

## DATORTOMOGRAFI SOM UNDERSÖKNINGS- METOD FÖR UNG OCH GAMMAL, SPRUTAD OCH GJUTEN BETONG FÖR TUNNLAR



Anders Ansell  
Lamis Ahmed  
Alvaro Guarin



# **DATORTOMOGRAFI SOM UNDERSÖKNINGSMETOD FÖR UNG OCH GAMMAL, SPRUTAD OCH GJUTEN BETONG FÖR TUNNLAR**

**Computed tomography as investigation method  
for young and old, sprayed and cast concrete for  
tunnels**

Anders Ansell, KTH

Lamis Ahmed, KTH

Alvaro Guarin, KTH



# Förord

Föreliggande rapport sammanfattar resultaten från ett pilotprojekt med datortomografi som undersökningsmetod för betong. Projektet som genomfördes under första halvåret 2016 fokuserade på ung och gammal, sprutad och gjuten betong för tunnlar. Den tomografiutrustning som har använts är ett avancerat system som integrerar apparatur för röntgenbestrålning och bilddetektering med en kraftfull beräkningsdator för numerisk bildbehandling. Ett system för mekanisk tryck- eller dragbelastning samt en temperaturkammare för provkroppar ingår också. Utrustningen är stationerad i laboratoriet hos KTH Bygghälsa och har i detta projekt tagits i anspråk av avdelningen för Betongbyggnad. Erfarenheter finns från att undersöka asfaltmaterial och pilotprojektets syfte har här varit att inhämta erfarenheter även från analys av betongprovkroppar, typiskt gjutna cylindrar av normalstorlek och borrkärnor från tunnlar. Den dominerande fördelen är att de studerade provkropparna förblir intakta under undersökningen och ger en bild av den inre materialstrukturen hos de studerade volymerna vilka sedan kan studeras och analyseras virtuellt. Detta kan också kombineras med förstörande provning för att bestämma materialhållfastheter och även samtidigt studera spricktillväxt och förändringar i porsystem och inre struktur. Undersökningsmetoden har utvärderats för att inom en relativ snar framtid kunna användas standardmässigt som en oförstörande provningsmetod vid framtagning av nya, optimerade betongtyper och vid utredning av skadade och nedbrutna betongkonstruktioner i bruksstadiet.

Vid KTH Bygghälsa har projektet letts av Professor Anders Ansell, tomografiutrustningen har manövrerats av Tekn. Dr Alvaro Guarin och den numeriska analysen av tomografidata har genomförts av Tekn. Dr Lamis Ahmed. Utvärdering och presentation av resultaten har genomförts gemensamt av forskargruppen som till stöd har haft en referensgrupp för diskussioner och granskning bestående av Annika Gram (CBI), Iad Saleh (NCC), Lars Elof Bryne (Vattenfall), Martin Hansson (Sika Sverige), Tommy Ellison (Besab), och Per Tengborg (BeFo). Vidare har projektet fått hjälp av Erik Nordström (Sweco) och Per-Erik Thorsell hos Vattenfall i Älvkarleby som bidragit med borrkärnor av sprutbetong till undersökningen.

Projektet finansierades av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) samt genom egeninsatser från KTH.

Stockholm, 2016

*Per Tengborg*



# Sammanfattning

Sprutad och gjuten betong är ett av de viktigaste konstruktionsmaterialen vid byggande av tunnlar och undermarkskonstruktioner i hårt berg. Möjligheter att optimera betongens sammansättning för användning vid effektivt bergbyggande är beroende av kunskap om beskaffenheten inne i betongmaterialet, det vill säga materialets struktur och fördelning av ballast, luftporsystem och eventuella tillsatta stålfibrer, alternativt syntetiska fibrer. De undersökningsmetoder som idag används för uttagna eller särskilt gjutna provkroppar är oftast av typen förstörande provning samt sågning och mikroskopering vilket är tidskrävande och dessutom innebär att provkroppen sönderdelas vilket omöjliggör fortsatt undersökning. Nya möjligheter finns nu genom att använda datortomografering, till exempel med den typ av utrustning som nu finns hos KTH Bygghälsa. Utrustningen är ett avancerat system som integrerar utrustning för röntgenstrålning och bilddetektering med ett datoriserat visualiseringssystem som kan återge en tredimensionell virtuell genomsynlig modell av det studerade objektet. Systemet innehåller också en MTS utrustning för drag- och tryckprovning samt en klimatkammare. Högupplöst industriell datortomografi skiljer sig från medicinska skanningsmetoder genom att högre röntgenstrålning med högre energi och mer genomslagskraft används varvid detaljer ned till några tiotals mikrometer i storlek kan återges, även när föremål av material med hög densitet studeras.

En laborativ pilotstudie har nu genomförts med syfte att beskriva teknikens möjligheter och begränsningar samt arbetsgång och rutiner vid undersökning. Med exempel demonstreras hur metoden tillämpas vid undersökning av gjutna betongcylindrar och utborrade provkärnor av sprutbetong, med fokus på att hitta praktiska rutiner för undersökning och analys för att erhålla kvantitativ och kvalitativ data. En litteraturstudie som sammanfattar tidigare forskning på området ingår. Sammanställningen visar att mycket få genomförda undersökningar är inriktade på möjligheterna att analysera laboratorieprov av normalstorlek och betongkärnor borrade direkt ur befintliga konstruktioner. Detta är således unikt med den studie som här redovisas, sammantaget med att fokus ligger på att studera betong av den typ som används vid anläggningsbyggande i berg och vid tunnelkonstruktion, och särskilt då sprutbetong där inga publicerade undersökningar har hittats. De tidigare studierna omfattar projekt där datortomografi kombineras med tryckbelastning, triaxiellt, dynamiskt och cykliskt samt i form av spräckbelastning. Det har också genomförts studier av hålligheter, porsystem och fördelning av luftporer, som är av särskilt intresse ur ett beständighets-perspektiv eftersom detta påverkar genomsläppligheten av vatten och risken för frostsador. En annan självklart viktig inriktning är studier av fördelning och orientering av stålfibrer i betongen.

Med kunskap om den inre materialstrukturen kan betongmaterial optimeras för användning vid bergbyggande, för att ge kostnadseffektiva, uthålliga och säkra tunnlar och berggrum. Pilotstudien visar att det redan i det här tidiga skedet av metodutvecklingen går att genomföra praktisk analys av betongprovkroppar med den typ av datortomografiutrustning som finns hos KTH Bygghälsa. Resultaten från tomograferingen kan analyseras och presenteras i form av kvalitativ och kvantitativ utvärdering av provkroppar, från laboratorium eller fältmiljö. De kvantitativa data som kan beräknas är främst fördelningar av cementpasta, ballast, stålfibrer och luftporer i en studerad provkropp. Förslag på hur redovisning av standardiserat genomförda laboratorieundersökningar kan göras i protokollform ges. Baserat på utvärderingen av metoden rekommenderas att den etableras som en metod att användas

standardmässigt för oförstörande provning vid framtagning av nya, optimerade betongtyper och vid utredning av skadade och nedbrutna betongkonstruktioner i tunnlar och bergrum. En vidareutveckling och etablering av metoden är beroende av att underlag för jämförelser finns och det rekommenderas därför att översiktsdata presenterat på ett standardiserat sätt systematiskt tas fram för större byggprojekt och samlas i en öppen databas för att möjliggöra jämförelser. De exempel som redovisas demonstrerar att tekniken och utrustningen har stor potential för framtida arbete med att skräddarsy material för bergbyggande och det även bör vara möjligt att genom regelbunden provtagning och analys följa nedbrytning av betongmaterial i fält.

**Nyckelord:** Datortomografering, Oförstörande undersökning, Betong, Sprutbetong, Stålfibrer, Borrkärnor, Gjutna provkroppar.



# Summary

Cast and sprayed concrete is one of the most important construction materials for tunnels and underground structures in hard rock. Possibilities for optimization of the concrete composition for use in efficient rock construction depends on knowledge of the properties inside the concrete material, i.e. the material structure and distribution of aggregates, air voids and also possible added steel fibres, or synthetic fibres. The investigation methods used today for in situ samples or standard cast test specimens are usually destructive methods, such as slicing/sawing followed by microscopy. This is time consuming and also leads to that the studied specimen is destroyed, preventing further investigations. New possibilities now exist in using computed tomography (CT), for example with the type of equipment now available at the KTH Civil and Architectural Engineering laboratory. The equipment is an advanced system integrating equipment for X-ray scanning and image detection with a computerized visualization system that can reproduce a three-dimensional virtual, transparent model of the studied object. The system also includes an MTS equipment for tensile and compressive testing as well as a climate chamber. High-performance industrial computed tomography differs from medical scanning methods by higher X-ray radiation levels, with higher energy impacting further into also very dense materials. Details down to a few tens of micrometers in size can be reproduced.

A laboratory pilot study has now been carried out to describe the possibilities and limitations of the technique and also the labour time and procedures for an examination. With examples it is demonstrated how the method can be implemented for examination of cast concrete cylinders and drilled core samples of shotcrete (sprayed concrete), with a focus on finding practical routines for investigations and analyses to obtain quantitative and qualitative data. A literature review summarizing previous research in the area is included. The summary shows very little published work focusing on the possibilities of analysing laboratory samples of normal size and of concrete cores drilled directly out of existing structures. The work presented here is thus unique, also with the focus on concrete of the type used in civil engineering rock work and tunnel construction, especially with respect to shotcrete for which no published studies have been found. The earlier studies include projects where computed tomography is combined with compressive loading, triaxial, dynamic and cyclic as well as tensile cracking. There have also been studies of concrete pore systems and the distributions of air pores, which are of particular interest from a durability perspective, as this affects the permeability of water and the risk for frost damage. Another obvious key focus is the study of the distribution and orientation of steel fibres in concrete.

With knowledge of the internal material structure, concrete materials can be optimized for use in rock engineering, to produce cost-effective, sustainable and safe tunnels and subspace structures. The pilot study shows that already at this early stage of method development it is possible to practically analyse concrete specimens with the type of CT scan equipment that is available at the KTH Civil and Architectural Engineering lab. The results from tomography investigations can be analysed and presented in the form of qualitative and quantitative evaluation results for in situ or laboratory test specimens. The quantitative data that can be calculated are mainly distributions of cement paste, aggregates, steel fibres and air pores within a studied specimen. Suggestions on how the reporting of standardised laboratory investigations carried out can be made in protocol form are given. Based on the evaluation of the method it is recommended that it should be established as a standardised method for non-destructive testing when developing new, optimised concrete types and for investigations of

damaged and degraded concrete structures in tunnels and subspace structures. The further development and establishment of the method depends on that a basis for evaluations exists and it is therefore recommended that test data is systematically presented in a standardised way for major construction projects and collected in an open database to allow comparison. The examples presented demonstrate that the technology and equipment has great potential for future efforts to tailor concrete material for rock construction and it should also be possible, by regular testing and analysis, to follow degradation of concrete materials in situ.

**Keywords:** Computed tomography, Non-destructive testing, Concrete, Shotcrete, Steel fibres, Drill cores, Cast test specimens.

# Innehåll

<b>1. Bakgrund .....</b>	<b>1.</b>
1.1 Tomografering för betongmaterial .....	1.
1.2 Exempel på tidigare undersökningar .....	2.
1.3 Pilotprojektet .....	6.
<b>2. Datortomografi .....</b>	<b>9.</b>
2.1 Tomografiteknik .....	9.
2.2 Inhämtning av tomografidata .....	11.
2.3 Digital bildbehandling och analys .....	13.
2.4 NSI X5000 systemet vid KTH Byggvetenskap .....	14.
<b>3. Tidigare forskning .....</b>	<b>19.</b>
3.1 Belastning till brott .....	19.
3.2 Porositet och materialstruktur .....	21.
3.3 Fiberinnehåll, fördelning och orientering .....	22.
3.4 Temperatur, fukt och nedbrytning .....	23.
3.5 Andra material .....	24.
<b>4. Metod för databehandling och analys .....</b>	<b>27.</b>
4.1 Inläsning av CT bilder .....	27.
4.2 Identifiering av materialdelar utifrån CT bilder .....	30.
4.3 Kvalitativ analys .....	31.
4.4 Kvantitativ analys .....	33.

<b>5. Exempel</b> .....	<b>37.</b>
5.1 Spräckt provkropp av fiberbetong .....	37.
5.2 Borrkärna från sprutbetongbalk .....	40.
5.3 Sprutbetongkärna från tunnel .....	45.
5.4 Sprutbetongkärna med berg från tunnel .....	46.
<b>6. Slutsatser</b> .....	<b>49.</b>
6.1 Metodens möjligheter .....	49.
6.2 Nuvarande kunskapsläge .....	50.
6.3 Behov av fortsatt utveckling .....	51.
<b>Litteratur</b> .....	<b>53.</b>
<b>Bilagor</b> .....	<b>59.</b>
A. Exempel på provningsprotokoll .....	59.
B. Eng-Sve ordlista över tekniska termer .....	65.

# Kapitel 1

## Bakgrund

Prestanda och livslängd hos betongmaterial beror i stor utsträckning på förekomst och fördelning av ballast, luftporer, mikrosprickor och i förekommande fall stålfibrer eller syntetiska fibrer. Med kunskap om beskaffenheten inne i betongmaterialet kan detta optimeras för användning vid bergbyggande och det är också möjligt att genom prover tagna i fält följa upp nedbrytning av materialet. Idag är de användbara undersökningsmetoderna i huvudsak begränsade till förstörande provning samt sågning och mikroskopering av uttagna eller särskilt gjutna provkroppar.

### *1.1 Tomografering för betongmaterial*

KTH Byggetenskap har nyligen organiserat om de laborativa resurserna och till dessa hör nu ett avancerat system för tomografering av materialprov. Utrustningen är integrerad med ett datoriserat visualiseringssystem och har även en MTS utrustning för drag- och tryckprovning samt en klimatkammare, som opererar inom temperaturintervallet  $-20^{\circ}\text{C}$  till  $+80^{\circ}\text{C}$ . Utrustningen har ursprungligen anskaffats för att studera asfaltsprover (se t.ex. Onifade m.fl., 2013 & 2014) men är även lämplig för att generera tredimensionella genomlysningsskärningar av till exempel betong och bergmaterial. Erfarenheterna från användning av utrustningen för att prova sådana material var tidigare små och det fanns inte heller någon framtagen instruktion för hur det kan göras och var gränserna för användbarheten går. Därför genomfördes denna laborativa pilotstudie, för att ge en beskrivning av teknikens möjligheter och begränsningar samt arbetsgång och rutiner vid undersökning.

Av särskilt intresse är att studera stålfiberarmerad betong, som både kan vara gjuten och sprutad. Av intresse är dels hur fibrerna orienterar sig inne i betongen men också hur de verkar vid krympning, dragbelastning och sprickbildning (Lagerblad m.fl., 2007). Då ung betong hårdnar ökar dess hållfasthet och bindningen till fibrerna vilket påverkar sättet som sprickbildning sker (Ansell & Holmgren, 2007). Detta bör kunna gå att studera med utrustningen. I förlängningen kan det också bli möjligt att studera gränsskikt mellan olika material, till exempel berg och sprutbetong, se Bryne & Lagerblad (2012), Bryne (2014) och Ahmed (2015). Detta kommer också att kunna göras i kombination med studier av temperaturrens inverkan på materialens prestanda. Genom prover tagna i fält blir det också möjligt att kontinuerligt följa upp eventuell nedbrytning av materialet, till exempel genom korrosion i stålfiberarmering (se t.ex. Nordström, 2005).

Två olika typer av grafisk utdata kan fås från tomograferingen. I samband med provbelastning i maskinen kan 2D genomlysningsskärningar fås efter varje pålastning. Sprickor som uppstår kommer att synas men det framgår inte var i tjockleksriktningen de är belägna. Då provkroppen inte är kopplad till MTS provningsmaskinen kan en komplett 3D skanning genomföras. Resultatet från denna visar läget

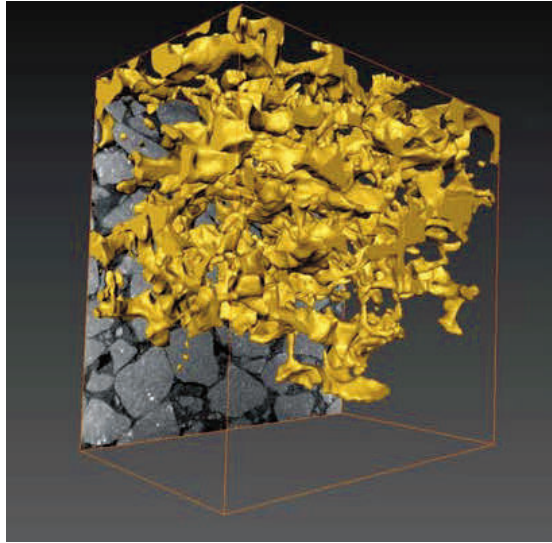
för ballast, porer, sprickor och fibrer. En virtuell provkropp visas och det är också möjligt att sektionera denna för att studera hela volymen. Det går även att välja ut delmaterial så att t.ex. enbart ballasten eller fibrerna visas. Tomografens inbyggda MTS provningsmaskin används bäst för tryckbelastningar. Dock kan betongcylindrar spräckas genom att tryckbelastningen koncentreras till smala linjaler. För fiberbetong kan det vara av intresse att se hur fibrer aktiveras och blir lastbärande då sprickor uppstår.

Pilotstudien kommer att ge en beskrivning av teknikens möjligheter och begränsningar samt ge en demonstration av hur och om tekniken som sådan är användbar för att undersöka laboratorietillverkade prov såväl som provkärnor från fältet. Om så är fallet kommer nyttan att vara stor genom att betongmaterial kommer att kunna optimeras för användning vid bergbyggnad och det blir också möjligt att genom kontinuerlig provtagning följa upp materialens prestanda under fältförhållanden. Av stor betydelse blir också möjligheten att kunna studera gränsskikt mellan olika material, till exempel berg och sprutbetong.

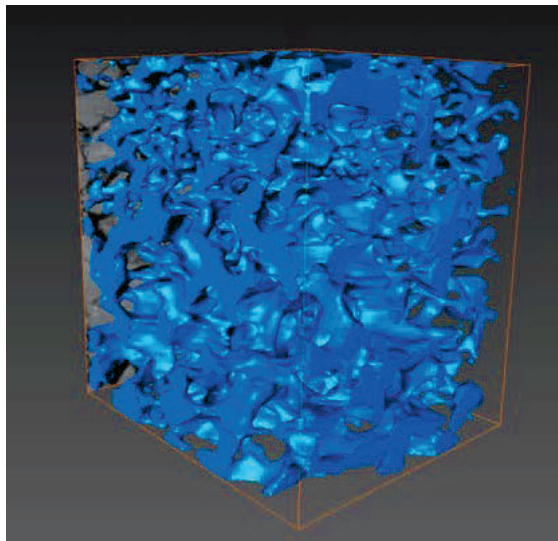
## ***1.2 Exempel på tidigare undersökningar***

Den utrustning för datortomografering som används i detta projekt har tidigare använts för att undersöka prover av asfaltbetong, se Guarin m.fl. (2012) och Onifade m.fl. (2013). Resultat från den undersökningen visas här för att ge exempel på den typ av materialdata som kan bli aktuell att ta fram även för prover av sprutbetong och gjuten betong. Den karakteriseringen av asfaltens inre struktur som genomfördes syftade till att bestämma parametrar för stengradering och orientering, distribution och geometri i kontaktzonerna mellan stenar, variation av bindemedel och luftporers fördelning över volymen. Exempel på grafiskt analysresultat ges här där den rekonstruerade ytan av det effektiva (sammankopplade) porsystemet visas för asfaltkärnor, i Figur 1 direkt efter uttag av provkärnor och i Figur 2 efter rengöring av materialet. Som kan ses så återställer rengöringsprocessen porernas öppning vid botten av provet som ursprungligen var igensatt på grund av nedsmutsning. Variationen i förekomst av luffickor i förhållande till djupet hos en rengjord provkärna visas i Figur 3. I Figur 4 visas en med CAD rekonstruerad volym hur ballaststenen i asfaltblandningen är orienterad och grupperad, vilket även beskrivs av histogrammet i Figur 5.

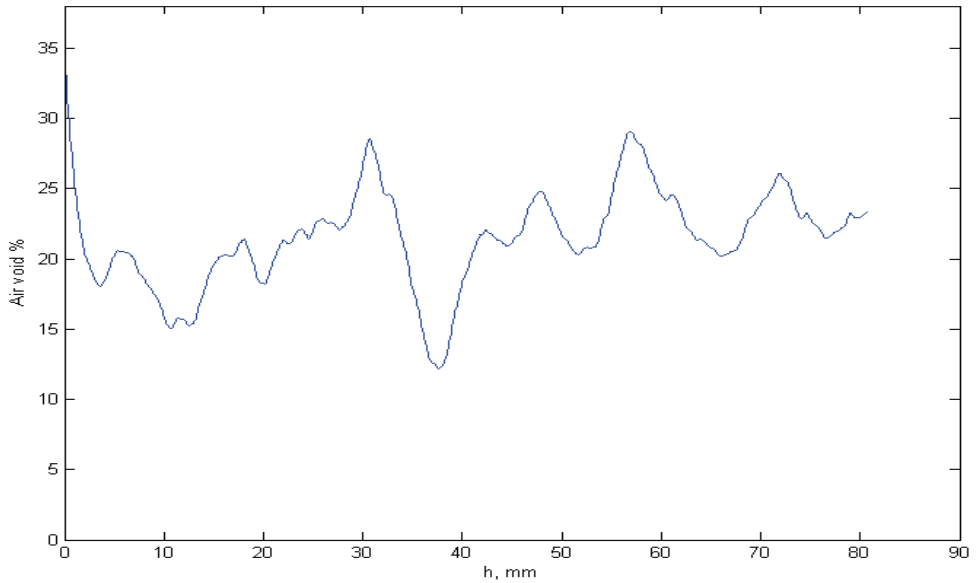
Som en vidare utvärdering av resultaten genomfördes mikromekanisk analys genom FEM simulering. Syftet var att förbättra förståelsen för det mekaniska beteendet hos asfalt och dess nedbrytningsprocesser samt att undersöka effekten av att använda ingående delmaterial med förändrade egenskaper. Genom analyser med olika belastningstyper på ett sådant "virtuellt prov" kan kostnadseffektiva sätt att optimera asfaltmassans sammansättning tas fram, beträffande optimal typ av bindemedel, luftinnehåll och stenstorleksfördelning. Rekonstruerade ytor och volymer har här exporterats till det finita elementprogrammet Comsol Multiphysics (2016), se Figur 6. Med programmet har sedan bland annat en enaxiell, tvådimensionell spänningsanalys genomförts, se Figur 7, och en termisk spänningsanalys där materialet utsätts för temperaturvariationer som resulterar i inre spänningar, se Figur 8.



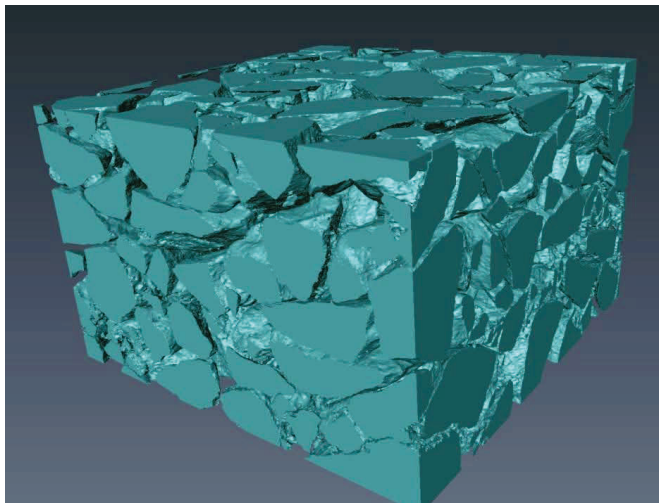
**Figur 1:** Luftporer i asfaltbetong, före rengöring (Guarin m.fl., 2012).



**Figur 2:** Luftporer i asfaltbetong, efter rengöring (Guarin m.fl., 2012).

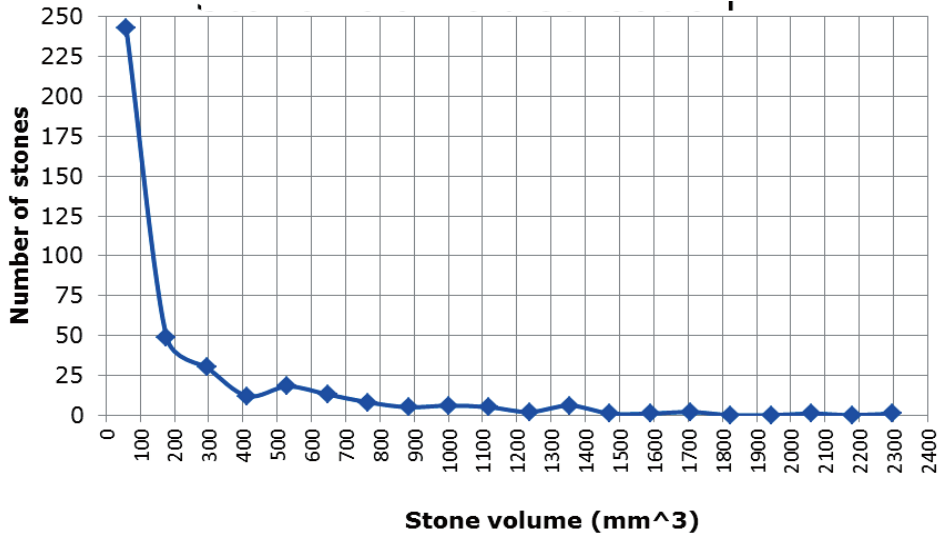


**Figur 3:** Variation av luftporer som funktion av djupet i provkropp av asfaltbetong, efter rengöring (Guarin m.fl., 2012).

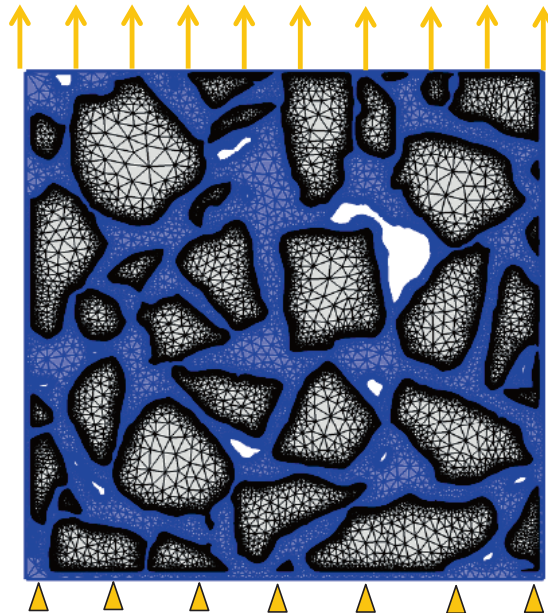


**Figur 4:** Tredimensionell CAD bild visande ballaststen i porös asfalt (Guarin m.fl., 2012).

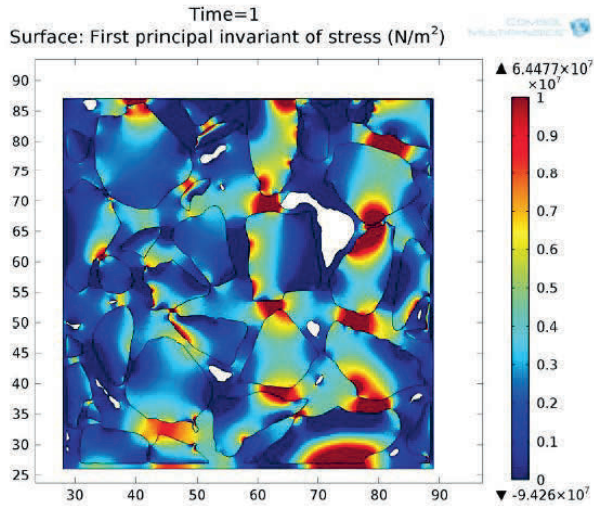




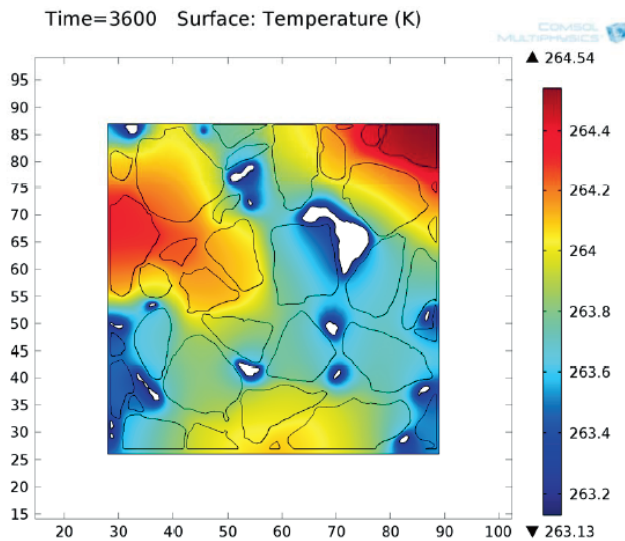
**Figur 5:** Volymfördelning av ballaststen i porös asfalt (Guarin m.fl., 2012).



**Figur 6:** Modell av asfaltbetong för numerisk simulering (Onifade m.fl., 2013).



Figur 7: Resultat från spänningsanalys (Onifade m.fl., 2013).



Figur 8: Resultat från termisk analys (Onifade m.fl., 2013).

### 1.3 Pilotprojekt

Den pilotstudie som här presenteras beskriver teknikens möjligheter och begränsningar som undersökningsmetod för ung och gammal, sprutad och gjuten betong för tunnlar. De provkroppar som undersöks är här uteslutande cylindrar gjutna av betong med stålfiberinnehåll eller provkärnor tagna i fält eller ur balkar tillverkade i laboratorium. Olika ballastfraktioner kommer framöver att kunna provas men av störst intresse är här mindre fraktioner, upp till maximalt ca 8 mm vilket är vanligt för

sprutbetong. Fokus har lagts på att hitta praktiska rutiner för undersökning och analys samt sätt att redovisa resultaten. Procedurer för att erhålla både kvantitativ och kvalitativ data demonstreras. Det ska noteras att möjligheterna att genomföra tomografiundersökning av provkroppar samtidigt belastade med de i utrustningen integrerade systemen för tryckbelastning och temperaturpåverkan har inte kunnat utvärderas fullt ut inom projektets omfattning.

Pilotstudien syftar till att utreda hur tomografi kan användas för att bedöma kvaliteten hos betongprov. Målet är att få en beskrivning av teknikens möjligheter och begränsningar samt arbetsgången, och därigenom indirekt arbetstiden, för att använda metoden för undersökning av fullstora betongprovkroppar, till exempel i doktorandprojekt inriktade mot bergförstärkning. Det antal prover som kan genomföras inom projektet beror av den verkliga tidsåtgången per prov vilket i sin tur är beroende av hur lämplig tekniken är för provning av betong av den typ som används vid bergförstärkning.

Målet är att projektet långsiktigt bidrar till att generera ny kunskap om konstruktionsmaterial och provningsmetoder, vilket kommer att bidra till kunskaps- och kompetensutveckling inom bergförstärkningsområdet och angränsande materialteknikområden. Projektet är områdesöverskridande med kombination av bergbyggande, betongmaterialteknik samt mätning- och provningsteknik och sammanför på så sätt teknikområden och överför kunskap och lösningar som utvecklar bergtekniken.



# Kapitel 2

## Datortomografi

Datortomografi (*X-ray computed tomography*) är en icke-förstörande observationsteknik som används för att visualisera det inre av ett fast föremål i syfte att erhålla digital information av den inre strukturen av objekten på mikroskopisk detaljnivå. Den studerade volymen beskrivs av skivor med konstant tjocklek, så kallade CT bilder (CT = *Computed Tomography*), tomografibilder. Dessa representeras med volymelement (*voxels*), till skillnad från tvådimensionella bildelement (*pixels*).

### 2.1 Tomografiteknik

I det följande ges en kortfattad sammanfattning av tomografitekniken och dess grundläggande principer. Sammanställningen baseras på den presentation som ges av Ketcham & Carlson (2001), där ytterligare detaljerade beskrivningar återfinns.

Datortomografisystem (CT system) kan kategoriseras efter användning inom medicin och industritillämpningar. System för medicinsk tillämpning används för att återge bilder av mjuka vävnader och ben för diagnos och prognos. Utveckling av medicinska CT system har också lett till framväxt av system för användning inom industrin. Högupplöst industriell datortomografi skiljer sig från konventionella medicinska skanningsmetoder främst genom att högre röntgenstrålning med högre energi och mer genomslagskraft kan användas varvid detaljer ned till några tiotals mikrometer i storlek kan återges, även när föremål av material med hög densitet studeras. Industriella CT system används i dag inom olika fält och discipliner, såsom geovetenskap, konstruktionsteknik och mekanisk tillverkning. Fördelarna och begränsningarna med tekniken redovisas nedan.

#### **Fördelar:**

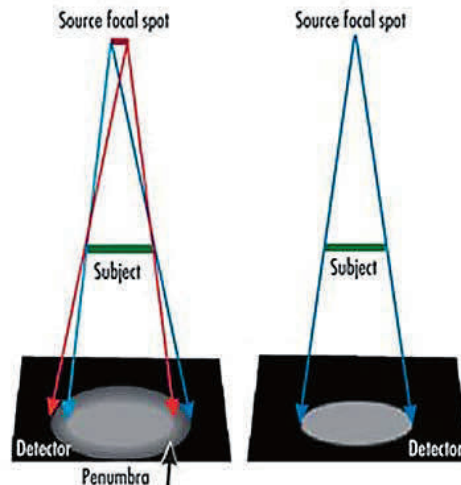
- Statiska och dynamiska belastningsmöjligheter samt klimatkammare för röntgen CT.
- Verktyg för att utveckla modeller för numeriska simuleringar.
- Helt icke-förstörande 3D analys.
- Liten eller ingen provberedning krävs.

#### **Begränsningar:**

- Svårigheter att penetrera in i vissa material.
- Ej mobil utrustning.
- Störningar i insamlade bilder.
- Stora datorresurser för visualisering och analys krävs.

Kvaliteten på den skannade bilden är ett mått på bruset, snittjockleken och upplösningarna vid låg och hög kontrast. Dessa egenskaper beror på den röntgenstrålekälla och den röntgendetektor som används samt på skanningsproceduren. De variabler som avgör hur effektiv en röntgenkälla kommer att vara för en viss uppgift är storleken på fokalflecken (eng: *focal spot*), det spektrum av röntgen-energier

som genereras och röntgenintensiteten. Fokalfläckens storlek definierar delvis den potentiella rumsliga upplösningen hos ett CT system genom att bestämma antalet möjliga vägar mellan strålningskälla och detektor som kan skära en given punkt i det objekt som skannas, se Figur 9. Ju fler sådana vägar som finns, desto mer oskärpa kommer att uppstå i bildåtergivningen.



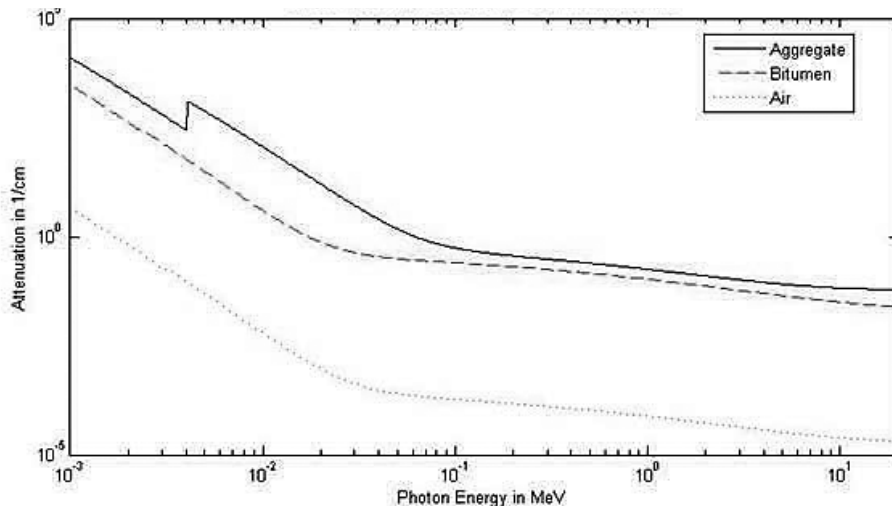
**Figur 9:** Effekten av fokalfläckens storlek. Från Zweig (2009).

Energispektrumet definierar den penetrerande förmågan hos röntgenstrålarna, samt deras förväntade relativa försvagning (eng: *attenuation*) då de passerar genom material med olika densitet. Försvagningen är minskningen av intensiteten av en röntgenstråle då den genomgår materia. Denna kan orsakas av absorption eller genom avböjning (eng: *scatter*) av fotoner från strålen och kan påverkas av olika faktorer såsom stråleenergi och atomnummer hos absorberande material (McKetty, 1998). Röntgenstrålar med högre energi tränger mer effektivt genom material men är mindre känsliga för förändringar i materialdensitet och sammansättning. Röntgenintensiteten påverkar direkt signal-till-brusförhållandet (eng: *signal-to-noise ratio*, SNR) och därmed bildskärpan. Högre intensitet förbättrar underlaget för bildåtergivning men kräver ofta en större fokalfläck. Upplösningen av det skannade objektet kan ökas genom att minimera avståndet mellan strålningskälla och studerat objekt samtidigt som avståndet mellan objektet och strålningsdetektorn maximeras. CT bilder av ett objekt är en sammanställning av variationen hos attenuationskoefficienten (eng: *attenuation coefficient*) vid passage genom dess beståndsdelar. Denna är ett mått på hur starkt ett kemiskt ämne eller substans absorberar eller sprider ljus vid en given våglängd, per viktenhet. Förutom för synligt ljus kan koefficienten också definieras för andra elektromagnetiska vågor såsom röntgenstrålar, ljud, eller liknande.

Förmågan hos röntgenstrålarna att visa skillnader mellan olika material beror på deras respektive linjära attenuationskoefficienter (eng: *linear attenuation coefficient*). De studerade materialens uppskattade koefficienter kan användas för att bestämma den energinivå som kommer att vara mest lämplig vid aktuell skanning. Försvagningskoefficienten för en materialvolym anger hur lätt den kan penetreras av en stråle av ljus, ljud, partiklar, eller annan energi eller materia. Dessa koefficienter kan erhållas genom att multiplicera attenuationskoefficienten för varje beståndsdel i materialet med deras respektive densitet. Värderna för försvagningen för olika element, föreningar och materialblandningar kan erhållas

från *XCOM: Photon Cross Sections Database* som förvaltas av National Institute of Standards and Technology (NIST) (Berger m.fl., 2010).

Diagrammet i Figur 10 visar linjära försvagningskoefficienter som funktion av röntgenstråleenergi för beståndsdelarna i asfaltbetong, ballast (kalksten), bitumen och luft. Det framgår att de linjära försvagningskoefficienterna för ballast och bitumen är åtskiljda men konvergerande för lägre energiintensiteter än 200 kV följt av linjära och närliggande kurvor över denna intensitet. En god åtskillnad mellan ballast och bitumenpasta (bitumen och grus) kan således erhållas när prover med asfaltbetong skannas med energinivåer under 200 kV. Detta är fallet för relativt små provkroppar, men högre energinivåer krävs för att tränga igenom materialprov med dimensioner på ca 80 mm och däröver. I den slutliga skannade bilden kommer materialet med den högsta försvagningskoefficienten, det vill säga här ballasten, att representeras av ljusa gråskalor medan materialet med den lägsta koefficienten, det vill säga luftfickor och porer, kommer att visas som mörka zoner. Bitumenpastans täthet ligger mellan dessa ytterligheter och kommer att visas som ljusgrå områden.



**Figur 10:** Linjära försvagningskoefficienter för beståndsdelarna i asfaltbetong (Onifade, 2013).

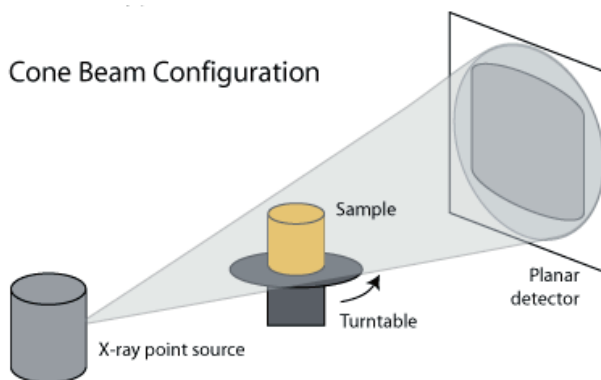
## 2.2 Inhämtning av tomografidata

Vid tomografiundersökning av en provkropp beror kvaliteten på inhämtad data på hur respektive steg i undersökningen genomförs och anpassas till aktuell provkroppsgeometri och materialtyp. En typisk tomografiundersökning består av följande sekvens (Ketcham och Carlson, 2001):

- 1) Provbredning
- 2) Kalibrering
- 3) Datainsamling
- 4) Rekonstruktion.

Före en CT skanning bereds provkropparna för att säkerställa att dessa passar inuti utrustningens synfält och att de inte rör sig under skanningen. Eftersom hela skanningsfältet är en cylinder, det vill säga en stapel av cirkulära fält, är den mest effektiva geometrin vid skanningen en cylinder, se Figur 11. Kalibreringar är nödvändiga för att fastställa egenskaperna hos röntgensignalen så som de läses av detektorerna under de givna skanningsförhållandena, och för att minska geometriska osäkerheter. De två huvudsakliga signalkalibreringar som genomförs är "offset" och "förstärkning", vilka styr detektoravläsningarna då röntgenstrålningen är avslagen respektive påslagen med olika valda energinivåer. De viktigaste variablerna vid insamling av CT data är antalet genomlysningar och tiden för datainsamling för varje sådan. Antalet genomlysningar som vanligtvis används varierar från 600 till 3600, eller mer, och representerar vardera ett rotationsintervall lika med 3608 dividerat med det totala antalet genomlysningar. Rådata lagras i matrisform så att varje rad innehåller en enda uppsättning detektoravläsningar för en genomlysning medan tiden går från topp till botten. Denna bild kallas sinogram (eng: *sinogram*), eftersom varje punkt i det skannade objektet motsvarar en sinuskurva.

Rekonstruktion är den matematiska process där sinogram omvandlas till tvådimensionella skiktbilder. Den mest utbredda rekonstruktionstekniken kallas filtrerad återprojektion (eng: *filtered backprojection*), där data först faltas (eng: *convolves*) med ett filter varefter varje vy successivt läggs ovanpå ett fyrkantigt rutnät orienterat i en vinkel som motsvarar dess förvärvsvinkel (eng: *acquisition angle*). Under återuppbyggnaden omvandlas rådata i sinogram till CT-nummer eller CT-värden som vardera tillhör ett område som bestäms av datorsystemet. De flesta medicinska och äldre industriella system använder en 12-bitars skala, där 4096 datavärden är möjliga, medan nyare system använder en 16-bitars skala vilket gör det möjligt för värden att variera från 0 till 65535. För de flesta industriella skannrar överensstämmer dessa värden med gråskalan i de bildfiler som skapas eller exporteras av systemen. Även om CT-värden bör kopplas linjärt till den effektiva försvagningskoefficienten för materialet i varje voxel är den absoluta korrespondens godtyckligt. Industriella CT system kalibreras ibland så att luften ges ett värde av 0, vatten värdet 1000 och aluminium 2700, så att CT-numren approximativt motsvarar materialens densitet (Johns et al., 1993). Kalibreringen av CT-värden är enkel för provkroppar med fixerad geometri men mycket mer komplicerad för provuppställningar med flexibel geometri och skanningslägen och olika användningsområden kommer därför att kräva olika optimeringstekniker.



**Figur 11:** Genomlysning av roterande, cirkulär provkropp (Ketcham, 2016).

En typisk sekvens för efterbearbetning innefattar fyra huvudsteg; brusreducering och korrigerig, **BeFo Report I65**



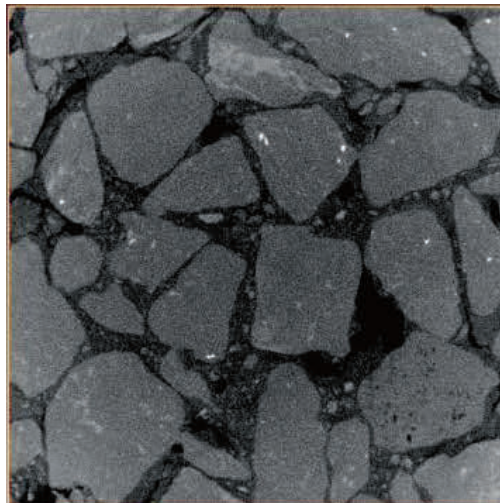
materialfördelning, kvantitativ analys och volymuppdelning. I syfte att kvantitativt kunna karakterisera provkroppens inre struktur kan till exempel följande parametrar bestämmas; ballastgradering och orientering, fördelning och geometri hos kontaktzoner mellan ballaststenar, variation i fördelning av bindemedel samt luftporers fördelning över djupet.

### 2.3 Digital bildbehandling och analys

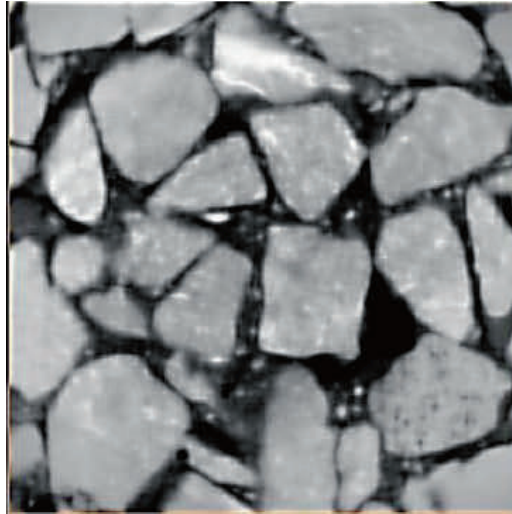
Bildbehandling innebär här huvudsakligen redigering och förbättring av digitala bilder med syfte att förbättra deras kvalitet eller för att extrahera relevant information. Olika tekniker kan användas och valet av lämplig teknik eller metod beror på tillämpningen. Allmän bildbehandlingsteknik för bildförbättring inkluderar kontrastförbättring, filtrering, erosion och dilation, bakgrundskorrektion, etc. Andra bildbehandlingstekniker så som tröskling (eng: *thresholding*), kantdetektering (eng: *edge-detection*), och vattendelare (eng: *watershed*) används för segmentering och separation av objekt. Figur 12 visar en röntgen-CT bild innan efterbearbetning, där betydande densitetsvariation inom faser (stenar och bindemedel) kan observeras, tillsammans med bildbrus och så kallad "*beam hardening*". För att åstadkomma den korrigerade bilden i Figur 13 har följande metoder använts:

- Histogramutjämning för att förbättra kontrasten.
- Brusreducering med medianfilter och kantbevarande utjämningfilter
- Korrigering av "*beam hardening*" baserat på bakgrunds- och fältkorrigering.

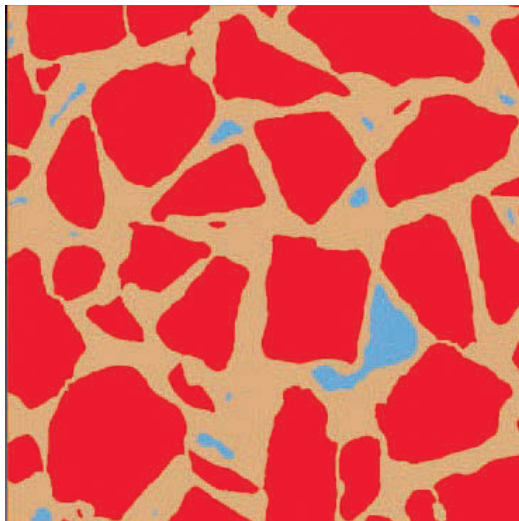
Den segmenterade bilden i Figur 14 visar identifierade faser, det vill säga luftporer och stenar, erhållna med tröskelbaserad segmentering. Asfaltbindemedlet definierades här som skillnaden mellan total volym, stenar och luftporer. Ballaststenar identifierades och separerades baserat på en avståndsöversikt med vattendelare/segmentering och genom att stenar mindre än 2,34 mm filtrerats bort och ersatts med bindemedel.



**Figur 12:** CT bild av asfaltbetong före korrigering (Onifade, 2013).



**Figur 13:** CT bild av asfaltbetong efter korrigering (Onifade, 2013).



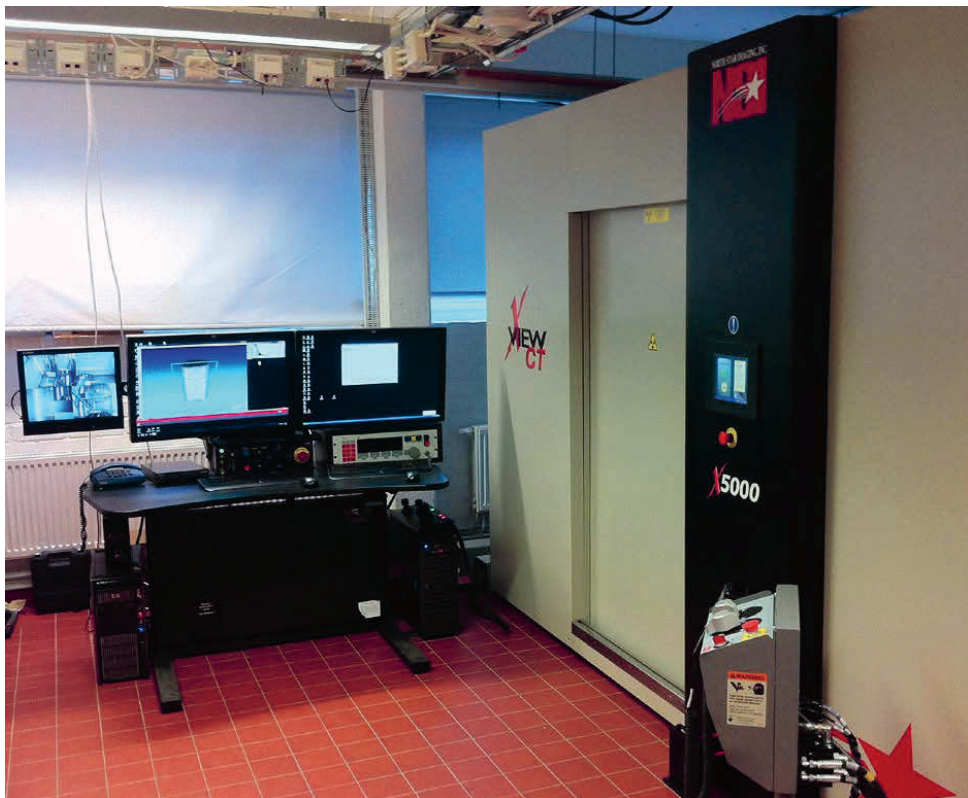
**Figur 14:** CT bild av asfaltbetong, med tydlig uppdelning (Onifade, 2013).

## ***2.4 NSI X5000 systemet vid KTH Bygghvetenskap***

Den tomografiapparatur som finns i laboratoriet vid KTH Bygghvetenskap är av typen NSI X5000. Systemet består av ett NSI strålningsavskärmat hölje och en NSI X5000 sexaxlig komponentmanipulator med en högupplösnings digital röntgen och CT-teknik, se Figur 15. För CT kalibrering, (*Cone-Beam*) rekonstruktion och 3D realtids visualisering används programvaran Efx CT, med

analysverktyg i samma gränssnitt. Beroende på provkroppens storlek, graden av geometrisk förstoring och den strålningskälla som används kan tomografidata med voxelstorlekar ned till  $5\ \mu\text{m}$  erhållas.

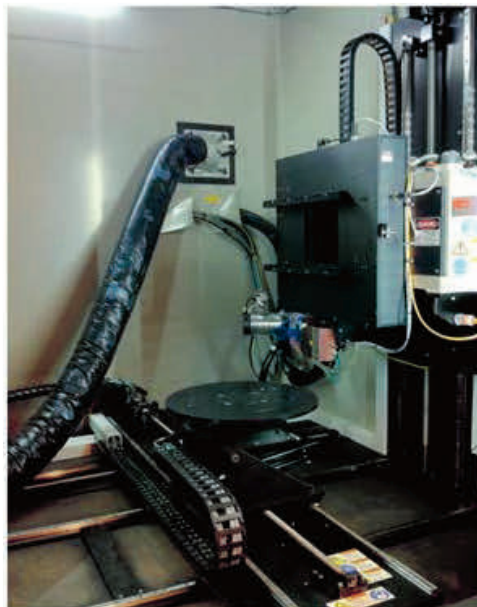
En högupplösnings *Amorphous Silicon* digital detektor ( $200\ \text{nm}\ \text{pixel}\ \text{pitch}$ ) ingår, se Figur 16, tillsammans med en NSI X-View EFX-DR arbetsstation. Till detta avbildningssystem hör också ett NSI 225 kV mikrofokus röntgenrör med  $5\ \mu\text{m}$  brännvidd och ett NSI 450 kV HP röntgenrör med  $400\ \mu\text{m}$  brännvidd, se Figur 17. I systemet ingår också en MTS Model 870 lastcell för enaxiell belastning med maximalt 100 kN kraft och 150 mm förskjutning, se Figur 18. Integrerat finns också en EGNU12-6CWL Platinum temperaturkammare som möjliggör provning inom temperaturintervall från  $-20\ ^\circ\text{C}$  till  $+80\ ^\circ\text{C}$ , se Figur 19.



**Figur 15:** NSI X5000 systemet vid KTH Byggetenskap.



**Figur 16:** Digital detektor med 200 nm pixel pitch i NSI X5000 systemet.



**Figur 17:** Röntgenstrålkällor med 225 kV och 450 kV i NSI X5000 systemet.



**Figur 18:** Mekaniskt MTS 810 i NSI X5000 systemet belastningssystem.



**Figur 19:** Klimatkammare kopplad till NSI X5000 systemet.



# Kapitel 3

## Tidigare forskning

I följande fem avsnitt ges en sammanfattning av tidigare utförda undersökningar med datortomografering av provkroppar av betong och cementbaserade material. I det sista avsnittet sammanfattas några undersökningar av andra material med liknande egenskaper som betong, med avsikt att komplettera genomgången. Den kortfattade sammanfattningen gör inga anspråk på att vara komplett utan syftet är här att med exempel beskriva var forskningsfronten står idag och vilken typ av frågeställningar som är aktuella. Datortomografering har tidigare mestadels använts för studier av mikrostrukturer i andra material än betong och cementbaserade material, och då också oftast utan pålagd yttre belastning - se till exempel sammanställningen av Sharma m.fl. (2016). Tidiga exempel på datortomografering utförd på geomaterial presenteras till exempel av Leung m.fl. (1996) och Desrues m.fl. (1996). En tidig diskussion om teknikens möjligheter för undersökning av betongprovkroppar hittas hos Heiskainen m.fl. (1991). Referenslistan är central för avsnittet och är avsedd som grund för fortsatta fördjupade studier. I listningen har den delats upp efter den rubricering som gäller i föreliggande kapitel, med några kompletterande rubriker. Det innebär att några referenser återfinns på flera ställen i listan. Det bör noteras att referenser till mjukvaror och numeriska algoritmer i regel inte har medtagits här. Dock är några program ofta förekommande som verktyg i bildbehandling, vilka har listats. Det gäller Avizo (2016) och Image J (2016), men också Matlab (2016) som använts i några arbeten.

### 3.1 Belastning till brott

**Tryckbelastning** av 40 mm betongkuber har studerats med datortomografering av Yang m.fl. (2013) med efterföljande arbeten av Huang m.fl. (2015) och Ren m.fl. (2015). Betongen innehöll ballast med en approximativ medelstorlek på 5 mm, men inget sand- eller annat finmaterial. Undersökning med mikrotomografering används här för att nå en ökad förståelse för brottmekanismerna i en 3D betongprovkropp under ökande lastnivåer. Belastningen lades på stegvis med avlastning och tomografiundersökning mellan varje steg, med en upplösning på 37,2 µm och 1000 pixlar i varje riktning. Kubernas tvärsnittsmått om 40×40×40 mm<sup>3</sup> avgränsades således till 37,2×37,2×37,2 mm<sup>3</sup>. Vid varje tomografering roterades provkropparna 360° vilket resulterade i 2000 bilder i 2D. Den röntgenstrålkälla som användes kan maximalt operera med 320 kV, men här ansågs en intensitet på 160 kV och 60 µA vara optimalt. För visualisering och bildbehandling användes det kommersiella programmet Avizo (2016) och en systematiserad rutin för att åtskilja ballast, cementpasta, porer och sprickor (Li, 2012). Processen innefattar bland annat att fastställa ett praktiskt tröskelvärde i upplösning under vilket det inte är möjligt att urskilja tunna sprickor och porer. Bland övriga studier relaterade till tryckbelastning finns artiklarna av Landis & Nagy (2000) och Wan & Xue (2013).



Försök med *cyklisk tryckbelastning* har genomförts av Sharma m.fl. (2016), som en uppföljning till provningarna presenterade av Yang m.fl. (2013). Provkropparna var här kuber på  $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ , utskurna från  $40 \times 20 \times 40 \text{ mm}^3$  kuber av en betong med en maximal ballaststorlek på 5 mm. Belastningen påfördes i tre cykler, med maximala pålagda laster om 7 kN, 10 kN och 24 kN. Tomografering gjordes efter att varje laststeg avlastats. Syftet var att undersöka initieringen av skador som kan uppstå i relation till last-deformation innan maxlast uppnås. Tomografitrustningens röntgenstrålkälla var på 100 kV och  $200 \mu\text{A}$  och de 2D bilder av betongens mikrostruktur som erhöles hade en upplösning på  $16,5 \mu\text{m}$ . Vid undersökningen kunde initiala mikrosprickor påvisas före belastning och i samband med av och pålastningarna kunde öppning och stängning av sprickor observeras.

En försöksserie med *triaxiell tryckbelastning* av 140 mm höga betongcylindrar med 70 mm diameter och efterföljande resultatanalyser presenteras av Poinard m.fl. (2010) och Piotrowska m.fl. (2013). För att kunna studera materialets meso-strukturella mekanismer under belastningen användes en högtrycks triax-press tillsammans med utrustning för röntgenstrålebaserad datortomografering. Till skillnad mot till exempel provningar genomförda av Landis m.fl. (2007), där skanning av provkropparna genomfördes vid olika grader av uppsprickning under pålastning, skannades provkropparna här endast före och efter genomförda av- och pålastningscykler. Den tomografiutrustning som använts benämns vara av typen "multi-scale" med kapacitet att skanna provkroppar med diametrar inom intervallet 4-200 mm, med motsvarande upplösningar inom 5-100  $\mu\text{m}$ . Upplösningen för aktuellt fall valdes till 52  $\mu\text{m}$  vilket möjliggjorde studier på mesoskopisk nivå, det vill säga motsvarande ballaststorlekar. Den metod för bildbearbetning som användes är den som har utvecklats av Landis m.fl. (2000) och Landis m.fl. (2007). Som en uppföljning till laborieförsöken genomfördes utvärdering och analys med numeriska modeller med syftet att återge betongens uppträdande på meso-skalenivå. Egenskaper hos ballast, cementbruk, porer och interaktion dem emellan beskrevs i 3D modeller med interagerande, kopplade sfärer. Betongen beskrivs således som trefas-material bestående av bruk, ballast och makroporer, som också benämns som "entrapped porosity" (Poinard m.fl., 2011). Storleken av dessa porsystem är relevant för bestämning av tröskelvärden vid bildtolkning av tomografibilder. I sammanhanget kommenteras att det är relativt svårt att särskilja ballast och bruk då deras representation i gråskala är närliggande. Laborieförsöken visade att låga sekundära belastnings-tryck ger brott med vinklade glidplan medan högre tryck ger mer homogena tryckbrott i zoner med hög porositet.

En numerisk studie med *dynamiskt tryckbelastade* kvadratiska betongytor i 2D redovisas av Huang m.fl. (2016). I studien användes Monte Carlo simulering med belastande horisontella randvillkor givna av töjningshastigheterna  $30 \cdot 10^{-6}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-6}$ ,  $2 \cdot 10^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^0$ ,  $10^1 \text{ s}^{-1}$ . Arbetet baseras på tidigare laborieförsök, utförda med låga belastningshastigheter av Yang m.fl. (2013), och baseras på 2D bilder med  $372 \times 372$  pixlar med en upplösning av 0,1 mm. För en beskrivning av den bildbaserade modelleringsmetod som används hänvisas till tidigare presentationer av Huang m.fl. (2013) och Ren m.fl. (2015). Resultaten visade att vid uppsprickning med höga belastningshastigheter är det mer troligt att porer i materialet kopplas samman så att större skadezoner uppträder. Det rekommenderas att antalet interna defekter begränsas i material som ska utsättas för höga belastningshastigheter.

Försök med *spräckning* av små cylindriska provkroppar har genomförts av Landis m.fl. (2010). Tre olika materialtyper provades; cementpasta, cementbruk och en höghållfast betongtyp. Provkropparna var endast 4 mm höga och med en diameter av 4 mm. Målet med undersökningen var att mäta spricksystemens totalarea, räkna antalet sprickor och relatera de olika materialens karaktäristik till uppmätt brottnenergi. Provnings- och utvärderingsmetoderna ses som en fortsättning och komplement till försök med tryckprovning som tidigare genomförts av samma forskargrupp (Landis m.fl., 1999 och Landis m.fl., 2007). Alla provkroppar skannades med mikrotomografi där en röntgenstrålningskälla om 30 keV användes. Vid varje skanningstillfälle togs 1500 bilder medan provkroppen roterades  $180^\circ$ . Den numeriska bildåtergivningningen resulterade i 3D bilder bestående av  $1299 \times 1299 \times 800$  voxels med en



sidlängd av 6  $\mu\text{m}$  i en 16 bitars bildrepresentation. Resultaten visade att de tre materialen uppträdde relativt snarlikt, bortsett från skillnader i brottspänning. Sett till mikrostrukturerna fanns dock skillnader där cementpastan som ej innehöll ballast uppvisade relativt få och okomplicerade sprickmönster. För materialen med ballastpartiklar observerades komplicerade brottmönster och flertalet sprickor på grund av att dessa stoppas i tillväxt, avleds och förgrenas.

### 3.2 Porositet och materialstruktur

De vanligaste studierna av provkroppar av betong och cementpasta där datatomografering används fokuserar på porsystemets struktur och egenskaper. Ett flertal undersökningar med olika inriktningar har presenterats och förutom de nedan sammanfattade, representativa arbetena kan till exempel artiklarna av Bentz m.fl. (2002), Lu m.fl. (2006) och Diamond & Landis (2007) nämnas.

**Normal och höghållfast betong** med tryckhållfastheterna 30 och 90 MPa har av Wong & Chau (2005) tryckprovats med efterföljande tomografiundersökning av luftporer och ballast. Cylindrar med 100 mm diameter och 200 mm höjd tryckbelastades till 50 % och 85 % av sin kapacitet följt av belastning till brott. Efter varje pålastning togs cylindrarna ut ur provningsriggen och undersöktes med tomografering. Vid denna användes en röntgenstrålkälla om 20 kV och 150 mA medan provkropparna roterades framför en 250 mm bred bilddetektor. Varje skannad skiva i höjddled längs cylindrarna var 3 mm tjock och totalt samplades ca 60 skivor, exklusive de översta och understa 5 mm sektionerna av cylindern. De sammanlagda 3D bilderna byggdes upp av bildelement (voxels) med storleken  $0,25 \times 0,25 \times 3 \text{ mm}^3$ . Resultaten visade stora skillnader i den normalhållfasta betongens porstruktur med ökande belastning medan motsvarande förändringar i den höghållfasta betongen var obetydliga.

Förändringar i hårdnande cementpastas porsystem har studerats av Promentilla m.fl. (2009). Arbetet är en fortsättning från ett tidigare (Promentilla m.fl., 2008) och i bakgrundsbeskrivningen refereras även till undersökningar av Gallucci m.fl. (2007) och Helfen m.fl. (2007), vilka dock inte medtas i den här kortfattade översiktsbeskrivningen. Porsystemets "*slingrighet*" eller "krokighet" (eng: *Tortuosity*) studeras, vilket här definieras som kvoten mellan effektiv medelväg och kortaste väg för en (vätske-) partikel i ett flöde. Mycket små fragment om ca 1 mm storlek valdes ut för mikrotomografiska studier, med en upplösning, det vill säga voxelstorlek, på ca  $0,5 \mu\text{m}$ . För varje fragment skannades 1500 tomografibilder genom bestrålning med 15 kV. De avgränsade 3D bilder som analyserades bestod vardera av 4503 voxels motsvarande en volym på  $2253 \mu\text{m}^3$ . Från undersökningar vid 22, 7 och 28 dygns ålder observerades att "slingrigheten" ökar med cementpastans ålder medan den genomsläppliga porositeten minskar i takt med att porer blir allt mer isolerade från varandra.

Inverkan av sprickor på den **elastiska vågutbredningen** i betongprovkroppar har studerats av Kocur m.fl. (2010). Betongprismor  $110 \times 120 \times 160/180 \text{ mm}^3$  undersöktes med datatomografering och deras sprickmönster jämfördes vid utvärderingen med uppmätta elastiska partikelhastigheter. Vid skanningen hade röntgenstrålkällan effekten 140 kV och 350 mAs vilket kunde ge en upplösning med en voxelstorlek på  $6,3 \times 6,3 \times 6,3 \mu\text{m}^3$ . Egenskaperna hos spruckna och ospruckna provkroppar jämfördes i studien.

En studie där **provkärnor tagna utomhus** undersöks med avseende på igensättning av porsystemet presenteras av Manahiloh m.fl. (2012). Borrkärnor med en diameter på 100 mm har tagits från utomhus belägna parkeringsplatser. Materialet är genomsläpplig betong med densitet inom  $1600\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$ , porositet 15–30%, permeabilitet 2–12 mm/s och tryckhållfastheter inom 3,5–28 MPa. Tomograferingen genomfördes här med 350–420 keV och 1,6–1,7 mA. Resultaten visade betydligt lägre porositeter för äldre betong. Även effekten av tvättning demonstrerades.

En undersökning av *fördelning av luftporer* i cementbruk presenteras av Yun m.fl. (2012) och Kim m.fl. (2012), med syfte att föreslå en mer effektiv undersökningsmetod än den traditionellt använda och standardiserade metoden med mikroskopering. De främsta fördelarna med en undersökningsmetod baserad på datortomografering sägs här vara att metoden inte kräver någon fysisk förbearbetning av provkropparna, så som sågning och polering, etc. Metoden kan också öka tillförlitligheten genom att samplingseffekter minimeras. Vid undersökningen användes tre olika typer av cementpastor, med olika luftporsystem. Varje undersökt provkropp var ursprungligen gjuten som en cylinder med 100 mm diameter och 200 mm höjd vilket skars ned till 12 mm diameter och 10 mm höjd innan tomografiundersökning. Denna skedde genom strålning med 150 kV och 100  $\mu$ A, där detektorn registrerade 409,6×409,6 mm<sup>2</sup> med en täthet på 2,5 linjer/mm. Varje provkropp dokumenterades med 1024 horisontella bilder för varje steg om 0,0087 mm i höjddled, med 1024×1024 pixlar med storleken 0,0108 mm. Efter numerisk bearbetning och brusreduktion beskars bilderna till 877×877 pixlar, det vill säga till en storlek om 9,47×9,47 mm<sup>2</sup>.

### 3.3 Fiberinnehåll, fördelning och orientering

En studie kring fiberinnehåll, fördelning och orientering i stålfiberarmerad betong presenteras av Fuentes m.fl. (2015). De tomografiundersökta provkropparna var 600 mm långa balkar med en bredd av 150 mm och med höjder varierande inom 40–150 mm, av en betongtyp som innehåll 78 kg/m<sup>3</sup> stålfibrer med en längd av 36 mm och ballast i fraktioner upp till 16 mm. För undersökningen användes en CT skanner med fixerad provkropp och roterande detektor och strålningskälla, inställd för 120–137 kV och 330–510 mAs. Balkarna utsattes först för *trepunkts böjprovning* varefter 100 mm av mittsektionerna skannades. Bland resultaten finns redovisningar av sannolikhetsfördelningar för fiberriktning i relation till balkarnas tvärsnittssektions normal.

Orienteringen av korta stålfibrer i betong har undersökts med mikrotomografering av Suuronen m.fl. (2013). Totalt undersöktes 12 prov tagna ur mittsnittet av *stålfiberarmerade betonggolv*. Fibrernas riktningar bedömdes utifrån en 3D skelettbild härledd utifrån tomografiresultaten. Sammanställningen visade att fibrerna mestadels är horisontellt orienterade nära plattans horisontella mittsnitt men mer vertikalt nära plattans kanter där formsidorna har haft inverkan. Som uppföljning studerade Herrmann m.fl. (2016) olika metoder och algoritmer för bearbetning och tolkning av tomografidata. Den numeriska metod som presenteras baseras på rutiner för filtrering av data med avsikt att reducera brus och störningar. Den föreslagna metodiken anses effektiv och på kort tid kunna bearbeta stora insamlade datamängder.

En tomografibaserad undersökning av fördelningen av stålfibrer i *självkompakterande betong* presenteras av Ponikiewski m.fl. (2015a). Betong innehållande stålfibrer med 35 mm och 50 mm längd undersöktes, med fiberinnehållen 40, 80 och 120 kg/m<sup>3</sup>. Balkar med dimensionerna 150×150×600 mm<sup>3</sup> användes vid tomografering med en röntgenstrålningskälla på 140 kV och 400 mA. En 3D bild av en provkropp innehöll 512×512×1600 voxels med storleken 0,47×0,47×0,4 mm<sup>3</sup>. Resultaten redovisades som andelen fibrer orienterade i förhållande till provbalkarnas huvudaxlar, det vill säga gjutriktningen. Som en uppföljning undersökte Ponikiewski m.fl. (2015b) fiberorienteringen i väggar gjutna med självkompakterande betong innehållande 80 kg/m<sup>3</sup> stålfibrer. Provkroppar med samma storlek som i den föregående studien skars ur väggarna och tomograferades med samma metod och inställning som i den första studien. Vid bägge dessa studier analyserades insamlad tomografidata med egenskriven mjukvara baserad på numeriska rutiner i C++ avsedda för medicinska tillämpningar. Samma undersökningsmetodik och parameterinställningar användes i ytterligare en undersökning där Ponikiewski & Katzer (2016) utvärderade uppträdandet vid böjning av balkar av självkompakterande

betong innehållande 40, 80 och 120 kg/m<sup>3</sup> stålfibrer. Slutsatserna visar att avståndet till gjutpunkten, det vill säga där betongen anbringas i formen, och stålfibrernas längd har stor inverkan på betongens mekaniska egenskaper.

Fördelningen av stålfibrer i *självkompakterande betong* har också studerats av Andries m.fl. (2015) och Verstryge m.fl. (2016). Av särskilt intresse var här flytavståndet och hur fiberfördelning och fiberorientering beror av detta. Utvärderingen gjordes i 3D med cylindriska provkroppar med en diameter på 100 mm. Tomografibildernas upplösning var 81  $\mu\text{m}$  vilket åstadkoms med en strålningskälla på 360 kV och 0,205 mA. Vid databehandlingen registrerades fibrernas yttertytor i 3D koordinater varifrån tvärsnittens fiberandelar och fibrernas orienteringskoefficienter beräknades.

### 3.4 Temperatur, fukt och nedbrytning

En undersökning av betongborrkärnor tagna ur en 40 år gammal vattenkanal presenteras av Suzuki m.fl. (2009) och Suzuki m.fl. (2010). Datortomografiundersökning användes för att bestämma graden av årstidsbetingad frostnedbrytning och uppsprickning i borrhärnorna med diametern 75 mm. Tomograferingen genomfördes med en medicinsk, fullstor tomografiutrustning (helical CT scan) hos Animal Medical Center vid Nihon University. Skanningen genomfördes för 1 mm längdintervall med visst överlapp så att 200-400 stycken 2D bilder behövdes för att beskriva en borrhärna. Parallellt gjordes också för jämförelse en kvantitativ undersökning med metod baserad på akustisk emission (AE) i samband med provtryckning.

En serie undersökningar av cementpastas uppträdande vid accelererad *urlakning och uttorkning* har genomförts av Burlion m.fl. (2006), Peng m.fl. (2010) och Rougelot m.fl. (2016). Tomografiundersökning medför här att nedbrytningens tidsförlopp, urlakningsfrontens läge och förändring i porositet kan studeras utan att provkropparna störs. Särskilt fokus har varit på möjligheten att observera förändringar i mikrostrukturen och eventuella genererade sprickor och sprickmönster. Cylindriska provkroppar, 20 mm långa och med 8 mm diameter, användes, sammansatta av cementpasta och sfäriska glaskulor med 1, 2 och 4 mm diameter. Glaskulor användes för att simulera effekten av ballast och reducera inverkan av eventuell nedbrytning av denna under urlakningen samt av stenarnas oregelbundna form. Av särskilt intresse var att försöka observera sprickbildning mellan glaskulorna och cementpastan och hur ballastdimensionen eventuellt påverkar detta. Tomograferingen genomfördes med en strålningskälla på 30 keV och en upplösning på 5,3  $\mu\text{m}$ . Med en kamerabild på 2048×2048 pixlar erhöles en maximal skanningsvidd om ca 10 mm (= 2048×5,3·10<sup>-3</sup>). Den efterföljande bildbehandlingen genomfördes i två steg. Först användes 8-bitars bildrepresentation för att skilja mellan porer och solid fas genom definition av ett tröskelfilter. En mer avancerad metod med flera numeriska filter användes sedan för att tolka förändringar i porvolym och eventuell sprickbildning under provens första 72 timmar.

Mikrotomografering har också använts av Stock m.fl. (2002) för att undersöka tidsförlopp och utbredning vid *sulfatangrepp* i cementpasta.

Inverkan av *fiberkorrosion* i samband med dragprovning har studerats av Nguyen m.fl. (2016). Vid försöken användes 31 mm långa cylindriska provkroppar med avsmalnande tvärsektion, från en diameter på 11 mm vid ändarna till 6 mm i mitten. Två olika belastningsfall användes. Först ren korttids dragbelastning och sedan långtidsbelastning under pågående korrosionsangrepp där de första skadorna noterades efter ca 5 veckor. Efter 44 veckors exponering visade provkroppar med både stålfibrer och PVA fibrer ingen märkbar uppsprickning medan motsvarande provkroppar med enbart stålfibrer hade multipla dragsprickor. Vid tomografiskanningen av korttidsförsöken användes en strålningskälla på 35

keV och 500 mA, vilket för långtidstestsöken ökades till 43 keV för att tydligt kunna återge korrosionens inverkan på stålfibrerna. Upplösningen på 2  $\mu\text{m}$  möjliggjorde en horisontell observationsvidd på 8,3 mm.

Rehydratationsegenskaperna hos små provkroppar av cementpasta utsatta för *uppvärmning* presenteras av Pei m.fl. (2016). Cylindriska provkroppar, 20 mm långa och med en diameter på 6 mm, utsattes för långsamma cykler av uppvärmning och nedkylning, varierande mellan 105°C och 600°C. Förmåga till autogen självläkning konstaterades och variationer i pastans hydrauliska egenskaper studerades, bland annat genom mätning av penetration av gas och etanol. Rehydratation efter värmebehandling gjordes med destillerat vatten. Tomografiundersökningarna före och efter värmebehandlingen gjordes med en approximativ voxelstorlek på 4  $\mu\text{m}$ , vilket alltså även var de minsta porstorlekar och sprickvidder som kunde detekteras. Dataanalysen genomfördes här med den kommersiella bildbehandlingsmjukvaran Avizo (2016). En studie av porstruktur och sprickbildning hos provkroppar utsatta för ännu högre temperaturer, upp till 1000°C, presenteras av Kim m.fl. (2013). I artikeln, som är en fortsättning på undersökningarna kommenterade i avsnitt 3.2 (Yun m.fl., 2012 och Kim m.fl., 2012), presenteras tomografiresultat från undersökning av 51 mm kuber av cementpasta. Syftet var att undersöka effekten av hastig värmepåverkan från till exempel brand och resultaten visade att sprickbildning initierades vid ca 600°C och att kraftig uppsprickning åtföljt av explosiv utstötning skedde vid temperaturer över 900°C. Tomograferingen genomfördes med 150 kV och 100  $\mu\text{A}$  och detektorns mätyta var 409,6×409,6  $\text{mm}^2$ , vilket gav en upplösning på 2,5 linjepar/mm. Varje slutlig, beskuren bild representerades av 265×265 pixlar med storleken 0,1627 mm och totalt omfattade varje 3D representation 512 skivor med höjden 0,1324 mm.

### 3.5 Andra material

Datortomografi har ökat i användning som analysmetod för geomaterial (Wong, 2000, Desrues m.fl., 2003 och Vervoort m.fl., 2004) och porösa byggnadsmaterial (Bentz m.fl., 2000 och Cnudde m.fl., 2011), såsom till exempel bruk, tegelmurverk, betong och konstruktionssten.

Resultat från tryckbelastningsprov av *tegelmurverk* sammanfogat med cementbruk eller kalkbruk presenteras av Hendrickx m.fl. (2010) och Verstrynge m.fl. (2016). Provkropparna var cylindriska med 29 mm diameter och en total höjd av 48 mm, varav det centrerade lagret med bruk var 12 mm tjockt och de anslutande tegelsektionerna var således 18 mm tjock vardera. Vid mikrotomograferingen användes en röntgenstrålkälla med 100 kV och 0,35 mA i kombination med en bildlagring med en upplösning på 45,6  $\mu\text{m}$ .

Inverkan från fukt på de mekaniska egenskaperna hos *sandsten* har studerats av Verstrynge m.fl. (2014) och Verstrynge m.fl. (2016). De cylindriska provkropparna hade här en diameter på 10 mm och en höjd på 14-15 mm. Mikrotomografering användes vid olika steg under en tryckbelastning till brott vilket resulterade i att sprickbildning samt porer, kvartskorn och stelnade lerfragment kunde detekteras. Det var dock inte möjligt att se initiering av mikrosprickor med den valda upplösningen på 7,8  $\mu\text{m}$ , från röntgenstrålning med 100 kV och 0,1 mA.

Försök utförda med *asfaltbetong* presenteras av Wang m.fl. (2003) som med användning av datortomografi visar förhållandet mellan provkropparnas generella skador och representativa skadezoner. I en senare studie använder Gao m.fl. (2015) datortomografi för att karaktärisera luftpor-systemet i återvunnen kallasfalt för vägbeläggning. Diametern hos de cylindriska provkropparna var ca 102 mm med en höjd på ca 64 mm. Tomograferingen gjordes med en 225 kV och 0,6 mA strålnings-

källa vilket gav en upplösning på 2.5µm. Vid den efterföljande bildbehandlingen användes programmet Matlab (2016) för en del av analysen. Datortomografi användes av Onifade m.fl. (2014) för att studera den interna strukturen hos asfaltbetong. Resultaten visar flera möjligheter att beskriva och kvantifiera fördelningen av de olika faserna i blandningen. En morfologisk parameter  $T_{ps}$  – “*Primary structure coating thickness*” – definierades för att beskriva asfaltblandningar utifrån den sammanlagda graderingen av ingående ballaststorlek och fördelningen av luftporer och bitumen.



# Kapitel 4

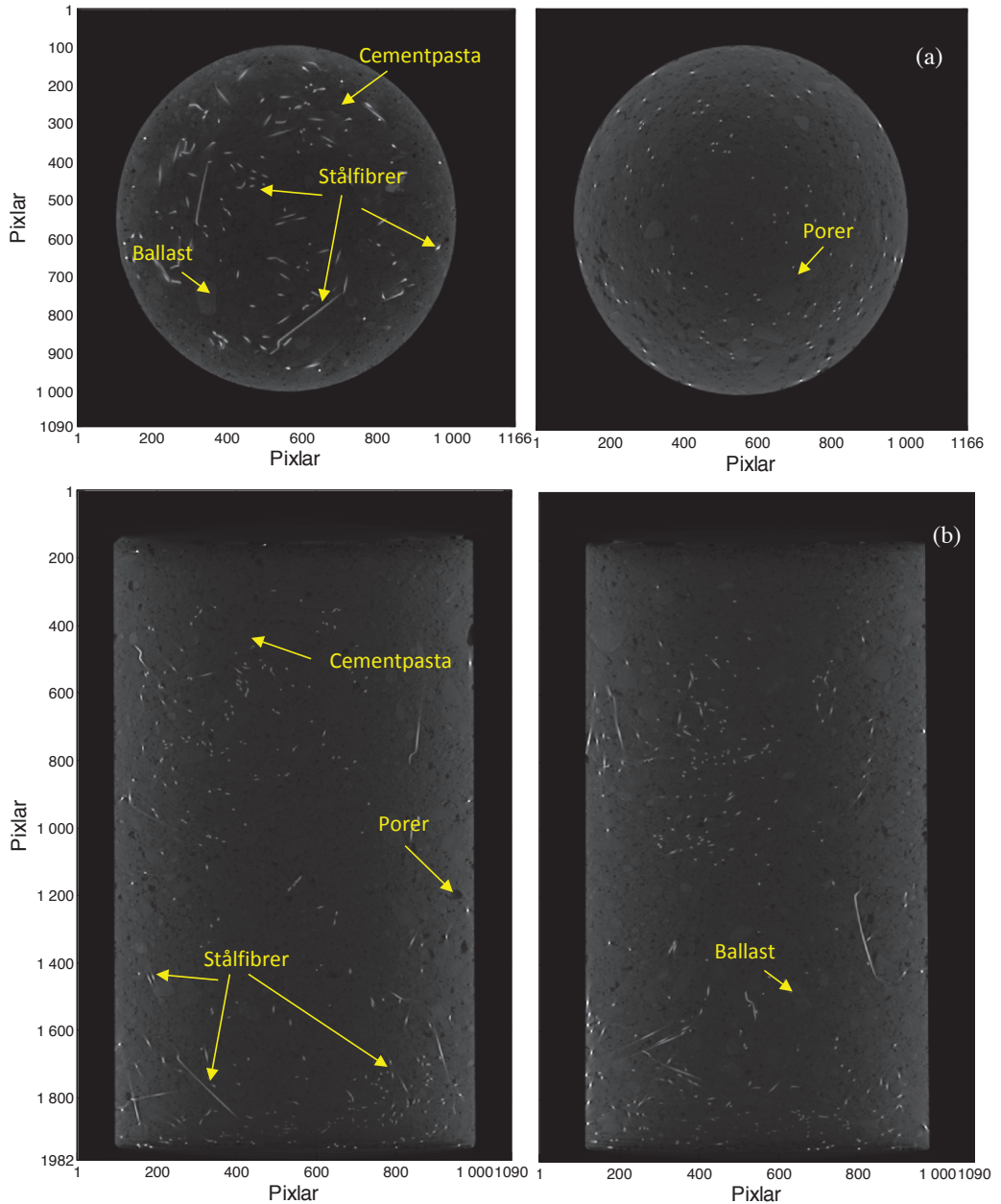
## Metod för databehandling och analys

Insamlad tomografidata behandlas numeriskt i systemet till CT bilder vilka staplade ovanpå varandra sammantaget ger en tredimensionell bild av den undersökta provkroppen. En komplett analys av en undersökt provkropp kräver ett efterföljande steg där bilderna tolkas och information extraheras med ytterligare numeriska beräkningar genomförs, för vilket här används det numeriska analysprogrammet MATLAB (2016). Det tillvägagångssätt som beskrivs och demonstreras i det här kapitlet visar hur kvantitativ data i form av information om betongsammansättning och materialstruktur tas fram ur den grafiska tredimensionella modell som erhålls. Kommentarer ges till metodens begränsningar och till de hänsyn som måste tas vid val av utvärderingsparametrar. Även visuell tolkning och bedömning av materialstrukturen, till exempel beträffande porystem och stålfiberfördelning, ingår i en komplett analysomgång och detta resulterar i sin tur i en sammanställning av kvalitativ data. Kapitlet baseras på resultaten från undersökning av en betongcylinder för vilken provningsresultaten också finns redovisade i bilagda provningsprotokoll (Bilaga A).

### 4.1 Inläsning av CT bilder

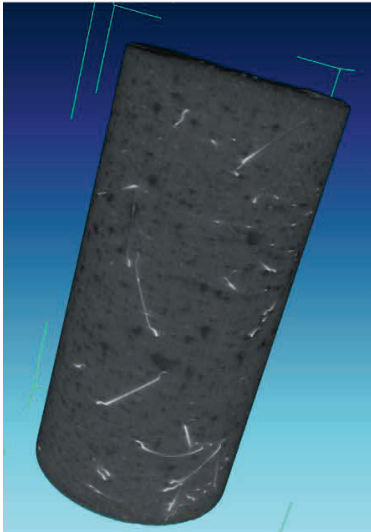
Som nämnts i avsnitt 2.2 så är grunden i det röntgenstrålebaserade CT systemet ett integrerat system bestående av en röntgenstrålkälla, ett roterande bord för provkroppar och en bilddetektor. Röntgenstrålningen moduleras i en kollimator till ett konformat strålknippe och för de undersökningar som presenterar här har en spänningsnivå på 225 kV använts för att generera strålningen. En betongprovkropp placeras på den roterande plattan mellan röntgenkällan och detektorn. En röntgenstråle får sedan passera genom provet medan det vridbara bordet genomgår en fullständig rotation med konstant hastighet. Den digitala tredimensionella bilden består av bildelement (voxels) och provkroppen, som i aktuellt fall är en stående cylinder, upp i en "stapel" horisontella bilder med motsvarande tjocklek och tvådimensionell upplösning (pixels). Typiska sådana tvådimensionella CT bilder från aktuellt betongprov visas i Figur 20. De horisontella tvärsektionsbilderna i delfigur (a) har 1166×1090 bildpunkter (pixels), medan bilderna i (b) med vertikala tvärsektionsbilder har 1090×1982 pixels. Hela den analyserade 220 mm höga provkroppen med en diameter på 100 mm kan här beskrivas av totalt 1982 bilder tagna med ett höjdintervall på 0,111 mm. De CT bilder som visas i Figur 20 består av 255 intensitetsnivåer som motsvarar olika densiteter inom ett prov. Den ljusare färgen representerar en högre täthet i materialet medan mörkare färg representerar material med lägre densitet. Att här särskilja de fyra huvudbeståndsdelarna i provkroppen, det vill säga ballast, cementpasta, luftporer och stålfibrer, innebär att den färgskala (eller gråskala) som motsvarar materialens respektive täthet måste definieras, baserat på att stålfibrerna är de ljusaste punkterna i tvärsnittet medan de mycket mörka områdena är tomrum,

eller luftporer, se Figur 20. De mellanliggande grå områdena utgörs av ballast (ljusare) och cementpasta (mörkgrå), som också innehåller ballastens minsta fraktioner vilka är svåra att särskilja beroende på upplösningen. Den tredimensionella representationen från CT analysen kan också visualiseras som tredimensionella volymer, så som visas i Figur 21. Det är här möjligt att visa provkroppens utsida eller ett godtyckligt snitt genom densamma, men det är går också att välja ett begränsat täthetsspektrum så att till exempel endast stålfibrerna visas.



**Figur 20:** Betongcylinder, 220 mm hög och med 100 mm diameter; (a) horisontella tvärsnitt och (b) vertikala tvärsnitt.

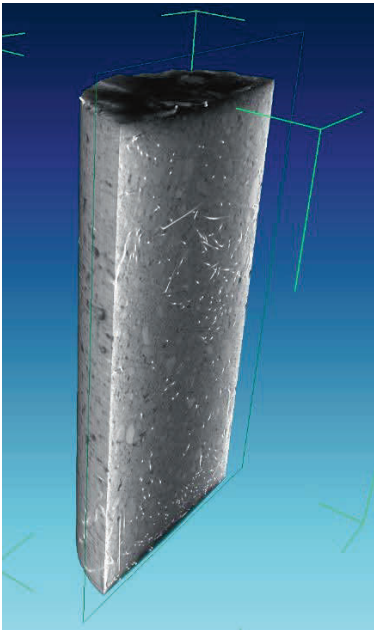




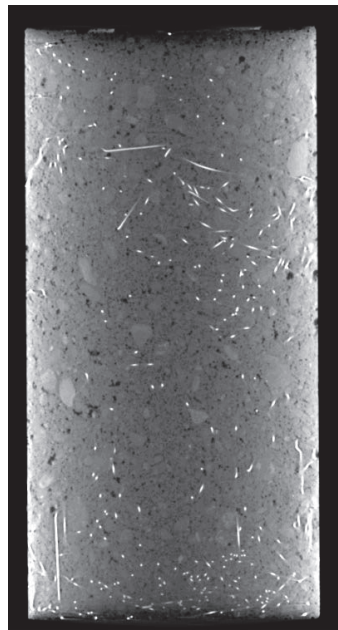
(a)



(b)



(c)



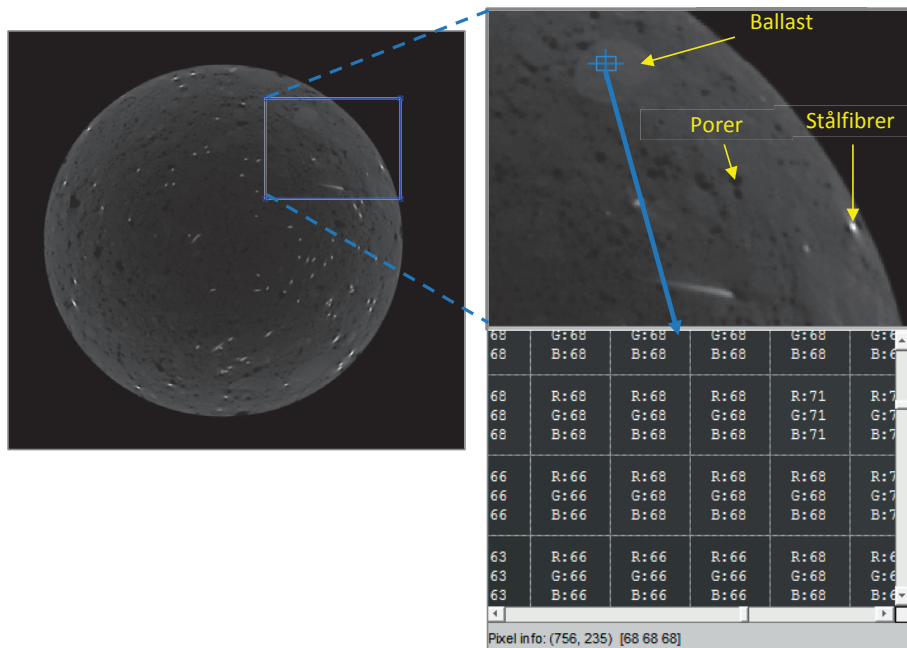
(d)

**Figur 21:** Tredimensionell visning av betongcylinder; (a) yttre struktur, (b) fördelning av stålfibrer, (c) vertikalt mittvärsnitt, och (d) en planvy av en inre sektion.

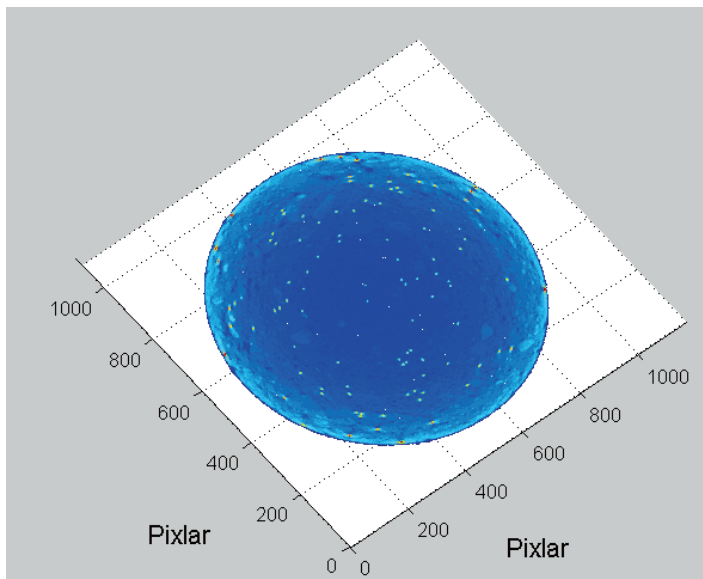
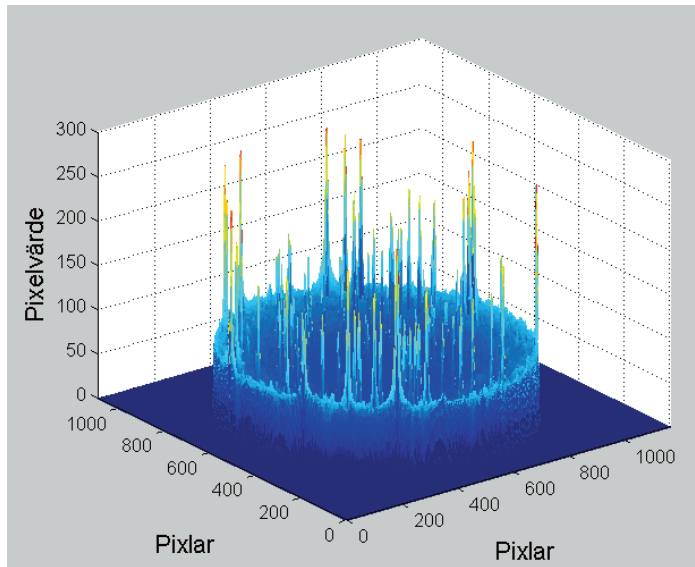
## 4.2 Identifiering av materialdelar utifrån CT bilder

Innan en CT bild kan delas upp i beståndsdelar genom definition av tröskelvärden och gränsvärden som motsvarar stålfibrer, cementpasta, ballast och tomrum måste bilderna genomgå numerisk förbehandling, vilket genomförs med MATLAB. Varje tvådimensionell bild representeras av en matris där varje pixelvärde motsvarar dess ljushet i bildens gråskala. Med det numeriska verktyget *Pixel Region Tool* i MATLAB kan de delar i en matris som motsvarar en grupp av bildpunkter i extrem närbild studeras, se Figur 22. I den här visade bilden är målpunkten ett ballastkorn och pixelvärdena representerar dess ljushet och därmed relativa täthet

Uppdelning i beståndsdelarna stålfibrer, ballast, cementpasta och hålrum görs genom att tröskel- och gränsvärden för respektive material identifieras genom jämförelser mellan bild och numeriska värden. För det exempel som visas i Figur 22 ses att de pixlar som tydligt representerar ballastkornet alla har en ljushet inom 66-71 vilket således ska ligga i det intervall som här representerar ballast, det vill säga stenmaterial. Gränsvärden mellan ballast/sten och cementpasta är oftast svårast att fastställa medan stålfibrerna generellt representeras av mycket höga numeriska värden på grund av materialets höga densitet, se Figur 23 där de numeriska pixelvärdena plottats i ett tredimensionellt diagram. Notera likheten mellan diagrammets basyta och motsvarande CT bild i Figur 22. För tomrum/luftporer ansätts ett tröskelvärde något över nollnivån för att fånga upp numeriskt avrundade värden och eventuella effekter av skuggning som kan ha uppstått under tomograferingen. Ett problem med till exempel som här cirkulära provkroppar är att de kvadratiska eller rektangulära bilderna även omfattar omgivande luft, som alltså ges samma pixelvärden som inre håligheter och porer. I ett första behandlingssteg måste därför pixelvärden som representerar yttre luft särskiljas från de inne i materialet för att inte medtas i nästa analysstegs summering och areaberäkning. Detta görs med en särskild stegfunktion som har programmerats i MATLAB och med utgångspunkt i varje bildhörn radvis reducerar bort alla punkter som förekommer fram tills att en ljusare pixel representerande solitt material nås.



**Figur 22:** Identifiering av numeriska värden representerande ett bildelement, här i ett ballastkorn.

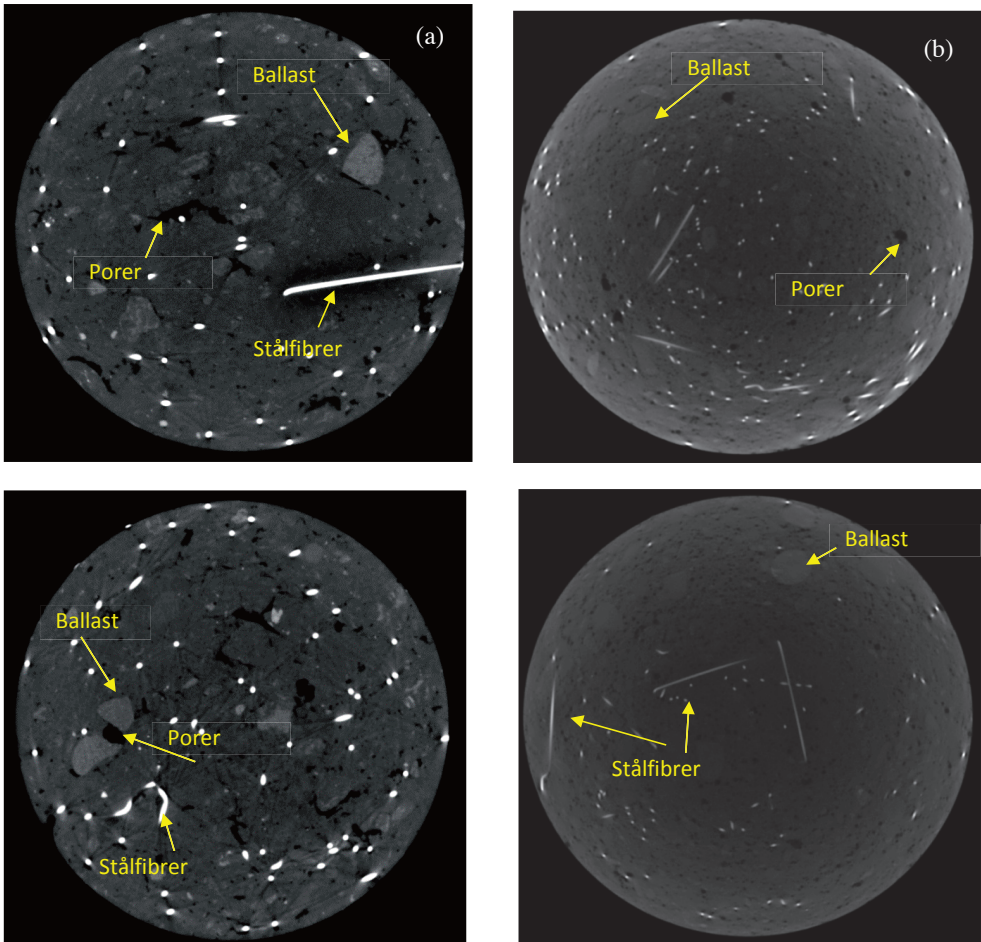


**Figur 23:** Tredimensionell plot av numeriska pixelvärden i representationen av en CT bild samt en planvy av samma diagram.

### 4.3 Kvalitativ analys

Det ovan beskrivna analyssteget med identifiering av materialdelar utifrån CT bilderna är också av relevans för den kvalitativa analysdel som ofta också genomförs, genom att materialets uppbyggnad och

struktur studeras för att kunna härleda respektive beståndsdel till ett specifikt intervall av bildens gråskala. Möjligheten att studera detaljer i provkroppens materialstruktur begränsas av den upplösning som finns i CT bilderna och den tredimensionella modell som de sammantaget beskriver. En av de viktigaste begränsningarna med att använda datortomografi är således storleken på de minsta möjliga volymselement (voxels) som kan användas för att beskriva provkroppen. Variation i provstorlek, form och sammansättning, tillsammans med tillgänglig datalagringskapacitet och egenskaperna hos röntgenstrålningskällan styr detta. Av sådana praktiska skäl är det nödvändigt att undersöka relativt små prover vilket påverkar möjligheterna att upptäcka hålrum, sprickor och imperfektioner i en kvalitativ analys. Ett exempel på effekten av provstorlek på upplösningen visas i Figur 24 där CT bilder från analys av en provkropp med mindre diameter (a) jämförs med den tidigare visade i Figur 20-23.

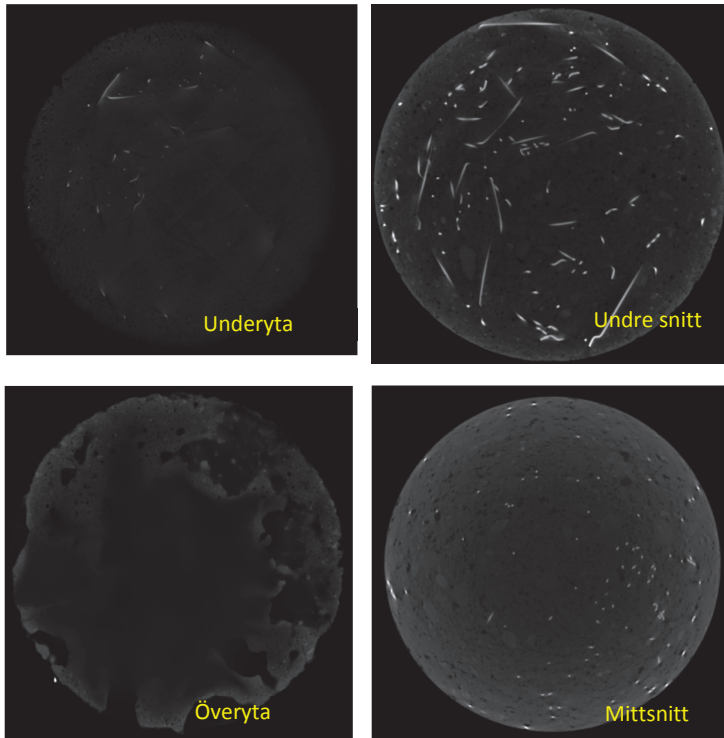
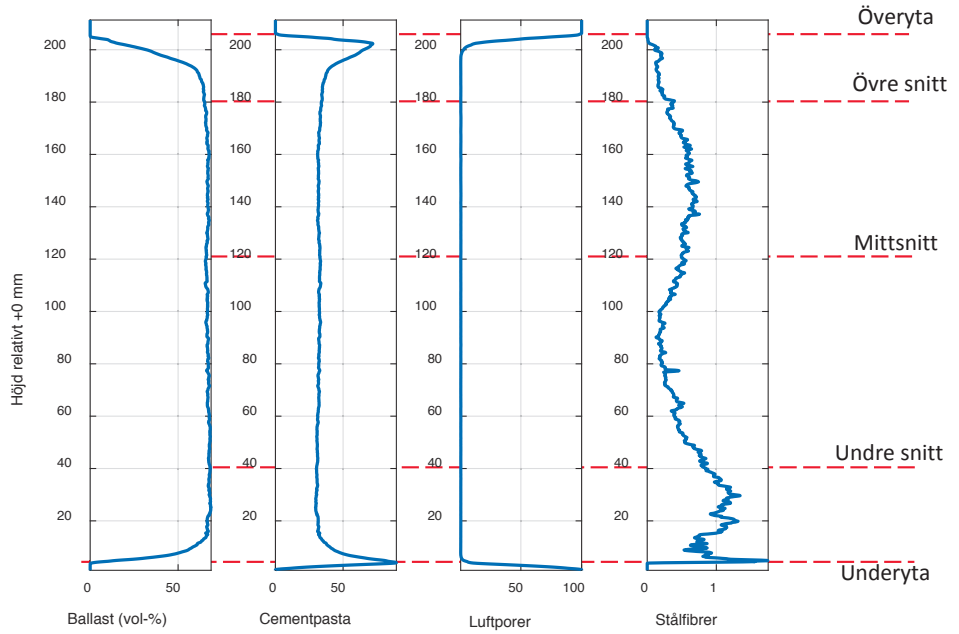


**Figur 24:** CT bilder av (a) utbördad betongkärna med 50 mm diameter och voxelstorlek 67,2 µm samt (b) av en betongcylinder med 100 mm diameter, och voxelstorlek 111 µm.

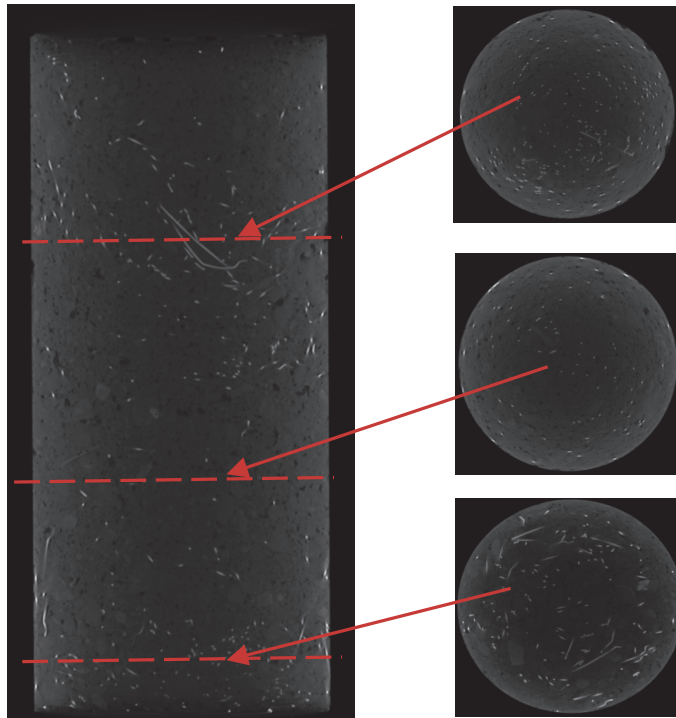
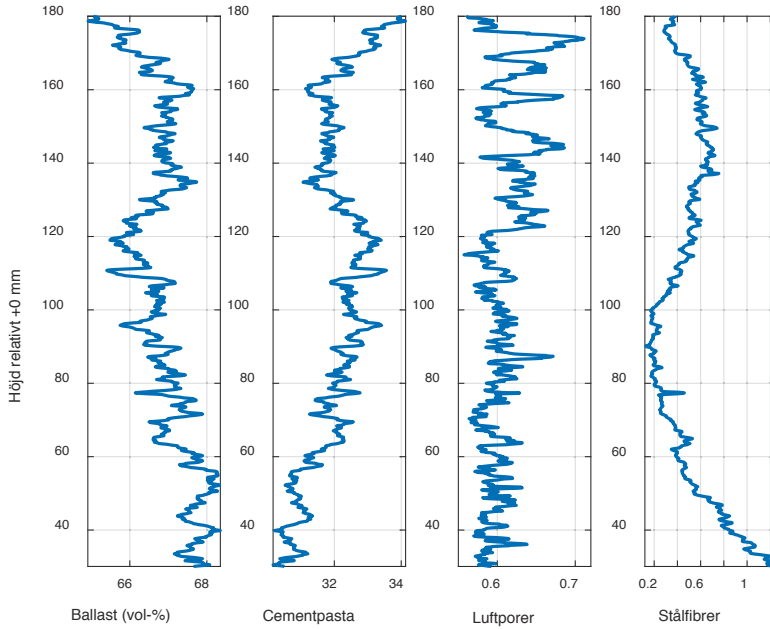
#### **4.4 Kvantitativ analys**

Som nämndes i avsnitt 4.2 kan fördelningarna av stålfiber, ballast, cementpasta och luftporer, och deras variation över provkroppens höjd, beräknas genom summering av de bildelement tillhörande respektive materialtyp som representerar digitala CT bilder i två dimensioner. Ett exempel visas i Figur 25, där variationerna i delmaterialens andelar längs den 220 mm höga provkroppen visas. Varje punkt i diagrammen har beräknats från areaförhållanden i motsvarande 111  $\mu\text{m}$  tjocka skiva som representeras av en tvådimensionell CT bild. Det kan ses att kurvorna för cementpasta och luftporer visar mycket höga toppar vid de övre och undre ytorna jämfört med vid mittdelen. Detta beror delvis på att cementpasta här täcker ballastkornen och att luftporerna vid ytan är oslutna och i direkt kontakt med den omgivande luften, men också att de fria ytorna orsakar störning vid tomograferingen. För att eliminera inverkan av sådana eventuella kanteffekter fokuseras ofta analysen av cylindriska provkroppar på mittnittet, genom att exkludera de översta och understa delarna av provkroppen. I aktuellt fall har de översta och understa 10 mm ej tagits med i slutanalysen, vilket ses i Figur 26.

En beräkning visar att de uppskattade genomsnittliga andelarna stålfiber, cementpasta, ballast och luftporer är ca 0,53 %, 32,0 %, 66,9 % och 0,61 %. En jämförelse mellan kurvorna visar att variationerna i andel ballast och cementpasta har en klar korrelation, dock med en viss skillnad som motsvarar variationen i andelen hålrum/porer. Den variation som visas är här troligen ett resultat av gjutningsprocessen där formen fylldes för hand och vibrerades varsamt. Det syns även i diagrammet och de tillhörande CT bilderna att fördelningen av stålfibrer är ojämn, med en viss koncentration mot provcylinderns botten. Medelvärdena av stålfiberinnehåll längs höj dintervallen 6-40, 40-120, och 120-180 mm är ca 1,0 %, 0,4 % och 0,5 %. Således är provkroppens stålfiberinnehåll ca 41  $\text{kg}/\text{m}^3$ , dock ojämnt fördelat och sektionsvis varierande inom ca 31-78  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Ett provningsprotokoll för den här analyserade provkroppen ges som exempel i Bilaga A.



**Figur 25:** Variation i betongsammansättning med höjd för betongprovkropp med 100 mm diameter.



**Figur 26:** Variation i betongsammansättning med höjd för betongprovkropp med 100 mm diameter samt bilder av dess yttre struktur och tre tvärsnitt längs dess höjd.





# Kapitel 5

## Exempel

Baserat på den analysprocedur som beskrivs i Kapitel 4 ges här ytterligare fyra exempel på resultat för analyserade betongcylindrar. Syftet är att demonstrera hur metoden med datortomografi kan användas för att beskriva provkroppars materialsammansättning och hur beräkning av variationer i volymfraktionerna hos delmaterialen genomförs och presenteras för olika typer av betongprover, här exemplifierat med gjutna prover och utborrade sprutbetongkärnor.

### *5.1 Spräckt provkropp av fiberbetong*

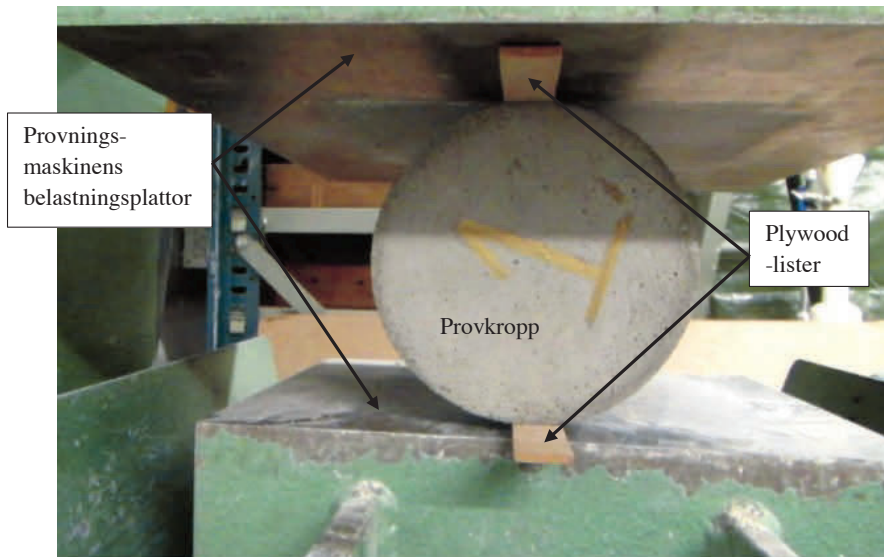
I det första exemplet redovisas undersökning av en 200 mm lång, gjuten betongcylinder med 100 mm diameter. Betongblandningen har valts för att motsvara en tidigare laboratorieundersökning av fiberarmerad sprutbetong som genomfördes av Bryne (2014), se Tabell 1. Efter gjutning har de cylindriska provkropparna härdats vid rumstemperatur under 7 dagar innan eventuell provning och tomografiundersökning. Totalt gjöts samtidigt tre provkroppar varav datatomograferingen av den första redovisades och presenterades i Kapitel 4. Här ges resultaten för en provkropp som genomgick spräckbelastning innan datortomograferingen genomfördes. Syftet med provningen var att åstadkomma en spricka att studera genom tomografiundersökning, i en fortfarande sammanhållen fiberbetong. Spräckprovning valdes för att det är svårt att korrekt genomföra, styra och avsluta en ren dragprovning. Provet placerades horisontellt mellan belastningsytorna i en tryckprovningssmaskin, så som visas i Figur 27. Tryckbelastning anbringades sedan diametralt och likformigt utmed cylinderns längd tills tydliga sprickor uppträdde längs kortsidorna. För att kunna lägga på en jämn och koncentrerad spänningsfördelning liknande en linjelast över tvärsnittet användes belastningslinjaler i form av remsor av plywood som placerades mellan provet och belastningsplattorna.

Efter uppspräckningen undersöktes provkroppen med datortomografering, så som beskrivits i föregående kapitel. Från de erhållna CT bilderna ges en tredimensionell visualisering av provet så som visas i Figur 28. Efter provningen syns en lokal intryckning efter belastningslinjalen, se Figur 28(a). Sprickans utbredning genom provet visas i Figur 29 med ett snedskuret snitt genom cylindern. Det syns att sprickvidden avtar nedåt i provet där fiberinnehållet är högre, liksom för provkroppen redovisad i Kapitel 4 – se till exempel Figur 25. Samtidigt uppträder också minst två sekundärsprickor, se Figur 29(b). I den uppförstorade detaljbilden i Figur 30 syns tydligt att sprickans vidd minskar då den passerar ett område med korsande stålfibrer. Områdena med lägre fibertäthet vid den visade ytans topp och botten verkar således vara något mer känsliga för sprickbildning än den mellersta delen. Fiberfördelningen tycks också ha inverkan på sprickmönstret. För den spräckta provkroppen redovisas här inte

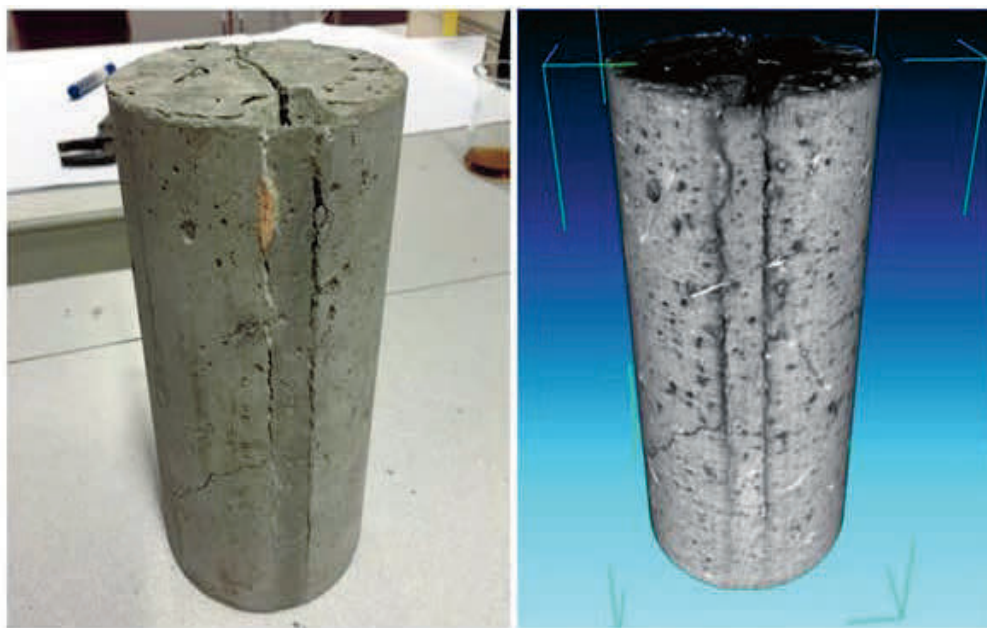
fördelningen av stålfibrer, ballast cementpasta och hålrum så som gjordes för den intakta cylindern i Kapitel 4. Anledningen är att de relativt vida och oregelbundna sprickornas tvärsnittsareor, och volym, är betydligt större än det som sammantaget kan uppmätas för porsystemet.

**Tabell 1:** Betongsammansättning enligt Bryne (2014).

<b>Delmaterial</b>	<b>Innehåll (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cement	495
Vatten	220
Ballast, 0-8 mm	1540
<b>Tillsatsmaterial</b>	
Silika U/D	20
Glenium	4
<b>Stålfiberarmering</b>	
Stålfibrer, raka med ändkrokar (D30/05)	50



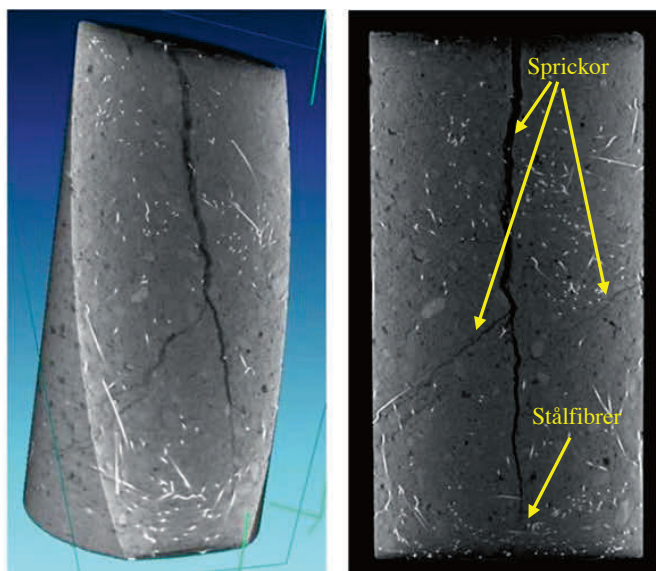
**Figur 27:** Provkropp riggad för spräckprovning.



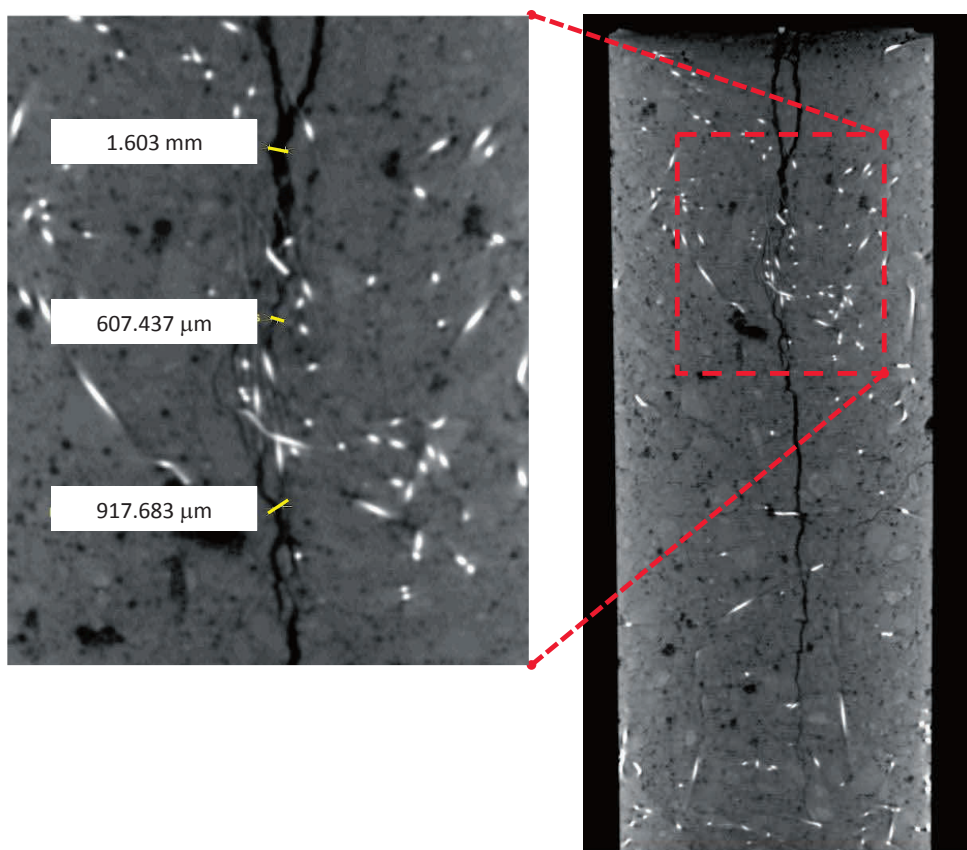
(a)

(b)

**Figur 28:** Spräckprovad betongcylinder; (a) foto och (b) tredimensionell CT bild.



**Figur 29:** Spräckt betongcylinder; (a) tredimensionell CT bild med snett snitt genom cylindern och (b) tvådimensionellt vertikalsnitt.



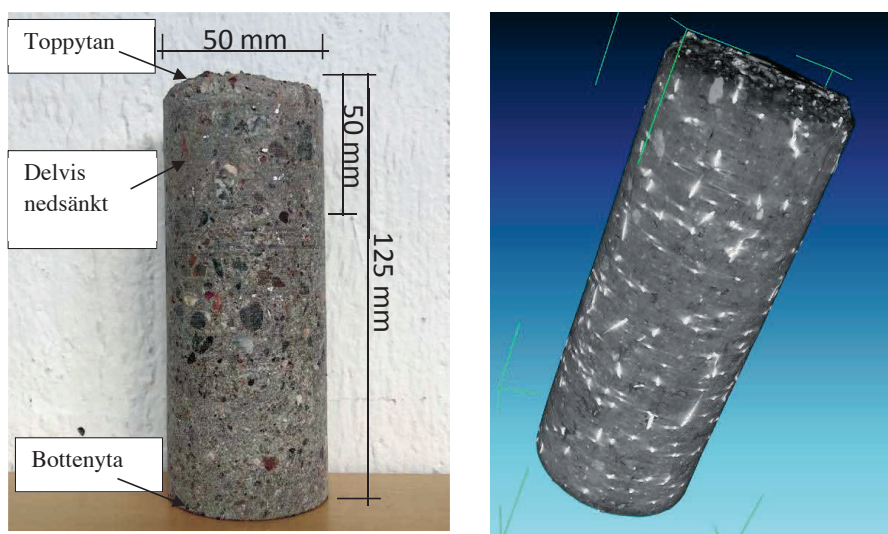
**Figur 30:** Uppförstorad detalj visande sprickvidder och stålfibrer kring och över sprickan.

## 5.2 Borrkärna från sprutbetongbalk

Det här andra exemplet är en borrkärna tagen från en sprutbetongbalk. Denna har sprutats i laboriemiljö och använts som provkropp i ett långtids observationsprojekt med stålfiberarmerad sprutbetong utsatt för olika miljöbelastningar, till exempel partiell nedsänkning i strömmande vatten, se Nordström (2005). Cylinderns diameter är 50 mm och dess längd 125 mm, varav de nedersta 50 mm har varit nedsänkt i vatten. Ett foto och en tredimensionell CT bild av provkroppen visas i Figur 31, och här ska observeras att den nu något nedbrutna yta som varit i kontakt med vatten här har vänts uppåt. Tvådimensionella sektioner i form av CT bilder visas i Figur 32 där delfigurer (a) är tagna ca 50 mm från den yta som varit i kontakt med luft medan figurerna i (b) är från snitt belägna ca 5 mm från den i vatten nedsänkta ytan. Det kan ses att den del som varit nedsänkt i vatten visar en signifikant skillnad i mikrostrukturen jämfört med den för luften exponerade delen.

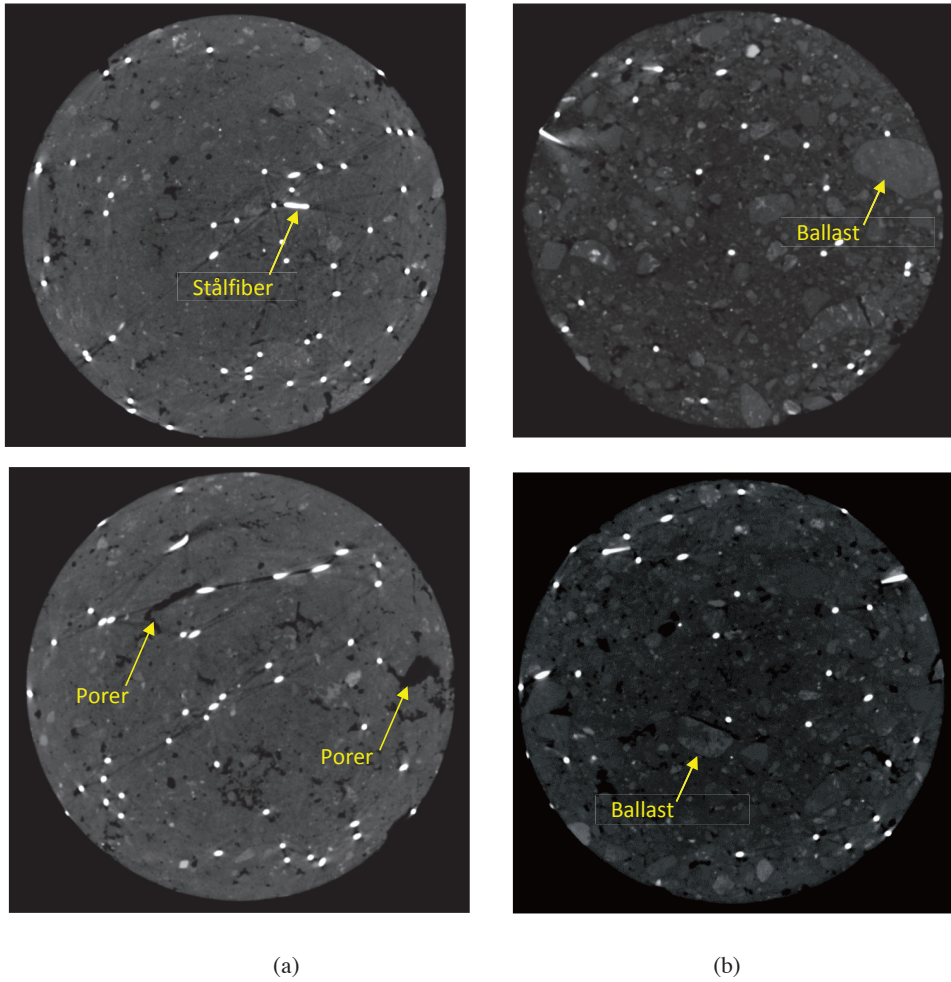
Stålfibrernas läge och orientering i borrkärnan visas i den tredimensionella bilden i Figur 33 där det framgår att fibrernas orientering är kraftigt varierande. Fördelningarna av stålfibrer, ballast, cement-

pasta och luftporer över kärnans höjd har beräknas genom numerisk bearbetning av digitalt representerade tvärsektionsbilder, enligt den procedur som beskrivs i avsnitt 4.4. Resultatet presenteras i Figur 34, och som även var fallet med de i Figur 25 visade resultaten uppvisar kurvorna stora variationer nära provkroppens botten och överyta. Det bör noteras att särskilt vid den nedbrutna yta som varit i kontakt med vatten (här vänd uppåt) är detta korrekt på grund av ballastförlust men det kan här också finnas randeffekter som gör resultaten något osäkra. För att fokusera på provkärnans mellandel och bortse från eventuella randeffekter visas här även i Figur 35 fördelningarna för en avgränsad del av kärnan, från 10 mm till 110 mm höjd över bottenytan. De genomsnittliga volymsandelarna stålfibrer, cementpasta, ballast och luftporer över denna höjd har beräknats till är 0,92; 36,15; 62,00 och 0,94 vol-%.



**Figur 31:** Borrkärna av sprutbetong.

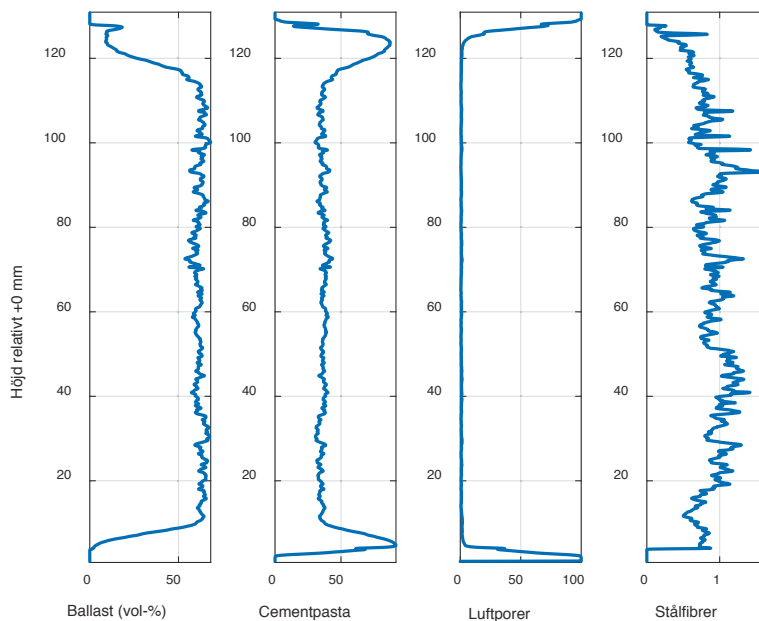




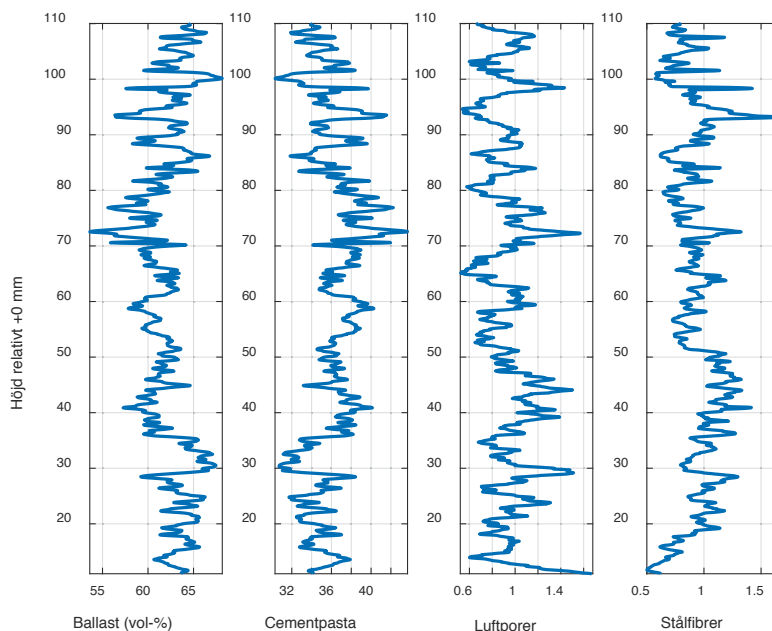
**Figur 32:** Tvådimensionella tvärsnitt av sektioner som varit (a) i kontakt med luft och (b) i vatten.



**Figur 33:** Tredimensionell bild visande stålfibrerna i provkroppen.



**Figur 34:** Variationer i betongsammansättning över den 125 mm långa provkärnan.

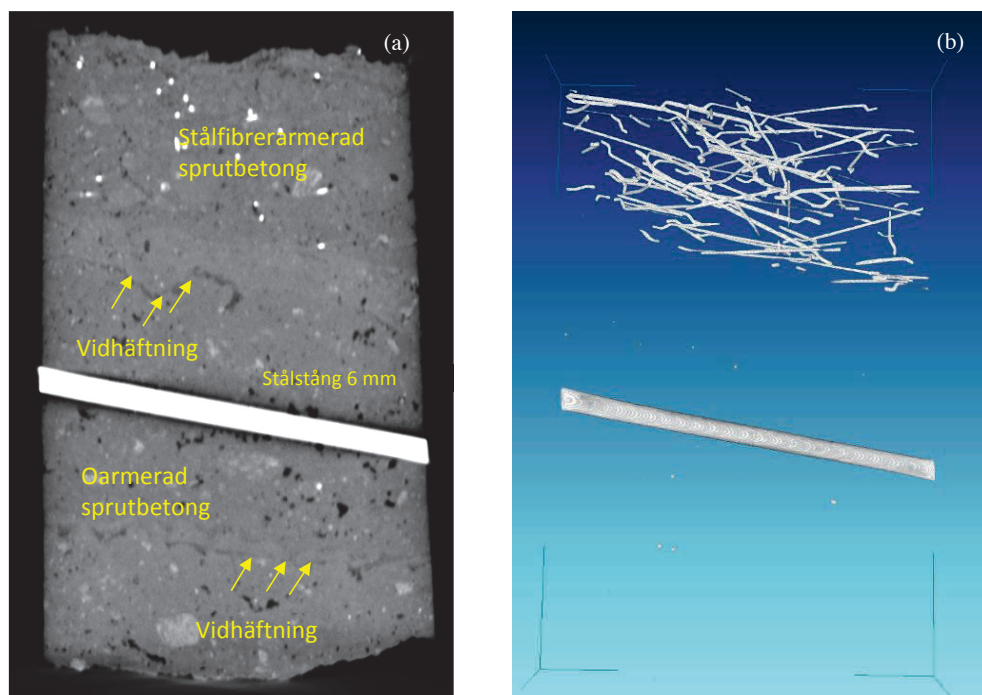


**Figur 35:** Variationer i betongsammansättning i 10-110 mm längd av provkärnan (jmf Figur 34).

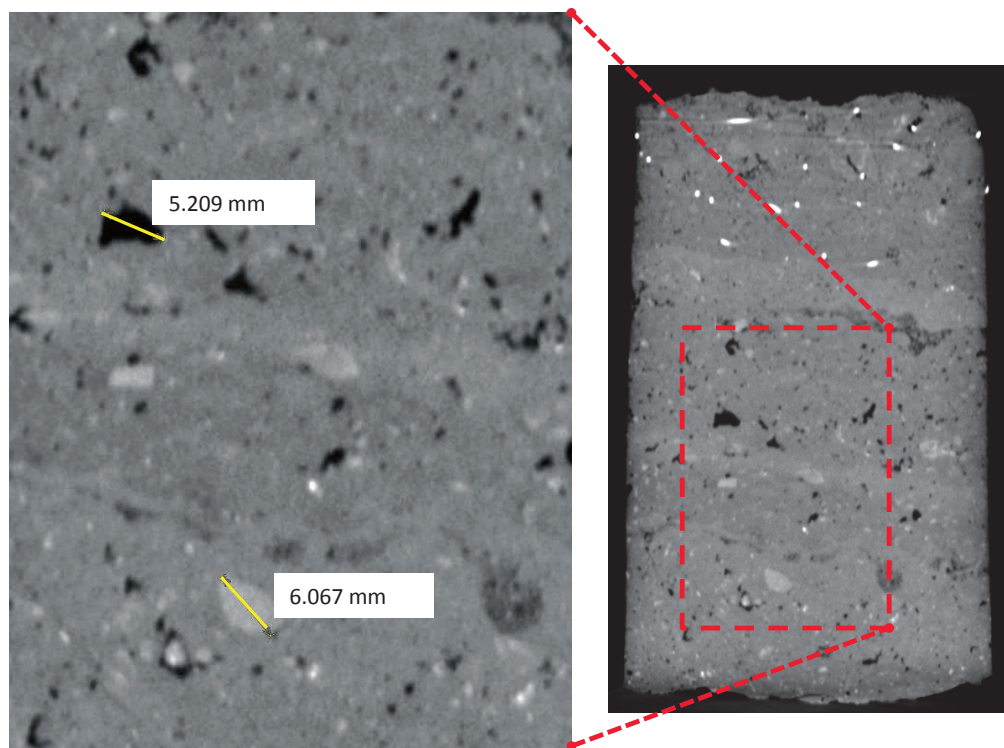


### 5.3 Sprutbetongkärna från tunnel

Det här exemplet redovisar en utborrard sprutbetongcylinder, bestående av två lager. Först ett tjockare lager utan stålfibrer men med nätarmering. Ovanpå detta finns ett tunnare lager stålfiberarmerad sprutbetong. Provkärnan visar ingen brottyta mot berg utan det får här antas att dragbrott i betongen har skett vid utdragnig av kärnan. Den mest grundläggande egenskapen hos sprutbetong är dess förmåga att vidhäfta till en yta, antingen en bergyta eller som här mot ytan hos tidigare sprutad betong. Armering av sprutbetong kan i princip ske på två sätt, vilka alltså båda representeras i den aktuella kärnan. Syftet är oftast att ge sprutbetongen en seghet vid brott efter stora deformationer och/eller kapacitet att ta upp böjande moment och koncentrerade krafter från till exempel bergbultar. En tvärsnitt av den aktuella provkärnan visas i Figur 36(a) där en sektion av det 6 mm tjocka armeringsnätet syns tillsammans med stålfibrerna i den övre sektionen. Det går också att urskilja två gränsskikt med vidhäftning betong-betong. Troligen har först ett lager sprutats på bergytan varefter nätarmering har monterats och översprutats. Detta har sedan täckts av ett lager stålfiberarmerad betong, men då borrkärnans ursprung och orientering är okänd kan proceduren ha varit den omvända, med fiberarmerad betong närmast bergytan. I den tredimensionella bilden i Figur 36(b) visas endast stålmaterialiet, det vill säga sektionen av armeringsnätet samt stålfibrerna. Här ses att fibrernas orientering i stort sammanfaller med tunnelytans riktning, det vill säga fibersprutbetongen är anisotrop med en betydande armeringseffekt i ytplanet men inte i tjockleksriktningen. Figur 37 visar med en uppförstorad del av betongkärnan hur mätning i CT bilderna kan används för att kvalitativt tolka detaljer i materialet, här representerat genom att peka på en ca 6 mm stor ballaststen och en mycket stor luftpor av nästan samma storlek.



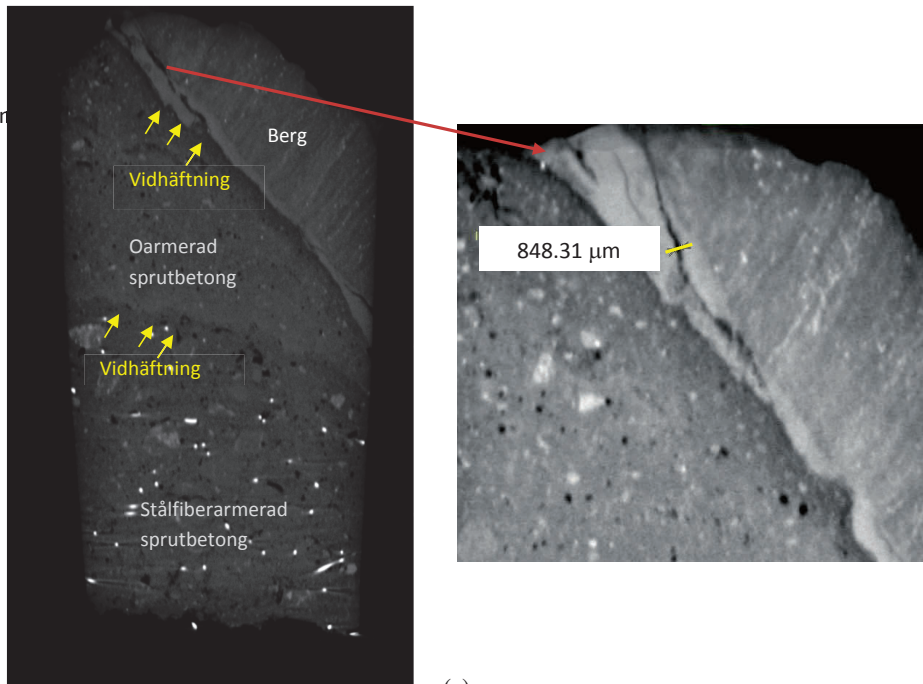
**Figur 36:** Borrkärna med armerad och oarmerad sprutbetong; (a) tvådimensionellt tvärsnitt och (b) tredimensionell översikt av sprutbetongens innehåll av stålfibrer och nätarmering.



**Figur 37:** Uppförstorad detalj visande dimensionerna på ballastkorn och stor luftpor.

#### **5.4 Sprutbetongkärna med berg från tunnel**

I detta fjärde och sista exemplet visas en borrkärna innehållande sprutbetong och berg. I ett skikt närmast berget är dessutom sprutbetongen oarmerad medan dess yttre lager innehåller stålfibrer, se Figur 38. Provkärnan innehåller således två vidhäftande gränsskikt, mellan sprutbetong och berg samt mellan två betonglager sprutade vid olika tillfällen. Trots att det finns ett antal etablerade testmetoder för att uppskatta vidhäftningsstyrkan mellan sprutbetong-berg och betong-betong vid till exempel pågjutning så finns det relativt få detaljerade studier av hur gränsskiktets utseende och egenskaper påverkar den hållfastheten. Som exemplet visar så är det möjligt att använda den här typen av resultat från analys med datortomografi som komplement till undersökning med till exempel svepelektron-mikroskop av mikrostrukturen i övergångszonen mellan berg och sprutbetong, se till exempel undersökningen av Bryne (2014). I Figur 38(a) syns gränsskikten tydligt och det syns även en spricka i berget. Det ska noteras att borrkärnan har tagits i ett parti där bergytan varit lokalt kraftigt vinklad gentemot tunnelväggens medellinje. I de tredimensionella bilderna visas borrkärnans yttre struktur (a) och det innehåll av stålfibrer som finns i kärnans yttre del (c). Fibernas orientering ger här en betydligt mer isotrop sprutbetong jämfört med den föregående studerade borrkärnan, se Figur 36.



(a)



(b)



(c)

**Figur 38:** Borrkärna med armerad och oarmerad sprutbetong samt berg; (a) tvådimensionellt tvärsnitt, (b) tredimensionell översikt och (c) sprutbetongens stålfiberinnehåll.



# Kapitel 6

## Slutsatser

Den laborativa pilotstudie som har genomförts visar hur datortomografi kan användas som undersökningsmetod i laboratorium för provkroppar av betong avsedd att användas i tunnlar. De presenterade resultaten demonstrerar hur metoden tillämpas vid undersökning av gjuten betong såväl som av utborrade provkärnor av sprutbetong. Metoden har visat sig vara mycket väl lämpad för att beskriva fördelning och orientering av stålfibrer i betongen. Det har också med några exempel visats hur gränsskikt mellan berg-betong och betong-betong från olika sprutetapper kan detekteras och detaljstuderas. De exempel som genomförts visar också hur fördelningen av luftporer och ballaststenar kan beskrivas och studeras. Det visade sig vara relativt svårt att tydligt göra åtskillnad mellan cement och de mindre ballastfraktionerna och därför har här valts att redovisa dessa som en kombinerad materialfas som benämns cementpasta. Den tomografiutrustning som finns hos KTH Bygghälsa har tidigare använts för att analysera prover av asfaltbetong och bitumenmaterial. Några exempel från det arbetet ges för att visa möjliga sätt att redovisa insamlad undersökningsdata. Det finns också flertalet dokumenterade tomografiundersökningar av betong och cementbaserade material, även innehållande stålfibrer. Det som är unikt med den studie som här redovisas är att fokus ligger på att studera betong av den typ som används vid anläggningsbyggande i berg och tunnelkonstruktion, och särskilt då sprutbetong där inga publicerade undersökningar har hittats. Många publicerade studier är på mikronivå med mycket små provkroppar av cementpasta, men här fokuseras på möjligheterna att analysera laboratorieprov av normalstorlek och betongkärnor borrade direkt ur befintliga konstruktioner.

### *6.1 Metodens möjligheter*

De exempel som redovisas i Kapitel 4 och 5 visar att tekniken och utrustningen har stor potential för framtida arbete med att skräddarsy material för bergbyggande och det bör även vara möjligt att genom regelbunden provtagning och analys följa nedbrytning av betongmaterial i fält. Teknikens främsta fördel är möjligheten att studera inre materialstrukturer på ett sätt som inte går vid olika typer av förstörande provning. Med sådan kunskap kan betongmaterialet optimeras för användning vid bergbyggande, med bland annat sikte på kostnadseffektiva, uthålliga och säkra tunnlar och bergum.

De studier som här sammanfattas i Kapitel 3 är grupperade efter inriktning och fokus, där betongprovkroppar belastade till brott är den första kategorin. Här refereras till studier med tryckbelastning, även triaxiellt, dynamiskt och cykliskt samt i form av spräckbelastning. För den inriktning som ges i föreliggande rapport så är särskilt spräckprovning, som är ett mer praktiskt provningsätt än ren dragbelastning, av intresse för att studera spräckors uppkomst och propagering.

Även tryckbelastning är dock intressant eftersom det kan leda till kompression och förändringar i betongmaterialets porsystem. Studier av luftporer och porsystem är av särskilt intresse eftersom detta påverkar genomsläppligheten av vatten och risken för frostsador. De undersökningar som sammanfattas här omfattar både normal- och höghållfast betong och inriktas huvudsakligen på att beskriva fördelningen av olika stora luftporer. Det finns också studier som kartlägger porsystem, dess väg och "slingrighet" eller "krokighet" genom materialet.

Stålfiberinnehåll, fibrernas fördelning och orientering är centralt för de typer av gjuten och sprutad betong som ofta används i tunnlar och undermarkskonstruktioner i berg. I de arbeten som hittats och refereras har dock fokus mestadels varit på fiberbetongs tillämpningar i betonggolvs och liknande, även i form av självkompakterande betong. För betong i tunnlar är även risken för nedbrytning av stort intresse och därmed inverkan av temperatur och fukt. I den litteratur som här studeras finns exempel på undersökningar avseende urlakning, uttorkning, sulfatangrepp och fiberkorrosion, och även på extrem temperaturpåverkan i samband med brandbelastning.

## 6.2 Nuvarande kunskapsläge

Den begränsade pilotstudie som här har genomförts visar att det redan i det här tidiga skedet av metodutvecklingen går att genomföra praktisk analys av betongprovkroppar med den typ av datortomografiutrustning som finns hos KTH Bygghälsa. De resultat som kan inhämtas kan användas både vid kvalitativ och kvantitativ utvärdering av provkroppar, från laboratorium eller fältmiljö. De kvantitativa data som kan beräknas är främst fördelningar av de olika delmaterialen i en studerad provkropp, det vill säga variationer i innehållet av cementpasta, ballast, stålfibrer och luftporer. Resultaten kan redovisas som volymprocentandelar och deras variation med en betongprovkroppens höjd, så som visas i Figurerna 25, 26, 34 och 35. Denna typ av data ger information om medelinhåll av respektive delmaterial och såväl systematiska som lokala variationer och deras läge. Det går dock inte att till exempel numeriskt utläsa stålfibrers orientering samt variationer i storlek hos ballastmaterial och luftporer. Däremot kan en kvalitativ analys ge sådan kompletterande information. Utifrån studier och jämförelser av sekvenser av horisontella tvärsnittsbilder kan ballaststenar, stålfibrer och system av luftporer följas genom en provkropp, se Figurerna 20, 24-26 och 32. Det går också att se hur sprickplan passerar genom materialet, hur sprickor viker av kring ballastkorn och hur stålfibrer överbryggar sprickor, se Figur 30. Det går också att studera hur två motgjutna material interagerar i ett gränsskikt, se Figurerna 36 och 38. Det är möjligt att lägga valfritt antal snitt genom en tredimensionell modell av en provkropp och där studera de olika delmaterialen och eventuella lokala avvikelser, se Figurerna 21 och 29. Det går även att generera tredimensionella bilder av delmaterialens orientering, vilket dock i nuläget har visat sig kunna göras tydligast för stålfibrer, så som visas i Figurerna 21, 33, 36 och 38.

Ett exempel på hur denna typ av analysresultat kan redovisas ges i Bilaga A. Två stycken protokoll visas där, bägge avseende den provkropp som används som exempel i Kapitel 4 för att beskriva och kommentera metodens huvudsteg och analysmoment. Det första protokollet sammanställer kvantitativa analysresultat och ger på den första sidan en geometrisk beskrivning av aktuell provkropp. Här finns också information om vilken del av volymen som har undersökts med datortomografering och vilken upplösning registrerad data har. Den andra sidan ger en grafisk visning av delmaterialens variation över provkroppens höjd, på samma sätt som i Figurerna 25, 26, 34 och 35. Protokollet avslutas med att beräknade min, max och medelvärden tabelleras för respektive delmaterial. Det andra protokollet ger en begränsad men översiktlig kvalitativ beskrivning av provkroppen. De slutsatser och kommentarer som ges på första sidan refererar till de CT bilder som visas på den andra sidan. En tredimensionell översiktssbild ges tillsammans med motsvarande volymbild över endast stålfibrerna i materialet. Detta

följs av fyra tvådimensionella bilder visande utvalda horisontalsnitt. Den beskrivning som ges ordnas under generella rubriker och för respektive delmaterial, huvudsakligen kortfattat och i punktform. Tanken är att protokollen kan användas för att redovisa endera typen av utvärdering, eller ges tillsammans då en mer ingående utredning och beskrivning är önskvärd.

### **6.3 Behov av fortsatt utveckling**

Utifrån de tidigare erfarenheterna med analys av provkroppar av asfaltbetong, den litteraturstudie som här genomförts och de analyser som här presenteras i Kapitel 4 och 5 har några önskemål att beakta vid fortsatt metodutveckling kunnat identifieras. Det handlar dels om att öka precisionen då det gäller att kunna särskilja och visa de olika delmaterialen och dels om att hitta sätt att anpassa metoder som utprovats av andra forskare till att kunna användas för att också analysera laboratorieprov av normalstorlek och betongkärnor borrade direkt ur befintliga konstruktioner. Att kunna genomföra följande typer av analyser och utvärderingar är det önskvärt att kunna:

- Ge en beskrivning på stålfibrernas fördelning efter tredimensionell orientering.
- Beskriva fördelning av ballast med avseende på ingående materialfraktioner.
- Beskriva fördelningen av luftporer efter storlek.
- Ge en kvantitativ beskrivning på porsystemens egenskaper med avseende på kontinuitet, avgreningar och slingrighet.
- Kombinera tomografering med sekventiell pålastning i utrustningens integrerade MTS provningsmaskin.
- Genomföra materialstudier av belastad och obelastad betong med olika fukttinnehåll vid olika temperaturförhållanden.

Slutligen så är det viktigt att poängtera att en vidareutveckling och etablering av tekniken som provningsmetod är beroende av att underlag för jämförelser finns. Det rekommenderas därför att ett kostnadseffektivt förfarande för att ta fram översiktsdata, till exempel så som exemplifieras med provningsprotokollen i Bilaga A, tas fram. Att sådana undersökningar genomförs systematisk i större byggprojekt och att resultaten samlas i en öppen databas för att möjliggöra jämförelser. Då särskilt intresse finns kan tekniken också användas i ingående, kompletterande studier för att ge detaljerade kvalitativa beskrivningar av provkroppar från fältet och i laboratorium. Särskilt intressant är det att använda detta i studier av miljönedbrytning och fortplantande skador som uppstår i bruksstadiet.





# Litteratur

Ahmed L. *Models for analysis of young cast and sprayed concrete subjected to impact-type loads*. Doktorsavhandling, KTH Byggvetenskap/Betongbyggnad, Stockholm, 2015.

Ansell A, Holmgren J. *Sprutbetongs krympning - fiberinblandning för bättre sprickfördelning*, Rapport 87, SveBeFo, Stockholm, 2007.

Berger MJ, Hubbell JH, Seltzer SM, Chang J, Coursey JS, Sukumar R, Zucker DS, Olsen K. *XCOM: Photon cross sections database*, National Institute of Standards and Technology (NIST). <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/> (2010).

Bryne LE. *Time dependent material properties of shotcrete*. Doktorsavhandling, KTH Byggvetenskap/Betongbyggnad, Stockholm, 2014.

Bryne LE, Lagerblad B. "Texture and bond at the interfacial zone between rock and sprayed concrete", Proceedings of *fib Symposium - Concrete Structures for Sustainable Community*, Stockholm, 2012.

Desrues J, Chambon R, Mokni M, Mazerolle F, "Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography", *Geotechnique*, 46, 529–546 (1996).

Guarin A, Jelagin D, Kringos N, Birgisson B. *X-ray computed tomography with tension/compression system with climate control*. Report RILEM TC on Mechanism of Cracking and Debonding - TG3 - State of the Art, 2012.

Heiskainen KA, Rhim HC, Monteiro PJM. "Computer simulations of limited angle tomography of reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, 21, 625-634 (1991).

Ketcham RA, Carlson WD. "Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences", *Computers & Geosciences*, 27, 381-400 (2001).

Johns RA, Steude JS, Castanier LM, Roberts PV. "Non-destructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography", *Journal of Geophysics Research*, 98, 1889–1900 (1993).

Ketcham R. *X-ray computed tomography (CT)*, University of Texas at Austin, [http://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/CT.html](http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/CT.html) (2016).

Lagerblad B, Fjällberg B, Westerholm M. *Sprutbetongs krympning – modifiering av betongsammansättning*, Rapport 86, SveBeFo, Stockholm, 2007.

Leung SK, Kry PR, Wong RCK. "Visualization of deformation in unconsolidated Athabasca oil sand", *International Heavy Oil Symposium*, Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, Canada, 1995.

McKetty MH. *X-ray attenuation. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents, Imaging & therapeutic technology*, RadioGraphics 1998.

Nordström E. *Durability of sprayed concrete: steel fibre corrosion in cracks*. Doktorsavhandling, Luleå tekniska Universitet, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser/Konstruktionsteknik, Luleå, 2005.

Onifade I. *Internal structure characterization of asphalt concrete using X-Ray computed tomography*. Examensarbete, KTH Byggetenskap, Stockholm, 2013.

Onifade I, Jelagin D, Guarin A, Birgisson B, Kringos N. "Asphalt internal structure characterization with X-ray computed tomography and digital image processing". *Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials - Proceedings of the International RILEM Symposium*, Stockholm, 2013.

Onifade I, Jelagin D, Guarin A, Birgisson B, Kringos N. "Effect of micro-scale morphological parameters on meso-scale response of asphalt concrete". *Asphalt Pavements - Proceedings of the 12th International Conference on Asphalt Pavements*, Raleigh NC, USA, 2014.

Zweig G. "Real-time X-ray inspection", *Quality Digest Magazine*  
<http://www.qualitydigest.com/magazine/2009/mar/article/real-time-x-ray-inspection.html> (2009).

*X5000 system*, North Star Imaging Inc., Rogers MI, USA, <http://4nsi.com/systems/x5000/> (2015).

*Avizo, 3D image processing package*, <http://www.fei.com/software/avizo3d/> (2016).

*COMSOL Multiphysics*, <https://www.comsol.com/> (2016).

*Image J, Image processing package*, <http://imagej.nih.gov/ij/index.html> (2016).

*Matlab*, The language of technical computing, <http://se.mathworks.com/products/matlab/> (2016).

### **Belastning till brott**

Huang YJ, Yang ZJ, Ren WY, Liu GH, Zhang CZ. "3D In-situ XCT Image based meso-scale fracture modelling and validation of concrete using voxel hexahedron meshing and damage plasticity model", *International Journal of Solids and Structures*, 67-68, 340-352 (2015).

Huang YJ, Yang ZJ, Liu GH. "X-ray computed tomography image-based meso-scale dynamic fracture of concrete under compression: Monte Carlo simulations", *9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-9, Berkeley, 2016.

Landis EN, Nagy EN, Keane DT, Nagy G. "A technique to measure three-dimensional work-of-fracture of concrete in compression", *Journal of Engineering Mechanics*, 125, 599-605 (1999).

Landis EN, Nagy EN. "Three-dimensional work of fracture for mortar in compression", *Engineering Fracture Mechanics*, 65, 223-234 (2000).

Landis EN, Petrell AL, Lu S, Nagy EN. "Examination of pore structure using three dimensional image analysis of microtomographic data", *Concrete and Scientific Engineering*, 2, 162-169 (2000).

Landis EN, Zhang T, Nagy EN, Nagy G, Franklin WR. (2007). "Cracking, damage and fracture in four dimensions", *Materials and Structures*, 40, 357-364 (2007).

Landis E, Bridges M, Bolander J. "3D tomographic imaging applied to split cylinder fracture", *7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-7, Seoul, 2010.

Li Y. *Characterisation of 3D cracks in concrete from XCT Images*. MSc thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, the University of Manchester, 2012.

Piotrowska E, Malecot Y, Marin P, Poinard C, Daudeville L. "From tomographic images to mesoscopic modelling of triaxial behaviour of concrete", *8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-8, Toledo, 2013.

Poinard C, Malécot Y, Daudeville L, Landis EN. "Analysis of X-ray tomographic images of concrete after severe triaxial loading", *7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-7, Seoul, 2010.

Poinard C, Malécot Y, Daudeville L, Landis EN. "Compression triaxial behavior of concrete: The role of the mesostructure by analysis of x-ray tomographic images", *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2011).

Ren WY, Yang ZJ, Sharma R, Zhang CH, Withers PJ. "Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete", *Engineering Fracture Mechanics*, 133, 24-39 (2015).

Sharma R, Ren W, McDonald SA, Yang Z. "Micro mechanisms of concrete failure under cyclic compression: X-ray tomographic in-situ observations", *9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-9, Berkeley, 2016.

Wan K, Xue X. "In situ compressive damage of cement paste characterized by lab source X-ray computer tomography", *Materials Characterization*, 82, 32-40 (2013).

Yang ZJ, Ren WY, Mostafavi M, McDonald SA, Marrow TJ. "Characterisation of 3D fracture evolution in concrete using in-situ x-ray computed tomography testing and digital volume correlation", *8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-8, Toledo, 2013.

### **Porositet och materialstruktur**

Bentz DP, Mizell S, Satterfield S, Devaney J, George W, Ketcham P, Graham J, Porterfield J, Quenard D, Vallee F, Sallee H, Boller E, Baruchel J. "The visible cement data set", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 107, 137-148 (2002)

Diamond S., Landis EN. "Microstructural features of a mortar as seen by computed tomography", *Materials & Structures*, 40, 989-993 (2007).

Gallucci E, Scrivener K, Groso A, Stambanoni M, Margaritondo G. “3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography”, *Cement & Concrete Research*, 37, 360-368 (2007).

Helfen L, Dehn F, Mikulik P, Baumbach T. “Three-dimensional imaging of cement microstructure evolution during hydration”, *Advances in Cement Research*, 17, 103-111 (2007).

Kim KY, Yun TS, Choo J, Kang DH, Shin HS. “Determination of air-void parameters of hardened cement-based materials using X-ray computed tomography”, *Construction and Building Materials*, 37, 93–101 (2012).

Kocur GK, Saenger EH, Vogel T. “Elastic wave propagation in a segmented X-ray computed tomography model of a concrete specimen”, *Construction and Building Materials*, 24, 2393–2400 (2010).

Lu S, Landis EN, Keane DT. “X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete”, *Materials and Structures*, 36, 11-20 (2006).

Manahiloh KN, Muhunthan B, Kayhanian M, Gebremariam SY. “X-Ray computed tomography and non-destructive evaluation of clogging in porous concrete field samples”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 1103-1109, (2012).

Promentilla MAB, Sugiyama T, Hitomi T, Takeda N. “Characterizing the 3D pore structure of hardened cement paste with synchrotron microtomography”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6, 273-286 (2008).

Promentilla MAB, Sugiyama T, Hitomi T, Takeda N. “Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography”, *Cement and Concrete Research*, 39, 548-557 (2009).

Wong RCK, Chau KT. “Estimation of air void and aggregate spatial distributions in concrete under uniaxial compression using computer tomography scanning”, *Cement & Concrete Research*, 35, 1566-1576 (2005).

Yun TS, Kim KY, Choo J, Kang DH. “Quantifying the distribution of paste-void spacing of hardened cement paste using X-ray computed tomography”, *Materials Characterization*, 73, 137–143 (2012).

### **Fiberinnehåll, fördelning och orientering**

Andries J, Van Itterbeeck P, Vandewalle L, Van Geysel A. “Influence of concrete flow on spatial distribution and orientation of fibres in steel fibre reinforced self-compacting concrete”, in *fib Symposium*, Copenhagen, Denmark. 2015.

Fuentes R, Geiker M, Stang H. “Characterisation of fibre content, distribution and orientation to predict fibre reinforced concrete behaviour”, *Nordic Concrete Research*, 52, 1–22 (2015).

Herrmann H, Pastorelli E, Kallonen A, Suuronen JP. “Methods for fibre orientation analysis of X-ray tomography images of steel fibre reinforced concrete (SFRC)”, *Journal of Materials Science*, 51, 3772–3783 (2016).

Ponikiewskia T, Gołaszewski J, Rudzki M, Bugdol M. “Determination of steel fibres distribution in self-compacting concrete beams using X-ray computed tomography”, *Archives of civil and mechanical engineering*, 15, 558–568 (2015a).

Ponikiewskia T, Katzer J, Bugdol M, Rudzki M. “Steel fibre spacing in self-compacting concrete precast walls by X-ray computed tomography”, *Materials and Structures*, 48, 3863–3874 (2015b).

Ponikiewskia T, Katzer J. “X-ray computed tomography of fibre reinforced self-compacting concrete as a tool of assessing its flexural behaviour”, *Materials and Structures*, 49, 2131–2140 (2016).

Suuronen JP, Kallonen A, Eik M, Puttonen J, Serimaa R, Herrmann H. “Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete (SFRC) by X-ray tomography”, *Journal of Materials Science*, 48, 1358–1367 (2013).

Verstrynghe E, Van Steen C, Andries J, Van Balen K, Vandewalle L, Wevers M. “Experimental study of failure mechanisms in brittle construction materials by means of X-ray microfocus computed tomography”, *9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-9, Berkeley, 2016.

### Temperatur, fukt och nedbrytning

Burlion N, Bernard D, Chen D. “X-ray microtomography: application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process”, *Cement and Concrete Research*, 36, 346-357 (2006).

Kim Ky, Yun TS, Park KP. “Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography”, *Cement and Concrete Research*, 50, 34-40 (2013).

Nguyen W, Hernández-Cruz D, Celik K, Duncan JF, Monteiro PJM, Ostertag CP. “In-situ tensile and corrosion damage characterization of fiber-reinforced cementitious composites using X-ray micro-computed tomography”, *9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-9, Berkeley, 2016.

Pei Y, Skoczyla F, Hauss G, “Characterization of a rehydration phenomenon in cement-based materials containing heat-induced cracks: coupled transport properties and X-ray micro-tomography”, *9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-9, Berkeley, 2016.

Peng C, Rougelot T, Burlion N, Bernard D. “Cementitious composites during leaching and drying: X-ray microtomography analysis of cracking pattern dependence on size of rigid inclusions”, *7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-7, Seoul, 2010.

Rougelot T, Burlion N, Bernard D, Skoczylas F. “Cracking due to leaching in cementitious composites: experimental investigation by means of X-ray microtomography and numerical modelling”, *9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-9, Berkeley, 2016.

Stock SR, Naik NK, Wilkinson AP, Kurtis KE. “X-ray microtomography (micro CT) of the progression of sulfate attack of cement paste”, *Cement and Concrete Research*, 32, 1673-1675 (2002).

Suzuki T, Aoki M, Ohtsu M. “Damage identification of cracked concrete by X-Ray computed tomography method”, *7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-7, Seoul, 2010.

Suzuki T, Ogata H, Takada R, Aoki M, Ohtsu M. “Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete”, *5th Kumamoto International Workshop on Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete*, Kumamoto, 2009.

### Andra material

Bentz Dp, Quenard DA, Kunzel HM, Baruchel J, Peyrin F, Martys NS, Garboczi EJ. “Microstructure and transport properties of porous building materials. II: Three-dimensional X-ray tomographic studies”, *Materials and Structures*, 33, 147-153 (2000).

Cnudde V, Dewanckele J, Boone M, de Kock T, Boone M, Brabant L. “High-resolution X-ray CT for 3dD petrography of ferruginous sandstone for an investigation of building stone decay”, *Microscopy Research and Technique*, 74, 1006-1017 (2011).

Desrues J. “X-Ray CT for geomaterials soils, concrete, rocks”, *International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials*, Kumamoto, 2003.

Gao L, Ni F, Luo H, Charmot S. “Characterization of air voids in cold-in-place recycling mixtures using X-ray computed tomography”, *Construction and Building Materials*, 84, 429-436 (2015).

Hendrickx R, Buyninckx K, Schueremans L, Kerckhofs G, Verstrynghe E, Wevers M. “Observation of the failure mechanism of brick masonry doublets with cement and lime mortars by microfocus X-ray computed tomography”, *8th International Masonry Conference*, Dresden, 2010.

Vervoort A, Wevers M, Swennen R, Roels S, Van Geet M, Sellers E. “Recent advances of X-ray CT and its applications for rock material”, *X-Ray CT for Geomaterials Soils, Concrete, Rocks*, 79-91 (2004).

Verstrynghe E, Adriaens R, Elsen J, Van Balen K. “Multi-scale analysis on the influence of moisture on the mechanical behavior of ferruginous sandstone”, *Construction and Building Materials*, 54, 78-90 (2014).

Verstrynghe E, Van Steen C, Andries J, Van Balen K, Vandewalle L, Wevers M. “Experimental study of failure mechanisms in brittle construction materials by means of X-ray microfocus computed tomography”, *9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-9, Berkeley, 2016.

Wang LB, Frost JD, Voyiadjis GZ, Harman TP. “Quantification of damage parameters using X-ray tomography images”, *Mechanics of Materials*, 35, 777-790 (2003).

Wong RCK. “Shear deformation of locked sand in triaxial compression”, *Journal of Geotechnical Testing*, 23, 158-170 (2000).

## **Bilaga A**

### **Exempel på provningsprotokoll**







# Datortomografiundersökning

## av betongcylinder

sid

1(2)

KTH Betongbyggnad

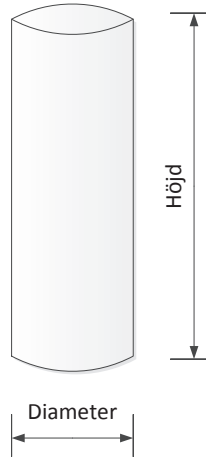
Anders Ansell, Stockholm 2016-09-03

### Gjuten betongcylinder - stålfiberbetong

#### Uppmätning

Diameter	100,0 ± 0,1 mm
Höjd	220,0 ± 0,1 mm
Vikt	3836 g
Densitet*	2220 kg/m <sup>3</sup>

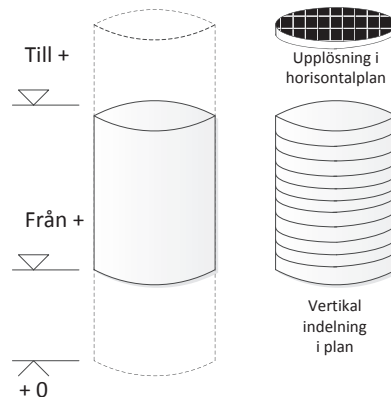
\*Skrymdensitet, baserat på dimensionernas medelvärden



#### Tomografering

Från höjd	+30,0 mm
Till höjd	+180,0 mm
Vertikal indelning	1351 plan
Vertikal planhöjd	111 µm
Upplösning i horisontalplan	111 µm

Höjdangivelser anges i relation till betongcylinderns basyta vid +0,0 mm.



#### Kommentarer:

Gjuten provkropp, 495 kg/m<sup>3</sup> cement, 220 kg/m<sup>3</sup> vatten och 1540 kg/m<sup>3</sup> ballast 0-8 mm.

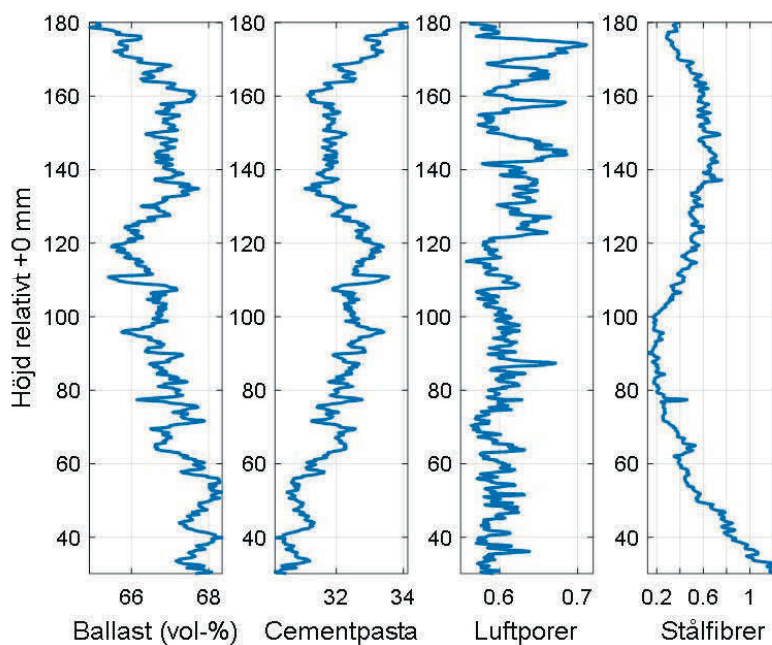
Blandningen innehåller stålfibrer D30/05,  $50 \text{ kg/m}^3$  (0,64 vol-%) samt  $20 \text{ kg/m}^3$  silika och  $4 \text{ kg/m}^3$  Glenium. Betongblandningens densitet var  $2329 \text{ kg/m}^3$ .

# Datortomografiundersökning av betongcylinder

sid 2(2)

## Gjuten betongcylinder - stålfiberbetong

### Variation i sammansättning



Delmaterial	Min innehåll i höjdsnitt	Max innehåll i höjdsnitt	Medelvärde
Ballast	64,9 vol-%	68,2 vol-%	66,9 vol-%
Cementpasta*	29,6 vol-%	34,1 vol-%	31,9 vol-%
Luftporer	0,56 vol-%	0,71 vol-%	0,61 vol-%
Stålfibrer	0,13 vol-%	1,34 vol-%	0,53 vol-%

\* Avser cementpasta, dvs cement och finpartikelballast.



## Datortomografiundersökning

### av betongcylinder

sid

1(2)

KTH Betongbyggnad

Anders Ansell, Stockholm 2016-09-03

## ***Gjuten betongcylinder - stålfiberbetong***

### Visuell beskrivning

- Intakt betongcylinder. Gjuten i laboratorium – ej utsatt för förstörande provning.
- Mantelytan är plan och slät – provkroppen har gjutits i stålform.
- Överytans perimeter är relativt horisontell, överytan konkav och relativt gropig – se Figur 3.
- Relativt stora porer i betongytan. Även djupa, men mindre porer.
- Synliga stålfibrer. Flertalet ligger ytligt och parallellt med ytterytan – se Figur 1 och 4.
- Märkbart högre koncentration av stålfibrer mot bottenytan – se Figur 1 och 4.

### Ballast

- Den observerbara ballastens storlek är här inom 0,1–10,0 mm.
- Provkroppen visar tecken på ballastseparation – jämför Figur 5 och 6.
- Andelen stora ballastkorn/stenar är större mot botten.
- Flertalet ballastkorn/stenar har avlång form och en längd som överskrider 8 mm – se Figur 6.

### Luftporer

- De största inre porerna är ca 2 mm. De minsta observerbara ca 0,1 mm.
- Fördelningen över respektive tvärsnitt är relativt jämn – se Figur 5 och 6.
- I provkroppens övre halva finns fler men mindre porer – jämför Figur 5 och 6.
- De största luftporerna finns i anslutning till mantelytan.

### Stålfibrer

- Koncentrationen av stålfibrer är högre mot provkroppens botten – se Figur 2,5 och 6.
- Fiberfördelningen är ojämn, både till läge och orientering – se Figur 2.
- Vid botten är fibrernas orientering mer horisontell än högre upp i provet.
- En kraftig koncentration av horisontellt orienterade fibrer finns vid botten - se Figur 6.

### Slutsats/bedömning

Betongcylindern visar tecken på ballastseparation och ojämn fiberfördelning. Sammantaget med förekomsten av stora ojämna porer längs formytan (mantelytan) ger detta slutsatsen att betongen har blandats dåligt och/eller vibrerats bristfälligt.

# Datortomografiundersökning av betongcylinder

sid 2(2)

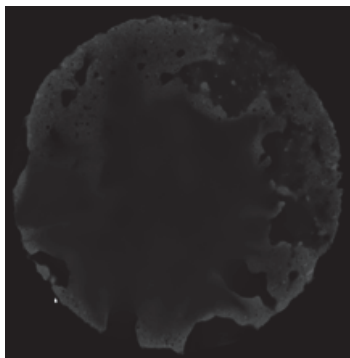
## Gjuten betongcylinder - stålfiberbetong



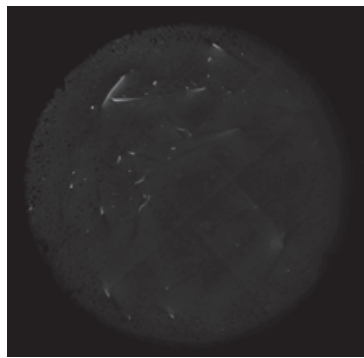
**Figur 1:** Översiktspåsyn – yttre struktur.



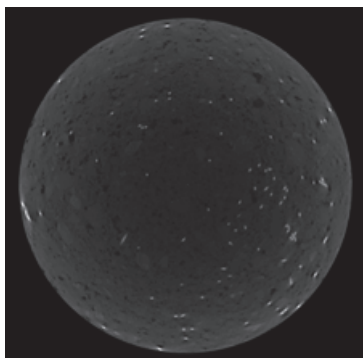
**Figur 2:** Genomlysningssåsyn - stålfiberarmering.



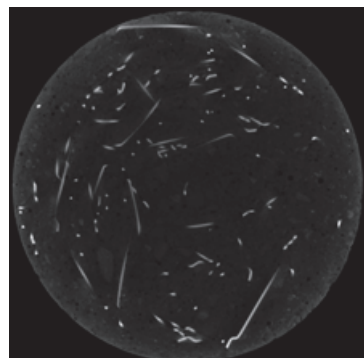
**Figur 3:** Horisontalsnitt vid +220,0 mm.



**Figur 4:** Horisontalsnitt vid +0,0 mm.



**Figur 5:** Horisontalsnitt vid +120,0 mm.



**Figur 6:** Horisontalsnitt vid +10,0 mm.



## Bilaga B

### Eng-Sve ordlista över tekniska termer

I den översiktliga beskrivningen av tomografitekniken (avsnitt 2.1-2.3) förekommer en del tekniska termer från engelsk litteratur, för vilka svenska motsvarigheter har inhämtats för att användas i den svenskspråkiga texten. Dessa termer listas nedan.

<u>Engelska</u>	<u>Svenska</u>
Acquisition angle	Förvärvsvinkel
Attenuation	Försvagning/attenuation
Convolved	Faltade
Computed tomography (CT)	Datortomografi
CT views	CT bilder
Edge-detection	Kantdetektering
Filtered backprojection	Filtrerad återprojektion
Focal spot size	Fokalfläckens storlek
Linear attenuation coefficient	Linjär attenuationskoefficient
Scatter	Avböjning
Signal-to-noise ratio (SNR)	Signal-till-brusförhållande
Sinogram	Sinogram
Thresholding	Tröskling
Watershed	Vattendelare









Box 5501  
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org  
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773