

DATORTOMOGRAFI SOM UNDER- SÖKNINGSMETOD FÖR ATT BESKRIVA ORIENTERING AV STÅLFIBRER I SPRUTAD OCH GJUTEN BETONG FÖR TUNNLAR

Anders Ansell

DATORTOMOGRAFI SOM UNDERSÖKNINGSMETOD FÖR ATT BESKRIVA ORIENTERING AV STÅLFIBRER I SPRUTAD OCH GJUTEN BETONG FÖR TUNNLAR

**Computed tomography as investigation
method to describe the steel fibre
distribution in sprayed and cast concrete for
tunnels**

Anders Ansell, KTH

FÖRORD

Föreliggande rapport sammanfattar ett projekt som presenterar en undersökningsmetod för sprutad och gjuten betong i tunnlar, baserad på datortomografi. Projektet är en fortsättning på ett tidigare pilotprojekt (BeFo rapport 165) men här fokuseras på att kunna beskriva orientering och läge av stålfibrer inne i en betongvolym. Metoden anpassas för analys av normalstora betongprovkroppar, typiskt gjutna provcylindrar eller borrhärdar från tunnlar. Undersökningsmetoden har tagits fram och utvärderats med målsättningen att den inom en relativt snar framtid ska kunna användas standardmässigt som en provningsmetod vid framtagning av nya, optimerade betongtyper och vid utredning av skadade och nedbrutna betongkonstruktioner i bruksstadiet.

Projektet genomfördes under 2020 - 2021 vid avdelningen för Betongbyggnad, ingående i institutionen för Bygghälsa vid KTH. De gjutna och utborrade provcylindrar som redovisas i exemplen har tomografiundersökts med utrustning för CT-skanning som finns placerad i laboratoriet hos KTH Bygghälsa. Projektet har genomförts av Professor Anders Ansell, med laboratoriearbete av Docent Alvaro Guarin, som har manövrerat tomografiutrustningen, och av Laboratorietekniker Gürsel Hakan Taylan, som förberett och gjutit provcylindrar för försöken. Adj professor Erik Nordström har bistått med diskussioner kring tolkningar av analysresultaten.

Som stöd för projektet har funnits en referensgrupp som har bidragit med kommentarer och givande diskussioner. Referensgruppen bestod av Lars Elof Bryne (Vattenfall), Tommy Ellison (Besab), Martin Hansson (Sika), Alf Nilsson (Trafikverket), Iad Saleh (NCC), Per Tengborg (BeFo) och William Bjureland (BeFo). Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo har finansierat forskningsprojektet.

Stockholm, 2021

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Prestanda och livslängd hos gjutet och sprutat betongmaterial för användning i tunnlar beror i stor utsträckning på förekomst och fördelning av ballast, luftporer, mikrosprickor och stålfibrer. Effektiviteten hos stålfibrer i betong beror av antalet skärande fibrer i ett snitt av konstruktionen och också på hur dessa är orienterade i dragna snitt av betongen. Den vanligaste undersökningsmetoden för den inre strukturen hos gjutna eller sprutade betongprover är sågning till tunna skivor följt av elektronmikroskopi, vilket är tidskrävande och förstör proverna. Datortomografi (Computed Tomography, CT) har under senare tid börjat användas för materialtekniska tillämpningar och är en provningsteknik som bygger på genomlysning med röntgen följt av bilddetektering för att visualisera det inre av fasta föremål. Tekniken har använts för att studera betongmaterial, men de flesta publicerade undersökningarna av orientering av stålfibrer har varit inriktade på speciella betongtyper, som till exempel höghållfast och självkompakterande betong, men det finns mycket få studier med fokus på sprutbetong. En pilotstudie har tidigare genomförts med syfte att beskriva möjligheter vid undersökning av betong för tunnlar genom tomografering och visat att det går att genomföra praktisk analys av betong-provkroppar från laboratorium eller fältmiljö. Resultaten kan ges i form av fördelningar av cementpasta, ballast, luftporer och stålfibrer. Det har dock inte gått att bestämma fibrernas orientering inne i sådan tomografiundersökt provkropp. Därför genomförs här en laborativ studie i kombination med utveckling av numeriska analysrutiner som tillsammans med erfarenheter från befintliga undersökningsrutiner ska kunna implementeras som ett komplement till den tidigare utprovade provningsmetodiken.

En genomförd litteraturstudie visar att de metoder som hittills har redovisats för att studera orienteringen av stålfibrer i betong är numeriskt komplicerade med långa beräkningstider och ofta relativt dåligt anpassade till de storlekar på provkroppar som är aktuella för tunnelbetong. Några valda exempel demonstrerar variationer i fiberorientering i gjuten betong på grund av avgränsning av betongvolymens dimensioner. Det har observerats att fibrernas orientering påverkas av gjutformen och underlagets begränsande yta. Till exempel mitt i en gjuten golvplatta är fibrerna relativt ostörda och orienterar sig nära nog horisontellt i plattans huvudplan medan de vid plattans kanter har påverkats av gjutformen. Resultat för sprutbetong på en tunnelvägg visar fibrer orienterade i sprutbetongens huvudplan, vinkelrätt mot sprutriktningen.

Den analysmetod som har arbetats fram, testats och tillämpats inom aktuellt projekt är anpassad för undersökning av normalstora provkärnor av betong, gjutna som materialprov eller utborrade provkärnor. Data från en genomförd CT-skanning lagras som en sekvens tvärsnittsbilder längs en betongcylinders längdaxel. Bilderna som är i bitmapformat läses sedan in som numerisk information i ett särskilt skrivet program för den följande databehandlingen. Stålfibrer som korsar respektive tvärsnitt identifieras och mäts in men för fortsatt analys måste punkterna kopplas samman till fibrer som sedan ska kunna beskrivas på vektorform, med läge och riktning. Punkterna sorteras därför enligt en särskild rutin och plottas så att respektive fibers ändpunkter framträder tydligare. Med

utprovade toleransvillkor bestäms sedan var varje fiber börjar och slutar, varefter de fibersegment som i ett följande steg identifieras som liggande i linje kopplas samman till längre, hela fibrer. Metoden har testats genom konvergensanalys baserat på inskannade betongprover särskilt gjutna för ändamålet och bestående av ett känt antal hela, räknade stålfibrer. Om en borrkärna undersöks kompliceras analysen av att ett relativt stort antal fibrer har kapats vid utbörningen av kärnan. Analysmetoden har genom testerna visat sig ha en tillförlitlighet och precision som är mer än tillräcklig för undersökning av prover från tunnelbetong och är jämförelsevis numeriskt effektiv med relativt korta beräkningstider. Metoden är inte heller beroende av att dyra program för avancerad bildanalys måste användas. Ett antal analys exempel redovisas med en standardiserad uppställning bestående av kopplade diagram, för att möjliggöra jämförelser. Respektive fibers position i en betongcylinder redovisas med lutningsvinklar i horisontalplanet och relativt längdaxeln. Det visas också hur många fibrer som skär betongcylinderns tvärsnitt på respektive höjd.

De studerade exemplen bekräftar att det är skillnad i fiberorientering i sprutbetong jämfört med i gjutna betongkonstruktioner. Av särskilt intresse för metodens användning är att mer systematisk undersöka om en högre grad av fibrerna orienteras optimalt i sprutbetong jämfört med i gjutna betongkonstruktioner. Genom kunskap om hur stålfibrer i sprutbetong verkar och orienteras kan effektiviteten hos sprutbetongförstärkningar ökas. Målet är att beskriva och etablera metoden som en standardiserad och praktiskt fungerande metod med föreskrivet antal prov som måste tas per yta sprutbetong, eller volym gjuten betong. Syftet är att med metoden som verktyg nå en effektivare användning av stålfibrer i sprutbetong, med rätt mängd på rätt plats och anbringad med rätt metodik. En minskad mängd överksamma fibrer i sprutbetong leder till ekonomisk och miljömässig hållbarhet på grund av minskad åtgång av stål samt betong och cement. Bättre kunskap om sprutbetongförstärkningar leder också till mer säkra och trygga miljöer och därmed social hållbarhet.

Nyckelord: Sprutbetong, Gjuten betong, Stålfibrer, Datortomografering, Laboratorieprovning, Provtagning i fält.

SUMMARY

The performance and lifespan of cast and sprayed concrete materials for use in tunnels depends to a large extent on the occurrence and distribution of aggregates, air pores, micro-cracks and steel fibres. The efficiency of steel fibres in concrete depends on the number of fibres crossings in a section of the structure and also on how these are oriented in sections exposed to tensile stresses. The most common investigation method for the internal structure of cast or sprayed concrete (shotcrete) samples is sawing thin slices to be studied through electron microscopy, which is time consuming and destroys the samples. Computed tomography (CT) has begun to be used for materials technology applications and is a laboratory testing technology based on X-ray scanning followed by image detection to visualize the interior of solid objects. The technology has been used to study concrete materials, but most published studies of orientation of steel fibres focus on special types of concrete, such as high-strength and self-compacting concrete, but there are very few studies on shotcrete. A pilot study has previously been carried out with the purpose of describing possibilities when examining concrete by tomography, showing that it is possible to carry out practical analysis of concrete samples from laboratory or field environments. The results can be given in the form of distributions of cement paste, aggregates, air pores and steel fibres. However, it has not been possible to determine the orientation of the fibres inside such a test specimen examined through tomography. Therefore, a laboratory study in combination with the development of a numerical analysis routine is carried out so that experiences from existing routines can be adapted and implemented as a complement to the previously developed test method.

A completed literature study shows that the methods previously reported for studying the orientation of steel fibres in concrete are numerically complicated, with long calculation times and often relatively poorly adapted to the sizes of test specimens relevant for tunnel concrete. Some selected examples demonstrate variations in fibre orientation in cast concrete due to the dimensions of the delimited concrete volume. It has been observed that the orientation of fibres is affected by the formwork and the limiting surface of the substrate. For example, at the centre of a cast floor slab, the fibres are relatively undisturbed and oriented almost horizontally in the main plane of the slab, while at the edges of the slab they have been affected by the side walls. Results for shotcrete on a tunnel wall show fibres oriented in the main plane of the shotcrete, perpendicular to the spraying direction.

The analysis method that has been developed, tested and applied within the current project is adapted for examination of normal-sized concrete test cylinders, cast as material samples or drilled test cores. Data from a completed CT-scan are stored as a sequence of cross-sectional images along the longitudinal axis of a concrete cylinder. The images that are in bitmap format are then loaded as numeric information in a specially written program for the following data processing. Steel fibres that cross the respective cross-sections are identified and measured, but for further analysis, these points must be connected to fibres that can then be described in vector form, with position and direction.

The data points are therefore sorted following a special routine and plotted so that the end points of each fibre appear more clearly. With tested tolerance conditions, it is then determined where each fibre begins and ends, after which the fibre segments in a subsequent step are identified as positioned in line are connected to longer, complete fibres. The method has been tested through convergence analysis based on scanned concrete samples specially cast for the purpose, consisting of a known number of complete, counted steel fibres. If a cored sample is examined, the analysis is complicated by the fact that a relatively large number of fibres have been cut during the drilling of the core. Through the tests, the analysis method has been shown to have a reliability and precision that is more than sufficient for examining samples from tunnel concrete and is comparatively numerically efficient, with relatively short calculation times. The method is also independent of the use of expensive and advanced image analysis programs. A number of analysis examples are presented with a standardized set-up consisting of coupled diagrams, to enable comparisons. The position of the respective fibres in a concrete cylinder is reported with angles of inclination in the horizontal plane and relative to the longitudinal axis. It is also shown how many fibres cut a cross-section of the concrete cylinder at each height.

The studied examples confirm that there is a difference in fibre orientation in shotcrete compared to in cast concrete structures. Of special interest for the use of the method is to systematically investigate whether a higher degree of fibres is optimally oriented in shotcrete compared to in cast concrete constructions. Knowledge of how steel fibres in shotcrete functions can increase the efficiency of shotcrete supports. The aim is to describe and establish the method as a standardized and practically functional method with a prescribed number of samples that must be taken per surface of shotcrete, or volume of cast concrete.

The purpose is to use the method as a tool for achieving a more efficient use of steel fibres in shotcrete, with the right volume in the right place and applied with the right method. A reduced amount of inactive fibres in shotcrete leads to economic and environmental sustainability due to reduced use of steel, concrete and cement. Better knowledge of shotcrete reinforcement behaviour also leads to more safe and secure environments and thus social sustainability.

Keywords: Shotcrete, Concrete, Steel fibres, Computed tomography (CT), Laboratory testing, In situ samples.

INNEHÅLL

1. BAKGRUND.....	1
1.1 Tomografering för betongmaterial.....	1
1.2 Betong med stålfiber.....	2
1.3 Tidigare och aktuellt projekt.....	3
2. DATORTOMOGRAFI.....	5
2.1 Tomografiteknik.....	5
2.2 Tomografering, datainsamling och rekonstruktion.....	9
2.3 Metod för gjuten och sprutad betong för tunnlar.....	12
3. TIDIGARE FORSKNING.....	17
3.1 Yttre last, temperatur, fukt och nedbrytning.....	17
3.2 Porositet och materialstruktur.....	20
3.3 Fiberinnehåll, fördelning och orientering.....	22
3.4 Sprutbetong.....	25
3.5 Exempel på fördelning av fiberorientering.....	26
4. METOD FÖR ANALYS AV FIBERBETONG.....	29
4.1 Fibrer i tvärsnitt av provcylinder.....	29
4.2 Fiberorientering.....	32
4.3 Numeriska villkor och resultatkonvergens.....	33
4.4 Presentation av analysresultat.....	39
5. EXEMPEL.....	43
5.1 Gjuten betongcylinder med 25 raka, kapade fibrer.....	44
5.2 Gjuten betongcylinder med 100 raka, kapade fibrer.....	46

5.3	Gjuten betongcylinder med 25 fibrer	48
5.4	Gjuten betongcylinder med 100 fibrer	50
5.5	Borrkärna nr 1 från sprutbetong i tunnel	52
5.6	Borrkärna nr 2 från sprutbetong i tunnel	54
5.7	Borrkärna från sprutad provbalk	56
5.8	Gjuten betongcylinder – centrerat uttag	58
5.9	Gjuten betongcylinder – alternativa uttag	61
6.	KOMMENTARER OCH SLUTSATSER	63
6.1	Analysmetodens precision och effektivitet	63
6.2	Metod med virtuella borrkärnor	64
6.3	Kommentarer till exemplen	65
6.4	Fiberinnehåll i sprutbetong	66
6.5	Behov av fortsatt undersökning	67
	LITTERATUR.....	69

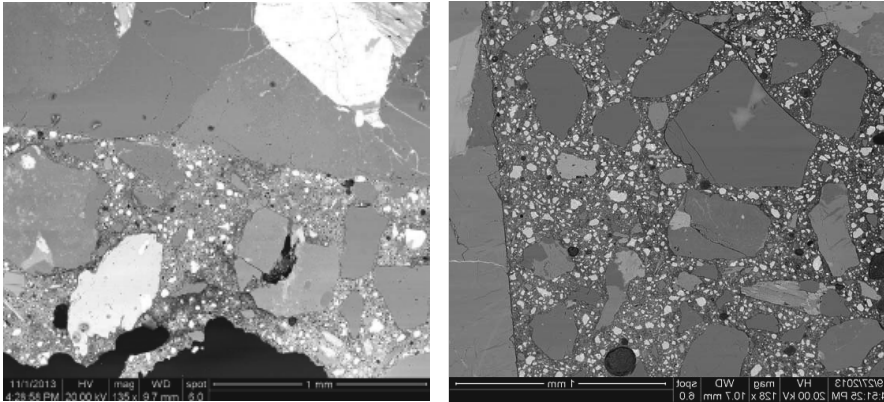
1. BAKGRUND

Förmågan att optimera sammansättningen av gjuten eller sprutad betong för användning i effektivt tunnel och bergbyggande beror på kunskap om materialegenskaperna, materialstruktur och fördelning av ballast, porsystem och fibrer av stål eller andra material om de tillsätts. Med kunskap om den interna materialstrukturen kan egenskaperna hos sprutad och gjuten betong optimeras för att bygga mer kostnadseffektiva, hållbara och säkra tunnlar och undermarkkonstruktioner. Att effektivt kunna ta prover i fält för detaljerad undersökning skulle också göra det möjligt att effektivt följa upp prestandan och eventuell initierad nedbrytning av materialet i konstruktionerna. Detta skulle leda till en ökad säkerhet och mer effektiv drift och underhållsplanering.

1.1 Tomografering för betongmaterial

De vanligaste undersökningsmetoderna för inre prover av gjutna eller sprutade betongprover av standardtyp är idag sågning till tunna skivor följt av elektronmikroskopi (Scanning Electron Microscopy, SEM), se Figur 1. Detta är tidskrävande och förhindrar också ytterligare undersökningar eftersom proverna förstörs. Datortomografi (Computed Tomography, CT), som är en avancerad metod baserad på genomlysning med röntgen följt av bilddetektering, ger nu nya möjligheter. Metoden med CT-skanning är således en digital teknik för att visualisera det inre av fasta föremål, ned till mikroskopisk detaljnivå. Medicinska röntgenbaserade CT-system används till exempel för att avbilda ben och mjuka vävnader. Ytterligare framsteg inom medicinsk CT-teknik har idag också lett till utvecklingen av industriella CT-system. Industriell CT med hög upplösning skiljer sig från konventionell medicinsk CT-skanning genom att röntgen med betydligt högre energiinnehåll kan användas. Den ökande genomlysningsförmågan gör det möjligt att i solida material detektera detaljer ned till några tiotals mikrometer i storlek, även i material med hög densitet. Integrerade CT-system med utrustning för datoriserad visualisering kan återge tredimensionella (3D) virtuella, transparenta modeller av de studerade objekten. Resultaten från tomografiundersökningar kan analyseras och presenteras i form av kvalitativa och kvantitativa resultat.

Många studier inriktade på betong har dock fokus på materialstrukturen i mikroskala, varför oftast undersökningar av mycket små prov redovisas. De kvantitativa data som ska kunna beräknas för ett betongprov i en makro- eller mesoskala är fördelningar av cementpasta, aggregat, stålfibrer, hålrum och luftporer inom den studerade volymen. För gjuten och sprutad stålfiberarmerad betong är det särskilt intressant att studera hur fibrerna är orienterade relativt det önskade verkningssättet vid krympning, dragspänning och sprickbildning. Bindningen till fibrerna i ung och hårdnande betong ökar med tiden, och påverkar sprickprocessen (Ansell & Holmgren, 2007), vilket vore värdefullt att kunna studera i realtid. Inverkan av nedbrytning på grund av till exempel karbonatisering och fiberkorrosion kan studeras med metoden.



Figur 1. Materialstruktur hos sprutbetong undersökt med SEM. Från Bryne (2014).
Figure 1. Material structure in shotcrete studied with SEM. From Bryne (2014).

1.2 Betong med stålfiber

Fiberbetong används i dag i ökande utsträckning i anläggningskonstruktioner och tunnlar, både i gjuten och i sprutad betong. Stål är idag det klart dominerande materialet för fibrer i betong men även andra material såsom plast, kolfiber, glas och basalt förekommer (Rengarajan, 2020). Effektiviteten hos stålfibrer i gjuten eller sprutad betong beror inte enbart på kvantiteten, det vill säga antalet stålfibrer i ett snitt av sprutbetongen utan också hur dessa är orienterade. För en effektiv fiberverkan bör så många fibrer som möjligt vara belägna i dragriktningen och följaktligen också vara orienterade i dragriktningen, se till exempel sprickorna med utstickande stålfibrer i den laboratorieprovade sprutbetongplattan i Figur 2. Av intresse är dels hur fibrerna orienterar sig inne i betongen men också hur de verkar vid dragbelastning, sprickbildning och krympning (Lagerblad m.fl., 2007; Ansell & Holmgren, 2007; Bryne, 2014). Även cementpastans vidhäftning till fibern har betydelse vilket kan förklara varför en ökad mängd fibrer inte alltid leder till högre hållfasthet. Genom kunskap om hur stålfibrer i sprutbetong verkar och orienteras, och hur detta kan påverkas genom konstruktionsutformning och materialanpassning, kan effektivitet hos sprutbetongförstärkningarna ökas och medföra att den totala mängden fibrer som måste blandas i betongen kan reduceras. Okunskap om effektiviteten hos fibrerna leder idag ofta till överdimensionering av sprutbetongens tjocklek. Mer effektivt utnyttjande av fibrerna gör att sprutbetongtjocklekar kan reduceras och då åtgår en mindre mängd stål, betong, och därigenom särskilt en mindre mängd cement vilket bidrar till minskade CO₂-utsläpp och samtidig hushållning med naturresurser och en ökad hållbarhet. Här bör dock kravet på bärförmåga stämmas av med

behovet av att reducera sprickbildning och sprickvidder för att undvika risken för fiberkorrosion, se till exempel Nordström (2005) och Ansell m.fl. (2020). Vid renovering och reparation kommer ett mer effektivt nyttjande av de stålfibrer som finns i sprutbetongen att spara arbetstid och material. Säkerheten och arbetsmiljön under byggande och drift ökar också med ett ökat kunnande om effektiviteten hos bergförstärkningarna.



Figur 2. Böjprovad rund sprutbetongplatta med utstickande stålfibrer i brottsprickorna. Från ElZain (2018).

Figure 2. Round shotcrete plate tested in flexure, with protruding steel fibers in the fracture cracks. From ElZain (2018).

1.3 Tidigare och aktuellt projekt

Under år 2016 genomfördes en pilotstudie (Ansell m.fl, 2016) med syfte att beskriva möjligheter, begränsningar samt arbetsgång och rutiner vid undersökning av sprutbetongprovkroppar genom tomografering. Pilotstudien demonstrerar de praktiska möjligheterna att genomföra analys av betongprovkroppar med till exempel den typ av datortomografiutrustning som finns hos KTH Bygghälsa (X5000, 2021). Resultaten från en CT-skanning kan presenteras i form av kvalitativ och kvantitativ utvärdering av

provkroppar, från laboratorium eller fältmiljö. Fördelningar av cementpasta, ballast, luftporer och stålfibrer kan visas som kvantitativa data. Pilotstudie demonstrerade hur undersökning av sprutbetongprovkroppar genom tomografering kan genomföras och visade att det praktiskt går att analysera betongprovkroppar från laboratorium eller fältmiljö. Det går dock inte i nuläget att bestämma fibrernas orientering inne i sådan CT-skannad provkropp. Att utifrån en tomografiundersökt provkropp bestämma orienteringen av hela fibrer genom numerisk databehandling är relativt komplicerat och därför behövs en rutin särskilt utformad och anpassad för analys av fullstora prover, till exempel borrkärnor, från gjuten och sprutad betong i tunnlar.

Därför har det här rapporterade projektet bestående av en laborativ studie i kombination med utveckling av numeriska analysrutiner genomförts. Erfarenheter även från andra befintliga metoder har undersökts och några anpassats för implementering i en komplett-erande teknik till den tidigare framtagna (Ansell m.fl, 2016) provningsmetodiken för gjuten och sprutad betong i tunnlar. Syftet är att hitta en metod för att särskilt studera hur stålfibrerna orienterar sig inne i betongen. Fokus ligger på undersöka om en högre grad av fibrerna orienteras optimalt, det vill säga i dragriktningen, i sprutbetong jämfört med i gjutna betongkonstruktioner, som är volymer med stor utsträckning i alla riktningar jämfört med sprutbetong som har geometri som ett skal. Även appliceringstekniken – sprutning vs. gjutning – påverkar hur fibrerna orienteras. Genom kunskap om hur stålfibrer i sprutbetong verkar och orienteras kan effektiviteten hos sprutbetongförstärkningarna ökas. Syftet är att nå en effektivare användning av stålfibrer i sprutbetong, och i gjuten betong, med rätt mängd på rätt plats och anbringad med rätt metodik. Med ökad kunskap om betongmaterialets inre struktur kan detta optimeras för användning vid tunnelbyggande och det blir också möjligt att följa nedbrytning av materialet, till exempel på grund av korrosion i stålfiberarmering (se t.ex. Nordström, 2005), genom att kontinuerligt ta prover i fält. Idag är de användbara undersökningsmetoderna i huvudsak begränsade eftersom de kräver tidskrävande sågning och efterföljande noggrann mikroskopering av uttagna eller särskilt gjutna provkroppar.

2. DATORTOMOGRAFI

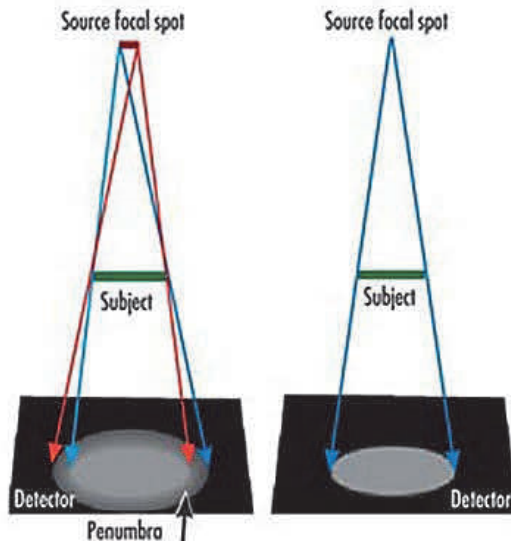
Datortomografi (*X-ray computed tomography*) är en teknik som gör det möjligt att visualisera det inre av ett fast föremål. Det är en icke-förstörande observationsteknik baserad på genomlysning med röntgenstrålar vilket sammanställs till digital information om det studerade objektets inre struktur på mikroskopisk detaljnivå. Volymbildelementen benämns *voxels*, till skillnad från tvådimensionella bildelement, *pixels*.

2.1 Tomografiteknik

Här ges en introduktion till och kortfattad sammanfattning av tomografitekniken och dess grundläggande principer. Sammanställningen är en nedkortad version av den som ges av Ansell m.fl. (2016). En mer detaljerade beskrivning ges av till exempel Ketcham & Carlson (2001). Datortomografisystem (*Computed Tomography*, CT-system) används sedan en längre tid inom medicinska tillämpningar för att återge bilder av mjuka vävnader och ben för diagnos och prognos. Under de senaste decennierna har också systemen anpassats för användning inom industrin. Med högupplöst industriell datortomografi används högre röntgenstrålning med högre energi för att få mer genomslagskraft jämfört med konventionella medicinska skanningsmetoder. Därmed kan detaljer ned till några tiotals mikrometer i storlek återges, också i föremål av material med hög densitet. Industriella CT-system används i dag inom till exempel geovetenskap, konstruktions-teknik och mekanisk tillverkning. Teknikens fördelar är främst att analys av ett material prov kan genomföras som en helt icke-förstörande undersökning i 3D. Ingen eller liten beredning av proverna behövs vilket gör metoden relativt tidseffektiv. De numeriska verktyg som används för att post-processa inskannad data möjliggör datautbyte med andra numeriska analys program, till exempel för beräkningar med finita element-metoden. Nackdelarna är främst att stora och relativt avancerade utrustningar krävs. Den är oftast inte heller mobil och kan inte användas i fält, till exempel nära ett pågående tunnelbygge, och därför måste uttagna materialprov skickas till ett välutrustat laboratorium. Det krävs också stora datorresurser med avancerad mjukvara för visualisering och analys av resultaten. Kvaliteten på inskannande data kan bli nedsatt om det finns svårigheter att penetrera in i vissa material och det kan också finnas störningar i de insamlade bilderna.

Begränsningarna för den skannade provkroppens tjocklek, upplösningarna vid låg och hög kontrast och det brus som möjligen uppstår beror på utrustningens röntgenstrålkälla och den röntgendetektor som används samt på skanningsproceduren. Med högre energi tränger röntgenstrålar mer effektivt genom material men är mindre känsliga för förändringar i materialdensitet och sammansättning. Signal-till-brusförhållandet (eng: *signal-to-noise ratio*, SNR) och bildskärpan påverkas direkt av röntgenintensiteten. Genom att minimera avståndet mellan strålningskälla och studerat objekt samtidigt som avståndet mellan objektet och strålningsdetektorn maximeras kan upplösningen av det skannade objektet ökas. 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 röntgenenergi som genereras och röntgenintensiteten. Denna definierar den potentiella rumsliga upplösningen hos ett CT-system och ger antalet möjliga vägar mellan strålningskälla och detektor som kan skära en given punkt i det objekt som skannas, se Figur 3. CT-bilder av ett objekt är en sammanställning av variationen hos attenuationskoefficienten (eng: *attenuation coefficient*) vid passage genom materialets beståndsdelar. Ett energispektrum definierar penetrerande förmågan hos röntgenstrålarna, samt deras förväntade relativa försvagning (eng: *attenuation*) vid passage genom material med olika densitet (McKetty, 1998). De studerade materialens uppskattade koefficienter kan användas för att bestämma den energinivå som kommer att vara mest lämplig vid aktuell skanning. Värderna för försvagningen för olika element, föreningar och materialblandningar kan fås från *XCOM: Photon Cross Sections Database* som förvaltas av National Institute of Standards and Technology (NIST) (Berger m.fl., 2010).



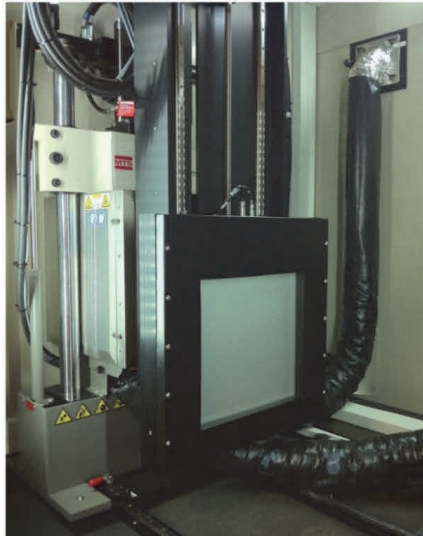
Figur 3. Effekten av fokalfleckens storlek. Från Zweig (2009).
Figure 3. Effect of focal spot size. From Zweig (2009).

Den tomografiapparat som används för att skanna provkropparna till exemplen i avsnitt 5.1-5.9 finns i laboriet vid KTH Byggetenskap. Det är av typen NSI X5000 X-Ray CT (X5000, 2021) och består av ett NSI strålningsavskärmat hölje och en NSI X5000 sexaxlig komponent-manipulator med en högupplösning digital röntgen och CT-teknik, se Figur 4. För CT kalibrering, (*Cone-Beam*) rekonstruktion och 3D realtids visualisering används programvaran Efx CT som också innehåller ett grafiskt analysverktyg. Den strålningskälla som används kan generera tomografidata med upplösningar ned till 5 μm , men detta beror också på provkroppens storlek och graden av geometrisk förstoring. En högupplösning *Amorphous Silicon* digital detektor (200 nm *pixel pitch*) ingår, se Figur 5. Systemets styrs via en NSI X-View EFX-DR arbetsstation. Till avbildningssystemet hör också ett NSI 225 kV mikrofokus röntgenrör med 5 μm brännvidd och ett NSI 450 kV HP röntgenrör med 400 μm brännvidd, se Figur 6.



Figur 4. NSI X5000 system (Foto: KTH Byggetenskap).

Figure 4. NSI X5000 system (Photo KTH Civil and Architectural Engineering).



Figur 5. Digital detektor i NSI X5000 systemet (Foto: KTH Bygghälsa).
Figure 5. Digital detector in NSI X5000 system (Photo KTH Civil and Architectural Engineering).



Figur 6. Röntgenstrålkällor i NSI X5000 systemet. (Foto: KTH Bygghälsa).
Figure 6. X-ray sources in NSI X5000 system (Photo KTH Civil and Architectural Engineering).

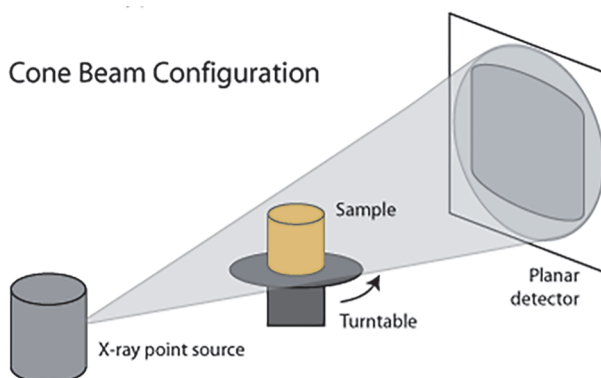
2.2 Tomografering, datainsamling och rekonstruktion

Kvaliteten på de data som kan inhämtas genom en CT-skanning av en provkropp beror på hur respektive steg i undersökningen genomförs och anpassas till aktuell materialtyp, storlek och geometri på provkroppen. Följande moment i en typisk tomografiundersökning beskrivs av Ketcham & Carlson (2001):

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

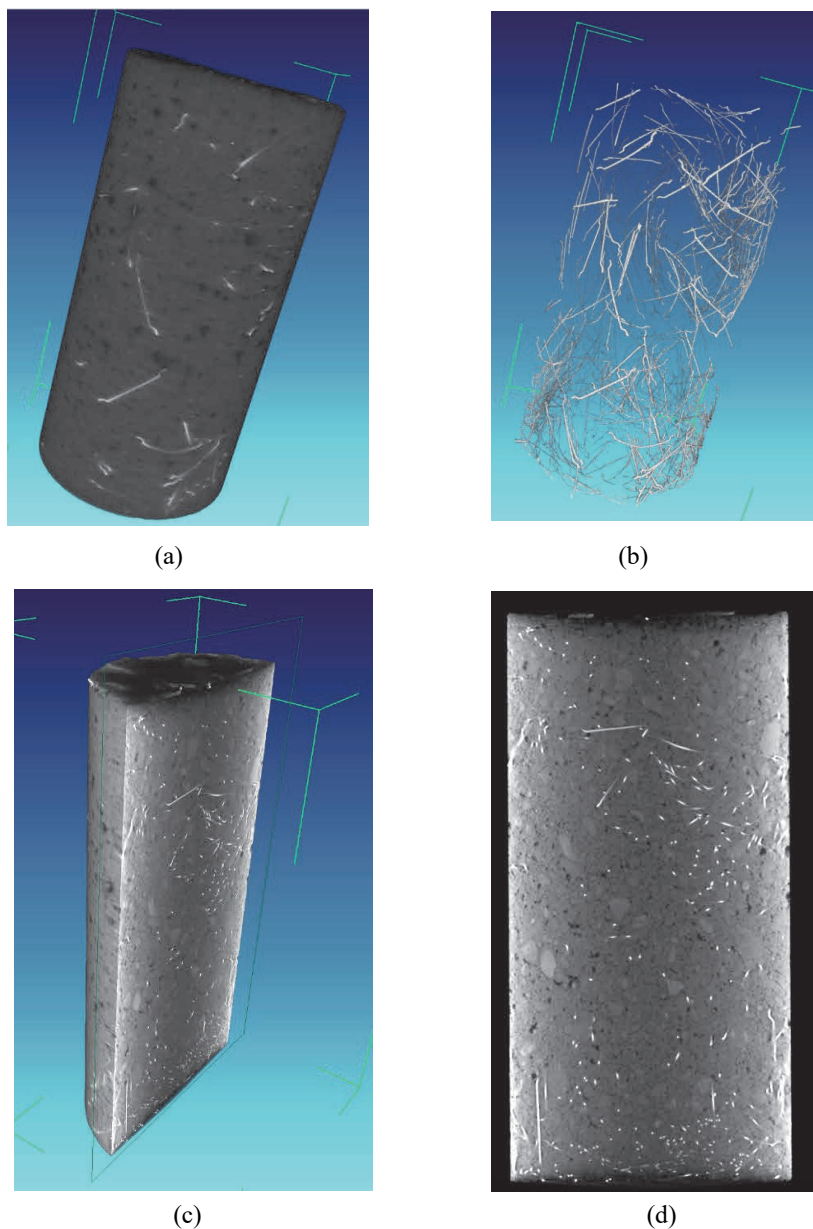
Eftersom hela skanningsfältet är en cylinder är den mest effektiva geometrin vid skanningen en cylinder, se Figur 7. En roterande platta finns mellan röntgenkällan och detektorn och här måste provkropparna placeras och arrangeras så att de inte rör sig i CT-utrustningens observationsfält under skanningen. Under skanningen passerar en röntgenstråle genom provet medan det vridbara bordet roterar med konstant hastighet. Den digitala tredimensionella bilden är uppbyggd av bildelement (voxels) och en cylindrisk provkropp kommer att beskrivas av en "stapel" horisontella bilder med en voxels tjocklek och samma tvådimensionella upplösning (pixels) i horisontalplanet.

De viktigaste variablerna vid insamling av CT-data är antalet genomlysningar och tiden för datainsamling för varje sådan viktig variabel. Kalibreringar är nödvändiga för att fastställa egenskaperna hos röntgensignalen i relation till hur de läses av detektorerna under de givna skanningsförhållandena. Då röntgenstrålarna gör en genomlysning från topp till botten lagras rådata från detektoravläsningarna i matrisform så att varje rad innehåller en enda sådan datauppsättning. Detta utgör ett sinogram (eng: *sinogram*), där varje punkt i det skannade objektet motsvarar en sinuskurva. Sinogrammen omvandlas till tvådimensionella skiktbilder genom en matematisk process som kallas rekonstruktion. Filtertrad återprojektion (eng: *filtered backprojection*) är den vanligaste rekonstruktionstekniken. Lagrad data kommer där först att 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. Industriella CT system kalibreras ofta så att luft 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. Sekvensen för efterbearbetning består sedan av fyra steg; brusreducering och korrigerig, materialfördelning, kvantitativ analys och volymuppdelning.



Figur 7. Skanning av roterande, cirkulär provkropp (Ketcham, 2016).
Figure 7. Scanning of rotated, circular test sample (Ketcham, 2016).

Exempel på hur resultatet från en CT-analys kan representeras grafiskt i 3D ges i Figur 8. Den tredimensionella volymens utsida kan visas eller ett godtyckligt snitt genom densamma. Ljus färg representerar en högre materialtäthet medan områden med lägre täthet visas som mörkare. Stålfibrerna är således de ljusaste punkterna i tvärsnittet medan de mycket mörka områdena är tomrum eller luftporer. De fyra beståndsdelarna i provkroppen, ballast, cementpasta, luftporer och stålfibrer, kan alltså identifieras utifrån den gråskala som motsvarar aktuellt materials täthet. Genom att begränsa täthetsspektrat för den visade volymen kan till exempel endast stålfibrer visas i 3D.

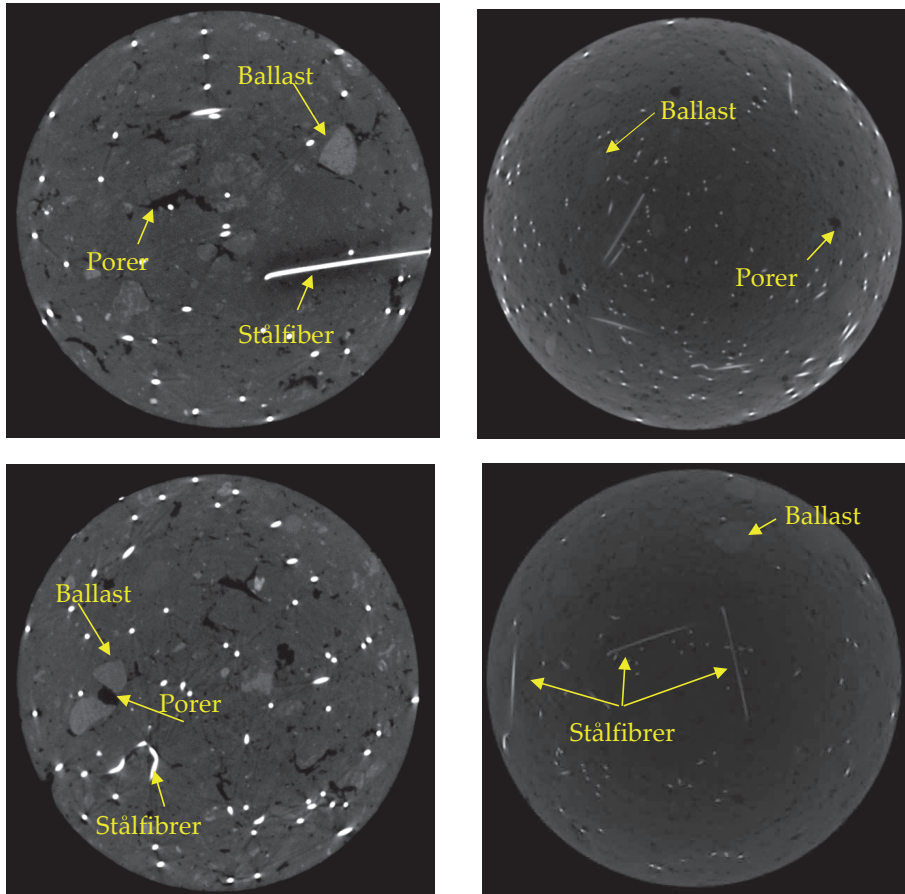


Figur 8. Tredimensionell visning av betongcylinder; (a) yttre struktur, (b) stålfibrer, (c) vertikalt mittnytt, (d) en planvy av en inre sektion (Ansell m.fl., 2016)

Figure 8. Three dimensional view of concrete cylinder; (a) outer structure, (b) steel fibres, (c) vertical section, (d) inner section (Ansell et.al., 2016).

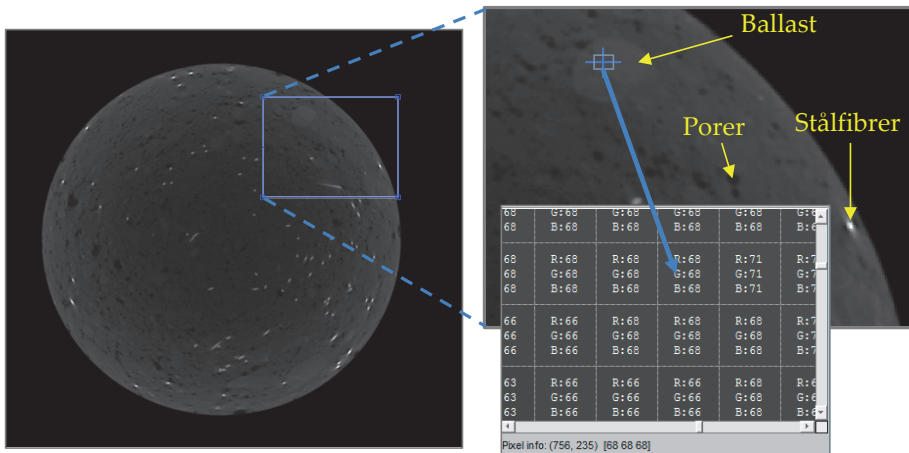
2.3 Metod för gjuten och sprutad betong för tunnlar

Den metod för praktisk analys och utvärdering av bilder från CT-skanning som har arbetats fram av Ansell m.fl. (2016) utgår från sekvenser av tvärsnittsbilder längs och vinkelrätt mot en provcylinders längdaxel. Bilderna är av den typen som exemplifieras i Figur 9, lagrade som gråskalebilder i tif- alternativt bmp-format. En normalstor skannad betongcylinder representeras vanligtvis av en sekvens på ca 1000-2000 sådana tvärsnittsbilder. Den metod som utvecklats syftar till att genomföra en kvantitativ analys av provkroppens hela volym där variationen av ingående ballastmaterial, cementpasta, stålfibrer samt porer och hålrum kan beskrivas som funktion av läge längs cylinderns längdaxel.



Figur 9. Tvärsnittsbilder från CT-skannade betongcylindrar (Ansell m.fl., 2016).
Figure 9. Cross sections from CT-scanned concrete cylinders (Ansell et.al., 2016).

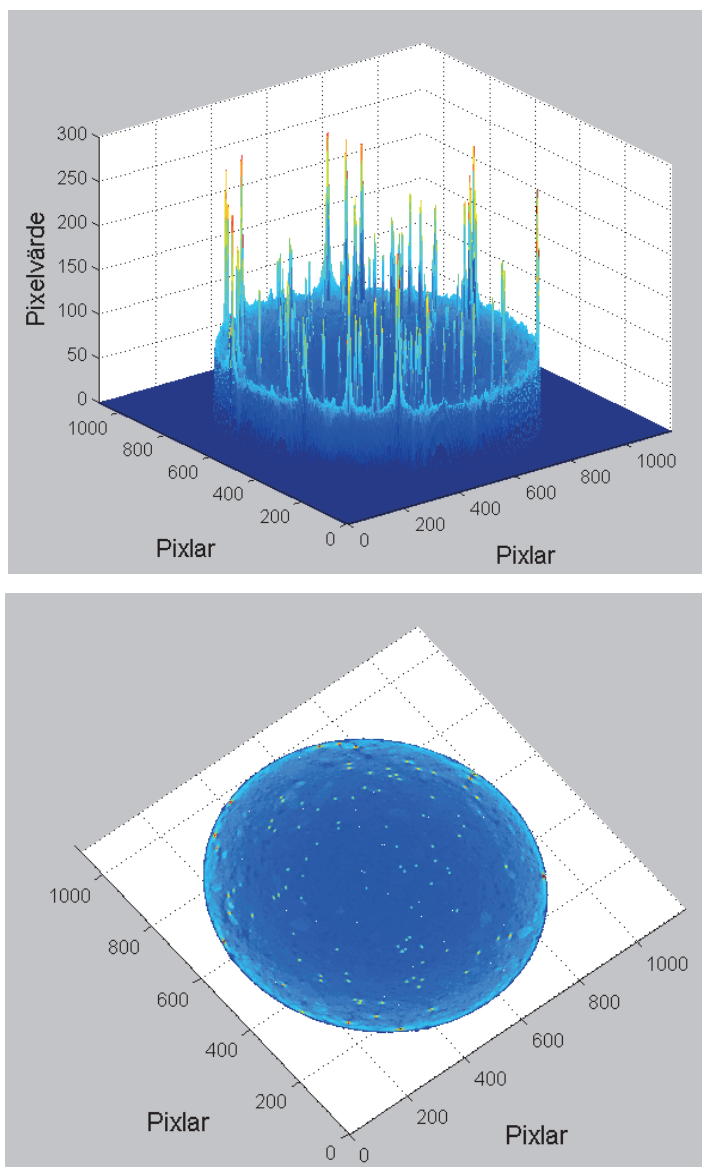
Uppdelning i de beståndsdelar som representeras i en CT-bild görs med hjälp av tröskelvärden och gränsvärden som måste definieras utifrån hur de representerar stålfibrer, cementpasta, ballast och tomrum. Innan utvärdering och analys måste en sådan förbehandling genomföras, här med det numeriska analysprogrammet Matlab (2021). I en sådan två-dimensionell CT-bild har varje pixel ett värde motsvarande dess ljushet i bildens gråskala, vilka lagras i matrisform. De delar i en matris som motsvarar en grupp av bildpunkter kan studeras i extrem närbild med det numeriska verktyget *Pixel Region Tool* i Matlab, se Figur 10. Här är målpunkten ett ballastkorn och dess motsvarande pixelvärden representerar dess ljushet och därmed den relativa täthet som uppmättes i CT-skanningen. Beståndsdelarna cementpasta, ballast, hålrum och stålfibrer kan sedan identifieras genom gränsvärden satta för respektive material genom okulär/manuell jämförelse och avstämning mellan bild och numeriska värden. För det ballastkornet som visas i Figur 10 har pixlarna en ljushet inom 66-71 vilket då ska kunna hänföras till det intervall som i aktuellt fall har förbestämts att representera stenmaterialet. Det är oftast svårast att fastställa gränsen mellan cementpasta och ballaststenarna medan stålfibrerna på grund av materialets höga densitet tilldelas mycket höga numeriska värden. Detta visas i Figur 11 där de numeriska pixelvärdena plottats i ett tredimensionellt diagram., där det ska noteras att diagrammets basyta återger CT-bilden i Figur 10. Ett lågt tröskelvärde skilt från noll sätts ofta för tomrum och luftporer, för att fånga upp numeriskt avrundade värden och skuggeffekter som kan ha uppstått under tomograferingen. Då provkropparna är cirkulära och CT-bilderna kvadratiska eller rektangulära kommer den omgivande luften att tilldelas samma pixelvärden som inre håligheter och porer. Med en särskild stegfunktion som har programmerats i Matlab måste därför alla bildpunkter utanför den skannade cylindern reduceras bort från datamängden.



Figur 10. Identifiering av numeriska värden representerande ett bildelement, här i ett ballastkorn. Från Ansell m.fl. (2016).

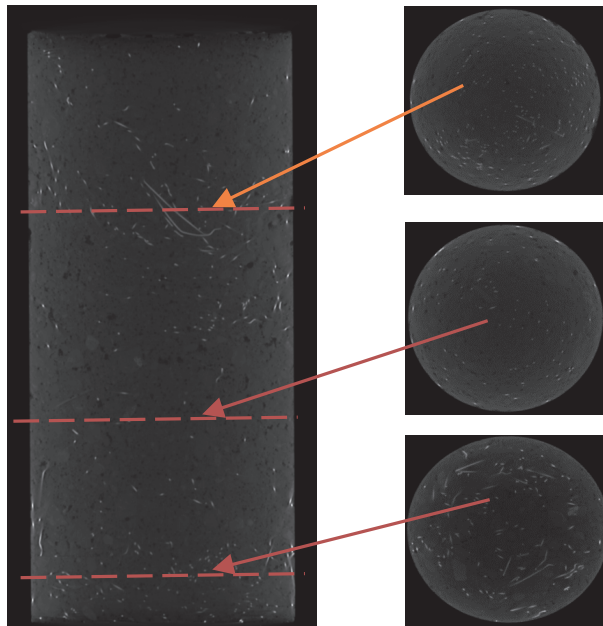
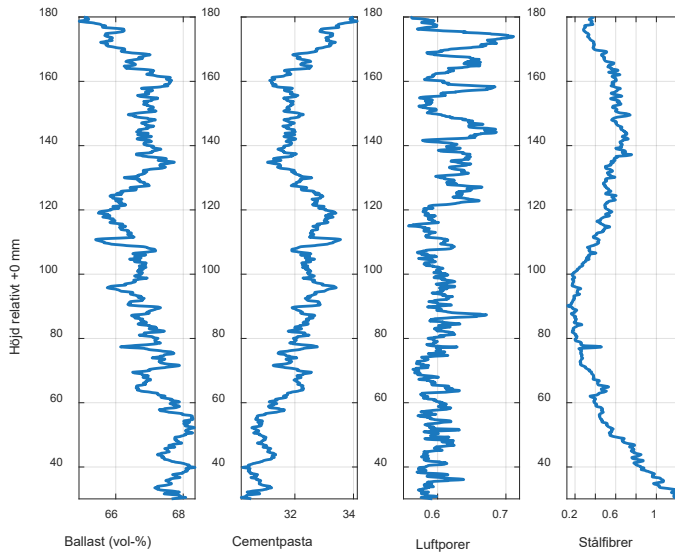
Figure 10. Identifying numerical values representing a picture element, here for an aggregate particle. From Ansell et.al. (2016).

Ett exempel på redovisning av analysresultatet ges i Figur 12, där variationerna i delmaterialens andelar längs en 220 mm hög betongcylinder visas. I aktuellt fall har de översta och understa 10 mm ej tagits med i slutanalysen (Ansell m.fl., 2016). Diagrammen har beräknats utifrån från areaförhållanden i 111 μm tjocka tvådimensionella CT-bilder. Kurvorna för cementpasta och luftporer visar höga toppar vid de övre och undre ytorna vilket delvis beror på att cementpastan här täcker ballastkornen och att luftporerna vid ytan är oslutna och i direkt kontakt med den omgivande luften. Eventuell störning på grund av kanteffekter elimineras oftast genom att i analys av långsträckta cylindriska provkroppar fokusera på mittsnittet. För det visade fallet är de genomsnittliga andelarna stålfiber, cementpasta, ballast och luftporer ca 0,53 %, 32,0 %, 66,9 % och 0,61 %. Kurvorna visar att variationerna i andel ballast och cementpasta har en klar korrelation, men en skillnad som motsvarar variationen i andelen hålrum och porer. Från diagrammet syns också att fördelningen av stålfibrer är ojämn, med en viss koncentration mot provcylinders botten. Medelvärdena av stålfiberinnehåll längs höjdintervallen 6-40, 40-120, och 120-180 mm är ca 1,0 %, 0,4 % och 0,5 %. Således är provkroppens stålfiberinnehåll ca 41 kg/m^3 , men ojämnt fördelat och varierande inom ca 31-78 kg/m^3 . Information om hur respektive stålfiber är orienterad går inte att få med den här versionen av analysprogrammet, utan endast information om hur stor andel av ett areatvårsnitt som utgörs av korsande stålfibrer.



Figur 11. Tredimensionell plot av numeriska pixelvärden i representationen av en CT-bild samt en planvy av samma diagram. Från Ansell m.fl. (2016).

Figure 11. Three dimensional plot of numerical pixel values in the representation of a CT-image and a plane view of the same diagram. From Ansell et.al. (2016).



Figur 12. Variation i betongsammansättning med höjd för en provcylinder samt bilder av dess yttre struktur och tre tvärsnitt. Från Ansell m.fl. (2016).

Figure 12. Variation in concrete composition for a test cylinder and pictures of its outer structure and three cross-sections. From Ansell et.al. (2016).

3. TIDIGARE FORSKNING

Här i tredje kapitlet sammanfattas tidigare undersökningar där CT-skanning har använts för att studera främst stålfiberarmerad betong. En mer detaljerad redogörelse ges av Ansell m.fl. (2016), där också fler referenser medtas i beskrivningen. Här återges direkt en nedkortad version av den sammanställningen där bland annat beskrivningar av val av tomografitekniska parametrar har utelämnats. Sammanfattningen har kompletterats med tillägg av arbeten publicerade under femårsperioden 2016-21, och då särskilt undersökningar med fokus på att bestämma fördelning och orientering hos stålfibrer. Kapitlets första avsnitt summerar arbeten med fokus på effekten av belastningar från yttre last och klimatlast från temperatur och fukt. I det andra avsnittet summeras arbeten med fokus på betongens materialstruktur och då särskilt porsystemets uppbyggnad. Det tredje avsnittet summerar de för föreliggande rapport mest relevanta studierna, på fördelning och orientering av stålfibrer. De avslutande avsnitten kommenterar de få publicerade arbeten där sprutbetong har studerats med CT-skanning och ger några exempel på tidigare publicerade resultat visande fördelning och orientering av stålfibrer.

3.1 Yttre last, temperatur, fukt och nedbrytning

Datortomografering, det vill säga CT-skanning, av *tryckbelastade* 40 mm betongkuber har använts 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 användes för att nå en ökad förståelse för brottmekanismerna i en 3D betongprovkropp under ökande lastnivåer. Belastningen lades på stegvis med avlastning och CT-skanning mellan varje steg vilket resulterade i 2D bilder. För visualisering och bildbehandling användes det kommersiella programmet Avizo (2021) och en systematiserad rutin för att åtskilja ballast, cementpasta, porer och sprickor (Li, 2012). 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 av Yang m.fl. (2013). Provkropparna var här kuber på $20 \times 20 \times 20$ mm³ kuber av betong, även här med en maximal ballaststorlek på 5 mm. Tomografering gjordes efter att varje laststeg avlastats. Syftet var att undersöka initieringen av skador som kan uppstå i relation till last-deformation innan maximal last uppnås. Vid undersökningen kunde initiella 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 genom-

fördes vid olika grader av uppsprickning under pålastning, skannades provkropparna här endast före och efter genomförda av- och pålastningscykler. Den metod för bildbearbetning som användes är den som har utvecklats av Landis m.fl. (2000, 2007). Som en uppföljning till laboratorieförsöken genomfördes utvärdering och analys med numeriska modeller med syftet att återge betongens uppträdande på meso-skalenivå. Betongen beskrivs 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. Laboratorieförsöken 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 töjningshastigheter mellan $30 \cdot 10^{-6}$, och 10^1 s^{-1} . Arbetet baseras på tidigare laboratorieförsök, utförda med låga belastningshastigheter av Yang m.fl. (2013). För en beskrivning av den bildbaserade modelleringsmetod som används hänvisas till presentationer av Huang m.fl. (2015) 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 brottenergi. Provnings- och utvärderingsmetoderna ses som en fortsättning och komplement till försök med tryckprovning som tidigare genomförts av Landis m.fl. (1999, 2007). 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, avledds och förgrenas.

I samband med *böjprovning av runda plattor* av ultrahögpresterande fiberarmerad betong (UHPFRC) använde Barnett m.fl. (2010) elektrisk resistivitetsmätning och CT-skanning för att undersöka fibrernas orientering. De runda plattorna som provades hade diametrar på 550 mm, tjocklekar på 25 eller 50 mm och gjöts med innehåll av 2,0-4,0 vol-% 13 mm långa stålfibrer. Olika sätt att hålla betongen i gjutformarna användes och de färdiga plattorna belastades sedan till brott i böjning av en centrisk last. Provningsarna visade att fibrerna tenderade att rikta sig vinkelrätt mot flödesriktningen vid gjutningen och därför hade plattor där betongen hållits från mitten betydligt högre bärförmåga än övriga plattor.

Anledningen var att fler fibrer överbryggade de radiella sprickor som bildades under pålastningen. Från de provade plattorna togs borrkärnor med en diameter på 100 mm vilka CT-skannades. Utifrån 2D bilder av kärnornas tvärsnitt uppskattades fibrernas orientering grafiskt med bildbehandlingsprogrammet ImageJ (2016). Fibrernas orientering uppskattades genom att anta att deras riktning följer huvudaxeln för de ellipsytor som visas där en lutande fiber skär provcylinderns betraktade tvärsnittsytta. Uppsprickning i samband med dragbelastning i samband med *böjprovning av balkar* av fiberarmerad ultrahöghållfast betong (UHPC) redovisas av Rios m.fl. (2019). Balkarna innehöll två olika fibertyper, raka 13 mm långa fibrer och 30 mm fibrer med ändkrokar, och deras orientering i betongen undersöktes också genom CT-skanning – se vidare beskrivningen i avsnitt 3.3.

Uttagsmekanismer för olika vanliga stålfibrer undersöktes med en speciellt framtagen metod för utdragnings tester utförda på plats i en röntgenmikrotomograf av Flansbjer m.fl. (2018, 2019). Cylindriska betongprover med diametern 50 mm och höjden 43 mm gjöts med en enda stålfiber utstickande vinkelrätt genom cylinderns överyta. Totalt 6 olika stålfibertyper, alla med längden 60 mm provades. Provkropparna var anpassade för att kunna monteras inne i en CT-skanner där också utdragsprovningen genomfördes. Efter varje belastningssteg genomfördes en skanning av provkroppen vilket tog ca 1 timme, och totalt ungefär en hel dag för ett komplett prov. Resultaten visar att lastöverföringen initieellt dominerades av skjuvning längs fibern men när lasten ökade sker glidning i området kring ändkrokarna varvid mekanisk låsning blev den dominerande lastbärande mekanismen.

Mikrotomografering har också använts av Stock m.fl. (2002) för att undersöka tidsförlopp och utbredning vid *sulfatangrepp* i cementpasta. 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 1-4 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.

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 årtidsbetingad *frostnedbrytning* och uppsprickning i borrkärnorna med diametern 75 mm. Parallellt gjordes också för jämförelse en kvantitativ undersökning med metod baserad på akustisk emission (AE) i samband med provtryckning.

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. Dataanalysen genomfördes här med den kommersiella bildbehandlingsmjukvaran Avizo (2021). 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 tomografieresultat 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.

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.

3.2 Porositet och materialstruktur

De vanligaste studierna av provkroppar av betong och cementpasta där dator-tomografering 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. 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. 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 $110 \times 120 \times 160/180$ mm³ undersöktes med dator-tomografering och deras sprickmönster jämfördes vid utvärderingen med uppmätta elastiska partikelhastigheter. 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. 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 cementpaster, 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.

Olika betongtypers mikrostruktur har studerats med CT-skanning av Clark m.fl. (2020), som redovisar tre olika studier. Den första av dessa är på en typ av *cellbetong*, en betong med låg densitet på ca 500-1400 kg/m³ som framställs genom inblandningen av lättballast till exempel bestående av cellplastkuler. Materialet har tillämpningar som till exempel krossbar energiabsorberare men är också ett billigt fyllnadsmaterial som även kan användas för akustisk isolering och värmeisolering. Med CT-skanning undersöktes provcylindrar med 100 mm diameter och 200 mm höjd av denna betongtyp. Resultaten överfördes senare till finita elementmodeller där regioner med spänningskoncentrationer vid belastning identifierades. I en andra studie gjordes försök att identifiera karakteristiska tätheter för *hydratiseringsprodukterna* i Portlandcement. Syftet var att kunna använda dessa tröskelvärden för att identifiera beståndsdelarna i en betongvolym. De fyra huvudsakliga hydratiseringsprodukterna i Portlandcement (C-S-H, CH, AFm och AFt) syntetiserades, komprimerades och gjöts i fyr-lagrade cylindriska provkroppar med diameterarna 3,7 mm och höjderna 2-5 mm vilka sedan CT-skannades. Gråskalevärden för respektive hydratiseringsprodukt identifierades. Som en tredje studie demonstreras hur snabb datatomografering kan användas för att möjliggöra *realtidsbedömning* av olika nedbrytningsmekanismer i betong. Den pilotstudie som redovisas sägs kunna reducera

skanningstiden från 30 min till 15 sekunder genom att detaljstyra röntgenstrålarnas energinivåer.

3.3 Fiberinnehåll, fördelning och orientering

Majoriteten av de publicerade undersökningarna av orientering av stålfibrer har fokus på höghållfast och självkompakterande betong. En viktig teoretisk del är här utvecklingen av numeriska metoder för att tolka resultaten från en CT-skanning och utifrån 3D bilder bestående av voxlar identifiera och beskriva fibrernas läge och orientering. En relativt aktuell sammanfattning över utvecklingen av de metoder och teorier som använts ges av Miletić m.fl. (2020). I det följande sammanfattas den sammanställningen samt kommenteras och kompletteras med ytterligare referenser relevanta för det aktuella projektet med fokus på gjuten och sprutad stålfiberbetong för tunnlar.

En tidig undersökning där CT-skanning användes för att studera orientering och fördelning av stålfibrer genomfördes av Schnell m.fl. (2008). **Ultrahöghållfast betong** (UHPC) studerades, med $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$ provkroppar med 144 kg/m^3 av 6 mm långa fibrer, och sedan **normalhållfast** betong med 60 kg/m^3 , 60 mm fibrer i $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ provkroppar. För den numeriska bildanalysen användes programmet MAVI (2021) och en enkel tröskelteknik. Resultaten visade att fiberfördelningen inte är isotrop i betongvolymen utan fibrerna är oftast orienterade i en huvudriktning. Antalet fibrer i proverna ansågs dock vara otillräckligt för en tillförlitlig statistisk analys. En slutsats var att analyser av CT-skannade provkroppar är komplicerat vid höga doser av korta fibrer vilka kan vara tätt packade inom en liten volym, med många fibrer i kontakt med varandra. Små provstorlekar är att föredra vid mikro-CT-skanning, men då måste många prover från olika punkter i en struktur undersökas för att effektivt kartlägga fiberfördelningen i hela den aktuella volymen.

Efterföljande studier gjordes dock främst med små prover, långa eller tjocka fibrer vilket resulterade i lågt fiberantal inom de skannade volymerna där ofta en enkel tröskelprocess användes för att urskilja fibrerna. En metod som bygger på en automatiserad numerisk postprocess med en enkel tröskelteknik programmerad i Matlab (2021) presenteras av (Vicente m.fl., 2014). Som input till programmet ges antal pixlar, pixelstorlek, avstånd mellan horisontalsnitt och fiberinnehåll (vol-%). Metoden demonstreras med gjutna cylindriska provkroppar av **höghållfast betong**, med 200 mm höjd och diametern 100 mm, innehållande 1,0 vol-% 35 mm långa fibrer med ändkrokar. Den numeriska beräkningstiden för analys av en sådan provkropp anges till 3 timmar. Metodens stora nackdel är dock att fiberinnehållet måste vara känt för att ett tröskelvärde ska kunna sättas.

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^3 . Balkar med dimensionerna $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$ användes vid CT-skanningen. 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^3 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. Plattor av självkompakterande stålfiberbetong undersöktes också (Ponikiewski m.fl., 2015c), där samma betongtyp och fibermängd 80 kg/m^3 användes. Samma undersökningsmetodik och parameterinställningar användes i ytterligare en undersökning där Ponikiewski & Katzer (2016) utvärderade uppträddet vid böjning av balkar av samma självkompakterande betong, även här innehållande 40, 80 och 120 kg/m^3 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. För bildanalys användes The Insignh Toolkit (ITK, 2021). För den automatiserad numeriska processen valdes ett tröskelvärde som motsvarar radiodensiteten för stål, det vill säga 3000 Hounsfield-enheter. Denna enhet (CT-nummer) anger den relativa oförmågan hos den elektromagnetisk strålningen att passera genom ett visst material. Tillförlitligheten och användbarheten blir dock begränsad när gräskalavärdena i CT-bilderna (tomogrammen) inte är exakt kända. Fördelningen av stålfibrer i ***självkompakterande betong*** har också studerats av Andries m.fl. (2015) och Verstrynge 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. Vid databehandlingen registrerades fibrernas yttertytor i 3D koordinater varifrån tvärsnittens fiberandelar och fibrernas orienteringskoefficienter beräknades.

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^3 stålfibrer med en längd av 36 mm och ballast i fraktioner upp till 16 mm. 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 cylindriska prov med dimensionen $\phi 100 \times 250$ mm tagna ur mittsnittet av ***stålfiberarmerade betonggolv***. Fibrernas riktningar bedömdes utifrån en 3D skelettbild härledd från 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. Anlysmetoden beräknar orienteringen för varje voxel i en skannad volym. Denna data samlas i en serie matriser, Hessianer, som uttrycker den tänkta funktionens partiella

andrerivator. Beräkningstiden anges till 2,5 timme för en 70 mm hög cylinder med diametern 100 mm. Också Oesch m.fl. (2018) presenterar en likande analysmetod som även den bygger på bestämning av Hessianer, men även här kan fiberfördelningen endast redovisas som funktion av fiberlutningar i enstaka punkter eftersom metoden inte möjliggör att enstaka fibrers ändpunkter identifieras. Här användes Matlab (2021) för de numeriska beräkningarna där provcylindrar $\phi 70 \times 140$ mm, $\phi 70 \times 70$ mm och $\phi 70 \times 150$ mm med 3,2 vol-% av 30 mm långa stålfibrer analyserades. Fokus i studien var på **gjutordningens** inverkan.

I en undersökning av inverkan från **mixningstiden** på residualhållfasthet, tryckhållfasthet porositet, fiberorientering och fördelning använde Balázs m.fl. (2017) bland annat CT-skanning. Den studerade betongen innehåll 50 mm långa stålfibrer med ändkrokar i mängder om 0,3 vol-% och 0,5 vol-%. Skanningen genomfördes på betongprismor med dimensionen $300 \times 150 \times 150$ mm³. Varje 1,2 mm tjock tvärsnittsbild (150×150 mm²) processades sedan med en automatiserad algoritm implementerad med Matlab (2021). Varje tvärsnitt delades in i 6×6 rutor inom vilka det fiberinnehåll (vol-%) som motsvarade arean av de i tvärsnittet korsande fibrerna. För att kunna beskriva fibrernas orientering identifierades och uppmärktes sedan respektive fiber manuellt. Resultaten visade att den största mängden fibrer fanns längst ned i betongprismorna och minskade upp mot överytan.

Fördelningen av stålfibrer i **ultrahöghållfast betong** (UHPC) studerades av Ruan & Poursaei (2019). Fiberfördelningen undersöktes med hjälp av tre tekniker; konventionell bildanalys av sågade skivor, mätning av elektrisk ledningsförmåga (Electrical Impedance Tomography, EIT) och CT-skanning. Studerad UHPC innehöll 13 mm stålfibrer med 0,5-2,0 vol-% fibreinnehåll. Alla tre tekniker kunde bestämma fiberfördelningen i UHPC-proven, men EIT-mätningarna krävde minimal förberedelse och ansågs vara billigare och snabbare jämfört med de övriga metoderna. För CT-skanningen användes cylindriska provkroppar $\phi 100 \times 200$ mm. Ingen information om fiberlutningar och position för hela fibrer bestämdes. Resultaten redovisas endast som andel fiberarea för varje höjdsektion som undersökts. Fiberarmerad **ultrahöghållfast betong** (UHPC) studerades också av Rios m.fl. (2019) som bland annat använde CT-skanning för att kartlägga porsystem och fördelningen av stålfibrer. Två fibertyper användes, raka 13 mm långa fibrer och 30 mm fibrer med ändkrokar. Den provade betongtypen innehöll 196 kg/m³ stålfibrer, i tre kombinationer; korta, långa och med hälften av vardera fibertypen. För CT-skanning gjöts fyra prismor av vardera typen, med dimensionerna $100 \times 25 \times 25$ mm³. Analysen av CT-bilderna utfördes med den kommersiellt tillgängliga programvaran Avizo (2021) vilket rapporteras ge bra resultat, men på bekostnad av att analyserna blir beräkningsintensiva och långvariga. Genom att identifiera tröskelvärden utifrån identifierade nivåer i bildernas gråskala separerades porer, cementpasta och stålfibrer. Beskrivningen av fibrernas orientering gjordes genom medelvärdesbildning av utifrån bilderna manuellt identifierade stålfibrer. För varje CT-skannad prisma gjordes detta för minst 4 st tvärsektioner, och därmed behövde alltså $4 \times 3 \times 4 = 48$ st tvärsektioner gås igenom okulärt.

En alternativ numerisk analysmetod presenteras av Miletić m.fl. (2020), som utvecklat en tvåstegsmetod för att också identifiera stålfibrer i **ultrahöghållfast betong**. Först används lokala intensitetsgradienter för detektering av fibrernas centerpunkter, vilket följs av en expansion av volymen för att bestämma rätt längd och göra en formuppskattning. Den numeriska rutinen har implementerats i Python (2021) där bland annat avancerade tröskelalgoritmer har programmerats. Metoden demonstreras genom analys av 50-82 mm höga utborrade betongcylindrar med diametrar inom 43-49 mm diameter och innehållande 2,0 vol-% stålfibrer. En första uppsättning provkroppar innehöll 13 mm långa stålfibrer medan en andra innehöll lika mängder av 20 mm långa, raka fibrer och 25 mm fibrer med ändkrokar. Analysen av de CT-skannade provkropparna visade att den numeriska rutinen kunde skilja på de två fibertyperna utifrån deras olika diametrar och att beräkningstiden för ett prov var ca 30 min, med en arbetsstation med Windows 10 och 16 GB RAM. Det påpekas dock att den automatiserade rutinen med vald tröskelalgoritm resulterade i en viss mängd fragmenterade (delade) fibrer och att vissa fibrer i kontakt inte kunde separeras. Ändå hävdas att analysprogrammet lyckas identifiera ca 98% av stålfibrerna i den analyserade volymen.

3.4 Sprutbetong

Publicerade laboratorieundersökningar av sprutbetong där CT-skanning används är mycket ovanliga. I ett projekt med fokus på **frostnedbrytning** av sprutbetong presenterar dock Liu m.fl. (2021) en studie där nanoindentering och mikro-CT använts för att undersöka materialet. Provkropparna bestod dock av gjuten betong, med samma sammansättning som sprutbetong utan fibrer. Provbalkar med dimensionen $75 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ utsattes för upp till 600 fyratimmars frostcykler mellan $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ och $+4 \text{ }^\circ\text{C}$. Studier av eventuell sprickbildning i materialet gjordes i meso- och i mikroskala. För undersökning i mesoskala sågades kuber på $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ut, vilka undersöktes med CT-skanning. Provkropparnas storlek motiverades här av att den största ballastfraktionen bedömdes vara 2,8 mm och de största luftporerna 1,7 mm. För studier i mikroskalan fokuserades på eventuell sprickbildning i gränzonen mellan cementpasta och ballast (ITZ, interfacial transition zone). Här uttogs mindre provkuber om $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ vilka också dem undersöktes med CT-skanning, men här följt av nanoindentering. Den senare är en metod för att karakterisera utvecklingen av mekaniska egenskaper i mikroskala. Vid beredningen av en högkvalitativ yta för nanoindentering inbäddas först proverna i epoxi och poleras sedan. I testet appliceras en provspets av hårt material för att sondera intryckningsmodulerna för cementpasta, ballast och i ITZ. Undersökningen visade i mesoskalan att antal och längd hos observerbara mikrosprickor tydligt ökar med ökande antal frostcykler. I mikroskala kunde observeras att den genomsnittliga tätheten och intryckningsmodulen i ITZ är ca 30% lägre än i omgivande cementpasta.

Ett konferensbidrag av Pittino & Galler (2009) beskriver CT-skanning av stålfiberarmerad sprutbetong från tunnlar, med syfte att beskriva **fiberorienteringen**. I proceedings för konferensen redovisas dock endast en översiktlig poster, utan att detaljförklaringar och beskrivningar ges. Postern visar undersökningsproceduren med

illustrationer, där först borrkärnor från sprutbetong i en tunnelvägg tas ut. Sedan visas en översiktbild av utrustningen för CT-skanning. En 3D CT-bild av provkärnan och en över stålfibrerna visas sedan, följt av ett 3D koordinatsystem som definierar en fibers orientering relativt sprutriktningen och tunnelns längdaxel. Detaljer ges dock i en senare tyskspråkig artikel av Pittino m.fl. (2011). Här ges bakgrunden till de redovisade resultaten och det framgår bland annat att 200 mm höga borrkärnor med 100 mm diameter har CT-skannats. Sprutbetongen har innehållit 35 mm långa fibrer med ändplattor. Inga ytterligare resultat beträffande fördelning av fiberorientering ges förutom de i postern redovisade tabellerna med statistiska parametrar och diagrammen över fiberlutningar. De senare återges här i nästa avsnitt. Ytterligare en studie av fiberorienteringen i sprutbetong presenteras av Kaufmann m.fl. (2013). Här har CT-skanning använts för att studera strukturen hos syntet- och stålfibrer i sprutbetong i samband med att graden av återstuds vid sprutning har undersökts. De skannade provkropparna innehöll 30 kg/m^3 av 35 mm långa stålfibrer vilket jämfördes med sprutbetong med 4,6-9,1 kg/m^3 syntetiska makrofibrer, 40-50 mm långa. Skanningen genomfördes med 50 mm höga borrkärnor med en diameter på 60 mm. Som slutsats ges bland annat att stålfibrerna i det här fallet har uppvisat en nära slumpvis orientering i sprutbetongen.

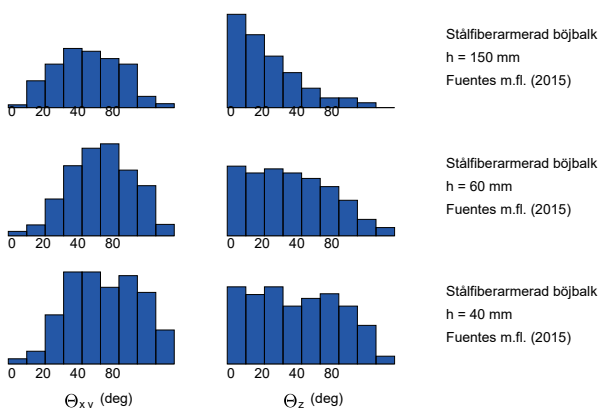
Tre projekt där CT-skanning används för att studera **3D-skriven betong** (Shotcrete 3D Printing, SC3DP) presenteras av samma tyska forskargrupp. En undersökning av luftporsystemet presenteras av Kloft m.fl. (2020). Betongen innehåller här endast PP-fibrer med en halt om 3 kg/m^3 , och inga stålfibrer. Från den sprutade betongen har 60 mm höga borrkärnor med en diameter på 30 mm tagits ut. Fördelningen av luftporer i proven (vol-%) redovisas sedan som funktion av läge längs de skannade provcylindrarna. Samma dimension på borrkärnor har använts av Dressler m.fl. (2020) som genom CT-skanning har fokuserat på gränsskiktet mellan två sprutetapper där olika mängd accelerator har använts i betongen. Större provkroppar har CT-skannats av Freund m.fl. (2020) som har undersökt samverkan mellan 3D skriven betong och armeringsstänger av stål samt kolfiber. En enstaka stång med diametern 12 mm har varit fäst i en betongvolym om ca $300 \times 150 \times 120 \text{ mm}^3$. Hela provet inklusive stång har CT-skannats innan stången har dragits ut.

3.5 Exempel på fördelning av fiberorientering

Här visas några utvalda, representativa exempel på fiberorienteringar från några av de publikationer som sammanfattades och kommenterades i avsnitt 3.1-3.4. Graferna med fiberorienteringarna har i vissa fall justerats i relation till hur de visas i ursprungspublikationerna, för att vara sinsemellan jämförbara. De följer också samma uppställning som används för att redovisa exemplen i kommande avsnitt 5.1-5.9. Vinkeln θ_z är vinkeln mot horisontalplanet i en cylindrisk provkropp, vilken ofta är orienterad så att längdaxeln (z-axeln) är orienterad i provets gjutriktningen, eller i sprutriktningen. Vinkeln θ_{xy} avser orienteringen i horisontalplanet, relativt en av huvudaxlarna. Hur dessa är orienterade

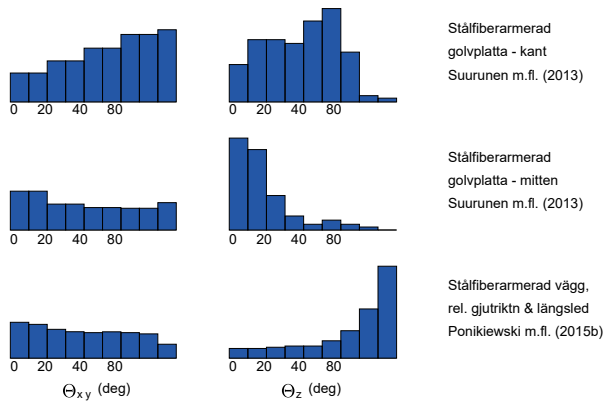
beror på hur provet har placerats relativt strålningsriktningen under CT-skanningen. Vinklarnas definition visas grafiskt i Figur 29.

Det första exemplet i Figur 13 är från försöken av Fuentes m.fl. (2015) och valda för att de demonstrerar variationer i fiberorientering i gjuten betong på grund av inverkan av den avgränsade betongvolymens dimensioner, det vill säga långa och lika breda balkar med olika höjd. Som framgår av vinkeln θ_z så orienterar sig fibrerna mer horisontellt desto högre balken blir, det vill säga då inverkan av formens botten och den fria, avjämnade överytan avtar. I horisontalplanet (θ_{xy}) är fiberriktningen nära normalfördelad i alla tre fallen. Samma fenomen kan ses vid jämförelserna av de två översta fallen i Figur 14, som har hämtats från Suuronen m.fl. (2013). Här är det en gjuten golvplatta där prov tagna i plattans kant visar sidoformens inverkan på fiberorienteringen. Mitt i plattan är fibrerna relativt ostörda och orienterar sig nära nog horisontellt i plattans huvudplan. Det tredje och nedersta fallet i Figur 14, från Ponikiewski m.fl. (2015c), visar fiberorienteringen i en gjuten vägg. Här är fibrerna huvudsakligen vertikalt orienterade, alltså i väggens huvud-plan. I det sista exemplet i Figur 15, från Pittino & Galler (2009), visas fiberorienteringen i sprutbetong på en tunnelvägg. Här är fibrerna orienterade i sprutbetongens huvudplan, vinkelrätt mot sprutriktningen.



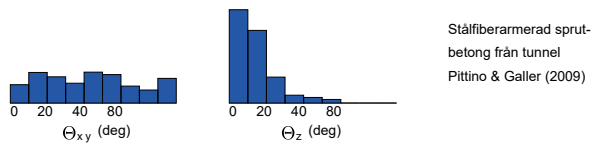
Figur 13. Exempel på fiberorientering i böjbalkar med olika höjder. Från Fuentes m.fl. (2015).

Figure 13. Examples of fibre orientations in flexural beams with different heights. From Fuentes et.al. (2015).



Figur 14. Exempel på fiberorientering i golvplatta och vägg. Från Suuronen m.fl. (2013) och Ponikiewski m.fl. (2015c).

Figure 14. Examples of fibre orientations in floor slab and wall. From Suuronen et al. (2013) and Ponikiewski et al. (2015c).



Figur 15. Exempel på fiberorientering i sprutbetong från tunnel. Från Pittino & Galler (2009).

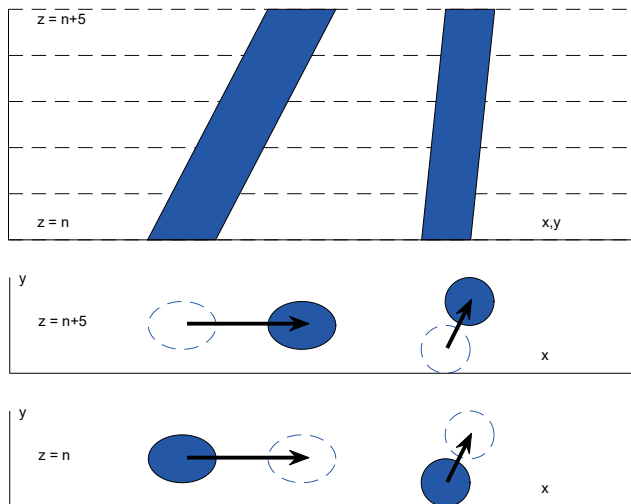
Figure 15. Example of fibre orientations in shotcrete from tunnel. From Pittino & Galler (2009).

4. METOD FÖR ANALYS AV FIBERBETONG

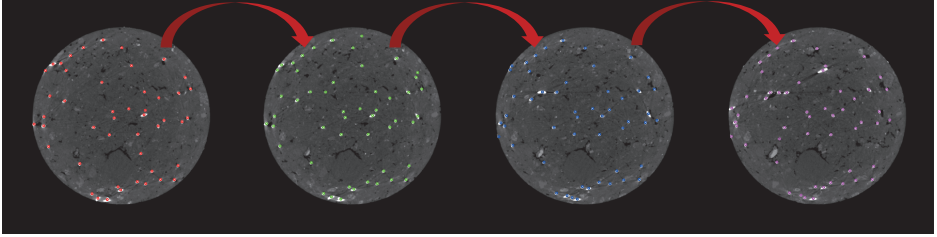
Data från CT-skanningen lagras som en sekvens av gråskalebilder beskrivande en provcylinders cirkulära tvärsnitt i ordning efter ökande höjdläge. Varje bild motsvarar således en skiva av cylindern med en voxels tjocklek. Bilderna sparas som tif- eller bmp-filer som kan läsas in i Matlab (2021) för vidare databehandling. De stålfibrer som korsar respektive tvärsnitt visas i bilden som ett vitt eller mycket ljust område, cirkulärt eller ellipsformat beroende på fiberns lutning. Principen visas i Figur 16 där två fibrer med olika lutning i 3D-volymen visas överst med en sidovy, där höjdkoordinaten z är cylinderns längdaxel. De två undre delfigurerna visar de två fibernas skärning med övre och undre horisontella tvärsnittsplanen. I följande två avsnitt demonstreras den numeriska analysrutin som utvecklats inom projektet och som används för att från grafisk information i bitmap-form beskriva stålfibers läge och orientering.

4.1 Fibrer i tvärsnitt av provcylinder

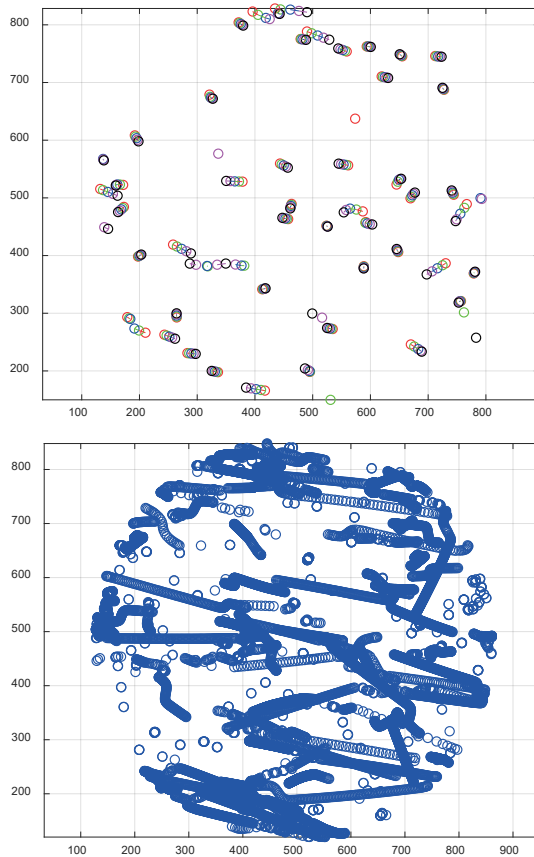
Med numerisk bildanalys i Matlab identifieras centrumpunkten för varje ljust område som representerar tvärsnittet av en fiber och dess läge sparas i en matris som en koordinatpunkt inne i fibern. Varje tvärsnittssektion kommer att representeras av en matris, som typiskt kan innehålla 800×800 element, och det totala antalet sådana matriser, typiskt 1500-2000 st, visar då läget för punkter i fibrer inne i den skannade betongvolymen. Hur fibernas läge kan variera mellan tvärsnitten visas i Figur 17-18, först för en sekvens av fyra efterföljande tvärsnitt och sedan med en horisontalprojektion av alla identifierade punkter i en provcylinder.



Figur 16. Två lutande stålfibrer, vertikalvy och två horisontella tvärsnitt.
Figure 16. Two inclined steel fibres, vertical view and two horizontal cross-sections.

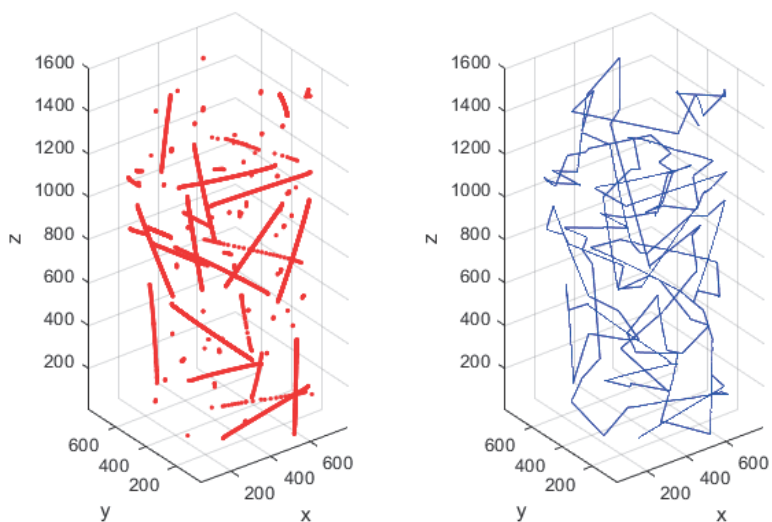


Figur 17. Identifiering av mittpunkt av fibrer i sekvens av tvärsnitt.
Figure 17. Identified centre points of fibres in a sequence of cross-sections.



Figur 18. Horisontalprojektion av mittpunkter i sekvens (vä.), från alla tvärsnitt (hö.).
Figure 18. Horizontal projection of points in sequence (L), from all cross sections (R).

Om varje identifierad skärningspunkt mellan fiber och ett tvärsnitt plottas som en punkt i ett 3D diagram fås en bitmap-representation av fibrerna i betongvolymen, se Figur 19 (vä). Här framgår också tydligt att beroende på fibrernas lutning så varierar det inbördes avståndet mellan punkterna avsevärt. Det finns också fibrer där punkter tycks saknas, vilket kan bero på att skärningspunkten har varit ottydligt avbildad i 2D bilden över tvärsnittet. I figuren syns också ett relativt stort antal friliggande, singulära punkter som inte kan hänföras till någon fiber. Dessa kommer från mineralpartiklar inne i ballast-materialet, med täthet nära den hos stål. Punkterna komplicerar den numeriska behandlingen men kan inte markeras som singulära och exkluderas innan fibrerna har identifierats eftersom det då finns risk att även punkter som ligger på en fiber tas bort ur datamängden.



Figur 19. Skärningspunkter med fibrer i alla tvärsnitt (vä.) och punkterna sammanbundna (hö).

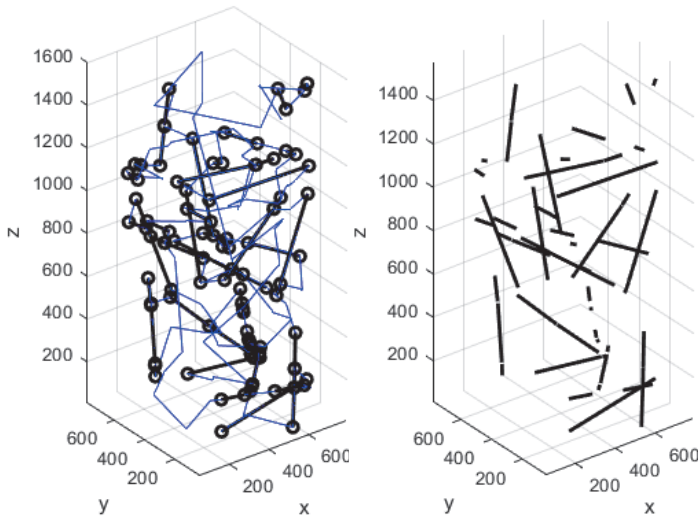
Figure 19. Crossing fibres at all cross sections (L) and these points interconnected (R).

För fortsatt analys är det nödvändigt att definiera fibrerna på vektorform. Som ett första steg sorteras därför punkterna så att respektive fibers ändpunkt framträder tydligare, se Figur 19 (hö). Datapunkterna ordnas i tre långa koordinatvektorer (x,y,z) där ordningen i princip följer z -vektorns kontinuerligt ökande värden, från nedersta punkt till översta. Ökningen i z -koordinat är dock inte strikt eftersom varje nästkommande punkt väljs som den med kortaste avstånd till aktuell punkt. Den blå, multi-linjära 3D-kurva som visas i figuren representerar således en väg där samtliga datapunkter passerar i ordning, även de singulära punkterna. För CT-skannade cylindrar av stålfiberbetong kan datamängden bli

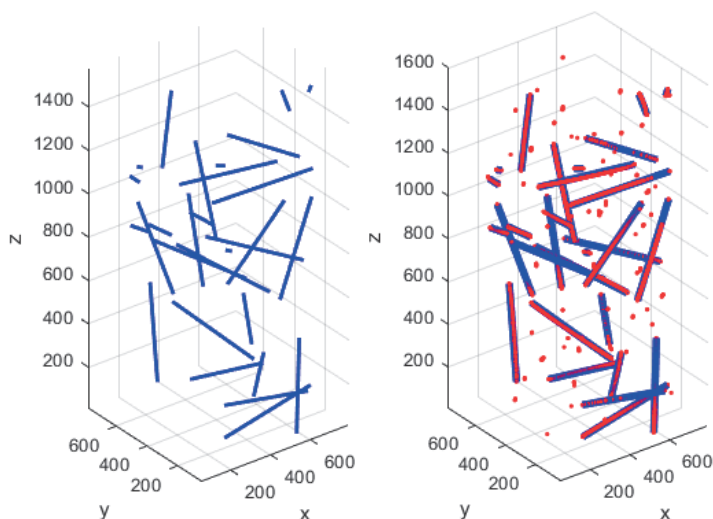
relativt stor, möjligen med fler än 50 000 punkter (se avsnitt 5.7), vilket gör sorteringsprocessen numeriskt krävande. Teoretiskt behöver för ett sådant fall en avståndsmatrix med $50\,000 \times 50\,000$ beräknade avstånd upprättas. Matrisen är dock symmetrisk och en särskild rutin som lagrar avstånden i sub-matriser har särskilt utvecklats för det här projektet.

4.2 Fiberorientering

För att fullt ut kunna beskriva fibrernas läge och orientering behöver de beskrivas på vektor-form, det vill säga definieras av två ändpunkter med kända (x,y,z)-koordinater. Utifrån den sorterade långa vektor som visas i Figur 19 och 20 (blå kurva) identifieras raka linjesegment som innehåller flertalet punkter. Där avståndet mellan punkterna är stort och/eller där kurvan märkbart byter riktning sätts en markör, se Figur 20 (vå). Dessa markörer är fiber-vektorens ändpunkter och alla mellanliggande punkter kan därmed tas bort ur datamängden. De tabellerade ändpunkterna kan nu läsas av och de vektorer som representerar fibrer, eller fibersegment, kan nu plottas som räta linjer, se Figur 20.



Figur 20. Identifierade brytpunkter med räta linjer (fibersegment) däremellan.
Figure 20. Identified breaking points with straight lines (fibre segments) between.



Figur 21. Ihopkopplade räta linjer (fibrer) och jämförelse med skärningspunkter.
Figure 21. Connected straight lines (fibres) and comparison with crossing points.

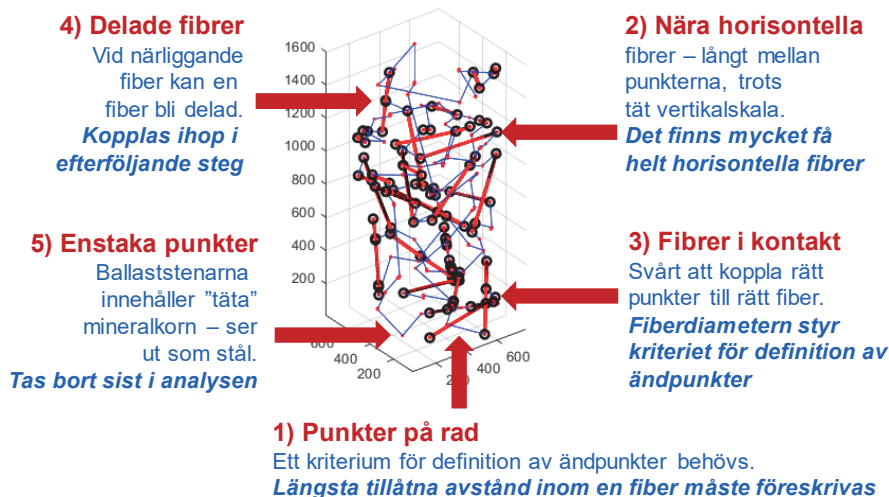
En del av de identifierade fiber-vektorena har avbrott vilket medför att en fiber kan representeras av flera kortare linjer med glapp emellan. Orsaken är att vid sorteringen, blå tunna kurvan i Figur 19-20, kan punkter på närliggande fibrer ge upphov till att en punkts närmaste nästa punkt ligger i en annan fiber än den egna. Eftersom kurvan passerar genom samtliga punkter kommer den dock alltid att återkomma till den fiber som lämnades i förtid och där börja följa en ny rät linje. Genom att avsöka alla identifierade fiber segment, svarta linjer i Figur 20, kan linjer med samma vektorriktning sammankopplas varvid ändpunkterna skiftas. Resultatet visas här med blå linjer i Figur 21. Här jämförs också slutligen de identifierade fibrerna med de ursprungliga (röda) skärningspunkter som också visas i Figur 19.

4.3 Numeriska villkor och resultatkonvergens

Den numeriska procedur för att koppla ihop bitmap-punkter till vektorer, som beskrivits i 4.1-4.2 ovan, kan kompliceras på grund av ett flertal faktorer och orsaker. Fem av dessa illustreras här i Figur 22, där den första (1) redan ovan har kommenterats. Så länge punkter ligger relativt nära varandra och på en rät linje antas att de tillhör samma fiber, men det behövs ett villkor för då fibrers ändpunkt kan ansättas. Lämpligt är att använda maximalt tillåtet avstånd som kriterium för avslut av en fiber men det behöver väljas med omsorg. Då fibrerna ligger nära horisontellt (2) blir avstånden mellan punkterna relativt långt. Teoretiskt betyder det att en fiber som är helt perfekt horisontellt orienterad endast skulle beskrivas med en enda punkt vid skärning med ett observerat tvärsnitt. I praktiska fall är sannolikheten för att det ska inträffa mycket låg eftersom fibrerna har en diameter

flera gånger större än indelningen i höjddled och dessutom är de ofta försedda med ändkrokar så att de i princip utgörs av fem kopplade linjära segment. Även fibrer som är något böjda eller krokiga kommer att beskrivas med fler segment än motsvarande helt raka fibrer.

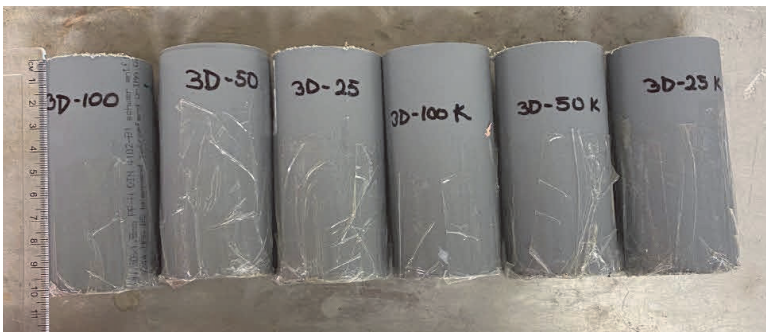
Då fibrer ligger mycket nära eller är i kontakt (3) blir det tätt mellan punkter som hör till olika fibrer. Därför bör ett kriterium för att hitta ändpunkter väljas så att det är relaterat till fiberdiametern. Problematiken är besläktad med de fall där fiber delas (4), det vill säga beskrivs av rätta linjer som ligger i linje. Problemet har kommenterats ovan och löses genom ett efterföljande analyssteg där närliggande linjer med samma lutning slås samman. Även fallet med enstaka punkter (5) som ej härrör från fibrerna utan från ballasten har kommenterats tidigare. Först då alla punkter som uppfyller de kriterier för sammankoppling till rätta linjer har tilldelats definierade fibrer kan de punkter som ej uppfyller kraven tas bort från datamängden. Om några stycken närliggande punkter finns, till exempel från större mineralkorn, kommer dessa att först bilda en "mikrofiber". Alla sådan tas bort ur listningen över definierade fibrer genom att ansätta en minimilängd för godkända fibrer.



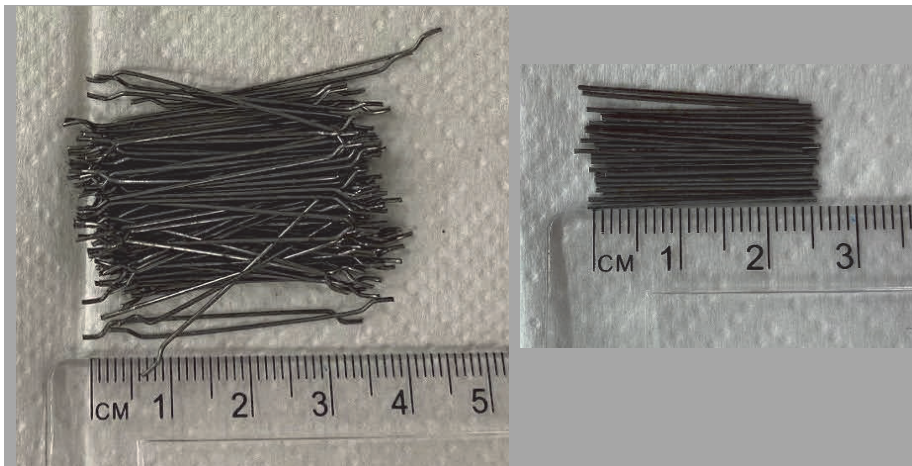
Figur 22. Illustration av numeriska problem för identifiering av fibrer i vektorform.
Figure 22. Illustration of numerical difficulties in identifying fibres in vector form.

Att genomföra en konvergensanalys baserat på inskannade betongprover är inte helt okomplicerat. Målet måste vara att undersöka hur stor andel av ett känt antal stålfibrer som finns i den studerade volymen som hittas. Med de relativt stora fibermängder som normalt blandas in i betong är det komplicerat att efter CT-skanningen krossa materialet och exakt räkna alla fibrer. Om en uttagen borrkärna undersöks kompliceras analysen ytterligare av att ett relativt stort antal fibrer har kapats av vid utboringen av kärnan.

Därför har inom det här projektet särskilda provcylindrar gjutits med manuell tillsats av ett noggrant räknat antal stålfibrer. En serie provcylindrar, 100 mm höga och med diametern $\text{Ø}50$ mm gjöts med färdigmixad finbetong, i former av PVC-rör, så som visas i Figur 23. Hela serien bestod av 6 st cylindrar, med tillsats av 25, 50 och 100 st fibrer. Dock har endast fyra av dessa CT-skannats och undersökts. Två av de undersökta cylindrarna innehöll stålfibrer av typen Dramix 3D 65/35, och de övriga två samma typ av fibrer men där ändkrokarna hade kapats av. De intakta fibrerna är 35 mm långa och de raka, de kapade är 25 mm – se Figur 24. Av vardera fibertypen har en cylinder gjutits med tillsats av exakt 25 st fibrer, och en med 100 st fibrer. Fibertypen Dramix 3D 65/35 har en diameter som är $\text{Ø}0,55$ mm. Analysresultaten för de fyra provkropparna redovisas i detalj i exempelavsnitten 5.1-5.4.



Figur 23. Betongprovkroppar med räknat antal stålfibrer, gjutna i PVC-rör.
Figure 23. Concrete samples with fixed number of steel fibres, cast in PVC pipes.



Figur 24. Stålfibrer för provkroppar, 35 mm med ändkrok och 25 mm raka fibrer.
Figure 24. Steel fibres for concrete samples, 35 mm with end hooks and 25 mm straight.

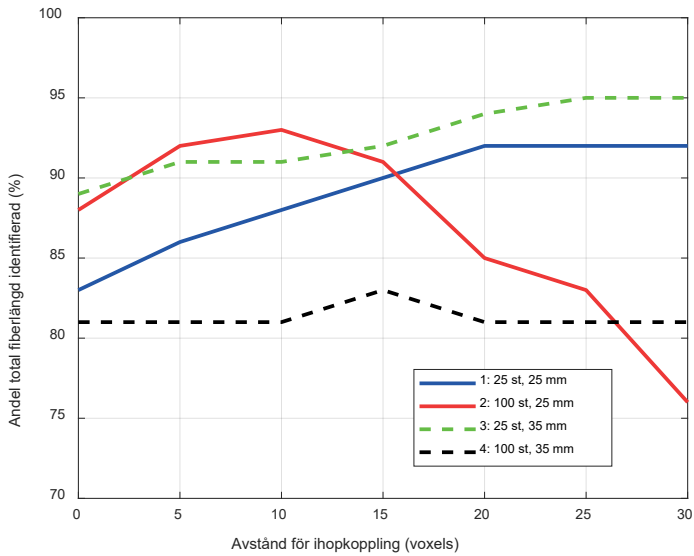
Som beskrivits ovan bearbetas koordinatpunkter som fås från en CT-skanning så att de pixlar/voxlar som representerar stålfibrerna kopplas samman till räta linjesegment (vektorer) som beskriver delar av stålfibrer. I ett efterföljande analyssteg kopplas sedan de ofta "avbrutna" fibrerna ihop till längre fibrer. För den beräkningen sätts en gräns för hur nära två parallella, eller nära parallella, linjer ska vara för att kopplas ihop. De ovan beskrivna fyra provkropparna har använts för att genomföra en konvergensanalys för valet av gränsvärde för sammankopplingen. Som standardvärde används $Limit = 15$, det vill säga att linjer närmare varandra än 15 pixlar/voxlar kopplas ihop. För de här analyserade fyra exemplen är voxelstorleken 0,05944 mm (se avsnitt 5.1-5.4), vilket ger $Limit = 0,89$ mm, det vill säga 1,6 gånger fibrernas diameter. Om gränsen här hade satts till 10 voxlar skulle det ganska precis motsvara en fiberdiameter. Att sätta gränsen till 1,5 gånger detta avstånd ger en marginal för numeriska avrundningar till gränsvärdet.

Konvergensens vid varierande val av $Limit$ för de fyra fallen jämförs i Tabell 1. Översta raderna för varje fall motsvarar ojusterade resultat, utan att linjer/vektorer har kopplats samman. Parametern *Antal* ger hur många linjer/vektorer, det vill säga fibrer, som respektive beräkning resulterar i. Med *Längd* avses hur stor andel av den sammantagna stålfiberlängden som finns i provcylindern, det vill säga summan av 25 eller 100 fibrers längd, som de definierade linjerna (vektorena) representerar. I den sista kolumnen kommenteras när det förekommer numeriskt beräknade fibrer med längder som överskrider de verkliga, och hur många och långa de är. Resultaten från tabellen illustreras i Figur 25 och 26. Först visas hur den totala fiberlängden (*Längd*) varierar med val av gränsvärdet $Limit$. Sedan visas för $Limit = 15$ (gulmarkerat i tabellen) hur fiberlängderna fördelas. Tjocka linjer ger kumulativ variation, tunna linjer representerar antal och medellängd.

Tabell 1. Antal fibrer och andel identifierad fiberlängd som funktion av *Limit*, gräns för sammankoppling. För de fyra exemplen redovisade i avsnitt 5.1-5.4. Se Figur 9-10.

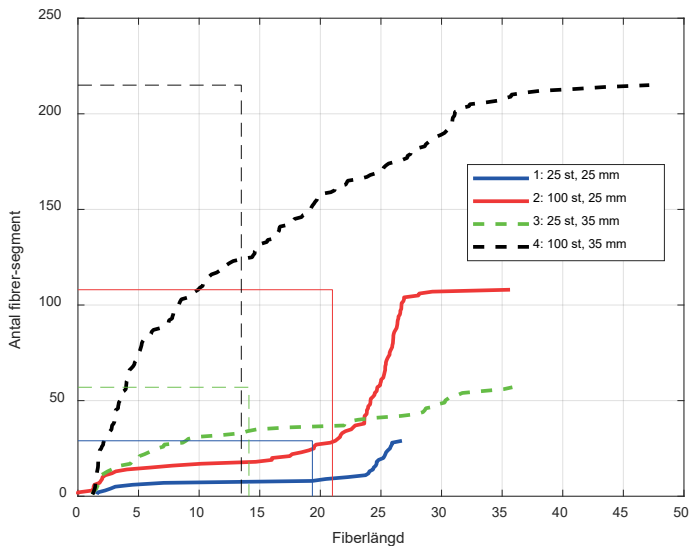
Table 1. Number of fibres and fraction of identified fibre length as function of connection criterion, Limit. For the four examples in section 5.1-5.4. See Figures 9-10.

Cylinder	Limit	Antal	Längd	Fiberlängd > max
(5.1) – 25 st, 25 mm (raka, kapade)	-	49 st	83%	-
	5	22 st	86%	2 st - 29, 30 mm
	10	23 st	88%	2 st - 29, 30 mm
	15	29 st	90%	1 st - 26 mm
	20	25 st	92%	2 st - 29, 30 mm
	25	24 st	92%	2 st - 29, 30 mm
	30	24 st	92%	2 st - 29, 30 mm
(5.2) – 100 st, 25 mm (raka, kapade)	-	228 st	88%	3 st
	5	158 st	92%	4 st, max 35 mm
	10	119 st	93%	4 st, max 35 mm
	15	108 st	91%	4 st, max 35 mm
	20	98 st	85%	4 st, max 35 mm
	25	92 st	83%	4 st, max 60 mm
	30	82 st	76%	4 st, max 60 mm
(5.3) – 25 st, 35 mm	-	72 st	89%	-
	5	64 st	91%	-
	10	63 st	91%	-
	15	57 st	92%	-
	20	50 st	94%	-
	25	42 st	95%	-
	30	36 st	95%	-
(5.4) – 100 st, 35 mm	-	308 st	81%	3 st
	5	283 st	81%	3 st, max 30 mm
	10	251 st	81%	3 st, max 41 mm
	15	215 st	83%	5 st, max 47 mm
	20	183 st	81%	6 st, max 45 mm
	25	129 st	81%	10 st, max 80 mm
	30	88 st	81%	8 st, max 80 mm



Figur 25. Andel identifierad fiberlängd som funktion av *Limit*, gräns för sammankoppling.

Figure 25. Fraction of fibre length identified as function of connection criterion, Limit.



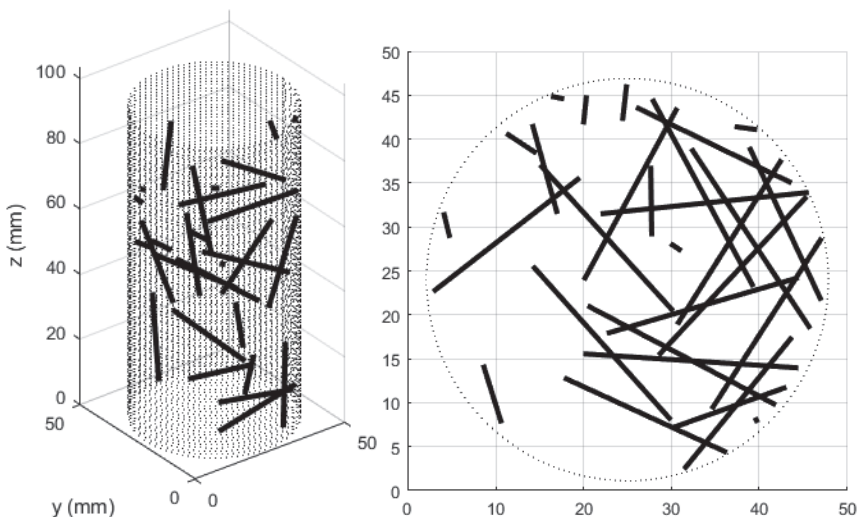
Figur 26. Fördelning av identifierade fibrers längd, vid beräkning med *Limit* = 15.

Figure 26. Distribution of identified fibres, from analysis based on Limit = 15.

4.4 Presentation av analysresultat

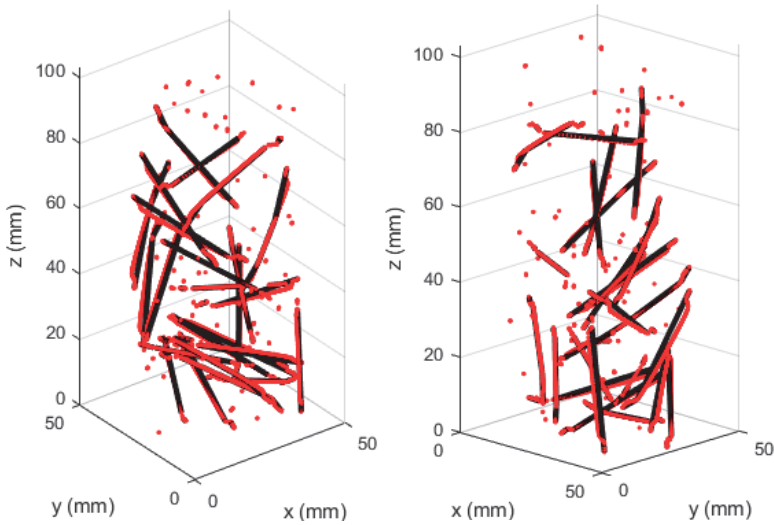
Analysresultaten i form av 3D vektorer positionsbestämda i den CT-skannade provkroppen kan med relativt liten datorinsats representeras grafisk, med de inbyggda grafikfunktionerna i Matlab (2021) eller annat grafikprogram dit lägesvektorerna kan exporteras. Att resultaten är i vektorform gör databearbetningen effektiv och minimerar det datalagringsutrymme som krävs. För till exempel det enkla fall som här illustreras i Figur 21 åtgår 58 positionspunkter för att definiera fibrerna som vektorer (svarta linjer) medan motsvarande i punktform (bitmap, röda punkter) kräver 3226 koordinatpunkter. För större fibermängder blir detta helt avgörande för om geometrin ska kunna hanteras effektivt numeriskt.

Exempel på identifierade raka stålfibrer i en betongcylinder med begränsningsytan skissad visas i Figur 27, med en 3D vy och en 2D horisontalvy. Det går också relativt enkelt att för jämförelse plotta fibrer i vektorform tillsammans med hela eller delar av punkt-representationen, så som visas i Figur 28. Här ses tydligt hur för vissa fibrer de räta linjerna approximerar de verkliga fibrerna genom att spänna från ändkrok till ändkrok. Några fibrer representeras också av en sekvens av räta linjer som följer ändkrokarna.



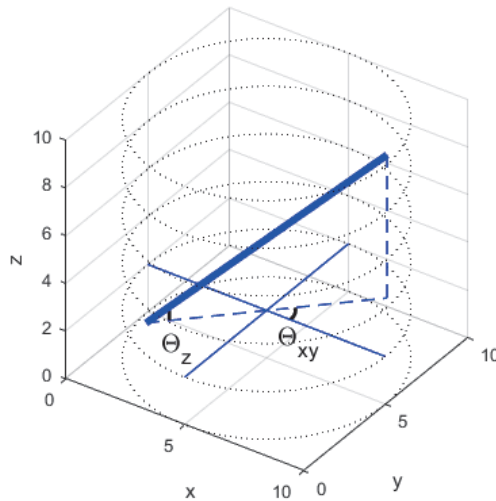
Figur 27. Exempel på presentation av analysresultat i 3D och 2D.

Figure 27. Example of presentation of analysis results in 3D and 2D..



Figur 28. Fibrer, hela eller i delar, representerade med räta linjer och jämförda med koordinatpunkter från CT-skanning.

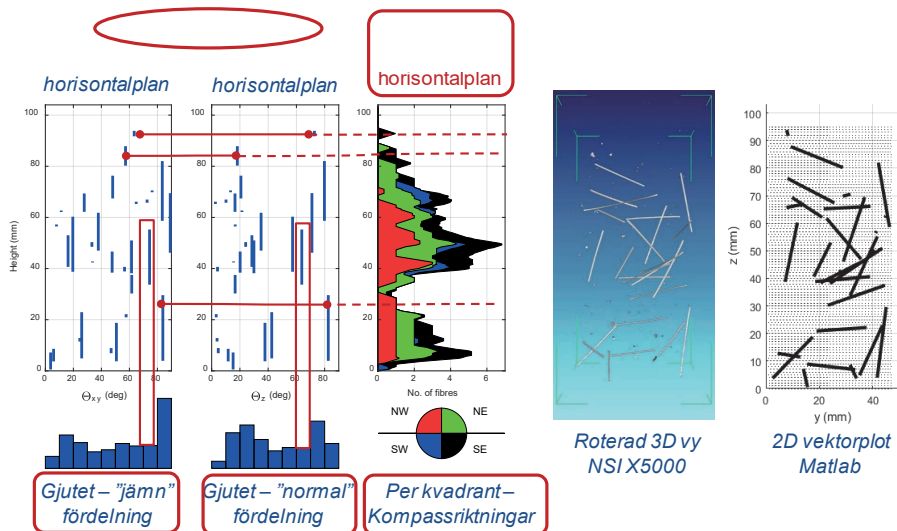
Figure 28. Fibres, complete or in parts, represented by straight lines and compared to coordinate points from CT-scan results.



Figur 29. Definition av en fibers lutning θ_{xy} relativt horisontalplanet och θ_z relativt vertikalaxeln.

Figure 29. Definition the fibre inclination θ_{xy} versus the horizontal plane and θ_z versus the vertical axis.

För att kunna beskriva fibrernas orientering i 3D volymen behövs två lutningsvinklar, som här definieras i Figur 29. Det antas att z -axeln följer en provcylinders längdaxel. Fiberns lutning relativt horisontalplanet är θ_z vilken definieras inom intervallet 0° till 90° , så att alltid minsta vinkeln mot horisontalplanet ges. En fiber så representerad har således ingen definierad start- eller slutpunkt, endast två ändpunkter. Fiberns orientering i horisontalplanet ges av θ_{xy} som också den definieras inom 0° till 90° . Således ges orienteringen av den minsta vinkel mellan fiberns horisontalprojektion och x -axeln, här definierad som horisontalaxeln i de 2D tvärsnittsbilder som kommer från CT-skanningen, se Figur 9 och 17.



Figur 30. Förklaring av kopplade resultatdiagram, jämförda med 3D vy från CT-skanner och en 2D vy av vektorrepresentation av fibrer.

Figure 30. Explanation of coupled result diagrams, compared to 3D image from the CT-scanner and a 2D view of fibres in vector form.

För de exempel som redovisas i avsnitt 5.1-5.9 visas resultaten med en standardiserad uppställning bestående av 6 st kopplade diagram, som ges av en rutin för post-bearbetning som har skrivits i Matlab. Hur diagrammen är kopplade demonstreras i Figur 30, där till höger också en bild direkt från CT-skannerns bildbehandlingsprogram (X5000, 2021) visas tillsammans med en 2D bild från Matlab (se ovan) visas för jämförelse. Respektive fibers position i betongcylindern redovisas som vertikala streck i två diagram där horisontalaxlarna är lutningsvinklarna θ_{xy} och θ_z . Varje fiber motsvaras således av ett lika långt streck i vardera diagrammet. Till höger om dessa två diagram visar ett tredje hur

många fibrer som skär betongcylinderns tvärsnitt på respektive höjd. För stora fiberantal ger diagrammet ett approximativt värde eftersom dess form har avrundats för att förenkla avläsningen. Fibrernas lägen anges här också fördelat på fyra kvadranter som definieras utifrån kompassens riktningar, där E finns i x -axelns positiva riktning och N längs positiva y -axeln. Under de två diagrammen över lutningsvinklarna visas dessa summerade i 10° -intervall som stapeldiagram, skalade relativt summan av totala fiberlängden i betongprovet.

5. EXEMPEL

Här redovisas resultaten från nio CT-skannade betongprov, gjutna eller sprutade cylindrar eller borrkärnor. För att möjliggöra jämförelser redovisas exemplen och analysresultaten med likadant uppställda figurer och diagram samt med motsvarande beskrivande text. Resultaten kommenteras, jämförs och utvärderas sedan i efterföljande avsnitt 6.1-6.4. Det ska noteras att de CT-skannade volymerna är cylindriska men beskrivs i ortonormerade 3D koordinatsystem där varje tvärsnitt i höjddled har rektangulära, nära kvadratiska tvärsnitt. Volymen är ett rätblock som alltså omfattar en analyserad, fylld betongcylinder med omgivande tomrum.

De visade exemplen kan grupperas enligt följande:

Gjutna betongcylindrar

5.1 Gjuten betongcylinder med 25 raka, kapade fibrer	Figur 31-33
5.2 Gjuten betongcylinder med 100 raka, kapade fibrer	Figur 34-36
5.3 Gjuten betongcylinder med 25 fibrer	Figur 37-39
5.4 Gjuten betongcylinder med 100 fibrer	Figur 40-42

Borrkärnor från sprutbetong

5.5 Borrkärna nr 1 från sprutbetong i tunnel	Figur 43-45
5.6 Borrkärna nr 2 från sprutbetong i tunnel	Figur 46-48
5.7 Borrkärna från sprutad provbalk	Figur 49-51

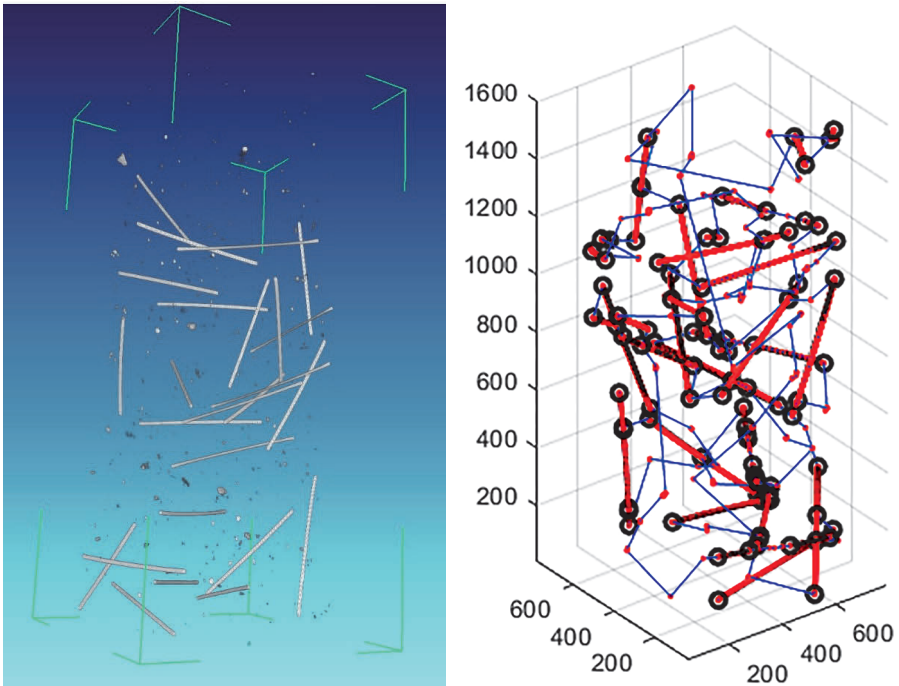
Gjuten spräckprovad betongcylinder

5.8 Gjuten betongcylinder – centrerat urval	Figur 52-56
5.9 Gjuten betongcylinder – alternativa urval	Figur 57-58

5.1 Gjuten betongcylinder med 25 raka, kapade fibrer

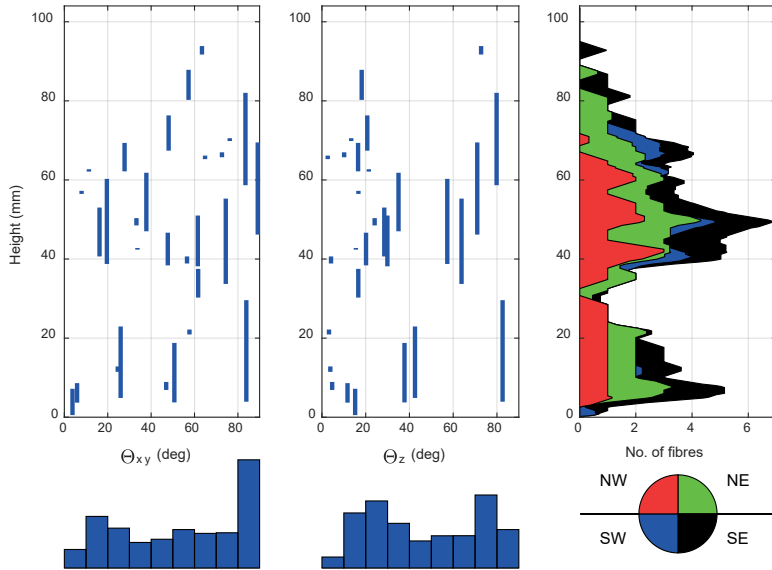
Betongcylinder gjuten av finbetong, med diametern 45,8 mm och höjden 100 mm. Innehåller exakt 25 st stålfibrer av typen Dramix 3D 65/35 med diametern 0,55 mm. Här har ändkrokarna kapats av så att fibrerna är raka med längden 25 mm. Fiberinnehållet är beräknat till $7,1 \text{ kg/m}^3$, motsvarande 0,09 vol-%.

Provcylindern är CT-skannad med $827 \times 1743 \times 840$ voxels. Voxelstorleken är $59,44 \mu\text{m}$ och den skannade volymen är $49,2 \times 103,6 \times 49,9 \text{ mm}^3$. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1743 tif-bilder tagits ut i cylinderns höjled.



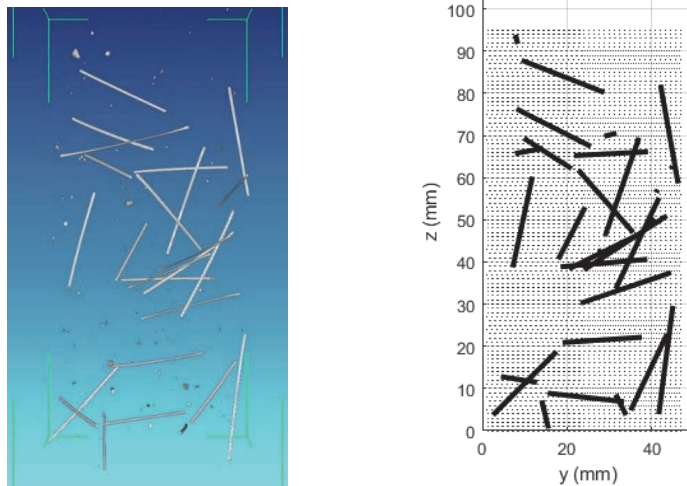
Figur 31. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.

Figure 31. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 32. Lutning och läge i höjddled för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 32. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



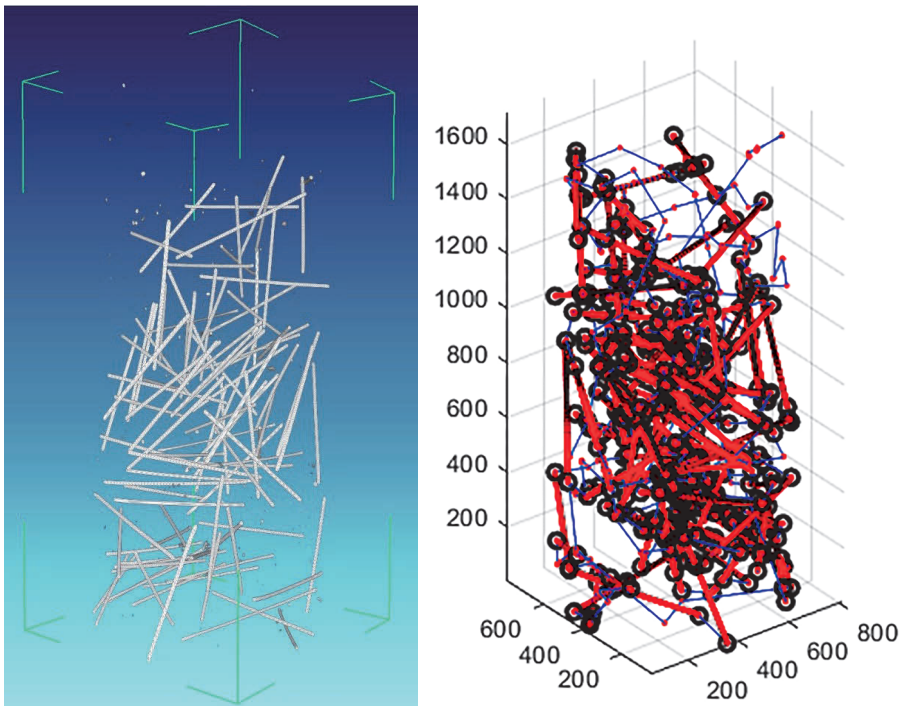
Figur 33. Jämförelse mellan 3D figur från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

Figure 33. Comparison between 3D figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

5.2 Gjuten betongcylinder med 100 raka, kapade fibrer

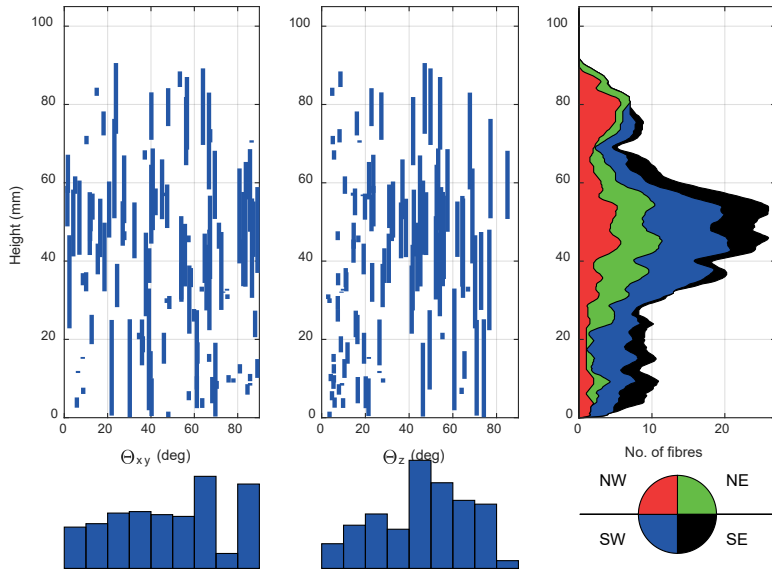
Betongcylinder gjuten av finbetong, med diametern 45,6 mm och höjden 100 mm. Innehåller exakt 100 st stålfibrer av typen Dramix 3D 65/35 med diametern 0,55 mm. Här har ändkrokarna kapats av så att fibrerna är raka med längden 25 mm. Fiberinnehållet är beräknat till $28,5 \text{ kg/m}^3$, motsvarande 0,36 vol-%.

Provcylindern är CT-skannad med $844 \times 1760 \times 864$ voxels. Voxelstorleken är $59,44 \mu\text{m}$ och den skannade volymen är $50,2 \times 104,6 \times 51,4 \text{ mm}^3$. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1760 tif-bilder tagits ut i cylinderns höjded.



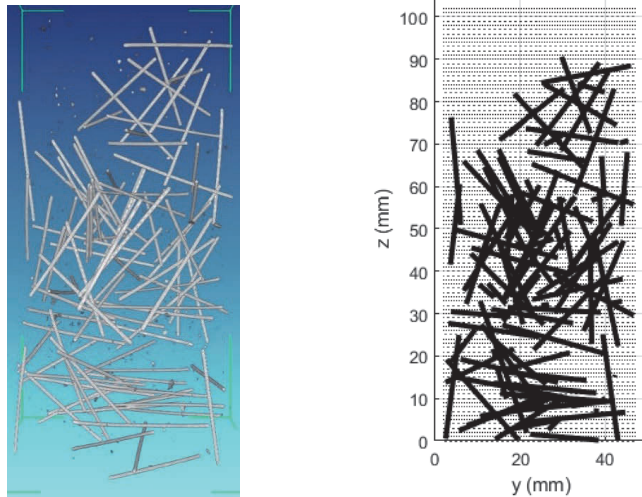
Figur 34. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.

Figure 34. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 35. Lutning och läge i höjdded för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 35. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



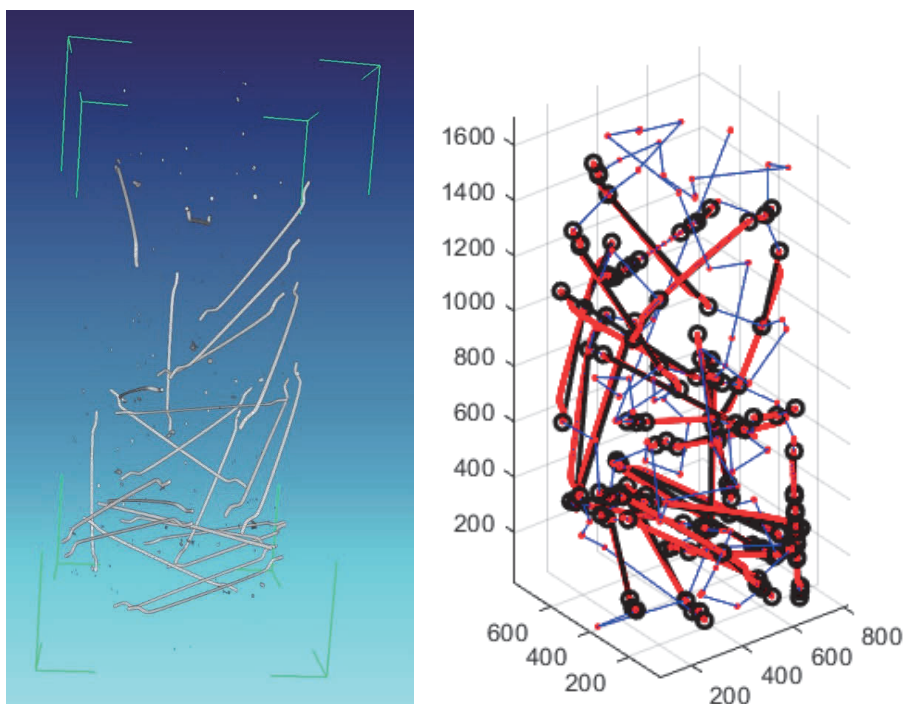
Figur 36. Jämförelse mellan 3D figur från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

Figure 36. Comparison between 3D figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

5.3 Gjuten betongcylinder med 25 fibrer

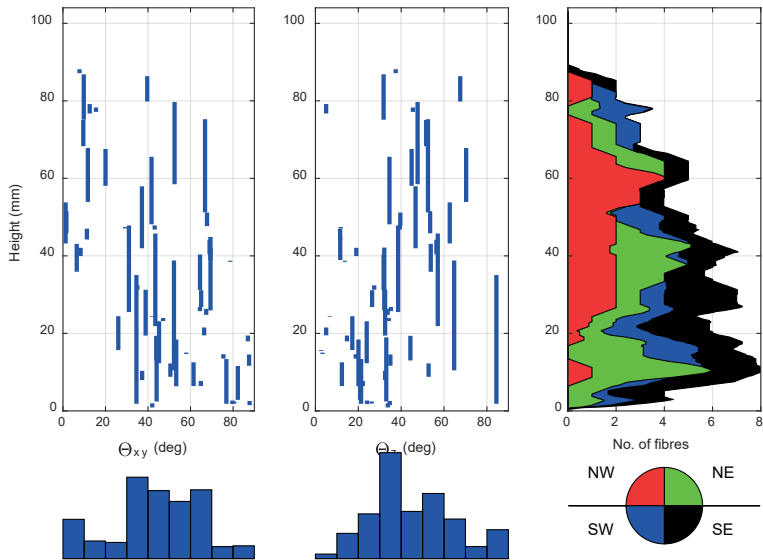
Betongcylinder gjuten av finbetong, med diametern 45,7 mm och höjden 100 mm. Innehåller exakt 25 st stålfibrer av typen Dramix 3D 65/35 med diametern 0,55 mm. Här är fibrerna okapade med längden 35 mm, inkl. ändkrokarna. Fiberinnehållet är beräknat till $9,9 \text{ kg/m}^3$, motsvarande 0,13 vol-%.

Provcylindern är CT-skannad med $838 \times 1735 \times 871$ voxels. Voxelstorleken är $59,44 \mu\text{m}$ och den skannade volymen är $49,8 \times 103,1 \times 51,8 \text{ mm}^3$. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1735 tif-bilder tagits ut i cylinderns höjddled.



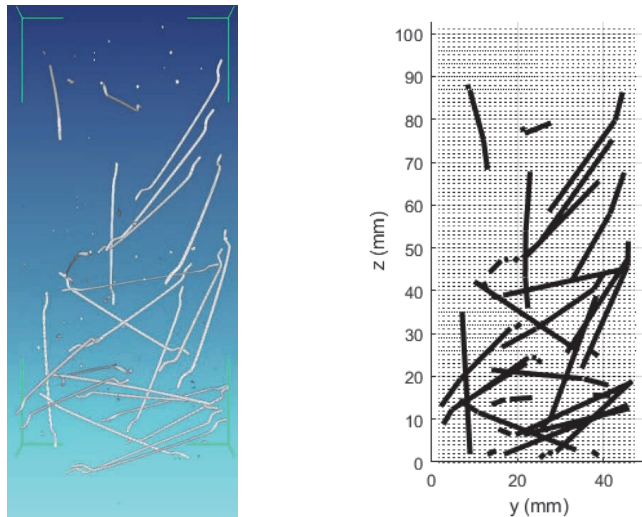
Figur 37. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.

Figure 37. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 38. Lutning och läge i höjddel för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 38. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



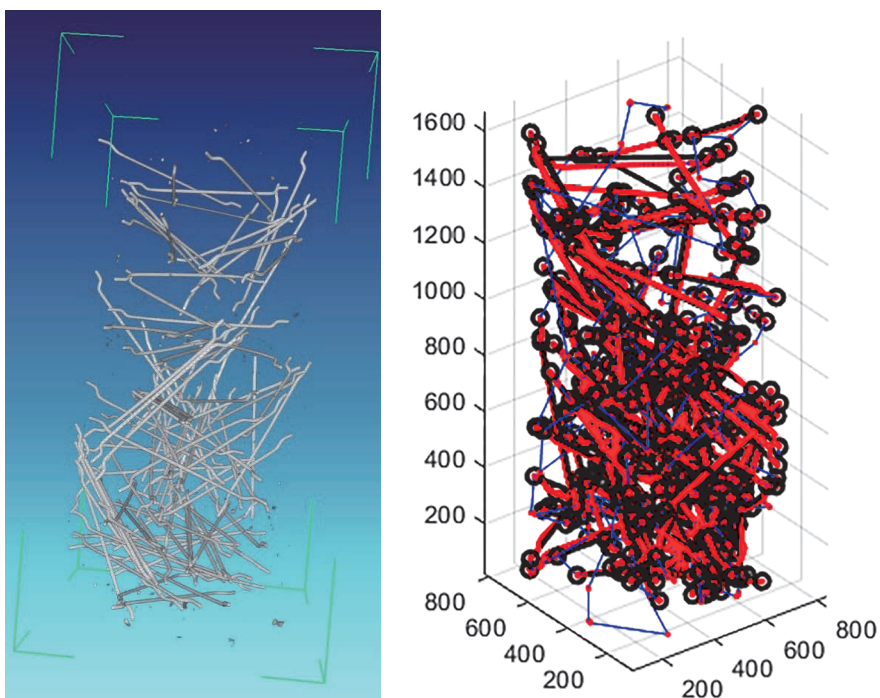
Figur 39. Jämförelse mellan 3D figur från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

Figure 39. Comparison between 3D figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

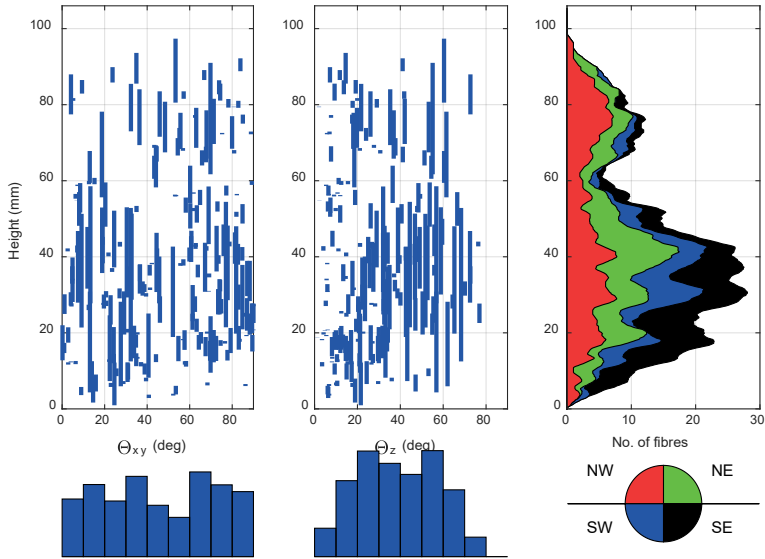
5.4 Gjuten betongcylinder med 100 fibrer

Betongcylinder gjuten av finbetong, med diametern 45,7 mm och höjden 100 mm. Innehåller exakt 100 st stålfibrer av typen Dramix 3D 65/35 med diametern 0,55 mm. Här är fibrerna ökapade med längden 35 mm, inkl. ändkrokarna. Fiberinnehållet är beräknat till $39,8 \text{ kg/m}^3$, motsvarande 0,51 vol-%.

Provcylindern är CT-skannad med $894 \times 1773 \times 890$ voxels. Voxelstorleken är $59,44 \mu\text{m}$ och den skannade volymen är $53,1 \times 105,4 \times 52,9 \text{ mm}^3$. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1773 tif-bilder tagits ut i cylinderns höjddled.

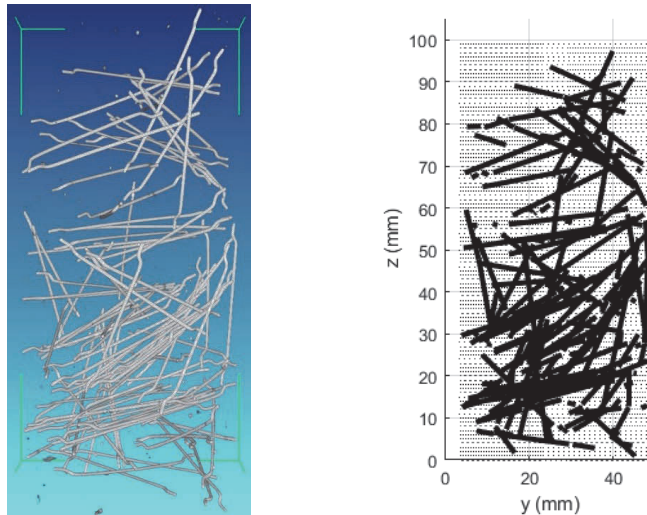


Figur 40. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.
Figure 40. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 41. Lutning och läge i höjddled för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 41. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



Figur 42. Jämförelse mellan 3D figur från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

Figure 42. Comparison between 3D figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

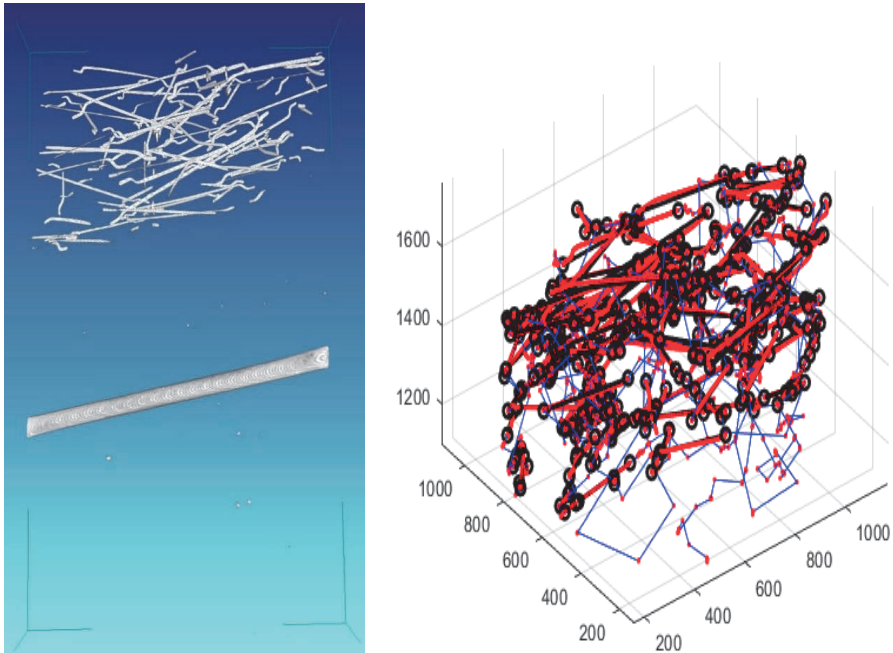
5.5 Borrkärna nr 1 från sprutbetong i tunnel

Borrkärna tagen från sprutbetong med 2-3 lager, med diametern ca 72 mm och höjden ca 127 mm. Innehåller stålfibrer stålfibrer av typen Dramix 30/0.5 med diametern 0,50 mm och längden 30 mm, inkl. ändkrokarna.

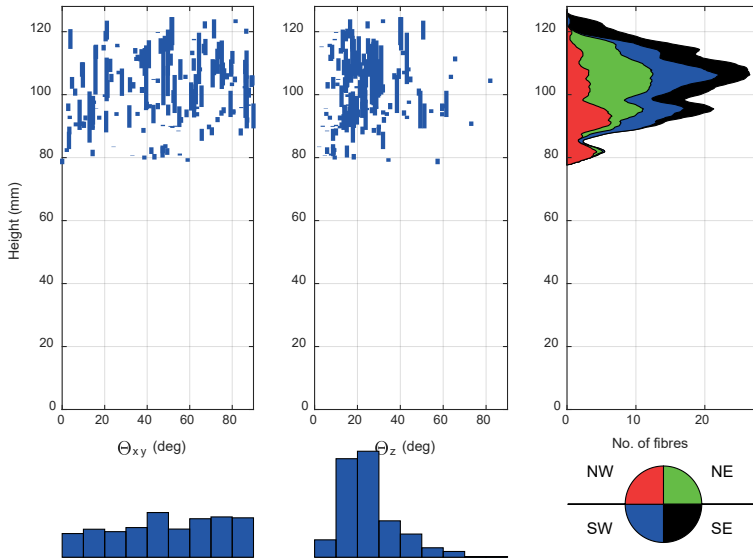
En stålstång med diametern ca 4,7 mm går igenom borrkärnans nedre del. Stålfibreerna finns på höjden 78,0–124,8 mm räknat nedifrån kärnans bas.

Från nivån 105,7 mm och uppåt är tvärsnittet inte längre helt cirkulärt och vid 126,6 mm slutar cylindern.

Provcylindern är CT-skannad med $1270 \times 1952 \times 1304$ voxels. Voxelstorleken är $70,69 \mu\text{m}$ och den skannade volymen är $89,8 \times 130,0 \times 92,2 \text{ mm}^3$. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1952 tif-bilder tagits ut i cylinderns höjddled.

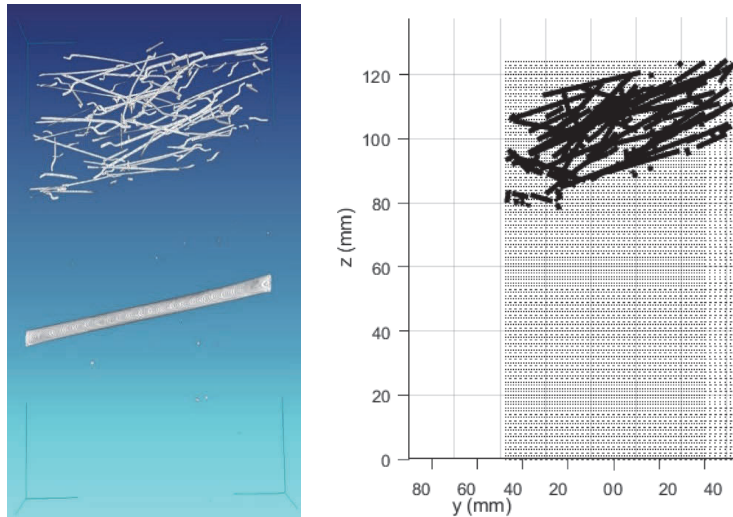


Figur 43. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.
Figure 43. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 44. Lutning och läge i höjddled för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 44. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



Figur 45. Jämförelse mellan 3D figur från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

Figure 45. Comparison between 3D figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

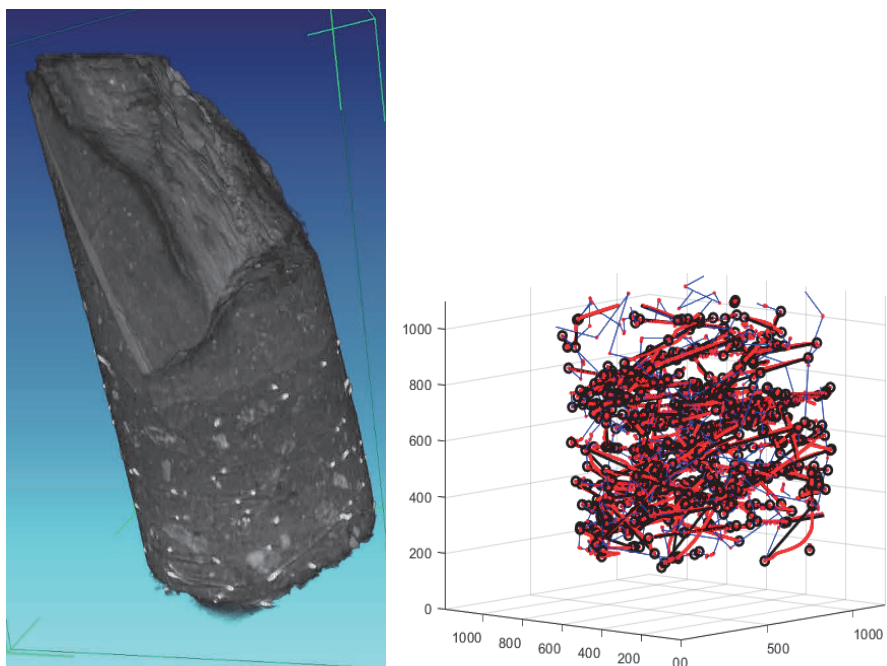
5.6 Borrkärna nr 2 från sprutbetong i tunnel

Borrkärna tagen från sprutbetong och berg, med diametern ca 72 mm och höjden ca 129 mm. Innehåller troligen stålfibrer av typen Dramix 30/0.5 med diametern 0,50 mm och längden 30 mm, inkl. ändkrokarna.

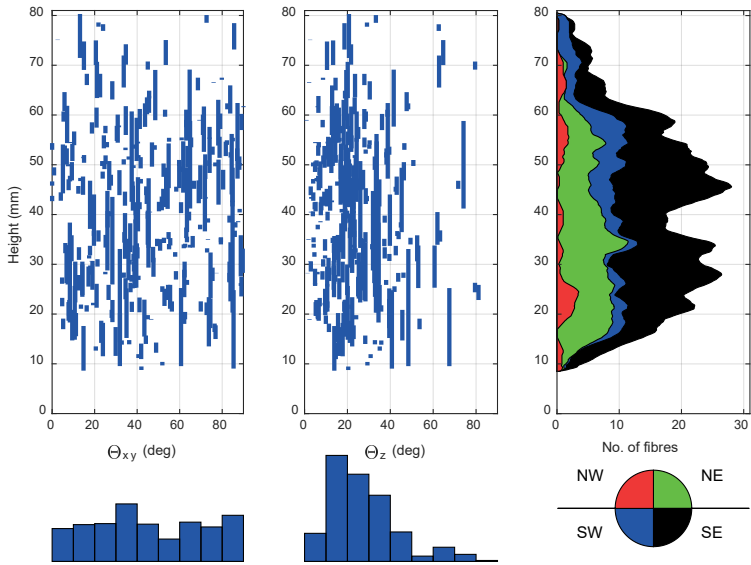
Stålfibrerna finns på höjden 8,5–80,6 mm räknat nedifrån kärnans bas.

Vid nivå 64,0 mm kommer berget in i borrkärnan. Från nivå 74,2 mm och uppåt är tvärsnittet inte längre helt cirkulärt. Tunt skikt sprutbetong finns på hela bergkilens, men inga fibrer.

Provcylindern är CT-skannad med $1261 \times 1952 \times 1564$ voxels. Voxelstorleken är $70,69 \mu\text{m}$ och den skannade volymen är $89,1 \times 138,0 \times 110,6 \text{ mm}^3$. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1952 tif-bilder tagits ut i cylinderns höjddled.

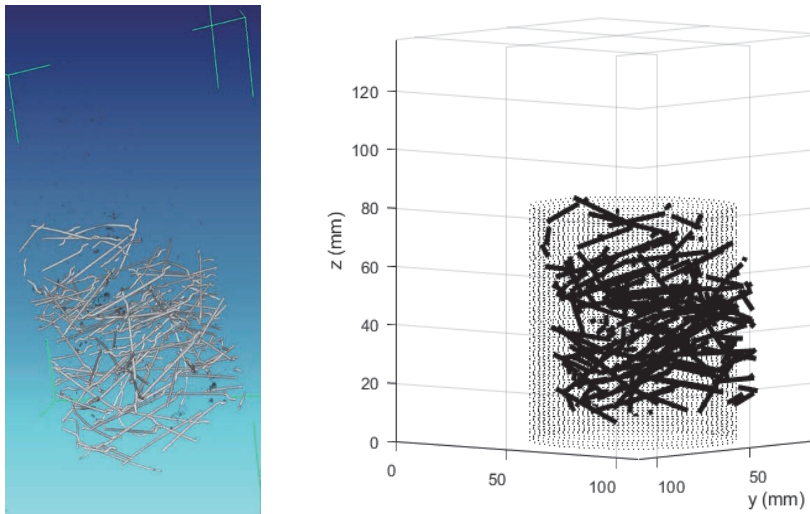


Figur 46. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.
Figure 46. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 47. Lutning och läge i höjddel för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 47. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



Figur 48. Jämförelse mellan 3D figur från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

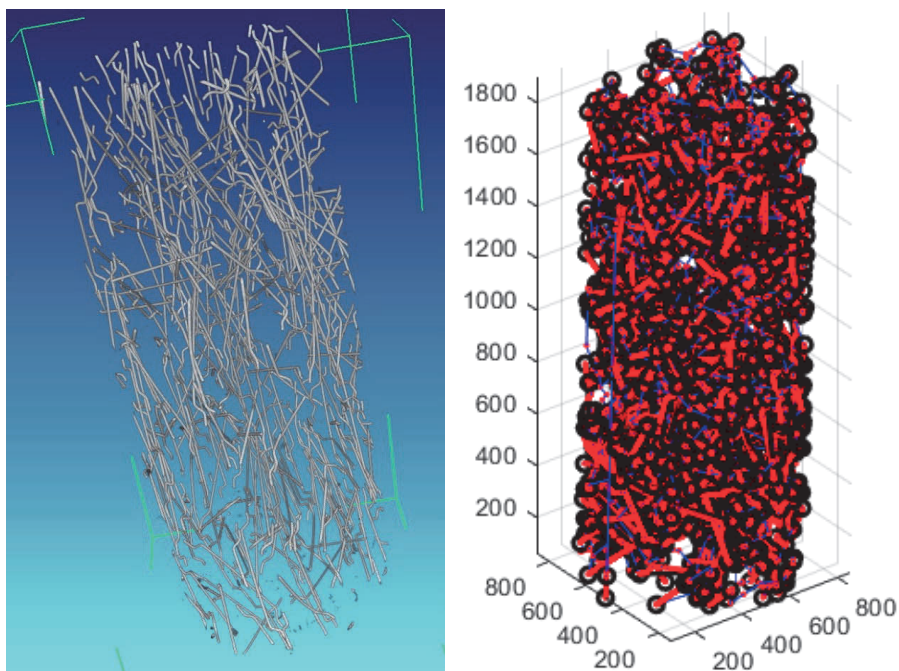
Figure 48. Comparison between 3D figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

5.7 Borrkärna från sprutad provbalk

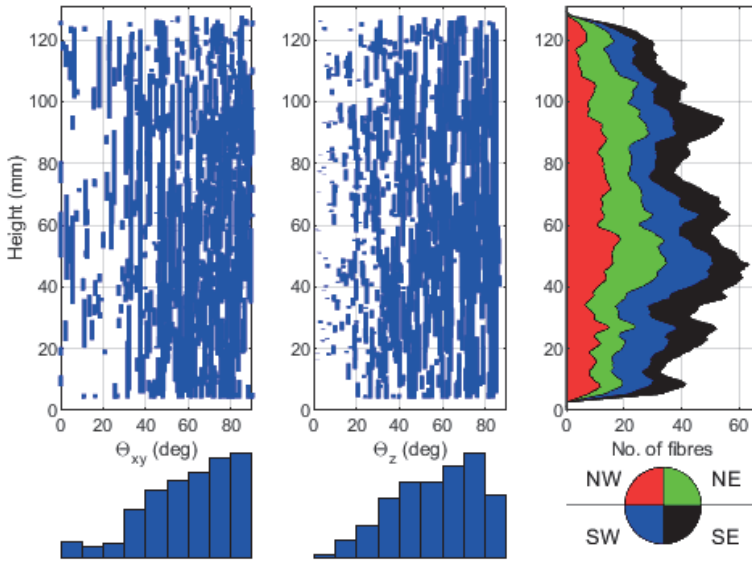
Borrkärnan är tagen genom en 75×125×500 mm provbalk, uttagen ur en 2×1,2×0,5 m sprutad platta. Sprutriktningen är tvärs borrkärnans höjdaxel. Diameter ca 56 mm, höjd ca 128 mm. Innehåller stålfibrer av typen Dramix 30/0.5 med diametern 0,50 mm och längden 30 mm, inkl. ändkrokarna.

Betongmixens fiberinnehåll ska vara 70 kg/m³ (Nordström, 2005), eller 0,89 vol-%. Fiberinnehållet i sprutbetong på plats kan dock vara så lågt som ca 26 kg/m³, eller 0,33 vol-% (Nordström, 2005).

Provcylindern är CT-skannad med 974×1949×968 voxels. Voxelstorleken är 67,21 µm och den skannade volymen är 65,4×131,0×65,0 mm³. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1949 tif-bilder tagits ut i cylinderns höjddled.

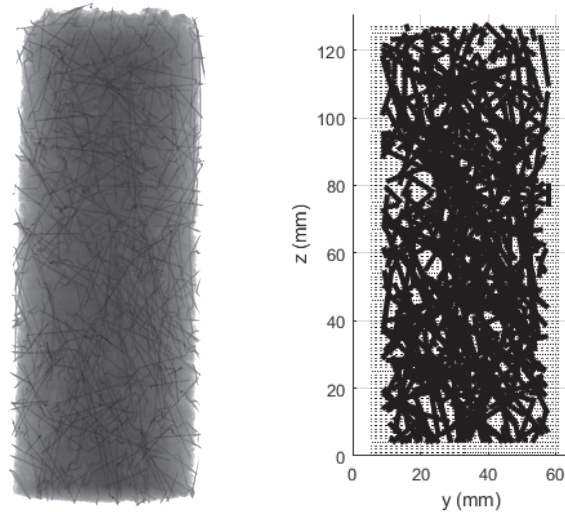


Figur 49. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.
Figure 49. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 50. Lutning och läge i höjddled för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 50. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



Figur 51. Jämförelse mellan 2D genomlysningssbild från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

Figure 51. Comparison between 2D X-ray figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

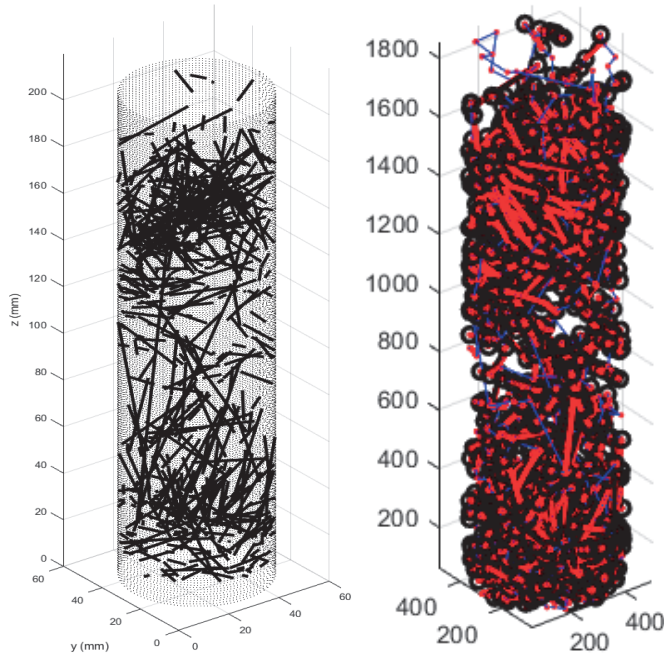
5.8 Gjuten betongcylinder – centrerat uttag

Betongcylinder gjuten av finbetong, diameter 100 mm, höjd 206 mm. Cylindern har spräckts genom standardprovning – belastning i diameters riktning (Ansell m.fl., 2016). Innehåller stålfibrer av typen Dramix 30/0.5 med diametern 0,50 mm och längden 30 mm, inkl. ändkrokarna. Betongmixens fiberinnehåll ska vara 50 kg/m³, vilket är motsvarande 0,64 vol-%.

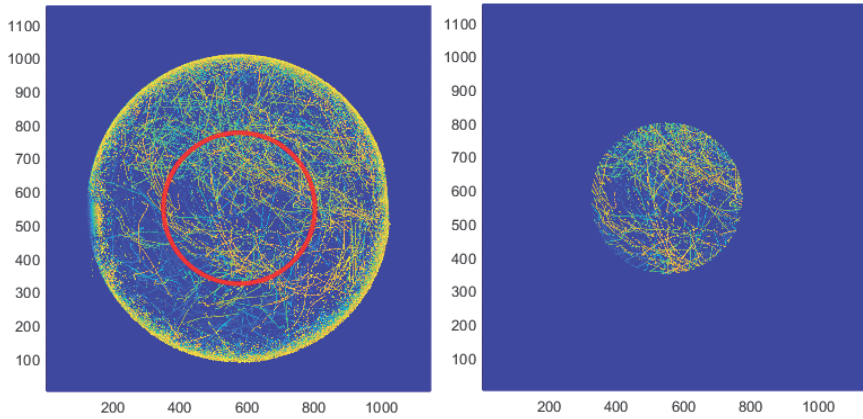
Provcylindern är CT-skannad med 1146×1982×1156 voxels. Voxelstorleken är 0,111 mm och den skannade volymen är 127,2×220,0×128,3 mm³. För utvärderingen av resultaten från CT-skanningen har 1982 bmp-bilder tagits ut i cylinderns höjddled.

Analys baserad på bmp-bilderna går i detta fall ej att genomföra på grund av att den yttre randen är "belyst" (se vidare exempel 5.9), vilket också gör att antalet punkter motsvarande ståls täthet är mycket stort vilket delvis överskuggar fibreerna.

Här utförs därför utvärderingen av en från betongcylindern uttagen delvolym ("numerisk borrkärna"), centriskt placerad och med diametern 50 mm och höjden 206 mm, se Figur 53-54. Den utvalda volymen representeras med 551×1982×551 voxels, motsvarande en delmängd på 61,2×220,0×61,2 mm³ av den skannade volymen.

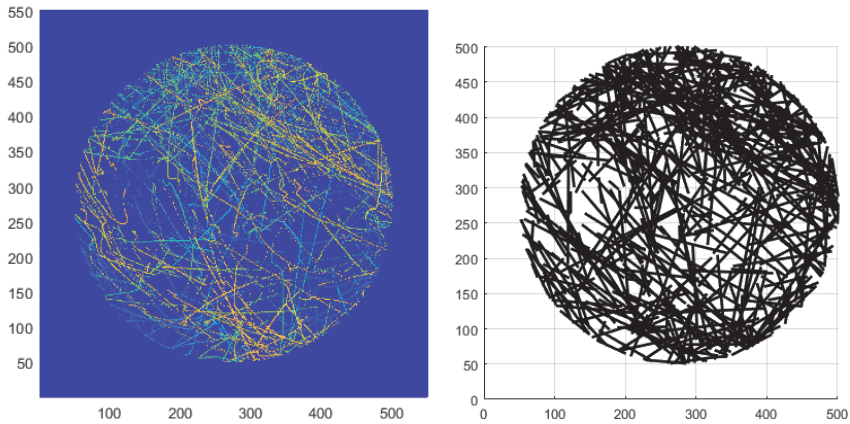


Figur 52. Översiktlig 3D figur från CT-skanning (vä.) och diagram visande punkter i 3D volymen, deras sortering och identifierade fibrer – cirklar noterar ändpunkter.
Figure 52. An overview in 3D from CT scanning (L) and a diagram showing points in the 3D volume, their sorting order, and identified fibres – circles at end-points.



Figur 53 Uttag av volym (“numerisk borrhärna”) ur gjuten betongcylinder. Radien reduceras från 100 mm till 50 mm.

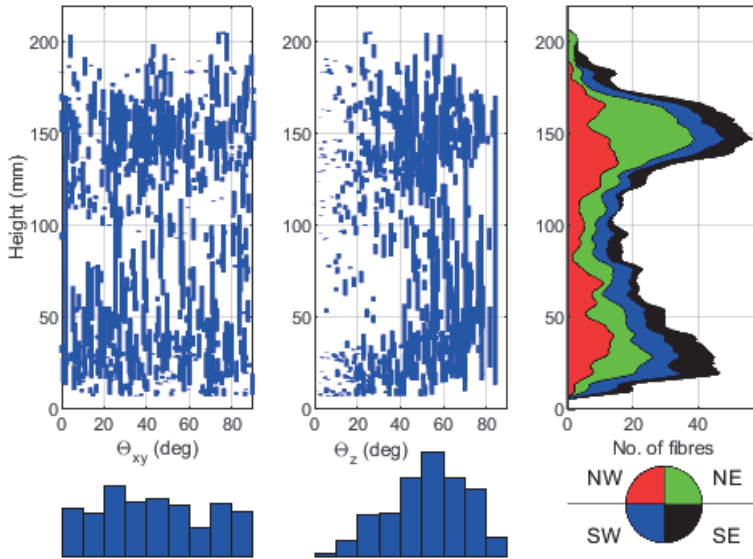
Figure 53. Extraction of volume (“numerical core”) from cast concrete cylinder. The radius is reduced from 50 mm to 100 mm.



Figur 54. Numeriskt definierat område med reducerad diameter.

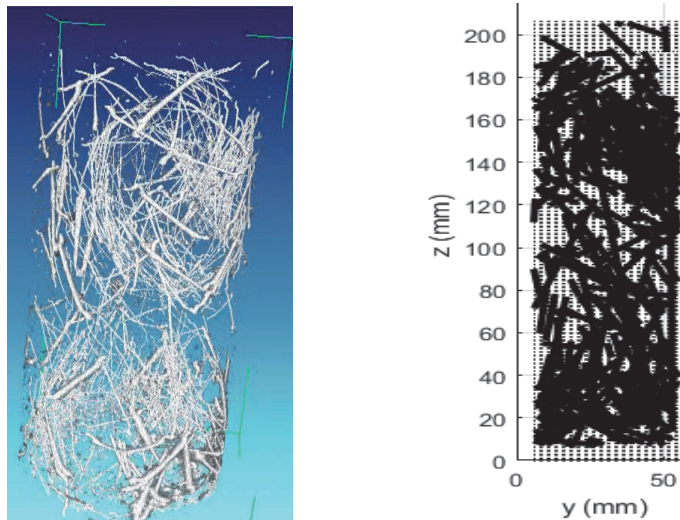
Horisontalprojektion jämförs med motsvarande för identifierade fibrer.

Figure 54. Numerically defined area with reduced diameter. Horizontal projection compared to that of the numerically identified fibres.



Figur 55. Lutning och läge i höjdled för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymen.

Figure 55. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volume.



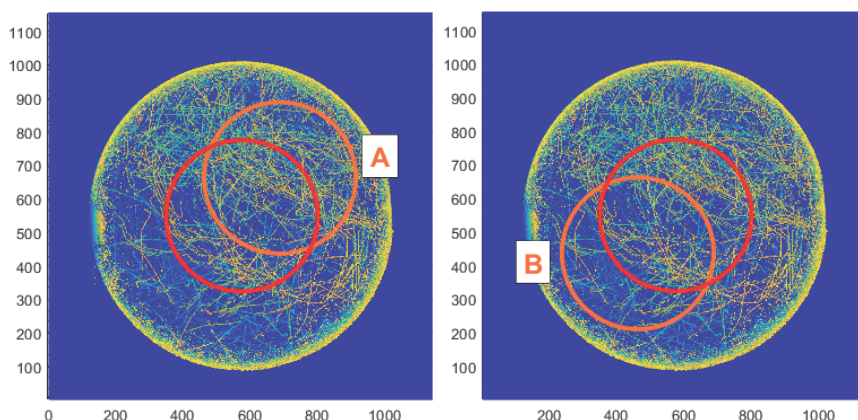
Figur 56. Jämförelse mellan 3D figur från CT-skanning (vä.) och 2D-vy av lägesidentifierade fibrer (hö.)

Figure 56. Comparison between 3D figure from CT-scan (L) and 2D view of fibres with identified positions (R).

5.9 Gjuten betongcylinder – alternativa uttag

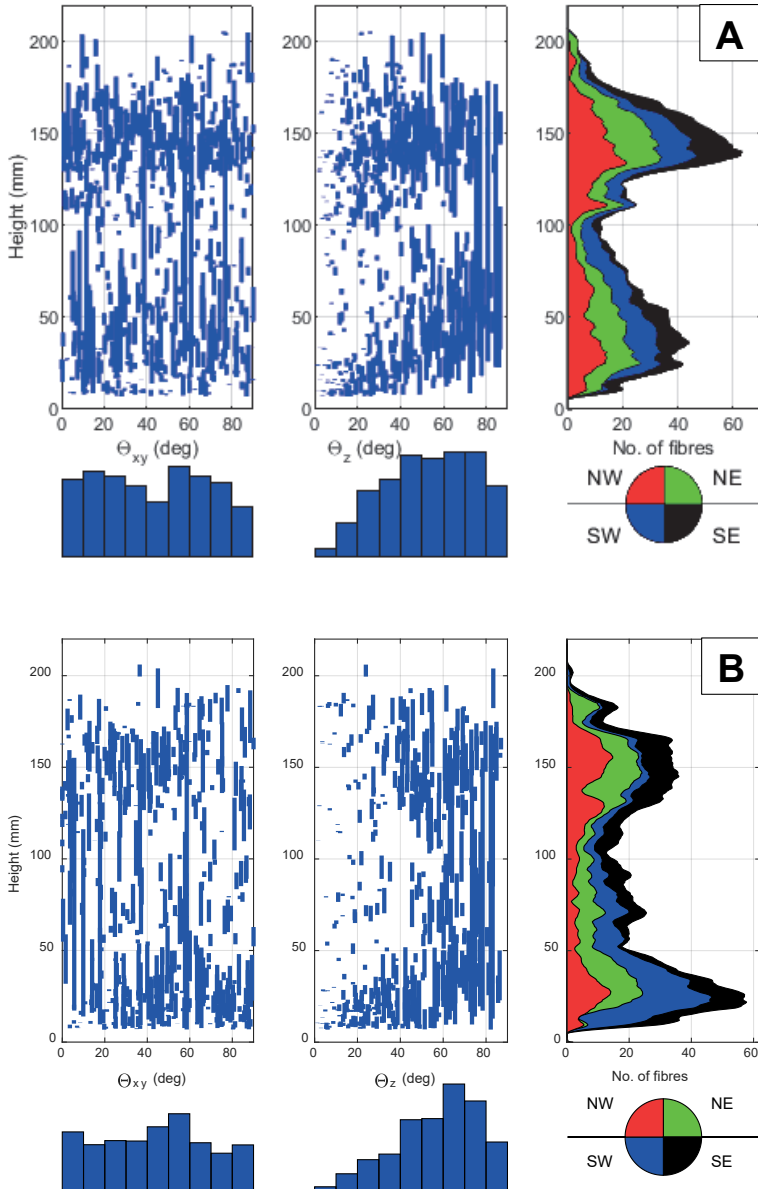
Den metodik som användes i föregående exempel (5.8) för att genomföra analys av en mindre volym än av en hel CT-skannad fysisk volym kan vara användbar vid stora fibermängder och/eller stora provkroppar. Metoden kan också vara praktisk då provkroppar med oönskade imperfektioner eller skador ska analyseras, och det går då alltså att på detta sett exkludera den oönskade delen från utvärderingen. Det bör noteras att vissa fibrer kommer att, liksom då kärnor borrar ut, att kapas av så att endast delar ingår i den analyserade volymen. Man kan således benämna den uttagna volymen som en “numerisk borrhärna”, till skillnad från en verklig, fysisk.

I det här uppföljande exemplet demonstreras principen vidare genom att redovisa analysresultat från två fall då den uttagna volymen placeras excentriskt, så som visas i Figur 57. I de två alternativa, kompletterande fallen A och B har den uttagna volymens centrumpunkt förflyttats 12,5 mm uppåt/nedåt och till höger/vänster relativt den ursprungliga volymens centrum, så som figuren. Läget för de uttagna volymerna med 50 mm diameter (orange cirklar) jämförs med läget för volymen i exempel 5.8 (röda). Analysresultaten för de två fallen jämförs i Figur 57, och ska alltså också jämföras med resultaten i Figur 55.



Figur 57. Alternativa uttag av betongvolym (”numeriska borrhärnor”) med 50 mm diameter. Centrumpunkt för A och B förflyttas $\pm 12,5$ mm uppåt/nedåt och till höger/vänster.

Figure 57. Alternative extractions of concrete volumes (“numerical cores”) with 50 mm diameter. Center points for A and B are shifted $\pm 12,5$ mm up/down and right/left.



Figur 58. Lutning och läge i höjddel för fibrer, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant i cylindervolymerna A (överst) och B (underst).
Figure 58. Inclination and height position for steel fibres, and number of crossing fibres in each height section and quarter of the cylinder volumes A (top) and B (bottom).

6. KOMMENTARER OCH SLUTSATSER

Projektet är en uppföljning av en tidigare utvärdering av möjligheterna att använda datortomografi som undersökningsmetod för ung och gammal, sprutad och gjuten betong för tunnlar (Ansell m.fl, 2016). Den analysmetod som då togs fram kunde identifiera andelen stålfibrer fördelat över en betongcylinder men det gick inte att bestämma fibrernas orientering. Huvudfokus har därför här varit att arbeta fram en praktiskt fungerande metod som kan användas för att analysera prover av fiberbetong, antingen gjutna eller som uttagna borrhärnor. Den genomförda litteraturstudien visar att det finns flera tidigare dokumenterade metoder som har tagits fram för att studera fiberorienteringar i betong. De flesta av dem är numeriskt komplicerade med långa beräkningstider och en del är dåligt anpassade till de storlekar på provkroppar som är aktuella för tunnelbetong. Den analysmetod som redovisas här har en tillförlitlighet och precision som är mer än tillräcklig för tillämpningen, är jämförelsevis numeriskt effektiv med relativt korta beräkningstider och är inte beroende av dyra specialiserade program för avancerad bildanalys.

6.1 Analysmetodens precision och effektivitet

Den andel fibrer som kan hittas med CT-skanning och efterföljande numerisk bearbetning kan bestämmas exakt enbart om det totala antalet fibrer som finns i betongen är känt. Om betongblandningens sammansättning är känd är det dock ändå osäkert hur exakt blandningen har skett och hur stort eventuellt fiberspill har varit. Fiberfördelningen kan också bli ojämnt fördelad så att det i en delmängd (prov) som undersöks finns fler eller färre fibrer relativt medeltalet, och i den föreskrivna blandningen.

I projektet utvärderades analysmetodens precision utifrån undersökning av en serie gjutna provkroppar med ett i förväg noggrant räknat antal stålfibrer, se avsnitt 4.3. För de gjutna provcylindrarna 5.1-5.4 visas beräkningsresultat som erhållits med variation av gränsvärdet *Limit* som anger när korta identifierade linjesegment ska slås ihop till längre i Tabell 1 och i Figur 9-10. I **proven 5.1-5.3** hittas 90-92% av den tillsatta fibermängden. Här har inget fiberspill förekommit vid gjutningen. Fiberinnehållet är dock relativt lågt (7–29 kg/m³) och de raka fibrerna är lättare att entydigt detektera och definiera än de med ändkrokar. **Betongcylinder 5.3** innehåller fibrer med ändkrokar, men de är relativt få. För **betongcylinder 5.4**, innehållande fibrer med ändkrokar (40 kg/m³), är andelen identifierade fibrer 83%, och ingen märkbar ökning sker i det andra beräkningssteget, då kortare fibrer kopplas ihop till längre. Det andra beräkningssteget leder inte genomgående till att större fibermängder detekteras men har en positiv effekt på antalet fibrer som dokumenteras, genom att närliggande fibersegment med sinsemellan korta avbrott slås ihop till längre fibrer. Från den första beräkningsetappen är antalet numeriskt definierade fibrer relativt verkliga antalet 2,0–2,3 för **cylindrarna 5.1-5.2**, med raka fibrer, och 2,9–3,1 för **cylindrarna 5.3-5.4** med fullånga fibrer med ändkrokar. Efter andra beräknings-etappen är motsvarande 1,1–1,2 och 2,2–2,3. Det ska här noteras att fibrer med ändkrokar i princip består av 5 raka linjesegment.

Resultaten visar att ett beräkningssteg med sammanslagning av kortare fibersegment är fördelaktigt med avseende på fiberlängderna, men är mer gynnsamt för helt raka fibrer än för fibrer med ändkrokar. I analysresultaten kommer den fibertypen att typiskt approximeras med 1-3 okopplade men närliggande räta linjer, beroende på ändkrokarnas orientering i betongvolymen. Optimalt val av avstånd för sammanslagning (*Limit*) är 15 voxlar. För en betongvolym innehållande en stor mängd fibrer med ändkrokar bör särskilt kontrolleras så att inte flertalet "fiktiva", mycket långa fibrer erhålls i resultatet genom felaktig sammanslagning av fibersegment. Beträffande metodens effektivitet så är tidsåtgången för en beräkning då den genomförs med en typisk standard-PC med det numeriska analysprogrammet Matlab (2021) förhållandevis kort. För en provkropp med få fibrer, här till exempel 5.1 där CT-skanningen identifierade 3226 inmätta punkter representerande material med ståls täthet, var beräkningstiden endast 2 minuter. För exemplet 5.7 som innehöll betydligt mer fibrer var motsvarande 50 770 punkter och en beräkningstid på 25 minuter. Detta ska jämföras med att de tider som anges av Vicente m.fl. (2014) och Herrmann m.fl. (2016) ligger inom 2,5-3 timmar. Det bör i sammanhanget noteras att Miletić m.fl. (2020) påstår sig ha en identifieringsgrad på ca 98% med en beräkningstid på ca 30 minuter. Den numeriska rutin som används är dock inte fullt ut i alla detaljer redovisad och nyttjar relativt komplicerade numeriska rutiner för att bestämma tröskelvärden mm.

6.2 Metod med virtuella borrhärnor

För den gjutna cylindern i exemplen 5.8-5.9 har cylindrar med mindre diameter än huvudprovets tagits ut för analys. Detta motsvarar att en borrhärna tas ur en större betongvolym och således kommer den analyserade volymen att innehålla avkapade fibrer, vilka här dock är "numeriskt" kapade. Cylindern i exemplet har gjutits med ett deklarerat fiberinnehåll på 50 kg/m^3 , men det är osäkert hur stort fiberspill som har förekommit. För de provcylindrar som tagits centriskt ur den större gjutna cylindern ses (för 5.8) att volymen med hänsyn till förväntat fiberinnehåll borde innehålla motsvarande 439 hela fibrer. Antalet identifierade fibersegment är dock 256 st efter den första beräknings-etappen, och 268 st efter den andra. Resultaten efter två justeringar innehåller dock många fibrer längre än 30 mm, och även två som är längre än 100 mm. Sammanslagningen av fibersegment bör här studeras vidare i detalj. Det bör noteras att voxelstorleken vid CT-skanningen här var betydligt större än för betongcylindrarna 5.1-5.4, vilket medför att $Limit = 15$ voxels motsvarar 1,7 mm, eller 3,3 fiberdiametrar. En analys med $Limit = 5$ borde ge ett bättre resultat. Totalt hittas alltså endast 58% av det förväntade fiberinnehållet. Även om ca 80% kan förväntas bli identifierade (som för cylinder 5.4) motsvarar detta fortfarande endast 73%. Detta kan dock bero på att fibrerna i cylinder 5.8 verkar ojämnt fördelade, på grund av ojämn fiberblandning och/eller problem vid CT-skanningen (till exempel "beam hardening").

Vid jämförelse mellan resultaten från exemplen 5.8 och 5.9, så ses ur Figur 55 och 58 att fördelningen av fiber i höjddled visar samma principiella variation, med ett första maxima vid ca 25 mm höjd och ett andra vid ca 150 mm. Om de tre fallen jämförs i ordning efter

sitt läge B-0-A (där 0 för notera det centrerade fallet i 5.8) så framgår att den nedre maximum-toppen kontinuerligt minskar medan den övre samtidigt ökar i samma grad. Det ska här noteras att för sekvensen B-0-A så finns det relativt stort överlapp i tvärsnittskvadranternas ytor, enligt NE-SW/NE-SW. Vid en detaljstudie av fiberfördelningen kan man således också jämföra vart och ett av de fält i grafen som markeras med rött, grönt, blått, svart och vardera motsvarar en fjärdedel av provets volym. För fördelningen av fiberlutning z relativt horisontalplanet ses en förskjutning från en nära normalfördelning mot en dominans av högre lutningsvinklar då provvolymen förflyttas mot A respektive B. Detta är i princip i överensstämmelse med det som visas och kommenteras i avsnitt, att mitt inne i en stor volym bör fibrer i gjuten betong statistiskt vara normalfördelade medan den närmare formsidorna tenderar att orientera sig efter dessa, det vill säga här vertikalt längs med den cylindriska gjutformens mantelyta.

6.3 Kommentarer till exemplen

Exemplen i avsnitt 5.1-5.9 visar att det är skillnader i den typiska fiberorienteringen för gjutna och sprutade betongcylindrar. Skillnader finns även i fördelning av fibrer över cylindrarnas höjd. De förhållanden som ligger bakom variationer i θ_z , vinkeln relativt betongcylindrarnas tvärsnittsplan, överensstämmer med de exempel från tidigare forskning som redovisas i avsnitt 3.5, se Figur 1-3. Från utvärderingen av de här skannade betongproverna 5.1-5.9 kan ses att de **gjutna betongcylindrarna** (5.1-5.4 och 5.8-5.9) har en relativt jämn fördelning i lutning θ_{xy} relativt horisontalplanet. Det återspeglar att fibrerna är inblandade i betongen som portionsvis tillsätts i formarna vid gjutning. Även lutningarna θ_z relativt xy -planet är nära jämnt fördelade vilket bör bero på gjutprocessen och närheten till formsidorna, jämför med fördelningarna för den tunna böjbalken och provet från en golvplattas kant i Figur 1-2.

För provkärnorna 5.5-5.6, som har **sprutats i sin längsriktning**, visar θ_{xy} en mycket jämn fördelning. Lutningarna θ_z vinkelrätt horisontalplanet har en markant förskjutning mot noll, det vill säga med nära horisontellt orienterade fibrer, vilket är ett direkt resultat av sprutprocessen. Jämför här med fördelningarna för den tjocka böjbalken och provet från golvplattans mitt i Figur 1-2. Det finns också ett publicerat resultat från tidigare undersökning med CT-skanning av sprutbetong, vilket visas i Figur 3. Här är fördelningen förskjuten långt mot noll och i den mycket kortfattade dokumentationen (Pittino & Galler, 2009) anges att medellutningen är 23° mot tunnelns längdaxel. Motsvarande för exemplen 5.5-5.6 är ca 15° - 20° .

Provkärnan 5.7 har **sprutats tvärs längsriktningen**. Lutningarna θ_z vinkelrätt horisontalplanet visar här en tydlig förskjutning upp mot 90° , vilket alltså sammanfaller med riktningen tvärs sprutriktningen. Relativt horisontalplanet syns också för θ_{xy} en förskjutning uppåt, vilket indikerar att sprutriktningen bör ha varit vinkelrät mot en linje orienterad 60° - 90° i horisontalplanet, nära y -riktningen. En jämnt fördelad fiberorientering bör således finnas nära ett xz -plan.

Fördelningen av fibrer i *höjled* för de *gjutna cylindrarna* 5.1-5.4 och 5.8 är ojämn. För de fyra första provcylindrarna har ett i förväg räknat antal fibrer blandats in portionsvis i betongen, och toppar och dalar i antalet fibrer återspeglar här att mängden fibrer per matning i formarna kan ha anpassats efter återstående mängd fibrer som funnits att blanda in. För de *sprutade provkärnorna* 5.5-5.7 är fördelningen nära normalfördelad *över höjden*, vilket bör vara en direkt följd av den jämna fördelningen av fibrer i betongen före sprutning, samt de fria över- och underyrnas inverkan.

6.4 Fiberinnehåll i sprutbetong

Om andelen fibrer som kan detekteras i en sprutbetong ska bestämmas utifrån en given betongblandning (recept) måste fiberspillet vid blandning och sprutning beaktas. Fibrerna i aktuell betongvolym kan också vara ojämnt fördelade, bland annat beroende på hur blandningen mekaniskt har genomförts och hur lång blandningstiden har varit. Detta är viktigt att beakta om betongblandningens fiberinnehåll approximativt ska bestämmas utifrån CT-skanningens resultat. Från *Sprutbetonghandboken-Reparation* (Nordström & Holmgren, 2009) går att utläsa att "Jämfört med torrsprutning ger våtsprutning betydligt mindre andel totalt spill från återstuds, 5–15 % resp. 10–20 % (vägg / tak). Fiberspillet är också mycket lägre, ca. 10–40 %". Idag är ett fiberinnehåll på 50 kg/m³ för sprutbetong i tunnlar inte ovanligt. För den första studerade *borrkärnan 5.5* tagen ur sprutbetong i en tunnel kan följande ses att efter första beräkningsomgången definieras 216 st fibersegment med en sammantagen längd som motsvarar 60 st hela fibrer. Endast ett av fibersegmenten är längre än 30 mm. Efter en andra beräkning för att slå samman fibersegment blir motsvarande 153 och 63 st, men då är 11 segment längre än 30 mm. Fiberinnehållet är då

$$(63 \times 30 \times \pi \times 0,52/4) / ((124,8-78) \times \pi \times 722/4) \times 100 \text{ m} = 0,20 \text{ vol-\%}.$$

Vilket motsvarar $0,0020 \times 7850 = 16 \text{ kg/m}^3$. Om 40% fiberspill beaktas uppnås dock endast 27 kg/m^3 , och om CT-skanningsmetodens precision tillfälligt skulle vara så låg som 80% fås ändå endast 33 kg/m^3 . För den andra *borrkärnan 5.6* ur sprutbetong i en tunnel är motsvarande efter första beräkningsomgången 403 st fibersegment, vilket motsvarar 107 st hela fibrer. Tre av fibersegmenten är längre än 30 mm. Efter en andra beräkning blir motsvarande 294 och 106 st, då med 16 segment längre än 30 mm. Fiberinnehållet blir

$$(116 \times 30 \times \pi \times 0,52/4) / ((80,6-8,5) \times \pi \times 722/4) \times 100 \text{ m} = 0,23 \text{ vol-\%}.$$

vilket motsvarar $0,0023 \times 7850 = 18 \text{ kg/m}^3$. Med 40% fiberspill beaktat uppnås här 30 kg/m^3 , och om CT-skanningsmetodens precision endast är 80% fås 38 kg/m^3 .

Samma genomgång görs för *borrkärnan 5.7* som tagits ur en sprutad provbalk. För denna har betongblandningens fiberinnehåll angetts till 70 kg/m^3 . I detta fall hittas först 941 st fibersegment vilket motsvarar 231 st hela fibrer. Två av fibersegmenten är längre än

30 mm. Efter en andra beräkning blir motsvarande 677 och 258 st, med 22 segment längre än 30 mm. Noteras bör att två av dessa är längre än 100 mm. Fiberinnehållet blir

$$(231 \times 30 \times \pi \times 0,52/4) / (128 \times \pi \times 562/4) \times 100 \text{ m} = 0,43 \text{ vol-\%}$$

Detta motsvarar $0,0043 \times 7850 = 34 \text{ kg/m}^3$. Med 40% fiberspill beaktat uppnås 57 kg/m^3 , och om CT-skanningsmetodens precision endast är 80% fås 71 kg/m^3 . Här ska dock noteras att Nordström (2005) redovisar resultat från stickprovsundersökningar som visar att i sprutade provkroppar för vilka betongmixen har innehållit 70 kg/m^3 stålfiber kunde endast motsvarande 33 kg/m^3 fibrer hittas efter manuell kontrollräkning. Detta är mycket nära uppskattningen ovan, innan möjlig inverkan av fiberspill och fall med låg precision hos analysmetoden har beaktats.

6.5 Behov av fortsatt undersökning

De studerade exemplen tyder på att det är skillnad i fiberorientering i sprutbetong jämfört med i gjutna betongkonstruktioner av större utsträckning, där inte formsidor och andra ytor styr fiberorienteringen. Det är av intresse att fortsätta studera fiberorienteringen i sprutbetong med målet att statistiskt undersöka hur stor del av fibrerna kan förväntas vara optimalt orienterade, det vill säga ligga parallellt med sprutbetongskiktets huvudplan.

Ett uppföljande projekt bör inriktas på att samla in och prova ett större antal fiberbetongprov och sammanställa resultaten med angivande av aktuell betongsammansättning, omgivande förhållanden vid spruttillfället och andra faktorer som kan påverka den slutliga fördelningen och orienteringen av fibrerna i materialet. Även skillnader för olika fibertyper och fiberlängder bör observeras och tas i beaktande. Målet ska vara att beskriva metoden som en standardiserad och praktiskt fungerande provningsmetod och ge rekommendationer på program för provning i fält, med praktiska regler för till exempel antal nödvändiga prov per yta sprutbetong.

LITTERATUR

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”, *fib Symposium*, Copenhagen, Denmark. 2015.

Ansell A, Ahmed L, Guarin A. *Datortomografi som undersökningsmetod för ung och gammal, sprutad och gjuten betong för tunnlar*, BeFo Rapport 165, Stockholm, 2016.

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

Ansell A, Nordström E, Strömberg L. “Durability of shotcrete tunnel linings due to steel fibre corrosion in cracks”, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2020.

Avizo, *3D image processing package*, <http://www.fei.com/software/avizo3d/> (2021).

Balázs GL, Czoboly O, Lublósy É, Kapitány É, Barsi Á. “Observation of steel fibres in concrete with Computed Tomography”, *Construction and Building Materials*, 140, 534-541 (2017).

Barnett SJ, Lataste J-F, Parry T, Millard SG, Soutsos MN. “Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength”, *Materials and Structures*, 43(7), 1009-1023 (2010).

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).

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).

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).

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

Clark JV, Deboodt TJ, Lange DA, Ideker JH, Isgor OB. “Advances in X-Ray Computed Tomography for the characterization of cementitious materials”, *Concrete International*, 42(9), 30-36 (2020).

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

Dressler I, Freund N, Lowke D. “The effect of accelerator dosage on fresh concrete properties and on interlayer strength in shotcrete 3D printing”, *Materials*, 13(2), 374 (2020).

ElZain N. *An experimental study of the validity of the round panel test method for shotcrete*. Examensarbete, KTH Betongbyggnad, Stockholm, 2018.

Flansbjerg M, Williams Portal N, Hall S, Engqvist J. “Analysis of failure modes in fiber reinforced concrete using X-ray tomography and digital volume correlation”, *18th International Conference on Experimental Mechanics*, Brussels, Belgium, 2018.

Flansbjerg M, Williams Portal N, Hall S, Engqvist J. “Analysis of fiber-matrix interaction in FRC using X-ray tomography and digital volume correlation”, *10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-X, Bayonne, France, 2019.

Freund N, Dressler I, Lowke D. “Studying the bond properties of vertical integrated short reinforcement in the shotcrete 3D printing process”, *RILEM Bookseries*, 28, 612-621 (2020).

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).

Gallucci E, Scrivener K, Groso A, Stampanoni 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).

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).

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.

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

ITK, *The Insight Toolkit*, <https://itk.org/> (2021).

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).

Kaufmann J, Frech K, Schuetz P, Münch B. “Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete applications”, *Construction and Building Materials*, 49, 15-22 (2013).

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

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

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).

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).

Kloft H, Krauss H-W, Hack N, Herrmann E, Neudecker S, Varady PA, Lowke D. “Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP)”, *Cement and Concrete Research*, 134 (2020).

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).

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

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.
- Liu M, Liu D, Qiao P, Sun L. “Characterization of microstructural damage evolution of freeze-thawed shotcrete by an integrative micro-CT and nanoindentation statistical approach”, *Cement and Concrete Composites*, 117 (2021).
- 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).
- Matlab, The language of technical computing, <http://se.mathworks.com/products/matlab/> (2021).
- MAVI, Modular Algorithms for Volume Images, <https://www.itwm.fraunhofer.de/en/departments/bv/products-and-services/mavi.html> (2021).
- McKetty MH. *X-ray attenuation. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents, Imaging & therapeutic technology*, RadioGraphics 1998.
- Miletića M, Kumar LM, Arns J-Y, Agarwal A, Foster SJ, Arns C, Perić D, “Gradient-based fibre detection method on 3D micro-CT tomographic image for defining fibre orientation bias in ultra-high-performance concrete” *Cement and Concrete Research*, 129 (2020).
- 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.
- Nordström E. *Durability of sprayed concrete: steel fibre corrosion in cracks*. Doktorsavhandling, Luleå tekniska Universitet, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser/Konstruktionsteknik, Luleå, 2005.
- Nordström E, Holmgren J. *Sprutbetonghandboken – Reparation*, Elforsk rapport 09:74. Elforsk, Stockholm, 2009.
- Oesch T, Landis E, Kuchma D. “A methodology for quantifying the impact of casting procedure on anisotropy in fiber-reinforced concrete using X-ray CT”, *Materials and Structures*, 51 (2018).

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.

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.

Pittino G, Galler R. “X-ray tomographie of steel fibre reinforced shotcrete (SFRS)”, *Shotcrete for Underground Support XI*, Davos, Switzerland (2009).

Pittino G, Geier G, Fritz L, Hadwiger M, Rosc J, Pabel T. “Computertomografische Untersuchung von Stahlfaserspritzbeton mit mehrdimensionalen Transferfunktionen”, *Beton- und Stahlbetonbau*, 106(6), 364-370 (2011).

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).

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, Kutzer 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, Kutzer J, Bugdol M, Rudzki M. “X-ray computed tomography harnessed to determine 3D spacing of steel fibres in self compacting concrete (SCC) slabs”, *Construction and Building Materials*, 74, 102-108 (2015c).

Ponikiewskia T, Kutzer 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).

- 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).
- Python, *Programming language*, <https://www.python.org/> (2021)
- 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).
- Rengarajan M. *Laboratory testing of shotcrete with fibres of steel, basalt or synthetic materials*. Examensarbete, KTH Betongbyggnad, Stockholm, 2020.
- Rios JD, Leiva C, Ariza M, Seidl S, Cifuentes H. “Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography”, *Materials & Design*, 165 (2019).
- 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.
- Ruan T, Poursaee A. “Fiber-distribution assessment in steel fiber-reinforced UHPC using conventional imaging, X-Ray CT scan and concrete electrical conductivity”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 2019.
- Schnell J, Ackermann F, Rösch R, Sych T. “Statistical analysis of the fibre distribution in ultra high performance concrete using computer tomography”, *Second International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, 145-152, 2008
- 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.
- 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).
- 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).

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.

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.

Vicente MA, González DC, Mínguez J. “Determination of dominant fibre orientations in fibre-reinforced high-strength concrete elements based on computed tomography scans”, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 29, 164-182 (2014).

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).

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).

X5000 *system*, North Star Imaging Inc., Rogers MI, USA,
<http://4nsi.com/systems/x5000/> (2021).

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.

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).

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).



Box 55545
SE-102 04 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Sturegatan 11, Stockholm

ISSN 1104-1773