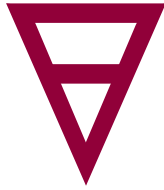


Rapport 2:2021

# Maximal dynamisk modul från laboratoriemätningar





**Svenska Geotekniska Föreningen**  
Swedish Geotechnical Society

SGF Rapport 2:2021

# Maximal dynamisk modul från laboratoriemätningar

Linköping 2021

<b>SGF Rapport</b>	Svenska Geotekniska Föreningen E-post: <a href="mailto:info@sgf.net">info@sgf.net</a>
Beställning	Svenska Geotekniska Föreningen c/o Ermax Design AB Sveaborgsvägen 16 439 73 Fjärås Tel: 0708-13 77 73 E-post: <a href="mailto:info@sgf.net">info@sgf.net</a>
ISSN	1103-7237
ISRN	SGF-R-21/2-SE
Upplaga	Digital utgåva
Tryckeri	<a href="http://www.sgf.net">www.sgf.net</a>

# Förord

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) är en allsidigt sammansatt ideell förening, där de flesta yrkesverksamma geotekniker i branschen är representerade. Föreningens mål är att främja utvecklingen av geoteknik i ett nationellt och internationellt perspektiv. En stor del av SGF:s arbete utförs inom olika sektioner inom SGF. Sektionerna svarar för informations och utbildningsfrågor, initierar forsknings- och utvecklingsarbeten, samt utför målinriktat arbete genom projekt i arbetsgrupper och/eller av enskilda medlemmar. Arbetsgruppen för Markvibrationer inom SGF är en sådan arbetsgrupp.

SGF:s markvibrationsarbetsgrupp har bland annat som målsättning att förbättra geoteknikers kunskap om jorddynamiska frågor samt att informera om de geotekniska förutsättningars betydelse vid lösning av olika vibrationsproblem. Föreliggande informationsskrift har tagits fram inom SGF:s markvibrationsarbetsgrupp. Projektet har finansierats genom anslag från SGF. Ett stort tack riktas till Per-Evert Bengtsson för initiativet till denna rapport samt Mehdi Bahrekazemi, Gunilla Franzén, och Håkan Garin för stöd och uppmuntran från SGF. Särskilt tack också till Rainer Massarsch, Lars Hall, Martin Holmén, Peter Claesson och Lars Olsson som bidragit med värdefulla granskningskommentarer till denna rapport.

Synpunkter och kommentarer på rapporten emottas gärna genom den kontaktinformation som framgår på SGF:s hemsida.

Nils Rydén  
Lund, 2021-10-18



# Innehåll

<b>1. Inledning och begrepp.....</b>	<b>1</b>
1.1 inledning och syfte	1
1.2 maximal skjuvmodul	1
1.3 grundläggande begrepp	3
1.3.1 Moduler och seismiska utbredningsfarter i ett homogent och isotropt elastiskt material	3
1.3.2 Dämpning och dämpade resonansfrekvenser	5
<b>2. Resonansfrekvensmätningar.....</b>	<b>9</b>
2.1 resonansfrekvensmätningar – enkel approximativ metod	10
2.2 resonansfrekvensmätningar – allmän metod	13
2.2.1 Mätuppställning och utrustning	14
2.2.2 Utvärdering av uppmätt resonansfrekvens	16
2.3 resonansfrekvensmätningar – med resonanskolonn (resonant column)	21
<b>3. Transmissionsmätningar.....</b>	<b>25</b>
3.1 transmission och reflektion med ljudvågor	25
3.2 transmissionsmätningar med böjelement (bender elements)	27
<b>4. Referenser.....</b>	<b>29</b>
<b>Bilagor</b>	
<b>A Normaliserade frekvenser.....</b>	<b>1</b>

## SYMBOLFÖRTECKNING

$\nu$	Tvärkontraktionstal
$\rho$	Skrymdensitet
$\lambda$	Våglängd
$\omega$	Vinkelfrekvens
$\gamma$	Skjuvtöjning
$\xi$	Dämpkvot
$\eta$	Förlustfaktor
$\phi$	Fasvinkel
$f$	Frekvens
$f_d$	Dämpad resonansfrekvens
$f_n$	Naturlig egenfrekvens
$i$	index modnumrering
$C$	Vågfart
$C_P$	Kompressionsvågsfart
$C_S$	Skjuvvågsfart
$D$	Diameter på cylindrisk provkropp
$E$	Elasticitetsmodul
$G$	Skjuvmodul
$G_{max}$	Maximal skjuvmodul
$L$	Längd (höjd eller tjocklek) på cylindrisk provkropp



# Kapitel 1.

## Inledning och begrepp

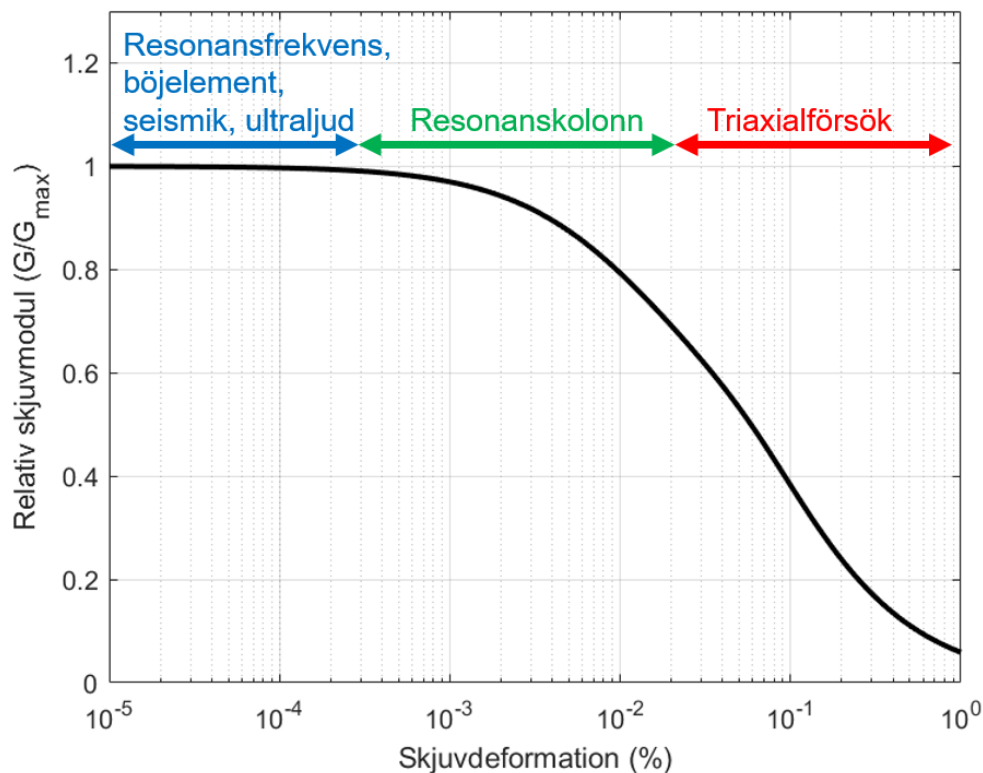
### 1.1 INLEDNING OCH SYFTE

I denna rapport beskrivs flera laboratoriemetoder för mätning av seismiska utbredningsfarter i provkroppar för vidare bestämning av maximal dynamisk skjuvmodul ( $G_{max}$ ) eller E-modul ( $E_{max}$ ) för jord och andra byggnadsmaterial. Målgruppen är inte bara geotekniker som arbetar med lös jord utan merparten av de metoder som beskrivs är fokuserade på fasta material som berg, stabiliserad jord, betong och asfalt. De flesta metoder beskrivs översiktligt men med referenser där utrustning, mätförfarande och tillämpningar beskrivs i mer detalj. Den enklaste metoden, resonansfrekvensmätningar på fasta material med fria randvillkor, som idag kan utföras med en modern telefon eller liknande enkel utrustning beskrivs dock i mer detalj. Nya kalibreringskurvor för enkel utvärdering av dessa mätningar har tagits fram för denna rapport med syftet att möjliggöra enkel mätning och utvärdering för alla som vill använda tekniken. En annan skillnad mot tidigare rapporter och böcker inom ämnesområdet är att rapporten behandlar mätning av  $G_{max}$  inom olika områden som berg, betong, asfalt, stabiliserad jord och andra material. Syftet med detta är att ge en bredare bild av mättekniken och visa exempel som kan stimulera till fortsatt utveckling inom respektive område.

### 1.2 MAXIMAL SKJUVMODUL

Skjuvmodulen  $G$  beskriver förhållandet mellan skjuvspänning ( $\tau$ ) och vinkeländring ( $\gamma$ ) vid enkel skjuvning. Maximal eller initiell skjuvmodul ( $G_{max}$ ) eller ( $G_0$ ) representerar en jords skjuvmotstånd vid mycket små töjningar  $\epsilon \sim 1E-6$  (1 mikro strain eller 0.0001 % töjning). Vid dessa små töjningsnivåer antas jorden ofta kunna beskrivas som ett elastiskt eller viskoelastiskt material med en nästan konstant modul  $G_{max}$ . Vid större töjningsnivåer minskar skjuvmodulen

( $G$ ) drastiskt och kan för jord vara en faktor 10 lägre vid större töjningsnivåer (Hall *et al.*, 2015). Figur 1 visar en typisk modulreduktionskurva med töjningsnivån från olika laboratorieförsök på y-axeln.  $G_{max}$  är typiskt en funktion av portal, medeleffektivspänning och, för kohesionsjord också överkonsolideringsgraden (Massarsch, 2015). En mängd empiriska samband för  $G_{max}$  i jord och modulreduktionskurvan har tagits fram och jämförts/sammanställts, se till exempel (Richart, Hall and Woods, 1970; Dobry and Vucetic, 1987; Larsson and Mulabdic', 1991; Darendeli, 2001; Santamarina, Klein and Fam, 2001; Chang and Liu, 2003; Boyd, Asce and Ferraro, 2005; Carniel, Barazza and Pascolo, 2006).



**Figur 1. Exempel på en typisk modulreduktionskurva för friktionsjord med typiska töjningsnivåer från olika laboratiemätningar exempel från (Rollins *et al.*, 1998) och (Larsson, 1994).**

Bestämning av  $G_{max}$  genom dynamiska eller seismiska mätningar av utbredningsfarter i geotekniska laboratorier används i Sverige mer och mer vid kontroll av egenskaper hos stabiliserad jord. Skjuvmodulen är också vanligt förekommande i materialmodeller som används i numeriska beräkningar av geokonstruktioner, varför det finns ett stort intresse för rutinmässig bestämning

av  $G_{max}$  i samband med avancerade laboratorieundersökningar som direkta skjuvförsök och triaxialförsök. Mätutrustning för dynamiska mätningar har under de senaste 10 åren blivit betydligt enklare och billigare vilket gör rutinmässiga mätningar enklare och mer praktiska. Sammantaget har detta inneburit att finns behov av en standardmässig beskrivning för bestämning av maximal skjuvmodul i geotekniska laboratorier för jord och andra byggnadsmaterial.

Syftet med denna skrift är att ta fram en rapport som redovisar hur man i laboratoriet kan bestämma  $G_{max}$  (eller  $E_{max}$ ) för olika material. Rapporten fokuserar på enkla resonansfrekvensmätningar och dess tillämpning inom provning av stabiliserad jord och andra områden samt för olika geometrier. Ett delsyfte är också att lyfta fram likheter och skillnader mellan olika mätmetoder och tillämpningsområde för att sprida kunskap mellan olika tillämpningsområden som kan stimulera till en fortsatt utveckling inom området.

### **1.3 GRUNDLÄGGANDE BEGREPP**

I denna rapport om maximal skjuvmodul beskrivs flera olika dynamiska mätmetoder. Utvärderingen av mätningarna bygger oftast på det grundläggande antagandet om ett homogent, isotropiskt elastiskt eller viskoelastiskt material. Under dessa förutsättningar gäller de grundläggande elastiska sambanden mellan elastiska konstanter och seismiska utbredningsfarter. Det finns en mängd rapporter och böcker där dessa samband beskrivs närmare (Richart, Hall and Woods, 1970; Santamarina, Klein and Fam, 2001; Hall *et al.*, 2015) och här ges bara en kortfattad sammanfattning av de viktigaste begreppen för denna rapport.

#### **1.3.1 Moduler och seismiska utbredningsfarter i ett homogent och isotropt elastiskt material**

Skjuvmodulen ( $G$ ) i ett homogent och isotropt elastiskt material är direkt kopplad till utbredningsfarten för en skjuvvåg ( $C_s$ ) och skrymdensiteten ( $\rho$ ) genom:

$$G = \rho C_s^2 \quad \text{(Ekv 1)}$$

Sambandet ovan gäller oberoende av geometri och randvillkor. Den snabbare kompressionsvågen ( $C_P$ ) är däremot beroende av randvillkoren i den volym som påverkas av vågutbredningen. I en hel eller halvrymd (stor jordvolym i förhållande till våglängden ( $\lambda$ )) är vågfarten kopplad till  $\rho$  och kompressionsmodulen (Ödometermodulen) ( $M$ ) istället för  $G$  ( $M=\rho C_P^2$ ).

För E-modulen finns ett liknande samband till utbredningsfarten för kompressionsvågen i en 1D geometri ( $C_{P\_1D}$ ) vilken är något lägre än  $C_P$  i en hel eller halvrymd. Observera att detta samband bara gäller i geometrier som förenklat kan sägas vara 1D (stavar och pålar).

$$E = \rho C_{P\_1D}^2 \quad \text{(Ekv 2)}$$

$C_{P\_1D}$  och sambandet ovan används i denna rapport eftersom det är relevant för vågutbredning i en cylindrisk provkropp i laboratorium där  $\lambda$  är större eller i samma storleksordning som diametern ( $D$ ) på provkroppen. I en hel eller halvrymd är kopplingen mellan  $C_P$  och  $E$  även beroende av Poisson's tal ( $\nu$ ) enligt:

$$E = \rho C_P^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad \text{(Ekv 3)}$$

Sambandet mellan  $G$  och  $E$  kan uttryckas som:

$$E = 2G(1+\nu) \quad \text{(Ekv 4)}$$

Detta samband kan också skrivas om i form av seismiska utbredningsfarter vilket betyder att kvoten  $C_P/C_S$  enbart beror på  $\nu$ .

$$\nu = \frac{0.5 \left( \frac{C_P}{C_S} \right)^2 - 1}{\left( \frac{C_P}{C_S} \right)^2 - 1} \quad (\text{Ekv 5})$$

Uttrycken ovan används flitigt för att växla mellan moduler och utbredningsfarter i de dynamiska mätningar som beskrivs i denna rapport.

### 1.3.2 Dämpning och dämpade resonansfrekvenser

I asfalt och lösa jordar kan dämpning få en signifikant påverkan på de dynamiska mätningar som beskrivs i denna rapport. Dämpning är en sammanfattande benämning på alla effekter som gör att en fri svängning avtar med tiden (Hall and Richart, 1963). Det finns flera olika koefficienter för att beskriva dämpning och i denna metodbeskrivning används dämpkvot ( $\xi$ ) vilken ibland också benämns som dämpningsfaktor inom akustik och mekanik.  $\xi$  förhåller sig till förlustfaktorn ( $\eta$ ) som  $\xi=2\eta$  och till fasvinkeln ( $\phi$ ) som  $\xi=\tan(\phi)/2$ .  $\phi$  är fasförskjutningen (fördröjningen) mellan belastning och respons vid en kontinuerlig belastning med konstant frekvens.

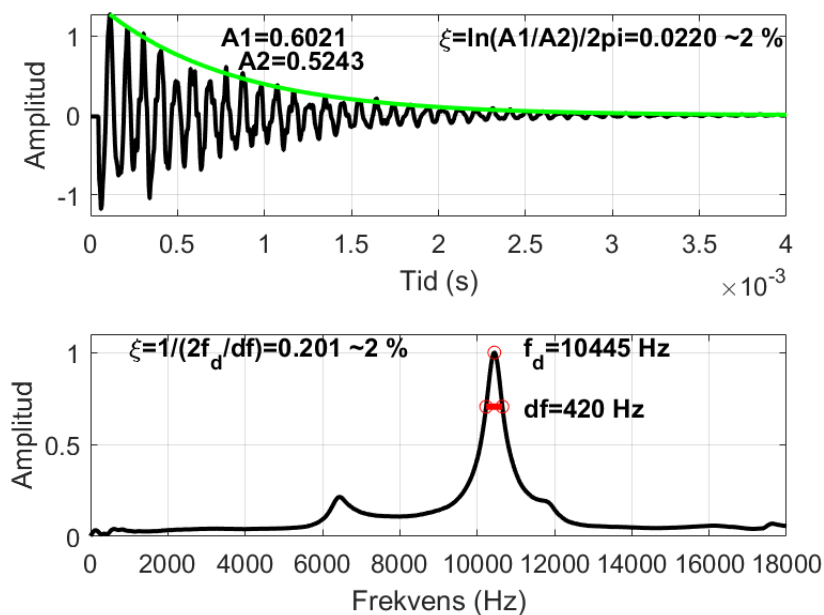
$\xi$  för en dämpad svängning är ett mått på energin i svängningen (resonansen i detta fall) jämfört med den energi som sprids eller förbrukas per svängningscykel.  $\xi$  kan beräknas från skillnaden i amplitud mellan två toppar i en dämpad resonansfrekvens i tidsdomän (A1 och A2 i Figur 2) med Ekvation 6.

$$\xi = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{2\pi} \quad (\text{Ekv 6})$$

Det är dock oftast mer robust att beräkna  $\xi$  i frekvensdomän med hjälp av den så kallade "half power bandwidth" metoden eftersom hela resonansförloppet i tidsdomän då utnyttjas (Richart, Hall and Woods, 1970):

$$\xi = \frac{\Delta f}{2f_d} \quad (\text{Ekv 7})$$

där  $\Delta f$  är bandbredden vid 70.7 % (halva energin) av amplituden vid  $f_d$  (Figur 2). Med ekvationerna ovan och värdena i exemplet i Figur 2 blir  $\xi$  ca 2 % från både tids och frekvensdomänberäkningen. Exemplet i Figur 2 kommer från en resonansfrekvensmätning på en betongcylinder med en längd ( $L$ ) på 193 mm och diameter ( $D$ ) på 100 mm.



**Figur 2. Exempel på uppmätt resonansfrekvens och dämpningsfaktor i tid (överst) och frekvensdomän (underst).**

Naturlig resonansfrekvens ( $f_n$ ) (även kallat naturlig egenfrekvens) är antalet svängningar per sekund (Hz) i en provkropp utan dämpning som får svänga fritt. En uppmätt resonansfrekvens från ett material med dämpning kallas dämpad resonansfrekvens ( $f_d$ ) och är något lägre än  $f_n$  (Richart, Hall and Woods, 1970). Dämpningsfaktorn ( $\xi$ ) i materialet reducerar  $f_n$  till  $f_d$  enligt följande samband:

$$f_d = f_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (\text{Ekv 8})$$

Vid mätningar på betong eller stabiliserad jord eller mycket kall asfalt är  $\xi$  väldigt låg ( $\sim 2\%$ ) och skillnaden mellan  $f_n$  och  $f_d$  kan då bli praktiskt försumbar. Men vid låga frekvenser eller höga temperaturer i asfalt kan  $\xi$  öka till upp mot  $30\%$  (motsvarar fasvinkel  $\phi=31^\circ$ ) och ger därmed en betydande inverkan på  $f_n$  vilket då måste beaktas. Detta innebär att  $\xi$  också måste mätas upp för respektive dämpade resonansfrekvens på asfaltprovkroppar (Gudmarsson, Ryden and Birgisson, 2012).

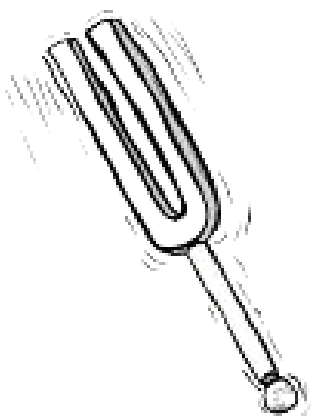




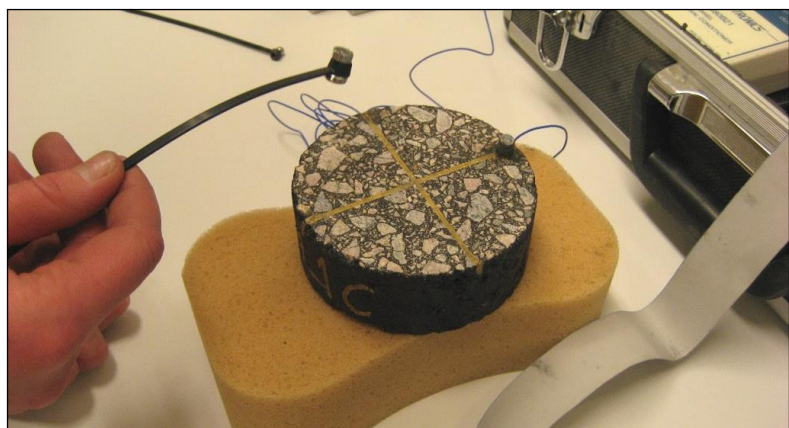
## Kapitel 2.

# Resonansfrekvensmätningar

Resonansfrekvensmätning är en metod som kan användas för att bestämma styvhetsmodul eller den seismiska vågfarten på en provkropp med känd geometri och massa. Alla fasta kroppar har specifika resonansfrekvenser vilka är beroende av styvheten i materialet, geometrin på provkroppen, samt provets dynamiska randvillkor. Metoden kan jämföras med en stämgafl av stål där olika storlekar (geometrier) på gaffeln ger olika toner (frekvenser), se Figur 3a.



(a)



(b)

**Figur 3. (a) Geometrin och materialet i en stämgafl avgör vilken ton (frekvens) som kan alstras. (b) Resonansfrekvensmätning på cylindrisk asfaltprovkropp.**

En provkropp har ett obegränsat antal resonansfrekvenser ( $i$ ) och den lägsta kallas den fundamentala eller grundmoden. Alla naturliga resonansfrekvenser kan teoretiskt relateras till de elastiska konstanterna ( $E$  och  $G$ ) och tvärkontraktionstal ( $\nu$ ) eller seismiska utbredningsfarter, vilka utvärderas i denna rapport.

För en provkropp med känd geometri och randvillkor går det därför att bestämma materialets styvhetsmodul indirekt genom att mäta upp en eller flera

dämpade resonansfrekvenser ( $f_d$ ) samt skrymdensiteten. Resonansfrekvensmätningar med fria randvillkor benämns ofta ”Free-Free Resonance Testing” eller ”Impact Resonance Testing” inom Geoteknik och ”Resonance Spectroscopy” inom andra tillämpningar. Resonansfrekvensmätningar där en sida av provet är fast inspänd och motsatt sida är fri, benämns ofta som Resonanskolonnförsök (”Resonant Column Testing” inom Geoteknik och ”Fixed-Free Resonance Testing” inom andra tillämpningar). I detta kapitel beskrivs båda metoderna med fokus på cylindriska provkroppar (Figur 3b). Mätningarna kan dock göras på vilken geometri som helst så länge det går att prediktera teoretiska resonansfrekvenser för aktuell geometri.

Resultaten från resonansfrekvensmätningar anses oftast precis som vid seismiska mätningar och ultraljudsmätningar representera materialets styvhet vid en konstant och liten töjningsnivå  $\varepsilon \sim 1E-6$  (1 mikro strain). Resonansfrekvensmätningar kan dock också genom mer avancerad utvärdering användas för att mäta upp en del av den initiala modulreduktionskurvan från ca 0.1-3 mikro strain (Dahlen, Ryden and Jakobsson, 2015; Ryden, Dahlen and Jakobsson, 2015).

## **2.1 RESONANSFREKVENSMÄTNINGAR – ENKEL APPROXIMATIV METOD**

Resonansfrekvensmätningar med fria randvillkor är särskilt enkla att utföra för långa slanka provkroppar av fasta material där provet kan läggas ”fritt” på ett mjukt underlag. För provkroppar med ett längd ( $L$ ) / diameter ( $D$ ) förhållande som är större än eller lika med 2 är metoden särskilt enkel och praktiskt tillämpbar. För att lyfta fram enkelheten i dessa mätningar och utvärdering beskrivs denna metod först separat i detta delkapitel. Tekniken har använts tidigare på prover av betong men används nu också på asfalt, stabiliserad jord, fast jord eller berg. Det finns också flera standarder för denna typ av mätning (Swedish Standard Institute, 2004; ASTM Standard C215, 2008).

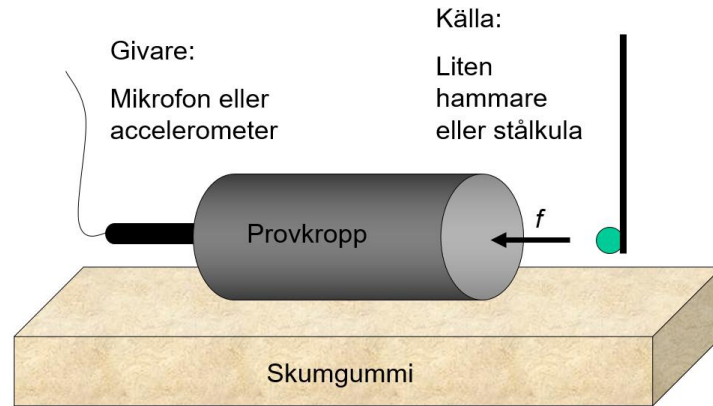
När  $L/D \geq 2.0$  kan longitudinella vibrationer i provkroppen beskrivas med en enkel 1D geometri. Denna förenklade teori bygger på att  $L \gg D$  och att våglängden ( $\lambda$ )  $\lambda \gg D$ . Vid detta förhållande går det att försumma tröghets-

moment och skjuvspänningar i cylindern och kompressionsvågshastigheten i cylindern ( $C_{P\_1D}$ ) kan relateras till resonansfrekvensen  $f_n$  och  $L$  genom Ekvation 9.

$$C_{P\_1D} = 2Lf_n \quad \text{(Ekv 9)}$$

Observera att  $C_{P\_1D}$  motsvarar kompressionsvågshastigheten i en lång slank struktur där  $\lambda \gg D$ . Detta belastningsfall motsvarar definitionen på E-modulen (enbart axiell belastning med fria randvillkor radiellt) och modulen kan därför beräknas direkt från  $C_{P\_1D}$  och skrymdensiteten utan hänsyn till Poisson's tal ( $\nu$ ) med Ekvation 2.

Figur 4 visar mätuppställningen för mätning av den fundamentala longitudinella resonansfrekvensen i en slank cylinder. Provet läggs på något mjukt material som skumgummi med betydligt lägre styvhet jämfört med själva provet. Det finns många exempel på undersökningar av underlagets betydelse vid "fria" resonansfrekvensmätningar med slutsatserna att de flesta mjuka material fungerar bra som "fria" randvillkor (Schaeffer, Bearce and Wang, 2013). Bäst resultat uppnås oftast med en accelerometer som fästs med lim, fett eller liknande i mitten på provkroppens ena kortsida (se även sektion 2.2.1 nedan). Mittpunkten på den motsatta sidan exciteras med en liten hammare eller liknande källa. För provkroppar av berg och betong med förhållandevis liten materialdämpning kan mätningen också utföras med en mikrofon som bara hålls stilla nära ena kortsidan av provkroppen. Erfarna användare kan under dessa förutsättningar tom använda en applikation i en smarttelefon. Sök till exempel på applikationer om "*audio frequency analysis*" eller se exempelvis appen "*Audio Spectrum Analyzer dB RTA*" för iPhone.

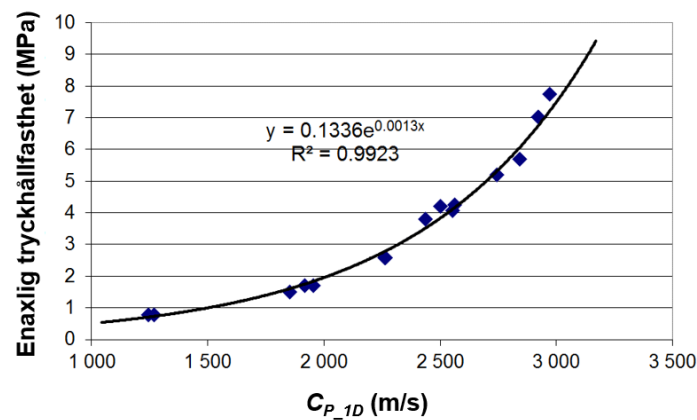


**Figur 4. Mätupställning vid resonansfrekvensmätning på cylinder med  $L/D > 2$ . Läget för generering av den fundamentala longitudinella moden är markerad med en pil.**

Mätupställningen ovan motsvarar den mätning som gjorts på en betongcylinder i Figur 2 för beskrivningen av dämpning. Längden på provkroppen i detta exempel var 193 mm vilket ger  $C_{P\_ID} = 2 * 0.193 * 10445 = 4032$  m/s (Ekvation 9). Med  $D = 100$  mm uppfyller inte denna provkropp rekommendationen på  $L/D > 2$  men förhållandet (1.93) är nära nog för att denna förenklade approximativa metod ska kunna användas. Densiteten på provkroppen var  $2400$  kg/m<sup>3</sup> vilket ger  $E_0 = 2400 * 4032^2 = 39$  GPa (Ekvation 10). Observera att  $\nu$  nu behöver antas eller mätas upp för att också kunna bestämma  $C_S$  eller  $G_0$  för betongcylindern (Ekvation 4 och 5) metoder för bestämning av  $\nu$  från olika svängningsmoder beskrivs utförligt i nästa kapitel 2.2.

Denna enkla typ av resonansfrekvensmätning (Figur 2 och 4) har visat sig mycket repeterbar och robust vilket gjort att den börjat användas rutinmässigt vid laboratorieprovning av asfalt, betong och stabiliserad jord (Lindh, 2018). Figur 5 visar ett exempel från (Ryden, Ekdahl and Lindh, 2006) där uppmätt  $C_{P\_ID}$  jämförs med enaxlig tryckhållfasthet på cylindrar ( $L = 0.2$  m och  $D = 0.1$  m) av stabiliserad jord. Liknande resultat på stabiliserad jord har också presenterats av (Åhnberg, H., Holmén, 2008; Pantazopoulos and Atmatzidis, 2012; Toohey and Mooney, 2012; Guimond-Barrett *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2013; Bearce and Mooney, 2014; Jamshidi, Lake and Barnes, 2015; Verástegui-Flores *et al.*, 2015). Sambandet i Figur 5 kan sedan utnyttjas för att uppskatta/kontrollera hållfastheten i fält på samma typ av material genom att mäta upp  $C_P$  i fält

(Ryden, Ekdahl and Lindh, 2006). Observera att det finns en liten skillnad mellan  $C_P$  och  $C_{P\_1D}$  som är beroende av  $\nu$  (Ekvation 2 och 3).



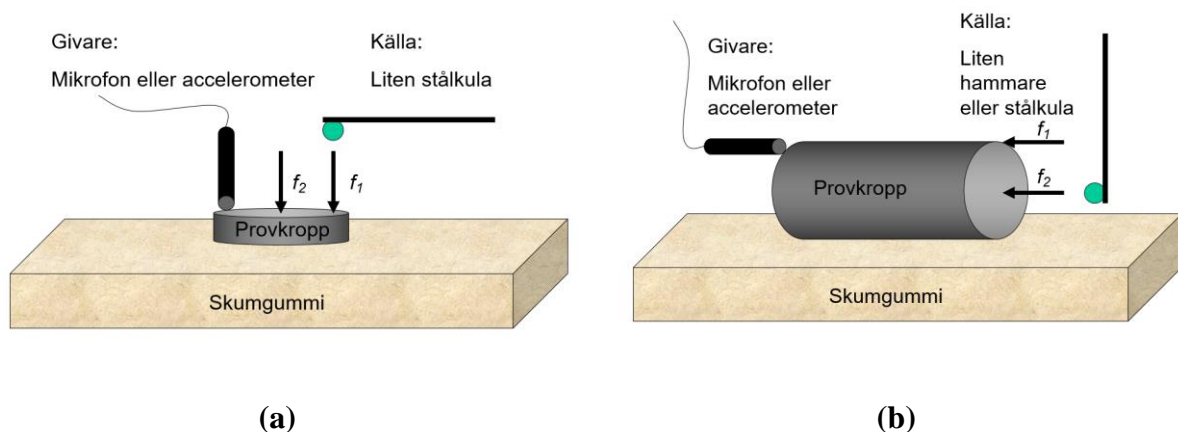
Figur 5. Exempel på uppmätt korrelation mellan  $C_{P\_1D}$  och tryckhållfasthet från enkla resonansfrekvensmätningar i samband med enaxliga tryckförsök.

## 2.2 RESONANSFREKVENSMÄTNINGAR – ALLMÄN METOD

Den enkla varianten på resonansfrekvensmätningar med fria randvillkor som beskrivits ovan bygger på att endast en frekvens från en longitudinell svängning (mod) mäts upp. Denna metod kan inte användas för godtyckliga  $L/D$  förhållande eller för att bestämma Poisson's tal ( $\nu$ ). Detta beror på att sambandet mellan resonansfrekvenser och geometri samt elastiska egenskaper blir mer komplext vid  $L/D < 2$  och kan inte beräknas utan en komplett 3D beräkning (Leissa och So, 1994; So och Leissa, 1998). Det finns en mängd olika numeriska metoder för att beräkna exakta resonansfrekvenser för olika geometrier men dessa är alla relativt komplicerade och kräver omfattande beräkningar vilket gör utvärderingen av vågfarter komplicerad och tidskrävande. Traditionellt har detta problem lösts genom att bara räkna en gång på en given geometri och  $\nu$  och sedan ta fram "normaliserade" resonansfrekvenser för denna geometri och  $\nu$ . Genom att upprepa detta förfarande på flera olika  $L/D$  förhållande och  $\nu$  kan en tabell med normaliserade resonansfrekvenser tas fram och användas för utvärderingar inom det område som har beräknats. Detta gör det möjligt att ändå kunna tillämpa enkla resonansfrekvensmätningar på cylindriska provkroppar med godtycklig geometri (Martinček, 1965; Verástegui-Flores *et al.*, 2015). För denna rapport har nya tabeller tagits fram för ett betydligt bredare område av olika slankhetstal ( $L/D$ ) och  $\nu$  vilket gör det möjligt att tillämpa enkla

resonansfrekvensmätningar på cylindriska provkroppar från tunna diskar till långa stavar eller pÅlar. Dessa nya tabeller har ocksÅ tagits fram för tvÅ olika svÅngningar (moder) vilket gör det möjligt att ocksÅ utvÅrdera  $v$  och dÅrefter alla seismiska vÅgfarter eller elastiska konstanter. UtvÅrderingen av vÅgfarter och  $v$  baserat pÅ dessa tabeller beskrivs nÅrmare i kapitel 2.2.2.

Figur 6 visar en schematisk mÅtuppstÅllning fr cylindriska provkroppar av olika dimensioner. Pilarna med texten  $f_1$  och  $f_2$  representerar hÅr olika slagpunkter för att kunna mÅta upp olika svÅngningsmoder. Observera att  $f_2$  motsvarar samma svÅngningsmod som anvÅndes fr den enklare metoden i kapitel 2.1.



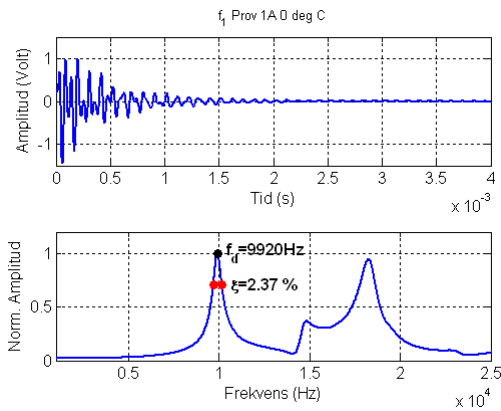
**Figur 6. Schematisk mÅtuppstÅllning fr (a) litet och (b) stort L/D förhÅllande pÅ en cylindrisk provkropp. Olika svÅngningsmoder kan exciteras genom att slÅ i olika punkter pÅ provkroppen ( $f_1$  och  $f_2$ ).**

### 2.2.1 MÅtuppstÅllning och utrustning

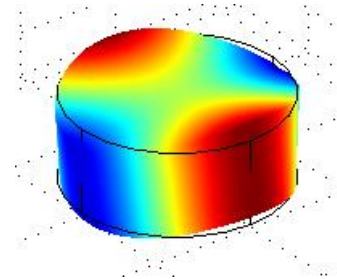
ResonansfrekvensmÅtningar kan utföras med en vibrationsgivare (accelerometer eller mikrofon) och en dator eller oscilloskop för datainsamling (Figur 3b).

Provkroppen kan exciteras med en transient impuls eller med en kontinuerlig vibrationskÅlla. I denna rapport beskrivs frÅmst mÅtningar med impulskÅlla (Impact Resonance Testing). Vibrationer i provkroppen mÅts upp som funktion av tid och transformeras till frekvensdomÅn i en dator eller ett oscilloskop. I frekvensdomÅn kan resonansfrekvenser identifieras som tydliga pÅkar i uppmÅtt spektrum (Figur 7a och Figur 7c). Dessa resonansfrekvenser kan mÅtas upp med

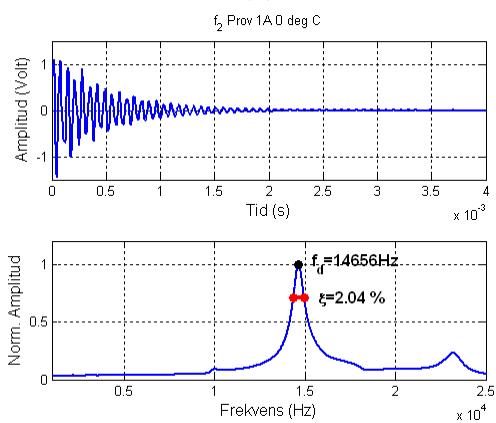
en mängd olika typer av utrustningar men även med ljudkortet i en vanlig laptop eller smarttelefon. Denna rapport bygger inte på att någon speciell utrustning behöver användas utan beskriver främst mätförfarandet och utvärderingen av seismisk hastighet eller modul i provkroppen.



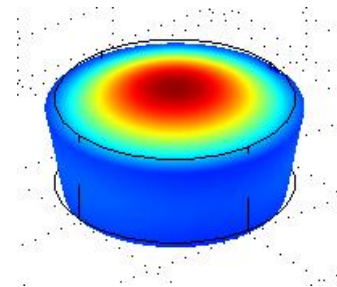
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figur 7. (a och c till vänster) Exempel på uppmätta signaler från en provkropp med ett geometriskt  $L/D$  förhållande på 0.3820. (höger) illustration av respektive svängningsrörelse (modform).**

Innan mätningen påbörjas bör provkroppen prepareras så att geometrin kan bestämmas. Det bör påpekas att en korrekt bestämning av geometrin ( $L$  och  $D$ ) är lika viktig som själva mätningen av resonansfrekvensen ( $f_d$ ). Provkroppen bör också vara symmetrisk med plana ändytor. Ojämna ändytor bör sågas eller skäras så att ändytorna är helt parallella och på ett sätt som inte skadar provkroppen. Efter preparering mäts  $L$  och  $D$  med en noggrannhet inom 1 % (Swedish Standard Institute, 2004; ASTM Standard C215, 2008).

Figur 6 visar mätuppställningen på diskar och cylindrar. Efter eventuell temperering till aktuell temperatur läggs provkroppen på en bit skumgummi för att efterlikna ”fria” randvillkor (Schaeffer, Bearce and Wang, 2013). En liten accelerometer sätts fast nära kanten av provkroppen med hjälp av lite vax eller fett. En impuls genereras i provkroppen genom ett kort slag med en liten hammare eller stålkula. En mindre slagkälla ger i allmänhet ett bredare och högre frekvensinnehåll vilket kan behövas på små provkroppar. En större/tyngre slagkälla ger förhållandevis mer energi vid låga frekvenser vilket kan behövas på stora provkroppar. När ett nytt material eller ny geometri ska provas kan det vara bra att testa flera storlekar på källor för att säkerställa att repeterbara resonansfrekvenser kan mätas upp med olika källor. Pilarna i Figur 6 anger två olika slagpunkter för excitering av olika typer av svängningsmoder i provkroppen. Vid slag på kanten av provkroppen exciteras en antisymmetrisk fundamental böjmod vilken här kallas  $f_1$ . Vid slag i centrum på provkroppen exciteras en symmetrisk fundamental longitudinell svängningsmod här kallad  $f_2$  (samma svängningsmod som i föregående kapitel 2.1). Flera högre svängningsmoder kan också exciteras men här används bara grundmoderna för böj respektive longitudinella svängningar. För en given geometri kan  $\nu$  bestämmas från kvoten mellan  $f_1$  och  $f_2$  (se Bilaga A). I praktiken fungerar dock denna kvot lite sämre vid  $L/D > 1.5$  på grund av att känsligheten för  $\nu$  avtar med ökande  $\nu$  (se Figur 9). För högre  $L/D$  kvoter kan andra svängningsmoder utnyttjas (Ryden and Johansson, 2008).

Svängningsmoderna  $f_1$  och  $f_2$  har valts ut för att dom är förhållandevis enkla att excitera i typiska provkroppar av byggnadsmaterial. Det bör dock påpekas att det finns fler teoretiska moder vilka beroende på  $L/D$  förhållandet kan ha lägre frekvens än  $f_2$ . Mätuppställningarna i Figur 2 används för att underlätta mätningen av enbart  $f_1$  och  $f_2$ . Vid en korrekt utförd mätning ska dessa svängningsmoder motsvara de första (lägsta frekvenserna) och tydligaste frekvenstopparna i uppmätta spektrum (se Figur 7).

## 2.2.2 Utvärdering av uppmätt resonansfrekvens

Figur 7 visar exempel på mätdata och svängningsmönster (modform) från  $f_{d1}$  och  $f_{d2}$  på en disk av asfalt med ett geometriskt  $L/D$  förhållande på 0.3820. I detta

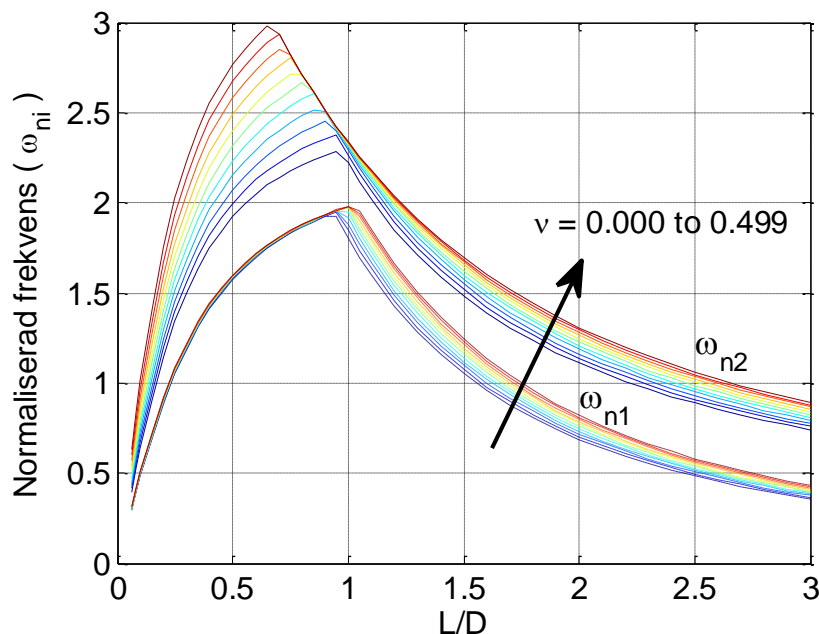


exempel har  $f_{d1}$  och  $f_{d2}$  utvärderats automatiskt genom att plocka den första piken (lägst frekvens) för respektive svängningstyp. Dämpningen för respektive svängningsmod har också utvärderats automatiskt genom att bestämma bandbredden ( $\Delta f$ ) vid 0.707 av maxvärdet för varje resonansfrekvens (Ekvation 7).

Figur 7 visar också respektive modform där stora rörelser (amplituder) motsvaras av blå och röd färg. Grön färg motsvarar områden med mycket låg rörelse (nodpunkter). Optimal mätning av respektive mod innebär att mätning och excitering görs i blå och röda områden med hög amplitud, jämför med pilarna i Figur 6.

Repetierbarheten kan bli mycket bra vid resonansfrekvensmätningar och bör kontrolleras för att säkerställa en bra mätuppställning och fungerande utrustning. Variansen mellan upprepade individuella mätningar bör inte överstiga 1 % och kan relativt lätt understiga 0.1 % (Lundqvist and Rydén, 2012).

Från uppmätt naturlig resonansfrekvens ( $f_{n1}$  och/eller  $f_{n2}$ ) kan den seismiska vågfarten eller styvhetsmodulen beräknas. Det exakta sambandet mellan resonansfrekvenser och elastiska konstanter i en provkropp är (för de flesta geometrier) komplext och kräver omfattande beräkningar (Leissa och So, 1994; So och Leissa, 1998). I denna metodbeskrivning används därför istället tabeller med normaliserade resonansfrekvenser ( $\omega_{ni}$ ) för att kunna beräkna elastiska konstanter direkt från mätdata. Metoden föreslogs av Martincek (1965) men har här utökats till ett bredare  $L/D$  intervall med förfinade intervall i både  $\nu$  och  $L/D$  för ökad noggrannhet. Figur 8 visar alla  $\omega_{ni}$  värden från tabellerna i Bilaga A.



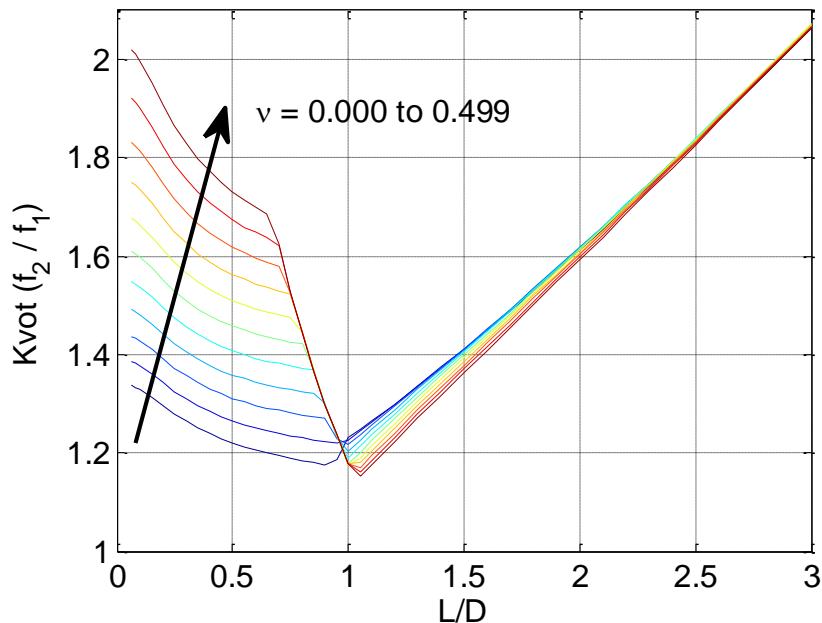
**Figur 8. Normaliserade resonansfrekvenser för olika  $\nu$  som funktion av  $L/D$  och  $\omega_{ni}$  (se också tabell i Bilaga A).**

Figur 8 visar översiktligt hur  $\omega_{ni}$  varierar med  $L/D$  och  $\nu$ . För en noggrann bestämning av  $C_S$  krävs exakta värden från tabellerna i Bilaga A med eventuell interpolering mellan tabellvärdena. Genom att hämta rätt  $\omega_{ni}$  värde från Bilaga A kan  $C_S$  beräknas som:

$$C_S = D\pi f_{ni} / \omega_{ni} \quad (\text{Ekv 10})$$

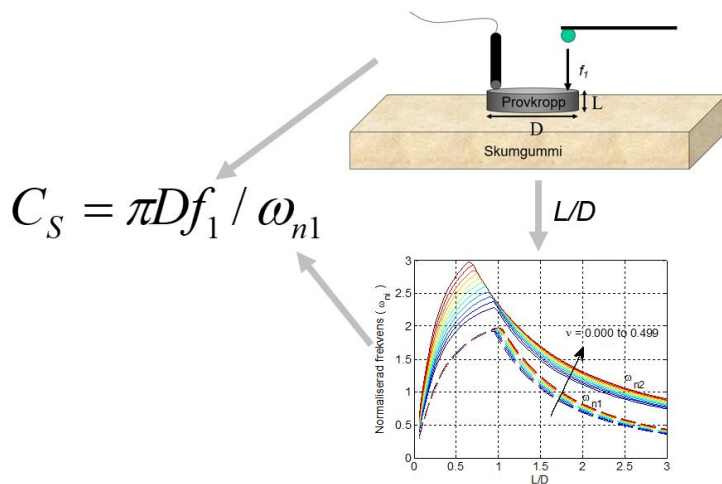
för respektive mod (i). Normaliserade frekvenser i Bilaga A anges med 5 decimalers noggrannhet. Beräkningarna har gjorts med finita elementmetoden. Flera värden har kunnat stämmas av mot andra publicerade resultat för enstaka värden på  $L/D$  och  $\nu$  (Leissa, 1995; So and Leissa, 1998). För ett homogent isotropiskt elastiskt material ska  $f_{n1}$  och  $f_{n2}$  ge samma  $C_S$  om rätt  $\nu$  används i tabellerna. För elastiska material utan betydande frekvensberoende styvhet (stabiliserad jord eller betong) kan alltså  $\nu$  bestämmas från  $f_{n1}$  och  $f_{n2}$ . Figur 9 visar hur kvoten mellan  $f_{n1}$  och  $f_{n2}$  beror på  $\nu$  för olika geometrier ( $L/D$ ). Exakta värden finns presenterade i Bilaga A och kan (för elastiska homogena isotropa material) användas för att bestämma  $\nu$  innan den seismiska vågfarten eller modulen bestäms från tabellerna i Bilaga A. Figur 9 visar att den relativa

känsligheten för bestämning av  $\nu$  från just dessa moder varierar kraftigt med olika geometriska förhållande på en cylindrisk provkropp. I praktiken kan det vara svårt att bestämma  $\nu$  från  $f_{n2}/f_{n1}$  när  $L/D > 1.5$ . För större slankhetstal kan istället de två första longitudinella moderna användas för att bestämma  $\nu$  (Kolluru, Popovics and Shah, 2000).



**Figur 9. Kvoten mellan  $f_{n1}$  och  $f_{n2}$  som funktion av  $L/D$  och  $\nu$  (se också tabell i Bilaga A).**

Figur 10 beskriver schematiskt hur Ekvation 10 och tabellerna i Bilaga A kan användas för att relativt enkelt utvärdera  $C_S$  från en provkropp med uppmätt resonansfrekvens  $f_{n1}$  och  $\nu$  samt känd  $L$  och  $D$ . Med denna metodik är det lika enkelt att utvärdera seismiska vågfarter på mindre provkroppar med nästan godtyckligt slankhetstal som större provkroppar med  $L/D > 2$  (kapitel 2.1).



**Figur 10. Schematisk översikt för användning av tabellerna i Bilaga A vid utvärdering av seismisk skjuvvågsfart  $C_s$ .**

Det bör påpekas att de normaliserade frekvenserna i Bilaga A är normaliserade mot  $C_s$  och inte  $C_{P\_ID}$  (eller E-modulen) som i (Martinec 1965). I de fall då  $\nu$  inte kan bestämmas måste ett värde på  $\nu$  därför antas för att beräkna  $C_s$  och därifrån  $G$ ,  $E$ , eller  $C_P$  (se Ekvation 1, 3, 4, 5 och 10). Generellt ökar det potentiella felet i modul eller seismisk hastighet med ökande  $\nu$  i denna process. När  $L/D$  ökar upp mot ca 2 kan dock  $E$  eller  $C_{P\_ID}$  bestämmas från  $f_{n2}$  med relativt litet fel (inom ca 2 %) även utan  $\nu$  (Kolluru, Popovics and Shah, 2000). Detta beror på att ett eventuellt fel i  $C_s$  (Ekvation 10) och effekten av  $\nu$  på  $C_{P\_ID}$  (Ekvation 2) nästan tar ut varandra helt vid höga  $L/D$  förhållande. Detta kan också ses som att  $f_{n2}$  är direkt kopplad till  $C_{P\_ID}$  och  $E$  för dessa geometrier vilket också beskrevs i kapitel 2.1.

För att exemplifiera utvärderingen av seismisk vågfart eller  $G_{max}$  och  $\nu$  för en provkropp med lågt  $L/D$  ges här ett exempel steg för steg. Genom att kopiera värdena från tabellerna i Bilaga A kan processen nedan automatiseras i Excel, Mathcad, Matlab eller liknande program.

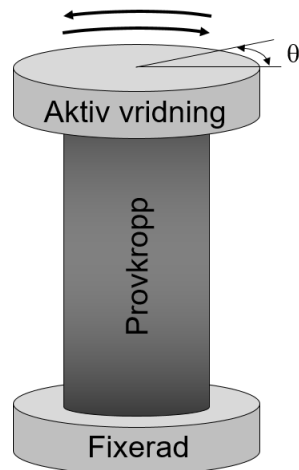
1. Provkroppen och mätningen från Figur 7 används som exempel på mätning. För denna provkropp är  $L=38.8$  mm,  $D=101.6$  mm,  $\rho=2371$  kg/m<sup>3</sup>,  $f_{d1}=9920$  Hz,  $\xi_1=2.37$  %,  $f_{d2}=14656$  Hz,  $\xi_2=2.04$  %.

2. Uppmätta dämpade resonansfrekvenser justeras först till naturliga egenfrekvenser (Ekvation 8) vilket ger  $f_{n1}=9923$  Hz och  $f_{n2}=14659$  Hz. Vid låg dämpning blir skillnaden i frekvenser praktiskt taget försumbar.
3. Den sista tabellen i Bilaga A (Figur 9) kan nu användas för att bestämma  $\nu$  från  $L/D=0.3820$  och  $f_{n2}/f_{n1}=1.4773$  vilket ger exakt  $\nu=0.2438$  med interpolation mellan värdena i tabellen. Alternativt kan det närmaste värdet i tabellen användas direkt utan interpolation vilket då ger  $\nu=0.25$  (från  $L/D=0.40$  och  $f_{n2}/f_{n1}=1.47912$ ).
4. Med  $L/D$  och  $\nu$  kan nu  $\omega_{n1}$  hämtas från den första tabellen i Bilaga A (Figur 8). Med ingångsvärdena  $L/D=0.3820$  och  $\nu=0.2438$  och interpolation blir  $\omega_{n1}=1.3926$  vilket ger  $C_S=2275.0$  m/s (Ekvation 10). Utan interpolation blir  $\omega_{n1}=1.42768$  vilket ger  $C_S=2219.1$  m/s (från  $L/D=0.40$  och  $\nu=0.25$ ). Motsvarande beräkning kan göras från  $f_{n2}$  och  $\omega_{n2}$  (andra tabellen i Bilaga A) vilket då ska ge samma resultat om materialets styvhet inte är frekvensberoende.
5. Till sist kan  $G_{max}$  (och/eller  $C_P$  och andra moduler se kapitel 1.3.1) beräknas från  $C_S$ ,  $\nu$  och  $\rho$ . För detta exempel blir  $G_{max}=12.27$  GPa och  $C_P=3908$  m/s om de exakta interpolerade värdena används.

### 2.3 RESONANSFREKVENSMÄTNINGAR – MED RESONANSKOLONN (RESONANT COLUMN)

Resonansfrekvensmätningar där en sida av provet är fast inspänd och motsatt sida är fri, Resonanskolonn eller Resonanspelareförsök, benämns ofta ”Fixed-Free Resonant Column Testing” (RC) inom Geotekniken (Richart, Hall and Woods, 1970). Denna metod är den mest avancerade och mest använda metoden för dynamisk provning av jord från små till medelstora skjuvtöjningar ( $\gamma$ ).

Tekniken går ut på att mäta upp en eller flera resonansfrekvenser ( $f_d$ ) i vridning (torsion) på en cylindrisk provkropp som sitter fastspänd i en kortsida och drivs med en oscillerande vibrator i motsatt fria sida, se Figur 11. Genom att mäta upp tillfört vibrerande axiellt vridmoment och resulterande respons på provkroppens fria sida kan  $G$  och  $\xi$  för provkroppen utvärderas. Utvärderingen av skjuvmodul tar hänsyn till provets geometri och skrymdensitet (Richart, Hall and Woods, 1970).



**Figur 11. Schematisk mätuppställning och utrustning i Resonanskolonnförsök (Fixed-Free Resonant Column Testing).**

Från de första prototyperna som utvecklades av Richart och Hall på 60-talet (Hall and Richart, 1963; Richart, Hall and Woods, 1970) har tekniken förfinats och det finns idag många förslag på utrustning och förbättringar av tekniken (Drnevich *et al.*, 2015). Utrustningen går att köpa från flera olika leverantörer av geoteknisk laborieutrustning och det finns en ASTM standard för metoden (ASTM Standard D4015, 2015).

Utrustningen i Figur 11 är i praktiken ofta inbyggd i en lastcell så att  $G$  och  $\xi$  kan bestämmas vid olika spänningsnivåer (celltryck). Genom att öka det vibrerande vridmomentet på provet kan dessutom skjuvmodulens töjningsberoende bestämmas från låga töjningsnivåer ca 0.001 % upp mot 0.08 % (Khan, El Naggar and Cascante, 2011). Metoden är bäst lämpad för jord och har varit mycket viktig för att utveckla empiriska modulreduktionskurvor för jord (Massarsch, 2004). Metoden lämpar sig också väl för att undersöka effekten av många små dynamiska belastningscykler (Cherian and Kumar, 2016).

Eftersom metoden bygger på en mekanisk oscillering av provkroppen kan det vara svårt att få bra data vid riktigt låga töjningsnivåer (0.0001 %) och det finns flera förslag på alternativ excitering med RC metoden för riktigt små töjningar (Cavallari, 2016). En kombination av enkel resonansfrekvensmätning med fria randvillkor (kapitel 2.1) och RC mätningar har också föreslagits för att få bättre noggrannhet vid den maximala skjuvmodulen  $G_0$  (Schaeffer, Bearce and Wang,

2013). I flera undersökningar har också RC metoden kombinerats med ”bender elements” (se kapitel 3) för mätning av  $G_0$  vid mycket små töjningar (Knodel, Thomann and Hryciw, 1990; Pantazopoulos and Atmatzidis, 2012).

Vid höga töjningsnivåer kan cykliska triaxialförsök kombineras med RC metoden för att öka töjningsnivån ytterligare (Delfosse-Ribay *et al.*, 2004). Ett typiskt överlapp i töjningsnivå kan fås inom  $\gamma=0.03-0.08$  %. För fina jordar har dock skillnader i  $G$  vid jämförbara töjningsnivåer kunnat observeras vilket antas bero på att materialet också är frekvensberoende (Khan, El Naggar and Cascante, 2011). En variant av RC metoden där  $G$  och  $\xi$  kan utvärderas vid betydligt lägre frekvenser har utvecklats, Non Resonance (NR) metoden, för att minska den viskoelastiska effekten av höga frekvenser (Rix and Meng, 2005). RC metoden har under senare tid också använts på asfalt och andra byggnadsmaterial (Kheiry *et al.*, 2011).



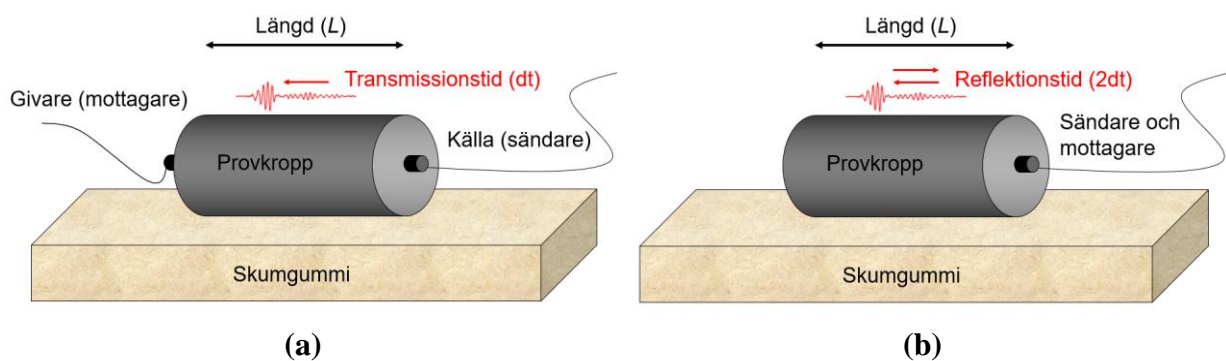


# Kapitel 3.

## Transmissionsmätningar

### 3.1 TRANSMISSION OCH REFLEKTION MED LJUDVÅGOR

Transmissionsmätningar med ljudvågor genom en provkropp benämns ofta ”Bender Element Testing” inom geoteknik och ”Pitch Cast” eller ”Time of Flight” eller ”Through Transmission” inom betong och andra material. Om frekvensen överstiger 20 kHz kallas dessa metoder ofta bara ”ultraljudsmätningar”. Figur 12 visar en schematisk figur över mätning med (a) separat sändare och mottagare på var sin sida om provet och (b) en mottagare på en sida av provet. I det senare fallet utvärderas den dubbla gångtiden ( $2dt$ ) genom provet från den reflekterade vågen. Vågfarten ( $C$ ) genom provet beräknas som  $C=L/dt$ .



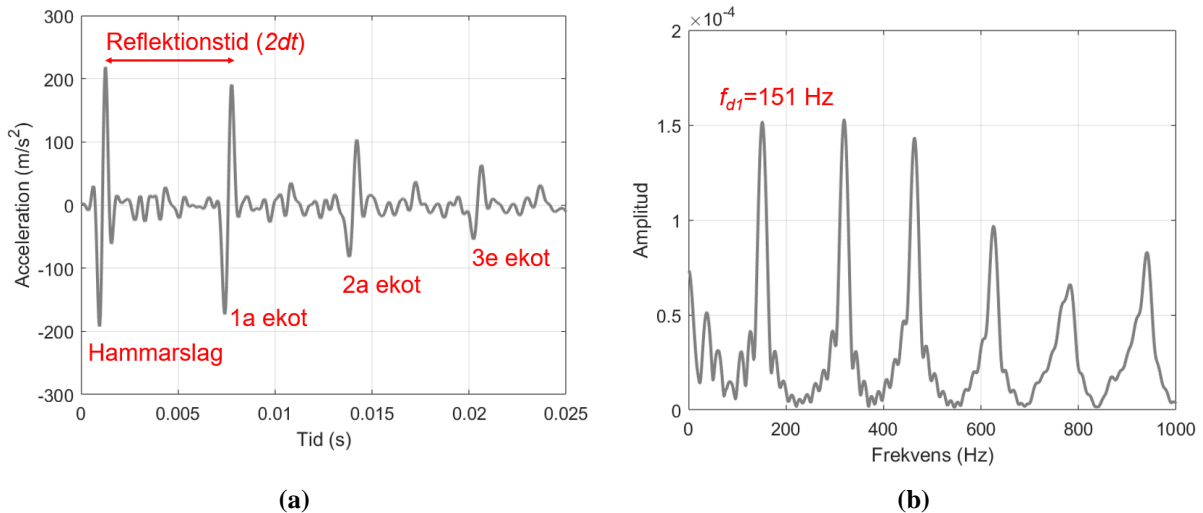
**Figur 12. Schematisk mätuppställning för (a) transmission och (b) reflektion med ljudvågor.**

För att illustrera likheter och skillnader mellan mätning av reflektionstid och resonansfrekvensmätningar (kapitel 2.1) visas här ett exempel från en mätning på en ”fri” oinstallerad betongpåle (Ryden and Lindh, 2015). Sändare (hammare) och mottagare (accelerometer) har här placerats i en av ändarna på en 12.3 m lång prefabricerad betongpåle (SP1 påle).

$C_{P\_ID}$  kan utvärderas direkt från tidsskillnaden ( $2dt=0.0066$  s) mellan synliga eko i rådata ( $C_{P\_ID}=2L/2dt=24.6/0.0066=3727$  m/s), Figur 13a. Alternativt kan hastigheten utvärderad i frekvensdomän från  $f_{dl}$  med Ekvation 9 ( $C_{P\_ID}=2Lf=24.6*151=3715$  m/s).  $C_{P\_ID}$  blir alltså i båda fallen nära 3700 m/s.

Vid transmissions och reflektionsmätningar sker utvärderingen i tidsdomän (Figur 13a) och för att där få så stor noggrannhet som möjligt krävs korta tydliga pulser med hög amplitud. Korta pulser motsvarar ett brett och högt frekvensområde (liten slagkälla) vilket ibland kan vara svårt att generera med tillräckligt hög amplitud. När frekvensområdet minskar (stor hammare eller hejare) blir pulserna långa och ”ringiga” vilket ofta försvårar utvärderingen i tidsdomän.

Vilken metod som är bäst lämpad beror ofta på geometri och dämpning i materialet. Vid transmissionsmätningar (Figur 12a) kan det generellt finnas en osäkerhet i definitionen av tiden 0 och tiden  $dt$  beroende på var i signalen dessa tider definieras samt hur bra kopplingen mellan givarna och provet är. Vid reflektionsmätningar och resonansfrekvensmätningar blir denna osäkerhet mindre eftersom samma givare används för att mäta upp  $2dt$  eller  $fd$ . Resonansfrekvenser bygger dessutom på flera reflektioner där hela provkroppens volym påverkas (modform) vilket kan ses som en medelvärdesbildning av resultatet i både tid och rum jämfört med transmissions eller reflektionsmätningar där ljudet alltid tar den snabbaste vägen genom provkroppen. I material med stor dämpning kan dock transmissionsmätningar vara det enda alternativet som ger tydliga signaler.



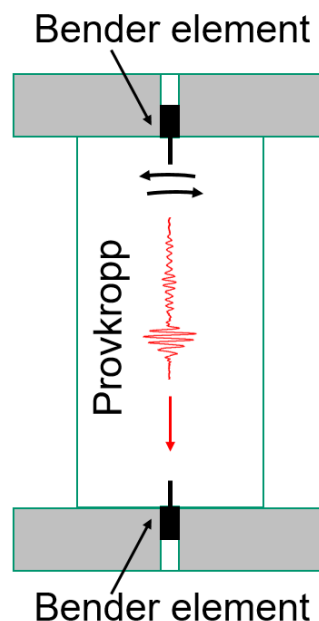
**Figur 13. Exempel på uppmätta signaler från en 12.3 m lång prefabricerad betongpåle i (a) tidsdomän och (b) frekvensdomän.**

Transmissionsmätningar med konventionella ultraljudsgivare har länge utförts på material med förhållandevis liten dämpning som betong (Malhotra and Carino, 2003). Mätning sker typiskt med två ultraljudsgivare på ca 50-100 kHz, Figur 12a. Utrustning kan köpas kommersiellt (tex Pundit) och det finns flera internationella standarder för provning av betongprover (ASTM C 597-09, 2010) och EN 12504-4:2021. Ultraljudsmätningar på betongprover har utförts för att detektera inre skador i materialet (Berthaud, 1991), undersöka sambandet mellan vågfart och hållfasthet (Sabbag and Uyanik, 2017), samt följa härdningsförloppet som funktion av tid och temperatur (Carette and Staquet, 2015). Transmissionsmätningar med ultraljudsutrustning för betong har också använts på provkroppar av stabiliserad jord (Mandal, Tinjum and Edil, 2016) och asfaltprovkroppar (Norambuena-Contreras *et al.*, 2010). Ultraljudsmätningar har också använts på bergprover för att följa brottförloppet genom tomografiska mätningar (Tudisco *et al.*, 2015).

### 3.2 TRANSMISSIONSMÄTNINGAR MED BÖJELEMENT (BENDER ELEMENTS)

I lösa sediment och leror är dämpningen av skjuvvågor vid höga frekvenser (ultraljud  $> 20 \text{ kHz}$ ) mycket stor. Det är därför svårt att mäta upp  $G_{max}$  med konventionella ultraljudsgivare. Shirley och Hampton (Shirley and Hampton, 1978) löste detta problem genom att limma två vanliga ultraljudsgivare

(piezokeramiska plattor) på en tunn metallfilm så att det sammanfogade elementet istället böjs förhållandevis kraftigt och långsamt vilket genererar en lågfrekvent skjuvvåg när en spänningspotential läggs över plattans båda utsidor. Efter Shirley och Hampton's lyckade experiment på lösa bottensediment fick metoden namnet "*Bender Element Testing*" (böjelement) inom geotekniska laboriemätningar. Den stora fördelen med elementen demonstrerades av Selig mfl. (Selig *et al.*, 1984) samt Dyvik och Madshus (Dyvik and Madshus, 1985) som visade att mätningarna kunde göras i kombination med konventionella geotekniska laboriemätningar som ödometer och triaxialprovning (Möller *et al.*, 2000). Efter dessa inledande studier blev metoden under 90-talet en mer etablerad laboriemetod för bestämning av  $G_{max}$  (Knodel, Thomann and Hryciw, 1990; Fam and Santamarina, 1995; viggiani and Atkinson, 1995). Eftersom metoden bygger på utvärdering av seismisk vågfart i tidsdomän är det viktigt att mäta upp så tydliga och korta pulser som möjligt samt se till att elementen har bra koppling till provkroppen (Pereira *et al.*, 2015).



**Figur 14. Schematisk figur av mätning med Bender Element (böjelement).**

Bender element kan idag köpas kommersiellt eller tillverkas förhållandevis enkelt (Santamarina, Klein and Fam, 2001) och det finns en standard för metoden (ASTM International, 2019). Det krävs dock ganska omfattande datainsamlingssystem och signalkonditionering (förstärkning och filtrering) för att utföra noggranna mätningar.

# Kapitel 4.

## Referenser

- ASTM C 597-09 (2010)** ‘Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete<sup>1</sup>’, *United States: American Society for Testing and Material.*, 04(02), pp. 3–6.
- ASTM International (2019)** *D8295-19 Standard Test Method for Determination of Shear Wave Velocity and Initial Shear Modulus in Soil Specimens using Bender Elements 1*. doi: 10.1520/D8295-19.
- ASTM Standard C215 (2008)** ‘Standard Test Method for Fundamental Transverse , Longitudinal , and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens’, *ASTM standard*. PA, pp. 1–7. doi: 10.1520/C0215-08.
- ASTM Standard D4015 (2015)** ‘ASTM D4015-15, Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices’. doi: 10.1520/D4015-15.
- Bearce, R. and Mooney, M. (2014)** ‘Seismic Modulus Maturity Function for Lime and Lime–Cement Stabilized Clay’, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(3), p. 4015150. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001430.
- Berthaud, Y. (1991)** ‘Damage measurements in concrete via an ultrasonic technique. Part I experiment’, *Cement and Concrete Research*, 21(1), pp. 73–82. doi: 10.1016/0008-8846(91)90033-E.
- Boyd, A. J., Asce, M. and Ferraro, C. C. (2005)** ‘Effect of Curing and Deterioration on Stress Wave Velocities in Concrete’, (April), pp. 153–158.
- Carette, J. and Staquet, S. (2015)** ‘Monitoring the setting process of mortars by ultrasonic P and S-wave transmission velocity measurement’,

*Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 94, pp. 196–208.  
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.054.

- Carniel, R., Barazza, F. and Pascolo, P. (2006)** ‘Improvement of Nakamura technique by singular spectrum analysis’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(1), pp. 55–63. doi: 10.1016/j.soildyn.2005.08.005.
- Cavallari, A. (2016)** ‘Resonant column testing challenges’, *1st IMEKO TC4 International Workshop on Metrology for Geotechnics, MetroGeotechnics 2016*, (December), pp. 149–156.
- Chang, P. C. and Liu, S. C. (2003)** ‘Recent Research in Nondestructive Evaluation of Civil Infrastructures’, (June), pp. 298–304.
- Cherian, A. C. and Kumar, J. (2016)** ‘Effects of Vibration Cycles on Shear Modulus and Damping of Sand Using Resonant Column Tests’, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), pp. 1–6. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001545.
- Dahlen, U., Ryden, N. and Jakobsson, A. (2015)** ‘Damage identification in concrete using impact non-linear reverberation spectroscopy’, *NDT & E International*. Elsevier, 75, pp. 15–25. doi: 10.1016/j.ndteint.2015.04.002.
- Darendeli, M. B. (2001)** *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. The University of Texas at Austin. Available at: file:///C:/pdf/papers/VelocityStressRelations/Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves.pdf.
- Delfosse-Ribay, E. et al. (2004)** ‘Shear modulus and damping ratio of grouted sand’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(6), pp. 461–471. doi: 10.1016/j.soildyn.2004.02.004.
- Dobry, R. and Vucetic, M. (1987)** ‘Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits.’, *International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Ciudad de México*, (May), pp. 51–87. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/245984103>.
- Drnevich, V. P. et al. (2015)** ‘Applications of the new approach to resonant column testing’, *Geotechnical Testing Journal*, 38(1), pp. 23–39. doi: 10.1520/GTJ20140222.

- Dyvik, R. and Madshus, C. (1985)** ‘Lab Measurements of Gmax Using Bender Elements’, in *ASCE Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*. ASCE, pp. 186–196. Available at: <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0046357>.
- Fam, M. and Santamarina, C. (1995)** ‘Study of Geoprocesses with Complementary Mechanical and Electromagnetic Wave Measurements in an Oedometer’, *Geotechnical Testing Journal*, 18(3), p. 307. doi: 10.1520/GTJ10999J.
- Gudmarsson, a., Ryden, N. and Birgisson, B. (2012)** ‘Application of resonant acoustic spectroscopy to asphalt concrete beams for determination of the dynamic modulus’, *Materials and Structures*, 45(12), pp. 1903–1913. doi: 10.1617/s11527-012-9877-3.
- Guimond-Barrett, A. et al. (2013)** ‘Free-free resonance testing of in situ deep mixed soils’, *Geotechnical Testing Journal*, 36(2), pp. 1–9. doi: 10.1520/GTJ20120058.
- Hall, J. R. J. and Richart, F. E. J. (1963)** ‘Dissipation of elastic wave energy in granular soils’, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(SM6), pp. 27–56.
- Hall, L. et al. (2015)** *Markvibrationer*. SGF Informationskrift 1:2012, SGF’s Markvibrationskommitté.
- Jamshidi, R. J., Lake, C. B. and Barnes, C. L. (2015)** ‘Evaluating Impact Resonance Testing As a Tool for Predicting Hydraulic Conductivity and Strength Changes in Cement-Stabilized Soils’, 27(12), pp. 1–9. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001318.
- Khan, Z., El Naggat, M. H. and Cascante, G. (2011)** ‘Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests’, *Journal of the Franklin Institute*. Elsevier, 348(7), pp. 1363–1376. doi: 10.1016/j.jfranklin.2010.04.003.
- Kheiry, P. T. et al. (2011)** ‘Characterization of Warm Mix Asphalt through Resonant Column Testing’, pp. 2–7. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001253.
- Knodel, P., Thomann, T. and Hryciw, R. (1990)** ‘Laboratory Measurement of Small Strain Shear Modulus Under K0 Conditions’, *Geotechnical Testing Journal*, 13(2), p. 97. doi: 10.1520/GTJ10700J.

- Kolluru, S. V., Popovics, J. S. and Shah, S. P. (2000)** ‘Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders’, *Cement, Concrete and Aggregates*, 22(2), pp. 81–89. doi: 10.1520/cca10467j.
- Larsson, R. (1994)** *Deformationsegenskaper i jord*.
- Larsson, R. and Mulabdic, M. (1991)** ‘Shear moduli in Scandinavian clays; Measurement of initial shear modulus with seismic cones; Empirical correlations for the initial shear modulus in clay’, *Swedish Geotechnical Institute.*, p. 134. Available at: <https://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgir40.pdf>.
- Leissa, A. W. (1995)** ‘Comparisons of vibration frequencies for rods and beams from one-dimensional and three-dimensional analyses’, *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 2122–2135. doi: 10.1121/1.414331.
- Lindh, P. (2018)** *Provning stabiliserad jord med geofysiska metoder*. Sveriges Bygg och Utvecklingsfond (SBUF) 13324. Available at: [https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/311211f9-d942-411d-8252-79b46fb552dd/FinalReport/SBUF 13324 Slutrapport Provning av stabiliserad jord med geofysiska metoder.pdf](https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/311211f9-d942-411d-8252-79b46fb552dd/FinalReport/SBUF_13324_Slutrapport_Provning_av_stabiliserad_jord_med_geofysiska_metoder.pdf).
- Lundqvist, P. and Rydén, N. (2012)** ‘Acoustoelastic effects on the resonance frequencies of prestressed concrete beams - Short-term measurements’, *NDT and E International*, 50, pp. 36–41. doi: 10.1016/j.ndteint.2012.04.010.
- Malhotra, V. M. and Carino, N. . (2003)** *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press.
- Mandal, T., Tinjum, J. M. and Edil, T. B. (2016)** ‘Non-destructive testing of cementitiously stabilized materials using ultrasonic pulse velocity test’, *Transportation Geotechnics*. Elsevier Ltd, 6, pp. 97–107. doi: 10.1016/j.trgeo.2015.09.003.
- Martinček, G. (1965)** ‘The determination of poisson’s ratio and the dynamic modulus of elasticity from the frequencies of natural vibration in thick circular plates’, *Journal of Sound and Vibration*, 2(2), pp. 116–127. doi: 10.1016/0022-460X(65)90089-1.



- Massarsch, K. (2004)** ‘Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote lecture’, *Inter. Conf. on Site Characterization, ISC 39;2, 19-22 Sept.*, pp. 19–22. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Deformation+properties+of+fine-grained+soils+from+seismic+tests#0>.
- Massarsch, K. R. (2015)** ‘Determination of Shear Modulus of Soil from Static and Seismic Penetration Testing’, in Kavvadas, M. (ed.). Athens, Proceedings in honour of Prof. A. Anagnostopoulou, pp. 335–352. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/321937664\\_Determination\\_of\\_Shear\\_Modulus\\_of\\_Soil\\_from\\_Static\\_and\\_Seismic\\_Penetration\\_Testing](https://www.researchgate.net/publication/321937664_Determination_of_Shear_Modulus_of_Soil_from_Static_and_Seismic_Penetration_Testing).
- Möller, B. et al. (2000)** ‘Geodynamik i praktiken’.
- Norambuena-Contreras, J. et al. (2010)** ‘Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test’, *NDT and E International*. Elsevier, 43(7), pp. 629–634. doi: 10.1016/j.ndteint.2010.06.007.
- Pantazopoulos, I. A. and Atmatzidis, D. K. (2012)** ‘Dynamic properties of microfine cement grouted sands’, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Elsevier, 42, pp. 17–31. doi: 10.1016/j.soildyn.2012.05.017.
- Pereira, C. et al. (2015)** ‘The importance of coupling and sample geometry in bender element testing. L’importance du couplage et de la géométrie des éprouvettes dans les essais avec “Bender Elements”’, in *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, pp. 3279–3284. doi: 10.1680/ecsmge.60678.vol6.513.
- Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D. (1970)** *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Rix, G. J. and Meng, J. (2005)** ‘A non-resonance method for measuring dynamic soil properties’, *Geotechnical Testing Journal*, 28(1), pp. 1–8. Available at: [http://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/JOURNALS/GEOTECH/PAGES/GTJ12125.htm](http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/GEOTECH/PAGES/GTJ12125.htm) (Accessed: 20 April 2020).
- Rollins, K. M. et al. (1998)** ‘Shear modulus and damping relationships for gravels’, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 396–405.

- Ryden, N., Dahlen, U. and Jakobsson, A. (2015)** ‘Characterization of progressive damage in concrete using impact non-linear reverberation spectroscopy’, in *8th Int. Symp. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015)*. Available at: [https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/181\\_ryden\\_nils.pdf](https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/181_ryden_nils.pdf).
- Ryden, N., Ekdahl, U. and Lindh, P. (2006)** ‘Quality Control of Cement Stabilised Soils using Non-Destructive Seismic Tests’, in *Proceedings Advanced Testing of Fresh Cementitious Materials, Stuttgart, Germany, August 3-4, DGZfP-Proceedings BB 102-CD, Lecture 34*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), pp. 295–300. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Quality+Control+of+Cement+Stabilised+Soil+using+Non-Destructive+Seismic+Tests#0> (Accessed: 17 January 2014).
- Ryden, N. and Johansson, C. (2008)** *Implementering av seismisk mätning för kvalitetskontroll av asfaltbeläggningar Delrapport Etapp 2 : Test av mätmetod på asfaltprover Förord*. Sveriges Bygg och Utvecklingsfond (SBUF) 12017. Available at: [https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/529d8f5d-de7a-4ab4-96e2-c89545134f56/FinalReport/SBUF\\_12017\\_Slutrapport\\_Seismisk\\_mätning\\_för\\_kvalitetskontroll\\_av\\_asfaltbeläggningsar.pdf](https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/529d8f5d-de7a-4ab4-96e2-c89545134f56/FinalReport/SBUF_12017_Slutrapport_Seismisk_mätning_för_kvalitetskontroll_av_asfaltbeläggningsar.pdf).
- Ryden, N. and Lindh, P. (2015)** *Oförstörande Provning Av Jetpelare*. Sveriges Bygg och Utvecklingsfond (SBUF) 12841. Available at: [https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/f02374cf-5c09-40d1-b0ae-4baf3cced406/FinalReport/SBUF\\_12841\\_Slutrapport\\_Oförstörande\\_provning\\_av\\_jetpelare.pdf](https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/f02374cf-5c09-40d1-b0ae-4baf3cced406/FinalReport/SBUF_12841_Slutrapport_Oförstörande_provning_av_jetpelare.pdf).
- Sabbağ, N. and Uyanık, O. (2017)** ‘Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities’, *Journal of Applied Geophysics*, 141, pp. 13–23. doi: 10.1016/j.jappgeo.2017.04.005.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001)** *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. West Sussex: John Wiley and Sons Ltd.
- Schaeffer, K., Bearce, R. and Wang, J. (2013)** ‘Dynamic Modulus and Damping Ratio Measurements from Free-Free Resonance and Fixed-Free Resonant Column Procedures’, *Geotechnical and Environmental Engineering*, 139(12), pp. 2145–2155. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000945.

- Selig, E. et al. (1984)** ‘Elastic-Wave Velocities and Liquefaction Potential’, *Geotechnical Testing Journal*, 7(2), p. 77. doi: 10.1520/GTJ10596J.
- Shirley, D. J. and Hampton, L. D. (1978)** ‘Shear-wave measurements in laboratory sediments’, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), p. 607. doi: 10.1121/1.381760.
- Silva, J. et al. (2013)** ‘Continuous stiffness assessment of cement-stabilised soils from early age’, *Géotechnique*, 63(16), pp. 1419–1432. doi: 10.1680/geot.13.P.021.
- So, J. and Leissa, A. W. (1998)** ‘THREE-DIMENSIONAL VIBRATIONS OF THICK CIRCULAR AND ANNULAR PLATES’, *Journal of Sound and Vibration*, 209(1), pp. 15–41. doi: 10.1006/jsvi.1997.1228.
- Swedish Standard Institute (2004)** ‘Provningsmetoder för natursten – Bestämning av dynamisk E-modul (genom mätning av resonansfrekvens)’. Swedish Standard Institute. doi: ICS 73.020; 91.100.15.
- Toohey, N. M. and Mooney, M. a. (2012)** ‘Seismic modulus growth of lime-stabilised soil during curing’, *Géotechnique*, 62(2), pp. 161–170. doi: 10.1680/geot.9.P.122.
- Tudisco, E. et al. (2015)** ‘Timelapse ultrasonic tomography for measuring damage localization in geomechanics laboratory tests’, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(March), pp. 1389–1400. doi: 10.1121/1.4913525.
- Verástegui-Flores, R. D. et al. (2015)** ‘Evaluation of the free-free resonant frequency method to determine stiffness moduli of cement-treated soil’, *Soils and Foundations*, 55(5), pp. 943–950. doi: 10.1016/j.sandf.2015.09.001.
- Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995)** ‘Stiffness of fine-grained soil at very small strains’, *Géotechnique*, 45(2), pp. 249–265. doi: 10.1680/geot.1995.45.2.249.
- Åhnberg, H., Holmén, M. (2008)** ‘Laboratory determination of small-strain moduli in stabilized soils’, in *4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Atlanta 2008)*, pp. 291–297.



# Bilaga A.

## Normaliserade frekvenser

Normaliserad resonansfrekvens ( $\omega_{n1}$ ) för uppmätt  $f_{n1}$  ( $C_S = D\pi f_{n1}/\omega_{n1}$ )

L/D	Tvärkontraktionstal ( $\nu$ )										
	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.499
0.06	0.29682	0.29871	0.30057	0.30239	0.30418	0.30594	0.30767	0.30936	0.31103	0.31266	0.31424
0.08	0.39169	0.39409	0.39643	0.39873	0.40097	0.40317	0.40533	0.40744	0.40951	0.41154	0.41348
0.10	0.48353	0.48636	0.48912	0.49182	0.49445	0.49703	0.49954	0.50199	0.50439	0.50674	0.50899
0.15	0.69721	0.70084	0.70435	0.70775	0.71105	0.71426	0.71737	0.72039	0.72332	0.72617	0.72889
0.20	0.88570	0.88974	0.89363	0.89737	0.90098	0.90445	0.90780	0.91104	0.91416	0.91718	0.92004
0.25	1.04893	1.05311	1.05710	1.06091	1.06455	1.06805	1.07139	1.07460	1.07769	1.08065	1.08344
0.30	1.18898	1.19310	1.19701	1.20071	1.20424	1.20759	1.21078	1.21383	1.21673	1.21951	1.22212
0.35	1.30877	1.31272	1.31644	1.31994	1.32325	1.32637	1.32934	1.33215	1.33482	1.33736	1.33973
0.40	1.41133	1.41504	1.41851	1.42176	1.42481	1.42768	1.43039	1.43294	1.43535	1.43763	1.43976
0.45	1.49940	1.50286	1.50606	1.50905	1.51183	1.51444	1.51688	1.51917	1.52133	1.52337	1.52525
0.50	1.57537	1.57856	1.58151	1.58423	1.58675	1.58911	1.59130	1.59335	1.59528	1.59708	1.59875
0.55	1.64122	1.64415	1.64685	1.64932	1.65161	1.65373	1.65570	1.65753	1.65924	1.66084	1.66232
0.60	1.69857	1.70127	1.70374	1.70599	1.70806	1.70997	1.71174	1.71337	1.71490	1.71632	1.71763
0.65	1.74877	1.75126	1.75352	1.75557	1.75745	1.75917	1.76076	1.76223	1.76359	1.76486	1.76602
0.70	1.79292	1.79522	1.79729	1.79917	1.80087	1.80244	1.80387	1.80519	1.80641	1.80755	1.80858
0.75	1.83189	1.83403	1.83594	1.83766	1.83923	1.84065	1.84195	1.84315	1.84425	1.84527	1.84620
0.80	1.86645	1.86844	1.87021	1.87180	1.87324	1.87455	1.87573	1.87682	1.87782	1.87875	1.87959
0.85	1.89718	1.89905	1.90071	1.90219	1.90352	1.90472	1.90592	1.90682	1.90773	1.90857	1.90934
0.90	1.92460	1.92636	1.92793	1.92932	1.93056	1.93168	1.93269	1.93362	1.93446	1.93524	1.93594
0.95	1.92517	1.95081	1.95229	1.95360	1.95478	1.95583	1.95712	1.95764	1.95843	1.95915	1.95980
1.00	1.80487	1.84563	1.88242	1.91536	1.94470	1.97073	1.97812	1.97923	1.97997	1.98065	1.98126
1.05	1.69608	1.73440	1.76953	1.80156	1.83062	1.85690	1.88087	1.90202	1.92132	1.93876	1.95424
1.10	1.59729	1.63334	1.66676	1.69759	1.72594	1.75192	1.77561	1.79738	1.81721	1.83531	1.85155
1.20	1.42487	1.45693	1.48706	1.51530	1.54170	1.56632	1.58895	1.61054	1.63034	1.64872	1.66545
1.30	1.27973	1.30844	1.33565	1.36139	1.38570	1.40861	1.43020	1.45047	1.46952	1.48742	1.50389
1.40	1.15616	1.18203	1.20670	1.23018	1.25250	1.27370	1.29386	1.31286	1.33090	1.34798	1.36382
1.50	1.04991	1.07338	1.09584	1.11731	1.13782	1.15740	1.17608	1.19387	1.21082	1.22696	1.24202
1.60	0.95780	0.97919	0.99973	1.01943	1.03831	1.05641	1.07395	1.09032	1.10618	1.12136	1.13558
1.70	0.87734	0.89694	0.91579	0.93392	0.95135	0.96810	0.98419	0.99964	1.01448	1.02871	1.04211
1.80	0.80659	0.82463	0.84200	0.85874	0.87487	0.89041	0.90546	0.91978	0.93365	0.94700	0.95959
1.90	0.74403	0.76069	0.77676	0.79226	0.80723	0.82167	0.83561	0.84906	0.86203	0.87455	0.88639
2.00	0.68842	0.70385	0.71876	0.73316	0.74708	0.76054	0.77351	0.78612	0.79827	0.81002	0.82115
2.10	0.63875	0.65309	0.66696	0.68037	0.69336	0.70592	0.71806	0.72985	0.74125	0.75228	0.76276
2.20	0.59419	0.60756	0.62049	0.63302	0.64516	0.65691	0.66831	0.67934	0.69005	0.70042	0.71029
2.30	0.55406	0.56655	0.57865	0.59038	0.60174	0.61276	0.62349	0.63382	0.64389	0.65366	0.66296
2.40	0.51779	0.52950	0.54084	0.55183	0.56250	0.57285	0.58289	0.59266	0.60214	0.61135	0.62013
2.50	0.48491	0.49589	0.50654	0.51688	0.52691	0.53665	0.54610	0.55531	0.56425	0.57295	0.58124

2.60	0.45500	0.46533	0.47535	0.48508	0.49452	0.50371	0.51264	0.52131	0.52976	0.53798	0.54583
2.70	0.42771	0.43744	0.44689	0.45607	0.46498	0.47365	0.48190	0.49029	0.49828	0.50606	0.51349
2.80	0.40275	0.41194	0.42086	0.42953	0.43795	0.44615	0.45413	0.46189	0.46946	0.47683	0.48388
2.90	0.37987	0.38856	0.39699	0.40519	0.41317	0.42093	0.42844	0.43584	0.44302	0.45001	0.45670
3.00	0.35884	0.36706	0.37505	0.38282	0.39038	0.39774	0.40486	0.41189	0.41870	0.42535	0.43170

## Tabell för normaliserad resonansfrekvens $\omega_{n2}$

Normaliserad resonansfrekvens ( $\omega_{n2}$ ) för uppmätt  $f_{n2}$  ( $C_S = D\pi f_{n2} / \omega_{n2}$ )

L/D	Tvärkontraktionstal ( $\nu$ )										
	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.499
0.06	0.39683	0.41394	0.43192	0.45093	0.47116	0.49284	0.51625	0.54174	0.56976	0.60087	0.63510
0.08	0.52223	0.54459	0.56806	0.59285	0.61920	0.64740	0.67780	0.71084	0.74708	0.78723	0.83127
0.10	0.64233	0.66961	0.69821	0.72838	0.76039	0.79460	0.83140	0.87133	0.91501	0.96327	1.01603
0.15	0.91550	0.95351	0.99323	1.03495	1.07905	1.12593	1.17612	1.23022	1.28900	1.35340	1.42316
0.20	1.14787	1.19451	1.24306	1.29386	1.34731	1.40385	1.46402	1.52846	1.59794	1.67340	1.75427
0.25	1.34201	1.39557	1.45114	1.50906	1.56973	1.63360	1.70118	1.77307	1.84998	1.93274	2.02048
0.30	1.50322	1.56244	1.62369	1.68730	1.75366	1.82318	1.89633	1.97364	2.05570	2.14318	2.23490
0.35	1.63720	1.70116	1.76713	1.83542	1.90638	1.98038	2.05782	2.13912	2.22475	2.31517	2.40890
0.40	1.74904	1.81707	1.88706	1.95930	2.03408	2.11172	2.19253	2.27682	2.36489	2.45701	2.55142
0.45	1.84298	1.91457	1.98806	2.06370	2.14173	2.22239	2.30590	2.39244	2.48215	2.57508	2.66925
0.50	1.92240	1.99717	2.07376	2.15238	2.23322	2.31643	2.40210	2.49035	2.58109	2.67418	2.76746
0.55	1.98999	2.06761	2.14698	2.22825	2.31155	2.39693	2.48441	2.57389	2.66518	2.75566	2.84992
0.60	2.04786	2.12808	2.20996	2.29361	2.37907	2.46631	2.55514	2.64561	2.73709	2.82921	2.91954
0.65	2.09769	2.18028	2.26445	2.35023	2.43760	2.52644	2.61651	2.70748	2.79886	2.89005	2.97857
0.70	2.14081	2.22559	2.31183	2.39954	2.48859	2.57878	2.66970	2.76106	2.85208	2.93190	2.93612
0.75	2.17831	2.26508	2.35322	2.44265	2.53317	2.62449	2.71613	2.80754	2.81699	2.81911	2.82078
0.80	2.21102	2.29962	2.38949	2.48046	2.57226	2.66449	2.70988	2.71072	2.71136	2.71185	2.71224
0.85	2.23966	2.32994	2.42136	2.51369	2.60658	2.61004	2.61005	2.61005	2.61005	2.61005	2.61005
0.90	2.26478	2.35660	2.44942	2.50901	2.51063	2.51163	2.51234	2.51281	2.51319	2.51348	2.51372
0.95	2.28686	2.37874	2.39686	2.40609	2.41152	2.41505	2.41741	2.41935	2.42076	2.42188	2.42277
1.00	2.22144	2.26488	2.29012	2.30522	2.31489	2.32152	2.32632	2.32991	2.33273	2.33499	2.33681
1.05	2.11566	2.15972	2.18912	2.20872	2.22221	2.23188	2.23915	2.24464	2.24903	2.25260	2.25550
1.10	2.01949	2.06318	2.09488	2.11766	2.13426	2.14664	2.15615	2.16360	2.16959	2.17452	2.17856
1.20	1.85120	1.89299	1.92640	1.95275	1.97351	1.99000	2.00329	2.01408	2.02303	2.03053	2.03679
1.30	1.70880	1.74829	1.78156	1.80926	1.83222	1.85126	1.86719	1.88049	1.89180	1.90147	1.90968
1.40	1.58674	1.62395	1.65634	1.68426	1.70819	1.72868	1.74622	1.76135	1.77442	1.78579	1.79557
1.50	1.48096	1.51603	1.54724	1.57480	1.59899	1.62018	1.63872	1.65500	1.66930	1.68193	1.69293
1.60	1.38840	1.42151	1.45145	1.47835	1.50238	1.52380	1.54299	1.55982	1.57495	1.58847	1.60037
1.70	1.30673	1.33806	1.36673	1.39281	1.41644	1.43778	1.45703	1.47436	1.48999	1.50411	1.51665
1.80	1.23413	1.26385	1.29128	1.31650	1.33958	1.36065	1.37984	1.39732	1.41323	1.42773	1.44070
1.90	1.16918	1.19742	1.22369	1.24802	1.27048	1.29116	1.31015	1.32762	1.34363	1.35833	1.37158
2.00	1.11072	1.13762	1.16279	1.18625	1.20806	1.22828	1.24702	1.26430	1.28029	1.29506	1.30845
2.10	1.05783	1.08350	1.10764	1.13026	1.15140	1.17113	1.18979	1.20657	1.22244	1.23719	1.25064
2.20	1.00975	1.03430	1.05747	1.07928	1.09977	1.11898	1.13694	1.15375	1.16944	1.18410	1.19751
2.30	0.96584	0.98936	1.01164	1.03268	1.05253	1.07121	1.08878	1.10526	1.12072	1.13523	1.14856
2.40	0.92560	0.94817	0.96960	0.98992	1.00915	1.02731	1.04437	1.06060	1.07581	1.09012	1.10333
2.50	0.88858	0.91027	0.93092	0.95055	0.96918	0.98683	1.00358	1.01935	1.03428	1.04838	1.06143
2.60	0.85440	0.87528	0.89520	0.91418	0.93223	0.94939	0.96572	0.98113	0.99577	1.00964	1.02251
2.70	0.82276	0.84288	0.86211	0.88048	0.89799	0.91467	0.93053	0.94564	0.95998	0.97360	0.98628

2.80	0.79337	0.81279	0.83138	0.84916	0.86616	0.88238	0.89784	0.91259	0.92663	0.93999	0.95246
2.90	0.76601	0.78477	0.80276	0.82000	0.83649	0.85227	0.86741	0.88174	0.89548	0.90859	0.92085
3.00	0.74048	0.75863	0.77605	0.79276	0.80879	0.82414	0.83887	0.85290	0.86634	0.87919	0.89122

## Tabell för tvärkontraktionstalet ( $\nu$ ) från kvoten ( $f_{n2}/f_{n1}$ )

### Kvoten $f_{n2}/f_{n1}$ (eller $\omega_{n2}/\omega_{n1}$ )

L/D	Tvärkontraktionstal ( $\nu$ )										
	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.499
0.06	1.33696	1.38576	1.43701	1.49121	1.54894	1.61090	1.67796	1.75117	1.83187	1.92180	2.02109
0.08	1.33327	1.38190	1.43294	1.48686	1.54424	1.60575	1.67221	1.74464	1.82433	1.91290	2.01041
0.10	1.32841	1.37677	1.42747	1.48098	1.53784	1.59870	1.66435	1.73574	1.81408	1.90091	1.99618
0.15	1.31309	1.36053	1.41013	1.46231	1.51753	1.57637	1.63950	1.70772	1.78206	1.86375	1.95249
0.20	1.29601	1.34254	1.39102	1.44183	1.49538	1.55215	1.61271	1.67772	1.74798	1.82450	1.90672
0.25	1.27941	1.32520	1.37276	1.42242	1.47454	1.52952	1.58782	1.64998	1.71662	1.78850	1.86487
0.30	1.26430	1.30956	1.35646	1.40525	1.45624	1.50977	1.56621	1.62597	1.68952	1.75741	1.82870
0.35	1.25094	1.29590	1.34236	1.39053	1.44068	1.49308	1.54800	1.60577	1.66670	1.73115	1.79805
0.40	1.23929	1.28411	1.33031	1.37807	1.42761	1.47912	1.53282	1.58892	1.64761	1.70907	1.77212
0.45	1.22914	1.27396	1.32004	1.36755	1.41665	1.46747	1.52016	1.57483	1.63156	1.69039	1.75003
0.50	1.22029	1.26518	1.31126	1.35863	1.40741	1.45769	1.50952	1.56297	1.61796	1.67442	1.73102
0.55	1.21251	1.25755	1.30369	1.35101	1.39957	1.44941	1.50052	1.55285	1.60626	1.65919	1.71442
0.60	1.20563	1.25087	1.29713	1.34444	1.39285	1.44231	1.49272	1.54409	1.59607	1.64842	1.69975
0.65	1.19952	1.24498	1.29137	1.33873	1.38701	1.43615	1.48601	1.53640	1.58702	1.63755	1.68660
0.70	1.19404	1.23973	1.28629	1.33369	1.38188	1.43072	1.47999	1.52951	1.57887	1.62203	1.62344
0.75	1.18910	1.23503	1.28175	1.32921	1.37730	1.42585	1.47459	1.52323	1.52744	1.52775	1.52789
0.80	1.18462	1.23077	1.27766	1.32517	1.37316	1.42140	1.44470	1.44431	1.44388	1.44343	1.44300
0.85	1.18052	1.22690	1.27393	1.32148	1.36935	1.37030	1.36944	1.36880	1.36814	1.36754	1.36699
0.90	1.17676	1.22334	1.27049	1.30047	1.30047	1.30023	1.29992	1.29954	1.29916	1.29880	1.29845
0.95	1.18787	1.21936	1.22771	1.23162	1.23365	1.23480	1.23518	1.23585	1.23607	1.23619	1.23623
1.00	1.23080	1.22716	1.21658	1.20354	1.19036	1.17800	1.17603	1.17718	1.17816	1.17890	1.17946
1.05	1.24738	1.24523	1.23712	1.22600	1.21391	1.20194	1.19049	1.18013	1.17056	1.16187	1.15416
1.10	1.26433	1.26316	1.25686	1.24745	1.23658	1.22531	1.21431	1.20375	1.19392	1.18482	1.17661
1.20	1.29921	1.29930	1.29544	1.28869	1.28009	1.27050	1.26076	1.25056	1.24087	1.23158	1.22296
1.30	1.33528	1.33616	1.33385	1.32898	1.32223	1.31425	1.30555	1.29647	1.28735	1.27837	1.26982
1.40	1.37243	1.37386	1.37262	1.36911	1.36382	1.35721	1.34962	1.34161	1.33324	1.32479	1.31657
1.50	1.41056	1.41239	1.41193	1.40945	1.40531	1.39985	1.39337	1.38625	1.37866	1.37082	1.36305
1.60	1.44958	1.45172	1.45185	1.45017	1.44695	1.44244	1.43674	1.43061	1.42377	1.41656	1.40929
1.70	1.48943	1.49181	1.49240	1.49136	1.48887	1.48515	1.48043	1.47488	1.46873	1.46213	1.45537
1.80	1.53006	1.53263	1.53359	1.53305	1.53117	1.52811	1.52391	1.51919	1.51367	1.50764	1.50137
1.90	1.57141	1.57413	1.57538	1.57526	1.57388	1.57138	1.56789	1.56364	1.55868	1.55317	1.54738
2.00	1.61344	1.61628	1.61777	1.61799	1.61703	1.61501	1.61217	1.60828	1.60383	1.59880	1.59344
2.10	1.65610	1.65904	1.66073	1.66123	1.66062	1.65901	1.65696	1.65317	1.64917	1.64458	1.63962
2.20	1.69937	1.70239	1.70424	1.70497	1.70466	1.70339	1.70121	1.69833	1.69473	1.69054	1.68596
2.30	1.74321	1.74628	1.74826	1.74920	1.74914	1.74817	1.74627	1.74379	1.74055	1.73672	1.73248
2.40	1.78758	1.79070	1.79279	1.79389	1.79405	1.79334	1.79171	1.78956	1.78664	1.78313	1.77920
2.50	1.83246	1.83561	1.83779	1.83903	1.83938	1.83889	1.83773	1.83564	1.83301	1.82980	1.82615
2.60	1.87782	1.88099	1.88324	1.88460	1.88511	1.88482	1.88382	1.88204	1.87966	1.87671	1.87332
2.70	1.92363	1.92682	1.92913	1.93059	1.93123	1.93111	1.93098	1.92874	1.92660	1.92389	1.92074
2.80	1.96988	1.97307	1.97542	1.97697	1.97773	1.97776	1.97708	1.97576	1.97382	1.97133	1.96840
2.90	2.01652	2.01972	2.02211	2.02372	2.02459	2.02475	2.02457	2.02307	2.02133	2.01904	2.01630
3.00	2.06356	2.06675	2.06917	2.07084	2.07180	2.07207	2.07198	2.07069	2.06911	2.06700	2.06445





# SGF Rapport/Report

- 1:93 Rekommenderad standard för CPT-sondering.
- 1:93E Recommended Standard for Cone Penetration Tests.
- 2:93 Rekommenderad standard för vingförsök i fält.
- 2:93E Recommended Standard for Field Vane Shear Test.
- 1:95 Rekommenderad standard för dilatometerförsök.
- 1:95E Recommended Standard for Dilatometer Tests.
- 2:95 Några pionjärprofiler i svensk geoteknik. SJ Geotekniska Kommission 1914–1922.
- 3:95 Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95.
- 4:95 Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll.
- 4:95E Lime and Lime Cement Columns. Guide for Project Planning, Construction and Inspection.
- 1:96 Geoteknisk fälthandbok. Allmänna råd och metodbeskrivningar.
- 1:99 Tätskikt i mark. Vägledning för beställare, projektörer och entreprenörer.
- 2:99 Metodbeskrivning för Jord-bergsondering.
- 3:99 Metodbeskrivning för Viktsondering.
- 1:2000 Geotekniken i Sverige 1920–1945.
- 2:2000 Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll.
- 1:2001 Fälthandbok – Miljötekniska markundersökningar (ersätts av 1:2004).
- 1:2003 Att bygga med avfall. Miljörättsliga möjligheter och begränsningar för återvinning av avfall i anläggningsändamål
- 1:2004 Fälthandbok – Miljötekniska markundersökningar.
- 2:2004 Armerad jord och fyllning – Nordisk vägledning.
- 3:2004 NGM 2004 – XIV Nordic Geotechnical Meeting. May 19th – 21th 2004.
- 1:2006 Metodbeskrivning för Jb-totalsondering
- 2:2006 Metodbeskrivning för installation av inklinometerör
- 1:2008 Användning av restprodukter inom EU
- 1:2009 Metodbeskrivning för provtagare med standardkolvprovtagare. - Ostörd provtagning i fikornig jord
- 2:2009 Åtgärds mål vid in-situsanering. Formulering och kontroll av åtgärds mål.
- 1:2010 Förorenade byggnader. Provtagning och riskbedömning.
- 1:2011 Stimulerad reduktiv deklorering. En praktisk handledning
- 2:2011 Klorerade lösningsmedel i mark och grundvatten – Att tänka på inför provtagning och upphandling
- 3:2011 Hantering och analys av prover från förorenade områden - Osäkerheter och felkällor
- 1:2012 EYGEC 2012 - Setting the scene for future European geotechnical research
- 2:2012 Triaxialförsök – en vägledning
- 3:2012 SGF:s dataformat
- 4:2012 Metodbeskrivning för jord- bergsondering
- 1:2013 Fälthandbok - Geoteknik
- 1:2014 Riskhantering 1
- 1:2014E Risk Management methodology

2:2014 Riskidentifiering 2  
1:2016 Jordarternas indelning och benämning  
2:2016 Akustisk JB Sondering  
2:2016 Akustisk JB Sondering - Bilagor  
1:2017 Metodik för bestämning av cu  
2:2017 Fältgeoteknik Mät- och ersättningsregler  
3:2017 Dynamiska miljöundersökningar  
1:2019 Kvalitetskontroller för provtagning  
1:2020 Riskstruktureringsverktyg  
2:2020 Osäkerheter vid bestämning av organisk halt i jord  
1:2021 Introduktion i bergbyggnad för geotekniker

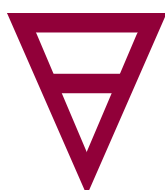


Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 1800 enskilda medlemmar, med minst två års praktisk erfarenhet av geoteknik. Dessutom ingår ca 30 korporativa medlemmar i form av institutioner, högskolor, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med grundläggning och miljöteknik i ett nationellt och internationellt perspektiv.

Föreningen företräder i Sverige den internationella föreningen, the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

I SGF:s Rapport- och Notatserie utges föreningens metodbeskrivningar, monografier och dokumentation från konferenser, temadagar m.m.



**Svenska Geotekniska Föreningen**  
Swedish Geotechnical Society

c/o Ermax Design AB, Sveaborgsvägen 16 439 73 FJÄRÅS Tel: 0708-137773

Internet: [www.sgf.net](http://www.sgf.net) E-post: [info@sgf.net](mailto:info@sgf.net)