© 2026 Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors.

LIVSLÄNGD FÖR ALTERNATIVA FIBRER I SVENSKA TUNNLAR
LIFESPAN FOR ALTERNATIVE FIBRES IN SWEDISH TUNNELS

Andreas Sjölander, Kungliga Tekniska Högskolan
Annika Gram, Kungliga Tekniska Högskolan
Erik Nordström, Kungliga Tekniska Högskolan och Tyréns
Anders Ansell, Kungliga Tekniska Högskolan

Sammanfattning
Fiberarmerad sprutbetong har sedan slutet av 80-talet använts för att förstärka svenska bergrum. Med några få undantag är all sprutbetong armerad med stålfiber. Detta är även situation idag trots att flertalet alternativa fibermaterial finns på marknaden. Trots att det strukturella beteendet efter uppsprickning skiljer sig åt mellan fibertyperna har forskning visat att fiber av glas, basalt och polypropylen alla kan uppfylla de idag ställda kraven på bärförmåga. En stor anledning till att alternativa fiber inte används är att det finns osäkerheter kring hur bärförmågan för fiberarmerad sprutbetong påverkas efter lång tids exponering i tunnelmiljö. Tidigare forskning har ofta fokuserat på nedbrytning av individuella fiber i lösningar med höga salthalter eller pH värde. Sprutbetongens energiupptagande förmåga efter uppsprickning beror på fibertyp och styrs av en kombination av utdragning av fibrer från betongmatrisen samt deformation och brott i fibern. För att studera förändringar i bärförmåga över tid är det därför lämpligt att utsätta fiberarmerade provkroppar för exponering i olika miljöer och därefter testa bärförmågan. Detta har studerats i ett nyligen avslutat BeFo projekt där accelererande åldringsförsök har genomförts varefter bärförmågan utvärderades med Barcelonametoden.
Nyckelord: Barcelonametoden; åldring; accelererad provning; strukturell provning; sprutbetong

Abstract
Fibre-reinforced shotcrete has since the 1980s' been used as rock support in Swedish tunnels. Shotcrete has, with few exceptions, been reinforced with steel fibres only. The situation is similar today even though alternative materials are available. While the structural behaviour post-cracking differs for shotcrete reinforced with fibres of glass, basalt and polypropylene, most of them will fulfil the typical requirements with respect to structural performance. However, uncertainties regarding the long-term structural performance after exposure in a tunnel environment still exist for alternative fibres, which is one of the major reasons that those fibres are not used in Sweden. Previous research has commonly focused on degradation of individual fibres exposed to alkaline or saline environments. The energy absorption of fibre-reinforced shotcrete post cracking depends on the fibre type and is governed by a combination of pull-out, deformation and tensile rupture. Thus, studies focusing on structural performance over time should focus on the composite material and its performance after exposure to certain environments. This has been studied in a recently finalised project funded by BeFo in which accelerated testing

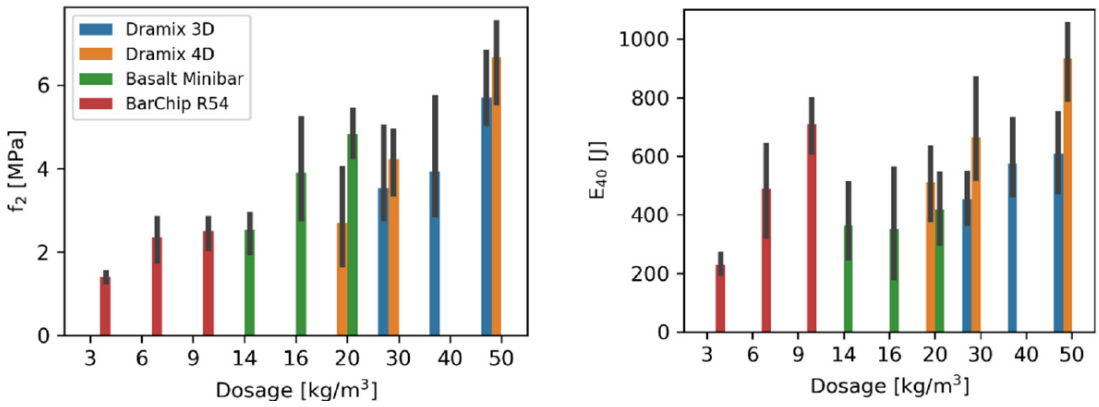
was used to simulate ageing and structural performance was evaluated with the Barcelona method.
Keywords: Barcelona method; ageing; accelerated testing; structural testing; shotcrete

1. Introduktion

Svenska tunnlar i hårt berg har sedan början av 1980-talet primärt förstärkts med fiberarmerad sprutbetong i kombination med bergbult. Principen med denna typ av förstärkning är att bergbultar bidrar med stabilitet av större block och sprutbetong kan bära upp last av enskilda lösa bock mellan bultgrupperna. I kombination med systematisk bergbultning är sprutbetong alltid fiberarmerad medan oarmerad sprutbetong principiellt kan användas vid bergförstärkning utan bult. Vanligtvis dimensioneras sprutbetongens bärförmåga baserat på dess residualbärförmåga vilket är dess förmåga att bära last efter uppsprickning. Denna bärförmåga styrs helt av fiberinnehåll och i synnerhet av fördelningen och orientering av fibrer tvärs de sprickor som uppstår. Traditionellt har enbart stålfiber använts i svensk sprutbetong medan andra fibertyper, främst syntetfibrer, används i vissa länder. Idag, när mycket fokus riktas mot att minska miljöpåverkan vid byggande av tunnlar, blir utsläpp av växthusgaser (primärt CO_2) en viktig parameter vid dimensionering av tunnlar. För en svensk traditionell fiberarmerad sprutbetong baserad på CEM-I visade Brodd m.fl (2023) att majoriteten av växthusgaserna kommer från produktionen av betong där cementklinkerproduktionen bidrar till den största delen av utsläppen. Idag pekar trenden mot att använda CEM-II som bas i sprutbetong. I denna har man ersätt delar av cementklinkerinnehåll med alternativa bindemedel. Dessa utgörs ofta av restprodukter från bland annat stålindustrin (masugnsslagg) och kolindustrin (flygaska). Beräkningsmässigt blir utsläppen av växthusgaser från restprodukter enbart de utsläpp som krävs för att kunna använda den i en cementblandning. Detta omfattar vanligtvis någon bearbetning samt transport och utsläppen blir därmed betydligt lägre jämfört med tillverkning av cementklinker. Tillgången till restprodukter är delvis begränsad och det pågår därför intensiv forskning med att hitta nya lämpliga och mer klimatvänliga bindemedel (Jameel m.fl. 2026). Exempel på detta är kalcinerade leror och vulkaniskt material.

När utsläppen av växthusgaser från cementklinker minskar kommer de totala andelen utsläpp från fibrerna att öka. Vidare måste man beakta hela tunnelns livslängd för att optimera tunneln med avseende på bärförmåga och klimatavtryck. Nedbrytning av fibrer kan över tid leda till att sprutbetongförstärkningar behöver repareras eller förstärkas. Om valet av fibrer kan leda till att reparationer inte behövs, kan detta bidra till en stor minskad miljöpåverkan över tunnelns livslängd. Att undersöka potentialen att använda alternativa fibrer är därför en viktig del för att optimera våra bergförstärkningar. Dagens alternativ till stålfiber består av bland annat basalt, syntet och glasfiber. Dessa fibrer kan, med rätt dosering, uppfylla de flesta ställda krav på bärförmåga som ställs på fiberarmerad sprutbetong (Sjölander m.fl. 2023b). Figur 1 visar resultat för bärförmåga för olika doseringar och fibertyper. För balkprover visas residualhållfasthet vid 2 mm nedböjning (SIS, 2006) och för runda plattor visas energiabsorption vid 40 mm nedböjning (ASTM, 2020). Att andra fibertyper inte används idag beror troligen på en kombination av bristande praktisk erfarenhet samt teoretisk förståelse för de alternativa fibrernas

bärförmåga men kanske framförallt, hur bärförmåga påverkas av exponering i tunnelmiljö. Mycket forskning inom detta område har fokuserat på nedbrytning av fibrer och betongen som enskilda element, se t.ex. Afroz m.fl. (2017) och Bolooki Poorsaheli m.fl. (2018). Även om förståelsen för nedbrytning av enskilda material i en viss miljö kan ge indikationer om materialets lämplighet styrs fiberbetongens bärförmåga efter uppsprickning av samspelet mellan betong och fibrer. Därmed bör även bärförmåga över tid studeras för det sammansatta systemet istället för de enskilda komponenterna.



Figur 1. Residualhållfasthet vid 2 mm nedböjning f_2 (vänster) och energiabsorption för rund platta vid 40 mm deformation E_{40} (höger) för olika dosering och fibrer. Från Sjölander m.fl. (2023a).

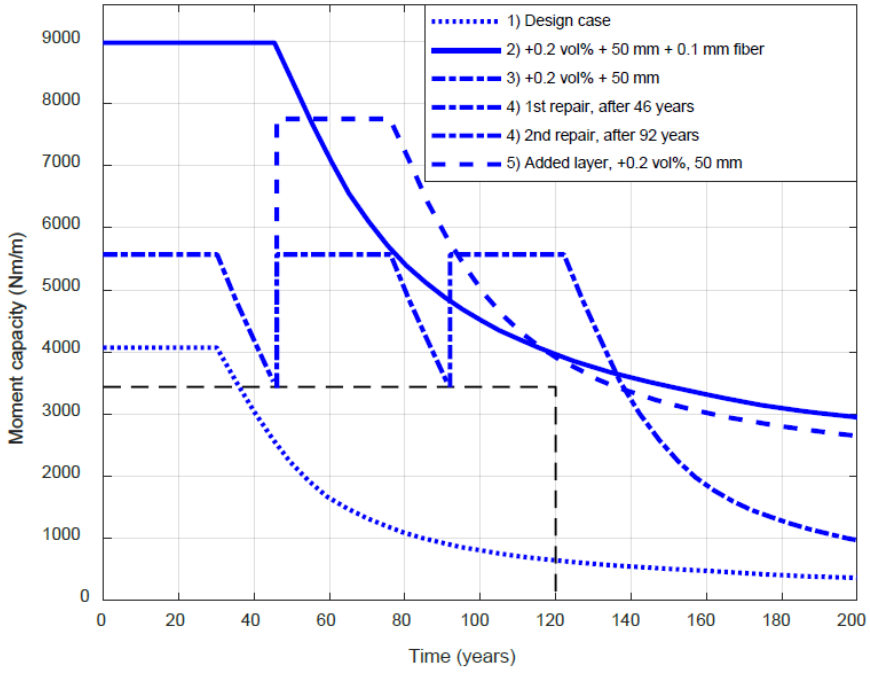
Ett arbete med att undersöka lämpligheten att använda alternativa fibrer genomfördes av Sjölander m.fl. (2024). Slutsatsen från detta arbete var att fibrer av basalt och syntet kan uppfylla kraven för bärförmåga men att osäkerheter kvarstår kring bärförmågan på lång tid efter exponering i tunnelmiljö. En fortsättningsstudie finansierad av BeFo inleddes med syftet att hitta en lämplig provmetod för att utvärdera hur bärförmågan hos fiberarmerad sprutbetong påverkas efter exponering i tunnelmiljön. Inom ramen för projektet har även accelererad åldring genomförts men det primära målet var att utvärdera provmetoden och dess lämplighet att användas för att genomföra accelererad och långtidsprövning. Resultaten från projektet kommer att presenteras i en BeFo rapport (Sjölander m.fl. 2026) och här ges en kortare sammanfattning av studien.

2. Utvärdering av bärförmåga efter exponering i tunnelmiljö

Att utvärdera eventuella förändringar i sprutbetongens bärförmåga efter lång tids exponering i tunnelmiljö är komplicerat och kan genomföras på flera olika sätt. Först och främst måste man välja hur förändringar i bärförmågan ska utvärderas. Detta kan göras genom direkta försök samt analytiska eller teoretiska modeller. Direkta försök innebär att man utvärderar bärförmåga med någon form av provningsmetod. Exempel på provningsmetoder är den, i Sverige, vanligtvis använda balkmetoden EN 14488-3 (SIS, 2006). Internationellt används även runda plattor enligt ASTM C1550 (ASTM, 2020).

Med hjälp av teoretiska modeller kan man försöka beskriva nedbrytningen av ett material vid exponering i en given miljö. Denna typ av information kan utgöra en grund vid användandet av en analytisk modell. Ett exempel på detta presenteras av Ansell och Nordström (2022). Här analyserades sprutbetongens förändrade bärförmåga med en analytisk modell och residualbärförmåga beskrevs genom fibrernas förmåga att bära last över sprickan. Denna beräknades som en funktion av antalet fibrer som korsade sprickan multiplicerat med fiberns hållfasthet. Baserat på försök genomförda av Nordström (2005) antogs en funktion för att beskriva areaförlusten i stålfiber över tid med avseende på korrosion. I Figur 2 visas hur momentkapaciteten för en sprutbetongförstärkning minskar över tid med avseende på korrosion av stålfiber. För att säkerställa bärförmågan över tunnelns livslängd (120 år) visas alternativa utformningar och olika förstärkningsförslag i figuren (Ansell och Nordström, 2022).

För att studera nedbrytning måste även metoden för nedbrytningen att väljas. Detta kan göras med långtidsförsök eller accelererad provning. Långtidsprovning bygger på att provkroppar exponeras i en naturlig miljö, t.ex. längs en väg för att simulera effekten av exponering till tösalter. Accelererad provning å andra sidan genomförs i extrema miljöer där proverna exponeras för högre koncentrationer än naturligt förekommande för att accelerera nedbrytningen av material.



Figur 2. Förändring i momentkapacitet över tid för sprucken stålfiberarmerad sprutbetong. Från Ansell och Nordström (2022).

2.1 Provmetoder för fiberbetong

Som nämnts ovan utvärderas vanligen bärförmågan för fiberarmerad sprutbetong i Sverige genom fyrpunktsböjning av balkar enligt SS-EN 14488-3 (SIS, 2006). Denna

metod används både i förprövning och under produktion. En fördel med metoden är att balkar kan sågas ut från lådor som sprutas på plats i en tunnel. Eftersom prover sågas ut är kraven för noggrannheten vid sprutning av provlådor inte så hög. Detta förenklar processen med att tillverka provkroppar. Sprutbetongens bärförmåga efter brott styrs helt av fibrernas förmåga att överföra last tvärs sprickan. Tidigare forskning har visat att brottytans storlek har stor betydelse för spridningen av resultaten (Östlund m.fl. 2023, Bernard, 2002). Nackdelen med balkprovning är därmed att en liten brottyta (125 × 75 mm) ger en stor spridning i resultatet. Internationellt används i vissa sammanhang istället runda plattor för att utvärdera bärförmågan för fiberarmerad sprutbetong. Metoden bygger på arbete presenterat av Bernard (2002) och Hanke m.fl. (2001) och är nu standardiserad enligt ASTM C-1550. Den runda plattan har en diameter på 800 mm och är upplagd på tre ledade stöd vilket leder till en statiskt bestämd platta och ska resultera i tre stycken sprickor. Den totala spricklängden blir omkring 1200 mm vilket är signifikant längre än för balkarna. Som en följd av detta blir spridningen i resultat mindre och Östlund m.fl. (2023) visade genom numeriska simuleringar att fibervolymen kan minskas med omkring 20 % genom att utvärdera bärförmågan med runda plattor istället för med balkar.

För att kunna utvärdera bärförmågan efter exponering är det viktigt att spridningen i den använda metoden inte är för stor. Om spridningen är stor är risken att den förändrade bärförmågan inte kan detekteras eller snarare är ett resultat av en stor spridning i resultaten istället för en effekt av nedbrytning. Med detta i åtanke är de runda plattorna en mer pålitlig metod jämfört med balkarna. För att kunna utvärdera effekten av åldring behöver dock provkropparna exponeras i en viss miljö. Hanteringen och förvaringen av provkropparna kommer därför att bli enklare för de mindre provkropparna. Detta är speciellt viktigt om proverna ska utföras i laboratoriemiljö där plats för förvaring kan vara kostsamt.

2.2 Energiupptagande förmåga för sprutbetong

Den fiberarmerade sprutbetongens bärförmåga efter uppsprickning styrs av vilken typ av fiber som används och varierar beroende på antalet fiber och dess orientering relativt den spricka som uppstår (Sjölander 2024). Brottmoden för fiber är antingen utdrag från betongmatrisen eller dragbrott i fibern. Vilken typ som inträffar beror på samspelet i vidhäftningen mellan fiber och betong samt fiberns deformationsförmåga och dragkapacitet. Alla dessa mekanismer konsumerar energi vilket leder till en ökad duktilitet hos betongen. Tidigare har mycket forskning gjorts på nedbrytningen av de enskilda materialen, dvs betongen och de olika fibertypen. Eftersom brottet styrs av ett samspel mellan materialen är det viktigt att studera nedbrytning och förändring av bärförmåga av det sammansatta materialet.

2.3 Åldringsmetoder för fiberbetong

Effekten av åldring och exponering av fiberarmerad betong kan göras genom långtidsprovning eller accelererad provning. Långtidsprovning är, från ett teoretiskt perspektiv, en förhållandevis enkel men pålitlig metod. Metoden bygger på en jämförelse av bärförmåga före och efter exponering där fysiska provkroppar placeras i den tänkte

miljön under en väldigt lång tid. Det finns dock praktiska problem som innefattar hur provkropparna ska placeras på ett säkert sätt i den tänkta miljön samt att nedbrytning av betong och fibrer är en långsam process. Provkropparna bör därmed placeras under flertalet år i miljön för att man ska kunna göra en bedömning av hur det påverkarna bärförmågan. Exempelvis förvarade Nordström (2024) spruckna stålfiberarmerade provkroppar under totalt 25 år i fält.

Jämförelsevis är accelererad provning en betydligt snabbare process där indikationer av exponeringens betydelse kan tas fram inom ett par månader. För att accelerera effekten av den exponerade miljön utsätts materialen för temperaturer och koncentrationer av ämnen som är betydligt högre än materialen normalt utsätts för. Ett exempel på detta är när avrostning av stålfiber studeras. Ingen standardiserad metod finns för detta och rapporterade resultat i litteraturen bygger på olika salthalter och exponeringsgrad av saltvatten. Ett vanligt scenario bygger på att använda vatten med salthalter mellan 2 och 5 %. Proverna är därefter i cyklisk kontakt med saltvatten för att accelerera korrosionen. Olika scenarion finns där hela eller delar av provet exponeras för saltvatten och därefter torkas. En vanlig frekvens på dessa cykler är ett antal dagar, se t.ex. Nordström (2005). Andra sätt att accelerera korrosion av stål är att använda en kombination av vatten, salt och elektricitet (Fernandes och Neves, 2024). Att omsätta resultaten från accelererad provning under ett par månader under extrema förhållande till en förväntad livslång under normal exponering kan vara svårt och provmiljöer måste noggrant kalibreras mot långtidsförsök för att kunna bedöma hur lång tids verklig exponering den simulerade (accelererade) miljön motsvarar. Vidare finns det en risk att den accelererade miljön triggar en annan nedbrytningsmekanism som inte var avsedd att studeras.

3. Experimentella försök

Nedan beskrivs de experimentella försök som genomförts för att utvärdera lämpligheten att använda olika fibertyper i svenska tunnlar. Från ett praktiskt och ekonomiskt perspektiv var syftet att använda en provmetod som använde mindre provkroppar.

3.1 Barcelona metoden

Barcelonametoden utvecklades av Molins m.fl. (2009) och illustreras i Figur 3. Denna visar provuppställningen som bygger på att kuber eller cylindrar spräcks med hjälp av cirkulära stålkroppar som placeras i ovan- och underkant av provet. Provkropparna trycks därefter till en given vertikal deformation vilket leder till sprickbildning i fiberbetongen och dess energiabsorption kan beräknas genom arean under kraft-deformations kurvan. Kubens sidor och cylinderns höjd och diameter är alla 150 mm vilket gör det till en attraktiv metod att använda för att studera åldringseffekter av fiberarmerad betong eftersom provkropparna är små och enkla att hantera att lagra i en laboratoriemiljö för att genomföra accelererad provning. Provning resulterar i ett eller två sprickplan vilket gör att brottytans minsta storlek är 150 × 150 mm vilket är större än de traditionella balkar som används i Sverige (SIS, 2006).

Figur 3. Barcelonametoden utvecklad av Molins m.fl. (2009). Provkroppar trycks till brott med hjälp av centriskt placerade stålpuckar (ovan) och energiabsorptionen under uppsprickning (nedan) kan mätas. Figur från Sjölander m.fl. (2026).

3.2 Provserie

För att studera lämpligheten att använda Barcelonametoden som ett verktyg att utvärdera olika exponeringsmiljöer genomfördes en pilotserie där totalt 93 kuber gjöts. Kuberna var armerade med fiber av basalt, glas, syntet och stål. Som referens gjöts även ett antal oarmerade kuber. Syftet med denna provserie var att undersöka spridningen med metoden. Inom ramen för provserien gjordes även initiala accelererande försök. Syftet med dessa var att göra en första undersökning av olika miljöers eventuella påverkan på bärförmågan och om denna ändring kunde detekteras. Fiber av basalt, syntet och glas utsattes för accelererad åldring genom att förvaras i vatten med 50°C (Exp. 1) under 56

dagar eller med 40°C under 131 dagar (Exp. 2). Baserat på Arrhenius funktion ska detta motsvara cirka 30 års exponering i svenskt klimat. Stålfiberarmerade kuber spräcktes först i testriggen och var därefter nedsänkta till hälften i vatten med 3.5 % koncentration av salt (Exp. 3). För att provkropparna skulle vara cykliskt våta och torra roterades dem med en genomsnittlig 2-dagars cykel. För varje exponeringstyp jämfördes en testerie med referensprover med resultat efter exponering. Storleken på provserierna varierande mellan 6 och 10 kuber av varje typ. Mer detaljer presenteras av Sjölander m.fl. (2026).

3.3 Utvärdering av provresultat

Spridningen i resultat studerades på två sätt. Först beräknades medelvärdet för hela provserien och plottades tillsammans med minsta och högsta värdet för varje deformationssteg. Detta ger en snabb visuell bild av spridningen av resultat. Därefter gjordes en systematisk analys för att kvantifiera spridningen i resultat samt för att göra en analys av mängden provkroppar som behövs i en provserie. För varje provserie skattas medelvärdet μ, standardavvikelsen σ samt variationskoefficienten CoV. Förutsättningar för denna beräkning är att resultaten kommer att vara normalfördelade, vilket materialdata vanligtvis är. För att uppskatta antalet provkroppar n som krävs för att upptäcka en given procentuell skillnad Δ mellan en grupp med referensprover och en grupp med exponerade prover görs en enkelsidig hypotesprövning med följande ekvation.

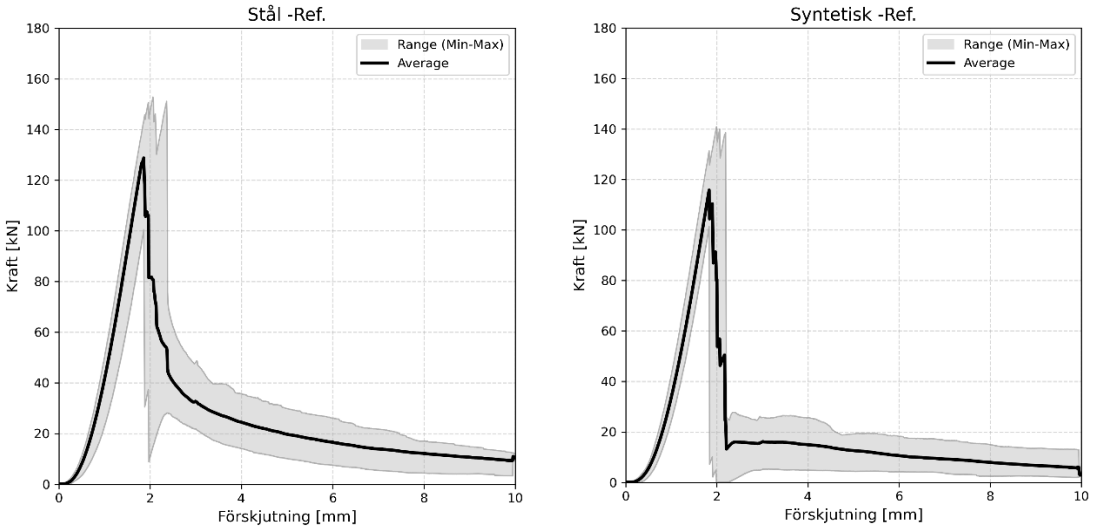
$$n = \frac{2\sigma^2\left(Z_\alpha + Z_\beta\right)^2}{\Delta^2} \quad (1)$$

Nollhypotesen H_0 i detta fall är att medelvärdet är samma för en provgrupp före och efter exponering. Den alternativa hypotesen H_1 är att medelvärdet har minskat. Denna beräkning bygger på att provserien är normalfördelad och att standardavvikelsen σ (som beräknas från genomförda prover) är känd. För att bedöma antalet prover n behöver värden på de två variablerna Z_α (signifikans) och Z_β (statistisk styrka) att antas. Här användes en signifikans på 95 % ($Z_\alpha = 1.645$) och en statistisk styrka på 80 % ($Z_\beta = 0.84$). Detta betyder att risken för ett falskt positivt svar är 5 % (H_0 är sann men förkastas, dvs medelvärdet bedöms vara förändrat trots att detta inte stämmer) och risken för ett falskt negativt resultat är 20 % (H_1 är sann men H_0 förkastas ej, dvs medelvärdet för exponerade gruppen har sjunkit men det upptäcks inte). I detta fall används metoden till att bedöma hur många provkroppar som krävs för att upptäcka ett givet Δ.

4. Resultat

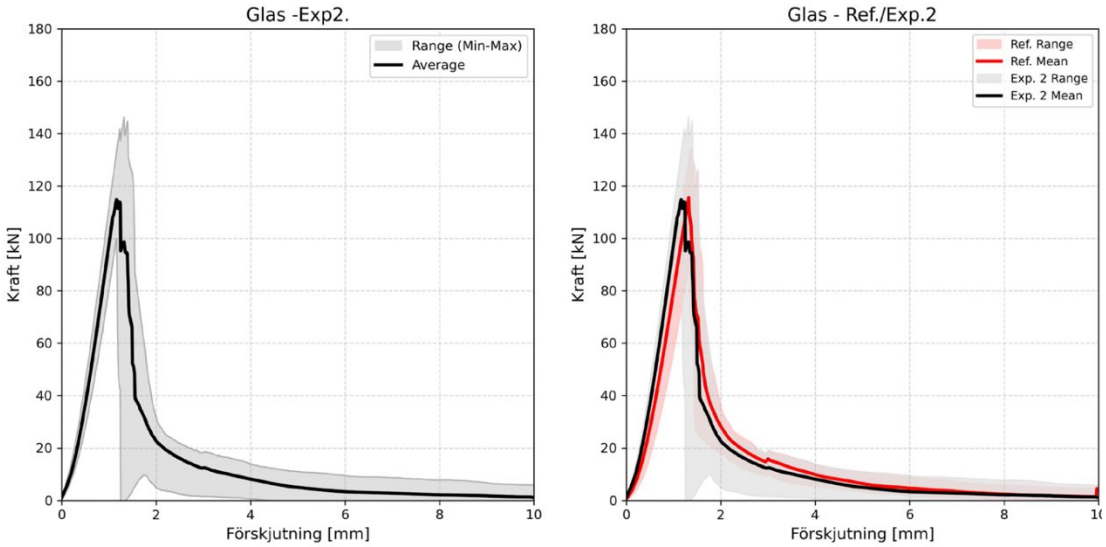
I Figur 4 visas kraft-deformationskurvan för fiberarmerade kuber med stål och syntetfiber. Total provades tio kuber av respektive fibertyp och svarta kurvan visar medelvärdet av provserien och den skuggade delen visar högsta och lägsta värdet för hela provserien. Resultaten visar ett liknande intervall på brottlasten (cirka 90–150 kN) för båda serierna vilket antyder en likvärdig kvalitet hos betongen. Resultaten visar att för de använda doseringarna (40 kg/m^3 stål och 4,5 kg/m^3 syntet) blir brottenergin högre för stålfiber jämfört med syntetfiber med ett medelvärde på 163 J och 91 J. Här är brottenergin definierad som den energi som konsumeras från maxlasten tills en

deformation på 10 mm uppstår. Skillnaden i energi beror delvis på att stålfibrer presterar bättre vid små deformationer jämfört med syntetfibrer och kan, delvis, kompenseras med en större fibermängd. Spridningen i brottenergin var relativt stor och CoV var 27 respektive 38 % för stål och syntetfibrer. I Figur 5 visas kraft-deformationskurvan för glasfiberarmerad betong efter exponering i vatten med 40°C under 131 dagar och en jämförelse mellan referens- och exponerade prover. Resultaten antyder att bärförmågan för glasfiberarmerad betong är oförändrad efter cirka 30 års exponering i svensk miljö.



Figur 4. Kraft-deformationskurvor för referensprover med stål och syntetfiber. Svart linje visar medelvärde av tio prover och skuggade delen visar spridningen jämfört med minsta och högsta värdet för alla prover. Från Sjölander m.fl. (2026).

I Tabell 1 redovisas den genomförda hypotesprövningen på två sätt, dels genom att beakta hela kurvan (även den elastiska energin), dels med enbart brottenergin. Syftet med detta var att ge en uppskattning av hur många provkroppar som en testserie ska bestå av för att med säkerhet kunna säga att den observerade försämrade bärförmågan beror på exponering i en viss miljö och inte beror på variationer i provserien. Som angetts tidigare användes en signifikans på 95 % ($Z_\alpha = 1.645$) och en statistisk styrka på 80 %. Tabellen anger antalet provkroppar som krävs för att upptäcka en skillnad på 25 (n_{25}) eller 30 % (n_{30}). För detta krävs 15 respektive 11 prover för stål och 29 respektive 20 provkroppar för syntet. Den stora skillnaden i antalet provkroppar beror här på skillnaden i standardavvikelse mellan provserierna för stål och syntetfibrer. En intressant observation är att standardavvikelsen σ är nästan helt oberoende om den elastiska energin tas med eller ej. Medelvärdet μ av energi sjunker dock signifikant. Detta visar att variation i den elastiska responsen är liten och antalet prover som behövs för att upptäcka en skillnad minskar eftersom σ är likvärdig medan μ minskar kraftigt. Detta visar samtidigt att den stora spridningen och därmed osäkerheten beror på fibrernas förmåga att ta upp energi.



Figur 5. Kraft-deformationskurva för glasfiberarmerad betong efter exponering (vänster) och kombination av referens (rött) och exponerade prover (svart) i höger figur. Från Sjölander m.fl. (2026).

Tabell 1. Antal prov som behövs för att med statistiks säkerhet upptäcka en minskad bärförmåga för olika fibermaterial.

Material	**Metod**	μ **[J]**	σ **[J]**	n_{25}	n_{30}
Stål	Hela kurvan	267	45	6	4
Stål	Efter peak	163	44	15	11
Basalt	Hela kurvan	272	98	26	18
Basalt	Efter peak	175	93	57	40
Glas	Hela kurvan	160	24	5	4
Glas	Efter peak	87	24	15	11
Syntet	Hela kurvan	183	39	9	7
Syntet	Efter peak	91	35	29	20

5. Diskussion

En kritik som kan framföras mot Barcelonametoden är att brottet skiljer sig jämfört med balkar och runda plattor. Provkroppar som testas med Barcelonametoden utsätts för en kombination av ren dragning och böjning medans balkar och plattor i huvudsak utsätts för böjning. Den energiupptagande förmågan från Barcelonatester ska därför inte jämföras med resultat från runda plattor. Syftet här är dock inte att använda metoden vid dimensionering av sprutbetong utan för att jämföra responsen mellan referensprover och provkroppar som exponerats för en viss miljö. Om den fiberarmerade betongen utsätts för en miljö som initierar nedbrytning av något av materialen bör detta kunna detekteras med en försämrad energiupptagande förmåga och genom detta kan man identifiera vilka fibertyper som är lämpliga att använda i vilka miljöer. Som tidigare nämnts är den stora

fördelen med Barcelonametoden, jämfört med standard balkar och plattor (SIS, 2006; ASTM, 2020) provkropparnas storlek. Kuber med en 150 mm sida är enklare att hantera och behöver mindre plats om accelererad provning ska genomföras.

En oro är att den relativt lilla brottytan leder till stora variationer i resultaten vilket gör det svårt att avgöra om en detekterad skillnad i bärförmåga beror på den naturliga spridningen eller att nedbrytning har initierats. Resultaten visade dels en stor spridning i resultaten men i detta fall även skillnader mellan olika fibertyper. Vidare var spridningen i resultat större när enbart brottenergin beräknades och vilken energi som betraktas (hela kurvan eller enbart brottenergin) kommer ha stor inverkan på antalet prover. Å ena sidan känns det som ett rimligt antagande att bortse från den elastiska energin eftersom fiberarmerad sprutbetong vanligen dimensioneras baserat på att den är sprucken. Å andra sidan kommer en relativt stor andel av sprutbetongen att förbli osprucken. Analysen av antalet prover visar att valet av denna parameter, tillsammans med signifikans och statistik styrka kommer ha stor påverkan på antalet prover. Även vilken nivå av förändring i bärförmåga som ska upptäckas kommer ha stor påverkan. Att upptäcka en större skillnad i bärförmåga kräver mindre provkroppar och om man ska studera miljöernas lämplighet är det kanske lämpligt att en större påverkan ska detekteras. Detta bör utredas vidare och som nästa steg bör en större provserie med en fibertyp studeras. Detta kan användas för att ta fram ett bättre statistiskt underlag för att kunna avgöra hur många provkroppar som krävs.

6. Slutsatser

Resultaten i denna artikel och i den kommande BeFo rapporten (Sjölander m.fl. 2026) visar att Barcelonametoden kan vara en lämplig metod för att utvärdera nedbrytningen av fiberarmerad sprutbetong i tunnelmiljö. Detta görs genom att utvärdera förändringen i den energiupptagande förmåga före och efter exponering. Genom att genomföra accelererande provning kan man få en indikation på vilka fibrer som är lämpliga och mindre lämpliga att använda i de olika miljöer som finns i en tunnel. Provning av fiberarmerad sprutbetong påvisar ofta stor spridning i resultat. Detta beror på den naturliga spridningen i antalet och riktningen för de fibrer som korsar sprickan och den förväntade spridningen är större för mindre provkroppar. Resultat från denna provserie visade att standardavvikelsen i den fiberarmerade betongens energiupptagande förmåga var i det närmaste opåverkad om hela responsen (elastisk tillsammans med brottenergi) eller en enbart brottenergin beräknades. Detta betyder att variationen i elastisk energiupptagning (upp till maxlast) är liten jämfört med brottenergin, här definierad som energin från maxlast till 10 mm deformation. Genom en hypotesprövning redovisas ett förslag på hur många provkroppar som krävs för att upptäcka en given procentuell skillnad i medelvärdet. Antalet provkroppar är starkt kopplat till vilken procentuell förändring som ska upptäckas och ökar markant om studien enbart fokuserar på att detektera skillnader i brottenergi. För att upptäcka en procentuell förändring av energiupptagningen med 25 % bör provserien minst bestå av 15 provkroppar. Detta antal beror dock, delvis, på fibertyp och bör här ses som en första rekommendation och detta bör studeras vidare.

Referenser

ASTM. (2020). *ASTM C1550-20: Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel).* Teknisk standard. ASTM International, Pennsylvania, USA.

Afroz, M., Patnaikuni, I., Venkatesan. S. (2017). Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Construction and Building Materials (*154).

Ansell, A., Nordström, E. (2022). Service-life extension of tunnel shotcrete subjected to steel fibre corrosion. *In Procceedings of XXIV Nordic Concrete Research Symposium*, Stockholm, Sweden.

Bernard, E. S. (2002). Correlations in the Behaviour of Fibre Reinforced Shotcrete Beam and Panel Specimens. *Materials and Structures*, RILEM, Vol 35.

Brodd, E., Sjölander, A., Östlund, L. (2023). The use of slag in accelerated shotcrete: A pilot study on the influence of the early compressive strength. *Nordic Concrete Research,* 69.

Bolooki Poorsaheli, H., Behravan, A., Tabatabaei Aghda, S.T., Gholami, A. (2019). A study on the durability parameters of concrete structures reinforced with synthetic fibers in high chloride concentrated shorelines. *Construction and Building Materials,* 200:578–585.

Fernandes, M., Neves, R. (2024). Assessment of Fiber Corrosion Influence in the Flexural Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Applied Sciences*, 14(13), 5611.

Jameel, F., Ansell, A., Sjölander, A. (2026). *Bindemedlens och acceleratorns inverkan på sprutbetongs hållfasthetstillväxt under tidig ålder*. BeFo rapport, Stockholm, Sweden.

Hanke, S. A., Collis, A., and Bernard, E. S. (2001). The M5 Motorway: An Education in Quality Assurance for Fibre Reinforced Shotcrete. *Shotcrete: Engineering Developments*. Swets & Zeitlinger, Lisse.

Nordström, E. (2005) *Durability of sprayed concrete*. Doktorsavhandling. Luleå Tekniska Universitet. Luleå, Sweden.

Nordström, E. (2024). *Långtidsexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong.* Befo rapport 262, Stockholm, Sweden.

Molins, C., Aguado, A., Saludes, S. (2009). Double punch test to control the energy dissipation in tension of frc (barcelona test). *Materials and Structures,* 42.

SIS. (2006). *SS-EN 14488-3 Provning av sprutbetong - Del 3: Böjdraghållfasthet (sprick-, maximal- och residualhållfasthet) hos fiberarmerade provbalkar*. Teknisk Standard. Svenska institutet för standarder, Stockholm, Sverige.

Sjölander, A., Ansell, A., Nordström, E. (2023a). Effective use of fibres of various types and material for shotcrete in rock support for tunnels. *In proceedings of World Tunnel Congress 2023.* Athens, Greece.

Sjölander, A., Ansell, A., Nordström, E. (2023b). On the Design of Permanent Rock Support Using Fibre-Reinforced Shotcrete. *Fibers*, 11(2), 20.

Sjölander, A., Ansell, A., Nordström. E. (2024). *Performance of shotcrete tunnel support with steel, synthetic and basalt fibres.* Trita-abe-rpt 2417, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Sjölander, A., Gram, A., Nordström, E., Bryne, L.E., Ansell, A. (2026). *Långtidsexponering av sprutbetong med alternativa fibrer.* Befo rapport, Stockholm, Sweden

Östlund, L., Sjölander, A., and Brodd, E. 2023. Post-Cracking Behaviour of Fibre-Reinforced Shotcrete: A Numerical Comparision Betwen Beams and Panels. *Fibers*, 11.