

## PLACERING OCH ORIENTERING AV STÅLFIBRER I SPRUTBETONG KARTLAGD GENOM TOMOGRAFIUNDERSÖKNING AV PROV FRÅN TUNNLAR

Anders Ansell



# **PLACERING OCH ORIENTERING AV STÅLFIBRER I SPRUTBETONG KARTLAGD GENOM TOMOGRAFI- UNDERSÖKNING AV PROV FRÅN TUNNLAR**

**Position and orientation of steel fibres in  
shotcrete samples from tunnels investigated  
with tomography**

Anders Ansell



## FÖRORD

Betongmaterial har generellt mycket god förmåga att bära tryckbelastningar men har lägre kapacitet för direkt drag eller drag i samband med böjning och därför behöver materialet armeras för att fungera effektivt, till exempel som vanligt vid sprutbetong genom tillsats av fibrer. Hur fibrernas fungerar vid dragbelastning, sprickbildning och betongkrympning är förstås av intresse men beror mycket på fibrernas orientering och rumsliga fördelning inne i betongen. En undersökningsmetod och en därtill särskild analysrutin har tidigare utvecklats och utprovats för tomografiundersökning av sprutbetongprovkroppar. Föreliggande rapport verifierar metoden på ett flertal provkroppar tillhandahållna av industrin.

Studien har utförts i samverkan med en referensgrupp bestående av Alf Nilsson, Lars Elof Bryne, Iad Saleh, Anders Selander och Patrik Vidstrand och har samfinansierats av BeFo och KTH.

Stockholm

*Patrik Vidstrand*



## SAMMANFATTNING

Okunskap om effektiviteten hos stålfibrer i sprutbetong leder idag ofta till överdimensionering av sprutbetongens tjocklek. Med en mer optimal användning av stålfibrer i sprutbetong skulle en minskad mängd överksamma fibrer fås vilket leder till minskad åtgång av stål, betong och cement. Effektiviteten hos stålfibrer i sprutbetong beror inte enbart på 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 dragna snitt av betongen och också vara orienterade i dragriktningen. För att kunna kartlägga hur stålfibers fördelning och orientering i sprutbetong kan variera krävs data från undersökning av sprutbetong på tunnelväggar och från provlådor sprutade i fält. De vanligtvis använda undersökningsmetoderna är i huvudsak begränsade till förstörande provning, som till exempel sågning och mikroskopering av uttagna provkroppar.

En etablerad, alternativ undersökningsteknik är dock idag datortomografi (CT-skanning) som kan används för att visualisera det inre av hårda provkroppar. Fördelarna är att hela 3D volymen av ett materialprov kan kartläggas i en helt icke-förstörande undersökning och att ingen eller endast liten beredning av proverna behöver göras. En tomografi-baserad metod med en särskilt utvecklad analysrutin har tidigare utprovats för tomografi-undersökning av sprutbetongprovkroppar. Varje studerad provkropp genomlysas med röntgenstrålar och resultatet sammanställs till en digital, virtuell provkropp. Genom numerisk analys kan sedan de stålfibrer som identifieras kartläggas och beskrivas med avseende på placering och orientering. Metoden redovisar stålfibrernas läge och orientering i vektorform, beskrivet med två lutningsvinklar och som antalet fibrer som skär respektive höjdsnitt av en provcylinder. Den laborativa studie som här redovisas har genomförts för att testa och demonstrera hur metoden fungerar praktiskt. Ett urval av sprutbetongprov har undersökts för att visa en representativ variation av stålfibers orientering i sprutbetong för normalt förekommande materialsamman-sättningar och omgivningsförhållanden. Projektet omfattar CT-skanning och utvärdering av totalt 16 sprutbetongprov och ett referensprov från en gjuten platta, utan förlust av fiber. Provkropparna är cylindriska borrhärnor ur tunnelväggar, sprutade lådor eller plattor.

Det vanligaste sättet att kontrollera bärförmågan för fiberarmerad betong är genom böjprovning av balkar som ger en residualböjdraghållfasthet, ett mått på fiberbetongens restbärförmåga efter uppsprickning. För att kunna uppskatta residualhållfastheterna hos en fiberarmerad sprutbetong som har undersökts med CT-skanning presenteras här en särskild beräkningsmodell. Denna bygger på antagandet antagandet att undersökt sprutbetongcylinder har tagits ur en böjprovbalk så att cylinderns tvärsnitt motsvarar balkens mittvärsnitt. Tvärsnittets böjmomentkapacitet beräknas sedan där det beaktas att alla fibrer under neutrala lagret utsatta för dragning. Varje dragen fiber behandlas beräkningsmässigt som en liten armeringsstång och därmed ger fiberfördelningen över höjden neutrala lagrets läge. För utvärdering av de undersökta sprutbetongprovkropparnas fiberorientering och fiberinnehåll har också gjorts en sammanställning över kunskapsläget beträffande fiberförluster. Hur stor andel fibrer som förloras under sprut-

processen på grund av återstuds från bergytan och hur stor del som förloras vid blandning, omlastning och av andra orsaker är idag fortfarande relativt okänt. Även möjligheten att beräkna fibereffektivitetsfaktorer kartläggs. En sådan faktor relateras till det totala antalet fibrer som korsar en spricka i en till brott belastad betongprovkropp. Den kan bestämmas genom att räkna det totala antalet fibrer som korsar brottytorna och sedan dividera den relativa tvärsnittsarean stål/betong med volymandelen fibrer i betongen. Om faktorn får ett värde på 1,0 motsvarar det att alla fibrer är helt orienterade i dragriktningen, orienterade i 1D. Om faktorn är 0,5 motsvarar detta en 3D orientering, vilket är att förvänta i en gjuten stor betongvolym, och om den är 0,64 är fibrerna orienterade i ett 2D plan, vilket kan förväntas för en tunn sprutbetong.

Resultaten uppvisar relativt stora fiberförluster, det vill säga skillnaderna mellan föreskrivet fiberinnehåll i provens betongmixar och de fibrer som kunnat identifieras genom CT-skanning, vilket här också till stora delar kunnat förklaras. Beräknade fiberorienteringsfaktorer visar god överensstämmelse med de fiberorienteringar som kan ses i resultaten. Här ses också att en högre grad av fibrerna orienteras optimalt i sprutbetong jämfört med i gjutna betongkonstruktioner. Den föreslagna metoden att utifrån de identifierade fiberorienteringarna i 3D cylindervolymer beräkna motsvarande residualböjdraghållfastheter för sprutbetongen har genomgående använts. Resultaten uppvisar realistiska värden och i de få fall där direkt jämförelse med resultat från balkprovning kunnat göras fås god överensstämmelse. Metoden kommer att ytterligare öka värdet på de resultat som fås med undersökningsmetoden för stålfiberarmerad sprutbetong. Med kunskap om hur stålfibrer i sprutbetong verkar och orienteras, och hur detta kan påverkas genom konstruktionsutformning och materialanpassning, kan säkerställas att rätt mängd fibrer hamnar på rätt plats, anbringad med rätt metodik.

**Nyckelord:** Sprutbetong, Stålfibrer, Datortomografering, Provtagning i fält, Residualhållfasthet.



## SUMMARY

Lack of knowledge regarding the effectiveness of steel fibres in shotcrete today often leads to over-dimensioning the thickness of the shotcrete. With a more optimal use of steel fibres in shotcrete, a reduced amount of ineffective fibres would be obtained, which leads to a reduced consumption of steel, concrete and cement. The effectiveness of steel fibres in shotcrete depends not only on the number of steel fibres in a section of the shotcrete, but also on how these are oriented. For an effective fibre effect, as many fibres as possible should be located in concrete sections in tension and also be oriented in the direction parallel to this direction. In order to investigate how the distribution and orientation of steel fibres in shotcrete can vary, data must be collected through examination of shotcrete on tunnel walls and from test boxes sprayed in situ. The commonly used examination methods are essentially limited to destructive testing, such as sawing and microscopy of test specimens.

However, an established, alternative examination technique today is computed tomography (CT), which can be used to visualize the interior of hard specimens. The advantages are that the entire 3D volume of a material sample can be mapped in a completely non-destructive examination and that no or only little preparation of the samples are needed. A tomography-based method with a specially developed analysis routine has been tested in a previous study for tomography examination of shotcrete specimens. Each studied specimen is scanned with X-rays and the results are compiled into a digital, virtual specimen. Through numerical post-processing, the identified steel fibres can be mapped and described with respect to location and orientation. The method reports the position and orientation of steel fibres in vector form, described with two inclination angles and as the number of fibres that intersect the respective vertical section of a sample cylinder. The laboratory study reported here has been carried out to test and demonstrate how the method works in practice. A selection of shotcrete samples has been investigated to show a representative variation of steel fibre orientation in shotcrete for normally occurring material compositions and tunnel conditions. The project includes CT scanning and evaluation of a total of 16 shotcrete samples and a reference sample from a cast slab, without fibre loss. The test ed samples are cylindrical drill cores from tunnel walls, sprayed boxes or slabs.

The most common method to measure the load-bearing capacity of fibre-reinforced concrete is through bending testing of beams which gives a residual flexural tensile strength, a measure of the fibre-reinforced concrete's residual load-bearing capacity after cracking. In order to estimate the residual strengths of a fibre-reinforced shotcrete that has been examined with CT scanning, a special analysis model is presented here. This is based on the assumption that the examined shotcrete cylinder has been taken from a bend-test beam so that the cross section of the cylinder corresponds to the central cross section of the beam. The bending moment capacity of the cross-section is then calculated where it is taken into account that all fibres under the neutral layer are subject to tension. Each fibre in tension is computationally treated as a small reinforcing bar and thus the fibre

distribution over the height gives the location of the neutral layer. In order to evaluate the fibre orientation and fibre content of the investigated shotcrete specimens, a compilation of the state of knowledge regarding fibre losses has also been made. How much fibre is lost during the spraying process due to rebound from the rock surface and how much is lost during mixing, loading and for other reasons is still relatively unknown today. The possibility of calculating fibre efficiency factors is also mapped. One such factor is related to the total number of fibres crossing a crack in a concrete specimen loaded to failure. It can be determined by counting the total number of fibres crossing the fracture surfaces and then dividing the relative steel/concrete cross-sectional area by the volume fraction of fibres in the concrete. If the factor gets a value of 1.0, it corresponds to that all fibres are fully oriented in the tensile direction, oriented in 1D. If the factor is 0.5, this corresponds to a 3D orientation, which is to be expected in a large, cast concrete volume, and if it is 0.64, the fibres are oriented in a 2D plane, which is to be expected for a thin shotcrete.

The results show relatively large fibre losses, i.e. the differences between the prescribed fibre content in the concrete mixes of the samples and the fibres that could be identified through CT scanning, which can also be largely explained here. Calculated fibre orientation factors show good agreement with the fibre orientations that can be seen in the results. Here it is also seen that a higher degree of the fibres are optimally oriented in shotcrete compared to in cast concrete constructions. The proposed method of calculating the corresponding residual flexural tensile strengths for the shotcrete based on the identified fibre orientations in 3D cylinder volumes has been consistently used. The results show realistic values and in the few cases where direct comparison with results from beam testing could be made, good agreement is obtained. The method will further increase the value of the results obtained with the investigation method for steel fibre reinforced shotcrete. With knowledge on how steel fibres in shotcrete act and are oriented, and how this can be affected by structural design and material adaptation, it can be ensured that the right amount of fibres ends up in the right place, applied with the right methodology.

**Keywords:** Shotcrete, Steel fibres, Computed tomography (CT), In situ samples, Residual strength.

## INNEHÅLL

<b>1. BAKGRUND.....</b>	<b>1</b>
1.1 Sprutbetong med stålfiber.....	1
1.2 Datortomografi för betongprovkroppar .....	2
1.3 Tidigare undersökningar.....	6
1.4 Aktuellt projekt.....	6
<b>2. ÅTERSTUDS OCH FIBERFÖRLUSTER.....</b>	<b>7</b>
2.1 Fiberförluster vid blandning och hantering .....	7
2.2 Återstuds av fibrer .....	9
2.3 Torrspirad betong .....	10
2.4 Våtsprad betong.....	11
2.5 Sammanställning av tidigare resultat.....	12
<b>3. FIBERORIENTERING.....</b>	<b>15</b>
3.1 Dimensionering av fiberbetongkonstruktioner.....	15
3.2 Fiberorienteringsfaktorer .....	17
3.3 Fibrer i tvärsnitt av provcylinder.....	22
3.4 Exempel på fiberorientering.....	23
<b>4. BÖJPROVNING OCH RESIDUALHÅLLFASTHET .....</b>	<b>27</b>
4.1 Provning för residualböjdraghållfasthet .....	27
4.2 Teoretisk dimensionering .....	30
4.3 Modell för utvärdering av provkroppar .....	33
4.4 Exempel på böjdraghållfasthet vs. fiberinnehåll .....	35

<b>5. BESKRIVNING AV PROVSERIEN .....</b>	<b>37</b>
<b>6. RESULTAT .....</b>	<b>43</b>
6.1 Redovisning av CT-skannade provcylindrar .....	43
6.2 Fördelning och orientering av stålfibrer .....	45
6.3 Böjdraghållfasthet.....	46
<b>7. KOMMENTARER OCH SLUTSATSER .....</b>	<b>47</b>
7.1 Fiberinnehåll.....	47
7.2 Fiberorientering .....	49
7.3 Beräkning av residualhållfasthet .....	51
7.4 Rekommendationer för fortsatt undersökning.....	53
<b>LITTERATUR.....</b>	<b>55</b>
<b>BILAGA .....</b>	<b>59</b>

## 1. BAKGRUND

Prestanda och livslängd hos sprutbetong och andra betongmaterial beror i stor utsträckning på förekomst och fördelning av ballast, luftporer, mikrosprickor samt stålfibrer eller syntetiska fibrer, då sådana har tillsatts. Med kunskap om hur variationer i materialrecept, blandning, transport, och sprutningsförfarande inverkar kan sprutbetongmaterialets inre optimeras för användning vid bergbyggande. Detta ställer krav på att kunna studera prover tagna i fält, också för att långsiktigt kunna följa eventuell nedbrytning av materialet, till exempel genom korrosion i stålfiberarmering (se Nordström, 2005). Idag är de praktiskt användbara undersökningsmetoderna i huvudsak begränsade till förstörande provning, till exempel genom sågning och mikroskopering av uttagna eller särskilt gjutna provkroppar.

### 1.1 Sprutbetong med stålfiber

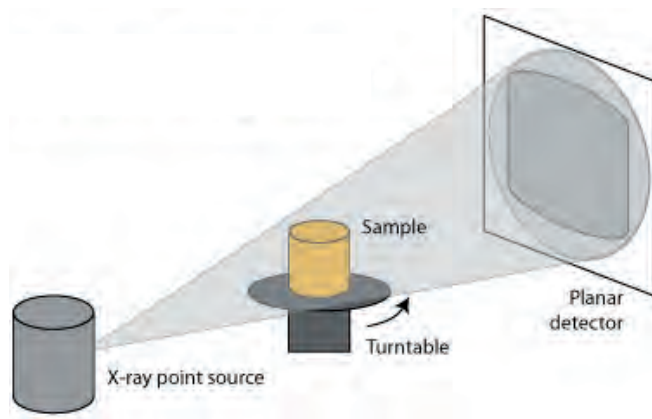
Betongmaterial har generellt mycket god förmåga att bära tryckbelastningar men har lägre kapacitet för direkt drag eller drag i samband med böjning. Därför behöver materialet armeras för att fungera effektivt, till exempel genom tillsats av fibrer. Effektiviteten hos stålfibrer i sprutbetong beror på antalet fibrer i ett dragbelastat snitt och hur dessa är orienterade. Genom kunskap om hur stålfibrer i sprutbetong verkar och orienteras och hur detta kan påverkas genom konstruktionsutformning och materialanpassning, kan effektiviteten hos sprutbetongförstärkningar ökas, det vill säga att en ökad hållfasthet kan uppnås med samma fiberinnehåll. Okunskap om effektiviteten hos fibrerna sammantaget med stor spridning i provningsresultat leder idag ofta till överdimensionering av sprutbetongens tjocklek, se Sjölander m.fl. (2023). Ökad kunskap kommer att leda till att den totala mängden fibrer som måste blandas i den använda betongen kan reduceras. Mer effektivt utnyttjande av fibrerna gör också att sprutbetongtjocklekar kan reduceras och då åtgår totalt sett en mindre mängd stål, betong, och därigenom en mindre mängd cement vilket bidrar till minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp, och samtidigt till hushållning med naturresurser och en ökad hållbarhet. Kravet på bärförmåga hos sprutbetongförstärkningar bör stämmas av med antalet fibrer som verkligen finns i sprutbetongen. Av intresse är hur fibrernas orientering inne i betongen verkar vid dragbelastning, sprickbildning och betongkrympning. För en effektiv fiberverkan bör så många fibrer som möjligt vara belägna i dragna snitt av betongen och följaktligen också vara orienterade i dragriktningen. Att effektivt kunna ta prover i fält för detaljerad undersökning skulle göra det möjligt att effektivt följa upp och stämma av den verkliga prestandan och eventuell initierad nedbrytning av materialet i konstruktionerna. Detta skulle leda till en ökad säkerhet och mer effektiv drift och underhållsplanering. En undersökningsmetod med en särskilt för tillämpningen utvecklad analysrutin har i ett tidigare projekt (Ansell, 2021) utprovats för tomografiundersökning av sprutbetongprovkroppar. Med den metod som har arbetats fram kan stålfibrernas läge och orientering uppskattas och dessa beskrivs med två lutningsvinklar, kompletterat med uppgift om antalet fibrer som skär respektive höjdsnitt av en provcylinder. Ett långsiktigt mål är att

etablera metoden som en resurs för särskild undersökning då det är angeläget att kvalitetskontrollera fibersprutbetongs effektivitet. Med jämförelser och avstämning av orsak-verkansamband vid variation i betongsammansättning, blandning, hantering och sprutning går det att nå en effektivare användning av stålfibrer i sprutbetong, med rätt mängd på rätt plats och anbringad med rätt metodik. Bättre kunskap om sprutbetong-förstärkningar leder till ökad säkerhet i tunnelmiljöer.

## 1.2 Datortomografi för betongprovkroppar

Datortomografi (*X-ray computed tomography*) är en teknik som används för att visualisera det inre av ett fast föremål, till exempel en provkropp av betong. Denna genomlysas med röntgenstrålar och resultatet sammanställs till digital information om provkroppens inre struktur på mikroskopisk detaljnivå. Volymbildelementen benämns *voxels*, till skillnad från tvådimensionella bildelement, *pixels*. En introduktion och kortfattad sammanfattning till tomografitekniken ges av Ansell m.fl. (2016) och Ansell (2021). En mer detaljerade beskrivning ges till exempel av Ketcham & Carlson (2001). Under de senaste decennierna har datortomografisystem (*Computed Tomography*, CT-system) fått allt bredare användning inom industrin och forskningen. Detaljer ned till några tiotals mikrometers storlek kan återges, också i föremål av material med hög densitet. Teknikens fördelar är främst att analys av ett materialprov kan genomföras som en helt icke-förstörande undersökning i 3D. Ingen eller liten beredning av proverna behövs vilket gör metoden relativt tidseffektiv.

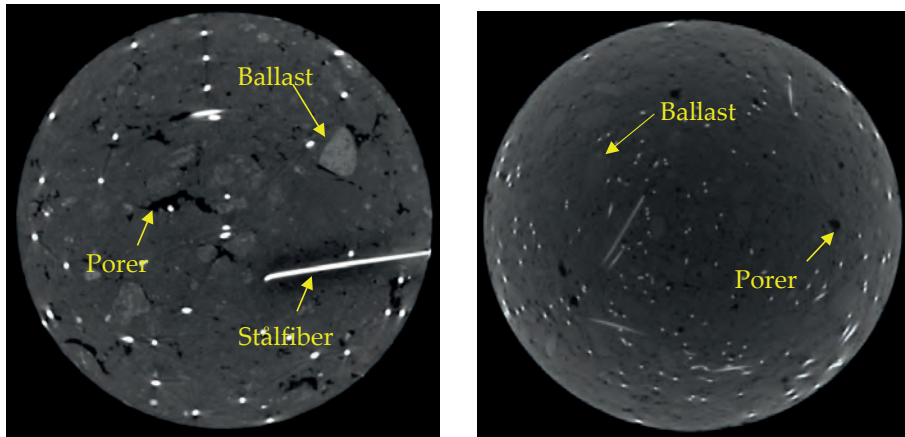
Huvudmomenten i en typisk tomografiundersökning är *Provberedning*, *Kalibrering*, *Datainsamling* och *Rekonstruktion*. Den del av undersökningen som omfattar Datainsamling och Rekonstruktion kommer i det följande att refereras till som "CT-skanning". Då den provkropp som ska undersökas är en cylinder placeras den oftast på en roterande platta mellan röntgenkällan och detektorn, se Figur 1. Under skanningen passerar röntgenstrålar genom provet medan det vridbara bordet roterar med konstant hastighet. Den digitala tredimensionella bild som fås 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. Exempel på hur resultatet från en CT-skanning kan representeras grafiskt i 3D ges i Figur 2. 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 här de ljusaste punkterna i tvärsnittet medan de mycket mörka områdena är tomrum eller luftporer. Genom att begränsa täthetsspektret för den visade volymen kan till exempel endast stålfibrer visas i 3D.



**Figur 1.** Skanning av roterande, cirkulär provkropp (Ketcham, 2016).  
*Figure 1. Scanning of rotated, circular test sample (Ketcham, 2016).*



**Figur 2.** Tredimensionell visning av betongcylinder vertikalt mittsnitt (vä.) och dess stålfibrer (hö.) (Ansell m.fl., 2016)  
*Figure 2. Three dimensional view of concrete cylinder vertical section (L) and its steel fibres (R) (Ansell et.al., 2016).*

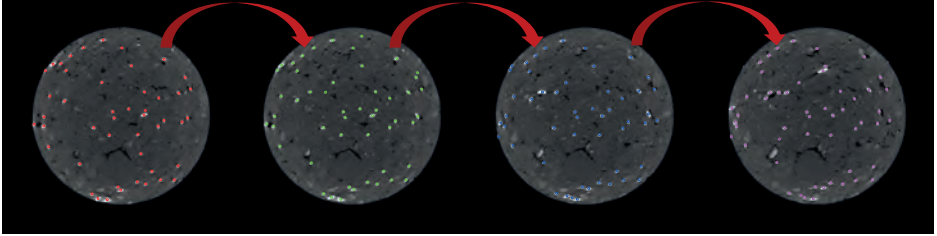


**Figur 3.** Tvärsnittsbilder från CT-skannade betongcylindrar (Ansell m.fl., 2016).  
*Figure 3. Cross sections from CT-scanned concrete cylinders (Ansell et al., 2016).*

Den metod för praktisk analys och utvärdering av bilder från CT-skanning som har utvecklats av Ansell m.fl. (2016) och Ansell (2021) utgår från sekvenser av tvärsnittsbilder längs med och vinkelrätt mot en provcylinders längdaxel. Bilderna är av den typ som visas i Figur 3, där en normalstor skannad betongcylinder vanligtvis representeras av en sekvens på ca 1000–2000 sådana tvärsnittsbilder. Data från CT-skanningen lagras som en sekvens av gråskalebilder i ordning efter ökande höjdläge. Varje bild motsvarar således en skiva av cylindern med en voxels tjocklek. Bilderna sparas som tif-filer som kan läsas in i Matlab (2024) 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. 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  $800 \times 800$  element, och det totala antalet sådana matriser, typiskt 1500–2000 st., visar då läget för punkter i fibrer inne i den skannade betongvolymen. Hur fibrernas läge kan variera mellan tvärsnitten visas i Figur 4, för en sekvens av fyra efterföljande tvärsnitt. Om varje identifierad skärningspunkt mellan fiber och ett tvärsnitt plottas som en punkt i ett 3D diagram fås en punktrepresentation av fibrerna i sprutbetongvolymen, se Figur 5. 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 5. Datapunkterna ordnas i tre långa koordinatvektorer  $(x,y,z)$ . Den blå, multilinjära 3D-kurva som visas i figuren representerar således en väg där samtliga datapunkter passerar en gång. Med särskilda geometriska villkor identifieras brytpunkter på linjen vilket leder till ett antal räta linjer, vektorer som approximerar fibrer eller delar av fibrer. För CT-skannade normalstora

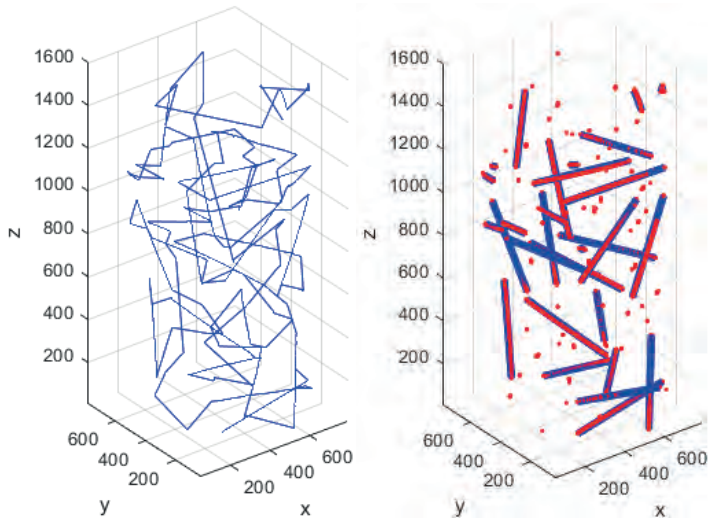


provcyndrar av stålfiberbetong kan datamängden bli relativt stor, möjligen med fler än 50 000 punkter (se Ansell, 2021), vilket gör sorterings- och identifieringsprocessen numeriskt krävande.



**Figur 4.** Identifiering av mittpunkt av fibrer i sekvens av tvärsnitt. Från Ansell (2021).

*Figure 4. Identified fibres in a sequence of cross-sections. From Ansell (2021).*



**Figur 5.** Sammanbundna skärningspunkter med fibrer i alla tvärsnitt (vä.), identifierade fibrer i punkt- och vektorrepresentation (hö.). Från Ansell (2021).

*Figure 5. Interconnected crossing points of fibres at all cross sections (L), identified fibres represented as points and vectors (R). From Ansell (2021).*

### 1.3 Tidigare undersökningar

Den pilotstudie som genomförts av Ansell m.fl. (2016) med syfte att beskriva möjligheter, begränsningar samt arbetsgång och rutiner vid undersökning av betongprovkroppar genom tomografering visade att det redan i det tidiga skedet av metodutvecklingen gick att genomföra praktisk analys av betong med till exempel den typ av datortomografiutrustning som finns hos KTH Byggetenskap (se Ansell, 2021). Det visades hur resultaten från tomograferingen kan analyseras och presenteras i form av kvalitativ och kvantitativ utvärdering av gjutna och sprutade betong-provkroppar, från laboratorium eller fältmiljö. De kvantitativa data som kan beräknas är främst fördelningar av cementpasta, ballast, luftporer och stålfibrer. En analysrutin särskilt utprovad och anpassad för tomografiundersökning av sprutbetongprovkroppar presenterades i ett uppföljande projekt (Ansell, 2021). Fokus var på att kunna beskriva innehållet av stålfiber i sprutbetong. Den metod som har arbetats fram redovisar fibrernas läge och orientering beskrivet med två orienteringsvinklar i en 3D cylinder, och dessutom ges antalet fibrer som skär respektive höjdsnitt av cylindern. Metoden demonstreras för ett urval av några gjutna och några sprutade provcylindrar, och en utvärdering visade att minst 85% av den sammantagna fiberlängden i betongvolymen kan identifieras med metoden. För raka fibrer utan ändkrokar är andelen märkbart högre.

### 1.4 Aktuellt projekt

För att kunna påbörja kartläggningen av hur stålfibrers fördelning och orientering i sprutbetong kan variera krävs ytterligare data. Undersökningen bör göras på sprutbetong från tunnelvägg och från provlådor sprutade i fält och i laboratorium. Aktuellt projekt är en laborativ fortsättningsstudie med syfte att testa och demonstrera hur den undersökningsmetod som tidigare utvecklats (Ansell, 2021) fungerar i ett praktiskt sammanhang. Syftet har varit att med ett relativt begränsat urval prover visa på en representativ variation av stålfibrers orientering i sprutbetong för normalt förekommande material-sammansättningar och omgivningsförhållanden. Det antal prover som kunnat undersökas avgränsas delvis av att projektet genomförs under begränsad tid vilket har lett till att andelen prover tagna från sprutade lådor dominerar relativt prov direkt ur tunnelvägg. Däremot är samtliga undersökta prov, förutom ett gjutet och ett sprutat referensprov (Prov 1 och 17), från betong sprutad i tunnelmiljö. Uppsättningen av resultat och data ska kunna fungera som referens för fortsatta jämförelser och avstämningar med prov tagna från nybyggda och befintliga tunnlar. Resultaten kan också användas för att planera hur uttag och hantering av prover från fältet praktiskt bäst kan göras. Av särskilt intresse är också att 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 sprutbetongförstärkningarna ökas. Målet är att nå en effektivare användning av stålfibrer i sprutbetong, med rätt mängd på rätt plats och anbringad med rätt metodik.

## 2. ÅTERSTUDS OCH FIBERFÖRLUSTER

De förväntade egenskaperna hos fiberarmerad sprutbetong relateras oftast till den mängd stålfibrer som föreskrivs att blandas in i betongmixen. Det accepteras allmänt att den mängd fibrer som återfinns i sprutbetongen när den väl är på plats på en tunnelyta är lägre än den inblandade mängden. Erfarenhet och praxis har visat att det finns ett samband mellan sprutbetongens prestanda och den initialt inblandade fibermängden. Det är därmed allmänt accepterat att fibrer förloras under blandning, omlastning och sprutning av betongen. Hur stor andel fibrer som förloras under själva sprutprocessen på grund av att de styva stålfibrerna återstudsar vid träff med bergytan och hur stor del som förloras vid blandning, omlastning och av andra orsaker är idag fortfarande relativt okänt.

### 2.1 Fiberförluster vid blandning och hantering

Mängden fibrer i sprutbetong kan mätas direkt ur betongblandningen före sprutningen, efter sprutningen då betongen fortfarande är ohårdnad eller i hårdnat tillstånd (Nordström & Holmgren, 2009). Det går också att uppskatta fiberinnehållet genom att räkna antalet fibrer som korsar ett sågat tvärsnitt eller ett brottsnitt i en provkropp av sprutbetong, se vidare avsnitt 3.2. Metoden som används för mätning i färskt tillstånd bygger på urvaskningsprov, där fibrer i ca 1–2 kg betong tvättas ur och friläggs med magnet, enligt SS-EN 14488-7 (2006). För att få en uppfattning om den mängd fibrer som finns i den färdiga konstruktionen måste urvaskningsprov där betong skrapas ner från den sprutade ytan genomföras (Nordström & Holmgren, 2009). Mätningen kan också göras på hårdnade betongprovkroppar som krossas för att frilägga fibrerna. För att uppskatta mängden återstudsade fibrer kan urvaskningsprov genomföras på fiberbetong uppsamlat från tunnelgolvet, vilket före sprutning då kan ha täckts med plast. För att uppskatta det totala fiberspillet bör således undersökningar genomföras i flera stadier, från den direkta inblandningen av fibrer tills sprutbetongen väl sitter på plats i en tunnel. Mycket få sådana, relevanta undersökningar har dock dokumenterats och publicerats.

Inom ett examensarbetsprojekt användes metoden med urvaskning för att mäta innehållet i sprutbetong för bergförstärkning i tunnlar (Oustampasidis, 2019). Syftet var att studera eventuell inverkan av när och hur fibern blandades in i betongmixen genom att ta prov i början, mitten och slutet under utpumpningen av betongen. Tre olika sätt att blanda in fibrer undersöktes, den första bestod i att fibrerna tillsattes i en central betongblandar-anläggning. Prover togs då vid tre tillfällen direkt från den centrala anläggningen. Vid de två andra inblandningssätten tillsattes fibrerna i betongblandaren efter att betongen fyllts och samtidigt som betongen fylldes i. Vid dessa två testtillfällen togs proverna nere i tunnlar direkt från blandarbilarna då de överförde betong till sprutriggar, se Figur 6–7. Resultaten visade att variationen mellan de tre olika metoderna för att tillsätta fibrerna var obetydlig. En del av proven visade lägre stålfiberinnehåll i slutet av avlastningen jämfört med i början. Generellt redovisas också lägre fiberinnehåll än specificerat för beställd betongmix. Slutsatsen var dock att variationen var inom de gränser som ges i gällande provningsstandard, SS-EN 206 (2013). Denna anger att provning med avseende

på stålfiberinnehåll och homogenitet ska utföras på tre stickprover per lass sprutbetong. Varje prov ska ha ett värde som är minst lika med 80% av det specificerade minimivärdet och medelvärdet av de tre proverna från ett lass ska ha ett värde som är minst lika med 85% av det specificerade minimivärdet. Det finns alltså redan innan sprutningen sker en acceptans, stödd av gällande regelverk, för att betongen kan innehålla mindre fibrer än specificerat för beställd sprutbetongmix.



**Figur 6.** Betongblandarbil som överför stålfibersprutbetong till sprutrigg. Från Oustampasidis (2019).

*Figure 6. Mixer truck transferring steel fibre shotcrete to spraying rig. From Oustampasidis (2019).*



**Figur 7.** Provtagning av stålfibersprutbetong. Från (Oustampasidis, 2019).

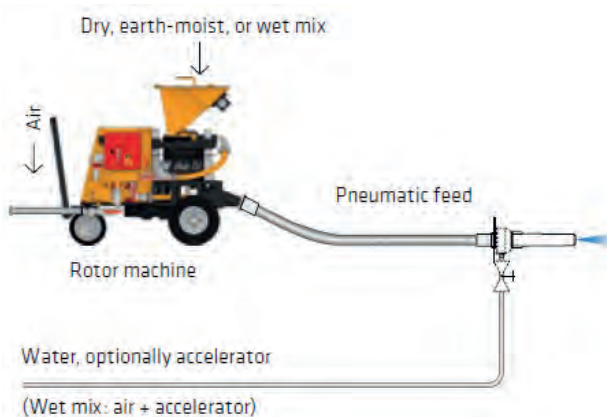
*Figure 7. Extraction of steel fibre shotcrete samples. From (Oustampasidis, 2019).*

## 2.2 Återstuds av fibrer

Särskilt under sprutningens första skede fäster inte sprutbetongen och alla ingående fibrerna helt på underlaget på grund av den relativt höga anslaghastigheten. Grova ballastkorn och speciellt fibrer tenderar att återstudsas mer än resten av delmaterialen vilket leder till förluster och ojämna fördelningar. Förluster av stålfibrer på grund av återstuds orsakas av fibrernas elastiska styvhet och dessa har också en lägre vidhäftningsförmåga till betongmatrisen i färskt tillstånd jämfört med till exempel polymerfibrer, se Castellón m.fl. (2022), Kaufmann m.fl. (2013) och Austin m.fl. (1997). På engelska benämns de två dominerande betongsprutningsmetoderna “*Dry-mix shotcrete*” och “*Wet-mix shotcrete*”, alternativt “*Dry-mix sprayed concrete*” och “*Wet-mix sprayed concrete*”, vilket belyser att den främsta skillnaden består i hur blandningen av delmaterialen sker. På svenska är motsvarande benämningar *Torrspjutning* och *Våtsprjutning*, vilket inte direkt belyser det faktum att vid bägge metoderna innehåller betongblandningarna vatten då de lämnar sprutmunstycket. Metoderna skiljer sig märkbart åt när det gäller graden av återstuds av stålfibrer och i de kommande avsnitten 2.3–2.4 beskrivs därför metodernas särarter kortfattat med några specifika kommentarer kring fiberåterstuds för respektive metod. Vid *torrspjutning* är återstudsproblematiken som störst och här har undersökningar med höghastighetsfotografering visat att många av fibrerna finns i den yttre delen av luftströmmen och en del blåses då också bort radiellt innan de träffar målytan (Kaufmann m.fl. 2013). Vid *våtsprjutning* tillsätts härdningsacceleratorer så att sprutbetongen uppnår styvhet redan vid ankomsten till tunnelytan vilket kan leda till minskad vidhäftning mellan betongmaterialet och stålfibrerna. I allmänhet påverkar också bearbetbarheten av en sprutbetongblandning graden av återstuds och det har observerats variationer på i storleksordningen 4 % för liknande sprutbetongblandningar. Förklaringen kan här finnas i pumpegenskaperna när den färskfiberarmerade sprutbetongen transporteras till sprutmunstycket. För att minska förlusten är det, förutom att kontrollera konsistensen och spruttrycket, också viktigt att hålla munstyckets riktning konstant 90° i förhållande till den sprutade ytan och att upprätthålla ett konstant avstånd mellan munstyckets spets och ytan. I en jämförande studie av återstuds för de två metoderna användes 30 mm långa stålfibrer av standardtyp, med en diameter på 0,5 mm och försedda med ändkrokar (Banthia & Bindiganavile, 2007). Försöken utfördes under identiska förhållanden och resultaten visar tydligt att återstuds av både grov ballast och stålfibrer är högre vid *Torrspjutning* än vid *Våtsprjutning*, för fibrernas del 27–32 % mot 10–12 %. Resultaten påvisar också att den torrsprutade betongen utvecklade en mycket högre tryck-hållfasthet, men mycket lägre böjhållfasthet, seghet och fibereffektivitet än motsvarande våtsprutad betong. Det ska noteras att de prover som utvärderas och kommenteras i föreliggande rapport uteslutande har sprutats med våtsprutmetoden i svensk tunnelmiljö.

### 2.3 Torrspirad betong

Den äldsta metoden för betongsprutning är torrspirningsmetoden där cement, ballast och torra tillsatser förblandas i förutbestämda förhållanden och paketeras, ofta i stora säckar. Först vid spruttillfället tillsätts vatten till den torra blandningen, så som schematiskt visas i Figur 8. Den torra blandningen matas in i den specialdesignade maskinen där blandningen trycksätts och förs in i en höghastighetsluftkompressor. Här ska noteras att just den maskin som visas i figuren även går att använda med våtbländad betong, det vill säga där vattnet redan är tillsatt innan den når maskinen – se vidare avsnitt 2.4. I fallet med torrblandad betongmix tillsätts vatten och eventuellt också accelerator i sprutmunstycket. För mer detaljerad metodbeskrivning, se till exempel Lindlar m.fl. (2021). Metoden med torrspirad betong används ofta vid betongreparationer, medelstora sprutningsarbeten, tätskiktsarbeten, preliminär tätning mot vattenläckage och vid sprutning i torra utrymmen. Metodens största nackdelar är en relativt hög nivå av dammbildning samt att en relativt stor andel fibrer går förlorade genom återstuds under sprutningsprocessen. Detta beror på att fibrerna har en tendens återstudsas mer än de andra delmaterialen såsom ballasten vid just torrspirningsprocessen, med rapporterade nivåer på upp till 50 % och i vissa fall ända upp mot 50–80 %, se Kobayashi (1983), Austin m.fl. (1997), Banthia m.fl. (1992), Banthia m.fl. (1994) och Armelin & Banthia (2007).



**Figur 8.** Utrustning och process för torr och våt betongsprutning. Från Lindlar m.fl. (2021).

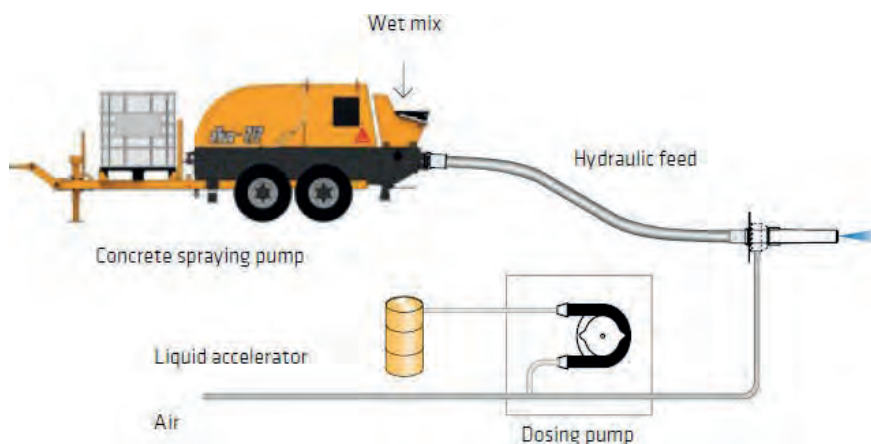
*Figure 8. Machine and process for dry and wet shotcreting. From Lindlar m.fl. (2021).*

Exempel på experimentella undersökningar av återstuds med torrspirad betong redovisas av Banthia m.fl. (1992) som har genomfört mätningar i tunnelmiljö. Resultat erhållna med urvaskningsmetoden (se avsnitt 3.1) visade här på återstuds av stålfibrer i intervallet 35–78 %. I en annan serie, om nio fältförsök (Austin m.fl., 1997), sprutades i träformar med en storlek på  $100 \times 900 \times 1200 \text{ mm}^3$  och i samband med det uppsamlades

det återstudsade materialet, fibrer och ballast, som sedan sorterades och vägdes. I detta fall rapporteras fiberåterstuds inom 30–79 %. En studie med industriell sprutbetongutrustning under laboratoriekontrollerade förhållanden presenteras av Armelin & Banthia (2007), med syfte att undersöka inverkan av stålfiberform och geometri (diameter och längd) på fiberåterstuds vid torrsprutning. Resultaten visar att för en given fiberdiameter befanns fiberlängden vara en nyckelparameter vid bestämning av stålfiber-återstuds, med kortare fibrer som leder till en betydligt lägre återstuds. För en given fiberlängd visade sig en större fiberdiameter ge mindre återstuds. Testerna visade 70–80 % återstuds beroende på blandningens proportionering och sprutförhållandena.

## 2.4 Våtsprutad betong

Vid storskaliga sprutbetongarbeten används idag oftast metoden för våtsprutning, där betongen färdigblandas även med vattnet tillsatt, i princip som vid konventionell betongblandning. Betongen kan pumpas till sprututrustningen men även levereras direkt med betongbil, se Figur 6. Den utrustning som används vid storskalig våtsprutning är betydligt kraftfullare än vid torrsprutning, se Figur 9. Ofta monteras utrustningen på lastbil för att vara flexibel och enkelt flyttbar. Den våta betongblandningen pumpas fram till sprutmunstycket varifrån den accelereras mot underlaget med tryckluft. För att ge snabbt tillhårdnande tillsätts ofta en accelerator vars mängd kan regleras efter behov, vilket dock inte är fallet med vatteninnehållet i betongblandningen. Våtsprutning används ofta i arbeten som kräver hög utkapacitet, högre hållbarhet och väsentligt förbättrade arbetsförhållanden, till exempel med hänsyn till dammbildning som är ett betydligt mindre problem än med torrblandad sprutbetong.



**Figur 9.** Storskalig utrustning och process för våt betongsprutning. Från Lindlar m.fl. (2021).

*Figure 9. Large-scale machine and process for wet shotcreting. From Lindlar et al. (2021).*

Fiberspillet i samband med våtsprutning är mycket lägre än vid sprutning med torrsprutad betong, ca 10–40 % (Kobayashi, 1983; Banthia m.fl., 1992). Förklaringen är att våtsprutning ger en "blötare" betong precis i sprutögonblicket så att ballaststenar och fibrer lättare fastnar i och följer med cementpastan istället för att separerat nå fram till underlaget, det vill säga tunnelväggen. För att där enklare återstudsas. Då återstuds är ett mindre problem med våtsprutningsmetoden finns därför också märkbart färre publicerade undersökningar på området. Återstuds beteendet hos makrosyntetiska polymerfibrer och stålfibrer studerades i fälttester såväl som i laboratorieexperiment Kaufmann m.fl. (2013). Betong sprutades på väldefinierade konstgjorda stenytor och fibrer såväl som återstudsat ballastmaterial samlades in och analyserades. Fiberåterstuds inom 25–44 % observerades, den lägsta nivån för makrosyntetiska fibrer. Slutsatserna anger att fiberdoseringen inte hade någon signifikant inverkan på återstuds men att de observerade nivåerna för återstuds av stålfibrer låg relativt högt. Bland annat jämför man med resultaten från Banthia m.fl. (1994), som genomfört en undersökning där återstuds material samlades upp från golvet i en sprutkammare och jämförts med det materialet som stannade på plats på dess väggar. Stålfiberåterstuds inom 12–18 % redovisas. I en undersökning av optimering av stålfiberdoseringen i våtsprutad betong i en svensk gruva visar fiberdoserna vissa avvikelser från de förväntade (Larsson, 2018). Den genomsnittliga faktiska fiberdoseringen på 20 kg/m<sup>3</sup> var ca 9–21 % högre än specificerat. För prover från en serie med endast 15 kg/m<sup>3</sup> fibrer var dock det verkliga innehållet 6–15 % lägre än förväntat. I sprutbetongen för fältexponeringarna som presenteras av Nordström (2005) tillsattes en relativt hög fibermängd på 75 kg/m<sup>3</sup> stålfibrer. En kontrollmätning av sprickytan på slumpmässigt utvalda prover från fältexponeringstesterna påvisade dock att fibermängden i de sprutade proven endast motsvarade 26 kg/m<sup>3</sup>. Skillnaden kan förklaras med dålig fiberfördelning och/eller kraftig fiberåterstuds vid sprutningen. I en uppföljning av Ansell m.fl. (2016) CT-skannades prov från samma provkroppar vilket påvisade att fiberinnehållet där kan ha varit 33 kg/m<sup>3</sup>. Här är det möjligt att fiberförluster vid blandning och transport kan ha samverkat med en hög grad av återstuds.

## 2.5 Sammanställning av tidigare resultat

Här i Tabell 1 sammanställs de mätningar av fiberinnehåll vid urlastning av betong för sprutning som gjordes av Oustampasidis (2019), se avsnitt 2.1. De tre olika metoderna för fiberinblandning var (1) direkt i den centrala anläggningen, (2) i betongbilen efter att betongen fyllts i och (3) i betongbilen samtidigt som att betongen fylldes i. Tidsangivelserna "Början", "Mitt" och "Slut" är tre tidpunkter under betongbilens lossning av sprutbetongen över till betongsprutningsutrustningen. Bestämd fibermängd jämförs med observationerna och med kravgränserna enligt SS-EN 206 (2013). Tabellen påvisar att fiberförlusterna kan vara i storleksordningen 10 % innan sprutningen påbörjas, och att de krav som ställs här tillåter förluster/avvikelse/variationer ned till 80 % för enstaka prov. Resultat med stålfiber Dramix 3D har medtagits.

De resultat för observerade och uppmätta mängder återstudsande stålfibrer som anges i de referenser som återges i avsnitt 2.2–2.4 sammanfattas och jämförs i Tabell 2. För



jämförelse visas här resultat för både torrsprutad och våtsprutad betong. Huvudanledningen är att relativt få referenser för våtsprutad betong har kunnat hittats vid litteratursökningen. För resultaten har angetts om sprutningen har skett i fält, det vill säga i tunnelmiljö, eller i betonglaboratorium. Årtalet för respektive mätning och undersökning anges också eftersom det bör vara så att betongsprutningstekniken utvecklas och förbättras med tiden.

**Tabell 1.** Observerade avvikelser i stålfiberinnehåll vid blandning, hantering och urlastning av sprutbetong. Från (Oustampasidis, 2019).

*Table 1. Observed deviations in steel fibre contents during mixing, handling and unloading of shotcrete. From (Oustampasidis, 2019).*

Metod	Beställt	Början	Mitt	Slut	SS-EN 206 (2013)
1	60 kg/m <sup>3</sup>	56 kg/m <sup>3</sup>	52 kg/m <sup>3</sup>	53 kg/m <sup>3</sup>	51 kg/m <sup>3</sup>
1	60 kg/m <sup>3</sup>	55 kg/m <sup>3</sup>	58 kg/m <sup>3</sup>	61 kg/m <sup>3</sup>	51 kg/m <sup>3</sup>
1	53 kg/m <sup>3</sup>	47 kg/m <sup>3</sup>	49 kg/m <sup>3</sup>	52 kg/m <sup>3</sup>	45 kg/m <sup>3</sup>
<b>1 - Medelvärden</b>		<b>91 %</b>	<b>91 %</b>	<b>96 %</b>	<b>85% (minimigräns)</b>
2	55 kg/m <sup>3</sup>	53 kg/m <sup>3</sup>	53 kg/m <sup>3</sup>	52 kg/m <sup>3</sup>	47 kg/m <sup>3</sup>
2	57 kg/m <sup>3</sup>	56 kg/m <sup>3</sup>	54 kg/m <sup>3</sup>	51 kg/m <sup>3</sup>	48 kg/m <sup>3</sup>
<b>2 - Medelvärden</b>		<b>97 %</b>	<b>97 %</b>	<b>92 %</b>	<b>85% (minimigräns)</b>
3	55 kg/m <sup>3</sup>	58 kg/m <sup>3</sup>	56 kg/m <sup>3</sup>	51 kg/m <sup>3</sup>	47 kg/m <sup>3</sup>
3	55 kg/m <sup>3</sup>	61 kg/m <sup>3</sup>	55 kg/m <sup>3</sup>	55 kg/m <sup>3</sup>	47 kg/m <sup>3</sup>
3	55 kg/m <sup>3</sup>	63 kg/m <sup>3</sup>	54 kg/m <sup>3</sup>	54 kg/m <sup>3</sup>	47 kg/m <sup>3</sup>
<b>3 - Medelvärden</b>		<b>110 %</b>	<b>100 %</b>	<b>97 %</b>	<b>85% (minimigräns)</b>

**Tabell 2.** Exempel på observerad återstuds av stålfibrer vid betongsprutning.  
*Table 2. Observed amounts of steel fibre rebound during shotcreting.*

Återstuds	Sprutmetod	Miljö	Årtal	Referens
10-40 %	Våtsprutad	Fält och labb	1994	Kobayashi (1983)
12-18%	Våtsprutad	Labb	1994	Banthia m.fl. (1994)
65%	Våtsprutad	Labb	2005	Nordström (2005)
25-44 %	Våtsprutad	Fält och labb	2013	Kaufmann m.fl. (2013)
15%	Våtsprutad	Fält	2018	Larsson (2018)
50-80 %	Torrspnutad	Fält och labb	1983	Kobayashi (1983)
35-78 %	Torrspnutad	Fält	1992	Banthia m.fl. (1992)
30-79%	Torrspnutad	Fält	1997	Austin m.fl. (1997)
70-80 %	Torrspnutad	Labb	2007	Armelin & Banthia (2007)

### 3. FIBERORIENTERING

Tillsats av fibrer påverkar inte betongens tryckhållfasthet nämnvärt. Dock kan praktiska problem vid mycket höga fiberhalter leda till svårigheter att gjuta eller spruta fiberbetongen och ge en minskning i hållfasthet (Holmgren & Silfwerbrand, 2017). För de flesta praktiska tillämpningar kan dock antas att fiberinnehållet inte påverkar tryckhållfastheten. Följaktligen kan hållfasthetsvärden representativa för normalbetong användas som dimensioneringsvärden för fiberbetong, så länge betongblandningen är densamma med undantag för fiberinnehållet. Böjdraghållfasthet är den primära hållfastheten för fiberbetong. I många applikationer, som i sprutbetong för bergförstärkning, är det också den hållfasthet som används vid design. I Sverige är det vanligaste sättet att prova bärformågan i sprucket tillstånd böjprovning av balkar (Nordström & Holmgren, 2009). Det ger ett mått på den så kallade residualhållfastheten, vilket ger ett ungefärligt mått på fiberbetongens "restbärformåga" eller "seghet" när balken är sprucken och fibrerna förväntas fortsätta bära last. Denna beror till stor del på fibrernas fördelning och orientering i betongen.

#### 3.1 Dimensionering av fiberbetongkonstruktioner

Anvisningar för dimensionering av fiberbetongkonstruktioner ges i den svenska standarden SS 812310 (2014). Residualböjdraghållfastheten för fiberbetong betecknas med residualböjdraghållfasthetsklasser, (R-klasser) som hänförs till de karakteristiska residualböjdraghållfastheterna  $f_{R,i}$ , bestämda från balkprovning vid en ålder av 28 dagar enligt SS-EN 14651 (2007), se vidare avsnitt 4.1. De fyra klasserna R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> och R<sub>4</sub> motsvarar den böjdraghållfasthet som vid provning uppmäts vid en sprickvidgning på 0,5; 1,5; 2,5 och 3,5 mm. För respektive klass anges sex nivåer på hållfastheten (1,0; 2,0; ... 6,0 MPa), så som visas i Tabell 3.

**Tabell 3.** Residualböjdraghållfasthetsklasser (R-klasser) för fiberbetong enligt SS-EN 812310 (2014).

*Table 3. Residual flexural tensile strength classes (R-classes) for fibre concrete according to SS 812310 (2014).*

Class R <sub>1</sub>	$f_{R,1}$ (MPa)	Class R <sub>2</sub>	$f_{R,2}$ (MPa)	Class R <sub>3</sub>	$f_{R,3}$ (MPa)	Class R <sub>4</sub>	$f_{R,4}$ (MPa)
R <sub>1</sub> 1	1,0	R <sub>2</sub> 1	1,0	R <sub>3</sub> 1	1,0	R <sub>4</sub> 1	1,0
R <sub>1</sub> 2	2,0	R <sub>2</sub> 2	2,0	R <sub>3</sub> 2	2,0	R <sub>4</sub> 2	2,0
R <sub>1</sub> 3	3,0	R <sub>2</sub> 3	3,0	R <sub>3</sub> 3	3,0	R <sub>4</sub> 3	3,0
R <sub>1</sub> 4	4,0	R <sub>2</sub> 4	4,0	R <sub>3</sub> 4	4,0	R <sub>4</sub> 4	4,0
R <sub>1</sub> 5	5,0	R <sub>2</sub> 5	5,0	R <sub>3</sub> 5	5,0	R <sub>4</sub> 5	5,0
R <sub>1</sub> 6	6,0	R <sub>2</sub> 6	6,0	R <sub>3</sub> 6	6,0	R <sub>4</sub> 6	6,0

Ett exempel på hur en fiberbetong ska benämnas ges i SS 812310 (2014), som:

**C30/37-R13/R32**

vilket i detta fall betecknar en betong med tryckhållfastheten 30 MPa (cylinder) eller 37 MPa (kub) och med residualböjdraghållfasthet på 3,0 MPa och 2,0 MPa i klasserna R<sub>1</sub> and R<sub>3</sub>. För dimensionering i bruksgränstillstånd (*Serviceability Limit State*, SLS) behöver endast klass R<sub>1</sub> anges medan för brottgränstillståndet (*Ultimate Limit State*, ULS) krävs att båda klasserna (R<sub>1</sub> och R<sub>3</sub>) är specificerade. Ett förenklat antagande för ULS kan dock baseras på enbart klass R<sub>3</sub> (se vidare kommande avsnitt 4.2).

Den särskilda standarden för böjprovning av sprutbetong, SS-EN 14488-3 (2023), anger två alternativa provningsmetoder, vilka här beskrivs i avsnitt 4.1. För den första metoden (Metod A), som bygger på böjprovning av balkar, anges att resultaten ska redovisas för de deformationsklasser, låg, normal, hög – D1, D2, D3 – enligt SS-EN 14487-1 (2022), standarden för definitioner, specifikationer och kriterier gällande sprutbetong, se Tabell 4. Enligt SS-EN 14488-3 (2023) motsvarar de draghållfasthetsklasserna  $f_{r1}$ ,  $f_{r2}$  och  $f_{r4}$ . Enligt klassificeringen benämns sprutbetong till exempel med **D2S3**, vilket betyder att residualdraghållfastheten ska överskrida 3 MPa inom i 0,5–2,0 mm deformation.

**Tabell 4.** Definition av residualhållfasthetsklasser. Från EN 14487-1 (2022).

*Table 4. Definitions of residual strength classes. From EN 14487-1 (2022).*

Deformation range		Strength level (minimum strength, MPa)			
	Deflection mm	S1	S2	S3	S4
D1	0,5 to 1	1	2	3	4
D2	0,5 to 2				
D3	0,5 to 4				

**Tabell 5.** Definition av duktilitetsklasser. Från SS-EN 14487-1 (2022).

*Table 5. Definitions of class of ductility. From SS-EN 14487-1 (2022).*

Class of ductility	Ductility requirement	Crack control requirement
Class 1	$f_{R_{s3k}}/f_{R_{s1k}} > 0,5$	$f_{R_{s1k}}/f_{L_{g,k}} > 0,4$
Class 2	$f_{R_{s3k}}/f_{R_{s1k}} > 0,7$	$f_{R_{s1k}}/f_{L_{g,k}} > 0,5$
Class 3	$f_{R_{s3k}}/f_{R_{s1k}} > 0,9$	$f_{R_{s1k}}/f_{L_{g,k}} > 0,6$

Den andra metoden (Metod B) som anvisas i SS-EN 14488-3 (2023) är baserad på provning av sprutbetongplattor försedda med en notch. Plattorna är anpassade för att ge resultat jämförbara med de som fås från provning av motsvarande fiberbetong i gjutna balkar enligt SS-EN 14651 (2007). I den övergripande standarden SS-EN 14487-1 (2022) anges att dessa resultat kan anges i form av duktilitetsklass, se Tabell 5.

Dimensioneringsberäkning av de flesta typer av fiberbetongkonstruktioner baseras dock på ren draghållfasthet (Holmgren & Silfwerbrand, 2017). För att erhålla dimensioneringsvärden måste de karakteristiska residualböjdraghållfastheterna  $f_{R,i}$  först överföras till karakteristiska residualdraghållfastheter  $f_{ft,R,i}$  enligt:

$$f_{ft,R1} = 0,45 \cdot f_{R,1} \quad (3.1)$$

$$f_{ft,R3} = 0,37 \cdot f_{R,3} \quad (3.2)$$

Detta ska sedan följas av en omräkning till dimensionerande residualdraghållfastheter  $f_{ftd,R,i}$  genom multiplikation och division med partialkoefficienter, som beskriver risken för att det verkliga värdet avviker ogynnsamt från det antagna karakteristiska värdet (SS 812310:2014). För SLS anges följande samband:

$$f_{ftd,R1} = \eta_f \cdot \frac{f_{ft,R1}}{\gamma_f} \quad (3.3)$$

där  $\gamma_f$  är partialkoefficient för materialet fiberbetong, som sätts till  $\gamma_f = 1,0$  i SLS, och där  $\eta_f$  är en faktor som tar hänsyn till fiberorientering (se nedan). Vid dimensionering för ULS görs omräkningen med:

$$f_{ftd,R1} = \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot \frac{f_{ft,R1}}{\gamma_f} \quad (3.4)$$

$$f_{ftd,R3} = \eta_f \cdot \eta_{det} \cdot \frac{f_{ft,R3}}{\gamma_f} \quad (3.5)$$

I detta fall sätts  $\gamma_f = 1,2$  för olyckslaster och  $\gamma_f = 1,5$  övriga permanenta och variabla laster. Här finns också en faktor  $\eta_{det}$  som beaktar graden av statistisk bestämdhet. För statistiskt bestämda balkar sätts denna till  $\eta_{det} = 1,0$ .

Fiberorienteringsfaktorn beaktar fördelningen av fibrernas orientering och kan enligt SS 812310 (2014) väljas inom  $0,5 \leq \eta_f \leq 1,0$ , beroende på konstruktionens dimensioner, fiberlängd och gjutmetod. För horisontellt gjutna konstruktionsdelar med bredden  $> 5 \times$  tjockleken anges att  $\eta_f = 1,0$  kan väljas.

### 3.2 Fiberorienteringsfaktorer

En fibereffektivitetsfaktor kan relateras till det totala antalet fibrer som korsar en spricka i en till brott belastad betongprovkropp (Löfgren, 2006). Denna kan bestämmas genom att räkna det totala antalet fibrer som korsar brottytorna och sedan dividera den relativa tvärsnittsarean stål/betong med volymandelen fibrer i betongen. Motsvarande faktor kan

beräknas för en osprucken betongvolym genom att göra ett sågsnitt skapa ett observationsplan genom till exempel en balk eller en cylinder. Faktorn bör då benämnas riktningfaktor (Grimheden, 2003) eller fiberorienteringsfaktor (Dupont & Vandewalle, 2006; Svec m.fl., 2014) och betecknas här i det följande med  $\eta_s$  där S:et avser att faktorn gäller för ett plant sågsnitt. Faktorn beräknas som kvoten mellan armeringsinnehållet  $\rho_s$  ( $m^2/m^2$ ), som bestäms genom att räkna antalet avskurna fibrer i den sågade plana ytan, och som volymandelen  $v_f$  ( $m^3/m^3$ ) fibrer i betongvolymen. Faktorn och i sambandet ingående storheter kan presenteras med olika beteckningar och uppställningar, se till exempel Grimheden (2003), Dupont & Vandewalle (2006), Svec (2014) och Lorente m.fl. (2022), dock med samma betydelse vilket sammanfattas här:

$$\eta_s = \frac{\rho_s}{v_f} = \frac{n \cdot A_f}{A_c} / \frac{V_f}{V_c} = \frac{n \cdot \pi \phi^2}{4A_c} / \frac{V_f}{V_c} \quad (3.6)$$

Här betecknar  $n$  antalet fibrer i snittet,  $\phi$  diametern hos en fiber,  $A_f$  tvärsnittsarean av en fiber,  $A_c$  betongsnittets area,  $V_c$  totala betongvolymen och  $V_f$  volymen av alla fibrer i den betongvolymen.

Fiberorienteringsfaktorer kan också beräknas som medelvärden för en betongvolym och relaterat till en förbestämd riktningssaxel (Lorente m.fl., 2022). För en betongprovkropp beskriven i ett 3D-koordinatsystem kan således en faktor relativt respektive x, y och z-axel beräknas. Fiberorienteringsfaktorn betecknas här med  $\eta_j$  där alltså j-axeln kan ansättas som  $j = x, y, z$  och beräknas som medelprojektion av enhetsvektorn för fibrerna i en förutbestämd riktning, enligt:

$$\eta_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_{ij} \quad (3.7)$$

Här är  $n$  totala antalet fibrer i betongvolymen och  $\theta_{ij}$  vinkeln mellan fiber  $i$  och axeln  $j$ , där vinkeln sätts in som positiv och varierande mellan 0 och 90°.

Ett exempel på hur fiberorienteringsfaktorn  $\eta$  kan variera och påverkas av randvillkor så som undergrund och formsidor ges av Dupont & Vandewalle (2006), och återges här i Figur 10. En sektion av en betongbalk visas, och denna har indelats i zoner beroende på inverkan från formsidorna. Noteras bör att plattans övre yta efter gjutningen har jämnats av så att inga fibrer sticker ut. I figuren är  $b$  och  $h$  balksektionens bredd och höjd, medan  $l_f$  står för fiberlängden. Fiberorienteringen i zon 1 påverkas inte alls av rand-villkoren, zon 2 påverkas endast av en sida av formen medan zon 3 påverkas av två formsidor.

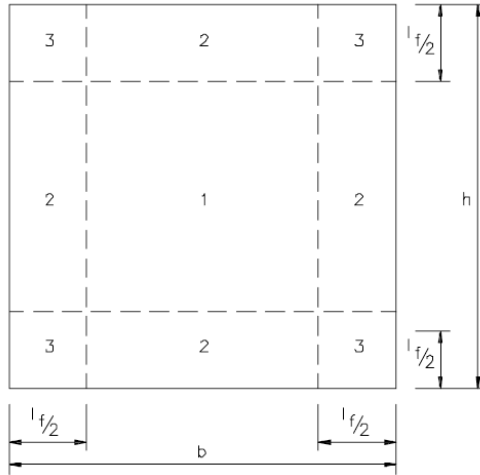
Om  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  och  $\eta_3$  är fiberorienteringsfaktorerna för tvärsnittets zon 1, 2, 3, vilka motsvarar volymdelar av balken, så kan den totala orienteringsfaktorn  $\eta$  för balken beräknas genom att ta det geometriska medelvärdet över tvärsektionen, enligt:

$$\eta = [\eta_1(b - l_f)(h - l_f) + \eta_2((b - l_f)l_f + (h - l_f)l_f) + \eta_3 l_f^2] / bh \quad (3.8)$$

En fiber i zon 1 påverkas inte av någon formsida och kan därmed rotera fritt runt sin tyngdpunkt. Baserat på detta visar Dupont & Vandewalle (2006) att om alla möjliga

orienteringar av fibern beaktas så beskriver fiberns ändpunkter ytan på en sfär, så som visas i Figur 11. Varje punkt på sfären har lika stor sannolikhet att vara fiberns ändpunkt. Detta innebär att sannolikheten att fibern bildar en vinkel  $\theta$  med längdaxeln är proportionell mot arean:

$$dA = \frac{1}{2} \pi l_f^2 \cdot \sin \theta \, d\theta \quad (3.9)$$



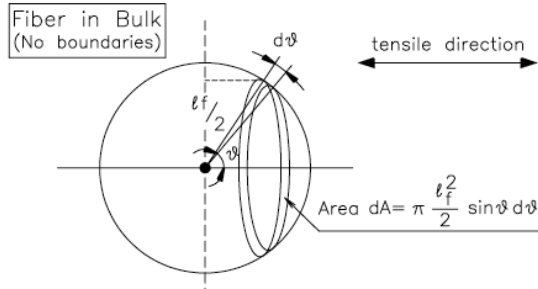
**Figur 10.** Tvärsnitt  $b \times h$  av en fiberbetongbalk indelad i tre olika typer av fiberorienteringszoner. Från Dupont & Vandewalle (2005).

*Figur 10. Cross-section  $b \times h$  of a fibre concrete beam divided in three different orientation zones. From Dupont & Vandewalle (2005).*

Bidraget av arean  $dA$  till orienteringsfaktorn är då  $\cos \theta \, dA$  (jämför med Ekv. 3.7). Om detta integreras över halva sfären och sedan divideras med dess yta fås:

$$\eta_1 = \frac{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \, dA}{2\pi(l_f/2)^2} = \frac{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot \frac{1}{2} \pi l_f^2 \cdot \sin \theta \, d\theta}{2\pi(l_f/2)^2} = \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta \, d\theta = 0,5$$

Detta värde på  $\eta$  motsvarar också fibereffektivitetsfaktorn vid en 3D fiberorientering (Löfgren, 2006; Grimheden, 2003), det vill säga då fibrerna fördelas helt jämnt i den ostörda volymen. Om fibrerna däremot ligger helt orienterade i dragriktningen, orienterade i 1D, går det att visa att  $\eta = 1,0$ . Detta ska jämföras med de två gränsvärdena som ges i dimensioneringsstandarden SS 812310 (2014) (se här avsnitt 3.1). Vid en 2D fiberorientering, det vill säga med fibrerna jämnt fördelade i ett plan, blir motsvarande  $\eta = 2/\pi \approx 0,64$  (Löfgren, 2006).



**Figur 11.** En fiber i en ostörd betongvolym. Från Dupont & Vandewalle (2005).  
*Figure 11. A fibre in a concrete bulk volume. From Dupont & Vandewalle (2005).*

Uttryck för fiberfördelning i olika riktningar som en kombination av dess tre ideella fall visas av Grimheden (2003). Här antas att om fibrerna i x-riktningen är 1D orienterade och fibrerna i xy-planet 2D planorienterade så kan resterande fibrer därmed antas vara 3D orienterade. Här ansätts att  $\beta$  är andel fibrer som är orienterade i längdriktningen x och  $\omega$  andel fibrer orienterade i horisontalplanet xy, vilket ger fördelningarna som visas i Figur 12. Här ska noteras att  $v$  är volymandelen fibrer och att fiberandelen här noteras  $\rho = \eta v$ . Utifrån Ekv. (3.6) kan sedan fiberorienteringsfaktorer för planen vinkelräta mot x, y, z beräknas, enligt:

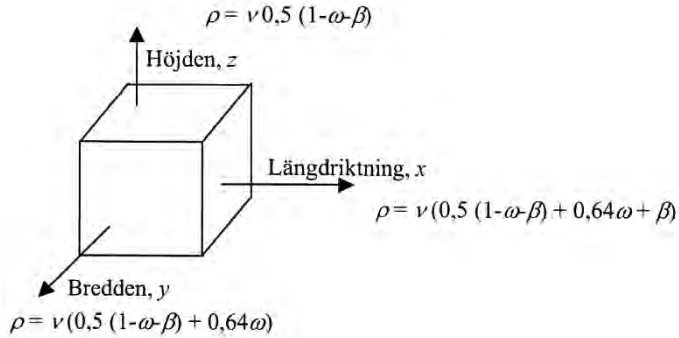
$$\eta_x = 0,50 + 0,14\omega + 0,5\beta \quad (3.10)$$

$$\eta_y = 0,50 + 0,14\omega - 0,5\beta \quad (3.11)$$

$$\eta_z = 0,50 - 0,50\omega - 0,5\beta \quad (3.12)$$

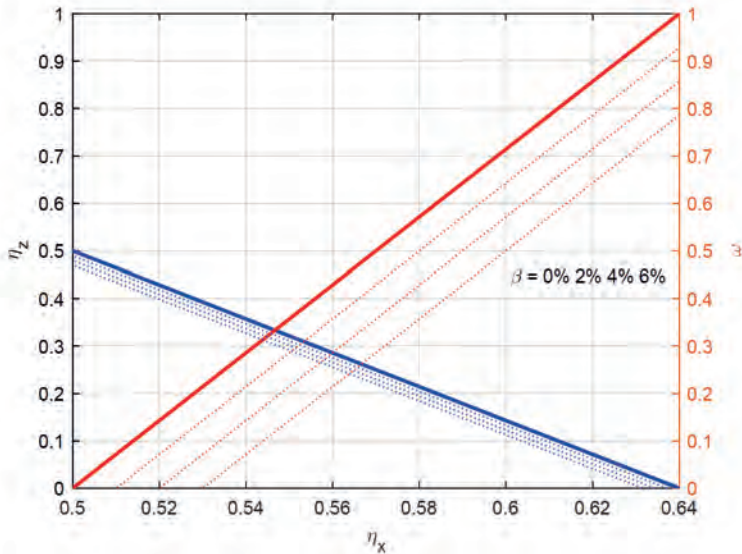
Det bör dock noteras att de grundläggande antagandena, att delar av den totala fibermängden kan indelas i andelarna  $\beta$ ,  $\omega$  och  $(1-\beta-\omega)$ , leder till en approximativ idealiserad bild av fiberfördelningen. I en verklig fiberbetongvolym finns det troligen endast enstaka fibrer som exakt ligger i horisontalplanet xy eller exakt i x-axelns riktning. Den strikta gränsdragning som antagandena innebär begränsar ekvationernas praktiska giltighetsområde till  $0,50 \leq \eta_x \leq 0,64$ . Under antagandet att  $\beta = 0$ , det vill säga att  $\eta_x = \eta_y$ , demonstreras detta i Figur 13, där  $\omega$  ökar samtidigt med en minskning i  $\eta_z$ , från ett 3D fall tills ett rent 2D tillstånd nås för  $\eta_x = \eta_y = 0,64$  och  $\eta_z = 0$ . Beräkningsmodellen beaktar på detta sätt ej att vissa fibrer med 2D orientering också bidrar till 3D, det vill säga att högre värden än 0,64 kan nås för  $\eta_x$  och  $\eta_y$  samtidigt som  $\eta_z \neq 0$ . Det ska noteras att teoretiskt gäller här att  $\omega + \beta \leq 1,0$ . Figuren visar också att små variationer i  $\beta$  har liten total inverkan. Resultaten ska ses som approximativa men kan användas för en avstämning av relationerna mellan  $\eta_x$ ,  $\eta_y$  och  $\eta_z$  i en 3D fiberbetongvolym.





**Figur 12.** Fiberandelarna  $\rho = \eta v$  av fiberinnehållet  $v$  i en 3D betongvolym med fiberandelar  $\beta$  och  $\omega$  i längsled  $x$  respektive horisontalplanet  $xy$ . Från Grimheden (2003).

Figure 12. Fibre proportions  $\rho = \eta v$  of the total content  $v$  in a 3D concrete volume with parts  $\beta$  and  $\omega$  in the  $x$ -direction and horizontal  $xy$ -plane. From Grimheden (2003).

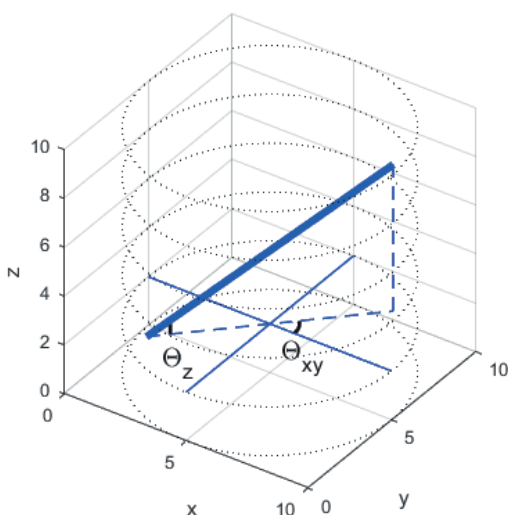


**Figur 13.** Samband mellan fiberorienteringsfaktorerna  $\eta_x$  och  $\eta_z$  samt  $\omega$ , andelen 2D orienterade fibrer, enligt Ekv. (3.10-3.12). Även variation med  $\beta$  visas.

Figure 13. Connection between the fibre orientation factors  $\eta_x$  and  $\eta_z$  and  $\omega$ , the part of fibres in 2D, according to Eqs. (3.10-3.12). Also, the variation with  $\beta$  is shown.

### 3.3 Fibrer i tvärsnitt av provcylinder

För att kunna beskriva fibrernas orientering i en 3D betongvolym används två lutningsvinklar (se Ansell, 2021), så som här definieras i Figur 14. Det antas att z-axeln följer en provcylinders längdaxel. Fibrens lutning relativt horisontalplanet är  $\theta_z$  ges inom intervallet  $0^\circ$  till  $90^\circ$ , det vill säga med minsta vinkeln mot horisontalplanet. Fibrens orientering i horisontalplanet ges av  $\theta_{xy}$  som också den definieras inom  $0^\circ$  till  $90^\circ$ . Således ges orienteringen av den minsta vinkel mellan fibrerns horisontalprojektion och x-axeln, här definierad som horisontalaxeln i de 2D tvärsnittsbilder som kommer från CT-skanningen, se Figur 4.



**Figur 14.** Definition av en fibrers lutning  $\theta_{xy}$  relativt horisontalplanet och  $\theta_z$  relativt vertikalaxeln. Från Ansell (2021).

*Figure 14. Definition the fibre inclination  $\theta_{xy}$  versus the horizontal plane and  $\theta_z$  versus the vertical axis. From Ansell (2021).*

Orienteringsfaktorer  $\eta_x$ ,  $\eta_y$  och  $\eta_z$  som representativa medelvärden för en hel betongvolym kan beräknas med Ekv. (3.7). För en provcylinder av sprutbetong fås dessa här direkt från de redovisade fiberlutningarna, så som visas i exemplet i Figur 31 (se också motsvarande figurer i bilagan). Varje vertikalt streck i delfigurerna till vänster och i mitten representerar respektive lutningsvinkel för en fiber. Utifrån definitionen av fiberinklarna i Figur 14 ger då en summering av alla identifierade fibrer  $i=1, 2, \dots, n$  enligt Ekv. (3.7) följande:

$$\eta_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos\theta_{xyi} \quad (3.13)$$

$$\eta_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (90^\circ - \cos\theta_{xyi}) \quad (3.14)$$

$$\eta_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos\theta_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (90^\circ - \cos\theta_{zi}) \quad (3.15)$$

De samband som ges av Ekv. (3.6) kan användas för att beräkna fiberorienteringsfaktorer för valda snitt i samma provcylinder. I avsnitt 6.1 och i bilagan redovisas, tillsammans med  $\eta_x$ ,  $\eta_y$  och  $\eta_z$  enligt ovan, också faktorerna  $\eta_{Sx}$ ,  $\eta_{Sy}$  och  $\eta_{Sz}$ . Dessa beräknas utifrån antalet  $n_x$ ,  $n_y$  och  $n_z$  fibrer som skär mittsnitten  $S_x$ ,  $S_y$  och  $S_z$ . Snittet  $S_x$  är rektangulärt och ortogonalt mot x-axeln och har dimensionen  $\Phi \times H$ , där  $\Phi$  är cylinderns diameter och  $H$  dess höjd. Snittytan  $S_y$  har samma dimensioner men är ortogonal mot y-axeln. Snittet  $S_z$  är horisontellt orienterat och cylindriskt med diametern  $\Phi$  och placerat på cylinderhöjden  $H/2$  från basen. Ett exempel på fördelning av de fibrer som skär dessa tre snitt ges i Figur 32 (se även bilagan). Utifrån Ekv. (3.6) fås följande tre uttryck för faktorerna:

$$\eta_{Sx} = (n_x \pi \phi^2 / 4\Phi H) / v_f \quad (3.16)$$

$$\eta_{Sy} = (n_y \pi \phi^2 / 4\Phi H) / v_f \quad (3.17)$$

$$\eta_{Sz} = (n_z \phi^2 / \Phi H) / v_f \quad (3.18)$$

### 3.4 Exempel på fiberorientering

Exempel på observerad fiberorientering i sprutbetong ges av Castellón m.fl. (2022) som redovisar försök med böjprovade, sprutade betongbalkar. I tunnelmiljö och dels i laboratorium sprutades  $150 \times 150 \times 1600 \text{ mm}^3$  balkar som provades enligt SS-EN 14651 (2007). Över böjbrottens tvärsnittsytor på  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  räknades antalet skärande fibrer och orienteringsfaktorer över brottytorna beräknades i enlighet med Ekv. (3.6). Dock förefaller det som att den volymandel fibrer  $v$  som använts vid beräkningen är betongmixens teoretiska fiberinnehåll, utan beaktande av fiberförluster och återstuds vid sprutningen. Som en konsekvens är de redovisade fördelningsfaktorerna låga, inom intervallet  $0,29 \leq \eta \leq 0,49$  för de två fiberinnehållen på 30 och  $50 \text{ kg/m}^3$  som redovisas. Det ska noteras att dessa värden ligger under 0,5 som gäller för full 3D orientering av fiber vilket ges som minimivärde enligt SS 812310 (2014), se avsnitt 3.1. Motsvarande faktorer för syntetfibrer (Polyolefin fibrer  $7\text{--}10 \text{ kg/m}^3$ ) som redovisas är  $0,43 \leq \eta \leq 0,65$ . Resultaten för stålfibrer sammanfattas i Tabell 6 där också omräknade faktorer

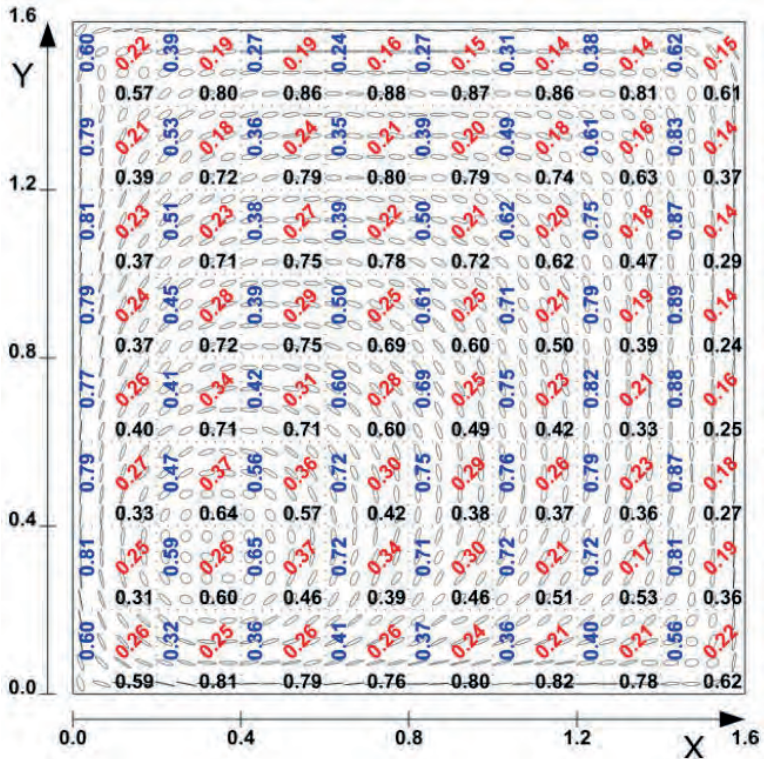
motsvarande 20 % och 30 % fiberförlust också ges (se avsnitt 2.5). Resultaten kommenteras av Castellón m.fl. (2022) med att ju högre halten av stålfibrer var, desto större blev skillnaden i orienteringsfaktor mellan de i laboratorium och i tunnel sprutade provbalkarna, där de förstnämnda genomgående uppvisar högre värden på  $\eta$ . Laboratorie-balkarnas brottytor visar bättre homogenitet och fördelning av fibrer medan de i tunnel sprutade balkarna uppvisar ansamling av fibrer i planet vinkelrätt sprutriktningen, det vill säga längs formens botten.

**Tabell 6.** Orienteringsfaktorer för böjprovade sprutbetongbalkar. Relativt teoretiskt fiberinnehåll i betongmixen, från Castellón m.fl. (2022) och med antagna fiberförluster.

*Table 6. Fibre orientation factors for shotcrete beams tested in flexure. Corresponding to theoretical fibre content in the concrete mix, from Castellón et al. (2022), and with assumed fibre losses.*

Provbalk från	Stålfiberinnehåll	$\eta$ med antagen fiberförlust		
		0 %	20 %	30 %
Fält	30 kg/m <sup>3</sup>	0,35	0,44	0,50
Laboratorium	30 kg/m <sup>3</sup>	0,38	0,48	0,54
Fält	50 kg/m <sup>3</sup>	0,35	0,44	0,50
Laboratorium	50 kg/m <sup>3</sup>	0,42	0,53	0,60

Ett för jämförelse intressant exempel på hur stålfibrer kan fördela sig över en gjuten fiberbetongplatta redovisas av Svec m.fl. (2014). Gjutningen av plattan med måtten 1,6×1,6×0,15 m<sup>3</sup> simulerades med numeriska beräkningar. Plattan göts genom att stålfiberarmerad självkompakterande betong påfördes vid ett avstånd av 0,3 m från ett av plattans hörn. Den självkompakterande betongen modellerades som ett fritt ytflöde av homogen Bingham-vätska där de ingående stålfibrerna vardera lades till som tunna styva cylindrar. Från resultaten av den numeriska simuleringen beräknades ett medelvärde av position och orientering för varje enskild fiber vilket sammanställdes till den översikt som visas i Figur 15. Fiberorienteringsfaktorer beräknades i plan vinkelräta mot X-, Y- och Z-riktningen, vardera motsvarande medelvärdet av 50 faktorer från sektioner jämnt fördelade i ett område med dimensionerna 200×200×150 mm<sup>2</sup> (X, Y, Z).



**Figur 15.** Fiberorienteringsfaktorer i tvärsriktningen till X (svart), Y (blått) and Z (rött) axlarna för en fiberbetongplatta. Från Svec m.fl. (2014).

*Figure 15. Fibre orientation factors in the cross-direction to the X (black), Y (blue) and Z (red) axes of a fibre concrete slab. From Svec et.al. (2014).*

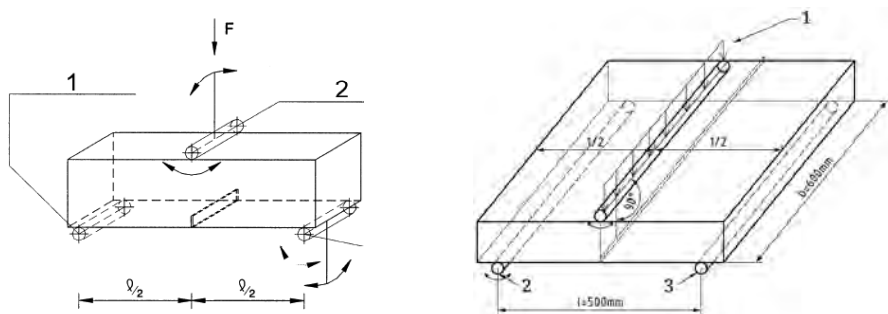


## 4. BÖJPROVNING OCH RESIDUALHÅLLFASTHET

De residualhållfastheter som används vid dimensionering uttrycker vad som uppmäts med standardiserade metoder för böjprovning. Här beskrivs och sammanfattas de viktigaste provningsmetoderna och hur dimensioneringsreglerna för sprutbetongkonstruktioner kan användas. Detta ligger till grund för en utvärderingsmetod som tagits fram för att utifrån CT-skannade provcylindrar av sprutbetong kunna uppskatta dess residualhållfasthet.

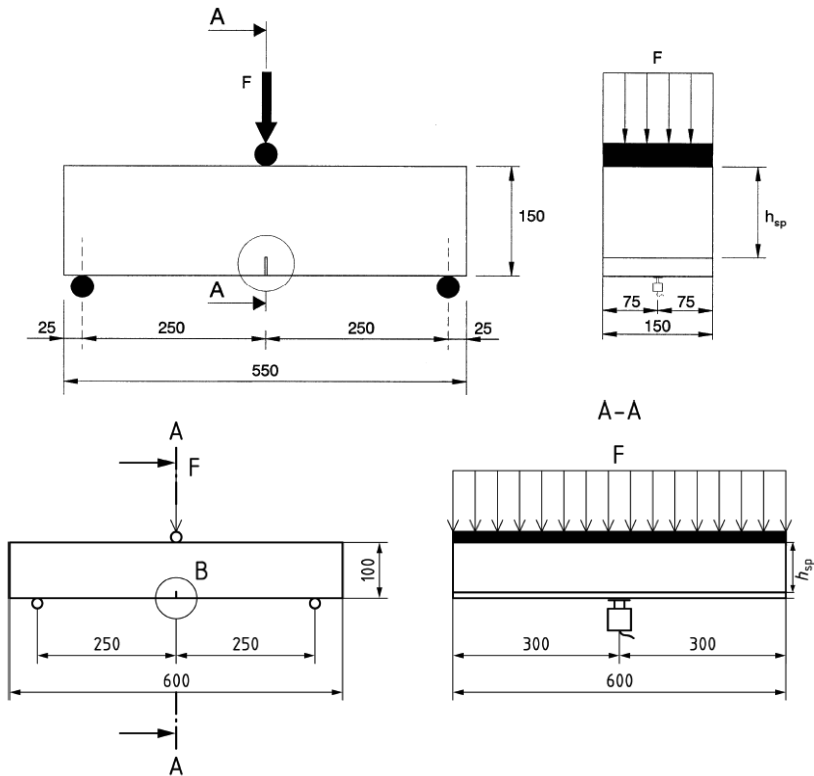
### 4.1 Provning för residualböjdraghållfasthet

Som påvisades i förra kapitlet så ska klassificering av residualböjdraghållfasthet för sprutbetong göras genom specifikation av en hållfasthetsnivå vid ett visst deformationsområde. Detta ska enligt SS-EN 14487-1 (2022) baseras på provning som vanligtvis ska utföras vid 28 dagars ålder. Detta kan göras med fyrpunktsböjning av testbalk (Metod A) eller alternativt med trepunktsböjtest av  $600 \times 600 \times 100 \text{ mm}^3$  fyrkantig platta (Metod B), båda beskrivna i SS-EN 14488-3 (2023). När parametrarna  $f_{R,s,j}$  som representerar karakteristiska residualböjdraghållfastheten för sprutbetong utvärderas utifrån trepunktsböjprov av platta med notch (Metod B) är hållfastheterna (se Tabell 3) också jämförbara med resultat från provning av  $550 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  fiberbetongbalkar i enlighet med SS-EN 14651 (2005). Metod B är således anpassad (se de Rivaz, 2015) för att dessa provningsmetoder ska överensstämja. Att provkroppen för provning av sprutbetong är en platta motiveras av att om sågning av provkroppen inte behöver genomföras så minimeras inverkan av formsidorna vid sprutningen vilket kan störa fiberorienteringen. Om provbalkar sågas ut ur en sprutad platta, med dimensioner enligt standarden för balkprovning, så ska de två provningsstandarderna ge likvärdiga resultat. Det ska noteras att trots att den fria spännvidden 500 mm är densamma för balk och platta så är provkropparnas onotchade höjd  $h_{sp}$  olika, 125 mm för balken och 90 mm för plattan. De två olika provupställningarna jämförs i Figur 16–17.



**Figur 16.** Provkroppar för trepunkts böjprovning – balk enligt SS 14651 (2007) (vä.) och platta enligt SS-EN 14488-3 (2023) (hö.).

*Figure 16. Samples for three-point bending tests – beam according to SS 14651 (2007) (L) and slab to SS-EN 14488-3 (2023) (R).*



**Figur 17.** Jämförelse mellan uppställning för trepunkts böjprovning - balk enligt SS 14651 (2007) (överst) och platta enligt SS-EN 14488-3 (2023) (underst).

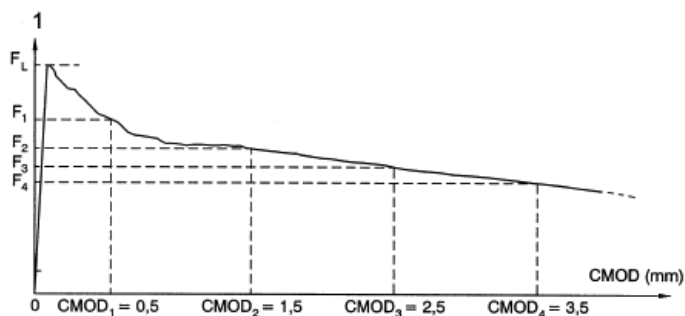
*Figure 17. Comparison between test arrangements three-point bending tests - beam according to SS 14651 (2007) (top) and slab to SS-EN 14488-3 (2023) (bottom).*

Residualböjdraghållfasthetsvärdena bestäms här från förhållandet mellan last och sprickmynningens öppning (CMOD) mätt över skåran, eller från last-avböjningskurvan. Residualböjdraghållfastheterna  $f_{R,j}$  är de resterande böjdraghållfastheterna som motsvarar  $CMOD = CMOD_j$  ( $j = 1,2,3,4$ ), beräknad från belastningarna  $F_j$  som visas i Figur 18. Balken och plattans olika höjder leder till att nedböjningarna  $\delta$  blir annorlunda vid provning av plattan, men att CMOD blir jämförbara mellan balk och platta, se de Rivaz (2015). Relationen mellan CMOD (mm) och nedböjningsdeformation  $\delta$  (mm) kan i SS 14651 (2007) approximeras med:

$$\delta = 0,85 \cdot CMOD + 0,04 \text{ (mm)} \quad (4.1)$$

I provningsstandarden EN 14488-3 (2023) anpassad för sprutbetong ges istället Tabell 7.





**Figur 18.** Last-CMOD kurva med  $F_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ). Från SS-EN 14651 (2007).

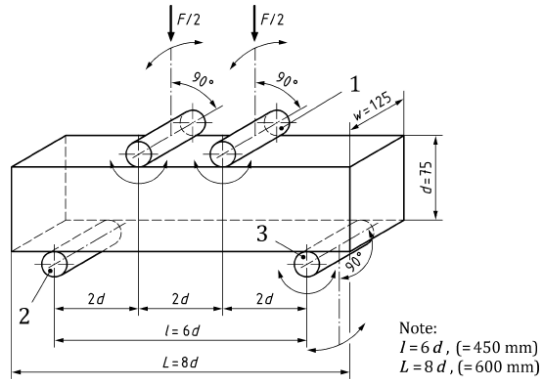
*Figure 18. Load-CMOD diagram with  $F_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ). From SS-EN 14651 (2007).*

**Tabell 7.** Residualböjdraghållfasthet från trepunkts provning av notchad kvadratisk platta. Samband mellan spricköppning och nedböjning. Från SS-EN 14488-3 (2023)

*Tabell 7. Residual flexural tensile strength from three-point bending test of square slab with notch. Relation between crack opening and deflection. From SS-EN 14488-3 (2023).*

LOP/ Residual flexural strength	CMOD (in mm)	Deflection $\delta$ (in mm)
$f_{ct,L}$	0,05	0,063
$f_{R,1s}$	0,5	0,631
$f_{R,1s}$	1,5	1,894
$f_{R,3s}$	2,5	3,156
$f_{R,4s}$	3,5	4,420

Syftet med de alternativa provningsmetoderna (Metod A och B) i SS-EN 14487-1 (2022) och SS-EN 14488-3 (2023) är att ge konstruktörerna flexibilitet i val av deformationskrav eller duktilitetskrav för sprutbetongen. Uppställningen med fyrapunktsböjprovning av onotchad balk (Metod A) används dessutom oftast eftersom provkropparna är mindre och mer lätthanterliga än plattorna. Uppställningen visas i Figur 19, där det också framgår att totallängden sätts till  $6d=450$  mm. Det ska noteras att i den tidigare gällande versionen av standarden, SS-EN 14488-3 (2006), var balkens längd mellan stöden  $3d$  med balkhöjden  $d = 150$  mm, det vill säga samma balklängd men nu har balkhöjden halverats. Balkbredden ska vara 125 mm och balkarna sågas ur sprutlådor där ytan mot lådans botten vänds nedåt vid provning. Residualböjdraghållfastheterna  $f_{r1}$ ,  $f_{r2}$ ,  $f_{r3}$  och  $f_{r4}$  ska bestämmas utifrån den minsta last som registreras mellan uppmätta nedböjningar inom  $\{0,5 - 1,0$  mm $\}$ ,  $\{0,5 - 2,0$  mm $\}$ ,  $\{0,5 - 3,0$  mm $\}$  och  $\{0,5 - 4,0$  mm $\}$ .

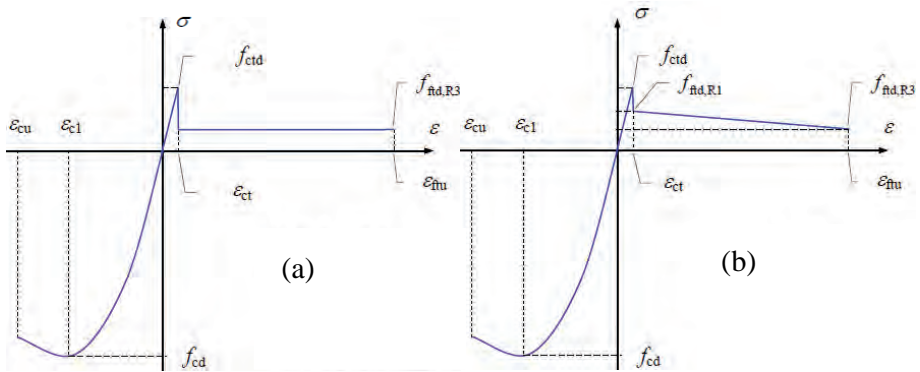


**Figur 19.** Fyrpunkts böjprovning av balk enligt SS-EN 14488-3 (2023).  
*Figure 19.* Four-point beam test according to SS-EN 14488-3 (2023).

## 4.2 Teoretisk dimensionering

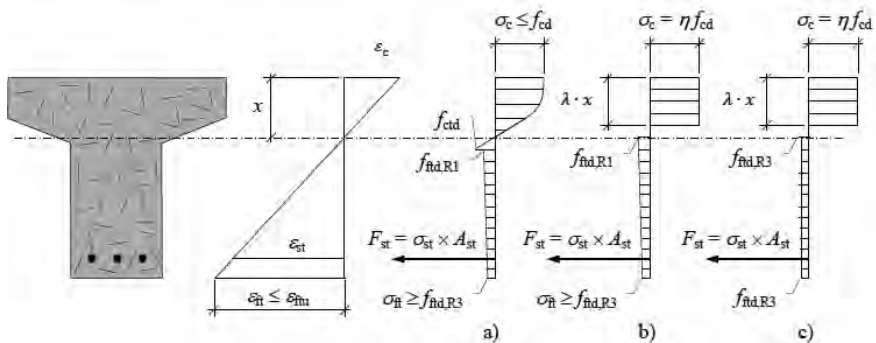
Dimensionering av fiberbetongkonstruktioner kan genomföras enligt SS 812310 (2014). För bestämning av bärförmågan vid böjning hos sprutbetongelement med enbart fiberarmering behöver beräkning i brottgränstillståndet (ULS, *Ultimate Limit State*) göras. Som hållfasthetsparametrar används de residualdraghållfasthet som beskrevs i avsnitt 3.1. Den materialmodell för fiberbetongen som används vid konstruktionsberäkning i ULS kan baseras på två alternativa spänning-töjningsdiagram, se Figur 20(a-b), där designvärdet för draghållfastheten är  $f_{ctd}$ . I det första (a) antas residualdraghållfastheten vara konstant  $f_{ctd,R3}$  medan det andra alternativet (b) är ett multilinjärt diagram. Detta kännetecknas av att residualdraghållfastheten minskar från  $f_{ctd,R1}$  till  $f_{ctd,R3}$  då töjningen  $\epsilon$  ökar.

Då momentbärförmågan för ett fiberarmerat betongtvärsnitt, med eller utan konventionell armering, ska bestämmas antas balk- eller plattvärsnittets töjning variera linjärt över dess höjd, så som visas i Figur 21. Här visas tre olika alternativ för motsvarande spänningsfördelningar, där (a) är den generella fördelningen medan (b) och (c) är approximativa fördelningar giltiga i ULS. Här approximeras betongtryckzonen på vanligt sätt med faktorerna  $\lambda$  och  $\eta$  (OBS! Noterar här ej fiberorienteringsfaktorn) så som specificeras i Eurokod 2, SS-EN 1992-1-1 (2005). Notera att variationerna i residualdraghållfastheten i (b) och (c) motsvarar de i Figur 20 (a) och (b). Om konventionell armering saknas i tvärsnittet sätts  $A_s=0$ . Motsvarande exempel med normalkraft och resultat till dragspänningarna i fiberbetongen ges i Figur 22.



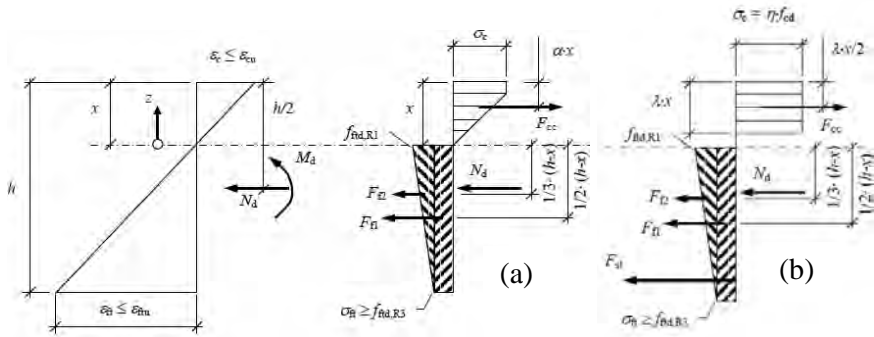
**Figur 20.** Alternativa spänning-töjnings samband för stålfiberbetong. Från SS 812310 (2014).

*Figure 20. Alternative stress-strain relations for steel fibre concrete. From SS 812310 (2014).*



**Figur 21.** Böjbelastat fiberbetongtvärsnitt, med linjärt varierande töjning över höjden och alternativa spänningsfördelningar. Från SS 812310 (2014).

*Figure 21. Fibre concrete cross-section in flexure, with linearly varying stresses over its height and alternative stress distributions. From SS 812310 (2014).*



**Figur 22.** Fiberbetongtvärsnitt belastat av böjande moment och normalkraft samt spänningsfördelningar med och utan konventionell armering. Från SS 812310 (2014).  
*Figure 22. Fibre concrete cross-section loaded by bending moment and normal force, stresses with and without conventional reinforcement. From SS 812310 (2014).*

I dimensioneringsanvisningarna för beräkning i ULS ges en förenklad modell för fiberarmerade tvärsnitt utan konventionell armering, baserat på fallet (a) i Figur 22. Alternativt kan också tryckspänningsfördelningen i (b) användas, men då bör maximala betongtöjningen antas ha nått stukgränsen  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ . Horisontell kraftjämvikt över tvärsnittet då konventionell armering och normalkraft saknas,  $F_{st} = 0$  och  $N_d = 0$ , ger:

$$\rightarrow: F_{cc} = F_{ft1} + F_{ft2} \quad (4.2)$$

där resultanten till tryckspänningarna för fallet (a) är:

$$F_{cc} = b \cdot \int_0^x \sigma_c(z) dx \quad (4.3)$$

och för (b):

$$F_{cc} = \lambda \cdot x \cdot b \cdot \eta \cdot f_{cd} \quad (4.4)$$

Här är  $x$  tryckzonshöjden,  $b$  balkbredden,  $\sigma_c$  betongspänning och  $f_{cd}$  betongens tryckhållfasthet. Om konventionell armering hade medtagits så beräknas dess dragkraftresultant enligt:

$$F_{st} = A_{st} \cdot \sigma_{st} \quad (4.5)$$

där  $A_{st}$  är armeringsarean och  $\sigma_{st}$  armeringsspänningen. Resultanten till den konstanta delen av residualdragspänningen är:

$$F_{ft1} = b \cdot (h - x) \cdot \left( f_{ftd,R1} - \varepsilon_{ft} / \varepsilon_{ftu} \cdot (f_{ftd,R1} - f_{ftd,R3}) \right) \quad (4.6)$$

medan motsvarande för den linjärt varierande delen blir:

$$F_{f2} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \varepsilon_{ft} / \varepsilon_{ftu} \cdot (f_{ftd,R1} - f_{ftd,R3}) \quad (4.7)$$

Det ska noteras att vid maximalt utnyttjad dragtöjning blir  $\varepsilon_{ft} / \varepsilon_{ftu} = 1$ . För fallet (a) beräknas momentkapaciteten enligt:

$$M_{Rd} = F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \alpha) + F_{f1} \cdot \frac{h-x}{2} + F_{f2} \cdot \frac{h-x}{3} \quad (4.8)$$

medan den med antagandet i (b) ges av:

$$M_{Rd} = F_{cc} \cdot x \cdot (1 - \lambda/2) + F_{f1} \cdot \frac{h-x}{2} + F_{f2} \cdot \frac{h-x}{3} \quad (4.9)$$

### 4.3 Modell för utvärdering av provkroppar

För att kunna uppskatta residualhållfastheterna hos en fiberarmerad sprutbetong som har undersökts med CT-skanning har här en beräkningsmodell baserad på SS 812310 (2014) tagits fram. Beräkningarna baseras på de ekvationer som sammanfattas i föregående stycke, vilka används för att utifrån identifierade stålfibrer först beräkna de karakteristiska residualdraghållfastheterna  $f_{ftd,R1}$  och  $f_{ftd,R3}$ . I enlighet med SS 14651 (2007) räknas de sedan om till residualböjdraghållfastheter för att slutligen kunna ge en kvalitetsbenämning på aktuell fibersprutbetong (se avsnitt 3.1).

Till grund för beräkningsmodellen ligger antagandet att undersökt sprutbetongcylinder har tagits ur en böjprovbalk så att cylinderns tvärsnitt i x- (eller y-) riktningen motsvarar balkens mittvärsnitt, se Figur 23. Balkens tvärsnitt antas i och med det också ha en bredd som är lika med cylinderns diameter och en höjd som är lika med cylinderns. Balken antas vara onotchad och arrangerad för fyrapunkts böjprovning, i princip som för en probbalk enligt Metod A i SS-EN 14488-3 (2023) (se avsnitt 4.1). Det bör dock noteras att förhållandet mellan den teoretiska balkens bredd och höjd avviker från probbalkens  $125 \times 75 \text{ mm}^2$ . Alla fibrer som skär mittsnittet har identifierats genom numerisk analys efter CT-skanningen, se exemplet i Figur 32 där de rödmarkerade fibrerna är verksamma i det tvärsnitt som antas vara aktuellt.

Vid böjbelastning av den teoretiska balken blir alla fibrer under neutrala lagret utsatta för dragning. Varje dragen fiber behandlas beräkningsmässigt som en liten armeringsstång och därmed ger fiberfördelningen över höjden neutrala lagrets läge. Böjmomentkapaciteten ges av kraftresultanterna i den tryckta betongen och i de dragna stålfibrerna. Dessa är lika och utgör ett kraftpar med avståndet lika med den inre hävarmen  $z$ . Momentkapaciteten för balken enligt Figur 23 sätts sedan lika med den som beräknas med Ekv. (4.8) eller Ekv. (4.9), varefter motsvarande  $f_{ftd,R1}$  och  $f_{ftd,R3}$  kan beräknas. Det antas vidare att alla partialkoefficienter sätts till 1,0 och att materialhållfastheterna är de karakteristiska, det vill säga att  $f_{ftd,R1} = f_{ft,R1}$  och  $f_{ftd,R3} = f_{ft,R3}$  i ULS beräkningen. Beräkningsgången sammanfattas i algoritmform i Tabell 8. Här antas att om kraftresultanten  $F_{f2} < 0$  så sätts  $F_{f2} = 0$  och  $f_{ftd,R1} = f_{ftd,R3}$ , det vill säga att ett spänningstöjningssamband enligt Figur 20 (a) antas, mot för alternativet (b) i övriga fall.

**Tabell 8.** Beräkningsgång för residualböjdraghållfastheter för sprutbetongcylinder.  
*Table 8.* Calculation procedure for residual tensile bending strength for shotcrete.

---

**1. Identifiera ingångsdata:**

$L$  = cylinderns & balkens höjd       $D$  = cylinderns diameter (= balkens bredd)  
 $\sigma_c$  = betongens tryckhållfasthet       $\lambda, \eta$  = tryckzonens konstanter  
 $\sigma_{s, \text{fib}}$  = fibrernas draggräns       $A_{s, \text{fib}}$  = en fibers tvärsnittsarea       $n$  = antal fibrer

**2. Beräkna kraftresultanter för tryckt betong och en dragen stålfiber:**

$$F_c / x = \sigma_c \cdot D \cdot \lambda \cdot \eta \qquad F_{t, \text{fib}} = \sigma_{s, \text{fib}} \cdot A_{s, \text{fib}} \qquad \text{Ekv. (4.4)(4.5)}$$

**3 Beräkna kraftjämvikt över balkhöjden:**

$$\text{Då } F_c = \Sigma F_{t, \text{fib}} \text{ fås } x = \text{tryckzonshöjden} \qquad \text{Ekv. (4.2)}$$

Bestäm sedan läget  $d$  till dragkraftresultanten  $\Sigma F_{t, \text{fib}}$

**4. Beräkna momentkapaciteten:**

$$\text{Bestäm först inre hävarmen} \qquad z = d - x/2 \qquad M = F_c \cdot z$$

**5. Beräkna kraftresultanter till tryck och fiberspänningar:**

$$F_c = \sigma_c \cdot D \cdot x \cdot \lambda \cdot \eta \qquad \text{Ekv. (4.4)}$$

$$F_{f1} = (M - F_c (x(1-\lambda/2) + (L-x)/3)) / ((L-x)/2 - (L-x)/3) \qquad \text{Ekv. (4.9)}$$

$$F_{f2} = F_c - F_{f1} \qquad \text{Ekv. (4.2)}$$

OBS! Om  $F_{f2} < 0$  sätts  $F_{f2} = 0$  och  $f_{fd, R1} = f_{fd, R3}$  i det följande.

**6. Beräkna residualdraghållfastheterna:**

$$f_{fd, R1} = (2F_c - F_{f1}) / (b(h - x)) \qquad \text{Ekv. (4.2)(4.6)(4.7)}$$

$$f_{fd, R3} = -2F_{f2} / (b(h - x)) + f_{fd, R1} \qquad \text{Ekv. (4.6)(4.7)}$$

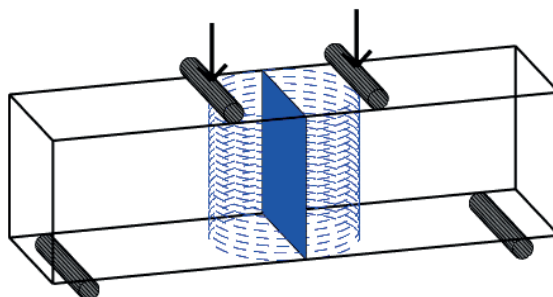
**7. Beräkna residualböjdraghållfastheterna:**

$$f_{R1} = f_{fd, R1} / 0,45 = f_{fr, R1} / 0,45 \qquad \text{Ekv. (3.1)}$$

$$f_{R3} = f_{fd, R3} / 0,37 = f_{fr, R3} / 0,37 \qquad \text{Ekv. (3.2)}$$


---

De resultat som redovisas i kapitel 6 och i bilagan bygger på några grundläggande antaganden. Om information om betongens tryckhållfasthet saknas sätts  $\sigma_c = 40$  MPa. Koefficienterna för approximation av den tryckta zonen sätts till  $\lambda = 1,0$  och  $\eta = 0,8$ . Stålfibrernas diameter sätts till 0,55 mm, motsvarande Dramix 3D, men deras area räknas upp genom division med 85% vilket motsvarar numeriska analysens precision, se kapitel 1. Fibrernas draggräns beräknas baserat på resultat från utdragsförsök (Rengarajan, 2020), där medelutdragskraften var 150 kN vilket ger ca  $\sigma_{s, \text{fib}} = 630$  MPa.



**Figur 23.** Teoretisk sprutbetongbalk med fyrpunkts böjbelastning. Balkens kritiska tvärsnitt tänks sammanfalla med en undersökt provcylinders mittsnitt.

*Figure 23. Theoretical shotcrete beam with four-point loading. The beam critical section is assumed to coincide with the centre section of a test cylinder.*

#### 4.4 Exempel på böjdraghållfasthet vs. fiberinnehåll

Det finns relativt få resultat från uppmätning av residualdraghållfasthet för sprutbetong som har redovisats i forskningsrapporter och artiklar. I flera av de fall som hittats är det fiberarmerad betong med samma sammansättning som sprutbetong som har gjutits i laboratorium som redovisas. Då det internationellt finns och har funnits olika provningsstandarder och då dessa har reviderats med åren gör dessutom jämförelser svåra och resultaten icke-representativa. I Tabell 9 sammanställs dock några resultat som även de innehåller prov från gjutna balkar (Rengarajan, 2020 och Sjölander m.fl., 2023) och för jämförelse också ett typiskt kravvärde vid tunnelbyggande i Sverige, se till exempel Sjölander m.fl. (2023).

**Tabell 9.** Exempel på uppmätta residaldraghållfastheter för sprutbetong med stålfibrer.  
*Table 9. Example on measured residual tensile strengths for shotcrete with steel fibres.*

<b>Stålfiber- innehåll</b>	<b><math>f_{R1}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{R3}</math> (MPa)</b>	<b>Förhållanden</b>	<b>Referens</b>
30-50 kg/m <sup>3</sup>	-	3,5-4,0	Krav för tunnel	Sjölander m.fl. (2023)
50 kg/m <sup>3</sup>	-	5,5	Gjutet i labb	Sjölander m.fl. (2023)
40 kg/m <sup>3</sup>	-	3,7	Gjutet i labb	Sjölander m.fl. (2023)
30 kg/m <sup>3</sup>	-	3,2	Gjutet i labb	Sjölander m.fl. (2023)
50* kg/m <sup>3</sup>	3,8	2,8	Sprutat i tunnel	Castellón m.fl. (2022)
50* kg/m <sup>3</sup>	5,5	3,1	Sprutat i labb	Castellón m.fl. (2022)
30* kg/m <sup>3</sup>	2,5	1,6	Sprutat i tunnel	Castellón m.fl. (2022)
30* kg/m <sup>3</sup>	4,2	1,8	Sprutat i labb	Castellón m.fl. (2022)
40 kg/m <sup>3</sup>	5,3-6,8	-	Gjutet i labb	Rengarajan (2020)
50 kg/m <sup>3</sup>	3,9	( $f_{R2}$ )	Omräknat från $f_{5,10}$	Nordström

\* Enligt betongmix. Fiberförluster ej beaktat.



## 5. BESKRIVNING AV PROVSERIEN

Studien omfattar CT-skanning och utvärdering av totalt 17 st sprutbetongprov, enligt Tabell 10. Dessa beskrivs i det följande, tillsammans med motiveringar till urvalet av prov. Provkropparna är cylindriska borrkärnor ur tunnelväggar, sprutade lådor eller plattor. För referens och jämförelse har ett gjutet prov (nr 1) medtagits, gjuten med samma betongmix som vid betongsprutning, men utan förlust av fiber, (se avsnitt 2.1–2.2). De flesta proven baseras på sprutbetong med  $40 \text{ kg/m}^3$  föreskrivet enligt aktuell betongmix, men på grund av fiberförluster är innehållet oftast märkbart lägre (se avsnitt 6.2–6.3). Då betongmixens föreskrivna fibermängd varit okänd antas och noteras detta i tabellen med “(40 kg/m<sup>3</sup>)”.

**Tabell 10.** Sammanställning av CT-skannade och utvärderade sprutbetongprov.  
*Table 10. Overview of the CT-scanned and evaluated shotcrete samples.*

Prov nr.	från Låda/Platta/Vägg	Diameter	Höjd	Föreskrivet fiberinnehåll
1. Gjuten platta (referens)	P	φ79 mm	79 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
2. LKAB - Typ 1, prov 1:3	L	φ93 mm	280 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
3. LKAB - Typ 1, prov 2:3	L	φ93 mm	267 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
4. LKAB - Typ 1, prov 3:3	L	φ93 mm	271 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
5. LKAB - Typ 2, prov 1:3	L	φ93 mm	248 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
6. LKAB - Typ 2, prov 2:3	L	φ93 mm	272 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
7. LKAB - Typ 2, prov 3:3	L	φ93 mm	239 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
8. LKAB - Typ 3, prov 1:3	L	φ93 mm	275 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
9. LKAB - Typ 3, prov 2:3	L	φ93 mm	272 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
10. LKAB - Typ 3, prov 3:3	L	φ93 mm	275 mm	40 kg/m <sup>3</sup>
11. Järnvägstunnel - Prov 1	L	φ90 mm	194 mm	41 kg/m <sup>3</sup>
12. Järnvägstunnel - Prov 2	L	φ90 mm	211 mm	41 kg/m <sup>3</sup>
13. Borrkärna från vägtunnel - Prov 1	V	φ70 mm	113 mm	(40 kg/m <sup>3</sup> )
14. Borrkärna från vägtunnel - Prov 2	V	φ70 mm	120 mm	(40 kg/m <sup>3</sup> )
15. Borrkärna från sprutbetong i flera lager	V	φ72 mm	60 mm	(40 kg/m <sup>3</sup> )
16. Borrkärna från sprutbetong på bergkil	V	φ72 mm	72 mm	(40 kg/m <sup>3</sup> )
17. Borrkärna från sprutad provbalk	P	φ56 mm	131 mm	70 kg/m <sup>3</sup>

### **PROV 1 - Gjuten platta (referens)**

Provcylindrar från en gjuten platta medtas i provserien. Syftet är att resultaten ska kunna användas som jämförande referensvärden, dels vad gäller fibrernas orientering och hur de påverkas av gjutning respektive sprutning, och dels beträffande förekomsten av fiberförluster. Plattan har gjutits i Vattenfalls Älvkarlebylaboratorium under mycket kontrollerade förhållanden vilket ger en mycket jämn inblandning av fibrerna i betongen och med inget eller minimalt fiberspill i samband med hanteringen av betongen. Självklart försvinner också effekten av fiberförluster på grund av återstuds vid sprutningen. Den platta som har medtagits provades i samband med provningar för ett examensarbete (Rengarajan, 2020). Plattan av typen RDP provades till brott varefter provkärnor borrades ur de intakta plattdelarna, se Figur 24. Betongens sammansättning var densamma som för våtsprutad betong, i detta fall med ett fiberinnehåll på  $40 \text{ kg/m}^3$  enligt betongmixens specifikation.



**Figur 24.** Gjutning av RDP platta och dess delar efter provning. Foton från Vattenfall och Rengarajan (2020).

*Figure 24. Casting of RDP (Round Determinate Panel) and its parts after testing. Photos from Vattenfall and Rengarajan (2020).*

### **PROV 2-10 - LKAB - Typ 1-3**

Av de totalt 17 st undersökta sprutbetongproverna tillhör 9 st en provserie från LKAB. Cylindrarna kommer från lådor som har sprutats från olika avstånd, 2 m respektive 3 m. För sprutavståndet 2 m har också en tredje variant provats, där flyttillsats har använts för att nå ett flytsättningsmått på 50 cm. I de två andra fallen uppmättes ett sättningsmått på 13 cm. Tre prov av vardera typen har undersökts, alltså totalt nio cylindrar, se Figur 25.



**Figur 25.** Provcylindrar från LKAB. Tre uppsättningar om tre vardera.  
*Figure 25. Test cylinders from LKAB. Three sets of three cores each.*

#### **PROV 11-12 - Järnvägstunnel - Prov 1-2**

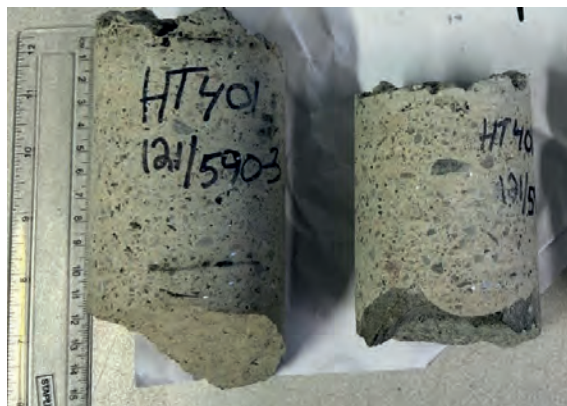
Dessa provcylindrar kommer från en uppsättning tagna ur lådor sprutade i samband med fortlöpande provningen för bygget av en järnvägstunnel. Proven kommer från uppsättning insänd av en entreprenör och utav dessa har två cylindrar valts för CT-skanning och utvärdering, se Figur 26.



**Figur 26.** Provcylindrar från järnvägstunnel. Två har undersökts.  
*Figure 26. Test cylinders from railroad tunnel. Two were investigated.*

### ***PROV 13-14 – Borrkärna från vägtunnel - Prov 1-2***

Dessa två provcylindrar är tagna som vidhäftningsprover direkt i tunnelvägg, se Figur 27. Följaktligen är de mindre än de prov som tagits från sprutlådor eftersom kärnborr med mindre diameter används i samband med utdragsförsök. Cylindrarnas höjd begränsas dessutom här av sprutbetongens tjocklek. Proven kommer från Trafikverket via Vattenfall som har utfört vidhäftningsproverna i vägtunneln och de är viktiga då den totala provserien innehåller relativt få prover direkt från sprutbetong på tunnelvägg.



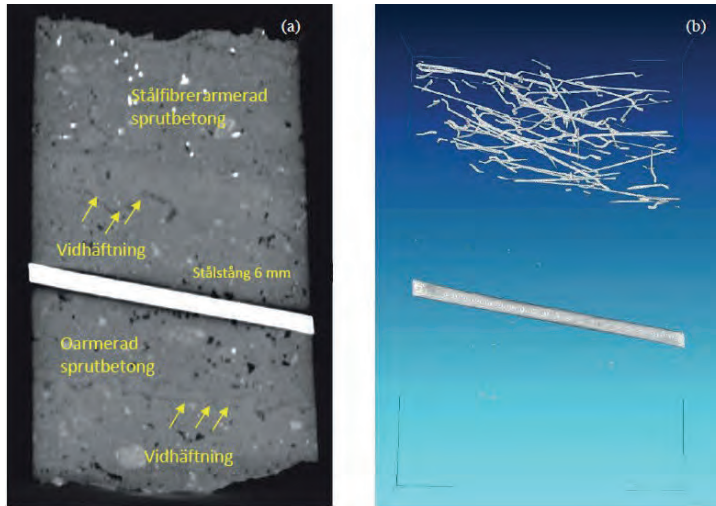
**Figur 27.** Provcylindrar från utdragsprov i vägtunnel.  
*Figure 27. Test cylinders from bond strength test in road tunnel.*

### ***PROV 15 - Borrkärna från sprutbetong i flera lager***

Även detta prov är en borrkärna från sprutbetong i tunnel. Provet har ingått i och presenterats i den tidigare projektetappen Ansell (2021). Det är en borrkärna som har tagits genom tre lager sprutbetong och berg, där endast det yttre sprutbetonglagret är fiberarmerat, se Figur 28. Genom borrkärnan går också en del av ett armeringsnät.

### ***PROV 16 - Borrkärna från sprutbetong på bergkil***

Ytterligare en borrkärna som även tidigare har undersökts har medtagits, dels för att öka antalet borrkärnor från tunnlar och dels för att möjliggöra jämförelser med nya och äldre resultat. Provcylindern innehåller stålfiberarmerad och oarmerad sprutbetong på en bergkil med lutning relativt provets horisontalplan, se Figur 29.



**Figur 28.** Borrkärna genom tre lager sprutbetong, fiberarmerad, oarmerad och med nätarmering. Från Ansell m.fl. (2016).

*Figure 28. Core drilled through three layers of shotcrete, fibres reinforced, plain and with reinforcement mesh. From Ansell et al. (2016).*



**Figur 29.** Borrkärna med fiberarmerad och oarmerad sprutbetong på bergkil. Från Ansell m.fl. (2016).

*Figure 29. Core drilled through fibre reinforced and plain shotcrete on a rock wedge. From Ansell et al. (2016).*



**PROV 17 - Borrkärna från sprutad provbalk**

Även provseriens sista sprutbetongcylinder har undersökts under de tidigare genomförda projekten Ansell m.fl. (2016) och Ansell (2021). Cylindern har också inkluderats här eftersom den har relativt högt fiberinnehåll vilket med precision inte har kunnat bestämmas med säkerhet vid de tidigare studierna. Det är dock känt, se Nordström (2005) och Ansell m.fl. (2016), att fiberinnehållet avviker relativt kraftigt från de specificerade  $70 \text{ kg/m}^3$  enligt betongmixen. Cylindern är också speciell eftersom den har borrats ut vinkelrätt sprutriktingen vilket har resulterat i att majoriteten av stålfiberna är orienterade i cylinderns längsriktning, se Figur 30. Anledningen är att provet kommer från en balk som under längre tid delvis varit nedsänkt i vatten som del i ett projekt för att kartlägga möjlig betongnedbrytning och fiberkorrosion. Aktuellt prov uppvisar dock inga spår av fiberförluster på grund av detta.



**Figur 30.** Borrkärna ur fiberarmerad sprutbetongbalk och dess fibrer. Överändan har varit nedsänkt i vatten. Från Ansell m.fl. (2016) och Ansell (2021).

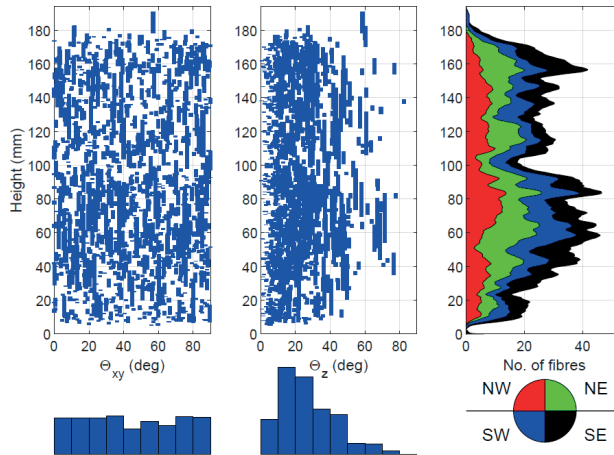
*Figure 30. Core drilled through fibre reinforced shotcrete beam and its fibres. The top section has been submerged in water. From Ansell et.al. (2016) and Ansell (2021).*

## 6. RESULTAT

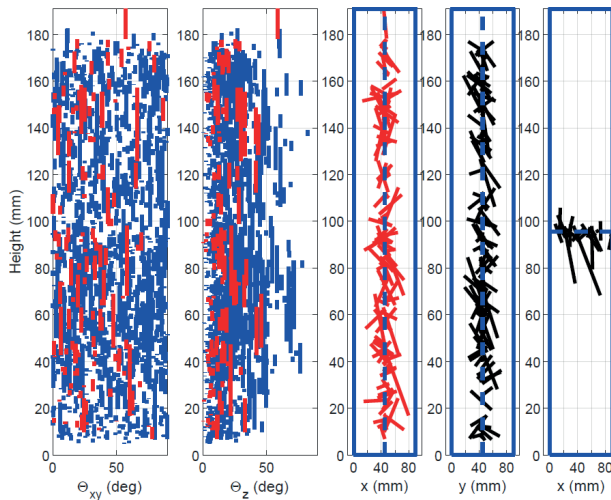
Här redovisas och kommenteras de resultat som fås efter CT-skanning med efterföljande numerisk analys, bearbetning och tolkning av datan. För vardera av de 17 st undersökta sprutbetongcylindrarna sammanställs resultaten i enhetliga grafer och tabeller, omfattande ett tvåsidors uppslag i rapportens bilagedel, för att möjliggöra jämförelser. Det första av de följande avsnitten ger beskrivning och vägledning till hur resultatupställningarna ska läsas. Därefter sammanställs de fiberorienteringsfaktorer som räknats fram i enlighet med avsnitt 3.2. Ett avsnitt som redovisar böjdraghållfastheter framräknade enligt avsnitt 4.2 följer.

### 6.1 Redovisning av CT-skannade provcylindrar

Den grafiska redovisning som presenteras och beskrivs av Ansell (2021) används också här. För att kunna beskriva fibernas orientering i 3D volymen används två lutningsvinklar, se exemplet i Figur 31. Det antas att  $z$ -axeln följer provcylinders längdaxel och att en fibers lutning relativt horisontalplanet är  $\theta_z$ , inom  $0^\circ$  till  $90^\circ$ , så som visas i Figur 14. Fiberns orientering i horisontalplanet ges av  $\theta_{xy}$ , också här inom  $0^\circ$  till  $90^\circ$ . Således ges orienteringen av den minsta vinkel mellan fibern och  $x$ -axeln, här definierad som horisontalaxeln i de 2D tvärsnittsbilder som kommer från CT-skanningen, se Figur 4. Resultaten visas med en standardiserad uppställning bestående av 6 kopplade diagram, som ges av en rutin för numerisk analys och bearbetning som har programmerats i Matlab (2024). Hur diagrammen är kopplade kan ses i Figur 31 som redovisar resultaten för prov 11, där respektive fibers position i betongcylindern redovisas som vertikala streck i två diagram där horisontalaxlarna är lutningsvinklarna  $\theta_{xy}$  och  $\theta_z$ . Till höger om dessa två diagram visar ett tredje hur många fibrer som skär betongcylinderns tvärsnitt på respektive höjd. Fibernas lägen anges här också fördelat på fyra kvadranter som definieras utifrån kompassens riktningar, där E (öster) finns i  $x$ -axelns positiva riktning och N (norr) längs positiva  $y$ -axeln. Under de två diagrammen över lutningsvinklarna visas dessa summerade i  $10^\circ$ -intervall som stapeldiagram, skalade relativt summan av totala fiberlängden i betongprovet. I kompletterande Figur 32 visas läge och fördelning av de fibrer som skär de tre mittsnitten av cylindern, se avsnitt 3.3. Från höger och till vänster visas snittet projektioner med de markerade snitten  $S_z$  genom en cylinderyta med diametern  $\Phi$  samt de rektangulära snitten  $S_y$  och  $S_x$  ( $\Phi \times H$ ). Dessa två typer av figurer visas fi bilagan för respektive prov 1–20, tillsammans en kortfattad beskrivning, beräknat totalt fiberinnehåll, geometrisk beskrivning, beräknade fiberorienteringsfaktorer samt beräknad och uppskattade residualhållfastheter för drag och böjdrag. En ungefärlig klassificering ges utifrån detta. Även översiktsbilder i 3D visas för varje cylinder.



**Figur 31.** Resultat för prov 11. Lutning och läge i hos fibrer över höjden av en provcylinder av sprutbetong, samt antal skärande fibrer per höjdsnitt och kvadrant.  
*Figure 31. Results for test 11. Fibre inclinations and position over the height of a shotcrete test cylinder, with the number of crossing fibres at each height and their distribution per quadrant in the cylinder.*



**Figur 32.** Resultat för prov 11. Fördelning av fiberlutningar över höjden av en provcylinder av sprutbetong. De tre delfigurerna till höger visar de fibrerna som skär cylinderns tre mittsnitt.  
*Figure 32. Results for test 11. Distribution of fibre inclinations over the height of a shotcrete test cylinder. The three sub-figures towards the right show the fibres that cross the three mid-sections of the cylinder.*



## 6.2 Fördelning och orientering av stålfibrer

De 17 provcylindrarna har utvärderats med avseende på fiberorienteringen, enligt de samband som beskrivs i avsnitt 3.2–3.3. De fiberorienteringsfaktorer som har räknats fram för respektive prov presenteras i Tabell 11. Faktorerna visas i tre kolumner, med avseende på provcylindrarnas respektive x, y och z-axlar. Två värden för respektive ges där det första är genomsnittsvärdet för hela volymen, beräknat enligt Ekv. (3.13)–(3.15). Det andra värdet noteras med ett subskript "S" och avser fiberfördelningen över cylindrarnas mittnitt, se Figur 32. Dessa värden har beräknats enligt Ekv. (3.16)–(3.18). För de flesta proven avviker värdena för mittnitten ("S-värdena") från de som avser volymen och där relativt stora skillnader finns indikerar detta en ojämn fördelning av fibrerna då de skär aktuella snitt. Detta kan tydligt ses i Figur 32 och i motsvarande figurer i bilagan. Det ska här särskilt noteras att faktorerna för prov nr. 17 ska avvika i y- och z-led, eftersom detta prov är orienterat i sprutriktningen.

**Tabell 11.** Sammanställning av framräknade fiberorienteringsfaktorer.  
*Table 11. Overview of calculated fibre distribution coefficients.*

Prov nr.	$\eta_x$ ( $\eta_{sx}$ )	$\eta_y$ ( $\eta_{sy}$ )	$\eta_z$ ( $\eta_{sz}$ )	Fiberinnehåll
1. Gjuten platta (referens)	0,71 (0,73)	0,57 (0,56)	0,30 (0,37)	40 kg/m <sup>3</sup>
2. LKAB - Typ 1, prov 1:3	0,64 (0,60)	0,64 (0,62)	0,33 (0,25)	31 kg/m <sup>3</sup>
3. LKAB - Typ 1, prov 2:3	0,64 (0,60)	0,64 (0,62)	0,33 (0,25)	25 kg/m <sup>3</sup>
4. LKAB - Typ 1, prov 3:3	0,63 (0,57)	0,64 (0,57)	0,40 (0,54)	35 kg/m <sup>3</sup>
5. LKAB - Typ 2, prov 1:3	0,63 (0,71)	0,64 (0,67)	0,30 (0,37)	32 kg/m <sup>3</sup>
6. LKAB - Typ 2, prov 2:3	0,62 (0,51)	0,66 (0,51)	0,31 (0,19)	25 kg/m <sup>3</sup>
7. LKAB - Typ 2, prov 3:3	0,65 (0,52)	0,62 (0,57)	0,32 (0,38)	29 kg/m <sup>3</sup>
8. LKAB - Typ 3, prov 1:3	0,62 (0,52)	0,66 (0,66)	0,36 (0,29)	32 kg/m <sup>3</sup>
9. LKAB - Typ 3, prov 2:3	0,59 (0,34)	0,68 (0,47)	0,32 (0,30)	29 kg/m <sup>3</sup>
10. LKAB - Typ 3, prov 3:3	0,66 (0,53)	0,62 (0,52)	0,32 (0,21)	28 kg/m <sup>3</sup>
11. Järnvägstunnel - Prov 1	0,65 (0,56)	0,62 (0,58)	0,31 (0,28)	35 kg/m <sup>3</sup>
12. Järnvägstunnel - Prov 2	0,63 (0,48)	0,65 (0,54)	0,28 (0,31)	29 kg/m <sup>3</sup>
13. Vägtunnel - Prov 1	0,59 (0,34)	0,68 (0,47)	0,32 (0,30)	30 kg/m <sup>3</sup>
14. Vägtunnel - Prov 2	0,72 (0,46)	0,55 (0,48)	0,39 (0,42)	37 kg/m <sup>3</sup>
15. Borrkärna - flera lager	0,65 (0,56)	0,62 (0,58)	0,31 (0,28)	23 kg/m <sup>3</sup>
16. Borrkärna - på bergkil	0,65 (0,44)	0,63 (0,66)	0,37 (0,43)	31 kg/m <sup>3</sup>
17. Borrkärna - sprutad provbalk	0,43 (0,35)	0,83 (0,79)	0,65 (1,0*)	57 kg/m <sup>3</sup>

### 6.3 Böjdraghållfasthet

Här redovisas de residualböjdraghållfastheter som räknats fram enligt den algoritm som föreslås i Tabell 8. Resultaten sammanställs i Tabell 12 där hållfastheterna ges av de två kolumnerna för  $f_{R1}$  och  $f_{R3}$ . Här ska noteras att i de fall då värde för  $f_{R1}$  inom parentes () ges så avser det ett utseende på spänning-töjningssambandet som följer (a) enligt Figur 20, det vill säga med en konstant nivå på betongspänningen i drag efter uppsprickningen. För varje prov anges också måtten för  $x/z/h$  som avser tvärsnittens tryckzonshöjd, inre hävarm och totalhöjd, vilka har använts i beräkningen. Den klassificering som beräknade residualhållfastheterna motsvarar anges, tillsammans med respektive provs identifierade fiberbetonginnehåll (se ytterligare detaljer i bilagan).

**Tabell 12.** Sammanställning av framräknade residualböjdraghållfastheter.  
*Table 12. Overview of calculated residual bending tensile strengths.*

Prov nr.	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R3}$	$x/z/h$ (mm)	Klass	Fiberinnehåll (kg/m <sup>3</sup> )
1. Gjuten platta (referens)	6,8	4,8	4/ 37/ 79	C50/60–R <sub>1</sub> 6/R <sub>3</sub> 4	40
2. LKAB - Typ 1, prov 1:3	(3,6)	3,6	10/156/280	C45/55–R <sub>1</sub> 3/R <sub>3</sub> 3	31
3. LKAB - Typ 1, prov 2:3	2,5	2,3	7/128/267	C45/55–R <sub>1</sub> 2/R <sub>3</sub> 2	25
4. LKAB - Typ 1, prov 3:3	3,9	3,0	10/126/271	C45/55–R <sub>1</sub> 3/R <sub>3</sub> 3	35
5. LKAB - Typ 2, prov 1:3	4,0	3,0	9/115/248	C45/55–R <sub>1</sub> 4/R <sub>3</sub> 3	32
6. LKAB - Typ 2, prov 2:3	2,7	2,0	7/125/272	C45/53–R <sub>1</sub> 2/R <sub>3</sub> 2	25
7. LKAB - Typ 2, prov 3:3	(3,1)	3,1	7/110/271	C45/55–R <sub>1</sub> 3/R <sub>3</sub> 3	29
8. LKAB - Typ 3, prov 1:3	(3,3)	3,3	9/139/275	C45/55–R <sub>1</sub> 3/R <sub>3</sub> 3	32
9. LKAB - Typ 3, prov 2:3	(4,0)	4,0	11/144/278	C45/55–R <sub>1</sub> 4/R <sub>3</sub> 4	29
10. LKAB - Typ 3, prov 3:3	(3,3)	3,3	9/146/275	C45/55–R <sub>1</sub> 3/R <sub>3</sub> 3	28
11. Järnvägstunnel - Prov 1	(3,8)	3,8	9/104/194	C40/50–R <sub>1</sub> 3/R <sub>3</sub> 3	35
12. Järnvägstunnel - Prov 2	2,8	2,0	7/ 97/211	C40/50–R <sub>1</sub> 2/R <sub>3</sub> 2	29
13. Vägtunnel - Prov 1	(2,5)	2,5	3/ 57/113	C40/50–R <sub>1</sub> 2/R <sub>3</sub> 2	30
14. Vägtunnel - Prov 2	(4,0)	4,0	5/ 54/119	C40/50–R <sub>1</sub> 4/R <sub>3</sub> 4	37
15. Borrkärna - flera lager	2,7	1,5	2/ 26/ 60*	C40/50–R <sub>1</sub> 2/R <sub>3</sub> 1	23
16. Borrkärna - på bergkil	2,7	1,9	2/ 33/ 72*	C40/50–R <sub>1</sub> 2/R <sub>3</sub> 1	31
17. Borrkärna - sprutad provbalk	(3,4)	3,4	6/ 73/131	C40/50–R <sub>1</sub> 3/R <sub>3</sub> 3	57

## 7. KOMMENTARER OCH SLUTSATSER

I följande avsnitt kommenteras utvärderingen av de 17 CT-skannade proven med avseende på fiberinnehåll och fiberorientering. Även de residualböjdraghållfasthetsvärden som utifrån resultaten beräknats med den metod som föreslås i avsnitt 4.3 kommenteras. Slutligen ges några rekommendationer för fortsatta undersökningar. Resultaten utvärderas och kommenteras först mot bakgrund av sammanställningarna i rapportens kapitel två som behandlar förväntat fiberinnehåll beaktat fiberförluster på grund av hantering av den färska betongen och återstuds vid sprutningen. Möjliga orsaker till skillnader mellan föreskrivet fiberinnehåll i betongmixar och de fibrer som kunnat identifieras genom CT-skanning kommenteras. Rapportens tredje kapitel introducerar fiber-orienteringsfaktorer som indikatorer på sprutbetongprovers inre geometri. God överensstämmelse mellan faktorerna och identifierade fiberorienteringar kan ses i resultaten. I det fjärde kapitlet föreslås en metod att utifrån fiberorienteringar i 3D cylindervolymer som bestämts med hjälp av CT-skanning beräkna motsvarande residualböjdraghållfastheter för sprutbetongen. För de undersökta proven uppvisas realistiska värden och i de få fall där direkt jämförelse med resultat från balkprovning kunnat göras fås god överensstämmelse. Metoden kommer att ytterligare öka värdet på de resultat som fås med undersökningsmetoden för stålfiberarmerad sprutbetong.

### 7.1 Fiberinnehåll

Fördelningen av fibrer över cylindrarnas höjd ges av Figur 31, och figurerna av samma typ i bilagan. För den gjutna plattans del (Prov 1) syns att flest fibrer som skär höjdsnitt finns inom 40–70 mm medan avsnittet därunder tydligt innehåller färre fibrer. Detta indikerar att vid gjutningen kan betongen ha hållts på i två omgångar, med aningen fler fibrer i den andra. Detta framgår också av 2D projektionen (övre vänstra figuren på sid 61) där en koncentration av fibrer syns, med förskjutning mot höger, det vill säga SE enligt fördelningarna per tvärsnittskvadrant (sid 60). Plattan har gjutits med en betongmix innehållande 40 kg/m<sup>3</sup> fibrer, vilket också uppmätts utifrån CT-skanningen. Här finns följaktligen inga fiberförluster på grund av återstuds och det har inte heller förlorats några fibrer vid blandning och hantering av betongen. Detta kan med allra största sannolikhet tillskrivas den småskaliga blandningsutrustning som använts och det minimala transportavståndet till gjutformen. Däremot kan alltså fibrerna ha varit aningen ojämnt iblandade, vilket kan ha resulterat i olika fiberinnehåll vid de två tillfällena betong hälldes i formen. Det ska dock noteras att cylindern endast är ett stickprov från en sektion av plattan, se Figur 24.

För proven 2–10, som alla kommer från en provserie sprutad hos LKAB, har fiberinnehållet varierat inom 25–35 kg/m<sup>3</sup>. Detta innebär att skillnaden i antalet fibrer är 25% då de prov med högst/lägst fiberinnehåll jämförs och att fiberförlusterna relativt betongmixen ligger på 12–38%, det vill säga att alla cylindrars fiberinnehåll ligger straxt över eller under det gränsvärde som ges av SS-EN 206 (2013). Det ska dock noteras att tillämpningen av standarden görs så att denna avser mängden fibrer i levererad betong

innan sprutningen, se avsnitt 2.5. Fiberinnehållet i betongen innan sprutning kan alltså ha varit så låg som  $34 \text{ kg/m}^3$  (85% av  $40 \text{ kg/m}^3$ ), vilket ger att återstudsden då som lägst kan ha varit inom 0–22%. I medeltal är den totala fiberförlusten 26%.

För de tre första proven, nr 2–4 som har sprutats på 2 m avstånd, ses en viss ojämnhet i resultaten och det ska noteras att delgruppen har störst variation i fiberinnehåll, med ett prov med  $25 \text{ kg/m}^3$  och ett med  $35 \text{ kg/m}^3$ . Möjligen kan det korta sprutavståndet haft inverkan på återstuds och fördelning av betongen i sprutlådorna. För prov 3 syns ett svagare fält vid höjden ca 75 mm men här finns också en koncentration av fibrer nära provets botten, vilket är fördelaktigt med avseende på böjdragkapaciteten. För prov 4 är situationen det omvända, med större fiberkoncentration uppåt, men detta prov är det som innehåller flest fibrer. Proven 5–7, som har sprutats på 3 m avstånd, uppvisar en jämnare fiberfördelning, med mindre variation i fiberinnehåll. Den tredje gruppen, med prov 8–10 som har sprutats på 2 m avstånd men innehållande flytmedel, ses en relativt jämn genomgående fördelning av fibrerna och ett fiberinnehåll med liten variation inom  $28\text{--}32 \text{ kg/m}^3$ , utan märkbart svaga höjdsektioner.

Proven 11–14 visar en liknande variation som i de föregående beträffande det totala fiberinnehållet, dock med lägre total fiberförlust, inom 8–27%. Om även här beaktas att fibermängden före sprutning kan ha varit 85% av betongmixens specificerade del så skulle återstudsden som lägst kunna ha varit 0–12%. Vid en jämförelse mellan Prov 11–12 från en järnvägstunnel ses en skillnad främst i att Prov 12 har en övervägande andel av fibrerna i cylinderns övre halva. Bägge proven visar svaga snitt vid ca 90–100 mm höjd, vilket kan vara en effekt av att sprutningen möjligtvis genomförts i två etapper, det vill säga att halva sprutlådorna först fylls med ett lager varefter övre halvan sprutas.

För proven 13–14 är cylindrarnas höjd lägre på grund av att dessa är borrarade direkt ur tunnelvägg och inte ur provlådor. Bägge proven visar lågt, eller inget, fiberinnehåll vid basen men detta bedöms bero på den oregelbundna formen cylindrarna har där, se Figur 27. Detta orsakas av att borrhärnorna har tagits ur en serie för utdragsprovning där Prov 13 (Figur 27, vänster) uppvisar brott i betongen och Prov 14 (Figur 27, höger) brott i berg och gränsskiktet berg/sprutbetong. De oregelbundna bottenytorna har beaktats då cylindrarnas volymer har bestämts, på samma sätt som skett för samtliga provcylindrars oregelbundna överytor. Det bör särskilt noteras att Prov 13–14 uppvisar snarlika fördelningar i höjddel och likvärdiga fiberförluster som Prov 11–12, trots att de två första är tagna ur sprutlådor och de senare direkt ur sprutbetong på tunnelvägg.

För Prov 15–16 som också är borrhärnor från sprutbetong på tunnelvägg är begränsningsytorna för volymerna innehållande stålfibrer också icke-horisontella och oregelbundna, se Figur 28–29. Här syns tydlig inverkan av sprutbetongskiktens randvillkor. Vid fiberbetongens nedre del som gränsar till berget är ytorna oregelbundna och för Prov 16 så är ju också bergytan lutande genom cylindern så att det formas en kil. I proven tagna ur tunnelväggen är dessutom den yttre, fria sprutbetongytan betydligt mer ojämn än för proven tagna ur sprutlådor. För Prov 16 syns också en horisontell svaghetszon med mindre fiberinnehåll på ca 40 mm höjd.

Fiberinnehållet i Prov 17 kommenterades av Ansell (2021) och speciellt för detta prov är i jämförelse med de övriga den högre fibermängden i betongmixen,  $70 \text{ kg/m}^3$ . Den totala fiberförlusten är här 18%, vilket är nära de lägre nivåerna uppmätta för Prov 2–10. Då fiberfördelningen ska tolkas bör det noteras att provcylindern är tagen tvärs sprutriktningen. Den svaghetszon med färre fibrer som syns på höjden ca 80 mm i fördelningsgraferna (sid 92) beror således inte på sprutningens eventuella lagerföljd. Också i 2D projektionen (övre vänstra figuren på sid 93) syns detta tydligt, som ett litet område utan fibrer.

För att kontrollera överensstämmelsen mellan identifierat fiberinnehåll (Tabell 11–12) och verkligt innehåll har stickprov tagits. Det har varit möjligt att i laboratorium bestämma fiberinnehållet i cylindrarna från Prov 2, 5, 8 och 13. Provningen har genomförts enligt SS-EN 14721 (2005) genom att cylindrarna krossas varefter fibrerna avlägsnas med magnet, tvättas och vägs. Resultaten visade att innehållet varit 35, 34, 32 och  $30 \text{ kg/m}^3$  i de fyra proven, vilket ska jämföras med resultaten från CT-skanningen som gav 31, 32, 32 och  $30 \text{ kg/m}^3$ . Således full överensstämmelse för Prov 8 och 13 men viss avvikelse för Prov 2 och 5. Anledningen kan vara numeriska svårigheter att i vissa fall utifrån CT-skanningens resultat numeriskt särskilja och identifiera fibrer som ligger mycket nära varandra. Detta kan möjligen också ha påverkat resultaten för Prov 3 och 6 som avviker något med endast  $25 \text{ kg/m}^3$  fibrer (se Tabell 11–12). Det ska i sammanhanget noteras att full överensstämmelse mellan verkligt och identifierat fiberinnehåll även finns för Prov 1, där inga fibrer förlorades i samband med gjutningen.

Vid beräkning av fiberinnehåll används den totala längden stålfibrer som erhålls från den numerisk analysen av resultat från CT-skanning. Fibertypens verkliga diameter används i beräkningen tillsammans med stålmaterialets densitet. Det ska i sammanhanget noteras att för vissa fibertyper anges densiteten men om uppgift saknas har  $7850 \text{ kg/m}^3$  använts. För till exempel den relativt vanliga fibertypen Dramix 3D (Bekaert, 2024) ges uppgift om antalet fibrer per kg. Med ett antagande att fibrerna är 35 mm långa och raka erhålls då den fiktiva densiteten på  $8175 \text{ kg/m}^3$  som använts vid beräkningarna. Denna något högre densitet beaktar då tillkommande längd av kurvaturen vid fibrernas ändkrokar samt att stålmaterialet i sig är av en högre kvalitet med något högre densitet.

## 7.2 Fiberorientering

För den gjutna plattan (Prov 1) framgår att fördelningen över vinkeln  $\theta_x$  är ojämnare jämfört med för de flesta övriga proven, med en förskjutning mot lägre vinklar. Detta tyder på att fibrerna inte är helt jämnt fördelade i plattans horisontalplan vilket kan vara en följd av gjutprocessen där möjligtvis betongen huvudsakligen har påförts från en sida till den motstående. Fiberorienteringsfaktorerna (Tabell 11) visar här en skillnad mellan  $\eta_x$  och  $\eta_y$ , vilket bekräftar att en större mängd fibrer är orienterade i x-riktningen. För x-riktningen är fördelningen mitt emellan 1D och 2D medan y-riktningens fördelning ligger mellan 2D och 3D. Fördelningen av  $\theta_z$ , det vill säga lutningen mot horisontalplanet, visar även här liksom för de sprutade proven en förskjutning mot låga vinklar och därmed mot

horisontellt liggande fibrer. Särskilt ska här noteras att höga värden på  $\theta_z$  i princip saknas och att fibrerna har placerat sig normalfördelade kring  $22,5^\circ$  och inom intervallet  $0-45^\circ$ .

De nio proven 2–10 från LKAB ger en bra möjlighet att se hur fiberorienteringen kan variera inom duplicerade prov då delserien innehåller  $3 \times 3$  st. sprutbetongcylindrar. I jämförelse med Prov 1 ses att  $\theta_{xy}$  generellt är jämnare fördelad och att  $\theta_z$  även visar visst bidrag även från höga vinklar men att majoriteten av fibrerna är orienterade med en lutning inom  $10^\circ-20^\circ$ . Figureerna med fibrer skärande de tre mittsnitten visar här att de fibrer som korsar mitt-snittet i x-riktningen genomgående har lutningsvinklar som är  $\theta_z < 45^\circ$ . Fiberorienterings-faktorerna är relativt väl samlade med medelvärden på straxt ovan 0,6, 0,6 och 0,3 för x, y och z-riktningarna, se Tabell 11. Märkbart är att för flertalet av proven ligger  $\eta_x$  och  $\eta_y$  exakt vid eller mycket nära 0,64 som indikerar en 2D orientering av fibrerna. För Prov 2–10 märks också att faktorerna för snitten,  $\eta_s$ -faktorerna, generellt ligger aningen lägre. För  $\eta_{sz}$ -fördelningarna är det flera som ligger märkbart lågt, se Prov 2, 3, 6 och 10. Här syns också att det är få fibrer som skär mittsnittet i höjddled (högra delfigureerna). Vid jämförelse med fiberorienteringen i den gjutna plattan som visas i Figur 15 ses dock att även där förekommer låga värden på orienteringsfaktorerna i z-riktningen (röda siffror). Anledningen är den koppling som finns mellan de tre koordinatriktningarnas  $\eta$ -faktorer, i princip så som anges i Ekv. (3.10–3.12).

Även Prov 11–16 visar fiberorienteringsfaktorer som är jämförbara med de för Prov 2–10, trots att det här är två prov från sprutlådor och fyra från sprutbetong på tunnelvägg. De två proven från järnvägstunneln (Prov 11–12) visar en ganska jämn fördelning över alla tre mittsnitten, vilket också till viss del styrks av  $\eta_s$ -faktorerna. Märkbart här är också avsaknaden av fibrer med stora lutningsvinklar  $\theta_z$ . För de fyra övriga prov som borrats ur tunnelvägg (Prov 13–16) är det troligt att bergets geometri haft inverkan på fiberfördelningen nära gränsskiktet berg-sprutbetong, men spridningen i resultat är här inte märkbart större än för proven tagna ur sprutlådor. Vid en jämförelse mellan Prov 13 och 14 ses att det andra uppvisar betydligt fler stående fibrer, det vill säga med högre  $\theta_z$ , än det första.

Vid tolkning av resultaten för Prov 17 måste det beaktas att provcylinderns huvudriktning är vinkelrätt sprutriktningen. Resultatmässigt märks detta på att majoriteten av fibrerna har stora lutningar  $\theta_z$  relativt horisontalplanet, det vill säga det omvända fallet relativt prover tagna i sprutriktningen. Vidare så syns också en kantring mot större vinklar  $\theta_{xy}$  i horisontalplanet, eftersom en av huvudaxlarna (y-axeln) här sammanfaller med sprutriktningen. Det är alltså helt korrekt att här inte få en jämn fördelning över vinklarna  $\theta_{xy}$ .

Vid en jämförelse mellan Prov 1 och 17 så syns skillnaden i fiberorientering också för de fibrer som skär snittet vinkelrätt x-axeln, det vill säga de rödmarkerade fibrerna i undre graferna på sid 61 och 93. För Prov 1 återfinns dessa för låga värden på både  $\theta_{xy}$  och  $\theta_z$  medan Prov 17 visar höga värden särskilt för  $\theta_z$ . För provet har också höga fiberorienteringsfaktorer i y- och z riktningarna beräknats. Särskilt gäller det  $\eta_{sz}$  vilket också

syns på antalet fibrer som korsar det horisontella cylindersnittet, se högra nedre delfiguren på sid 93. Här ska noteras att varje fiber kan vara verksam vid dragbelastning i flera huvudriktningar, vilket medtas i beräkningen av  $\eta$ -faktorerna, vilket dock inte fullt ut kan beaktas i den modell som beskrivs i Figur 12. Se här de samband som ges i Ekv. (3.10–3.12), men notera också den begränsning som den modellen har i och med att delar av den totala fibermängden indelas i andelarna  $\beta$ ,  $\omega$  och  $(1-\beta-\omega)$ . För Prov 17 motsvarar fiberorienteringen i x-led ungefär den för en 3D rymd, medan den i y-led ligger mitt emellan det förväntade värdet för fiberorientering i 2D och 1D, se avsnitt 3.2. Värdet för  $\eta_z$  är 0,65 och motsvarar därför ganska exakt en 2D orientering.

### 7.3 Beräkning av residualhållfasthet

De residualböjdraghållfastheter som har beräknats med den metod som beskrivs i avsnitt 4.3 sammanfattas i Tabell 12. För Prov 2–10 ses relativt god samstämmighet i resultaten. Medelvärdena för respektive sammanhörande Prov 2–4, 5–7 och 8–10, här uttryckt som  $[f_{R1} : f_{R3}]$ , är [3,3 : 3,0], [3,3 : 2,7] och [3,5 : 3,5] MPa. Medelvärdena ges av att de två första grupperna vardera innehåller ett prov med låg och ett med hög hållfasthet medan den tredje gruppen inte innehåller något lågt hållfasthetsvärde. Utifrån dessa relativt få prov kan man möjligen ana att sprutbetongen Typ 3 ger en något högre och jämnare kvalitet än de två övriga, där Typ 2 ger lägsta hållfasthetsvärdena, medan Typ 1 placerar sig mitt emellan. Under givna förhållandena skulle det således möjligen vara fördelaktigt att använda flyttillsats och ett kortare sprutavstånd. Även för Prov 11–14 blir medelhållfastheterna jämförbara, med  $[f_{R1} : f_{R3}] = [3,3 : 3,1]$  MPa, liksom för Prov 17 där motsvarande är [3,4 : 3,4] MPa. Här ska noteras att för såväl proven från järnvägstunneln (Prov 11–12) som för proven från vägtunneln (Prov 13–14) fanns vardera ett prov med hög och ett med låg hållfasthet. Beräkningsresultaten för borrhörnorna i Prov 15–16 gav relativt låga hållfasthetsvärden, vilket delvis kan bero på de låga tvärsnittshöjderna och den oregelbundna geometrin, se Figur 28–29. Vid jämförelse mellan Prov 2–16 och de exempel som ges i Tabell 9 för 30–40 kg/m<sup>3</sup> fiberinnehåll ses god överensstämmelse. Slutligen, för den gjutna platta varifrån Prov 1 kommer, beräknades mycket höga hållfastheter,  $[f_{R1} : f_{R3}] = [6,4 : 4,8]$  MPa.

För de beräknade hållfasthetsvärdena syns ingen direkt korrelation med fiberinnehållet. Spridningen i resultaten är relativt stor, och för de 6 prov som uppvisar de högsta beräknade hållfastheterna kan ses att medelfiberinnehållet är 33 kg/m<sup>3</sup>, med en spridning inom 29–37 kg/m<sup>3</sup>. Motsvarande för de 6 prov som uppvisar de lägsta hållfastheterna är 27 kg/m<sup>3</sup>, med en spridning inom 23–31 kg/m<sup>3</sup>. Här bör noteras att Prov 1 och 17 inte har ingått i jämförelsen.

För de prov med de lägsta hållfasthetsvärdena ses relativt genomgående att det är få fibrer som korsar det belastade vertikalsnittets nedre del, se till exempel de rödmarkerade fibrerna i nedre, mittersta delfiguren på sid 65. Detta är särskilt påtagligt för Prov 13 som innehåller 30 kg/m<sup>3</sup> fibrer men ändå ger låga hållfasthetsvärden. Vid beräkningarna påverkas residualböjdraghållfastheten såklart av eventuell fiberbrist längs den dragna

underkanten av modellerat böjt balktvärsnitt. Det har till viss del beaktats för de prov som består av borrkärnor, genom att bortse från en del av provens bottensektion. Detta har gjorts för Prov 13–16, där endast de övre 99, 105, 60 och 72 mm av cylindrarnas höjd har medtagits i beräkningarna,

Beräkningsmodellen som sammanfattas i Tabell 8 ger olika svar beroende på förhållandet mellan  $F_c$  och  $F_{f1}$ , det vill säga mellan tryckspänningarnas kraftresultant i betongen och en av stålfibrernas kraftresultant i drag. Om  $F_c < F_{f1}$  antas att stålfiberbetongens residual-draghållfasthet är konstant mellan spricktöjningen  $\varepsilon_{ct}$  och maxtöjningen  $\varepsilon_{fu}$ , så som visas i Figur 20(a). Detta innebär att beräkningsresultaten ges som  $f_{R1} = f_{R3}$ . Om  $F_c > F_{f1}$  antas istället en spänning-töjningsvariation enligt Figur 20(b) och således är  $f_{R1} > f_{R3}$ . I sammanställningen i Tabell 12 ses att för de prov då töjningssambandet (a) har antagits har alla ett fiberinnehåll som ligger bland de högre, det vill säga på 30 kg/m<sup>3</sup> eller mer. Det är endast Prov 4 som innehåller mer fibrer än så och som ändå uppvisar en spänning-töjningsvariation enligt Figur 20(b).

Då uppgift om tryckhållfasthet hos sprutbetongen saknas måste denna antas för att ingå i Ekv. (4.4). Betonghållfastheten ansätts som cylindertryckhållfastheten om denna har bestämts genom provning, men om uppgift saknas antas  $\sigma_c = 40$  MPa. För Prov 2–10 har uppmätta cylinderhållfastheter inom 46–48 MPa rapporterats in och därför har beräkningarna genomförts baserat på dessa. För betongplattan varifrån Prov 1 har tagits har provning (Rengarajan, 2020) gett en kubtryckhållfasthet på 62 MPa, vilket motsvarar en cylinderhållfasthet på 50 MPa, vilket har använts i beräkningen. För samtliga övriga prov har  $\sigma_c = 40$  MPa antagits i beräkningarna. För att uppskatta vikten av rätt antaganden har beräkningar gjorts för flertalet av proven där tryckhållfastheten insatts som 30, 40 och 50 MPa. Detta har visat att en ökning eller minskning av tryckhållfastheten med  $\pm 10$  MPa ger en förändring på i storleksordningen  $\pm 1$ -3% i  $f_{R1}$  och  $f_{R3}$ . Resultaten visar dock att  $x$  minskar med ökande  $\sigma_c$  samtidigt som  $f_{R1}$  och  $f_{R3}$  minskar. Detta samband kan förklaras genom att studera uttrycket för  $f_{fd,R1}$  enligt steg 6 i beräkningsalgoritmen i Tabell 8. Tryckzonhöjden  $x$  minskar naturligt då betongens tryckhållfasthet och  $F_c$  ökar. Detta medför att den del av höjden ( $h-x$ ) där dragna fiber finns ökar, tillsammans med  $F_{f1}$ . Förändringen i ( $2F_c - F_{f1}$ ) blir därmed liten. Sammantaget med ökningen i ( $h-x$ ) ger detta en liten minskning i  $f_{fd,R1}$ .

För Prov 1 har de höga hållfastheterna [ $f_{R1} : f_{R3}$ ] = [6,4 : 4,8] MPa beräknats. Detta kan jämföras med de hållfastheter som bestämts genom provning av Rengarajan (2020). Provningarna genomfördes enligt SS-EN 14488-3 (2006) och redovisas därför som spänningar vid 0,5 till 5,0 mm nedböjning. Genom interpolering fås värden motsvarande [ $f_{R1} : f_{R3}$ ] = [5,7 : 5,4] MPa, vilket får anses vara i relativt god överensstämmelse med de beräknade hållfastheterna.

För Prov 11–12 från järnvägstunneln har opublicerade provningsbaserade hållfasthetsvärden i protokollform kunnat hämtats in efter att proven tomografiundersökts. För varje prov finns resultat i form av  $f_{f1}$ ,  $f_{f2}$  och  $f_{f4}$ , vardera baserade på tre provbalkar. Om



motsvarande värde för  $f_{r3}$  approximeras som medelvärdet mellan  $f_{r2}$  och  $f_{r4}$  fås för Prov 11 att  $[f_{R1} : f_{R3}] = [4,3 : 4,1]$  MPa, vilket ska jämföras med beräknade  $[3,8 : 3,8]$  MPa. För Prov 12 är hållfastheterna enligt provning  $[3,7 : 3,5]$  MPa, vilket ska jämföras med de beräknade hållfastheterna som endast är  $[2,8 : 2,0]$  MPa. Överensstämmelsen är således relativt god för Prov 11 medan skillnaden är större för Prov 12, där också spridningen i enskilda provresultat var betydligt större. För den provbalk som gav den lägsta hållfastheten registrerades dock  $[3,1 : 2,8]$  MPa, vilket ligger betydligt närmare de beräknade hållfastheterna.

#### 7.4 Rekommendationer för fortsatt undersökning

Vid fortsatta undersökningar av fiberinnehåll i sprutbetong med den metodik som använts här bör det särskilt fokuseras på att inhämta underlag för att verifiera beräkningsmodellen för residualbärförmåga. För detta gäller att inhämta provcylindrar från sprutlådor varifrån samtidigt balkar för böjprovning uttas, samt cylindrar eller kuber för tryckhållfasthetsprovning. I sammanhanget bör man också noggrant ta prover för att fastställa fiberinnehållet i den färska betongen, vid inblandning i betongblandaren, vid omlastning till betongbil eller annat transportmedel och vid överföring till sprututrustningen. Även mängden återstuds bör om möjligt uppskattas, dels genom insamling av sprutbetongmaterial från marken och genom krossning av borrhärdar vars frilagda fibrer mäts och räknas.

Det är också önskvärt att ett större antal borrhärdar tagna direkt ur sprutbetong på berg kan komma att undersökas. Detta för att få en uppfattning om de variationer som finns i tunnarnas sprutbetong och vilka miljöer och förhållanden som är gynnsamma för kvaliteten och effektiviteten hos fibersprutbetong. Även äldre sprutbetong som nedbrutits med tiden eller på annat sätt skadats bör undersökas på detta sätt för att fastställa orsak-verkanssamband som kan leda till skador med ringa eller allvarliga konsekvenser som följd.

I förlängningen är det mycket önskvärt att kunna jämföra effektiviteten hos stålfibrer med motsvarande hos fibrer av andra material, till exempel olika plaster eller basalt. Påbörjade pilotstudier visar dock att det är relativt svårt att utifrån bilder inhämtade genom CT-skanning på ett säkert sätt identifiera fibrer av andra material. Det är relativt enkelt att tydligt se stålfibrer i en betongvolym eftersom stål är det tätaste materialet i stålfiberarmerad betong. Men för till exempel bassaltfibrer fås en situation då fibrerna kan ha samma täthet som ballastmaterialet, stenen och gruset, i betongen. Då det gäller de flesta plastfibrer så har de en täthet som istället ligger nära cementmatrisen i betongen. För att nå upp till nuvarande metods tillförlitlighet på 85-90% tillförlitlighet då det gäller att identifiera mängden stålfibrer krävs ytterligare avancerade numeriska rutiner. Då dessa är framtagna och fungerande får undersökningsmetoden ytterligare användningsområden och dess attraktion ökar avsevärt som verktyg i arbetet med att optimera och effektivisera fiberarmerade sprutbetongförstärkningar i tunnlar.



## LITTERATUR

- Ansell A. *Datortomografi som undersökningsmetod för att beskriva orientering av stålfibrer i sprutad och gjuten betong för tunnlar*, BeFo Rapport 217, 2021.
- Ansell A, Ahmed L, Guarin A. *Datortomografi som undersökningsmetod för ung och gammal, sprutad och gjuten betong för tunnlar*, BeFo Rapport 165, 2016.
- Armelin HS, Banthia N. "Steel fiber rebound in shotcrete". *Concrete International*, September, 78-83 (2007).
- Austin SA, Peaston CH, Robins PJ. "Material and fibre losses with fibre reinforced sprayed concrete". *Construction and Building Materials*, 11, 291-298 (1997).
- Banthia N, Bindiganavile V. "Fiber-reinforced shotcrete – Comparing the properties of dry- and wet-mix shotcrete reinforced with steel fibers". *Concrete International*, April, 53-58 (2007).
- Banthia N, Trottier J-F, Wood D, Beaupre D. "Influence of fiber geometry in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete". *Concrete International*, May, 24-28 (1992).
- Banthia N, Trottier J-F, Wood D, Beaupre D. "Influence of fiber geometry in steel fiber reinforced wet-mix shotcrete". *Concrete International*, June, 27-32 (1994).
- Bekaert. *Datasheet – Dramix 3D*, <https://www.bekaert.com/en/product-catalog/content/dop/dramix3d>. Bekaert, Zwevegem, Belgium, 2024.
- Castellón RC, Alberti MG, Gálvez JC, Vera-Agulló J, Pina-Zapardiel R. "Comparison of the mechanical properties of fiber reinforced shotcrete at laboratory and on-site conditions" (Not peer-reviewed). *Preprints*, 2022060037 (2022).
- de Rivaz B. "Fibre reinforced spray concrete: Minimum performance requirement to meet safety needs". Proceedings: *Shotcrete for Underground Support XII*, Singapore, 2015.
- Dupont D, Vandewalle L. "Distribution of steel fibres in rectangular sections". *Cement and Concrete Composites*, 27, 391–398 (2005).
- Grimheden D. *Orientering hos stålfibrer i betong*. Examensarbete, KTH Betongbyggnad, Stockholm, 2003.
- Holmgren J, Silfwerbrand J. *Steel fibre concrete. Compendium for AF2102 Concrete Structures, advanced course*, KTH, Stockholm, 2017.
- 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](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).
- Kobayashi IK. "Developments of fibre reinforced concrete in Japan", *Cement and concrete composites*, 5(1), 27-40 (1983).
- Larsson P. *Optimization of the steel-fiber dosage in shotcrete used in the Kankberg mine*. Master Thesis, Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå, 2018.
- Lindlar B, Jahn M, Schlumpf J. *SIKA Sprayed concrete handbook*, Sika Services AG, Zürich, 2021.
- Lorente S, Carmona S, Molins C. "Use of fiber orientation factor to determine residual strength of steel fiber reinforced concrete". *Construction and Building Materials*, 360, 128878 (2022).
- Löfgren I. "Fiberarmerad betong – materialprovning och strukturanalys baserad på brottmekanik". *Bygg & teknik*, 7/06, 2006.
- Matlab, *The language of technical computing*, <http://se.mathworks.com/products/matlab/>. 2024.
- 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.
- Oustampasidis A. *Fiber distribution in readymix concrete*. Examensarbete, KTH Betongbyggnad, Stockholm, 2019.
- Rengarajan M. *Laboratory testing of shotcrete with fibres of steel, basalt or synthetic materials*. Examensarbete, KTH Betongbyggnad, Stockholm, 2020.
- Sjölander A, Ansell A, Nordström E. "On the design of permanent rock support using fibre-reinforced shotcrete". *Fibers*, 11, 20 (2023).
- Svec O, Nyholm Thrane L, Stang H. "Linking the fibre orientation factor with the mechanical response of the fibre reinforced self-compacting concrete". *Nordic Concrete Research*, 49, 17-26 (2014).

### **Standarder och riktlinjer**

SS-EN 14487-1:2022. Sprutbetong – Del 1: Definitioner, specifikationer och kriterier för överensstämmelse. SIS, Stockholm (2022).

SS-EN 14488-3:2006. Provning av sprutbetong – Del 3: Böjdraghållfasthet (sprick-, maximal- och residualhållfasthet) hos fiberarmerade provbalkar. SIS, Stockholm (2006).

SS-EN 14488-3:2023. Provning av sprutbetong – Del 3: Böjdraghållfasthet (sprick-, maximal- och residualhållfasthet) hos fiberarmerade provbalkar. SIS, Stockholm (2023).

SS-EN 14488-7:2006. Provning av sprutbetong – Del 7: Fiber mängd hos fiberarmerad betong. SIS, Stockholm (2006).

SS-EN 14651:2005. Provningmetod för betong med metallfibrer – Bestämning av böjdraghållfasthet. SIS, Stockholm (2007).

SS-EN 14721:2005. Provningmetod för betong med metallfibrer – Bestämning av fiberinnehållet i färsk och hårdnad betong. SIS, Stockholm (2007).

SS-EN 1992-1-1:2005. Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner. Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader. SIS, Stockholm (2005).

SS-EN 206:2013. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse. SIS, Stockholm (2013).

SS 812310:2014. Fiberbetong – Dimensionering av fiberbetongkonstruktioner. SIS, Stockholm (2014).



## BILAGA

### Sammanställda resultat för CT-skannade och utvärderade prov 1-17

Prov nr.	från Låda/Platta/Vägg	Diameter	Höjd
1. Gjuten platta (referens)	P	ϕ79 mm	79 mm
2. LKAB - Typ 1, prov 1:3	L	ϕ94 mm	280 mm
3. LKAB - Typ 1, prov 2:3	L	ϕ94 mm	267 mm
4. LKAB - Typ 1, prov 3:3	L	ϕ94 mm	271 mm
5. LKAB - Typ 2, prov 1:3	L	ϕ94 mm	248 mm
6. LKAB - Typ 2, prov 2:3	L	ϕ94 mm	272 mm
7. LKAB - Typ 2, prov 3:3	L	ϕ94 mm	239 mm
8. LKAB - Typ 3, prov 1:3	L	ϕ94 mm	275 mm
9. LKAB - Typ 3, prov 2:3	L	ϕ94 mm	272 mm
10. LKAB - Typ 3, prov 3:3	L	ϕ94 mm	275 mm
11. Järnvägstunnel - Prov 1	L	ϕ90 mm	194 mm
12. Järnvägstunnel - Prov 2	L	ϕ90 mm	211 mm
13. Vägtunnel - Prov 1	V	ϕ70 mm	113 mm
14. Vägtunnel - Prov 2	V	ϕ70 mm	120 mm
15. Borrkärna från sprutbetong i flera lager	V	ϕ72 mm	60 mm
16. Borrkärna från sprutbetong på bergkil	V	ϕ72 mm	72 mm
17. Borrkärna från sprutad provbalk	P	ϕ56 mm	131 mm

## PROV 1: Gjuten platta (referens)

**Beskrivning:** Borrkärna från platta provad av Vattenfall för KTH-exjobb (Muraldiharan, 2020). Fibrer Dramix 3D 65/35.

Vct 0,41, Anläggningscement 500 kg/m<sup>3</sup>.

**Fiberinnehåll:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,71$     $\eta_y = 0,57$     $\eta_z = 0,30$

$\eta_{sx} = 0,73$     $\eta_{sy} = 0,56$     $\eta_{sz} = 0,37$

**Tryckhållfasthet:**

Uppmätt, kub 62 MPa (cylinder ca 50 MPa)

**Residualdraghållfasthet:**

$f_{t,R1} = 2,9$  MPa    $f_{t,R3} = 1,8$  MPa

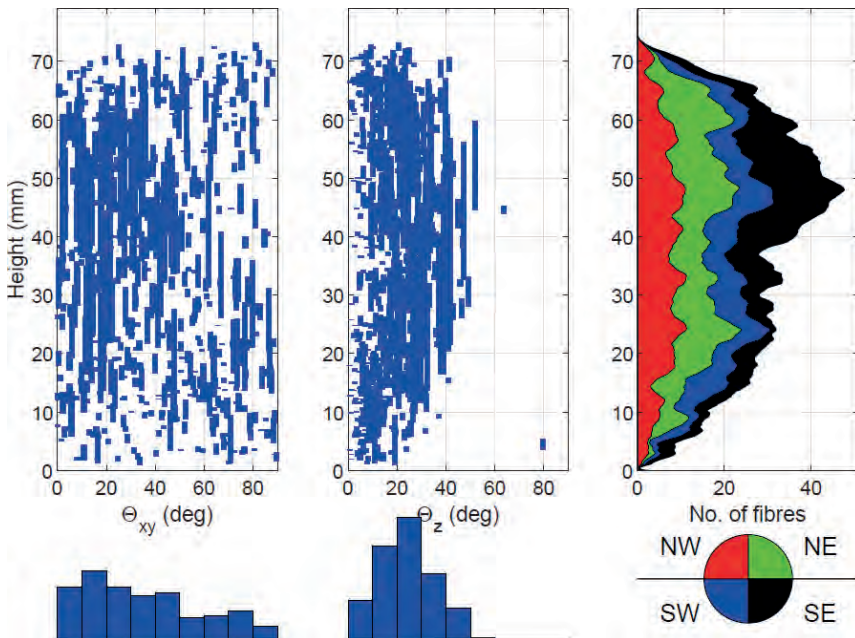
**Residualböjdraghållfasthet:**

$f_{R1} = 6,4$  MPa    $f_{R3} = 4,8$  MPa

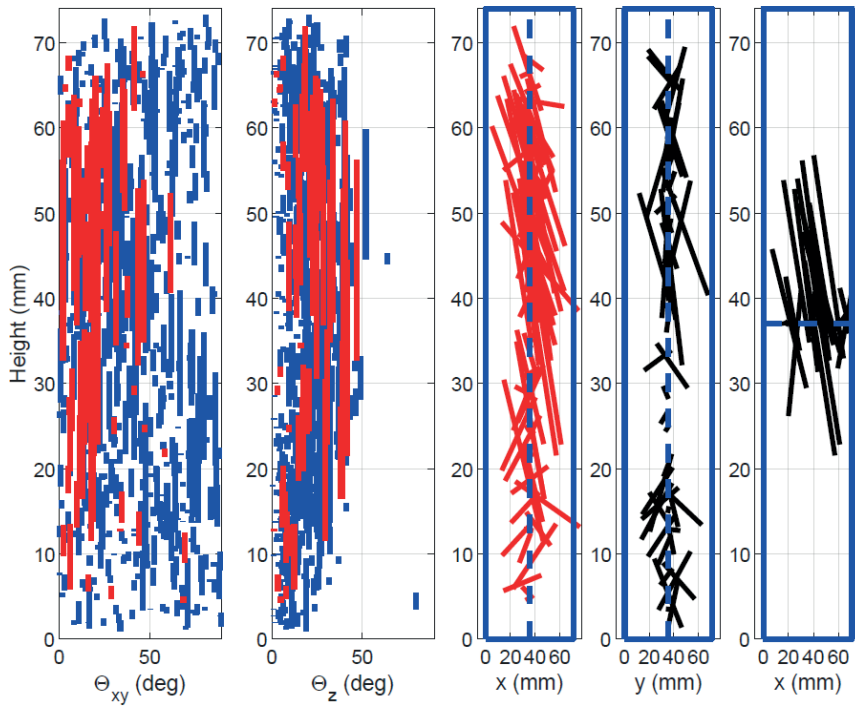
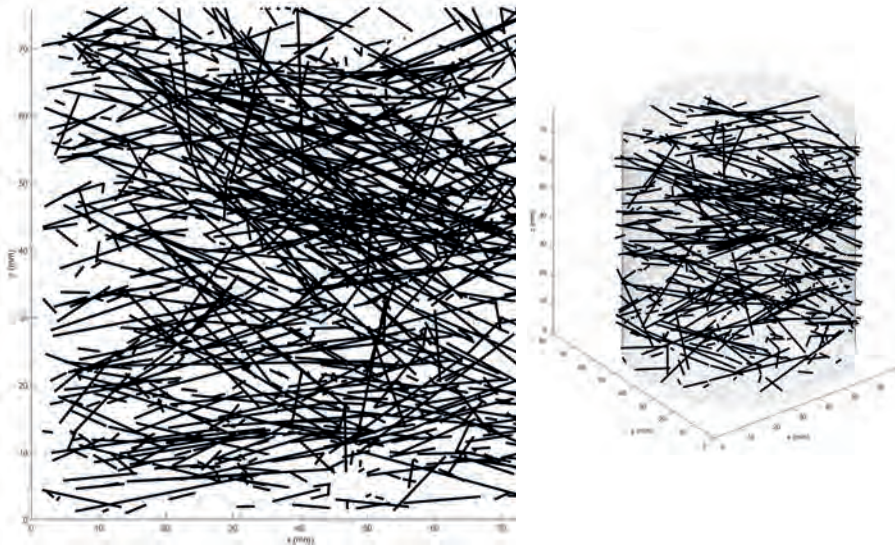
**Klassificering:** C50/60 – R16/R34

Duktilitetsklass 2 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,8$ )   D1S4

**Diameter:** 79 mm   **Höjd:** 79 mm   **Tryckzonshöjd:** 4 mm   **Inre hävarm:** 37 mm







## PROV 2: LKAB - Typ 1, prov 1:3

**Beskrivning:** Sprutavstånd 2 m, Sättnått 130 mm. 2313 kg/m<sup>3</sup>.

Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.

**Fiberinnehåll:** 31 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,64$     $\eta_y = 0,64$     $\eta_z = 0,33$

$\eta_{sx} = 0,60$     $\eta_{sy} = 0,62$     $\eta_{sz} = 0,25$

**Tryckhållfasthet:**

Uppmätt, cylinder 48 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

( $f_{it,R1} = 1,4$  MPa)    $f_{it,R3} = 1,4$  MPa

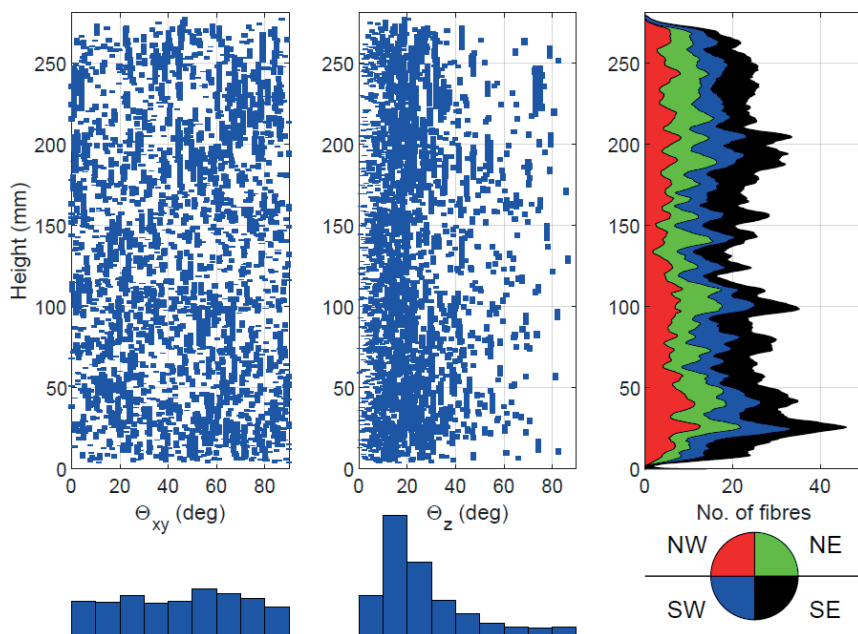
**Residualböjdraghållfasthet:**

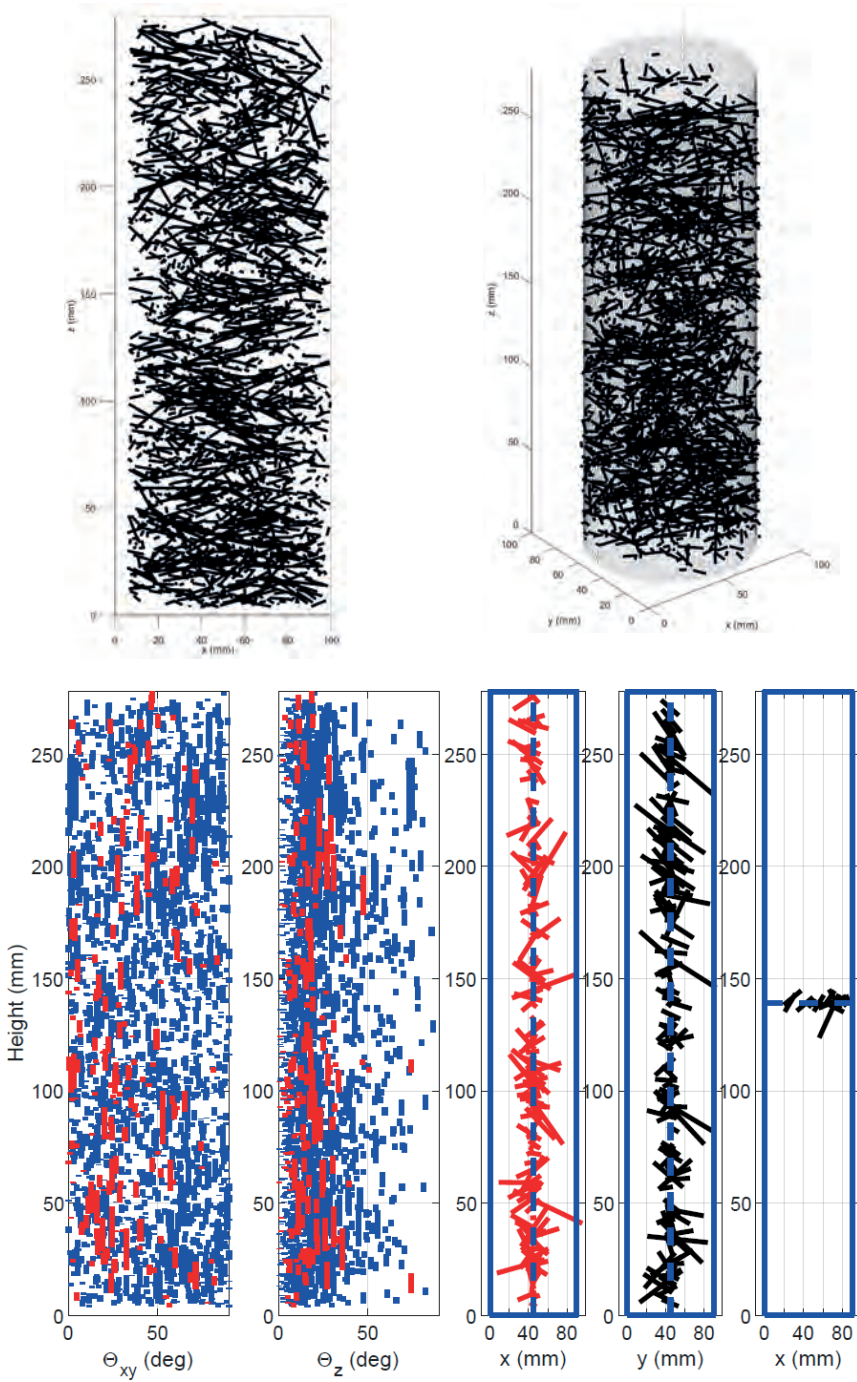
( $f_{R1} = 3,6$  MPa)    $f_{R3} = 3,6$  MPa

**Klassificering:** C45/55 – R13/R33

Duktilitetsklass 3 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ )   D1S3

**Diameter:** 94 mm   **Höjd:** 280 mm   **Tryckzonshöjd:** 10 mm   **Inre hävarm:** 156 mm





### PROV 3: LKAB - Typ 1, prov 2:3

**Beskrivning:** Sprutavstånd 2 m, Sättmått 130 mm. 2313 kg/m<sup>3</sup>.

Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.

**Fiberinnehåll:** 25 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,63$     $\eta_y = 0,65$     $\eta_z = 0,31$

$\eta_{sx} = 0,50$     $\eta_{sy} = 0,52$     $\eta_{sz} = 0,16$

**Tryckhållfasthet:**

Uppmätt, cylinder 48 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

$f_{it,R1} = 1,1$  MPa    $f_{it,R3} = 0,8$  MPa

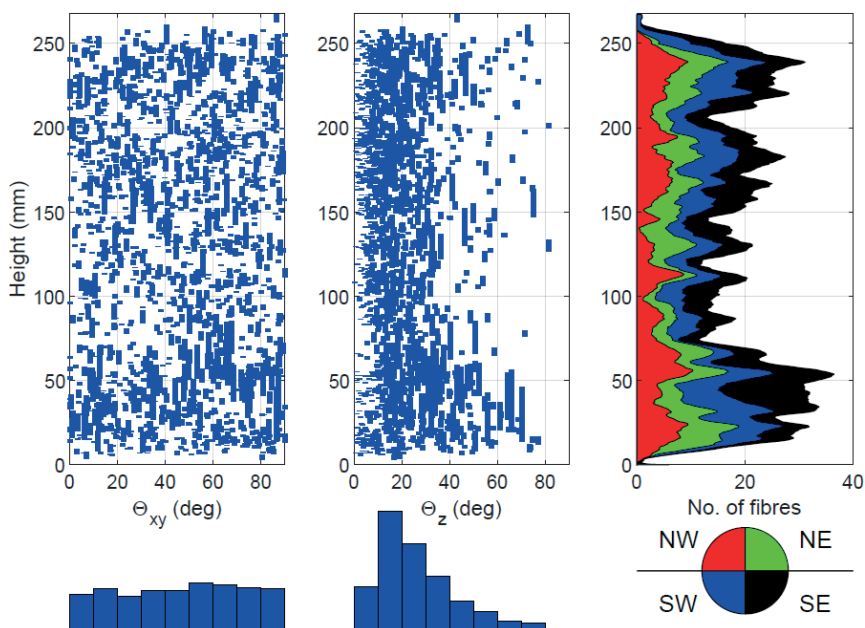
**Residualböjdraghållfasthet:**

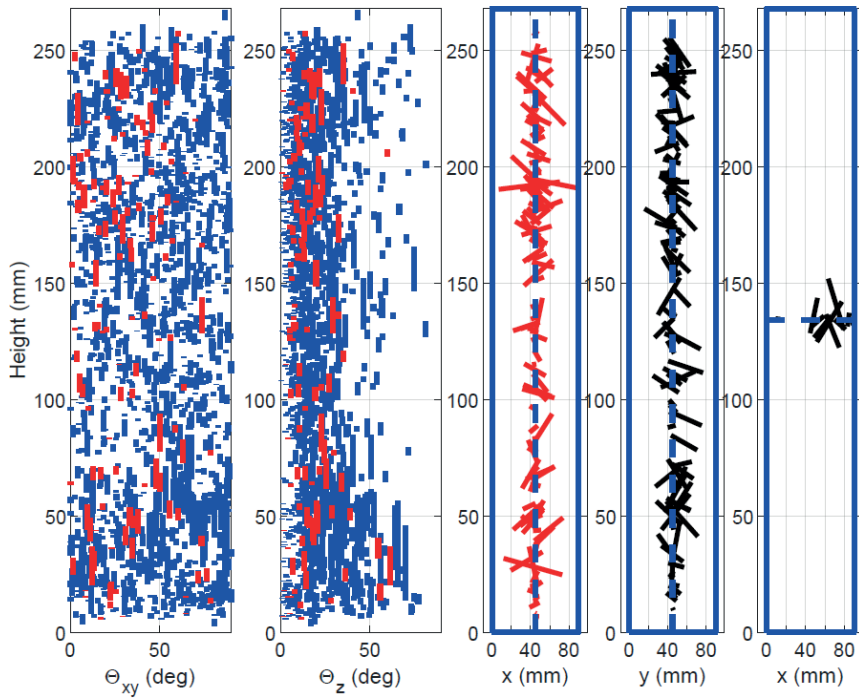
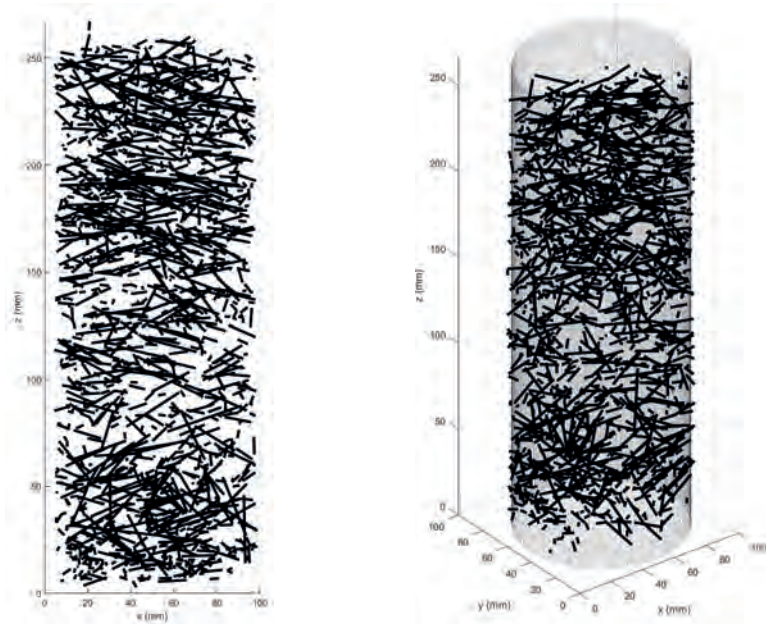
$f_{R1} = 2,5$  MPa    $f_{R3} = 2,3$  MPa

**Klassificering:** C45/55 – R<sub>1</sub>2/R<sub>3</sub>2

Duktilitetsklass 3 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,9$ )   D1S2

**Diameter:** 94 mm   **Höjd:** 267 mm   **Tryckzonhöjd:** 7 mm   **Inre hävarm:** 128 mm





**PROV 4: LKAB - Typ 1, prov 3:3****Beskrivning:** Sprutavstånd 2 m, Sättmått 130 mm. 2313 kg/m<sup>3</sup>.

Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.**Fiberinnehåll:** 35 kg/m<sup>3</sup>**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>**Fiberorienteringsfaktorer:**

$$\eta_x = 0,63 \quad \eta_y = 0,64 \quad \eta_z = 0,40$$

$$\eta_{sx} = 0,57 \quad \eta_{sy} = 0,57 \quad \eta_{sz} = 0,54$$

**Tryckhållfasthet:**

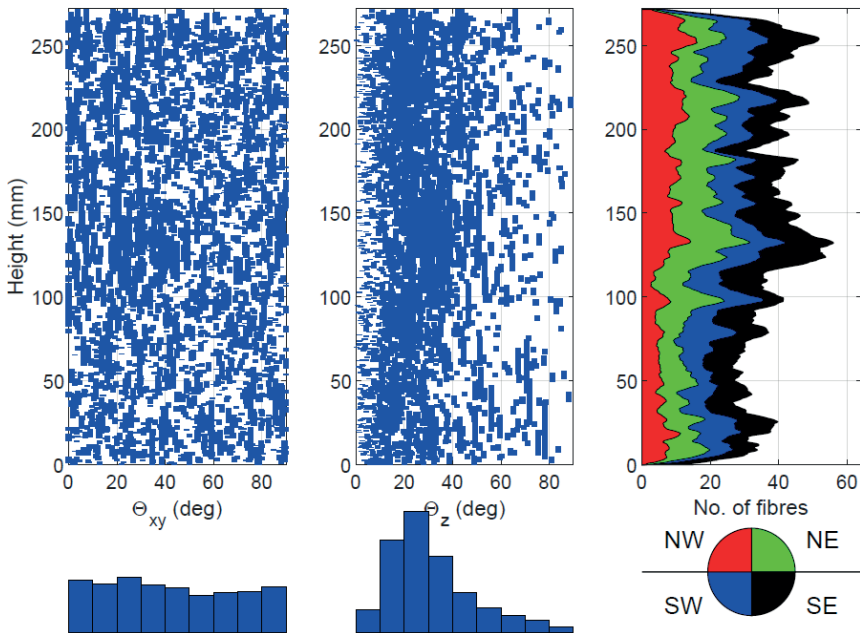
Uppmätt, cylinder 48 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

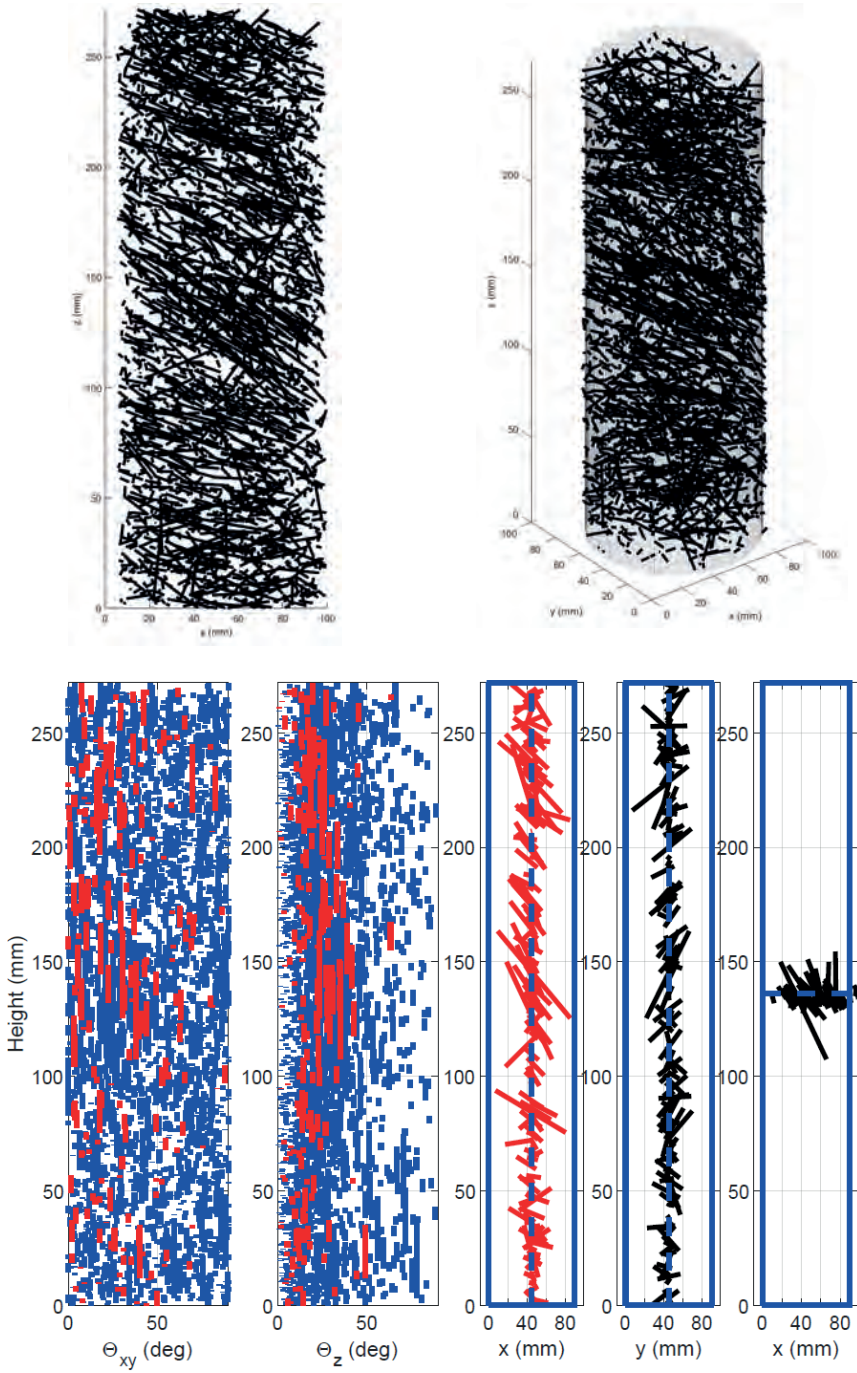
$$f_{it,R1} = 1,8 \text{ MPa} \quad f_{it,R3} = 1,1 \text{ MPa}$$

**Residualböjdraghållfasthet:**

$$f_{R1} = 3,9 \text{ MPa} \quad f_{R3} = 3,0 \text{ MPa}$$

**Klassificering:** C45/55 – R13/R33 Duktilitetsklass 2 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,7$ ) D1S3**Diameter:** 94 mm **Höjd:** 271 mm **Tryckzonshöjd:** 10 mm **Inre hävarm:** 126 mm





## PROV 5: LKAB - Typ 2, prov 1:3

**Beskrivning:** Sprutavstånd 3 m, Sättmått 130 mm. 2316 kg/m<sup>3</sup>.

Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.

**Fiberinnehåll:** 32 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,63$     $\eta_y = 0,64$     $\eta_z = 0,30$

$\eta_{sx} = 0,71$     $\eta_{sy} = 0,67$     $\eta_{sz} = 0,37$

**Tryckhållfasthet:**

Uppmätt, cylinder 46 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

$f_{it,R1} = 1,8$  MPa    $f_{it,R3} = 1,1$  MPa

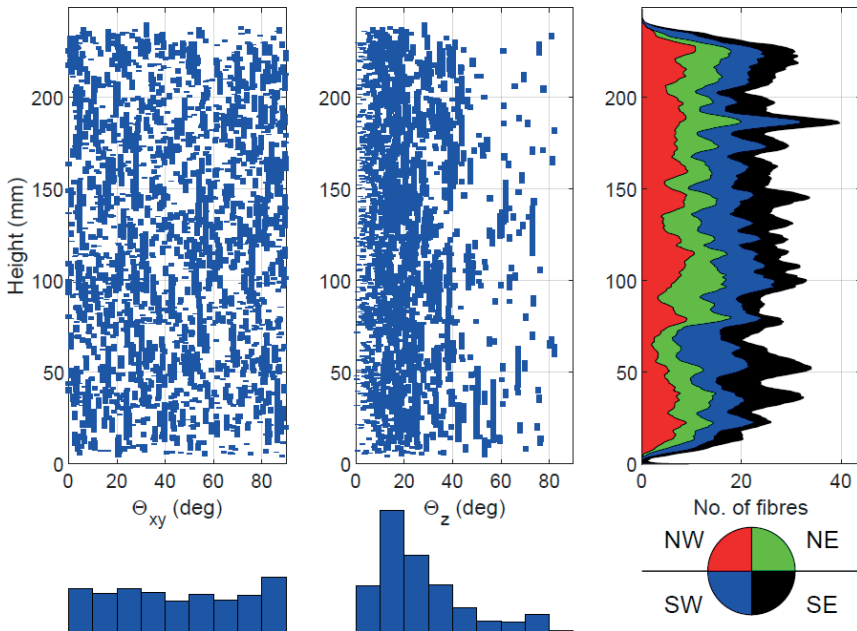
**Residualböjdraghållfasthet:**

$f_{R1} = 4,0$  MPa    $f_{R3} = 3,0$  MPa

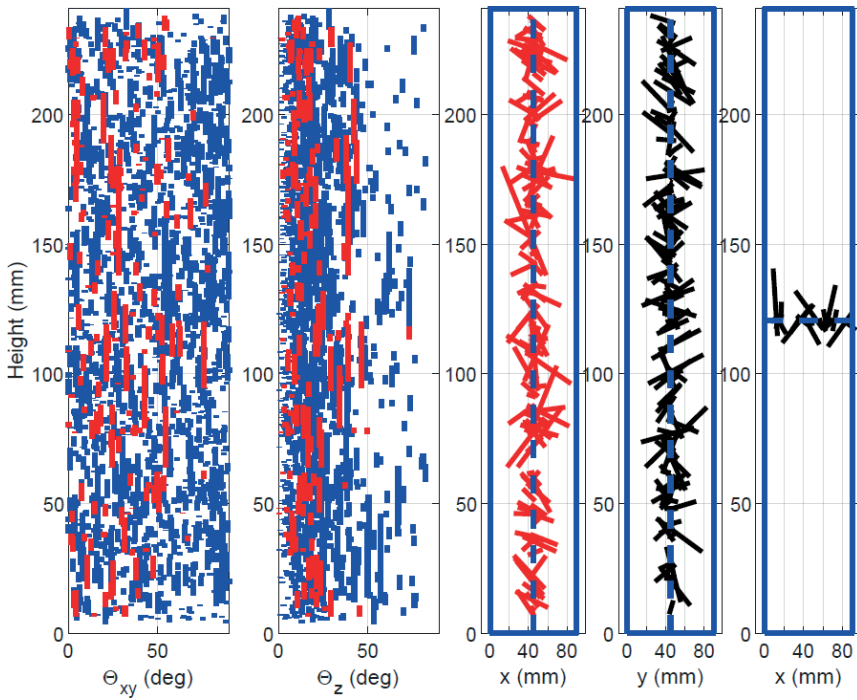
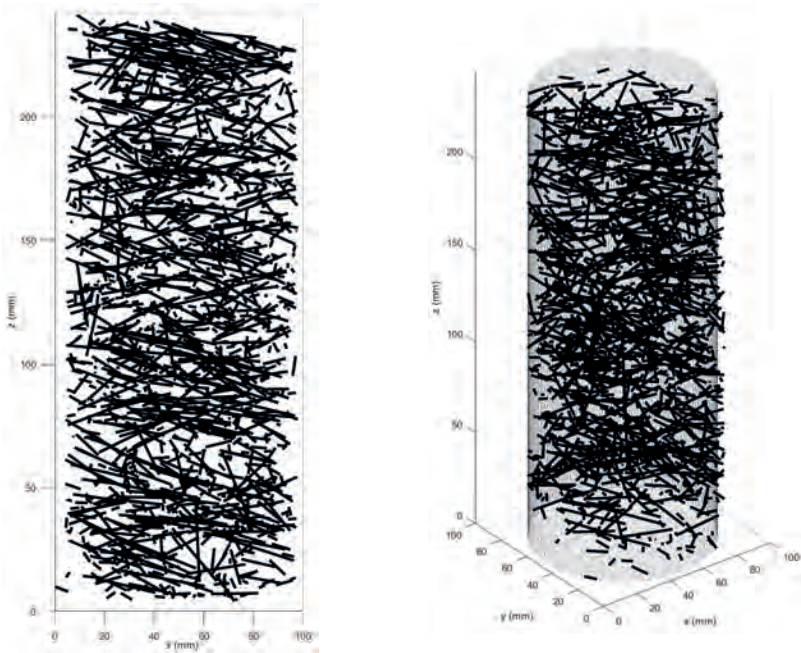
**Klassificering:** C45/55 – R14/R33

Duktilitetsklass 2 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,7$ )   D1S4

**Diameter:** 94 mm   **Höjd:** 248 mm   **Tryckzonshöjd:** 9 mm   **Inre hävarm:** 115 mm







## PROV 6: LKAB - Typ 2, prov 2:3

**Beskrivning:** Sprutavstånd 3 m, Sättnått 130 mm. 2316 kg/m<sup>3</sup>.

Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.

**Fiberinnehåll:** 25 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,62$     $\eta_y = 0,66$     $\eta_z = 0,31$

$\eta_{sx} = 0,51$     $\eta_{sy} = 0,51$     $\eta_{sz} = 0,19$

**Tryckhållfasthet:**

Uppmätt, cylinder 46 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

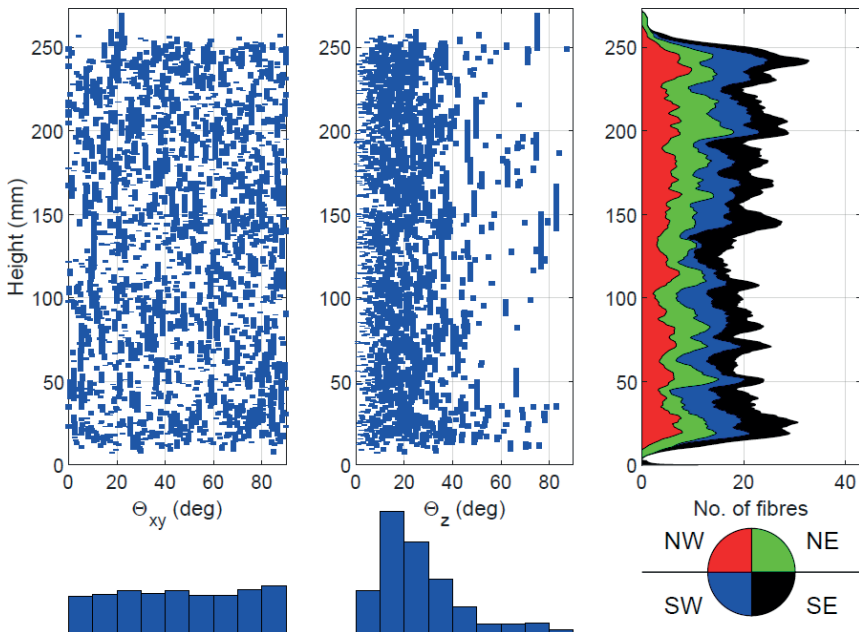
$f_{it,R1} = 1,2$  MPa    $f_{it,R3} = 0,8$  MPa

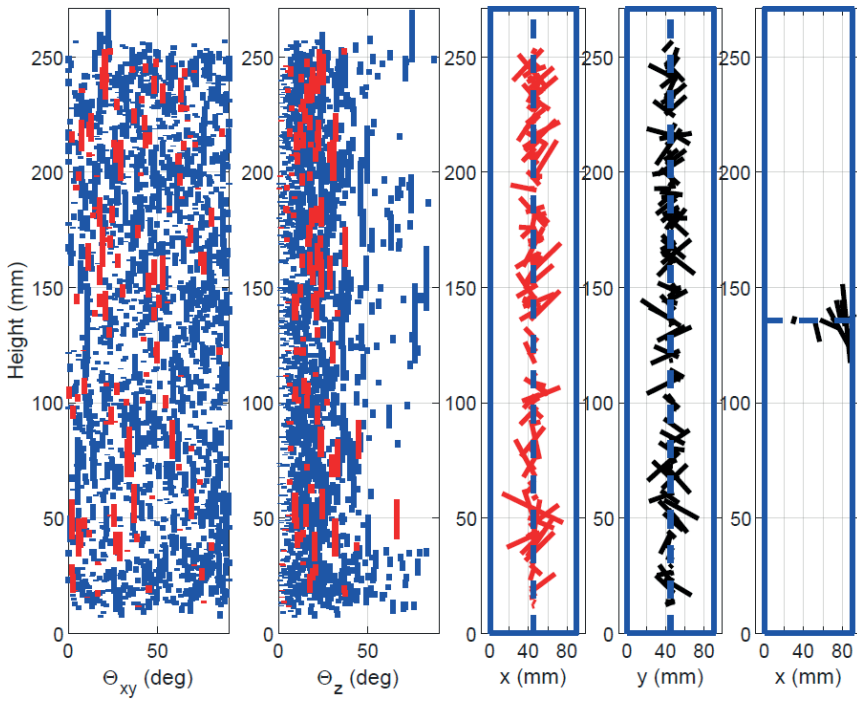
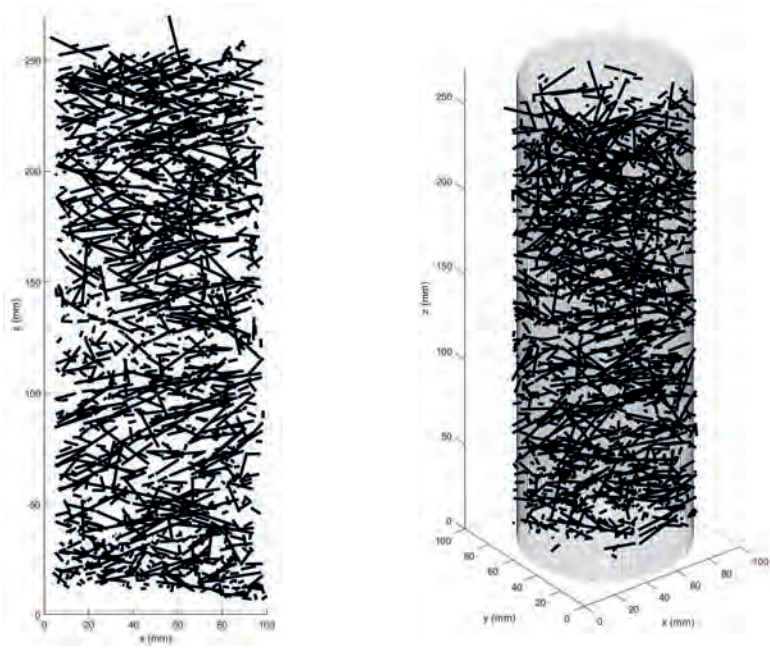
**Residualböjdraghållfasthet:**

$f_{R1} = 2,7$  MPa    $f_{R3} = 2,0$  MPa

**Klassificering:** C45/55 – R<sub>1</sub>2/R<sub>3</sub>2   Duktilitetsklass 2 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,7$ )   D1S2

**Diameter:** 94 mm   **Höjd:** 272 mm   **Tryckzonshöjd:** 7 mm   **Inre hävarm:** 125 mm





**PROV 7: LKAB - Typ 2, prov 3:3****Beskrivning:** Sprutavstånd 3 m, Sättnått 130 mm. 2316 kg/m<sup>3</sup>.

Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.**Fiberinnehåll:** 29 kg/m<sup>3</sup>**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>**Fiberorienteringsfaktorer:**

$$\eta_x = 0,65 \quad \eta_y = 0,62 \quad \eta_z = 0,32$$

$$\eta_{sx} = 0,52 \quad \eta_{sy} = 0,57 \quad \eta_{sz} = 0,38$$

**Tryckhållfasthet:**

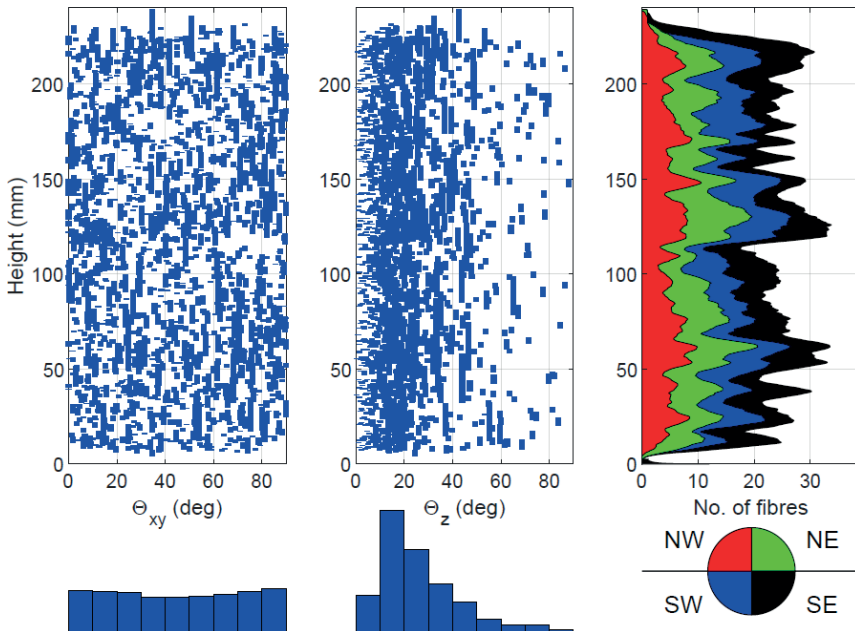
Uppmätt, cylinder 46 MPa.

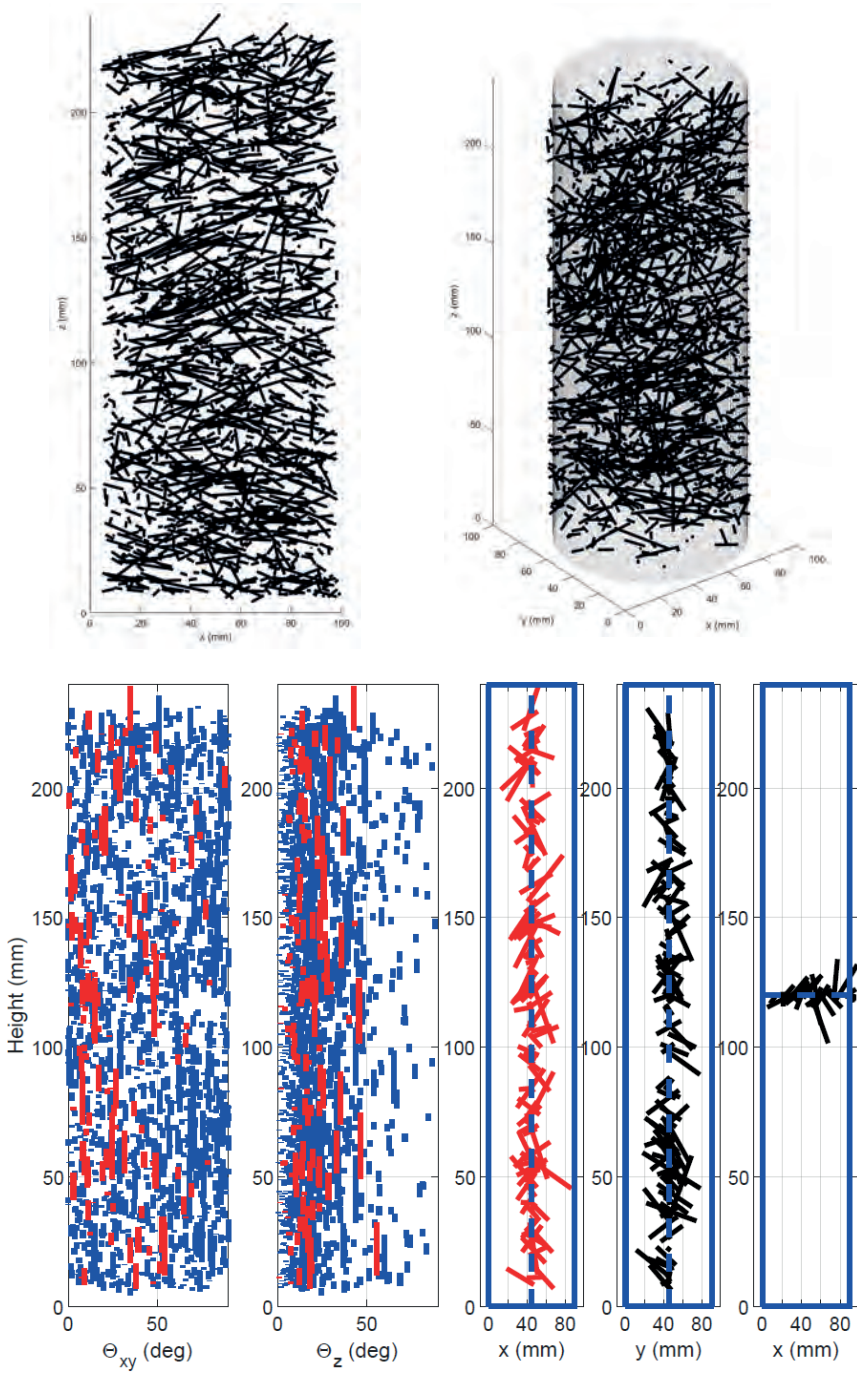
**Residualdraghållfasthet:**

$$(f_{it,R1} = 1,4 \text{ MPa}) \quad f_{it,R3} = 1,1 \text{ MPa}$$

**Residualböjdraghållfasthet:**

$$(f_{R1} = 3,1 \text{ MPa}) \quad f_{R3} = 3,1 \text{ MPa}$$

**Klassificering:** C45/55 – R13/R33Duktilitetsklass 3 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ ) D1S3**Diameter:** 94 mm **Höjd:** 239 mm **Tryckzonshöjd:** 7 mm **Inre hävarm:** 120 mm



**PROV 8: LKAB - Typ 3, prov 1:3**

**Beskrivning:** Sprutavstånd 2 m, Flytsättmått 500 mm. 2332 kg/m<sup>3</sup>.  
Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.

**Fiberinnehåll:** 32 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$$\eta_x = 0,62 \quad \eta_y = 0,66 \quad \eta_z = 0,36$$

$$\eta_{sx} = 0,52 \quad \eta_{sy} = 0,66 \quad \eta_{sz} = 0,29$$

**Tryckhållfasthet:**

Uppmätt, cylinder 46 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

$$(f_{it,R1} = 1,5 \text{ MPa}) \quad f_{it,R3} = 1,2 \text{ MPa}$$

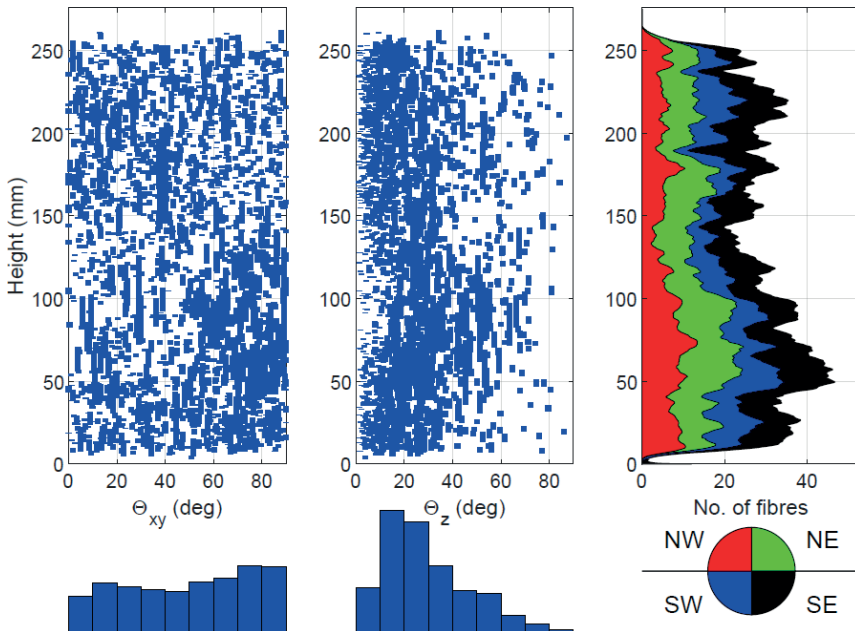
**Residualböjdraghållfasthet:**

$$(f_{R1} = 3,3 \text{ MPa}) \quad f_{R3} = 3,3 \text{ MPa}$$

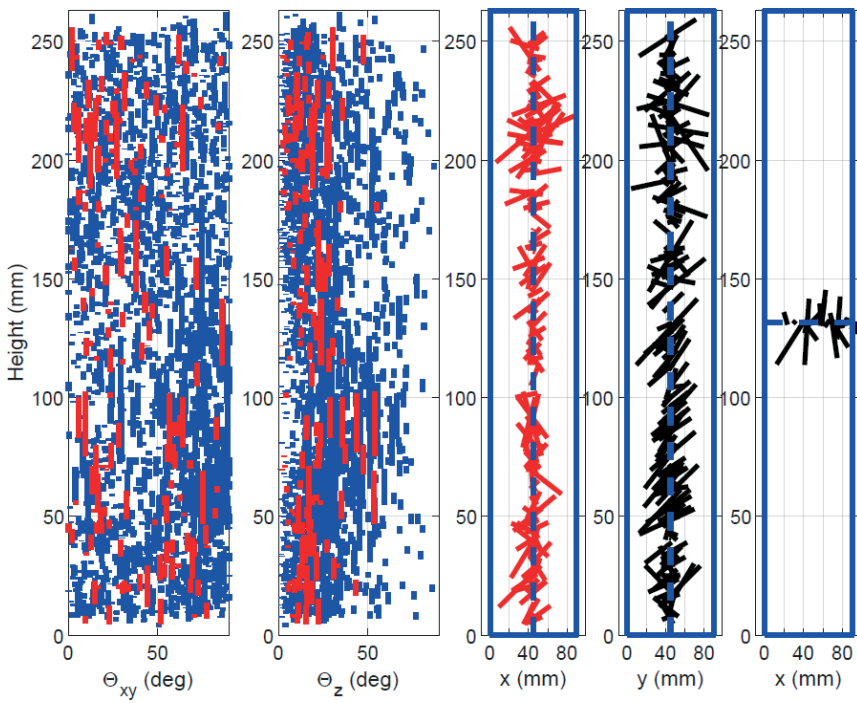
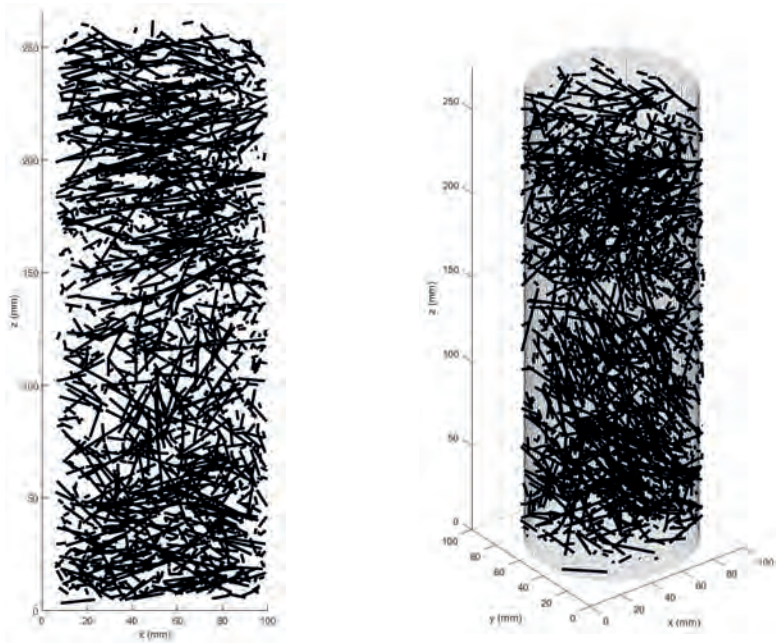
**Klassificering:** C45/55 – R13/R33

Duktilitetsklass 3 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ ) D1S3

**Diameter:** 94 mm **Höjd:** 275 mm **Tryckzonshöjd:** 9 mm **Inre hävarm:** 139 mm







**PROV 9:****LKAB - Typ 3, prov 2:3****Beskrivning:**Sprutavstånd 2 m, Flytsättmått 500 mm. 2332 kg/m<sup>3</sup>.

Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.**Fiberinnehåll:** 29 kg/m<sup>3</sup>**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>**Fiberorienteringsfaktorer:**

$$\eta_x = 0,69 \quad \eta_y = 0,59 \quad \eta_z = 0,33$$

$$\eta_{sx} = 0,63 \quad \eta_{sy} = 0,53 \quad \eta_{sz} = 0,31$$

**Tryckhållfasthet:**

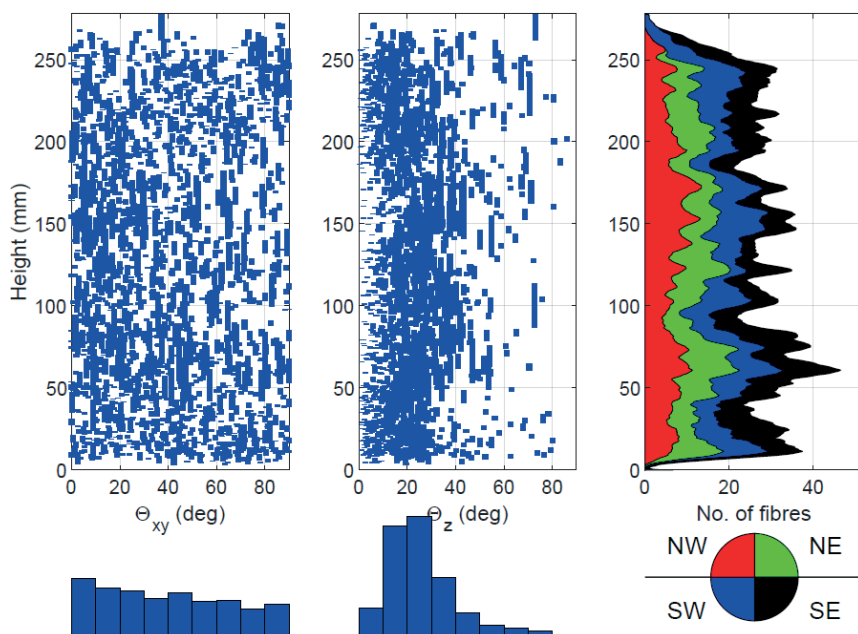
Uppmätt, cylinder 46 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

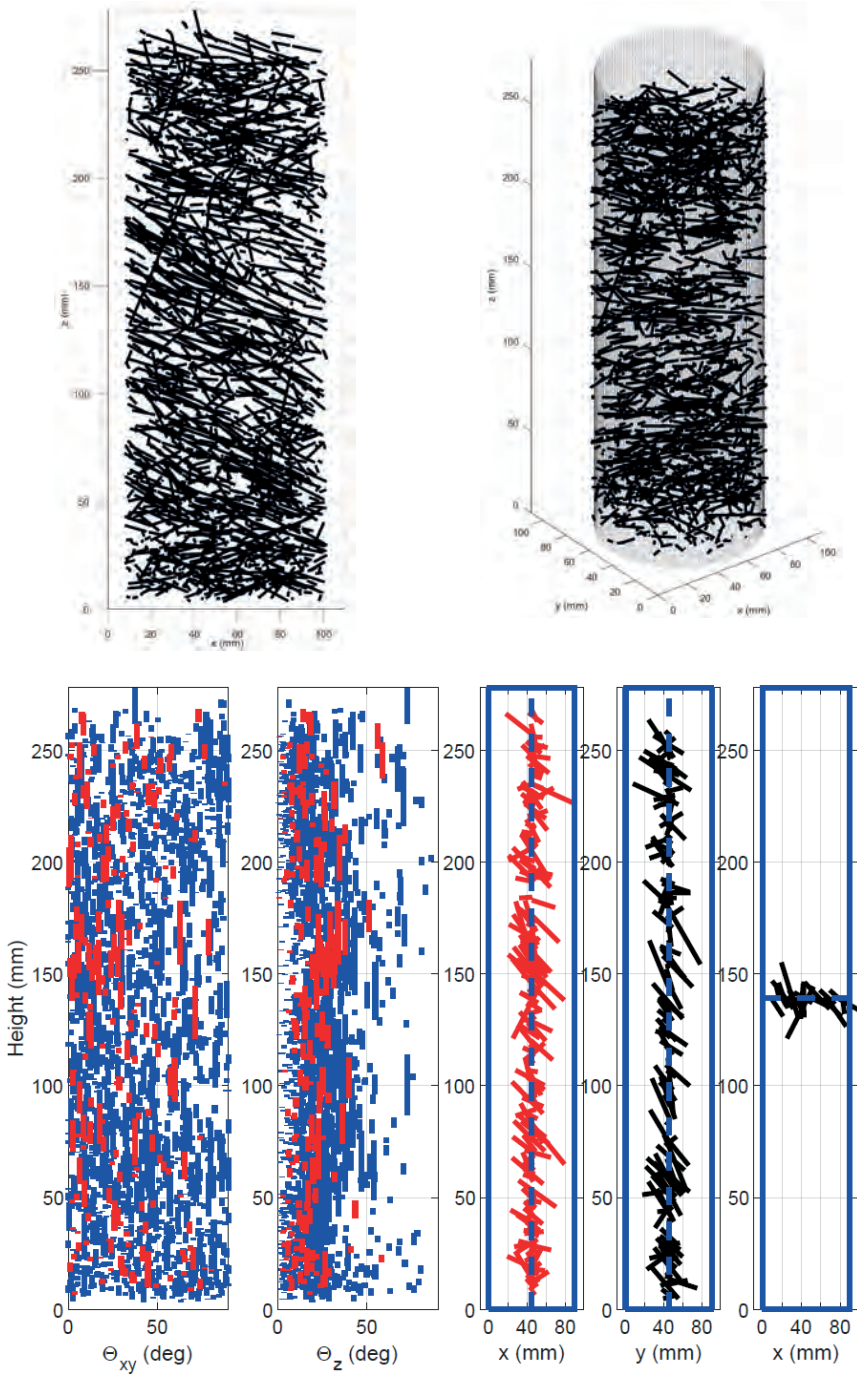
$$(f_{it,R1} = 1,5 \text{ MPa}) \quad f_{it,R3} = 1,5 \text{ MPa}$$

**Residualböjdraghållfasthet:**

$$(f_{R1} = 4,0 \text{ MPa}) \quad f_{R3} = 4,0 \text{ MPa}$$

**Klassificering:** C45/55 – R14/R34Duktilitetsklass 2 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ ) D1S4**Diameter:** 94 mm **Höjd:** 278 mm **Tryckzonshöjd:** 11 mm **Inre hävarm:** 144 mm





**PROV 10: LKAB - Typ 3, prov 3:3**

**Beskrivning:** Sprutavstånd 2 m, Flytsättmått 500 mm. 2332 kg/m<sup>3</sup>.  
Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,46, 100+350+50 kg/m<sup>3</sup> Cement Anl, Bas, Merit.

**Fiberinnehåll:** 28 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,66$     $\eta_y = 0,62$     $\eta_z = 0,32$

$\eta_{sx} = 0,53$     $\eta_{sy} = 0,52$     $\eta_{sz} = 0,21$

**Tryckhållfasthet:**

Uppmätt, cylinder 46 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

( $f_{it,R1} = 1,2$  MPa)    $f_{it,R3} = 1,2$  MPa

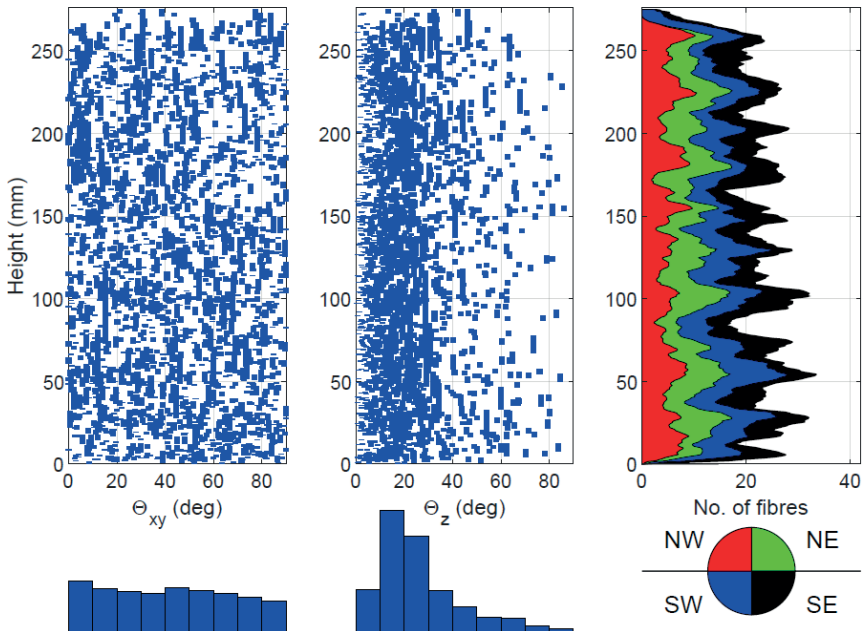
**Residualböjdraghållfasthet:**

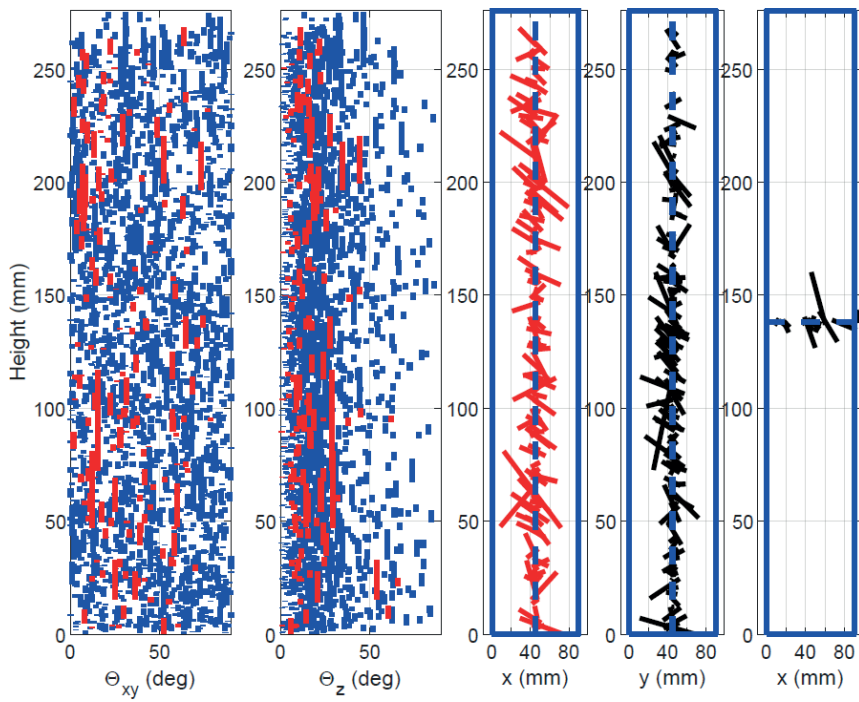
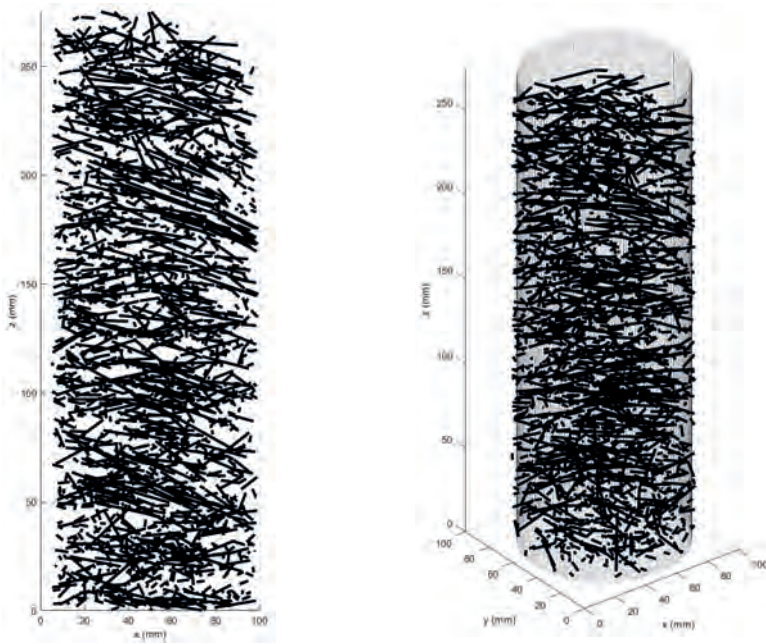
( $f_{R1} = 3,3$  MPa)    $f_{R3} = 3,3$  MPa

**Klassificering:** C45/55 – R<sub>1</sub>3/R<sub>3</sub>3

Duktilitetsklass 3 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ )   D1S3

**Diameter:** 94 mm   **Höjd:** 275 mm   **Tryckzonshöjd:** 9 mm   **Inre hävarm:** 146 mm





## PROV 11: Järnvägstunnel – Prov 1

**Beskrivning:** Fortlöpande prov i järnvägstunnel. Från en entreprenör.  
Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,40, 500-510 kg/m<sup>3</sup>, Anl-FA.

**Fiberinnehåll:** 35 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 41 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,65$     $\eta_y = 0,62$     $\eta_z = 0,31$

$\eta_{sx} = 0,56$     $\eta_{sy} = 0,58$     $\eta_{sz} = 0,28$

**Tryckhållfasthet:**

Antagen 40 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

( $f_{it,R1} = 1,7$  MPa)    $f_{it,R3} = 1,4$  MPa

**Residualböjdraghållfasthet:**

( $f_{R1} = 3,8$  MPa)    $f_{R3} = 3,8$  MPa

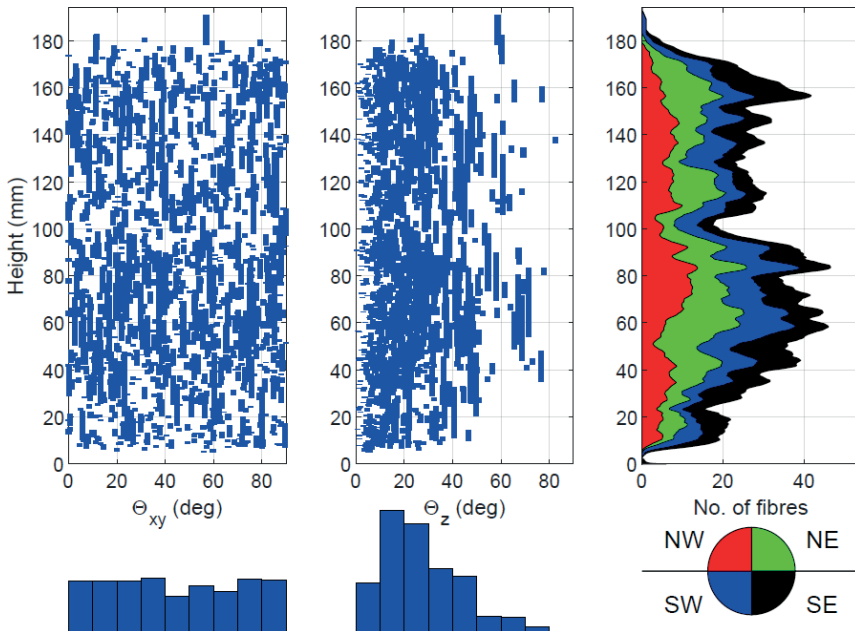
**Klassificering:** C40/50 – R13/R33

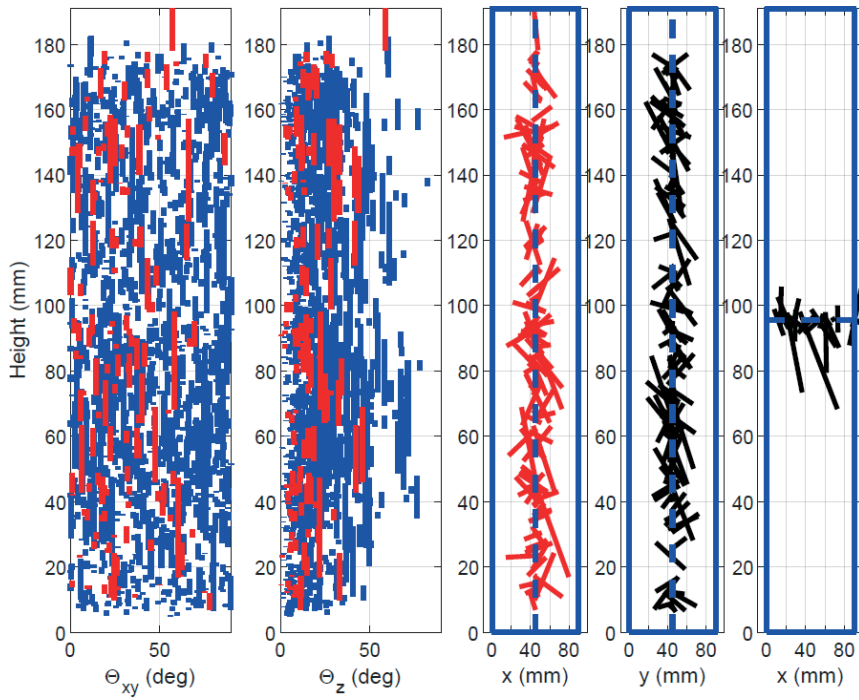
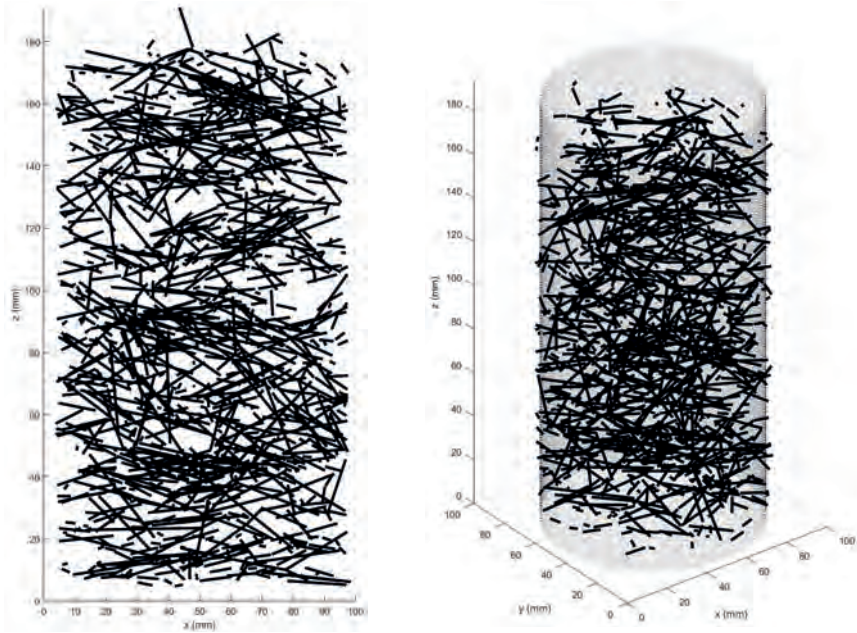
Duktilitetsklass 3 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ )   D1S3

**Diameter:** 90 mm

**Höjd:** 194 mm

**Tryckzonhöjd:** 9 mm   **Inre hävarm:** 104 mm





## PROV 12: Järnvägstunnel – Prov 2

**Beskrivning:** Fortlöpande prov i järnvägstunnel. Från en entreprenör.  
Sprutbetongfiber 65/35.

Vct 0,40, 500-510 kg/m<sup>3</sup>, Anl-FA.

**Fiberinnehåll:** 29 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 41 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,63$     $\eta_y = 0,65$     $\eta_z = 0,28$

$\eta_{sx} = 0,48$     $\eta_{sy} = 0,54$     $\eta_{sz} = 0,31$

**Tryckhållfasthet:**

Antagen 40 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

$f_{it,R1} = 1,3$  MPa    $f_{it,R3} = 0,8$  MPa

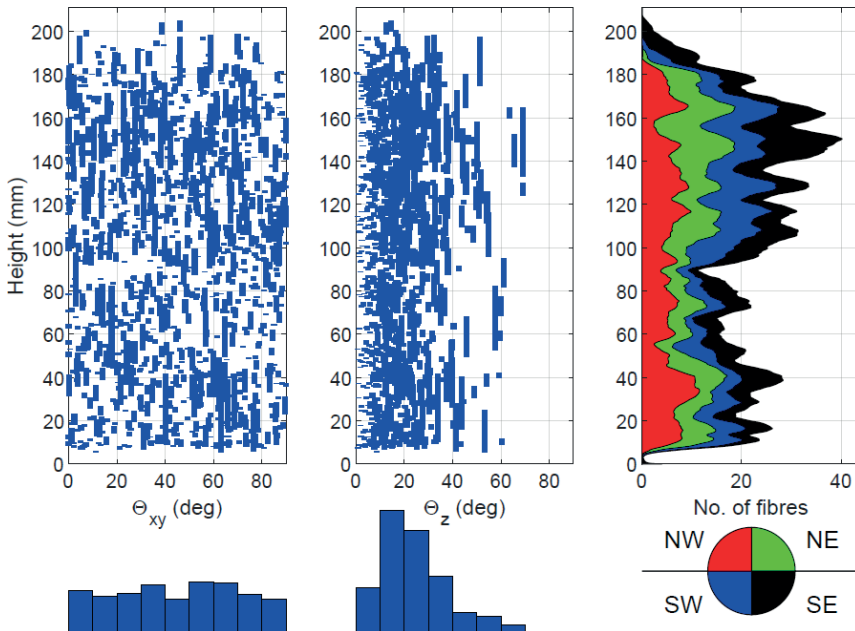
**Residualböjdraghållfasthet:**

$f_{R1} = 2,8$  MPa    $f_{R3} = 2,0$  MPa

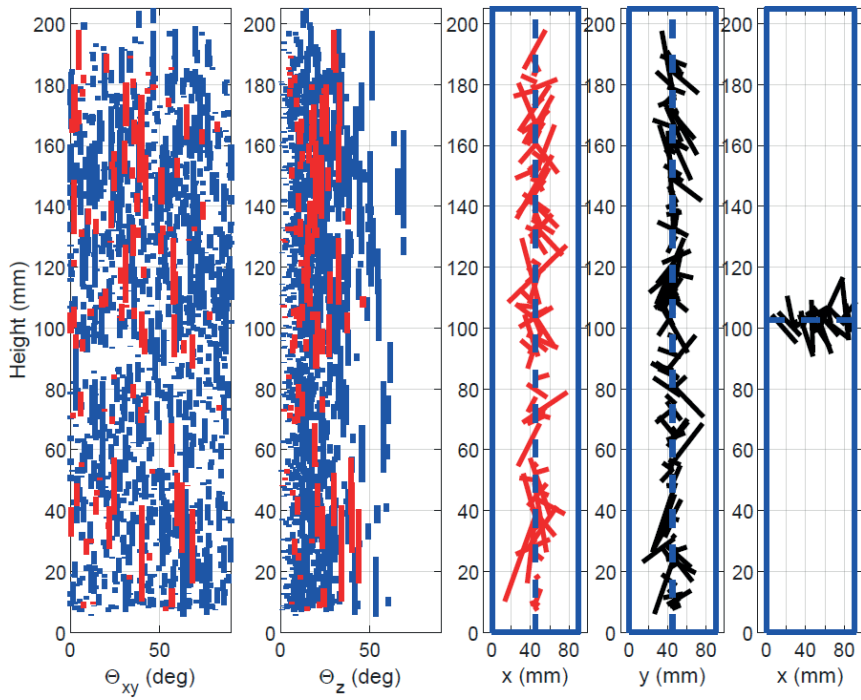
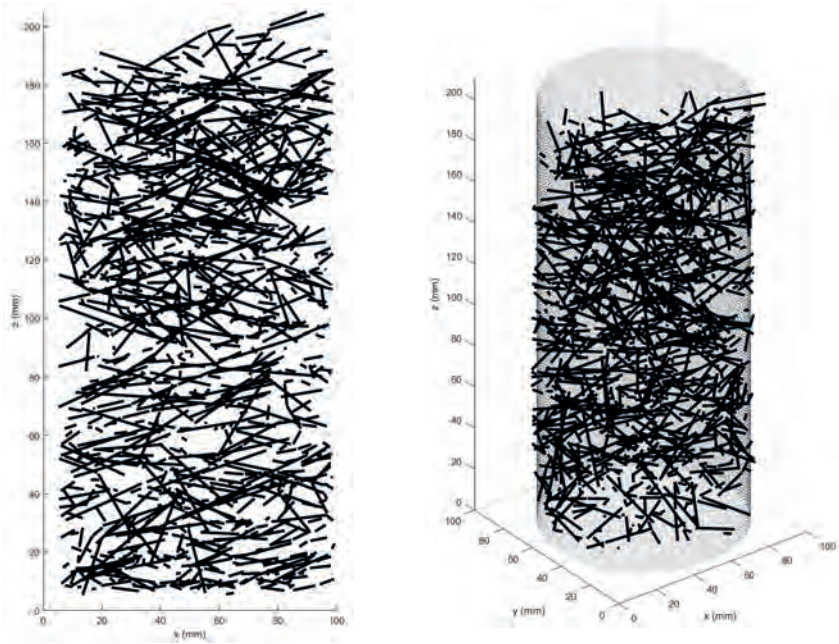
**Klassificering:** C40/50 – R<sub>1</sub>2/R<sub>3</sub>2

Duktilitetsklass 2 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,7$ )   D1S2

**Diameter:** 90 mm   **Höjd:** 211 mm   **Tryckzonhöjd:** 7 mm   **Inre hävarm:** 97 mm







## PROV 13: Vägtunnel – Prov 1

**Beskrivning:** Borrkärna för utdragsprov i vägtunnel. Från Trafikverket via Vattenfall.

Materialsammansättning okänd. 40 kg/m<sup>3</sup> stålfiber antaget.

**Fiberinnehåll:** 30 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$$\eta_x = 0,59 \quad \eta_y = 0,68 \quad \eta_z = 0,32$$

$$\eta_{sx} = 0,34 \quad \eta_{sy} = 0,47 \quad \eta_{sz} = 0,30$$

**Tryckhållfasthet:**

Antagen 40 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

$$(f_{t,R1} = 9,9 \text{ MPa}) \quad f_{t,R3} = 0,9 \text{ MPa}$$

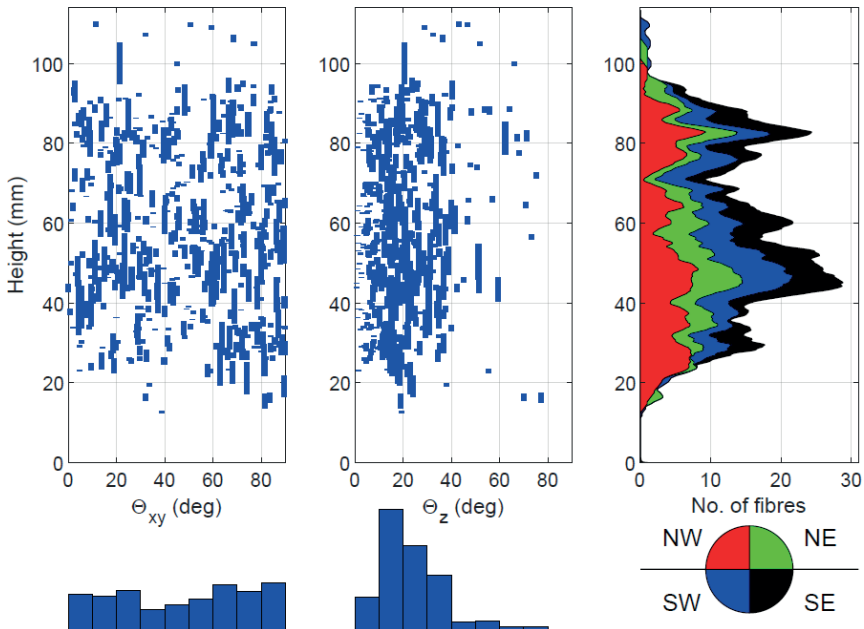
**Residualböjdraghållfasthet:**

$$(f_{R1} = 2,5 \text{ MPa}) \quad f_{R3} = 2,5 \text{ MPa}$$

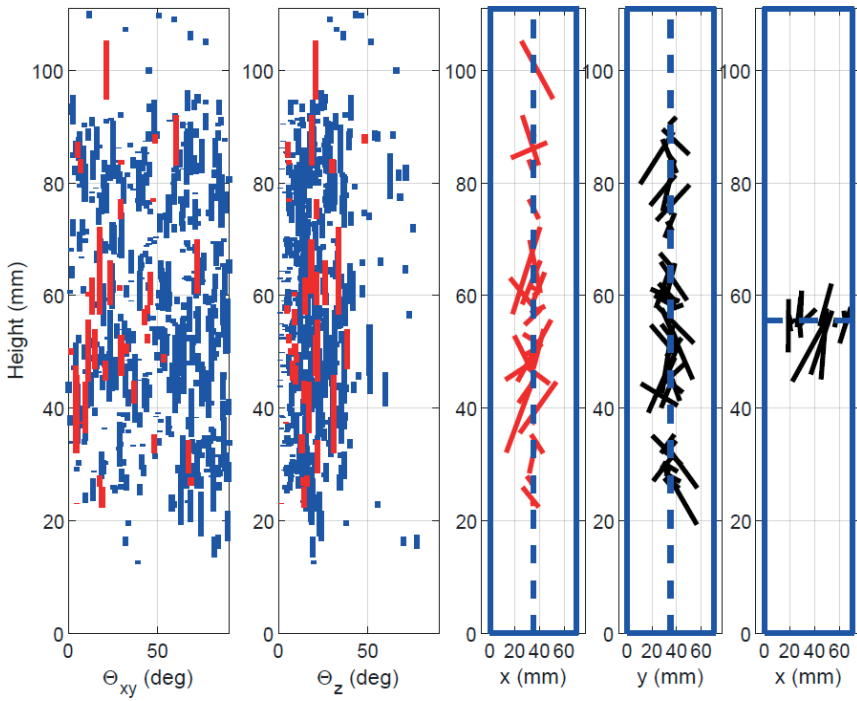
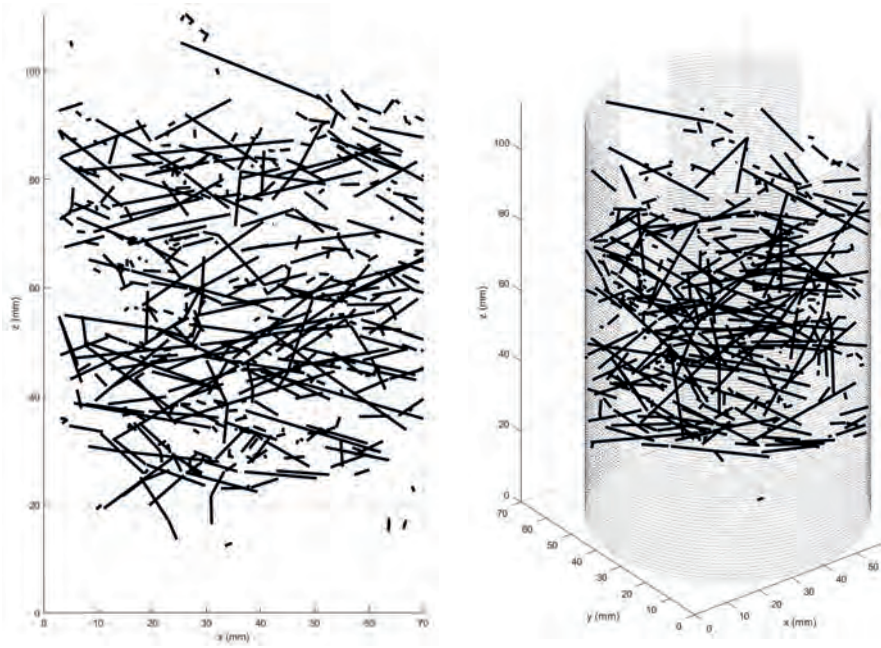
**Klassificering:** C40/50 – R12/R32

Duktilitetsklass 3 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ ) D1S2

**Diameter:** 70 mm **Höjd:** 99 mm **Tryckzonshöjd:** 3 mm **Inre hävarm:** 57 mm







## PROV 14: Vägtunnel – Prov 2

**Beskrivning:** Borrkärna för utdragsprov i vägtunnel. Från Trafikverket via Vattenfall.

Materialsammansättning okänd. 40 kg/m<sup>3</sup> stålfiber antaget.

**Fiberinnehåll:** 37 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$$\eta_x = 0,72 \quad \eta_y = 0,55 \quad \eta_z = 0,39$$

$$\eta_{Sx} = 0,46 \quad \eta_{Sy} = 0,48 \quad \eta_{Sz} = 0,42$$

**Tryckhållfasthet:**

Antagen 40 MPa.

**Residualraghållfasthet:**

$$(f_{f,R1} = 1,5 \text{ MPa}) \quad f_{f,R3} = 1,5 \text{ MPa}$$

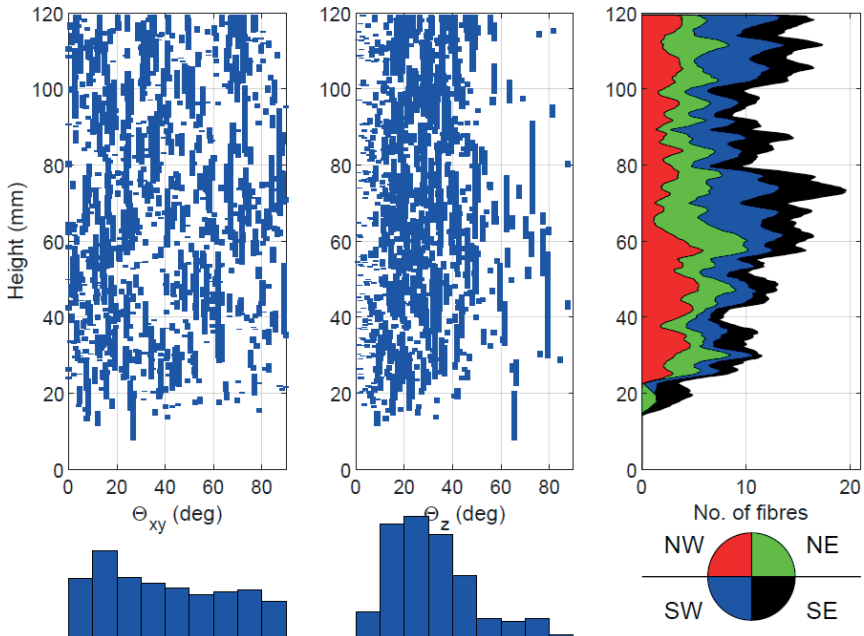
**Residualböjdraghållfasthet:**

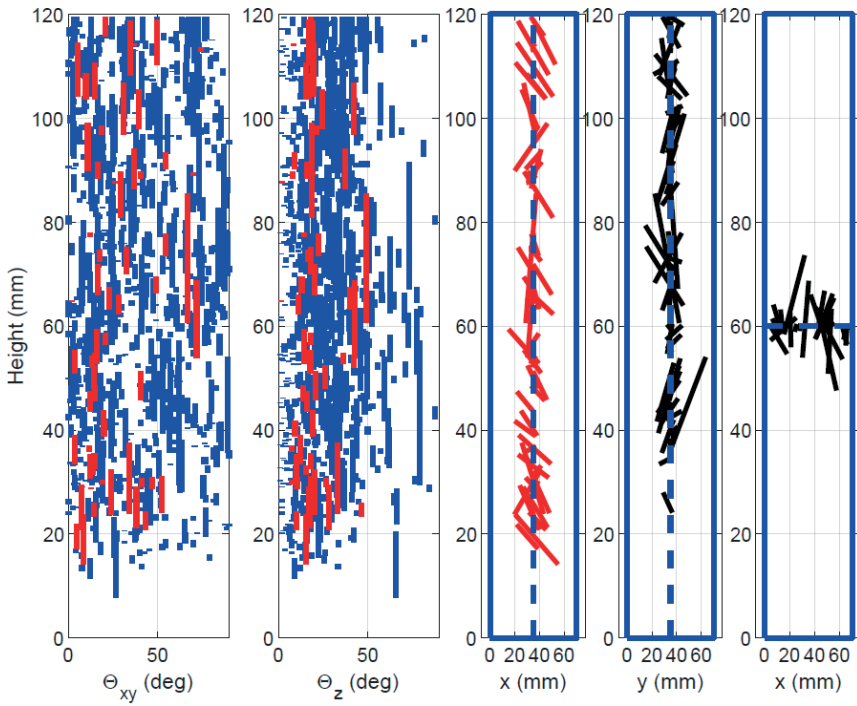
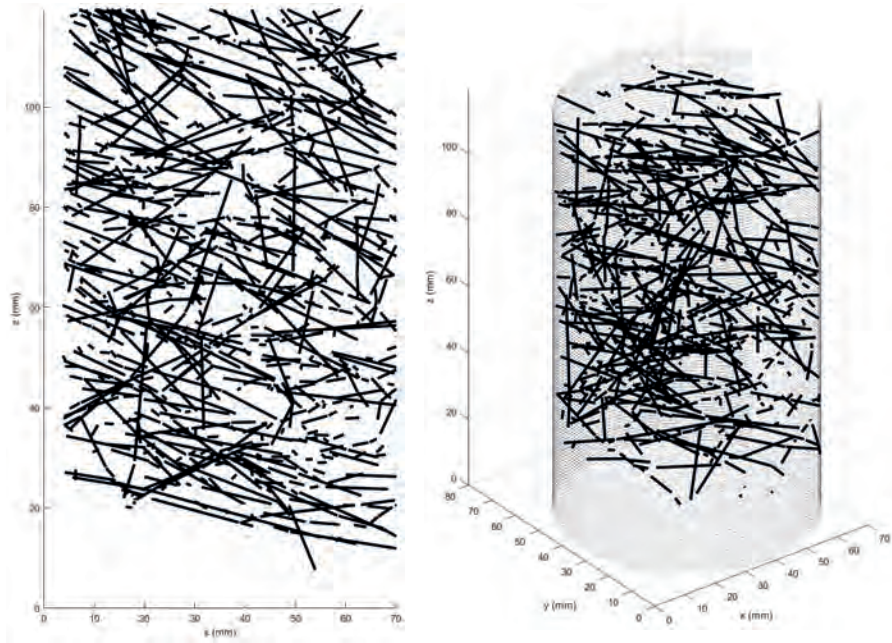
$$(f_{R1} = 4,0 \text{ MPa}) \quad f_{R3} = 4,0 \text{ MPa}$$

**Klassificering:** C40/50 – R14/R34

Duktilitetsklass 1 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ ) D1S4

**Diameter:** 70 mm **Höjd:** 105 mm **Tryckzonshöjd:** 5 mm **Inre hävarm:** 54 mm





## PROV 15: Borrkärna från sprutbetong i flera lager

**Beskrivning:** Borrkärna från tunnelvägg genom 2–3 lager sprutbetong på bergsektion – oarmerat och med stålfibrer. Från tidigare rapport, Ansell (2021). Stålfiber Dramix 30/0.5.

Hållfasthetsberäkningarna har gjorts för övre 60 mm.

Materialsammansättning okänd.  $40 \text{ kg/m}^3$  stålfiber antaget.

**Fiberinnehåll:**  $23 \text{ kg/m}^3$

**Jmf betongmix:**  $40 \text{ kg/m}^3$

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,60$     $\eta_y = 0,68$     $\eta_z = 0,39$

$\eta_{Sx} = 0,30$     $\eta_{Sy} = 0,27$     $\eta_{Sz} = 0^*$

**Tryckhållfasthet:**

Antagen  $40 \text{ MPa}$ .

**Residualdraghållfasthet:**

$f_{t,R1} = 1,2 \text{ MPa}$     $f_{t,R3} = 0,6 \text{ MPa}$

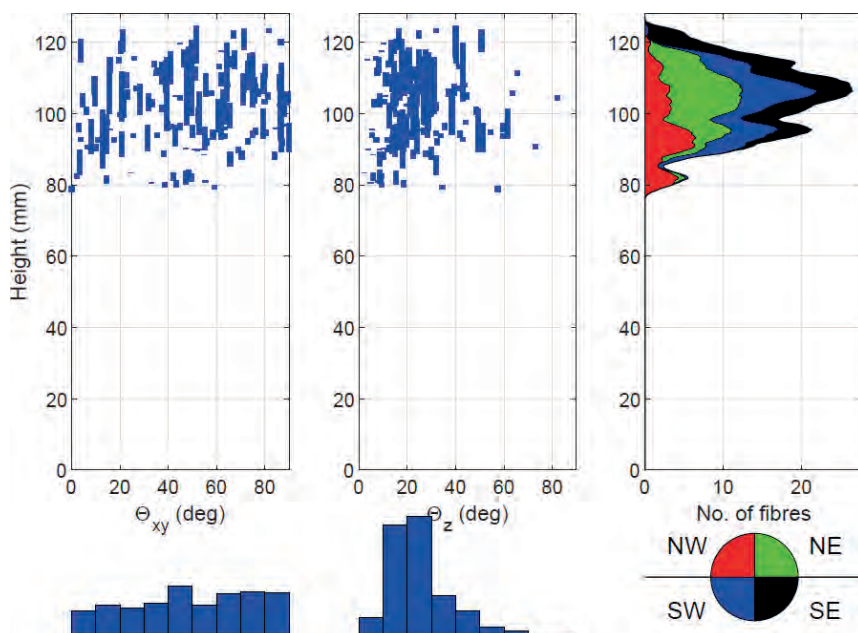
**Residualböjdraghållfasthet:**

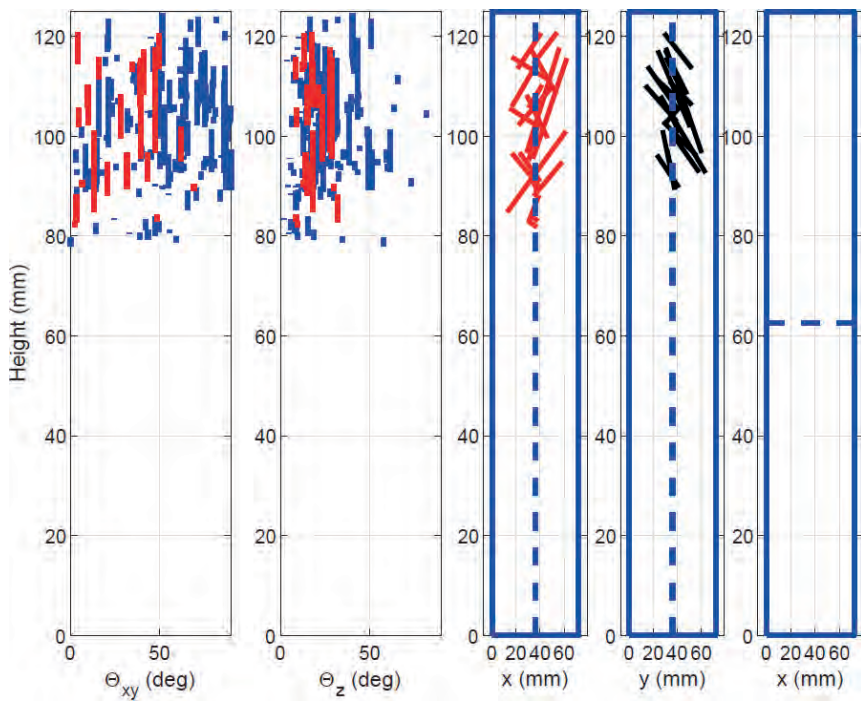
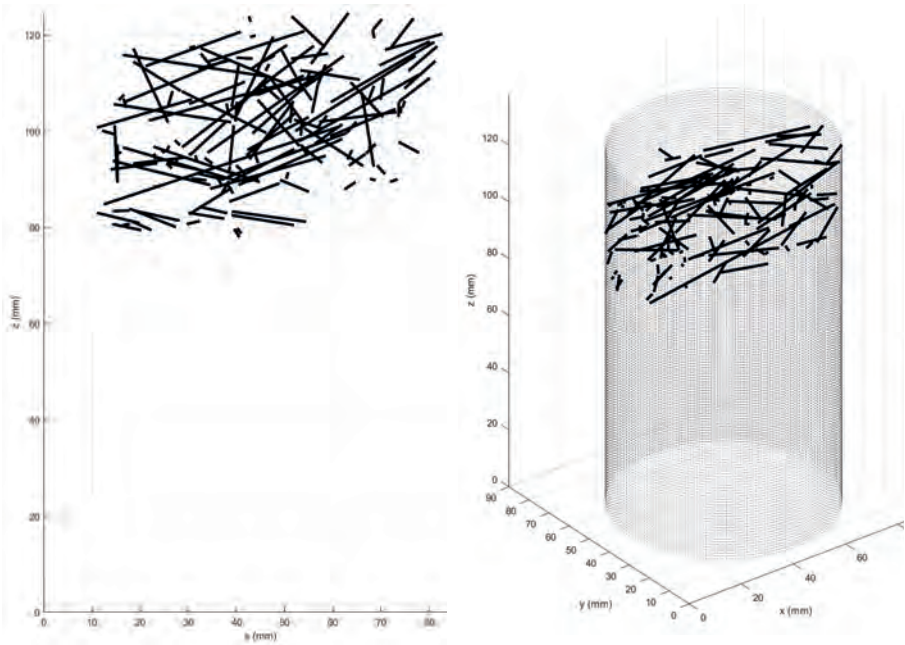
$f_{R1} = 2,7 \text{ MPa}$     $f_{R3} = 1,5 \text{ MPa}$

**Klassificering:** C40/50 – R<sub>1</sub>2/R<sub>3</sub>1

Duktilitetsklass 1 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,57$ ) D1S2

**Diameter:** 72 mm   **Höjd:** 60 mm   **Tryckzonshöjd:** 2 mm   **Inre hävarm:** 26 mm







## PROV 16: Borrkärna från sprutbetong på bergkil

**Beskrivning:** Borrkärna från tunnelvägg genom ett lager sprutbetong på kilformad bergsektion. Från tidigare rapport, Ansell (2021). Stålfiber Dramix 30/0.5.

Hållfasthetsberäkningarna har gjorts för övre 72 mm.

Materialsammansättning okänd. 40 kg/m<sup>3</sup> stålfiber antaget.

**Fiberinnehåll:** 31 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 40 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$$\eta_x = 0,65 \quad \eta_y = 0,63 \quad \eta_z = 0,37$$

$$\eta_{Sx} = 0,44 \quad \eta_{Sy} = 0,66 \quad \eta_{Sz} = 0,43$$

**Tryckhållfasthet:**

Antagen 40 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

$$f_{t,R1} = 1,2 \text{ MPa} \quad f_{t,R3} = 0,7 \text{ MPa}$$

**Residualböjdraghållfasthet:**

$$f_{R1} = 2,7 \text{ MPa} \quad f_{R3} = 1,9 \text{ MPa}$$

**Klassificering:** C40/50 – R<sub>1</sub>2/R<sub>3</sub>1

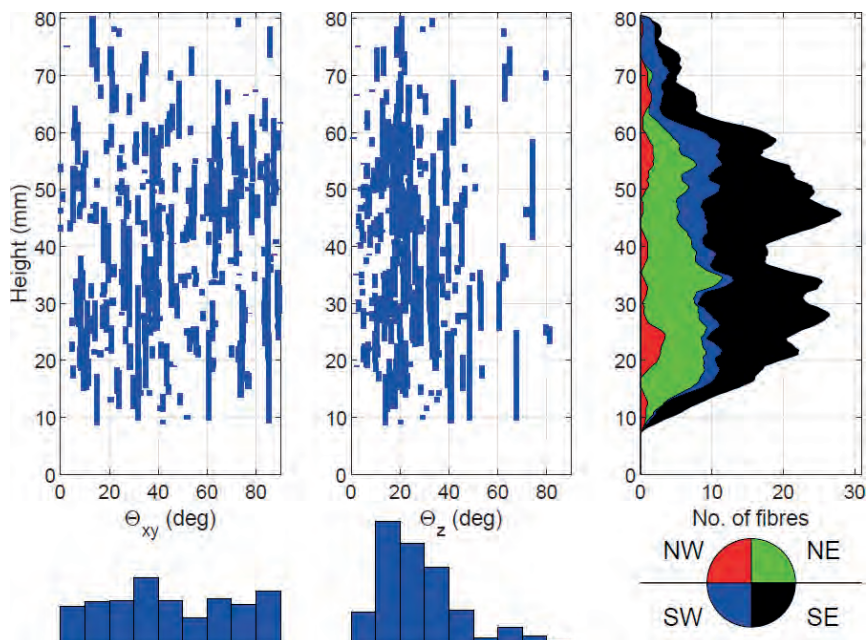
Duktilitetsklass 2 ( $f_{R3} / f_{R1} = 0,7$ ) D1S2

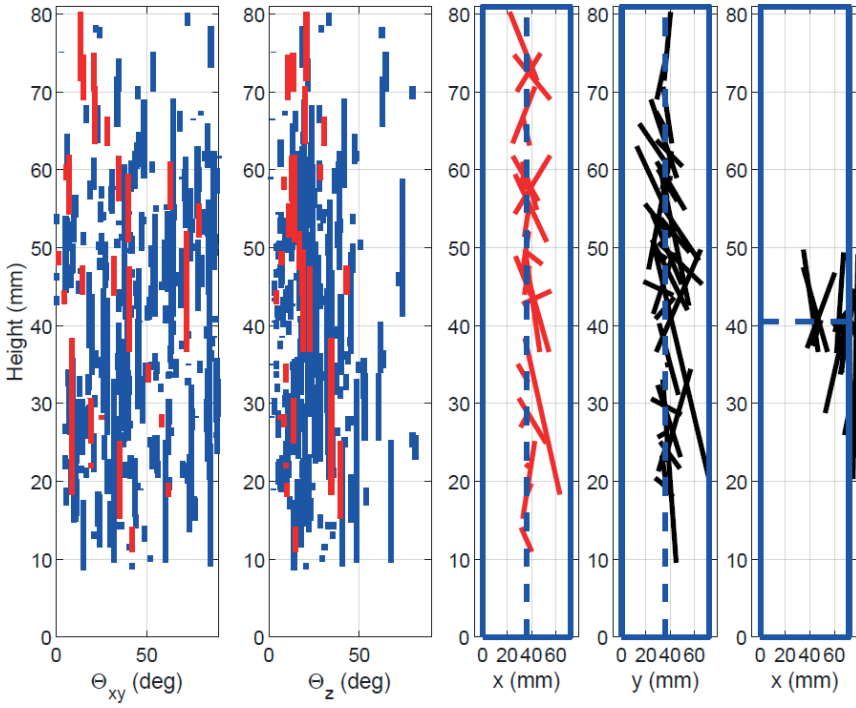
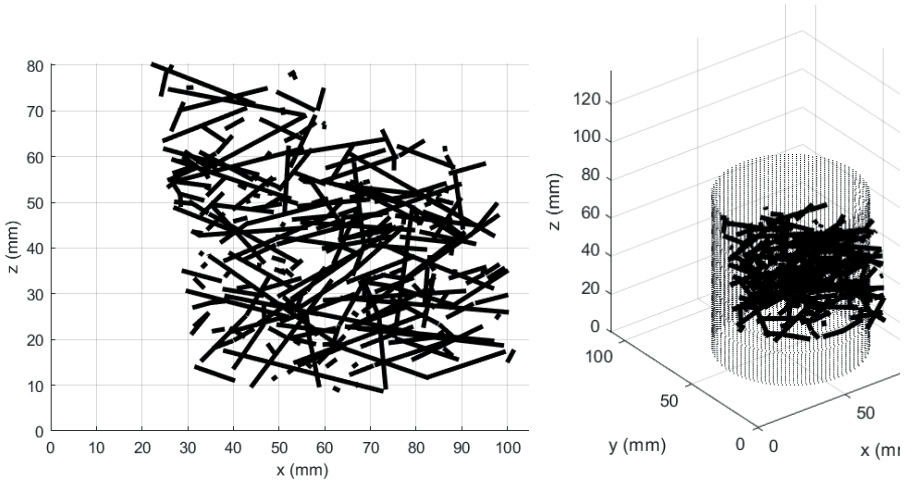
**Diameter:** 72 mm

**Höjd:** 72 mm

**Tryckzonshöjd:** 2 mm

**Inre hävarm:** 33 mm





**PROV 17:****Borrkärna från sprutad provbalk****Beskrivning:**

Borrkärnan är tagen genom en 75×125×500 mm provbalk, uttagen ur en 2×1,2×0,5 m sprutad platta. OBS att sprut-riktningen här är tvärs borrkärnans höjdaxel. Från tidigare rapport, Ansell (2021). Stålfiber Dramix 30/0.5.

Materialsammansättning okänd, förutom 70 kg/m<sup>3</sup> stålfibrer.

**Fiberinnehåll:** 57 kg/m<sup>3</sup>

**Jmf betongmix:** 70 kg/m<sup>3</sup>

**Fiberorienteringsfaktorer:**

$\eta_x = 0,43$     $\eta_y = 0,83$     $\eta_z = 0,65$

$\eta_{sx} = 0,35$     $\eta_{sy} = 0,79$     $\eta_{sz} = 1,00^*$

**Tryckhållfasthet:**

Antagen 40 MPa.

**Residualdraghållfasthet:**

( $f_{t,R1} = 1,5$  MPa)       $f_{t,R3} = 1,3$  MPa

**Residualböjdraghållfasthet:**

( $f_{R1} = 3,4$  MPa)       $f_{R3} = 3,4$  MPa

**Klassificering:** C40/50 – R<sub>1</sub>3/R<sub>3</sub>3

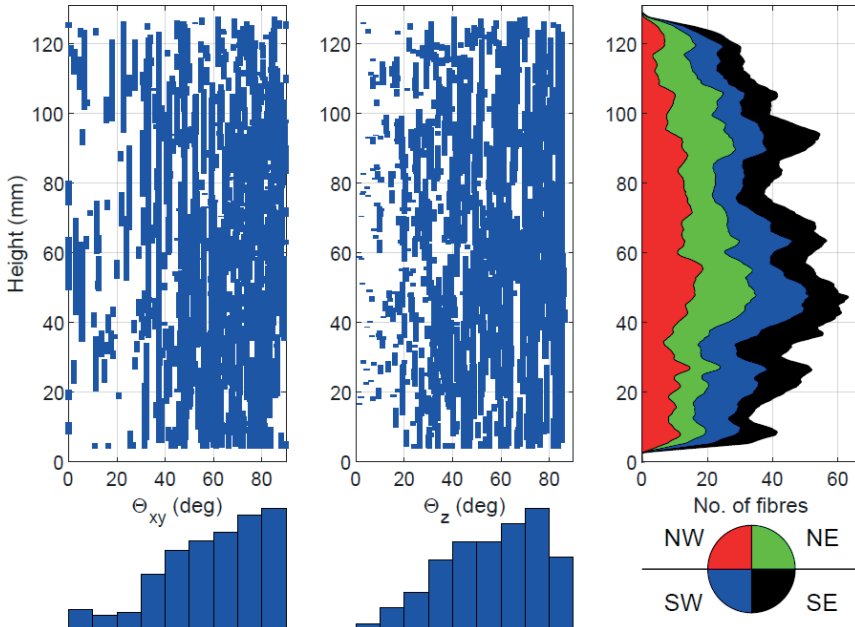
Duktilitetsklass 1 ( $f_{R3} / f_{R1} = 1,0$ )    D1S3

**Diameter:** 56 mm

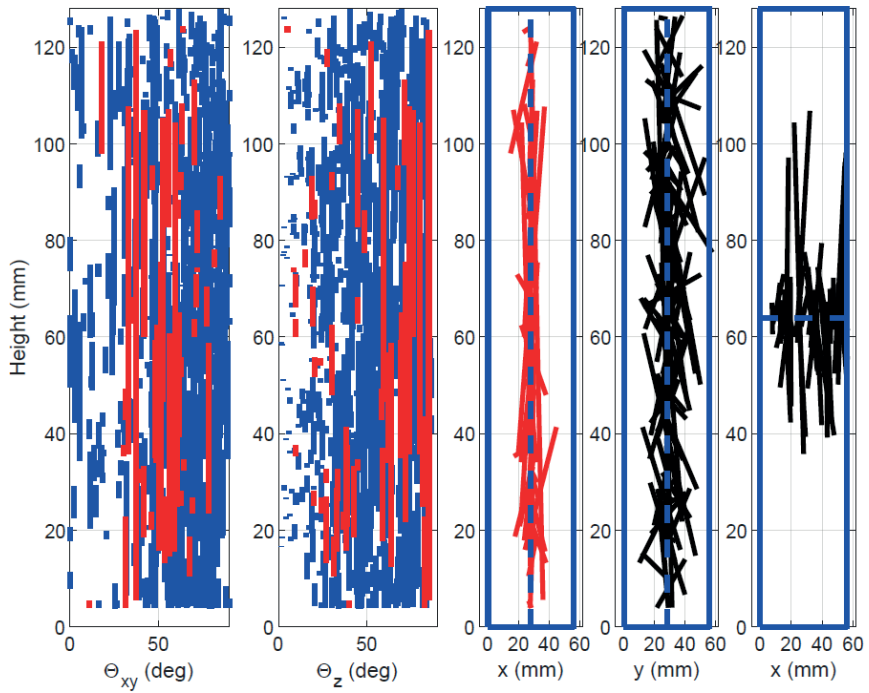
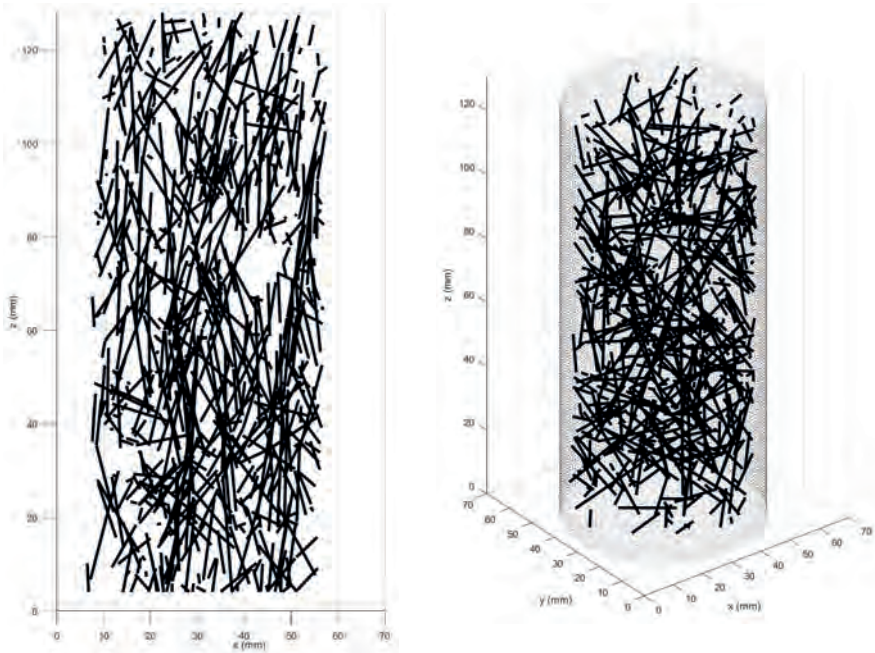
**Höjd:** 131 mm

**Tryckzonshöjd:** 6 mm

**Inre hävarm:** 73 mm













Box 5501  
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773