

FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK
BERGMEKANIKK/GEOTEKNIKK 2019

**MÅLERESULTATER ETTER FULLSKALA SPRENGNINGSFORSØK – HVOR
KRAFTIGE VIBRASJONER TÅLER EN BYGNING FØR DET OPPSTÅR SKADER**

Karin Norén-Cosgriff, Norges Geotekniske Institutt, NGI
Nils Ramstad, Multiconsult Norge AS

SAMMENDRAG

Grenseverdier for sprengningsvibrasjoner fastsettes på grunnlag av *NS 8141 Vibrasjoner og støt*. Bergsprengning kan gi så kraftige vibrasjoner at det forårsaker skader på tilstøtende byggverk. Det er imidlertid sjelden at vibrasjoner fra bergsprengning forårsaker bygningsskader. Årsaken til dette kan være at dagens grenseverdier er unødvendig strenge. På bakgrunn av dette ble det i november 2018 gjennomført fullskala sprengningsforsøk i Norge med omfattende instrumentering. Dette forsøket indikerer at det for byggverk fundamentert på berggrunn er en stor sikkerhetsmargin i de norske grenseverdiene for sprengningsvibrasjoner.

SUMMARY

Guideline limit values for construction vibrations are set in *Norwegian Standard 8141*. Blasting in rock can produce vibrations of enough strength to cause damage to neighboring buildings and structures. However, building damages caused by vibrations from blasting are seldom observed. This may indicate that today's limit values are unnecessary strict. Therefore, an instrumented blast study was performed in Norway in November 2018. The results of this study indicate that the Norwegian limit values for blast induced building vibration include a large safety margin for buildings founded on rock.

INNLEDNING

Bergsprengning utgjør en betydelig andel av dagens anleggsdrift. Sprengning kan forårsake kraftige vibrasjoner i grunnen samt lufttrykkstøt. For å unngå at dette medfører skader på byggverk blir tillatte nivåer regulert av *Norsk Standard 8141 Vibrasjoner og støt*. Erfaring viser imidlertid at det sjelden oppstår skader som kan knyttes til vibrasjoner og lufttrykkstøt fra sprenging, selv ved til dels store overskridelser av grenseverdiene.

På bakgrunn av dette ble det i november 2018 gjennomført fullskala sprengningsforsøk med omfattende instrumentering. Forsøket fant sted i Spjulsåsen steinbrudd i Våler kommune i Hedmark i samarbeide med lærere og elever ved anleggsmaskinførerlinja ved Våler videregående skole. Forsøket ble finansiert av Vegdirektoratet, Bane NOR, Maskinentreprenørenes Forbund, Forsvarsbygg og Entreprenørforeningen Bygg og Anlegg. Austin Norge bidro med sprengningskompetanse, sprengstoff og tennere. Målingene ble utført av NGI og Multiconsult.

BESKRIVELSE AV TESTOMRÅDET OG BYGNINGENE

To testbygninger ble satt opp på plassen, ref. figur 1a. Bygningene ble fundamentert på en ca. 500 mm tykk, komprimert pukkpute over rensket berg. Begge bygningene var 2 m brede, 5 m lange og 2,4 m høye. Begge bygningene hadde en døråpning og et vindu på den ene langveggen. Bygningene ble speilvendt slik at døråpningene og vinduene vendte mot hverandre. Bygningene var uten gulv. Den ene bygningen hadde 200 mm tykke vegger i uarmert, plasstøpt betong på en 400 mm bred armert såle. Det ble benyttet betongkvalitet C30/37. Det gikk ca. 30 dager fra betongen var ferdig støpt til sprengningsarbeidene ble gjennomført. Den andre bygningen ble oppført av 250 mm tykke Lecablokker på et fundament av Leca såleblokker. Lecabygget ble pusset slik at det skulle være lettere å oppdage eventuell oppsprekking, ref. figur 1b. For å få en belastning på bygningene som tilsvarer marktrykket fra en enebolig, ble det lagt på toppsville, plateledd bjelkelag og en ramme rundt som ble fylt med ca. 4,5 tonn pukk.

Siden påstand om flisskader er en gjenganger ved sprengningsarbeider, ble den ene kortveggen i Lecahuset flisbelagt og fuget, ref. figur 1c. Mange nye bolighus bygges med plate på mark og ringmursblokker hvor det kun er et tynt skall utenpå isolasjonen, noe som gjør det umulig å montere måleutstyret etter standardens beskrivelse. I mange tilfeller benyttes kledningen som et alternativt sted for montering av måleutstyr. Det er imidlertid usikkert hvordan en slik montering påvirker måleresultatene. Det ble derfor på betonghuset satt opp en utlektet tømmermannskledning på et hjørne for sammenlignende måling, ref. figur 1d.



a



b



c



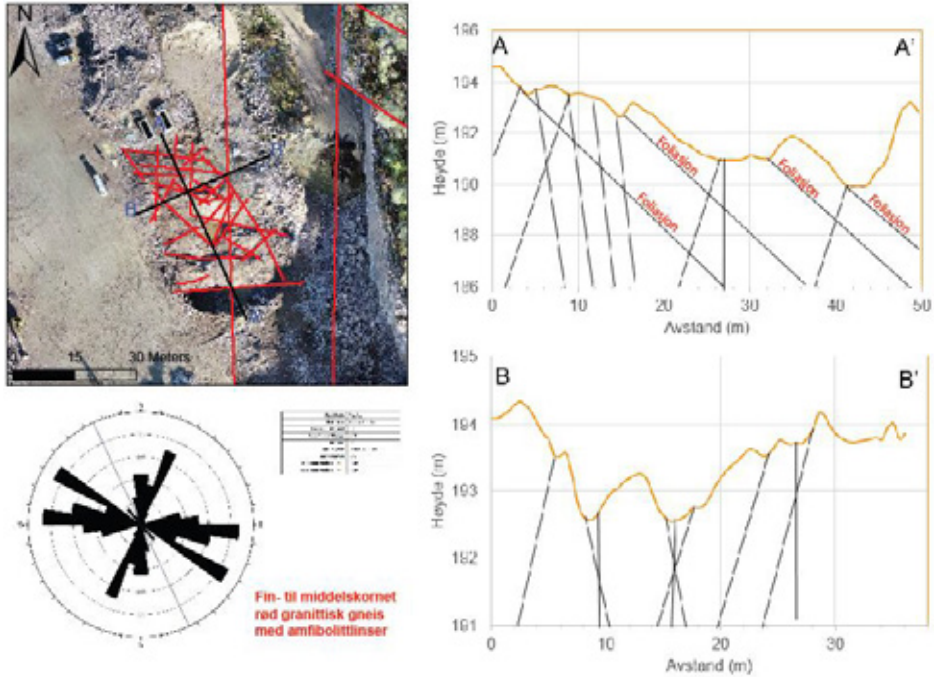
d

Figur 1. a) Testområde til venstre og bygningene til høyre (betongbygget står fortsatt med forskaling). b) Lecabygget med pussede vegger. c) Lecabygget med fliser på innsiden av veggen som vender mot sprengningsområdet. d) Betongbygget med kledning på kortsiden mot sprengningsområdet.

GEOLOGISK KARTLEGGING

Før oppstart av sprengningsarbeidene foretok Vegdirektoratet en omfattende kartlegging og dokumentasjon av området. Kartleggingen viste at berget består av fin til medium kornet rød granittisk gneis med linser av amfibolitt. Den dominerende retningen på lagdelinga er fra sprengningsområdet mot bygningene. Den geologiske kartlegginga er vist på figur 2 og 3.

Plasseringen av bygningene, alle sensorer samt alle borhull ble nøyaktig koordinatbestemt. Det ble i tillegg tatt kjerneprøver fra inntakt berg etter forsøkene som ble testet i laboratorium av SINTEF Byggeforsk. I retning parallelt med lagdelinga ble hastigheten for kompresjonsbølger bestemt til 4260 m/s og for skjærbølger til 2644 m/s. Gjennomsnittlig egenvekt på berget var 2646 kg/m³.



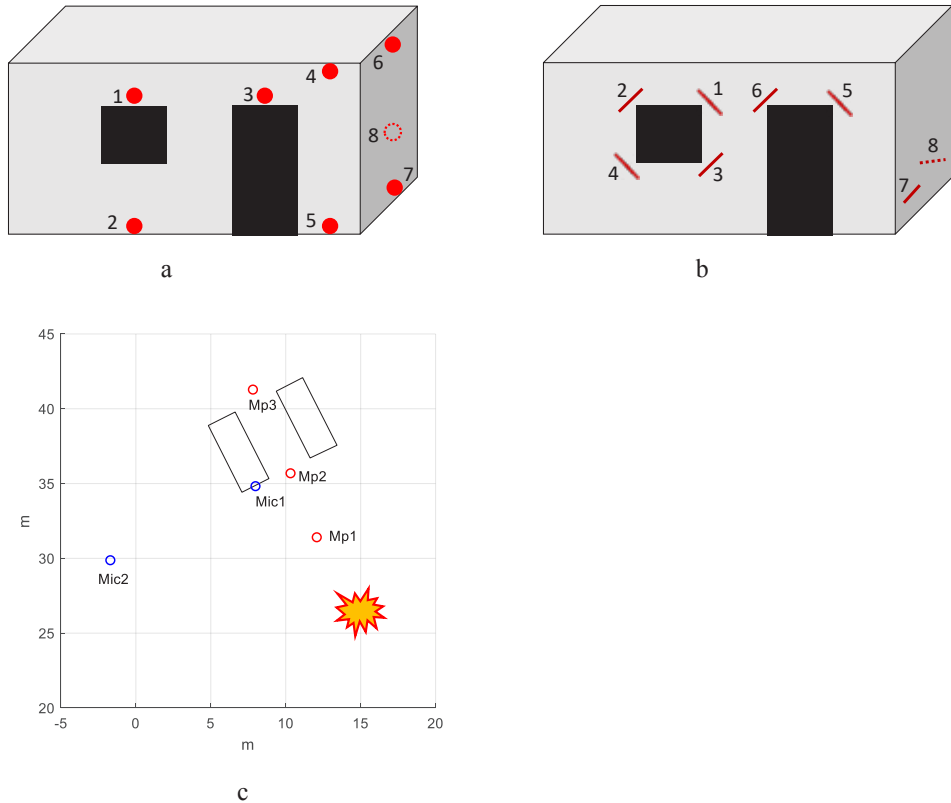
Figur 2. Geologisk kartlegging av testområdet. (Kilde. Statens vegvesen, Vegdirektoratet)



Figur 3. Eksisterende skjæring i steinbruddet. Sprengingsområdet er i front på bildet. Bygningene ligger utenfor bildet til venstre.

INSTRUMENTERING

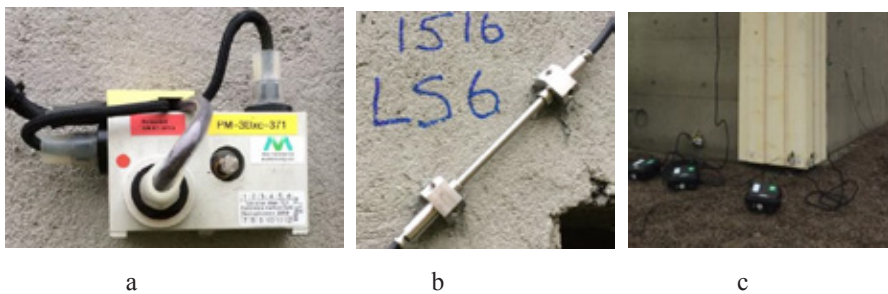
Svingehastighet og dynamisk tøyning ble målt på begge bygningene. Begge bygningene ble instrumentert med 8 treaksielle geofoner og 8 tøyningmålere. I tillegg ble det montert tre vertikale geofoner på fast berg, en mellom bygningene og sprengningsområdet, en mellom bygningene i front og en mellom bygningene i bakkant. Det ble også montert to mikrofoner for å måle lufttrykkstøt fra salvene. En lufttrykkmåler ble montert på veggen på Lecabygget og en lufttrykkmåler ble montert ut til siden for bygningene. Ref. Figur 4, 5 og 6.



Figur 4. Instrumentering av testbygningene. a) posisjonene til de treaksielle geofonene på betongbygningen. b) posisjonen til tøyningmålerne på betongbygningen. De prikkede linjene indikerer plassering av sensorer på baksiden av bygningene. Sensorplasseringene er identiske på Lecabygningen og betongbygningen. c) oversikt som viser plassering av mikrofoner og målepunkt direkte på berget. Den gule stjerna på c) markerer sprengningsområdet.



Figur 5. Instrumentering av Lecabygget



Figur 6. a) Treaksiell geofon. b) Tøyningssivler over vindusåpning. c) Treaksiell geofon på trekledning og på betongveggen.

Til måling av vibrasjoner og lufttrykksstøt ble det benyttet vibrasjonsmålere av typen AVA Trace M80. Målerne ble koblet sammen slik at alle registreringene på hvert bygg ble synkronisert. En geofon på berget foran bygningene ble benyttet til å trigge målesystemet. Målerne ble satt opp med en samplingsfrekvens på 6000 Hz som ble nedsamplet til 3000 Hz i de innsamlede kurveforløpene.

Tøyningssmålingene ble utført med et fiberoptisk målesystem fra Micron Optics. Tøyningene ble målt med 110 mm lange tøyningssivler som ble montert med en vinkel på 45° over og under dør- og vindusåpninger, ref. figur 6b. I tillegg ble to tøyningssivler montert over skjøten mellom langvegg og kortvegg, ref. figur 5. Samplingsfrekvensen på tøyningssivlerne var 1000 Hz. Tøyningssivlerne ble koblet til en fiberoptisk kabel som muliggjorde full synkronisering av alle tøyningssivlerne.

GJENNOMFØRING AV PRØVESPRENGINGENE

Det ble sprengt totalt 143 hull fordelt på fem salver. Huldiameteren var 76 mm. Største hulldybde i hver salve varierte fra 4,5 til 6 m. Bormønsteret var 2,0 x 2,5 m og det ble benyttet en fordemning på 1,5 m. Det ble sprengt fra 2 til 53 hull per salve. Alle salver ble sprengt med etthulls optenning med unntak for salve fem som ble skutt med to og to hull på samme intervall. Det ble kun benyttet elektroniske tennere. Forsinkelsen mellom nabohull var 10 ms og forsinkelsen mellom radene varierte fra 10 til 60 ms. Totalt ble det avfyrt mellom 3,0 kg og 404 kg sprengstoff i en salve og lademengde pr. intervall varierte fra 3,0 til 37,8 kg.

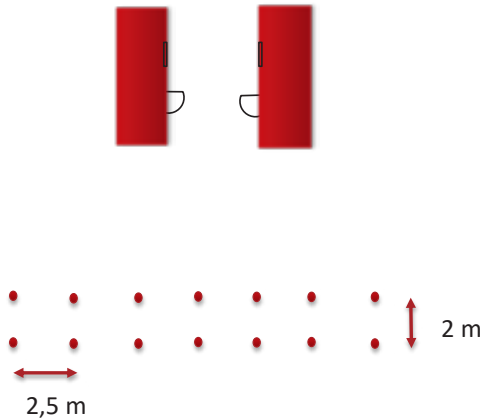
Salvene ble plassert slik at det skulle bli mest mulig lik vibrasjonsbelastning på begge bygningene. Den første salven hadde en minste avstand på 29 m til bygningene og den siste salven hadde en minste avstand på 7 m til bygningene. Alle salvene ble ladet med patronert sprengstoff for å ha full kontroll med lademengden i hvert hull. Tabell 1 samt figur 7 og 8 beskriver salvene.

Tabell 1. Beskrivelse av salvene

Salve	Minste avstand (m)		Antall hull	Total ladning (kg)	Max ladning pr. intervall (kg)
	Leca	Betong			
1	28.9	30	46	222	8.4
2	26.5	23.5	2	6.5	3.5
3	17.5	18.5	53	404	14
4	12.3	13.2	24	287	16.4
5	7.4	7.2	20	266	37.8



Figur 7. a) Lokalisering og nummerering av salvene. b) Spesifikasjon av sprengstoff og elektroniske tennere.



Figur 8. prinsippskisse salveplassering

Bygningene ble inspisert grundig etter hver salve for å registrere eventuelle skader inkludert bom i puss.

MÅLERESULTATER

Tabell 2 viser høyeste registrerte måleverdier for lufttrykkstøt og svingehastighet i hver salve. Salve 5 ga så høye svingehastigheter at det gikk over geofonenes måleområde. De målte vibrasjonene og tøyningene var hele tiden høyere på Lecabygget enn på betongbygget. De største tøyningene kom i hjørnene over døråpningene. Den siste salven ga store tøyninger både på Lecabygget og betongbygget. Det ble imidlertid ikke registrert skader på noen av husene med unntak av et mulig kort riss i hjørnet over døra på betong bygget. Tøyningsmåleren viste der en gjenstående sprekk på 0,05 mm.

Tabell 2. Målt svingehastighet og lufttrykkstøt

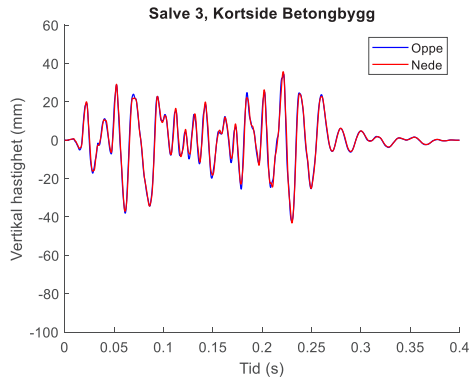
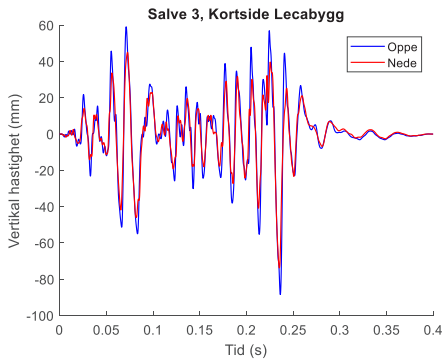
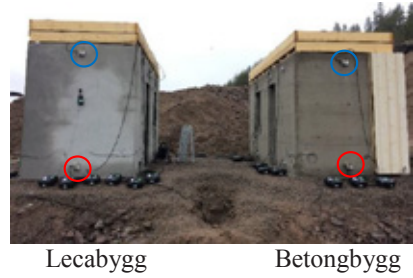
Salve	Lufttrykkstøt (Pa)		Svingehastighet (mm/s)	
	Pos 1, på vegg	Pos 2, fritt felt	Leca	Betong
1	234	119	32	22
2	0.8	0.8	42	30
3	339	233	89	53
4	425	349	133	101
5	750	682	>260	>260

Sammenligning av måleverdier nede og oppe på bygningene

Målingene viste at det på Leca bygningen var høyere svingehastigheter i vertikal retning øverst på veggen sammenlignet med nede ved bakken. På betonghuset var det minimale forskjeller. Dette har sammenheng med at Leca har vesentlig lavere stivhet enn betong og derfor tøyser seg mer ved en gitt vibrasjonsbelastning, ref. tabell 3 og figur 9.

Tabell 3. sammenligning av måleresultater nede og oppe på bygningene

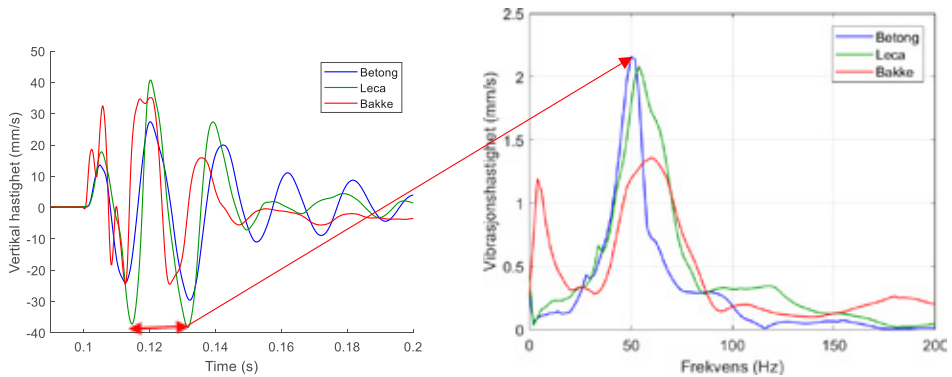
	Leca nede	Leca oppe	Betong nede	Betong oppe
Salve 1	20,0	27,4	14,0	13,9
Salve 2	42,5	52,4	29,1	29,5
Salve 3	73,1	86,9	42,8	42,1
Salve 4	117,8	129,3	80,0	79,2
Salve 5	262,1	262,1	>262	>262



Figur 9. Grafisk fremstilling av forskjell i svingehastighet nede og oppe på bygningene

Sprengning av fullt innspente ladning, dominerende frekvens

Salve 2 besto av to fullt innspente enkelthull med 3 sekunder mellom. Hensikten var å bestemme dominerende frekvens fra et målesignal som ikke var forstyrret av vibrasjoner fra nærliggende hull. Dominerende frekvens ble bestemt til ca. 50-60 Hz. ref. fig. 10. Det er lavere enn hva som tidligere er antatt for fast berg i de aktuelle avstandene.



Figur 10. Innspente borehull. Frekvens ca. 50 Hz.

Forsterkningsfaktor mellom vibrasjoner på berggrunn, lavt på bygningen og høyt på bygningen

Som nevnt, var det systematiske forskjeller i målt svingehastighet mellom berg, betongbygning og Lecabygning. Disse forskjellene er vist for hver salve i tabell 4.

Tabell 4. Forsterkningsfaktor fra bakken (fast berg Mp 3, vertikalt) til bygningsdel med høyeste svingehastighet.

Salve	Forsterkningsfaktor	
	Leca	Betong
1	2.1	1.4
2	1.6	1.1
3	1.3	0.8
4	1.8	1.3
5		

Sammenligning av måling på betong og kledning

Det ble montert to geofoner på kledningen. Den ene geofonen ble festet med kort skrue i kledningen mens den andre ble festet med lang skrue i spikerslaget for kledningen. Som det fremgår av tabell, var det minimal variasjon i måleverdiene på kledningen. Måling av svingehastighet på kledning viste systematisk høyere svingehastigheten enn målepunktet på betong. Forsterkningen varierte imidlertid fra salve til salve. Måling på kledning er derfor ikke godt egnet til å vurdere vibrasjonsnivået på bygningen i forhold grenseverdiene i NS 8141.

Tabell 5. Sammenligning mellom måling på betongvegg og kledning.

Salve	Betong nede	Kledning kortvegg	Forsterkningsfaktor	Kledning langvegg	Forsterkningsfaktor
1	14,0	25,3	1,8	25,1	1,8
2	29,1	41,8	1,4	43,1	1,5
3	42,8	61,2	1,4	59,1	1,4
4	80,0	145,9	1,8	151,2	1,9
5	>262	>262	-	>262	-



KONKLUSJON FRA FULLSKALAFORSØKENE

- Bygningene ble utsatt for vibrasjonsverdier langt over grenseverdiene uten at det oppsto synlige skader.
- Frekvensen var lavere enn forventet for bygninger på berggrunn.
- Lecabygningen hadde gjennomgående høyere vibrasjonsverdier og tøyninger enn betongbygningen.
- Forsøkene indikerer at dagens grenseverdier for bygninger fundamentert på berggrunn kan justeres noe.
- Mer arbeid må utføres for å sikre at resultatene er representative (bla. se på effekt av bygningenes størrelse).

REFERANSER

Norsk Standard 8141 Vibrasjoner og støt, Standard Norge