

Slutrapport för SBUF Forskningsprojekt nr 12266:

Undersökning och utveckling av materialegenskaper hos sprutbetong för bergtunnlar

Lars Elof Bryne & Anders Ansell

Bakgrund och syfte

Projektet syftar till att ge förståelse för sprutbetongs funktion i samverkan med hårt berg. Den överordnade hypotesen har varit att sprutbetongs mikrostruktur och materialegenskaper skiljer sig från vanlig betongs så kraftigt att kunskaper om dennas materialegenskaper och deras utveckling med tiden inte är applicerbara på sprutbetong. Projektet har omfattat kartläggning av viktiga, mekaniska egenskaper för sprutbetong och undersökningar av dess struktur, med syfte att förstå de mekanismer som styr utvecklingen av de mekaniska egenskaperna inklusive bindningen till berg. Målet har varit att klarlägga väsentliga skillnader mellan sprutbetong och konventionell betong, något som är av stor vikt vid analys och konstruktionsarbete. Tidigare har materialdata för nysprutad och hårdnande sprutbetongs egenskaper under realistiska förhållanden i stort sett saknats. Kartläggningen av de mekaniska egenskaperna har också kopplats till ett djupare studium av sprutbetongens struktur, vilket ger förståelse av grundläggande mekanismer som styr utvecklingen av mekaniska egenskaper. Inom projektet har egenskaper så som tryckhållfasthet, vidhäftningshållfasthet, böjdraghållfasthet, elasticitetsmodul, fri och förhindrad krympning som funktion av ålder undersökts. Fokus har särskilt varit riktat mot vidhäftningshållfasthet och förhindrad krympning för vilka två nya provningsmetoder utvecklats och utvärderats. Mikrostrukturella studier har utförts som komplement till provningen av vidhäftningshållfasthet.

Projektets genomförande

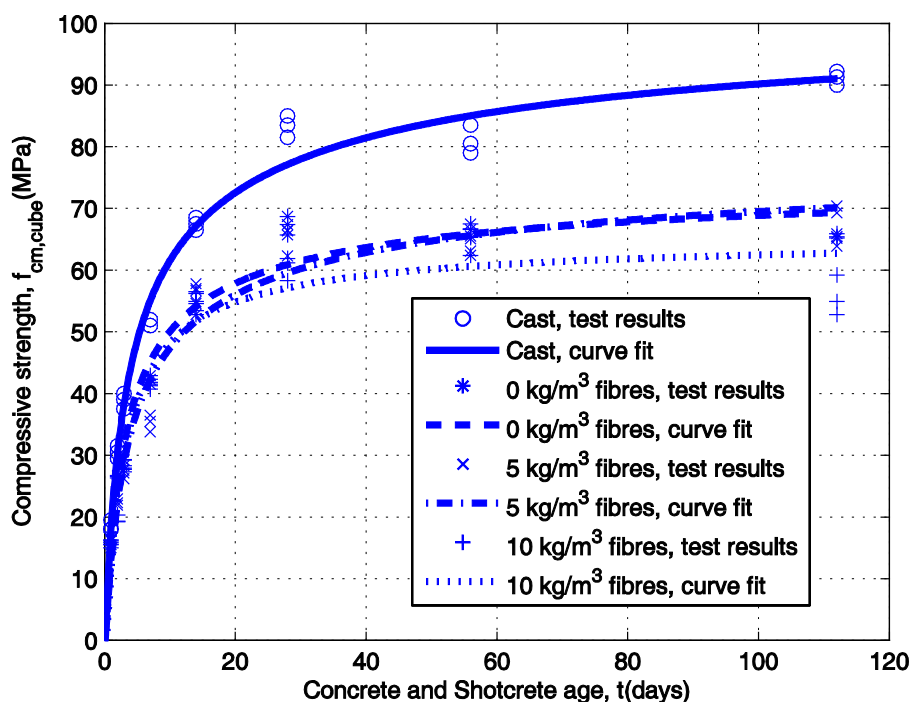
Projektet har genomförts som ett doktorandprojekt vid KTH Bygghälsa, avdelningen för Betongbyggnad. Laboratieprovningarna har skett vid KTH Bygghälsa och CBI Betonginstitutet i Stockholm samt vid Vattenfalls Älvkarlebylaboratorium. Sprutning av provkroppar har genomförts av BESAB som också står som sökande för SBUF-delen i projektet. Förutom av SBUF så har projektet också stötts finansiellt av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) och Trafikverket. Projektet redovisas och sammanfattas i en doktorsavhandling [1] som är av typen sammanläggning där också fem vetenskapliga artiklar [2-6] ingår. Utöver detta har också resultaten under åren 2011-2014 presenterats vid fem konferenser inom betong och sprutbetongområdet [7-16].

Laboratorieprovning

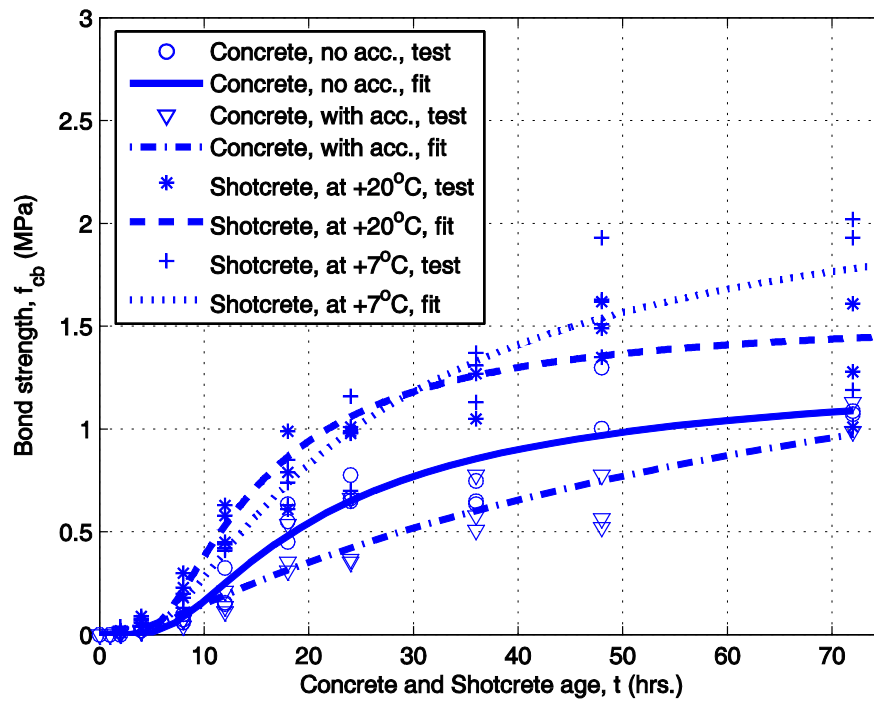
Etablerade undersökningsmetoder har använts för att undersöka tryckhållfasthet, böjdraghållfasthet, fri och förhindrad krympning. För vidhäftningshållfasthet hos ung sprutbetong har ny provningsmetodik lämplig för laboriemiljö utvecklats. Metoden kan också användas med sprutbetongprovkroppar sprutade under fältförhållanden. Genom att använda granitplattor med förborrade cylindriska kärnor som underlag för sprutbetongen elimineras störningar från kärnborring och friktion vid utdragning och mätning. Mekanisk koppling till sprutbetongen behöver inte heller göras vilket därigenom möjliggör provning redan vid mycket låga sprutbetongåldrar. Även för mätning av delvis förhindrad krympning har ny provningsmetodik utvecklats. Det studerade fallet motsvarar förhållanden då mjuka dräner på bergytter har täckts med sprutbetong som ska ge ett mekaniskt skydd. Det mjuka underlaget ger en dålig spänningsfördelning då sprutbetongen krymper och därigenom kan enstaka vida sprickor uppstå istället för många tunna sprickor, vilket ofta är fallet med krympande betong sprutad direkt på hårt berg. Försökuppställningen består av en betongsprutad granitplatta som instrumenteras med trådtöjningsgivare vilket möjliggör utvärdering av uppkomna töjningar och spänningar samt tidsförlopp tills krympsprickor uppstår.

Resultat

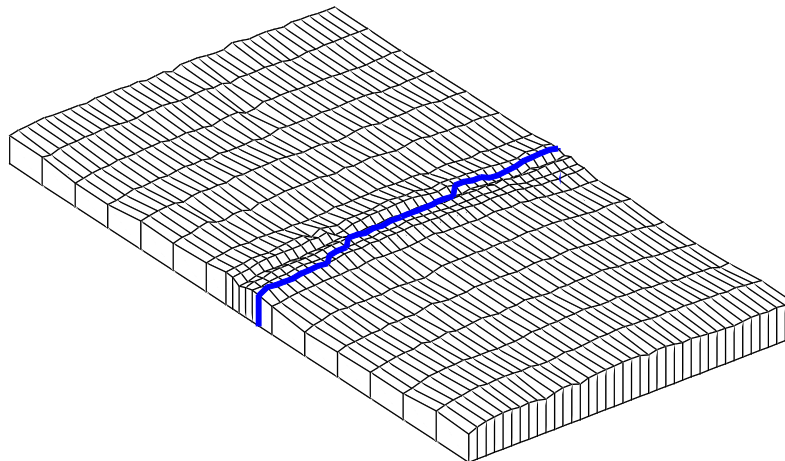
Projektet redovisar materialparametrar för mycket ung sprutbetong, upp till 3 dygn, samt längre serier av försöksdata, upp till 112 dygn. Flera av materialparametrarna jämförs med motsvarande hållfastheter för gjuten betong. Det finns också exempel på variation med temperatur och fiberinnehåll. Nedan ges i Figur 1-4 exempel på i tur och ordning tryckhållfasthet, vidhäftningshållfasthet och resultat från försök med delvis förhindrad krympning.



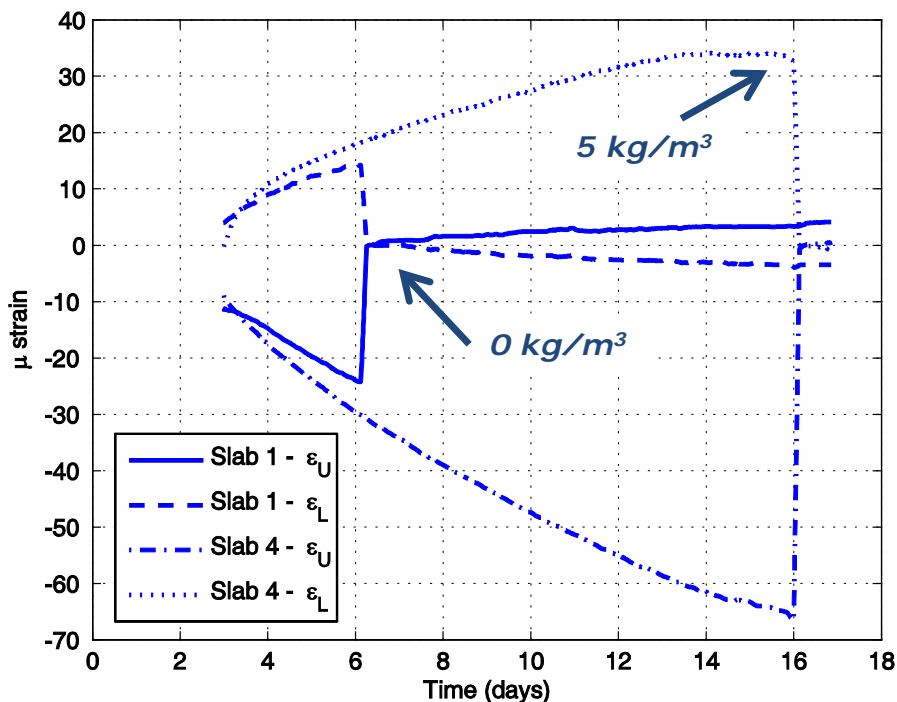
Figur 1: Tryckhållfasthet för sprutbetong och gjutna kontrollprov.



Figur 2: Vidhäftningshållfasthet som funktion av ålder, med och utan accelerator och för sprutbetong vid +7°C och +20°C.



Figur 3: Ystruktur för provplatta (nr 4). Spricka markerad med kraftig linje. Det horisontella mät nätet är $10 \times 50 \text{ mm}^2$.



Figur 4: Uppmätta töjningar för glasfiberarmerad (nr 4) och oarmerad (nr 1) provplatta. Från övre och nedre töjningsgivare på höger plattsida.

Sammanfattning av huvudresultat

Projektet bidrar till en ökad förståelse av de strukturella egenskaperna hos sprutbetong, som skiljer sig mycket från gjuten betongs. Inom projektet har mekaniska egenskaper hos sprutbetong som funktion av ålder, lufttemperatur, accelerator- och fibertillsats studerats med syfte att klarlägga väsentliga skillnader mellan sprutbetong och konventionell betong. Försöksresultat visar hur de mekaniska egenskaperna tryckhållfasthet, böjdraghållfasthet, vidhäftningshållfasthet och krympning utvecklas med tiden hos betong sprutad på hårt berg. Även de speciella härdningsbetingelser som tunnelmiljön medför har till viss del studerats. Genom projektet fås kunskap och möjligheter att förstå hur sprutbetongs egenskaper kan förbättras samt underlag att genomföra avancerad analys av sprutbetong under statisk och dynamisk last för att bättre förstå dess samverkan med berg i undermarksanläggningar. Bindningen mot berg är en av de viktigaste egenskaperna för sprutbetong som används vid bergförstärkning. Under den första tiden direkt efter sprutning är den fysikaliska bindningen mot berg beroende av tillstyvnadsacceleratoren och den mikrostruktur hos sprutbetongen som acceleratoren gett upphov till. Den nyligen utvecklade metoden har provats och utvärderats och visat sig vara användbar för vidhäftningshållfasthet redan ett par timmar efter sprutning. Bindningen eller adhesionen beror av flera olika faktorer, så som texturen hos berget, typ av tillstyvnadsaccelerator, applikationsteknik mm. I detta arbete har mikrostrukturens utveckling i övergångszonen mellan berg och cementpasta och bindningens styrkeutveckling undersökts. Resultaten visar att vidhäftningshållfastheten är relaterad till hydratationsprocessen, d.v.s. styrkeutvecklingen hos sprutbetongen. Den tidiga utvecklingen av övergångszonen studerades med hjälp av svepelektronmikroskop, vilket medgav observation av strukturella förändringar över tid, både före och efter den riktiga cement-

hydratationen. Förhindrad krympning hos sprutbetong, speciellt sprutad på mjuka dräneringsmattor ingående i ett tunnelsystem där kontinuerlig bindning till berget ej föreligger, kan vara skadlig för beständigheten hos tunnelsystemet och ge upphov till höga underhålls- och reparationskostnader. Den utvecklade provningsmetoden uppvisar ett realistiskt sätt att fånga beteendet hos en dräneringskonstruktion in situ. Metoden kan användas i utvärderingen av olika tekniska lösningar i syfte att förhindra eller minimera sprickbildning i mjuka dräneringskonstruktioner.

Praktiska tillämpningar

De redovisade resultaten har relevans för tunnelbyggande och gruvdrift i hårt berg. Syftet har varit att klarlägga väsentliga skillnader mellan sprutbetong och konventionell betong, något som är av stor vikt vid analys och konstruktionsarbete. Tidigare har materialdata för nysprutad och hårdnande sprutbetongs egenskaper i stort sett saknats. Den typ av data som presenteras gör det möjligt att optimera sprutbetongförstärkningar så att säkerhet, ekonomi och beständighet hos tunnlar och berggrum ökar. De i projektet framtagna nya provningsmetoderna kan direkt tillämpas för att jämföra alternativa konstruktionslösningar och sprutbetongtyper. Detta gäller särskilt provning av vidhäftning vid mycket tidig sprutbetongålder, vilket tidigare inte har varit möjligt att genomföra.

Projektet redovisas i följande publikationer:

1. Bryne, L.E., *Time dependent material properties of shotcrete for hard rock tunnelling*. Doktorsavhandling, KTH RByggvetenskap, Stockholm, maj 2014.
2. Bryne, L.E., Ansell, A., Holmgren, J., 'Investigation of restrained shrinkage cracking in partially fixed shotcrete linings', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 136–142 (2014).
3. Bryne, L.E., Ansell, A., Holmgren, J., 'Shrinkage testing of end restrained shotcrete on granite slabs', *Magazine of Concrete Research*, 66, 859–869 (2014).
4. Bryne, L.E., Lagerblad, B., 'Early age development of texture and bond at the interfacial zone between hard rock and shotcrete', Inskickad till *ACI Materials Journal* i april 2014.
5. Bryne, L.E., Ansell, A., Holmgren, J., 'Laboratory testing of early age bond strength between concrete for shotcrete use and rock', *Nordic Concrete Research*, 47, 81–100 (2013).
6. Bryne, L.E., Ansell, A., Holmgren, J., 'Laboratory testing of early age bond strength of shotcrete on hard rock', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 113–119 (2014).

Konferensbidrag:

7. Bryne, L.E., Ansell, A., 'Restrained shrinkage tests of fibre concrete for shotcrete applications in hard rock tunnels'. *XXI Symposium on Nordic Concrete Research & Development*, Hämeenlinna, Maj 2011.
8. Bryne, L.E., Holmgren, J., Ansell, A., 'Experimental investigation of the bond strength between rock and hardening sprayed concrete'. *6th International Symposium on Sprayed Concrete*, Tromsö, September 2011.
9. Bryne, L.E., Ansell, A., 'Laboratory testing of the bond strength between shotcrete and rock'. *fib Symposium 2012, Concrete Structures for Sustainable Community*, Stockholm, Juni 2012.
10. Bryne, L. E., Lagerblad, B., 'Texture and bond at the interfacial zone between rock and sprayed concrete'. *fib Symposium 2012, Concrete Structures for Sustainable Community*, Stockholm, Juni 2012.
11. Bryne, L. E., Ansell, A., Holmgren, J., 'Early age bond strength between hard rock and hardening sprayed concrete'. *7th International Symposium on Sprayed Concrete*, Sandefjord, Juni 2014.
12. Ansell, A., Bryne, L. E., Holmgren, J. 'Testing and evaluation of shrinkage cracking in sprayed concrete on soft drains'. *7th International Symposium on Sprayed Concrete*, Sandefjord, Juni 2014.
13. Lagerblad, B., Bryne, L. E., 'Texture and bond at the interfacial zone between hard rock and sprayed concrete at early age hardening time'. *7th International Symposium on Sprayed Concrete*, Sandefjord, Juni 2014.
14. Ansell, A., Bryne, L. E. 'Laboratory evaluation of shrinkage in shotcrete on soft drains'. *XXII Symposium on Nordic Concrete Research & Development*, Reykjavik, Augusti 2014.
15. Bryne, L. E., Ansell, A., 'Laboratory testing of early age shotcrete bond strength'. *XXII Symposium on Nordic Concrete Research & Development*, Reykjavik, Augusti 2014.
16. Lagerblad, B., Bryne, L. E., 'Cement hydration and development of texture and bond at interfacial zone between hard rock and shotcrete'. *XXII Symposium on Nordic Concrete Research & Development*, Reykjavik, Augusti 2014.