

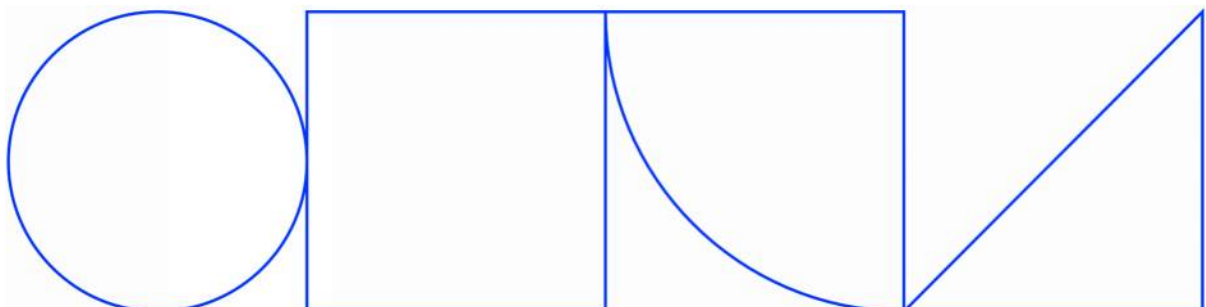
Betongpålar utsatta för aggressiva markförhållanden

Provtagning av betongpålar vid Nils Ericson Terminalen

Jonas Magnusson
Anders Lindvall
Per Lindh

NCC Sverige AB
Thomas Concrete Group AB
Trafikverket

2024-11-08



Förord

Projekt 14207 " Betongpålar utsatta för aggressiva markförhållanden". Syftet med projekt har varit att undersöka och redovisa nedbrytningen hos betongpålar som varit exponerad för kända aggressiva markförhållanden under en avsevärd tid (25 år). Projektet har utförts av en arbetsgrupp från NCC Sverige AB; Thomas Concrete Group, C-Lab; samt Trafikverket. Arbetet har utförts med stöd av referensgrupp och finansiärer.

Arbetsgrupp/Författare

Jonas Magnusson, NCC Sverige AB, Huvudförfattare
Anders Lindvall, Thomas Concrete Group, C-Lab
Per Lindh, Trafikverket

Vi i arbetsgruppen vill tacka alla deltagare i referensgruppen:

Gunnar Holmberg, Skanska Sverige AB
Peter Alheid, Hercules Grundläggning AB
Martin Laninge, Peab Anläggning AB
Henrik Granroth, Göteborgs Hamn AB
Martin Björklund, Port Engineering Göteborg AB

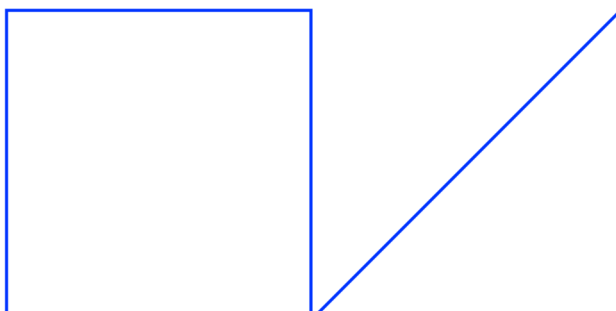
Ett speciellt och stort tack vill vi rikta till SBUF - Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, för deras stöd, tålamod och finansiering. Utan deras bidrag hade det inte varit möjligt att genomföra och slutföra detta projekt.

Utöver SBUF vill vi i arbetsgruppen även tacka övriga finansiärer enligt nedan som medverkat till att genomföra detta projekt.

- Hercules Grundläggning AB
- Trafikverket
- Thomas Concrete Group, C-Lab
- NCC Construction Sverige AB

Göteborg, 2024-11-08

Jonas Magnusson, Anders Lindvall och Per Lindh



Sammanfattning

Det är idag ofta aktuellt att bygga inom områden där aggressiviteten hos mark och vatten kan ge skador på betongkonstruktioner. Orsaken till aggressiviteten kan komma från både naturligt förekommande ämnen och ämnen från förorenad mark.

I samband med byggandet av Västlänken E02-Centralen drogs ett antal betongpålar upp. Dessa pålar installerades i mitten av 1990-talet och har således stått i lera med högt kloridinnehåll i ca 25 år. Det var därför en unik möjlighet att studera nedbrytningen av en betongkonstruktion som varit installerad i en, för armeringen, mycket aggressiv miljö.

De studerade pålarna har i sin helhet befunnit sig i leran och var ständigt under grundvattennivån. Inför byggandet utvärderades porvatten från lerprover. Porvattnet uppvisade kloridhalter mellan 1,0 % till 1,8 %. De uppmätta kloridhalterna i leran överskrider den övre gränsen för vilket täcksikt enligt EKS 12 gäller. Källan till kloriderna bedöms vara det saltvatten som leran avsattes i.

Undersökningen av betongen i de uppdragna pålarna utfördes genom okulär besiktning samt att borrhärnor borrades ut från tre pålelement. De utborrade kärnor användes för att bestämma betongens tryckhållfasthet, karbonatiseringsdjup samt kloridhalt. För att bedöma eventuell förekomst av kemiska angrepp, ASR och andra avvikelser i betongen, skickades ett prov för undersökning med mikroskopi på ett tunnslip.

Vid den visuella bedömningen av pålarna kunde varken synliga tecken på skador eller nedbrytning upptäckas. Det fanns inga tecken på att ytterytan av kärnorna har påverkats av exponering från eventuellt skadliga ämnen i den omgivande lera.

Armeringens status undersökes stickprovsmässigt, bland annat i de utborrade betongkärnorna, och denna undersökning avslöjade inte någon pågående problematik med armeringskorrosion.

Provning av betongens tryckhållfasthet visade att betongen i alla tre pålar var av hög kvalitet. En utvärdering av uppmätta tryckhållfastheter visade att betongens hållfasthetsklass var ca C70/85. En omräkning till 28-dygns hållfastheter visar att denna ursprungliga hållfasthetsklassen var ca C45/55. Dvs en betydande hållfasthetstillväxt har inträffat över tid. Resultaten indikerar att betongens mekaniska egenskaper inte har påverkats negativt av 25 års exponering från den omgivande lera.

Generellt så är de uppmätta karbonatiseringsdjupen små. En prognostisering, baserad på att karbonatiseringsdjupets tillväxt är proportionellt mot kvadratroten av tiden, indikerar att det inte finns någon generell risk för uppkomst av korrosion på grund av karbonatisering. Så länge armeringen ligger på rätt position kommer karbonatiseringen inte att nå in till armeringens nivå på 100 år, som får anses vara en normal livslängd för en påle.

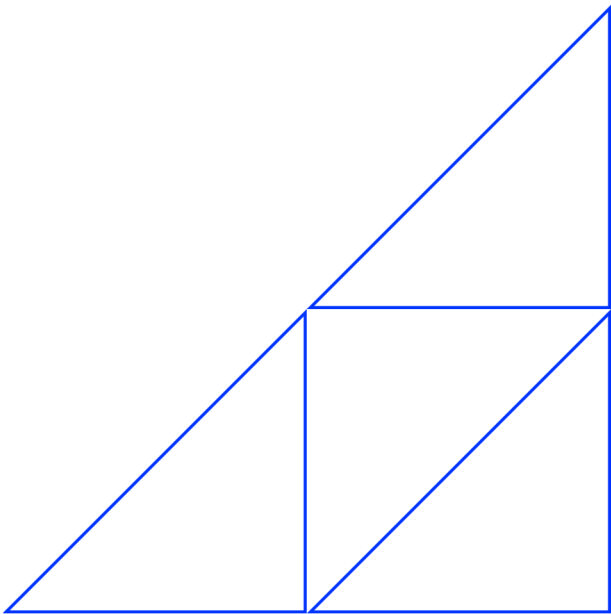
Kloridhalten i betongen utvärderades med RCT-metoden (Rapid Chloride Test). Kloridkoncentrationen i lera ökar mot djupet. Resultaten från kloridmätningarna visar att det finns förhöjda kloridhalter i betongen i alla prov. Kloridkoncentrationerna i lera

ökar mot djupet. Det finns även ett tydligt djupberoende på kloridinträngningen i betongen, där inträngningen är mest omfattande i de nedre delarna av de undersökta pålarna. För att bedöma risken för initiering av armeringskorrosion kan uppmätta kloridhalter jämföras med kloridtröskelvärdet, dvs. den kloridhalt vid armeringen när korrosion kan initieras. För den aktuella exponeringsmiljön och betongkvaliteten bedöms kloridtröskelvärdet vara ca 2,0 % Cl/cement. Uppmätta kloridhalter i höjd med armeringen överstiger kloridtröskelvärdet, dvs. det finns risk för initiering av armeringskorrosion orsakad av klorider. Även om kloridhalterna överstiger förväntade tröskelvärden så kunde ingen armeringskorrosion konstateras, vilket troligen beror på den starkt begränsade tillgången på syre i leran.

Mikroskopin indikerade att cementpastan är något karbonatiserad till ett djup på 1 mm samt längs sprickor på 4–8 mm djup. Cementpastan i provet visar tecken på urlakning till ett djup på 9 mm. ASR (alkalisk syra reaktioner) bedöms inte vara ett problem. Cementen bedöms inte vara sulfatresistent och det finns enligt mikroskopin eventuellt tecken på ett begynnande sulfatangrepp, dock inte verifierat och heller inte konstaterat om det är ett yttre eller inre sulfatangrepp. Mikroskopi som undersökningsmetod är en bra metod för att detektera påverkan på betongen. Det kan dock vara komplicerat att omsätta tunnslipens "mikronivå" till en betongkonstruktions "makronivå", speciellt om tunnslipen har gjorts på enstaka prov. Tyvärr kunde bara ett (stick-)prov utföras.

För betong i aggressiva markförhållanden finns risk för både kemiska angrepp och armeringskorrosion orsakad av karbonatisering eller kloridinträngning. När det gäller kemiska angrepp på betongen så kommer de att angripa betongkonstruktionens yta medan kloriderna först måste penetrera det täckande betongskiktet för att nå armeringen. Dimensionering av betongkonstruktioner i aggressiva markförhållanden ska baseras på EN 206:2013+A2:2021. Dock saknas beskrivning kring hur lera ska tas upp, förvaras samt hur porvattnet ska extraheras från lerproven för att ge rätt information. Det saknas även vägledning avseende hur angreppsgrad kan sänkas för jordar med låg hydraulisk konduktivitet.

Hur lera med låg hydraulisk konduktivitet kan påverka armeringskorrosion orsakad av klorider studerades med numeriska simuleringar där ett lerskikt ansattes. Lerskiktet varierades i steg från 0 mm till 500 mm. Simuleringarna visade att kloridhalten nära betongytan blir lite lägre när ett lerlager ansattes utanför betongen, men skillnaderna avtar mot djupet, vilket innebär att lerlagret har mycket begränsad "bromsande" effekt. Orsaken kan vara att betongen har en diffusionskoefficient som är lägre än leran med två potenser och därmed är transporten av klorid genom leran främst beroende av flödet i betong. Effekten var tydligare för betongen med slagg som också har en betydligt lägre kloridmigrationskoefficient än betongen utan slagg.



Innehåll

1	Bakgrund	6
2	Västlänken E02-Centralen	6
3	Exponeringsmiljö	6
4	Uppdrag av betongpålar	8
5	Provtagning	11
6	Utborrade kärnor	13
	Sammanställning över utborrade kärnor	13
7	Betongprovning	15
	Inledning	15
	Tryckhållfasthet och densitet	15
	Karbonatiseringsdjup	16
	Kloridhalt i betongen	16
	Mikroskopi – Kemiska angrepp och ASR	19
8	Diskussion av provresultat	20
	Visuell bedömning av pålar och utborrade kärnor	20
	Tryckhållfasthet	21
	Karbonatiseringsdjup	21
	Kloridhalt i betongen	23
9	Betong i aggressiva markförhållanden	27
10	Slutsatser	29
11	Referenser	31
	Bilaga A - Foton på utborrade kärnor	
	Bilaga B – Provningsrapport tryckhållfasthet	
	Bilaga C – Provningsrapport karbonatiseringsdjup	
	Bilaga D - Provningsrapport klorider	
	Bilaga E – Kloridprofiler inklusive möjligt spridnings-intervall	
	Bilaga F –Betonganalys av påle (Mikroskopi)	

1 Bakgrund

Det är idag ofta aktuellt att bygga inom områden där aggressiviteten hos mark och vatten kan ge skador på betongkonstruktioner. Orsaken till aggressiviteten kan komma från både naturligt förekommande ämnen och ämnen från förorenad mark. Tyvärr erbjuder dagens regelverk, standarder samt handböcker mycket lite stöd avseende hur ett lämpligt val av exponeringsklass, betongsammansättning och täckande betongskikt kan väljas. Dessa parametrar är avgörande för att en beständig betongkonstruktion med så låg klimatpåverkan som möjligt skall kunna konstrueras och byggas. I dagsläget finns det ytterst få undersökningar avseende nedbrytningen av betongkonstruktioner som varit exponerad för aggressiva markförhållanden.

2 Västlänken E02-Centralen

Under projekteringen av Västlänken E02-Centralen utfördes en omfattande hydrogeologisk utredning, som bland annat omfattade grundvattenkemin i området. Utredningen visade bland annat att porvattnet i lera uppvisade kloridkoncentrationer mellan 1,0% och 1,8%, dvs kloridkoncentrationer som ligger långt över den övre gränsen för vilket de förskrivna täckskikten enligt (Boverket 2022) gäller (högst 0,4%). I samband med byggandet av Västlänken E02-Centralen har delar av Nils Ericson Terminalen nedmonterats, varvid ett antal betongpålar dragits upp. Dessa pålar installerades i mitten av 1990-talet och har således stått i lera med högt kloridinnehåll i ca 25 år. I samband med att pålarna drogs upp utfördes provtagningar. Det var därför en unik möjlighet att studera nedbrytningen av en betongkonstruktion som varit installerad i en, för armeringen, mycket aggressiv miljö.

3 Exponeringsmiljö

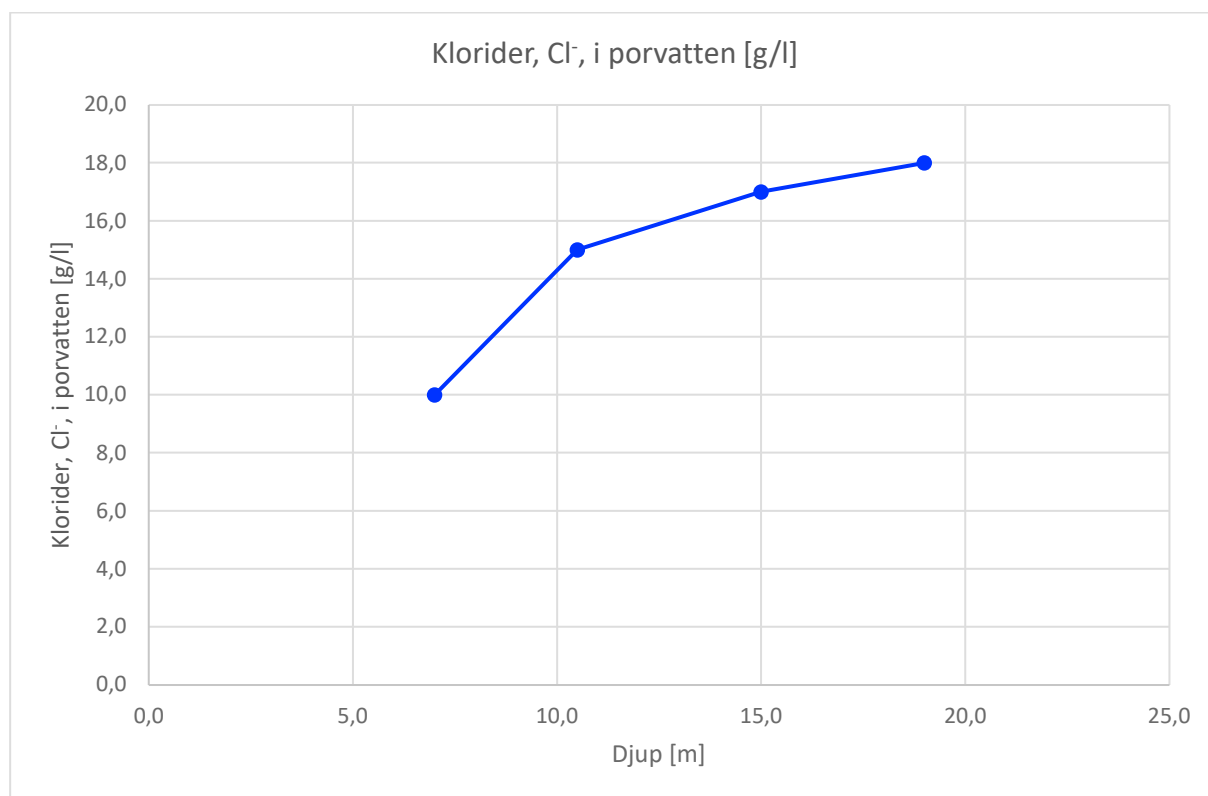
E02 Centralen byggs till största del i lera. En förenklad jordlagerföljd är: ytliga jordlager (som till stor del består av fyllnadsmaterial); lera (i olika lager); samt friktionsjord. De studerade pålarna har i sin helhet befunnit sig i lera och var ständigt under grundvattennivån. Lera i Göteborg är känd för att vara relativt homogen, den är sedimentärt avsatt i likande miljö och i samma dalgång. Inför byggandet utvärderades porvatten från lerprover.

Proverna togs på ca 750 meters avstånd från Nils Ericson Terminalen från fyra punkter genom kolvprovtagning. Inom det område där proverna togs ligger markytan kring +2,0 m och det ytliga jordlagret (fyllnadsmassor) var ca 2 meter, dvs lera börjar på ca 2 meter under markytan. Proverna är benämnda efter djupangivelse, men ibland behövdes fler nivåer slås ihop för att få tillräckligt med porvatten. Sammanslagningen gjordes så att respektive sammanslagen nivå skulle representera ungefär samma geologiska tid vid vilken lera avsattes. Porvattnet togs fram genom att proven

centrifugerades vid 20 000 G i syradiskade rör varefter porvattnet dekanterades och skickades för analys. Proven benämns enligt följande:

- Provbenämning "7m" – materialet från nivån räckte
- Provbenämning "10,5m" – består av material från 9m och 12m
- Provbenämning "15m" – består av material från 14m och 16m
- Provbenämning "19m" – består av material från 18m och 20m

En sammanställning av kloridkoncentrationens variation mot djupet redovisas i Figur 3.1. Porvattnet uppvisade kloridhalter mellan 1,0 % till 1,8 % (1,0 %; 1,5 %; 1,7 % och 1,8 %). Källan till kloriderna bedöms vara det saltvatten som leran avsattes i. Lerans låga hydrauliska konduktivitet medför att några säsongsvariationer inte förväntas och att mobiliteten hos kloridjonerna är låg. Dock överstiger de uppmätta kloridhalterna i leran den övre gränsen för vilket täckskikten enligt (Boverket, 2022) / (Transportstyrelsen, 2022)¹ gäller (högst 0,4%). Till viss del kommer den möjliga tillförseln av klorider påverkas av den täta leras transportmekanismer.



Figur 3.1. Sammanställning av kloridkoncentrationens variation mot djupet.

¹ Enligt den tidigare (Trafikverket, 2011) användes 1,0% i stället för 0,4%.

4 Uppdrag av betongpålar

Norra delen av Nils Ericson Terminalen var grundlagd på pålar. Leran började cirka 2–3 meter under markytan, medan pålaskärningsplanet (PAP) låg på ca 3–4 m djup. Efter att denna del av Nils Ericson Terminalen demonterats, inklusive källarplan, drogs samtliga pålar i det aktuella området upp. Pålarna var installerade som kohesionspålar, bestående av två lika långa betongpålelement (13m+13m), hopskarvade med en mekanisk pålskarv; samt under dessa ett träpålelement. Troligen var träpålelementen 18 m långa med ett toppmått (spetsen) på 125 mm (5"). De två pålelementen av betong (Typ SP2 enligt (SIS, 1989)) benämns i rapporten övre- respektive undre pålelement.

Skarven mellan betongelementen och träelementen var av en annan typ, en så kallad hylsskarv (se Figur 4.3b), än den mellan betongelementen. Träpålarna kunde inte extraheras, mest pga att skarven inte klarar att överföra tillräckligt stora dragkrafter, vilket den inte heller var avsedd att göra. Utformningen av skarven mellan betong- och träelementen framgår av Figur 4.3b. Pålavskärningsplanet, och därmed hela pålarna, var beläget i lera.



Figur 4.1. Framschaktning av pålar samt kran med greppanordning och vibrator.



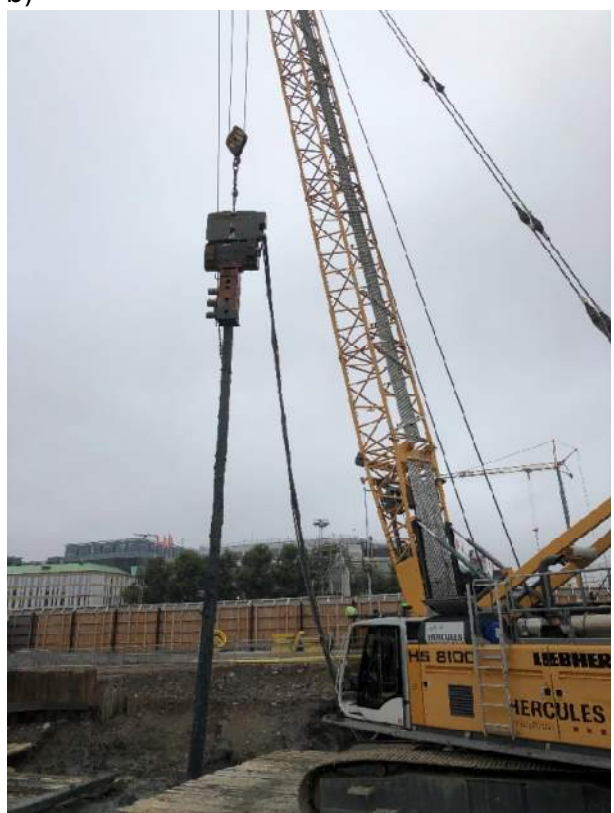
a)



b)



c)



d)

Figur 4.2. Kran, vibrator, greppanordning samt foton som beskriver uppdragning av påle.

Processen med att dra upp pålarna inleddes med att pålarna schaktades fram mha grävmaskin, se Figur 4.1a. Kravet på att få ett tillräckligt bra grepp om pålen, så att den kunde dras upp, bestämde framschaktningen omfattning. För att erhålla tillräckligt grepp nyttjades en greppanordning bestående av ett kvadratisk stålrör med tre hydraulkolvar av stål, se Figur 4.1b.

Greppanordning samt en vibrator anslöts till en larvburen kran, se Figur 4.1b samt 4.2a. Figurerna 4.2b – 4.2d visar uppdragningen av en påle. Först trädde greppanordningen över pålens ände varefter hydraulkolvarna trycktes in mot pålen, Figur 4.2b. Trycket från hydraulkolvarna anpassades för att vara tillräckligt för att dra upp pålarna men samtidigt inte krossa betongen. Efter att greppanordningen anslutits drogs pålarna upp genom en kombination av en vibrator, vilken kunde bryta lerans kohesion mot pålen, samt en kran för själva uppdragningen. I princip bildades alla brottytor en bit från pålens yta, i leran, vilket framgår av Figur 4.3a. Vibratorn fick arbeta en god stund för att lyckas lossa pålen från leran i tillräcklig omfattning för att kranen skulle orka dra upp pålarna.



Figur 4.3. Betongpålar efter uppdragning: a) brottyta i lera; b) "rengjord" påle samt skarv mellan betong- och träpålelement.

5 Provtagning

Pålarna drogs upp under september 2020, varefter de transporterades till Hercules förråd vid Vikan i Göteborg. Där förvarades de utomhus, se Figur 5.1, fram till 2021-07-01 då utborrning av kärnor tillsammans med okulär besiktning utfördes.

Som beskrevs i kapitel 3 bestod betongpålarna av två pålelement; ett övre pålelement som sträckte sig 0-13 m under pålavskärningsplanet och ett undre pålelement som sträckte sig 13-26 m under pålavskärningsplanet. Över- och underpålen är skarvade med en pålskarv.

Tre pålelement som, vid visuell besiktning, bedömdes vara representativa valdes ut för provtagning. Från dessa pålelement borrades betongkärnor ut för att utvärdera tryckhållfasthet, karbonatisering samt kloridinträngning. En av kärnorna undersöktes även med avseende på kemiska angrepp.



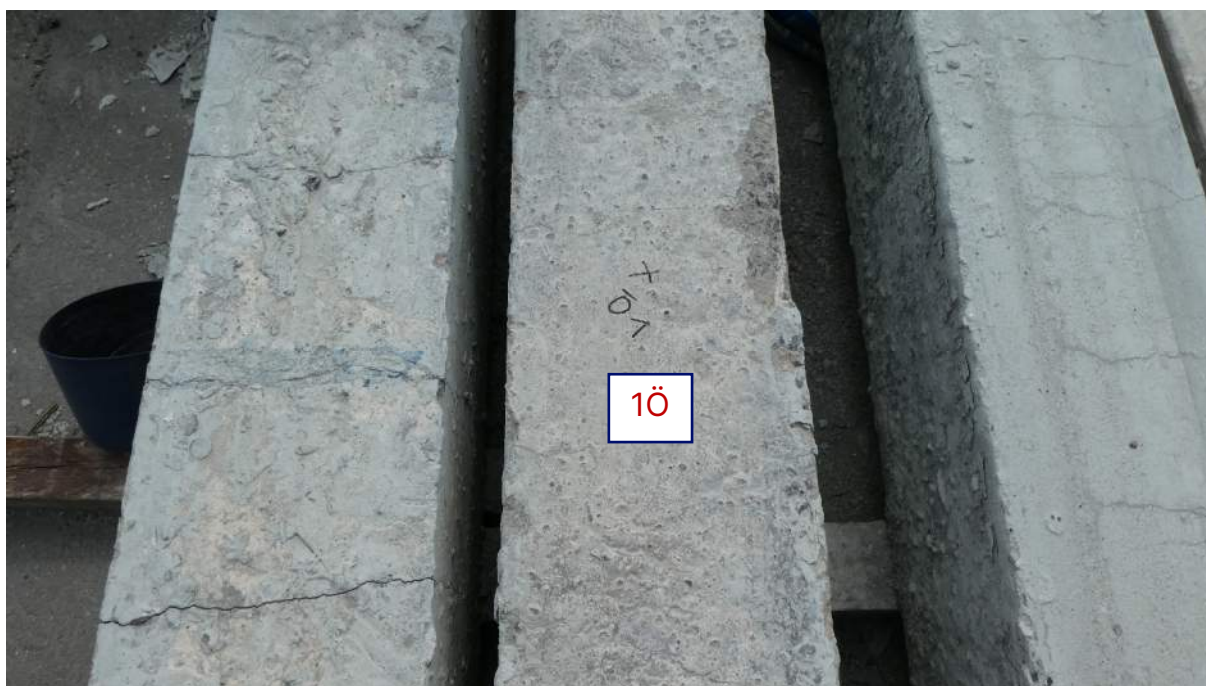
Figur 5.1. Uppdragna pålar förvarade utomhus vid Hercules förråd.

Vid den visuella bedömningen av pålarna kunde inga synliga tecken på skador upptäckas, som med säkerhet kunde relateras till installationsskedet eller driftskedet. De sprickor som syns i Figur 5.2 och Figur 5.3 kan med stor säkerhet relateras till uppdragningen av pålarna; detta eftersom sprickorna var rena dragsprickor och vid installationen av pålarna har ingen direkt slagning krävts, utan pålarna har tryckts ner varvid inga dragpåkänningar uppkommer i pålen. De skador på pålarna som framgår av Figur 5.1 kan relateras till två orsaker: trycket från hydrakolvorna i greppanordningen (t.ex. andra pålen från höger); och/eller de skador som uppkom när de 26 meter långa pålarna lades ner på marken.

Totalt borrades 13 kärnor ut från de tre pålelementen. I beteckningarna nedan används Ö för övre pålelement och B för undre pålelement. Det redovisas även om borrkärnan är utborrad från en sida som vett mot en formyta eller mot överyta (där betongen tillfördes) vid gjutning; skillnaden i ytstruktur mellan form-/ överyta framgår av Figur 5.2 och Figur 5.3. De tre studerade pålelementen betecknas:

- Pålelement 1B. (Kärna utborrad från formsida vid gjutning.)
- Pålelement 1Ö. (Kärna utborrad från översida vid gjutning.)
- Pålelement 2B. (Kärna utborrad från formsida vid gjutning.)

Foton på pålelement 2B och 1Ö visas i Figur 5.2 och Figur 5.3.



Figur 5.2. Foto på påle 1Ö, Kärna utborrad från översida på gjutning.



Figur 5.3. Foto på påle 2B. Kärna utborrad från formsida vid gjutning

6 Utborrade kärnor

Sammanställning över utborrade kärnor

Utborring av kärnor har gjorts vid tre höjdnivåer på de undre pålelementen och vid två höjdnivåer på det övre pålelementet. Pålelementen har numrerats baserat på avstånd till pålavskärningsplanet (PAP). På de undre pålelementen har kärnorna numrerats på följande sätt:

- K1. Utborrade ca 1 m över undre del av påle, dvs ca 25 m under PAP.
- K2. Utborrade ca 5 m över undre del av påle, dvs ca 21 m under PAP.
- K3. Utborrade ca 1 m under övre del av påle, dvs ca 14 m under PAP.

På överpålen har kärnorna numrerats på följande sätt:

- K1. Utborrade ca 3 m från undre del av påle, dvs ca 10 m under PAP.
- K2. Utborrade ca 2,5 m från övre del av påle, dvs ca 2,5 m under PAP.

I vissa lägen har två kärnor borrats ut, t.ex. borkärna 1B K1. Kärnorna betecknas då med ett löpnummer (1 eller 2), dvs. 1B K1:1 och 1B K1:2.

I påle 1B och 1Ö har kärnorna borrats ut från en formyta. I påle 2B har kärnorna borrats ut från överytan på gjutningen. En sammanställning över utborrade kärnor finns i Tabell 6.1.

Tabell 6.1 Sammanställning av utborrade kärnor. (Läge relativt PAP¹⁾)

Nr.	Kärna	Längd [mm]	Anmärkning
1	1B K1:1	140-160	-Borrade ur formsida -Ingen armering -Läge ca 25 m under PAP
2	1B K1:2	170-180	-Borrade ur formsida -Armering, TB=23 mm (ø 5, bygel) - Läge ca 25 m under PAP
3	1B K2	165-180	-Borrade ur formsida -Ingen armering -Vita utfällningar i en del porer -Läge ca 21 m under PAP
4	1B K3:1	165	-Borrade ur formsida -Armering, TB=60 mm (ø 12 dela av lyftögla) -Vita utfällningar i en del porer -Läge ca 14 m under PAP
5	1B K3:2	Trasig	-Borrade ur formsida -Ingen armering -Vita utfällningar i en del porer -Läge ca 14 m under PAP
6	1Ö K1	170-180	-Borrade ur formsida -Ingen armering -Läge ca 10 m under PAP
7	1Ö K2:1	180	-Borrade ur formsida -Ingen armering -Läge ca 2,5 m under PAP
8	1Ö K2:2	170	-Borrade ur formsida -Ingen armering - Läge ca 2,5 m under PAP
9	2B K1:1	175	-Borrade ur överytan -Ingen armering -Vita utfällningar i en del porer - Läge ca 25 m under PAP
10	2B K1:2	120	-Borrade ur överytan -Armering TB=22 mm (ø 5) -Vita utfällningar i en del porer -Läge ca 25 m under PAP
11	2B K2	180	-Borrade ur överytan -Ingen armering -Vita utfällningar i en del porer -Läge ca 21 m under PAP
12	2B K3:1	190	-Borrade ur överytan -Ingen armering -Läge ca 14 m under PAP
13	2B K3:2	185	-Borrade ur överytan -Armering TB=14 mm (ø 5) -Läge ca 14 m under PAP

¹⁾ PAP: Pålavskärningsplan

Betongen i samtliga kärnor ser ut att vara homogen och väl kompakterad. Största stenstorlek (d_{max}) är ca 16 mm. I några av kärnorna finns armering, där bygelarmeringen har borrats av. I kärna 1B 3:1 borrades en del av en lyftögla av (ej genomgående i kärnan). Det noterades inga tecken på korrosion på de avborrade armeringsjärnen.

Det noterades inga tecken på skador på betongen, t.ex. sprickbildning eller att betongen har blivit porös i någon del av kärnan. Det enda tecken på påverkan av betongen som noterades var att i flera av kärnorna fanns vita utfällningar i en del större porer (kalk/ettringit).

7 Betongprovning

Inledning

Utborrade kärnor har använts för att bestämma betongens tryckhållfasthet och densitet, karbonatiseringsdjup samt kloridhalt. Resultaten från genomförda provningar redovisas i följande kapitel. Foton av de flesta utborrade betongkärnorna redovisas i Bilaga A. Resultaten avseende betongens tryckhållfasthet och densitet, karbonatiseringsdjup samt kloridhalt redovisas i Bilagorna B-D. Dessa undersökningar är utförda av C-lab.

För att bedöma eventuell förekomst av kemiska angrepp, ASR och andra avvikelser i betongen, skickades ett prov för undersökning med mikroskopi på ett tunnslip. Detta prov togs från borrhärna 1Ö K2:2. Resultatet av undersökningen redovisas i Bilaga F. Denna undersökning är utförda av SWECO.

En kort kronologi över utförda undersökningar:

- Pålarna drogs upp i september 2020, varefter pålarna lagrades utomhus.
- Uttag av borrhärnor 2021-07-01
- Analys av borrhärnor mellan 2021-07-05 – 2021-07-09
- Mikroskopi 2023-06-01 (borrhärna lagra i inomhusmiljö fram till mikroskopi)

Tryckhållfasthet och densitet

Utborrade kärnor har undersökts med avseende på densitet och tryckhållfasthet enligt de metoder som finns beskrivna i (SIS, 2019a) samt (SIS, 2019b). Resultaten från genomförda provningar redovisas i Tabell 7.1 (1B och 2B är underpålar och 1Ö är en överpåle). Provningsrapport finns bifogad i Bilaga B.

Tabell 7.1 Uppmätta densiteter och tryckhållfastheter.

Märkning	Densitet [kg/m ³]	Hållfasthet [MPa]	Medelhållfasthet [MPa]	Anmärkning
1B 1:3	2400	78,0		
1B 3:1	(2540)	85,6	81,8	Innehöll armering (lyftögla)
1Ö 2:1	2370	80,0	80,0	
2B 1:1	2390	82,9		
2B 3:1	2380	79,6	81,2	
Medel	2385	81,2		

I Tabell 7.1 framgår att uppmätta densiteter är 2370-2400 kg/m³ vilket indikerar att betongen inte har haft extra luft tillsatt. Den extra höga densiteten i prov 1 B3:1 (2540 kg/m³) kan förklaras med att provet innehöll armeringsjärn (sannolikt en del av en lyftögla). Uppmätta tryckhållfastheter är 78,0-85,6 MPa, vilket indikerar att betongen i alla tre pålar är av hög kvalitet.

En utvärdering av uppmätta tryckhållfastheter visar att betongens hållfasthetsklass är ca C70/85. Om uppmätta tryckhållfastheter räknas om till 28-dygns hållfastheter² visar utvärderingen av betongens hållfasthetsklass att denna ursprungligen var ca C45/55. Uppmätta tryckhållfastheter indikerar att betongens vattencementtal (*vct*) är ca 0,40-0,45.

Karbonatiseringsdjup

Karbonatiseringsdjupet i betongen har bestämts på de yttre delarna av respektive kärna enligt den metod som finns beskriven i (SIS, 2006). Uppmätta karbonatiseringsdjup redovisas i Tabell 7.2 (1B och 2B är underpålar och 1Ö är en överpåle). Provingen utfördes cirka 7 månader efter att pålarna drogs upp.

Tabell 7.2 Uppmätta karbonatiseringsdjup.

Prov	Djup under PAP ¹⁾ [m]	Karbonatiseringsdjup [mm]	
		Max	Medel
1B K1:1	25	<1	<1
1B K2	21	<1	<1
1Ö K1	10	<1	<1
2B K1:2	25	6	5
2B K2	21	5	4
2B K3:2	14	<1	<1

¹⁾ PAP: Pålavskärningsplan

I Tabell 7.2 framgår att uppmätta karbonatiseringsdjup är små. Störst karbonatiseringsdjup mättes upp i de nedre delarna av påle 2, där karbonatiseringen sträcker sig upp till 6 mm. Vad förklaringen till den något mer omfattande karbonatisering i påle 2 är har inte gått att fastställa.

Kloridhalt i betongen

Kloridhalten i betongen har utvärderats i sju av borrkärna. Utvärderingen har utförts med RCT-metoden (Rapid Chloride Test) på betongpulver från borrkärnorna. Betongpulvret framställdes genom att mala ned skivor som sågats ut från kärnorna. Tre skivor sågades ut från varje borrkärna med djupintervallen; 5-15 mm, 25-35 mm samt 45-55 mm.

² Omräkning av uppmätta tryckhållfastheter till 28-dygns hållfastheter har gjorts enligt det samband för hållfasthetstillväxt som redovisas i Figur 14.12:21a i (Svenska Betongföreningen, 2021). Hållfastheten efter lång tid är ca 1,5-1,6 gånger högre än 28 dygnsvärdet, där uppmätta tryckhållfastheter har dividerats med 1,5.

Kloridhalten bestäms som kloridjonhalten i procent av betongprovets vikt. Därefter behöver betongprovets kloridjonhalt räknas om till kloridjonhalt i procent av cementens vikt. Att bestämma cementmängden i ett prov görs oftast baserat på erfarenhet.

Cementmängden beror i princip på betongkvaliteten. Pålarna är producerade under mitten av 1990-talet och därmed med största sannolikhet tillverkade enligt (SIS, 1989). Enligt denna standard ska lägsta hållfasthetsklass vara K50 med *vct* högst 0,45. De uppmätta tryckhållfastheterna indikerar att betongens *vct* är ca 0,40-0,45.

Mikroskopin, som redovisas i Bilaga F, indikerar ett *vct* av ca 0,35 ($\pm 0,05$), vilket får anses vara lågt.

Eftersom cementmängden ökar med ett lägre *vct* och att det därför finns en risk att underskatta kloridinnehållet, som del av cementvikten, utförs utvärderingen med *vct* 0,45 vilket motsvarar en cementhalt av ca 16 vikt-%. Erfarenheter från tidigare undersökningar utförda av C-lab visar att cementhalten, i skivor utsågade från kärnor, kan variera i storleksordningen $\pm 5\%$. Av denna anledning redovisas även ett spridningsintervall. En sammanställning av kloridhalterna redovisas i Tabell 7.3.

Tabell 7.3 Kloridhalt – Uppmätt Cl⁻ i % av provvikt samt uppskattad Cl⁻ i % av cementvikt.

Prov ¹⁾	Djup under PAP ²⁾	Mättdjup i borrhärlor	Uppmätt Cl ⁻ i % av provvikt [%]	Uppskattad Cl ⁻ i % av cementvikt ³⁾	
				Cementhalt 16% <i>vct</i> 0,45 [%]	Spridningsintervall $\pm 5\%$ ⁴⁾ [%]
1B K1:1	25	5-15	0,474	3,0	2,3 / 4,3
1B K1:1	25	25-35	0,434	2,7	2,1 / 3,9
1B K1:1	25	45-55	0,303	1,9	1,4 / 2,8
1B K2	21	5-15	0,488	3,1	2,3 / 4,4
1B K2	21	25-35	0,328	2,1	1,6 / 3,0
1B K2	21	45-55	0,200	1,3	1,0 / 1,8
1Ö K1	10	5-15	0,265	1,7	1,3 / 2,4
1Ö K1	10	25-35	0,196	1,2	0,9 / 1,8
1Ö K1	10	45-55	0,166	1,0	0,8 / 1,5
1Ö K2:2	2,5	5-15	0,151	0,9	0,7 / 1,4
1Ö K2:2	2,5	25-35	0,033	0,2	0,2 / 0,3
1Ö K2:2	2,5	45-55	0,019	0,1	0,1 / 0,2
2B K1:2	25	5-15	0,625	3,9	3,0 / 5,7
2B K1:2	25	25-35	0,436	2,7	2,1 / 4,0
2B K1:2	25	45-55	0,343	2,1	1,6 / 3,1
2B K2	21	5-15	0,517	3,2	2,5 / 4,7
2B K2	21	25-35	0,430	2,7	2,0 / 3,9
2B K2	21	45-55	0,451	2,8	2,1 / 4,1
2B K3:2	14	5-15	0,314	2,0	1,5 / 2,9
2B K3:2	14	25-35	0,258	1,6	1,2 / 2,3
2B K3:2	14	45-55	0,270	1,7	1,3 / 2,5

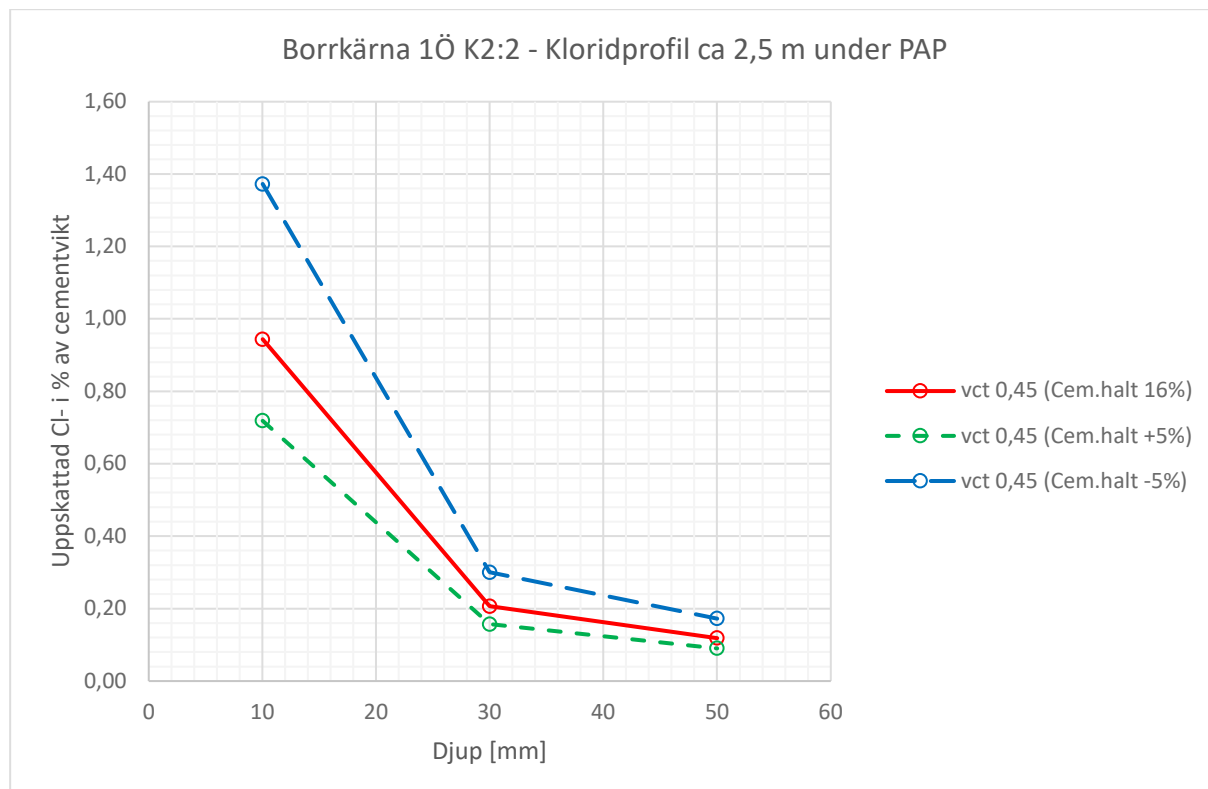
¹⁾ 1B K1:1: Pål nr 1B (Där B står för underpål och Ö står för överpål); Borrhärlor K1:1

²⁾ PAP: Pålavskärningsplan

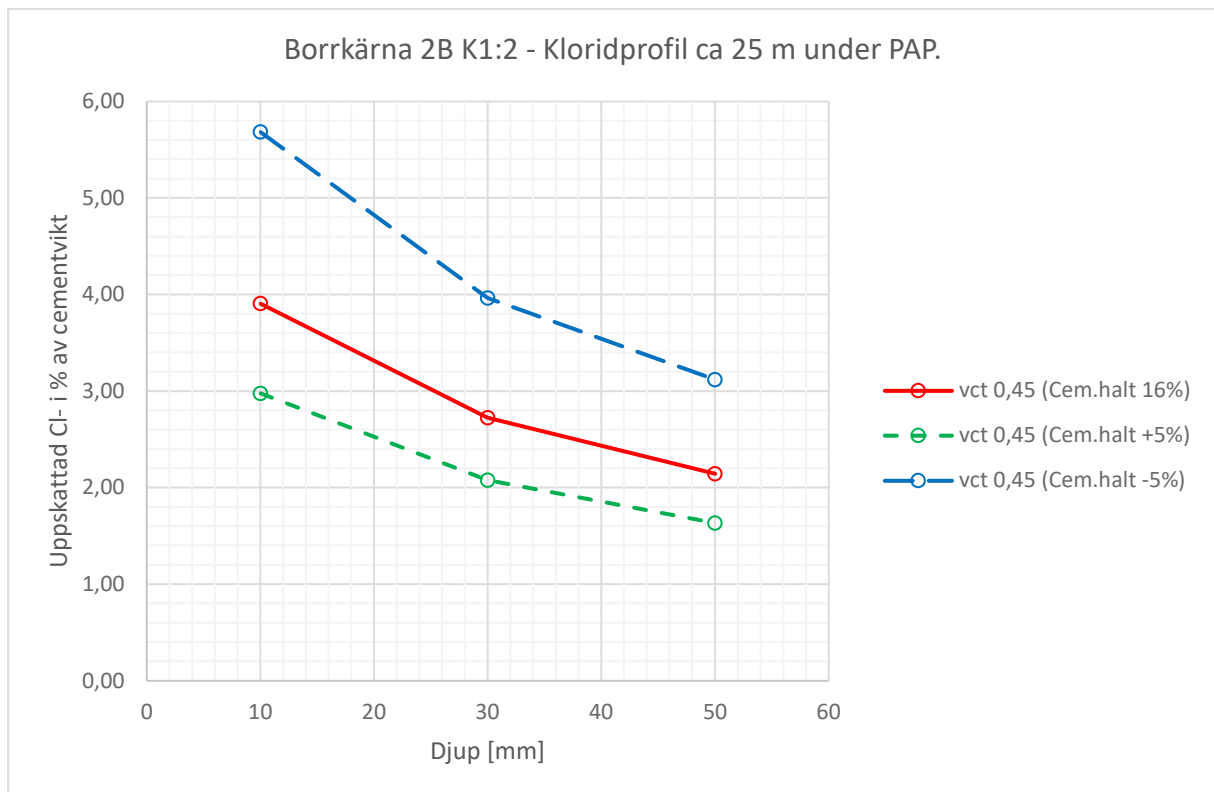
³⁾ Vid analysen av kloridtesten antogs en cementhalt av ca 16 vikt% (*vct*=045).

⁴⁾ Erfarenheter från tidigare undersökningar utförda av C-lab visar att cementhalten, i skivor utsågade från kärnor, kan variera i storleksordningen $\pm 5\%$. Därför redovisas ett möjligt spridningsintervall.

Resultaten, som redovisas i Tabell 7.3, visar att det finns förhöjda kloridhalter i betongen i alla prov. I Figur 7.1 och Figur 7.2 redovisas kloridprofilerna, inklusive möjligt spridningsintervall, för borrkärnorna 1Ö K2:2 (2,5 m under PAP) samt 2B K1:2 (25 m under PAP). Samtliga kloridprofiler redovisas i Bilaga E. För fortsatta utvärdering i rapporten baseras kloridhalterna på $v_{ct} 0,45$ med en cementhalt av ca 16 vikt-%. Uppmätta kloridhalter visar att det har skett en omfattande kloridinträngning i de undersökta pålarna.



Figur 7.1. Kloridhalter som har mätts upp borrkärnan 1Ö K2:2 (2,5 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.



Figur 7.2. Kloridhalter som har mätts upp borrkärnan 2B K1:2 (25 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.

Mikroskopi – Kemiska angrepp och ASR

För att bedöma eventuell förekomst av kemiska angrepp, ASR och andra avvikelser i betongen, skickades ett prov för undersökning med mikroskopi på ett tunnslip. Provet togs från borrkärna 1Ö K2:2, ett foto av borrkärnan visas i Figur 7.3.

Att utföra en mikroskopiundersökning aktualiserades under analysarbetet av övriga provresultat vilket medförde att mikroskopin utfördes 2 år efter övrig provning. Borrkärnan lagrades, under de 2 åren, i inomhusmiljö. Provet är från nivån 2,5 m under PAP. Porvatten från nivå "7m", vilket motsvarar 4m under PAP, uppvisade förhöjda halter av sulfater (290 mg/l vilket motsvarar XC1). Halterna avtar därefter mot djupet.

Resultatet av undersökningen redovisas i Bilaga F. Tunnslipens storlek var cirka 40×20 mm och den var cirka 25 µm tjock, dvs en tunnslip representerar en tvådimensionell bild av en mycket liten del av den undersökta borrkärnan/pålen. Tyvärr kunde bara ett (stick-)prov utföras, och då två år efter övrig provning, vilket behöver beaktas när resultaten värderas.

Mikroskopin indikerar att cementpastan är något karbonatiserad till ett djup på 1 mm samt längs med ytparallella sprickor på 4–8 mm djup. Cementpastan i provet visar tecken på urlakning till ett djup på 9 mm. Det finns eventuellt indikationer på en sänkning av betongens hållfasthet i detta område. ASR (alkalisk syra reaktioner) bedöms inte vara ett problem. Betongen bedöms ha ett *vct* av 0,35 (±0,05).

Cementen bedöms inte vara sulfatresistent och det finns enligt Bilaga F tecken på ett begynnande sulfatangrepp, dock inte verifierat och heller inte konstaterat om det är ett yttre eller inre sulfatangrepp (där inre angrepp orsakas av försenad ettringitbildning).



Figur 7.3. Foto på prov 1Ö K2:2.

8 Diskussion av provresultat

Visuell bedömning av pålar och utborrade kärnor

Vid den visuella bedömningen av pålarna kunde inga synliga tecken på skador upptäckas, som med säkerhet kunde relateras till installationsskedet eller driftskedet. Den visuella bedömningen av utborrade kärnor visar att betongen är homogen och inte har några synliga tecken på nedbrytning. Det fanns inga tecken på att ytterytan av kärnorna har påverkats av exponering från eventuellt skadliga ämnen i den omgivande lera.

Den enda notering som gjordes var att i flera av kärnorna fanns vita utfällningar i en del större porer (kalk/ettringit eller gips). Dessa vita utfällningar är sannolikt ett resultat av långvarig exponering för fukt, som har medfört att utfällningar har kunnat ske i större porer. C-lab:s erfarenhet är att vita utfällningar i större porer ofta förekommer i betong som varit utsatt för fukt en längre tid. Utfällningarna består exempelvis av kalk eller ettringit. En viss mängd ettringit förekommer normalt i betong. Det fanns inga tecken på ASR-angrepp.

Den visuella bedömningen var att exponeringen för den omgivande lera inte har medfört någon synlig kemisk nedbrytning av betongen. Mikroskopin indikerar att ytan var något eroderad.

Armeringens status undersökes bara stickprovsmässigt, bland annat i de utborrade betongkärnorna, och denna undersökning avslöjade inte någon pågående problematik med armeringskorrosion. I efterhand kan det konstateras att en mer omfattande friläggning av armeringen hade det varit önskvärd så att en mer omfattande visuell bedömning av armeringen hade kunnat utföras.

Tryckhållfasthet

Borrkärnorna som provades med avseende på tryckhållfasthet visade att betongkvaliteten i alla tre pålelementen var hög. Provkropparna för bestämning av tryckhållfasthet kommer från den inre delen av de utborrade betongkärnorna, dvs provresultaten representerar de inre delarna av pålarna. En utvärdering av uppmätta tryckhållfastheter visar att betongens hållfasthetsklass är ca C70/85. En omräkning till 28-dygnshållfastheter ger en ursprungligen hållfasthetsklass av ca C45/55. Resultaten indikerar att betongens vattencementtal är ca 0,40-0,45. Tunnslipen indikerar att *vct* ligger i det lägre området av intervallet. Enligt tunnslipsanalysen finns indikationer på en eventuell minskning av tryckhållfastheten i de yttersta delarna (ca 9 mm). Tunnslipen kan indikera urlakning eller en högre porositet som skulle kunna påverka hållfastheten, dvs indikationen avseende en minskning av tryckhållfastheten bedöms avse relativt resterande delen av betongtvärsnittet. Det är dock oklart hur denna minskning av hållfasthet förhåller sig till den generella hållfasthetstillväxt som provningen av borrkärnorna påvisar.

Resultaten indikerar att betongens mekaniska egenskaper inte har påverkats negativt av 25 års exponering från den omgivande lera. Den betydande hållfasthetstillväxten över tid är en aspekt som borde vara intressant vid dimensionering av pålar i allmänhet.

Karbonatiseringsdjup

Karbonatisering av betong är en process där koldioxid reagerar med porvattnet och bildar kolsyra (HCO_3^-) som sedan reagerar med kalciumhydroxid i betongen och bildar kalciumkarbonat ($CaCO_3$), vilket leder till att betongens pH-värdet sjunker vilket reducerar betongens förmåga att skydda armeringen från korrosion. Koldioxid förekommer i luft och i vatten löst som kolsyra. Alla utborrade betongkärnor har permanent befunnit sig under vatten.

Aggressiv kolsyra förekommer främst i vatten med låga pH-värden. Båda dessa parametrar ingår vid bedömningen av exponeringsklasser med avseende på kemiskt angrepp från naturlig jord och grundvatten (SIS, 2021). Det inte föreligger någon standardmetod för att ta fram porvatten från lera, vilket medförde att processen drog ut på tiden. Lerproven centrifugerades inte förrän cirka 2 månader efter att kolvproven togs upp. Den långa handläggningstiden medförde att analysresultaten avseende pH påverkades. Halten aggressiv kolsyra beräknas från alkalinitet och pH. Beräkningsmetoden är inte helt tillförlitlig för grundvatten med t.ex. relativt höga

kloridhalter. Till detta tillkommer att pH som använts i beräkningarna inte har pålitliga värden, vilket medförde att det inte gick att fastställa halterna av aggressiv kolsyra. Andra provtagningar utförda inom Västlänken (grundvatten ovan leran) har dock indikerat på områden med något lägre pH (~pH 6) och 10-40 mg/l CO₂.

Pålarna var lagrade utomhus i 7 månader från att pålarna drogs upp tills provningen med avseende på karbonatisering utfördes. Generellt så är de uppmätta karbonatiseringsdjupen små. Störst karbonatiseringsdjup mättes upp i de nedre delarna av påle 2B, där karbonatiseringen sträcker sig upp till 6 mm från betongens yta (uppmätt i en formyta). Vad förklaringen till den något mer omfattande karbonatisering i påle 2B är har inte gått att fastställa.

Tunnslipen utfördes nästan 3 år efter att pålarna drogs upp. Analysen visar att cementpastan är något karbonatiserad till ett djup av 1 mm och längs med ytparallella sprickor på 4–8 mm djup. Det är troligt att de ytparallella sprickorna är en del av en spricka som löper mer eller mindre vinkelrätt mot ytan. Detta då tunnslipen är extremt tunn, cirka 25 µm, samt att karbonatiseringen uppträder längs med sprickorna vilket indikerar att kolsyran trängt in med porvatten som fyller spricksystemet i betongen.

Karbonatisering är en långsam process, där karbonatiseringsdjupets tillväxt är proportionellt mot kvadratroten av tiden. En förutsättning för att detta samband ska gälla är att varken miljö eller betong ändrar sig med tiden, vilket kan antas gälla här. I Tabell 8.1 görs en prognos av karbonatiseringsdjupets tillväxt med tid.

Tabell 8.1 Prognos av karbonatiseringens propagering med tid.

Prov	Djup under PAP ¹⁾ [m]	Prognostisering av karbonatiseringsdjup [mm]		
		Uppmätt efter 25 år	Prognos efter 50 år	Prognos efter 100 år
1B K1:1	25	<1	>1	2
1B K2	21	<1	>1	2
1Ö K1	10	<1	>1	2
2B K1:2	25	5	8,5	12
2B K2	21	4	7	10
2B K3:2	14	<1	>1	2
1Ö K2:2 ²⁾	2,5	8	11	16

¹⁾ PAP: Pålavskärningsplan

²⁾ Från tunnslip

För betongpålar enligt (SIS, 1989) gäller ett minsta täckande betongskikt av 30 mm, med en tolerans på +10 /-5mm till huvudarmeringen. Huvudarmeringen omges av en ø5 bygelarmering. Detta innebär att det täckande betongskiktet till bygelarmeringen ska vara 20 mm. Generellt var de uppmätta täckskikten över 20 mm, i en borrhäla uppmättes ett täckskit av 14 mm.

Prognostiseringen indikerar att det inte finns någon generell risk för uppkomst av korrosion på grund av karbonatisering. Så länge armeringen ligger på rätt position kommer karbonatiseringen inte att nå in till armeringens nivå på 100 år, som får anses vara en normal livslängd för en påle. Att karbonatiseringen når armeringen innebär att betongens passiverande effekt försvinner och det finns risk att korrosion initieras. Eftersom tillgången på syre är mycket begränsad under mark kommer det inte finnas förutsättningar för att korrosion skall kunna fortskrida med någon större hastighet. Att

karbonatiseringen når armeringen betyder alltså inte automatiskt att armeringens livslängd är uppnådd.

Tre av de undersökta kärnorna har betydligt större karbonatiseringsdjup än de fyra andra. Det är oklart om skillnaderna beror på skillnader avseende: betongkvalitet; eventuell påverkan av betongen kopplad till pålarnas hantering i samband med installation; eller lokala skillnader i exponeringsmiljö (dvs lokala variationer i mängden CO₂). Det tycks inte heller finnas något samband mellan den provtagna ytans läge i samband med gjutning (formyta eller överyta). Dock är det känt att härdningen av täcksiktet är viktigt för att säkerställa ett bra skydd mot karbonatisering.

Kloridhalt i betongen

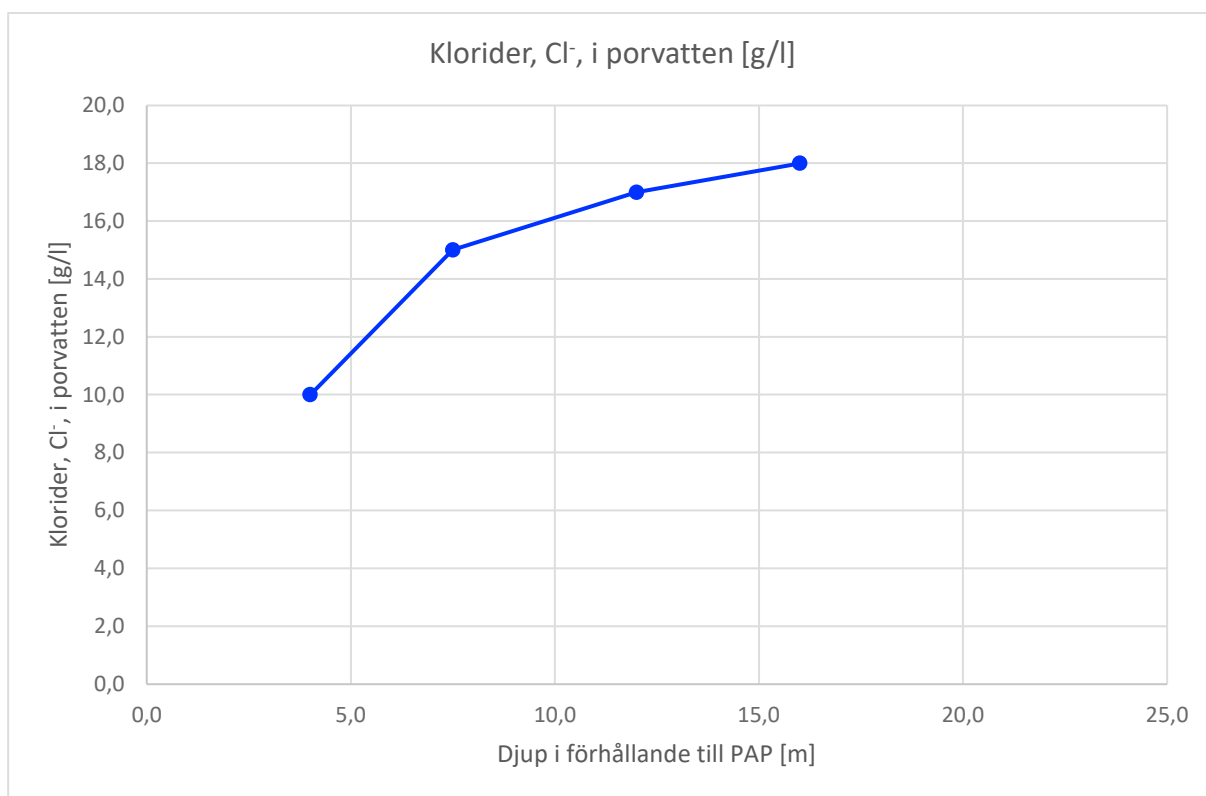
I Figur 8.1 redovisas kloridkoncentrationen i leran och hur den bedöms variera i relation till pålavskärningsplanet, PAP. I Figur 8.2 till Figur 8.5 redovisas utvärderade kloridprofiler från 1B, 2B (underpålar) samt 1Ö (överpåle). Resultaten som redovisas i figurerna visar att det finns förhöjda kloridhalter i betongen i alla prov.

Kloridkoncentrationerna i leran ökar mot djupet, jämför Figur 8.1. Det finns även ett tydligt djupberoende på kloridinträngningen i betongen, där inträngningen är mest omfattande i de nedre delarna av de undersökta underpålarna, dvs. 1B och 2B.

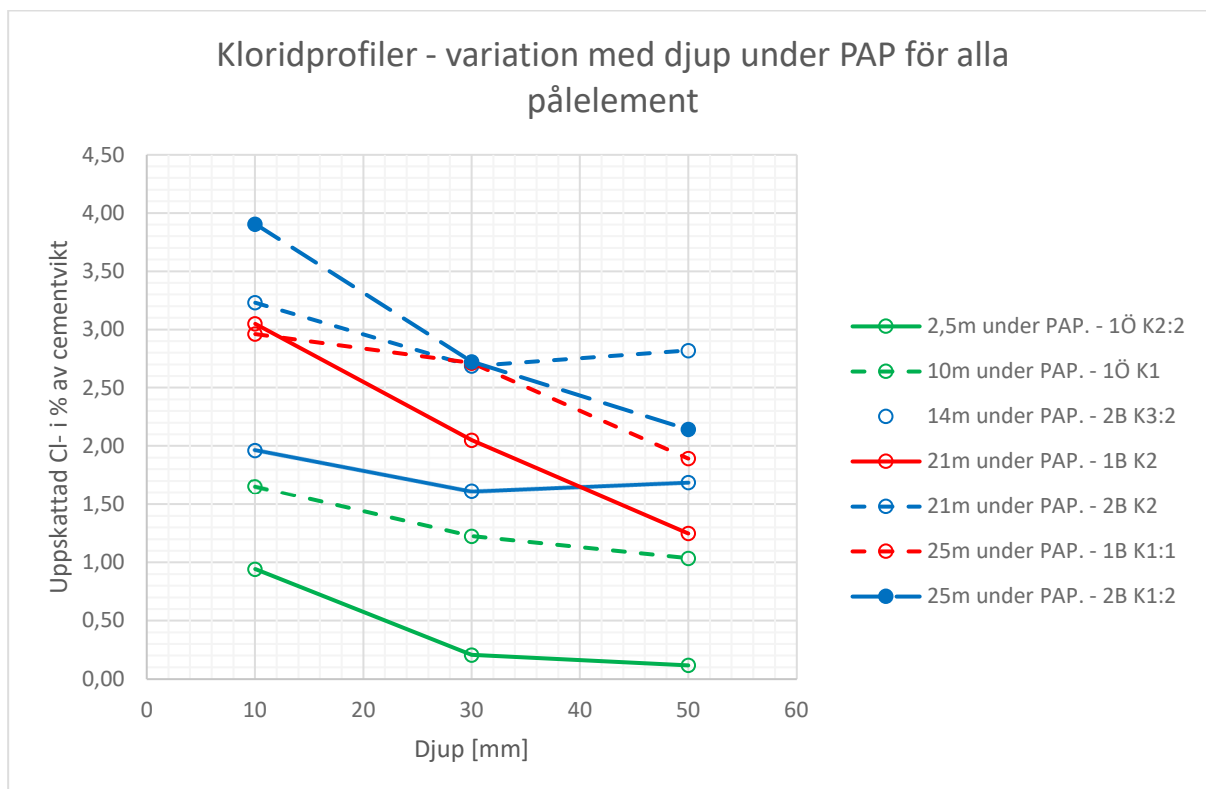
För att bedöma risken för initiering av armeringskorrosion ska uppmätta kloridhalter jämföras med kloridtröskelvärdet, dvs. den kloridhalt vid armeringen när korrosion kan initieras. För den aktuella exponeringsmiljön och betongkvaliteten bedöms kloridtröskelvärdet vara ca 2,0 % Cl/cement för slakarmering (där exponeringsmiljön för pålarna har likställts med en marin undervattenszon), se t.ex. (Frederiksen m.fl. 1997)³.

Uppmätta kloridhalter i höjd (tb till huvudarmering ca 25-30 mm) med armeringen överstiger kloridtröskelvärdet, dvs. det finns risk för initiering av armeringskorrosion orsakad av klorider. Det bör dock noteras att för korrosion skall kunna fortskrida krävs tillgång till både fukt och syre. I de aktuella pålarna finns tillgång till fukt men tillgången till syre är mycket begränsad, vilket betyder att det sannolikt inte finns förutsättningar för korrosion att kunna fortskrida med någon större hastighet. Detta bekräftas också genom en visuell bedömning av den armering som fanns i utborrade kärnor, där det inte fanns några synliga tecken på korrosion.

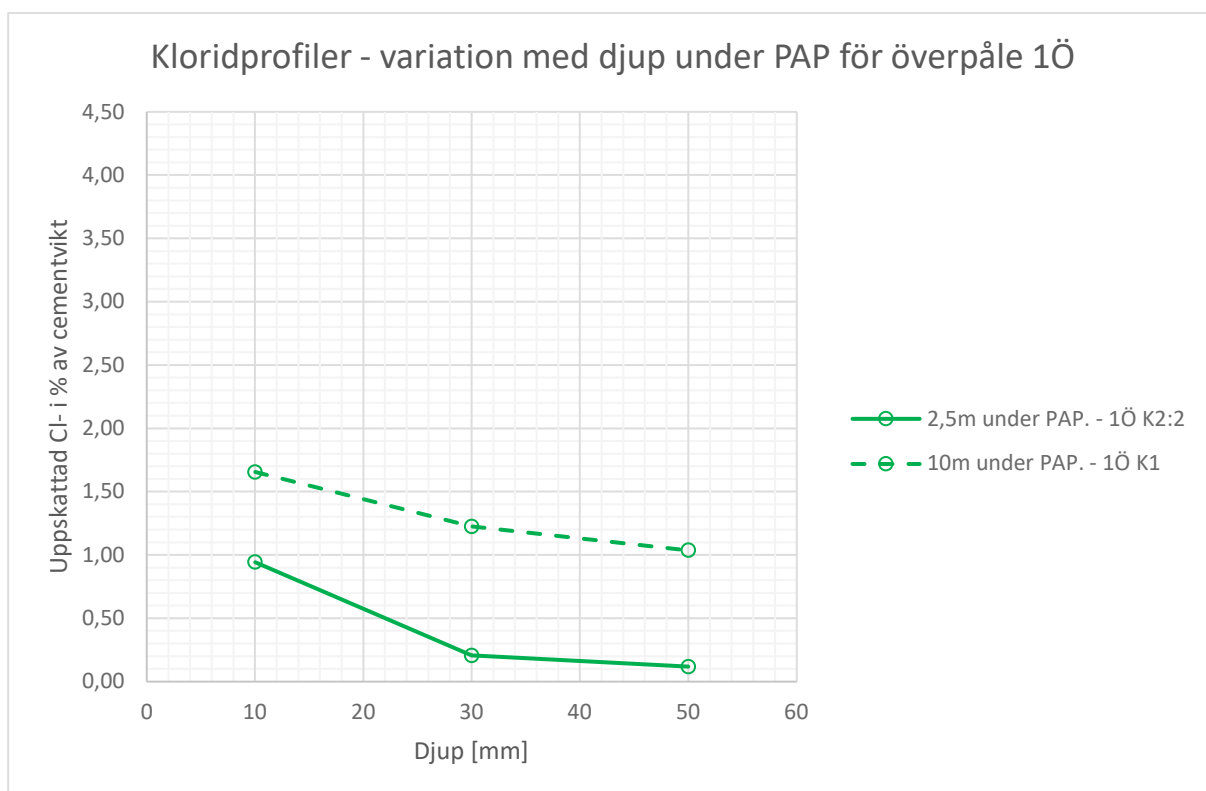
³ Frederiksen, J.M., Nilsson, L.-O., Poulsen, E., Sandberg, P., Tang L. & Andersen, A. (1997), HETEK, A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background, Vejdirektoratet, HETEK-Report No. 83, København, 1997.



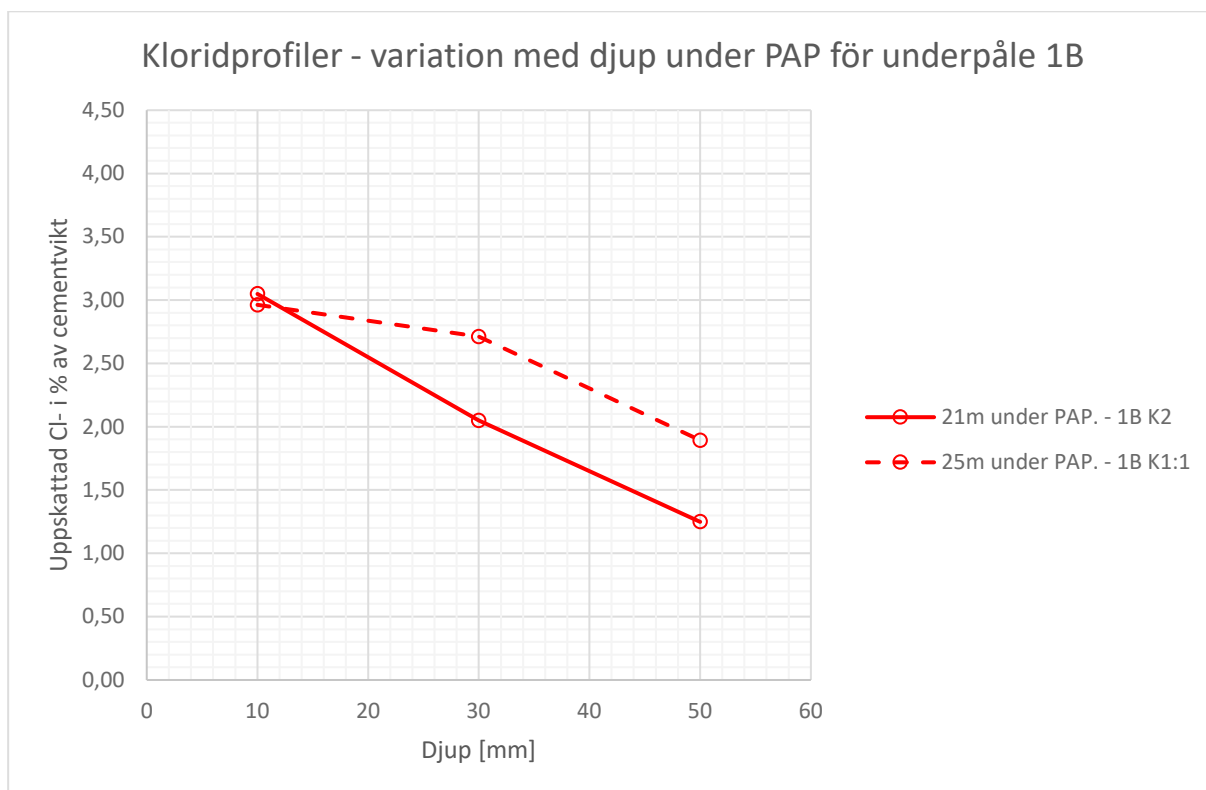
Figur 8.1. Kloridkoncentration i leran och hur den bedöms variera i relation till pålavskärningsplanet, PAP.



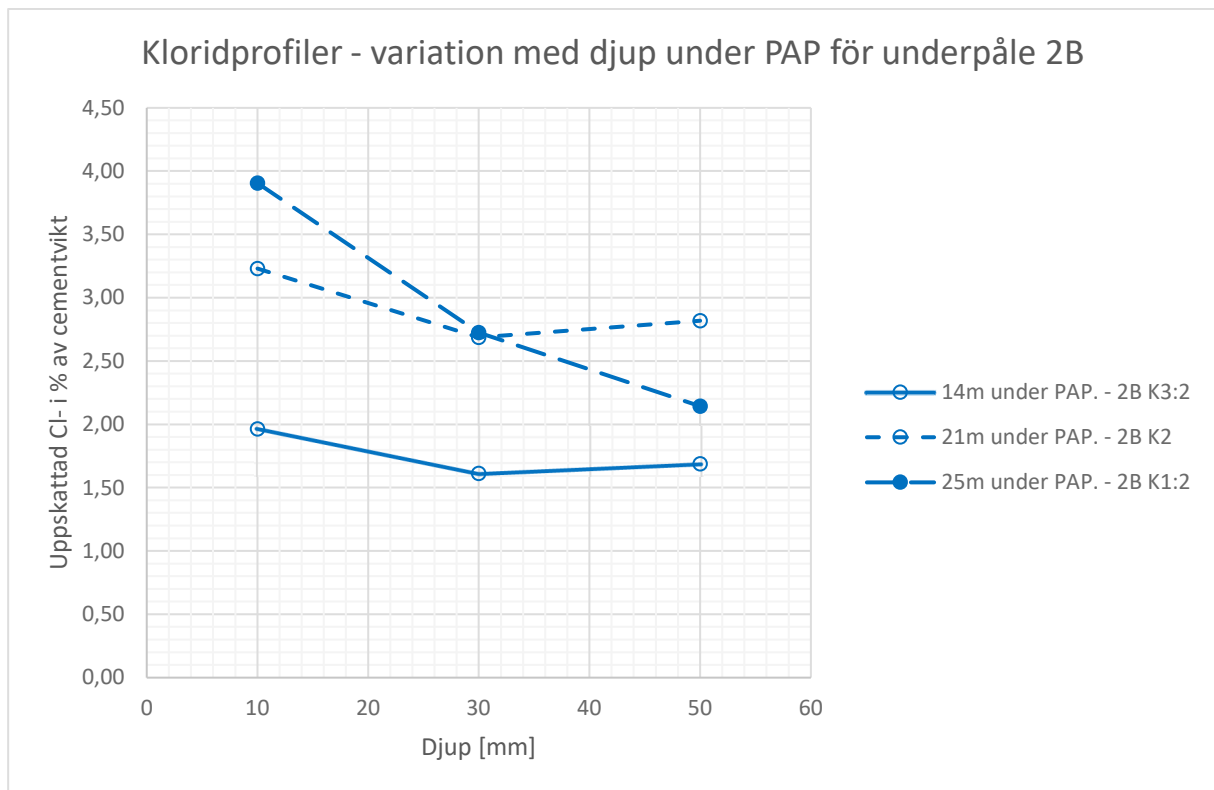
Figur 8.2. Samtliga utvärderade kloridprofiler från 1B, 2B (underpålar) samt 1Ö (överpåle). Baserad på v_{ct} 0,45 med cementhalt av ca 16 vikt-%.



Figur 8.3. Utvärderade kloridprofiler från 1Ö (överpåle). Baserad på v_{ct} 0,45 med cementhalt av ca 16 vikt-%.



Figur 8.4. Utvärderade kloridprofiler från 1B (underpåle). Baserad på v_{ct} 0,45 med cementhalt av ca 16 vikt-%.



Figur 8.5. Utvärderade kloridprofiler från 2B (underpåle). Baserad på $v_{ct} 0,45$ med cementhalt av ca 16 vikt-%.

Kloridhalten i betongen utvärderades i detta fall med RCT-metoden (Rapid Chloride Test). Resultaten redovisas i denna rapport med ett spridningsintervall. Det finns metoder med större noggrannhet där cementhalt eller både cement- och kloridhalt bestäms med våtkemiska metoder. Dessa metoder ställer större krav på laboratorieutrustning vilket innebär högre kostnad och större tidsåtgång. En sådan metod är (Nordtest, 1996). Det bör också tilläggas att det är den totala kloridhalten som uppmätts med RCT-metoden, dvs både bundna och fria klorider, där cement och bindemedel med en högre kloridbindningskapacitet kan ha en hög total kloridhalt men en låg andel fria klorider. Då tunnslippen indikerade att den cement som använts troligen inte var ett sulfatresistent cement så är det troligen så att cementet har en högre halt C_3A (aluminater) vilket då leder till en större kloridbindning. Detta medför att uppkomst av armeringskorrosion försenas.

Mikroskopi

Mikroskopi som undersökningsmetod är en bra metod för att detektera påverkan på betongen. Det kan dock vara komplicerat att omsätta tunnslipens "mikronivå" till en betongkonstruktions "makronivå", speciellt om tunnslipen har gjorts på enstaka prov. Det är också viktigt att beakta att tunnslip görs på extremt två-dimensionella prov, vilket också påverkar analysresultaten. Detta är något som behöver beaktas när uttag av prov för tunnslip planeras.

9 Betong i aggressiva markförhållanden

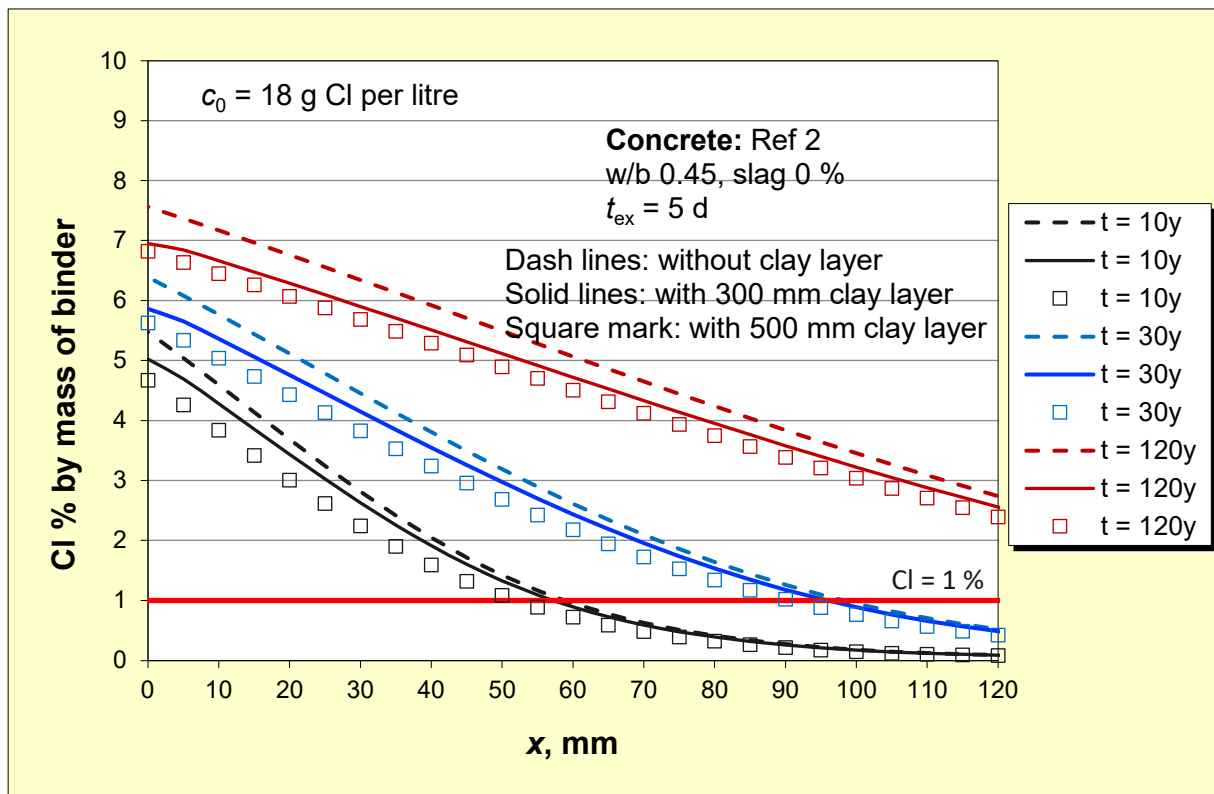
För betong i aggressiva markförhållanden finns risk för både kemiska angrepp och armeringskorrosion orsakad av karbonatisering eller kloridinträngning. När det gäller kemiska angrepp på betong så kommer angreppet ske på betongkonstruktionens yta medan klorider först måste penetrera det täckande betongskiktet för att nå armeringen.

När det gäller dimensioner av betongkonstruktioner i aggressiva markförhållanden används Tabell 2 i (SIS, 2021) som grund för en uppskattning av angreppsgraden. Tabellen gäller för naturlig jord och naturligt grundvatten, som i princip är stillastående. Grundvattnets rörlighet och markens förmåga att transportera skadliga kemiska ämnen spelar dock en betydande roll för att kunna bedöma hur tillförseln av skadliga ämnen kommer ske under konstruktionens livslängd. Enligt (Svenska Betongföreningen, 2021) kan en sänkning av bedömd angreppsgrad vara motiverad om vattenomsättningen är låg, t ex när jorden har låg permeabilitet ($<10^{-5}$ m/s). Den aktuella lera vid E02 – Centralen som har en permeabilitet på 10^{-9} m/s. Det är inte enbart halterna förorening i grundvattnet som styr utan även masstransporten. För en lera med låg permeabilitet kommer därför transporten av aggressiva kemikalier vara mindre. Tyvärr ges det i (SIS, 2021) eller (Svenska Betongföreningen, 2021) ingen vägledning om hur detta ska beaktas. Det finns vidare studier, (Alshameri, A. *m.fl.* 2018), som visar att leror oftast är negativt laddade och därför binder positivt laddade joner (som t ex ammonium- och magnesium-joner), vilket då ännu mer skulle begränsa risken för kemiska angrepp.

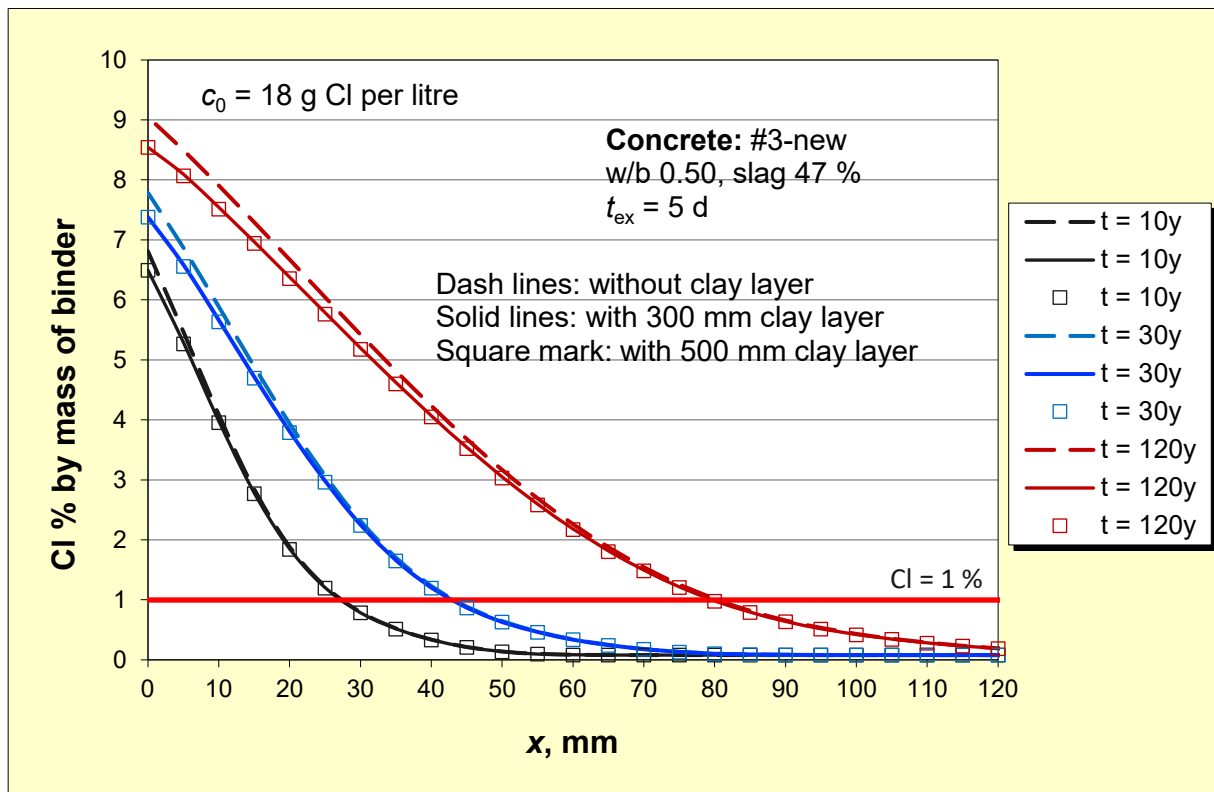
I (SIS, 2021) redovisas vilka testmetoder som ska användas vid provning av porvattnet för de olika kemiska komponenterna. Det saknas tyvärr underlag för hur man ska ta upp och förvara lera samt hur porvattnet ska extraheras från lerproven. I detta fall har lerproven centrifugerats i 20 000 g vilket får anses vara extremt. Troligen innehåller det extraherade porvattnet högre halter av de kemiska komponenterna än som i praktiken kan påverka betongen.

När det gäller hur lera med låg hydraulisk konduktivitet kan påverka dimensionering av betongkonstruktioner med avseende på armeringskorrosion orsakad av klorider lämnar (SIS, 2021) ingen vägledning. En studie, som gjordes i samband med projektet, presenterades i (Löfgren *m.fl.* 2022). Studien omfattade numeriska simuleringar där transport av klorider i både lera och betong beaktades för att bestämma kloridinträngningen i betong.

För lera användes en effektiv diffusionskoefficient av 5×10^{-10} m²/s och en porositet av 65 %. Lera antogs initialt vara mättad med klorider med en kloridjonkoncentration av 18 g/l. Lerlagrets tjocklek varierades mellan 0-500 mm (0mm, 300mm, 500mm). Resultaten för två olika betonger redovisas här, båda var baserade på en Anläggningscement CEM I 42,5 N-SR3 (MH LA). Den första betongen var baserad på 100% Anläggningscement med v_{ct} 0,45. Den andra betongen hade v_{bt} 0,50 och där 47% av cementen var ersatt med GGBS (Ground granulated blast-furnace slag). Betongernas kloridmigrationskoefficient (D_{RCM}) mättes med (Nordtest, 1999) vid olika åldrar. Resultaten från simuleringarna redovisas i Figur 9.1 och Figur 9.2.



Figur 9.1. Inverkan av lerans tjocklek på kloridprofiler Baserad på w/b 0.45, slag 0%,
 $D_{RCM} = 14.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.



Figur 9.2. Inverkan av lerans tjocklek på kloridprofiler Baserad på w/b 0.50, slag 47%,
 $D_{RCM} = 1.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2$.

Figurerna ovan visar jämförelsen av resultaten med och utan lerskikt. Kloridhalten nära betongytan blir lite lägre när ett lerlager ansätts utanför betongen, men skillnaderna avtar mot djupet, vilket innebär att lerlagret har mycket begränsad "bromsande" effekt, även när lerlagrets tjocklek ökades till 500 mm. Orsaken kan vara att betongen har en diffusionskoefficient som är lägre än leran med två potenser och därmed är transporten av klorid genom leran främst beroende av flödet i betong. Effekten är tydligare för betongen med slagg som också har en betydligt lägre kloridmigrationskoefficient än betongen utan slagg. I studien var det bara möjligt att studera lertjocklekar upp till 500 mm.

Kloridhalten i Figur 9.1 efter 30 år stämmer relativt bra överens med de uppmätta värdena redovisade i Figur 8.2 (ca 25 års exponering) för de djupare delarna. Fast den beräknade kloridhalten är något högre vilket troligen kan förklaras av att den är baserad på Anläggningscement (med låg C_3A -halt) som har sämre kloridbindningskapacitet och en högre kloriddiffusionskoefficient.

10 Slutsatser

Baserat på de utförda provtagningarna kan följande slutsatser dras.

Vid den visuella bedömningen av pålarna kunde varken synliga tecken på skador eller nedbrytning upptäckas. Det fanns inga tecken på att ytterytan av kärnorna har påverkats av exponering från eventuellt skadliga ämnen i den omgivande lera.

Armeringens status undersöktes stickprovsmässigt och undersökningen avslöjade inte någon pågående problematik med armeringskorrosion.

Provning av betongens tryckhållfasthet visade att betongen var av hög kvalitet och att betongens hållfasthetsklass var ca C70/85. En omräkning till 28-dygnshållfastheter visar att denna ursprungligen hållfasthetsklassen var ca C45/55. Dvs en betydande hållfasthetstillväxten har inträffat över tid. Resultaten indikerar att betongens mekaniska egenskaper inte har påverkats negativt av 25 års exponering från den omgivande lera.

Generellt så är de uppmätta karbonatiseringsdjupen små. En prognostisering, baserad på att karbonatiseringsdjupets tillväxt är proportionellt mot kvadratroten av tiden, indikerar att så länge armeringen ligger på rätt position kommer karbonatiseringen inte att nå in till armeringens nivå på 100 år, vilket får anses vara en normal livslängd för en påle.

De uppmätta kloridkoncentrationerna i leran är höga och ökar mot djupet. Kloridkoncentrationer i leran är så höga att täcksiktsskruven enligt (Boverket, 2022) / (Transportstyrelsen, 2022) inte är tillämpliga, då de är baserade på en maximal kloridkoncentration på 0,4 procent. Kloridinträngningen i pålarna uppvisade höga nivåer och som ökade med djupet. Även om kloridhalterna översteg förväntade kloridtröskelvärden så kunde ingen armeringskorrosion konstateras, vilket troligen beror på att det i leran är begränsad tillgång på syre.

Dimensionering av betongkonstruktioner i aggressiva markförhållanden ska baseras på (SIS, 2021), dock saknas:

- underlag som beskriver hur lera ska tas upp, förvaras samt hur porvattnet ska extraheras från lerproven för att ge rätt information.
- vägledning avseende hur angreppsgrad kan sänkas för jordar med låg hydraulisk konduktivitet.

Lerans bromsande inverkan på kloridinträngningen kan vara begränsad.

11 Referenser

Alshameri, A. *et al.* (2018) 'Adsorption of ammonium by different natural clay minerals: Characterization, kinetics and adsorption isotherms', *Applied Clay Science*, 159, pp. 83–93. doi:10.1016/j.clay.2017.11.007.

Boverket, (2022). Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder, EKS 12.

Frederiksen, J.M., Nilsson, L.-O., Poulsen, E., Sandberg, P., Tang L. & Andersen, A. (1997), HETEK, A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background, Vejdirektoratet, HETEK-Report No. 83, Köbenhavn, 1997

Ingemar Löfgren, Luping Tang, Jonas Magnusson. (2022) Transport of chlorides through clay layer into concrete, XXIV NCR Symposium 2022. [online] Tillgänglig på: [Magnusson_J_-_Transport_of_chlorides.pdf](#)

Nordtest, (1996). NT BUILD 208:1996 Concrete, Hardened: Chloride Content by Volhard Titration.

Nordtest, 1999. NT BUILD 492:1999 Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.

Svenska Betongföreningen, (2021). Betonghandboken Material. Del 2.

SIS, (1989), SS 81 11 03 Betongpålar med kvadratisk tvärsnitt – Fordringar

SIS, (2006). SS-EN 14630:2006 Produkter och system för skydd och reparation av betongkonstruktioner - Provning av betong - Karbonatiseringsdjup.

SIS, (2019a). SS-EN 12390-7:2019 Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete.

SIS, (2019b). SS-EN 13791:2019 Bedömning av tryckhållfasthet hos betong i konstruktioner och i prefabricerade betongelement.

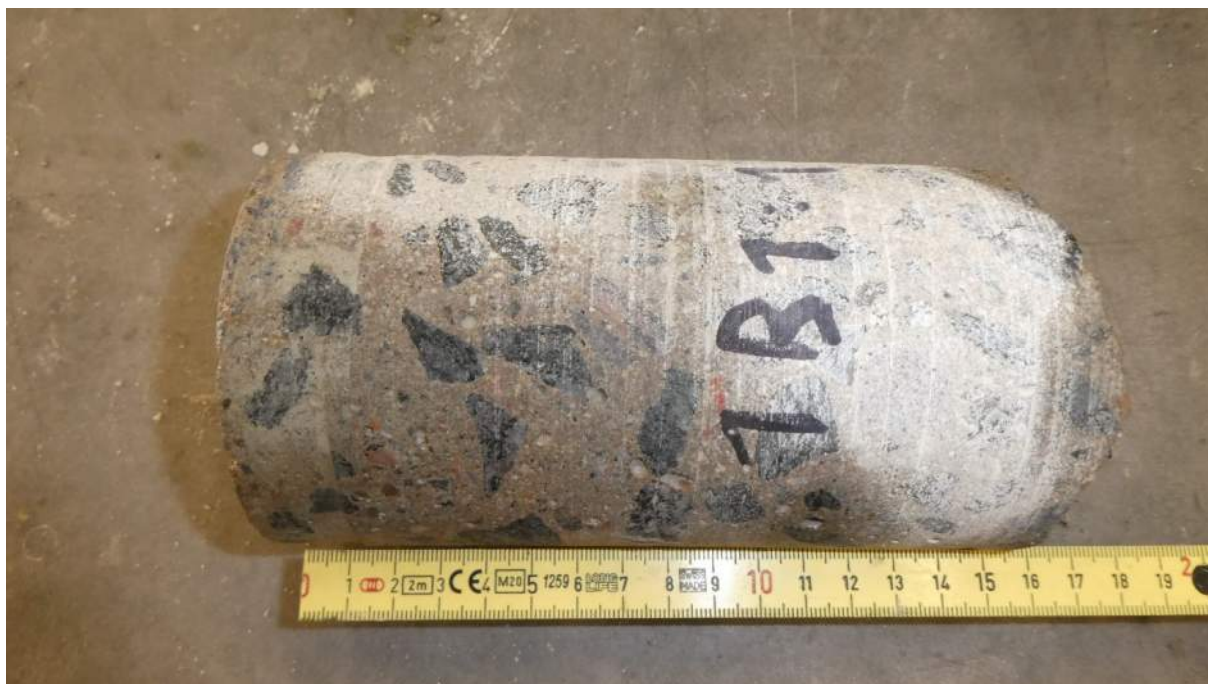
SIS, (2021). SS-EN 206:2013+A2:2021 Betong - Specifikation, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse.

Trafikverket, (2011). Trafikverkets föreskrifter om ändring i Vägverkets föreskrifter (VVFS 2004:43) om tillämpningen av europeiska beräkningsstandarder, TRVFS 2011:12.

Transportstyrelsen, (2022). Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av eurokoder, TSFS 2022:50.

Bilaga A - Foton på utborrade kärnor

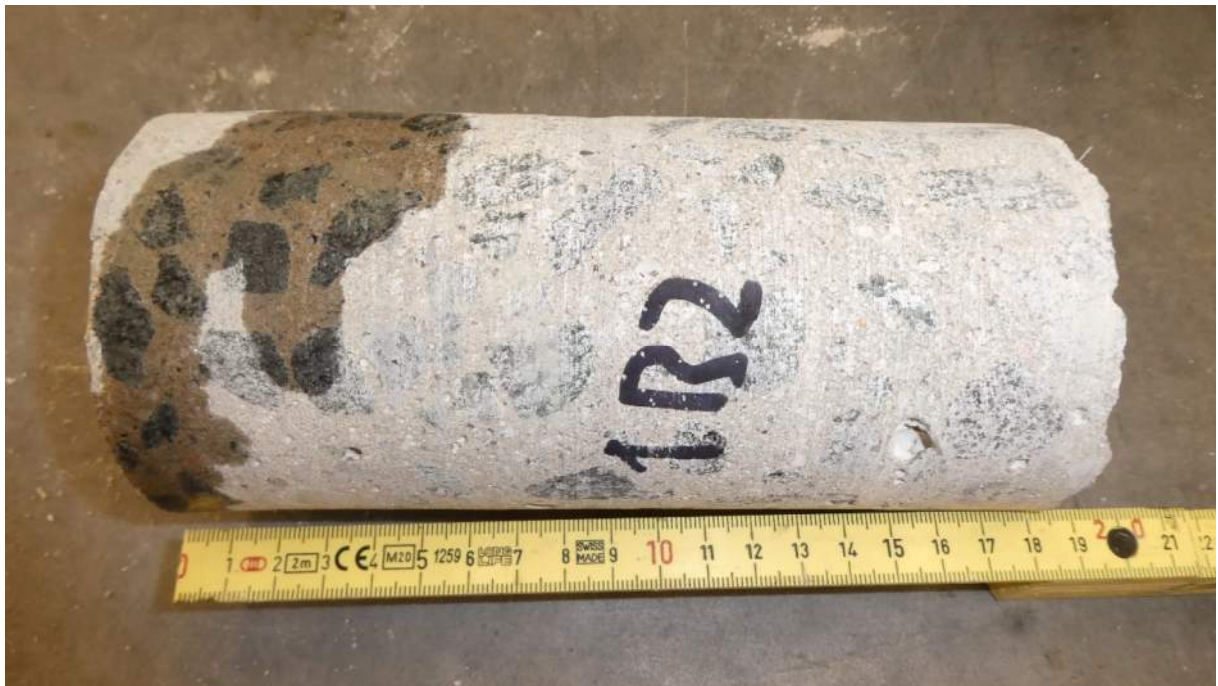
Foton på de utborrade kärnor finns i Figur A.1-Figur A.4 (kärnor utborrade från påle 1B), Figur A.5-Figur A.6 (kärnor utborrade från påle 1Ö) och Figur A.7-Figur A.10 (kärnor utborrade från påle 2B). Foton saknas på kärnorna 1 B3:2, 1 Ö2:2 och 2 B3:2.



Figur A.1. Foto på kärna 1B 1:1



Figur A.2. Foto på kärna 1B 1:2.



Figur A.3. Foto på kärna 1B 2.



Figur A.4. Foto på kärna 1B 3:1.



Figur A.5. Foto på kärna 1Ö 1.



Figur A.6. Foto på kärna 1 Ö 2:1



Figur A.7. Fotot på kärna 2 B 1:1.



Figur A.8. Foto på kärna 2B 1:2.



Figur A.9. Foto på kärna 2B 2.



Figur A.10. Foto på kärna 2B 3:1.

Bilaga B – Provningsrapport tryckhållfasthet

Provningsrapport för SS-EN 12390-3:2009/AC:2011 - Tryckhållfasthet

Sidan 1 av 1

Beställare NCC Sverige AB Jonas Magnusson C8003 19083 Rosersberg	Gjutningsdatum	Analys start 2021-07-05
	Ankomstdatum 2021-07-01	Analys slut 2021-07-08
	Typ av provobjekt Cyl d=84 mm	Antal provobjekt 2

Uppgifter om betongen lämnade av uppdragsgivaren eller dess ombud

Leverantör	Provtagningsplats Betongpålar från Centralen				
Entreprenör	Provtagare				
Objekt	Märkning 2B1:1, 2B2:1				
Betongtyp	Cementhalt Cementfabrikat				
Tillsatsmedel	Mängd i % / kg av cementhalten Produkt				
Börvärde	Uppmätt värde				
Konsistens (mm)	Lufthalt (%)	Konsistens (mm)	Lufthalt (%)	Betongtemperatur, uppmätt (°C)	VCT / VBT, börvärde
				Max stenstorlek (mm)	VCT / VBT, uppmätt värde

Provningsresultat

Märkning	Tryck- ålder (dygn)	h (mm)	d (mm)	h/d	Densitet (kg/m ³)	Brott- last (kN)	Hållfasthet (MPa)
2B1:1		84,9	84,3	1,01	2390	462,0	82,9
2B3:1		83,3	84,2	0,99	2380	443,3	79,6

Notering

Densitet är bestämd enligt SS-EN 12390-7.
Provkroppens dimensioner (tryckyta och volym) är uppmätt enligt SS-EN 12390-3 bilaga B.
Prov har lagrats minst 3 dygn i klimatrum, temperatur 20,0±2,0°C och RF 65±5%.
Original till Anders

Ort och datum

Göteborg 2021-07-09



Henric Nilsson, teknisk handläggare
Digital signatur

*Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg godkänt annat.
Resultaten avser endast provade objekt.*

B115 2020-09-10 Utvidgad mätosäkerhet SS-EN 12390-3: U=2u= ± 1,7 %, SS-EN 12390-7: U=2u= ± 10 kg/m³

Provningsrapport för SS-EN 12390-3:2009/AC:2011 - Tryckhållfasthet Sidan 1 av 1


Beställare NCC Sverige AB Jonas Magnusson C8003 19083 Rosersberg	Gjutningsdatum	Analys start 2021-07-05
	Ankomstdatum 2021-07-01	Analys slut 2021-07-08
	Typ av provobjekt Cyl d=84 mm	Antal provobjekt 3

Uppgifter om betongen lämnade av uppdragsgivaren eller dess ombud

Leverantör	Provtagningsplats Betongpålar från Centralen
Entreprenör	Provtagare
Objekt	Märkning 1B1:2, 1B3:1, 1Ö2:1
Betongtyp	Cementhalt Cementfabrikat
Tillsatsmedel	Mängd i % / kg av cementhalten Produkt
Börvärde	Uppmätt värde
Konsistens (mm)	Lufthalt (%)
Konsistens (mm)	Lufthalt (%)
	Betongtemperatur, uppmätt (°C)
	Max stenstorlek (mm)
	VCT / VBT, börvärde
	VCT / VBT, uppmätt värde

Provningsresultat

Märkning	Tryck- ålder (dygn)	h (mm)	d (mm)	h/d	Densitet (kg/m ³)	Brott- last (kN)	Hållfasthet (MPa)
1B1:3		83,8	84,3	1,00	2400	434,8	78,0
1B3:1		83,7	84,3	0,99	2540	477,4	85,6
1Ö2:1		85,0	84,1	1,01	2370	445,0	80,0

<p>Notering</p> <p>Densitet är bestämd enligt SS-EN 12390-7. Provkroppens dimensioner (tryckyta och volym) är uppmätt enligt SS-EN 12390-3 bilaga B. Prov har lagrats minst 3 dygn i klimatrum, temperatur 20,0±2,0°C och RF 65±5%. Original till Anders 1B3:1: Ett armeringsjärn ej genomgående d= 12 mm, 18 mm från övre tryckyta.</p>	<p>Ort och datum Göteborg 2021-07-09</p>  <p>Henric Nilsson, teknisk handläggare Digital signatur</p>
--	--

*Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg godkänt annat.
Resultaten avser endast provade objekt.*

B115 2020-09-10 Utvidgad mätosäkerhet SS-EN 12390-3: U=2u= ± 1,7 %, SS-EN 12390-7: U=2u= ± 10 kg/m³

Bilaga C – Provningsrapport karbonatiseringsdjup

Beställare
NCC Anläggningskonstruktion
Jonas Magnusson

Projektnummer
2021-2372

Datum
2021-07-06

Provning av hårdnad betong- Bestämning av Karbonatiseringsdjup


Uppdragsgivare: NCC Anläggningskonstruktion AB
Provobjekt: 6 st cylindrar ($d= 84$ mm)
Ankomstdatum: 2021-07-01
Märkning: 1 B1:1, 1 B2, 1 Ö1, 2 B1:2, 2 B2, 2 B3:2
Provtagningsplats: Betongpålar från Nils Ericssonsterminalen
Provningsmetoder: Karbonatiseringsdjup enligt SS-EN 14630:2006.
Provningsdatum/Tid: 2021-07-06 kl. 10:45
Plats för provning: C-lab

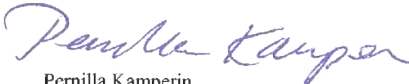
Resultat

Provets märkning	Mätpunkt	Karbonatiseringsdjupets maxvärde (mm)	Karbonatiseringsdjupets medelvärde (mm)
1 B1:1	Från yta-in	<1	<1
1 B2	Från yta-in	<1	<1
1 Ö1	Från yta-in	<1	<1
2 B1:2	Från yta-in	6	5
2 B2	Från yta-in	5	4
2 B3:2	Från yta-in	<1	<1

Anm. Avsteg från standarden i val av indikator. Indikatorns sammansättning: 1 g thymolphthalein upplöst i 80 g etanol (96 %) och spädd med 20 g avjoniserat vatten.

Thomas Concrete Group AB
C-lab


Anders Lindvall
(teknisk handläggare)


Pernilla Kamperin
(tekniskt ansvarig)

B117 2018-03-14 Utvidgad mätosäkerhet $U = 2u = \pm 1$ mm

*Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.
Resultaten avser endast provade objekt.*

THOMAS CONCRETE GROUP AB
C-lab
Ringögatan 14
417 07 GÖTEBORG

Besöksadress
Ringögatan 14

Tel: 0104-50 51 00
Fax: 0104-50 51 01
www.c-lab.se

Bankgiro: 857-6597
Postgiro: 215331-0
Org.nr: 556062-2812

Bilaga D - Provningsrapport klorider

Beställare
NCC Anläggningskonstruktion
Jonas Magnusson

Projektnummer
2021-2371

Datum
2021-07-09

Bestämning av Kloridhalt i hårdnad betong

Provföremål

7 kärnor

Märkning

1 B:1, 1 B2, 1 Ö1, 1 Ö2:2, 2 B1:2, 2 B2 samt 2 B3:2

Provtagningsplats

Betongpålar från Nils Ericssonsterminalen.

Ankomstdatum

2021-07-01

Provningsdatum

2021-07-08

Provningsmetod

Kloridhalten har bestämts enligt C.lab Metod 1 (Rapid Chloride Test). Kloridhalten redovisas som kloridjonhalt i procent av betongprovets vikt. Om cementmängden i provet är känd kan den uppmätta kloridhalten räknas till kloridjonhalt i procent av cementets vikt. Cementmängden kan antas beroende på betongkvaliteten. I de fall då delproven består av betongkärnor med diametern mindre än 3,5 gånger ballastens största storlek, kan lokala variationer i betongen resultera i att delprov innehåller en cementmängd som väsentligt skiljer sig från den antagna.

*Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.
Resultaten avser endast provade objekt.*

Provningsresultat

Märkning Prov	Mätdjup [mm]	Uppmätt CI i % av provvikt	Utvidgad mätosäkerhet CI i % av provvikt	Uppskattad CI- i % av cementets vikt*
				vct=0,45
1 B1:1 5-15	5-15	0,474	0,097	3,0
1 B1:1 25-35	25-35	0,434	0,089	2,7
1 B1:1 45-55	45-55	0,303	0,062	1,9
1 B2 5-15	5-15	0,488	0,100	3,0
1 B2 25-35	25-35	0,328	0,067	2,1
1 B2 45-55	45-55	0,180	0,037	1,1
1 Ö1 5-15	5-15	0,265	0,054	1,7
1 Ö1 25-35	25-35	0,196	0,040	1,2
1 Ö1 45-55	45-55	0,166	0,034	1,0
1 Ö2:2 5-15	5-15	0,151	0,031	0,9
1 Ö2:2 25-35	25-35	0,033	0,016	0,2
1 ö2:2 45-55	45-55	0,019	0,012	0,1
2 B1:2 5-15	5-15	0,625	0,128	3,9
2 B1:2 25-35	25-35	0,436	0,089	2,7
2 B1:2 45-55	45-55	0,343	0,070	2,1
2 B2 5-15	5-15	0,517	0,106	3,2
2 B2 25-35	25-35	0,430	0,088	2,7
2 B2 45-55	45-55	0,451	0,092	2,8
2 B3:2 5-15	5-15	0,314	0,064	2,0
2 B3:2 25-35	25-35	0,258	0,053	1,6
2 B3:2 45-55	45-55	0,270	0,055	1,7

* Antagen cementhalt ca 16 vikt% (vct=0,45).

Thomas Concrete Group AB

C-lab



Anders Lindvall
Teknisk Handläggare



Henric Nilsson
Tekniskt Ansvarig

B125 2016-11-07

*Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.
Resultaten avser endast provade objekt.*

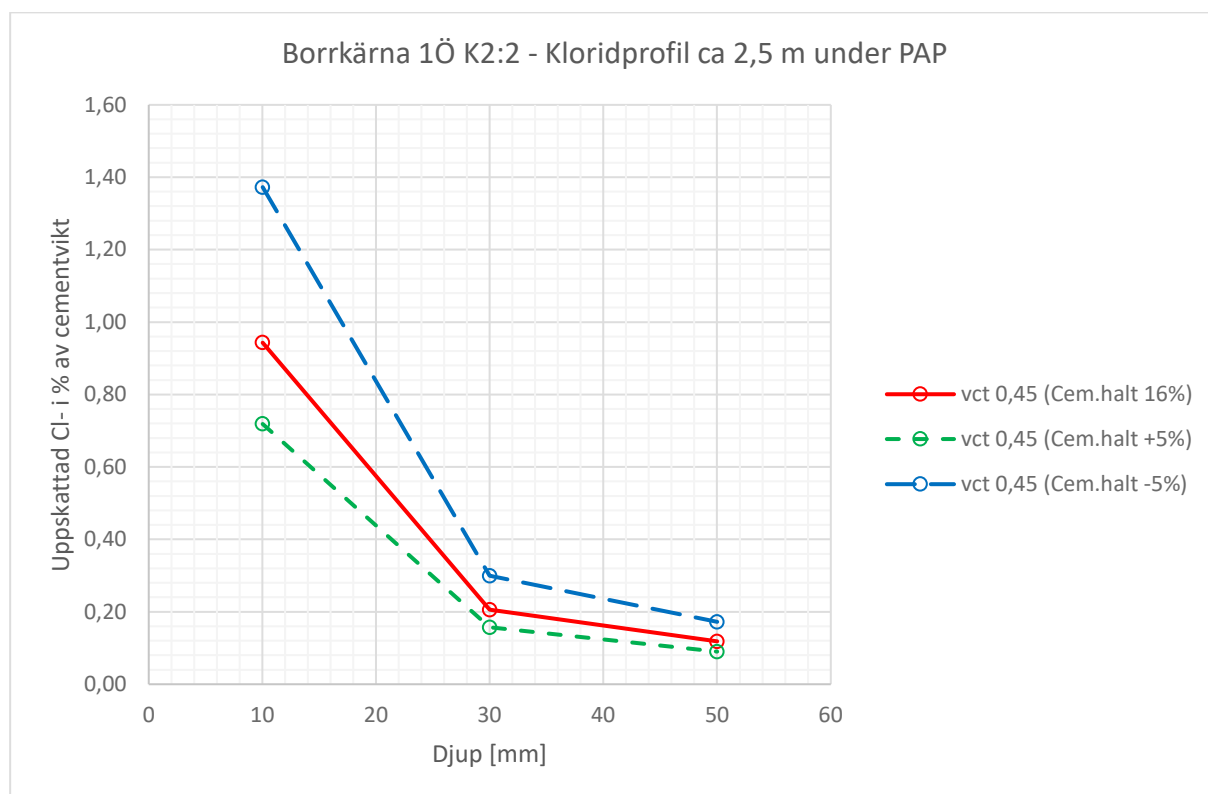
THOMAS CONCRETE GROUP AB
C-lab
Ringögatan 14
417 07 GÖTEBORG

Besöksadress
Ringögatan 14

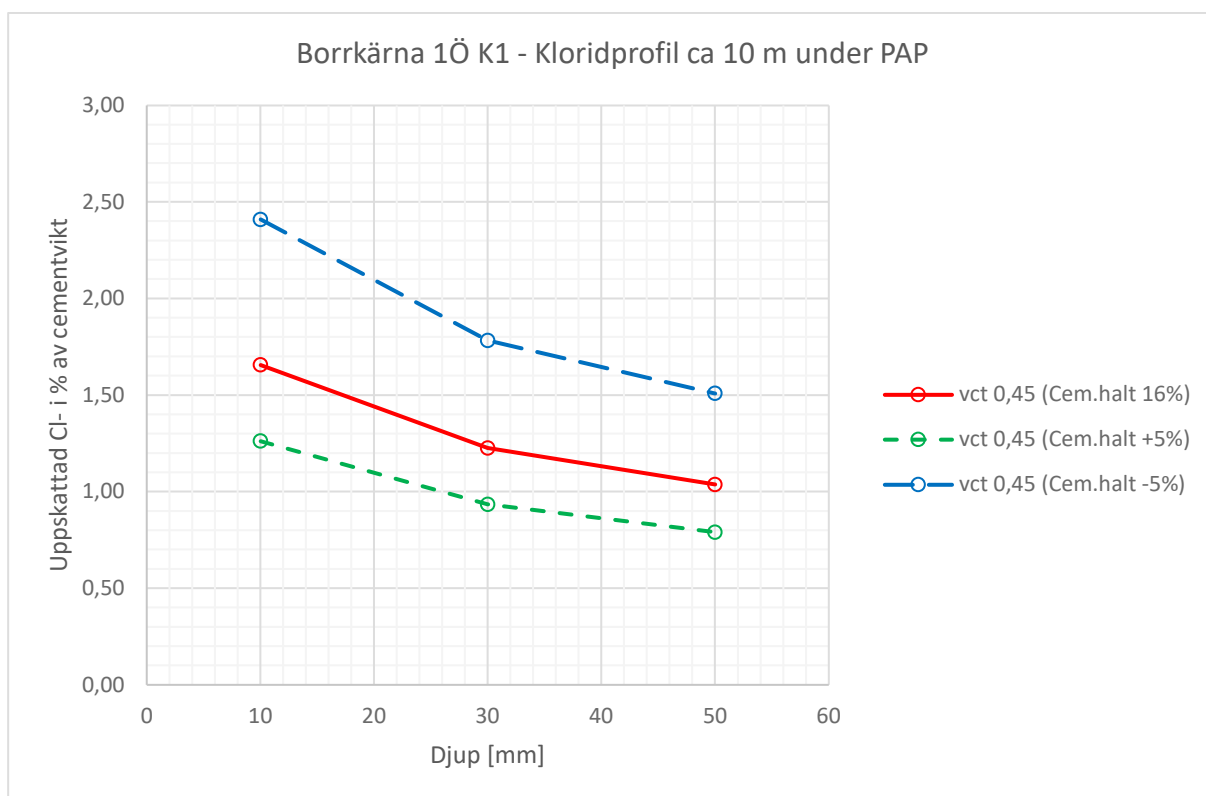
Tel: 0104-50 51 00
Fax: 0104-50 51 01
www.c-lab.se

Bankgiro: 857-6597
Postgiro: 215331-0
Org.nr: 556062-2812

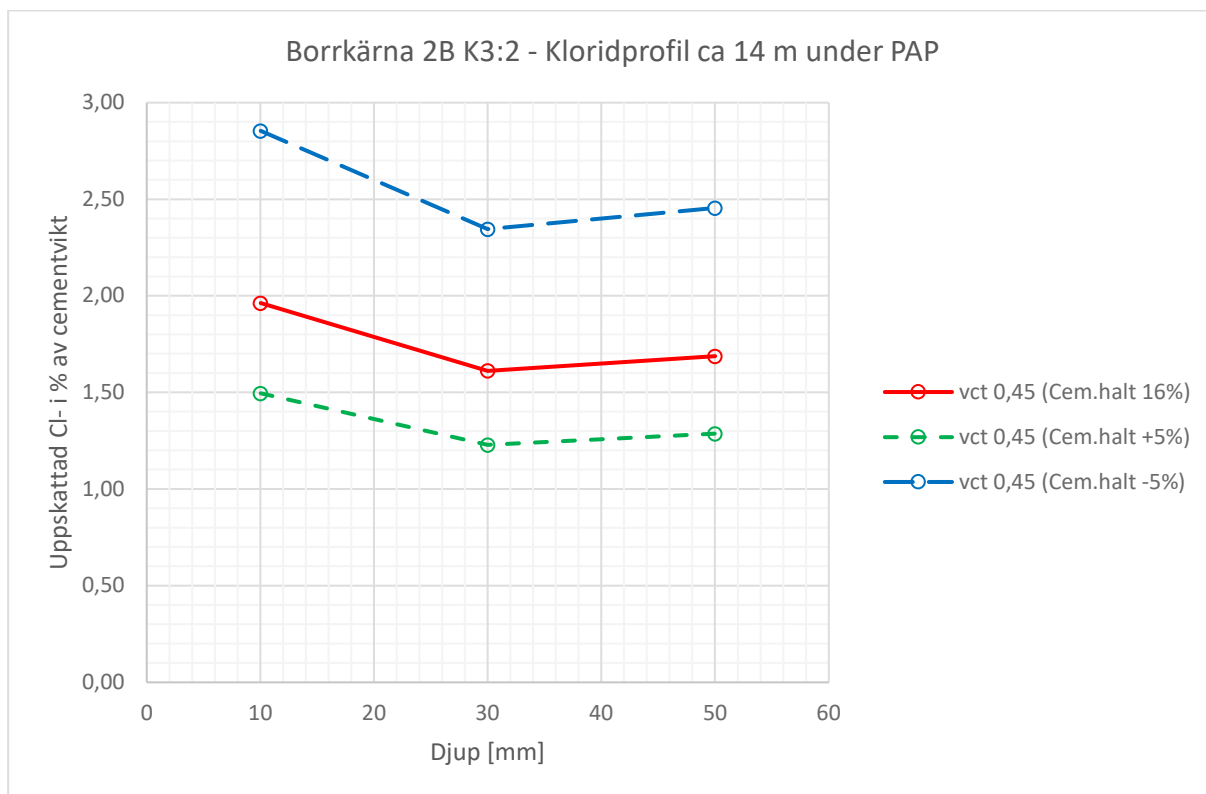
Bilaga E – Kloridprofiler inklusive möjligt spridningsintervall



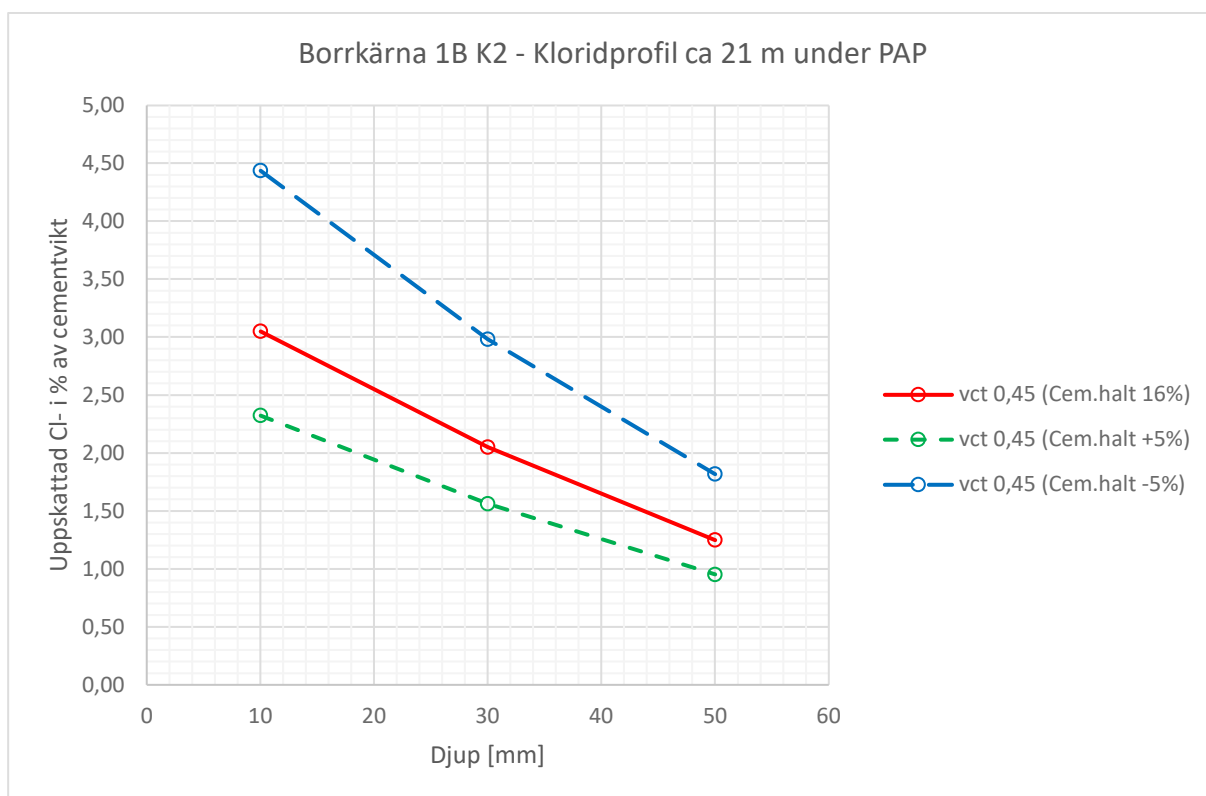
Figur E.1. Kloridhalter som har uppmätts i borrkärnan 1Ö K2:2 (ca 2,5 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.



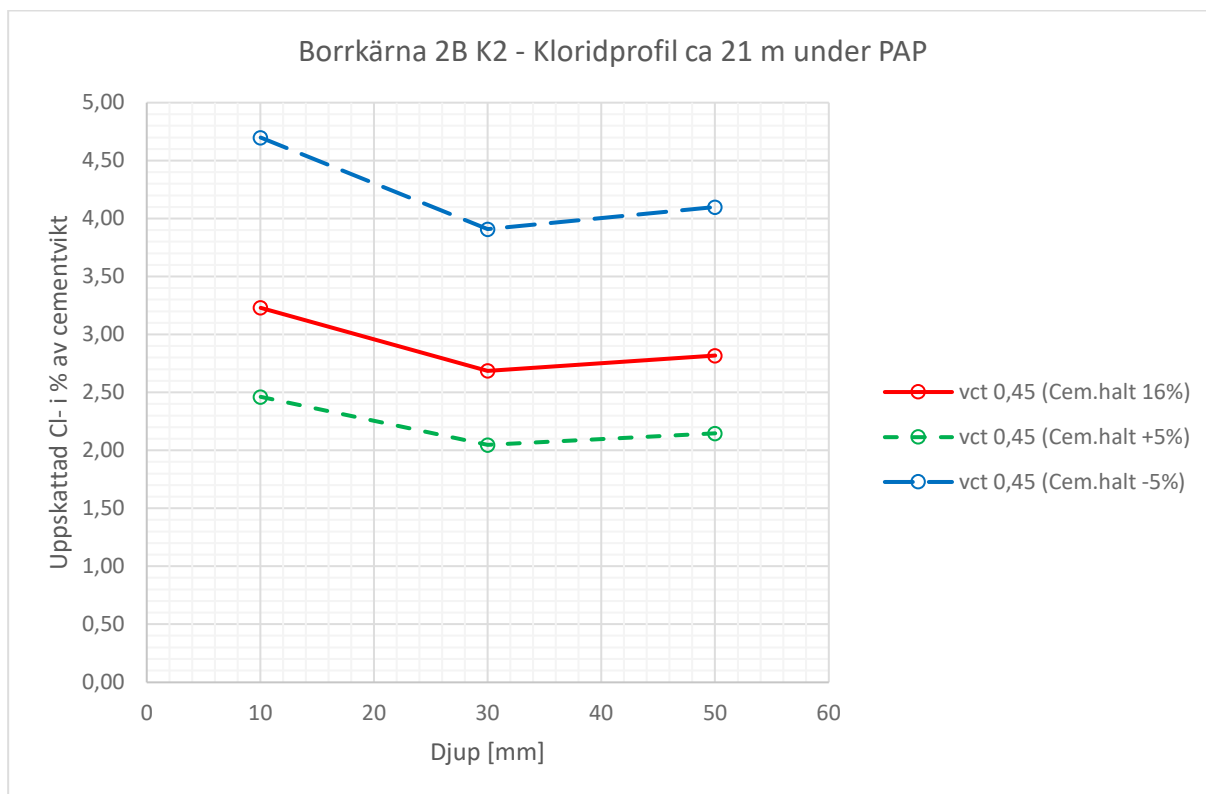
Figur E.2. Kloridhalter som har uppmätts i borrkärnan 1Ö K1 (ca 10 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.



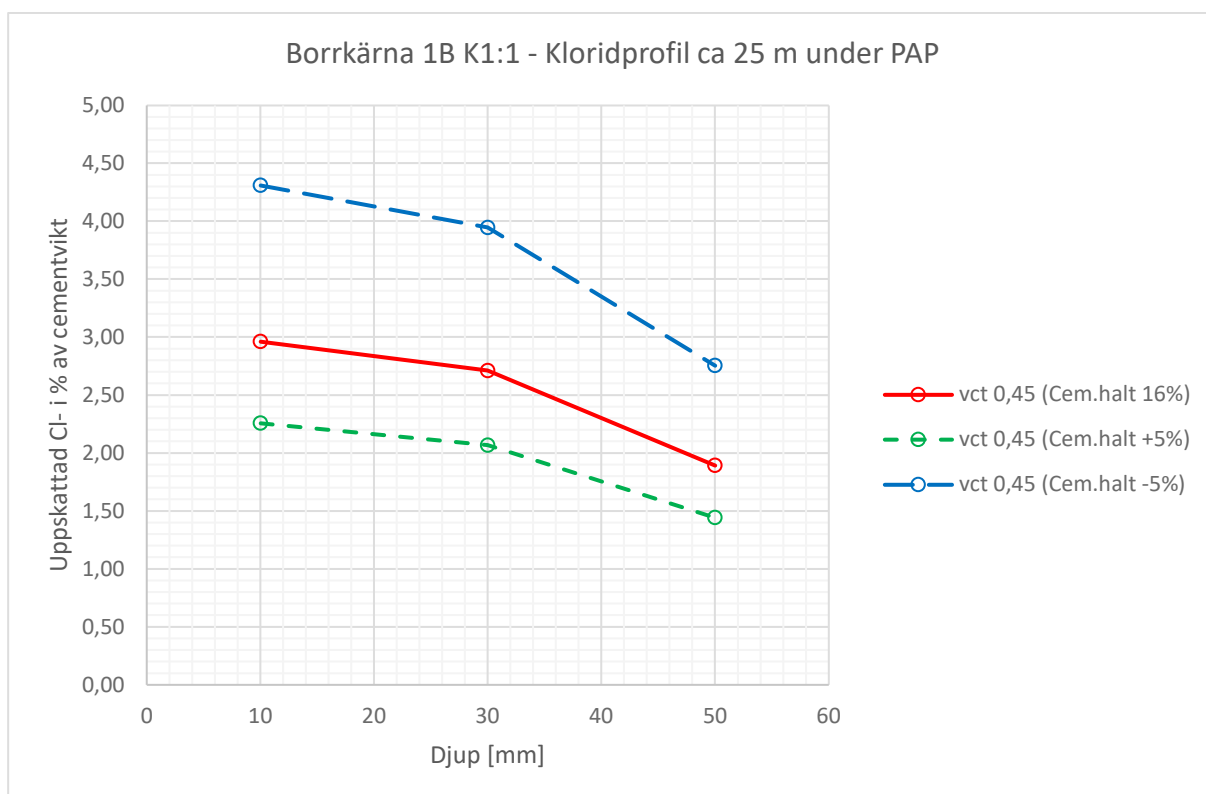
Figur E.3. Kloridhalter som har uppmätts i borrkärnan 2B K3:2 (ca 14 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.



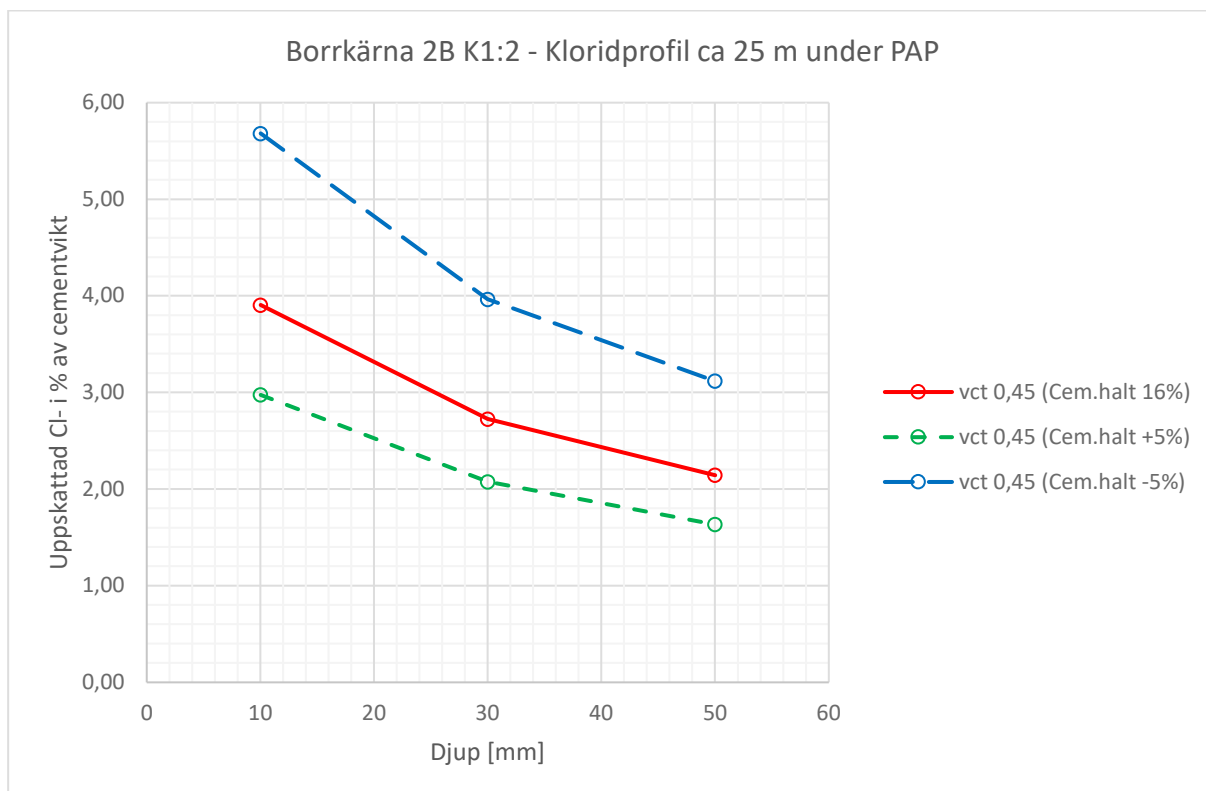
Figur E.4. Kloridhalter som har uppmätts i borrkärnan 1B K2 (ca 21 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.



Figur E.5. Kloridhalter som har uppmätts i borrkärnan 1B K2 (ca 21 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.



Figur E.6. Kloridhalter som har uppmätts i borrkärnan 1B K1:1 (ca 25 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.



Figur E.7. Kloridhalter som har uppmätts i borrkärnan 2B K1:2 (ca 25 m under PAP) inklusive möjligt spridningsintervall.

Bilaga F –Betonganalys av påle (Mikroskopi)



Uppdrag: Betonganalys SBUF
Uppdragsnummer: 30026519-063
Kund: Thomas Concrete Group AB – C-lab och NCC Infrastructure
Datum: 2023-06-29
Upprättad av: Birgit Fredrich

1 Inledning

På uppdrag av Thomas Concrete Group AB – C-lab och NCC Infrastructure analyserades ett tunnslip från en påle inom ett SBUF projekt. Tunnslipet är tillverkat på Vattenfalls laboratorier i Älvkarleby. Provet har märkts Kärna 1 32:2.

1.1 Syfte

Undersökningen är gjord i syfte att fastställa betongens tillstånd. Slutsatser gäller endast för de undersökta proverna. Författaren av detta dokument har ingen kännedom om var proverna är tagna.

1.2 Metod – tunnslip

Vid en tunnslipsanalys analyseras en ca 25 µm tjock betongskiva med ett polarisationsmikroskop. I detta så kallade tunnslip studeras komponenter vilka bygger upp betongen. Analysen ger information om potentiella förändringar i cementpastan (kemiska angrepp, reaktiva ballastpartiklar, urlakning, karbonatisering, brandskador m.m.) och deras effekter på betongens beständighet. Tunnslipet är impregnerat med fluorescerande epoxi för att möjliggöra uppskattning av vct samt kontrollera cementpastans täthet och sprickor.

Uppskattning av vct-ekvivalent gjordes med hjälp av referenstunnslip tillverkade av betong med byggcement och olika vct (0,35–0,70 med intervall på 0,05). Vct-ekvivalenten är ett mått på nuvarande kapillärporositet i betongens bindemedel. Uppskattningens noggrannhet är +/- 0,05. Metoden tar inte hänsyn till betongens ålder eller eventuell förekomst av hydrauliska tillsatsmedel som till exempel silikastoft.

2 Resultat

2.1 Tunnslipsanalys

Resultaten från analyserna redovisas i tabell 1 och 2. Bilder av tunnslipen visas i figur 1.

Provet yta är något ojämn.

Antalet sprickor (mikro- och vidhäftningssprickor samt fina sprickor) är något förhöjt i provet. Det finns ett spricksystem av huvudsakligen ytparallella sprickor på ett djup av cirka 4 mm. Sprickorna i resten av provet uppvisar huvudsakligen en svag radiell struktur. Mängden potentiellt reaktiva ballastpartiklar uppskattas till cirka 3–5 %. Lufthalten beräknades till 2,2 %. Luftporer mellan 0–37 mm är fyllda med en blandning av kalcit, portlandit och ettringit. Det finns luftporer som enbart är fyllda med ettringit, se figur 2. Cementpastan visar tecken på urlakning till ett djup på 9 mm. Cementpastan är något karbonatiserad till ett djup på 1 mm och längs med ytparallella sprickorna på 4–8 mm djup. Vct-ekvivalent bedöms vara 0,35 ($\pm 0,05$).

Tabell 1: Analysprotokoll, prov kärna 1 32:2.

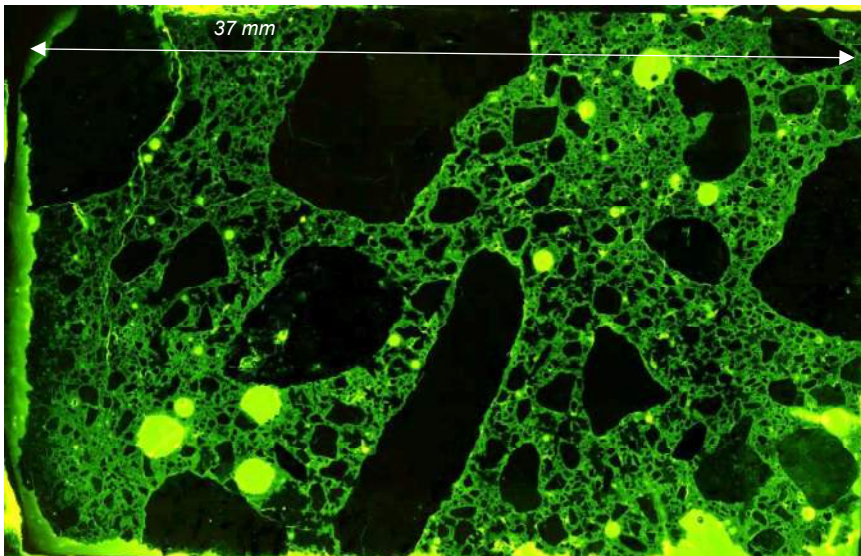
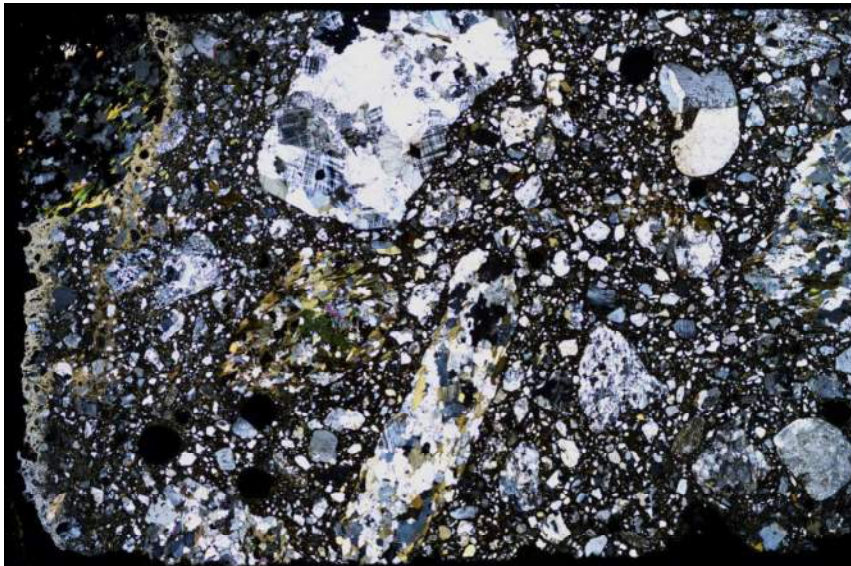
Projekt#	30026519-063
Datum	01.06.2023
Prov-id	Kärna 1 32:2
Ballast	
Sten (> 2mm)	Granitisk gnejs delvis biotitförande, granodioritisk gnejs
Sand (≤2 mm)	Kvarts, fältspat, glimmer, fragment av gnejs, kvartsit, glimmer-skiffer
Övrigt	Kalkfiller
Kornform	Blandning av kubisk rundade och kubisk kantiga korn
Potentiell reaktiv	Kvartsit, glimmer-skiffer
Antal reaktiv ballast	3–5 %
Sprickor	
Sprickor som är vinkelräta mot ytan	Inga, vid ytan, några i hela provet
Sprickor som är ytparallella	Spricksystem med fina sprickor och mikrosprickor i första 4 mm, annars bara några enstaka mikrosprickor
Vidhäftningssprickor	Några
Max. sprickbredd på djup 0–5 mm	0,03 mm
Sprickor; kvantitativ analys	Antal sprickor/mm² Medelvärde över hela provet
Mikrosprickor, ytparallella	0,7
Mikrosprickor, vinkelrät mot ytan	0,5
Fina och grova sprickor, ytparallella	0,02
Fina och grova sprickor, vinkelrät mot ytan	0,04
Vidhäftningssprickor	0,4
Por- och sprickfyllningar	
Pastasprickor	Lite kalcit
Vidhäftningssprickor	Lite kalcit
Helt fyllda porer	Portlandit, ettringit, kalcit
Delvis fyllda porer	Portlandit, ettringit, kalcit
Lufthalt	2,2%
Vct-ekvivalent	Cirka 0,35
Karbonatiseringsdjup	1 mm, samt längs med ytparallella sprickor (4–8 mm)
Kommentar	Tecken på urlakning: 0–9 mm
	Ytan är något eroderad

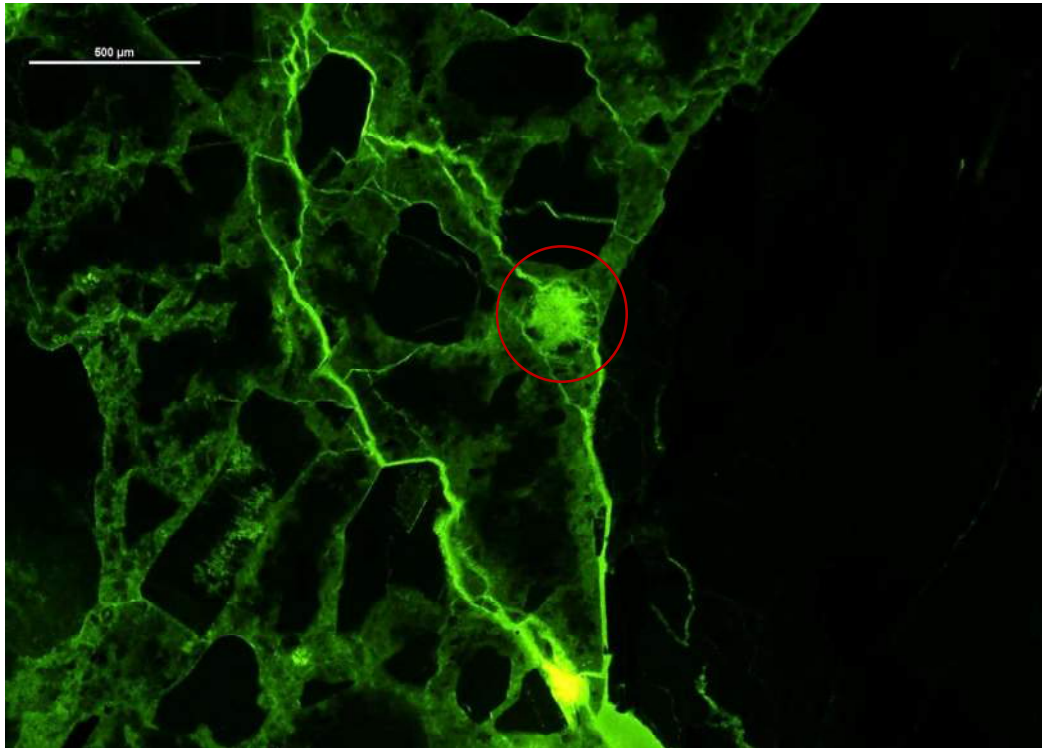
Tabell 2: Analysprotokoll av sprickfrekvensberäkning, prov kärna 1 32:2.

Nivå i provet		4 mm	15 mm	35 mm
		Antal sprickor/mm ²	Antal sprickor/mm ²	Antal sprickor/mm ²
Mikrosprickor <0,01 mm	Ytparallella sprickor	1,17	0,25	0,50
	Vinkelräta sprickor	0,33	0,25	0,42
Fina och grova sprickor >0,01 mm	Fina ytparallella sprickor	0,08	0,00	0,00
	Fina vinkelräta sprickor	0,17	0,00	0,00
	Vidhäftningssprickor	0,67	0,21	0,29
	Summa	2,42	0,71	1,21

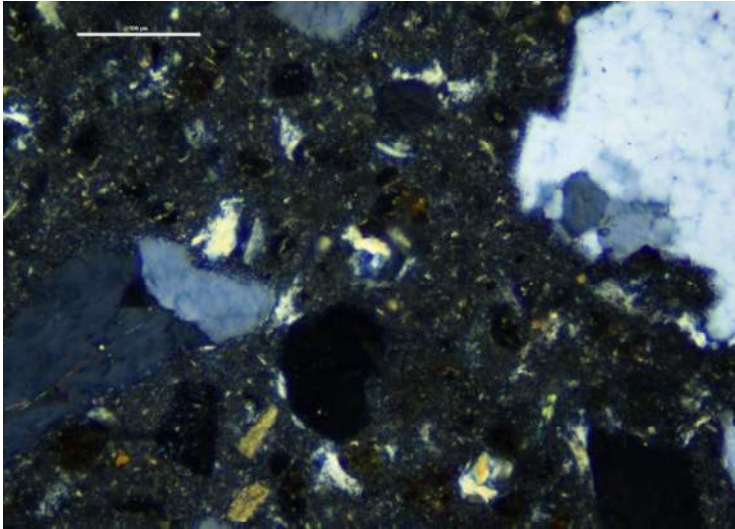


Figur 1 Bilden visar tunnslipsprov kärna 1 32:2 i planpolariserat ljus (övre bild: ballasten syns i vit-grå, luftporerna i gul och cementpastan i brunaktig färg), i korspolariserat ljus (mitten) och i fluorescensljus (nedre bild: sprickor och luftporer syns i ljusare grön färg). Betongytan är till vänster i bilden.

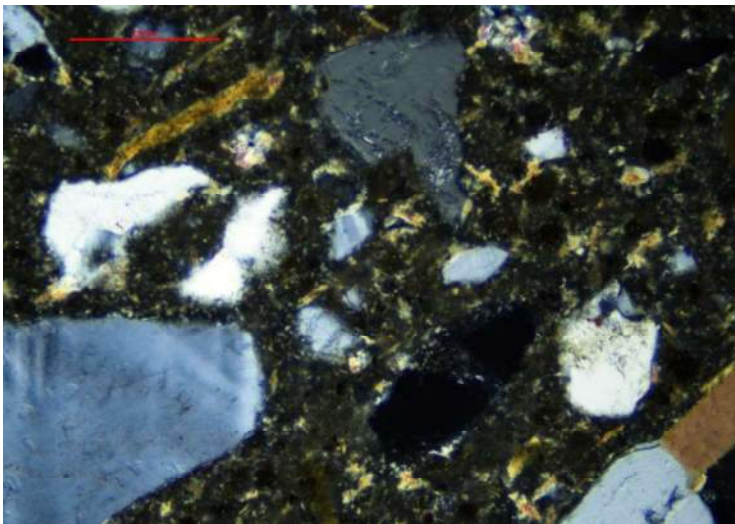




Figur 2 Bilden visar en del av spricksystemet med en ettringitfylld luftpor (röd ring). Bilden är tagen i fluorescensljus. Sprickor och luftporer syns i ljusare grön färg.



Figur 3 Bilderna visar tecken på urlakning i cementpastan på ett djup på cirka 2 mm (övre bild) och frisk cementpasta (nedre bild) på ett djup på cirka 30 mm. Bilderna är tagna i korspolariserat ljus.



3 Slutsats

Resultaten visar att antalet sprickor (mikro- och vidhäftningssprickor samt fina sprickor) är något förhöjt i provet. Det finns ett spricksystem av ytparallella sprickor vid ytan (cirka 4 mm inåt) av provet. Sprickorna i resten av provet uppvisar svaga tecken på expansion. Antalet sprickor är dock inte så högt att betongens hållfasthet bedöms ha påverkats signifikant av sprickbildningen i det undersökta provet. Sprickorna som förekommer är mestadels icke-plastiska.

Cementpastan i provet visar tecken på urlakning till ett djup på 9 mm samt är något karbonatiserad till ett djup på cirka 1 mm. Cementpastan kring spricksystemet vid ett djup på cirka 4–8 mm är också karbonatiserad. Detta betyder att pH-värdet i cementpastans porlösningar samt att betongens hållfasthet troligen är sänkt och betongens armeringsskyddande egenskaper är försämrade i dessa områden (0–9 mm).

Lufthalten beräknades till 2,2 %. Betongen i provet kan därmed ha begränsad frostbeständighet. Sprickbildning på grund av frostangrepp kan förväntas om betongen är utsatt för utomhusmiljö. Vct-ekvivalent bedöms vara 0,35 ($\pm 0,05$). Betongen innehåller kalkfiller. Inga tillsatsmaterial som till exempel flygaska observerades. Några ferrit-klinker observerades i betongen. Antalet ferrit är dock troligen inte så högt att betongen kan betraktas som sulfatresistent.

Mängden potentiellt alkalireaktiva ballastpartiklar uppskattas till cirka 3–5 % i det undersökta provet. De uppskattade halterna ligger under gränsvärdet enligt SS 137003:2021.

Sprickmönstret och förekomst av ettringit i luftporer tyder på begynnande sulfatangrepp.



Birgit Fredrich
Betongpetrograf, Geolog M.Sc.



Gabriel Johansson
Skadetredare Betongkonstruktioner, M.Sc