



CBI Betonginstitutet

## Uppdragsrapport nr 2009-10

# Materialanalys av sprutbetong från tunnlar i Göteborg och Stockholm



CBI Betonginstitutet

## Uppdragsrapport nr 2009-5

### Materialanalys av sprutbetong från tunnlar i Göteborg och Stockholm

Björn Lagerblad

Prof. Tel 08-6961124 E-mail bjorn.lagerblad@cbi.se + Tel + e-post

2009-01-15

Uppdragsgivare: BESAB

Nyckelord: Sprutbetong, kvalitet, tunnslip, SEM, porositet, skador

Antal blad inkl bilagor

34

CBI Betonginstitutet AB

www.cbi.se

ingår i SP-koncernen 

Stockholm

100 44 Stockholm

Besök Drott Kristinas väg 26

Tel 08-696 11 00

Fax 08-24 31 37

Borås

c/o SP

Box 857

501 15 Borås

Tel 010-516 50 00

Fax 033-13 45 16

Lund

c/o LTH Byggnadsmaterial

Box 118

221 00 Lund

Tel 046-222 31 14

Fax 046-222 44 27

Plusgiro

454538-0

Bankgiro

243-9412

Bank

Svenska Handelsbanken

Org.nummer

556352-5699

VAT No.

SE556352569901

Säte: Stockholm

**Materialanalys av sprutbetong från tunnlar i Göteborg och Stockholm****Innehåll**

<b>1</b>	<b>Orientering.....</b>	<b>4</b>
1.1	Analysteknik.....	5
<b>2</b>	<b>Materialanalyser.....</b>	<b>7</b>
2.1	Björns Trädgård.....	7
2.2	Östberga .....	12
2.3	Agnegatan .....	17
2.4	Gullhedstunneln.....	21
2.5	Brudarmossen .....	25
2.6	Shelltunneln.....	28
<b>3</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>Slutsatser .....</b>	<b>34</b>

## 1 Orientering

Mindre service tunnlar i berg är vanligt förekommande i Stockholm och Göteborg. De används för bl.a. för tele- och elkablar. Ytorna på dessa tunnlar är ofta, speciellt i transmissiva vattenförande zoner, täckta med sprutbetong.

För detta arbete har tunnlar i Stockholm inspekterats och sprutbetongen har provtagits. Syftet med undersökningen var att analysera och få fram vilken kvalitet betongen har och vad som hänt med den. Från Göteborg har prover skickats till CBI.

Tunnlarna i Stockholm är endast delvis sprutade och då framför allt vid transmissiva vattenförande zoner. Syftet med sprutningarna har i torra zoner varit att förstärka och stabilisera berg. Betongen är ganska tunn och har ingen bärande förmåga.

I de transmissiva zonerna är berget dels mera trasigt och ofta vattenförande. Generellt är sprutbetong sämre i de vattenförande zonerna. Man kan förmoda att det är svårare att spruta i vattenförande zoner men den sämre kvalitén kan även bero på att vatten luckrat upp betongen. I de vattenförande zonerna kan man ofta finna ”bompartier” och vattengenomslag. Med vattengenomslag menas att man finner missfärgning och kristallbildning på betongytan vilket indikerar att vatten runnit över och eller penetrerat betongen och givit utfällningar på ytan.

Från tunnlar i Stockholm har det valts ut 3 partier med bra respektive dålig betong. Även från Göteborg har 3 områden valts ut (4-6).

1. Björns Trädgård,
2. Östberga
3. Agnesgatan
4. Gullvikstunneln
5. Brudarmossen
6. Shelltunneln

På de flesta proverna har borrhävar tagit från sprutbetongen in i berget. Proverna har skickats till CBI Betonginstitutet i Stockholm. Inget är meddelat om ålder, cement, tillstyvnadsaccelerator eller typ av sprutning.

Generellt är betongen i alla tunnelavsnitten inhomogen och skiktad. I de flesta fall är antagligen betongen torrsprutad.

## 1.1 Analysteknik

De olika proverna har skickats till CBI Betonginstitutet i form av kärnor. Dessa kärnor har inspekterats visuellt varefter de sågats upp och det har tillverkats tunnslip. Detaljer har studerats i svepelektronmikroskop.

Ett tunnslip är ett preparat som slipats så tunt att ljus kan penetrera materialet.

Betongtunnslipen är 25 µm tjocka. Tunnslipen som täcker en yta av 45 x 25 mm och går i de flesta fall från ytan och inåt men i en del fall så täcker de gränsen mellan berg och sprutbetong.

Tunnslipen har vakuuminpregnerats med epoxi innehållande fluorescensmedel. I vanligt ljus syns detta som ett gult preparat. CBI's polarisationsmikroskop är utrustat med UV-ljuskälla. Med UV-ljus så får man ett "fluorescensljus" som är proportionerligt mot mängden fluorescensmedel vilket i sin tur relaterar till hur mycket epoxi provområdet innehåller. Detta medför att hålrum får intensivast ljus och att porös pasta blir ljusare än tät pasta. Med hjälp av referenstunnslip och antagandet om att vct är relaterat till porositeten som i sin tur relaterar till styrkan kan man uppskatta vct och hållfasthet.

Vi har försökt fastsätta är betongkvalité, betongstruktur och eventuella skador. Det fryser aldrig i tunnsliperna och möjliga skademekanismer är alkalisilikareaktion, sulfatreaktion och lakning. Alkalisilikareaktionen är ett resultat av att ballasten reagerar med cementpastan så att man får en expansion. Sulfatreaktionen är ett resultat av att sulfatjoner från miljön (grundvatten) trängs in i betongen och reagerar med aluminatjoner från cementpastan. Alkaliacceleratoren som var vanlig innan den alkalifria utvecklades baseras på alkalialuminat och ökar därmed förutsättningarna för sulfatreaktion (Lagerblad et al 2007). Sulfatreaktionen medför en uppluckring och expansion som kan ge skador.

Från den visuella inspektionen vet vi att det förekommer vattengrenomslag och lakning i de vattenförande zonerna. Detta kan, om grundvattnet innehåller sulfatjoner, leda till sulfatreaktion. Om vattnet penetrerar så kommer reaktionen att börja i övergången till berg och leda till att betongen släpper. Om sulfaten kommer från vatten som rinner över ytan så kommer detta att leda till en uppluckring av ytan. I det fallet att sulfatförande vatten rinner längs en porös zon kan sulfatangreppet leda till att ettringitnålar fälls ut vilket borde leda till en förtätning..

Vid lakning beror det på var och hur vattnet penetrerar. Generellt medför lakning att kalciumhydroxid (portlandit) som är den mest lösliga komponenten i cementpasta lakas ur

vilket ökar porositeten och försvagar betongen. Upplösningen börjar där betongen först kommer i kontakt med vatten då mättat vatten inte lakar. Efter att all portlandit lösts ut så destabiliseras alla andra pastakomponenter (Lagerblad 2003). Effekten av lakning beror därför på hur vattnet rör sig vid berget, längs zoner, i sprickor eller på ytan.

I tunnslip kan man även observera karbonatisering. Karbonatisering beror på att kalciumkomponenterna i cementpasta inte är stabila i kontakt med koldioxid och karbonatjoner (Lagerblad 2006). Både portlanditkristaller och kalciumjonerna i cementgelen kommer att lösas upp och kalciumet kommer att bindas till karbonatjoner och bilda kalciumkarbonatkristaller (kalcit). Analysen i mikroskop görs med polariserat ljus och korsade polarisationsplattor varvid färgen avslöjar den materialspecifika dubbelbrytningen. Vid denna uppställning så släcks ljuset ut när det passerar amorfa material såsom cementgel (C-S-H). Portlandit har en låg dubbelbrytning i förhållande till kalcitkristallen. Detta medför att med korsade polarisatorer så får den karbonatiserade pastan en ljus färg.

I normal betong karbonatiseras betongen från ytan och den propagerar inåt med tiden. I flera av proven finner man emellertid stråk med ”karbonatiserad” cementpasta inne i sprutbetongen. Det sammanhänger i allmänhet med porösa partier varvade med normal cementpasta. Dessa zoner kan inte ha uppkommit som ett resultat av koldioxid som trängt in från ytan. Detta har tolkats som att kolsyrerikt vatten har rört sig i dessa zoner vilket medför att det är ett fenomen som beror på vattengenomträngning och därmed är kopplat till lakning. Det kan emellertid även bero på bildningen av olika typer av aluminatkristaller med ursprung i tillstyvnadsacceleratorn. Vi återkommer i diskussionen till detta.

Ett annat fenomen som är karakteristiskt är om hålrummen har kristalltillväxt i sig eller inte. När en betong är vattenmättad och hålrummen är fyllda med vatten så sker en förgrovning och omkristallisering där de nya kristallerna växer i vätskan. Detta medför att om man finner kristaller i hålrum så vet man att betongen är vattenmättad.

Tunnslipen gav inte all behövlig information. Därför har proven även analyserats i svepelektronmikroskop (SEM). I SEM får man en betydligt större upplösning och med hjälp av energi dispersiv teknik kan man analysera kemin i en punkt eller på en bestämd yta. Med hjälp av SEM kan man därför med hjälp av kornform och kemi identifiera enskilda komponenter och mineral. Man kan också få en uppfattning av vilket typ av cement som använts. Vi måste dock påpeka att de kemiska analyserna inte är helt exakta, då man måste bestämma vilka element man skall analysera på och då tekniken inte kan analysera mängden bundet vatten. Det görs därför en analys där alla analyserade element normaliseras till 100 % oxider.

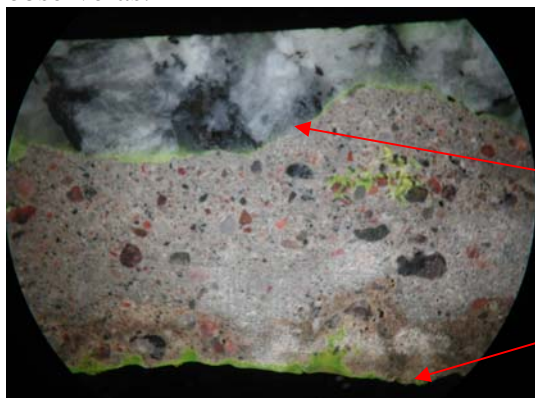
## 2 Materialanalyser

### 2.1 Björns Trädgård

#### ”Bra” sprutbetong

##### Visuellt

Detta prov är taget från ett tunnelparti där sprutbetongen ser bra ut. Sprutbetongen i kärnorna är mellan 15-30 mm tjock. Ingen armering eller fiberinblandning kan observeras. Betongen är varvig men relativt homogen. Granitisk naturballast med korn upp till ca 5 mm kan observeras.

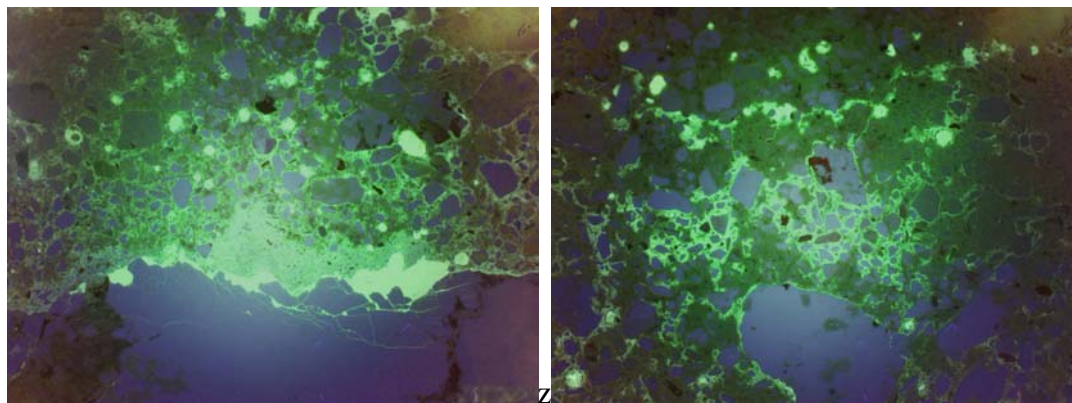


*Provbit: Berg på ovansidan.*

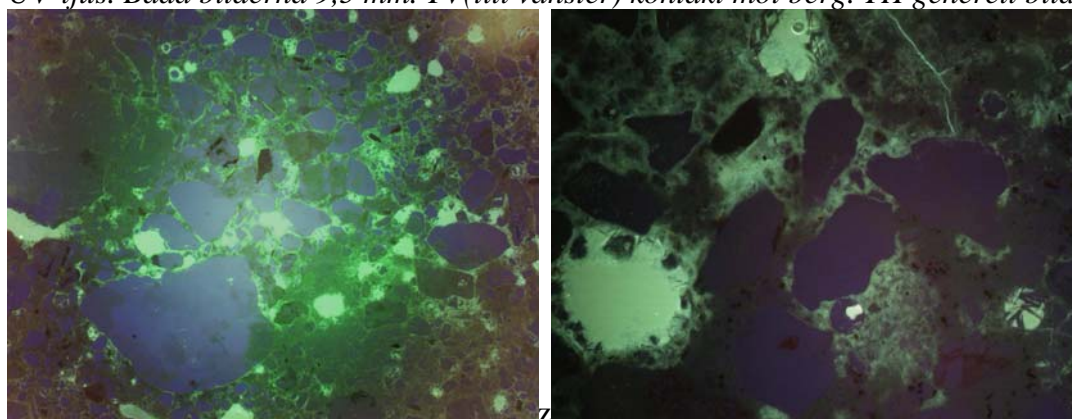
*Sprutbetongen är mellan 17 och 25 mm tjock. En glipa och svaghetszon kan observeras mellan sprutbetong och berg. Poröst ytterlager, cirka 3mm*

#### Tunnslip (3146)

Karbonatisering är ojämn men med ett medeldjup på runt 6 mm. Det är en porös pasta utan sten vid kontakt mot berg. Det är en relativt homogen betong med enstaka återstående cementkorn. De täta partierna har ett vct runt 0,4 medan de porösa har ett vct på över 0,5. Luftporerna är delvis fyllda med kristaller vilket tyder på hög fuktbelastning. Proven innehåller granitisk naturballast med sten upp till 5 mm. Man kan tydligt se att partiet mot berg är mera poröst och att det fläckvis inte binder. Provet har typiskt ganska mycket inblandningsluft och man kan finna glipor vid sten.



*UV-ljus. Båda bilderna 9,5 mm. TV(till vänster) kontakt mot berg. TH generell bild.*



*TV 4,8 mm. Generell bild. TH 2,5 mm. Hålrum delvis fyllt med kristaller*

## SEM

Man kan observera enstaka ohydratiserade cementkorn. En del men inte alla hålrum innehåller sekundära kristaller av portlandit och ettringit vilket indikerar vattenfyllnad av porerna och därmed en hög fuktbelastning.

## ”Dålig”. sprutbetong

### Visuellt

Betongen är mellan 10 till 30 mm tjock. Varvig med ljusa och mörka band. Provet innehåller granitisk finkornig ballast med upp till 5 mm stora korn.





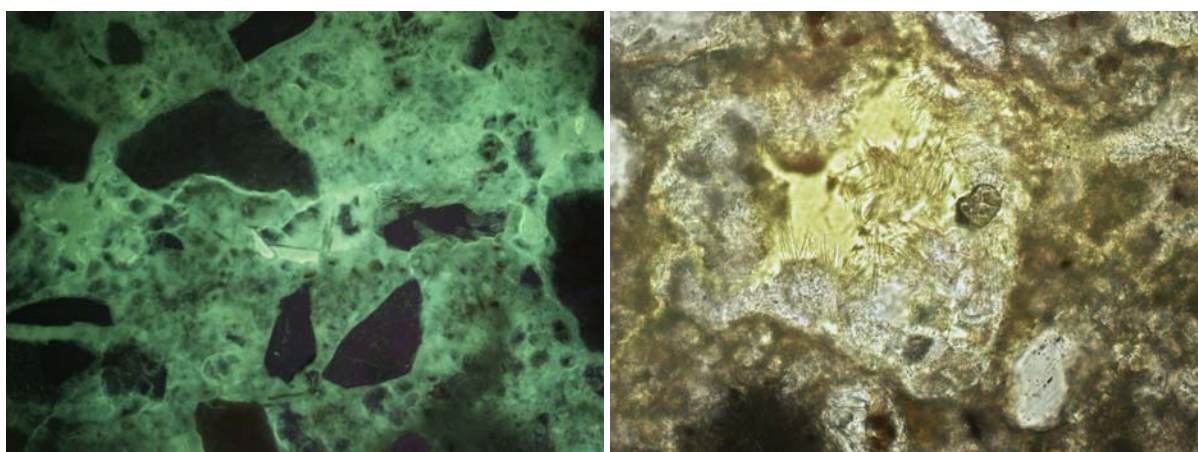
*Provbit. Ovansidan mot berg. Tjocklek mellan 12 och 20 mm. Poröst betong mot berg och på ytan. Distinkt skiktning.*

### **Tunnslip 3147**

Relativt den bra sprutbetongen vid Björns Trädgård är den ”dåliga” relativt porös. Den har även en kraftigare bandning. Den relativa tätheten ligger mellan vct 0,5 och 0,8.

Karbonatisering är några mm tjock och ojämn. Den relativt tunna karbonatiseringen (relativt den bra betongen) är antagligen orsakad av hög fuktbelastning (som minskar karbonatiseringshastigheten). Stråk av ”karbonatiserad” pasta inne i provet indikerar transport av karbonatjoner.

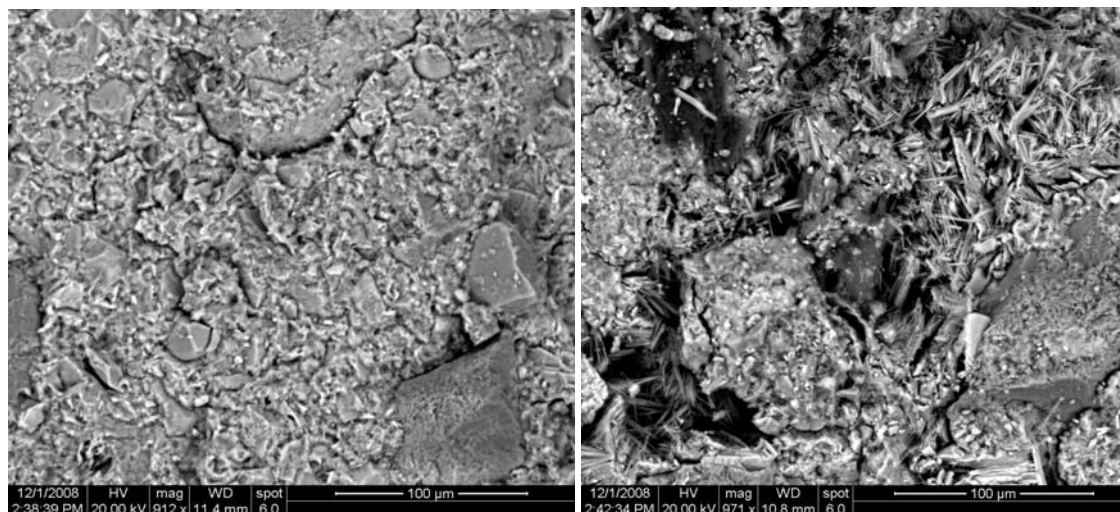
Vid kontakten mot berg finner man en mycket porös zon med kalcitutfällning och ettringitnålar. Detta tyder på att det runnit vatten mellan berg och sprutbetong. Vad porositeten beror på är svårt att säga men det kan beror på ett överskott av accelerator vilket indikeras av aluminat/ettringit. Hålrum och porer i hela betongen fyllda med kristaller vilket tyder på hög vattenmättnad/penetrerande vatten.



*TV (till vänster) UV-ljus. Bild 2,5 mm. Poröst lager. TH (Till höger) vanligt ljus. Bild 1,2 mm. Luftpor fylld med CH och ettringit.*

### **SEM**

Man finner en stor variation i täthet. I den porösa pastan kan man finna kristaller av ettringit och kalciumaluminat. Detta är antagligen produkter från tillstyvnadsacceleratoren och indikerar därmed ojämn sprutning där vissa lager fått mera accelerator.



*SEM foto. TV Tät pasta. TH Porös pasta med ettringit och portlandit. Detta är antagligen en porös pasta med mycket ettringit från tillstyvnadsacceleratoren i vilken det fällts ut portlanditkristaller.*

### **Analys Björns Trädgård**

Skillnaden mellan bra och dålig ligger i att den dåliga betongen är mera skiktad och att den dåliga även generellt är mera porös.

Karbonatiseringsdjupet är större i den bra än den dåliga vilket måste vara ett resultat av att fuktbelastningen hos den dåliga är mycket högre. Man finner även mera sekundära kristaller i hålrummen i den dåliga betongen vilket även detta tyder på en högre fuktbelastning.

Typiskt så finner man ohydratiserade cementkorn bevarade i den bra men inte i den dåliga betongen. Antagligen kommer den dåliga betongen från en trasmissiv vattenförande zon.

De kemiska analyserna i SEM visar att den dåliga betongen och då speciellt de porösa lagren har ett större innehåll av aluminat och sulfat. Om man utgår från att cementet är samma så tyder detta på en större inblandning med tillstyvnadsaccelerator. Detta i sin tur skulle indikera att man vid sprutning av de transmissiva zonerna ökade ängden tillstyvnadsaccelerator för att få en snabbare bindning vilket kan förklara den sämre kvalitén. Det kan emellertid även bero på lakning och remobilisering på grund av vatten.

*Kemiska analyser från SEM. Energidispersiv teknik.*

	Bra	Bra	Bra	Bra	Dålig	Dålig	Dålig	Dålig	Dålig poröst
Na <sub>2</sub> O									
MgO	2,84	2,79	2,92	2,35	3,40	3,59	2,31	3,92	1,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,91	7,85	6,63	6,05	7,75	7,43	6,77	7,34	14,06
SiO <sub>2</sub>	26,78	30,56	26,73	23,75	29,12	32,23	25,69	26,82	16,08
SO <sub>3</sub>	2,61	2,79	2,82	2,99	2,49	2,22	0,88	1,87	6,72
CaO	58,82	53,17	57,87	62,45	54,15	52,47	62,0	57,73	60,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,04	2,84	2,73	2,2	3,08	2,07	2,34	2,32	1,11

Man kan förvänta problem med dåliga betongen på grund av den lägre hållfastheten och vattengenomträngning. Vattengenomträngningen kommer att successivt göra betongen sämre.

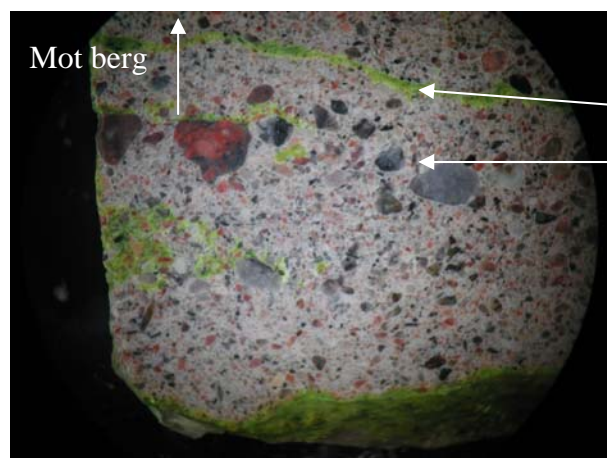
Den sämre betongkvaliteten i den dåliga beror på sämre sprutning vilket i sin tur kan bero på att man tillförde mera tillstyvnadsaccelerator då det var en transmissiv zon.

## 2.2 Östberga

### Östberga "bra"

#### Visuellt

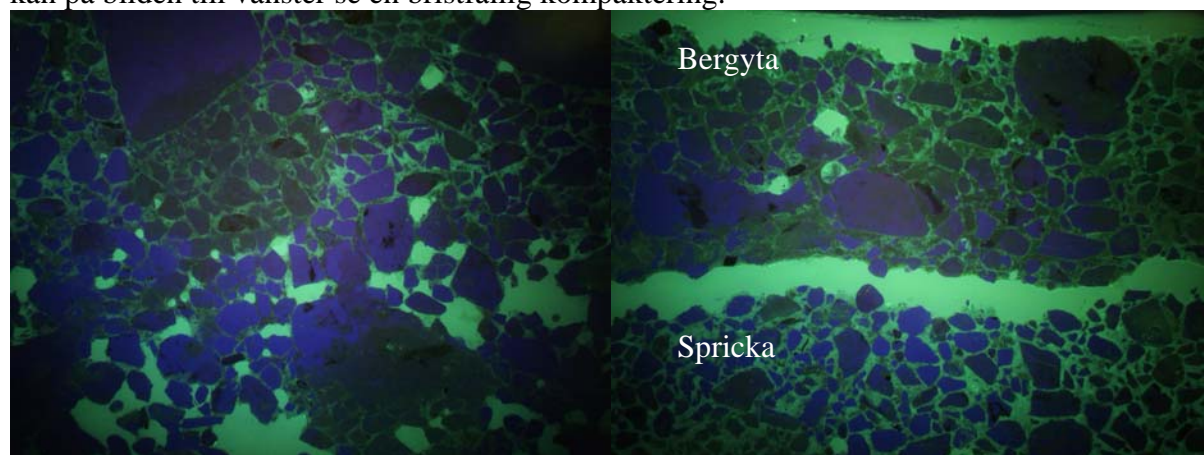
Sprutbetongen är mellan 20-40 mm tjock. Den är tät in mot berg men med ett poröst lager ca 3 mm från berg. Svag bandning. Granitisk naturballast med upp till 5 mm stora korn.



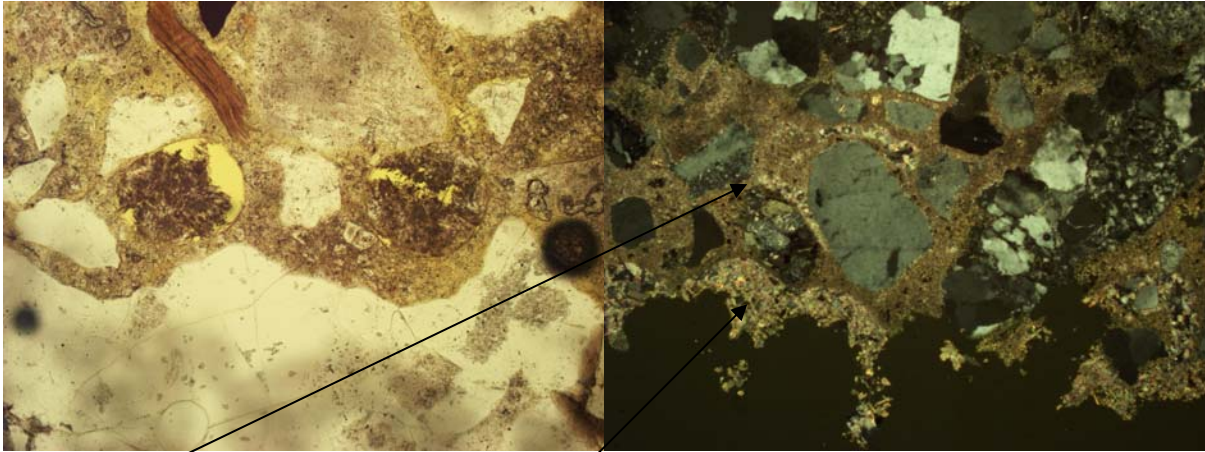
*Provbit. Det gula är epoxi och markerar en spricka/porös zon som även syns i tunnslip. Sten är ojämnt fördelat och tyder på ojämn sprutning.*

#### Tunnslip (tunnslip 3149)

Något (relativt svagt) bandad betong. Dåligt mellan sprutningar. Kalcitutfällningar på ytan vilket indikerar rinnande kalkhaltigt vatten, dvs lakning i närheten. På översta bilden till höger kan man se en spricka med sitt ursprung i två sprutomgångar (mera stora stenar överst). Man kan på bilden till vänster se en bristfällig kompaktering.



*UV-ljus Bilder 9,5 mm. TV inhomogent part med kaviteter. TH Porös zon/spricka mellan två sprutningar (olika ballaststorlek).*



*TV. bild 1,2 mm vanligt ljus. Porer med kristaller. TH 2,5 mm. Polariserat ljus  
Karbonatisering (1-3 mm) och utfällning av kalcitkristaller på ytan.*

### **SEM.**

Vid bergytan återfinnes kristaller av kalciumaluminat ( $\text{CaO} = 60\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30\%$ ).

Cementpastan är en vanlig blandning med både  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  och  $\text{SiO}_2$ . I kaviteter finner man ettringitkristaller.

Kalciumaluminat finns i tillstyvnadsacceleratoren och den skall reagera med cementpastan och bilda ettringit. Förekomsten tyder därmed på att sprutningen varit ojämn och att det kommit en ”skvätt” av acceleratoren (i torrform) innan cement och vatten.

På ytan finner man kalcitkristaller som kommit från utfällningar i vatten vilket tyder på en våt yta. På ytan men inte längre in finner man kristallbildning i luftporer. Detta indikerar att vatten rinner över ytan men att vatten inte penetrerat betongen. Kalcitkristallerna bildas i alkalint vatten som reagerar med luftens koldioxid varvid kalcitkristaller faller ut.

### **Östberga ”dålig”**

#### **Visuellt**

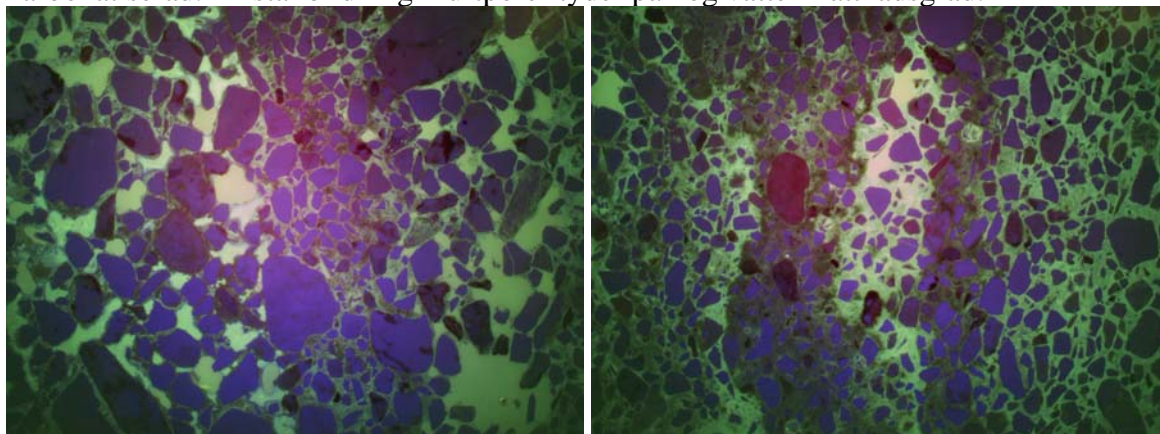
Bandad porös sprutbetong. I vissa zoner är ballastkornen nästa lösa. Dålig svag betong.



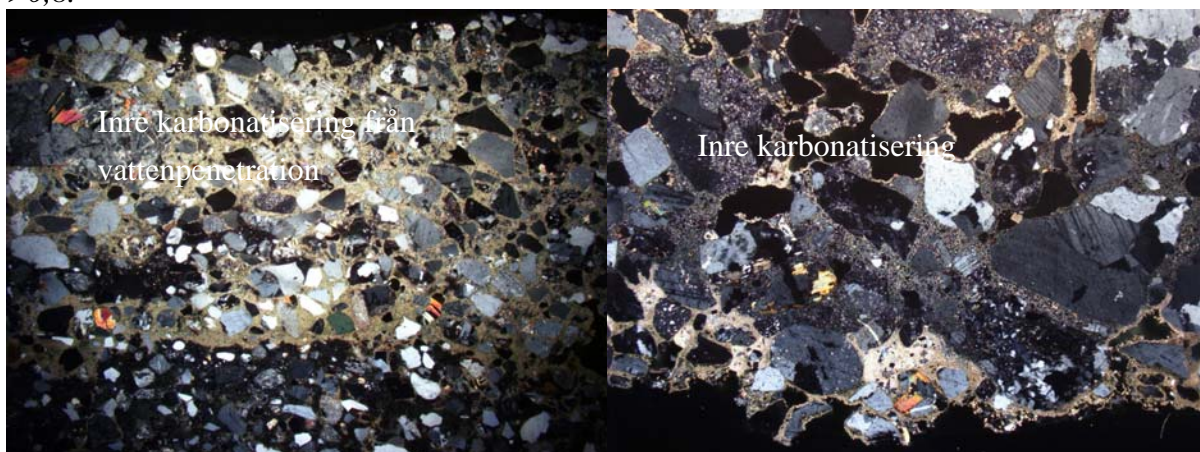
Provbit. Distinkt bandning. Lokalt sandiga lager vilket tyder på brist på cementpasta eller lakning.

### Tunnslip (tunnslip 3148)

Betongen är distinkt bandad med porösa lager. I de porösa lagren är betongen delvis karbonatiserad. Kristallbildning i luftporer tyder på hög vattenmättnadsgrad.



UV-ljus. Bilder 4,8 respektive 9,5 mm. Det visar den bandade porositeten. Vct mellan 0,5 och >0,8.



Polariserat ljus. Ljust är karbonatiserat, mörkt intakt cement pasta. Den vänstra bilden (9,5 mm) visar parti mot berg. Det är karbonatiserat omvandlat antagligen beroende på vatten som runnit längs kontakten mot berg. Här kan man även finna utfällningar av kalcitkristaller.

Bilden till höger (4,8mm) visar ytan. Här kan man se ett mycket tunt lager av vanlig karbonatisering från ytan och inåt. Längre in kan man finna karbonatisering och kalkutfällningar i kaviteter. Detta indikerar att den yttre karbonatiseringen kommer från luft medan den inre kommer från penetration av kolsyrerikt vatten.

## Analys Östberga

Skillnaden mellan bra och dålig tyder på att speciellt den ”dåliga” är en misslyckad sprutning som delvis gav en mycket porös betong. Man kan även finna porösa zoner i den ”bra” sprutbetongen men inte lika omfattande.

Den kemiska analysen visar att den dåliga betongen innehåller mera  $Al_2O_3$ . Detta kommer från tillstyvnadsacceleratoren och visar att man doserat kraftigare i den dåliga sprutbetongen. Det är möjligt att man överdoserade med tillstyvnadsaccelerator i den dåliga då man sprutade på en transmissiv zon och behövde snabb tillstyvnad för att betongen inte skulle bli vattenmättad och falla av. Även den ”bra” betongen är relativt dålig vilket tyder på en mindre lyckad sprutning.

Båda sprutbetongerna, men speciellt den dåliga sprutbetongen, har penetrerats av vatten vilket har ökat porositeten och medfört karbonatisering och kalcitutfällning. Man kan anta att kalcitutfällningarna på den bra sprutbetongen kommer från vatten som penetrerat betong i närheten. Denna vattenpenetration medför att man får ett forstskridande nedbrytning som med tiden kommer att fördärva betongen helt.

### SEM energidisperiv analyser

	Bra	Bra	Bra	Bra	Dålig	Dålig	Dålig	Dålig
Na <sub>2</sub> O	0,56	1,58	1,16	0,89	0,9	0,78	1,17	0,77
MgO	1,67	3,27	1,53	2,71	4,86	3,62	2,69	3,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,03	6,6	6,22	5,07	6,39	7,02	7,1	6,09
SiO <sub>2</sub>	24,7	26,87	25,02	24,03	26,63	24,62	27,42	27,05
SO <sub>3</sub>	2,16	3,81	2,92	2,37	2,95	3,16	3,18	3,88
K <sub>2</sub> O	0,51	0,72	0,73	0,23	0,30	0,23	0,55	0,37
CaO	64,22	54,69	58,73	62,1	55,54	57,43	55,6	54,84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,78	1,7	3,69	2,59	2,42	3,15	2,29	3,46





## 2.3 Agnesgatan

### Agnesgatan ”bra”

#### Visuellt.

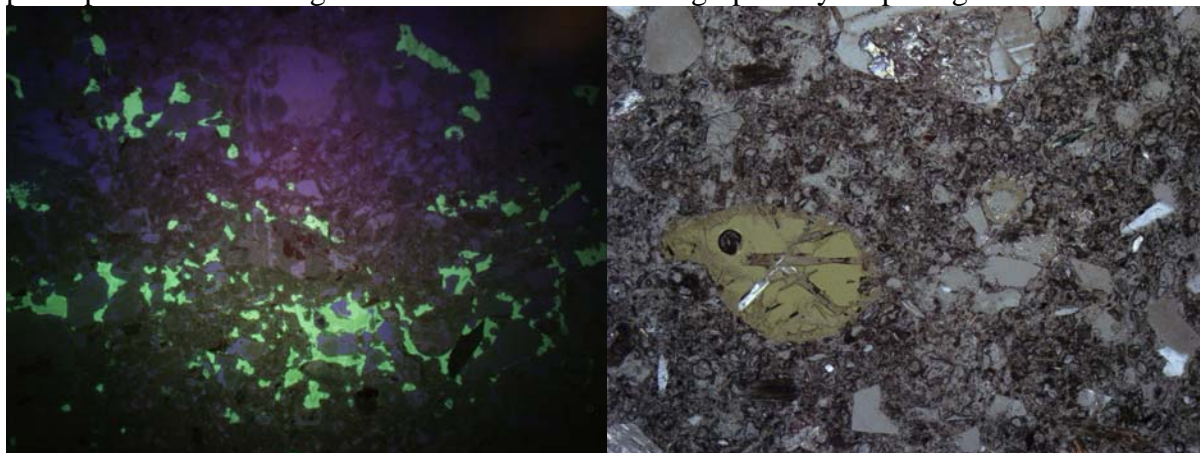
Bra tät betong. Ballast är natur med upp till 5 mm kornstorlek. Tjockleken varierar mellan 8 och 30 mm. Två prover varav en är en tjock och en är tunn. Den tunna sprutningen är relativt homogen men med vita utfällningar mot berg.



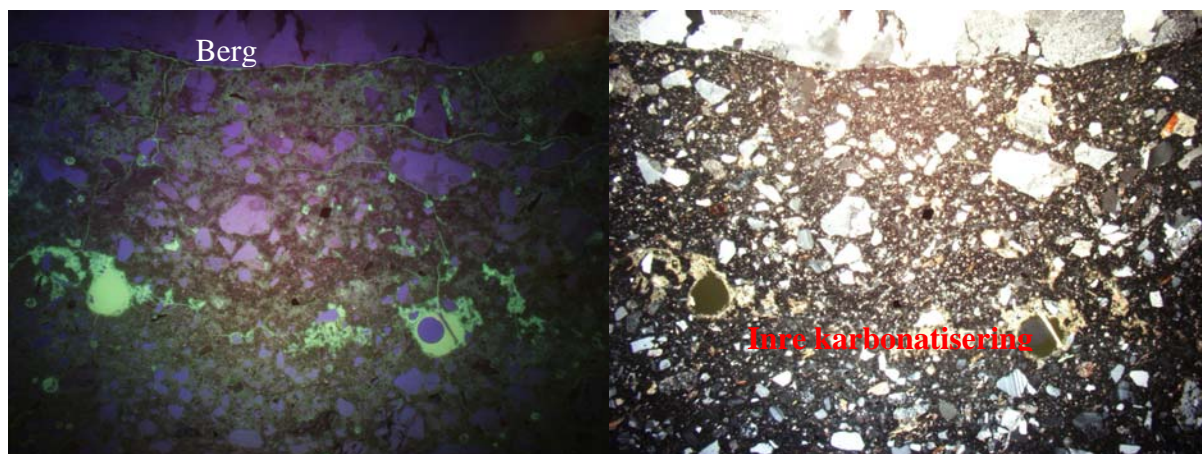
Provbit av det tjocka provet. Man kan se en viss skiktning men i övrigt ett bra prov.

#### Tunnslip (3151, 3152)

Något porös och ojämnt karbonatiserad yta. Det finns ohydratiserad cement kvar vilket indikerar ett lågt vct, vilket i sin tur ger tät betong. Karbonatisering på några mm vilket tyder på tät pasta och/eller hög fuktmättnad. Kristallbildning i porer tyder på hög vattenmättnad.



*Tunnslip 3151. Den tjocka sprutningen. TV. UV-ljus. Bild 9,5 mm. Tät pasta med en del kaviteter. Ingen omvandling karbonatisering. TH vanligt ljus. Bild 1,2 mm. Pasta med cementkorn kvar. Kristallbildning i luftporer tyder på hög fuktighet.*



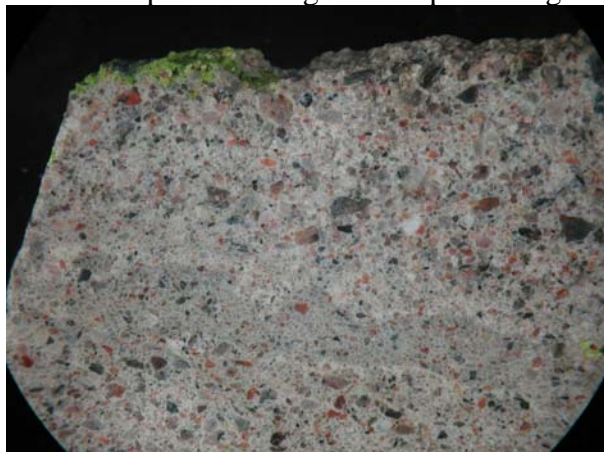
*Tunnslip 3152. Den tunna sprutningen. TV UV-ljus. Bild 9,5 mm. Tät pasta även mot berg. Två sprutgångar med poröst lager mellan. TV vanligt ljus. Bild 9,5 mm. Samma yta som TV. Karbonatisering i porösa lagret vilket tyder på vattengenomträngning längs det porösa lagret.*

Tät cementpasta vid kontakt mot berg. Delvis fyllda hålrum vilket tyder på hög vattenmättnad.

### **Agnegatan ”dålig”**

#### **Visuellt**

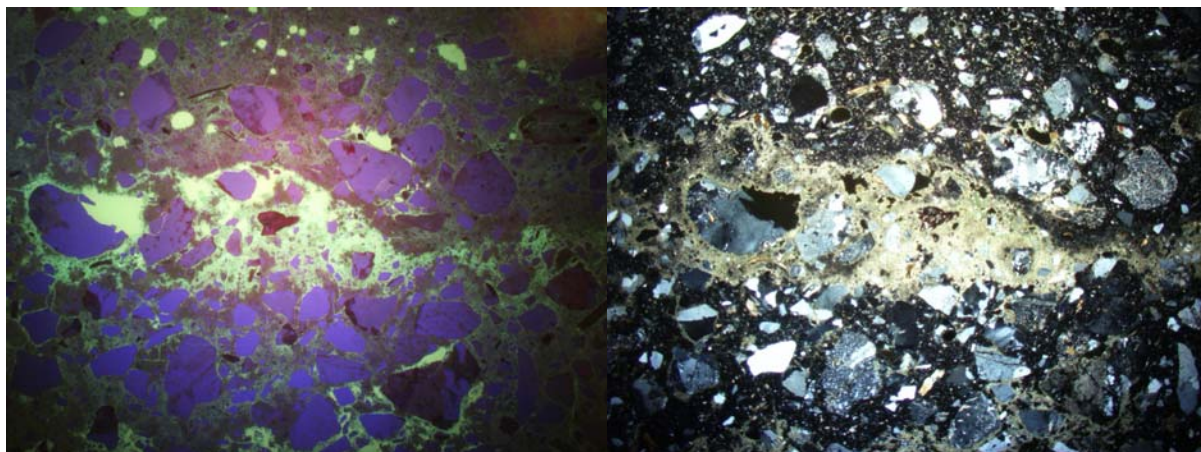
Relativt tjock sprutning (ca 50 mm). Betongen är mycket inhomogen med porösa lager. Man kan finna sprickbildning i en del porösa lager. Bruna och ljusa lager mot bergytan.



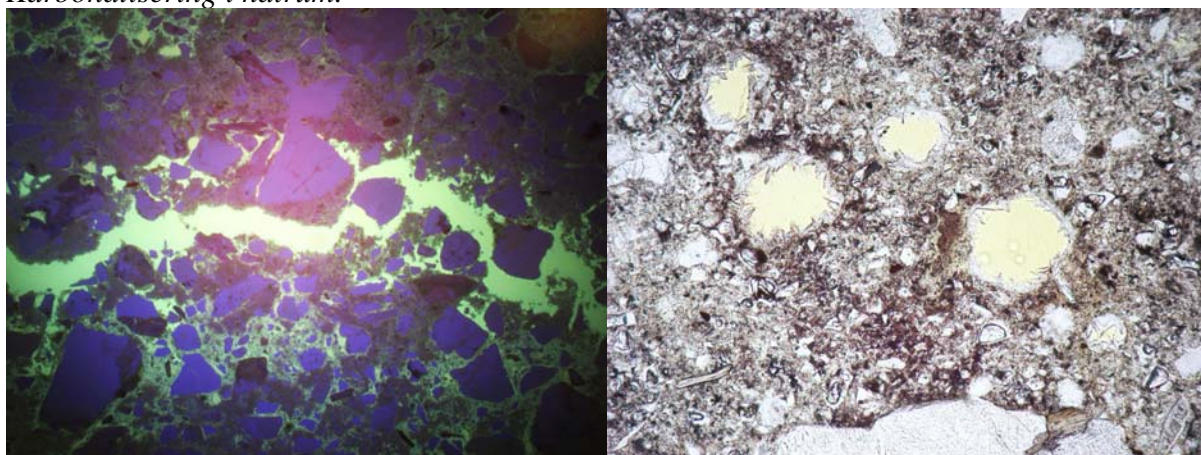
Provbit från Agnegatan dålig. Bergytan nedåt.

#### **Tunnslip (3150)**

Provet uppvisar endast några mm karbonatisering. Det finns partier inne i betongen som är karbonatiserade vilket tyder på öppning för lufttransport eller rörelse med kolsyrerikt vatten. Den är bandad och inhomogen med öppna sprickor. Man finner delvis fyllda hålrum. En del porösa svaga partier in mot berg. De homogena täta partierna har bra kvalité med kvarvarande cementkorn. Ojämnt fördelad ballast tyder på ojämn sprutning.

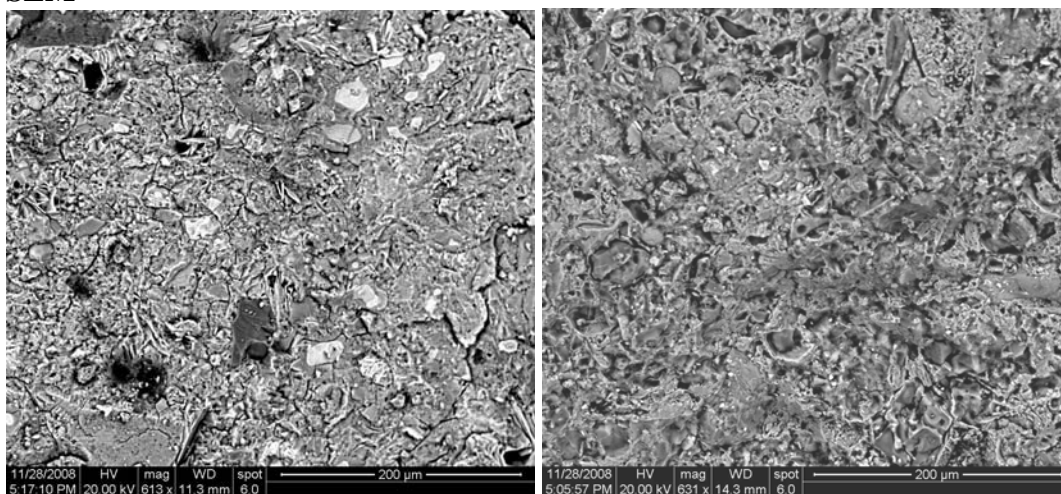


*TV UV-ljus Bilden är 9.5 mm lång. Poröst parti mellan sprutningar. TH polariserat ljus. Karbonatisering i hålrum.*



*TV UV-ljus 9,5 mm. Spricka poröst parti. TH vanligt ljus. 1,2 mm. Porer fyllda med kristaller. Rikligt med kvarvarande cement.*

## SEM



*SEM-foto som visar ytan mot berg. Pastan är porös och innehåller rikligt med ettringitkristaller.*

## Analys Agnesgatan

Det är stor kvalitetsskillnad mellan den bra och den dåliga betongen. Den dåliga betongen är tjock, bandad och med distinkt porösa partier. De täta partierna i den dåliga sprutbetongen är bra med kvarvarande cementkorn. Detta indikerar att skillnaden mellan den bra och den dåliga ligger i själva sprutningen. Karbonatiseringen av porösa partier inne i betongen tyder på att det förekommer transport av kolsyrerikt vatten i dessa. Skillnaden mellan den ligger i utförandet. Det kan bero på att man överdoserat med accelerator i den dåliga.

### SEM-analyser

	Bra	Bra	Bra	Bra	Dålig	Dålig	Dålig	Dålig Mera porös
Na <sub>2</sub> O								
MgO	6,82	2,32	4,38	4,73	4,7	5,13	3,87	3,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,55	4,96	5,67	7,28	5,23	5,87	6,29	7,35
SiO <sub>2</sub>	23,66	25,72	29,30	24,35	26,34	26,80	29,04	34,55
SO <sub>3</sub>	2,97	4,9	4,74	5,6	3,9	3,79	3,43	3,3
CaO	62	62,09	55,91	58,05	59,83	58,41	55,79	48,78

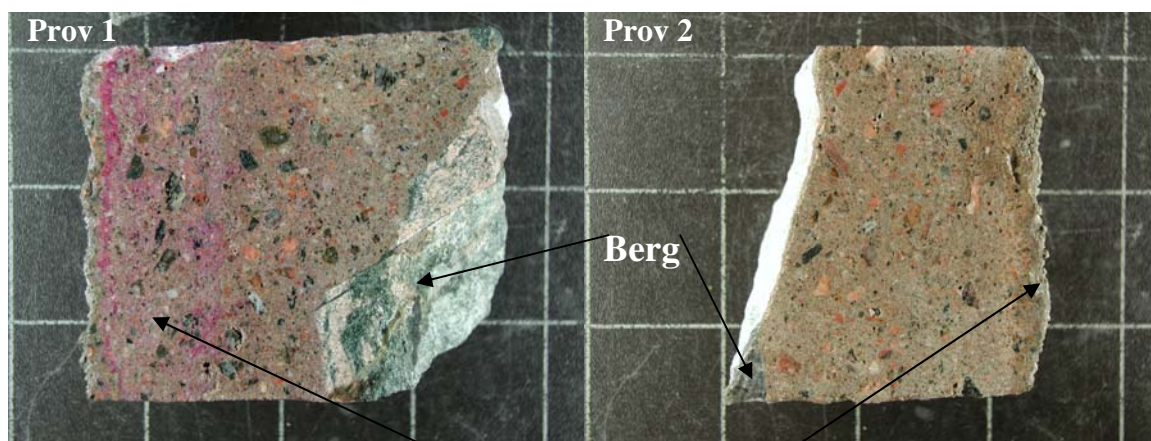
# Göteborg

## 2.4 Gullhedstunneln

### Gullhedstunneln Prov 1

#### Visuellt

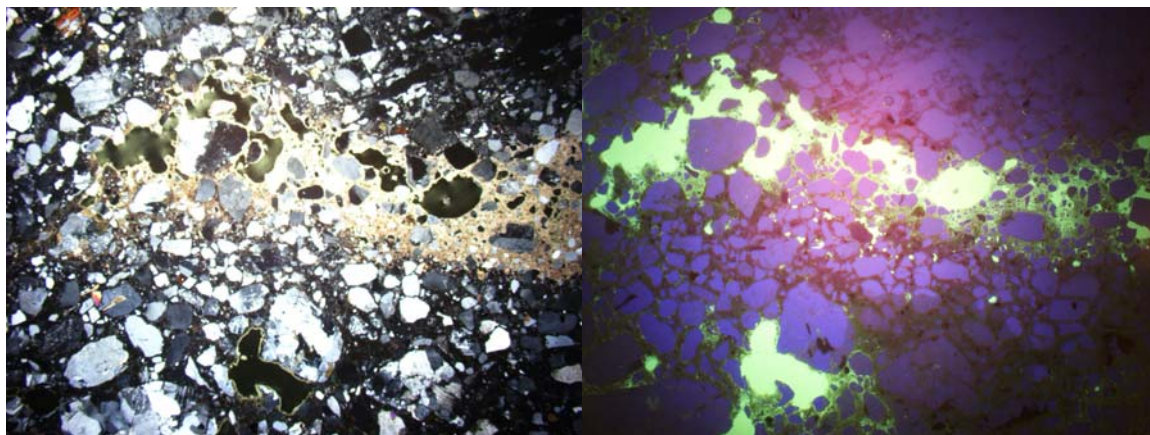
Provet har en gråaktig yta. Det innehåller granitisk naturballast med upp till 8 mm korn. Verkar vara någon annan typ av sprutning på ytan. Fenoftalin ger ett karbonatiseringsdjup på mellan 20 och 30 mm. Provet är bandad mellan ljusa och mörka partier. Bra bindning mot berg. Kalcitutfällningar på ytan. Provet visar att man får porösa partier mellan sprutningar som ibland är karbonatiserade. Detta indikerar vattentransport i porösa lager i betongen.



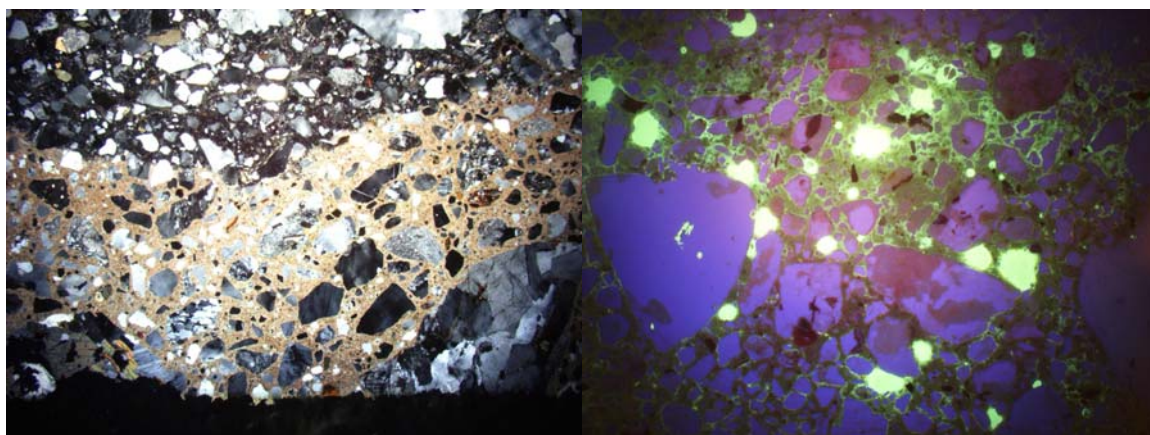
Varje ruta är 30 mm. Till vänster (TV). Lila färgnyans från ytan kommer från fenoftalin som indikerar karbonatisering (30 mm). Bra kontakt mot berg. Relativt homogen men med viss bandning. TH annat prov med tydlig ytbeläggning.

#### Tunnslip (3115)

De ljusa partierna är mera porösa lager. Karbonatisering till ett djup av ca 5 mm, men man finner även karbonatisering i de porösa lagren till ett djup av 20 mm. Detta visar att fenoftalin ger ett fel svar. Det finns kvar av ohydratiserad cement i täta lager vilket tyder på lokalt lågt vct, mellan 0,3 och 0,7. Mindre porer har kristallbildning vilket tyder på hög fuktbelastning. Ballasten relativt jämnt fördelad och packad. Generellt är det en bra sprutning men den är något ojämn speciellt med avseende på cement/vct, vilket tyder på ojämn vattentillförsel vid sprutningen.



*TV polariserat ljus. Bild 9,5 mm. Karbonatiserat parti ca 20 mm in i betongen. TH Samma område i UV-ljus. Här ser vi att det karbonatiserade partiet är betydligt mera poröst och markerar parti mellan två sprutgångar.*

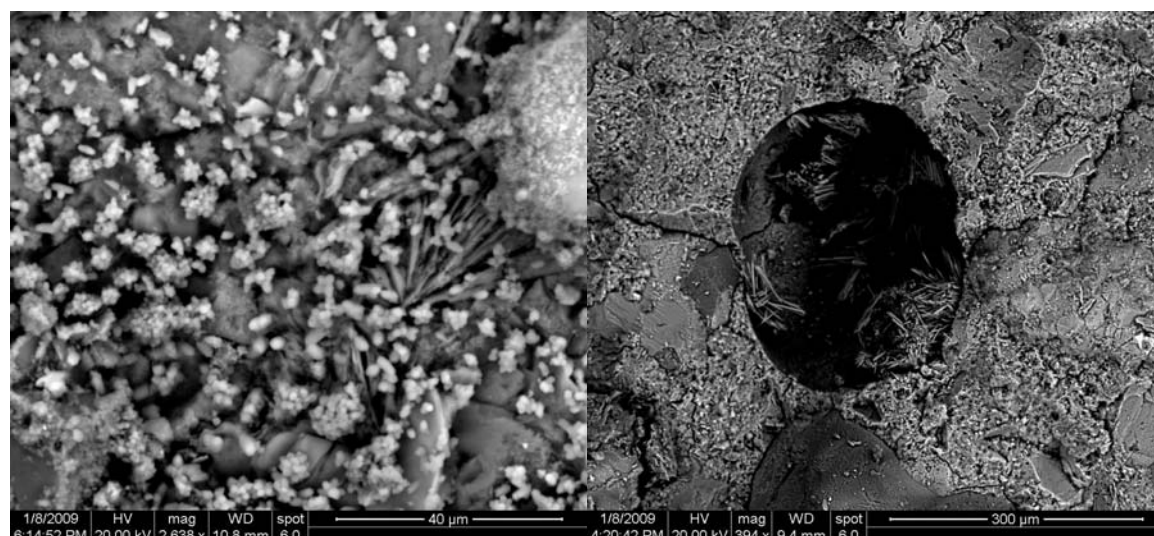


*TV. Bild 9,5 mm. Polariserat ljus som visar karbonatisering från ytan. TH bild 9,5mm. UV-ljus. Poröst parti inne i betongen nära berg.*

## SEM

Analyser har skett på brottyta dels inne i betongen dels på betongytan mot berg. Mot berg är betongen något mera porös. Visuellt är den mera vit. Man kan observera rikligt med portlanditkristaller och en diffus cementgel. Det finns också många små nålar. Den kemiska analysen visade att nålarna består av kalciumaluminat (se kemiska analyser). Inne i betongen har man en mera normal pasta. I hålrummen kan man finna ettringitkristaller. Ettringit är den vanliga kalciumaluminaten i cementpasta. I motsatt till kristallerna som finns vid bergytan innehåller den sulfatjoner. Om man ser på pastan som helhet kan man även här observera skillnader. Pastan vid bergytan innehåller mera MgO, och K<sub>2</sub>O medan halten av SO<sub>3</sub> är lägre. En alkaliaccelerator innehåller Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO och K<sub>2</sub>O men ingen SO<sub>3</sub>. Detta indikerar att

bergytan vid sprutning först täcks av tillstynnadsaccelerator som därefter kommit i kontakt med vanlig cementpasta.



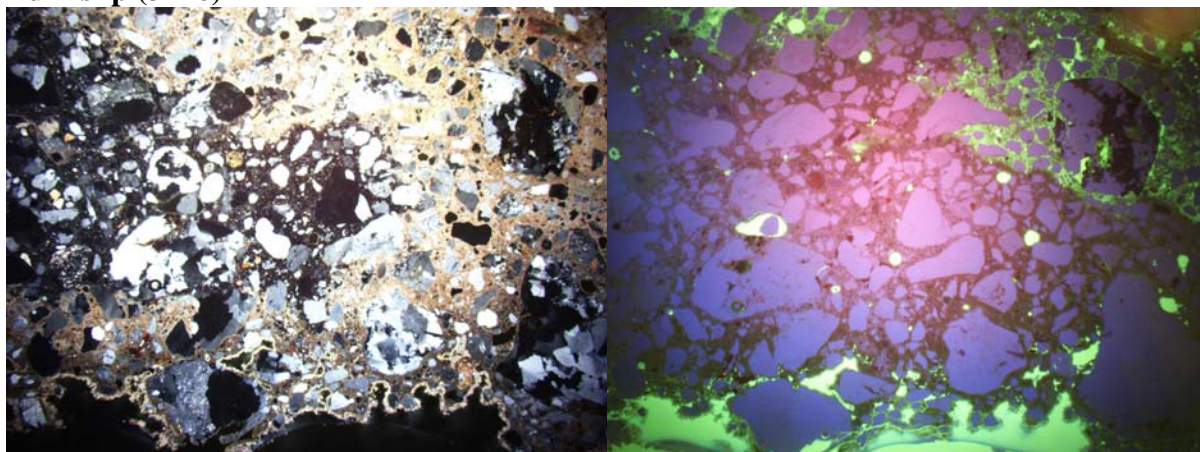
*SEM bilder brottyta. TV betong mot berg. Observera de små nålarna som består av kalciumaluminat. TH. Brottyta inne i betong. Luftpor med ettringitkristaller.*

	Pasta i Betong	Pasta i betong	Ettringit I betong	Pasta bergyta	Pasta bergyta	Kristall bergyta	Kristall bergyta
Na <sub>2</sub> O	0,15	0,35	0,13	0,82	0,63	0,78	0,34
MgO	1,13	0,86	0,34	1,69	2,65	3,08	1,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,78	6,77	20,37	5,76	7,89	40,70	34,28
SiO <sub>2</sub>	28,26	21,26	2,38	18,35	23,43	16,31	6,77
SO <sub>3</sub>	3,15	3,28	26,85	0,28	0,42	2,13	1,07
K <sub>2</sub> O	0,65	0,93	0,15	1,88	1,74	0,75	0,36
CaO	56,25	62,61	49,62	68,43	58,19	31,71	51,61
TiO <sub>2</sub>	0,27	0,60			0,27	0,34	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,37	3,39	0,47	2,79	4,80	4,22	3,51

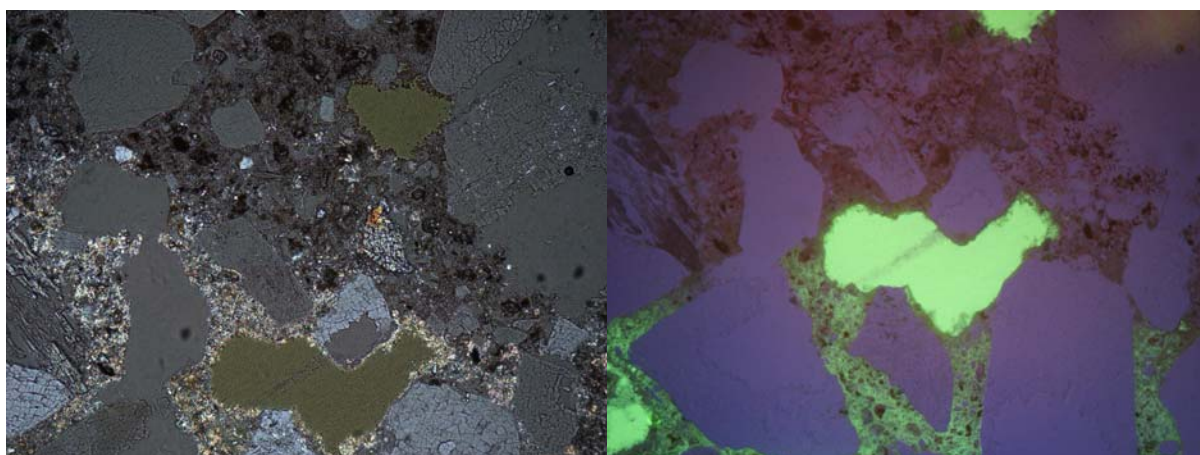
## Gullhedstunneln Prov 2.

### Visuellt

Samma som prov 1

**Tunnslip (3116)**

*TV bild 9,5 mm. Polariserat ljus visar karbonatisering som omger okarboniserad. På bild TH (9,5 mm) kan vi se tät betong som karbonatiserat från ytan och porös betong som "karbonatiserat" inne i betongen.*



*TV polariserat ljus. Bild 1,2 mm. Karboniserat parti längs ner på bild. TH samma bild i UV-ljus. Här ser vi skillnad i täthet. Kristallutfällning på ytorna i luftporer vilket tyder på hög fuktbelastning.*

**Analys Gullhedstunneln**

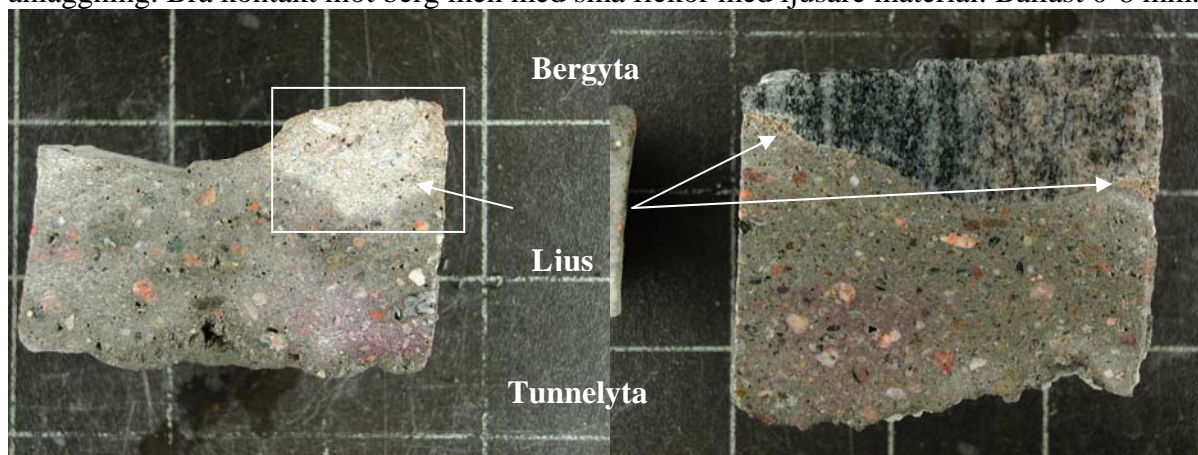
En relativt tjock sprutning. Det är en relativt bra sprutbetong men något ojämn i kvalitén. Inhomogeniteten är mest markant när det gäller vct vilket tyder på ojämn vatteninblandning vid torrsprutning. Generellt är betongen tät men det finns porösa lager mellan sprutningar. I en del av dessa lager har vatten penetrerat. Generellt är betongen fuktbelastad. Man kan anta att det finns partier där skador förekommer då det är hög fuktbelastning och på grund av ojämn sprutning.



## 2.5 Brudarmossen

### Visuellt.

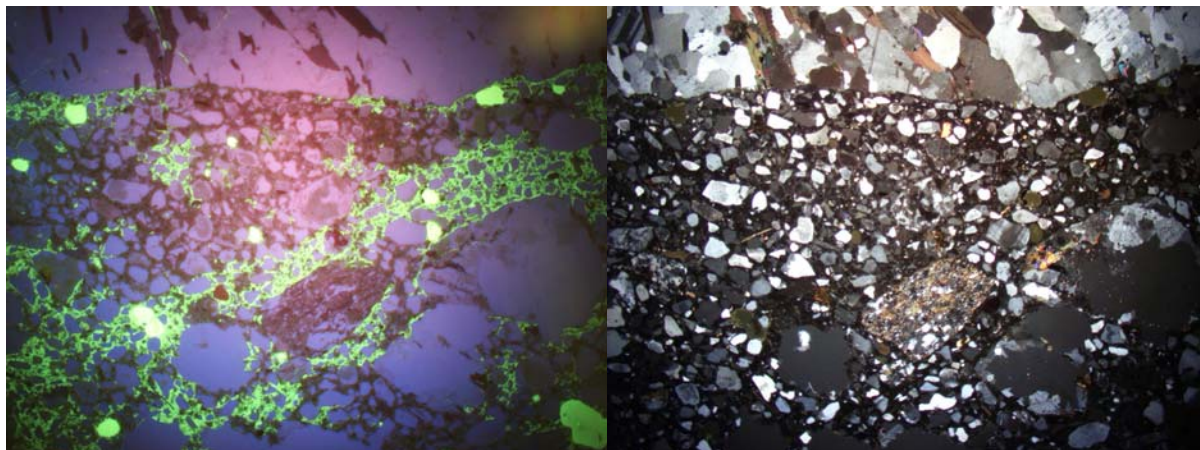
Stålfiberbetong med ganska mörk färg. Den mörka färgen indikerar cement av typ anläggning. Bra kontakt mot berg men med små fickor med ljusare material. Ballast 0-8 mm.



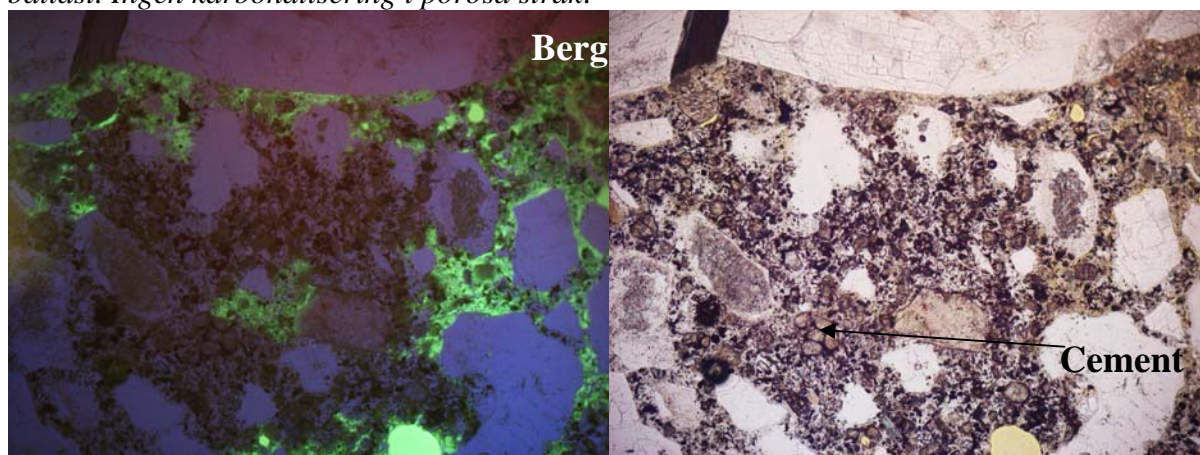
*Två prov från Brudarmossen. Varje ruta 30 mm. TV tunt parti sprutbetong. Relativt homogen parti. Det finns dock ett parti med ljus sprutbetong in mot berg. TH relativt homogen sprutbetong med tunna partier av annat ljusare vid bergytan.*

### Tunnslip (3117)

Tät betong svagt bandad. Vct varierar mellan ca 0,3 och 0,7. Något mera poröst mot berg. Karbonatisering är ca 2 mm. Man finner en svag kalcitutfällning på ytan. Luftporerna är öppna utan kristallisering vilket tyder på en tät betong eller torr miljö. Rikligt med kvarvarande cement med hög halt ferrit vilket indikerar anläggningscement.

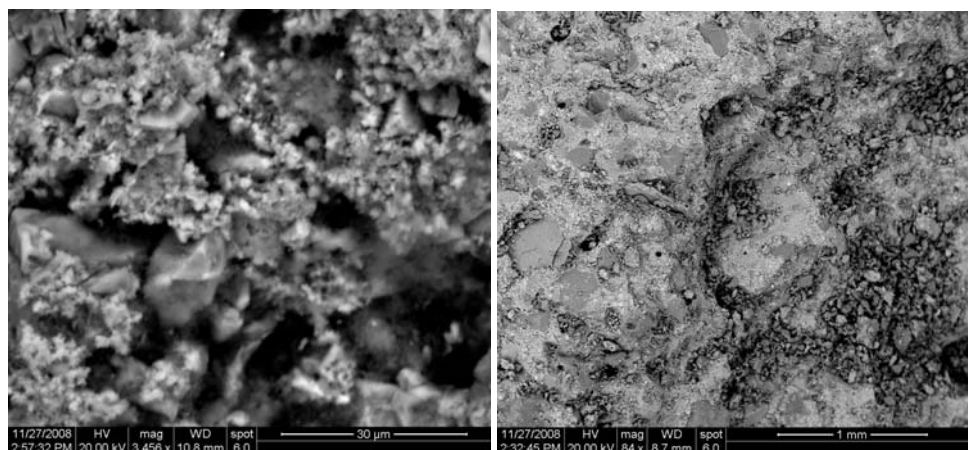


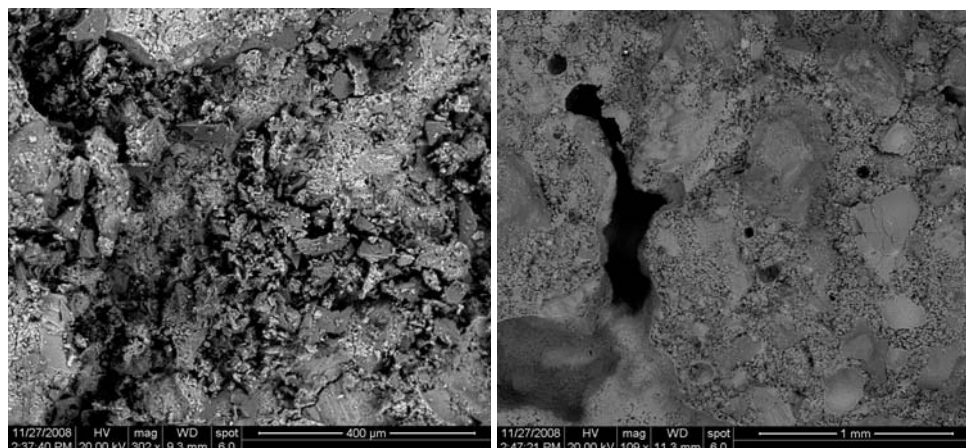
TV UV-ljus Bild 9,5 mm. Det visar parti mot berg. Betongen är inhomogen på denna skala. Kontakten mot berg något porösare. TH. Samma yta men med polariserat ljus. Tätt packad ballast. Ingen karbonatisering i porösa stråk.



TV UV-ljus. Bild 1,2 mm. Inhomogen porositet beroende på inhomogen befuktning. TH vanligt ljus. Man kan se rikligt med kvarvarande cement vilket tyder på låg vct. Cement av anläggningstyp.

## SEM





SEM bilder. I olika förstoring av ljust poröst part (övre bilder) och parti vid bergyta (nedre bilder). Se provbilder. Partiet är poröst och kristallerna består huvudsakligen av kalcium och aluminium. Detta är rester av tillstyvnadsacceleratorn (alkalialuminat) som inte blandats, dvs problem vid sprutning.

#### Kemiska analyser

	Pasta	Pasta				Ljus vid bergyta	Ljus vid bergyta
Na <sub>2</sub> O						2,43	
MgO	1,02	1,16				2,22	2,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,87	4,56				14,70	11,26
SiO <sub>2</sub>	29,18	30,65				52,39	34,82
SO <sub>3</sub>	1,78	2,58				0,22	3,54
K <sub>2</sub> O						2,28	
CaO	59,20	56,97				16,13	34,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,95	4,08				5,94	7,71

#### Analys Brudarmossen

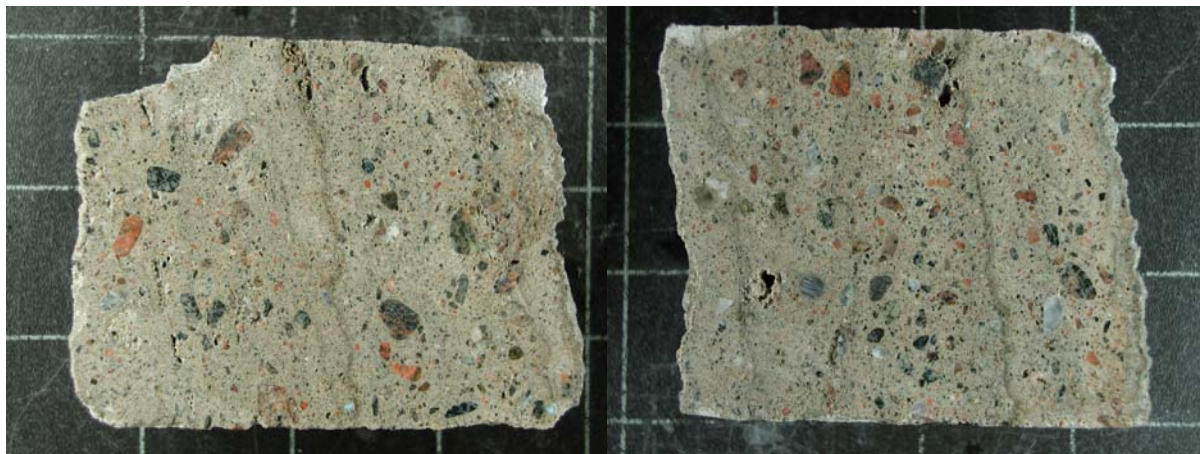
Relativt bra och tät betong vilket indikeras av rikligt med kvarvarande cement. Det verkar vara anläggningscement. De ofyllda luftporerna tyder på att inget vatten penetrerar. De vita partierna vid bergytan kommer från tillstyvnadsacceleratorn som varit av typ alkaliaccelerator. Detta ges av den kemiska analysen som ger höga halter av aluminat och alkali. Det kan inte varit en alkalifri tillstyvnadsaccelerator då halten av sulfat är för låg.

Om det är problem här beror det på att det finns partier av oblandad och ojämn fördelning av tillstyvnadsaccelerator som givit svaga och porösa partier.

## 2.6 Shelltunneln.

### Visuellt

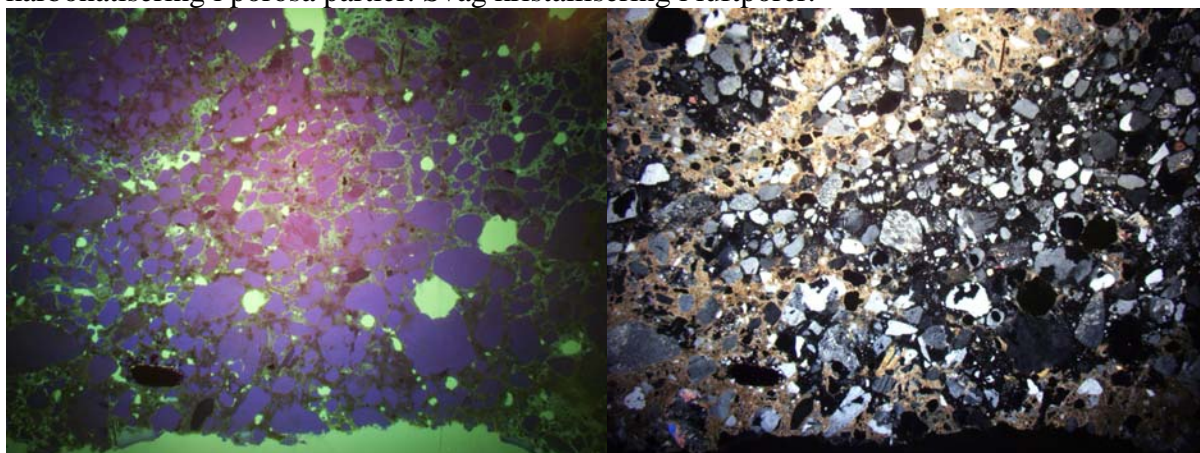
Nätarmerad sprutbetong. Ljus betong med karakteristisk bandning. Bandningen relativt diffus. 0-8 mm ballast. Bra bindning mot berg



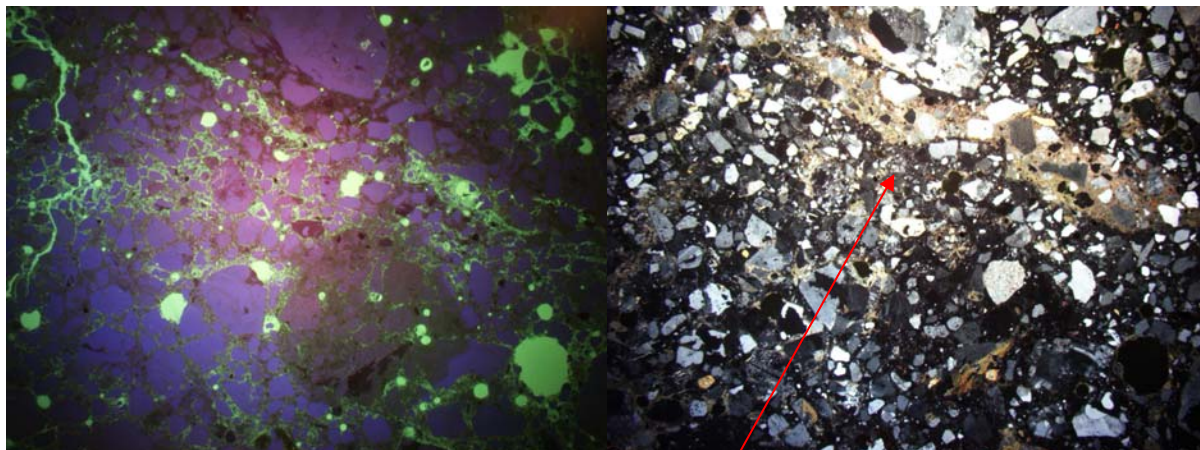
*Provbitar. Varje ruta 30 mm. Till höger ytan och till vänster berg. Man kan observera en distinkt bandning antagligen orsakat av sprutlager. Naturballast 0-8 mm.*

### Tunnslip (3118)

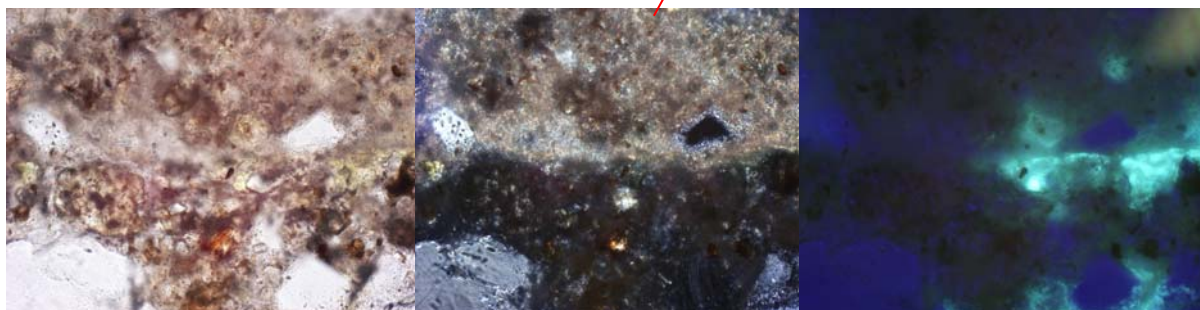
Ojämn karbonatisering. Djupare karbonatisering längs sprickor. Ojämn täthet. Djupare karbonatisering i porösa partier. Svag kristallisering i luftporer.



*Från ytan. TV UV-ljus Bilder 9,5 mm.. Tätt med ballast. Lite sprickig. Relativt tät pasta med cementkorn kvar. TH samma bild men med polariserat ljus. Ojämn karbonatisering.*

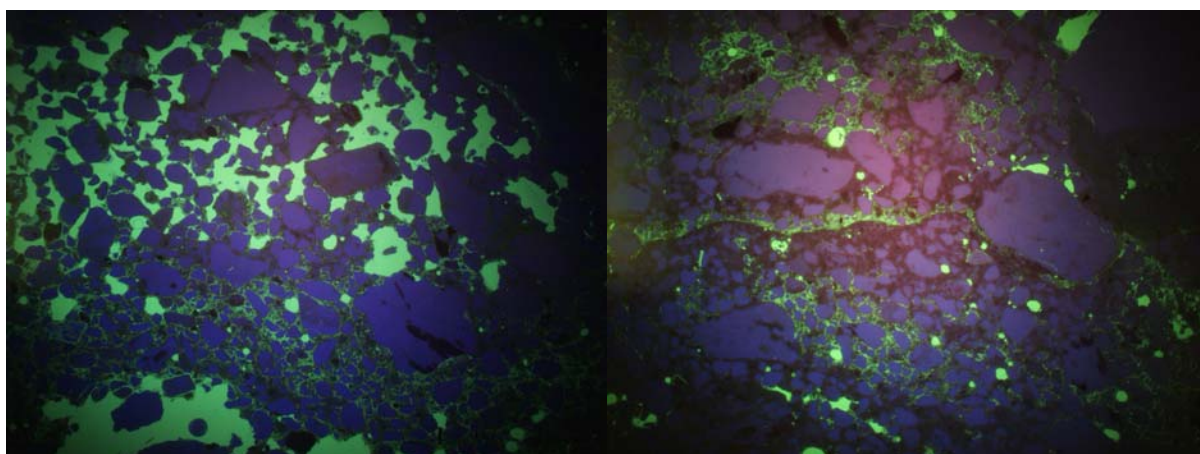


*Inne i betongen nära bergyta. Bilder 9,5 mm. TV. UV-ljus. Ojämnt kompakterad med spricka. TH polariserat ljus med till synes karbonatiserad stråk. Bilderna nedan visar en detaljbild.*

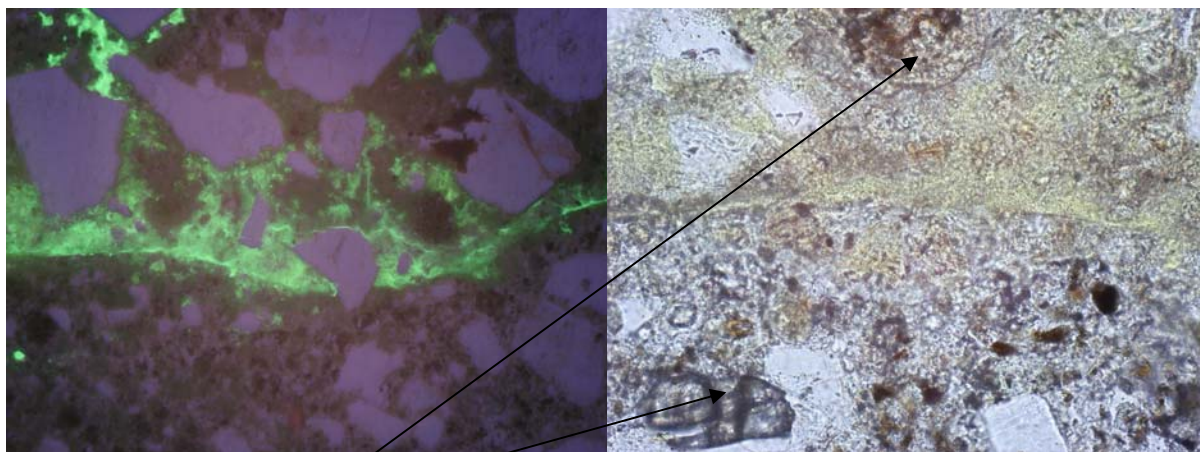


*Inne i betongen. Bild 0,3 mm. TV vanligt ljus som visar en gräns. Mitten polariserat ljus. Till höger UV-ljus. En närmare granskning visar att det dubbelbrytande partier består av antagligen dubbelbrytande kalciumaluminatkristaller, vilket i sin tur tyder på ojämn blandning vid sprutning. Kvarvarande cement i båda lagren.*

### **Tunnslip (3119)**



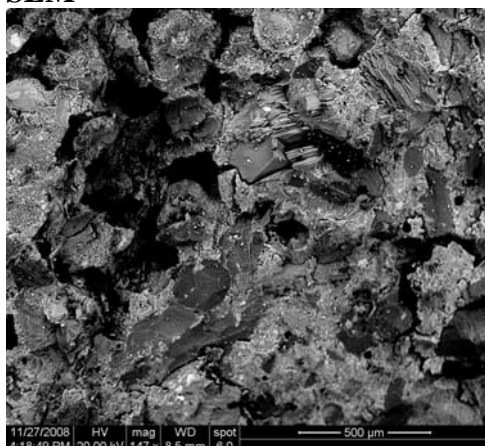
*Från mitten. UV-ljus bilder 9,5 mm. TV inhomogent parti. TH Gräns mellan två sprutomgångar.*



TV Gräns mellan två sprutgångar (se tidigare bild). TV UV-ljus. Bild 1,2 mm. TH vanligt ljus. Kvarvarande cement. I övre delen av bilden kalciumaluminat och större porositet.

Karbonatisering i sprickor. Bandad mellan porösa och täta partier. Vissa lager är mycket täta med kvarvarande cement. Man kan se kalciumaluminat vid övergångar vilket tyder på dålig blandning med tillstyvnadsaccelerator. Detta ger också upphov till mera porösa stråk.

#### SEM



Brottyta Poröst part med kristaller.

	Pasta	Pasta	Pasta	Porös betong	Porös betong	Kristall	Kristall
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,96	0,53	0,77		0,29	0,57
MgO	0,96	1,78	1,35	2,5	0,94	4,69	0,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,66	7,77	6,99	9,15	9,20	22,09	19,86
SiO <sub>2</sub>	22,42	27,57	25,34	25,31	33,58	26,86	4,22
SO <sub>3</sub>	1,58	1,46	2,03	2,07	0,41	0,17	0,29
K <sub>2</sub> O		0,94	1,23	0,78	5,43	4,51	1,60
CaO	59,86	55,64	58,72	54,09	46,86	29,05	69,64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,72	3,87	3,81	5,33	3,58	12,30	3,64

**Analys Shelltunneln.**

Relativt bra kvalité men något ojämn. Porer har enstaka kristaller men ingen vattenmättnad, och antagligen ingen vattengenomträngning. Lokalt relativ hög halt aluminat som antagligen kommer från den alkalifria acceleratoren. Ingen större skillnad mellan de två proven. I porösa lager kan man finna ett överskott på aluminat och bildning av kalciumaluminatkristaller. Detta kommer från alkaliacceleratoren. Det verkar som om sprutningen var ojämn och att man inte lyckats blanda tillstyvnadsacceleratorn med betongen helt bra

### 3 Diskussion

All proverna verkar vara tagna från torrsprutad sprutbetong utom möjligen den från Shelltunneln. Tillstyvnadsacceleratorn verkar vara alkaliaccelerator (alkalialuminat) i de flesta fall.

Alla proven är bandade med mer eller mindre täta/porösa lager. Man kan dock märka en skillnad där proverna från Stockholm är tunnare och mera bandade än de från Göteborg. Det är också tjockare band på sprutbetongen från Göteborg. Antagligen skiljer sig sprutningstekniken. Det är möjligt att sprutningarna i Göteborg är av senare datum, vilket indikeras av betongen från Brudarmossen är baserad på anläggningscement och att den innehåller stålfiber.

Kvalitetsskillnaden är stor både när det gäller tunnel och provtagningsområde. Rent generellt är alla sprutbetongerna skiktade. Detta beror till del på spruttekniken där man sprutar fram och tillbaka vilket ger olika lager, men det finns även andra orsaker.

Ett problem har varit inhomogeniteten där man finner en varvning mellan täta och porösa lager. Detta kan bero på olika hastighet, för torr/våt blandning och/eller återstuds. En annan orsak är förmodligen doseringen av tillstyvnadsacceleratorn. Vid överdosering generellt eller beroende på ojämn inblandning så verkar betongen bli mera porös med en kristalltillväxt. Det finns också indikationer på att bergytan i vissa fall fått en dos av ren tillstyvnadsaccelerator som givit ett poröst lager. Detta är uppenbart i proverna från Brudarmossen där man kan identifiera lager och klumpar av oblandad accelerator. Detta visar på ett tekniskt problem som måste undersökas närmare.

När man besöker tunnarna i Stockholm är det uppenbart att den mest skadade betongen ligger i anslutning till de transmissiva vattenförande zonerna. Det är också från dessa zoner som den ”dåliga” betongen kommer. Man finner här både bom, nedfall av sprutbetong och vattengenomslag. Vid analys så visar det sig att dessa ”dåliga” betonger har ett relativt överskott på aluminat. Det är svårt att spruta en betong mot dåligt vattenförande vått berg, varför det finns det anledning att misstänka att man vid sprutningen tillsatte extra tillstyvnadsaccelerator så att betongen snabbt stelade på plats och inte rann av.

En porös betong eller ett poröst lager ökar permeabiliteten och ger vattengenomträngning som i sig ger en sämre betong. Om detta är fallet måste man närmare utreda om det finns någon



annan teknik än att öka mängden tillstyvnadsaccelerator för att få bra tätning i transmissiva zoner. Antagligen hänger en del av problematiken ihop med torrsprutning och typen av accelerator.

Vid undersökningarna har vi inte i något fall kunnat konstatera alkalisilikareaktion. Vi har inte heller säkert kunnat konstatera sulfatreaktion vilket kan beror på att det inte finns någon större halt av sulfater i grundvattnet. Sulfatreaktionen kan bli ett problem speciellt eftersom ett tillskott av alkalialuminat skulle göra betongen extra känslig för sulfatreaktion (Lagerblad et al 2006). Man kan dock anta att man idag använder alkalifri accelerator vilken inte ger någon förhöjning av risken för sulfatreaktion.

När det gäller en sulfatreaktions konsekvenser beror det på hur vatten rör sig. Om vatten kommer bakifrån och penetrerar betongen kommer man att finna ettringit speciellt vid kontaktytan mot berg. I ett första stadium skulle det ge en förtätning men vid ytterliggare tillförsel skulle det ge ettringitbildning och en försvagning av bindningen mot berg. I de fall vi undersökt övergångsfasen så finner vi ingen förhöjning av sulfathalten (relativt aluminathalten) vilket i sin tur visar att ingen sulfatreaktion har skett. Det är en mekanism som måste undersökas i varje enskilt fall speciellt i äldre betong där man använt en alkaliaccelerator.

En del har varit så porösa att vatten lätt kan penetrera längs porösa lager. Kristallbildningen i framför sämre sprutbetong tyder på att betongen varit vattenmättad vilket i sin tur tyder på genomsläpplighet. Detta kommer att vid större vattenpenetration att ge lakning och en nedbrytning av cementpastastrukturen. Att man ofta finner en krusta av kalcitkristaller på sprutbetongens yta och kalkutfällning i närheten av sprutbetongen är också en indikation på att lakning sker. Kalciten har sitt ursprung i utlakad kalciumhydroxid som reagerar med luftens koldioxid. Man kan förmoda att lakningen sker längs porösa zoner vilket i sin förlängning medför att ytan mot berg eller någon porös zon inne i betongen mer eller mindre tappar sin hållfasthet vilket i sin tur medför ”bom” eller ras.

Problemen med sprutbetongen är huvudsakligen av teknisk natur. Det stora problemet är huvudsakligen att klara av att spruta transmissiva vattenförande partier av berg. För att klara detta måste betongen vara av högre kvalité (tätare). Detta medför att sprutningen måste vara mera homogen. Man får inte överdosera med tillstyvnadsaccelerator. Den relativa vattenmängden (vct) måste minskas för att få en tätare betong. Om det beror på sprutaren eller kvalitetsskillnader när det gäller blandningen är svårt att få fram.

## 4 Slutsatser

Det generella problemet är att många av sprutbetongerna har för låg kvalitet och att de är inhomogena. De kan inte motstå vatten i de vattenförande transmissiva zonerna. Vatten, omkristallisation och lakning gör att betongen försvagas och tappar sitt fäste mot berg och sin funktion. Ett bättre kvalitetssystem för utvärdering av sprutresultat behövs. Man behöver även tillse att vattenmängden och tillsättningen av tillstyvnadsaccelerator blir bättre.

Stockholm den 15 januari 2009

CBI Betonginstitutet

Björn Lagerblad