av frostprovningsmetod

För att undersöka betongytans frostbeständighet valdes en standardmetod, SS 13 72 44 som i dagligt tal kallas för Boråsmetoden (BST 1991).

I Boråsmetoden utsätts ytan hos provkroppar för upprepad frysning och upptining. Detta utförs i klimatskåp där temperaturen varierar cykliskt mellan -20 och +25 °C. En fullständig cykel uppnås på 24 timmar, se figur 4.1 (BST 1991). En vecka består därmed av 7 fryscykler.



Figur 4.1 Temperaturvariationen under en fryscykel (BST 1991).

Standarden är utformad för både ny och gammal betong. Vid provning av ny betong sågas provkroppar ut från standardkuber medan äldre betong från befintliga konstruktioner tas från borrhålskärnor och provas som cylindrar. Betongen i de

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

flesta befintliga dammkonstruktioner har exponerats för många års frysning, urlakning och nötning. Att använda en sådan betong i en studie som behandlar skademekanismers samverkan skulle ha en stor inverkan på resultatet. Av denna anledning bestämdes att ny betong skulle gjutas och användas i den experimentella studien.

Vidare finns möjlighet att undersöka två typer av ytor; en sågad yta eller en formyta. En standardprovkropp genererar två halvor för provning med höjden 50 mm. Beroende på hur dessa sågas ut erhålls olika provningsytor. I standarden benämns ytorna för förfarande 1 respektive 2 enligt:

Förfarande 1:                   Används vid förprovning och fortlöpande provning av betong. Ytan som studeras är det mittskikt som uppstår då en hel standardprovkropp sågas i två halvor.

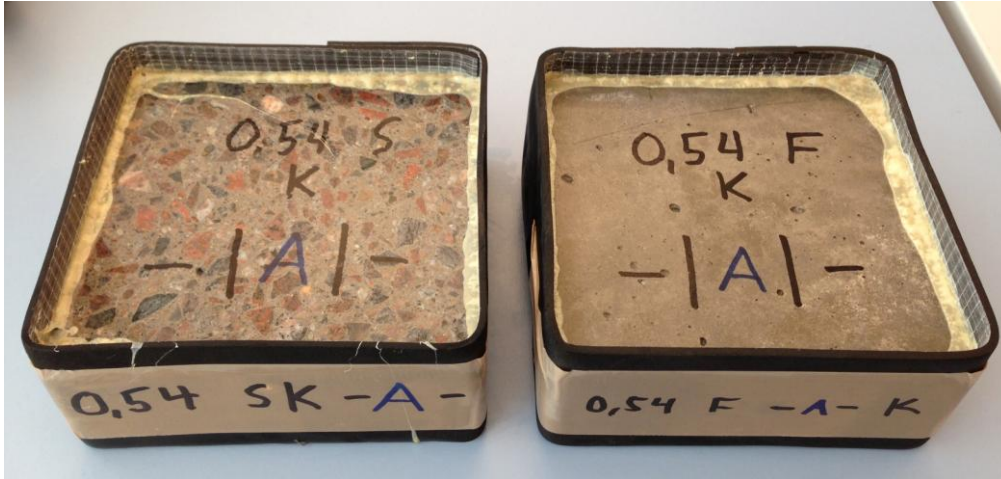
Förfarande 2:                   Används för att bestämma en gjutyta's frostbeständighet. Ytan som studeras är då en av formyterna hos provkroppen.

En formyta är oftast av svagare karaktär än en sågad yta. Detta beror på att det vid gjutning brukar bildas ett slamskikt mellan betong och form vilket försvagar ytan. Något sådant skikt förekommer inte för den sågade ytan (Rosenqvist 2013). För att kunna koppla resultaten som erhålls från studien med verkliga förlopp är en formyta att föredra men samtidigt finns risken att eventuella slamskikt påverkar resultaten. Av denna anledning bestämdes att båda typer av ytor skulle studeras.

Två provkroppar förberedda för provning enligt Boråsmetoden visas i figur 4.2. Av figuren framgår att det endast är en provyta som studeras. Gummiduken som används täcker alla sidor förutom provytan och fungerar som en fuktspärr vilket förhindrar de övriga ytorna från att påverka resultatet. För att säkerställa tätning mellan duk och betong appliceras en limsträng mot duken längs med betongytans kanter.

För att få frostsador appliceras vätska på ytan, antingen används avjoniserat vatten eller en lösning med NaCl. Den senare används då intresse finns att undersöka betongens saltfrostbeständighet. Salthalten kan väljas till antingen 1,5%, 3% eller 10% (BST 1991). Utförda studier har visat att skadegraden är störst vid en salthalt mellan 2-4%. Orsaken till detta är emellertid inte helt klarlagd. En hypotes är att närvaron av salt utanför betongytan medför att fukt anrikas i betongens ytparti (Fagerlund 2011a).





Figur 4.2 - Två provkroppar förberedda för frysprovning enligt Boråsmetoden. Den vänstra provkroppen enligt förfarande 1 och den högra enligt förfarande 2.

Vidare läggs sedan en 20 mm tjock värmeisolering i form av cellplast runt alla ytor med undantag för provytan där det istället läggs ett avdunstningsskydd.

I standardmetoden provas provkroppar antingen i 56 fryscyklar (8 veckor) eller 112 fryscyklar (16 veckor). Avflagnat material samlas upp från ytan med borste och vägs upp var 7:e fryscykel för de två första veckorna samt var 14:e frostcykel för de resterande veckorna. Det uppvägda materialet räknas sedan om till enheten  $\text{kg/m}^2$  d.v.s. avflagningarna divideras med provytans area. I standarden bedöms frostbeständigheten för Portlandcement enligt följande krav:

Tabell 4.1 - Krav för frostbeständighet enligt Boråsmetoden (BST 1991).

Frostbeständighet	Krav (Standard Portlandcement)
Mycket god	Avskalningar mindre än $0,1 \text{ kg/m}^2$ vid 56 cykler
God	Avskalningarnas medelvärde vid 56 cykler ( $m_{56}$ ) understiger $0,5 \text{ kg/m}^2$ samtidigt som $m_{56}/m_{28} < 2^1$
Acceptabel	Avskalningarnas medelvärde vid 56 cykler ( $m_{56}$ ) understiger $1,0 \text{ kg/m}^2$ samtidigt som $m_{56}/m_{28} < 2$
Inte acceptabel	Då kraven för acceptabel frostbeständighet inte uppfylls

<sup>1</sup>Bivilkoret anger att mer än hälften av de totala avskalningarna skall ha uppnåtts vid halva prövotiden.

## 4.2 Val av urlakningsmetod

Till skillnad från frostprovning finns i Sverige ingen standardmetod för provning av betongens motståndsförmåga mot urlakning. Vidare finns det inte heller någon inofficiell provningsmetod som normalt används varför det bestämdes att en egen metod skulle tas fram för studien.

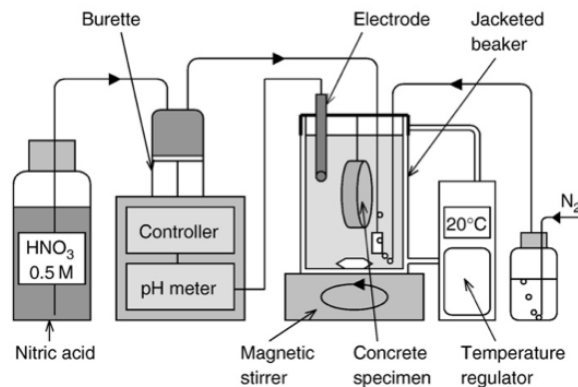
Till valet av urlakningsmetod har ett flertal artiklar publicerade inom området urlakning av betong använts som underlag och som inspiration. I vissa av de studerade artiklarna har urlakningsförsök utförts i syfte att undersöka vad som händer med betong vid urlakning (De Ceukelaire 1992, Jain & Neithalath 2009, Marionni et al. 2008 och Setunge et al. 2009) och i andra för att modellera fram en lämplig urlakningsmetod (Babaahmadi et al. 2012, Beddoe & Dorner 2005, de Larrard et al. 2010 och Roziere et al. 2009). Genom att studera och efterlikna tidigare utförda studier där tydliga urlakningsresultat erhållits har eventuella modelleringsproblem kunnat undvikas men även tid sparats som annars skulle gått åt till valideringar av framtagna metod.

Generellt kan det i studierna urskiljas två huvudtyper av urlakningsmetoder; en långtidsmetod där prover av betong utsätts för avjoniserat vatten och en accelererad metod där aggressiva lösningar används för att intensifiera urlakningsförloppet (Marionni et al. 2008). Ett av de vanligaste sätten att accelerera urlakningsförlopp är att använda ammoniumnitratlösningar ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Som exempel kan nämnas en studie där användningen av en 6 mol/l ammoniumnitratlösning ökade koncentrationen av kalcium i porvattnet från 22 mol/m<sup>3</sup> till 2700 mol/m<sup>3</sup>. Urlakningsförloppet accelererades därmed med en faktor på över 100 (de Larrard et al. 2010). Andra syror som har använts är saltsyra (HCl), salpetersyra ( $\text{HNO}_3$ ) och svavelsyra ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Syror leder i princip till samma skador på cementpastan som mjuka vatten. Det är först vid noggrannare analyser av betongens mikrostruktur som skillnader kan upptäckas. Beroende på vilken syra som används kan olika reaktionsprodukter bildas i betongen och dessa kan i sin tur leda till nya skador (Grattan-Bellew 1996). Som exempel kan svavelsyra nämnas vars sulfatjoner leder till bildning av ettringit i betong, en starkt svällande förening som i värsta fall kan leda till söndersprängning av betongen, s.k. sulfatangrepp (VAST 1991). Av denna anledning ansågs svavelsyra inte vara ett lämpligt val. Vidare valdes även saltsyra bort då denna skulle tillföra kloridjoner till betongen, vars närvaro skulle kunna inverka på frostprovningen. Den syra som slutligen valdes var salpetersyra.

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Valet av urlakningsmetod har i stora drag efterliknats en studie av Roziere där salpetersyra använts för att undersöka en betongs motståndsförmåga mot urlakning. I urlakningsförsöket placerades provkroppar i en sluten behållare med avjoniserat vatten vars pH sänkts till 5 med syran. Försöksuppställningen illustreras i figur 4.3 (Roziere et al. 2009).



Figur 4.3 - Försöksuppställning enligt studie utförd av Roziere et al. 2009.

Då urlakning av kalciumhydroxid leder till en ökning av pH användes utrustning som automatiskt tillsatte mer salpetersyra vid behov. På detta vis lyckades pH hållas konstant på  $5,0 \pm 0,1$ . Av figuren framgår att temperaturen också hölls konstant samt att luften i behållaren ersatts med kvävgas. Detta för att undvika inverkan av koldioxid i luften. Efter 60 dygn analyserades provkropparna genom att applicera fenolftalein på en sågad yta varvid det kunde konstateras att urlakningen nått 0,5 mm in i betongen d.v.s. att kalcium i de yttersta 0,5 mm av ytskikten hade urlakats (Roziere et al. 2009).

Då utrustning med liknande funktion för att mäta och reglera pH fanns till förfogande bestämdes att en liknande uppställning för urlakning skulle byggas upp. Då provkropparna växelvis utsattes för urlakning respektive frostprovning skulle den totala urlakningstiden emellertid endast uppgå till hälften av 60 dygn varför det beslutades att ett lägre pH-värde skulle väljas.

Test utfördes där det kontrollerades hur stor inverkan en sänkning till pH 4 skulle ha på urlakningen av kalcium. Provkroppar av äldre betong med okänd kvalitet placerades i hinkar med avjoniserat vatten och pH 4 respektive pH 5 där de fick stå under en veckas tid. Ingen omrörning eller reglering av pH utfördes. Samtidigt undersöktes även möjligheten att byta till ättiksyra, vilket emellertid är en svagare syra men vars reaktionsprodukter med kalciumhydroxid (kalciumacetat) skall ha högre löslighet i vatten (Beddoe & Dorner 2005). Vätskorna analyserades sedan med ett ICPAES instrument av modell OPTIMA 8300 från PerkinElmer USA vilket angav halten kalciumjoner. Resultatet presenteras i tabell 4.2.

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Tabell 4.2 - Inverkan av pH och typ av syra på urlakning av kalciumjoner.

Syra	pH	Ca [mg/l]
Salpetersyra	4	17,1
	5	13,6
Ättiksyra	4	8,0
	5	4,7

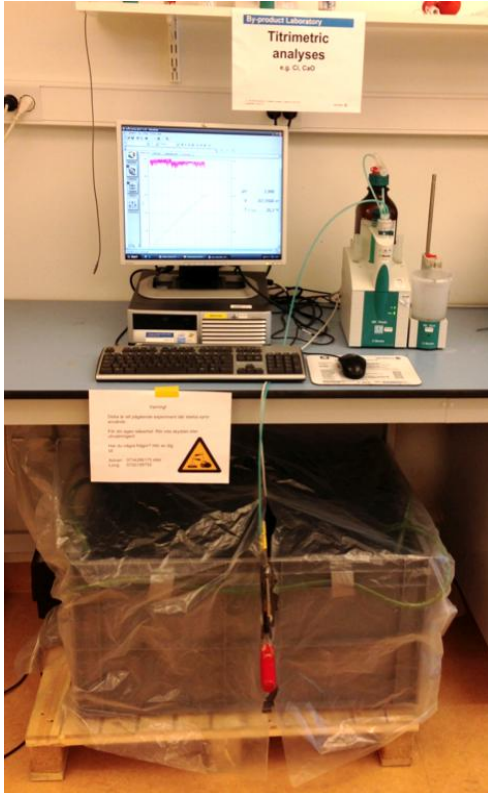
Då salpetersyralösningen med pH 4 visade sig vara mer än dubbelt så effektiv som ättiksyra valdes slutligen detta pH. Därmed bestämdes att urlakning skulle ske genom en accelererad metod där provkroppar skulle sänkas ned i avjoniserat vatten och pH skulle hållas konstant på 4 genom tillsättning av salpetersyra (1 M). Vidare bestämdes även att en del av provkropparna skulle urlakas med pH 7 d.v.s. neutralt pH för att tydligare kunna påvisa den inverkan som accelererad urlakning har på betongen.

Då de provkroppar som undersöktes skulle vara många fler till antal än de som användes i studien utförd av Roziere samt att det endast fanns en s.k. titratorutrustning till förfogande bestämdes att urlakningsförsöken behövde utföras i mycket större skala. För att få plats med alla provkroppar (antalet presenteras i avsnitt 4.4.2 provningsmatris) valdes två plastbaljor på vardera 162 liter; en plastbalja för urlakning med pH 4 och en plastbalja för urlakning med pH 7.

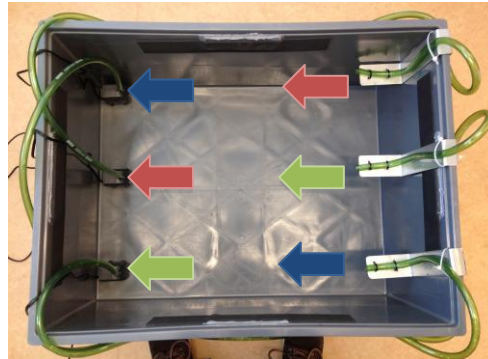
Efter att ha staplat det maximala antalet provkroppar som ska urlakas i en balja fylldes denna tills de översta provkropparna låg under vatten, varvid det kunde konstateras att 85 liter avjoniserat vatten skulle användas för experimentet.

Den titratorutrustning som fanns till förfogande kunde tack vare medföljande programvara visa vattnets pH samt volymen förbrukad syra över tid. Den slutgiltiga försöksupställningen kan ses i figur 4.4. För omrörning valdes tre akvariepumpar med en kapacitet på vardera 600 l/h. Med en total kapacitet på 1800 l/h skulle dessa därmed kunna cirkulera runt allt vatten i baljan 21 gånger per timme. Utblåsen från pumparna placerades så att maximal vattenomblandning skulle erhållas i baljan, se figur 4.5.

I figur 4.6 visas ett urlakningsförsök i sin helhet. Då provkropparna skulle staplas två och två i höjd placerades utblåsen i mitten av deras sammanlagda höjd. För att undvika eventuellt stillastående vatten under utblåsen tillsattes även en mixeromrörare. I figuren syns även att pH-mätare (vit kabel) och doserings slang (blå kabel) är placerade en bit från varandra. Detta för att undvika att mätaren anger pH från tillsatt syra.



Figur 4.4 - Slutgiltig försöksupställning med balja, titrator- och datorutrustning.



Figur 4.5 - Placering av pumpar och utblås.



Figur 4.6 - Placering av mixer, pH-mätare samt doseringslang.

#### 4.2.1 Urlakningskontroll

Då provkropparna skulle urlakas i två stora baljor skulle det emellertid inte gå att avgöra hur stor urlakningen av kalciumhydroxid varit för varje provkropp. För att undersöka inverkan av vct och pH bestämdes att ett antal provkroppar skulle urlakas i enskilda hinkar med volymen 10 liter. En provkropp skulle placeras i varsin hink med vardera 5,5 liter avjoniserat vatten. Vattnets pH skulle kontrolleras varje timme med handhållen pH-mätare och regleras genom manuell tillsättning av salpetersyra. Genom att sedan analysera vattnet från respektive hink skulle värden på urlakad halt kalciumjoner erhållas vilket skulle fungera som underlag vid analys för hur bra eller dåligt valet av urlakningsmetod hade varit.

### 4.3 Val av nötningsmetod

Vid utformandet av nötningsmetod har det letats efter en standardmetod som efterliknar nötning av betong i vattenkraftverksdammar d.v.s. nötning orsakad av isflak, erosion och kavitation. Någon sådan standardmetod fanns emellertid inte. Det närmaste som kunde hittas var tre provningsmetoder; ASTM C1138-89, ASTM C418-90 och ASTM C779-metod A vilka efterliknar nötning av vattenbyggnadsbetong i form av kavitation och erosion (Möller 1997). Nedan följer en kort förklaring om metoderna:

- ASTM C1138-89 nöter på en betongyta med hjälp av en anordning med stålkulor. Behållaren är fylld med vatten och i denna finns stålkulor av olika storlekar som cirkuleras med hjälp av en omrörare. Stålkulorna lyfts inte från ytan varför inverkan av stötverkan förhindras.
- ASTM C418-90 fungerar genom att betongytan nöts via sandblästring. Detta innebär att sand sprutas ut från ett munstycke med högt tryck varvid ytan nöts ner.
- ASTM C779-metod A har 3 roterande stålskivor vilka roterar kring en gemensam axel och nöter på en provyta.

Av de tre provningsmetoderna är nötningsformen enligt ASTM C1138-89 mest lämplig eftersom denna efterliknar verkligheten mest (stålkulor i vatten kan liknas vid partiklar i strömmande vatten). Men denna metod är inte passande eftersom den kräver cirkulära betongprover med en diameter på 305 mm och kan därmed inte anpassas till frostprovning enligt Boråsmetoden där kvadratiska provkroppar används.

ASTM C418-90 hade fungerat eftersom denna inte avser någon speciell ytstorlek som ska nötas. Nackdelen är att sandblästringen kan skada gummiduk och limsträng eftersom provkroppen är liten. Vidare motsvarar sandblästring av ytan inte den friktion som uppstår vid krock mellan isflak och betongyta. Avslutningsvis hade det inte gått att urskilja avskalningar från sandpartiklar varför denna metod inte ansågs vara lämplig.

Det sista alternativet ASTM C779-metod A hade kunnat fungera. Metoden kräver dock större dimensioner på betongprovet än de provkroppar som används i frostprovning enligt Boråsmetoden varför denna metod heller inte valdes.

Då ingen av metoderna kunde användas bestämdes att en egen metod skulle tas fram. Att utveckla en metod som efterliknar nötning av isflak, kavitation och erosion på betong som dessutom skulle gå att kombinera med frostprovning och urlakning visade sig vara en svår uppgift. Av denna anledning har en förenkling gjorts. Då

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

nötning av betong som orsakas av friktion mellan isflak och betong var lättast att efterlikna medan inverkan av de andra två var betydligt svårare bestämdes att provningsmetoden endast skulle efterlikna nötning genom friktion av isflak.

För att efterlikna friktionen som uppstår mellan betongyta och isflak bestämdes att ytan hos provkroppar skulle utsättas för borstning med stålborste. Test utfördes där ytan hos en provkropp borstades med en stålborste för att se om denna var tillräcklig för att orsaka skador på provytan. Borsten, som var 10 cm lång, sågades i två halvor, se figur 4.7. Detta gjordes dels för att förenkla borstning av provytan och dels för att undvika skador på gummiduk och limsträng under nötning, se figur 4.8. För att partiklarna inte skulle föras bort av luften applicerades vatten på betongytan. Tanken var att vattnet skulle samla upp alla partiklar som lossnar från betongen. Tillvägagångssättet var att borsta fram och tillbaka 10 gånger, längs hela ytan för att få en jämn nötning. Vattnet blev grumligt och partiklar kunde urskiljas vilket innebar att nötning gjorde en viss skada och att det var mätbart. Utefter resultatet togs beslutet att detta utförande skulle användas.



Figur 4.7 – Två halvor av en stålborste.



Figur 4.8 - Val av nötningssätt. Varje vertikal del nöttes fram och tillbaka 10 gånger.

#### **4.4 Kombination av provningsmetoder**

Provningsmetoderna som tagits fram och presenterats ovan har provats och visats fungera var för sig. Då studien behandlar skademekanismers samverkan kommer samma provkropp att utsättas för flera av de tre valda provningsmetoderna. Frågan är om metoderna kommer att inverka på varandra. Speciellt viktigt att undersöka är vilken påverkan den sura miljön under urlakning har på materialet som används till frostprovningen: gummiduken, gummidukens klisteryta och limmet.

Om materialen skulle brytas ner av syran skulle detta innebära att den skyddande tätningen på övriga sidor går förlorad. Med andra ord kommer övriga ytor att delta i urlakningsförsöket och påverka resultatet. Vidare gäller samma för frostprovningen där en förlorad tätning ökar risken för övriga ytor att inverka på resultatet.

Innan studien påbörjas måste det säkerställas att provkroppar förberedda enligt Boråsmetoden kan vara nedsänkta i sur miljö under en längre tidsperiod utan att det påverkar materialen.

##### **Kontroll av gummiduk med syra**

Test utfördes där gummidukens motståndsförmåga mot sura lösningar kontrollerades. Tre försök genomfördes där kvadratiska bitar av duken sänktes ner i bägare med olika lösningar. Intresset låg i att undersöka vilken effekt en salpetersyralösning med pH 4 har på duken. Resultatet från denna kontroll skulle avgöra möjligheten att kombinera frostprovning enligt Boråsmetoden med accelererad urlakning.

För att säkerställa att pH-värdet verkligen hade någon inverkan utsattes gummiduken även för rent avjoniserat vatten respektive koncentrerad salpetersyra (65%). Den senare ansågs vara ett extremfall. Uppnåddes ett gott resultat i denna lösning skulle pH 4 inte vara något problem för materialet. Försöksupställningen presenteras i figur 4.9.

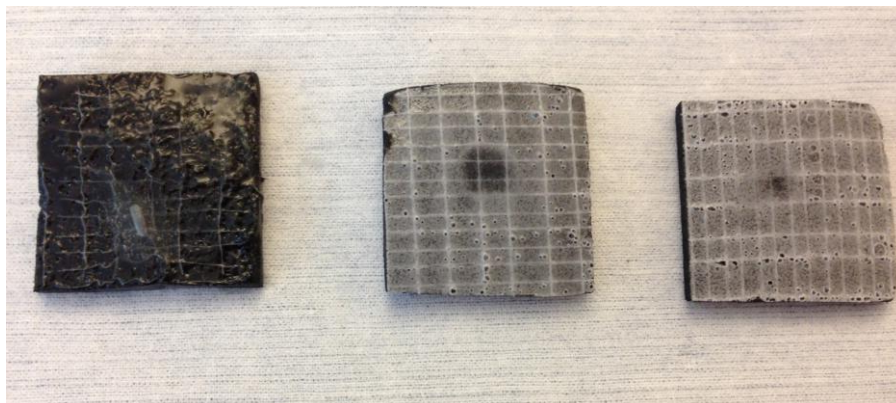


## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet



Figur 4.9 - Uppställning av experiment. Kvadratiske bitar med sida 3 cm placerade i 20 ml lösning med olika pH. Bägarnas öppning täcktes sedan med avdunstningsskydd.

Efter en veckas tid togs bitarna ut, fotograferades och vägdes. Resultatet presenteras i figur 4.10, vilket visar gummidukens klisteryta, samt i tabell 4.3, vilket visar gummidukarnas viktändring efter testet.



Figur 4.10 - Resultat efter en veckas tid. Från vänster: Bit av gummiduk placerad i konc. salpetersyra, pH 4 respektive avjoniserat vatten.

Tabell 4.3 - Inverkan av pH på bit av gummiduk.

Lösning	Vikt före [g]	Vikt efter [g]	Förändring [%]
Salpetersyra konc.	0,310	0,903	+ 191
Salpetersyra pH 4	0,318	0,410	+ 28,9
Avjon. vatten	0,320	0,424	+ 32,5

Figur 4.10 visar klisterytan av gummiduken. Av figuren framgår det tydligt att den koncentrerade salpetersyran haft en stor inverkan på klistret. Hela skiktet löstes upp av den koncentrerade syran medan de övriga två bitarna lämnats utan nämnvärda

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---

skador. De runda klisterlösa partierna i mitten av bitarna berodde inte på lösningen utan på det faktum att klistret fastnat på bågarnas botten.

Som väntat var viktökningen för biten i koncentrerad salpetersyra störst (> 190%). Förklaringen till detta antas vara att den starka syran förstört porväggarna i materialet och skapat ett öppet porsystem, vilket har fyllts med vatten. Viktökningen för bitarna som legat i avjoniserat vatten respektive salpetersyra med pH 4 ligger på samma nivå, vilket är ett positivt resultat och tolkas som att pH 4 inte hade samma förstörande effekt som den koncentrerade syran.

Resultat av experimentet visar att gummiduken som används till att täta provkroppar av betong för frostprovning enligt Boråsmetoden har en god motståndsförmåga mot sura lösningar. Det intressanta var hur duken skulle påverkas av en lösning med pH 4 och efter testet kan det konstateras att det inte uppkommit någon nämnvärd skada, vare sig på gummimaterialet eller klisterytan.

### Kontroll av limsträng med syra

Liknande test utfördes för att kontrollera limsträngens motståndsförmåga mot sura angrepp. Precis som för gummiduken uppvisade limsträngen inga skador.

## 4.5 Provningsmatris

Med valen av provningsmetoder klara för de tre olika skademekanismerna bestämdes sedan vilka kombinationer av skademekanismerna som skulle studeras. För att kunna påvisa att det uppkommit synergieffekter mellan skademekanismerna var det av stor vikt att alla möjliga kombinationer prövades. Med tre skademekanismer erhöles inledningsvis sju olika kombinationer:

*Tabell 4.4 - Preliminär provningsmatris.*

Kombination	Skademekanismer		
1	Frostprovning	-	-
2	Frostprovning	Urlakning	-
3	Frostprovning	-	Nötning
4	Frostprovning	Urlakning	Nötning
5	-	Urlakning	Nötning
6	-	Urlakning	-
7	-	-	Nötning

Till skillnad från frostprovning och nötning skulle urlakning som ensam skademekanism inte generera några avskalningar eller partiklar att samla upp från provkropparnas yta utan endast leda till en försvagning av betongens yttersta skikt. Av denna anledning bestämdes att urlakning som ensam skademekanism inte skulle

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

studeras. Till de sex återstående kombinationerna tillkom sedan ytterligare parametrar i form av olika:

- vätskor för frostprovning (avjoniserat vatten eller 3% NaCl)
- pH för urlakning (pH 4 eller pH 7)
- provningsytor (sågad yta eller formyta)

Vidare bestämdes att två olika betongkvaliteter skulle studeras; vct 0,62 och vct 0,54 (presenteras mer utförligt i avsnitt 4.6.1). Med alla kombinationer och parametrar skulle antalet unika kombinationer uppgå till 30 stycken per betongkvalitet. Med tre provkroppar per kombination (för medelvärde) skulle denna provningsmatris därmed kräva 180 provkroppar för experimentet. Intresset låg inte i att undersöka alla kombinationer varför vissa kunde tas bort och provningsmatrisen kunde kortas ned.

För frostprovning låg intresset huvudsakligen i att utsätta provkroppar för avjoniserat vatten, eftersom helt rent vatten bäst representerar den miljö (sötvatten) som betong i vattenkraftverksdammar utsätts för. Dock så bestämdes att några provkroppar ändå skulle genomgå frostprovning med saltlösning på 3% NaCl, se tabell 4.5. Resultatet från denna provning skulle mest troligt generera större avskalningar än någon annan kombination. Intressant skulle då bli att kontrollera ifall en kombination av frostprovning (sötvatten), urlakning och nötning skulle kunna generera motsvarande mängd avskalningar.

För urlakning bestämdes att huvuddelen av provkropparna skulle urlakas med pH 4. Att det tidigare valts två olika pH för urlakning var endast för att tydligare kunna kartlägga den inverkan som urlakning har på provkropparna. Fokus lades på det pH som skulle generera värst skador d.v.s. pH 4. För att påvisa skillnader mellan urlakning med pH 4 och pH 7 räckte det därmed med att endast ett fåtal provkroppar urlakades med pH 7, se tabell 4.5.

För valet av vilken typ av yta som skulle provas bestämdes att huvuddelen av provkropparna skulle prepareras för provning av sågad yta. På detta sätt skulle inverkan av eventuella slamskikt undvikas. För att jämföra inverkan av provningsyta samt kunna koppla resultatet från experimentet till betong i verkliga dammkonstruktioner bestämdes att ett antal provkroppar ändå skulle prepareras för provning av formyta. Slutligen bestämdes att alla kombinationer skulle provas på provkroppar från båda betongkvaliteter. Den slutliga provningsmatrisen kan ses i tabell 4.5. Samma provningsmatris gäller då även för vct 0,54.

Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Tabell 4.5 - Slutgiltig provningsmatris.

vct	Yta	Frostprovning	Urlakning	Nötning	Beteckning
0,62	Sågad	Söt	-	-	0,62 Söt
0,62	Sågad	Salt	-	-	0,62 Salt
0,62	Sågad	Söt	pH 7	-	0,62 Söt+pH7
0,62	Sågad	Söt	pH 4	-	0,62 Söt+pH4
0,62	Form	Söt	pH 4	-	0,62 F Söt+pH4
0,62	Sågad	Söt	pH 7	Nöt	0,62 Söt+pH7+Nöt
0,62	Sågad	Söt	pH 4	Nöt	0,62 Söt+pH4+Nöt
0,62	Form	Söt	pH 4	Nöt	0,62 F Söt+pH4+Nöt
0,62	Sågad	Söt	-	Nöt	0,62 Söt+Nöt
0,62	Sågad	-	pH 4	Nöt	0,62 pH4+Nöt
0,62	Sågad	-	-	Nöt	0,62 Nöt

Förutom ovanstående 11 kombinationer lades det till ytterligare tre kombinationer för vardera betongkvalitet, se tabell 4.6. Syftet med dessa var att undersöka den effekt urlakning under en längre tid har på avskalningarna. Provkroppar med dessa kombinationer kommer att utsättas för urlakning under hela 8 veckor samt avslutningsvis för en veckas frostprovning och nötning efter det.

Tabell 4.6 - Tillägg till provningsmatris. Kombinationer där urlakning sker under längre tid.

vct	Yta	Frostprovning	Långtidsurlakning	Nötning	Beteckning
0,62	Sågad	Söt	pH 7	Nöt	0,62 L Söt+pH7+Nöt
0,62	Sågad	Söt	pH 4	Nöt	0,62 L Söt+pH4+Nöt
0,62	Sågad	Salt	pH 4	Nöt	0,62 L Salt+pH4+Nöt

Avslutningsvis bestämdes att totalt fyra provkroppar per betongkvalitet skulle användas för urlakningskontrollen d.v.s. för den kontroll som skulle utföras för att se om någon urlakning verkligen sker, se avsnitt 4.2.1. Förutom att undersöka inverkan av pH bestämdes även att inverkan av provyta skulle undersökas, se tabell 4.7.

Tabell 4.7 - Provkroppar för urlakningskontroll.

vct	Yta	Frostprovning	Urlakning	Nötning	Beteckning
0,62	Sågad	-	pH 7	-	0,62 pH7
0,62	Sågad	-	pH 4	-	0,62 pH4
0,62	Form	-	pH 7	-	0,62 F pH7
0,62	Form	-	pH 4	-	0,62 F pH4

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---

Genom att summera alla provkroppar som krävdes för varje kombination samt urlakningskontroll erhöles att experimentet totalt skulle kräva 44 provkroppar per betongkvalitet. Då en standardkub genererar två provkroppar motsvarar detta 22 standardkuber. Vidare bestämdes att 3 standardkuber skulle användas för hållfasthetsprovningen varför 25 standardkuber per betongkvalitet gjöts.

### 4.6 Material

#### 4.6.1 Betong

I den experimentella studien har två olika betongkvaliteter studerats. Recepten till betongkvaliteterna har erhållits av Rosenqvist på Vattenfall R & D och skall motsvara betong som använts för byggnation av vattenkraftverksdammar under olika tidsperioder. Den sämre av dessa är en betong med ett vct på 0,62 och utan någon inblandning av luftporbildande medel. Denna betongkvalitet skall efterlikna den betong som användes under perioden 1930-1950 (Rosenqvist et al. 2013).

Den andra betongkvaliteten kan sägas representera perioden 1950-1970 vilket är en period då betydligt bättre betong användes för vattenkraftverken. Till skillnad från den sämre betongen har betong av denna kvalitet både högre täthet samt tillsättning av luftporbildande medel. För denna betongkvalitet valdes vct 0,54 samt luftporbildande medel av typen Mapeair 50 vilket ger betongen ett betydligt bättre skydd mot frostsador. För båda betongkvaliteter användes cement av typen CEM I Anläggningscement. För fullständiga betongrecept finns detta att hitta i bilaga A och bilaga B (Rosenqvist et al. 2013).

Betongen gjöts i Vattenfall Research & Development:s betonglaboratorium. Direkt vid gjutning uppmättes sättmått, våtdensitet och lufthalt för båda betongkvaliteterna. Efter 28 dagars vattenhärdning kunde betongens torrdensitet och tryckhållfasthet bestämmas. Den nygjutna och härdade betongens egenskaper visas i tabell 4.8.

*Tabell 4.8 - Nygjuten och härdad betongs egenskaper.*

vct	Sättmått [mm]	Lufthalt [%]	Våtdensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Torrdensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryckhållfasthet [MPa]
0,62	80	1,3	2375	2329	40,2
0,54	25	4,1	2350	2308	43,0

#### 4.6.2 Provkroppar

Av de båda betongkvaliteterna bestämdes att vardera 100 liter skulle gjutas. Denna volym räckte för att generera betong för 25 standardkuber per betongkvalitet med dimension 150x150x150 mm<sup>3</sup>. Totalt användes därmed 50 standardkuber för experimentet.

Efter gjutning förvarades kuberna det första dygnet under plastfilm för att undvika uttorkning av ytan. Därefter avformades samtliga kuber och placerades i vattenbad för härdning under vatten i 28 dygn. Kalkmättat vatten användes för att förhindra urlakning av betongen innan experimentet påbörjades.

Efter vattenhärdning togs samtliga kuber upp från vattenbadet, tre kuber av vardera betongkvalitet användes för bestämning av betongens 28 dygns tryckhållfasthet medan resterande kuber placerades i klimatrum till dess att experimenten påbörjades. I klimatrummet hölls temperatur och relativ fuktighet konstant på 20°C respektive 65% RF för att undvika inverkan av eventuella temperaturvariationer samt förändringar i luftfuktighet.

Dagarna innan experimenten startades togs kuberna ut för att delas och prepareras enligt Boråsmetoden. Av vardera betongkvalitet preparerades 18 kuber enligt förfarande 1 (sågad yta) och resterande fyra kuber enligt förfarande 2 (formyta). Varje kub genererade två provkroppar med dimension 150x150x50 mm<sup>3</sup> vilket innebär att det totalt erhöles 72 provkroppar för provning av sågad yta och 16 för provning av formyta. I figur 4.11 kan en del av provkropparna beskådas efter att de preparerats för frostprovning.



Figur 4.11 - Provkroppar innan experimentet startades.

## **4.7 Utrustning**

### **4.7.1 Titratorutrustning**

För urlakningsförsöken användes en titratorutrustning för mätning av vattnets pH och för tillsättning av salpetersyra. Titratorutrustningen var av modell 888 Titrande från Metrohm vilket med medföljande programvara kunde visa förbrukad volym syra samt variation av pH i vattnet över tid.

### **4.7.2 Klimatskåp**

För frostprovning användes klimatskåp som fanns att tillgå i frostprovningssrummet hos Vattenfall Research & Development. Klimatskåpen som användes var av modell CFA-700S från Kylcity AB och var sedan tidigare programmerade av personal på Vattenfall R & D för regelbunden provning av frostbeständighet enligt Boråsmetodens föreskrifter.

## 4.8 Huvudstudie

### 4.8.1 Metod – veckovis provning

Experimenten utfördes under totalt nio veckors tid. Under dessa veckor utsattes provkropparna för veckovis påverkan av de tre skademekanismerna. Kombinationen av skademekanismer avgjorde vilken skademekanism som provkropparna utsattes för först. Urlakning var alltid den första skademekanismen som provkroppar utsattes för, följt av frostprovning och slutligen nötning. Detta beror på att urlakning användes för att försvaga ytan för de två övriga skademekanismerna. Efter avslutandet av varje frostprovningsvecka togs provkroppar ut för nötning respektive uppsamling och vägning av avskalningar.

Ett schema över den veckovisa provningen kan beskådas i sin helhet i bilaga C. Av schemat framgår vad provkroppar från varje kombination utsattes för under respektive vecka. Urlakning av provkroppar utfördes i två baljor, en för pH 7 och en för pH 4. I baljorna fanns dels provkroppar som utsattes för veckovis urlakning och dels provkroppar som utsattes för långtidsurlakning. Av schemat framgår att långtidsurlakning startade vecka 1 för både pH 4 och pH 7, se under rubriken långtidsurlakning i bilaga C. Samma gäller emellertid inte för veckovis urlakning. För veckovis urlakning gäller att urlakning med pH 4 startade vecka 1 men att urlakning med pH 7 startade vecka 2, se under rubriken veckovis provning i bilaga C. Anledningen till att veckovis urlakning med pH 7 försköts med en vecka berodde på att det endast fanns en titratorutrustning till förfogande. Genom förskjutningen kunde titratorutrustningen användas till den balja där det låg flest provkroppar.

Under rubriken 'Antalet provkroppar varje vecka' i bilaga C visas antalet provkroppar som låg i respektive balja. Av schemat framgår att det under vecka 1 låg 42 provkroppar i pH 4-baljan men endast 6 provkroppar i pH 7-baljan. Titratorutrustningen användes då för automatisk reglering av vattnets pH i pH 4-baljan. För pH 7-baljan utfördes manuell reglering av pH, detta innebar att vattnet i baljan kontrollerades varje timme under kontorstid med en handhållen pH-mätare. För att motverka den ökning av pH i vattnet som urlakning orsakade tillsattes en tillräcklig mängd syra för att få ner pH-värdet till önskad nivå.

Under vecka 2, då merparten av provkropparna i pH 4-baljan flyttades för frostprovning samt då veckovis urlakning med pH 7 startade, bytte baljorna plats. Titratorutrustningen användes då för automatisk reglering av vattnets pH i pH 7-baljan medan manuell reglering utfördes för vattnet i pH 4-baljan. På så sätt skiftade baljorna plats varje vecka, se bilaga C.

Veckovis urlakning av provkroppar utfördes under totalt åtta veckors tid. Med en veckas förskjutning för urlakning med pH 7 förlängdes experimentets totala



## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

varaktighet till nio veckor. Efter varje avslutad provningsvecka togs vätskeprover av respektive balja. Vattnet i baljorna byttes sedan ut mot nytt, detta utfördes dels för att undvika eventuell kalkmättnings av vattnet och dels för att efterlikna verkliga förhållanden där betong hela tiden utsätts för nytt mjukt vatten.

Med frostprovning varannan vecka innebär detta att uppvägning av avskalningar utfördes fyra gånger d.v.s. efter 7, 14, 21 och 28 fryscyklar. Detta tillvägagångssätt avviker från Boråsmetodens föreskrifter, vilka säger att avskalningar skall vägas upp efter 7, 14 och 28 fryscyklar för de fyra första frysprovningensveckorna. Totalt erhöles därmed fyra mätvärden för respektive kombination av frostprovning och veckovis urlakning.

För provkroppar som utsattes för frostprovning men inte veckovis urlakning gäller att dessa hela tiden stod i frysarna för frostprovning. För dessa samlades avskalningar upp och vägdes efter 7, 14, 21, 28, 42 och 56 fryscyklar, se bilaga C. Anledningen till att frostprovning genomfördes under 56 fryscyklar var för att sedan kunna jämföra summan av avskalningarna med krav enligt Boråsmetoden, se tabell 4.1.

Provkroppar som endast utsattes för nötning redovisas inte i schemat då nötning av dessa genomfördes under ett och samma tillfälle.

### **4.8.2 Metod – urlakningskontroll**

För urlakningskontrollen utfördes manuell mätning och reglering av pH. Provkropparna placerades i varsin hink med avjoniserat vatten där pH-värdet inledningsvis reglerats till önskat värde genom tillsättning av salpetersyra. Hälften av provkropparna urlakades med pH 4 och resterande med pH 7. Vattnet i hinkarna kontrollerades varje timme med en handhållen pH-mätare. För att motverka den ökning av pH i vattnet som urlakning orsakar tillsattes en tillräcklig mängd syra för att få ner pH-värdet till önskad nivå.

Då urlakningskontrollen krävde timvis tillsyn kunde denna kontroll endast utföras under arbetstid. Kontrollen utfördes därmed endast sju timmar varje arbetsdag, resterande tid pausades kontrollen genom att provkropparna togs upp ur vattnet och placerades i täta plastpåsar.

För att erhålla siffror på urlakningens förändring över tiden bestämdes att vattnet i hinkarna med jämna mellanrum skulle bytas ut mot nytt vatten. Innan bytena togs vattenprover från varje hink vilka sedan skickades iväg för analys med ICPAES instrumentet. Tiden mellan bytena sattes till 48 timmar vilket motsvarar cirka sju arbetsdagar, på detta sätt erhöles totalt fem vätskeprover per hink.

#### **4.8.3 Metod – yttre skador**

Efter varje avslutad provningsvecka, då avskalningar samlats upp från provkropparnas yta, har varje provkropp fotograferats. Detta har utförts i syfte att kartlägga den successiva nedbrytningen av provkropparnas yta. Tyvärr så bestämdes det att detta skulle utföras först vid avslutande av första provningsveckan varför provkropparna aldrig fotograferades innan experimentet påbörjades.

#### **4.8.4 Metod – tunnslipsanalys**

Från början var det tänkt att alla provkroppar som utsattes för långtidsurlakning avslutningsvis även skulle utsättas för frostprovning och nötning. I efterhand dök emellertid möjligheten upp om att skicka ett antal provkroppar för tunnslipsanalys vilket är en okulär analysmetod för undersökning av betongs mikrostruktur.

Vid tunnslipsanalys impregneras betongproverna med fluorescerande epoxi varefter väldigt tunna skivor sågas ut och undersöks med polarisationsmikroskop. För analys används antingen planpolariserat ljus (blåljus) eller korspolariserat (mörkfält) ljus. Analys av cementpastans struktur och homogenitet görs i blåljus där fluorescens i cementpastan uppkommer, ju tätare cementpasta desto lägre ljusintensitet.

Genom tunnslipsanalys skulle det gå att bestämma urlakningens inträngningsdjup från provkropparnas yta. Intressant var då att undersöka skillnader i skador på betong som urlakats med pH 4 respektive pH 7 samt skillnader mellan de två betongkvaliteterna. För detta ändamål avsattes två provkroppar av vardera betongkvalitet, en provkropp som urlakats med pH 4 och en som urlakats med pH 7. Totalt skickades fyra provkroppar för tunnslipsanalys. För att hinna få resultaten lagom till skrivandet av analysdelen behövde provkropparna skickas redan efter avslutandet av provningsvecka sex vilket innebär att de provkroppar som skickades för tunnslipsanalys endast hade urlakats under sex veckor (42 dagar).

## 5 Resultat

### 5.1 Veckovis provning

Resultatet från den veckovisa provningen presenteras nedan i fem underrubriker. Denna uppdelning har gjorts för att tydligare kunna urskilja skillnader och/eller likheter mellan de olika kombinationerna och parametrarna. För att direkt kunna jämföra diagrammen med varandra har samma skalor använts till alla diagram, undantaget är det diagram som visar avskalningar från provkroppar som har utsatts för frostprovning med salthaltigt vatten då dessa varit mycket större än avskalningar från övriga kombinationer. För alla diagram gäller att presenterade avskalningar kommer från provkroppar med sågad yta, undantaget är diagrammen som presenteras under avsnitt 5.1.5 vilka visar en jämförelse mellan avskalningar från sågad yta respektive formyta.

Avskalningar som presenteras i diagrammen nedan är ett medelvärde av avskalningar från tre provkroppar. Medelvärdet användes för att undvika eventuella missvisande resultat från singelprover. Vid jämförelse av avskalningar från varje singelprov visade sig avvikelserna dock vara låga.

#### 5.1.1 Inverkan av skademekanismer

I de fyra första diagrammen presenteras den inverkan som de olika skademekanismerna haft på provkropparna. Diagrammen har delats upp i olika betongkvaliteter samt olika urlakningsmetoder. I de två första diagrammen visas skademekanismernas inverkan på de olika betongkvaliteterna där urlakning utförts med pH 7.

I diagram 5.1 visas skademekanismernas inverkan på provkroppar med vct 0,62. Av diagrammet framgår att avskalningarna varit lägst för provkroppar som endast utsatts för frostprovning. Vid en kombination med urlakning med pH 7 eller nötning har avskalningarna ökat något men fortfarande varit låga. Det är först vid en kombination av de tre skademekanismerna som en märkbar ökning i avskalningar kunnat påvisas.

**Inverkan av mekanismer - vct 0,62 med pH 7**

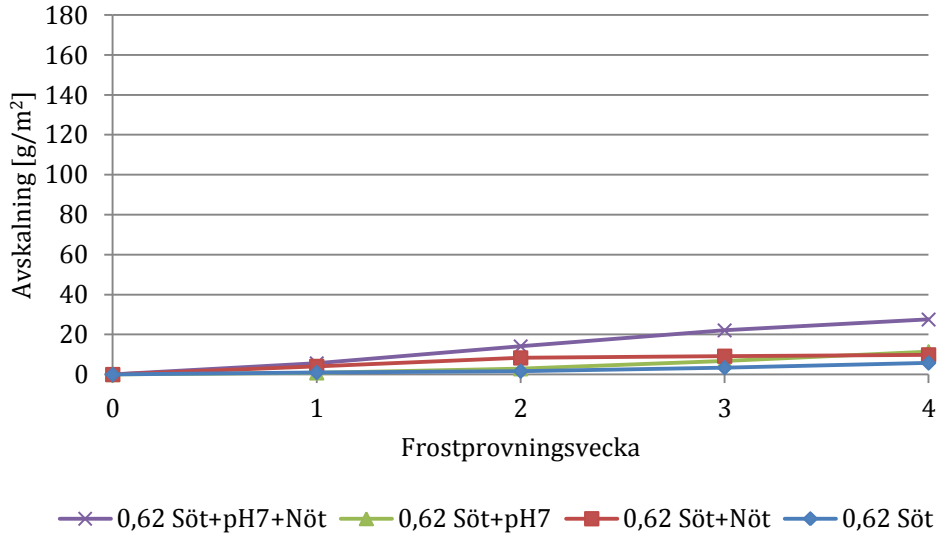


Diagram 5.1 – Inverkan av skademekanismerna på provkroppar med vct 0,62.

För provkroppar med vct 0,54 har skillnaderna mellan skademekanismerna varit lägre. Endast frostprovning gav inga vägbara avflagningar. Samma resultat erhöles då frostprovning kombinerades med urlakning med pH 7 eller nötning. En märkbar ökning i mängden avflagningar erhöles först då de tre skademekanismerna kombinerades, se diagram 5.2.

**Inverkan av mekanismer - vct 0,54 med pH 7**

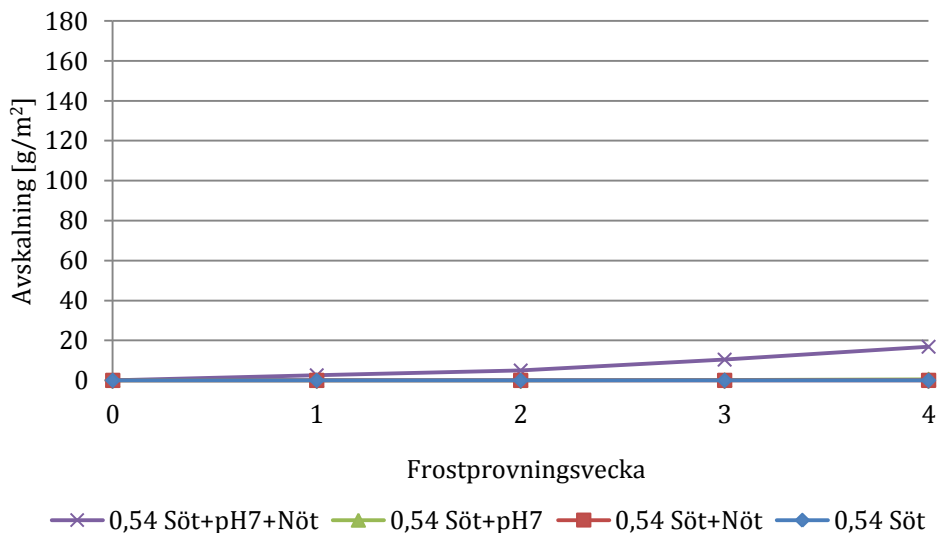


Diagram 5.2 - Inverkan av skademekanismerna på provkroppar med vct 0,54.

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

I diagram 5.3 – 5.4 presenteras samma kombinationer som tidigare med skillnaden att urlakning istället utförts med pH 4. I diagram 5.3 visas skademekanismernas inverkan på provkroppar med vct 0,62. Avflagningar från provkroppar som utsatts för en kombination av frostprovning och urlakning är nu märkbart större än avflagningar från frostprovning i kombination med nötning. Avflagningar från kombinationen av de tre skademekanismerna är nu mycket större än då urlakning utfördes med pH 7.

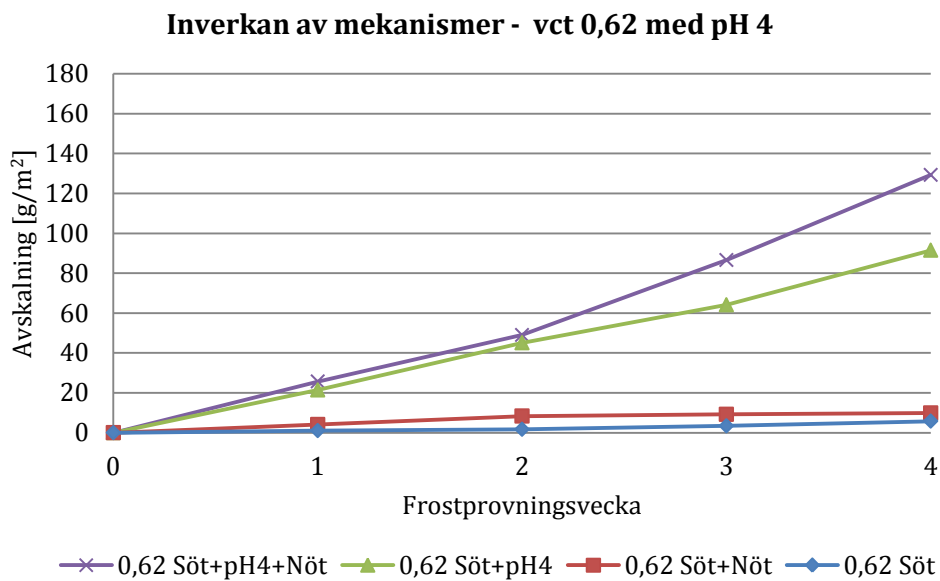


Diagram 5.3 - Inverkan av skademekanismerna på provkroppar med vct 0,62.

Liknande tendenser kan ses i mängden avskalningar från provkroppar med vct 0,54. Även för denna betongkvalitet har urlakning med pH 4 orsakat märkbart större avflagningar än för pH 7, se diagram 5.4.

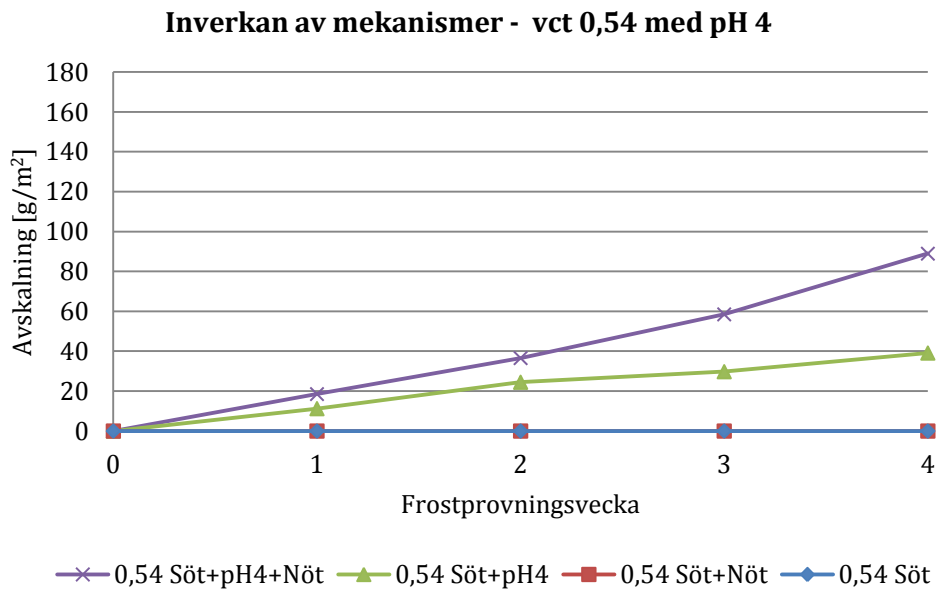


Diagram 5.4 - Inverkan av skademekanismerna på provkroppar med vct 0,54.

### 5.1.2 Inverkan av betongkvalitet

I diagram 5.5 presenteras skillnader i avflagningar mellan de två betongkvaliteterna. Blå linjer representerar urlakning med pH 7 medan röda representerar urlakning med pH 4. Skillnader i nyans anger betongkvalitet, där den mörkare nyansen representerar vct 0,62. För båda fallen är avskalningarna större för provkroppar med vct 0,62.

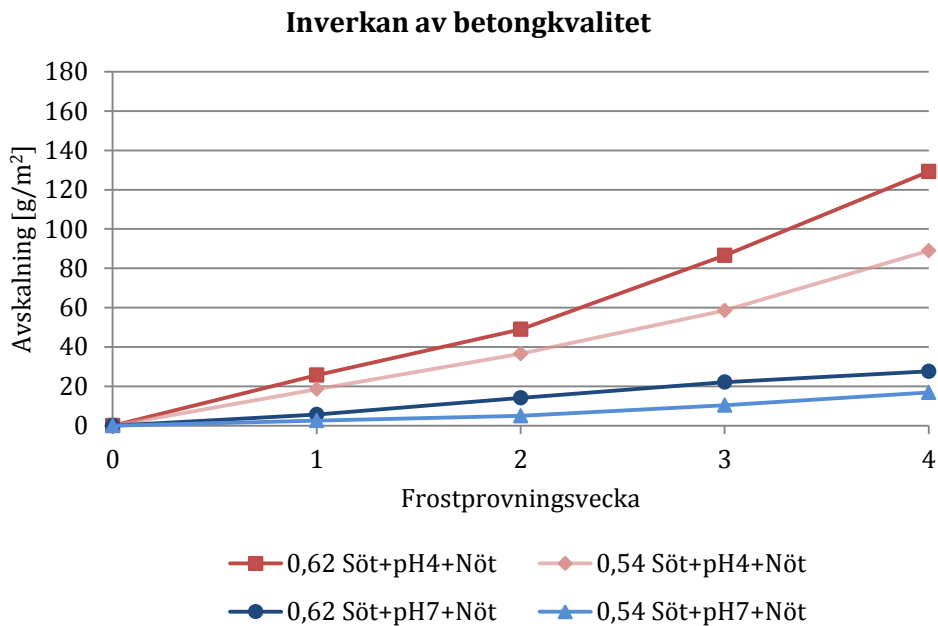


Diagram 5.5 – Jämförelse av avskalningar mellan vct 0,54 och vct 0,62.

I diagram 5.6 presenteras resultat från frostprovningar som utförts med en saltlösning på 3% NaCl. Resultatet från dessa provningar har valts att presenteras i ett diagram med en annan skala. Detta då avskalningar för vct 0,62 är mycket större än alla övriga kombinationer. Av diagrammet framgår att avskalningarna för vct 0,62 uppgått till cirka 7000 g/m<sup>2</sup> efter 56 fryscyklar (8 veckor). För vct 0,54 har saltlösning endast bidragit till en liten ökning i avskalningar, cirka 40 g/m<sup>2</sup> efter 56 fryscyklar.

### Inverkan av betongkvalitet

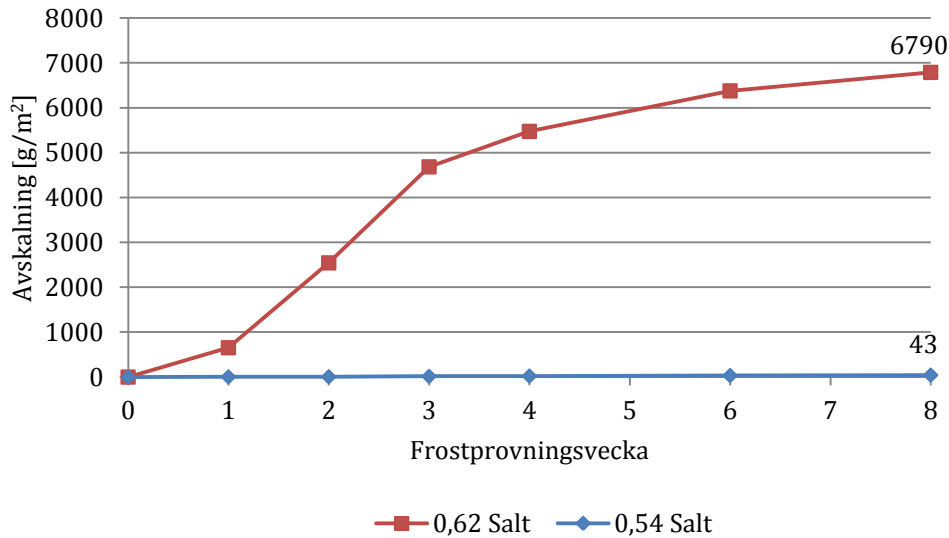


Diagram 5.6 – Inverkan av salt. Jämförelse mellan vct 0,54 och vct 0,62.

### 5.1.3 Inverkan av urlakningsmetod

I diagram 5.7 – 5.8 presenteras skillnader mellan avskalningar för provkroppar som har urlakats med pH 4 respektive pH 7. Av båda diagram framgår att urlakning med pH 4 resulterat i större avskalningar än urlakning med pH 7.

### Inverkan av urlakningsmetod - vct 0,62

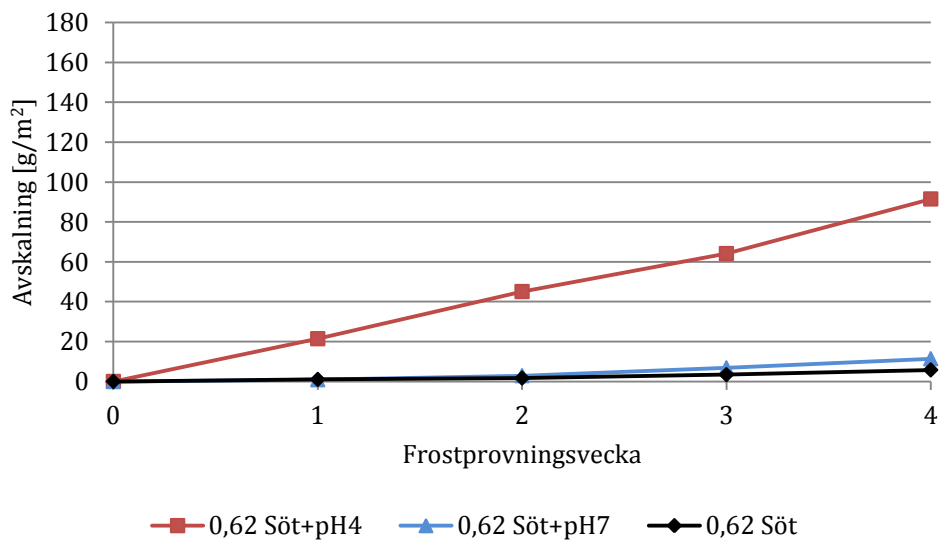


Diagram 5.7 – Inverkan av pH på provkroppar med vct 0,62.



### Inverkan av urlakningsmetod - vct 0,54

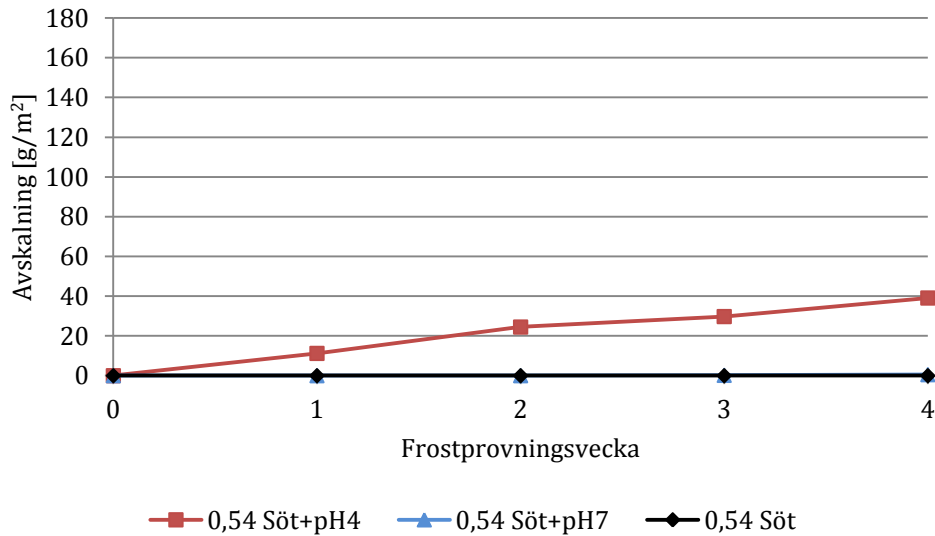


Diagram 5.8 - Inverkan av pH på provkroppar med vct 0,54.

#### 5.1.3.1 Inverkan av långtidsurlakning

För att ytterligare påvisa den inverkan som urlakning har i kombination med frostprovning och nötning jämfördes avskalningar från provkroppar som utsatts för långtidsurlakning (8 provningsveckor) med provkroppar som utsatts för vanlig urlakning (1 provningsvecka).

Då resultatet från långtidsurlakning endast gav ett värde (frostprovning sista veckan) jämförs dessa med avskalningar från första frostprovningssveckan för provkroppar som utsatts för vanlig urlakning, se diagram 5.9 – 5.10.

### Inverkan av urlakningsmetod - vct 0,62

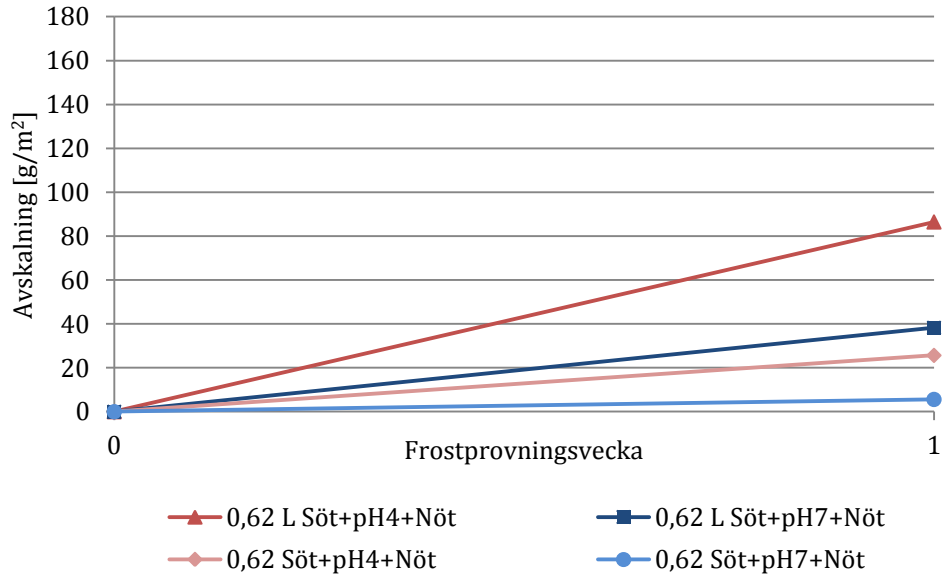


Diagram 5.9 – Inverkan av långtidsurlakning, vct 0,62.

### Inverkan av urlakningsmetod - vct 0,54

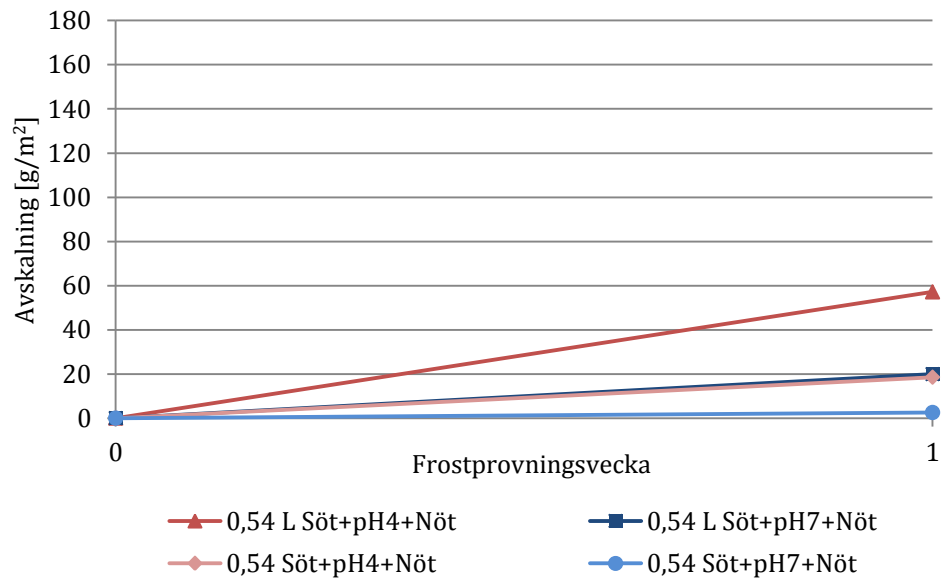


Diagram 5.10 – Inverkan av långtidsurlakning, vct 0,54.

#### 5.1.4 Inverkan av synergieffekter

Hittills har resultaten som presenterats visat att avskalningar ökar då skademekanismerna kombineras. Allra störst avskalningar har erhållits då de tre skademekanismerna kombinerats. Resultaten i sig är tydliga men bevisar inte att skademekanismerna samverkat till den grad att synergieffekter uppkommit. För att kontrollera ifall det uppkommit synergieffekter har två jämförelser gjorts där avskalningar från provkroppar som utsatts för en kombination av de tre skademekanismerna jämförts med summan av avskalningar från provkroppar som utsatts för enskilda skademekanismer.

I jämförelse 1 jämfördes avskalningar orsakade av en kombination av de tre skademekanismerna (kombination 4 i tabell 4.1) med summan av avskalningar orsakade av endast frostprovning samt avskalningar orsakade av kombinationen urlakning och nötning ( $\Sigma$  kombination 1 + kombination 5 i tabell 4.1). Resultatet av jämförelse 1 presenteras i diagram 5.11. Av diagrammet framgår att avskalningar orsakade av en kombination av de tre skademekanismerna är störst, detta gäller för båda betongkvaliteter. För att tydliggöra ökningen visas jämförelse 1 även med värden, se tabell 5.1.

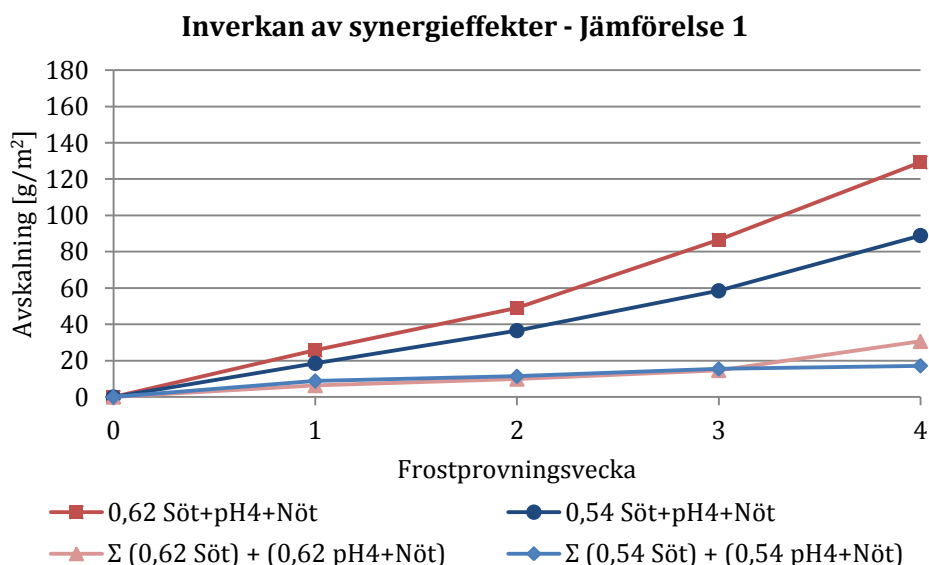


Diagram 5.11 – Inverkan av synergi, jämförelse 1.

Tabell 5.1 – Inverkan av synergieffekter, jämförelse 1.

vct	Söt+pH4+Nöt [g/m <sup>2</sup> ]	$\Sigma$ (Söt) + (pH4+Nöt) [g/m <sup>2</sup> ]	Ökning [g/m <sup>2</sup> ]	Ökning [%]
0,62	129	31	98	316
0,54	89	17	72	424

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

I jämförelse 2 jämfördes avskalningar orsakade av en kombination av de tre skademekanismerna (kombination 4 i tabell 4.1) med summan av avskalningar orsakade av kombinationen frostsprovnings och urlakning samt avskalningar orsakade av endast nötning ( $\Sigma$  kombination 2 + kombination 7 i tabell 4.1). Resultatet av jämförelse 2 presenteras i diagram 5.12 respektive tabell 5.2. Även här är avskalningar orsakade av en kombination av de tre skademekanismerna störst, detta gäller för båda betongkvaliteter. För att tydliggöra ökningen visas jämförelse 2 även med värden, se tabell 5.2.

### Inverkan av synergieffekter - Jämförelse 2

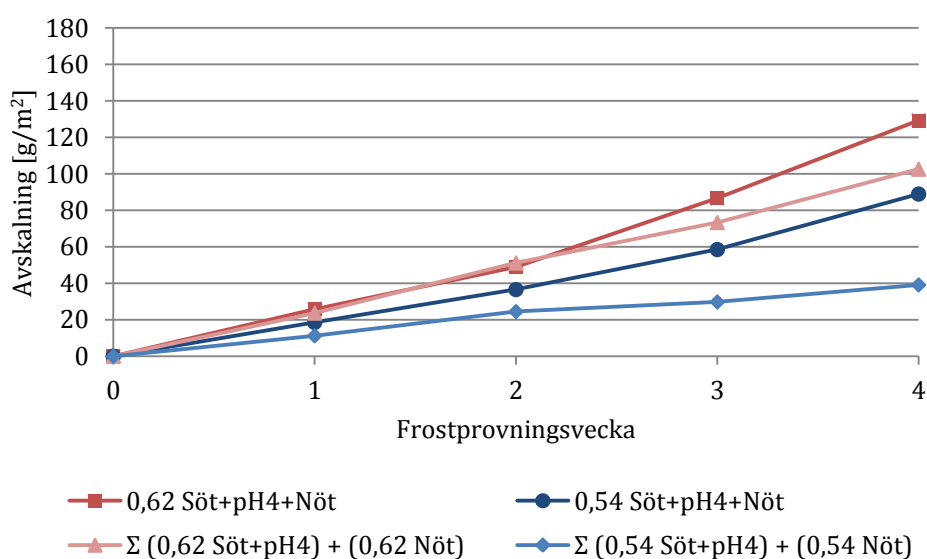


Diagram 5.12 – Inverkan av synergi, jämförelse 2.

Tabell 5.2 – Inverkan av synergieffekter, jämförelse 2.

vct	Söt+pH4+Nöt [g/m <sup>2</sup> ]	$\Sigma$ (Söt) + (pH4+Nöt) [g/m <sup>2</sup> ]	Ökning [g/m <sup>2</sup> ]	Ökning [%]
0,62	129	103	26	25
0,54	89	39	50	128

### 5.1.5 Jämförelse mellan sågad yta och formyta

Skillnader mellan sågad yta och formyta visas i diagram 5.13 – 5.14. I det första diagrammet visas skillnader mellan ytorna på provkroppar som utsatts för en kombination av de tre skademekanismerna. Av diagrammet framgår tydligt att provkroppar som har provats med formyta generellt har större avskalningar, detta gäller för båda betongkvaliteterna, se diagram 5.13.

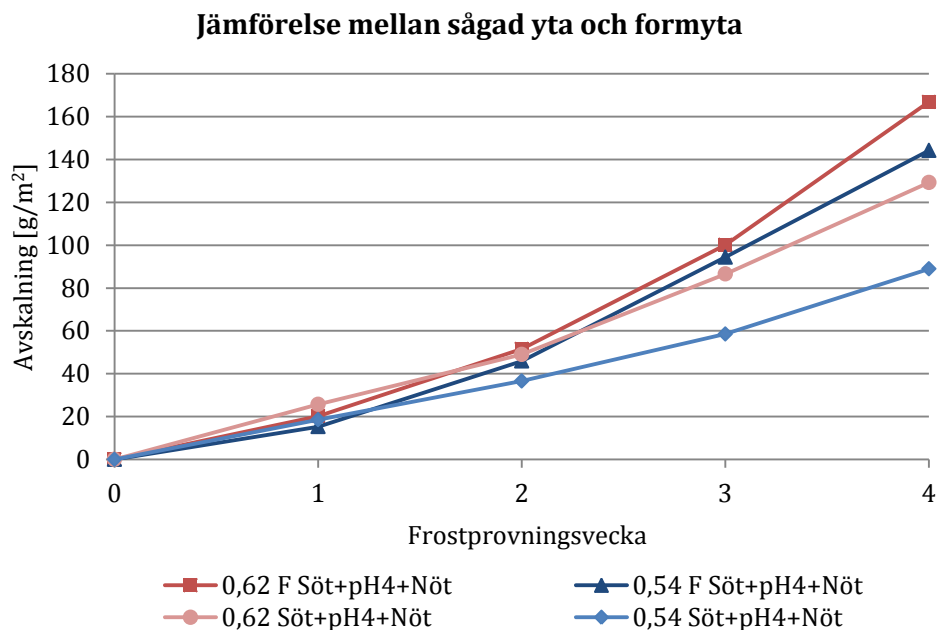


Diagram 5.13 – Inverkan av provyta vid kombination av de tre skademekanismerna.

Samma resonemang gäller emellertid inte riktigt då provkroppar med endast frostprovning och urlakning studerats. För vct 0,62 är nu istället avskalningarna hos provkroppar med den sågade ytan större. När det gäller vct 0,54 har provkroppar med formyta genererat större avskalningar än provkroppar med sågad yta, se diagram 5.14.

### Jämförelse mellan sågad yta och formyta

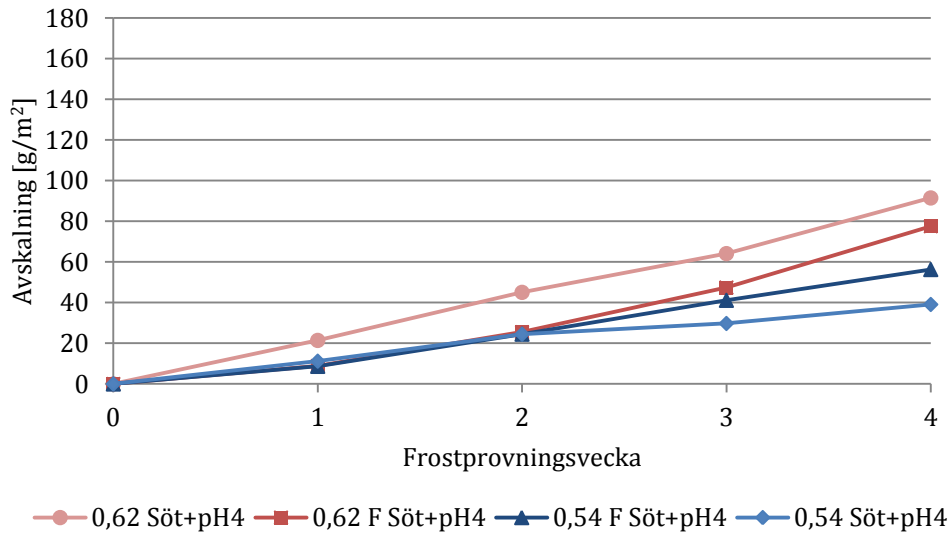


Diagram 5.14 – Inverkan av provytan vid kombination av frostprovning och urlakning.

#### 5.1.6 Yttre skador

Resultatet från den okulära undersökningen presenteras i form av bildserier vilka visar skillnaden i skador på provkroppar med sågad yta och formyta efter frostprovsningsvecka 1 respektive efter frostprovsningsvecka 4. Dessa provkroppar har utsatts för en kombination av de tre skademekanismerna. Önskvärt hade varit att kunna visa bilder på provkropparnas yta före respektive efter experimentet men då det i efterhand bestämdes att skadeutvecklingen skulle dokumenteras finns inga bilder att visa på provytorna innan frostprovsningsvecka 1. På den positiva sidan erhöll provkropparna inga större skador under den första provningsveckan varför jämförelsen mellan första och sista frostprovsningsveckan ändå är relevant att visa.

I figurerna 5.1 – 5.4 visas provkroppar med sågad yta från vardera betongkvalitet. I figurerna kan det ses att avskalningar av cementpastan lett till att konturen av ballastkornen nu tydligare går att urskilja. I vissa fall har tillräckligt mycket av cementpastan försvunnit att det till och med lett till en successiv friläggning av de allra minsta ballastkornen i provytan.

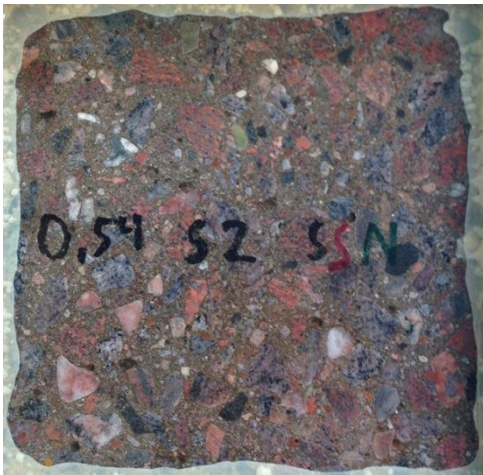
## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet



Figur 5.1 – Provkropp med sågad yta och vct 0,62 efter provningsvecka 1.



Figur 5.2 – Provkropp med sågad yta och vct 0,62 efter provningsvecka 4.



Figur 5.3 – Provkropp med sågad yta och vct 0,54 efter provningsvecka 1.



Figur 5.4 – Provkropp med sågad yta och vct 0,54 efter provningsvecka 4.

I figurerna 5.5 – 5.8 visas provkroppar med formyta från respektive betongkvalitet. Vid jämförelse mellan provytornas utseende efter frostprovningssvecka 1 respektive efter frostprovningssvecka 4 syns en förändring i form av en förlust av ytans yttersta skikt. På vissa ställen går det att urskilja de underliggande ballastkornen.



Figur 5.5 – Provkropp med formyta och vct 0,62 efter provningsvecka 1.



Figur 5.6 – Provkropp med formyta och vct 0,62 efter provningsvecka 4.



Figur 5.7 – Provkropp med formyta och vct 0,54 efter provningsvecka 1.



Figur 5.8 – Provkropp med formyta och vct 0,54 efter provningsvecka 4.

## 5.2 Vätskeanalys - urlakningskontroll

Resultat från ICPAES instrument gav halten joner som hade urlakats ur betongen. Då betong förutom kalciumhydroxid och kalciumsilikathydrat även innehåller andra föreningar bestämdes att halten urlakade joner från fler ämnen skulle studeras. På så sätt skulle en bättre uppfattning om urlakningens omfattning erhållas. För att veta vilka ämnen som kunde vara av intresse att undersöka studerades återigen de urlakningsstudier som användes som underlag vid framtagandet av den egna urlakningsmetoden, se avsnitt 4.2. Slutligen föll valet på kalcium (Ca), kisel (Si), aluminium (Al), järn (Fe), kalium (K), magnesium (Mg), natrium (Na) och svavel (S).



## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Fokus har lagts på Ca och Si medan halterna av resterande ämnen presenteras i bilaga D.

Då urlakning dels utfördes i stora baljor och dels i mindre hinkar representerade de olika antal provkroppar samt olika vattenvolymer. För att kunna jämföra urlakad mängd joner mellan provkropparna i de stora baljorna med provkropparna i de enskilda hinkarna har den från vätskeanalysen erhållna enheten på mg/l därför räknats om till g/m<sup>2</sup>-provkropp. Enhetsomvandlingen kan beskådas i bilaga E.

### Vätskeanalys - urlakningkontroll

I diagram 5.15 visas urlakning av kalcium under en period på 10 dagar. Av diagrammet framgår det att provkroppar som urlakats med pH 4 haft större urlakning av kalcium än provkroppar som urlakats med pH 7. De fyra översta linjerna i diagrammet visar urlakning med pH 4 av fyra provkroppar med olika vct och provtytor. Den allra högsta urlakade mängden kalcium erhålls från provkropp 0,62 Form, som sedan följs åt av 0,54 Form, 0,62 Sågad och sist 0,54 Sågad. Skillnaderna i urlakad mängd kalcium är tydlig mellan dessa provkroppar. För de fyra nedersta linjerna, vilka representerar provkropparna som urlakats med pH 7, är skillnaderna mycket mindre och nästintill lika vilket gör det svårare att avgöra vilka av provkropparna som mest kalcium urlakats från.

### Urlakning av kalcium

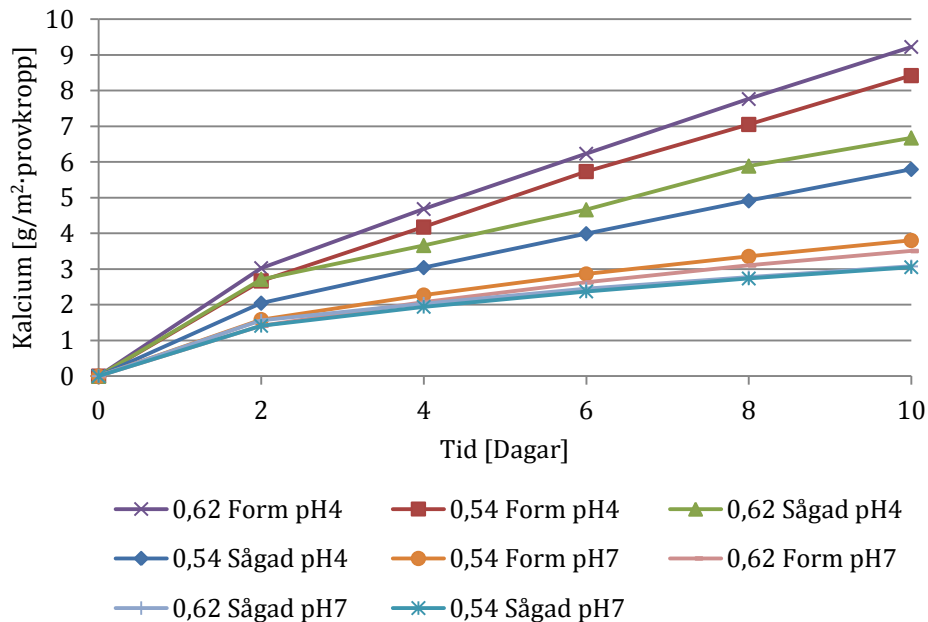


Diagram 5.15 – Halten urlakad kalcium. Inverkan av betongkvalitetet, provyta samt pH.

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

I diagram 5.16 visas urlakning av kisel. Jämfört med urlakningen av kalcium är denna mycket mindre. Vid jämförelse mellan halten urlakad kisel för urlakning som har utförts med pH 7 respektive pH 4 ses inga märkbara skillnader. Samma gäller för typ av betongkvalitet samt typ av provyta.

### Urlakning av kisel

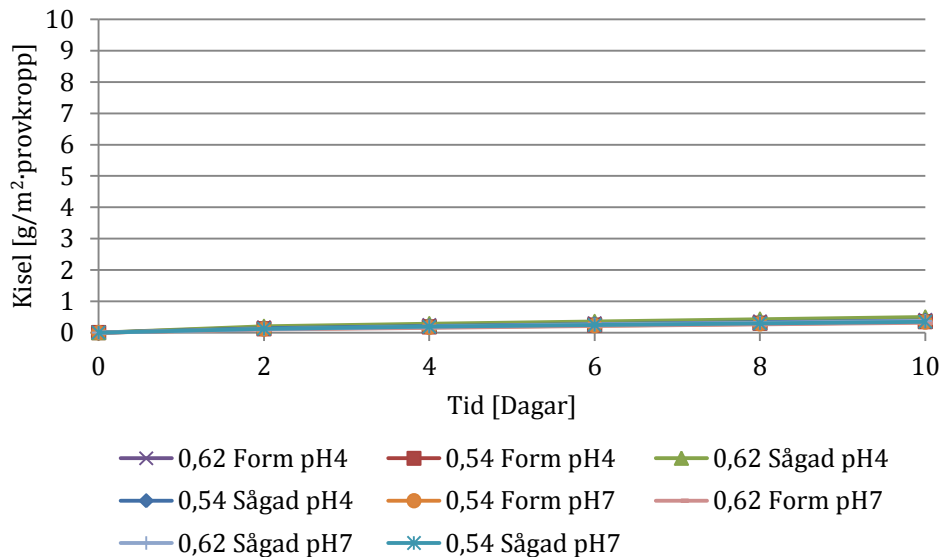


Diagram 5.16 – Halten urlakad kisel. Inverkan av betongkvalitetet, provyta samt pH.

### Vätskeanalys – veckovis provning från pH 4- och pH 7-baljan

I diagram 5.17 visas provkropparnas urlakning av olika ämnen i pH 4-baljan under 8 veckors tid. Det som framgår tydligt är att det som urlakats mest är kalcium medan urlakning av de andra ämnena var lägre.

### Urlakning av joner i pH 4-baljan

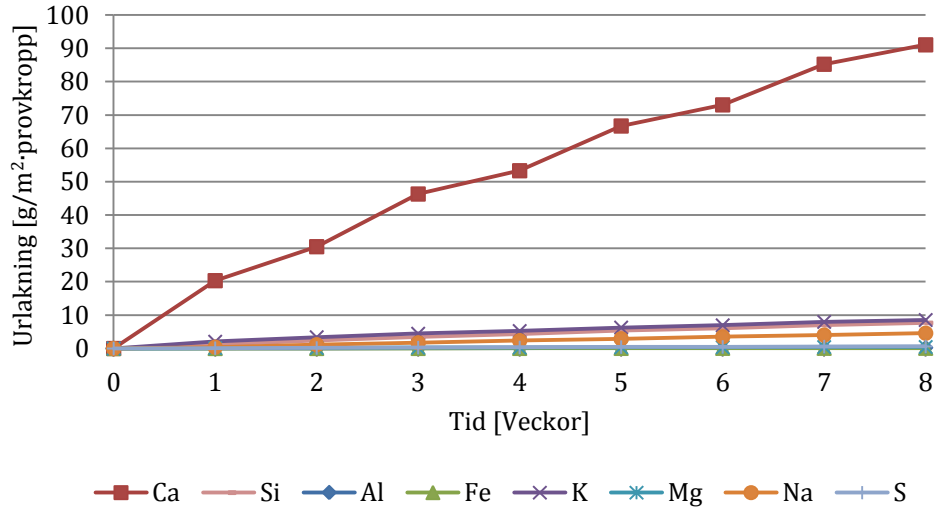


Diagram 5.17 – Halten urlakade joner, pH 4-balja.

För urlakning av olika ämnen i pH 7-baljan presenteras dessa i diagram 5.18. Urlakning av kalcium är lägre jämfört med pH 4-baljan. För urlakning av de resterande ämnena är halterna fortfarande låga.

### Urlakning i pH 7-baljan

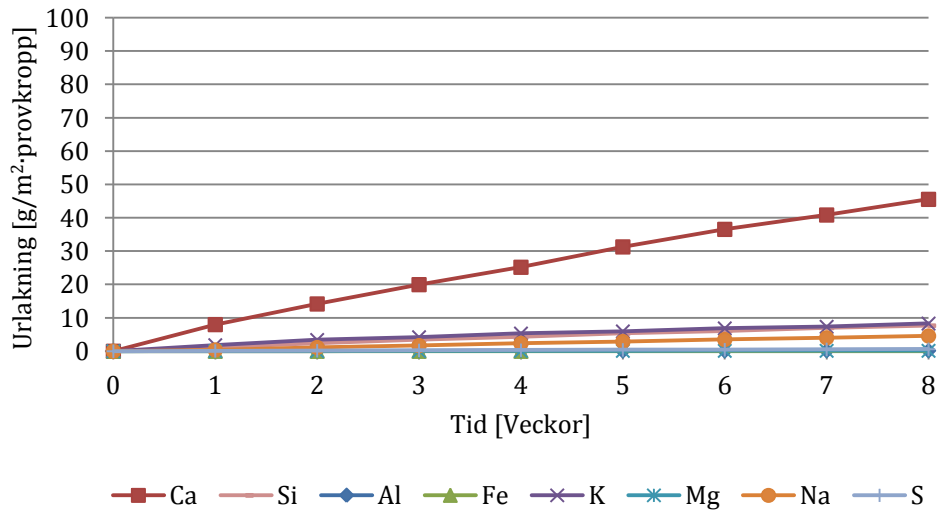


Diagram 5.18 – Halten urlakade joner, pH 7-balja.

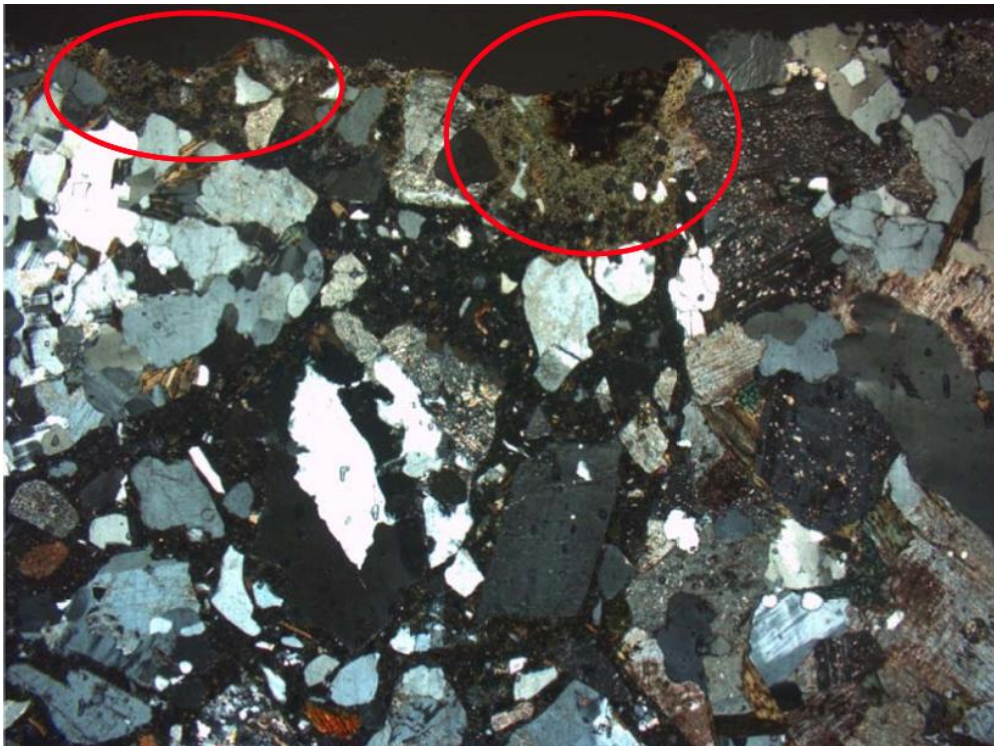
### 5.3 Tunnslipsanalys

Resultatet och analysen som har utförts av CBI presenteras i sin helhet i bilaga F, nedan följer en sammanfattning av resultatet.

Två provkroppar av vardera betongkvalitet användes för analys med polarisationsmikroskåp. En provkropp av vardera betongkvalitet som urlakats med pH 4 respektive pH 7. Vid analys med korspolariserat ljus har det upptäckts karbonatiserad betong i det yttersta ytskiktet hos samtliga prover. Karbonatisering har skett på olika djup hos de olika proverna men har överlag varit liten i samtliga prover (< 1 mm). Resultatet från tunnslipsanalysen har presenterats i bildform. Generellt gäller att det varit svårt att se några skillnader mellan proverna. Nedan visas därför bilder på endast en provkropp. För bilder på övriga provkroppar hänvisas till bilaga F.

#### Tunnslip från provkropp vct 0,54 pH 4

I figur 5.9 visas resultatet från tunnslip tagen från provkroppen med vct 0,54 och pH 4 vilken har analyserats med korspolariserat ljus. I översta skiktet går det att urskilja gulaktiga korniga områden närmast ytan vilket är karbonatiserad betong, som synes är denna begränsad till ett område högst 1 mm ned från ytan.

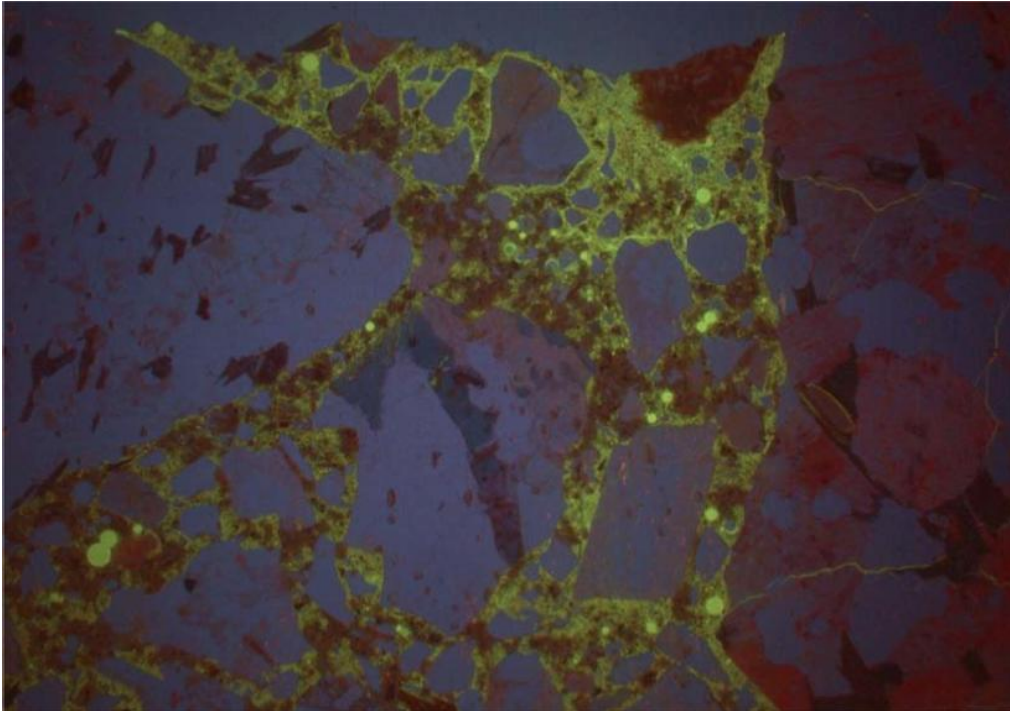


Figur 5.9 - Tunnslip från provkropp 0,54 pH 4 i korspolariserat ljus. Figuren visar de översta 5 mm av ytan och bildbredden är 6.7 mm. De röda ringarna anger karbonatiserad betong.

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

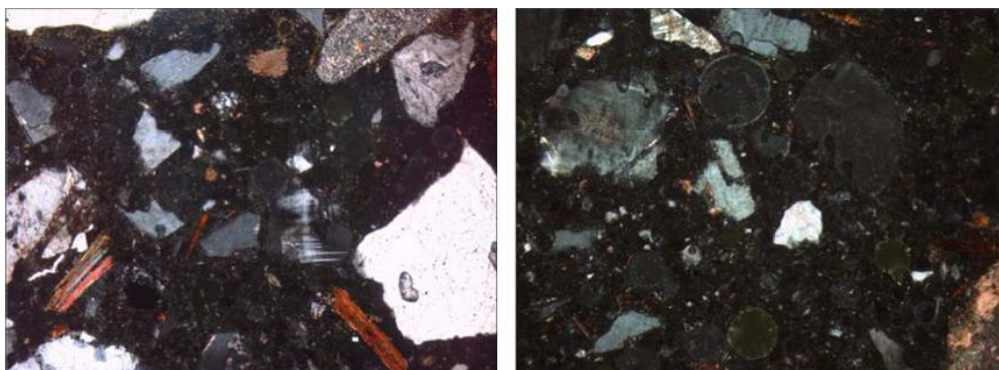
---

I figur 5.10 visas samma område analyserat med planpolariserat ljus (blåljus). I figuren går det att urskilja att cementpastan har högre kapillärporositet (högre ljusintensitet) närmast ytan vilket kan tyda på urlakning, men längre ned i provet finns andra områden med högre kapillärporositet vilket snarare tyder på lokal heterogen cementfördelning.



Figur 5.10 - Samma område som i figur 5.9 men nu med blåljus. Bildbredd 6,7 mm.

För att kontrollera om någon upplösning av kalciumhydroxid ägt rum har två områden i cementpastan studerats. I figur 5.11 visas en jämförelse mellan två områden, den ena belägen 1-2 mm ned från provets yta och den andra 4-5 mm ned från provets yta. Någon skillnad i strukturen gick inte att urskilja utan båda områden visade på närvaro av ungefär samma mängd kristallin Portlandit (kalciumhydroxid) vilket tyder på att urlakningen varit liten eller mycket liten.



Figur 5.11 - Jämförelse mellan cementpasta 1-2 mm respektive 4-5 mm ner i provet. Analys utförd med korspolariserat ljus. Bildbredden motsvarar 1.7 mm.

### Sammanfattning av resultat från alla fyra provkroppar

Den valda urlakningsmetoden har inte nämnvärt förstört mikrostrukturen i de undersökta provkropparna vilket visar på att C-S-H gelen endast tagit minimal skada. Av denna anledning har det varit svårt att se några skillnader mellan proverna. För samtliga prover gäller att det inte gått att urskilja tydliga tecken på upplösning av kalciumhydroxid vilket tyder på att urlakning varit liten eller mycket liten i samtliga prover. Någon anledning att jämföra resultatet från samtliga prover finns därmed inte utan det räcker att konstatera att samtliga prover utsatts för karbonatisering av det yttersta skiktet samt att urlakning av kalciumhydroxid varit liten eller mycket liten. Avslutningsvis presenteras en sammanfattning från CBI:s analys i tabell 5.3. För ytterligare information hänvisas till hela rapporten i bilaga F.

Tabell 5.3 - Maximalt karbonatiseringsdjup, urlakning samt upplösning av  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Beteckning	Max. karb.djup [mm]	Urlakning [mm]	Upplösning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$
0,54 pH 4	0,9 (3,8) <sup>1</sup>	Begränsad, ca 1	Nej
0,54 pH 7	0,9 (1,5) <sup>1</sup>	Begränsad, 0,5-1	Nej
0,62 pH 4	0,9	Begränsad, < 1	Nej
0,62 pH 7	0,8 (4) <sup>2</sup>	Begränsad, < 1	Nej

<sup>1</sup> I parentes anges enstaka lokalt karbonatiseringsdjup längs med en övergångszon ballastkorn/cementpasta.

<sup>2</sup> Karbonatisering längs en övergångszon som ej redovisats i rapporten.

## 6 Diskussion

### 6.1 Allmänt

De använda provningsmetoderna för frostsprängning, urlakning och nötning visade att det var möjligt att återskapa de skademekanismer som betong i vattenkraftdammar vanligtvis utsätts för. Att urlakning med pH 4 fungerade som en accelererad variant av naturlig urlakning bevisades genom vätskeanalyser vilka visade på urlakning av kalciumhydroxid samtidigt som urlakningen av kisel var låg. En låg halt urlakad kisel var ett tecken på att urlakningen inte haft någon större negativ inverkan på C-S-H gelen. Under frostprovingen uppstod skador i form av avskalningar av provytorna, vilka visade att det varit möjligt att återskapa avskalningar av betongytan i laboratoriemiljö. Avslutningsvis har nötning av ytorna visat på en liten ökning i mängden avskalningar.

### 6.2 Veckovis provning

Resultaten från den veckovisa provningen har överlag varit tydliga. Vid jämförelse mellan uppvägda avskalningar för de olika kombinationerna kan tydliga skillnader upptäckas vilket tyder på att de tre framtagna provningsmetoderna har fungerat som det var tänkt. Önskvärt var att avskalningarna skulle öka då två eller fler skademekanismer kombinerades med varandra och så har fallet också varit.

#### 6.2.1 Inverkan av betongkvalitet

Utifrån mängden uppvägda avskalningar framgår det tydligt att betongkvaliteten haft en avgörande betydelse för provytornas motståndsförmåga mot nedbrytning. Provkroppar med vct 0,54 har klarat sig bättre än motsvarande provkroppar med vct 0,62 vilket kan ses i jämförelsen av mängden avskalningar i diagram 5.5. Den högre motståndsförmågan kan dels förklaras med betongens högre täthet och dels med den extra luftinblandningen.

#### 6.2.2 Frostbeständighet

För betong med vct 0,54 tillsattes luftporbildande medel för att göra betongen frostbeständig. Vid frostprovning med sötvatten visade sig den uppmätta lufthalten på 4,1% vara tillräcklig för att skydda betongen mot frostsador, se diagram 5.2. För betong med vct 0,62 räckte däremot inte den naturliga lufthalten på 1,3%, varför avskalningar uppstod, se diagram 5.1. Avskalningarna var emellertid begränsade och efter 56 fryscyklar erhöles en ackumulerad avskalningsmängd på endast 24 g/m<sup>2</sup>. Vid jämförelse med kriterier från Boråsmetoden kan det konstateras att bägge betongkvaliteter uppfyller kravet för mycket god frostbeständighet (< 100 g/m<sup>2</sup> efter 56 fryscyklar).

### 6.2.3 Urlakningens inverkan på frostbeständighet

Då urlakning har kombinerats med frostprovning har mängden avskalningar ökat. Sålunda har urlakning en inverkan på frostbeständigheten. Urlakning med pH 7 gav dock endast en marginell ökning i avskalningar för provkroppar med vct 0,62 och ingen ökning i mängden avskalningar för provkroppar med vct 0,54. För vct 0,62 gäller att inverkan av urlakning med pH 7 kunde noteras först efter frostprovningsvecka 3 vilket visar på att denna form av nedbrytning är långsam. Ökningen kan förklaras med att upplösningen av kalciumhydroxid orsakat en försvagning av cementpastan i de yttersta skikten av provytan och på så sätt gjort provytan mer mottaglig för nedbrytning av frostsprängning. Detta troligtvis genom att ytan fått en högre vattenmättnadsgrad.

När urlakning har utförts med pH 4 har avskalningarna ökat betydligt mer än i fallet för pH 7, se diagram 5.7 – 5.8. Ökningen i mängden avskalningar märktes redan efter den första frostprovningsveckan och visade att den accelererade urlakningsmetoden har fungerat som förväntat. För urlakning med pH 7 har vattnet haft ett neutralt pH-värde och urlakningsmekanismen bakom kalciumhydroxidens upplösning har då primärt varit vattnets kalklösande förmåga. När det gäller urlakning med pH 4 har vattnet däremot haft ett överskott av vätejoner och upplösningen av kalciumhydroxid har då orsakats av vattnets kalklösande förmåga i samtidig kombination med en neutralisationsreaktion mellan den tillsatta syran och den basiska kalciumhydroxiden. Det sura vattnet har därmed orsakat ytterligare urlakning av kalciumhydroxid. Detta resonemang bekräftas av vätskeanalysen vilket visar på högre halter av kalciumjoner i vattnet från pH 4-baljan.

### 6.2.4 Nötningens inverkan på nedbrytningsprocessen

Då frostprovning har kombinerats med nötning har detta resulterat i en liten ökning av mängden avskalningar. Ökningen gäller emellertid endast för provkroppar med vct 0,62, jämför diagram 5.1 med diagram 5.2. Detta kan tolkas som ytterligare en bekräftelse på den sämre betongkvaliteten hos betong med vct 0,62 jämfört med vct 0,54.

Frostprovning som ensam skademekanism leder till avskalningar samt till en generell försvagning av det yttersta skiktet hos provytan. Vid en kombination med nötning ökar mängden avskalningar vilket kan förklaras med att friktionen från stålborsten orsakar bortfall av ytterligare avskalningar samt partiklar från den försvagade provytan, som inte har lossnat eller skulle lossnat efter fler cykler.

Hur väl den valda provningsmetoden för nötning motsvarar verkligheten går emellertid inte att avgöra. För att kunna jämföra den valda provningsmetoden med verklig nötning måste inverkan av verklig nötning av is på betong längs vattenlinjen först uppskattas och det är här svårigheten ligger. Nötning av is förekommer aldrig som ensam skademekanism varför det är svårt att avgöra dess enskilda inverkan.



Isflak transporteras mot betongytan med vattenflödet vilket innebär att betongen också utsätts för samtidig inverkan av urlakning. Vidare kan det finnas isbildning på betong längs vattenlinjen, se figur 2.1. Då isflak slår in mot den bildade isen kan bitar av is dras loss från ytan varför ännu fler partiklar kan avlägsnas.

Avslutningsvis kan nötning orsakad av isflak som krockar med betongytan vara oregelbunden då den inte angriper jämnt längs hela ytan som till exempel urlakning och frysning. Isflakens storlek har även en avgörande roll för nötningens storlek. Att utsätta hela provytan för jämn borstning med stålborste kan därmed ha varit en överskattning av nötningens inverkan. På motsvarande sätt kan den lilla stålborsten varit för liten för att efterlikna nötning orsakad av de allra största isflaken. Det som kan konstateras är att den valda provningsmetoden har orsakat bortfall av ytterligare avflagningspartiklar från provytorna vilket var det som ville uppnås. Hur väl denna motsvarar verkligheten går dock inte att avgöra.

### 6.2.5 Synergieffekter

För båda betongkvaliteter gäller att störst avskalningar har erhållits då de tre skademekanismerna kombinerades. Ökningen i avskalningar har varit störst för provkroppar med vct 0,62. Detta var väntat då denna betongkvalitet representerar en sämre betong som dessutom saknar tillsättning av luftporbildande medel. Även provkroppar med vct 0,54 har fått en tydlig ökning i avskalningar, men ökningen har dock varit mindre. Hypotesen i detta examensarbete har varit att det skulle uppstå synergieffekter då de tre skademekanismerna kombinerades. Detta har också kunnat påvisas genom två jämförelser.

I jämförelse 1 har avskalningar från provkroppar som utsatts för en kombination av de tre skademekanismerna (kombination 4 i tabell 4.1) jämförts med summan av avskalningar orsakade av endast frostprovning samt avskalningar orsakade av kombinationen urlakning och nötning ( $\Sigma$  kombination 1 + kombination 5 i tabell 4.1). Jämförelsen presenterades dels i diagram 5.11 och dels i tabell 5.1. För bägge betongkvaliteter gäller att störst avskalningar har erhållits då de tre skademekanismerna kombinerades och skillnaden var tydlig. Detta visar att synergieffekter har inträffat.

För att med större säkerhet kunna påvisa om synergieffekter har inträffat utfördes ytterligare en jämförelse, se diagram 5.12 respektive tabell 5.2. I jämförelse 2 jämfördes avskalningar orsakade av en kombination av de tre skademekanismerna (kombination 4 i tabell 4.1) med summan av avskalningar orsakade av kombinationen frostsprovning och urlakning samt avskalningar orsakade av endast nötning ( $\Sigma$  kombination 2 + kombination 7 i tabell 4.1). Även i detta fall var avskalningen större för provkroppar som utsatts för en kombination av de tre skademekanismerna. Skillnaden i mängden avskalningar mellan jämförelserna var

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

dock mindre än för den tidigare jämförelsen. Den minskade skillnaden kan förklaras med att det redan har inträffat synergieffekter i form av ökade avskalningar för kombinationen frostprovning och urlakning, vilka då har bidragit till den minskade skillnaden vid jämförelsen.

Synergieffekten kan förklaras med att de tre skademekanismerna har samverkat. Vid urlakning har kalciumhydroxid lösts upp från cementpastan i betongytan, vilket har gjort betongytan mer mottaglig för nedbrytning av frostsprängning (lättare att ta upp vatten). Vidare har nötning av den försvagade ytan orsakat bortfall av ytterligare avskalningar och partiklar. Förlusten av betongytans yttersta skikt, genom avskalning och nötning, har på nytt öppnat upp för skador på relativt opåverkad betong i de undre lagren. Denna cykel av samverkan mellan skademekanismerna påbörjas på nytt då provkroppen utsätts för urlakning igen.

### **6.2.6 Jämförelse mellan sågad yta och formyta**

För provkroppar med vct 0,54 har större avskalningar erhållits då formytan provats jämfört med om den sågade ytan provats, se diagram 5.13 – 5.14. Detta kan ses som en bekräftelse på teorin om att formytan får en sämre kvalitet än resten av materialet. Ju bättre betongkvalitet desto större skillnad. Att samma iakttagelse inte kunnat göras för provkropparna med vct 0,62 kan ses som en indikation på att betongen alltigenom haft lägre kvalitet. Den sågade ytan kan därmed ha varit lika svag som formytan.

### **6.2.7 Inverkan av salt**

Tre provkroppar av vardera betongkvalitet har utsatts för frostprovning med 3% NaCl i syfte att undersöka hur stora avskalningar som maximalt skulle kunna erhållas. För vct 0,62 gäller att det redan efter första provningsveckan uppmättes avskalningar som var långt över slutvärdet för alla andra kombinationer. Motsatsen gäller dock för vct 0,54 där inblandning av salt knappt hade någon inverkan på mängden avskalningar, se diagram 5.6. Detta visar på hur oerhört stor skillnad extra luftinblandning gör för frostbeständigheten i samband med salthaltigt vatten. Även betongens täthet i form av vct har bidragit till högre frostbeständighet för vct 0,54.

Resultatet är intressant då det visar på att båda betongkvaliteterna kan användas för betong i dammkonstruktioner eftersom de får små avskalningar vid frostprovning med sötvatten. Däremot skulle endast betong med vct 0,54 och luftporbildande medel klara av den salthaltiga miljön som råder för till exempel många bropelare.

Då det endast var betong med vct 0,54 som klarade frostprovning med salthaltigt vatten jämförs detta resultat med de avskalningar som erhöles från provkropparna i sötvatten där de tre skademekanismerna kombinerades. Om diagram 5.4 (inverkan

av de tre skademekanismerna) jämförs med diagram 5.6 (inverkan av salt) kan det konstateras att större avskalningar erhöles då de tre skademekanismerna kombinerades och frostprovingen utfördes med sötvatten.

### 6.2.8 Yttre skador

Vid okulär undersökning av provkroppar som utsatts för de tre skademekanismerna har det upptäckts att avskalningar av provytan leder till en successiv nedbrytning av cementpastan runt ballastkornen. Detta kan ses på den sågade ytan i figur 5.1 – 5.4. För formytan gäller att det yttersta täcksiktet har försvunnit varför det går att urskilja toppen på de underliggande ballastkornen, se figur 5.5 – 5-8. Vid jämförelse med de verkliga skadorna på betong längs vattenlinjen i vattenkraftverksdammar kan likheter hittas. Tendensen visar på att skadorna ökar med tiden. Hade experimentet utförts under en längre tid hade skadegraden ökat och likheten troligtvis blivit ännu tydligare. Vid jämförelse mellan vct 0,54 och 0,62 kan inga tydliga skillnader upptäckas trots att provkroppar med vct 0,62 generellt har fått större avskalningar.

### 6.3 Vätskeanalys - urlakningskontroll

Vätskeanalysen från ICPAES visar att det främst är kalciumjoner som har urlakats, vilket var det önskade resultatet, se diagram 5.17 – 5.18. Tydliga skillnader mellan urlakning med pH 7 och pH 4 kan urskiljas där pH 4 orsakat en större urlakning vilket tyder på att urlakningsmetoden troligtvis har fungerat. Urlakningen av kalciumhydroxid har orsakat en successiv nedbrytning av cementpastan. De kalkhaltiga komponenterna som har frigjorts har orsakat en försvagning av cementpastan i de yttersta skikten av provytan och på så sätt gjort provytan mer mottaglig för nedbrytning av frostsprängning och nötning.

Urlakning av kisel har varit liten för samtliga provkroppar vilket tyder på att en liten eller mycket liten del av kalciumjonerna har lösts upp från C-S-H. Silikaterna från C-S-H gelen har lämnats relativt orörda vilket var det som strävades efter då upplösning av dessa leder till en minskning av hållfasthet.

Från vätskeanalyserna finns tydliga tendenser på att urlakningen av kalcium har avtagit med tiden. Detta kan förklaras med att kalciumjoner successivt har urlakats från ytan och att avståndet mellan ytan och oskadad betong därmed har ökat för varje vecka.

Vid jämförelse mellan halten urlakade kalciumjoner från provkroppar med sågad yta respektive formyta visar de senare på större urlakning vilket är en indikation på att formytan är svagare än den sågade ytan. Generellt gäller att provkropparna med vct 0,62 urlakats mer än provkropparna med vct 0,54. Detta var väntat då vct 0,62 ger betong med lägre täthet.

## 6.4 Tunnslipsanalys

Resultatet som erhöles från tunnslipsanalysen visade tecken på begränsad urlakning av ytan. För samtliga provkroppar gäller att urlakningsdjupet varit begränsad till ett område av ca 1 mm av det yttersta skiktet samt att det observerats karbonatiserad betong vid ytan. Vid jämförelse av mikrostruktur mellan provkroppar som urlakats med pH 4 och pH 7 har emellertid inga skillnader mellan dessa kunnat hittas då det varken fanns tecken på upplösning av kalciumhydroxid eller på någon ökning av kapillärporositet, se bilaga F.

Att det på okulär väg inte gått att urskilja någon ökning av kalciumhydroxid eller någon ökning av kapillärporositet trots att tydliga skillnader i mängden avflagningar erhållits tyder snarare på att även en liten mängd urlakad kalciumhydroxid påverkar skadeutvecklingen.

För att få en bättre uppfattning om storleken kan urlakningsdjupet på ca 1 mm jämföras med urlakningsdjupet som erhöles i den urlakningsstudie som användes som inspiration vid framtagandet av den egna urlakningsmetoden. Den studien erhöles ett urlakningsdjup på ungefär 0,5 mm efter 60 dagars urlakning i avjoniserat vatten med konstant pH på 5,0 (Roziere et al. 2009). Att direkt jämföra värdena med varandra är emellertid inte helt korrekt då provkropparna från innevarande studie skickades för tunnslipsanalys efter att ha urlakats under 42 dagar. Att större urlakningsdjup erhållits på kortare tid visar på att urlakning med pH 4 varit mer effektiv vilket var det som strävades efter då ett lägre pH valdes.

Att det upptäckts karbonatiserad betong i samtliga tunnslipsprovkroppar var något oväntat då det direkt efter gjutning vidtogs åtgärder mot karbonatisering i form av vattenhärdning samt det faktum att provkropparna under större delen av tiden legat i vatten under urlakningsförsöket. Karbonatisering av betong har med störst sannolikhet skett under de tre veckorna som provkropparna förvarades i klimatrum. Möjligtvis kan löst koldioxid i vattnet också ha bidragit.

Den karbonatiserade betongen närmast ytan kan ha haft en negativ inverkan på urlakningen då karbonatiserad betong är mer svårlöslig än kalciumhydroxid. Hur stor denna inverkan har varit går emellertid inte att avgöra. Trots detta har resultaten från den experimentella studien varit tydliga. Möjligtvis hade ännu tydligare resultat kunnat erhållas om provkropparna aldrig placerats i klimatrum utan hela tiden lagrats i vatten fram till experimentets start.

Syftet med den accelererade urlakningsmetoden var att urlaka kalciumhydroxid utan att förstöra C-S-H gelen. Att sådant har varit fallet bekräftas dels av vätskeanalysen, som visar på urlakning av kalciumhydroxid och dels av tunnslipsanalysen, vilket visar på oförändrad mikrostruktur i samtliga provkroppar. Samma resultat har erhållits från urlakning med pH 7. Både vätskeanalysen och tunnslipsanalysen bekräftar

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

därmed att urlakning med pH 4 inte har tillfogat betongen andra skador än de som urlakning med pH 7 åstadkommit.

Av de valda pH-värdena är urlakning med avjoniserat vatten och pH 7 mest likt det vatten som betong i vattenkraftverk utsätts för. Men då urlakning med avjoniserat vatten och pH 4 endast har accelererat urlakningen av kalciumhydroxid går denna också att likställa med det vatten som betong i vattenkraftverk utsätts för under en längre tidsperiod. Den accelererade urlakningen kan därmed stämma överens med verkligheten.

Hur stor accelerationen har varit ur ett tidsperspektiv är däremot svårare att avgöra. Ett sätt kan vara att jämföra den ackumulerade halten av urlakade kalciumjoner i pH 4-baljan ( $90 \text{ g/m}^2 \cdot \text{provkropp}$ ) med den ackumulerade halten av urlakade kalciumjoner i pH 7-baljan ( $45 \text{ g/m}^2 \cdot \text{provkropp}$ ), se figur 5.17 respektive 5.18. Av figurerna framgår att pH 4 har varit dubbelt så effektiv på att urlaka kalciumjoner jämfört med pH 7. Därmed kan accelererad urlakning med pH 4 under 8 veckor sägas motsvara 16 veckor av urlakning med pH 7.

Jämfört med betong i verkliga dammkonstruktioner, vilken utsätts för många år av urlakning, är detta fortfarande en väldigt kort tid vilket kan förklara varför ingen förändring kunnat upptäckas på betongens mikrostruktur. Hade experimentet utförts under en längre tid hade skillnader troligtvis även kunnat upptäckas med tunnslipsanalys.



## 7 Slutsatser

Under examensarbetets gång har ett antal slutsatser dragits och de sammanfattas i följande punkter:

- Vid frysning av betong enligt Boråsmetoden har skadegraden ökat då provkroppar även utsatts för urlakning och/eller nötning jämfört med provkroppar som bara har utsatts för frysning.
- Synergieffekter mellan skademekanismerna frysning, urlakning och nötning har påvisats i form av en ökning av mängden avskalningar för prover som utsatts för de tre typerna av nedbrytning jämfört med summan av avskalningar från provkroppar som enbart utsatts för en typ av nedbrytning vilket betyder att de tre skademekanismerna har samverkat.
- Provkroppar med vct 0,62, vilka representerade betong som användes till vattenkraftverk mellan åren 1930-1950, fick större avskalningar än provkroppar med vct 0,54 och luftporbildande medel, vilka representerade betong som användes till vattenkraftverk mellan åren 1950-1970.
- Skador på provkropparnas yta påminner till utseendet om de skador som observerats på betong längs vattenlinjen i verkliga dammkonstruktioner vilket ökar sannolikheten för att de har uppstått på samma sätt.
- Urlakning av kalciumjoner har ägt rum samtidigt som endast ringa nedbrytning av C-S-H gelen har kunnat påvisas. Resultaten gäller både för urlakning med pH 7 och accelererad urlakning med pH 4 vilket visar på att den framtagna urlakningsmetoden kan sägas stämma överens med angreppets tidiga stadium.





## 8 Förslag på fortsatta studier

- Under den korta tid som experimentet har utförts har det med tunnslipsanalys inte gått att observera skillnader i mikrostruktur mellan urlakning med pH 4 och pH 7. Intressant vore att se vilken inverkan som de valda pH-värdena har på betongen efter en längre tid.
- Att utföra experimentet med samma förutsättningar men att öka provningstiden till 8 frostprovningsveckor. På så sätt skulle resultatet direkt kunna jämföras med krav enligt Boråsmetoden. Vidare skulle resultaten kunna användas till att ta fram egna kriterier för avskalningar liknande Boråsmetodens kriterier.
- Öppna upp experimentet till att även gälla betong från andra typer av konstruktioner, som till exempel bropelare i saltvatten för att undersöka om synergieffekter kan observeras då urlakning och frostprovning utförs med salthaltigt vatten.
- Att utföra experimentet med samma förutsättningar men att använda material som används till att reparera betongytan längs vattenlinjen hos skadade dammkonstruktioner. Detta för att utreda vilket reparationsmaterial som är mest beständigt mot synergieffekter mellan frostsprängning, urlakning och nötning.



## 9 Referenser

- Babaahmadi, A., Tang, L., Abbas, Z. (2012), 'Electrochemical migration technique to accelerate ageing of cementitious materials', NUCPERF 2012
- Beddoe, R. E., Dorner H. W. (2005), 'Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms', Cement and Concrete Research, Vol. 35 s 2333-2339
- BST, Byggstandardiseringen och SIS – Standardiseringskommissionen I Sverige (1991), 'Betongprovning med svensk standard – Hårdnad betong – Frostresistens', Grunditz & Forsberg tryckeri AB, ISBN 91-7162-325-6, Lidköping
- Burström, P. G. (2008), 'Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper', Studentlitteratur, ISBN 978-91-44-02738-8, Lund
- Byfors, K. (1997), 'Betonghandbok material, Utgåva 2 – Tillsatsmedel', AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm
- Byfors, K., Tuutti, K. (1997), 'Betonghandbok material, Utgåva 2 – Armeringskorrosion', AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm
- De Ceukelaire, L. (1992), 'The effects of hydrochloric acid on mortar', Cement And Concrete Research, Vol. 22, s 903-914
- de Larrard, T., Benboudjema, F., Colliat, J. B., Torrenti J. M., Deleruyelle, F. (2010), 'Concrete calcium leaching at variable temperature: Experimental data and numerical model inverse identification', Computational Material Science, Vol. 9, s 35-45
- Drugge, L. (2001), 'Geokemin längs Luleälven samt påverkan av vattenkraftsutbyggnaden', Institutionen för samhällsbyggnadsteknik – Avdelningen för tillämpad geologi, LTU, 2001:208 CIV, Luleå
- Ekström, T. (2003), 'Leaching of concrete – The leaching process and its effects', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-1020, Lund
- Fagerlund, G. (1972), 'Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material', Institutionen för byggnadsteknik, LTH, Rapport 34, Lund
- Fagerlund, G. (1987), 'Betongkonstruktioners beständighet – En översikt', Cementa, ISBN 91-87334-00-3, Uppsala

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Fagerlund, G. (1989), 'Vattenbyggnadsbetong', Cementa, ISBN 91-87334-04-6, Danderyd

Fagerlund, G. (1997), 'Betonghandbok material, Utgåva 2 – Frostbeständighet', AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm

Fagerlund, G. (1998a), 'Kompendium i Byggnadsmaterial (2006) – Fukt och porer del II - Kapillärphenomen', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G. (1998b), 'Kurspärm Byggnadsmaterial (2012) – Fuktmätning i betong', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G. (1999a), 'Kurspärm Byggnadsmaterial (2012) – Cement och andra oorganiska bindemedel', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G. (1999b), 'Kurspärm Byggnadsmaterial (2012) – Kalkbaserade bindemedels kemi', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G. (1999c), 'Kurspärm Byggnadsmaterial (2012) – Cementspastan och betongens strukturella uppbyggnad fuktegenskaper', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G. (2000), 'Leaching of concrete – The leaching process. Extrapolation of deterioration. Effect on the structural stability', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-3091, Lund

Fagerlund, G. (2006), 'Kompendium i Byggnadsmaterial (2006) – Frostbeständighet', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G. (2011a), 'Inverkan av salter på betong – Kemisk och fysikalisk påverkan', Elforsk rapport 12:29

Fagerlund, G. (2011b), 'Byggmaterialvetenskap – Kapillärphenomen', Avdelning för byggnadsmaterial, KFS AB, Lund

Fridh, K. (2005), 'Internal frost damage in concrete – Experimental studies of destructive mechanisms', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-1023, Lund

Graham, J. R. (1987), 'Erosion of Concrete in Hydraulic Structures', ACI materials journal, Vol. 84, s136-158

Grattan-Bellew, P. E. (1996), 'Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes', Construction and Building Materials, Vol. 10, Nr. 1, s 3-16

### Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Halvorsen, U. (1966), 'Korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner', Institutionen för byggnadsteknik, LTH, Bulletin 1, Lund

Halvorsen, U. (1968), 'Kemisk nedbrytning av betong', Institutionen för byggnadsteknik, Avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH, Lund

Hassanzadeh, M. (2010), 'Tillämpning av CONTECVEC – Tillståndsbedömning av erosionsskador vid vattenlinjen i Porsi kraftverk', Elforsk rapport 10:75, Stockholm

Huovinen, S. (1992), 'Abrasion of concrete structures by ice', Technical Research Centre of Finland - Laboratory of Structural Engineering, Finland

Jacobsen, S. (1995), 'Scaling and cracking in unsealed freeze/thaw testing of Portland cement and silica fume concretes', Institutt for konstruksjonsteknikk, NTH, Doktor ingeniøravhandling 1995:101, Trondheim, Norge

Jain, J., Neithalath, N. (2009), 'Analysis of calcium leaching behavior of plain and modified cement pastes in pure water', Cement & Concrete Composites, Vol. 31, s 176-185

Kungl. Vattenfallstyrelsen (1948), 'Statens Vattenfallsverk under fyra decennier, andra upplagan', K L. Beckmans boktryckeri, Stockholm

Kryzanowski, A., Mikos, M., Sustersic, J., Planinc, I. (2009), 'Abrasion Resistance of Concrete in Hydraulic Structures', Aci materials journal, Vol. 106, s349-356

Lagerblad, B. (2009), 'Betong tar upp koldioxid under hela sin livslängd', Husbyggaren, Nr 6, s36-37

Marinoni, N., Pavese, A., Voltolini, M., Merlini, M. (2008), 'Long-term leaching test in concretes: An x-ray powder diffraction study', Cement & Concrete Composites, Vol. 30, s 700-705

Möller, G. (1997), 'Betonghandbok material, Utgåva 2 – Nötningsmotstånd', AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm

Nilsson, L-O. (1994), 'Kurspärm Byggnadsmaterial (2012) – Fukt i betong', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Nilsson, L-O. (2006), 'Byggnadsmaterialvetenskap – Transport', Avdelning för byggnadsmaterial, KFS AB, Lund

## Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

Persson, M., Rosenqvist, M. (2009), 'Frostsprängning i betongdammar – Inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen hos betong i vattenkraftverk', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-5074, Lund

Rombén, L. (1997), 'Betonghandbok material, Utgåva 2 – Kemiskt angrepp', AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm

Rosenqvist, M. (2013), Intern kommunikation

Rosenqvist, M., Nordström, E., Hassanzadeh, M., Fridh, K. (2013), 'Observations and investigations of frost damage mechanisms of concrete dams in Sweden', Proceedings of the 81st Annual Meeting Symposium of ICOLD, Seattle, USA, s403-413

Roziere, E., Loukili, A., Hachem, R. El., Grondin, F. (2009). 'Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks', Cement & Concrete Research, Vol. 39, s 1188-1198

Setunge, S., Nguyen, N., Alexander, B. L., Dutton, L. (2009), 'Leaching of alkali from concrete in contact with waterways', Water Air Pollut: Focus, Vol. 9, s381-391

Taylor, H.F.W. (1997), 'Cement chemistry', Thomas Telford Publishing, ISBN 0 7277 2592 0, London

VAST, Kraftverksföreningens Utvecklingsstiftelse (1991), 'Betong i vattenkraftanläggningar', AW Grafiska, ISBN 91 87 33 4 07 0, Uppsala

Vattenfalls betonghandbok (1972), 'Vattenfalls betonghandbok', Boktryckeri AB Thule, ISBN 91-7186-003-7, Stockholm

Nationalencyklopedin, Om osmotiskt tryck  
<http://www.ne.se/osmotiskt-tryck>, 2013-04-17, 12:50

Nationalencyklopedin, Om urlakning  
<http://www.ne.se/urlakning/336646>, 2013-04-29, 14:24

Nationalencyklopedin, Om synergism  
<http://www.ne.se/lang/synergism/321879>, 2013-06-03, 14:30

USGS - U.S Geological Survey, Om vatten som lösningsmedel  
<http://ga.water.usgs.gov/edu/qa-solvent.html>, 2013-04-29 14:24

Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet

---

Visionlearning, Om vattens egenskaper och beteende

[http://www.visionlearning.com/library/module\\_viewer.php?mid=57](http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=57), 2013-04-29

14:24

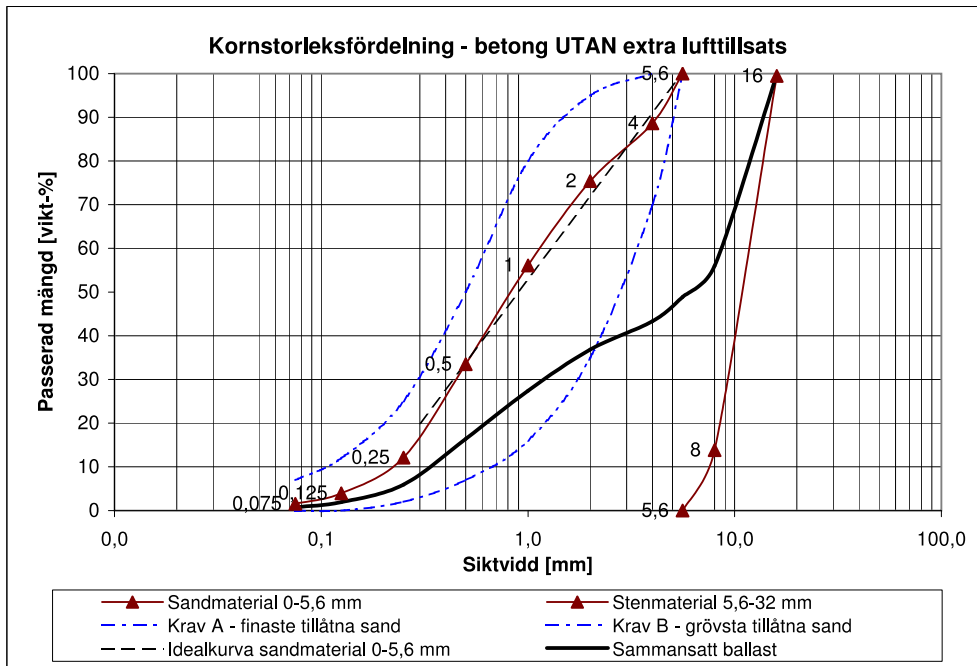




## Bilaga A – Betongrecept för vct 0,62

### Betongrecept (1930-1950): vct 0,62 UTAN extra lufttillsats.

vct: **0,62**      Fuktkvot u [%]: **0,00**      **1,16**      **7,80**      ( 0 - 0,25 | 0 - 2 | 0 - 8 )



#### Blanda den önskade volymen av betongreceptet enligt följande proportioner:

Cement	<b>32,500 [kg]</b>	325 [kg/m <sup>3</sup> ]	325 [kg/m <sup>3</sup> ]
Vatten	<b>16,035 [kg]</b>	160 [kg/m <sup>3</sup> ]	202 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betongsand 0-0,25 mm	<b>0,000 [kg]</b>	0 [kg/m <sup>3</sup> ]	0 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betongsand 0-2 mm	<b>33,892 [kg]</b>	339 [kg/m <sup>3</sup> ]	335 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betongsand 1-4 mm	<b>6,500 [kg]</b>	65 [kg/m <sup>3</sup> ]	65 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betonggrus 0-8 mm	<b>47,723 [kg]</b>	477 [kg/m <sup>3</sup> ]	440 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betonggrus 4-8 mm	<b>11,000 [kg]</b>	110 [kg/m <sup>3</sup> ]	110 [kg/m <sup>3</sup> ]
Makadam 8-16 mm	<b>83,500 [kg]</b>	835 [kg/m <sup>3</sup> ]	835 [kg/m <sup>3</sup> ]
Makadam 16-32 mm	<b>0,000 [kg]</b>	0 [kg/m <sup>3</sup> ]	0 [kg/m <sup>3</sup> ]
Tillsatsmedel	<b>0,00 [gram]</b>	0,00 [gram/m <sup>3</sup> ]	0,00 [gram/m <sup>3</sup> ]
Volym sats:	<b>100 [dm<sup>3</sup>]</b>		

## Bilaga B – Betongrecept för vct 0,54

### Betongrecept (1950-1970): vct 0,54 MED extra lufttillsats.

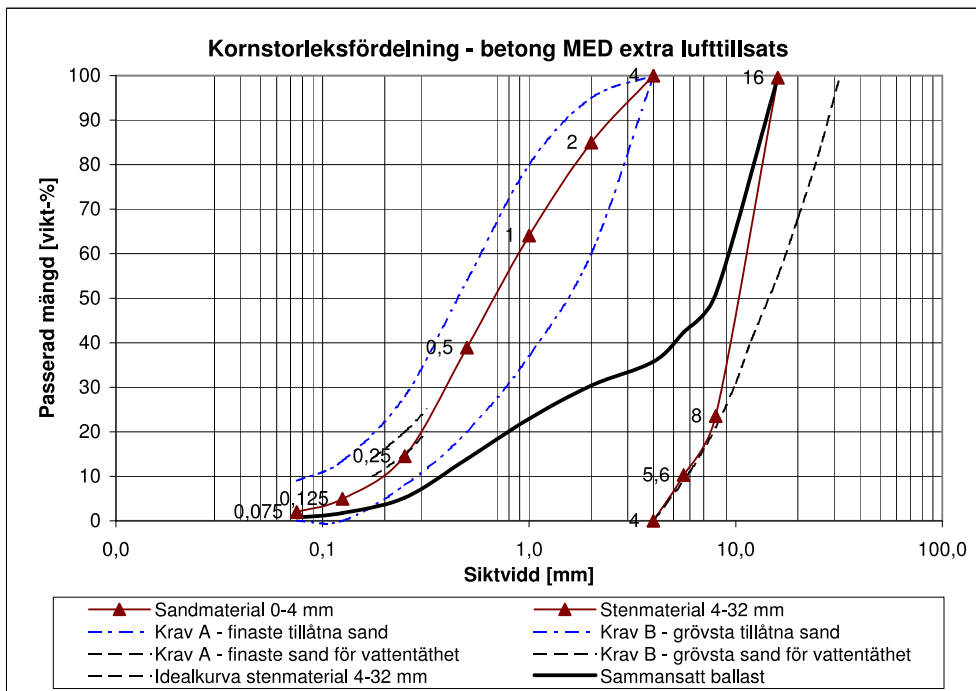
vct: 0,54

Fuktkvot u [%]: 0,00

1,16

7,80

( 0 - 0,25 | 0 - 2 | 0 - 8 )



#### Blanda den önskade volymen av betongreceptet enligt följande proportioner:

Cement	<b>30,000 [kg]</b>	300 [kg/m <sup>3</sup> ]	300 [kg/m <sup>3</sup> ]
Vatten	<b>13,272 [kg]</b>	133 [kg/m <sup>3</sup> ]	162 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betongsand 0-0,25 mm	<b>0,000 [kg]</b>	0 [kg/m <sup>3</sup> ]	0 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betongsand 0-2 mm	<b>32,374 [kg]</b>	324 [kg/m <sup>3</sup> ]	320 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betongsand 1-4 mm	<b>7,500 [kg]</b>	75 [kg/m <sup>3</sup> ]	75 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betonggrus 0-8 mm	<b>32,538 [kg]</b>	325 [kg/m <sup>3</sup> ]	300 [kg/m <sup>3</sup> ]
Betonggrus 4-8 mm	<b>20,000 [kg]</b>	200 [kg/m <sup>3</sup> ]	200 [kg/m <sup>3</sup> ]
Makadam 8-16 mm	<b>95,000 [kg]</b>	950 [kg/m <sup>3</sup> ]	950 [kg/m <sup>3</sup> ]
Makadam 16-32 mm	<b>0,000 [kg]</b>	0 [kg/m <sup>3</sup> ]	0 [kg/m <sup>3</sup> ]
Tillsatsmedel	<b>16,00 [gram]</b>	160,00 [gram/m <sup>3</sup> ]	160,00 [gram/m <sup>3</sup> ]
Volym sats:	<b>100 [dm<sup>3</sup>]</b>		

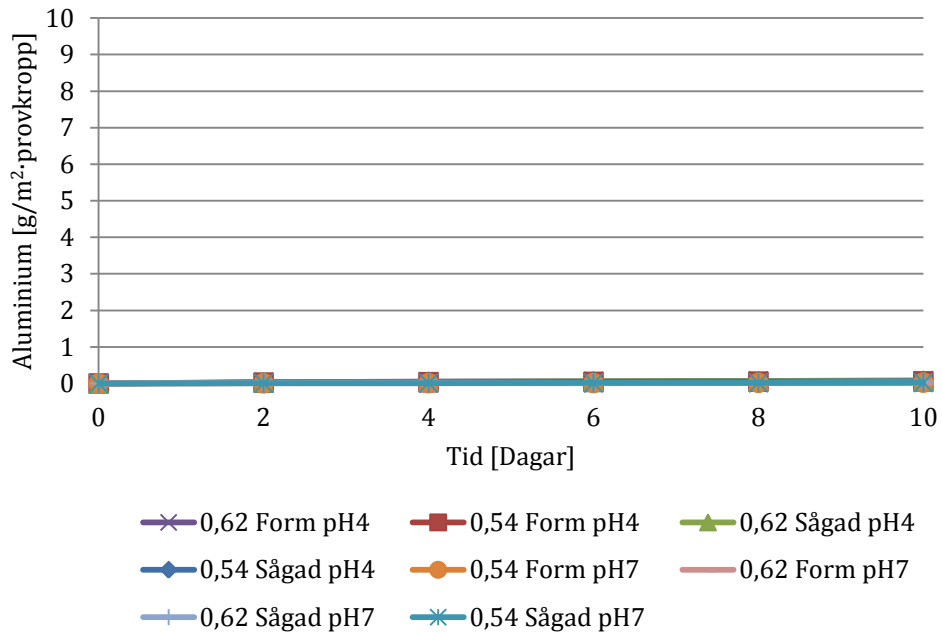
## Bilaga C – Provningschema

Veckovis provning	Vecka 1		Vecka 2		Vecka 3		Vecka 4		Vecka 5		Vecka 6		Vecka 7		Vecka 8		Vecka 9		
	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	
Söt	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	
Salt	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	
Söt+pH7		pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	frysning	
Söt+pH4	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	
F Söt+pH4	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	
Söt+pH7+Nöt		pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	pH 7	frysning	frysning	
Söt+pH4+Nöt	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	
F Söt+pH4+Nöt	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	pH 4	frysning	
Söt+Nöt	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	frysning	
pH4+Nöt	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	
<b>Långtidsurlakning</b>																			
L Söt+pH7+Nöt	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	pH 7	
L Söt+pH4+Nöt	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	
L Salt+pH4+Nöt	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	pH 4	
	<b>Antalet provkroppar i bajjorna varje vecka</b>																		
pH 4-bajja	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	42 (automatisk)	18 (manuell)	0
pH 7-bajja	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	6 (manuell)	18 (automatisk)	0

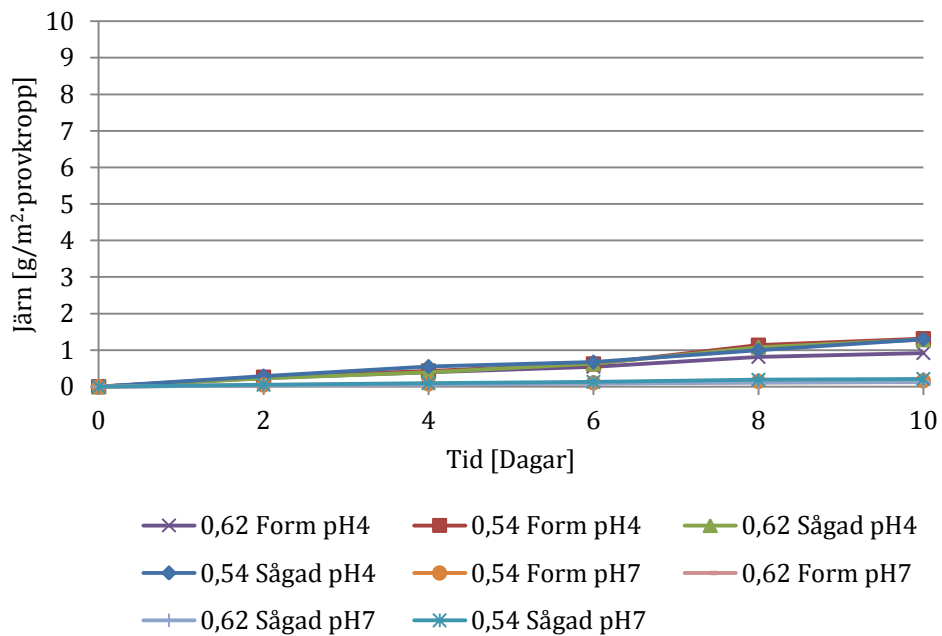
(automatisk) = automatisk pH-reglering med titratorutrustning  
 (manuell) = manuell pH-reglering med handhållen pH-mätare

## Bilaga D – Vätskeanalys

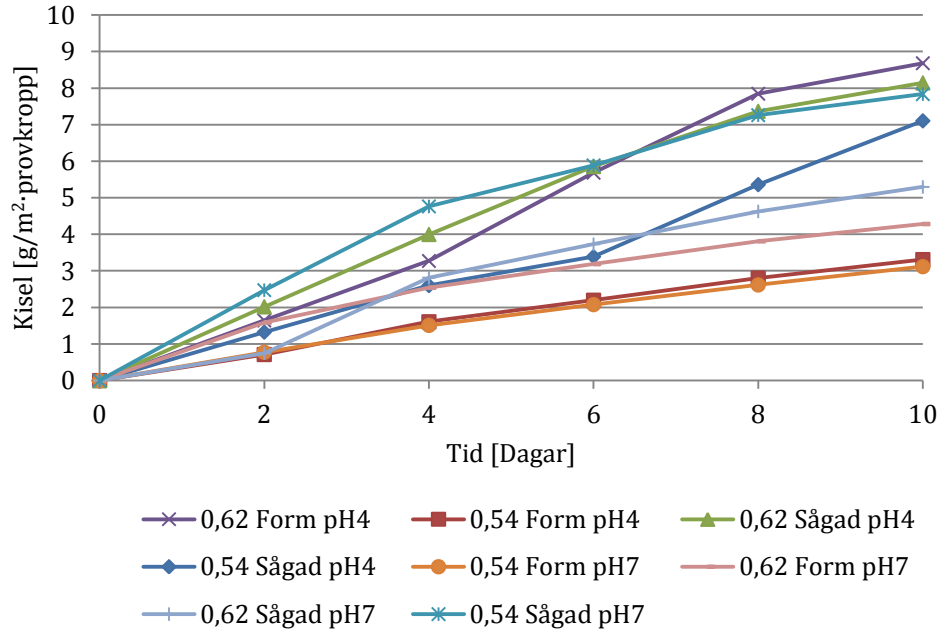
### Urlakning av aluminium



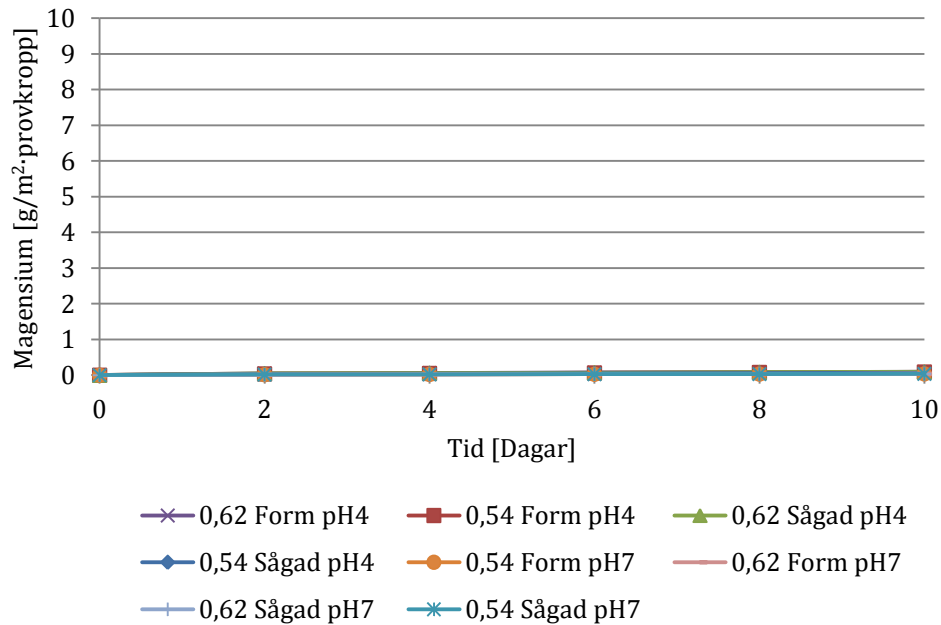
### Urlakning av järn



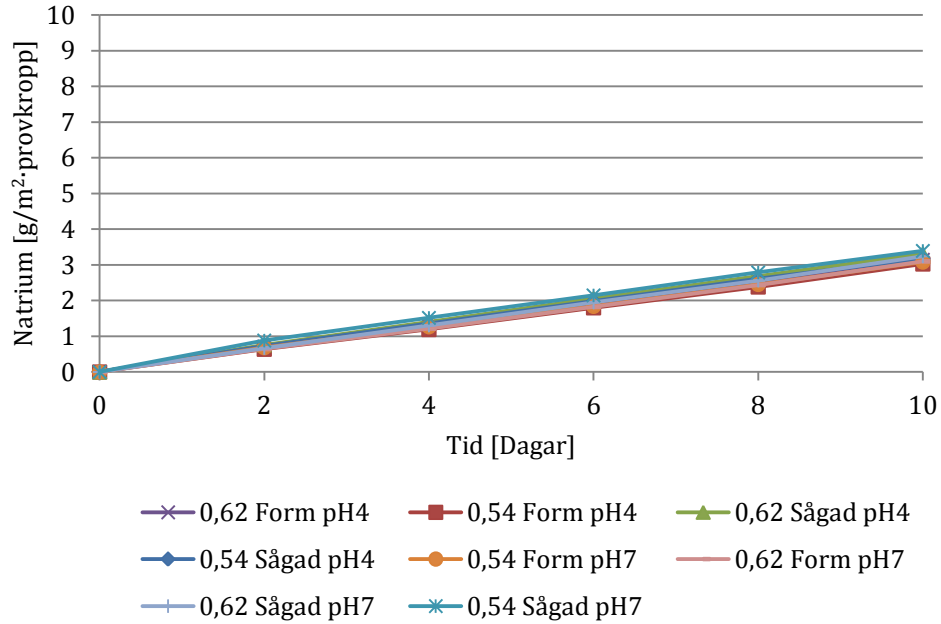
### Urlakning av kalium



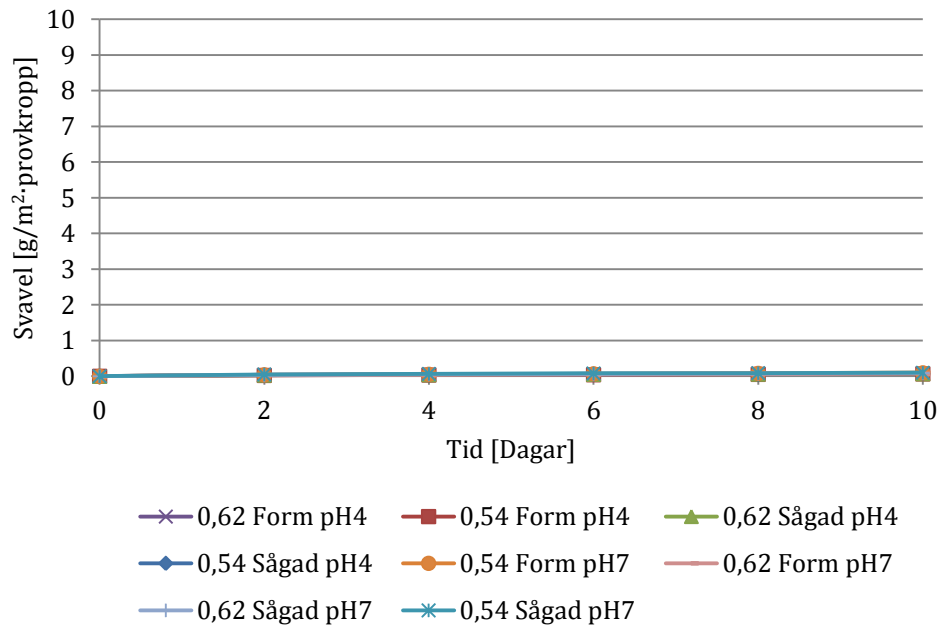
### Urlakning av magnesium



### Urlakning av natrium



### Urlakning av svavel



## Bilaga E – Enhetsomvandling

Från vätskeanalysen erhöles halter av urlakade joner i enheten mg/l. Då vätskeprover togs från tre olika behållare (hinkar, pH 4-balja och pH 7-balja) representerade vätskeproverna olika vattenvolymer samt olika antal provkroppar för urlakning. För att kunna jämföra resultaten från de olika behållarna med varandra behövde enheten räknas om. Till enhetsomvandlingen användes följande formel:

$$[mg/l] \cdot \frac{V}{1000 \cdot A \cdot \text{antal provkroppar}} = [g/(m^2 \cdot \text{provkropp})]$$

V = vattenvolymen [l]

A = provytans area [m<sup>2</sup>]

Beroende på vilken behållare som vätskeproverna hade tagits från sattes det in olika värden på vattenvolym och antal provkroppar. Vidare delades alla erhållna värden med arean för en provkropp vilket sattes till 0,14x0,14 m<sup>2</sup> (hänsyn togs till limsträngens bredd vilket kan skydda underliggande yta från urlakning).

- Vätskeprover tagna från hinkarna för urlakningskontroll representerade en vattenvolym på 5,5 liter och urlakning av en provkropp d.v.s. V = 5,5 och antal provkroppar = 1.
- Vätskeprover tagna från pH 4-balja representerade en vattenvolym på 85 liter, dock varierade antalet provkroppar varannan vecka. Under ojämn vecka låg där 42 provkroppar i baljan och under jämn vecka låg där 18 provkroppar i baljan d.v.s. V = 85 och antal provkroppar = 42 eller 18, se bilaga C.
- För vätskeprover tagna från pH-7 balja gäller att V = 85 och antal provkroppar = 18 eller 6 beroende på om det är jämn eller ojämn vecka, se bilaga C.

Att: Martin Rosenqvist  
Vattenfall R&D  
Laboratorievägen  
SE-814 26 Älvkarleby

## Undersökning av urlakning i betong i 4 st. tunnslip

### Uppdrag

CBI Betonginstitutet fick i uppdrag av Vattenfall R & D att undersöka hur djupt urlakning i betong skett i 4 st betongprover. Ett tunnslip tillverkades från vardera fyra betongprover och tunnslipen märktes med nummer enligt TABELL 1.

TABELL 1. Betongprov och korresponderande nummer på tunnslip.

Betongprov	Tunnslip nr
1: 0,54 S2 SSE.L	4081
2: 0,62 S1 SSE.L	4082
3: 0,54 S1 SAE.L	4083
4: 0,62 S3 SAE	4084

### Metod

Tunnslipen tillverkas från betongprov som impregneras med fluorescerande epoxi. Strukturanalys av betongen görs i tunnslip med hjälp av polarisationsmikroskop i planpolariserat och korspolariserat (mörkfält) ljus. Analys av cementpastans struktur och homogenitet görs i blåljus där fluorescens i cementpastan uppkommer. Ju tätare cementpasta, desto lägre ljusintensitet.

### Resultat

Resultaten presenteras i bildform. I korspolariserat ljus kan man se att det yttersta ytskiktet av proverna har karbonatiserat. Denna karbonatisering, som underlättas av urlakning, har skett på olika stort djup. Överlag var dock påverkan liten i de undersökta proverna. I kraftigt urlakad betong brukar man ofta kunna se att Portlanditen (calciumhydroxiden) lösts upp i en zon strax under det karbonatiserade ytskiktet. Dock är karbonatiseringen mycket begränsad om betongen är under vatten.

Bilderna presenteras antingen i korspolariserat ljus eller i blåljus. Nästan samtliga bilder är tagna från ytan och ca 5 mm nedåt i provet. Bildbredden, oftast motsvarande 6,7 mm, är angiven under varje bild.

#### Tunnslip 4081, prov 1

BILD 1 visar att det finns karbonatiserad betong närmast ytan, dock högst 1 mm ner. BILD 2 visar samma område men i blåljus. Man kan se att pastan har högre kapillärporositet närmast ytan vilket kan tyda på urlakning, men längre ner i provet finns andra områden med högre kapillärporositet vilket snarare tyder på lokal heterogen cementpastafördelning. Den högre kapillärporositeten närmast ytan kan även bero en begränsad vattenseparation.



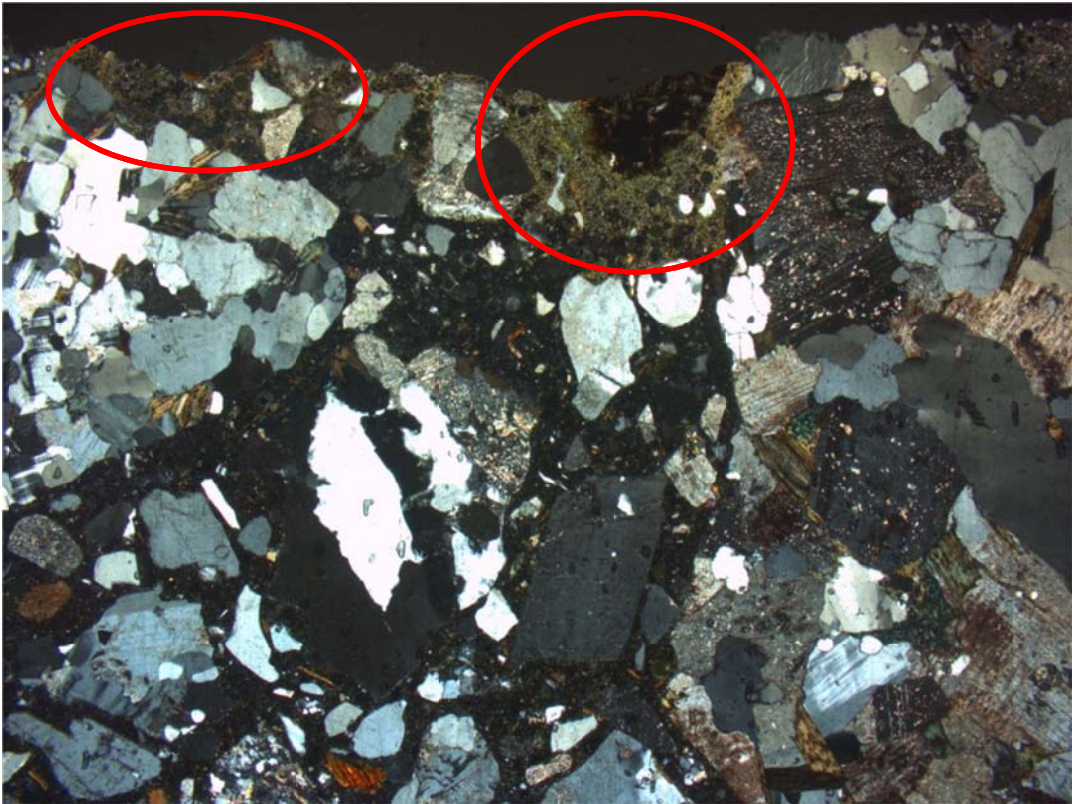


BILD 1. Prov 1 i korspolariserat ljus. Bildbredd 6,7 mm. I det översta skiktet kan man se gulaktigt korniga områden vilket är karbonatiserad betong. Se röda ringar. Karbonatiseringsdjupet motsvarar ca 1 mm maximalt.

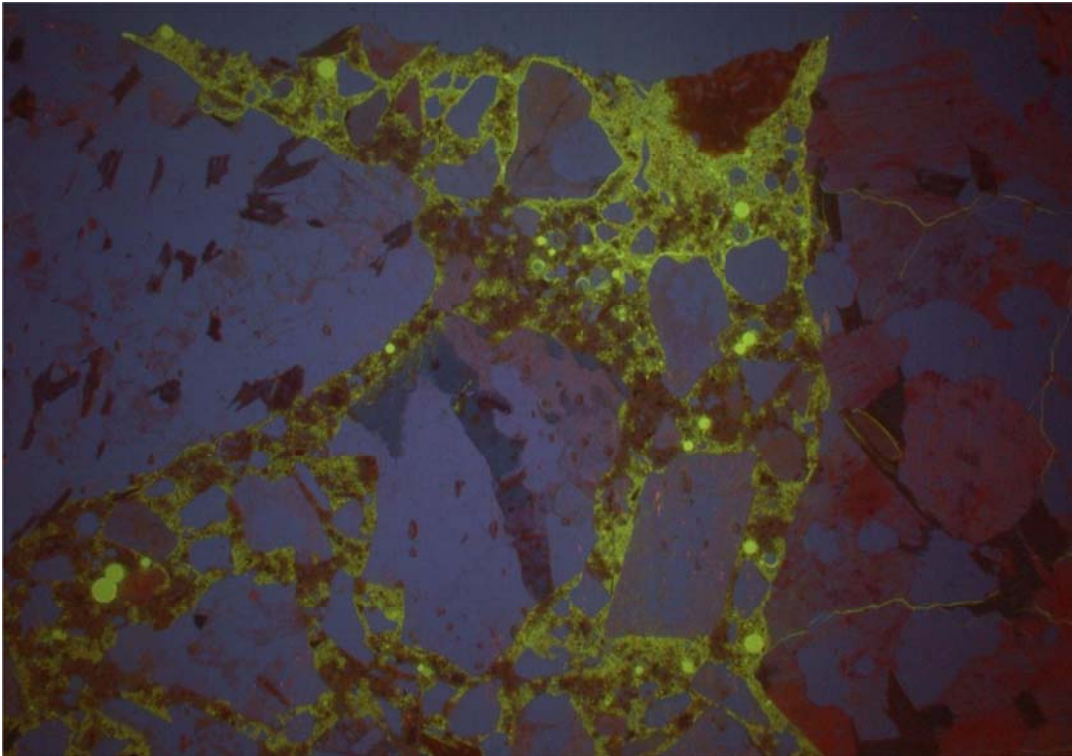


BILD 2. Samma område som i BILD 1 men i blåljus. Bildbredden är 6,7 mm.

BILD 3 visar ett annat område på kanten av tunnslip 4081. Här har karbonatisering upp till 4 mm in längs övergångszonen mellan ett ballastkorn och cementmatrisen. Det är dock endast mycket lokalt längs övergångszonen där kapillärporositeten är högre. I ett tredje område hade urlakning endast skett drygt en halv mm ner i provet.

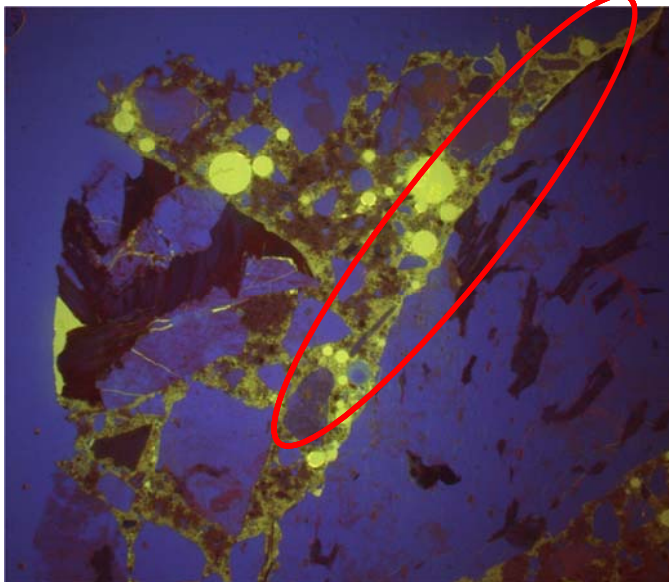


BILD 3. Högre kapillärporositet längs övergångszonen. Bildbredden är 5,7 mm.

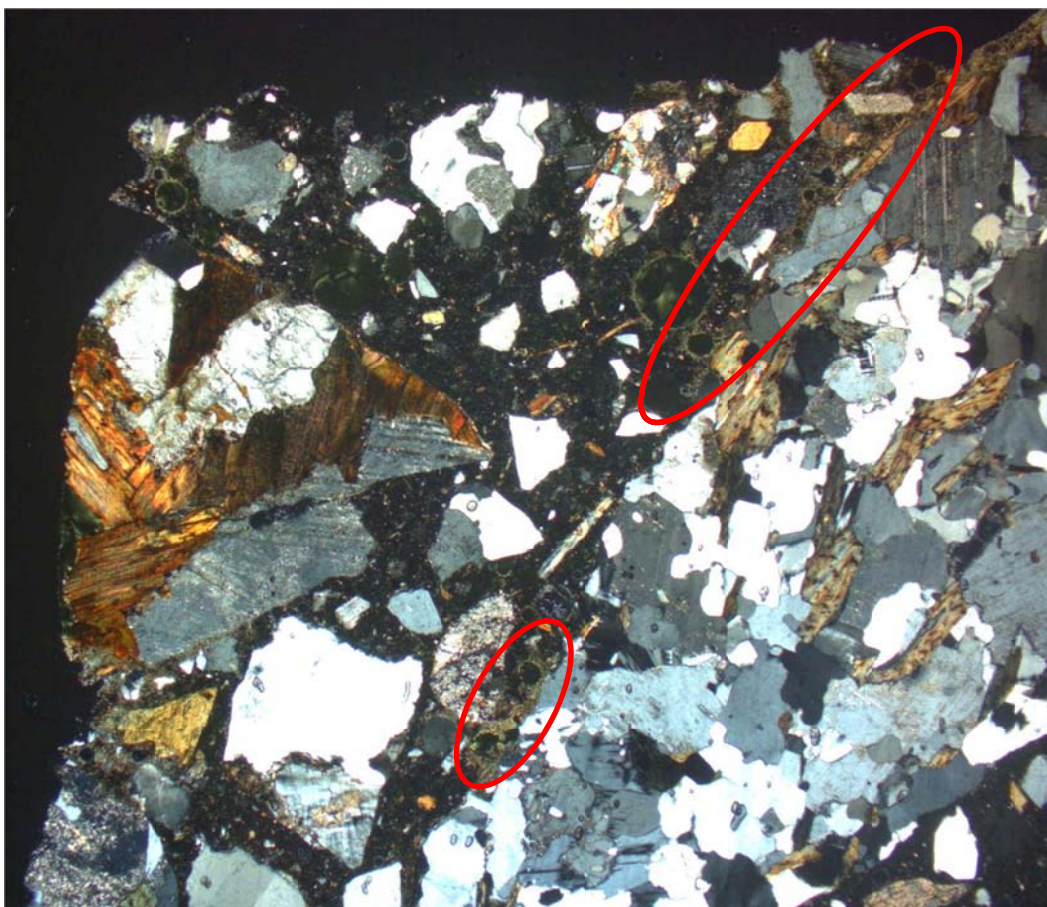


BILD 4. Samma område som i BILD 3 men i mörkfält. I de röda ringarna finns karbonatiserad cementpasta. Bildbredden motsvarar 5,7 mm.

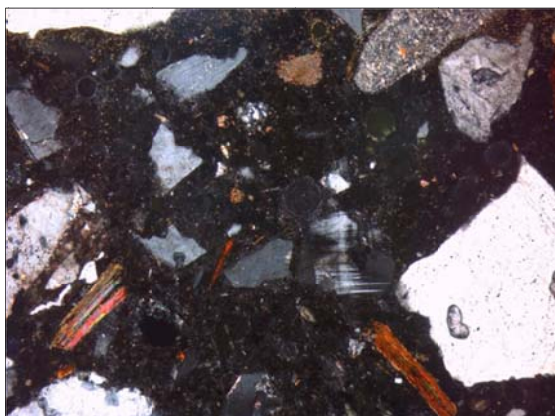


BILD 5a. Cementpastan 1-2 mm ner i provet i mörkfält. Bildbredden motsvarar 1,7 mm.

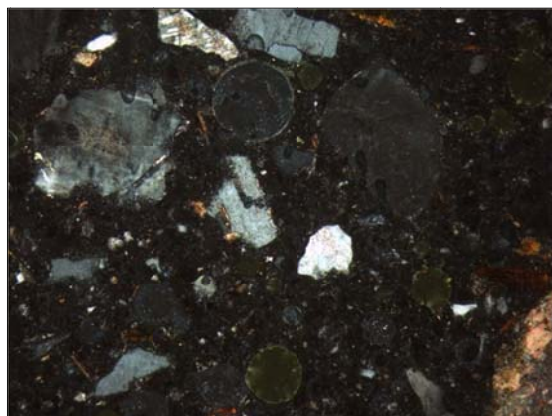


BILD 5b. Cementpastan 4-5 mm ner i provet i mörkfält. Bildbredden motsvarar 1,7 mm.

I BILD 5 har två områden i cementpastan studerats för att se om portlanditen har lösts upp. Det gick inte att se någon skillnad i strukturen, utan båda områdena visade på närvaro av ungefär samma mängd kristallin Portlandit.

#### Tunnslip 4082, prov 2

Avbildningen i blåljus (BILD 6) visade på en högre kapillärporositet i detta prov jämfört med i prov 1. Men här gick inte att se tydliga tecken på urlakning eller karbonatiseringen. I BILD 7 avbildas samma område i som i BILD 6 men i mörkfält. Karbonatisering har maximalt skett ca 0,9 mm ner i provet.

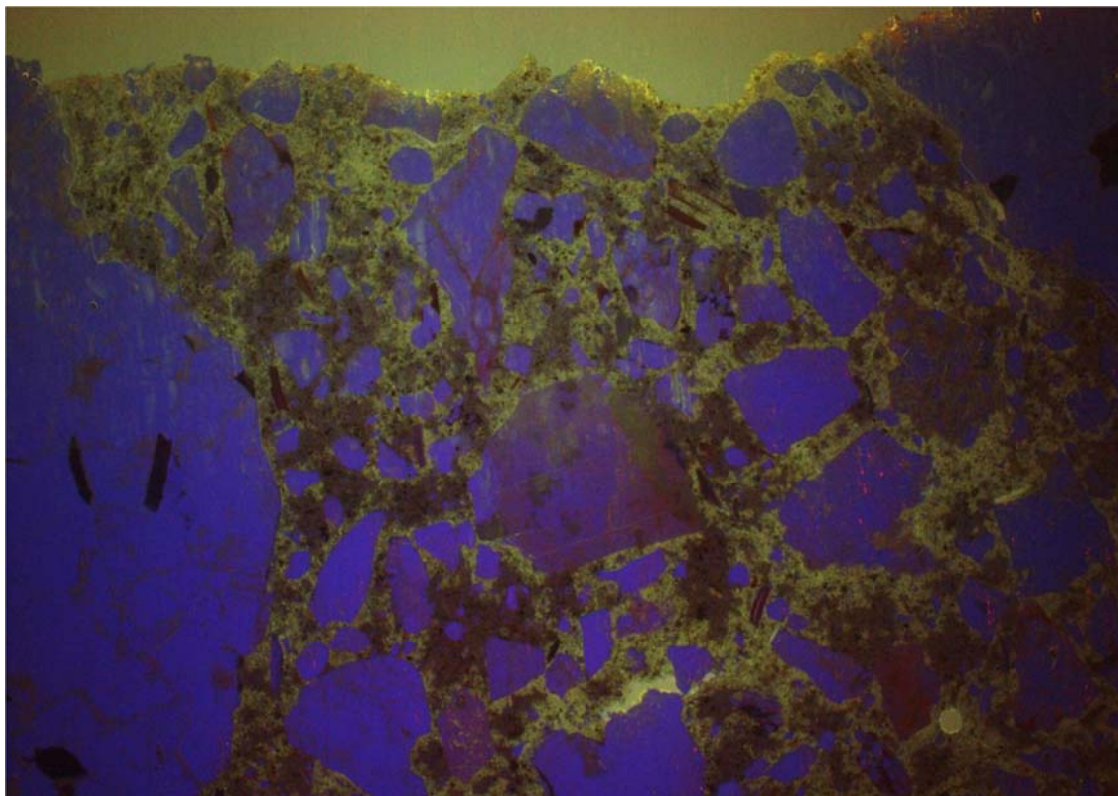


BILD 6. Ytskiktet på prov två avbildat i blåljus. Bildbredden motsvarar 6,7 mm.

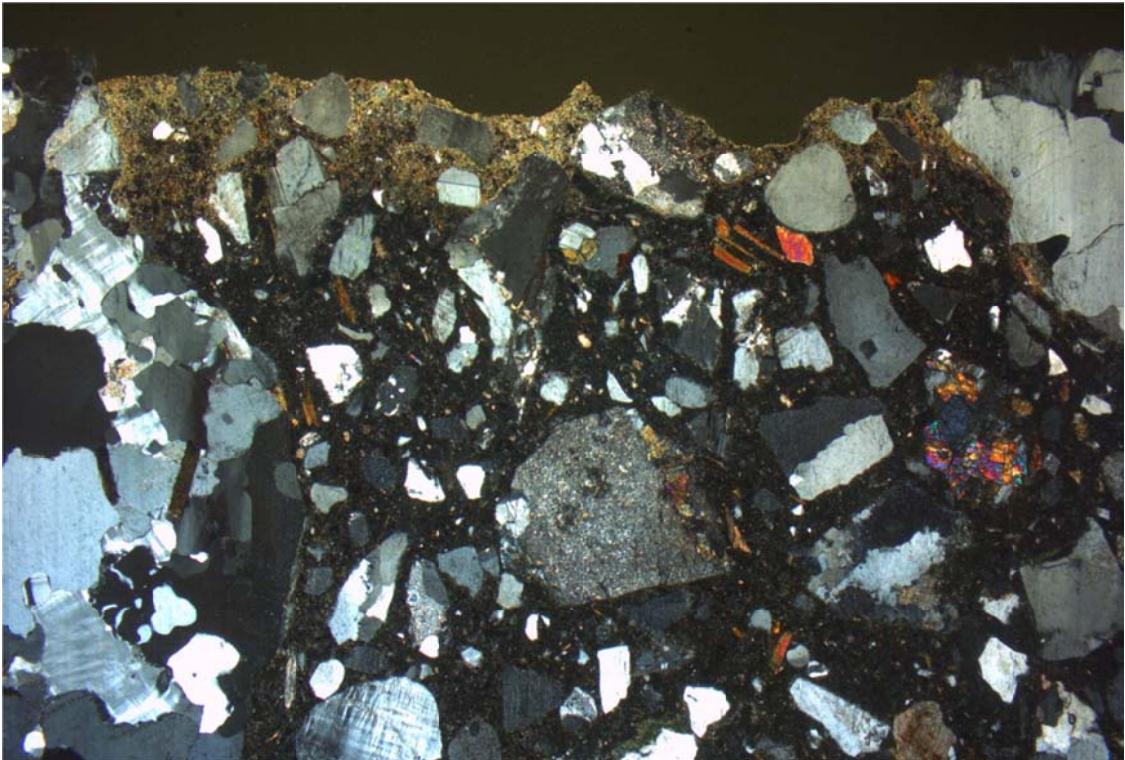


BILD 7. Prov två i mörkfält. Karbonatisering (gula korniga områden) har skett högst ca 0,9 mm ner i provet. Bildbredden motsvarar 6,7 mm.

Tunnslip 4083, prov 3

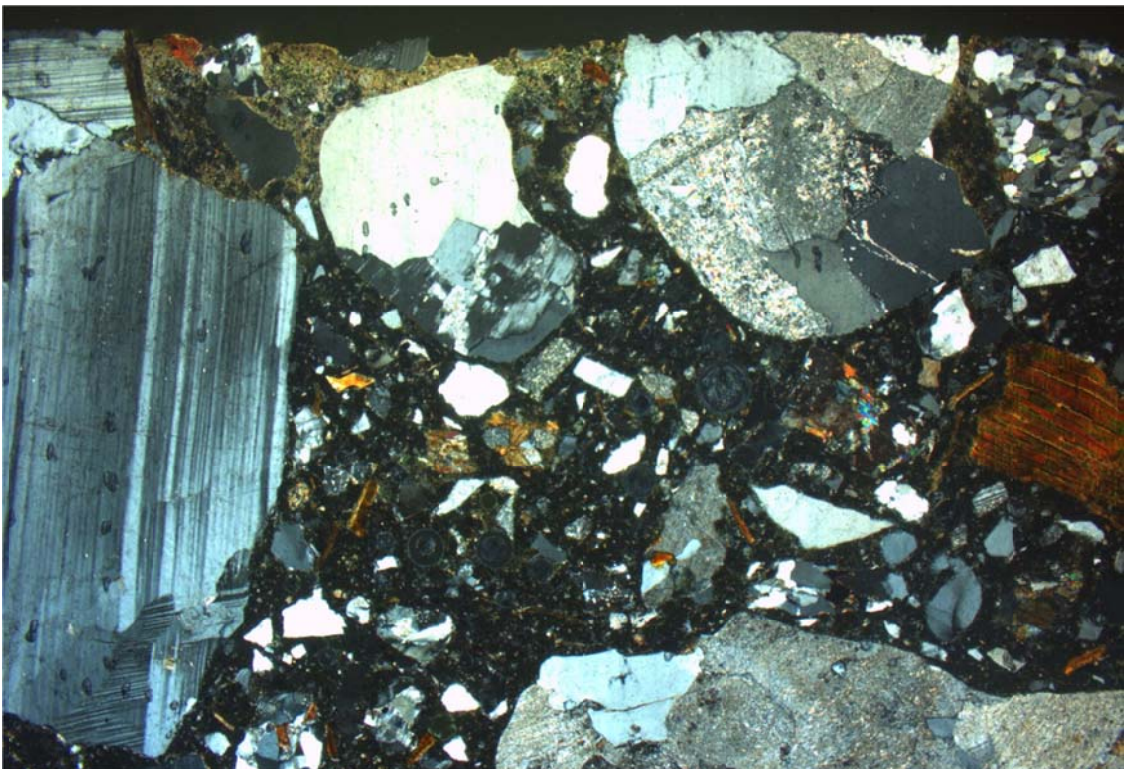


BILD 8. Prov 3 i mörkfält. Karbonatisering har lokalt (t.v. i bilden) skett ner till 0,9 mm djup. Bildbredden motsvarar 6,7 mm.

Prov 3 uppvisade inga större skillnader jämfört med prov 1 och prov 2 avseende urlakning av cementpastan. Kapillärporositeten var i stort den samma som i prov 2, men högre jämfört med i prov 1, se BILD 9. BILD 8 visar lokalt ett karbonatiseringsdjup på 0,9 mm, men i övrigt var karbonatiseringsdjupet mycket begränsat, jämför med BILD 10. Dock har även här karbonatisering skett ca 1,5 mm in i cementmatrisen längs med övergångszonen närmast ett ballastkorn markerat med en röd ring i BILD 10.

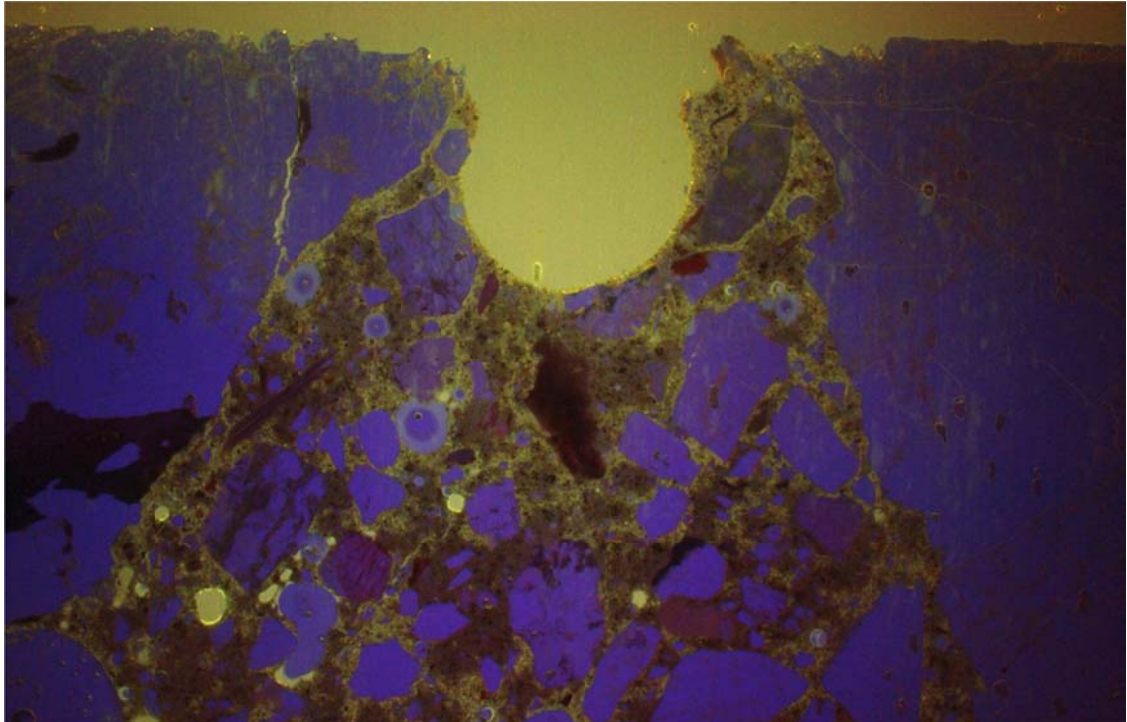


BILD 9. Prov 3 avbildat i blåljus. Bildbredden motsvarar 6,7 mm.



BILD 10. Samma område som i BILD 9 avbildat i mörkfält. Bildbredden motsvarar 6,7 mm.

Tunnslip 4084, prov 4

Detta prov hade mer heterogen pasta än övriga prover. Se BILD 11. Lokalt var karboniseringsdjupet upp till 1 mm (BILD 12) men i genomsnitt mindre. Se BILD 13. Inte heller här kunde någon upplösning av Portlandit i skiktet närmast ytan observeras.

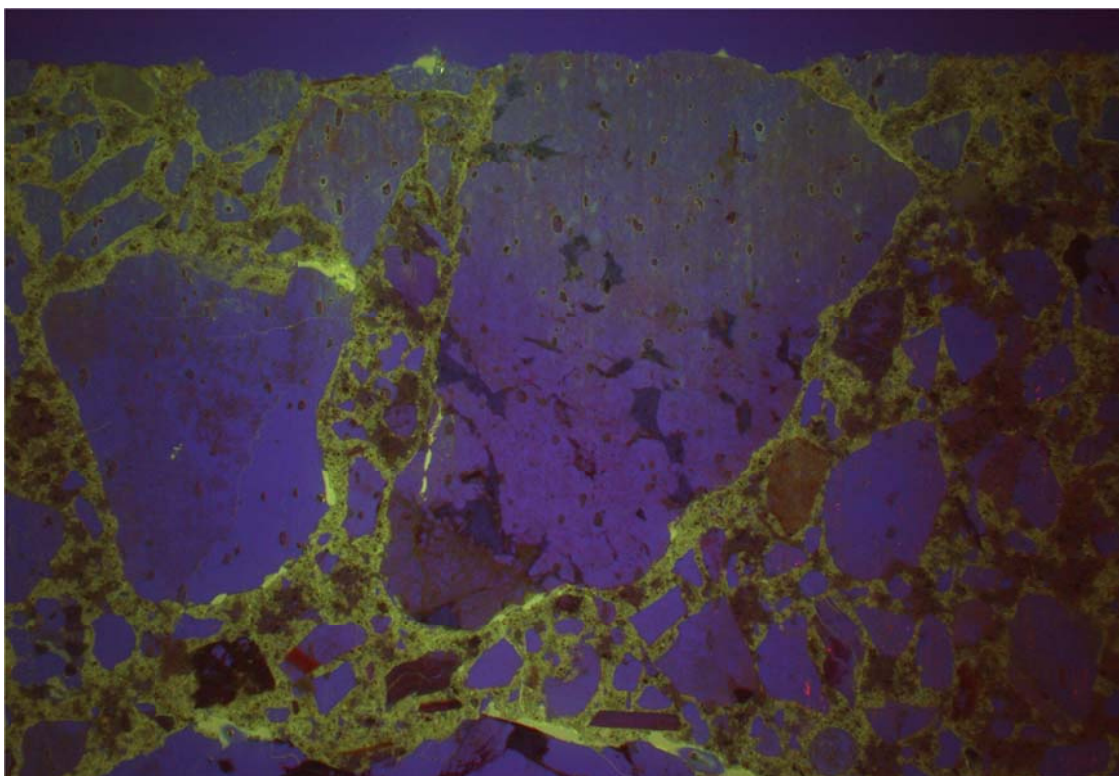


BILD 11. Provet avbildat i blåljus. Kapillärporositeten i cementpasta är betydligt högre i vänstra delen av provet än i den högra. Bildbredden motsvarar 6,7 mm.



BILD 12. Karbonisering ca 0,8 mm ner i provet (mörkfält). Bildbredden motsvarar 6,7 mm

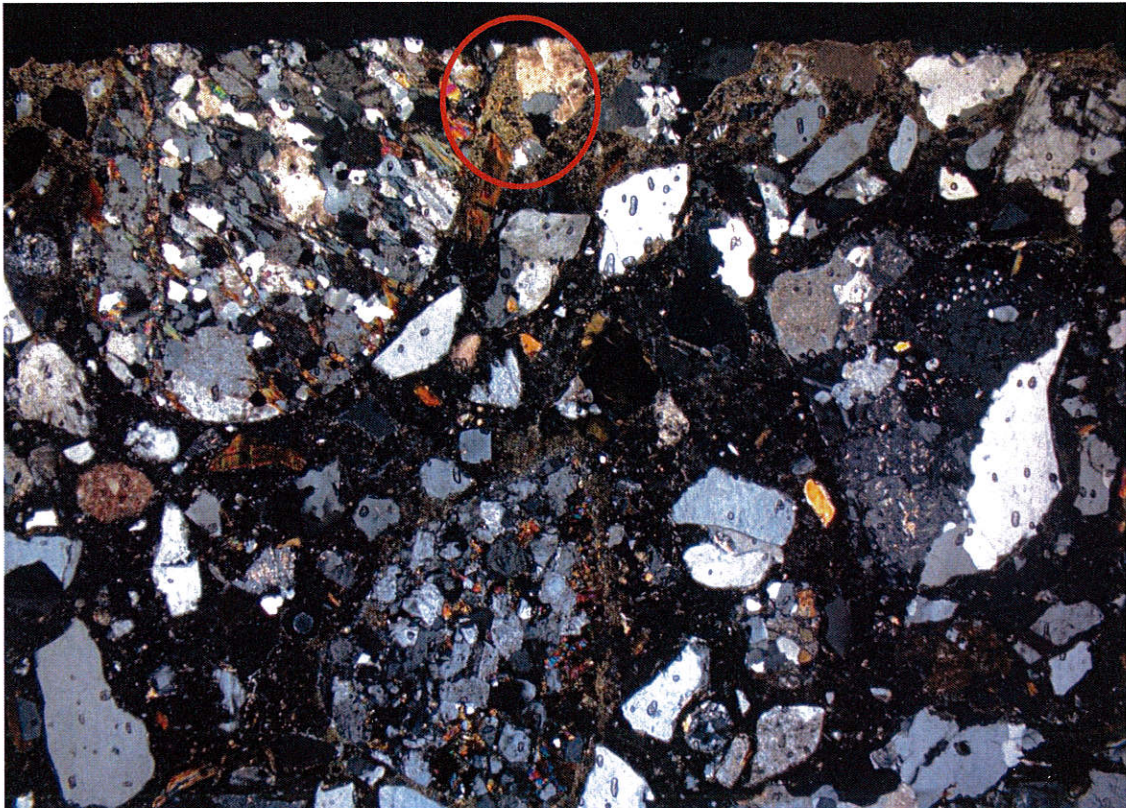


BILD 13. Karbonatisering ca 0,8 mm in i provet. . Bildbredden motsvarar 6,7 mm.

## Sammanfattning av resultat

Resultaten av analysen i ljusmikroskopet sammanfattas i nedanstående TABELL 1.

TABELL 1: Maximalt karboniseringsdjup, urlakning samt upplösning av Portlandit.

Prov	Max. karb.djup	Urlakning	Upplösning av Ca(OH) <sub>2</sub>
1	0,9 (3,8) <sup>a</sup>	Begränsad, ca 1mm	Nej
2	0,9	Begränsad, < 1mm	Nej
3	0,9 (1,5) <sup>a</sup>	Begränsad, 0,5 - 1 mm	Nej
4	0,8 (4 <sup>b</sup> )	Begränsad, < 1mm	Nej

a) I parentes anges karboniseringsdjup längs med en övergångszon.

b) Karbonisering längs en övergångszon som ej redovisas på någon bild i rapporten.

Sammanfattningsvis var urlakningen liten eller mycket liten i samtliga prover. Det var svårt att se några skillnader mellan proverna beträffande urlakning av cementpastan.

## CBI Betonginstitutet AB

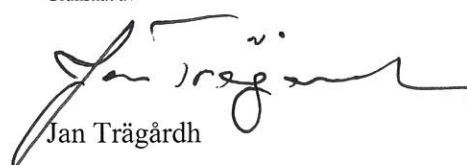
### Material

Utfört av



Lars Kraft

Granskat av



Jan Trägårdh