

Slutrapport för SBUF Forskningsprojekt nr 12641:

Risken för skador hos betong utsatt för vibrationer i tidig ålder

Lamis Ahmed & Anders Ansell

Bakgrund och syfte

Det råder idag fortfarande relativt stor osäkerhet om de vibrationsnivåer som kan tolereras nära nygjuten betong. Detta leder ofta till att alltför konservativa gränsvärden används vid byggande, med merkostnader som följd. För de typer av dynamiska belastningar som kan verka på ung och hårdnande betong är effekten från laster av stöttyp den allvarligaste och sådana störande vibrationerna kan härröra från till exempel sprängning. Målet med projektet har varit att ge mer nyanserade och detaljerade rekommendationer än de som finns tillgängliga idag. Två fall har valts för jämförelse mellan beräkning och försöksresultat - sprutbetong på hårt berg utsatt för sprängning och gjutna laboratorieprovkroppar utsatta för direkt mekanisk stötlast. Studien av sprutbetong har medtagits för att påvisa behovet av specialiserade riktlinjer för andra fall än för massiva betongkonstruktioner, dvs. strukturella element eller betongvolymmer med stora dimensioner i alla riktningar. Syftet är att sammanställa och presentera den kunskap som idag finns inom området och att med resultat från litteraturen och egna beräkningsexempel få kunskap för att vidareutveckla dagens svenska riktlinjer för vibrationsbelastad ung betong. De frågeställningar som diskuteras utgår från praktiska problem vid främst svenskt hus- och anläggningsbyggande och knyter på ett effektivt sätt samman intressen och behov av information som idag finns hos entreprenörer, konstruktörer, beställare, forskare och högskola.

Projektets genomförande

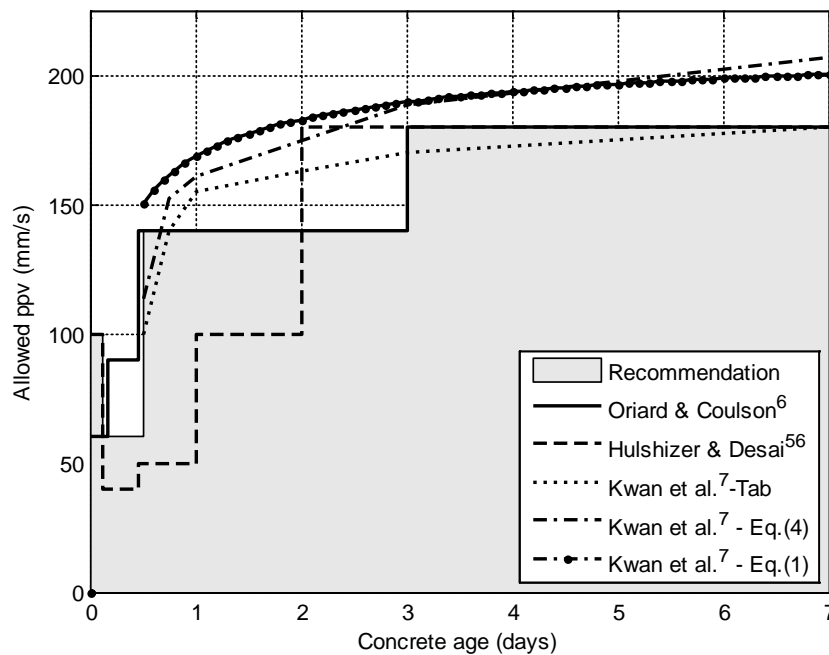
Projektet har genomförts som ett doktorandprojekt vid KTH Byggvetenskap, avdelningen för Betongbyggnad, som en utvidgad fortsättning till ett licentiatprojekt om vibrationstålighet hos sprutbetong på hårt berg, slutredovisat i en licentiatuppsats i maj 2012 [6]. Det här sammanfattade projektet utgör huvuddelen av doktorandprojektets andra halva, med en utvidgning till studier av såväl gjuten som sprutad ung betong. Licentiatdelen ingår till fullo i den slutliga doktorsavhandlingen [1] och de tidigare studierna på sprutbetong utgör där några av flera typstudier. Projektet har kombinerat kunskaper inom områdena Strukturodynamik, Vågutbredning, Mätningsteknik och Betongmaterialteknik och har omfattat Litteraturstudie, Strukturodynamisk analys, Frekvensanalys, Finit elementmodellering, Analytisk konstruktionsberäkning och Vibrationsmätning i laboratorium. Förutom av SBUF så har projektet också stötts finansiellt av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo). Projektet redovisas och sammanfattas i en doktorsavhandling [1] som är av typen sammanläggning där också sex vetenskapliga artiklar ingår, tre nya för den andra etappen [3-5] och tre som även ingått i licentiatuppsatsen [8-10]. Utöver detta har också projektets bakgrund, frågeställning och delresultat under åren 2012-2015 presenterats vid konferenser inom betong och sprutbetongområdet [11-13].

Litteratursammanställning

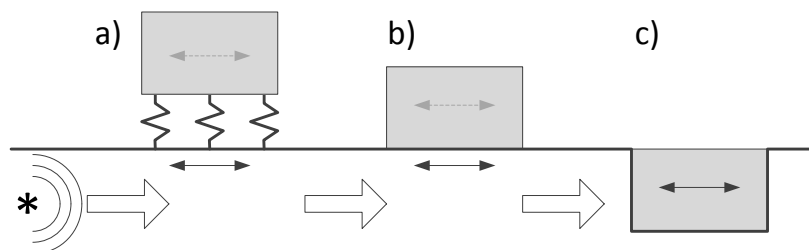
Litteraturstudien visar att det finns stora skillnader mellan rekommenderade maximala vibrationshastigheter från nationella föreskrifter och standarder samt de som rekommenderas av forskare och ingenjörer. Detta bekräftar att stora säkerhetsmarginaler finns vilket orsakar onödiga förseningar och stora säkerhetsavstånd. Inom de första sju dagarna är skillnaderna typiskt ca fyra gånger, även i fall med ytterligare säkerhetsfaktorer antagna i samband med experimentella resultat. Säkerhetsmarginalen i standarder och nationella bestämmelser kan därför vara mer än tio gånger de vibrationshastigheter som kan mätas i fält eller i laboratorium. Vissa nationella standarder och specifikationer för vibrationer nära ung och hårdnande betong jämförs i Tabell 1. Publicerade studier och observationer har ofta utförts under olika förhållanden som gör jämförelser svår. De gränsvärden som presenteras i Figur 1 har dock utförts under liknande förhållanden och här plottats för en tidsperiod på upp till sju dagar för jämförelse. Se doktorsavhandlingen [1] och artikel [3] för detaljer kring de citerade resultaten. De jämförda rekommendationerna är giltiga för sprängning på nära håll, varför effekten av frekvensen vanligtvis är utelämnad i denna typ av riktlinjer. En slutsats från litteraturstudien är att för analys av en betongkonstruktion kan denna klassas som strukturellt betongelement, betongvolym ovan jord eller betongvolym under jord, så som visas i Figur 2. För ett strukturellt betongelement måste en dynamisk strukturanalys utföras. Betongvolym ovan jord kommer vanligtvis inte att påverkas direkt av höga vibrationsnivåer och är dessutom fria att utföra stelkroppsvibrationer. Betongvolym under jord är ofta i direkt kontakt med omgivande undergrund genom vilken stötvågor med hög intensitet direkt kan nå fram till och in i betongen. Vibrationskänsligheten hos sprutbetong på berg måste studeras genom särskild analys och så också vidhäftning mellan betong och armering.

Tabell 1: En jämförelse mellan några nationella föreskrifter och standarder för vibrationer nära ung och hårdnande betong.

Betongålder:	0–3 dagar	3–7 dagar	7–28 dagar	>28 dagar	Kommentar:
USA	-	6 mm/s	51 mm/s	-	
Kina	15–20 mm/s	30–40 mm/s	70–80 mm/s	-	≤10 Hz
	20–25 mm/s	40–50 mm/s	80–100 mm/s	-	10–50 Hz
	25–30 mm/s	50–70 mm/s	100–120 mm/s	-	≥50 Hz
Norge	5–50 mm/s	50 mm/s	70 mm/s	100 mm/s	
Finland	45 mm/s	50 mm/s	70 mm/s	70 mm/s	Avstånd 1 m
	90 mm/s	100 mm/s	140 mm/s	140 mm/s	Avstånd 10 m
Sverige	-	-	-	70 mm/s	Avstånd 1 m
	-	-	-	134 mm/s	Avstånd 10 m
	30 mm/s	30 mm/s	-	-	Om $f_c \leq 12$ MPa



Figur 1: En jämförelse mellan maximalt tillåtna partikelvibrationshastigheter (ppv) som funktion av ålder hos ung och hårdnande betong. Rekommendation given i [1] har markerats med grå yta.



Figur 2: Effekt från stötvåg i mark på strukturellt betongelement (a), betongvolym ovan jord (b) och betongvolym under jord (c).

Finit elementmodellering och analys

De två fallen med sprutbetong på hårt berg utsatt för sprängning och gjutna laborieprovkroppar utsatta för direkt mekanisk stötlast har undersökts med hjälp av finita elementmodeller baserade på samma analysprinciper. Spänningsvågornas utbredning beskrivs på samma sätt oavsett om det är genom hårt berg mot en sprutbetongyta eller genom ett konstruktionselement av ung betong. Dock är brottmoderna olika för de två fallen, där sprutbetong oftast skadas genom vidhäftningsbrott, delvis eller över större sektioner vilket kan leda till nedfall av sprutbetong. Sprickbildning i sprutbetong på grund av enbart vibrationer är ovanligt och har inte observerats under tidigare fältförsök. Modelleringskonceptet har nu också använts för analys av stöbelastade balkar och betongprismor som har modellerats med solida 3D element. I en första analys användes en elastisk materialmodell för att

validera ett laboratorieexperiment med hammarbelastade betongbalkar. Laboratiebalken förblev oförstörd under provningen och därmed var det möjligt att uppnå god överensstämmelse med en linjärelastisk materialmodell för fullt hårdnad betong. Modellen utvecklades ytterligare för att möjliggöra modellering av spruckna provkroppar. För kontroll av de numeriska resultaten valdes en tidigare genomförd serie laboratieförsök med hammarbelastade mindre prismor av ung betong. En jämförelse mellan resultaten visade att laboratorieresultaten kan återges numeriskt och att provkropparnas fria vibrationsmoder och egenfrekvenser bidragit till spänningskoncentrationer som gav sprickbildning vid höga belastningar. Som slutsats från modelleringsarbetet, och jämförelserna i litteraturstudien, ges de rekommendationer som här visas i Tabell 2 och 3. Den första tabellen ger maximalt tillåtna vibrationshastigheter för upp till sju dygn gammal betong, och ger också en jämförelse mellan betong som belastas av stöt eller en kontinuerlig, varaktig vibration. Tabell 3 ger gränsvärden för mycket ung betong, för jämförelse med olika gränser för hållfasthetsklasserna C25 och C50. De övre och undre gränserna avser risken för initiering av mikro- och makrosprickor. Se doktorsavhandlingen [1] och artikel [5] för mer detaljer.

Tabell 2: *Rekommenderade maximalt tillåtna partikelvibrationshastigheter (ppv) i mm/s för stöbelastad ung betong. Även jämförelse med belastning av kontinuerliga vibrationer.*

Vibrationstyp	Betongålder					
	0–3 tim	3–12 tim	12 tim–1 dag	1–2 dagar	2–3 dagar	3–7 dagar
Stöt	100	60	140	140	140	180
Kontinuerlig	(100)	40	40	100	(140)	(180)

Tabell 3: *Rekommenderade maximalt tillåtna partikelvibrationshastigheter (ppv), från finita elementberäkningar.*

Betongålder, timmar	Hållfasthetsklass C25		Hållfasthetsklass C50	
	PPV undre gräns, mm/s	PPV övre gräns, mm/s	PPV undre gräns, mm/s	PPV övre gräns, mm/s
4	< 30	†	30	†
6	40	†	50	90
8	50	80	70	100
12	60	110	100	200

† Ej möjligt att bestämma övre gränsvärde

Sammanfattning av huvudresultat

Projektet har varit tvärvetenskapligt och kombinerat strukturdynamik, finit elementmodellering, betongmaterialteknik, konstruktionsteknik och bergförstärkningsteknik. Resultatet består av rekommendationer för hur dynamisk analys av ung betong, gjuten och sprutad, kan genomföras med

en korrekt beskrivning av effekten från laster av stöttyp. Den typ av numeriska modeller som presenterats och utvärderats kommer att vara ett viktigt verktyg för arbetet med att ta fram riktlinjer för praktisk användning vid anläggnings- och betongbyggnadsarbete. Några rekommendationer för säkerhetsavstånd och minimiåldrar ges, för nygjutna betongelement eller massiva betongkonstruktioner och för nyligen applicerad sprutbetong på hårt berg.

Praktiska tillämpningar

Behovet av pålitliga vibrationskriterier för ung betong är stort vid bland annat anläggningsarbeten där sprängning förekommer, såsom tunneldrivning och gruvverksamhet, vid broreparationer och byggverksamhet nära tung trafik samt inom industrin. Strävan efter en tidseffektiv byggprocess fokuserar på ett naturligt sätt på möjligheten att minska väntetiderna mellan byggetapper, vilket minimerar byggkostnaden. Om nyligen placerad betong, gjuten eller sprutad, utsätts för vibrationer av stöttyp vid tidig ålder då härdningsprocessen fortfarande pågår, finns risk för skador som hotar att försämra funktionen hos den fullhårdnade betongen. Därför behövs en väntetid där betongen förblir ostörd, eller ett säkert avstånd till vibrationskällan. Den typ av numeriska modeller som presenterats och utvärderats kommer att vara ett viktigt verktyg för arbetet med att ta fram riktlinjer för praktisk användning vid anläggnings- och betongbyggnadsarbete. De sammanställningar och resultat som här används kan direkt användas som väl grundade, översiktliga men säkra gränsvärden.

Projektet redovisas i följande publikationer

1. Ahmed L. *Models for analysis of young cast and sprayed concrete subjected to impact-type loads*. Doktorsavhandling, KTH Byggvetenskap, Betongbyggnad, Stockholm, juni 2015.
2. Ahmed L. *Impact-type vibration effects on young concrete for tunnelling*. BeFo rapport 147, Stockholm, 2015.
3. Ansell A, Ahmed L. 'Impact load vibrations on young concrete'. Inskickad till *Structural Concrete*, 2015.
4. Ahmed L, Ansell A. 'Vibration vulnerability of shotcrete on tunnel walls during construction blasting'. *Tunnelling and Underground Space Technology* 42:105–111, 2014.
5. Ahmed L, Ansell A, Malm R. 'Numerical modelling and evaluation of laboratory tests with impact loaded young concrete prisms'. Inskickad till *Materials and Structures*, 2015.

Tidigare publikationer

Licentiatuppsats, konferensbidrag, och artiklar som föregår projektet men ingår i doktorsavhandlingen.

6. Ahmed L. *Models for analysis of shotcrete on rock exposed to blasting*. Licentiatuppsats. KTH Byggvetenskap, Betongbyggnad, Stockholm, 2012.

7. Ahmed L. *Laboratory simulation of blasting induced bond failure between rock and shotcrete*. BeFo rapport 116, Stockholm, 2012.
8. Ahmed L, Ansell A. 'Laboratory investigation of stress waves in young shotcrete on rock'. *Magazine of Concrete Research* 64(10):899-908, 2012.
9. Ahmed L, Ansell A. 'Structural dynamic and stress wave models for the analysis of shotcrete on rock exposed to blasting'. *Engineering structures* 35:11-17, 2012.
10. Ahmed L, Ansell A, Malm R. 'Finite element simulation of shotcrete exposed to underground explosions'. *Nordic Concrete Research* 45:59-74, 2012.
11. Ahmed L, Ansell A. 'Behaviour of sprayed concrete on hard rock exposed to vibration from blasting operations'. *Proceeding of 7th International Conference on Sprayed Concrete*. Sandefjord: The Norwegian Society of Graduate Technical and Scientific Professionals, Tekna; 2014.
12. Ahmed L, Ansell A. 'Experimental and numerical investigation of stress wave propagation in shotcrete'. In: *Nordic concrete research: Research projects 2011*. Hämeenlinna: Nordic Concrete Research; 2011.
13. Ahmed L, Ansell A. 'A comparison of models for shotcrete in dynamically loaded rock tunnels'. *Proceedings of the 3rd international conference on engineering developments in shotcrete*. Queenstown: Australian Shotcrete Society and the American Shotcrete Association; 2010.