



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R102:1990

Rayleighvågsmätningar i friktions- jord och fast lera

Laszlo Gereben

Bengt O Pramborg

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400135506

Byggforskningsrådet

R102:1990

RAYLEIGHVAGSMÄTNINGAR I FRIKTIONSJORD
OCH FAST LERA

Laszlo Gereben
Bengt O Pramborg

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 890230-4
från Statens råd för byggnadsforskning till AB Jacobson
& Widmark, Geoteknik & Grundläggning, Lidingö.

REFERAT

Projektet har syftat till att erhålla samband mellan den dynamiska skjuvmodulen G_d bestämd med R-vågsseismik och andra parametrar som vanligen bestäms vid grundundersökningar.

Rayleighvågen breder ut sig ringformat från störningskällan. Den följer markytan och påverkar jorden till ett djup av ungefär våglängden. R-vågens hastighet, som användes för att beräkna den dynamiska skjuvmodulen G_d , bestäms av jordens egenskaper till ett djup av ungefär halva våglängden. Genom att mäta R-vågshastigheten för successivt ökande våglängder kan G_d beräknas skiktvis till större och större djup.

Resultat från R-vågsmätningar i friktionsjord och fast lera har jämförts med resultat från andra undersökningsmetoder. Jämförelsen visar att verklighetsnära och för sättningsberäkningar användbara samband finns mellan statiska och dynamiska deformationsmoduler för de undersökta jordslagen. Även ett sannolikt samband mellan dynamisk skjuvmodul och fast leras skjuvhållfasthet har angivits.

R-vågsmätningar utföres från markytan utan borrhningar. Med använd utrustning har mätningar kunnat göras till ca 35 m djup i friktionsjord.

I Bygghörsningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R102:1990

ISBN 91-540-5288-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

gotab Stockholm 1990

INNEHÅLL

	FÖRORD	1
1	BAKGRUND. INLEDNING.....	2
2	FÄLTARBETEN.....	4
3	R-VAGSMÄTNING.....	5
3.1	Primärdata.....	5
3.2	f/v _p -diagram.....	6
3.3	Skiktvis beräkning av v _p	7
3.4	Beräkning av dynamisk skjuvmodul G _d	9
3.5	Presentation av resultat.....	9
4	SAMBAND MELLAN DYNAMISK SKJUVMODUL G _d OCH ANDRA JORDPARAMETRAR.....	10
4.1	Dynamisk skjuvmodul G _d och statisk skjuvmodul G.....	10
4.2	Dynamisk skjuvmodul G _d och pressometer- modul E _p	10
4.3	Dynamisk skjuvmodul G _d och skjuvhåll- fasthet τ _{fu} för normalt konsoliderad lera	10
5	PROVPLATS KALMARSAND.....	11
5.1	Linje 1.....	11
5.1.1	Samband mellan E _p och G _d	14
5.2	Linje 2.....	15
6	PROVPLATS JAKOBSBERG.....	17
6.1	R-vågsmätning. Pressometermätning Viktsondering. Provtagning.....	17
6.1.2	Samband mellan G _d och τ _{fu}	20
6.1.3	Samband mellan G _d och kompressionsmodul M från ödometerförsök.....	21
7	PROVPLATS HAGALUND.....	22
8	SLUTORD.....	24
	LITTERATUR.....	25
	BILAGA 1. Pressometermodul E _p , gränstryck p ₁ , odränerad skjuvhållfasthet τ _{fu} och dynamisk skjuvmodul G _d för fast lera...	26

FÖRORD

Projektet har genomförts med ungefär lika stora bidrag från BFR som från AB Jacobson & Widmarks FoU-anslag.

Fältarbetena har genomförts i Ballast Stockholm ABs grustag vid Kalmarsand och på tomtmark i Jakobsberg tillhörig JM Byggnads- och Fastighets AB. Vi vill tacka de båda företagen för att vi fått genomföra undersökningarna på provplatserna.

Vi tackar även ABEM som kostnadsfritt har ställt en 24 kanals Terraloc Mark 3 till vårt förfogande för fältmätningarna.

För provplats Hagalund, som ej har ingått i det egentliga projektarbetet, har Banverket välvilligt ställt borresultat till förfogande.

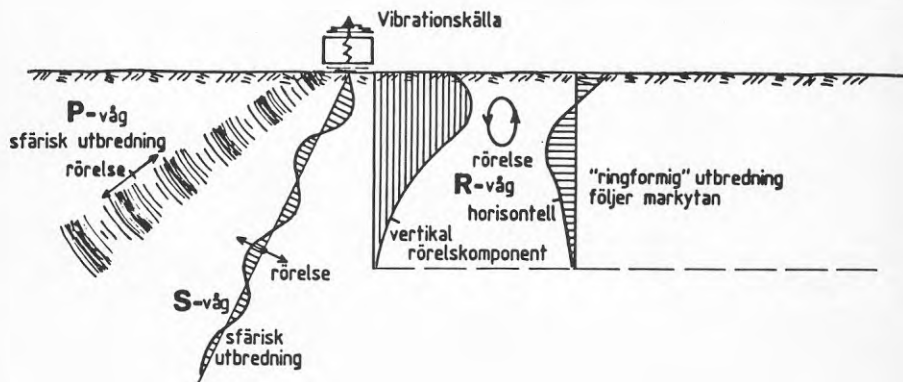
Lidingö i april 1990

Laszlo Gereben

Bengt O. Pramborg

1 BAKGRUND. INLEDNING

När jord utsätts för dynamisk påverkan uppträder i huvudsak tre vågtyper: kompressionsvåg (P-våg), skjuvvåg (S-våg) och Rayleighvåg (R-våg). Huvuddelen av totala vågenergin, ca 2/3, fortplantas som R-vågor, vilka därför dominerar och är lättast att studera. I fig 1.1 framgår de olika vågornas rörelse- och utbredningsmönster.



Figur 1.1

Figuren visar schematiskt jordpartiklarnas rörelse under inverkan av de olika vågtyperna. P- och S-vågor breder ut sig klotformigt och R-vågen "ringformigt" från punkten för påverkan.

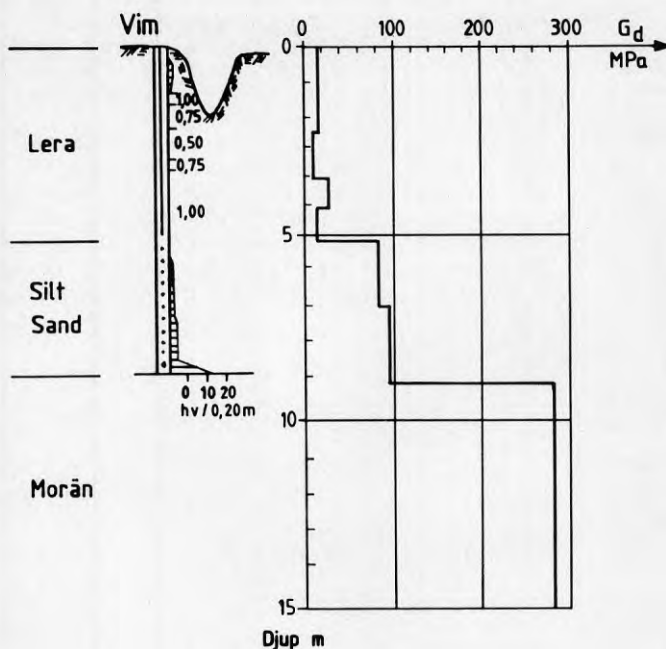
En tidigare genomförd undersökning, projekt "Datorstödd R-vågs-seismik" bekostat av Styrelsen för Teknisk Utveckling (STU) och AB Jacobson & Widmark (J&W), har visat att Rayleighvågen (R-vågen) med fördel kan användas för grundundersökning.

Därvid utnyttjas vissa egenskaper hos R-vågen.

- R-vågens hastighet v_R är nära lika med S-vågens hastighet v_S
- våghastigheten $v_R \cong v_S$ bestäms av jordens egenskaper till ett djup av ca halva våglängden ($\lambda/2$)

Genom att påtvinga jorden R-vågor av olika längd med hjälp av vibratorer samt mäta våglängd och våghastighet kan variationen med djupet av jordens dynamiska skjuvmodul G_d beräknas.

Ett exempel på resultat från en sådan undersökning och jämförelse med viktsondering visas i figur 1.2.



Figur 1.2
Jämförelse mellan viktsondering och R-vågsmätning
Jordarterna bedömda från viktsonderingen.

Exemplet i figur 1.2 visar att den i STU/J&W-projektet valda mät- och beräkningstekniken fungerar, men också att det som väntat finns samband mellan den dynamiska skjuvmodulen G_d och jordens fasthet.

Sambanden mellan G_d och övriga jordparametrar är dock endast delvis undersökta.

Det är för att söka påvisa sådana samband som detta BFR/J&W-projekt har genomförts. Förhoppningen är att de resultat, som erhålls från en R-vågsmätning, skall kunna användas i större utsträckning för praktisk geoteknikarbete.

Undersökningarna har begränsats till jämförande studier för fast lera och friktionsjord (sand och grus).

2 FÄLTARBETEN

Fältarbetena har omfattat R-vågsseismik samt vikt- och slagsondering, jord-bergsondering, provtagning och pressometermätningar.

R-vågorna har alstrats med en ca 1 ton tung el- och hydrauldriven vibrationsvält, hyrd av Geodynamik AB. Frekvensen kan varieras kontinuerligt och amplituden stegvis med olika tunga excentervikter. Dessutom har en liten, ca 5 kg, elektrodynamisk vibrator utnyttjats vid höga frekvenser.

Liksom vid STU/J&W-projektet har Atlas Copco ABEMs Terraloc Mark 3 och 24 seismometrar SM-4 används vid mätningarna.

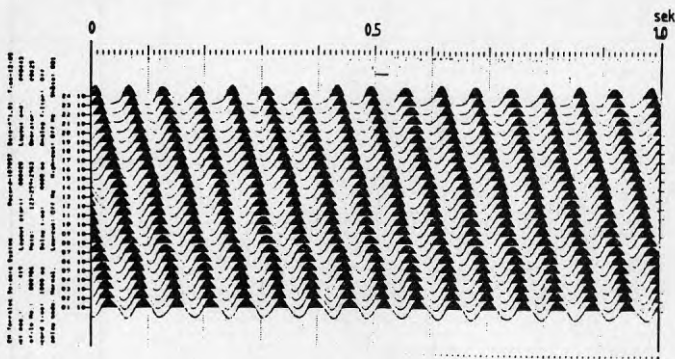
R-vågsmätningar och geotekniska borrhningar och mätningar har utförts på två provplatser och enbart R-vågsmätning på en plats.

Mätningarna har utförts längs linjer med 1 m avstånd mellan de 24 mätpunkterna. Utvärdering av resultaten har utförts för den mittre delen av sträckan och kan anses gälla för sträckans mittpunkt.

3 R-VAGSMÄTNING

3.1 Primärdata

Primärresultat från mätningarna spelas in på diskett, bearbetas och visas som ett vibrogram för varje mätfrekvens. Se figur 3.1.



Figur 3.1
Exempel på vibrogram

Mätningarna har utförts längs linjer med 1 m avstånd mellan de 24 seismometrarna.

För varje mätning bestäms frekvens f (Hz) och våglängd λ (m) genom kurvpasning. Därefter beräknas våghastigheten v_R (m/s) som

$$v_R = f \cdot \lambda;$$

Dessa storheter f , λ och v_R sammanställs som primärdata i tabellform enligt exemplet i figur 3.2.

	Freku(Hz)	Velocity(m/s)	Wavelength(m)
1	200.20	126.88	0.63
2	150.20	130.20	0.87
3	100.04	126.26	1.26
4	74.85	114.15	1.53
5	40.00	108.76	2.72
6	23.50	121.00	5.15
7	11.33	234.80	20.72
8	27.69	114.48	4.13
9	21.84	130.05	5.95
10	17.09	234.13	13.70
11	19.50	155.40	7.97

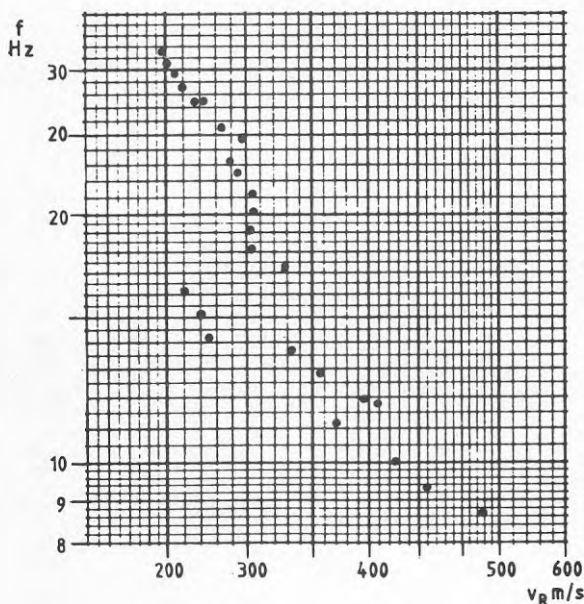
Figur 3.2
Primärdata från R-vägs mätning. Exempel

3.2 f/v_R -diagram

Genom att i ett diagram avsätta sammanhörande värden för frekvens (f) och hastighet (v_R) framträder en kurva vars utseende bestäms av grundförhållandena på den undersökta platsen.

Det har visat sig lämpligt att rita kurvan i dubbellogaritmisk skala. I diagrammet blir därvid sambanden linjära mellan f , v_R och λ . Dessutom blir kurvan mer "lättläst" vid höga frekvenser och hastigheter.

Som exempel på ett f/v_R -diagram är primärdata från en R-vågs-mätning avsatta i ett dubbellogaritmiskt diagram i figur 3.3.



Figur 3.3
Diagram visande sambandet mellan frekvens f och R-vågshastigheten v_R ; linje 1, Kalmarsand

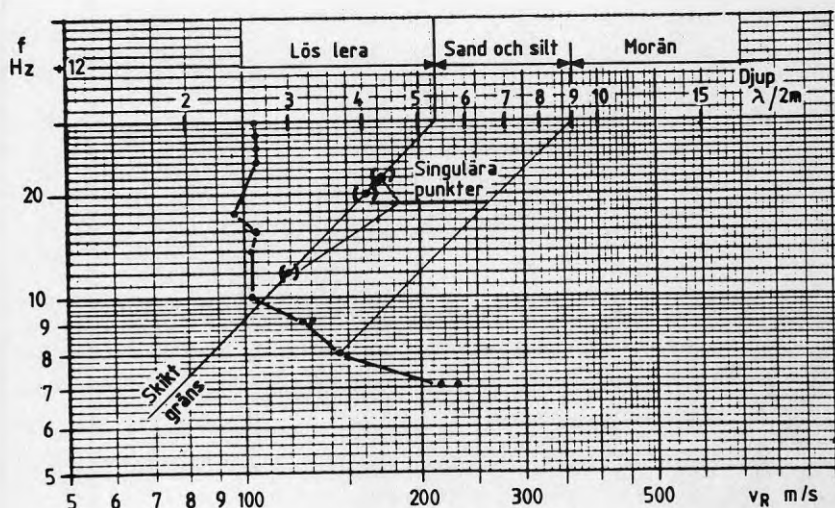
Erfarenheten av att "tolka" f/v_R -diagrammen är av naturliga skäl begränsad; det finns inte många mätningar utförda där frekvensen systematiskt varierats från låga till höga frekvenser med samtidig noggrann bestämning av våghastigheten. Tolkningen fördunklas dessutom av att det är R-vågens medelhastighet som förändras med våglängden. En del karaktäristiska utseenden hos f/v_R -kurvan kan dock nämnas,

- kurvans lutning är beroende av om jordens fasthet ökar, är konstant eller minskar med djupet

- kurvans lutning ändras påtagligt eller "hoppar" när R-vågen når kontakt med gränsskikt mellan lösare och fastare jord.

Det inträffar även att singulära punkter uppmäts, som inte tycks ha något sammanhang med en mer sammanhängande kurva. Våglängden är därvid oftast lika med en våglängd, som visar på skikt mellan lös och fast jord, men frekvensen är högre och hastigheten större. Någon bra förklaring till varför singulära mätresultat uppträder har vi ännu inte funnit.

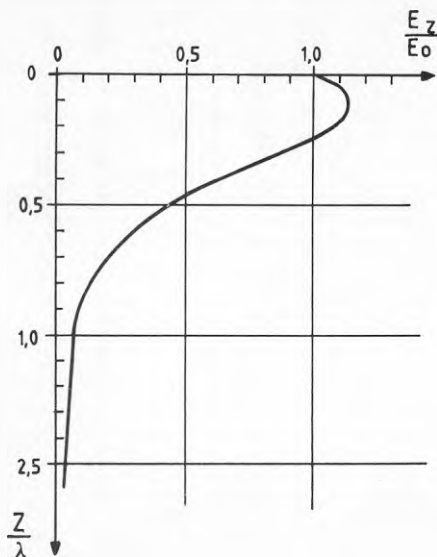
Som exempel på ett f/v_R -diagram med singulära punkter visas i figur 3.4 nedan resultatet från en mätning i Kallhäll vid det tidigare genomförda STU/J&W-projektet.



Figur 3.4
 f/v_R -diagram från Kallhäll med skiktgräns och singulära mätresultat.

3.3 Skiktvis beräkning av v_R

Med hänsyn till R-vågens energifördelning, se figur 3.5, och tidigare utförda modell- och fältexperiment, bl a i USA, England och Tyskland, kan antas att våghastigheten v_R bestäms av jordens egenskaper till ett djup av ungefär halva våglängden, $\lambda/2$.



Figur 3.5
Energins fördelning med djupet för R-vågen

Förändras v_R vid en förändring av λ , t ex från λ_1 till λ_2 , beror ändringen därför i huvudsak på egenskaperna hos jordskiktet på djupet mellan $\lambda_1/2$ och $\lambda_2/2$.

När v_R ändras från v_{R1} till v_{R2} vid mätning med två olika våglängder λ_1 och λ_2 beräknas hastigheten i skiktet mellan $\lambda_1/2$ och $\lambda_2/2$ som ett viktat geometriskt medelvärde.

Vid medelvärdesbildningen gäller

$$v_{R12} = \frac{v_{R2} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}}{v_{R1} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}}$$

Vid beräkning av v_{R12} måste differensen $\lambda_2 - \lambda_1$ vara rimligt stor för att inte små mätfel skall ge stora fel i v_{R12} . Vid STU/J&W-projektet valdes som styrning $\lambda_2 \geq 1,2 \lambda_1$.

I detta projekt har dock denna något okänsliga behandling av mätmaterialen ersatts av ett studium och en bedömning av f/v_R -kurvans utseende. Beräkningsvärdena väljs vid kurvans brytpunkter och däremellan med lämpliga intervall. Smärre justeringar av hastigheter och våglängder kan också vara rimligt att göra. Singulära punkter tas inte med.

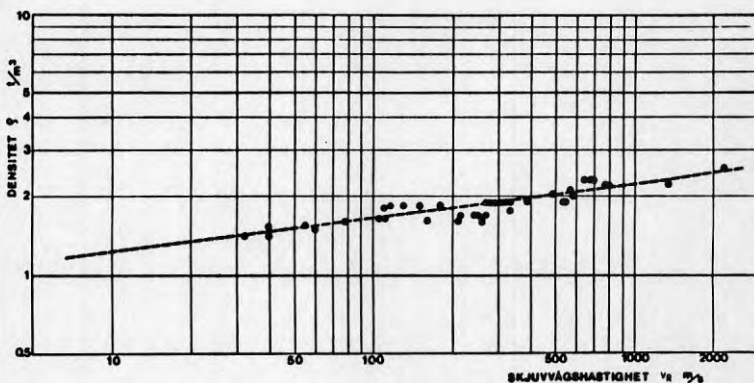
3.4 Beräkning av dynamisk skjuvmodul G_d

Enligt elasticitetsteorin gäller följande samband mellan skjuv-
vågens hastighet v_S och G_d .

$$G_d = \rho \cdot v_S^2$$

där ρ är densiteten.

Andra undersökningar har bl a resulterat i det empiriska unge-
färliga samband mellan ρ och v_S som framgår av figur 3.6



Figur 3.6
Empiriskt samband mellan densitet ρ och skjuvvågshastighet v_S ,
enligt Gereben (1985)

Eftersom skjuvvågshastighet v_S och Rayleighvågshastighet v_R
praktiskt sett överensstämmer beräknas skjuvmodulen som

$$G_d = \rho \cdot v_R^2$$

varvid ρ väljes enligt figur 3.6

3.5 Presentation av resultat

Erforderliga beräkningar görs av PC-dator som presenterar resul-
tatet i tabell- och diagramform.

f/v_R -diagram och beräkningsresultat i diagram presenteras i det
följande från varje provplats.

4 SAMBAND MELLAN DYNAMISK SKJUVMODUL G_d OCH ANDRA JORD-PARAMETRAR

Såsom tidigare nämnts är sambanden mellan G_d och andra parametrar endast delvis kända.

4.1 Dynamisk skjuvmodul G_d och statisk skjuvmodul G_s

Den mest betydelsefulla faktorn som påverkar skjuvmodulen är skjuvningsamplitudens storlek. Skjuvmodulen minskar med ökande skjuvdeformation. Vid mycket små skjuvdeformationer ($\gamma < 0,0025\%$) har modulen ett maximalvärde G_0 .

Vid de mätningar, som utförts på beskrivet sätt i detta och det tidigare genomförda STU/J&W-projektet, är värdet på erhållen skjuvmodul G_d nära lika med G_0 .

Av tidigare erfarenheter vet man att den dynamiska förstöringsfaktorn för skjuvmodulen i vanliga fall är ca 10, dvs

$$G_d \approx 10 \cdot G_s$$

4.2 Dynamisk skjuvmodul G_d och pressometermodul E_p

För att bestämma jordens statiska deformationsegenskaper har pressometermätningar utförts på provplatserna. Därvid bestäms pressometermodulen E_p vid påtvingad cylindrisk utvidgning av ett hål i jorden.

En relation mellan den statiska skjuvmodulen G_s och pressometermodulen E_p erhålls om man vid sättningsberäkning får samma resultat när elasticitetsteorin och pressometerteorin tillämpas. Från sådana beräkningar för kvadratiska plattor med en bredd av 1 till 3 m och med kontraktionstalet $\nu = 1/3$, erhålles samband mellan G_s och E_p som varierar mellan $G_s \approx E_p$ och $G_s \approx 3 \cdot E_p$ beroende av bl.a jordart och jordens fasthet. Som vanliga värden, när extremt fast lera undantas, erhålles

$$G_s = (1,5 \text{ à } 2,5) E_p$$

Tillämpas en förstöringsfaktor av 10 för den dynamiska skjuvmodulen blir

$$G_d = (15 \text{ à } 25) E_p$$

4.3 Dynamisk skjuvmodul G_0 och skjuvhållfasthet τ_{fu} för normalkonsoliderad lera

B. Andreasson (1979) har för lös lera funnit sambandet

$$G_0 = 441 \cdot \tau_{fu}$$

S. Hansbo (1981) anger för normalkonsoliderad, vattenmättad lera

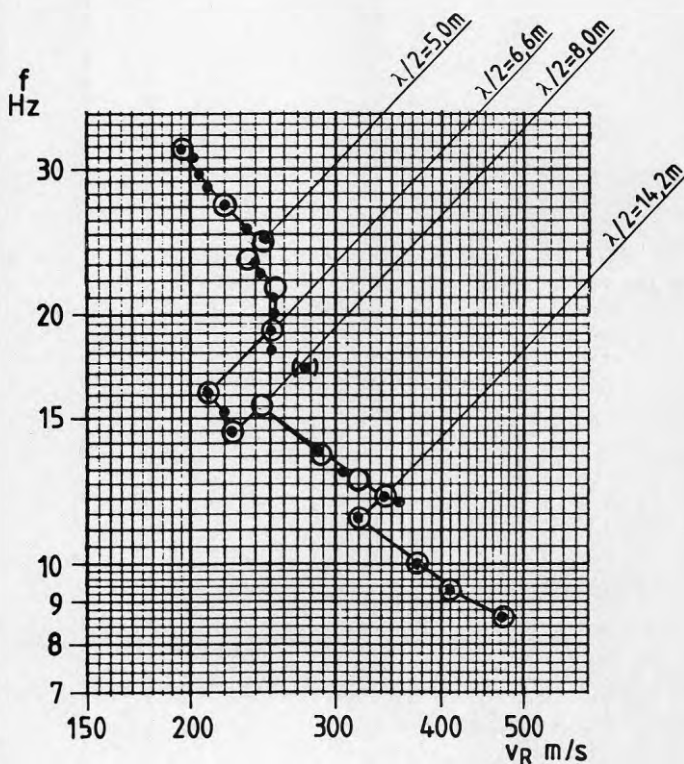
$$G_0 = 500 \cdot \tau_{fu}$$

5 PROVPLATS KALMARSAND

Undersökningarna har här genomförts i ett grustag med åsmaterial till stort djup. De har förutom R-vågsmätningar i två linjer omfattat jord-bergsondering till ca 20 m djup med kedjematad tung borrhusrustning, slagsondering samt pressometermätning i den ena av linjerna (linje 1).

5.1 Linje 1

Resultaten från R-vågsmätningen i linje 1 framgår av f/v_R -diagrammet i figur 5.1. Av figuren framgår även de punkter som valts vid beräkningen av skjuvmodulen G_d liksom de punkter som betraktats som singulära.



Figur 5.1

f/v_R -diagram, Kalmarsand, linje 1

- mätvärden
- valda värden för beräkning av G_d
- ◐ singulärt mätvärde

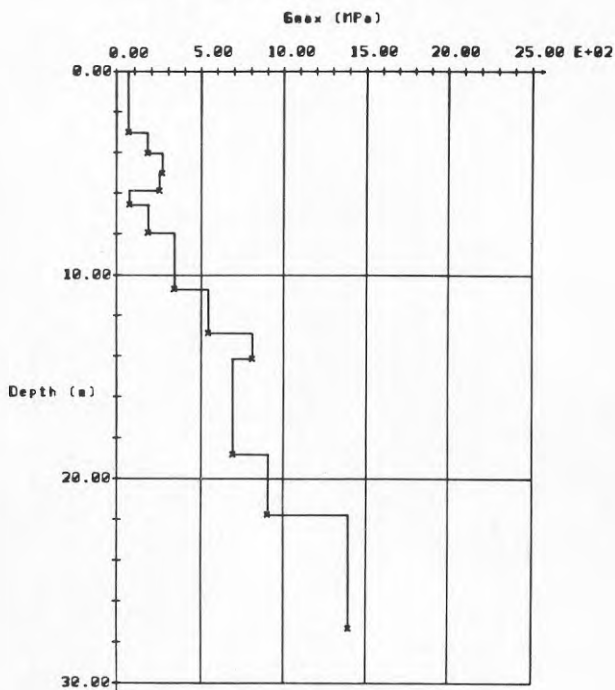
Resultat av beräkningarna för linje 1 visas i figur 5.2 med G_d som funktion av jorddjupet ($\lambda/2$).

J&W Geoteknik Proj: 9652236

R-Wave investigation

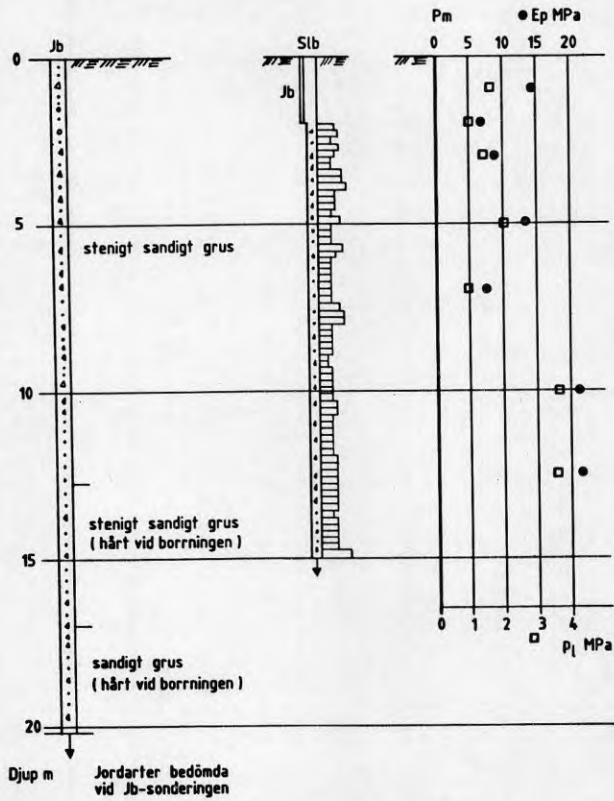
Area : Kalmarsand

Line No: 1



Figur 5.2
Kalmarsand, linje 1, G_d 's variation med jorddjupet enligt
R-vägs mätning, $G_d \equiv G_{max}$.

Resultatet av jord-bergsondering, slagsondering och pressometermätning är sammanställda i figur 5.3.



Figur 5.3
Resultat av jord-bergsondering, slagsondering och pressometermätning.

5.1.1 Samband mellan E_p och G_d

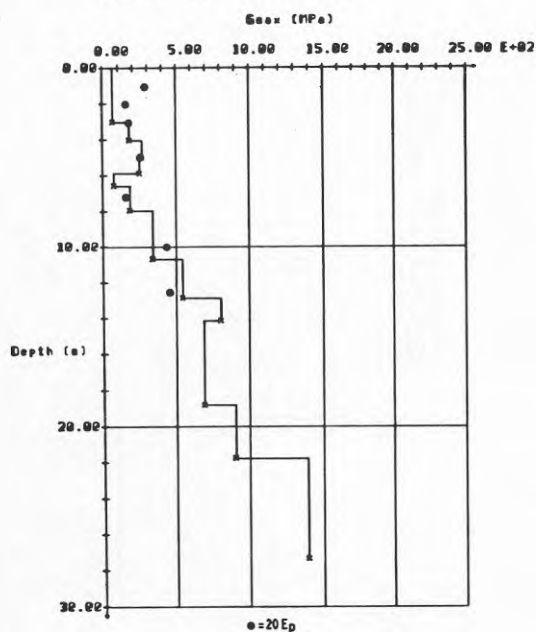
Figur 5.4 visar en jämförelse mellan G_d enligt R-vågsmätning och G_d beräknat som $20 \cdot E_p$.

J&W Geoteknik Proj: 9652236

R-Wave investigation

Area : Kolmarsand

Line No: 1

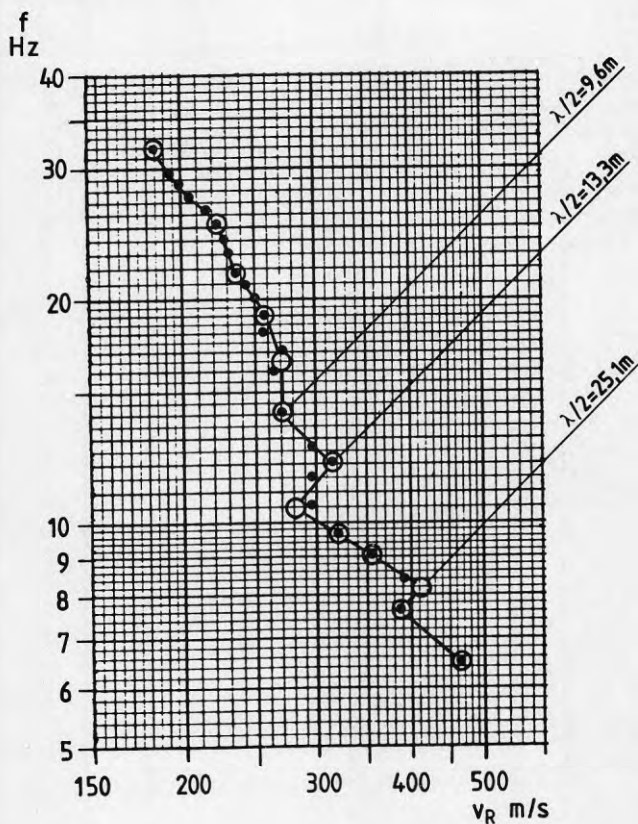


Figur 5.4
Jämförelse mellan G_d enligt R-vågsmätning och G_d beräknat som $20 \cdot E_p$.

Det framgår att ansatsen $G_d = 20 \cdot E_p$ ger god överensstämmelse och styrks av sambandet mellan elasticitetsteori och pressometerteori. Mot djupet, på ca 22 m, är skjuvmodulen G_d så hög att åsmaterialet här eventuellt underlagras av morän eller möjligen åskärnan.

5.2 Linje 2

Linje 2 ligger ca 50 m från linje 2. Av följande två figurer 5.5 och 5.6 framgår f/v_R -diagram och G_d 's variation med jorddjupet.



Figur 5.5

f/v_R -diagram, linje 2, Kalmarsand

● mätta värden

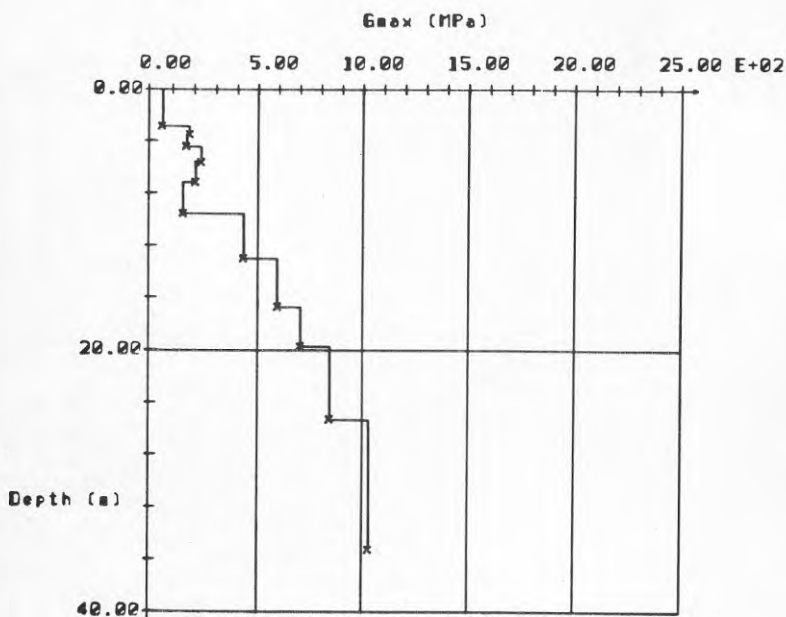
○ valda värden för beräkning av G_d

J&W Geoteknik Proj: 9652236

R-Wave investigation

Area : Kalmarsand

Line No: 2



Figur 5.6
Kalmarsand, linje 2, G_d 's variation med jorrdjupet

Resultaten från linje 2 överensstämmer i stort med linje 1. Modulen på stort djup (>25 m) är dock ca 40% högre i linje 1 än i linje 2. Det kan möjligen tyda på att åsmaterialet här sträcker sig djupare än i linje 1.

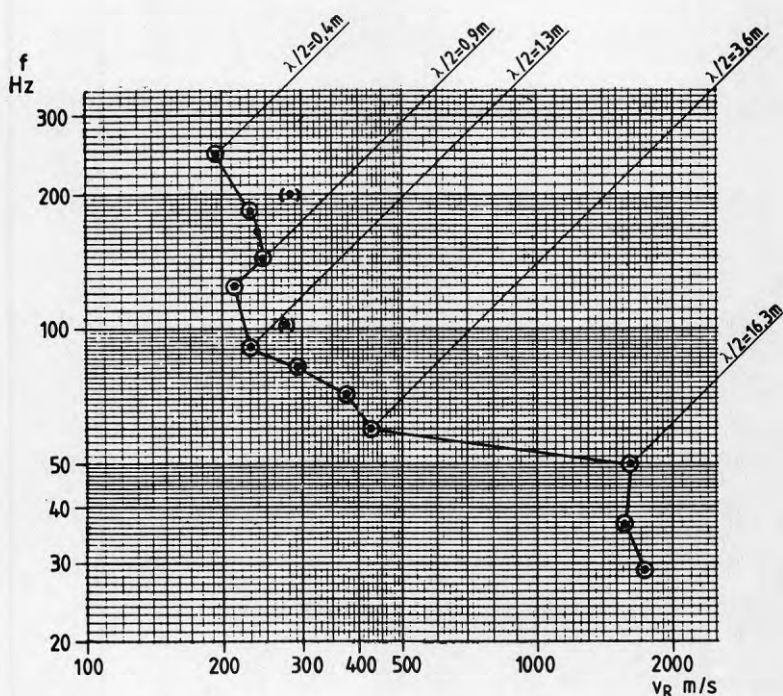
6 PROVPLATS JAKOBSBERG

Jorden består vid denna plats av torrskorpelera vilande på morän. Lerans tjocklek varierar mellan ca 2 och 3 m. På grund av begränsat utrymme kunde inte R-vågsmätning göras där leran var tjockast; lerans tjocklek är ca 2 m längs mätlinjen.

6.1 R-vågsmätning. Pressometermätning. Viktsondering. Provtagning

Som vibrationskälla användes från början välten, först med låga och sedan allt högre frekvenser. För frekvenser lägre än ca 30 Hz erhöles inga tydbara resultat. Mellan ca 30 och 50 Hz fanns dock några godtagbara mätningar. Därefter användes den lilla elektromagnetiska vibratorn för högre frekvenser.

Resultatet av mätningarna framgår av f/v_R -diagrammet i figur 6.1, där det även framgår valda beräkningspunkter och singulära punkter.



Figur 6.1
 f/v_R -diagram. Jakobsberg
 ● mätpunkter
 ○ valda punkter vid beräkning
 (●) singulära punkter

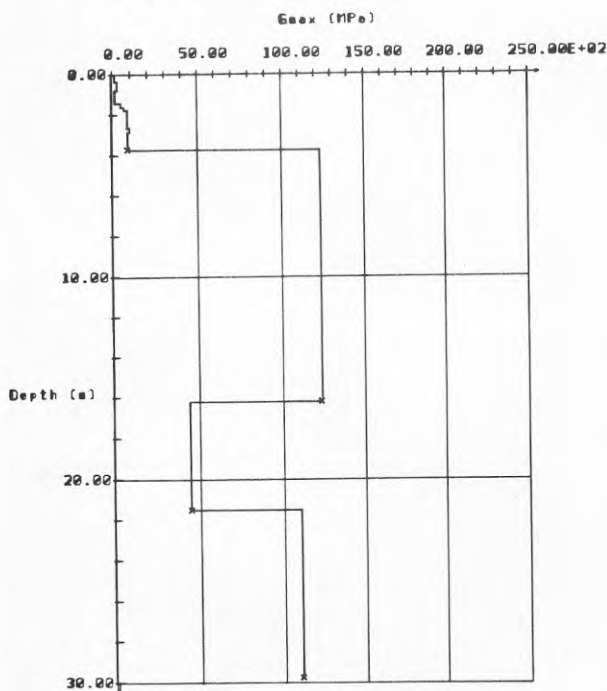
Beräkningsresultat framgår av figur 6.2

J&W Geoteknik Proj: 9652236

R-Wave investigation

Area : Jakobsberg

Line No: 1



Figur 6.2
 G_d som funktion av djup. Jakobsberg

De mycket höga skjuvmodulerna på större djup än ca 4 m visar att jorden vilar på berg på ungefär detta djup. Det förklarar också svårigheterna att få tydbara resultat av mätningar vid låga frekvenser. R-vågorna blir så långa (t ex >100 m vid 20 Hz) jämfört med vald mätsträcka (24 m) att mätvärdena blir svåra eller omöjliga att tolka.

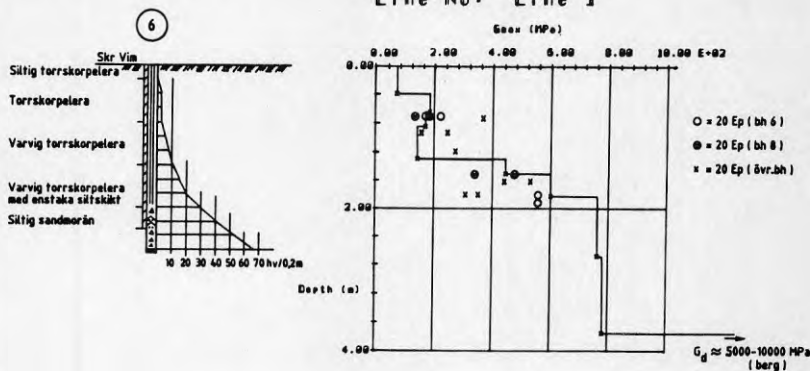
I figur 6.3 är sammanställt resultaten av R-vågsmätning, pressometermätningar, viktsondering och provtagning för jorden över berget. Resultat av pressometermätningar, finns förutom från borrhål 6 och 8 i linjen för R-vågsmätningen, även från ytterligare två borrhål inom ca 20 m från mätlinjen.

J&W Geoteknik Proj: 9652236

R-Wave investigation

Area : Jakobsberg

Line No: Line 1



Figur 6.3
Resultat av viktsondering, provtagning, R-vägs-mätning och pressometermätning

Torrskorpeleran har en vattenkvot mellan 21 och 29%, en konflyt-gräns mellan 50 och 53% och en densitet mellan 1,86 och 1,96 t/m³.

Lerans skjuvhållfasthet har inte kunnat bestämmas med konförsök eller vingborr på grund av dess fasthet. Skjuvhållfastheten har därför beräknats från pressometerförsöken som $(p_1 - p_0)/5,5$, där p_1 är gränstrycket och p_0 det horisontella "in-situ"-trycket på mätnivån. Beräknad skjuvhållfasthet τ_{fu} från borrhål 6 och 8 framgår av Tabell 6.1.

Tabell 6.1

Torrskorpelerans skjuvhållfasthet τ_{fu} beräknat ur pressometerförsök på olika nivåer i borrhål 6 och 8.

Borrhål	Djup (m)	τ_{fu} (kPa)		
		mätning 1	mätning 2	medelvärde
6	0,7	169	129	149
	1,8	318	284	301
8	0,7	153	109	131
	1,5	235	211	223

6.1.1 Samband mellan G_d och E_p

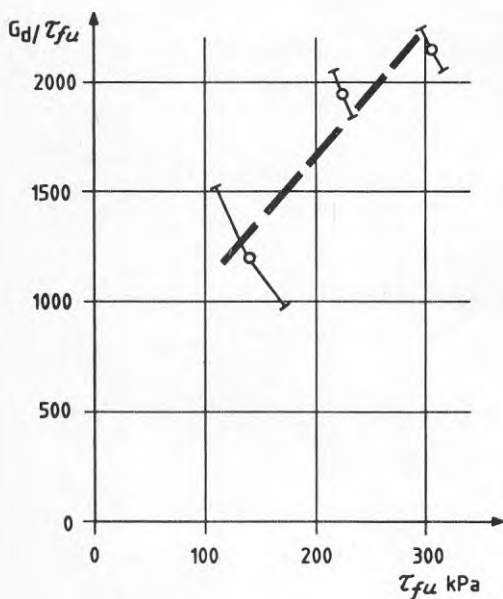
Som framgår av figur 6.3 kan den tidigare använda ansatsen för friktionsjord $G_d = 20 \cdot E_p$ användas även för den undersökta torrskorpeleran.

6.1.2 Samband mellan G_d och τ_{fu}

Jämförs skjuvhållfastheten τ_{fu} med den dynamiska skjuvmodulen G_d för olika djup erhålls

- för 0,7 m djup (Bh 6 och 8)
 $\tau_{fu} = 140 \pm 30$ kPa
 $G_d = 168$ MPa, dvs $G_d = (1200_{-212}^{+327}) \tau_{fu}$
- för 1,5 m djup (BH 8)
 $\tau_{fu} = 223 \pm 12$ kPa
 $G_d = 433$ MPa, dvs $G_d = (1941_{-98}^{+111}) \tau_{fu}$
- för 1,8 m djup (Bh 6)
 $\tau_{fu} = 301 \pm 17$ kPa
 $G_d = 610$ MPa, dvs $G_d = (2027_{-109}^{+121}) \tau_{fu}$

Sammanställes de beräknade sambanden mellan G_d och τ_{fu} erhålls diagrammet i figur 6.4



Figur 6.4
 Erhållet samband mellan G_d och τ_{fu} för torrskorpelera, Jakobsberg.

Det framgår att kvoten G/τ_{fu} ökar med ökande skjuvhållfasthet τ_{fu} . Sambandet är osäkert bl a på grund av spridningen i lerans skjuvhållfasthet och resultat från fler jämförande mätningar behövs innan spridningen förhoppningsvis kan krympas.

Den inlagda linjen i figur 6.4 ger sambanden

$$G_d = 6 \tau_{fu}^2 + 500 \tau_{fu} \text{ och}$$

$$\tau_{fu} = \sqrt{0,167 \cdot G_d + 1736} - 41,65; \text{ med } G_d \text{ och } \tau_{fu} \text{ i kPa.}$$

Se även bil. 1.

6.1.3 Samband mellan G_d och kompressionsmodul M från ödometerförsök

Kompressionsförsök är utförda på lera från fyra olika nivåer. Modulen M vid första pålastning och motsvarande skjuvmodul G_s beräknad med kontraktionstalet $\nu = 1/3$ framgår av sammanställningen i tabell 6.2

Tabell 6.2

Kompressionsmodul M och beräknad statisk skjuvmodul G_s för olika djup.

Djup (m)	Kompressionsmodul M MPa	Beräknad skjuvmodul modul G_s ($\nu=0,3$) MPa
0,9	11,8	3,0
1,2	14,1	3,5
1,6	14,7	3,7
1,8	13,4	3,3

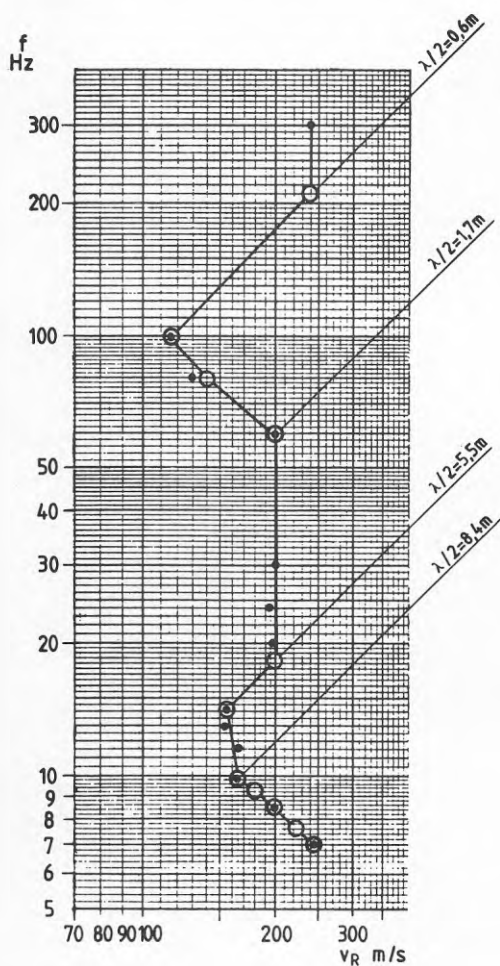
Alla kompressionsförsöken ger som synes ungefär samma deformationsmodul. Modulen från första pålastning brukar vanligen multipliceras med 2 å 3 för att motsvara den verkliga. Man får därvid, med en dynamisk förstörningsfaktor av 10, den dynamiska skjuvmodulen $G_d = 60$ å 110 MPa. Värdena är således lägre än de uppmätta och skillnaden mellan mindre djup (0,9-1,2 m) och större djup (1,6-1,8 m), som konstaterats vid in-situ mätningarna kommer inte till synes.

Det är därför inte realistiskt att uppskatta den dynamiska skjuvmodulen (eller den statiska) för torrskorpelera från kompressionsförsök.

7 PROVPLATS HAGALUND

Vid sidan av projektet har en R-vågsmätning utförs vid SJ:s spår-
område vid Hagalund. Här har järnvägsbanken fyllts upp på kalk-
pelarförstärkt lera.

R-vågsmätningens primärresultat framgår av f/v_R -diagrammet i
figur 7.1



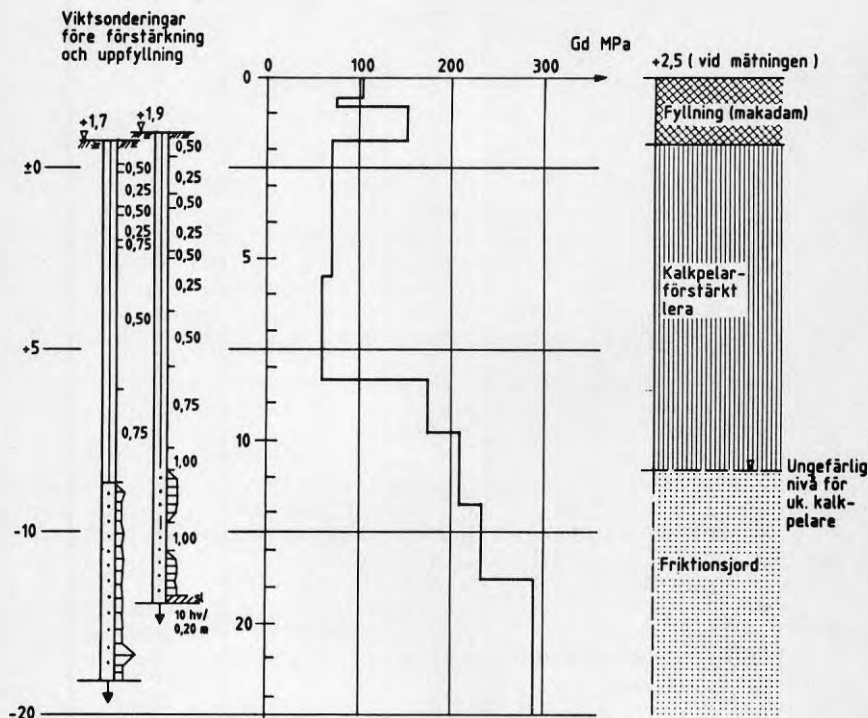
Figur 7.1

f/v_R -diagram från Hagalund

● mätvärden

O valda punkter vid beräkning

Resultat av viktsonderingar före förstärkning och uppfyllning samt resultatet av R-vågsmätningen efter arbetenas utförande har sammanställts i figur 7.2.



Figur 7.2
Resultat av viktsonderingar före och R-vågsmätning efter förstärkning och uppfyllning.

Av R-vågsmätningen framgår att uppfyllningen för spåret har lägre packningsgrad upptill än nedtill. Packningsgraden upptill bedöms motsvara lös till medelfast lagring och nedtill medelfast till fast lagring.

Medelskjuvhållfastheten τ_{fu} hos den kalkpelarförstärkta leran, beräknad enligt kurvan i figur 6.4, är ca 70 kPa från ca 2 till 8,5 m djup. Leran under 8,5 m har en skjuvhållfasthet τ_{fu} mellan ca 150 och 160 kPa beräknat på samma sätt.

Effekten av kalkinblandningen tycks således enligt R-vågsmätningarna ha varit större på leran under ca 7 à 8 m djup under ursprunglig marknivå än däröver.

Ökningen beror sannolikt även på att leran här successivt övergår i friktionsjord.

8 SLUTORD

De genomförda undersökningar har visat att

- * både för friktionsjord och för fast lera är ett användbart samband mellan dynamisk skjuvmodul G_d och pressometermodul E_p ,

$$G_d = 20 \cdot E_p$$

- * ett sannolikt samband mellan fast leras odränerade skjuvhållfasthet τ_{FU} och dess dynamiska skjuvmodul framgår av figur 6.4 under stycket 6.1.2.
- * den vid beräkningarna gjorda ansatsen, att R-vågshastigheten (v_R) är representativ för jorden till ett djup av halva våglängden ($\lambda/2$) synes stämma väl överens med verkligheten. Vi vill i detta sammanhang citera och instämma med Richard, Hall och Woods (1970) "... it should be reiterated that the steady-state-vibration method (or half-wave-length method) is an empirical procedure, and it is remarkable that it works so well."
- * den utnyttjade välten är användbar som vibrationskälla för frekvenser mellan ca 7 och 60 Hz. Den kan dock inte anses som fältanpassad för rutin användning.
- * den utnyttjade lätta elektrodynamiska vibratorn, som kan användas för frekvenser mellan ca 50 och 300 Hz, är lämplig vid speciella förhållanden; när jorddjupen är små och R-vågshastigheten hög hos jorden (exv. provplats Jakobsberg).
- * för att mer rutinmässiga R-vågsmätningar skall kunna göras behövs en tyngre vibrator (100-500 kg), sannolikt elektrodynamisk, som medger en enkel, kontinuerlig variation av både frekvens och amplitud.

Av hittills vunna erfarenheter är det vår uppfattning att R-vågsmätning är ett utmärkt komplement till de vanliga geotekniska undersökningsmetoderna. I vissa fall, t ex när det gäller jordens egenskaper på stora djup, kan man få säker och mer fullständig information om jorden och dess egenskaper än av de borrhål man av bl a kostnadsskäl måste begränsa till ett fåtal.

Även vid små jorddjup ger R-vågsmätningarna resultat som överensstämmer väl med vanliga undersökningsmetoder. Förutom att metoden direkt ger korrekta uppgifter om jordens dynamiska egenskaper kan dessa för friktionsjord (sand och grus) och fast lera översättas till statiska egenskaper. Framför allt är det värdefullt att, så långt man kan bedöma, deformationsmodulerna är tillämpliga vid praktiska sättningsberäkningar.

Sambanden mellan R-vågsresultat och geotekniska parametrar för lös lera, silt och morän är fortfarande ej undersökta. Det är önskvärt att undersökningar genomförs även i dessa jordarter för att om möjligt visa att metoden är mer allmänt tillämplig.

Fortfarande återstår också att finna en lämplig vibrator för rutinmässiga R-vågsmätningar.

LITTERATUR

Richard, Hall, Woods, 1970. *Vibration of Soils and Foundations*. Prentice-Hall, Inc. Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. Englewood Cliffs, New Jersey.

Andreasson, Bo, 1979. Deformation characteristics of soft high-plastic clays under dynamic loading conditions. Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Hansbo, Sven, 1981. *Grundläggning av byggnader och maskinfundament*. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Gereben, L., 1985. Systematisering av tillämpningsförfarande för nya dynamiska grundundersökningsmetoder. BFR-projekt 740397-2, Slutrapport.

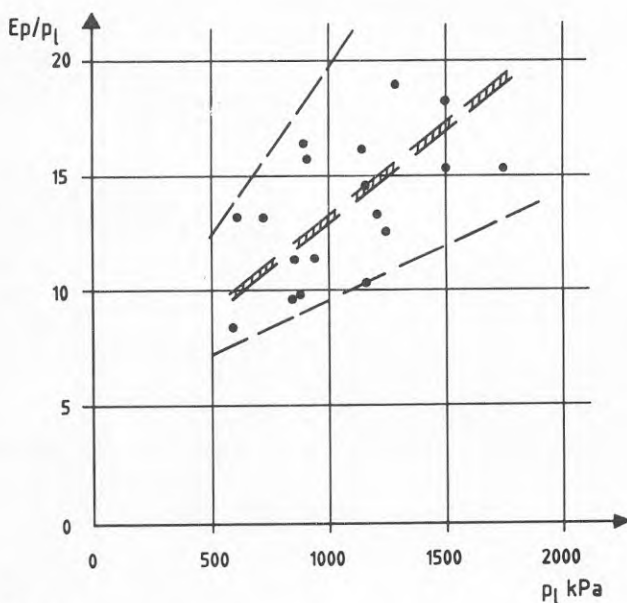
Gereben, L., Pramborg, B.O., 1988. Datorstödd R-vågsseismik. Rapport till STU. Anslagsnr 72-87-00742.

BILAGA 1

Pressometermodul E_p , gränstryck p_l , odränerad skjuvhållfasthet τ_{fu} och dynamisk skjuvmodul G_d för fast lera.

Det är väl känt för användare av pressometern att kvoten E_p/p_l vanligen ökar med ökande p_l i lera.

I figur 1 är sammanställda resultat av ett antal pressometerförsök i fast lera i Stockholmstrakten (Jakobsberg, Täby).

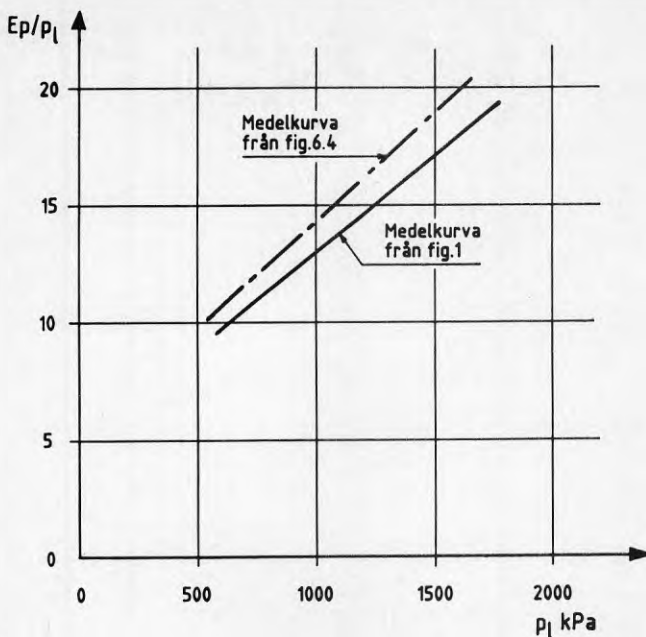


Figur 1
Kvoten E_p/p_l som funktion av p_l för ett antal pressometermätningar i fast lera.

Spridningen är stor men tendensen att E_p/p_l ökar med p_l är entydig. Den stora spridningen kan till en del förklaras av att leran störs vid håltagningen innan pressometersonden kommer på plats. Pressometermodulen E_p är känsligare för störning än gränstrycket p_l ; modulen bestäms vid små deformationer av borrhållsväggen och gränstrycket vid betydligt större. Man kan därför vänta sig att kvoten E_p/p_l ofta är mindre än den skulle vara om störningen alltid vore minimal.

Som ett sannolikt samband mellan E_p och p_l kan dock medelkurvan användas.

Om det i projektet visade sambandet mellan dynamisk skjuvmodul G_d och E_p , $G_d = 20 \cdot E_p$ samt $p_l - p_0 = 5,5 \cdot \tau_{fu}$ användes, motsvarar medelkurvan från figur 6.4 den punktstreckade linjen och medelkurvan från ovanstående figur 1 den heldragna linjen i följande figur 2.



Figur 2

Samband mellan E_p/p_l och p_l

Heldragen linje: medelkurva från figur 1

Punkt-streckad linje: medelkurva från figur 6.4 omräknad med $G_d = 20 \cdot E_p$ och $p_l - p_0 = 5,5 \cdot \tau_{fu}$.

Kurvorna ligger som synes nära varandra. Det visar att värdet på enligt R-vågsmätning erhållen skjuvmodul G_d stämmer väl med antagelsen $G_d = 20 \cdot E_p$.

Användes den heldragna linjen blir sambandet mellan E_p och p_l

$$E_p = 0,008 \cdot p_l^2 + 5 \cdot p_l; \text{ med } E_p \text{ och } p_l \text{ i kPa.}$$

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 890230-4 från Statens råd för byggnadsforskning till AB Jacobson & Widmark, Geoteknik & Grundläggning, Lidingö.

R102:1990

ISBN 91-540-5288-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6801102

Abonnemangsgrupp:
V. Anläggningsteknik

Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna

Cirka pris: 37 kr exkl moms