

AKUSTISK JORD-BERGSONDERING

***K. Rainer Massarsch, Geo Risk & Vibration &
Carl Wersäll, KTH/Geo Risk & Vibration***

Sammanfattning

En ny metod för identifiering av jord- och bergmaterial genom akustiska mätningar vid jord-bergsondering presenteras. En triaxiell geofon installeras på 4 m avstånd från borrhjulet och vibrationssignalen (svängningshastigheten) registreras i tre riktningar. Vibrationsamplituden ger information om de genomborrade jordlagrens fasthet men avtar med ökande borrhjulet. Däremot är vibrationssignalens frekvensinnehåll mindre påverkat av borrhjulet. Genom bestämning av vibrationssignalens frekvensspektrum är det möjligt att identifiera olika jordlager eller berg. Genom synkronisering av vibrationsmätningen med borrhjulet är det möjligt att redovisa frekvensinnehållets variation med djupet i form av spektrogram. Akustisk sondering är enkel att genomföra och påverkar inte genomförandet av Jb-sonderingen.

Summary

A new method for identification of soil and rock materials by acoustic measurements during soil-rock probing is presented. A triaxial geophone is installed at 4 m distance from the borehole and vibration signals are recorded in three directions. The vibration amplitude reveals information of the strength and stiffness of the penetrated soil layer but decreases with depth. However, the frequency content of the vibration signal appears to be less affected by drilling depth. By determining the frequency spectra, it is possible to identify different soil layers and rock. The vibration measurement can be synchronized with the drilling depth measurement. Based on this information it is possible to present frequency variations with depth in the form of spectrograms. Acoustic measurements are easy to perform and do not interfere with soil-rock drilling.

1 INLEDNING

Jord-bergsondering (Jb-sondering) används för att identifiera mäktigheten av fasta jordlager, förekomst av block eller övergången från sprickigt till fast berg. Jb-sondering ger dock endast en grov uppskattning av bergets sprickighet. För mer kvalificerad bedömning krävs kompletterande mätningar,

exempelvis provtagning, pressometerförsök eller seismiska undersökningar. Jb-sondering beskrivs i SGF Rapport 4:2012 *”Metodbeskrivning för jordbergsondering - Utförande, utrustning och kontroll”* och kan utföras i olika klasser. Jb-sondering typ 1 (Jb-1) är den enklaste klassen och kan utföras med borrhjälper utan registreringsutrustning. Jb-sondering typ 2 (Jb-2) används vid borrhjälper genom jordlager för att få uppfattning om jorden är grovkornig. Till exempel erhålls en markant skillnad vid registrering av borrhjälper i sandjordar jämfört med sten och blockjordar. Metoden används också för bestämning av bergnivå samt för att grovt bedöma bergets kvalitet vid borrhjälper i kristallint berg. Även om man har identifierat grovkornig jord med Jb-2 sondering kan det vara vanskligt att dra slutsatser om pål- och spontbarhet med hänsyn till den begränsade undersökta volymen jord.

Borrhjälper- och registreringsutrustning är en väsentlig del av undersökningsmetoden som skall samverka i sin helhet tillsammans med fältgeoteknikernas borrhjälper tekniska kunskaper. SGFs Fältkommitté har genomfört studien *”Förbättrad utvärdering av resultat från jord-bergsondering/MWD”*. Syftet har varit att utveckla en mer tillförlitlig utvärderingsmetod för bestämning av gränsen mellan friktionsjord och morän, mellan morän och berg, jordens blockighet samt bergets sprickighet, SGF rapport 1:2015. Jämförelsen mellan olika utvärderingsmetoder visar att för ett tillförlitligt resultat måste hänsyn tas till samtliga borrhjälper parametrar från jord-bergsonderingen, dvs. såväl sjunkhastighet, matningskraft, rotation och hammartryck. Bäst möjliga utvärdering erhålls om utvärderingen av lagergränser baseras på flera olika borrhjälper parametrar.

Föreliggande rapport beskriver en ny metod att med hjälp av seismiska mätningar på markytan bestämma vibrationsparametrar som ger kompletterande information vid utvärdering av Jb-sondering. Mätningarna kan utföras oberoende av Jb-sonderingen och de akustiska signalerna som registreras kan användas för identifiering av jord- och bergformationer.

2 AKUSTISK SONDERING

2.1 Seismiska mätningar vid sondering

Vid geotekniska undersökningar i fast jord eller löst berg kan endast ett begränsat antal undersökningsmetoder användas. Genom den snabba utvecklingen inom elektroniken och datatekniken är det möjligt att vid borrhjälper registrera olika maskinparametrar (measuring while drilling, MWD). Även geofysiska metoder har en stor potential eftersom dessa kan utföras

även i fasta material, där konventionella sonderingsmetoder inte är användbara. Olika typer av seismiska mätningar kan används i samband med sondering, (Massarsch, 2014). Vid svensk viktsondering utnyttjades redan tidigt information från stångvibrationer som uppstod när sondspetsen penetrerade genom friktionsjord. Vibrationerna kunde registreras genom att förmannen höll i sondstångens topp och antecknade när stångvibrationer uppstod, jfr Figur 1.

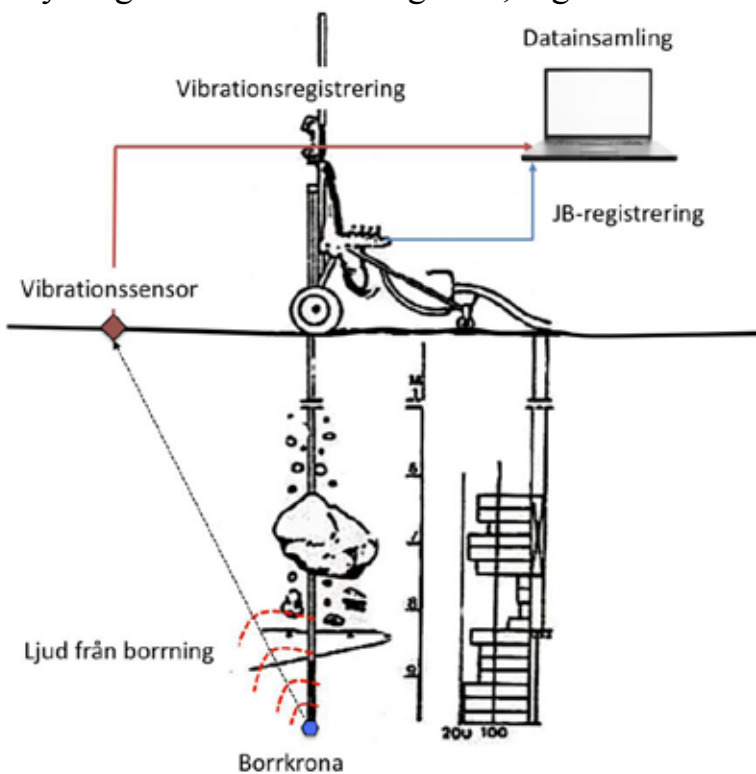


Figur 1. Manuell viktsondering där förmannen (t.v.) håller i stångtoppen för att notera vibrationer vid penetration genom friktionsjord.

Vid institutionen för jord- och bergmekanik, KTH utvecklades under början av åttiotalet en akustisk trycksond, där en vibrationsgivare installerades i sondspetsen. Vibrationssignalen som uppstår vid undanträngningen av jorden närmast sondspetsen registrerades under sondens nedträngning. Dess styrka och frekvensinnehåll användes för att identifiera övergången mellan skikt av lera, silt och sand (Massarsch, 1986). På grund av dåtidens begränsade elektroniska resurser var det inte möjligt att lagra den stora datamängden. Genom att spela upp ljudet i samband med sonderingen var det dock möjligt att höra när sonden passerade genom olika jordlager. Även mycket tunna sand- och siltskikt i lera kunde på detta sätt identifieras.

2.2 Akustisk Jb-sondering

Med modern mätutrustning är det möjligt att utföra detaljerade seismiska mätningar i samband med Jb-sondering och snabbt utföra avancerade analyser. Vid borrhning används ett hydraulsystem som är anpassat för matning, rotation och drivning av en hammare. Den hydrauldrivna borrhigen är utrustad med en hammare som har en slagfrekvens på mellan 1100 och 1400 slag/minut (18 Hz - 23 Hz). Hammarens slagenergi är 2 200 Joule och effekten brukar vara mellan 4-8 W/slag. Maskinen har en tryckkraft på 37 kN och ett varvtal på minst 80 varv/min. Borrkronan genererar en akustisk signal som fortplantar sig genom ovanförliggande jordlager och registreras på markytan genom en seismisk givare, Figur 2.



Figur 2. Principskiss av akustisk Jb-sondering.

2.3 Mätutrustning

Vid borrhning genom olika jord- och berglager förändras styrkan och frekvensinnehållet av den akustiska signalen. Vibrationerna mäts medels geofon eller accelerometer som installeras på eller strax under markytan. Mätningen kan utföras oberoende av den konventionella Jb-sonderingen.

Inom ramen för projektet utvecklades ett seismiskt mätsystem, bestående av triaxiella geofoner och triaxiella accelerometrar för att under borrhningen kunna bestämma svängningshastighetens maximalvärden, vibrationssignalernas tidsförlopp och vibrationernas frekvensinnehåll. En

målsättning med projektet har varit att synkronisera vibrationsmätningen med borrhjupet, vilket har varit möjligt genom av Geotech framtagna mjukvara. Två typer av geofoner användes, Tabell 1.

Tabell 1. Egenskaper av triaxiella geofoner.

Fabrikat	Känslighet (mV/mm/s)	Mätområde (Hz)
ABEM 20 4010	20	4,5 - 1000
G3/003 SM-4/7	30	10 - 200

Mätdata registrerades av en datainsamlingsenhet SONY DAT PC 216 Ax med 16 mätkanaler, kopplad till en PC. Mätssystemet har följande tekniska egenskaper, Tabell 2.

Tabell 2. Mätssystem och datainsamling.

Bandbredd:	0 - 20 kHz
Upplösning:	16 bitar
Mätområde:	0,5-20 volt
Läshastighet:	6kHz-48 kHz
Mjukvara:	SONY SCAN PCIF

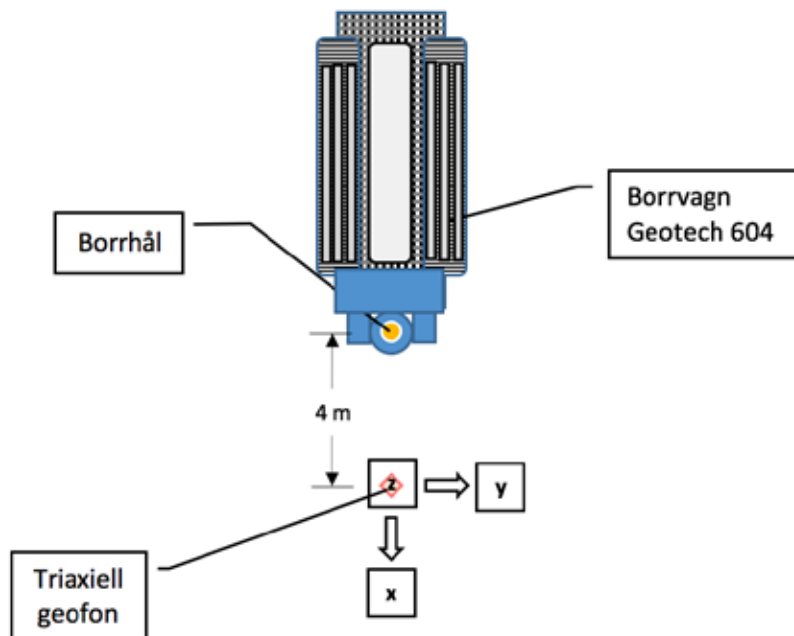
Vibrationssignalerna registrerades med en 16-kanalig datainsamlingsenhet, Figur 3.



Figur 3. Datainsamlingsenhet, typ SONY DAT PC 216 Ax.

2.4 Mätförfarande

Inledningsvis utfördes de seismiska mätningarna med triaxiella geofoner och accelerometrar på olika avstånd (1, 2, 4, 8 och 12 m) från borrhålet. Svängningshastigheten mättes med geofoner medan accelerometrar mätte accelerationen, som integrerades för att erhålla motsvarande svängningshastighet. Eftersom det inte fanns märkbara skillnader användes vid utvärdering och uppföljande mätningar endast geofoner. Analysen av de inledande mätningarna visade att avståndet endast har marginell betydelse för signalens utseende och avståndet 4 m från borrhålet ansågs mest lämpligt då hänsyn tas till alla aspekter, Figur 4.



Figur 4. Mätanordning vid akustisk Jb-sondering med vibrationsmätningarnas riktningsbeteckning.

I Figur 5 visas mätupställningen av en borravn typ Geotech med en triaxiell geofon och en triaxiell accelerometer på 4 m avstånd från borrhålet.

2.5 Redovisning av mätresultat

Vid Jb-sonderingen registrerades kontinuerligt vibrationssignalen (svängningshastigheten) i tre riktningar (x, y och z) som funktion av tiden. Under de inledande mätningarna registrerades borrhålets djup manuellt vid olika tidpunkter. Vid den sista försöksplatsen (Åkersberga) kunde vibrationssignalen synkroniseras direkt med mätning av borrhålets djup från

borriggen. Följande parametrar utvärderades utifrån resultaten av mätningarna:

1. Svängningshastighetens maximalvärde (mm/s) som funktion av tiden eller djupet.
2. Svängningshastighetens variation (mm/s) med tiden under utvalda tidsperioder (ca 5 sekunder).
3. Frekvensspektra för utvalda tidsperioder enligt (2) inom utvalda frekvensintervall (0 till 50 respektive 100 Hz).
4. Spektrogram som visar vibrationernas frekvensinnehåll som funktion av tid eller djup, där höga spektralvärden av amplituden visas i ljus färgton (gult och rött) och låga värden i mörkblått.



Figur 5. Seismiska mätningar i Åkersberga med triaxiell geofon och triaxiell accelerometer på 4 m avstånd från borrhölet.

Akustiska mätningar vid Jb-sondering utfördes på tre mätplatser i Stockholmsområdet - Hägernäs, Råsunda och Åkersberga. Resultaten från dessa mätningar redovisas nedan.

3. MÄTNINGAR HÄGERNÄS

Geotekniska förutsättningar

De seismiska mätningarna utfördes i samband med Jb-2 sondering. Utöver Jb-sonderingen fanns inga resultat från andra geotekniska undersökningar (provtagning eller viktsondering) tillgängliga. Den geologiska beskrivningen av området anger sandig och grusig jord ner till ca 10 – 15 m djup, som överlagrar morän på berg, Figur 6.



Figur 6. Geologisk karta över undersökningsområdet Hägernäs; för Jb-sondering användes en bormaskinen av typ Geotech.

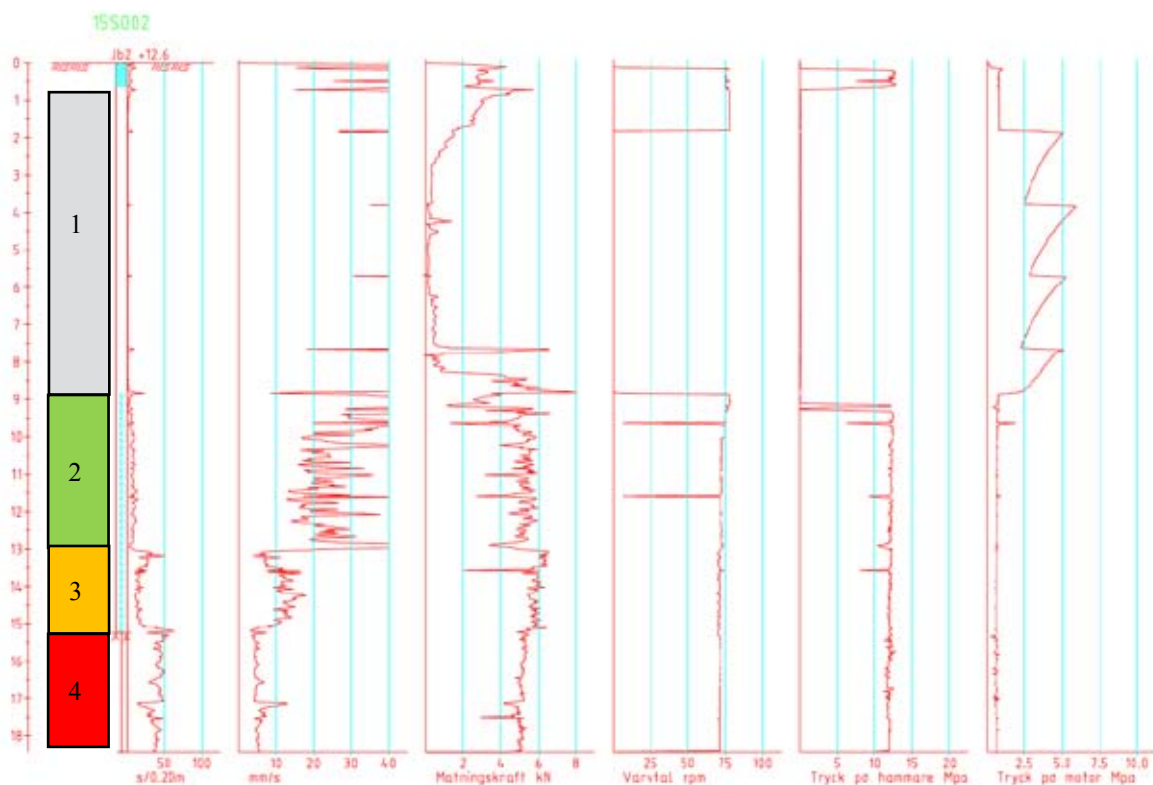
3.1 Jb-sondering

Seismiska mätningar utfördes i samband med Jb-sonderingar, typ 2 och vattenspolning. Ett typiskt exempel är borrhål 15S002 som visas i Figur 7. Under en ca 1 m tjock fyllning och ca 8,5 m av sandig jord (1) påträffades ett gruslager (2) ner till ca 13 m djup. Därefter följde morän (3) som på 15,2 m djup övergick i berg (4). Boringen avslutades på 18,2 m djup, dvs. tre meter i berg.

I det lösa sandlagret (1) var matningskraften och bormotståndet lågt och sjunkningshastigheten > 40 mm/s. Av varvtalsregistreringen framgår att slagboringen utfördes mellan 0 och 2 m, samt från 9 m djup. I gruslagret (2) märks en svag ökning av bormotståndet och sjunkningshastigheten sjönk till mellan 20 och 40 mm/s. Matningskraften varierade mellan 4 och 6 kN. En märkbar ökning noteras när borren penetrerar moränen (3). När boringen nådde berg (4) ökade bormotståndet och sjunkningshastigheten minskade. Matningskraften var 5 kN.

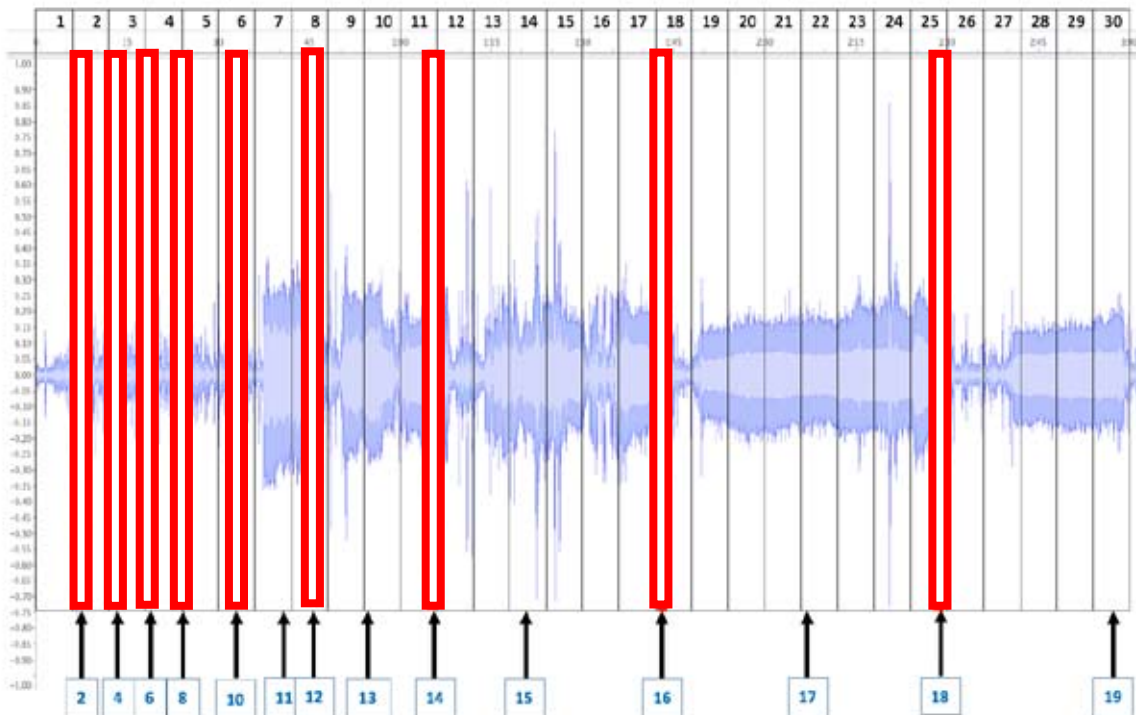
3.2 Seismiska mätningar

Analysen av de seismiska mätningarna visar att avståndet mellan borrhålet och mätpunkten inte påverkar vibrationssignalens utseende. Däremot så minskar signalstyrkan med ökande avstånd. Alla borrhål gav liknande seismiska signaler i respektive jordlager. Därför begränsas analysen i denna rapport till mätningen från borrhål 15S002.



Figur 7. Resultat av Jb-2 sondering, borrhål 15S002. Materialbeskrivning enligt borrhånsledare: 1: sand, 2: grus, 3: morän, 4; berg.

I Figur 8 visas den vertikala svängningsamplituden (mm/s) som funktion av tiden (minuter). Eftersom svängningshastigheten registrerades som funktion av tiden och inte av djupet, har djupintervaller indikerats längs tidsskalan. I diagrammet indikeras tidpunkten för byte av borrhåstänger i rött, som generellt tog kort tid och bedöms inte ha påverkat mätresultaten. Sonderingen till 18 m tog 30 minuter. Vid borrhåning genom den ytliga fyllningen (0 – 1 m) genereras märkbara vibrationssignaler. Borrhåningen genom den lösa sanden från 1 till ca 9 m utfördes utan hammarslagning och tog ca 5 minuter och vibrationsnivån är låg. På 9 m djup aktiverades hammarslagningen och vibrationsamplituden ökar markant. Vibrationsamplituden varierar beroende på de genomborrade jordlagrens motstånd. Vid borrhåning i berg gjordes kortare uppehåll i borrhåningen, där vibrationsamplituden sjunker.



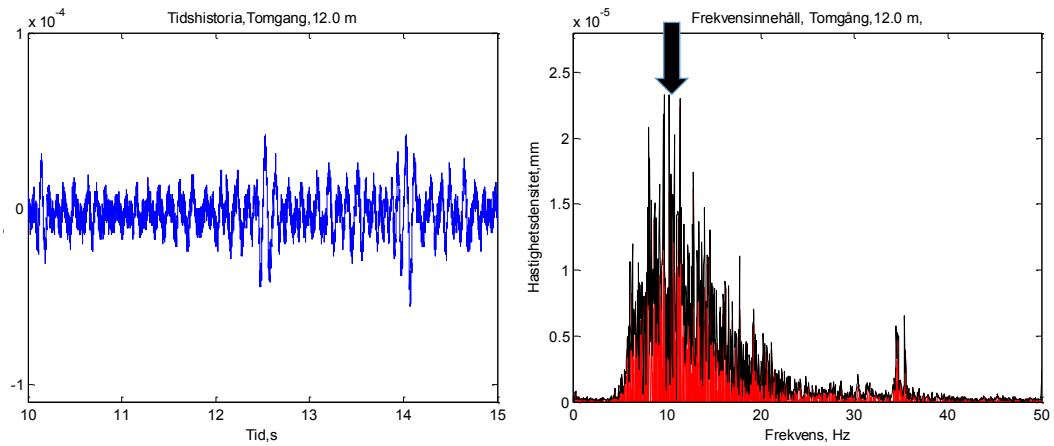
Figur 8. Vibrationshastighetsamplituden (svängningshastighet i mm/s) som funktion av tiden, som redovisas längs den övre horisontalaxeln (minuter). Borrhålsdjupet (m) indikeras längs den nedre horisontalaxeln. Byte av borrhälsstänger (varje 2 m) har markerats i rött.

3.3 Frekvensinnehåll

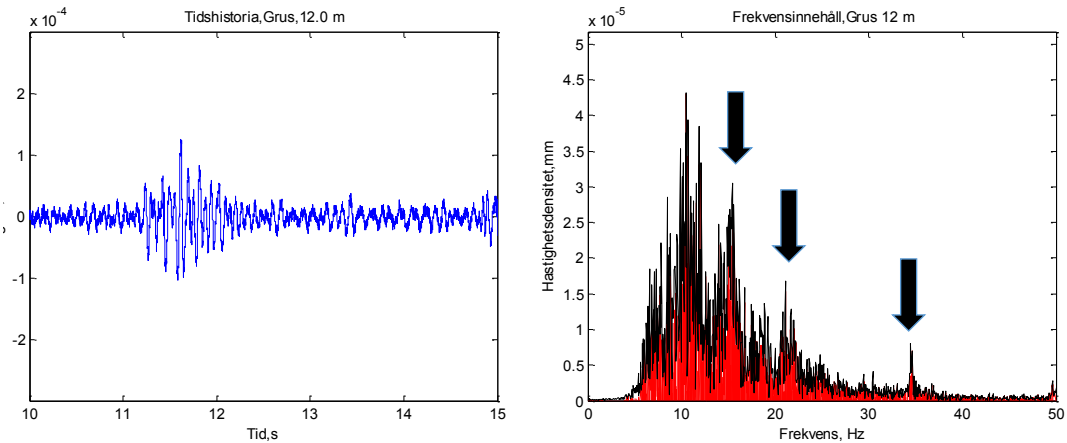
Frekvensinnehållet av en seismisk signal är en bättre indikator av det genomborrade materialets mekaniska egenskaper. Analysen av ett stort antal frekvensanalyser visar att den bästa informationen erhålls från frekvensspektra inom intervallet 0 – 50 Hz. Typiska signaler valdes ut från följande borrhälsfaser: tomgångskörning utan borrhäls, borrhäls i grus (2), morän (3) och berg (4). Figur 9 till 12 visar svängningsförlopp (mm/s) och tillhörande frekvensspektra (0 – 50 Hz) för olika borrhälssekvenser. Den vertikala svängningshastigheten mättes på 12 m avstånd från borrhålet under tidsperioder av 5 sekunder.

3.4 Spektrogram

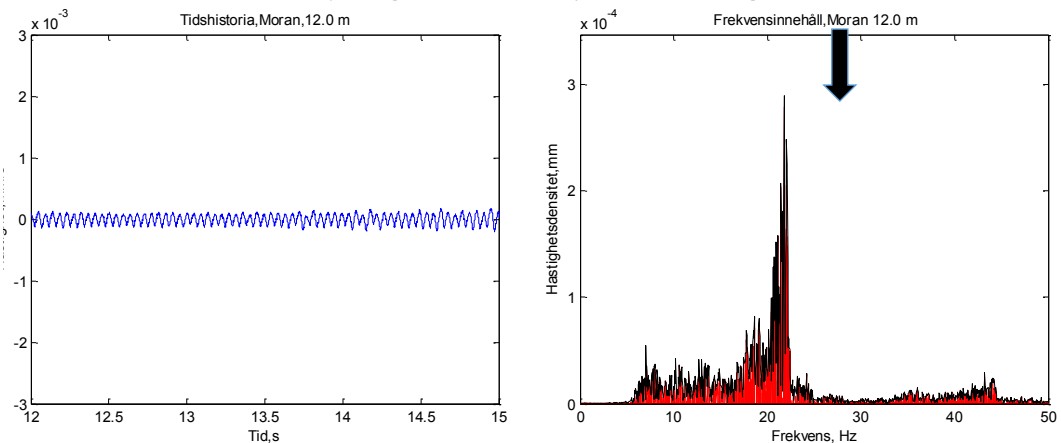
Variationen av vibrationers frekvensinnehåll kan åskådliggöras medels spektrogram, som visar variationen av vibrationers frekvensinnehåll som funktion av tid. Höga spektralvärden av amplituden visas i ljus färgton (gult och rött) och låga värden i mörkblått. I Figur 13 jämförs variationen av svängningshastigheten Figur 8 med ett spektrogrammet som funktion av tiden enligt för hela borrhälsförloppet (30 min).



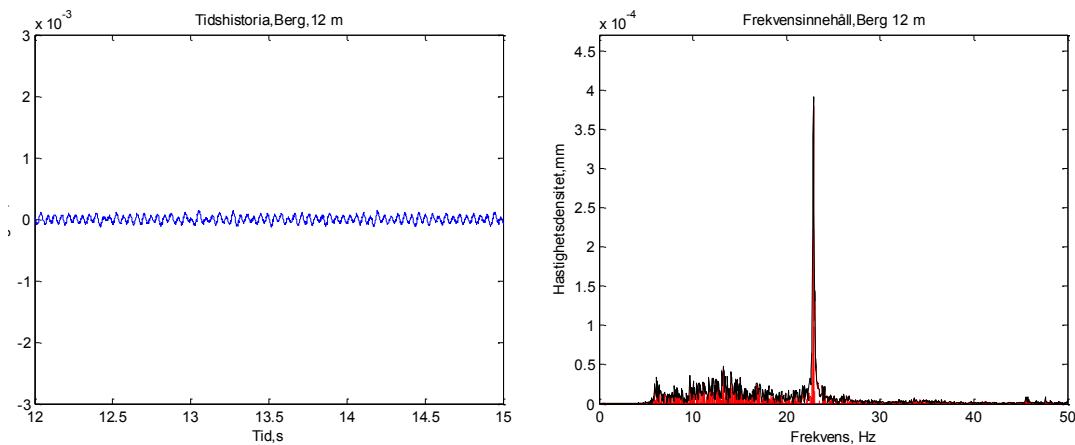
Figur 9. Brus vid tomgång – vertikal svängningshastighet (m/s) och frekvensspektrum. Bakgrundsbrusets är starkast inom intervallet 8 – 15 Hz.



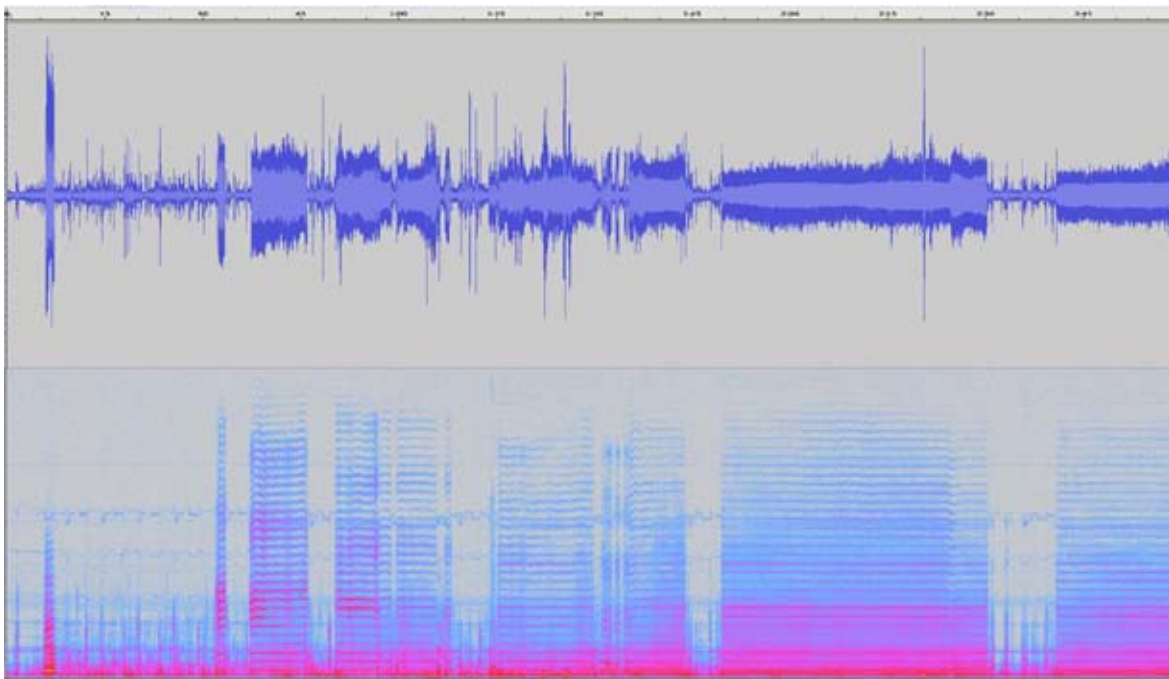
Figur 10. Borrning i grus (2) - vertikal svängningshastighet (m/s). Vibrationsamplituden varierar något under borrningen. Utöver bakgrundsbruset tillkommer en tydlig vibrations-förstärkning vid 15 och 22 Hz.



Figur 11. Borrning i morän (3) - vertikal svängningshastighet (m/s). Vibrationssignalen i morän är jämn. En markant ökning av vibrationsamplituden kan noteras vid 22 Hz. Observera den ökade amplitudskalan för svängningshastigheten.



Figur 12. Borrning i berg (4) - vertikal svängningshastighet (m/s). Vibrationssignalen i berg är relativt konstant. Vid 22 Hz (motsvarande hammarens slagningsfrekvens) inträffar en kraftig förstärkning av vibrationsamplituden.



Figur 13. Jämförelse mellan svängningshastighet och frekvensens energiinnehåll (0 – 50 Hz) som funktion av borrhingsförloppet (30 min).

Det finns tydliga samband mellan variationen av svängningsamplituden och frekvensinnehållet. Frekvensspektrumet ger dock mer information och är därför mer lämplig för identifiering av olika jord- och bergmaterial.

4. MÄTNINGAR RÅSUNDA

4.1 Geotekniska förutsättningar

Mätningarna utfördes på PEABs arbetsplats (kv. Lagern) inom tidigare Råsunda fotbollsstadion. Medan de seismiska mätningarna utfördes pågick påslagning på ca 90 m avstånd, som i viss mån kan ha påverkat de seismiska mätningarna. Geotekniska undersökningar utfördes inom området för att kartlägga jordlagerföljden. Markytan finns på nivå ca +8 m. De akustiska mätningarna utfördes i två punkter (8 och 9). Avståndet mellan punkterna är ca 22 m. Jb-totalsondering motsvarar Jb-2 med tillägget att man har infört ett statistiskt skede med avslagen hammare och spolning samt konstant rotations- och sjunkhastighet. Vid Jb-totalsondering registreras följande parametrar: 1. djup, 2. bormotstånd och sjunkningshastighet, 3. matningskraft, 4. hammartryck, 5. rotationstryck (tryck på vridmotorn) alt. vridmoment, 6. Rotationshastighet.

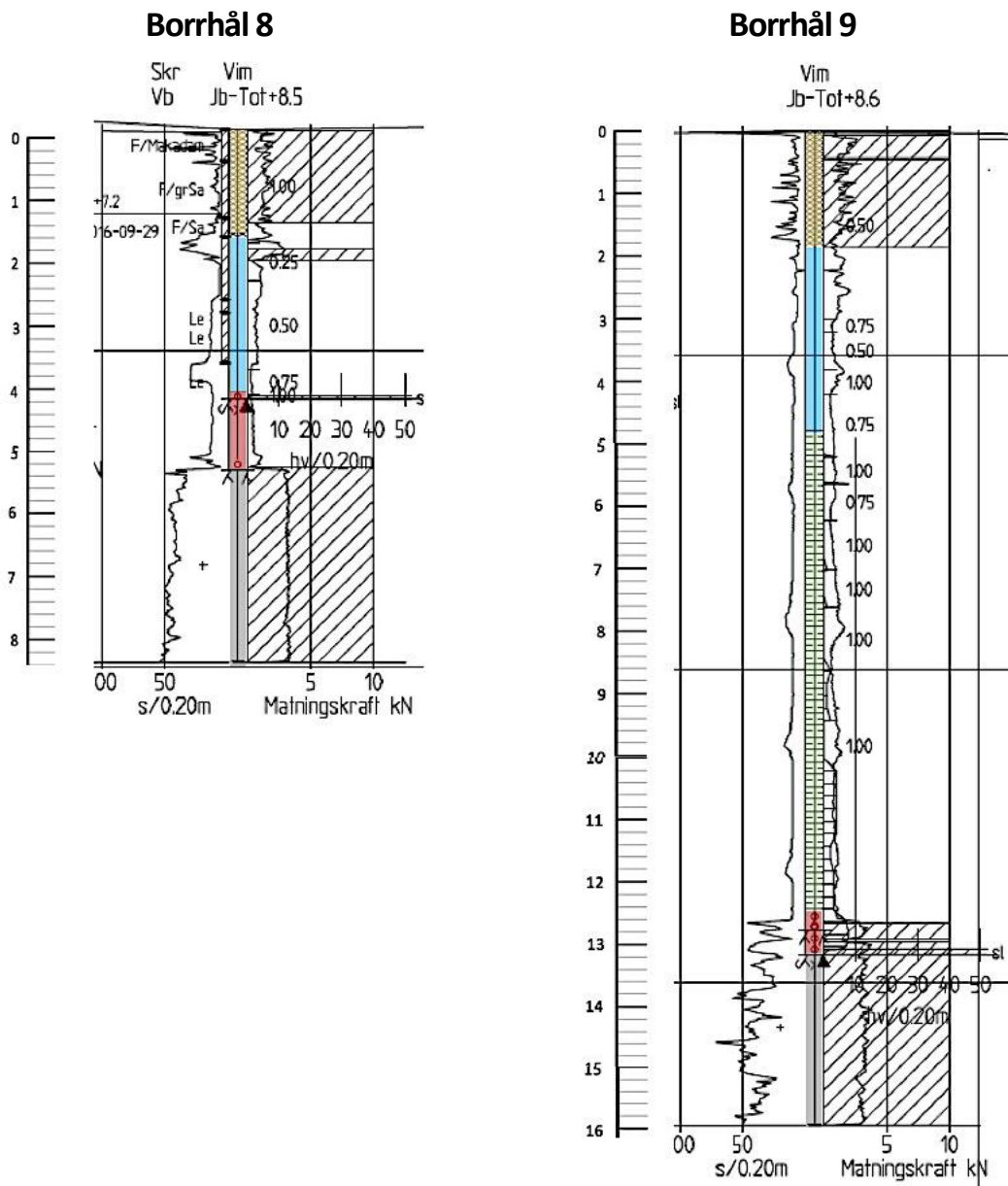
Resultaten från Jb-totalsondering redovisas i Figur 14. Det översta jordlagret består av ca 1,5 till 2 m mäktig fyllning (makadam och grusig sand). Därunder följer ett ca 2,5 m tjockt lerlager. På 4 m djup påträffas i borrhål 8 förmodligen uppsprucket berg. I borrhål 9 påträffas ett 7,5 m mäktigt lager av silt, som inte finns i borrhål 8. Bergkontakt indikeras i borrhål 8 på 4,5 m djup. I borrhål 9 finns ett 0,5 m tunt moränlager ovanför berg på 13 m djup. Borrningen avslutades efter ca 3 m borrning i fast berg.

4.2 Jb-totalsondering

Jb-totalsonderingarna utfördes i borrhål 8 och 9. Tidpunkten då skarvningen eller borrhåll inträffade, registrerades. Borrstängerna skarvades generellt med 2 m intervall. I borrhål 9 inträffade vid två tillfällen (1,8 m och 13,8 m) avbrott med lyft av borrstängerna. Borrningen i borrhål 8 till 8,2 m djup tog totalt 26 minuter, och i borrhål 9 till 15,8 m totalt 45 minuter.

4.4 Svängningshastighet

Svängningshastigheten registrerades kontinuerligt under borrningen. Vid mätningarna i Råsunda fanns inte synkroniseringsfunktionen mellan tid och djup tillgänglig. Därför visas i Figur 15 svängningshastighetens vertikala komponent som funktion av tiden. I tidsdiagrammen har tidsperioder markerats där borrstängerna skarvades. Det bör påpekas att påslagning, som pågick i närheten under vissa borrhållsperioder, kan ha förorsakat markvibrationer och påverkat vibrationssignalerna.

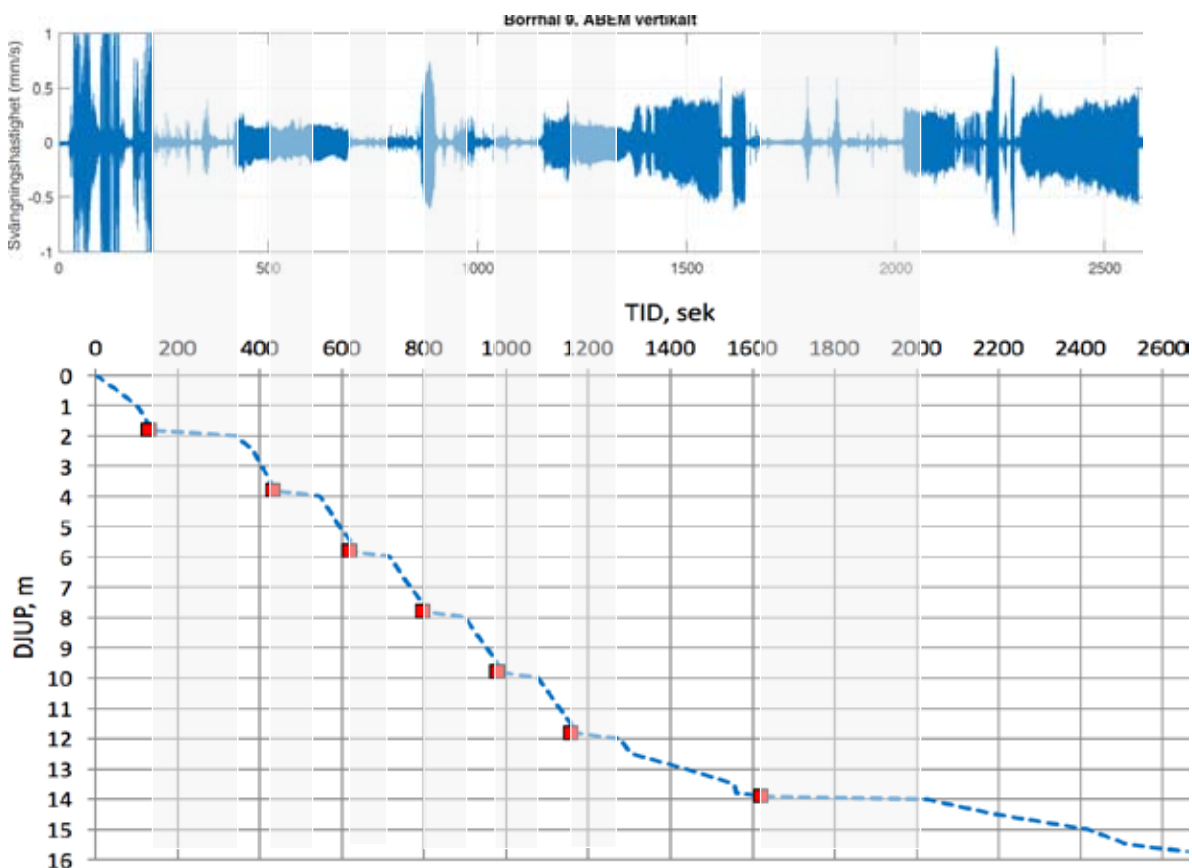


Figur 14. Resultat från Jb-totalsondering i borrhål 8 och 9, vingborrförsök, viktsondering och skruvborrprovtagning (borrpunkt 8, Råsunda).

Svängningshastigheten är ett mått på den energi som frigörs under Jb-totalsonderingen och ökar med ökande borrhållsmotstånd. Samtidigt minskar svängningshastighetens amplitud med ökande djup.

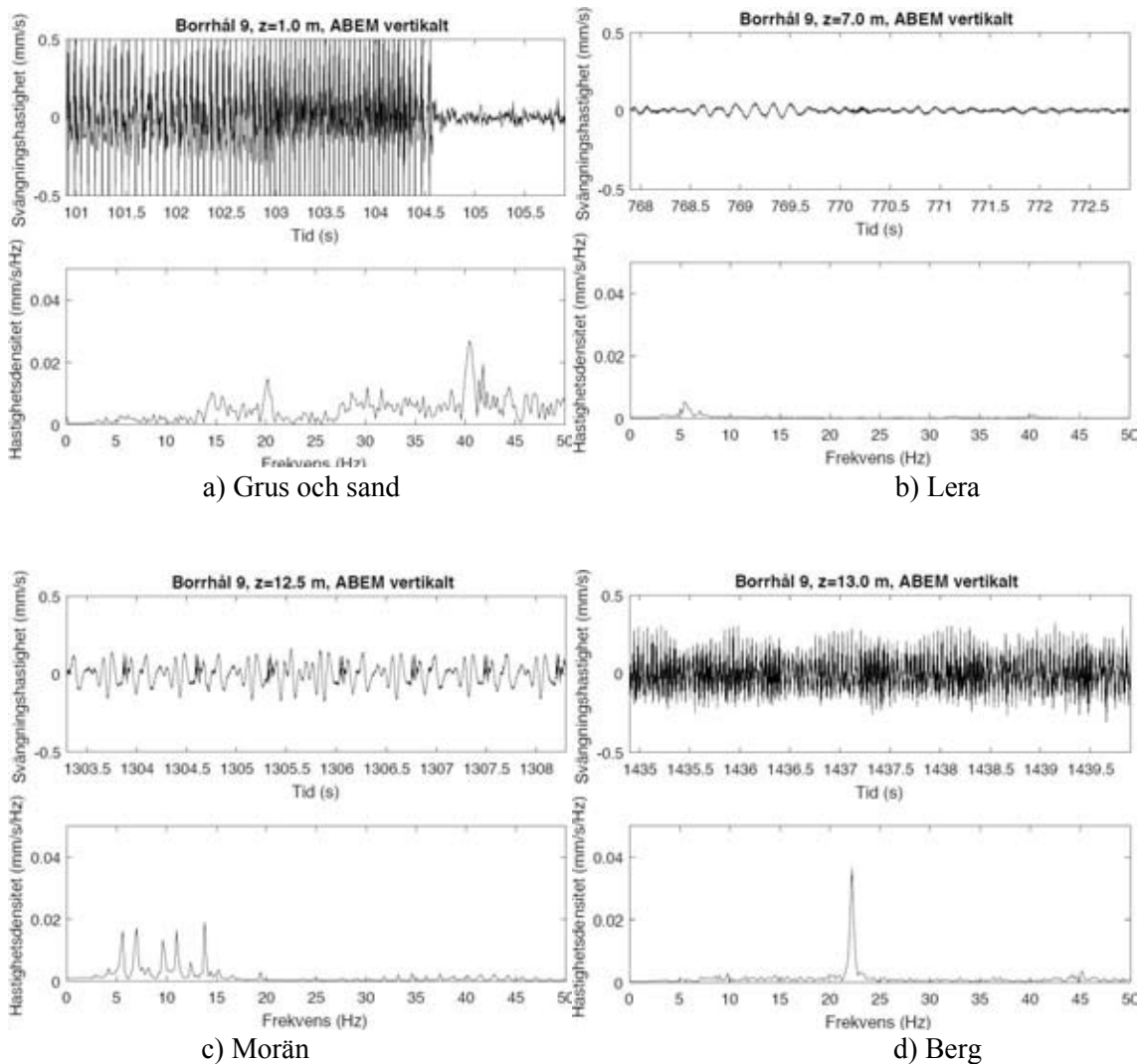
4.5 Frekvensinnehåll

De akustiska signalernas frekvensinnehåll ger värdefull information om de genomborrade jord- och berglagrens egenskaper. Nedan ges exempel på tidssignaler och tillhörande frekvensspektra för borrhål 9, Figur 16.



Figur 15. Svängningshastighet och borrhål 9. Borrstopp markers i grått.

Hammarens slagfrekvens var ca 1300 sl/min (22 Hz). Vid borring genom den ytliga fyllning, bestående av grus och sand, är den vertikala svängningshastigheten ca 0,5 mm/s och frekvensspektrumet brett, med maximalvärden omkring 22 Hz och 40 Hz. Vid borring genom lera är svängningsamplituden mycket liten och tyder på mycket lågt sonderingsmotstånd. Vid borring genom morän ökar vibrationsamplituden med dominerande frekvenser mellan 5 och 15 Hz. Vid borring i berg framträder en mycket tydlig skillnad i svängningssignalens utseende. Vibrationsamplitudens styrka ökar och frekvensspektrumet visar en tydlig spets vid 22 Hz, som motsvarar hammarens slagfrekvens.



Figur 17. Vertikal svängningshastighet och frekvensspektra i borrhål 9 på 1 m, 7 m, 12,5 m och 13 m djup.

5. MÄTNINGAR ÅKERSBERGA

En målsättning med mätningarna i Åkersberga var att kunna synkronisera vibrationsmätningen med borrhåldjupet, vilket har varit möjligt genom den av Geotech framtagna mjukvaran. För att kunna undersöka tillförlitligheten av mätsystemet användes en triaxiell geofon och en triaxiell accelerometer, samt en kanal för borrhåldjupsmätning.

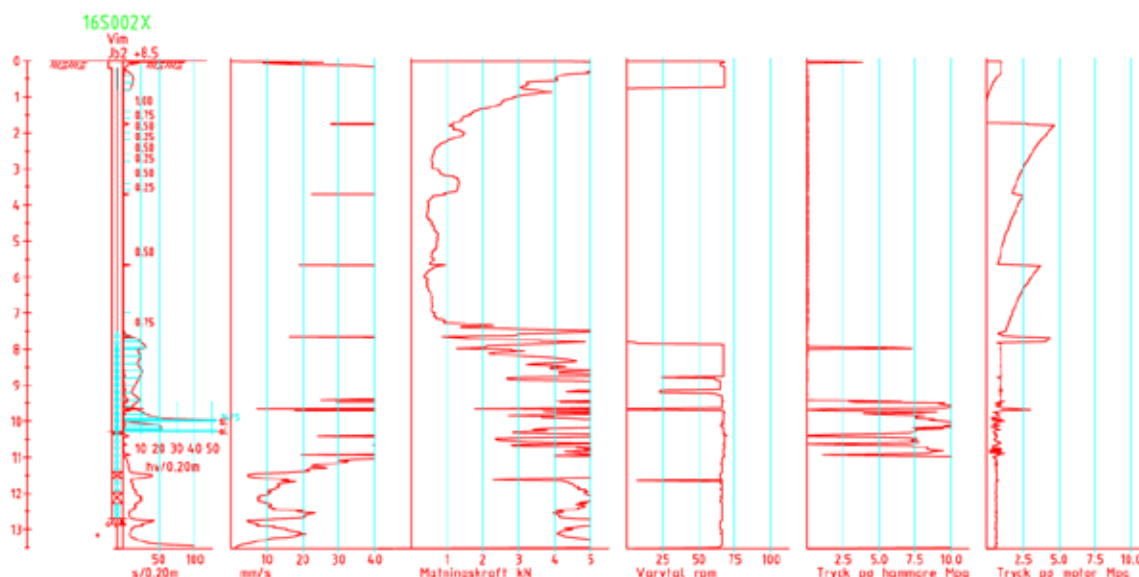
5.1 Geotekniska förutsättningar

Seismiska mätningar utfördes i samband med Jb2-sonderingar S001 och S002, men endast resultaten från Jb-sondering i borrhål S002 visas i Figur 18. I respektive borrhåll utfördes också viktsonderingar. Enligt viktsonderingen i borrhåll S001 finns närmast markytan torrskorpelera som på 2,5 m djup

övergår i lös lera. Under lerlagret förkommer på 7,5 m djup ett ca 3 m mäktigt lager av friktionsjord (morän?). Viktsonderingen avbröts på 11 m djup.

5.2 Jb-sondering

Jb-sonderingen visar att matningskraften varierar närmast markytan mellan 2 och 3 kN men sjunker i den lösa leran till 1 kN. På 7,5 m djup ökar matningskraften från 1 till 5 kN. Motorns varvtal ökas på 8,5 m till 70 rpm. Berg påträffas på 11 m djup där sjunkningshastigheten avtar markant till ca 5 mm/s. Motsvarande borrhast ökar från nära 0 till ca 40 s/0,20 m. På 13,8 m djup ökar sjunkningshastigheten markant (30 mm/s) en svaghets-skikt (sprickzon?). I den närbelägna borrhypen S 002 påträffades liknande förhållanden som i S 001.



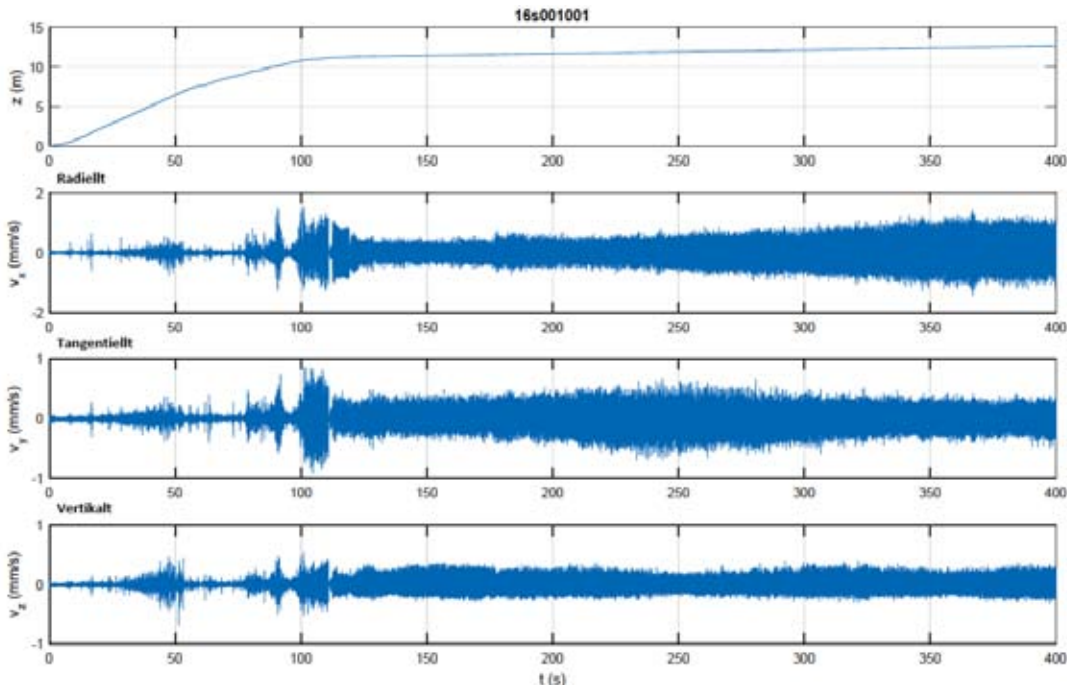
Figur 19. Resultat från Jb2-sonderingar och viktsonderingar, Åkersberga - Borrhyp S002.

Vid de seismiska mätningarna registrerades svängningshastigheten medels en triaxiell geofon på 4 m avstånd från borrhypen. Signalen från den triaxiella accelerometern omvandlades genom integration till svängningshastighet. Eftersom accelerometern gav samma resultat som geofonen (dock med något högre brusnivå) redovisas inte dessa resultat. Till skillnad från tidigare mätningar registrerades samtidigt med vibrationsmätningen också borrhypet. Under skarvningsperioden avbröts vibrationsmätningen.

5.4 Svängningshastighet

Vibrationsmätningarna utfördes medels en triaxiell geofon och en triaxiell accelerometer. Svängningshastigheten som erhöles från integrationen av accelerationen var i god överensstämmelse med geofonens registrering.

Därför redovisas i denna rapport endast svängningshastigheten som erhölls från geofonerna. I Figur 20 visas registreringarna från borrhål S002.



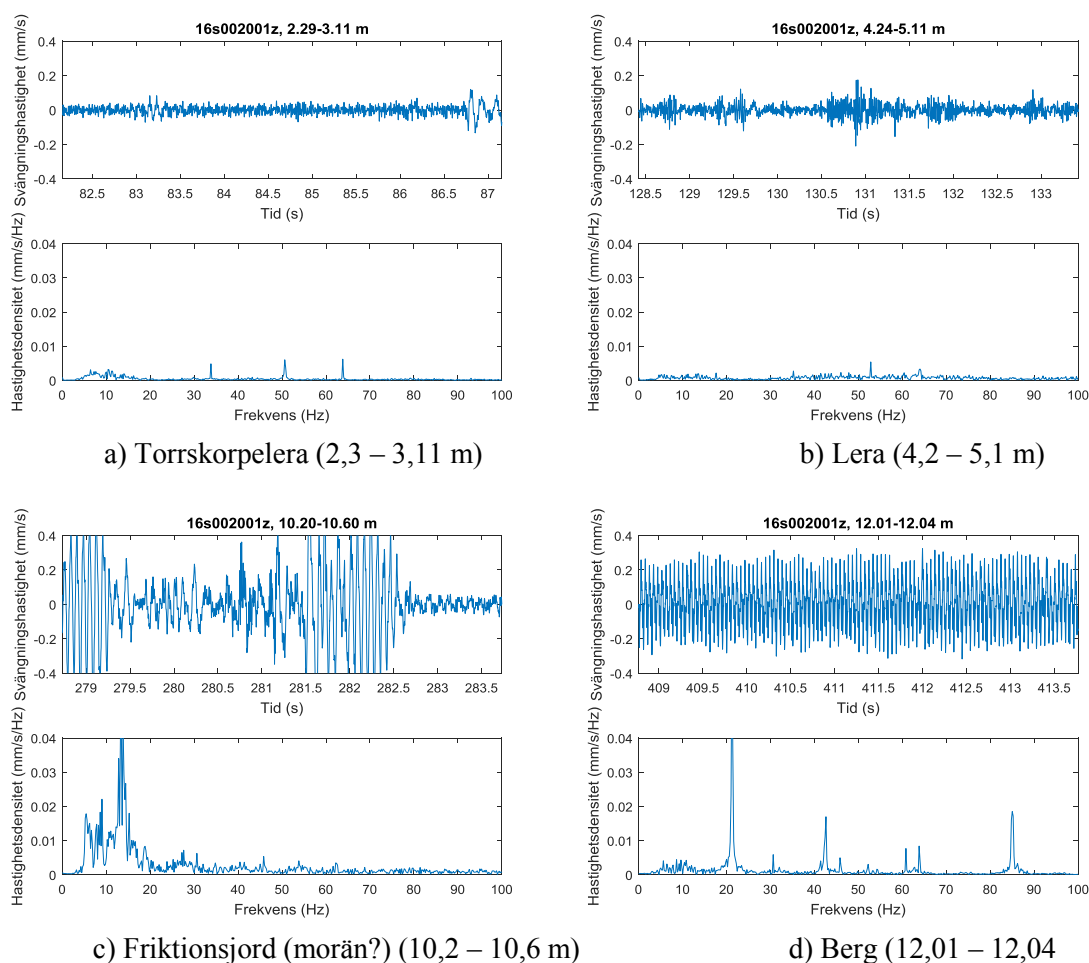
Fiugur 20. Svängningshastighet i tre riktningar samt borrhål som funktion av tiden (s) i borrhål S002. Skarvningsperioderna är bortklippta.

Överst i diagrammet finns borrhål som funktion av tiden. Sedan visas den radiella (x), transversala (y) och vertikala (z) vibrationskomponenten av svängningshastigheten. Mätningarna pågick i båda punkter under ca 400 sekunder (7 minuter). Vibrationerna under skarvningen är borttagna. Observera att olika amplitudskalor har använts vid redovisningen av de radiella, transversala och vertikala svängningshastigheterna.

Svängningshastigheten är låg under de första 100 sekunderna, då den lösa leran penetrerades. Den horisontella svängningshastigheten (x) är större än den vertikala komponenten (z). Detta tyder på att den horisontellt polariserade skjuvvågen ger högre amplituder än den vertikalt polariserade kompressionsvågen.

5.5 Frekvensinnehåll

Nedan ges exempel på tidssignaler och tillhörande frekvensspektra på utvalda djup för borrhål S002, Figur 21. Frekvensanalysen har utförts för en tidsperiod med varaktighet av 5 sekunder. I diagrammen anges djupintervallet för respektive registrering.



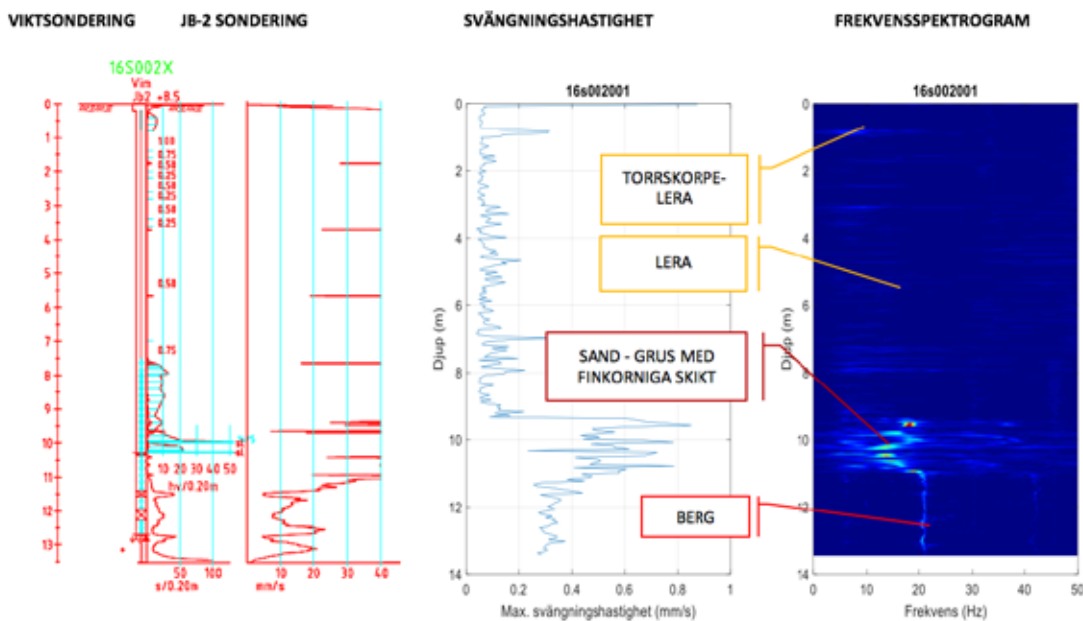
Figur 21. Vertikal svängningshastighet och frekvensspektra i borrhål S002. Notera att frekvensintervallet omfattar 0 – 100 Hz.

Analysen av vibrationssignalernas frekvensinnehåll visar på tydliga variationer som beror på det genomborrade materialets egenskaper. I torrskorpelera och lera är svängningshastigheten svag och de dominerande frekvenserna ligger inom intervallet 5 – 50 Hz. I dessa jordlager är de seismiska mätningarna osäkra. När borrhningen når friktionsjorden (morän?) ökar svängningshastigheten och en tydlig dominerande frekvens uppstår omkring 10 – 15 Hz. Vid borrhning i berg motsvarar den dominerande frekvensen (21 Hz) hammarens slagfrekvens (1250 rpm).

5.6 Spektrogram

Genom synkroniseringen mellan borrhdjupsmätning och svängningshastighetens tidsförlopp har det varit möjligt att redovisa variationen av olika vibrationsparametrar (svängningshastighet och frekvensinnehåll) som funktion av djupet. I Figur 22 jämförs sonderingsresultaten med de seismiska mätningarna. De seismiska mätningar

visas som maximal svängningshastighet (mm/s) och frekvensspektrum. I spektrogrammen anges höga spektralvärden (svängningshastighetsamplitud) i ljus färgton (gult och rött) och indikerar att vibrationer uppmäts vid de frekvenserna. Låga värden visas i mörkblått och betyder att vibrationssignalerna inte innehåller dessa frekvenser. Frekvensintervallet omfattar 0 till 50 Hz. Utgående från den geotekniska informationen, som baserats på tolkningen av viktsonderingsresultaten har även jordlagerföljden markerats.



a) Viktsondering b) Jb-sondering c) Svängningshastighet d) Frekvensspektrum

Figur 22. Redovisning av seismiska mätningar vid Jb-2 sondering i borrhål S002.

6. SLUTSATER

Resultaten från seismiska mätningar från två försöksplatser (Råsunda och Åkersberga) bekräftar erfarenheterna från den första undersökningsetappen. Tre komponenter av svängningshastigheten på 4 m avstånd från en Jb-borrbunkt ger värdefull information om det genomborrade jord- och bergmaterialet.

Ett viktigt steg i projektet har varit att synkronisera mätningen av de seismiska parametrar med borrhjupet. Därigenom har det varit möjligt att vid mätningarna i Åkersberga direkt jämföra borrhparametrar med seismiska mätvärden.

Vibrationsamplituden minskar med ökande borrhjup; samtidigt tilltar svängningshastigheten med stigande borrhjup. I lera är vibrationsamplituden mycket låg men ökar vid borrhjup genom friktionsjord, morän och i berg.

Det mest tillförlitliga seismiska mätvärdet för att identifiera det genomborrade materialet är vibrationssignalens frekvensinnehåll inom frekvensintervallet 0 till 50 Hz. Frekvensanalys kan utföras för korta tidsintervaller (ca 5 sekunder). En effektiv metod att redovisa variationen av vibrationsfrekvensen är genom frekvensspektrogram, där Jb-sonderingens olika parametrar kan direkt jämföras med vibrationssignalens frekvensinnehåll över hela borrhjupet.

Slutsatsen från de seismiska mätningarna i etapp 1 och 2 är att mätningen av vibrationssignalens tre komponenter ger kompletterande information om det genomborrade materialets material- och hållfasthetsegenskaper. Med ytterligare mätningar vid varierande markförhållanden kan praktiskt tillämpbara riktlinjer utvecklas för att identifiera jordlager och dess egenskaper med hjälp av seismiska mätningar. Eftersom vibrationsmätningarna utförs bredvid borrhjupen kan kompletterande information på detta sätt insamlas utan att störa borrhjupningen.

7. SLUTORD

Projektet har finansierats genom anslag från SGF. Ett stort tack riktas till Dr. Mehdi Bahrekazemi, SGFs Markvibrationskommittén och Gunilla Franzén, ordförande SGF, för stöd och uppmuntran. Geotech har utvecklat synkroniseringsprogrammet. De geotekniska undersökningarna i Åkersberga har utförts av SWECO och i Råsunda av Cowi. Ett stort tack riktas till Mats Tingström, Geotech AB, Nils Lindqvist, SWECO och Michael Lindberg, Cowi. Alexander Bergström, Peab Sverige AB har möjliggjort mätningarna i Råsunda. De seismiska mätningarna har utförts med stor kompetens av Kent Allard, Metro Metrik och Kent Lindgren, KeLi Mätteknik.

4 REFERENSER

- Massarsch, K. R. 1986. Acoustic Penetration Testing, International geotechnical seminar on field instrumentation and in- situ measurements, 4, Singapore, Nov. 1986. Proceedings, s. 71 -76.
- Massarsch, K. R. 2013. Introduction to Discussion Session 1.1 Field Investigations. European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15: Geotechnics of Hard Soils - Weak Rocks, Athens, 12-15 September, 2011. Proceedings, Vol. 5. pp. 257 - 264.

- Massarsch, K.R. 2014. Cone Penetration Testing - A Historic Perspective. Proceedings, Proceedings of 3rd International Symposium of Cone Penetration Testing, CPT14. Edited by P.K. Robertson and K.L. Cabal, May 13-14, 2014, Las Vegas, Nevada, USA. Printed by Omnipress; ISBN: 978-0-615-98835-1, Paper # KN-4, s. 97-134.
- Massarsch, K.R. 2016. Akustisk JB-sondering; Resultat från etapp 1. SGF Notat 1:2016. Svenska Geotekniska Föreningen (SGF), Linköping 2016. 15 p.
- SGF. 2012. Metodbeskrivning för Jord-bergsondering. Utförande, utrustning och kontroll. Svenska Geotekniska Föreningen SGF rapport 2:99, Linköping 2012, 90 s.
- SGF. 2015. Förbättrad utvärdering av resultat från jord bergsondering /MWD, Svenska Geotekniska Föreningen SGF rapport 1:2015, Linköping 2015, 127 s.

FÖRFATTARE

K. Rainer Massarsch, Geo Risk & Vibration Scandinavia AB, Bromma
rainer.massarsch@georisk.se

Carl Wersäll, Jord och bergmekanik, KTH, Stockholm
carl.wersall@byv.kth.se

