



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

R135:1979

**Dynamiska parametrar
och samband med andra
materialegenskaper**

Förstudie

Björn Svedinger

Byggforskningen

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR VAG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

R135:1979

DYNAMISKA PARAMETRAR OCH SAMBAND
MED ANDRA MATERIALEGENSKAPER

Förstudie

Björn Svedinger

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
780851-8 från Statens råd för byggnadsforskning
till Inst. för jord- och bergmekanik, KTH,
Stockholm.

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

R135:1979

ISBN 91-540-3142-7
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1979 958207

INNEHÅLL

| | | |
|-----|-------------------------------|----|
| | FÖRORD | 5 |
| | SAMMANFATTNING | 7 |
| 1. | INLEDNING | 9 |
| 2. | EMPIRISKA PARAMETERSAMBAND | 11 |
| 2.1 | Dynamiska parametrar | 11 |
| 2.2 | Exempel på empiriska samband | 16 |
| 3. | TEORETISKA PARAMETERSAMBAND | 25 |
| 3.1 | Materiallegenskaper | 25 |
| 3.2 | Beräkningsmetoder | 28 |
| 3.3 | Exempel på teoretiska samband | 39 |
| 4. | SIMULERING | 45 |
| 4.1 | System med en frihetsgrad | 47 |
| 4.2 | System med två frihetsgrader | 55 |
| 4.3 | System med fyra frihetsgrader | 59 |
| 5. | SLUTSATSER | 67 |
| 6. | REFERENSER | 71 |

BILAGA 1 Analogmaskin IANUS-A

Appendix A: IVA-meddelande 225 "Jord- och bergdynamik"

Appendix B: Vägverkets rapport "Definition av bearbetbarhet för olika jordar".

FÖRORD

En ökad tillämpning av dynamiska undersökningsmetoder förutsätter ökad tvärvetenskaplig kunskap för tolkning av dynamiska parametrar. Föreliggande rapport är resultat av en förstudie med syfte att sammanställa olika förutsättningar för ett tekniskt utnyttjande av jord- och bergdynamik. Målsättningen har varit att belysa olika samband mellan dynamiska parametrar och andra materialegenskaper ur empirisk och teoretisk synpunkt.

Det utförda arbetet baseras till stor del på erfarenheter gjorda i samarbete med Heinz Thurner, Geodynamik AB, Laszlo Gereben, Jacobson & Widmark och David Weiner vid Institutionen för Jord- och Bergmekanik, KTH. Vissa delar av det teoretiska projektarbetet har utförts som uppdrag av Anders Bodare, Teknikum i Uppsala, Håkan Johansson vid Institutionen för Reglerteknik, KTH samt Karl Markström vid Institutionen för Hållfasthetslära, KTH. Utskrift av manus har gjorts av Eva Gustafson Skrivtjänst.

Ett varmt tack riktas till samtliga medverkande och framför allt till Bengt Broms och personalen vid Institutionen för Jord- och Bergmekanik, KTH, som möjliggjort genomförandet av detta arbete.

Arbetet har finansierats med BFR-anslag 780851-8 "Samband mellan dynamiska parametrar och andra materialegenskaper - förstudie".

Stockholm i augusti 1979

Björn Svedinger

SAMMANFATTNING

En ökad tillämpning av dynamiska undersökningsmetoder förutsätter ökad kunskap för tolkning av erhållna resultat. Den förstudie har syftat till att belysa olika samband mellan dynamiska parametrar och andra materialegenskaper samt att sammanställa olika förutsättningar för ett tekniskt utnyttjande av jord- och bergdynamik.

Det arbete som redovisas i rapporten har omfattat en genomgång av resultat från fältförsök med seismiska undersökningsmetoder och olika metoder för packningskontroll. En genomgång av olika beräkningsmetoder har utförts för att söka erhålla en teoretisk underbyggnad för upptäckta empiriska samband. Dessutom har en enklare simulering utförts för att studera olika möjligheter att åskådliggöra dynamiska förlopp. I nära anslutning till projektet har arbetet även omfattat en genomgång av mätförfarande och olika tillämpningsområden. Detta arbete är bl a dokumenterat i IVA-meddelande 225 "Jord- och bergdynamik", som därför bifogas i sin helhet.

Rapporten är också ett underlag för fortsatt forskning och tillämpning av dynamiska undersökningsmetoder. Fortsatt dokumentation av parametersamband förefaller speciellt intressant för tillämpning i samband med

- materialinventering, t ex betongballast och material för vägar och jorddammar,
- massförflyttning, t ex schaktbarhet för bedömning av maskinval och kapacitet,
- resultatkontroll, t ex kontroll av packning i friktionsjord och sprängsten.

Dessutom skulle det vara av stort intresse att studera möjligheten att använda dynamiska undersökningsmetoder för bedömning av energilagring i mark genom en indirekt bestämning av vatteninnehåll och permeabilitet.

1. INLEDNING

Intresset för vibrationsfrågor har ökat under senare år. Skador och olägenheter förorsakas bl a av jordbävningar och trafik samt vibrationer från maskiner och byggverksamhet av olika slag. Produktionsmetoder som utnyttjar vibrationer och stötar har utvecklats för bl a packning, pålning och sprängning. Modern mät- och analysteknik har möjliggjort tillämpning av nya sk dynamiska metoder för undersökning och resultatkontroll i olika sammanhang.

Dynamiska problemställningar är som regel komplicerade med avseende på verkande belastningar och aktuella materialegenskaper. Lösning av vibrationsproblem eller tillämpning av dynamiska undersökningsmetoder förutsätter därför en viss tvärvetenskaplig kunskap inom bl a mekanik/svängningslära, mät- och analysteknik, geofysik samt byggnadsteknik/geoteknik. En fullständig teoretisk behandling är som regel mycket avancerad och utanför ramen för nuvarande utbildning inom väg- och vattenbyggnad.

Teori, laboratorieförsök och praktiska försök i fält visar att det finns tydliga samband mellan materialegenskaper, geometri och rörelser vid dynamiska förlopp. Materialegenskaperna kan avse materialets sammansättning, någon eller några allmänna fysikaliska egenskaper eller någon speciell teknisk parameter. Av allmänt intresse är att förstå bakgrunden till olika parametersamband för att i enskilda praktiska fall kunna avgöra vilka parametrar som är intressanta och vilken detaljeringsgrad som är relevant.

Arbetsgrupp 4 "Jord- och bergdynamik" inom IVA:s kommitté för vibrationsfrågor har sammanställt en informationskrift vars syfte är att översiktligt beskriva de problemställningar som berörs av jord- och bergmaterials dynamiska egenskaper. I rapporten, som här bifogas i sin helhet (Appendix A) presenteras också en enkel svängningsmodell samt några ofta förekommande definitioner och grundläggande begrepp.

Av IVA:s informationskrift framgår t ex att resultaten från avancerade seismiska undersökningsmetoder kan användas för bestämning av undergrundens dynamiska egenskaper och ger dessutom information om

- jord- och berglagerindelning
- jordarter och blockhalt
- grundvattennivå
- portal, lagringstäthet, packningsgrad
- sprickighet och krosszoner i berg

Resultaten kan även användas för bedömning av olika tekniska egenskaper såsom deformationsmodul, packningsgrad och schaktbarhet. I Vägverkets rapport "Definition av bearbetbarhet för olika jordar", som här bifogas i sin helhet (Appen-

dix B), definieras begreppet schaktbarhet samt några inverkande materialegenskaper.

Föreliggande rapport är resultat av en förstudie och syftar till att belysa olika samband mellan dynamiska parametrar och övriga materialegenskaper ur empirisk och teoretisk synpunkt. Arbetet har inkluderat en enklare simulering för att studera olika möjligheter att åskådliggöra dynamiska förlopp. Resultaten är ett underlag för planering av fortsatt forskning och tillämpning av dynamiska undersökningsmetoder.

Avsikten är att i ett senare skede speciellt studera klassificering av friktionsjord i samband med bl a

- materialval: Undersökning av materialslag för t ex betongballast och jorddammar
- massförflyttning: Schaktbarhet och bärighet för bedömning av kapaciteter för olika maskinresurser
- resultatkontroll: Packningskontroll vid t ex jorddammsarbeten
- värmelagring i mark: Undersökning av vatteninnehåll och permeabilitet för bedömning av energilagringmöjligheter.

2. EMPIRISKA PARAMETERSAMBAND

Praktiskt verksamma tekniker har för olika ändamål utvecklat empiriska metoder som baseras på mätningar av dynamiska förlopp. Utvecklingen inom mät- och analystekniken och marknadsföringen av olika mer eller mindre avancerade signalanalysinstrument har på ett revolutionerande sätt ökat dessa möjligheter för tekniker med olika bakgrund. Dynamiska parametrar som på ett enkelt sätt kan erhållas ur vibrationsmätningar och signalanalys används därför i ökad utsträckning för att söka tolka olika fysikaliska och tekniska materialegenskaper.

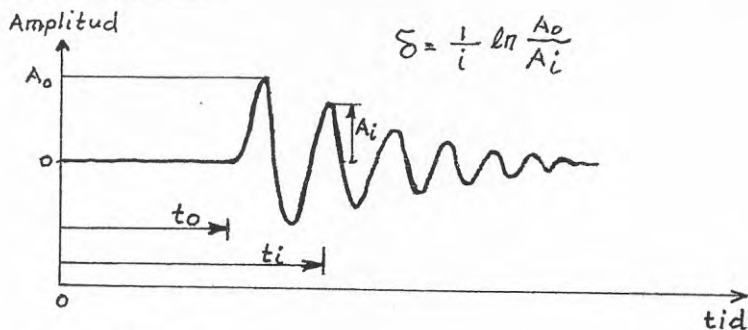
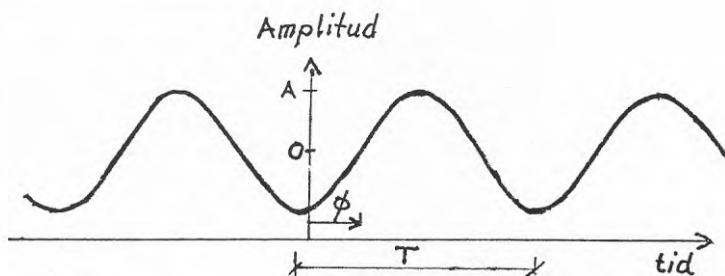
De samband jag har för avsikt att belysa baserar sig på studium av markytans rörelse vid dynamisk belastning och studium av elastisk vågutbredning. Praktiska tillämpningar av empiriska samband avser bl a packningskontroll, seismiska undersökningar för olika ändamål samt laboratoriemetoder för undersökning av deformationsegenskaper. I detta avsnitt presenteras några illustrativa exempel men först en kortfattad presentation av några vanliga dynamiska parametrar.

2.1 Dynamiska parametrar

Den mätsignal som erhålles vid en dynamisk undersökning är i princip transient (puls) eller stationär. Några av de parametrar som ofta används för att definiera en signal eller samband mellan signaler beskrivs nedan. För utförande av olika dynamiska undersökningar, t ex olika seismiska metoder, fallviktsförsök och laboratoriemetoder hänvisas till referenslitteraturen.

En registrerad signal från t ex en seismisk undersökning innehåller som regel ett stort antal direkta, reflekterade och refrakterade tryck- och skjuvvågor. Vid studium av signalparametrar och jämförelse mellan olika registreringspunkter är det därför nödvändigt att de olika vågtyperna är separerade och att en jämförelse avser identiskt samma vågtyp. Separeringen kan ske med hjälp av frekvensanalys och studium av det tredimensionella svängningsplanet, s k "partikelrörelse". Partikelrörelsen kan också för bl a reflekterade tryckvågor ge direkt information om undergrundens geometri.

Är en signal fysikaliskt särskild med avseende på vågtyp och svängningsplan kan en definition avse någon av de parametrar som visas i figur 1. Vissa signalparametrar, som t ex frekvensinnehåll och logaritmiskt dekrement kan användas direkt för bedömning av materialegenskaper. Andra parametrar måste jämföras med exciteringen eller en annan mätpunkt och ger då information om amplitudsamband och utbredningshastighet. (Se även appendix A).

Transient vågrörelse:Stationär vågrörelse

- t_0 = begynnelse- eller ankomsttidpunkt
 t_i = tidpunkt för vågtopp i
 ϕ = relativt fasläge
 A_i = amplitud för vågtopp i
 A = amplitud vid harmonisk rörelse (=1/2 "peak to peak")
 δ = logaritmiskt dekrement
 T = periodtid
 f = frekvens (period/sek. Herz)
 ω = vinkelfrekvens ($2\pi f$, radianer/sek)

Figur 1. Definition av några vanliga signalparametrar

Jämförelsen mellan amplituder kan vara tvetydig beroende på vågtyp och geometrisk dämpning. Vid studium av vågutbredning brukar man tala om absorbtion av energi och ange en absorbtionskoefficient. Motsvarande jämförelse vid t ex påtvingad svängning av ett fundament brukar ofta anges med en s_k förstöringsfaktor.

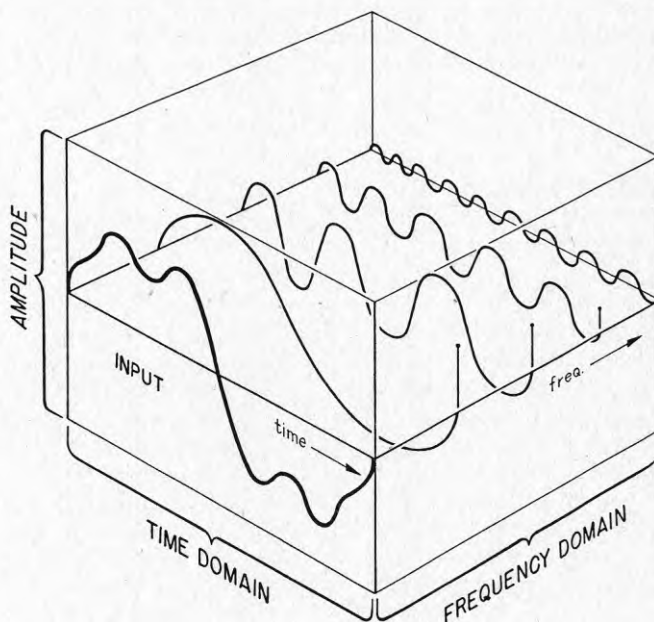
Beräkning av hastighet görs genom att för olika avstånd bestämma tidsskillnaden mellan identiska signalparametrar. Beträffande olika hastigheter verkar förvirringen bland forskare närmast total och det är mycket viktigt att klart ange vilka parametersamband, dvs vilken hastighet som avses:

| | | |
|----------|---------------------|-----------------|
| c_{vf} | = vågfronthastighet | (Δt_0) |
| c_{vt} | = vågtoppshastighet | (Δt_i) |
| c_f | = fashastighet | $(\Delta \phi)$ |
| c_g | = grupphastighet | |
| c_s | = signalhastighet | |

Grupphastigheten motsvarar en energiutbredningshastighet. Signalhastigheten baseras på en definition av vågpaketets tyngdpunktrörelse, t ex med hjälp av korrelationsanalys, se nedan. De olika hastigheter och deras betydelse beskrivs ytterligare i följande avsnitt om teoretiska samband.

Som regel är registreringar av transienta signaler från t ex seismiska undersökningar dispersiva, dvs frekvensen är ej konstant. Vid dispersiva signaler kan det vara lämpligt att definiera en envelop till signalen och ange dess dominerande frekvens samt tidpunkt för envelopens max.värde och tyngdpunkt.

Frekvensanalys utförs för att bestämma vilka frekvenser som förekommer i en signal. I princip utförs en transformation från ett tidplan där signalen avbildas som funktion av tid till ett frekvensplan där signalen avbildas som funktion av frekvens och fas enligt nedanstående figur.



*Signal Analysis - Given the Input,
to Find the Frequency Components.*

Figur 2. Illustration av frekvensanalys

Jämförelse av två signaler kan utföras i tid- eller frekvensplan med hjälp av olika analysrutiner enligt illustration i figur 3:

Korrelationsanalys utförs i tidplanet för att söka och bestämma likheter mellan två signaler samt tid-differensen mellan dessa likheter. Resultatet redovisas i ett diagram som visar en relativ överensstämmelse vid olika tidsförskjutning (τ) enligt exempel i figur 3.

Konjugatmultiplikation utförs i frekvensplanet för att t ex studera gemensamma frekvenser och fasrelationer mellan två signaler. Med polära koordinater erhålles enligt figur 3 ett beloppmaximum vid en gemensam frekvens och motsvarande fasläge anger skillnaden i fas mellan de två signalerna.

Överförings- och koherensfunktion är speciella rutiner för beskrivning av vad som händer med en signal vid passage genom ett system. I rutinerna ingår både frekvensanalys och konjugatmultiplikation.

Exempel:

| | Insignal | | System | | Utsignal |
|---------------|----------|---------------|--------|---------------|----------|
| TIDPLAN | $x(t)$ | \rightarrow | $h(t)$ | \rightarrow | $y(t)$ |
| FREKVENSPPLAN | $X(f)$ | \rightarrow | $H(f)$ | \rightarrow | $Y(f)$ |

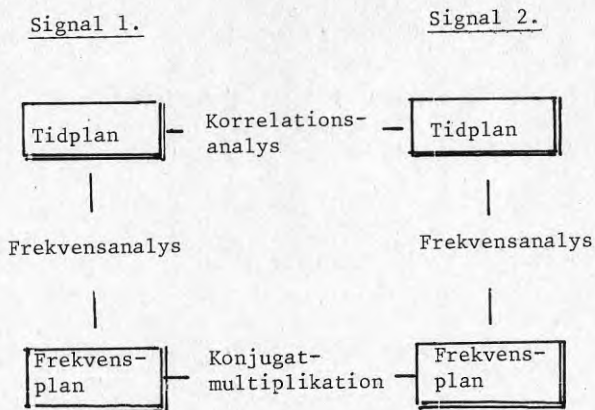
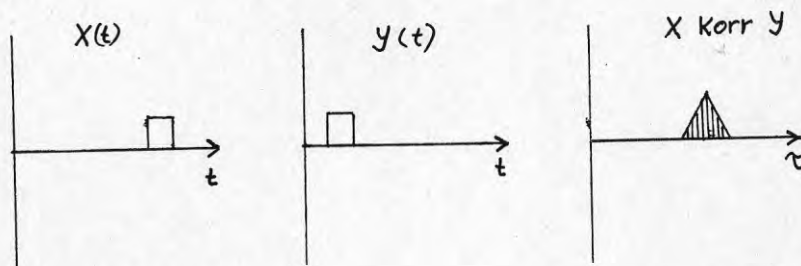
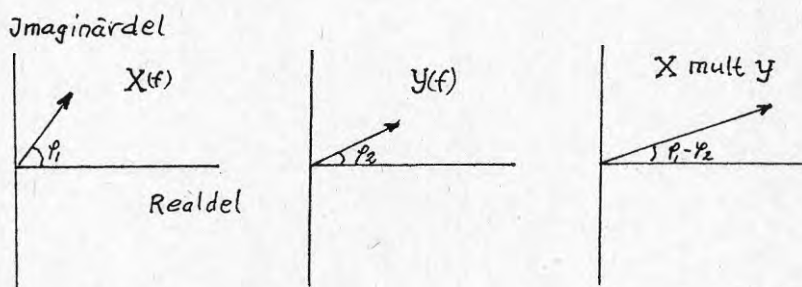
Överföringsfunktionen är en matematisk beskrivning av ett system och kan användas för att definiera förhållandet mellan två signaler. Överföringsfunktionen anger förstärkning av olika frekvenser och erhålles i exemplet ovan som

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

Med polära koordinater erhålles som belopp systemets förstärkning och som fas systemets fasvridning vid respektive frekvens.

Koherensfunktionen anger hur mycket av utsignalen som verkligen beror av insignalen och kan användas för att bedöma överföringsfunktionens tillförlitlighet. Är koherensen < 1 är systemet antingen olinjärt eller också finns mer än en insignal i systemet. Koherensfunktionen är således statistisk och saknar innebörd vid enstaka signaler.

Omfattningen av den utrustning som erfordras för bestämning av dynamiska parametrar kan synas avskräckande men används rutinmässigt vid bl a reflektionsseismiska undersökningar för olja- kol- och malmprospektering. Pracla Seismos i Tyskland utnyttjar sedan länge en utrustning för digital registrering av 48 kanaler. Vid excitering med 6-110 Hz, s k "Vibroseis", används korrelationsanalys för bestämning av utbredningshastighet. Resultatet redovisas med mycket avancerad plottning med valfri amplitud- och frekvensåtergivning.

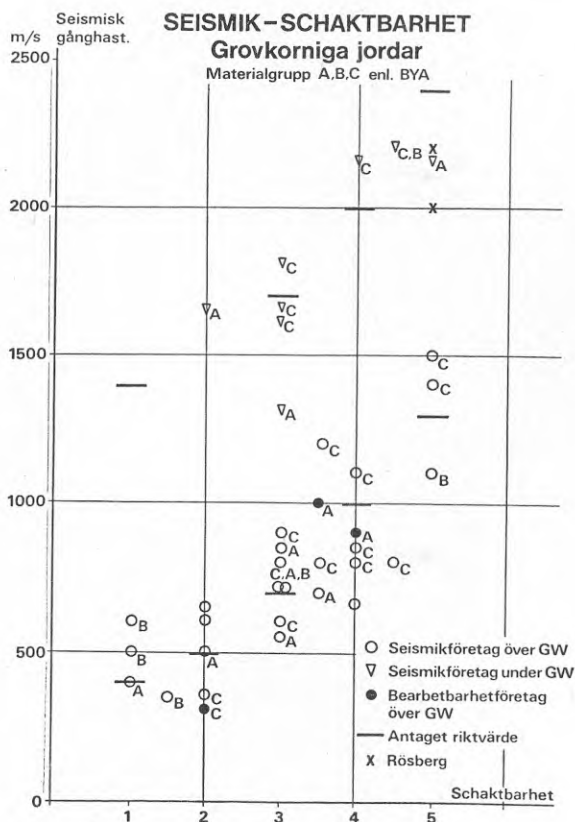
Korrelationsanalys:Konjugatmultiplikation:

Figur 3. Illustration av olika analysmetoder för bestämning av dynamiska parametrar

2.2 Exempel på empiriska samband

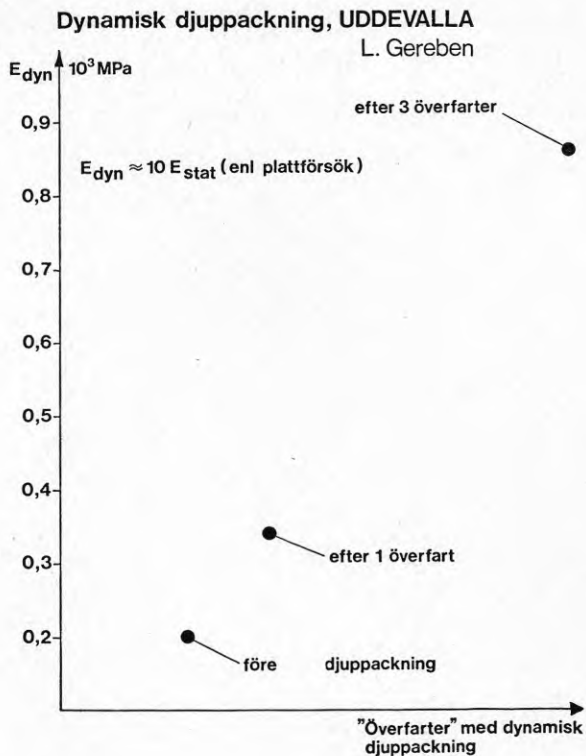
I detta avsnitt presenteras en sammanställning av olika empiriska samband från fältförsök, som idag utnyttjas för bedömning av jordmaterials egenskaper. Empiriska samband från laboratorieförsök med resonanspelarmetoden för bedömning av deformationsegenskaper är väl sammanställda i referenslitteraturen.

Seismiska undersökningar har utförts under lång tid för att bedöma undergrundens geometri. I Vägverkets utredning om seismiska undersökningar vid vägprojektering studerades även samband mellan tryckvågens hastighet och schaktbarhet. En sammanställning av resultat från försök i grovkorniga jordar visas i figur 4. Som framgår av figuren har bl a grundvatten avgörande inverkan på resultatet.



Figur 4. Empiriska samband mellan tryckvågens utbredningshastighet och schaktbarhet enligt Vägverkets utredning angående seismiska undersökningar vid vägprojektering (1976).

Det är också möjligt att bestämma utbredningshastigheten för andra vågtyper. I Uddevalla tillämpade Jacobson & Widmark en s k "Rayleighvågsmetod" för kontroll av packningsarbeten. Metoden innebär att en deformationsmodul (E_{dyn}) beräknas med hjälp av Rayleighvågens utbredningshastighet. Exempel på försöksresultat presenteras i figur 5.



Figur 5. Tillämpning av "Rayleighvågsmetoden" för kontroll av packningsarbete i Uddevalla. Fyllningen bestod av sprängsten, som packades med "dynamisk djuppackning". (Jacobson & Widmark, 1976, opubl.)

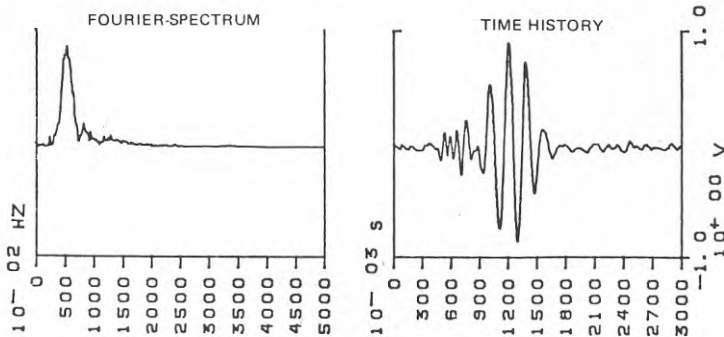
I BFR-rapport "Dynamiska undersökningsmetoder för insitu-bestämning av jordars fysikaliska egenskaper" presenteras olika tillämpningar som baseras på en analys av hela svängningsrörelsen bl a avseende frekvensinnehåll. En sammanställning av resultaten presenteras i figur 6. Av speciellt intresse är att grundvatten inte påverkar skjuvvågens utbredningshastighet, vilket ger möjlighet att särskilja en grundvattenyta från en gräns mellan lösa och fastare jordlager. Även frekvensen hos den transienta vågrörelsen beror av materialet.

Tabell. Hastigheter och frekvenser för transversell och longitudinell våg.

| Material | P-våg | | S-våg | | Dynamisk G-modul MPa | Dynamisk E-modul Mpa |
|--|---------------|-------------|---------------|-------------|----------------------|----------------------|
| | hastighet m/s | frekvens Hz | hastighet m/s | frekvens Hz | | |
| Lera (Skå-Edeby) | 1400 | 40-60 | 40 | 6-8 | 2 | 6 |
| Morän (Örebro) | 750 | 30-50 | -- | -- | -- | -- |
| Ändmorän (Skövde) | 700 | 50-70 | 310 | 30 | 195 | 510 |
| Ändmorän under GW | 1400 | 50-80 | 300 | 30 | 190 | 500 |
| Bottenmorän under GW (Skövde) | 2000 | 60-90 | 770 | 30-40 | 1300 | 3400 |
| Morän (Stöde) | 1000 | 80-100 | -- | -- | -- | -- |
| Sprängsten ¹ (Uddevalle) | 600-900 | -- | 260 | 15-20 | 120 | 320 |
| Packad sprängsten ¹ (Uddevalle) | 900-1300 | -- | 540 | 15-20 | 560 | 1500 |
| Grusig sand (Budapest) | 400 | -- | 220 | 30-40 | 80 | 220 |
| Sandigt grus under GW (Budapest) | 1500 | -- | 330 | 40 | 170 | 460 |
| Berg (Uddevalle) ² | 5100 | -- | 2200 | 25 | 14000 | 34000 |

¹ Exciteringskälla var fallvikt, ca 300 kg.

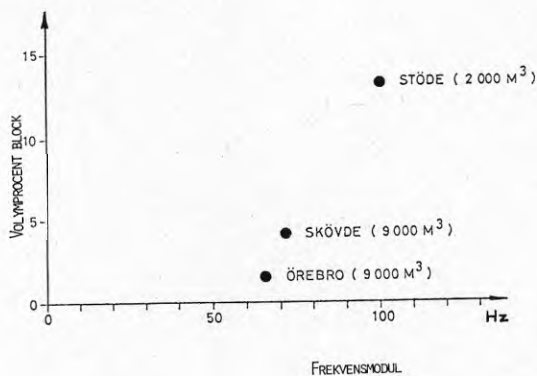
² Uppmätt vid dynamisk djuppackning varvid extremt låga frekvenser brukar förekomma.



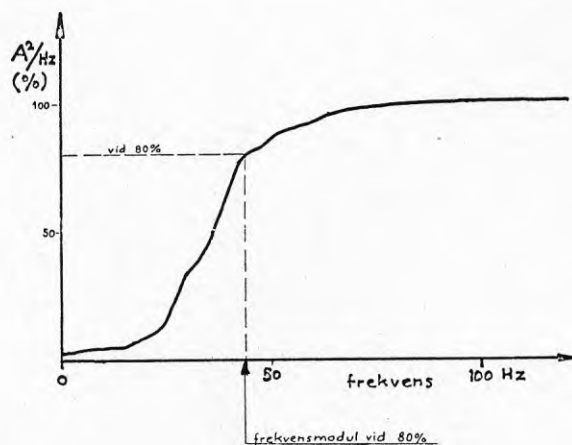
Exempel på registrerade analoga svängningsförlopp och utförd frekvensutvärdering.

Figur 6. Exempel på resultat från analys av hela svängningsförloppet vid en seismisk undersökning. (BFR-rapport "Dynamiska undersökningsmetoder för insitubestämning av jordars fysikaliska egenskaper, Laszlo Gereben).

I nedanstående figur 7 presenteras en sammanställning av resultatet från ett utvecklingsprojekt vid Vägverket under ledning av Heinz Thurner. Signaler från seismiska undersökningar har analyserats med avseende på frekvensinnehåll och klassificerats genom en s k "frekvensmodul". Denna har jämförts med jordmaterialets blockhalt, som bestämts under schaktningsarbete i 5 vägsärningar.



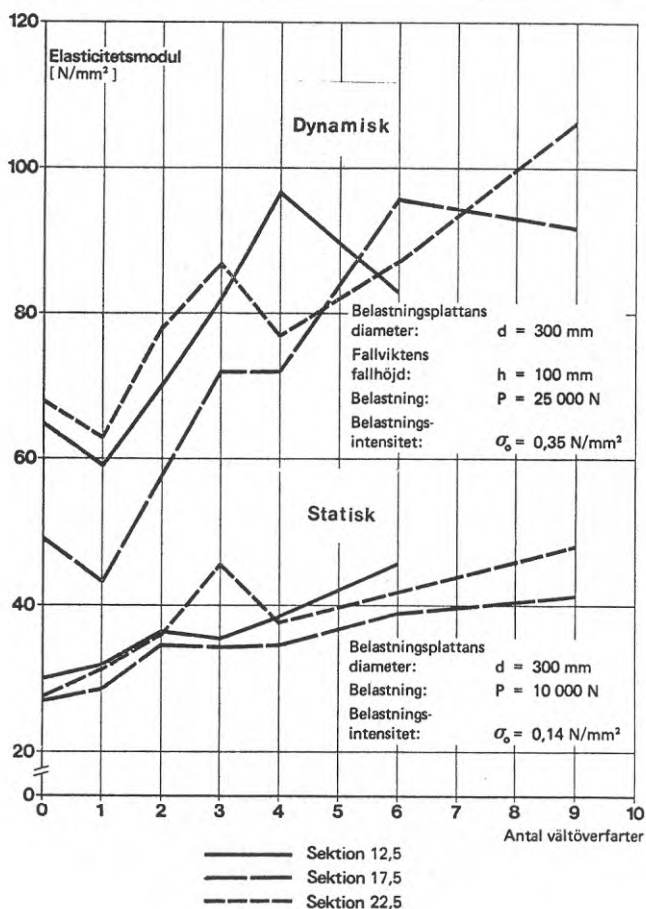
Effektspektrum
efter integrering



Figur 7. Sammanställning av Vägverkets undersökning av samband mellan blockhalt och frekvensinnehåll i signaler från seismiska undersökningar, samt definition av begreppet "frekvensmodul". (BFR-rapport se figur 6)

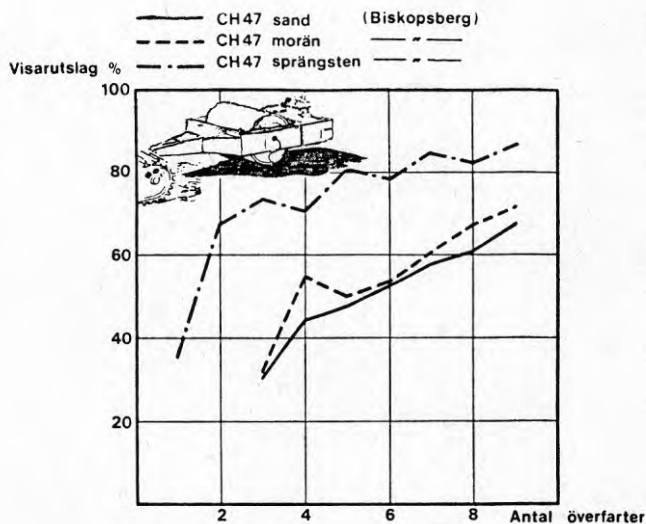
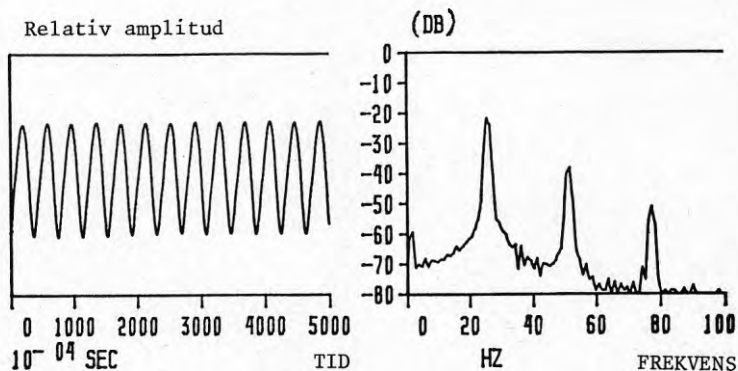
En metod att bedöma styvheten hos en markyta är fallvikt-försök. Metoden baseras på en bestämning av fallviktens deformation under stöten mot markytan med hjälp av accelerations- eller hastighetsgivare, vars signal sedan integreras till en rörelse. Resultaten visar att rörelsen minskar med ökad styvhet men att beräknad deformationsmodul är större än motsvarande modul vid statisk belastning (figur 8). Försök har också gjorts där man studerat tiden för fallviktens återstunds mot underlaget.

| | | |
|--|--|--------------------------------------|
| VV-projekt: Processtyrning av vibrerande packningsredskap | Packningsförsök 1974 på provvyta i Åkersberga | VTI Vägavdelningen Sven Engman |
|--|--|--------------------------------------|



Figur 8. Resultat från jämförande försök med fallvikt och statisk belastning för bestämning av deformationsmodul. (Packningsförsök i Åkersberga Vägverket 1976).

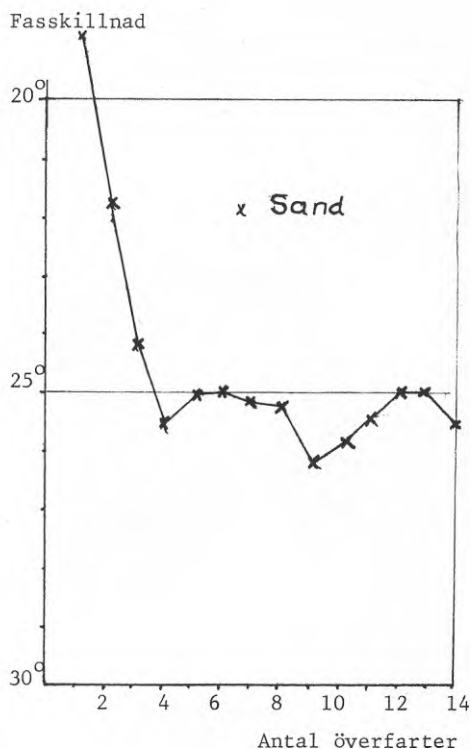
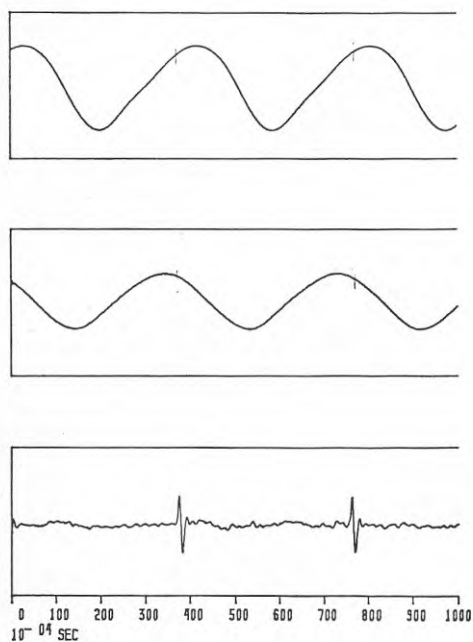
Packningskontroll sker traditionellt med hjälp av densitetsbestämningar och jämförelse med en standardiserad laboratoriepackning. Aktuella försök visar att det finns möjlighet utföra packningskontroll genom att analysera rörelsen hos en vibrerande vält. Geodynamik AB har i samarbete med Dynapac Maskin AB utvecklat en Compactometer, där vältens rörelse registreras med hjälp av en accelerometer och utvärdering sker av förhållandet mellan 1:a överton och grundton. Resultatet har visat sig ge ett relativt mått på det packade lagrets styvhet. Compactometern har rönt ett stort intresse, eftersom kontrollarbetet underlättas väsentligt.



Figur 9. Compactometer: Princip för analys av överton samt ett exempel på resultat från packningsförsök. (Geodynamik AB 1976, opubl.)

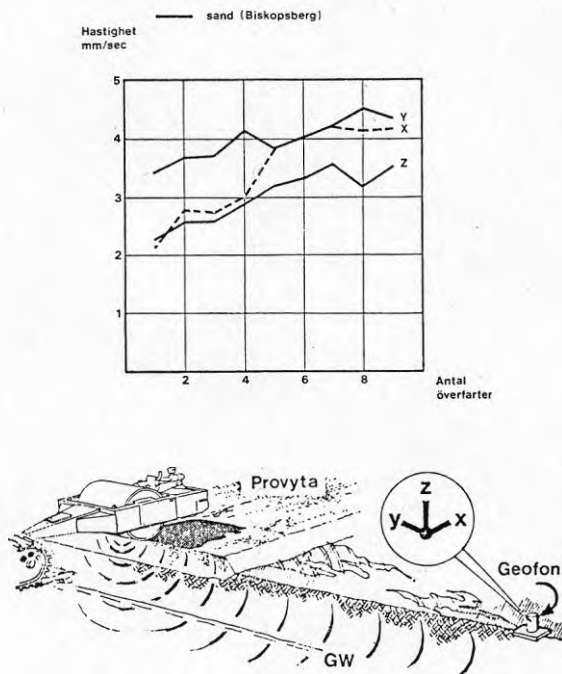
Under utvecklingsarbetet till Compactometern studerades även fasläget och ändringar av fasläget mellan exenters läge och den registrerade rörelsen (acceleration). Resultatet visar att fasskillnaden minskar med antalet överfarter enligt figur 10.

ORIGINALSIGNAL: Z, X, EXCENTER



Figur 10. Princip för analys av fasskillnaden mellan exenterläge och registrerad rörelse (acceleration) i en vibrerande vält samt exempel på resultat från ett packningsförsök. (Geodynamik AB 1976, opubl.)

Utbredningen av vågenergi beror av geometriska förhållanden och materialegenskaper. Ett exempel på inverkan av materialegenskaper har studerats med hjälp av geofoner under packning av en grusbädd. Geofonerna var placerade utmed provytan och i figur 11 visas amplituden vid packning av sand när välten passerar en geofon som funktion av antal överfarter. Av figuren framgår bl a att speciellt skjuvvågens amplitud (x) påverkas av packningsgraden.



Figur 11. Utbredning av vågenergi under packning med vibrerande vält.

Ovanstående sammanställning av dynamiska parametersamband har gjorts för att illustrera möjligheterna för olika tillämpningar. Det är många olika parametrar som samverkar och en förståelse för deras teoretiska bakgrund är nödvändig. För att kunna vidareutveckla upptäckta samband kan enklare teoretiska modellstudier vara ett hjälpmedel.

3. TEORETISKA PARAMETERSAMBAND

Den teoretiska behandlingen av dynamiska förlopp kan vara mycket komplicerad. Exakta lösningar förutsätter som regel en avancerad analytisk matematik medan användning av olika approximativa metoder fordrar erfarenhet för val av relevanta parametrar och beräkningsmodeller. Den teoretiska behandlingen baseras på materialets deformationsegenskaper, vilket i sin tur beror av jordart, lagringstäthet, vattenhalt, spänningshistoria etc. I detta avsnitt presenteras en sammanställning av olika beräkningsmetoder. Dessutom ges exempel på några teoretiska samband mellan deformationsegenskaper och dynamiska parametrar som underbyggnad till tidigare presenterade empiriska samband.

3.1 Materialegenskaper

Ur deformationssynpunkt brukar en indelning göras i elastiska, plastiska och viskösa material med linjära eller olinjära egenskaper. Den teoretiska analysen avser samband mellan deformationer och spänningar som för ett linjärt elastiskt material ges av Hookes lag:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)\}/E \\ \varepsilon_2 &= \{\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)\}/E \\ \varepsilon_3 &= \{\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)\}/E \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

där ε_i och σ_i är töjningen respektive spänningen i riktning i , E är materialets elasticitetsmodul och Poissons tal ν anger tvärkontraktionen. Ur E och ν kan andra elastiska konstanter härledas, såsom:

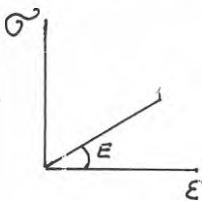
- skjuvmodul $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ($\tau = G\gamma$)
 $\left[\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \text{ och } \gamma_{\max} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \text{ insatt i (1)} \right]$
- kompressionsmodul $M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ($\sigma_1 = M\varepsilon_1$)
 $\left[\sigma_2 = \sigma_3 \text{ och } \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0 \text{ insatt i (1)} \right]$
- volymförändringsmodul $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ ($\sigma_v = K\varepsilon_v$)
 $\left[\sigma_v = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \text{ och } \varepsilon_v = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \text{ insatt i (1)} \right]$

Inom elasticitetsläran användes också ofta Lamés konstanter $\mu = G$ och $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$

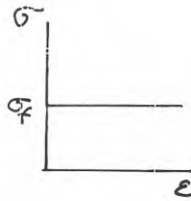
Egenskaperna hos ett linjärt elastiskt och isotropt material är entydigt bestämda av två konstanter. I plastiska material sker flytning vid ett visst spännings-deformationstillstånd var- efter deformationerna kvarstår efter avlastning. Olika teoretiska villkor och lagar för flytning resp. deformationer under flytning tillämpas såsom von Mises, Trescas, Mohr-Coulomb etc.

I viskösa material sker tidsberoende deformationer vid konstant belastning såsom konsolidering och krypning. De olika materialegenskaperna kan illustreras:

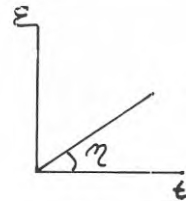
Linjära egenskaper:



Elastiskt material



Plastiskt material

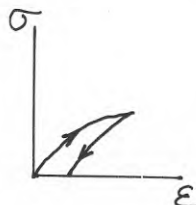


Viskö material

Icke-linjära egenskaper:



Elastiskt material



Elasto-plastiskt material



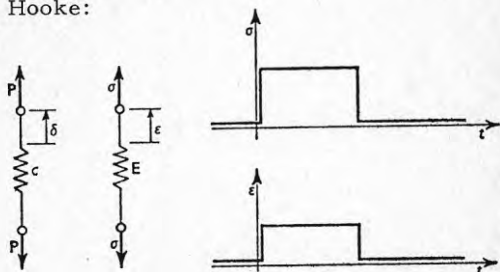
Visköst material

Ett jordmaterial har linjärt elastiska egenskaper endast vid mycket små deformationer. Vid större deformationer ($\gamma > 10^{-3}$) är egenskaperna icke linjära och elasto-plastiska, vilket försvårar den matematiska analysen. Inom geotekniken används därför olika approximativa metoder, som överför ett verkligt problem till ett som kan behandlas enligt elasticitetsläran inom ett visst spännings-deformationsområde. Samtliga jordmaterial, även friktionsjord, har dessutom mer eller mindre viskösa deformationsegenskaper.

Viskösa deformationsegenskaper studeras ofta med hjälp av reologiska modeller. En reologisk modell består av linjära eller olinjära fjädrar och viskösa dämpare. Linjära modeller kan i princip indelas i fyra grupper enligt nedan:

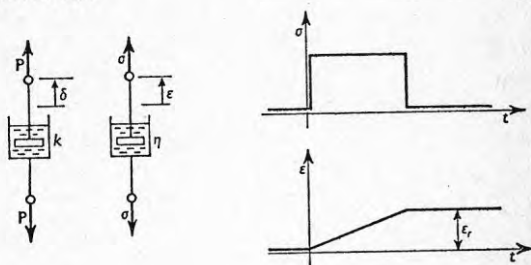
1. Elastiskt material enligt Hooke:

$$\sigma = E \epsilon$$



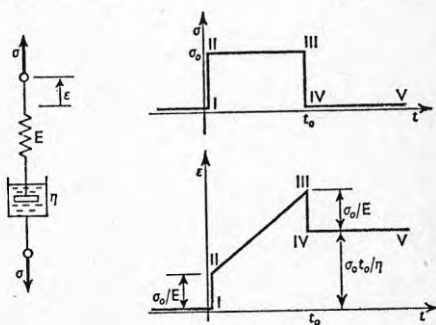
2. Visköst material enligt Newton:

$$\sigma = \eta \frac{d\epsilon}{dt} = \eta \dot{\epsilon}$$



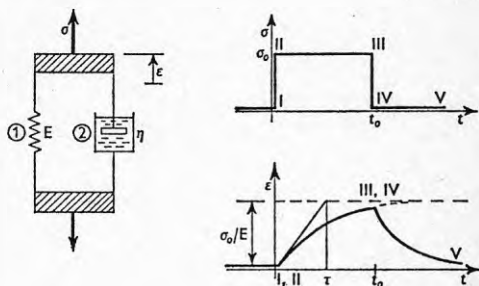
3. Viskoelastiskt material enligt Maxwell:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$$



4. Viskoelastiskt material enligt Kelvin:

$$\sigma = E\epsilon + \eta \dot{\epsilon}$$



En reologisk modell kan också karakteriseras genom att ange den momentana deformationen och deformationen efter lång tid vid statisk belastning eller genom att ange modellens överföringsfunktion. Varje modell kan beskrivas av en linjär differentialekvation av formen

$$\sigma + \sum_{k=1}^n b_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = a_0 \varepsilon + \sum_{k=1}^m a^k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k} = 0$$

som kan lösas med hjälp av Laplace-transformation:

$$\frac{\sigma(p)}{\varepsilon(p)} = Z^x(p) = \frac{a_0 + p a_1 + p^2 a_2 + \dots + p^m a_m}{1 + p b_1 + p^2 b_2 + \dots + p^n b_n}$$

där $Z^x(p)$ är överföringsfunktionen.

De fyra modellgrupperna kan således karakteriseras enligt:

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------|---------------------|----------------------------|---|--------------------------------------|
| | (Hooke) | (Newton) | (Maxwell) | (Kelvin) |
| Momentan deformation | δ | 0 | δ | 0 |
| Långtidsdeformation | δ | ∞ | ∞ | δ |
| Överföringsfunktion | $\frac{a_0}{1} = E$ | $\frac{p a_1}{1} = p \eta$ | $\frac{p a_1}{1 + p b_1} = \frac{p E \eta}{E + p \eta}$ | $\frac{a_0 + p a_1}{1} = E + p \eta$ |

I allmänhet har Hooke- och Kelvinmaterial, eller varianter av dessa inom grupp 1 resp 4 använts för att illustrera egenskaperna i jord.

3.2 Beräkningsmetoder

En beräkning av samband mellan krafter och rörelser omfattar lösandet av ett ekvationssystem avseende:

1. Jämvikt
2. Kompatibilitet (geometriska villkor)
3. Konstitutiva samband (materialegenskaper)

Den teoretiska behandlingen av ett svängningsproblem syftar

i allmänhet till att studera vågutbredning eller egenfrekvens och svängningsformer vid stationära svängningar. I detta avsnitt ges en kortfattad beskrivning av några vanliga beräkningsmetoder.

Exakt lösning

Partiella differentialekvationer kan användas för att beskriva ett kontinuerligt system. För ett linjärelastiskt isotropt material gäller generellt elastostatikens fältekvationer, som omfattar tre jämviktsekvationer, sex töjningsekvationer samt sex konstitutiva ekvationer. Således råder 15 linjära samband mellan de 15 variablerna: 6 st spänningskomponenter (σ, τ), 6 st töjningskomponenter (ϵ, γ) och 3 st förskjutningskomponenter (u). Lösningen ska uppfylla begynnelse- och randvillkor.

Elimineras spänningar och töjningar erhålles Naviers ekvation:

$$G\Delta\vec{u} + (\lambda + G) \text{grad div } \vec{u} + \vec{k} = 0 \quad (2)$$

där \vec{u} = förskjutningsvektor

\vec{k} = volymkraftvektor

Δ = Laplaceoperator: $(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2})$

grad \vec{u} = $(\frac{\partial u_1}{\partial x}; \frac{\partial u_2}{\partial y}; \frac{\partial u_3}{\partial z})^T$

div \vec{u} = $\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{\partial u_3}{\partial z}$

Utskriven har Naviers ekvation följande utseende:

$$G \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} \right) + (\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x \partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} \right) + (\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial y \partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} \right) + (\lambda + G) \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}$$

För att belysa tillämpningen av exakta beräkningsmetoder ges följande två exempel.

Exempel 1

Ur Naviers ekvation kan fashastigheten för tryck- och skjuv- våg enkelt härledas:

Tryckvåg: $u_2 = u_3 = 0$

Ansätt $u_1 = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_p} \right)$

Insättning i (2) ger:

$$c_p^2 = \frac{\lambda + 2G}{\rho} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{M}{\rho}$$

Skjuvåg: $\text{div } \underline{U} = 0$

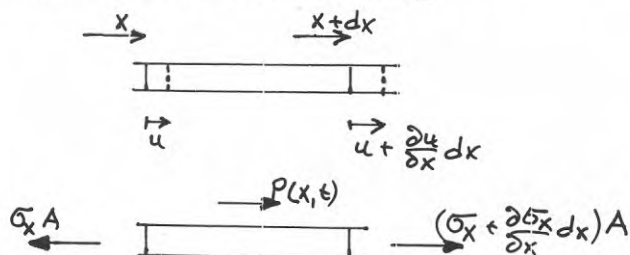
Ansätt $u_2 = A \sin \omega \left(t - \frac{y}{c_s} \right)$

Insättning i (2) ger:

$$c_s^2 = \frac{G}{\rho}$$

Exempel 2

För longitudinell svängningsrörelse i en stång, som är inspänd i ena änden erhålles följande lösning:



1. Jämviktsekvation

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx A + P(x,t) = A dx \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

2. Geometriska samband

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

3. Konstitutivt samband

$$\sigma_x = E \epsilon_x$$

Fri svängning: ($P(x,t) = 0$):

$$\Rightarrow \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{"Vågekvation"})$$

Ansätts lösningen $u(x,t) = U(x) \cdot F(t)$
i vågekvationen erhålles efter förenkling:

$$\frac{E}{\rho} \frac{d^2 U}{dx^2} \cdot \frac{1}{U} = \frac{d^2 F}{dt^2} \cdot \frac{1}{F} = \text{konstant}$$

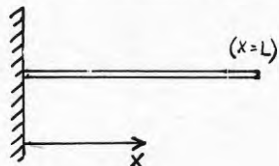
Ansätt $F(t) = A \sin(\omega t + \phi) \Rightarrow$ konstanten $= -\omega^2$

$$\Rightarrow \frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{\omega^2 U}{c_p^2} = 0 \quad (c_p^2 = \frac{E}{\rho})$$

med allmän lösning

$$U = C_1 \sin\left(\frac{\omega}{c_p} x\right) + C_2 \cos\left(\frac{\omega}{c_p} x\right)$$

där C_1 och C_2 är konstanter, som bestäms av randvillkor:



Fast ände: $U = 0$
Fri ände: $\sigma = 0 \Rightarrow \frac{dU}{dx} = 0$

$$U(0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0$$

$$\frac{dU(L)}{dx} = 0 \Rightarrow C_1 \cos\left(\frac{\omega}{c_p} L\right) = 0 \quad \left. \vphantom{\frac{dU(L)}{dx} = 0} \right\} \text{"Frekvensfunktion"}$$

Eigenfrekvensen är sådana värden på ω som uppfyller frekvensfunktionen d v s:

$$\omega_i = \frac{c_p}{L} (2i-1) \frac{\pi}{2}$$

Egensvängningsformerna bestäms av motsvarande egenfunktioner d v s:

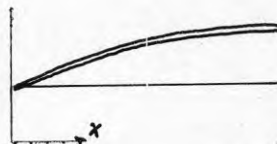
$$U_i = A_i \sin\left(\frac{x}{L} (2i-1) \frac{\pi}{2}\right)$$

Grundtonens egenfrekvens blir således:

$$\omega_1 = \frac{c_p}{L} \cdot \frac{\pi}{2}; f_1 = \frac{c_p}{4L}$$

med svängningsformen:

$$U_1 = A_1 \sin\left(\frac{x}{L} \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$



Den exakta matematiska lösningen har begränsad praktiskt tillämpning inom jordodynamiken. Vid påtvingad svängning och anisotropa material med icke linjärt elastiska egenskaper blir den matematiska behandlingen alltför komplicerad.

Finita elementmetoden, FEM

Ett kontinuerligt system kan således beskrivas av ett ekvationssystem med partiella differentialekvationer. Ekvationssystemet kan i vissa fall lösas exakt, men den analytiska lösningen är ofta svår att genomföra och ser alltid otrevligt ut för en icke matematiker. Ekvationssystemet kan också lösas med numeriska metoder.

Finita elementmetoden, FEM, för beräkning av problem inom strukturmekniken har utvecklats under senare år. Anledningen till det stora intresset för beräkningsmetoden är att man kan lösa problem med komplicerad geometri och andra "svåra" randvillkor. Finita elementmetoden kan också betraktas som en numerisk metod för lösning av komplicerade differentialekvationer, som beskriver t ex värmefflöde, grundvattenströmning, konsolideringssättningar, dynamiska och statiska deformationsproblem etc.

Den grundläggande principen i finita elementmetoden är att en kontinuerlig kropp delas upp i ett begränsat antal element som sammankopplas med varandra i knutpunkter. Ett element kan isoleras från de övriga och analyseras oberoende av de övriga elementen i strukturen. Olika slags element med olika antal knutpunkter användes och valet av elementtyp beror av det problem som skall studeras.

Variationen inom ett element av de sökta storheterna såsom töjning och spänning kan approximeras över elementet och på ett unikt sätt tecknas med hjälp av deras värden i knutpunkterna. Approximationen kallas FEM-funktion eller basfunktion och valet avgör resultatets noggrannhet. Antages t ex linjära samband mellan deformationer inom elementet blir töjningen ($\epsilon = \partial u / \partial x$) och därmed spänningen konstant, s k "constant strain"-element.

En samling av flera element, som är sammankopplade i knutpunkterna säges utgöra en diskret modell av den kontinuerliga kroppen. Dess uppträdande kan beskrivas av ett system med linjära eller icke linjära algebraiska ekvationer, som kan lösas med avseende på de sökta storheterna i knutpunkterna. Modern datorteknik gör det möjligt att snabbt lösa ekvationssystem med flera tusen obekanta.

Beräkningen av ett strukturmekaniskt problem med finita elementmetoden är en systematisering av den allmänna strukturmekniken enligt skiss på följande sida:



FEM-analysen utföres i fyra huvudsteg:

1. Idealisering av den kontinuerliga kroppen avseende geometri, belastning och materialegenskaper samt indelning i ett ändligt antal element.
2. Elementanalys med val av FEM-funktion (ζ_e), knutrörelser \underline{p}_e , knutkrafter \underline{P}_e och formulering av samband:

$$\underline{S}_e \cdot \underline{p}_e = \underline{P}_e$$

där \underline{S}_e är elementets styvhetsmatrix.

Bestämning av elementstyvheten innebär en analys av elementet vid statisk jämvikt, t ex enligt metoden för den potentiella energins minimum. Med beteckningen S^d för konstitutiva samband och töjningsmatrisen $B = D\zeta_e$ där D är en differential operator erhålles

$$\underline{S}_e = \int_V \underline{B}^T \underline{S}^d \underline{B} dV$$

3. Strukturanalysen utföres genom att addera bidraget från varje element till systemets jämviktsekvationer. Sambandet kan tecknas

$$\underline{A}^T \underline{S}_e \underline{A} \underline{p} = \underline{P}$$

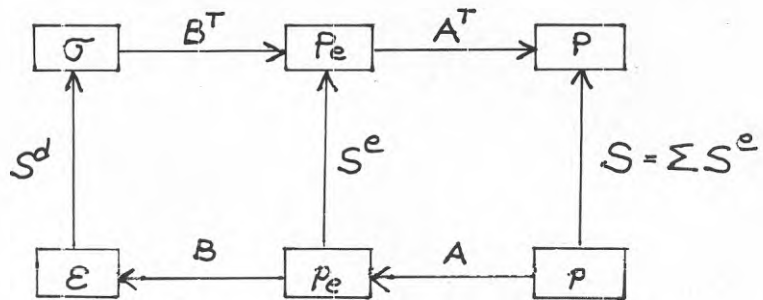
där \underline{p} och \underline{P} är strukturdeformationer resp strukturkrafter och matrisen \underline{A} kallas strukturens geometriska kompatibilitetsmatrix.

4. Lösning av ekvationssystem genom någon numerisk metod för att beräkna \underline{S}^{-1} eller motsvarande i det sökta sambandet

$$\underline{p} = \underline{S}^{-1} \underline{P}$$

När \underline{p} är känd kan sedan böjningar och spänningar i enskilda element beräknas.

Den beskrivna rutinen för FEM-analys kan illustreras schematiskt enligt nedan:



Vid analys av svängningsproblem med FEM tillkommer inverkan av masströghetskrafter och i vissa fall dämpningskrafter och ekvationssystemet erhåller formen

$$\underline{\underline{M}} \ddot{\underline{p}} + \underline{\underline{C}} \dot{\underline{p}} + \underline{\underline{S}} \underline{p} = \underline{P}(t)$$

där $\underline{\underline{M}}$ är en massmatrix och $\underline{\underline{C}}$ en dämpningsmatrix.

Vid fri svängning och odämpat system erhålles ekvationssystemet

$$\underline{\underline{M}} \ddot{\underline{p}} + \underline{\underline{S}} \underline{p} = \underline{0}$$

vars villkor för en icke trivial lösning, determinanten

$(\underline{\underline{M}}^{-1} \underline{\underline{S}} - \omega^2 \underline{I}) = \underline{0}$, ger frekvens ekvationen med egenvinkel-frekvenserna ω_i som lösning. Egenvektorerna \underline{p}_i kan därefter bestämmas som egenvärden enligt

$$\underline{\underline{M}}^{-1} \underline{\underline{S}} \underline{p}_i = \omega_i^2 \underline{p}_i$$

Egenvektorerna \underline{p}_i kan normeras ($\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$) och sammanställas i en modalmatrix $\bar{\underline{p}}_i$ som fullständigt beskriver systemet, så att vilken rörelse som helst kan skrivas som en linjärkombination av egensvängningsmoderna (jmf Fourier-analys):

$$\underline{u} = \bar{\underline{p}}_i \underline{q}$$

där \underline{q} anger i vilken utsträckning respektive mod deltar i rörelsen och bestäms av storkraften i ett ekvationssystem av formen:

$$\ddot{\underline{q}} + \bar{\underline{p}}_i^T \underline{\underline{C}} \bar{\underline{p}}_i \dot{\underline{q}} + \omega_i^2 \underline{I} \underline{q} = \bar{\underline{p}}_i^{-T} \underline{P}(t)$$

Lösning av dynamiska problem med finita elementmetoden kräver stor datorkapacitet. Vid olinjära materialegenskaper och vid påtvingade svängningar, som inte är harmoniska erfordras dessutom som regel många beräkningssteg. Metoden med modsuperponering används främst vid stationära sväng-

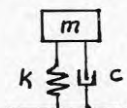
ningar. Vid stötproblem och studium av vågutbredning integreras resultat från finita elementmetoden i olika tidssteg eller också kan andra metoder tillämpas såsom finit differensmetod.

Utvecklingen av program pågår bl a med avseende på jordbävningsspekter, men tillämpningen av finita elementmetoden torde vara mest lämpad för konstruktionsberäkningar och andra konkreta problemställningar. Det är tveksamt om finita elementmetoden är ett lämpligt verktyg för en allmän studie av samband mellan dynamiska parametrar och materialegenskaper.

Lösning med hjälp av svängningsmodeller

Lösning med hjälp av svängningsmodeller innebär att problemet överförs till ett diskret system med element bestående av punktmassor, (m), fjädrar (k) och dämpare (c) på motsvarande sätt som tidigare presenterade reologiska materialmodeller. Modellerna kan göras mer eller mindre komplicerade med en eller flera frihetsgrader.

En svängningsmodell kan beskrivas av ett system med ordinära differentialekvationer som kan lösas analytiskt eller numeriskt. För ett system med en frihetsgrad erhålles följande:



$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = P(t)$$

Fri svängning ($P(t) = 0$):

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = 0$$

$$\text{Ansätt } x = A e^{\beta t}$$

$$m\beta^2 + c\beta + k = 0$$

$$\beta = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

För $c^2 - 4mk \geq 0$ erhålles reella rötter som representerar svängningen vid $s = k$ kritisk respektive överdämpat system. Med $c^2 - 4mk < 0$ erhålles imaginära rötter som representerar en svängning vars rörelse kan skrivas

$$x = e^{-\frac{c}{2m}t} A_1 \sin(\omega_d t) + A_2 \cos(\omega_d t)$$

där $\omega_d = \frac{\sqrt{4mk - c^2}}{2m}$ anger egenvinkelfrekvensen. Med beteckningen D för relativ dämpning

$$D = \frac{c}{c_{\text{krit}}} = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}}$$

erhålles

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot \sqrt{1-D^2} = \omega_0 \cdot \sqrt{1-D^2}$$

där ω_0 anger egenvinkelfrekvensen vid odämpad svängning.

Svängningens avklingning bestäms av exponenten

$$\frac{c}{2m} = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_0 D$$

varför D kan bestämmas ur ett registrerat förlopp genom att mäta amplituden hos efter varandra följande svängningstoppar. Det s k logaritmiska dekrementet definieras som

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{z_0}{z_n} = \omega_0 D T = \omega_0 D \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}$$

För små värden på D gäller:

$$\delta = 2\pi D$$

Vid påtvingad harmonisk svängning erhålles:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \sin \omega t$$

Homogen lösning (fri svängning):

$$x = e^{-\omega_0 D t} (A_1 \sin \omega_d t + A_2 \cos \omega_d t)$$

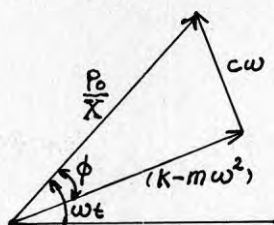
Partikulär lösning (stationär svängning):

Ansätt $x = X \sin(\omega t - \phi)$

$$\Rightarrow \frac{P_0 \sin \omega t}{X} = (K - m\omega^2) \sin(\omega t - \phi) + C\omega \cos(\omega t - \phi)$$

$$\left| \frac{P_0}{X} \right| = \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} = k \cdot \sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right\}^2 + \left(2D\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Vektorrepresentation:



$$X = \frac{P_0}{k} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2D\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{1}{\Phi}$$

Φ = förstöringsfaktor

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} = \frac{2D \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

En grafisk redovisning av förstöringsfaktor kallas responskurva och illustreras i Appendix A: "Jord- och bergdynamik" figur 2.5.

Det värde på vinkelfrekvensen som ger den största rörelsen kallas resonansvinkelfrekvens och är i det beskrivna fallet

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1-2D^2}$$

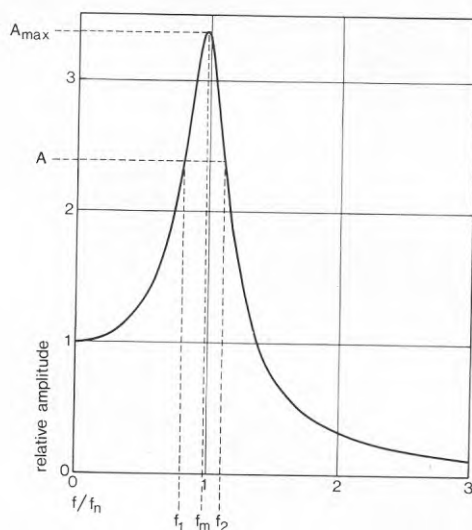
Fasskillnaden - som framgår av formeln - är direkt proportionell mot dämpningen, vilket ger förståelse för det empiriska sambandet som presenterats tidigare i figur 10.

Responskurvans utseende bestäms också av dämpningen varför denna kan bestämmas ur en uppmätt responskurva. Med beteckningar enligt figur 12 gäller:

$$\delta = \frac{\pi}{2} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_m^2} \sqrt{\frac{A^2}{A_{\max}^2 - A^2}} \frac{\sqrt{1-2D^2}}{1-D^2}$$

För små värden på D och om A väljs så att $A = 0,7 A_{\max}$ erhålles följande enkla uttryck:

$$D = \frac{1}{2} \frac{f_2 - f_1}{f_m}$$



Geometric shape of response curve for a single-degree-of-freedom system acted upon by a constant force amplitude.

Figur 12. Responskurva för bestämning av dämpning (Bo Andreasson 1979)

Diskreta svängningsmodeller med en frihetsgrad erbjuder således möjlighet att på ett enkelt sätt studera samband mellan olika parametrar och använda dessa vid analys av registrerade förlopp från olika försök. Ofta är det emellertid nödvändigt att utöka antalet frihetsgrader. Vid lösning av system med flera frihetsgrader används ofta matrisformulering:

$$\underset{\sim}{M}\ddot{\underset{\sim}{x}} + \underset{\sim}{C}\dot{\underset{\sim}{x}} + \underset{\sim}{K}\underset{\sim}{x} = \underset{\sim}{P}$$

Vid tillämpning av diskreta svängningsmodeller fordras stor erfarenhet för att från fall till fall välja relevanta värden på massa, styvhet och dämpning:

- o Massan avser teoretiskt all i fas medsvängande massa. Jordens massa försummas ofta vid t ex beräkning av maskinfundament
- o Styvheten bestäms av jordens skjuvmodul vid aktuell deformationsstorlek men hänsyn måste tas till belastningsytans storlek och placering såsom för bäddmodulbestämning vid statistiska beräkningar.
- o Dämpningen i en svängningsmodell är ett uttryck för energiförlusten och får ej förväxlas med ett jordmaterials

viskösa egenskaper. Vid t ex beräkning av maskinfundament omfattar dämpningen både materialdämpning (D 5%) och energiförlust på grund av vågutbredning (D 25-50%)

3.3 Exempel på teoretiska samband

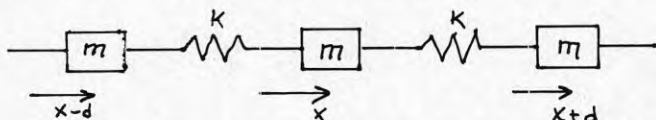
För att ge en teoretisk underbyggnad till tidigare exemplifierade empiriska samband har några representativa problemställningar analyserats analytiskt. Beräkningarna har utförts av Anders Bodare, Teknikum i Uppsala, som själv kommer att publicera ett fullständigt material. Här presenteras endast några allmänna slutsatser.

Utbredningshastigheten för tryck- och skjuvvåg för ett linjärt material härleddes tidigare till

$$c_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

För ett diskret system utan dämpning erhålles för en våg med vinkelfrekvensen ω som utbreder sig i x- riktningen:



$$m \ddot{u}(x) + k[u(x) - u(x-d)] - k[u(x+d) - u(x)] = 0$$

Ansatsen $u(x) = A e^{i(\gamma x - \omega t)}$ ger efter förenkling med $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$:

$$-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = e^{i\gamma d} - 2 + e^{-i\gamma d}$$

Realdel: $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 2(1 - \cos \gamma d)$

$$\left|\frac{\omega}{\omega_0}\right| = 2 \left| \sin \frac{\gamma d}{2} \right|$$

Fas hastighet: $c_f = \frac{\omega}{\gamma} = \omega_0 d \sin \frac{\gamma d}{2} / \frac{\gamma d}{2}$

$$c_f = c_0 \sin \frac{\gamma d}{2} / \frac{\gamma d}{2}, \quad (c_0 = \omega_0 d; \gamma = 0)$$

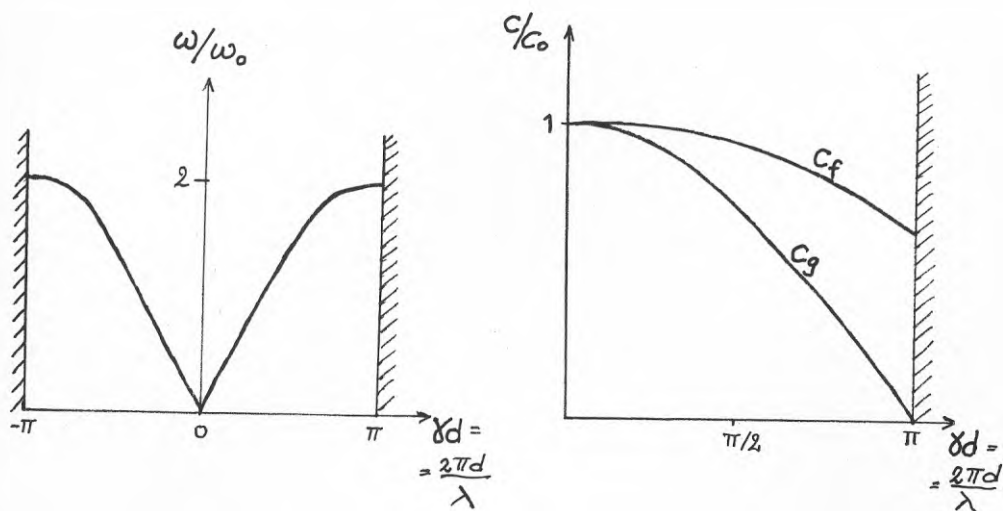
Grupp hastighet: $c_g = \frac{\partial \omega}{\partial \gamma} (= c_f - \lambda \frac{\partial c_f}{\partial \lambda})$

$$c_g = \pm c_0 \cos \frac{\gamma d}{2}$$

Våglängd $\lambda = \frac{2\pi}{\gamma}$;

$$|\gamma d| < \pi \Rightarrow d < \frac{\lambda}{2}$$

I nedanstående figur 13 har dels ω/ω_0 och dels c_f/c_0 och c_g/c_0 uppritats som funktion av γd . Ur ω/ω_0 diagrammet kan aktuellt värde på c_f avläsas som sekant genom origo och c_g som tangentens lutning i aktuell punkt. Av figuren framgår att skillnaden mellan c_f och c_g är försumbar vid stora våglängder om den fiktiva längden d är liten, d v s om massan ej representerar för stor volym. Sättes den fiktiva längden $d = 1$ erhålles vid stora våglängder $c_f = c_g = c_0 = \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, vilket motsvarar den linjärt elastiska fashastigheten.



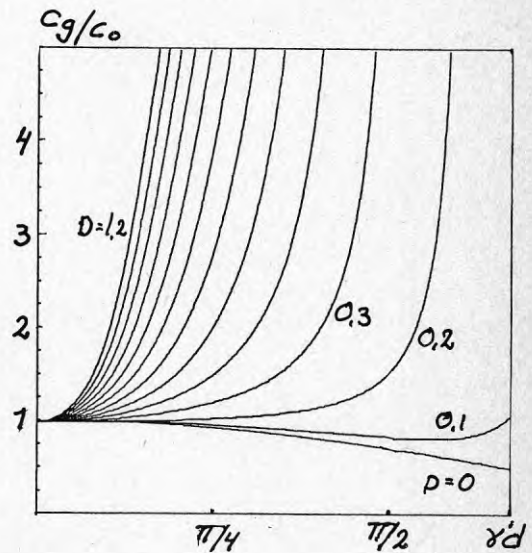
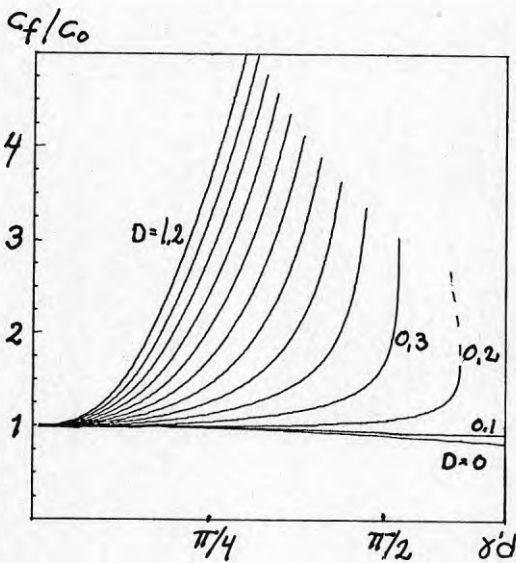
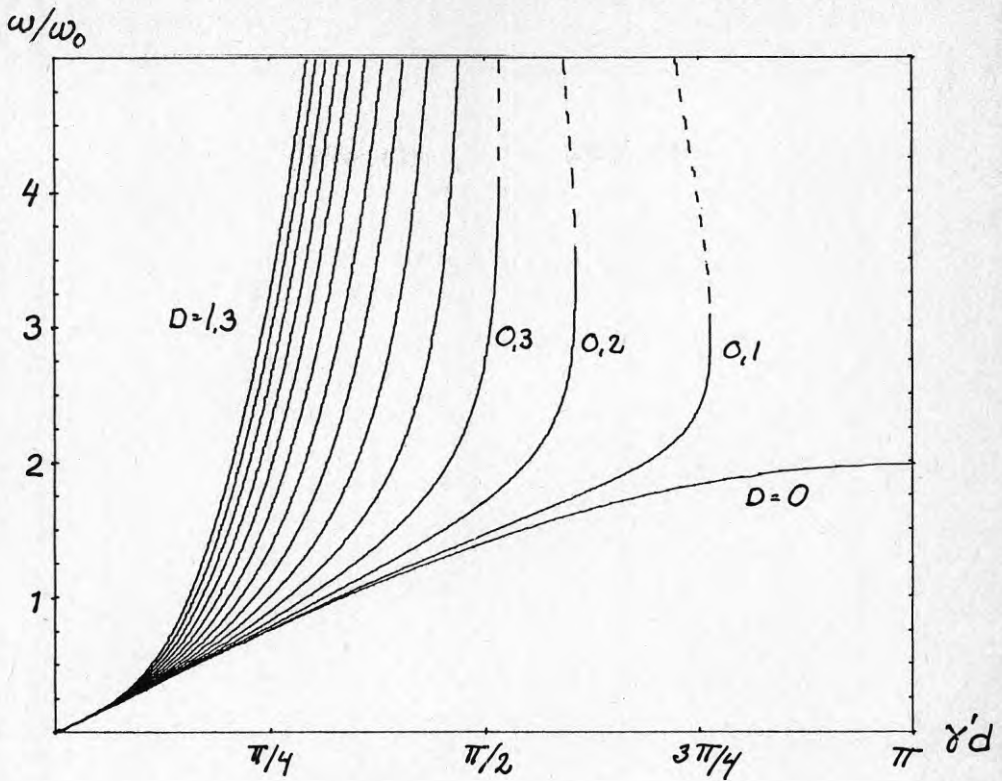
Figur 13. Fas- och gruppshastighet vid diskret system utan dämpning. (Anders Bodare 1979)

Vid diskreta system med dämpning måste γ betraktas som komplex:

$$\gamma = \gamma' + i\alpha$$

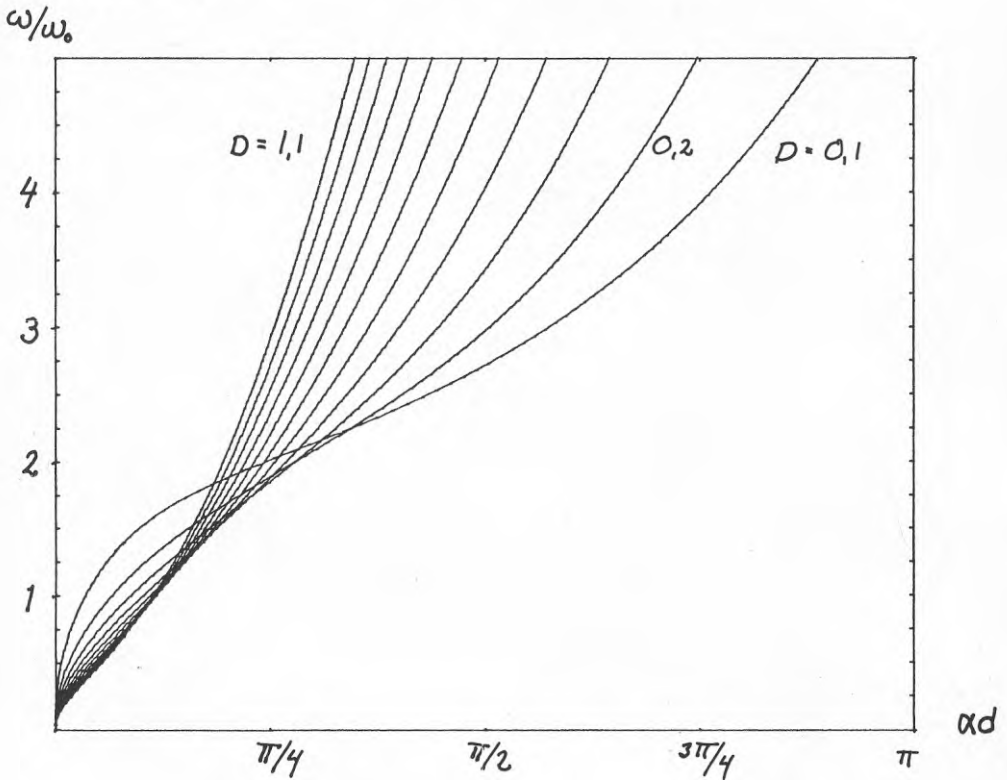
där γ' motsvarar γ i fallet utan dämpning. α är en absorptionskoefficient, som anger hur svängningsrörelsens amplitud ändras med avståndet från vibrationskällan.

I figur 14 visas fas- och gruppshastighetens beroende av dämpning. Som framgår av figuren ökar speciellt gruppshastigheten vid ökad dämpning men dess inverkan är försumbar vid liten dämpning och stor våglängd.



Figur 14. Fas- och grupphastighet vid diskreta system med dämpning. (Anders Bodare 1979)

I figur 15 visas sambandet mellan absorption och dämpning. Som framgår av figuren ökar absorptionen med ökad dämpning till $\omega/\omega_0 \approx 1$, varefter olika resonansfenomen uppstår i systemet.



Figur 15. Samband mellan absorption och dämpning vid diskreta system. (Anders Bodare 1979).

Den transienta vågrörelsen i ett linjärt elastiskt material har studerats av Graff "Wave motion in Elastic Solids" och Achenbach "Wave propagation in Elastic Solids". Vid excitering av en impuls i ett hålrum med radien a erhålles en transient vågrörelse med frekvensen ω . Resultatet visar att för en tryckvåg erhålles:

$$\omega_p = \frac{c_p}{a} \frac{\sqrt{1-2\nu}}{1-\nu}$$

För skjuvvåg erhålles motsvarande:

$$\omega_s = \frac{c_s}{a} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

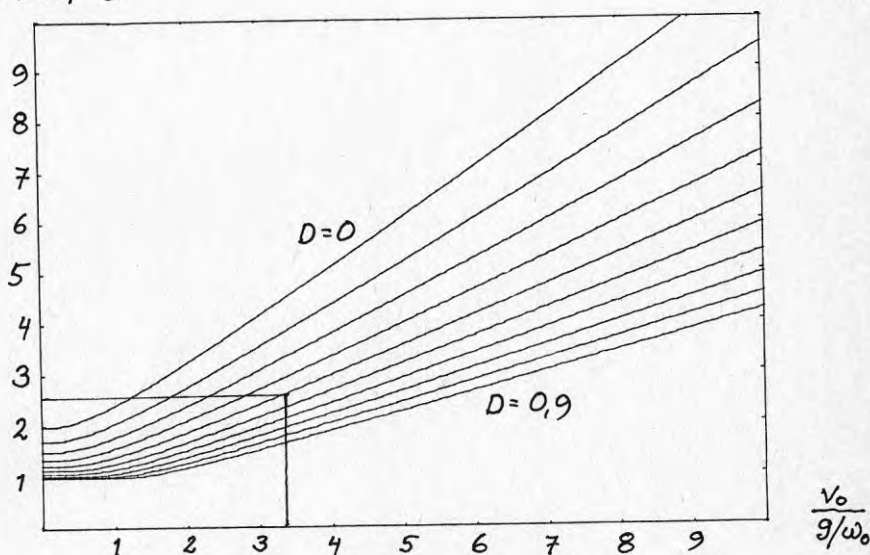
Skjuvstångens frekvens ger därför ingen ny information utöver hastigheten medan tryckstångens frekvens beror av Poissons tal i det linjärt elastiska fallet. Poissons tal kan också beräknas ur hastigheten för skjuv- och tryckstång enligt:

$$\nu = \frac{1 - 2(c_p/c_s)^2}{2 - 2(c_p/c_s)^2}$$

I uppmätta signaler från seismiska undersökningar är transientens frekvens ej konstant. Dispersionen kan bero av materialets egenskaper eller interferensfenomen på grund av exciteringens varaktighet och reflektioner i olika skikt. Det är av intresse att utföra en teoretisk analys av transient vågrörelse i anisotropa och icke elastiska material samt att speciellt studera inverkan av materialdämpning för att förklara olika dispersionsfenomen.

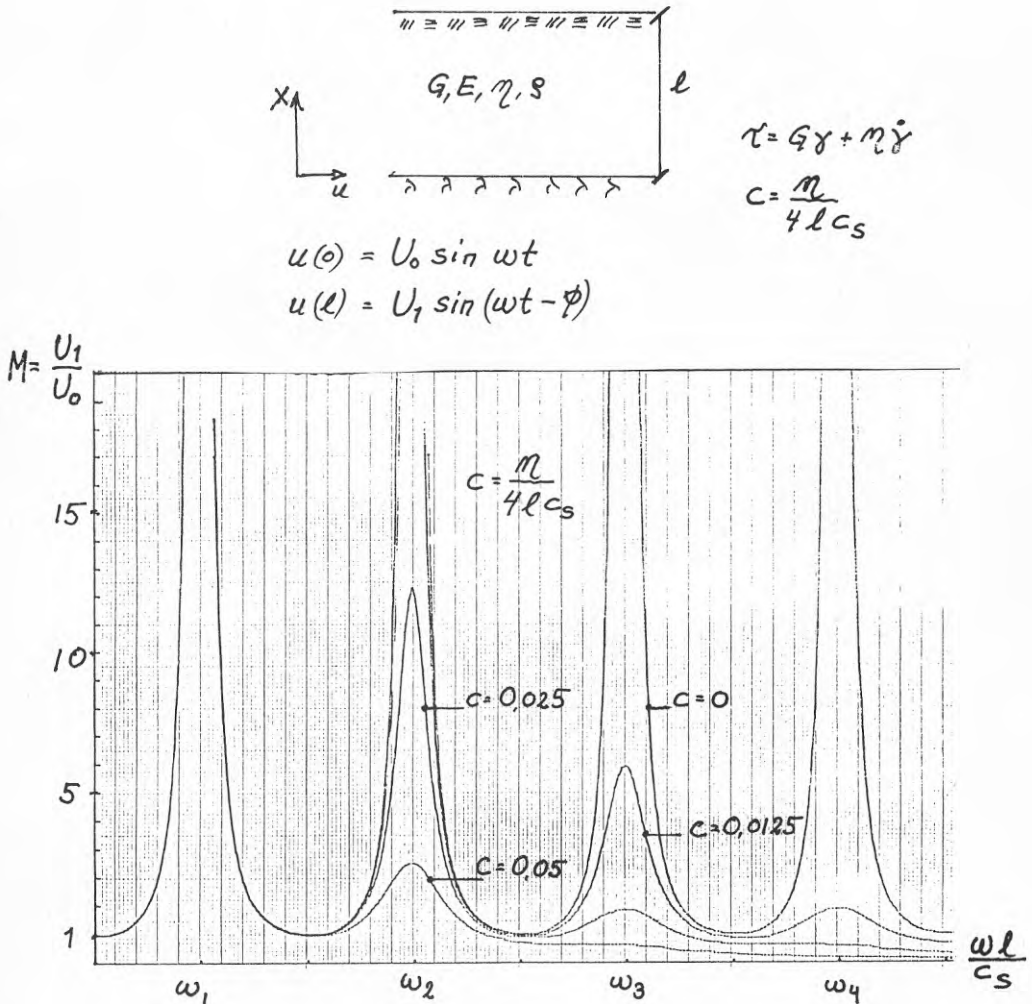
För att studera tekniken med svängningsmodeller med en frihetsgrad har den maximala rörelsen vid en stötbelastning motsvarande fallviktsförsök beräknats. Resultaten visas i figur 16 där x_s är deformationen vid statisk belastning och v_0 är fallhastigheten. Figuren visar bl a dämpningens inverkan på rörelsen, vilket delvis förklarar skillnaden mellan dynamiskt och statiskt bestämd deformationsmodul som tidigare presenterats i figur 8. I figuren har resultatet från utförd simulering enligt exempel 3 nedan inritats.

x_{max}/x_s



Figur 16. Beräkning av den maximala rörelsen vid stötbelastning av ett diskret system med en frihetsgrad. (Anders Bodare 1979)

Responskurvans utseende i figur 11 visar förhållandet vid en frihetsgrad. I en modell med flera frihetsgrader och i ett kontinuerligt system uppstår även övertoner. Anders Bodare har analyserat en modell bestående av ett jordlager med viskoelastiska egenskaper, som utsättes för en rörelse underifrån, och beräknat rörelsen i ytan. Resultatet i figur 17 visar att övertonernas amplitud ökar mycket snabbt med minskad viskositet. Exemplet belyser den tidigare beskrivna Compactometers funktion även om problemställningen ej är identisk.



Figur 17. Responskurva vid ett viskoelastiskt material.
(Anders Bodare 1979)

4. SIMULERING

Ett sätt att studera dynamiska förlopp och samband mellan olika parametrar är att utföra en simulering. Ordet simulera kommer från latinets "simulare" som betyder efterlikna eller låtsas. En matematisk simulering innebär således att man efterliknar ett system eller ett förlopp med en fysikalisk modell. Modellen analyseras med valda parametrar samt last- och begynnelsevillkor på någon form av datorutrustning.

Till skillnad från normala konstruktionsberäkningar är simuleringens huvudsakliga syfte att undersöka inverkan av ändringar i ett system. Det är alltså jämförelsen mellan olika situationer och trenderna vid parameterändringar som är det viktiga - absoluta resultat är åtminstone i ett inlednings-skede av underordnad betydelse.

Den verklighet som skall studeras måste renodlas. Modellen måste baseras på en omsorgsfull avgränsning och definition av det system man önskar studera och måste inkludera ett val av egenskaperna hos ingående element bl a avseende linjäritet. Slutligen måste modellens detaljeringsnivå bestämmas med hänsyn till tillgängliga data och användarens behov. Ju mer komplicerad modellen är dess svårare är det att utvärdera generella samband, varför enkla modeller är att föredra.

Självfallet skall modellen korrekt beskriva det aktuella systemet. Detta innebär att resultat från en simulering tillräckligt väl skall överensstämma med resultat från motsvarande realprov. Denna s k validisering kräver ofta att en uppsättning speciella försök utförs för att kontrollera modellen vid olika förutsättningar. I allmänhet börjar man därför med en mycket enkel modell med linjära egenskaper och utvidgar denna till ett mer komplext system alltefter förståelsen ökar och motiverar att ändringar utförs.

Modellen bör vara diskret så att motsvarande matematiska beskrivning byggs upp av ordinära differentialekvationer. Partiella differentialekvationer är betydligt svårare att simulera. Tidigare beskrivna svängningsmodeller, som består av masspunkter, dämpare och fjädrar, eventuellt i kombination med friktionselement, används ofta vid simulering. Elementen sammankopplas i system med en eller flera frihetsgrader beroende på problemställningen.

Beräkning av den matematiska modellen kan ske med hjälp av analog eller digital datorteknik. Den analoga tekniken är äldst och mycket användbar för beskrivning av linjära system och speciellt intressant vid inledande försök i en utvecklingsprocess. Digital simulering i vanliga datorer blir alltmer populär eftersom olinjära egenskaper kan simuleras. I slutskedet

av en produktutveckling är digital beräkning alltid att föredra med hänsyn till större noggrannhet och exaktare sorthantering.

En analogmaskin eller s k elektronisk differentialanalysator, består av ett antal integratorer vars utgång är tidsintegralen av ingående signaler. Dessutom finns enheter som jämför signaler (komparatorer), adderar signaler, multiplicerar med en konstant etc. Med hjälp av dessa enheter konstrueras de differentialekvationer som ingår i den matematiska modellen.

Belastningar och begynnelsevärden på olika tillståndsvariabler införs som spänningar (Volt) i den analoga modellen. Analogmaskinen har en intern spänningskälla men det är också möjligt att ansluta en extern spänningsgenerator eller bandspelare. Resultatet kan studeras "on-line" på visarinstrument, oscilloskop eller uppritas på x-y skrivare. Efter det att modellen uppkopplats ändras ingående parametrar med hjälp av potentiometrar.

Inom ramen för detta projekt har en förberedande simulering utförts främst med analog teknik men också digitalt. Det huvudsakliga syftet har varit att lära känna analogmaskinens funktion samt tillämpbarhet för studium av samband vid simulering av dynamiska egenskaper i jord. Den utförda simuleringen syftade också till att öka förståelsen för olika parametersamband. Genom att studera olika modeller avsågs dessutom att få en uppfattning om en lämplig detaljeringsnivå för fortsatta teoretiska jämförelser.

Simuleringen har utförts med hjälp av en enkel modell med en frihetsgrad, några mer komplicerade modeller med koplade styvhet- och dämparelement samt ett system med fyra frihetsgrader. Simuleringen har utförts med olika begynnelsevillkor för hastighet och rörelse. Inverkan av olika belastning har studerats såsom impuls, steglaster och internt genererad sinussvängning samt signaler från en extern spänningsgenerator.

Det utförda arbetet har varit av mycket förberedande karaktär men har visat att simulering kan vara ett mycket värdefullt verktyg för att ge ökad förståelse för dynamiskt belastade system. Den analoga simuleringen är mycket enkel att utföra även om omskalningar av fysikaliska storheter till spänning är besvärlig. Noggrannheten vid inställningar av parametervärden är begränsad varför tekniken förefaller mest lämpad när relativa jämförelser önskas, även om i bästa fall 1% noggrannhet kan erhållas.

Det enkla handhavandet vid ändring av parametervärden, belastningar och begynnelsevillkor gör det lätt även för en icke matematiker att förstå hur ett dynamiskt belastat system fungerar. Analogmaskinen är därför utmärkt som hjälpmedel

i undervisningen och bör kunna införas i utbildningen av väg- och vattenbyggare. Den analogmaskin IANUS-A, som visas i bilaga 1 kostar endast några tusen kronor.

Det förefaller onödigt att komplicera modellarbetet eftersom kunskapen om jord- och bergmaterials dynamiska egenskaper och dess inverkan på praktiska problemställningar ännu är begränsad. De parametersamband som erhålles vid fler än en frihetsgrad blir nämligen mycket komplicerade och svår-tolkade. Val av modell förefaller därför kunna begränsas till:

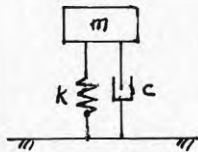
- 1-2 frihetsgrader vid studium av markytans rörelse vid dynamisk belastning
- 2-3 frihetsgrader vid studium av samverkan mellan olika konstruktionsdelar varvid det är väsentligt att antalet oberoende parametrar reduceras
- >4 frihetsgrader vid studium av vågutbredning. Denna teknik är mycket svårhanterlig eftersom antalet frihetsgrader bör vara stort om inverkan av lagerindelning och reflektioner skall kunna studeras.

I följande avsnitt ges några exempel på utförda beräkningar av system med olika antal frihetsgrader.

4.1 System med en frihetsgrad

Simulering av ett system med en frihetsgrad har utförts på analogmaskin IANUS-A (se bilaga 1). Den analoga modellen kan utformas på två sätt och med hjälp av modell b nedan är det mycket enkelt att studera inverkan av parametrarna m (massa), c (dämpkraft) och k (styvhet) samt olika begynnelsevillkor. I det följande visas några illustrativa exempel.

Fysikalisk modell



Matematisk modell

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t)$$

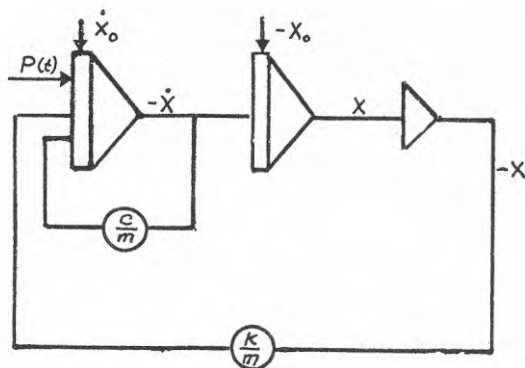
$$a) \ddot{x} = -\frac{c}{m}\dot{x} - \frac{k}{m}x + \frac{P(t)}{m}$$

$$b) \ddot{x} = -\frac{1}{m}(c\dot{x} + kx - P(t))$$

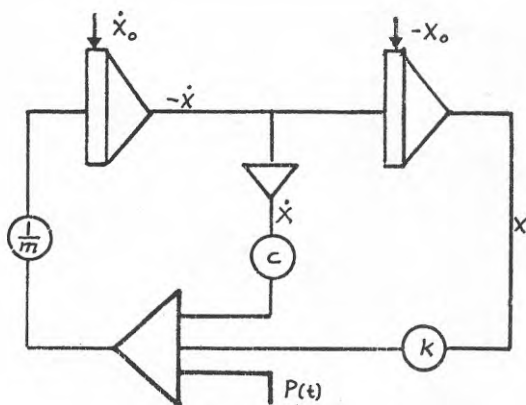
Last- och begynnelsevillkor införs som spänning; $P(t)$ respektive x_0 och \dot{x}_0 . $P(t) \neq 0$ motsvarar ett dynamiskt belastat system. $x_0 \neq 0$ innebär att systemet startar utanför jämviktsläget, vilket illustrerar t ex modellförsök med utlösning av ett förspänt fundament för bestämning av dämpning. Fallvikt-försök är ett exempel på begynnelsevillkor där $\dot{x}_0 \neq 0$.


Analog modell


a)




b)



 Integrator

 Summator

 Potentiometer

 Begynnelsevärde

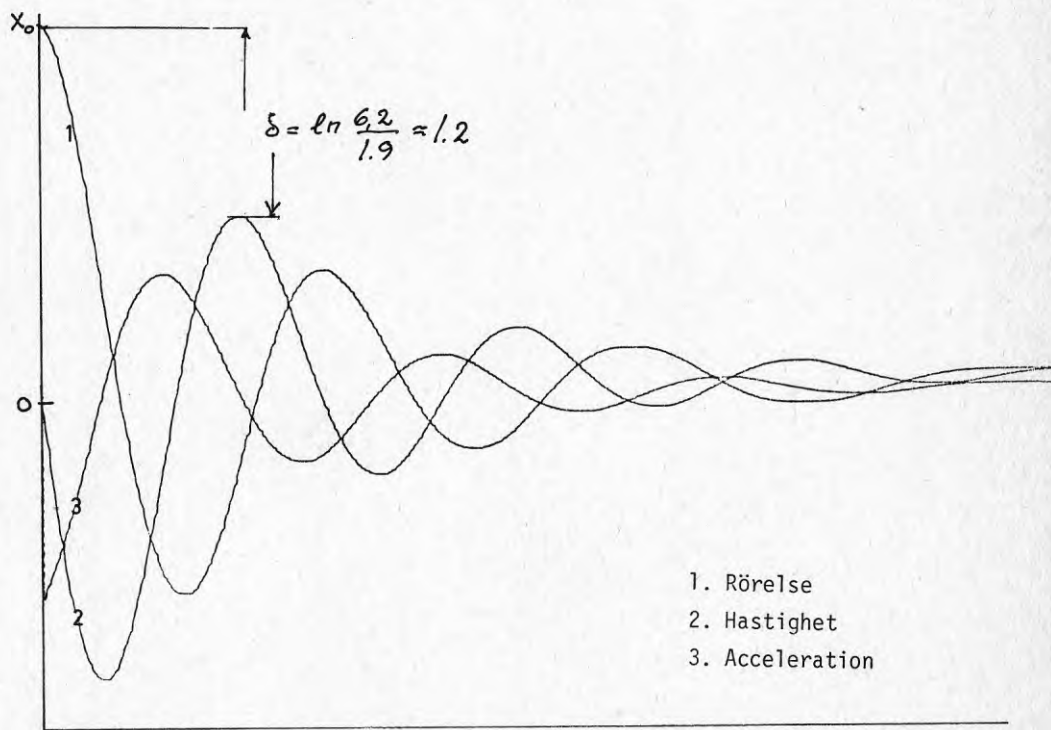
Exempel 1

Fri, dämpad svängning från förspänt läge ($P(t)=\dot{x}_0=0$; $x_0 \neq 0$).

Bestämning av dämpning med hjälp av det s k logaritmiska dekrementet ger samma värde som beräknat ur c , k och m . Exemplet visar också att fasskillnaden mellan rörelse, hastighet och acceleration är större än 90° resp 180° vid dämpad svängning.

Parametervärden

| m | c | k | $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ | $D = \frac{c}{2\sqrt{k m}}$ | $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1-D^2}$ | $\omega_0 D$ | δ | $D \cdot \frac{\delta}{\pi}$ |
|-----|-----|-----|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------|----------|------------------------------|
| 1 | 0,4 | 1 | 1 | 0,2 | 0,98 | 0,2 | 1,2 | 0,2 |



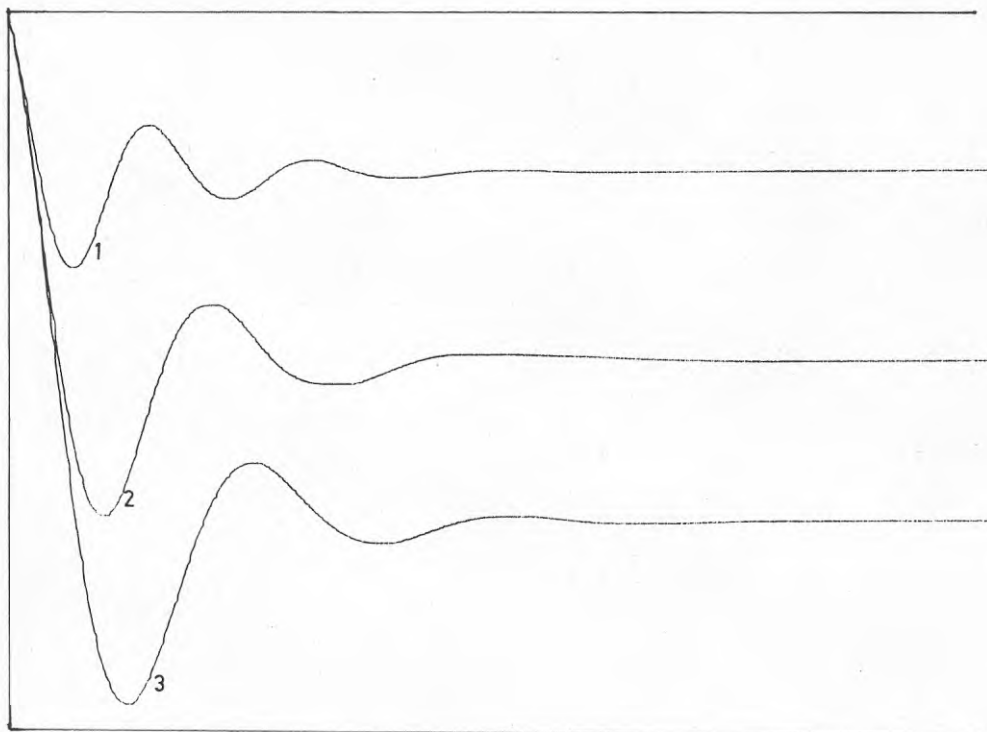
Exempel 2

Exempel 2 visar systemets rörelse och inverkan av ändring hos massa, dämpkraft respektive styvhet. Redovisade exempel visar att styvheten avgör slutdeformationen men att dämpningen inverkar på den maximala deformationen och deformationshastigheten i stötögonblicket.

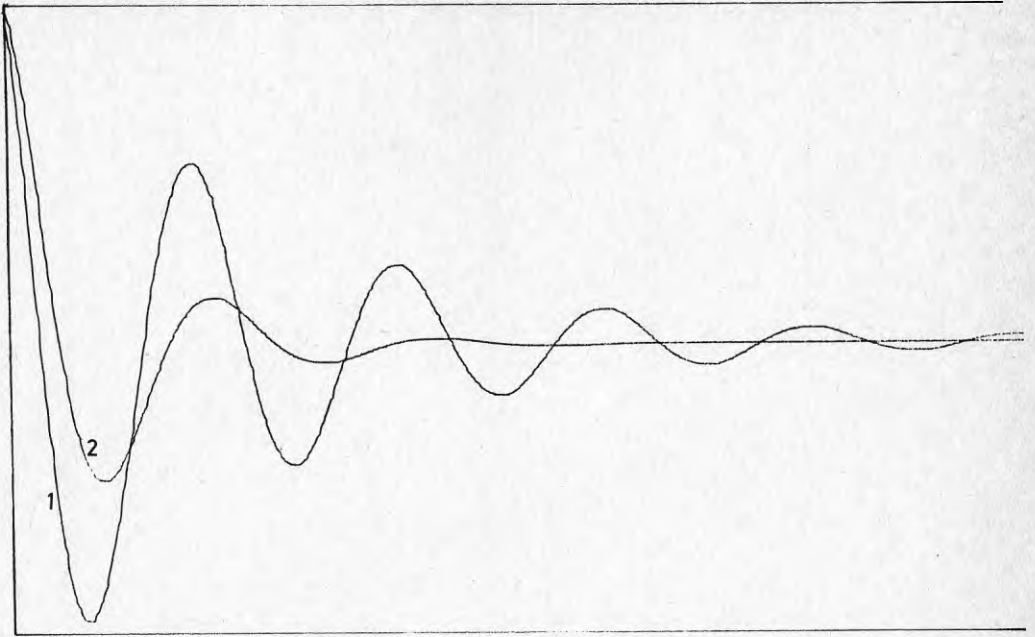
(Last- och begynnelsevillkor motsvarande fallvikt)

Parametervärden

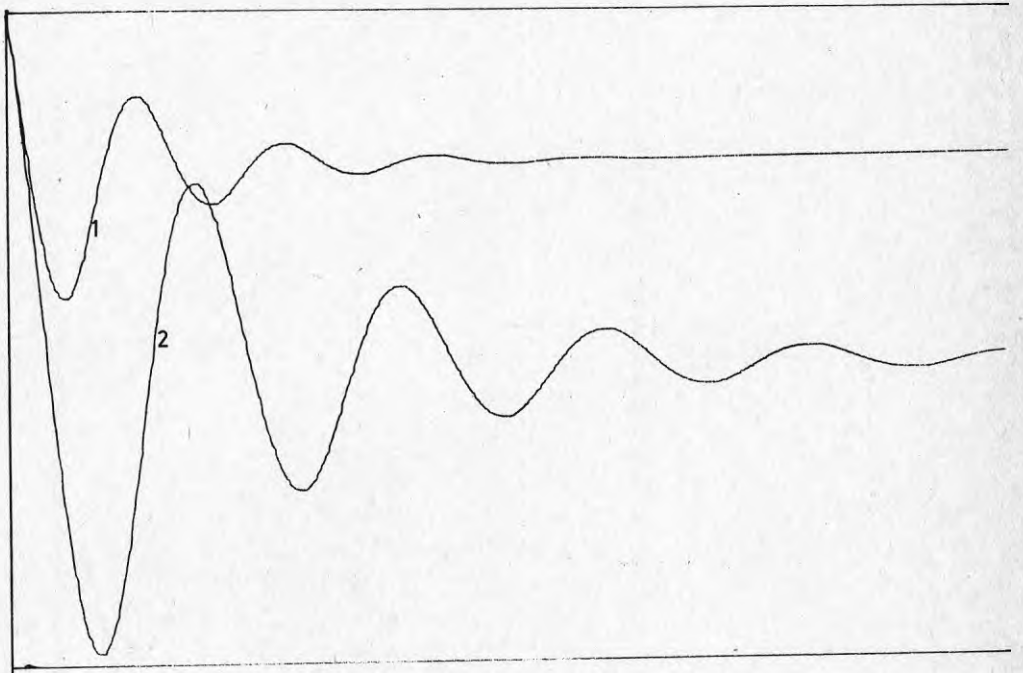
| Exempel | m | c | k | $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ | $D = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}}$ | x_0 (Volt) | \dot{x}_0 (Volt) | variabel |
|---------|-----|-----|-----|---------------------------------|--|-----------------|-----------------------|----------|
| 2a: 1 | 0,5 | 0,4 | 2 | 2 | 0,2 | -2 | 2 | styvhet |
| 2 | 0,5 | 0,4 | 1 | 1,4 | 0,28 | -4 | 2 | |
| 3 | 0,5 | 0,4 | 0,7 | 1,2 | 0,35 | -5,7 | 2 | |
| 2b: 1 | 1 | 0,4 | 2 | 1,4 | 0,15 | -4 | 4 | dämpning |
| 2 | 1 | 0,8 | 2 | 1,4 | 0,3 | -4 | 2 | |
| 2c: 1 | 0,5 | 0,4 | 2 | 2 | 0,2 | -2 | 2 | massa |
| 2 | 1 | 0,4 | 2 | 1,4 | 0,15 | -4 | 4 | |



a) ändring av styvhet



b. ändring av dämpkraft



c. ändring av massa

Exempel 3, Fallvikt - numeriskt exempel

$$\begin{aligned} m &= 40 \text{ kg} \\ k &= 40 \text{ kp/cm} = 40.000 \text{ N/m} \\ c &= 10.000 \text{ N/m/s} = 1000 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$\omega_0 = 33 \left[\sqrt{\frac{\text{L}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}} = \frac{1}{\text{s}} \right]$$

$$D = 0,4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{L}}{\sqrt{\text{kg} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}}} = 1 \right]$$

Rörelseekvation:

$$40\ddot{x} + 1000\dot{x} + 40.000x = 0; \ddot{x} + 25\dot{x} + 1000x = 0$$

Skalning: $X_{\max} = 0,05\text{m}$, $\dot{x}_{\max} = 1 \text{ m/s}$, $\ddot{x}_{\max} = 50 \text{ m/s}^2$

$$x_0 = -mg/k = -400/40.000 = -0,01\text{m}$$

$$(x_0/0,05) = -0,01/0,05 V_{\text{ref}} = -2\text{Volt}$$

$$\dot{x}_0 = \sqrt{2gh} = 1 \text{ m/s} \quad (h=0,5\text{m})$$

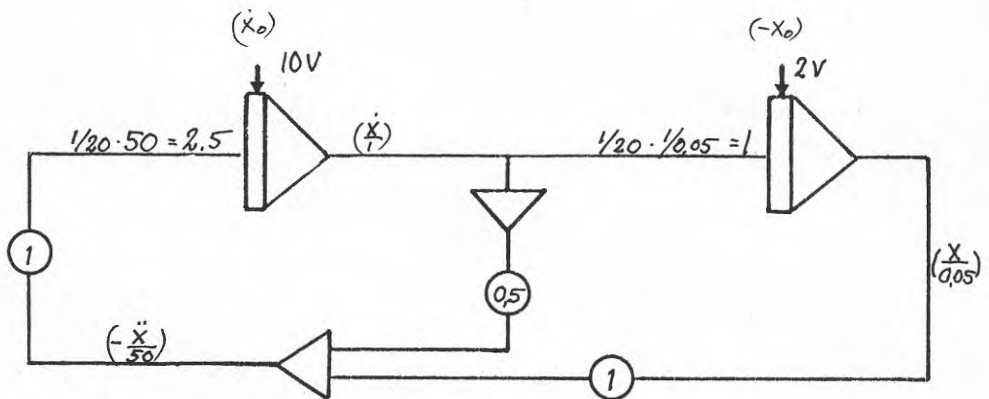
$$(\dot{x}_0/1) = 1/1 V_{\text{ref}} = 10 \text{ Volt}$$

$$\Rightarrow 50(\ddot{x}/50) + 25(\dot{x}/1) + 1000 \cdot 0,05(x/0,05) = 0$$

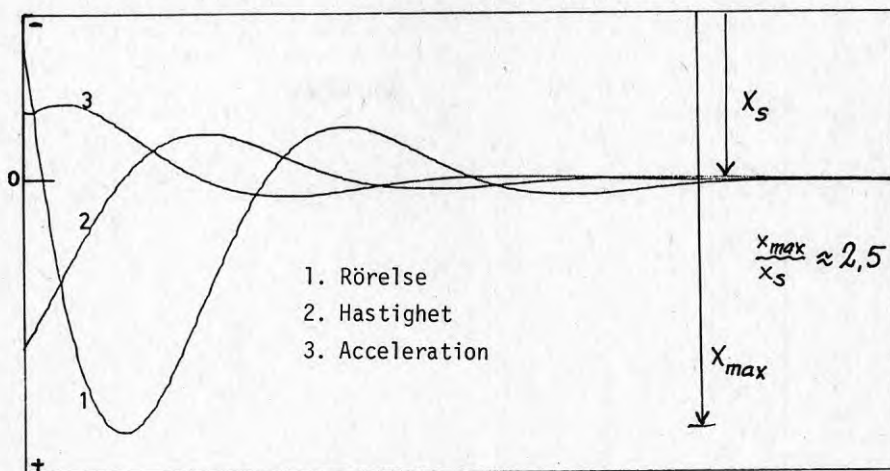
$$(\ddot{x}/50) + 0,5(\dot{x}/1) + (x/0,05) = 0$$

Vinkelfrekvensen måste omskalas och reduceras med en faktor 20 för att möjliggöra beräkning i analogmaskinen. Detta kan göras genom att multiplicera förstärkningen för varje integrator med en faktor 1/20.

Analog modell:



Resultat:



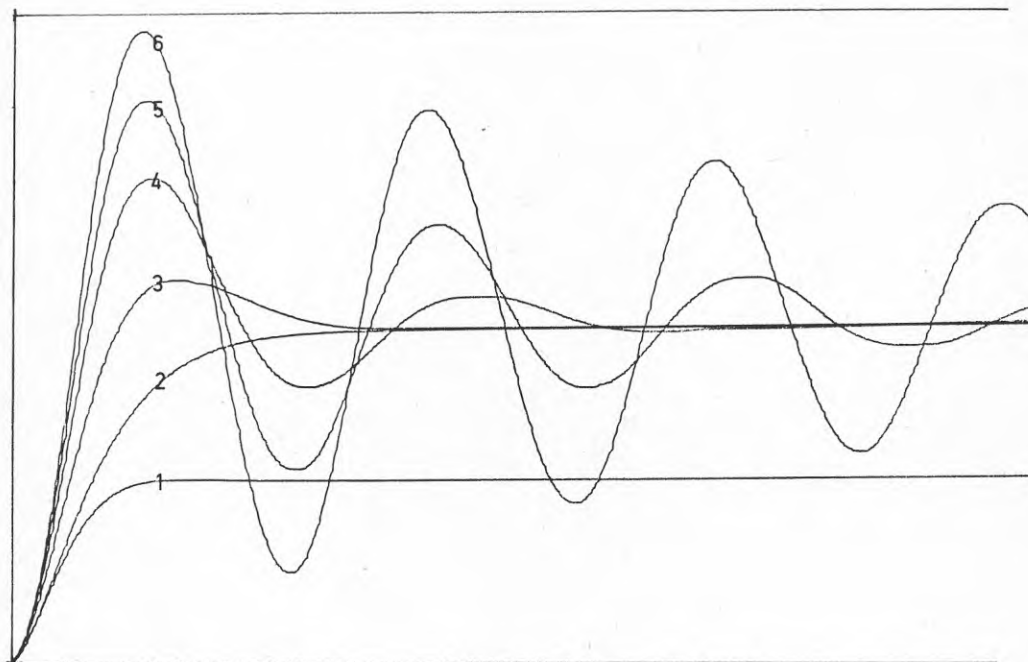
Förhållandet $x_{max}/x_s = 2,5$ mellan maximal rörelse och statisk deformation enligt exempel 3 har även inritats i den analytiska lösningen enligt figur 16 ovan.

Exempel 4

Exempel 4 visar rörelsen vid olika dämpning när systemet belastas med en steglaster om 4 Volt. (Begynnelsevillkor $\dot{x}_0 = x_0 = 0$). Som jämförelse visas också inverkan av ändrad styvhet vid stor dämpning. Observera speciellt rörelsen vid kritisk dämpning enligt plott.2.

Parametervärden

| plott | m | c | k | $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ | $D = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ | $\omega_d = \omega_0\sqrt{1-D^2}$ | $\omega_0 D$ | δ | $D \frac{\delta}{2\pi}$ |
|-------|---|-----|---|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------|----------|-------------------------|
| 1 | 1 | 2 | 2 | 1,4 | 0,7 | 1 | 1 | - | - |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | - | - |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 0,86 | 0,5 | - | - |
| 4 | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 0,25 | 0,96 | 0,25 | 1,5 | 0,25 |
| 5 | 1 | 0,3 | 1 | 1 | 0,15 | 0,99 | 0,15 | 0,8 | 0,13 |
| 6 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,05 | 1 | 0,05 | 0,3 | 0,05 |

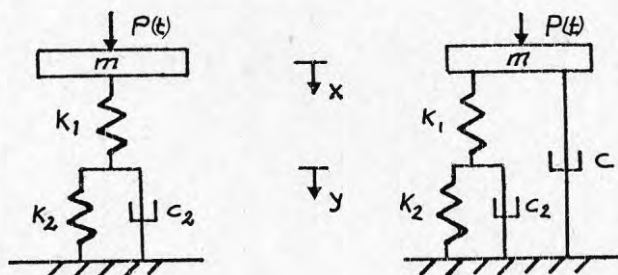


4.2 System med två frihetsgrader

Analog simulering av linjära egenskaper

Simulering av linjära egenskaper med hjälp av två olika modeller har också utförts på analogmaskin IANUS-A. Modellerna ger möjlighet att beskriva rörelsen på två nivåer och studera inverkan av kopplad styvhet och dämpning. Parametersambanden är mycket svårtolkade och här visas bara ett illustrativt exempel. En grundsats inom simuleringstekniken är att använda så enkla modeller som möjligt och att varje ökning av antalet beroende parametrar måste kunna motiveras från fall till fall.

Fysikalisk modell:



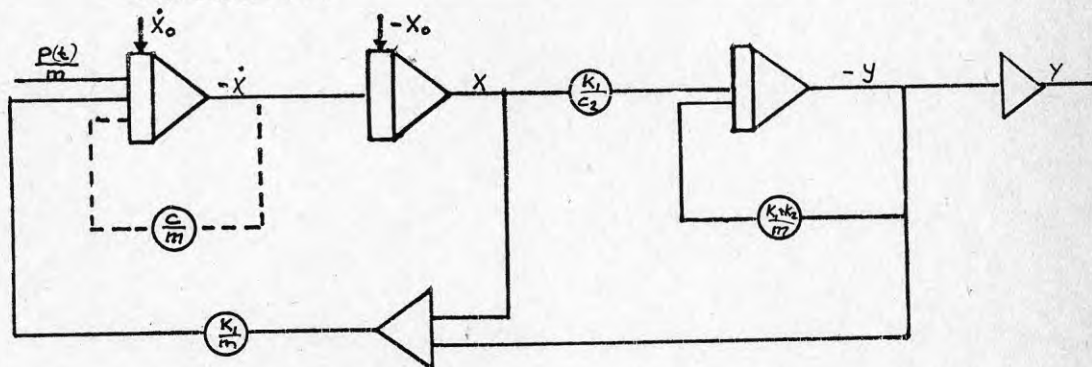
Matematisk modell:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + K_1(x-y) &= P(t) \\ K_1(x-y) &= K_2y + c_2\dot{y} \end{aligned} \right\}; \left. \begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + K_1(x-y) &= P(t) \\ K_1(x-y) &= K_2y + c_2\dot{y} \end{aligned} \right\}$$

$$\ddot{x} = \frac{K_1}{m}(x-y) + \frac{P(t)}{m} \left[\begin{array}{c} -\frac{c}{m} \dot{x} \\ 1 \end{array} \right]$$

$$\dot{y} = \frac{K_1}{c_2}(x-y) - \frac{K_2}{c_2}y = \frac{K_1}{c_2}x - \frac{K_1 + K_2}{c_2}y$$

Analog modell:

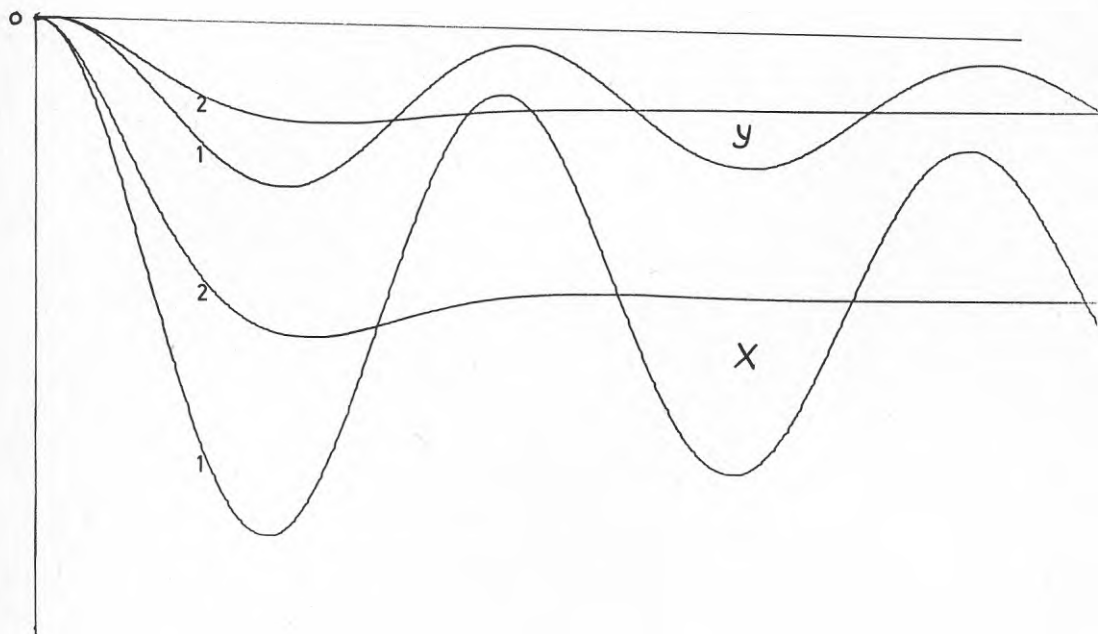


Exempel 5:

Exempel 5 visar x- och y- rörelsen med och utan dämpkraften c vid belastning med steglaster om 4 Volt. ($x_0=y_0=0$)

Parametervärden

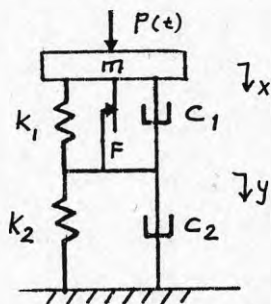
| plott | m | c | c_2 | K_1 | K_2 |
|-------|---|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 0 | 0,5 | 0,5 | 1 |
| 2 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 |



Digital simulering av olinjära egenskaper

I litteraturen föreslås ofta modeller med friktionselement för att simulera olinjära egenskaper i jord. Friktionselementet medför att systemet har olika egenskaper när en viss kraft över- resp underskrids, vilket t ex kan användas för simulering av förkonsolidering. En digital simulering av en sådan modell har utförts på institutionen för reglerteknik, KTH med ett simuleringspaket SIMNON. Här visas endast den fysikaliska modellen och ett illustrativt exempel.

Fysikalisk modell:



Matematisk modell

$$P_f < F \quad m\ddot{x} + c_2\dot{x} + k_2x = P(t)$$

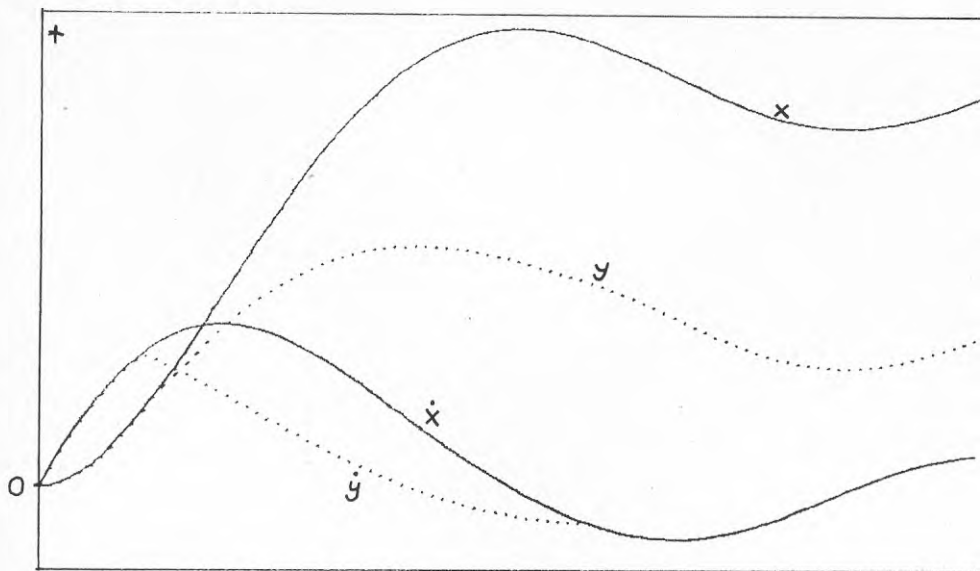
$$P_f > F \quad \begin{cases} m\ddot{x} + c_1(\dot{x} - \dot{y}) + k_1(x - y) = P(t) \\ c_1(\dot{x} - \dot{y}) + k_1(x - y) = c_2\dot{y} + k_2y \end{cases}$$

Exempel 6

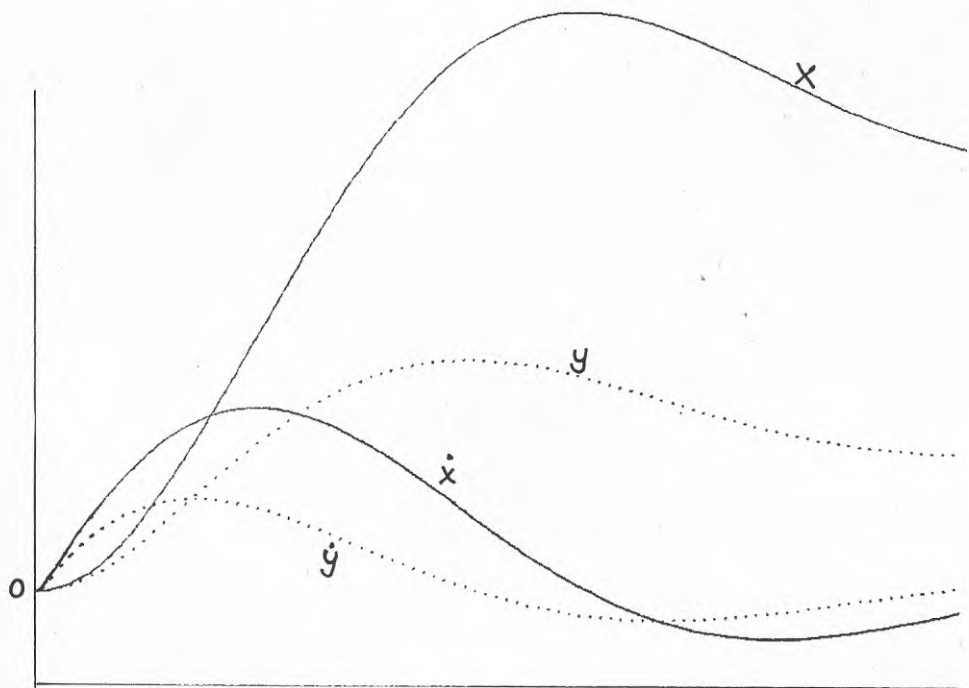
Exempel 6 här under och på nästa sida visar hastighet och rörelse av x och y med och utan friktionselement vid belastning med stegladd om 2 Volt.

Parametervärden

| Exempel | m | K_1 | K_2 | c_1 | c_2 | F |
|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|
| 6a | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 0,1 | 1 |
| 6b | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 0,1 | 0 |



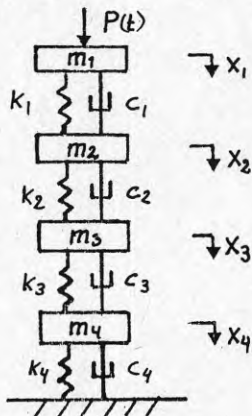
Exempel 6a: System med friktionselement



Exempel 6b: System utan friktionselement

4.3 System med fyra frihetsgrader

Simulering av ett system med fyra frihetsgrader har utförts på en analogmaskin PACE Model 231-3. Syftet var i första hand att studera vågutbredning men modellen kan också betraktas som en koppling av ett antal svängande system t ex maskin - fundament - undergrund - byggnad. Systemet har belastats dels med en impuls och dels med en stationär sinussvängning. Här presenteras fysikalisk matematisk och analog modell, använda lastgeneratorer samt några illustrativa exempel.

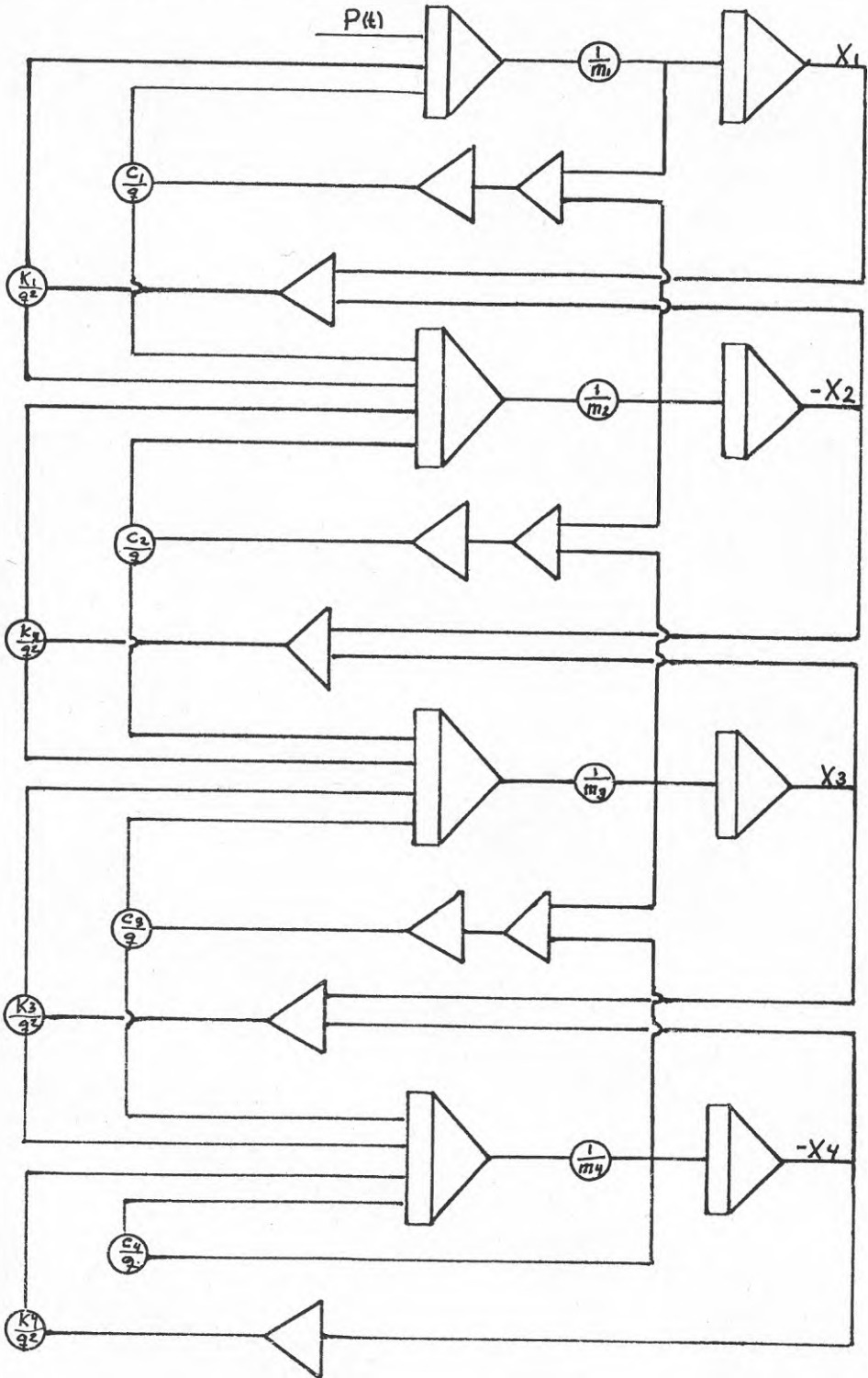
Fysikalisk modellMatematisk modell

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) &= P(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_2 - x_3) &= c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + k_3(x_3 - x_4) &= c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_2 - x_3) \\ m_4 \ddot{x}_4 + c_4 \dot{x}_4 + k_4 x_4 &= c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + k_3(x_3 - x_4) \end{aligned} \right\}$$

Tidsenheten multipliceras med q om tidskalning erfordras.

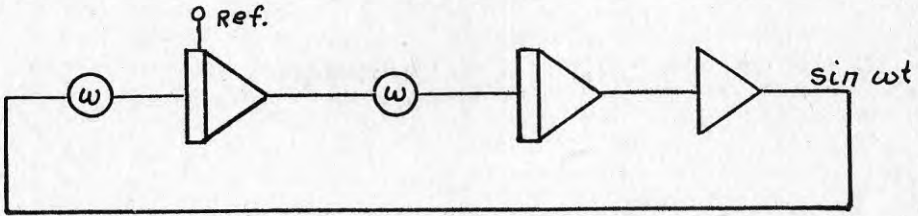
$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= -\frac{1}{m_1} \left[\frac{c_1}{q} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \frac{k_1}{q^2} (x_1 - x_2) + P(t) \right] \\ \ddot{x}_2 &= -\frac{1}{m_2} \left[\frac{c_2}{q} (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \frac{c_1}{q} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \frac{k_2}{q^2} (x_2 - x_3) - \frac{k_1}{q^2} (x_1 - x_2) \right] \\ \ddot{x}_3 &= -\frac{1}{m_3} \left[\frac{c_3}{q} (\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - \frac{c_2}{q} (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + \frac{k_3}{q^2} (x_3 - x_4) - \frac{k_2}{q^2} (x_2 - x_3) \right] \\ \ddot{x}_4 &= -\frac{1}{m_4} \left[\frac{c_4}{q} \dot{x}_4 - \frac{c_3}{q} (\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + \frac{k_4}{q^2} x_4 - \frac{k_3}{q^2} (x_3 - x_4) \right] \end{aligned} \right\}$$

Analog modell för system med fyra frihetsgrader

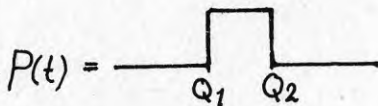
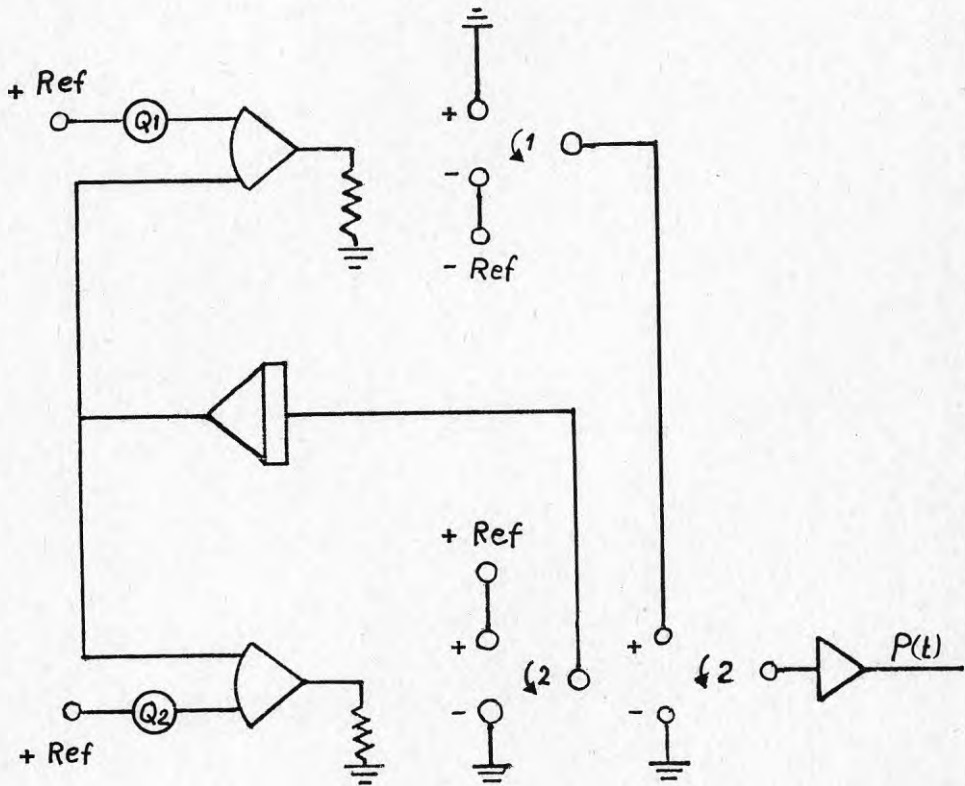


Belastningsgenerator

a) Sinusgenerator



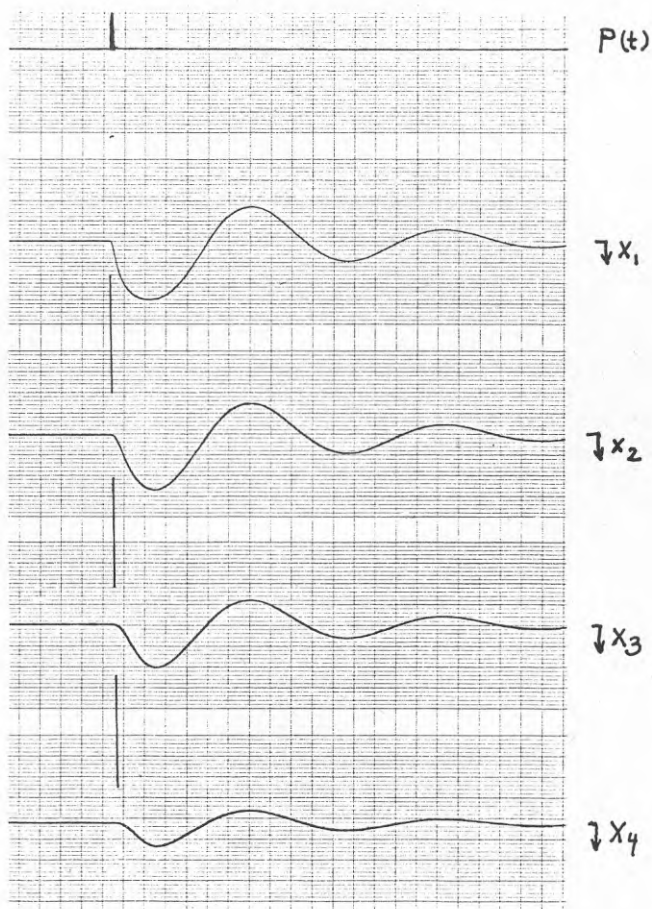
b) Impulsgenerator



Starttidpunkt och impulsens
längd bestäms av inställningen
hos Q_1 respektive Q_2 .

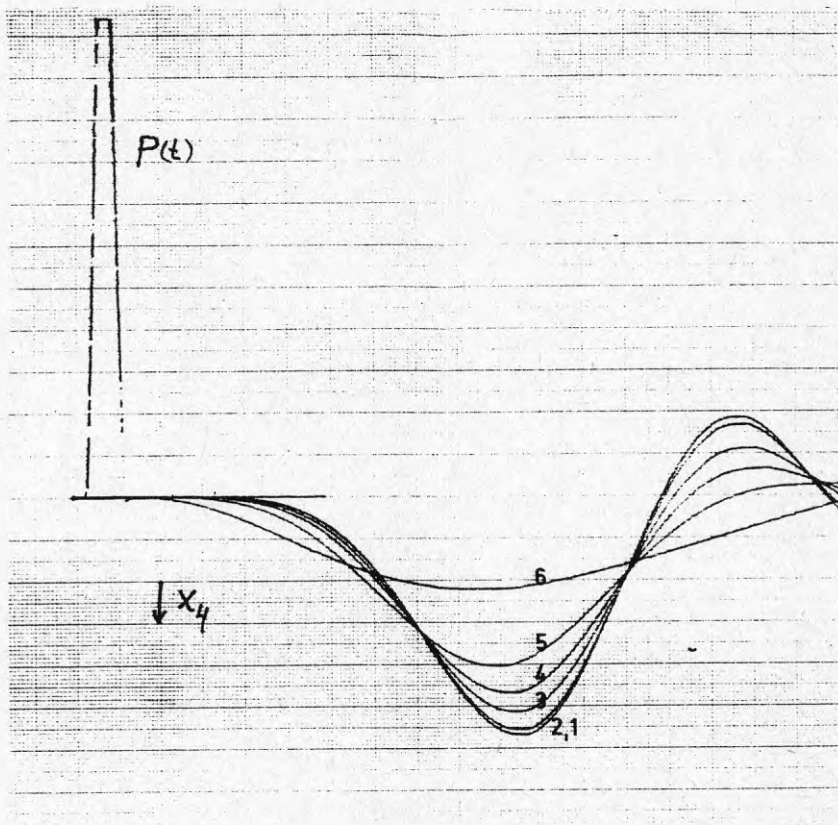
Exempel 7

Exempel 7 visar systemets rörelse vid homogena förhållanden när samtliga värden på m , c och k är lika med 1 och systemet belastas med en impuls. Försök har också gjorts med simulerad lagerindelning, men det visar sig att fyra frihetsgrader är otillräckligt för utvärdering av de olika lagrens egenskaper på grund av reflektioner och ett alltför begränsat antal bestämningspunkter. Redovisningen har därför begränsats till att omfatta homogena förhållanden och främst studium av rörelsen hos x_4 , som påverkas minst av reflektioner.



Exempel 8

Exempel 8 visar dämpningens inverkan på starttidpunkt och maxvärde av rörelsen hos x_4 vid belastning av systemet med en impuls. Resultatet visar att dämpningen har en mycket liten inverkan på starttidpunkten vid ett ekvivalent värde på den relativa dämpningen som understiger ca 10%, medan maxvärdet påverkas redan vid mindre dämpning (ca 1%).

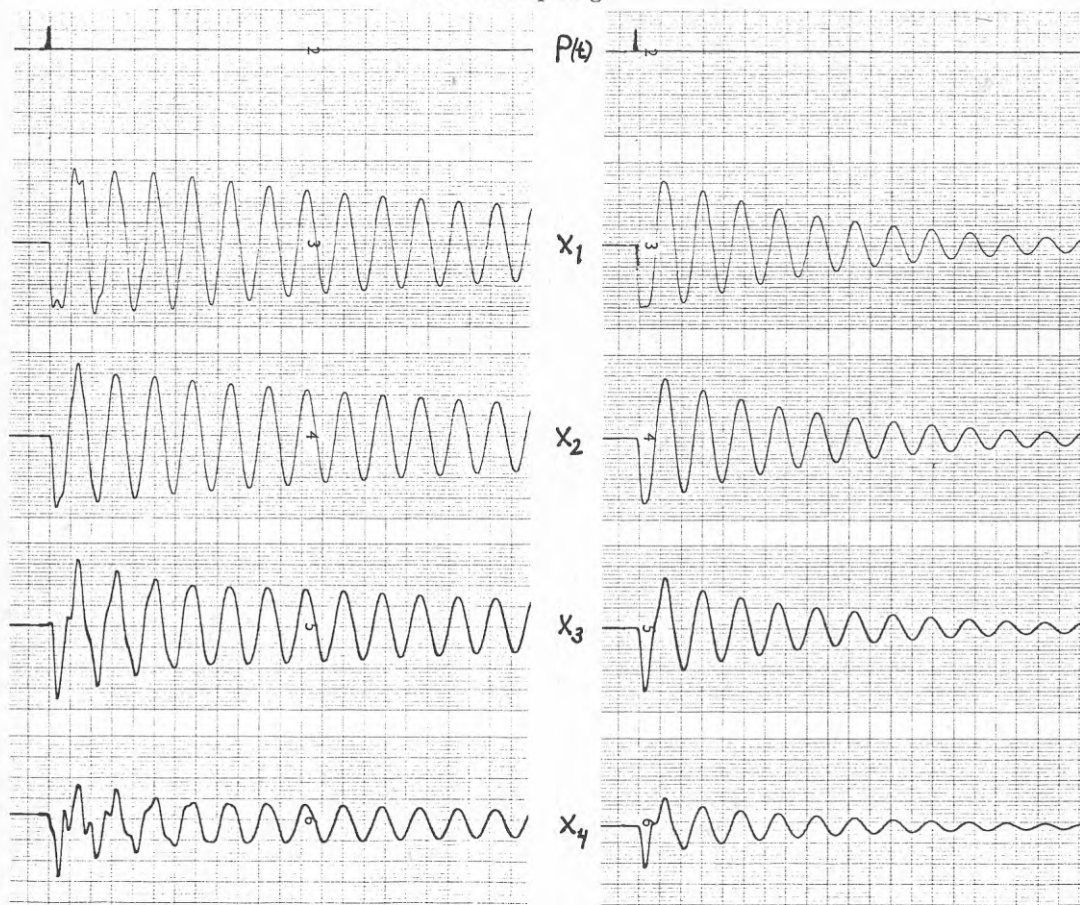


Parametervärden

| Exempel | m_i | c_i | k_i | ω_{ekv} | D_{ekv} |
|---------|-------|-------|-------|-----------------------|------------------|
| 8: 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0,01 | 1 | 1 | 0,005 |
| 3 | 1 | 0,05 | 1 | 1 | 0,025 |
| 4 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,05 |
| 5 | 1 | 0,25 | 1 | 1 | 0,125 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 |

Exempel 9

Exempel 9 visar systemets rörelse vid olika dämpning. Det är ej relevant att tala om ett s k logarithmiskt dekrement vid system med många frihetsgrader pga inbördes samverkan av olika svängningsmoder (superposition). Som framgår av exemplet ändras emellertid avklingningen entydigt när dämpningen ändras och de svängningsmoder som har högre frekvens utsläcks snabbare vid ökad dämpning.



Exempel 9a

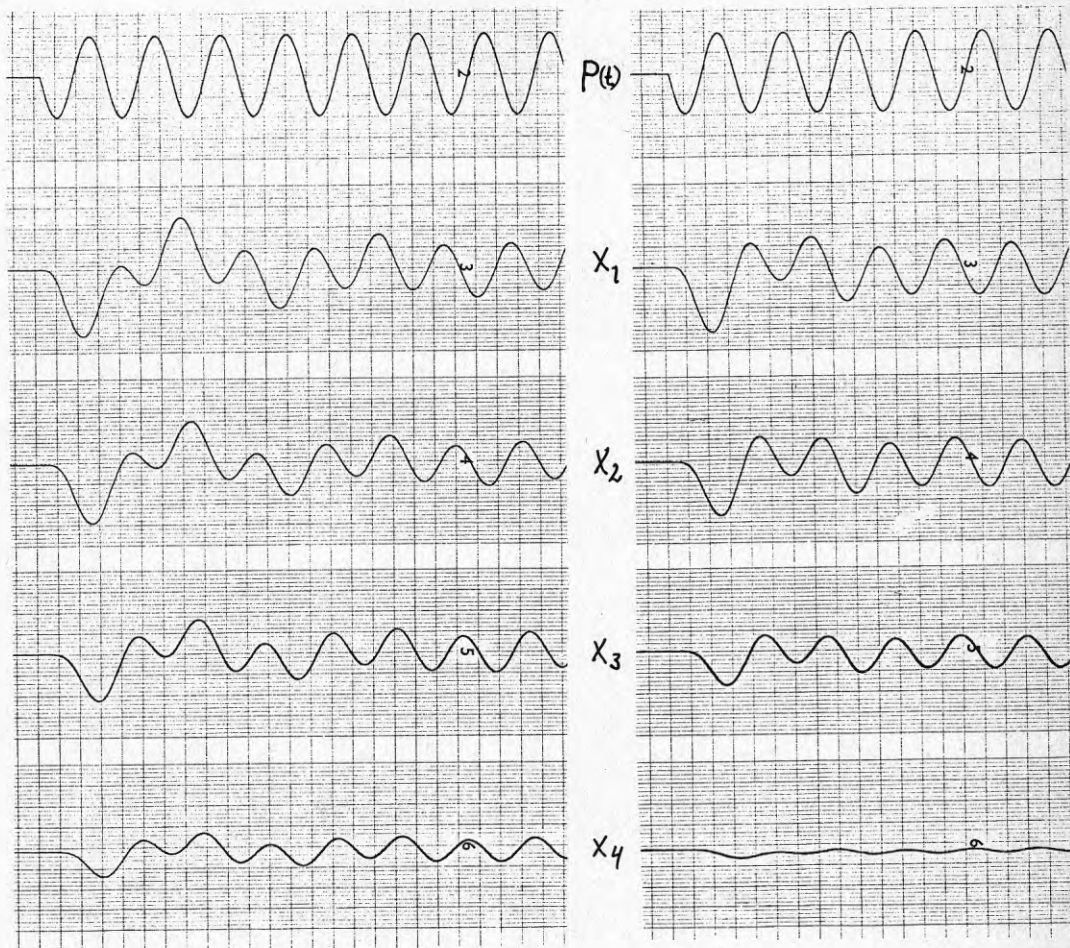
Exempel 9b

Parametervärden

| Exempel | m | c | k |
|---------|---|------|---|
| 9a | 1 | 0,05 | 1 |
| 9b | 1 | 0,25 | 1 |

Exempel 10

Exempel 10 visar systemets rörelse vid påtvingad sinusvängning med och utan speciell dämpning av reflekterade vågor. Den pålagda frekvensen är lika med systemets grundfrekvens. En viss utsläckning av reflekterade vågor under insvängningsfasen har erhållits genom att ansätta ett stort värde på c_4 och sätta $k_4 = 0$.



Exempel 10a

Exempel 10b

Parametervärden

| Exempel | m | c | k | ω | Anmärkn. |
|---------|---|---|---|----------|-----------------|
| 10a | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 10b | 1 | 1 | 1 | 1 | $k_4=0, c_4=10$ |

5. SLUTSATSER

Denna förstudie syftade i första hand till att studera och sammanställa olika förutsättningar för fortsatt forskning angående samband mellan dynamiska parametrar och andra materialegenskaper. I anslutning till projektet har arbetet även omfattat en genomgång av mätförfarande och olika tillämpningar. En sammanställning av dessa förutsättningar är presenterad i IVA-meddelande 225 "Jord- och bergdynamik" (Appendix A), Vägverkets internrapport "Definition av bearbetbarhet för olika jordar" (Appendix B) samt BFR-projekt "Systematisering av dynamiska undersökningsmetoder" med Laszlo Gereben, Jacobsson & Widmark som projektledare.

Det utförda arbetet har resulterat i följande allmänna slutsatser:

1. Tillämpning av dynamiska undersökningsmetoder har en stor marknad om entydiga parametersamband kan dokumenteras. Den traditionella tillämpningen är bestämning av deformationsegenskaper för t ex dimensionering av maskinfundament och olika jordbävningsaspekter. Nya tillämpningsområden är bl a materialinventering och klassificering av t ex schaktbarhet samt kontroll av t ex packningsarbeten, speciellt i friktionsjord.
2. Modern mät- och analysteknik möjliggör rutinmässig insamling av mätdata. Det är således möjligt att utveckla instrumentering för speciella ändamål till mycket låga kostnader vilket bl a illustreras av den Compactometer som utvecklats vid Geodynamik AB. Under ett forsknings- och utvecklingskede erfordras emellertid en relativt stor investering i ändamålsenlig basutrustning.
3. Den teoretiska behandlingen av dynamiska förlopp har underlättats genom den snabba utvecklingen av numeriska beräkningsmetoder. Simulering med hjälp av enkla svängningsmodeller är ett utmärkt hjälpmedel för verifiering och ökad förståelse av olika parametersamband. Avancerade analytiska och numeriska metoder, såsom finita elementmetoden, FEM, förefaller däremot mer lämpade för konkreta konstruktionsberäkningar.
4. En fortsatt studie av parametersamband bör koncentreras till sökta tekniska storheter såsom deformationsegenskaper, packningsgrad, schaktbarhet etc. Att studera samband med kornstorleksfördelning, vattenhalt, portal etc. förefaller vara en omväg, som kan leda till onödigt komplicerade problemställningar.
5. Det utförda projektarbetet har även omfattat en inledande studie för att söka en teoretisk underbyggnad till några

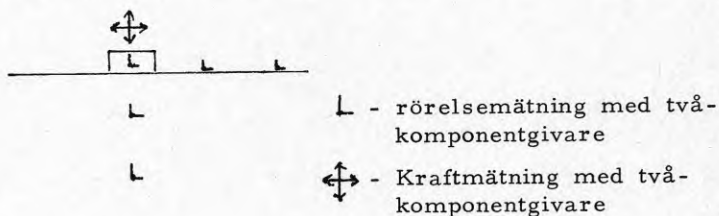
empiriskt funna samband. Resultatet av detta arbete visar att teoretiska förklaringar finns och följande slutsatser har dragits:

- Hittills utförd teoretisk analys av dynamiska material-egenskaper avser i första hand elastiska och viskoelastiska material. Material med olinjära och plastiska egenskaper och dess materialdämpning är mycket lite studerad i litteraturen. En fortsatt teoretisk analys av dämpningens orsak och inverkan är mycket önskvärd.
- Vid de våglängder som är aktuella vid seismiska undersökningar är utbredningshastigheten oberoende av dämpning och skillnaden mellan fas- och gruppshastighet bör vara försumbar. Absorbition och dispersion förefaller bero av icke linjärt elastiska egenskaper som kan representeras av dämpning i ett diskret svängningssystem. Utförd simulering och analys visar att dämpningen i första hand påverkar svängningsrörelsens amplitud ($D > 1\%$).
- Den transienta vågutbredningens frekvens är olika för tryck- och skjuvvåg. Detta har utnyttjats vid analys av seismiska registreringar för att särskilja olika vågtyper. Den teoretiska analys som utförts inom ramen för detta projekt kan däremot ej förklara det samband mellan frekvensinnehåll och blockhalt, som studerats vid Vägverket.
- Den deformationsmodul som bestäms med hjälp av fallvikt är större än motsvarande statiska modul. Detta kan förklaras genom inverkan av dämpning i en enkel svängningsmodell, där dämpningen främst representerar energiförlust på grund av vågutbredning. Cykliska belastningsförsök visar också att jordmaterials deformationsegenskaper är olinjära varför t ex seismiskt bestämd E-modul ($\gamma \approx 10-4\%$) kan vara 10 ggr så stor som en "statisk" E-modul bestämd genom plattförsök. ($\gamma \approx 1\%$).
- I ett viskoelastiskt material uppstår enligt beräkningar övertoner vars amplitud ökar snabbt när viskositeten minskar. Detta förklarar i viss mån Compactometerns funktionssätt eftersom ett packat material har mer rent elastiska egenskaper än ett opackat.
- Utförda packningsförsök visar också att fasskillnaden mellan kraft och rörelse minskar med ökad packning. Enligt teorin för system med en frihetsgrad är fasskillnaden direkt proportionell mot dämpning.

Det finns således förutsättningar och motiv för ett fortsatt forskningsarbete avseende dokumentation av olika samband

som underlättar tolkningen av dynamiska undersökningsmetoder. Inledningsvis bör teori och konkreta tillämpningar studeras för att på längre sikt eventuellt komma fram till ett generellt klassificeringssystem baserat på dynamiska parametrar. Följande projektrinriktningar förefaller möjliga:

- A. Allmän teori: En fortsatt genomgång av teoretiska samband mellan olika parametrar är värdefull. Arbetet bör koncentreras till icke linjärt elastiska material och bli syfta till ökad förståelse för olika hastighetsbegrepp och dispersionsfenomen. Arbetet bör också verifieras genom försök i full skala med transient och stationär excitering. Vid försöket bör exciteringens kraft och rörelse (hastighet eller acceleration) samt rörelserna i marken registreras simultant enligt nedanstående skiss:



- B. Tillämpning: Hittills utförda försök visar att redan en bestämning av hastigheten för tryck- och skjuvvåg ger möjlighet till en bedömning av packningsgrad och schaktbarhet. Ett fortsatt forskningsarbete bör verifiera dessa samband genom en statistiskt upplagd försöksserie med olika material och vattenhalt. Arbetet bör resultera i tabeller och diagram för praktiskt bruk.

Ett jord- eller bergmaterials energilagringsskapacitet beror i huvudsak av vatteninnehåll och permeabilitet. Tillämpning av dynamiska undersökningsmetoder för detta ändamål bör studeras genom att utföra mätningar i anslutning till fullskaleförsök med energilagring.

- C. Generell sambandstudie: En fortsatt sambandstudie bör omfatta en sammanställning av resultat från olika fältförsök. Registrering av transient och stationär vågutbredning bör utföras i olika material för att bygga upp en erfarenhetsbank. De dynamiska parametrarna bör avse hastighet, frekvens, våglängd, absorptionskoefficient och ett logaritmiskt dekrement för både tryck- och skjuvvåg. Materialegenskaperna bör dokumenteras avseende bl a jordart, vattenhalt, portal (lagringstäthet, packningsgrad) och kornstorleksfördelning samt aktuella tekniska parametrar såsom deformationsegenskaper, schaktbarhet, packningsgrad och värmekapacitet.

Den här föreslagna inriktningen av ett forskningsarbete kan bli mycket omfattande och förutsätter därför en samlad och

kontinuerlig verksamhet. Detaljplanering av projekt och former för samordning beror av intresset från olika avnämare, i första hand konsulter och myndigheter men också entreprenörer och maskintillverkare. Till vissa delar kan arbetet bedrivas som doktorandarbete men bör, för att vara effektivt ske inom en tvärvetenskapligt sammansatt grupp med resurser att anskaffa erforderlig basutrustning.

6. REFERENSER

Andreasson, B, Deformation characteristics of soft, high-plastic clays under dynamic loading condition. Chalmers 1979.

Gereben, L, Systematisering av dynamiska undersökningsmetoder, BFR-projekt 740397-2.

Halter, D.J., Matrix computer methods of vibration analysis, London Polytechnic 1973.

Krizek, R, Rheologic behavior of cohesionless soils subjected to dynamic loads. The Society of Rheology 1971.

STF-ingenjörsutbildning, Simulering som praktiskt konstruktionsmedel. Kursmaterial 1978.

Turner, H., mfl. Packningsförsök med vibrerande vält, förstudie. Geodynamik AB 1976, opubl.

Turner, H., mfl. Analysrutiner för vibrationer i mark. Geodynamik AB 1976, opubl.

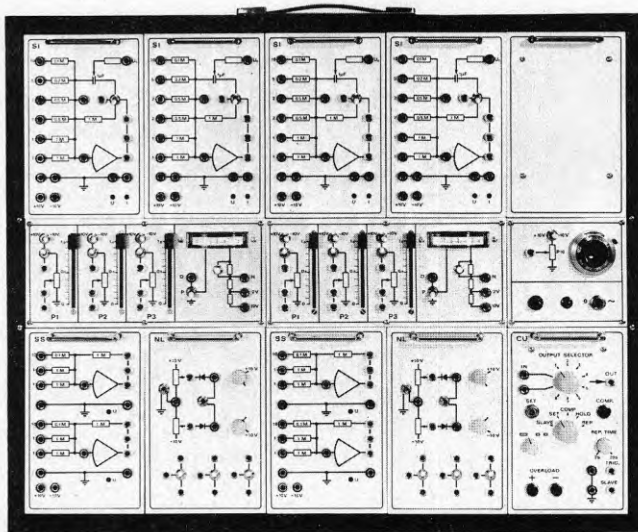
Viberg, N-E., Finita elementmetoden, FEM, Chalmers 1975.

Vägverket, Definition av bearbetbarhet för olika jordar, 1976, Resultat från vägverkets försöksverksamhet angående jordarters bearbetbarhet, 1976, Utredning angående seismiska undersökningar vid vägprojektering, 1976, Packningsförsök i Åkersberga, 1976.

Konferensmaterial från Karlsruhe 5-16 september 1977. "Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics".

Dessutom hänvisas till de referenser som anges i IVA-meddelande 225 "Jord- och bergdynamik", samt kursmaterial för forskarutbildningen vid institutionen för jord- och bergmekanik, KTH.

IANUS-A



- GEMENSAM BASENHET MED IANUS-L
Lägre kostnad
- KORTSLUTNINGSSÄKRA UTGÅNGAR
Tål felkopplingar
- STORA TYDLIGA SYMBOLER
Underlättar för eleverna
- KOMPENDIUM PÅ SVENSKA
Underlättar för läraren
- 8 OPERATIONSFÖRSTÄRKARE
Avancerad problemlösning
- MODULUPPBYGGNAD
Ökad flexibilitet

IANUS Analogimaskin är ett komplett system speciellt konstruerat för undervisning i ämnen reglerteknik, systemteknik, mekanik och matematik på såväl yrkesskola, fackskola som gymnasium.

Ett mycket omfattande kompendium ingår. Det innehåller grundläggande teori, skalning, kopplingsövningar samt laborationer. Ett speciellt laborationshäfte finns för uppkopplingar med multiplikatorer.

Den tekniska beskrivningen innehåller bl a principalschemor över ingående enheter.

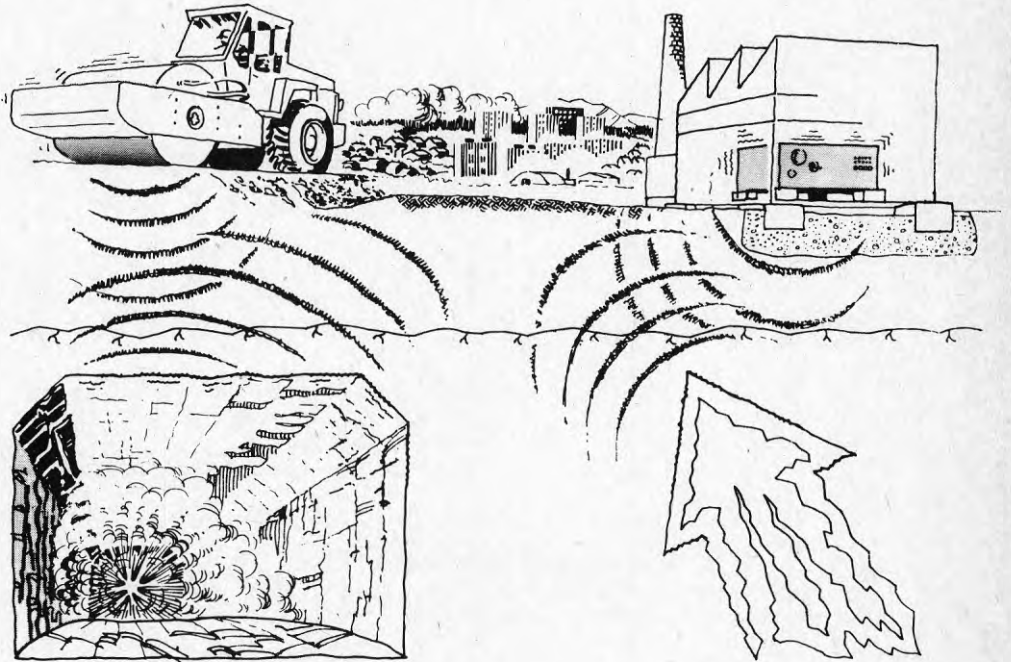
Den pedagogiskt tillrättalagda panelen med sina stora tydliga symboler och den funktionella uppbyggnaden gör att eleven lätt kan följa problemlösningen både vid demonstrationer och laborationer.

IANUS är mekaniskt och elektriskt dimensionerad att tåla hårda påfrestningar. Kortslutningssäkra förstärkare, säkrade potentiometrar, diodskyddade instrument och strömbegränsade drivspänningar gör att maskinen tål alla eventuella felkopplingar. Denna viktiga egenskap innebär avsevärt lägre underhållskostnader, minskat stillestånd samt störningsfri undervisning.

Vanliga standard 4 mm banankontakter används för uppkoppling. Inga dyrbara specialsladdar som är svåra att ersätta när de "kommer bort". Plug-in systemet gör IANUS A flexibel vilket betyder att den kan växa med uppgiften, t ex utökning med multiplikator.

JORD- OCH BERGDYNAMIK

Information från
IVA 's kommitte för vibrationsfrågor
Arbetsgrupp 4: Jord- och bergdynamik



Ingenjörsvetenskapsakademien
Meddelande 225

FÖRORD

Ingenjörsvetenskapsakademien och Byggforskningsrådet tog år 1976 initiativet att bilda en kommitté för vibrationsfrågor. Kommittén och dess verksamhet är presenterad i IVA-rapport 117 "Vibrationsdag 1977 - Presentation av IVA's kommitté för vibrationsfrågor.

Kommitténs målsättning är att under en treårsperiod strukturera och informera om dagens samlade kunskap inom vibrationsområdet samt initiera erforderlig forskning och utveckling. Arbetet bedrivs väsentligen genom olika arbetsgrupper, som var och en svarar för avgränsade ämnesområden:

| | | |
|-------------|---|---------------------------------------|
| Arbetsgrupp | 1 | - Normer och nomenklatur |
| " | 2 | - Mät- och analysteknik |
| " | 3 | - Fordonsvibrationer |
| " | 4 | - Jord- och bergdynamik |
| " | 5 | - Trafik- och byggverksamhet |
| " | 6 | - Byggnadsdynamik |
| " | 7 | - Maskinfundament |
| " | 8 | - Vibrationers inverkan på människan. |

Föreliggande information syftar till att beskriva det ämnesområde som behandlas av arbetsgrupp 4 "Jord- och bergdynamik": Målsättningen är också att öka förståelsen för jord- och bergdynamiska aspekter i samband med de olika praktiska tillämpningar som behandlas av övriga arbetsgrupper inom kommittén. I en referenslista finns ett urval av svensk och utländsk litteratur för den som vill veta mer.

Inom arbetsgrupp 4: "Jord- och bergdynamik har följande personer på olika sätt medverkat till detta arbete:

| | |
|------------------------|--------------------------------------|
| Bo Andreasson | Chalmers, Inst. för Geoteknik |
| Sven-Erik Beigler | Jacobsson & Widmark |
| Anders Bodare | Uppsala Universitet, Teknikum |
| Bengt Broms (ordf.) | KTH, Inst. för Jord- och Bergmekanik |
| Lars Forssblad | Dynapac Maskin AB |
| Laszlo Gereben | Jacobsson & Widmark |
| Göran Lande | Uppsala Universitet, Kvartärgeologi |
| Nils Lundborg | Stiftelsen Svensk Detonikforskning |
| Rainer Massarsch | Vattenbyggnadsbyrån |
| Björn Svedinger (sekr) | KTH, Inst. för Jord- och Bergmekanik |
| Heinz Thurner | Geodynamik AB |
| David Weiner | KTH, Inst. för Jord- och Bergmekanik |

Arbetet har finansierats genom anslag 780746-3 från Byggforskningsrådet. Illustrationerna har ritats av Stig Kronholm, Teknisk Illustration AB.

Bengt Broms

IVA's Kommitté för vibrationsfrågor
Arbetsgrupp 4 "Jord- och bergdynamik"

I N N E H Å L L

| | sid |
|---|-----|
| 1. Inledning | 1 |
| 2. Definitioner och grundläggande begrepp | 3 |
| 3. Dynamiska egenskaper hos jord och berg | 11 |
| 4. Praktiska tillämpningsområden | 17 |
| 4.0 Allmänt | 17 |
| 4.1 Jordbävningar | 18 |
| 4.2 Dynamiskt belastade fundament | 21 |
| 4.3 Mikroseismer | 22 |
| 4.4 Packning | 23 |
| 4.5 Pålning | 25 |
| 4.6 Sprängning | 26 |
| 5. Undersökningsmetoder | 29 |
| 5.0 Allmänt | 29 |
| 5.1 Fältmetoder | 30 |
| 5.2 Laborariemetoder | 34 |
| 5.3 Modellförsök | 36 |
| 6. Mät- och analysteknik | 38 |
| Referenser | 41 |

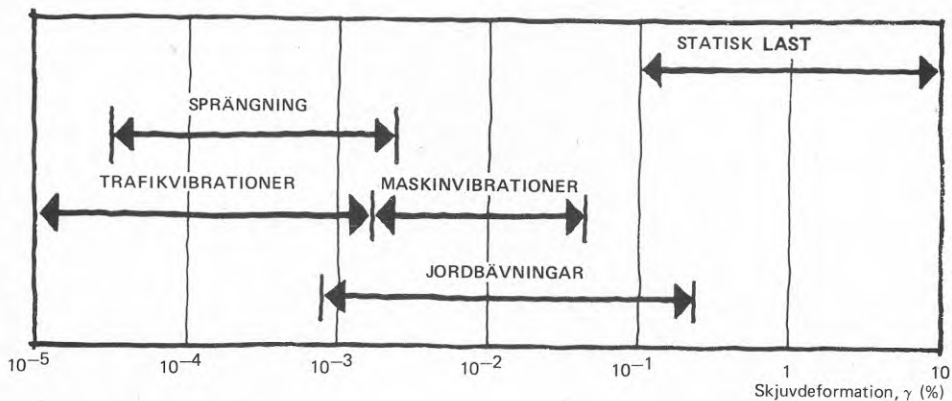
1. INLEDNING

1.

Intresset för vibrationsfrågor har ökat under senare år. Skador och olägenheter förorsakas bl.a. av jordbävningar och trafik samt vibrationer från maskiner och byggverksamhet av olika slag. Produktionsmetoder som utnyttjar vibrationer och stötar har utvecklats för bl.a. packning, pålning och sprängning. Modern mät- och analysteknik har möjliggjort tillämpning av nya metoder för undersökning och resultatkontroll i olika sammanhang.

Dynamik definieras som läran om kroppar i rörelse där tröghetskrafter har avgörande betydelse för kraftjämvikt. Jord- och bergdynamik är en sammanfattande benämning för problemställningar där jord- och bergmaterial påverkas av vibrationer eller kortvariga stötar.

Deformationsstorleken vid jord- och bergdynamiska problemställningar är som regel betydligt mindre än vid statisk belastning, vilket framgår av figur 1.1. Den dynamiska belastningen måste emellertid ofta adderas till en statisk last såsom vid grundläggning av dynamiskt belastade fundament och kan därför ej behandlas oberoende.



Figur 1.1. Deformationsstorlek vid olika dynamiska och statiska belastningsfall.

2.

Belastningens karaktär har stor betydelse, eftersom deformationsegenskaperna hos jord- och bergmaterial beror av deformationens storlek och varaktighet. Ur praktisk synpunkt är det därför ofta lämpligt att indela ämnesområdet med hänsyn till deformationernas storlek vid olika tillämpningar.

Trafik och sprängningar ger normalt upphov till mycket små deformationer och undergrunden kan med god noggrannhet betraktas som ett linjärt elastiskt material. Vid andra problemställningar, exempelvis packning och jordbävningar med stora rörelser måste undergrundens olinjära och tidsberoende deformationsegenskaper beaktas.

Det ämnesområde arbetsgrupp 4: Jord- och bergdynamik svarar för begränsas i princip av markytan och omfattar

- samverkan mellan vibrationskälla och undergrund t.ex. grundläggning av dynamiskt belastade fundament.
- vibrationers och stötars utbredning i jord och berg.
- vibrationers och stötars inverkan på egenskaper hos jord och berg.
- samverkan mellan undergrund och byggnadskonstruktion, t.ex. inverkan av jordbävning och sprängning.

Omfattningen av pågående forskning inom ämnesområdet är stor såväl i Sverige som utomlands. Arbetsgruppen har därför sett behov av en orienterande översikt och tagit initiativ till föreliggande information.

Avsikten är att ge i första hand tekniker med olika bakgrund en kortfattad introduktion till olika problemställningar samt ange inriktningen av den forskning som pågår. Avsikten har ej varit att presentera en handbok och det måste påpekas att angivna formler och figurer endast avser att belysa generella samband.

2. DEFINITIONER OCH GRUNDLÄGGANDE BEGREPP

Dynamiska problemställningar är som regel komplicerade både med avseende på verkande belastningar och aktuella materialegenskaper. Enkla beräkningsmodeller användes med viss framgång för att söka förståelse för olika problemställningar. I detta kapitel ges en översiktlig presentation av några ofta förekommande definitioner och grundläggande begrepp.

Svängningsrörelse

Ett dynamiskt förlopp kan åskådliggöras som en svängningsrörelse där rörelsen hos en masspunkt anges som funktion av tiden. Den enklaste svängningsrörelsen är en sinussvängning eller s k harmonisk svängning och visas i figur 2.1. Svängningsrörelsens storlek kallas rörelseamplitud och genom matematisk derivering kan rörelsens hastighet och acceleration erhållas.

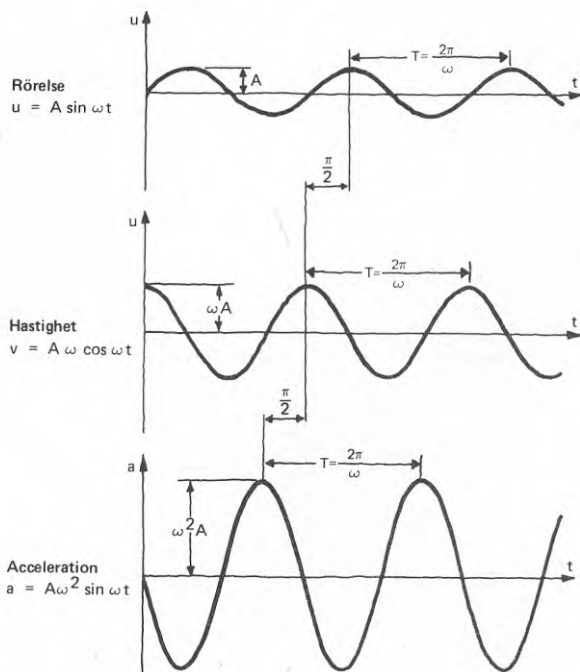
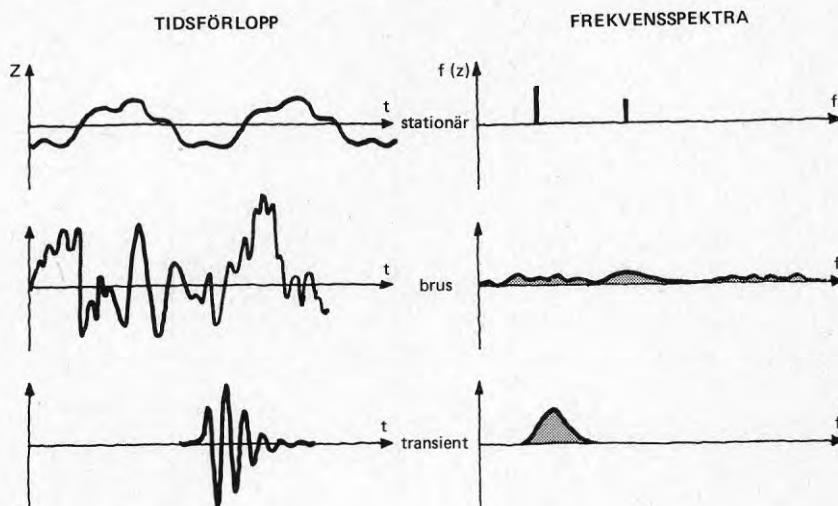


Fig. 2.1 Harmonisk svängning A = rörelseamplitud
 T = period
 ω = vinkelfrekvens

4.

Beroende på det dynamiska förloppets karaktär brukar man ofta tala om stationär svängningsrörelse med en viss amplitud, transient svängningsrörelse med kort varaktighet samt rörelse av bruskaraktär (random). Komplicerade svängningsrörelser åskådliggöres ofta som funktion av frekvens, s.k. frekvensspektra, där ingående frekvenser anges. I figur 2.2. visas olika svängningsrörelser både som funktion av tid och frekvens.



Figur 2.2 Exempel på svängningsrörelser som funktion av tid och frekvens

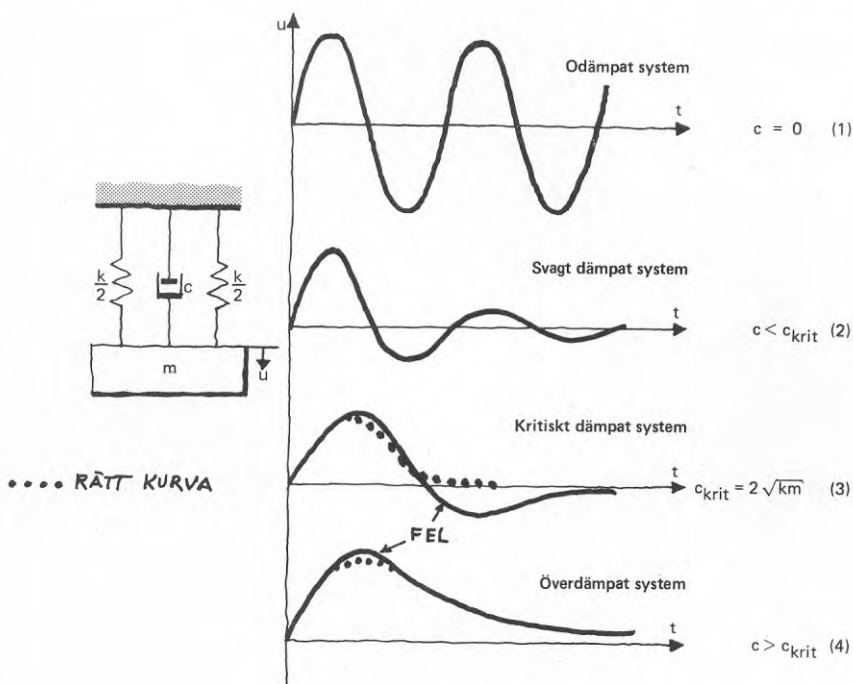
Som framgår av figurerna 2.1 och 2.2 är det väsentligt att veta vilken karaktär svängningsrörelsen har och om förflyttning, hastighet eller acceleration avses vid beskrivning av ett dynamiskt förlopp. Oklarheter på denna punkt har orsakat många missförstånd.

Svängningsmodell

Vid analys av svängningssystem användes ofta modeller där stela massor, fjädrar och dämpare sammankopplas på olika sätt. Den enklaste modellen med en frihetsgrad består av en massa och en fjäder enligt figur 2.3 ($c = 0$). För detta system svänga fritt utan inverkan av någon yttre kraft kommer den stela massan att utföra en harmonisk svängningsrörelse med frekvensen

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ perioder/sekund (Hertz, Hz)}$$

där k är fjäderkonstanten [N/m] och m är massan [kg]



Figur 2.3 Fri svängning av modell med en frihetsgrad och olika dämpning

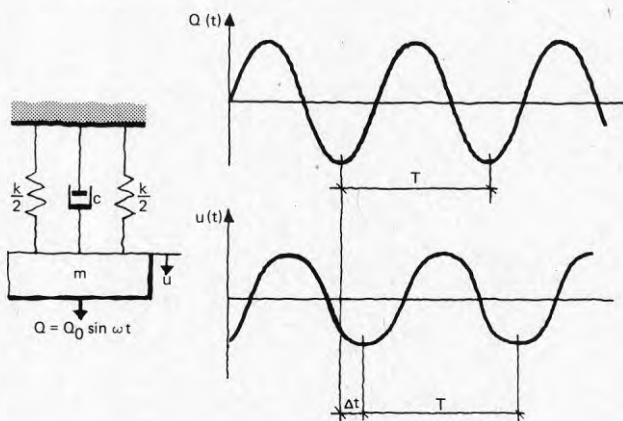
I alla svängande system sker en dämpning av rörelsen på grund av att energi lämnar systemet på olika sätt, t.ex. i form av värme. Ett vanligt antagande är att dämpningen är proportionell mot massans hastighet och bestäms av dämpningskonstanten c . I figur 2.3 åskådliggöres hur olika storlek på dämpningskonstanten c inverkar på fri svängning. Kritiskt dämpade system

återgår snabbast till jämviktsläget och användes t.ex. i visarinstrument. I litteraturen anges ofta dämpningen D som det procentuella förhållandet mellan aktuell dämpning och kritisk dämpning.

När ett svängningssystem belastas dynamiskt uppstår en s.k. påtvingad svängningsrörelse. I figur 2.4 visas den enkla svängningsmodellen med en frihetsgrad belastad med en harmoniskt varierande kraft. Som framgår av figuren kommer massan att röra sig med samma frekvens som den påtvingade kraften, men rörelsen är tidsförskjuten i förhållande till kraften. Förskjutningstiden Δt definierar en fasvinkel ϕ enligt

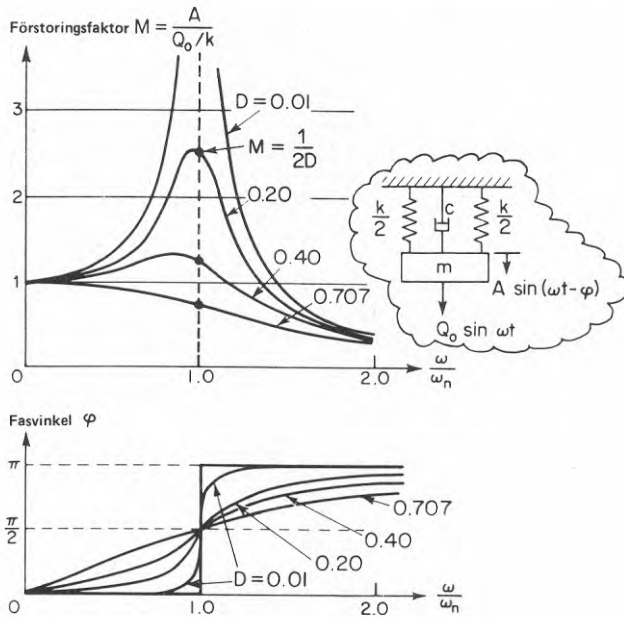
$$\phi^{\circ} = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360 \text{ eller } \phi^{\text{rad}} = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi$$

där T är svängningens period.



Figur 2.4 Påtvingad svängning av modell med en frihetsgrad

Amplituden hos den påtvingade rörelsen beror av belastningens frekvens i förhållande till den fria svängningens frekvens. När belastningens frekvens överensstämmer med systemets egenfrekvens inträffar resonans, varvid mycket stora rörelser kan uppträda om dämpningen är liten. Hur förstöringsfaktorn och fasvinkeln varierar med frekvens och dämpning visas i figur 2.5

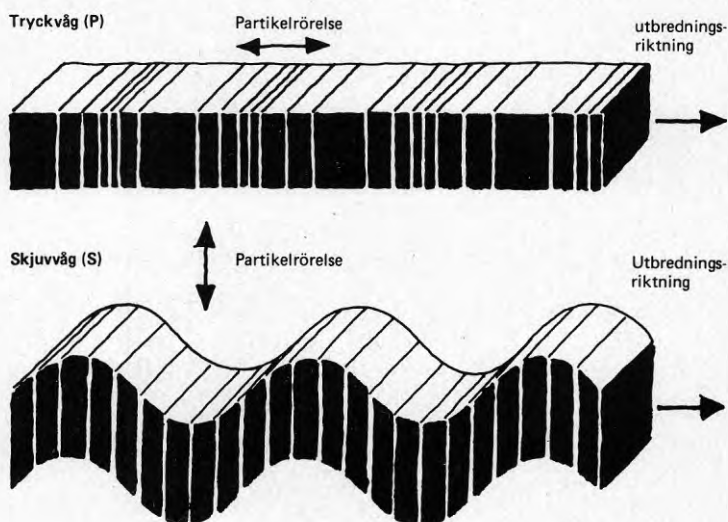


Figur 2.5 Förstoringsfaktor och fasvinkel vid påtvingad svängning (Richart, Hall and Woods, 1970)

Elastisk vågrörelse

I ett elastiskt medium utbreder sig energi i form av en elastisk vågrörelse. Två olika vågtyper kan särskiljas. Den snabbaste vågen kallas tryckvåg (P-våg) och sätter materialpartiklarna i en fram- och

återgående rörelse längs utbredningsriktningen på samma sätt som ljudvågor i luft. Den andra vågtypen är en skjuvvåg (S-våg) där partiklarna rör sig vinkelrätt mot vågens utbredningsriktning. P- och S-vågor kallas gemensamt för volymvågor, figur 2.6.



Figur 2.6 Volymvågor vid elastisk vågrörelse

I en fri yta uppstår ytvågor av olika slag bl.a. Rayleighvågen (R-våg). I Rayleighvågen beskriver partiklarna en elliptisk rörelse vars amplitud minskar från ytan till ett djup som ungefär motsvarar en våglängd. Vid samtliga begränsningsytor sker dessutom reflektion och refraktion på motsvarande sätt som gäller för ljusvågor.

Enligt elasticitetsteorin råder ett samband mellan utbredningshastigheten för olika vågtyper och de elastiska materialkonstanterna. Således kan t.ex. kompressionsmodulen (M) och skjuvmodulen (G) direkt beräknas ur tryck- och skjuvvågshastigheterna c_p respektive c_s :

$$M = \rho \cdot c_p^2$$

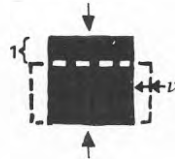
$$G = \rho \cdot c_s^2$$

$$[\text{Pa}] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2$$

där ρ är det elastiska materialets densitet. Ytterligare samband framgår av figur 2.7.

Kontraktionstal

$$\nu = \frac{1 - 2 (c_s/c_p)^2}{2 - 2 (c_s/c_p)^2}$$



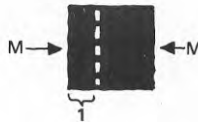
Skjuvmodul

$$G = \rho \cdot c_s^2$$



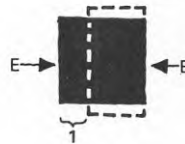
Kompressionsmodul

$$M = \rho \cdot c_p^2$$



Elasticitetsmodul

$$E = 2(1 + \nu) \cdot G$$

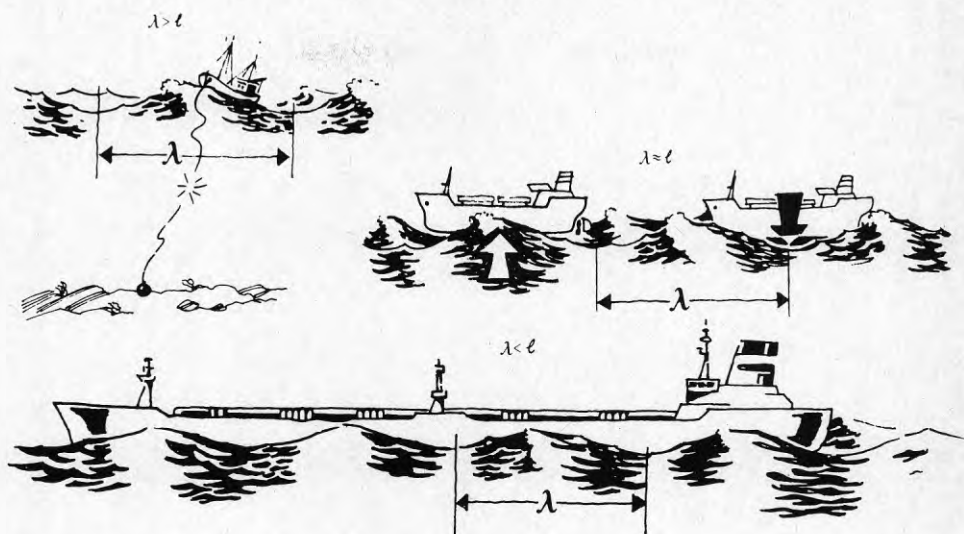


Figur 2.7 Samband mellan utbredningshastigheter och elastiska materialkonstanter.

I en elastisk vågrörelse med utbredningshastigheten c råder sambandet

$$c = f \cdot \lambda$$

mellan vågrörelsens frekvens, f , och dess våglängd, λ . Våglängden definieras som det minsta avståndet mellan två punkter med samma fasläge. Våglängdens storlek i förhållande till storleken hos den konstruktion som påverkas av vågrörelsen avgör deformationsbilden, vilket illustreras i figur 2.8.



Figur 2.8 Illustration av den relativa våglängdens betydelse. (Thurner, 1976)

Referenser: Bodare, A. Lokalseismologisk teori med grundexempel, Uppsala Universitet, UPTEC 76 11OR

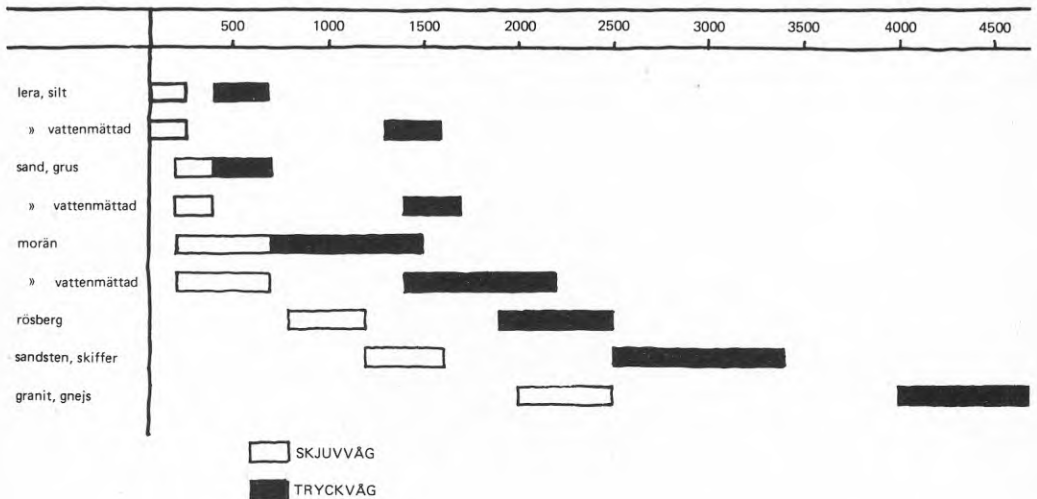
Graff, K.F. Wave motion in Elastic Solids, Clarendon Press, Oxford 1975.

Richart, Hall and Woods. Vibrations of Soils and foundations, New Jersey 1970.

3. DYNAMISKA EGENSKAPER HOS JORD OCH BERG

Jord- och bergmaterial utgöres av ett relativt stelt kornskelett och porer. Porerna är fyllda med vatten och luft. I jord består kornskelettet av mineralkorn som hålls samman av friktions- och kohesionskrafter. I sedimentära bergarter är mineralkornen hopcementerade. I magmatiska och metamorfa bergarter har mineralen kristalliserats till en bergmassa, som vanligtvis innehåller vattenförande sprickor och slag.

Det är i praktiken ofta svårt att ange en markant gräns mellan jord och berg eller mellan olika jord- och bergarter. Svårigheten att ur dynamisk synpunkt definiera olika gränser illustreras i figur 3.1. Figuren visar exempel på normala värden för tryck- och skjuvvågors utbredningshastighet i olika jord- och bergarter.



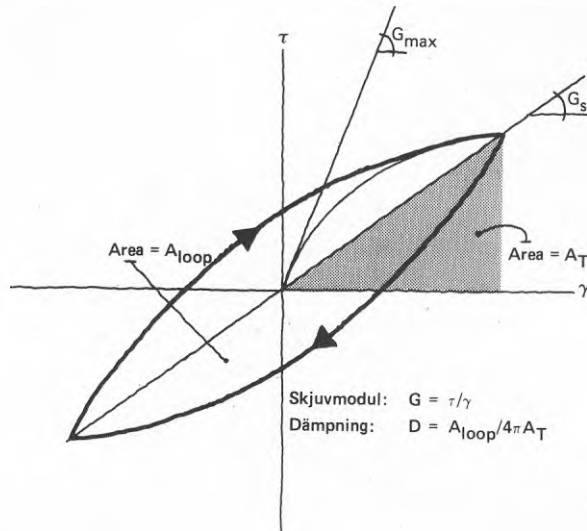
Figur 3.1 Utbredningshastighet för P- och S-vågor i olika jord- och bergarter.

Vid belastning av jord- och bergmaterial överförs spänningarna dels genom kornskelettet som effektivtryck och dels genom vattnet i porerna som porvattentryck. Växelverkan mellan effektivtryck och porvattentryck kan vara mycket komplicerad och svår att analysera.

Vid dynamisk belastning av vattenmättad, löst lagrad sand kan jordflytning ("liquefaction") uppträda. Detta innebär att kornskelettet kollapsar och jorden uppträder som en tung vätska. Fenomenet orsakas av att porvattenövertrycket ej hinner dräneras bort då mineralkornen vill inta en tätare lagring. Jordflytning är speciellt aktuell i samband med jordbävningar och större sprängningar.

Vid analys av jord- och bergdynamiska problem användes ofta beräkningsmetoder, som är baserade på elasticitetsteorin, trots att jord och berg ej är linjärt elastiska material. Anledningen är dels att kunskapen om verkliga deformationsegenskaper är bristfällig och dels att elastiska system är relativt enkla att matematiskt analysera.

De två viktigaste materialegenskaperna ur dynamisk synpunkt är skjuvmodul och materialdämpning som definieras i figur 3.2. Vid cyklisk belastning absorberas en del av den tillförda energin och omvandlas till värme (hysteresiseffekt). Den maximala skjuvmodulen G_{\max} erhålles vid mycket små deformationer. Sekantmodulen G_s användes i allmänhet för att ange skjuvmodulen vid en viss deformationsstorlek.



Figur 3.2 Skjuvmodul och materialdämpning vid cykliska belastningsförsök.

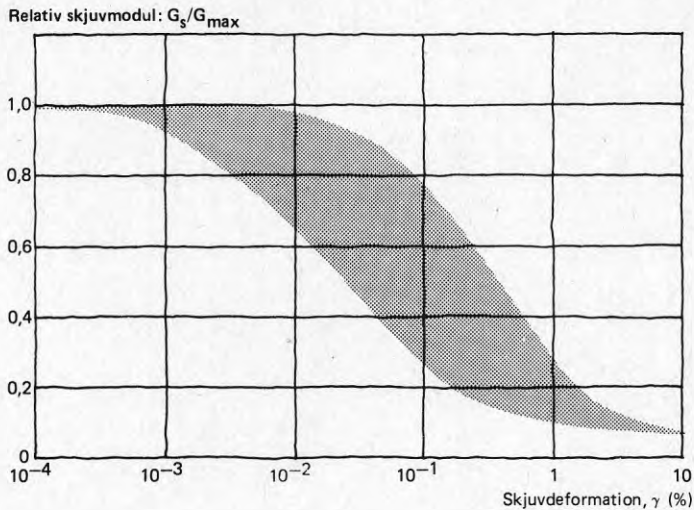
Skjuvmodul

Skjuvmodulen i ett jordmaterial beror främst av effektivspänningsnivå, portal och deformationsstorlek. Skjuvmodulen vid mycket små deformationer (G_{max}) skall helst bestämmas genom mätning av skjuvvågens utbredningshastighet in situ. Alternativt kan G_{max} beräknas med hjälp av olika formler. För exempelvis rundkornigt friktionsmaterial används ofta formeln (Hardin & Drnevich 1972)

$$G_{max} = \frac{686 (2,17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma_0 \cdot P_a)^{0,5}$$

där e är portalet ($0,3 < e < 0,8$) σ_0 är effektivspänningsnivån och P_a är atmosfärtrycket i samma enhet som σ_0 och G_{max} .

Deformationsstorleken har mycket stor inverkan på skjuvmodulen. Som framgår av figur 3.3 kan skjuvmodulen vid 1% deformation vara mindre än 10% av G_{\max} .

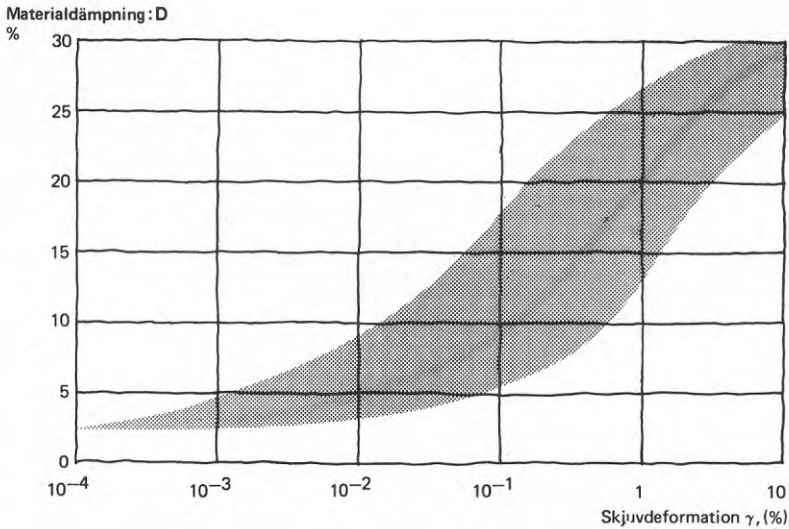


Figur 3.3 Samband mellan skjuvmodul och skjuvdeformation

Dämpning

Materialdämpning eller inre dämpning är ett mått på den energi som omvandlas till värme. Liksom skjuvmodulen är materialdämpningen beroende av bl.a. effektivspänningsnivå och portal men framförallt deformationsstorlek som framgår av figur 3.4.

I många tillämpningar är det viktigt att kunna beräkna hur vibrationerna från en vibrationskälla avtar med avståndet från källan. Vibrationernas amplitud minskar i ett oändligt halvrum dels på grund av geometrisk utbredning, sk geometrisk dämpning och dels på grund av materialdämpning som innebär en energiabsorbion.



Figur 3.4 Samband mellan materialdämpning och skjuvdeformation

För ytvågor, som utbreder sig tvådimensionellt utefter markytan visar resultat från fältförsök att ytvågans amplitudminskning följer sambandet:

$$A = A_1 \sqrt{\frac{r_1}{r}} \cdot e^{-\alpha(r-r_1)}$$

där A_1 är svängningsamplituden på ett visst avstånd r_1 och A är svängningsamplituden på avståndet r från vibrationskällan. Absorbionskoefficienten α varierar mellan 0,03 och 0,3 m^{-1} beroende på undergrundens egenskaper.

Ovanstående samband förutsätter homogena förhållanden och stort djup till berg. Om undergrunden är skiktad och oregelbunden uppstår reflekterade tryck- och skjuvvågor. Samverkan mellan olika vågtyper och fokuseringseffekter i undergrunden kan ge upphov till

lokala variationer med oväntat stora vibrations-
amplituder.

Referenser: Andreasson, B., Bestämning av kohesionära
jordars dynamiska egenskaper, CTH,
Göteborg 1975.

Richart, Hall and Woods. Vibration of
Soils and Foundations, New Jersey 1970.

Schwab, E., Behaviour of dynamically
loaded soils, Litteraturstudie, KTH,
JoB nr 5, Stockholm 1976.

4. PRAKTISKA TILLÄMPNINGSOMRÅDEN

4.0 Allmänt

Dynamiska egenskaper hos jord- och bergmaterial är aktuella i många praktiska tillämpningar. Byggnader, maskiner och människor utsättes för vibrationer orsakade av bl.a. jordbävningar, trafik, byggverksamhet och olika maskiner. Vibrationerna utbreder sig i marken och kunskap om undergrundens dynamiska egenskaper påverkar projekteringsarbete och val av lämpliga produktionsmetoder.

Åtgärder mot vibrationsstörningar kan utföras på olika sätt. I vissa fall kan vibrationskällans dynamiska belastning ändras eller isoleras från undergrunden. I andra fall kan åtgärder utföras i det föremål som är utsatt för vibrationer, som t.ex. ändrar resonansfrekvenser. Undergrundens förmåga att överföra vibrationer kan reduceras genom avskärmande konstruktioner.

Gemensamt för de flesta tillämpningar är att en teoretisk svängningsmodell är mycket komplicerad. Några generella beräkningsmetoder finns ej, utan förenklade metoder är utvecklade för olika praktiska tillämpningar. Undergrundens dynamiska egenskaper beaktas som regel endast i alltför begränsad omfattning.

En svårighet har tidigare varit att bestämma de olika materialens dynamiska egenskaper. Intresset för beräkningar kommer med all sannolikhet att öka i takt med att nya och förbättrade metoder utvecklas för bestämning av t.ex. skjuvmodul och dämpning. Avancerade beräkningar med exempelvis finita elementmetoden blir därmed mer meningsfulla.

I det följande beskrivs några aktuella tillämpningsområden där jord- och bergdynamiska egenskaper har avgörande betydelse.

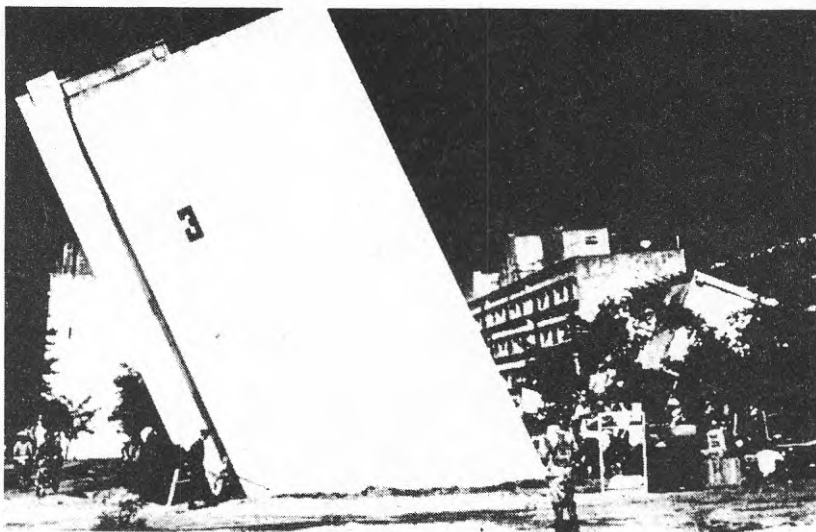
4.1 Jordbävningar

Jordbävningar eller jordskalv orsakas av plötsliga förskjutningar i jordskorpan. Sverige befinner sig i ett seismiskt lugnt område men jordbävningaspekter beaktas vid grundläggning av exempelvis kärnkraftverk. Den ökande utlandsverksamheten för svenska tekniker har medfört ett ökat intresse för jordbävningar och deras inverkan.

Vid ett jordskalv frigöres energi i form av tryck- och skjuvvågor. Skalvets läge kallas fokus och dess magnitud avser den energimängd som frigöres. Intensiteten på markytan är normalt störst i en punkt, epicentrum, rakt ovanför fokus. Magnituden anges i en logaritmisk skala och intensiteten beskrivs ofta i en skala (Mercalli) från I till XII baserad på observerad skadeverkan.

Undergrundens dynamiska egenskaper påverkar intensiteten. Skjuvmodulen i fast berg är stor, varför den elastiska vågrörelsen i t.ex. bergrum endast orsakar små rörelser. Nära markytan och speciellt i lösa jordlager blir rörelserna större, eftersom skjuvmodulen är mindre. I markytan sker en reflektion mot fri yta och svängningsamplituden fördubblas. Upprepad reflektion mellan markytan och underliggande bergyta kan i vissa fall ge upphov till ytterligare förstärkning av den elastiska vågrörelsen.

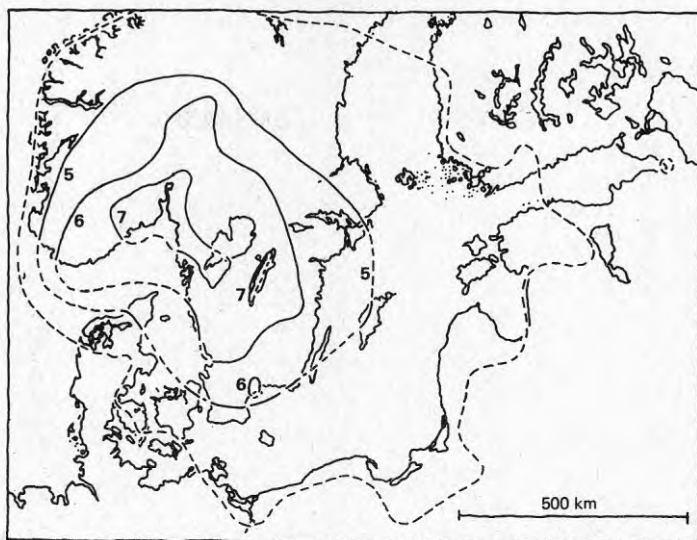
Den dynamiska belastningen från ett jordskalv kan ge upphov till jordflytning (liquefaction), vilket bl.a. inträffade vid den stora jordbävningen i Nigata 1964, se figur 4.1.



Figur 4.1 Exempel på skadeverkan av jordflytning i samband med jordbävning. (Nigata, Japan 1964)

För att söka ange sannolikheten för att ett jordskalv med en viss storlek skall inträffa inom ett område utföres en riskanalys. Analysen baseras på historiska data samt studier av geologiska strukturer och förkastningszoner. Genom bedömning av undergrundens egenskaper kan sedan intensiteten uppskattas. Resultatet sammanställs på en s.k. isoseismisk karta, se figur 4.2, där linjer sammanbinder orter med samma intensitet.

Med ledning av isoseismiska kartor kan ett dimensioneringsunderlag erhållas. För att rätt dimensionera en konstruktion eller byggnad krävs dessutom detaljerad kunskap om undergrundens dynamiska egenskaper. I många länder finns särskilda normer för dimensionerande seismisk belastning, bl.a. USA och Japan.



Figur 4.2 Exempel på isoseismisk karta
(Båth, 1970)

Vid dimensionering av byggnadskonstruktioner med hänsyn till seismisk belastning används antingen kraft- eller rörelsemetod. Vid kraftmetoden påföres en horisontell seismisk tröghetskraft bestämd av den dimensionerande accelerationen. Beräkning enligt rörelsemetoden sker på dator och baseras på hela svängningsförloppet.

Beräkning av rörelse vid seismisk belastning kan också ske genom s.k. responsspektra, som anger rörelsen hos en teoretisk svängningsmodell. Beräkningen baseras på ett antal aktuella seismiska registreringar. Resultatet kan användas för bedömning av maximal rörelse, maximal hastighet eller maximal acceleration hos olika konstruktionsdetaljer.


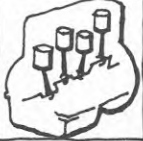

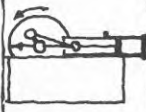


Aktuell forskning i Sverige och framför allt utomlands berör främst riskanalys och beräkningsmetoder. Behovet av korrekta bestämningar av undergrundens dynamiska egenskaper är stort.

4.2 Dynamiskt belastade fundament

Ett fundament är en byggnadsdel som överför belastningar från en maskin till underlaget - jord, berg eller pålar. Skorstenar, vindkraftverk och off-shore konstruktioner är andra dynamiskt belastade konstruktioner med motsvarande problemställningar.

I början av den industriella utvecklingen var maskinerna långsamma och relativt små. Fundamentens dimensioner bestämdes empiriskt utan hänsyn till maskinernas särart och undergrundens dynamiska egenskaper. Det moderna industrisamhällets tekniska utveckling med allt större, snabbare och känsligare maskiner har medfört att man vid dimensionering av maskinfundament även måste ta hänsyn till den dynamiska belastningen av fundament och undergrund.

Vid dimensionering av maskinfundament måste man känna till maskinens funktionssätt och den belastning som överförs till fundamentet, samt undergrundens dynamiska egenskaper. Exempel på olika maskinfundament presenteras i figur 4.3.

| Maskintyp | | | Fundamenttyp | | |
|---|---|---|---|---|--|
| Rörelsens resp. kraftens art | | | Utformning | | |
| Rotation harmonisk | Fram- och återgående | Stöt-transient | Block-fundament | Skiv-fundament | Ram-fundament |
|  |  |  |  |  |  |
| Generator, El.motor, Turbin, Fläkt, Pump | Förbränningsmotor, Kolv-pump, Kompressor, Ramsåg | Hejare, Hammare, Dragmaskin, Press, Stans | Hejare, Maskiner med varvtal $n_m < 10$ Hz | Maskiner med varvtal $n_m < 25$ Hz | Maskiner med varvtal $n_m > 25$ Hz |

Figur 4.3 Exempel på olika maskinfundament.

I befintliga maskinuppställningar kan oförutsedda vibrationer uppstå, som ger upphov till slitage av maskiner, skador på tillverkade produkter samt störningar i kringliggande bebyggelse. Störningarna kan vara mycket besvärliga ur arbetsmiljösynpunkt och orsaka stora kostnader för aktuell industri.

Uppstår vibrationsstörningar bör de åtgärdas relativt omgående, eftersom de kan förvärras snabbt. Orsaken till störningen är ofta svår att lokalisera och ibland krävs omfattande undersökningar. I många fall är en balansering av maskinen tillräcklig men ofta erfordras ändring både av maskinens belastningskaraktäristika och fundamentets eller undergrundens egenskaper.

Ur beräkningssynpunkt är svängningssystemet maskin-fundament-undergrund-byggnad komplicerat. De rörelser som är aktuella är dels förskjutningar i horisontell och vertikal led och dels olika rotationer av fundamentet. För många praktiska problem kan dock förenklade antaganden göras, som ger tillfredsställande resultat.

Den forskning som bedrivs i Sverige berör till stor del åtgärder vid skador i befintlig industri. Ur dimensioneringssynpunkt studeras bl.a. grundläggning på pålar och inbördes inverkan av närliggande fundament. Behovet av korrekta bedömningar av undergrundens dynamiska egenskaper är stort.

Maskinfundament behandlas i huvudsak av arbetsgrupp 7: "Maskinfundament".

4.3 Mikroseismer

Mikroseismer - akustiska emissioner eller knäppningar - uppstår på grund av bristningar i jord och berg i samband med mycket små rörelser. Omlagringar pågår kontinuerligt men mikroseismer är mest markanta omedelbart efter belastningsändringar samt omedelbart före brott, då deras intensitet och frekvens ökar.

Med hjälp av vibrationsmätning och speciella analyser kan mikroseismer särskiljas från bakgrundsbrus och andra störningar. Utveckling pågår av rutiner som dokumenterar antalet mikroseismer per tidsenhet och specificerar förändringar i mikroseismers karaktär.

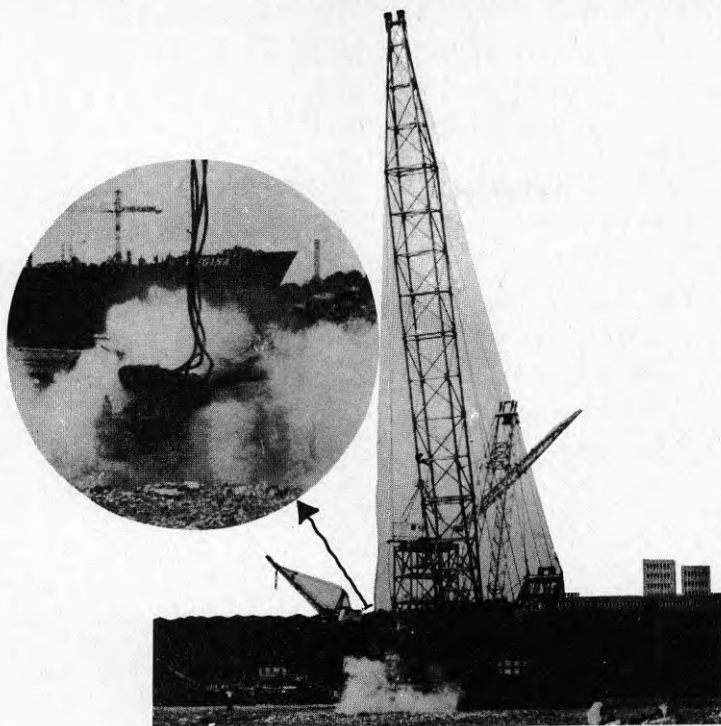
Varningssystem som baseras på analys av mikroseismer har utvecklats för övervakning av ras i bergrum, tunnlar och bergslänter. Detta förfarande kan troligtvis även användas för att övervaka jordslänter och jorddammar även om mikroseismer i jord är svåra att identifiera.

4.4 Packning

Packning av olika jord- och sprängstensmaterial utförs sedan länge med vibrerande redskap och andra dynamiska metoder. Vibrering påföres antingen från markytan med hjälp av vibratorplattor och vibrationsvältar eller på djupet genom s.k. vibroflotation med hjälp av stavvibratorer. Packning till stora djup kan också utföras med fallvikt, s.k. dynamisk konsolidering, enligt förfarande som visas i figur 4.4.

Vid jordpackning med hjälp av vibratorplatta eller vibrationsvältar utsätts markytan för snabbt återkommande stötkrafter. De från ytan utgående krafterna sätter materialet i rörelse och vilofriktionen mellan materialpartiklarna upphävs. Omlagring och packning sker under samtidig inverkan av partiklarnas rörelsetillstånd och de dynamiska tryck- och skjuvpåkänningar som stötkrafterna ger upphov till.

Packning av jord innebär i princip en plastisk deformation varvid den energi som tillföres absorberas. När jorden packas förändras dess egenskaper så att det packade jordlagret blir alltmer elastiskt. Detta medför att tillförd energi kan utbredas till allt större djup och avstånd från packningsredskapet. Den packade zonens tjocklek ökar härigenom successivt.



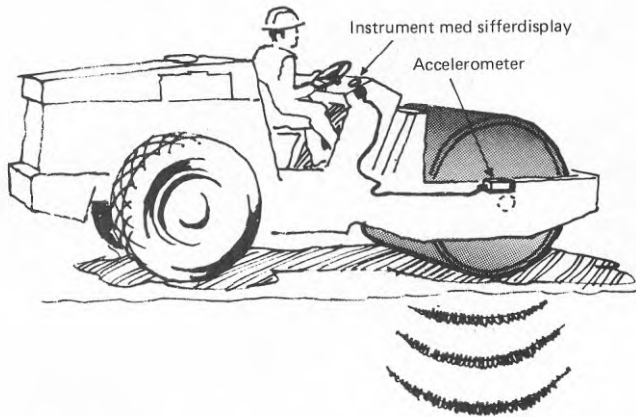
Figur 4.4 Dynamisk konsolidering: Packning av sprängstensfyllning med 40 ton fallvikt från 40 m höjd.

Den djupverkan som kan erhållas vid packning beror främst av packningsredskapet, antal överfarter och undergrundens egenskaper. Packningsredskap väljs bl.a. med hänsyn till aktuell jordart och vattenhalt samt arbetets storlek. Det måste påpekas att dynamiska metoder ej alltid är lämpliga. I silt och lera kan statiska vältar vara ett bättre alternativ framför allt vid höga vattenhalter.

Ett väl genomfört packningsarbete skall resultera i en homogen jordmassa med hög packningsgrad. Kontroll av packningsgrad sker vanligtvis med sand- eller vattenvolymeter och jämförelse med en standardiserad packning på laboratorium. Detta förfarande är dyrt och tidskrävande. Genom mätning av skjuvvågens utbred-

ningshastighet (jämför kapitel 5) kan en bedömning av uppnådd packningsgrad erhållas på mycket kort tid. Erhållna värden måste emellertid kalibreras med resultat från konventionella metoder.

Sedan länge har man frågat efter en packningsmätare på vibrationsvältar, som kan ge föraren information om resultatet av packningen. En sådan packningsmätare har nyligen utvecklats och illustreras i figur 4.5. Signaler från en accelerometer monterad på den vibrerande valsen analyseras. Instrumentet anger relativa mätvärden som motsvarar undergrundens dynamiska respons och därigenom indikerar materialets packningsgrad.



Figur 4.5 Packningsmätare för vibrationsvält.

4.5 Pålning

Pålslagning i Sverige utförs till övervägande del med fallhejare, men under senare år har vibrationshejare kommit till ökad användning. Vibrationshejare orsakar som regel mindre ljud- och vibrationsstörningar i omgivningen än fallhejare och är särskilt lämpade för neddrivning av pålar i friktionsjord. För fallhejare finns vedertagna stoppslagningskriterier och arbete

med kriterier för vibrationshejare pågår.

För en utförlig beskrivning av pålning hänvisas till det arbete som bedrivs av IVA's pålkommission.

4.6 Sprängning

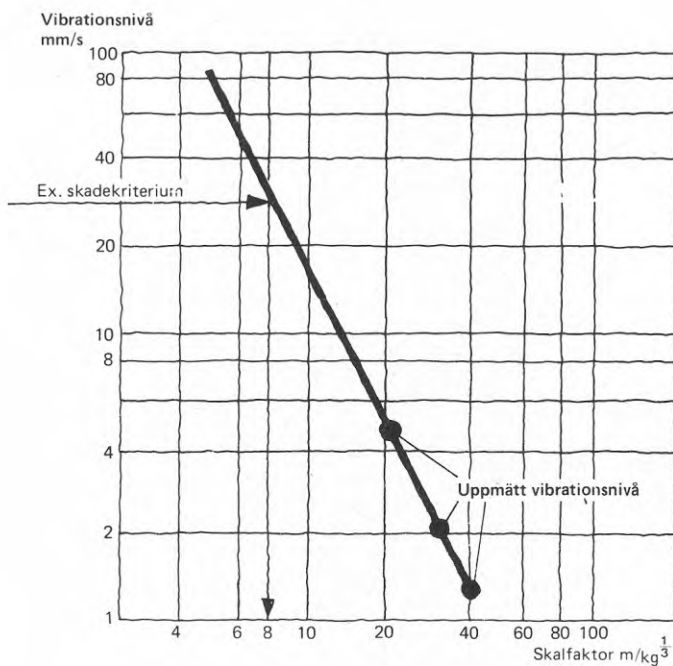
Den svenska berggrunden utgör som regel en mycket lämplig grund för känsliga anläggningar och konstruktioner och svensk teknologi för bergsprängning är välkänd världen över.

Dagens sprängteknik ger goda möjligheter att begränsa vibrationerna samtidigt som sprickbildning i tak och väggar blir låg, bergkonturen slät och sönderfallet av det utsprängda berget blir godtagbart.

Sprängningar ger upphov till vibrationer vars storlek beror av samverkande laddningsmängd, inspänningsförhållanden och bergets egenskaper samt avståndet från sprängplatsen. Genom att anpassa drivningsmetod samt borrh- och tändplaner kan vibrationernas storlek kontrolleras.

Vid stora s.k. industriella sprängningar och vid stora avstånd (~ 1000 m) är den totala laddningsmängden avgörande för vibrationernas storlek. Problemen med de stora salvorna vid gruvdrift och stenbrott är kända men ännu ej helt kartlagda och analyserade.

Vid mindre sprängningar och kortare avstånd (~ 100 m) är den momentant detonerande laddningsmängden avgörande för vibrationernas storlek. För planering av sprängningsarbetet används ofta empiriska samband mellan laddning, avstånd och vibrationsstorlek, s.k. likformighetslagar enligt ett förfarande som illustreras i figur 4.6.



Figur 4.6 Exempel på tillämpning av likformighetslagar.

En likformighetslag erhålls genom provskjutningar och vibrationsmätning på olika avstånd från sprängplatsen. Med hjälp av diagrammet kan för olika skadekriterier en maximal tillåten momentant detonerande laddningsmängd beräknas för ett givet avstånd.

Riktvärden för skador och dynamiska problem i samband med sprängningar behandlas i huvudsak av arbetsgrupp 5: "Trafik och byggverksamhet".

Referenser: Båth, M. Introduktion till seismologin Natur och Kultur, Stockholm 1970

Bennerhult, O. Gränsvärden för vibrationer och stötar, Statens Naturvårdsverk, Stockholm 1970

Forsssblad, L. Jordvibreringsundersökningar, Dynapac Maskin AB, Solna 1963

forts. ref. Lundborg, N. Markvibrationers avstånds- och laddningsberoende, Byggforskningsrådet R11:1978.

Moore, P. Bibliography on machine foundations, Byggforskningsrådet D6:1978

Richart, Hall and Woods. Vibrations of Soils and Foundations, New Jersey 1970.

Thurner, H. Seismisk mätmetodik - vibrationer, Geodynamik AB, Stockholm 1976.

Thurner, H. och Svensson, C. Övervakning av mikroseismer - fältmätningar, Geodynamik AB, Stockholm 1977.

Weiner, D. Vibrationer i ramsågverk, KTH, JoB nr 8, Stockholm 1977.

5. UNDERSÖKNINGSMETODER

5.0 Allmänt

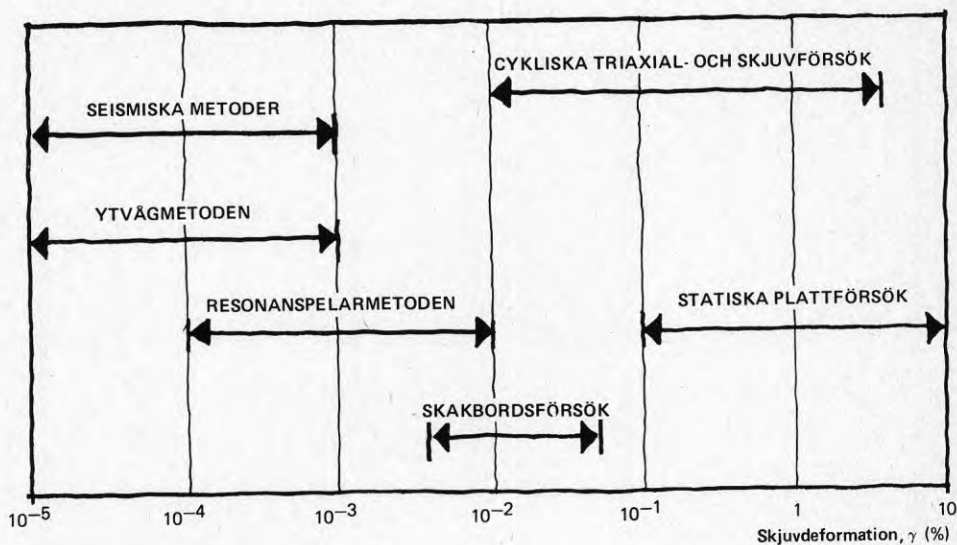
Kunskap om undergrundens egenskaper är nödvändig i många sammanhang. För grundläggning av dynamiskt belastade konstruktioner fordras främst kunskap om jordlagrens egenskaper och mäktighet. Vid jordarbeten t.ex. väg- och dammbyggen har jordarters egenskaper ur massförflyttningssynpunkt och användbarhet som byggnadsmaterial stor betydelse. För underjordsarbeten erfordras kunskap om undergrundens egenskaper på aktuellt djup.

Ett projekteringsarbete är normalt indelat i olika faser där behovet av detaljkunskaper underhand ökar. Under lokaliserings- och utredningsskedet erfordras som regel endast en översiktlig information. Vid detaljprojektering erfordras däremot detaljerade resultat från provtagning och laboratorieförsök.

Val av undersökningsmetod är således beroende dels av det aktuella projektets karaktär och omfattning och dels var i projekteringskedet man befinner sig. Detaljerade undersökningar är normalt dyra. Planeringen av dessa undersökningar måste därför vara omsorgsfull och bör baseras på resultat från tidigare mer översiktliga undersökningar.

I detta kapitel presenteras några olika undersökningsmetoder för bestämning av undergrundens dynamiska egenskaper. Val av metod måste avgöras med hänsyn till bl.a. geologi och problemställning samt omfattningen av den geotekniska undersökning som planeras. Dynamiska metoder bör betraktas som komplement till mer konventionella undersökningsmetoder och resultaten bör ej utvärderas oberoende av varandra. Undersökningar i borrhål och på laboratorium är främst aktuella under detaljprojekteringskedet.

Utvecklingen av dynamiska undersökningsmetoder har varit nödvändig, eftersom deformationerna vid dynamiska belastningar som regel är mycket små, jämför figur 1.1. De mätområden som är typiska för olika dynamiska undersökningsmetoder visas i figur 5.1.



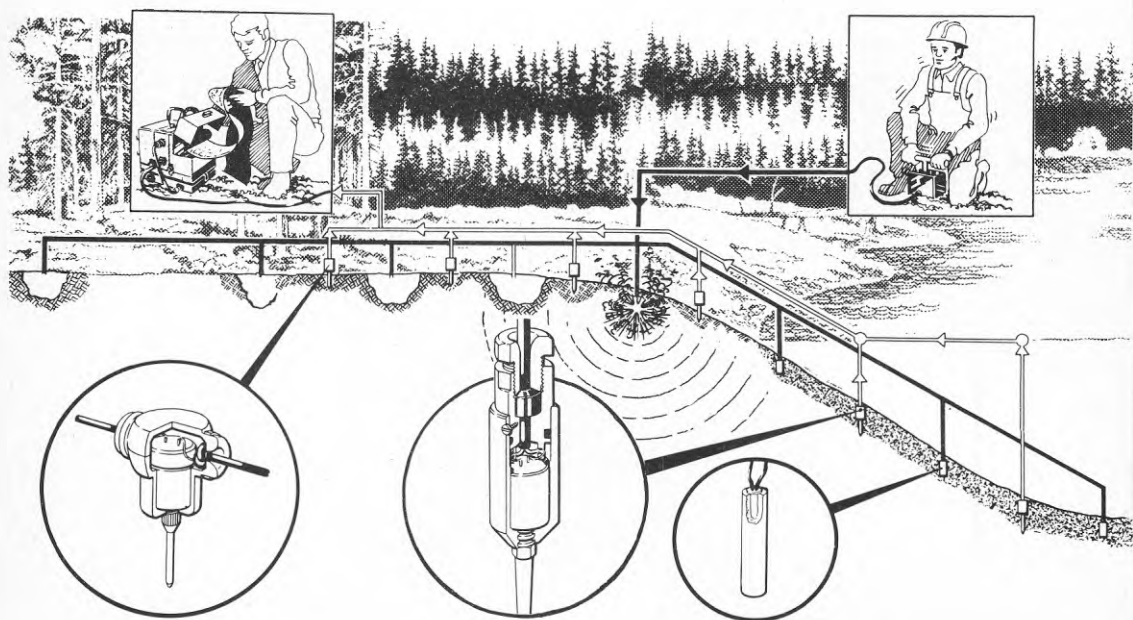
Figur 5.1 Skjuvdeformationen, γ vid några olika dynamiska undersökningsmetoder.

5.1 Fältmetoder

De dynamiska metoder som används för insitu-undersökningar baseras antingen på studium av elastisk vågrörelse eller på studium av deformationer vid dynamisk belastning.

S_e_i_s_m_i_k

Seismiska undersökningsmetoder har sedan länge använts för att erhålla översiktlig information om undergrundens egenskaper på olika djup. Exempel på utförande av en konventionell seismisk undersökning visas i figur 5.2.



Figur 5.2 Exempel på utförande av en konventionell seismisk undersökning. (Thurner 1976)

I konventionell seismik studeras enbart tryckvågens utbredning i undergrunden och tolkningsmöjligheterna blir begränsade, jämför figur 3.1. Under senare år har man med hjälp av speciell exciteringsapparat och avancerad signalanalys även kunnat bestämma skjuv- vågens hastighet och andra karaktäristika hos den elastiska vågrörelsen.

Resultat från dessa mer avancerade seismiska undersökningsmetoder ger förutom undergrundens dynamiska egenskaper information om

- jord- och berglagerindelning
- jordarter och blockhalt
- grundvattennivå
- lagringstäthet
- schaktbarhet och bärighet för arbetsmaskiner

- sprickighet och krosszoner i berg.

Studier av samband mellan dynamiska parametrar och olika materialegenskaper pågår.

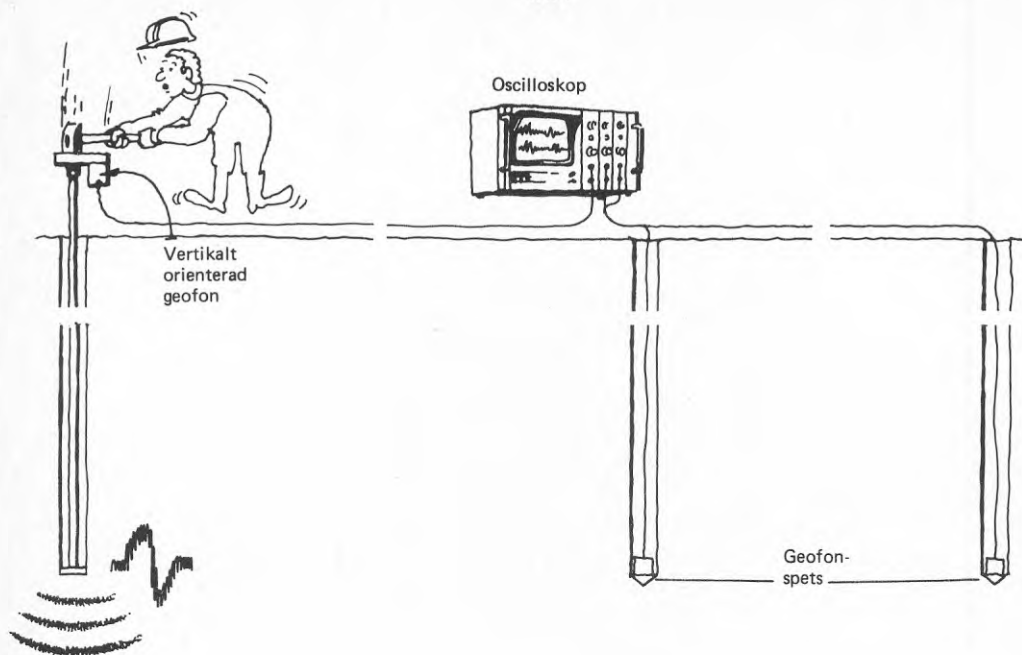
Y_t_v_å_g_s_m_e_t_o_d_e_n

En snabb metod att översiktligt bestämma undergrundens dynamiska egenskaper är den s.k. ytvågs- eller Rayleighvågsmetoden. Ytvågens utbredningshastighet kan för praktiskt bruk sättas lika med skjuvvågs-hastigheten. Genom att mäta ytvågens hastighet kan man således bestämma en genomsnittlig skjuvmodul hos det ytliga skiktet. Ytvågen åstadkommes vanligtvis med hjälp av en vibrator, som placeras på markytan.

Den beräknade skjuvmodulen utgör ett medelvärde för skiktet mellan markytan och till ett djup som motsvarar ungefär en våglängd hos vågrörelsen. En profil som visar skjuvvågens hastighet ned till några tiotal meters djup kan erhållas genom att variera vibrationens frekvens och därmed dess våglängd.

B_o_r_r_h_å_l_s_m_e_t_o_d_e_n

En mer tillförlitlig metod att mäta våghastigheter i fält är att använda sig av CH (crosshole)- eller DH (downhole)-metoderna. Vid ett CH-försök (figur 5.3) alstras en vågrörelse på en viss nivå i undergrunden. I olika borrhål på samma nivå finns ett antal, minst två, givare och signalerna från dessa registreras på en skrivare eller oscilloskop. Ur registreringarna kan man bestämma tryck- och skjuvvågens utbredningshastighet på olika nivåer om avståndet mellan borrhålen är kända.

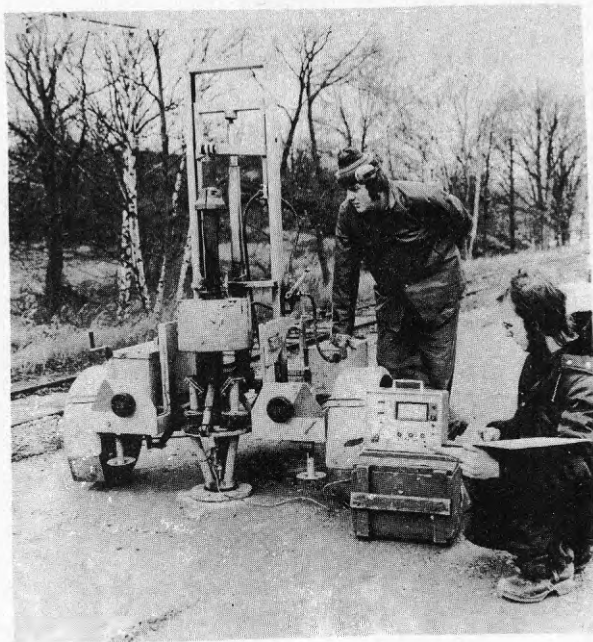


Figur 5.3 Exempel på ett CH-försök (crosshole)

DH-metoden är en variant på CH-metoden. Man mäter våghastigheten mellan två under varandra liggande punkter i samma borrhål. Olika utrustning användes för excitering antingen på markytan eller i borrhålet. Mätning och registrering görs på samma sätt som vid CH-metoden.

F_a_l_l_v_i_k_t

Vid undersökningar med fallvikt registreras viktens retardation under stötförloppet. Ur den registrerade signalen kan ett last-deformationssamband beräknas. Metoden användes bl.a. i samband med packningskontroll och bedömning av vägars bärighet. Se figur 5.4.



Figur 5.4 Exempel på undersökning med fallvikt

5.2 Laboratoriemetoder

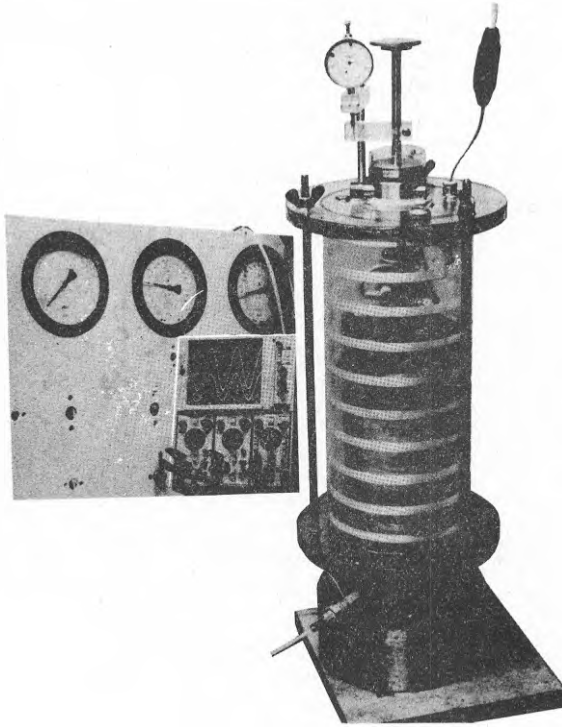
De vanligaste laboratoriemetoderna för bestämning av dynamiska egenskaper är resonanspelarmetoden och cykliska belastningsförsök.

R e s o n a n s p e l a r m e t o d e n

Resonanspelarmetoden (resonant column test), är speciellt utvecklad för bestämning av jordmaterials dynamiska egenskaper. Apparaturen finns i flera olika utföranden. Vanligtvis är provets ena ände fast inspänd medan dess andra, "fria" ände belastas med en harmonisk svängningsrörelse. Frekvensen varieras till dess resonans uppstår i provet.

Det mätområde som kan studeras vid ett resonanspelarförsök beror på apparaturens utförande. I den utrustning som visas i figur 5.5 kan skjuvdeformationen

varieras mellan 10^{-4} och $10^{-1}\%$. Provet i figuren utgörs av en cylinder med diametern 5 cm och höjden 10 cm.



Figur 5.5 Exempel på resonanspelarapparat
(Chalmers)

Med kännedom om lägsta resonansfrekvens, provets geometri och apparaturens egenskaper kan man bestämma våghastigheten i provet. I det fall den dynamiska belastningen är axiell kan E-modulen beräknas. Vid torsionssvängningar erhålles i stället G-modulen. Materialdämpningen kan också bestämmas exempelvis genom att studera responskurvas utseende.

Vid ett resonanspelarförsök kan man noggrannt studera olika parametrars inverkan på deformationsmodulerna och dämpningen, exempelvis inverkan av

- deformationsstorlek
- effektivspänningsnivå

- mättnadsgrad
- portal
- skjuvspänningsnivå
- överkonsolideringsgrad

Cykliska triaxial- och skjuvförsök

Vid cykliska triaxial- och skjuvförsök används konventionella triaxial- och skjuvapparater. Skillnaden är att man vid cykliska försök har ett mer avancerat belastningssystem, vanligtvis ett elektroniskt styrt hydrauliskt system och ett avancerat deformationsmätningssystem.

Vid University of Kentucky, USA, har man utvecklat en speciell skjuvapparat, med vilken man kan studera skjuvdeformationer över ett mycket stort deformationsområde. Det undersökta jordprovet är rörformat och torsionslasten påförs med hjälp av ett system av elektriska spolar och permanentmagneter. Deformationerna mäts med elektroniska lägesgivare med stor mätnoggrannhet.

Vid cykliska belastningsförsök eller s.k. kvasidynamiska försök är de dynamiska tröghetskrafterna försumbara, eftersom belastningsfrekvensen vanligen är mindre än 5 Hz.

5.3 Modellförsök

Ett tredje sätt att bestämma jord- och bergmaterials dynamiska egenskaper är modellförsök på laboratorium eller i fält. Som exempel kan nämnas modellfundament för bestämning av skjuvmodul och dämpningen hos systemet fundament-jord. Belastningen kan påföras t.ex. med en vibrator med steglöst reglerbar frekvens. En nackdel med dessa modellförsök är att resultat endast ger information om undergrunden inom en begränsad zon, maximalt till ett djup motsvarande dubbla plattdiametern.

En annan typ av modellförsök är att bygga en laboratoriemodell på ett skakbord. Relativt stora skakbord finns konstruerade med möjlighet att belasta dynamiskt i tre riktningar. Denna typ av modellförsök är speciellt lämplig för att studera samverkan mellan undergrund och byggnadskonstruktion vid exponering av vibrationer, t.ex. i samband med jordbävningar.

Referenser: Andreasson, B. Bestämning av kohesionära jordars dynamiska egenskaper. CTH, Göteborg, 1975

Gereben, L. Dynamiska undersökningsmetoder för insitu-bestämning av jordars fysikaliska egenskaper. Byggforskningsrådet, R10:1976.

Richart, Hall and Woods. Vibrations of Soils and Foundations, New Jersey 1970.

Stephansson, O., Lande, G. och Bodare, A. Seismik för ytuppsprucket berg. Teknisk Rapport 1978:17, Högskolan i Luleå.

Thurner, H. Seismisk mätmetodik - vibrationer. Geodynamik AB, Stockholm 1976.

6. MÄT- OCH ANALYSTEKNIK

För mätning och analys av dynamiska förlopp har speciellt under senare år en mängd olika mätinstrument och analysatorer utvecklats. Det är inte möjligt att här ge en heltäckande beskrivning av olika möjligheter eller att behandla de aspekter som måste beaktas. I stället görs ett försök att beskriva vissa principer och ge några exempel.

Ett generellt mät- och analyssystem består av följande komponenter:

- givare
- förstärkare
- observationsenhet
- registreringsutrustning
- analysator/dator

I givaren översättes mätpunktens rörelser till elektriska impulser. Vanligtvis användes geofoner, vilka registrerar lägesändringar (hastighet) eller accelerometrar, vilka registrerar hastighetsändringar (acceleration). Genom speciella givarmontage kan rörelseförloppet mätas i två eller tre dimensioner.

Förstärkare och kablar erfordras för att överföra de vanligen mycket svaga impulserna från givaren till observationsenheten. Systemet givare - förstärkare - kablar kalibreras vid varje mättillfälle med avseende på frekvens och amplitudåtergivning. Kabeldragning i terräng och byggnader är ett stort problem vid samtidig registrering av flera kanaler. Trådlös överföring kan ske men kostnaderna är ännu höga.

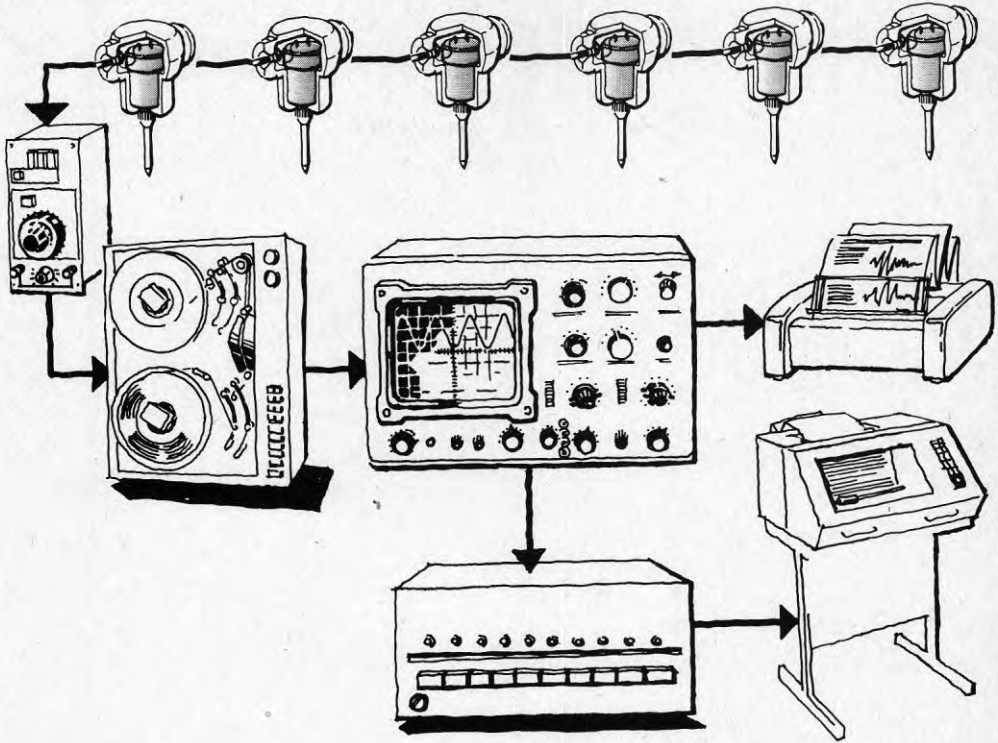
I observationsenheten studeras uppmätta signaler antingen på visarinstrument, UV-skrivare eller oscilloskop. Utrustning finns för samtidigt studium av en, två eller flera kanaler. I vissa fall när registrering ej erfordras är det tillräckligt att direkt jämföra och kontrollera olika mätpunkters rörelse eller avläsa vissa mätdata.

Erfordras dokumentation måste mätsystemet kompletteras med ett registrerande instrument, såsom polaroidkamera, UV- eller bläckskrivare eller vanligtvis en bandspelare. Data kan lagras på band antingen i analog eller digital form och standardbandspelare finns med upp till 14 spår. Genom speciell teknik (Puls Code Modulation, PCM) kan upp till 16 kanaler lagras på samma spår.

Analysenheten kan antingen vara ett portabelt instrument för fältbruk - ofta hopkopplad med observationsenheten - eller en större analysator i kombination med en dator för styrning och beräkningar. Analys kan utföras av signalens tidsförlopp (amplitud, starttidpunkt etc.) eller med avseende på frekvensinnehåll i en, två eller tre dimensioner. Vissa instrument kan utföra medelvärdesbildning och avancerade analyser såsom bestämning av överföringsfunktioner och andra jämförelser mellan rörelser i olika mät-punkter.

Redovisningen av resultat från dynamiska undersökningar är ej standardiserad utan ett flertal olika förfaranden tillämpas. Vanligtvis presenteras en tabelluppställning av vissa intressanta parametrar såsom amplituder och dominerande frekvenser samt diagram med intressanta tidsförlopp och frekvensanalyser. Resultat från utvärderingen kan också sammanställas på plan-, sektion- och profilritningar med angivande av jordlagerindelning, utbredningshastighet för olika vågtyper samt beräknade moduler.

Val av lämplig utrustning avgörs av det dynamiska förloppets karaktär, frekvensinnehåll och amplitud samt noggrannhetskrav. Av betydelse är också vilka parametrar som skall mätas och hur resultaten skall utvärderas och redovisas. Konsulter och tillverkare av utrustning har ofta utvecklat speciella system för rutinmässiga undersökningar.



Figur 6.1 Exempel på utrustning för mätning och analys av vibrationer

Referenser: Brüel & Kjaer: Introduktion till vibrationsmätning (broschyr)

Gereben, L. Dynamiska metoder för insitu-bestämning av jordars fysikaliska egenskaper. Byggeforskningsrådet R10:1976.

Turner, H. Seismisk mätmetodik - vibrationer. Geodynamik AB, Stockholm 1976.

REFERENSER

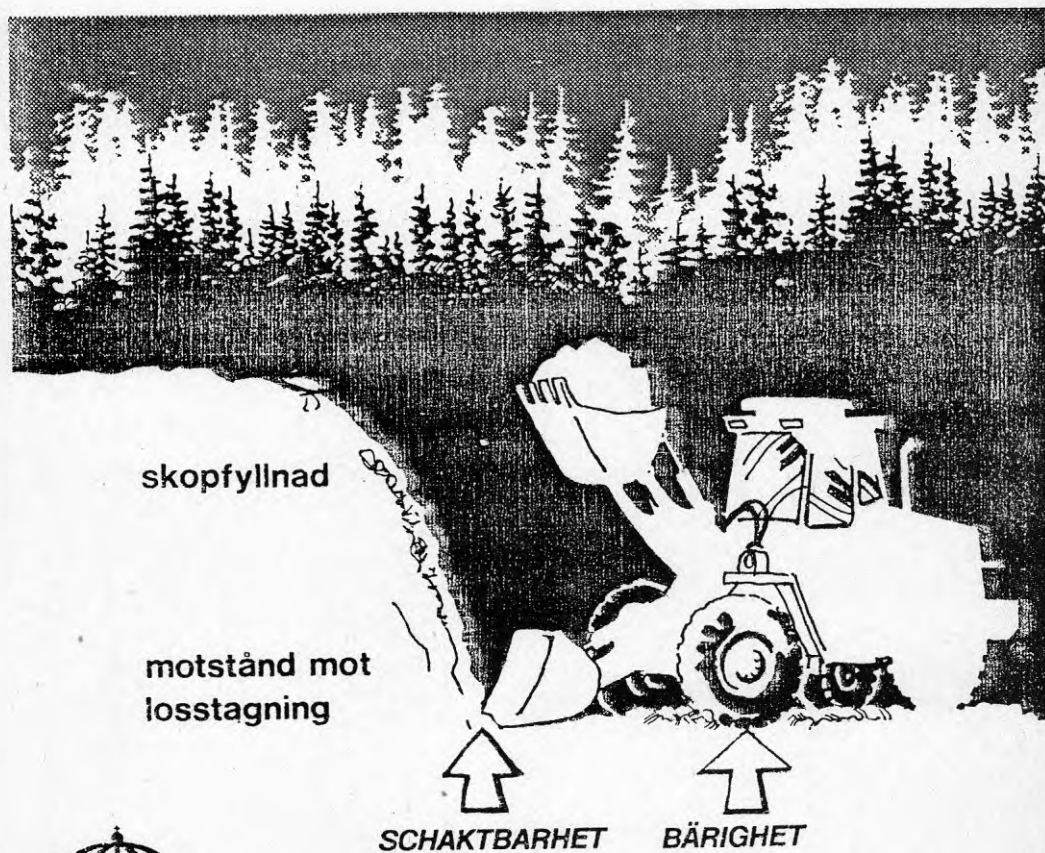
- ANDREASSON, B., Bestämning av kohesionära jordars dynamiska egenskaper. Chalmers, Göteborg, 1975.
- BENNERHULT, O., Gränsvärden för vibrationer och stötar. Statens Naturvårdsverk, Stockholm 1977.
- BODARE, A., Lokalseismologisk teori med grundexempel Uppsala Universitet, UPTec 76 11OR
- BRUEL & KJAER, Introduktion till vibrationsmätning (broschyr)
- BÅTH, M., Introduktion till seismologin. Natur & Kultur, Stockholm, 1970
- FORSSBLAD, L., Jordvibreringsundersökningar. Dynapac Maskin AB, Solna 1963.
- GEREBEN, L., Dynamiska undersökningsmetoder för insitu-bestämning av jordars fysikaliska egenskaper. Byggforskningsrådet, R10: 1976.
- GRAFF, K.F., Wave motion in Elastic Solids. Claredon Press, Oxford 1975.
- LUNDBORG, N., Markvibrationers avstånd- och laddningsberoende. Byggforskningsrådet R11:1978.
- MOORE, P., Bibliography on machine foundations. Byggforskningsrådet Dt:1978.
- RICHART, HALL and WOODS. Vibration of Soils and Foundations, New Jersey 1970.
- SCHWAB, E., Behaviour of dynamically loaded soils. Litteraturstudie, KTH, JoB nr 5, Stockholm 1976.
- STEPHANSSON, O., LANDE, G. och BODARE, A. Seismik för ytuppsprucket berg. Teknisk rapport 1978:17, Högskolan i Luleå.
- THURNER, H., Seismisk mätmetodik-vibrationer. Geodynamik AB, Stockholm 1976.
- THURNER, H. och SVENSSON, C. Övervakning av mikro-seismer - fältmätningar. Geodynamik AB, Stockholm 1977.
- WEINER, D., Vibrationer i ramsågverk. KTH, JoB nr 8, Stockholm 1977.

STATENS VÄGVERK

1976-12

SLUTRAPPORT
Utvecklingsprojekt 2.7

Definition av
Bearbetbarhet
för olika jordar



FÖRORD

I syfte att undersöka möjligheterna att klassificera de jordegenskaper som påverkar massförflyttningsprocessen tillsattes en arbetsgrupp 1969. Utredningsarbetet har krävt en omfattande test- och försöksverksamhet, vilka bedrivits som separata projekt och redovisas i följande rapporter:

- . Resultat från testverksamhet angående jordarters bearbetbarhet.
- . Grundundersökningsmetoder för bedömning av jordarters bearbetbarhet.
- . Testverksamhet i Allån-Alanäs angående jordarters bearbetbarhet.

Arbetsgruppens föreliggande slutrapport "Definition av bearbetbarhet för olika jordar" vänder sig främst till Vägverkets projektörer och produktionsplanerare. Klassificeringssystemet i här föreslagen utformning bör vara i princip tillämbart vid projektering även om införandet bör ske successivt allteftersom kunskaper och behov föreligger. Rapporten anses kunna utgöra underlag för kompletterande anvisningar.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

sida

Sammanfattning

| | | |
|-----|--|----|
| 0. | Inledning | 1 |
| 1. | Problembeskrivning | 2 |
| 2. | Kapacitetspåverkande faktorer | 3 |
| 2.0 | Allmänt | 3 |
| 2.1 | Motstånd mot losstagning | 5 |
| 2.2 | Skop-, blad-, korgfyllnad | 5 |
| 2.3 | Bärighet, rullmotstånd och markgrepp | 6 |
| 3. | Förslag till definition av bearbetbarhet | 9 |
| 3.0 | Allmänt | 9 |
| 3.1 | Schaktbarhet | 9 |
| 3.2 | Bärighet | 10 |
| 4. | Geoteknisk bestämning av bearbetbarhet | 13 |
| 4.0 | Allmänt | 13 |
| 4.1 | Geotekniska parametrar | 13 |
| 4.2 | Klassificeringsnycklar | 15 |
| 4.3 | Grundundersökningsmetoder | 17 |
| 5. | Blankettrutin för bearbetbarhetsklassificering | |
| 5.0 | Allmänt | 19 |
| 5.1 | Fältprotokoll | 19 |
| 5.2 | Värderad bearbetbarhet | 20 |
| 5.3 | Geoteknisk sammanställningsprofil | 21 |

Bilaga 0. Jordklassindelning enligt Planeringsdata APB

| | |
|---|---|
| " | 1. Systembild |
| " | 2. Klassificeringsnyckel för schaktbarhet |
| " | 3. Klassificeringsnyckel för bärighet |
| " | 4. Fältprotokoll |
| " | 5. Värderad bearbetbarhet |
| " | 6. Geoteknisk sammanställningsprofil |

INLEDNING

Utvecklingsprojektet "Definition av bearbetbarhet för olika jordar" påbörjades år 1969 i syfte att upprätta ett byggnadspassat system för klassificering och redovisning av jordegenskaper. Systemet skulle vara anpassat till modern massförflyttningsteknik och utnyttja geotekniskt mätbara parametrar för en objektiv klassificering. "Bearbetbarhet" är ett samlande begrepp för de jordegenskaper, som påverkar massförflyttningsprocessen.

Utredningsarbetet har krävt en omfattande försöksverksamhet för att dokumentera sambanden mellan ett jordmaterials geotekniska och produktionstekniska egenskaper: (Resultat redovisas i separata rapporter).

1969-70: "Utredning beträffande seismiska undersökningar vid vägprojektering". Fält- och arkivstudier av seismikens användbarhet vid bestämning av bergläge och överlagrade jordars egenskaper.

1971-73: Test av olika grundundersökningsmetoder och insamling av data för klassificeringsnycklar. Försöksobjekt "Lasele", "Örebro", "Skövde" och "Stöde".

1973-74: Test av upprättat förslag till klassificeringssystem vid vägobjektet Z-805 Allån-Alanäs.

För utvecklingsprojektet har svarat en arbetsgrupp bestående av:

| | | | | |
|-----------------|------|---------------|---------------|---------|
| Stig Andersson | f.n. | cBYNN | projektledare | 1969-72 |
| Ove Forslund | f.n. | cBA | projektledare | 1972-75 |
| Anders Lindberg | f.n. | cBAp | projektledare | 1975- |
| Lars Jernå | f.n. | DDa | | 1969- |
| Dan Carlsson | f.n. | BPb | | 1969- |
| Conny Svensson | f.n. | APu | | 1969- |
| Heinz Thurner | f.n. | Geodynamik AB | | 1970- |
| Björn Svedinger | f.n. | Geodynamik AB | sekr | 1973- |

Dessutom har såsom konsulter medverkat bl.a:

| | |
|----------------|------------------------------|
| Ewert Westlund | BYNN |
| Henry Berglund | DPu |
| Magnus Almgren | TVg |
| Allan Ekström | Statens Geotekniska Institut |
| Sven Engman | Väg- och trafikinstitutet |

Arbetsgruppen har tidigare utgivit:

| | |
|--------------|---------------|
| Delrapport 1 | februari 1970 |
| Delrapport 2 | december 1972 |
| Remiss | november 1974 |

1. PROBLEMBESKRIVNING

Inom VV uppgår massförflyttningskostnaden vid väg- bygge till c:a 30% av totala produktionskostnaden.

Massförflyttningskostnaden bestäms i huvudsak redan vid val av väglinje i plan och profil. För att kunna värdera alternativa utföranden krävs därför kännedom om jord- och bergmassornas egenskaper både ur användbarhets- och bearbetbarhetssynpunkt.

Ur användbarhetssynpunkt tillämpas för närvarande en uppdelning av jordarter i olika materialgrupper enligt BYA 311:6.:

"För vägtekiskt bruk har jordarterna som framgår av dimensioneringstabellerna, uppdelats i olika materialgrupper, där varje grupp omfattar jordarter med ur dimensioneringssynpunkt likartade egenskaper. Dessa grupper har betecknats med bokstäver A-E."

Ur bearbetbarhetssynpunkt finns för närvarande ingen klassificering baserad på geotekniska parametrar.

För bestämning av en schaktmaskins lastningskapacitet används kapacitetsdiagram i "Planeringsdata" (Verksamhetshandboken, del 2 kap. 1), vilket är en sammanställning av arbetsstudier utförda av arbetstekniska kontoret. I Planeringsdata tillämpas för en jordklassindelning med hänsyn till schaktbarheten vars klasser 1-5 baseras på jordartsbenämning och blockhalt enligt bilaga 0.

Det är önskvärt att öka objektiviteten i klassificeringen genom att använda geotekniska mätmetoder.

För transportvägar tillämpas en uppdelning i bra och mindre bra transportvägar enligt:

"Med bra resp mindre bra transportväg menas transportväg, där körhastigheten ej nämnvärt resp tydligt påverkas av faktorerna vägbredd, kurvor, sikt, mjukhet och ojämnhet".

Det är önskvärt att öka objektiviteten i denna klassificering genom att använda geotekniska mätmetoder och samtidigt utöka den till att gälla även dålig transportväg.

2. KAPACITETSPÅVERKANDE FAKTORER

2.0 Allmänt

För att bestämma en aktuell maskins eller maskinkombinations kapacitet erfordras kännedom om samtliga kapacitetspåverkande faktorer. Faktorerna kan indelas i nedan angivna huvudgrupper. Dessa påverkar i sin tur i princip alla hanteringsmomenten i massförflyttningsprocessen.



Fig. 1. Kapacitetspåverkande faktorer och hanteringsmoment.
Definition av hanteringsmomenten framgår av TFK nr 67.

| GRÄVMASKIN 1.2 M ³ SAE HYDRAULISK Vissa kapacitetspåverkande faktorer | | Tabellen är upprättad med 80 vfm ³ /h som bas Aktuell kapacitet = 80 vfm ³ /h + $\sum \Delta$ KAPACITET | | | | |
|---|------------------------|--|-----|---------|----------|-----|
| SCHAKTBARHET | | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| | Δ Kap | -40 | -15 | ± 0 | ± 15 | |
| SCHAKTHÖJD | Meter | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| | Δ Kap | -17 | -6 | ± 0 | +2 | |
| SVÄNGNINGSVINKEL | Grader | 180 | 135 | 90 | 45 | |
| | Δ Kap | -7 | -3 | ± 0 | +6 | |
| VÄNTETID PÅ FORDON | Min/Lass | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.2 |
| | Δ Kap | -7 | -3 | ± 0 | +4 | +8 |
| LASSTORLEK | Vfm ³ /Lass | | 5 | 7 | 9 | 11 |
| | Δ Kap | | -4 | ± 0 | +3 | +5 |
| TILLGÄNGLIG TID | Min/Tim | 45 | 50 | 55 | 60 | |
| | Δ Kap | -15 | -7 | ± 0 | +8 | |

Fig. 2. Exempel på vissa kapacitetspåverkande faktorer för helhydraulisk grävmaskin med skopvolym 1.2 m³ SAE. Kapaciteten beräknas som positiva eller negativa tillskott till baskapaciteten 80 m³ (v_f)/h

För att ytterligare belysa jordmaterialets inverkan redovisas nedanstående exempel för helhydraulisk grävmaskin 1,2 m³ SAE. Kurvorna är upprättade som funktion av lagringstäthet, blockhalt $\varnothing < 600$ mm och blockhalt $\varnothing > 600$ mm, vilket subjektivt klassificerats i en 3-gradig skala där "1" är "låg" och "3" är "hög". Av figuren framgår att beroende på ett jordmaterials egenskaper kan kapaciteten variera från 20 m³/tim till 100 m³/tim.

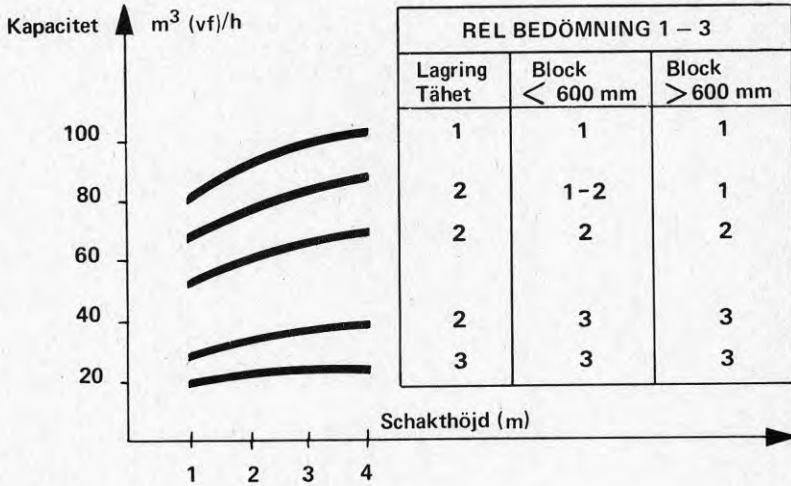


Fig. 3. Kapacitetsstudier vid djupgrävning i morän, med helhydraulisk grävmaskin 1,2 m³ SAE.

2.1 Motstånd mot losstagning

Jordmaterialets "motstånd mot losstagning" påverkar en schaktmaskins (skopa, blad eller rivartand) möjlighet att tränga in i och sönderdela jordmaterialet.

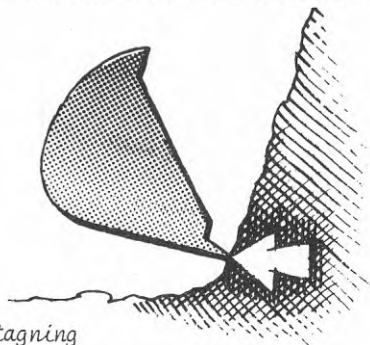


Fig. 4. Losstagning

Motstånd mot losstagning är betingat av materialets

- lagringstäthet
- kornstorleksfördelning
- kohesion och cementering
- (tjäle)

I jordar med lågt eller normalt motstånd mot losstagning, kan beroende på maskintyp och maskinstorlek, losstagning utföras i samband med lastning. I jordmaterial med stort eller mycket stort motstånd mot losstagning erfordras däremot som regel en separat losstagning - anpassning - genom exempelvis rivning.

2.2 Skop-, blad- resp korgfyllnad

Med skopfyllnad menas utlastad fast volym per skopa. Skopfyllnadsgraden är förhållandet mellan skopfyllnad och skopvolym SAE. Skopfyllnadsgraden är således avhängig materialets volymförändring från fast till löst tillstånd och möjligheten att fylla skopan.

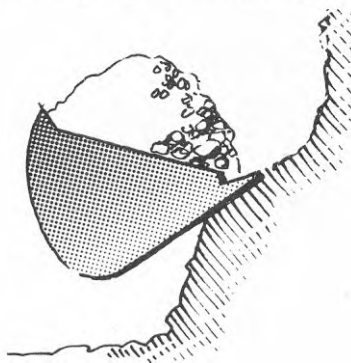


Fig. 5. Fyllning

Skopfyllnadsgraden beror av jordmaterialets

- lagringstäthet
- kornstorleksfördelning
- blockstorlek i förhållande till skopvolym
- rasvinkel, kohesion och vattenhalt som påverkar "råge"
- klubbighet och påfrysning som medför att material kan kvarstanna i skopan.

Dessutom påverkas skopfyllnadsgraden av vissa geometriska faktorer, t ex schakthöjd (för gräv- och lastmaskiner).

Kapaciteten för en schaktmaskin kan således variera avsevärt i material med samma lagringstäthet men med väsentligt olika kornstorleksfördelning och vice versa.

2.3 Bärighet, rullmotstånd och markgrepp

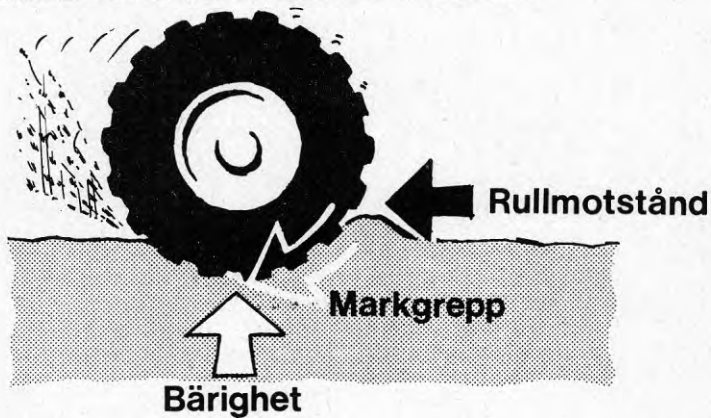


Fig. 6. Kraftspel kring ett hjul i rörelse

Ett jordmaterials bärighet är en faktor som tekniskt avgör om det är möjligt att använda en viss maskin. För att en massförflyttning skall kunna utföras med en viss maskinkombination erfordras att bärigheten är tillräcklig under samtliga arbetsmoment.

Ett jordmaterials bärighet beror av:

- kornstorleksfördelning
- vattenhalt
- lagringstäthet
- kohesion
- cementering
- (tjäle)

Rullmotstånd är den hindrande inverkan som jordmaterialet har på ett fordons hjul i rörelse. Beroende på dimension och lufttryck i däckens samt fordonets hastighet varierar rullmotståndet med hjulets nedsjunkning. Nedsjunkningen är proportionell mot bärigheten och be-

lastningen per ytenhet. Belastningen utförs av statiska och dynamiska krafter.

Rullmotståndet för ett visst fordon är således en funktion av jordmaterialets bärighet. Minskad bärighet resulterar i större nedträngning, vilket ger ökat rullmotstånd.

Rullmotståndet tillsammans med

- ojämnhet
- väggeometri
- trafikintensitet

bestämmer transportvägens beskaffenhet. Transportvägens beskaffenhet avgör i sin tur transporthastigheten och därmed även transportkapaciteten.

För att bedöma ett transportfordons kapacitet erfordras omräkning av bärigheten till en viss beskaffenhet hos transportvägen. P.g.a. transportvägens geografiska omfattning måste ofta ett flertal jordmaterial klassificeras innan hela transportsträckan kan sammanvägas.

Vid arbetstekniska kontoret har noggrannhetskravet för klassificering av transportvägar utretts. Man har funnit att vid korta transportavstånd (<600 m) kan en relativt grov klassificering tillåtas. Terminaltider för lastning och lossning får större andel i totala transporttiden ju kortare transportsträckan blir. För att illustrera transporthastighetens betydelse visas nedanstående kostnadsfunktioner.

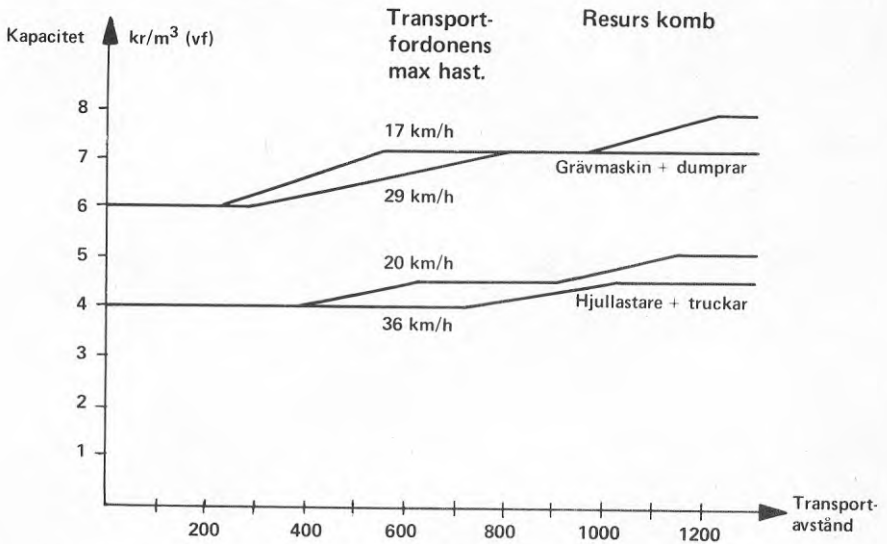


Fig. 7. Exempel på transporthastighetens betydelse för massflyttningens kostnaden vid olika resurskombinationer.

Vid dålig transportväg är kostnadsfunktionen svårare att beräkna, då faktorer som större maskin- och förarslitage uppstår med minskad effektiv arbetstid som följd.

Gjorda undersökningar tyder på som tidigare nämnts att en relativt grov klassificering av transportvägar kan tillåtas och att en bärighetsbestämning främst är nödvändig för att avgöra om en viss maskin är användbar eller inte.

Med markgrepp avses kraftspelet i kontaktytan mellan däck och underlag vid överföring av maskinens drivkraft till underlaget.

Markgreppet beror av:

- materialets slirighet, d v s förmåga att uppta horisontella skjuvspänningar
- fordonets däck- resp. bandprofil
- fordonets tyngd och tryckfördelning

Markgreppets kapacitetspåverkan behandlas ej i denna rapport.

3. DEFINITION AV BEARBETBARHET

3.0 Allmänt

En av projektets målsättningar var att utveckla ett klassificeringssystem där bearbetbarhet definierades med hjälp av enbart geotekniska mätvärden. Avsikten var att erhålla en sådan objektivitet och noggrannhet att en bearbetbarhetsklassificering skulle ge matematiskt underlag för maskinval och kapacitetsberäkning.

Arbetsgruppen har i likhet med flera utländska utredningar konstaterat att det är svårt att ge en entydig geoteknisk klassificering av jordarters bearbetbarhet. Testverksamheten har dock visat att med hänsyn till övriga kapacitetspåverkande faktorer (enligt kapitel 2) kan kravet på klassificeringsnoggrannhet mildras.

Arbetsgruppen föreslår att bearbetbarhet för ett jordmaterial klassificeras genom bedömning av:

SCHAKTBARHET och BÄRIGHET

3.1 Schaktbarhet

Med schaktbarhet avses ett jordmaterials kapacitetspåverkande egenskaper vid anpassning och lastning. Schaktbarheten bestäms av jordmaterialets motstånd mot losstagning och inverkan på skopfyllnad.

Arbetsgruppen föreslår att schaktbarheten klassificeras med skala 1-5 där:

- 1 = litet motstånd mot losstagning och hög skopfyllnadsgrad, d v s hög kapacitet erhålls vid lastning
- 5 = stort motstånd mot losstagning och liten skopfyllnadsgrad, d v s låg kapacitet vid lastning.

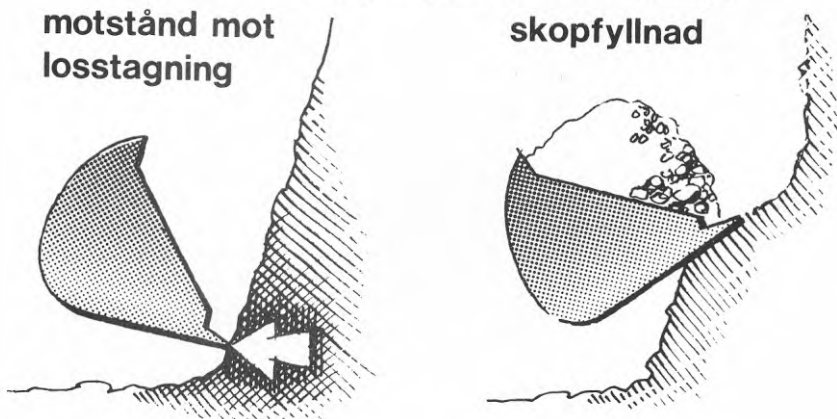


Fig. 8. Schaktbarhet

Vid klassificeringen är större noggrannhet än halvsteg ej motiverat.

Undersökningar har visat att vid normala vattenhalter kan schaktbarheten med tillräcklig noggrannhet klassificeras utgående från jordmaterialets lagringstäthet och kornstorleksfördelning. Vid extrema vattenhalter måste dock hänsyn tas till jordmaterialets speciella inverkan på skopfyllnaden.

Schaktbarheten bedöms objektivt med hjälp av en geoteknisk klassificeringsnyckel (bilaga 2) och/eller subjektivt i samband med grävning av provgrop. Klassificeringsnyckeln är så upprättad att överensstämmelse med nuvarande jordklassindelning erhållits, varför befintliga kapacitetsdiagram kan användas.

3.2. Bärighet

Med bärighet avses här ett jordlagers förmåga att bära arbetsmaskiner. Bedömningen avser förhållanden i schakt utan mekanisk eller kemisk förstärkning.

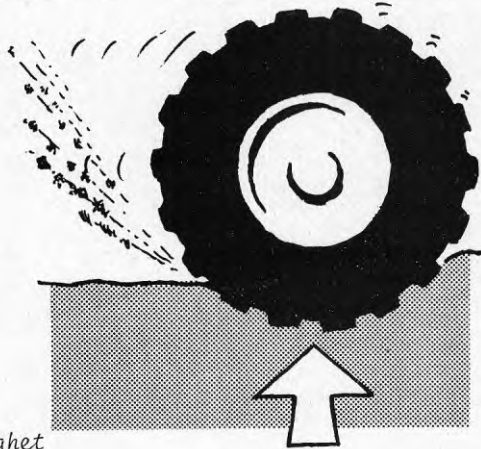


Fig. 9. Bärighet

Beroende på jordmaterialets vattenkänslighet och förväntade normala vattenhaltsvariationer ändras bärigheten. Bärigheten klassificeras och redovisas därför vid

- lägsta normala vattenhalt
- vattenhalt uppmätt vid provtagningen
- högsta normala vattenhalt

Under utredningsarbetet har framkommit att det för närvarande ej är realistiskt att entydigt klassificera bärighet, eftersom allt för många geotekniska och maskintekniska faktorer inverkar. Arbetsgruppen föreslår att en erfarenhetsmässig bedömning redovisas i form av siffror med följande innebörd:

- 1 = fast och problemfri undergrund
- 2 = viss nedsjunkning för hjulfordon
- 3 = problem för hjulfordon
- 4 = problem för bandfordon
- 5 = otillräcklig bärighet för vanliga arbetsmaskiner

Större noggrannhet än helsteg är ej motiverad.

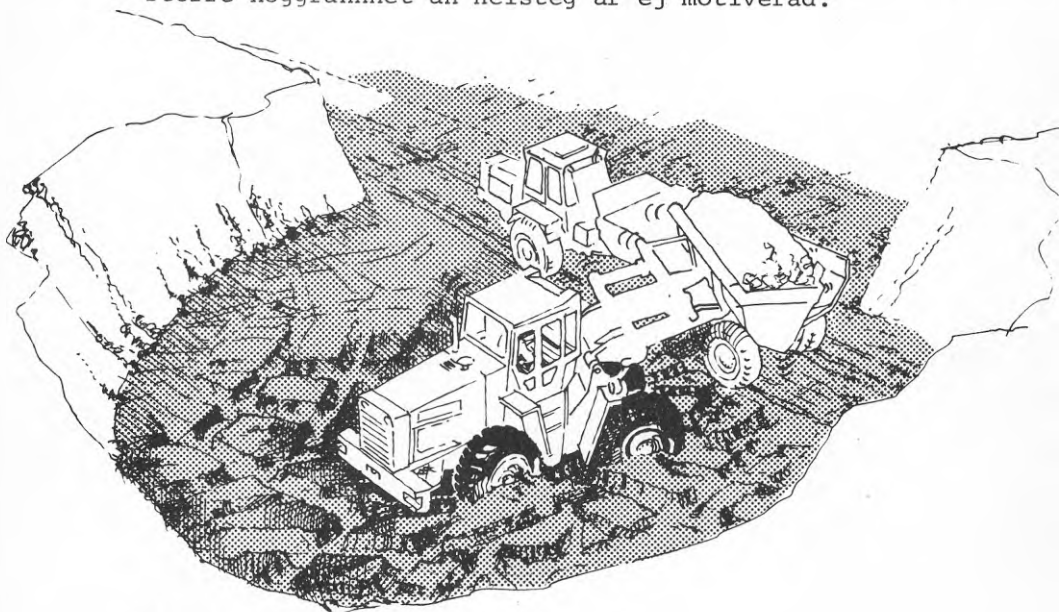


Fig. 10. Bärighet vid lastningsplatsen

Med hjulfordon avses dumper eller hjullastare med lågtrycksdäck. Bärighetsbedömningen skall avse förväntade förhållanden under pågående produktion, eller efter minst 10 överfarter i samma spår.

Bärigheten bedöms med hjälp av geoteknisk klassificeringsnyckel i bilaga 3.

För att göra bärigheten till en kapacitetspåverkande faktor föreslås klassificeringen av transportvägar med hänsyn till jordmaterialets "mjukhet" enligt:

- Bärighetsklass 1 ~ bra transportväg
- " 2 ~ mindre bra transportväg
- " 3 ~ dålig transportväg

12.



Fig. 11. Bärighet på transportväg

4. GEOTEKNISK BESTÄMNING AV BEARBETBARHET

4.0 Allmänt

I syfte att studera olika geotekniska parametrars inverkan på massförflyttningsprocessen har en omfattande försöksverksamhet genomförts. Olika geotekniska och geofysiska metoder har använts för undersökning av ca. 110 000 m³ jordmassor före, under och efter utschaktning. I samband med schaktning har studier av losstagning och bärighet/rullmotstånd utförts. Försöksverksamheten redovisas i separat rapport.

Försöksverksamheten har visat att bearbetbarhet beror på ett flertal geotekniska parametrar som måste ställas i relation till varandra. Någon "patentmetod" för bestämning av bearbetbarhet existerar inte. En geoteknisk undersökning bör därför omfatta en kombination av metoder så att nödvändiga parametrar kan utvärderas. Försök med signalanalytisk utvärdering av seismiska registreringar har visat på intressanta möjligheter men metoden befinner sig fortfarande på ett försöksstadium.

Arbetsgruppen föreslår därför att bearbetbarhetsklassificering utförs genom bättre systematisering och utvärdering av idag inom vägprojekteringen förekommande grundundersökningsmetoder.

4.1 Geotekniska parametrar

Enligt kapitel 3 klassificeras bearbetbarhet genom en bedömning av schaktbarhet och bärighet.

Schaktbarhet beror enligt ovan 3 av:

- lagringstäthet
- kornstorleksfördelning
- kohesion och cementering för losstagning
- kohesion och rasvinkel för skopfyllnad

Bärighet beror av:

- kornstorleksfördelning och kornhållfasthet
- vattenhalt
- lagringstäthet
- kohesion och cementering

Nedan beskrivs kortfattat dessa parametrar.

Lagringstäthet beräknas enligt Bygg 171:2 ur portal (eller torrdensitet), in situ, samt vid lös och fast lagring enligt standardiserade metoder. Lagringstätheten kan bedömas grovt i fält med hjälp av t ex seismik och sondering. Tolkningen av resultaten kräver dock erfarenhet och kannedom om jordart och vattenförhållanden.

Relationen mellan sten- och blockhalt och lagringstäthet är normalt avgörande för schaktbarheten. På bärighet för arbetsmaskiner inverkar lagringstätheten i allmänhet så att ett fast lagrat material har bättre bärighet än motsvarande löst lagrat.

Kornstorleksfördelning och formen hos de enskilda mineralpartiklarna påverkar sådana egenskaper som skjuvhållfasthet, kompressibilitet, permeabilitet och kapillär stighöjd. Kornstorleksfördelningen kan bestämmas genom siktning av en större mängd (s k fältsiktning) eller genom att ett mindre prov siktas på laboratorium sedan halten grövre material bedömts i fält. Halten mjåla och lera bestäms genom sedimentationsanalys.

Schaktbarheten påverkas främst av block. Mindre block och sten i större koncentration inverkar speciellt i hårt packad morän med viss finkornhalt. Bärigheten beror av den totala kornstorleksfördelningen. Generellt gäller att bärigheten minskar med ökande finkornhalt. Är hög finkornhalt betingad av hög lerhalt medför detta mindre bärighetsproblem än om halten finmo-mjåla är hög. Vid mycket hög sten och blockhalt kan ett bärande "skelett" bildas.

Kornhållfasthet är medtaget i sammanställningen eftersom kornstorleksfördelningen för jordmaterial med låg kornhållfasthet förändras vid bearbetning. Bärigheten försämras successivt genom att materialkorn krossas och finkornhalten ökas. Är halten av korn med låg hållfasthet stor måste hänsyn till detta tas vid bärighetsklassificeringen.

Med kohesion avses kemiska bindningar mellan lerpartiklar och uttrycks genom skjuvhållfastheten. I lera är kohesionen avgörande för såväl schaktbarhet som bärighet.

Med cementering avses kemiska bindningar mellan grövre mineralkorn. Cementering bedöms i samband med provtagning i fält.

Ett jordmaterials rasvinkel beror i friktionsjord i huvudsak av kornfördelning och vattenhalt och i lera av kohesion. Exempel: Fuktig sand och fast lera ger stor råge medan torr sand och lös lera ger liten råge.

Vattenhalt och vattentillförsel är helt avgörande för bärigheten i jord med hög halt av mo och mjåla. Vid överskott av vatten, t ex under grundvattenytan, minskar friktionen mellan mineralkornen och av friktion betingad bärighet reduceras. Smörjverkan kan också erhållas genom att i materialet kapillärt bundet vatten frigörs vid materialets bearbetning eller genom att vatten pumpas upp från underliggande lager vid dynamisk belastning. Vattenöverskott uppstår även i samband med nederbörd och tjällossning.

På laboratorium bestäms vissa för varje jordmaterial karakteristiska och definierade vattenhalter

- optimal vattenhalt är den vattenhalt vid vilken maximal packningseffekt erhålles vid instampning med visst arbete. Ur densitetskurvan och genom observationer i samband med packningsarbetet kan man bilda sig en uppfattning om materialets bärighet i fält vid olika vattenhalter. För de flesta jordmaterial uppstår en markant bärighetsförsämring när vattenhalten överstiger den optimala,
- vattenmättnad erhålles då ett jordmaterials hålrum (porer) är helt fyllda med vatten (t ex under grundvattenytan),
- konflytgräns (finlekstal W_F) är den vattenhalt vid vilken lera och leriga finsediment övergår från plastiskt till flytande tillstånd. Bestämningen utföres med fallkonapparat på laboratorium.

4.2 Klassificeringsnycklar

För att underlätta utvärderingen av mätresultat har klassificeringsnycklar för schaktbarhet och bärighet upprättats. Ett stort antal geotekniska parametrar samverkar varför gränsvärden i klassificeringsnycklar ej får betraktas som statistiskt - matematiska storheter utan endast som hjälpmedel för en bearbetbarhetsklassificering. Olika mätresultat kan ge skilda bearbetbarhetsvärden i olika jordarter och det tillkommer geoteknikern att avgöra vilket värde som är mest relevant i varje speciellt fall.

Uppdelningen i finkorniga och grovkorniga jordar motiveras av dessa gruppers sinsemellan helt olika geotekniska såväl som produktionstekniska egenskaper. Grovkorniga jordar ger normalt inga bärighetsproblem och schaktbarheten beror främst av blockhalt. Finkorniga jordar har vid vattenöverskott låg bärighet och schaktbarheten beror främst av lagringstätheten.

I en undersökning vid VTI av block- och stenhalt i morän har det konstaterats att det finns ett samband mellan finkornhalt och blockhalt. Eftersom materialgruppindelningen enligt BYA är uppbyggd efter finkornhalt är det lämpligt att definiera:

grovkorniga jordar = Materialgrupp A, B, C
finkorniga jordar = Materialgrupp D.

Ur bearbetbarhetssynpunkt är det önskvärt att materialgrupp D uppdelas i:

- finkorniga moräner
- finsediment (silt)
- lera

Schaktbarhet (bilaga 2)

I klassificeringsnyckel för schaktbarhet har följande parametrar medtagits.

- stenhalt (60-200 mm)
- blockhalt ($\emptyset > 600$ mm)
- blockhalt ($\emptyset > 200$ mm)
- seismisk gånghastighet
- sonderingsmotstånd

Angivna sonderingsmotstånd är grova riktvärden. Stora avvikelser kan förekomma på grund av bl.a. stenar och block i jorden samt vattenmättnad i finmo och mjåla.

För att underlätta nyckelns läsbarhet har den kompletterats med ett antal jordartsexemplar. Det bör dock observeras att dessa exempel ej utgör entydigt klassificeringsunderlag då lagringsförhållandet i det enskilda fallet bestämmer schaktbarheten.

Gränsvärden i klassificeringsnyckeln är framtagna efter utvärdering av försöksverksamhet och så valda att överensstämelsen med nuvarande "Planeringsdata" blir så stor som möjligt.

Schaktbarhet för lera bedöms efter indelning enligt BYA 311:65, se nedan.

| Benämning | Odränerad skjuvhållfasthet τ_{fu} | |
|-------------|--|----------------------|
| | kN/m ² | (Mp/m ²) |
| Mycket lös | < 10 | (< 1) |
| Lös | 10- 25 | (1 - 2,5) |
| Halvfast | 25- 50 | (2,5- 5) |
| Fast | 50-100 | (5 -10) |
| Mycket fast | > 100 | (> 10) |

Tabell 1. Indelning av lera med hänsyn till skjuvhållfasthet enligt BYA 311:65.

Bärighet (bilaga 3)

Klassificeringsunderlaget för bärighetsbedömning är uppbyggt så att respektive jordmaterials vattenhalt jämförs med jordmateriallets optimala vattenhalt. För leriga finsediment rekommenderas jämförelse av aktuell vattenhalt med konflytgräns bestämd med fallkonapparat. Inverkan på bärigheten av sten- och blockhalt, lagringstäthet, kornhållfasthet och cementering får avgöras från fall till fall.

Bärighet för lera bedöms efter indelning enligt BYA 311:65 (se tabell 1 ovan).

Eftersom finkornhalt och vattenhalt är avgörande för ett jordmaterials bärighet är det önskvärt att upprätta ett funktionssamband. Genom bedömning av bärighet och provtagnings samband med pågående schaktarbeten kan

ett statistiskt material insamlas och en klassificeringsnyckel enligt nedan eventuellt upprättas.

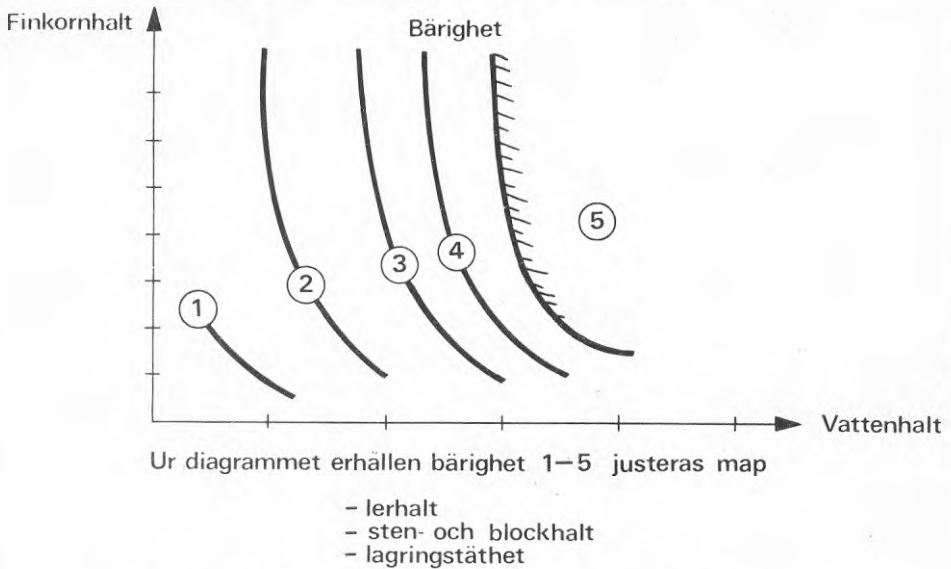


Fig. 12. Utkast till diagram för bärighetsbedömning

4.3 Grundundersökningsmetoder

Det är väsentligt att grundundersökningar utförs i en logisk ordning och att resultat från samtliga undersökningar beaktas vid utvärdering och tillämpning.

Planeringen av en undersökning bör vara omsorgsfull. Som underlag för detaljplanering och beslut om detaljundersökningar är resultatet från en översiktlig metod att rekommendera. Vid planering av detaljundersökningar bör byggare medverka så att ur produktionssynpunkt intressanta partier prioriteras.

Lämpligt är att börja med en geologisk undersökning följt av enkel och översiktlig sondering. Efter det att en första orienterande information erhållits beslutas om mer avancerade geotekniska och geofysiska metoder allteftersom resultaten kräver. Provgropsgrävning och laboratorieanalys bör ingå i och avsluta undersökningen.

Erforderlig laboratorieanalys kan omfatta

- jordartsbenämning
- siktningsanalys med tvättsiktning
- sedimentationsanalys
- tjälfarlighetsbestämning
- laboratorieinstampning (för optimal vattenhalt)
- fallkonförsök (för bestämning av skjuvhållfasthet och konflytgräns).

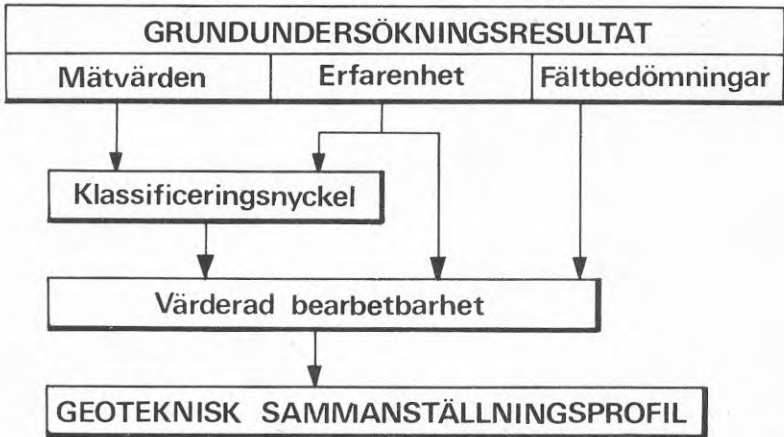
Det bör observeras att avsikten med bearbetbarhets-systemet ej är att komplicera och mångfaldiga grundundersökningar, utan att systematisera och dubbelnyttja de grundundersökningar som normalt bör utföras vid projektering till att även ge underlag för produktionsplanering. Provgropsgrävning har befunnits speciellt intressant varför en blankett för dokumentation av observationer utarbetats (bilaga 4).

Grundundersökningsmetoder för bedömning av jordarters bearbetbarhet har studerats i ett separat projekt. Se förord.

5. RUTIN FÖR BEARBETBARHETSKLASSIFICERING

5.0 Allmänt

Systembilden nedan visar arbetsgången vid utvärdering av grundundersökningsresultat för bearbetbarhetsklassificering.



Resultat från samtliga delundersökningar, d v s både i form av absoluta mätvärden och bedömningar som gjorts i fält, sammanställs och utvärderas i samråd mellan projektör/geotekniker och byggare.

Under utredningens gång har framkommit att det för närvarande brister i redovisning av observationer och kommentarer i samband med utförande och sammanställning av grundundersökningar i fast mark. Geotekniska utlåtanden redovisas normalt i form av basmaterial på "geoteknikerspråk" i ett utlåtande som i första hand är riktat till projektör/konstruktör. Arbetsgruppen föreslår att nedanstående blanketter införs som hjälpmedel för att systematisera dokumentationen och öka överskådligheten.

5.1 Fältprotokoll (förslag se bilaga 4)

Avsikten med ett fältprotokoll är att underlätta dokumentationen av observationer i fält samt att systematiskt förteckna beställda laboratorieanalyser. Blanketten är avsedd att användas främst vid provgrävning och arbetsstudier.

Blankettrutin:

1. Preliminär profilnivå vid aktuell observationspunkt inritas i kolumn "profilplan". Vid provgroppgrävning är det av största vikt att undersökningen utföres till erforderligt djup.
2. I fält bedöms och antecknas följande
 - grundvattenyta
 - jordlagerindelning och jordartsbenämning
 - block- och stenhalter
 - schaktbarhet och bärighet enligt kap. 3.
3. Under anmärkning noteras speciella observationer, t ex igenflytningstendenser, vattenförande lager m m.
4. Fotografering av grop och urgrävda massor rekommenderas.
5. Under "utföres på lab" markeras beställda laboratorieundersökningar. Den som utför fältprovtagningen bör ha tillräcklig kunskap för att avgöra omfattningen av erforderlig laboratorieanalys (separat laboratoriebeställning medföljer rutinmässigt varje prov).

5.2. Värderad bearbetbarhet (förslag se bilaga 5)

Avsikten med denna blankett är att samla all geoteknisk information för en geotekniskt enhetlig vägsträcka exempelvis en skärning. På blanketten redovisas också den fullständiga bearbetbarhetsklassificeringen vid uppmätt samt vid den minimala och maximala vattenhalt som materialet kan förväntas erhålla med tanke på topografi och hydrologi. Förutom rent tekniska uppgifter bör geoteknikers och byggares allmänna kommentarer redovisas. Blanketten bör medfölja det geotekniska utlåtandet.

Blankettrutin:

1. Under "Terräng" beskrivs terrängen med ledning av geologens utlåtande och iakttagelser i samband med utförda fältundersökningar.
2. Lagerindelning utföres i den mån det är möjligt och nödvändigt. För respektive lager införs jordartsbenämning och tjälfarlighet. Under anmärkning noteras eventuella problem med jordlagerindelning och grundvattennivåer. Volymförändringskoefficient erhålles enligt separat utredning.
3. Ett bedömt medelvärde av de olika undersökningsmetodernas resultat för respektive lager bedöms. Är variationerna stora inom lagret anges variationsområdet.

4. Med hjälp av klassificeringsnycklar (bilaga 2 och 3) tolkas mätresultaten och geoteknikern bedömer vattenhaltens inverkan på resp jordlagets bärighet.
5. Under fältbedömning införs den bearbetbarhetsbedömning som utförts i samband med provgroppsgrävning.
6. Geotekniker och byggare utför gemensamt den slutliga bearbetbarhetsklassificeringen.
 - Materialgrupp erhålles ur jordartsbenämning och finkornhalt enligt BYA 311:65.
 - Schaktbarhet erhålles ur klassificeringsnyckel och/eller fältbedömning.
 - Bärigheten vid uppmätt vattenhalt bedöms med hjälp av klassificeringsnyckel och/eller fältbedömning.
 - Vattenhaltsvariationer och därav erhållen bärighetsförändring bedöms och klassificering utförs vid minimal resp. maximal förväntad vattenhalt.
7. Under utvärderingen framkomna "snilleblixtar" antecknas.

5.3 Geoteknisk sammanställningsprofil

För orientering och överskådlig redovisning föreslår arbetsgruppen införandet av en separat geoteknisk profil. Profilen bör upprättas under tidigt detaljprojekteringskede. En reviderad geoteknisk sammanställningsprofil bör ingå i det slutliga geotekniska utlåtandet. Den geotekniska sammanställningsprofilen bör utgöra en sammanfattning av den utvärdering som utförts med ledning av resultaten från geologiska och geotekniska undersökningar.

Profilen användes för att tillgodose

- projektörens behov av faktaunderlag för dimensionering av profil och överbyggnad
- byggarens behov av fakta för bedömning av arbetsmetod och därmed val av lämpliga maskiner
- projektör och byggares behov av faktaunderlag för kalkylering av massförflyttningskostnader.

Av sammanställningsprofilen bör framgå

- markyta i vägmitt
- profillinje
- jordlagergränser
- jordartsbenämning och tjälfarlighet

- grundvattennivåer med eventuella fluktuationer
- terrängbeskrivning
- materialgrupp enligt BYA
- bearbetbarhetsklassificering
- hänvisning till bilagor med detaljerade geotekniska utlåtanden och ritningar.
- terrängbeskrivning med avseende på vegetation, topografi, ytblockighet och ytbärighet.

Bearbetbarheten redovisas för respektive jordlager enligt figur 13.

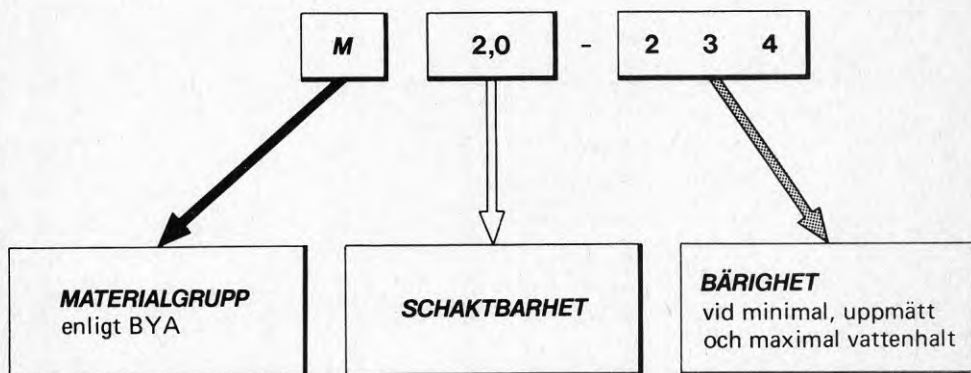


Fig. 13. Redovisning av bearbetbarhetsklassificering

Längst ner på sammanställningsprofilen ges utrymme för kommentarer.

Den geotekniska sammanställningsprofilen är ej avsedd att användas som arbetsritning.

Förslag till utseende på geoteknisk sammanställningsprofil samt den redovisning av fastmark och bearbetbarhet som föreslås presenteras i bilaga 4, 5 och 6.

STATENS VÄGVERK
DDa

Anvisning
72.12

1.1.1.00

JORDKLASSINDELNING

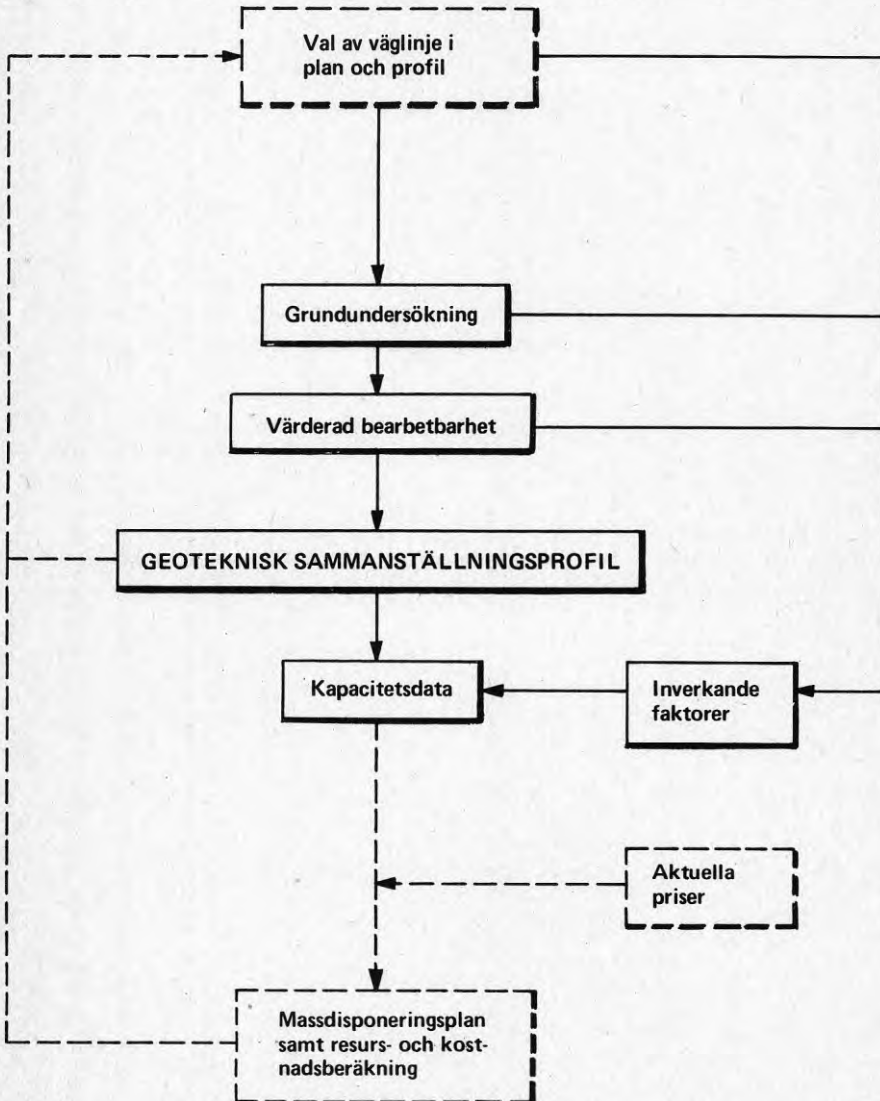
med hänsyn till schaktbarhet

| Jordklass | Material, benämning |
|-----------|--|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> - Matjord (utan rötter av buskar och träd) - Lös sand " - Såplera " - Dy " - Gylltja " |
| 2 | <ul style="list-style-type: none"> - Mjåla - Finmo - Grovmo - Sand - Grus - Grusig sand - Sandigt grus - Lera (beroende bl a på vattenhalt samt torrskorpans tjocklek) |
| 3 | <ul style="list-style-type: none"> - Blockfattiga moräner <ul style="list-style-type: none"> = Grusig morän = Sandig morän = Sandig - moig morän - Lera (beroende bl a på vattenhalt samt torrskorpans tjocklek) |
| 4 | <ul style="list-style-type: none"> - Blockfattiga eller normalblockiga moräner <ul style="list-style-type: none"> = Normalmorän = Lerig morän - Normalblockiga, blockrika eller storblockiga moräner <ul style="list-style-type: none"> = Grusig morän = Sandig morän = Sandig - moig morän - Moränlera - Stenigt grus - Lera (beroende bl a på vattenhalt samt torrskorpans tjocklek) |
| 5 | <ul style="list-style-type: none"> - Blockrika eller storblockiga moräner <ul style="list-style-type: none"> = Normalmorän = Lerig morän |

Anmärkning

- Med block förstås stenmaterial > 2 dm.

För att lättare förstå bearbetbarhetssystemets förgreningar visas nedanstående förenklade systembild, där endast av systemet berörda verksamhetsområden medtagits.



KLASSIFICERINGSNYCKEL: SCHAKTBARHET

Bilaga 2

GROVKORNIGA JORDAR (MATERIALGRUPP A, B OCH C)

| SCHAKT- BARHET | HEJARSOND sl/20 cm | SEISMIK m/s (P-VÅG) | | BLOCKHALT Ø > 200 mm | | BLOCKHALT Ø > 600 mm | | JORDARTSEXEMPEL |
|-------------------|-----------------------|------------------------|------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|---------------------------------|
| | | ÖGV | UGV | VOL % | VIKT % | VOL % | VIKT % | |
| 1,0 | ≤ 5 | 400 | 1400 | 0 | 0 | 0 | 0 | lös sand |
| 2,0 | 10 | 500 | 1500 | 5 | 7 | 3 | 5 | grovmo sand grus |
| 3,0 | 50 | 700 | 1700 | 10 | 15 | 5 | 7 | stenigt grus sandig morän |
| 4,0 | 150 | 1000 | 2000 | 20 | 30 | 10 | 15 | blockigt åsgrus grusig morän |
| 5,0 | | 1300 | 2400 | 30 | 40 | 15 | 20 | blockrik fast morän rösberg |

FINKORNIGA JORDAR (MATERIALGRUPP D)

FINKORNIGA JORDAR (MATERIALGRUPP D)

| SCHAKT- BARHET | VIKT- SOND hv/20 cm | HEJAR- SOND sl/20 cm | SEISMIK m/s (P-VÅG) | | BLOCKHALT Ø 200 mm | | BLOCKHALT 20 – 200 mm | | JORDARTSEXEMPEL |
|-------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|------|-----------------------|--------|--------------------------|--------|---|
| | | | ÖGV | UGV | VOL % | VIKT % | VOL % | VIKT % | |
| 1,0 | ≤ 5 | ≤ 5 | — | — | 0 | 0 | 0 | 0 | halvfast lera ($T_{fu} < 50 \text{ kN/m}^2$) |
| 2,0 | 10 | 10 | 600 | 1400 | 3 | 5 | 10 | 15 | fast lera mjäla, finmo |
| 3,0 | > 25 | 50 | 900 | 1600 | 5 | 7 | 20 | 30 | mkt fast lera ($T_{fu} > 100 \text{ kN/m}^2$) sandig moig morän |
| 4,0 | | 150 | 1200 | 1800 | 7 | 10 | 30 | 40 | moränlera moig morän |
| 5,0 | | | 1500 | 2200 | 10 | 15 | 40 | 55 | fast lagrad lerig morän förstenad sediment |

DY, GYTTJA, LÖS- OCH MYCKET LÖS LERA HAR LÅGT MOTSTÅND MOT LOSSTAGNING. LASTNINGSKAPACITETEN MÅSTE DOCK KORRIGERAS MED AVSEENDE PÅ SKOPFYLLNAD EFTERSOM MATERIALEN EJ BILDAR RÅGE.

ANMÄRKNING: Redovisade geotekniska parametervärden och jordartsexempel utgör endast riktvärden för klassificering.

KLASSIFICERINGSNYCKEL: BÄRIGHET (för arbetsmaskiner)

Bilaga 3

GROVKORNIGA JORDAR (MATERIALGRUPP A, B OCH C)

| JORDARTS- EXEMPEL | TJÄLFAR- LIGHETS- KLASS | OPTIMAL VATTEN- HALT % ca | VATTENHALT VID BÄRIGHET | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------|-------------|---------|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Materialgrupp A grus sandigt grus grusig morän | I I I | — 10 5 | < Vm < Vm < Vm | Vm Vm Vm | | | |
| Materialgrupp B grusig sand grovmo | II II | 11 13 | < opt < opt | ~ opt ~ opt | Vm > opt | — Vm | |
| Materialgrupp C sandig morän moig sandig morän | I I | 6 7 | ≤ opt < opt | > opt ~ opt | Vm > opt | Vm | |

FINKORNIGA JORDAR (MATERIALGRUPP D)

| JORDARTS- EXEMPEL | TJÄLFAR- LIGHETS- KLASS | OPTIMAL VATTEN- HALT % ca | VATTENHALT VID BÄRIGHET | | | | |
|---|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| sandig moig morän moig morän lerig morän moränlera | III III III III | 8 9 11 13 | — — — — | ≈ opt < opt < opt < opt | > opt ~ opt ~ opt ~ opt | Vm > opt > opt > opt | Vm Vm Vm |
| finmo mjäla lerig finmo/mjäla | III III III | 15 17 — | — — — | — — — | ~ opt ~ opt ≤ W _F | opt opt ≤ W _F | Vm Vm > W _F |
| lera (enl BYA 311:65) | III | — | hård torr- skorpa | mkt fast | fast | halv- fast | lös |

opt = optimal vattenhalt, W_F = konflytgräns, Vm = vattenmättat

BÄRIGHETSBEDÖMNING:

1 – fast och problemfri undergrund
2 – viss nedsjunkning för hjulfordon3 – problem för hjulfordon
4 – problem för bandfordon
5 – otillräcklig bärlighet

VÄRDERAD BEARBETBARHET

TERRÄNG

(Vegetation, topografi, ytblockighet, ytbärighet, vattenförhållande.)

Skogsmark, flack moränhöjd

Mjuk markyta under våtsäsong

JORDLAGERINDELNING

(Jordarter, tjälfarlighet, volymförändringskoefficient, grundvatten.)

Lager 1: sandig moig morän II

Lager 2: sandig moig morän II under grundvattenyta

Lager 3: lerig sandig moig morän II - III

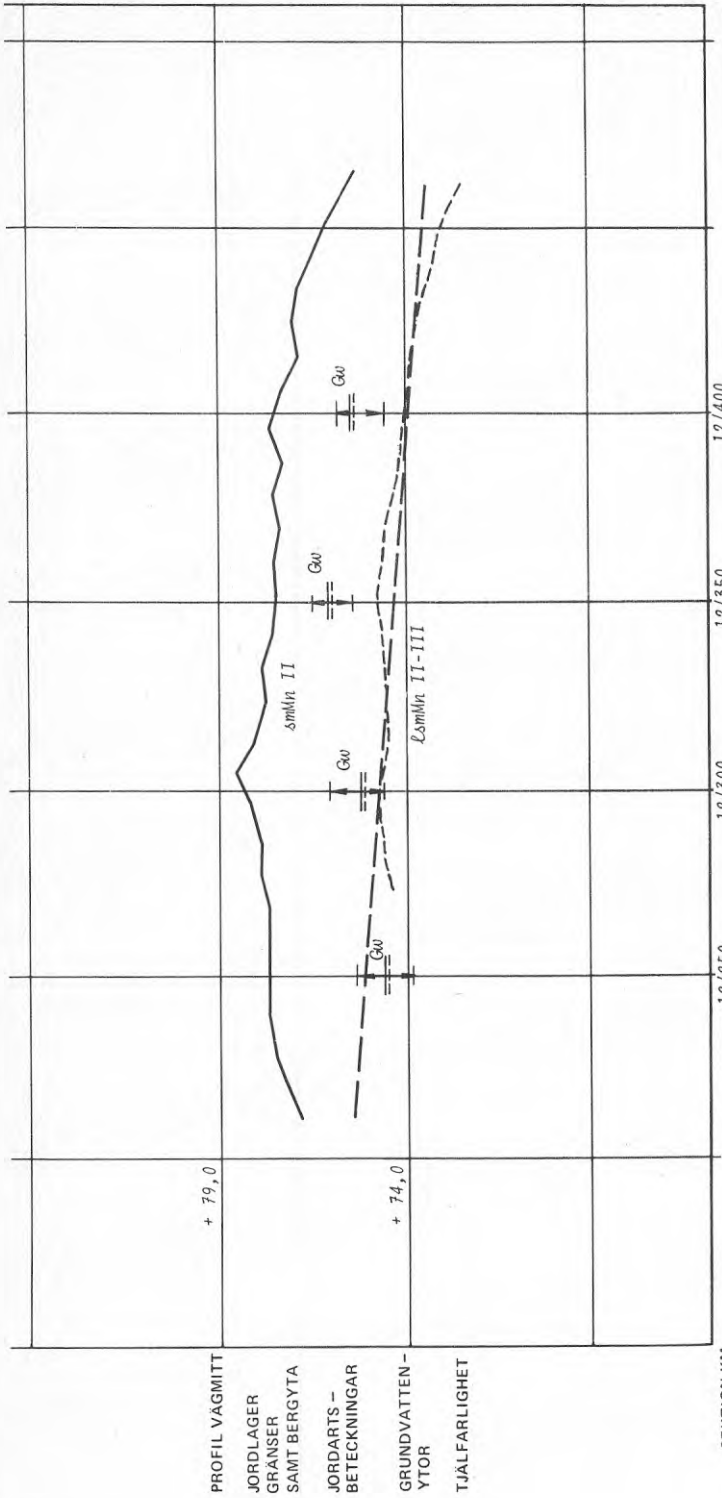
| METOD | DATUM | MÄTVÄRDE LAGER | | | ENHET | SCHAKTBARHET LAGER | | | BÄRIGHET LAGER | | |
|--|-------|-------------------|-------|-------|---|-----------------------|-----|------|-------------------|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| seismik viktsond | 72,12 | 700 | 1400 | 2000 | m/s | 2,5 | 2,0 | 4,5 | | | |
| hejarsond skjuvhållfasthet | 72,12 | 20-50 | 20-50 | >100 | hv/20 cm sl/20 cm kN/m ² | 2,5 | 2,5 | >4,0 | | | |
| uppmätt vattenhalt optimal vattenhalt konflytgräns | 73,03 | 8-10 6 | Vm | Vm | % % % | | | | 3 | 4 | 4 |
| blockhalt (Ø > 600 mm) | | <3 | <3 | 0 | vol % | 1 | 1 | - | | | |
| blockhalt (Ø > 200 mm) | | 3-5 | 3-5 | 0 | vol % | 2,5 | 2,5 | - | | | |
| stenhalt | | 15-20 | 15-20 | 30-40 | vol % | 3,0 | 3,0 | 4,5 | | | |
| finkornhalt (Ø < 0,074 mm) | | 25-30 | 25-30 | 35-40 | vikt % | | | | | | |
| lerhalt | | | | 5-15 | vikt % | | | | | | |
| FÄLTBEDÖMNING | | | | | | 2,5 | 2,5 | 4,0 | 2 | 4 | 3 |

BEARBETBARHET

| LAGER | MATERIALGRUPP | SCHAKTBARHET | BÄRIGHET VID | | |
|-------|---------------|--------------|--------------|-----------|-------|
| | | | W.min | W.uppmätt | W.max |
| 1 | D | 2,5 | 1 | 3 | 3 |
| 2 | D | 2,5 | 4 | 4 | 4 |
| 3 | D | 4,0 | 3 | 3 | 3 |

Geoteknikers och byggares
kommentarer

| | | |
|---|------------|----------|
| Org.enhet | Dat. 74.12 | Sign. BS |
| Objekt R - 2061 - 48 SKÖVDE - HAGGÅRDEN | | |
| Sträcka 12/250 - 12/450 | | |



PROFIL VAGMITT
 + 79,0
 JORDLAGER
 GRÄNSER
 SAMT BERG YTA
 + 74,0
 JORDARTS -
 BETECKNINGAR
 GRUNDVATTEN -
 YTOR
 TJÄLFÄRLIGHET

SEKTION KM

12/250 12/300 12/350 12/400

| | |
|---|----------------------|
| TERRÄNG | |
| BEAR. 1 | D 2.5 - 133 |
| BET. 2 | D 2.5 - 4 (under Gw) |
| BARHET 3 | D 4.0 - 3 (under Gw) |
| GRUNDFOR- STÄRKNING | |
| ANM | |
| --- | LAGERGRÄNS |
| --- | TERRASS YTA |
| Geoteknisk sammanställningsprofil OBJEKT NR. 12.74 N-2061-48 SKÖLDE-HAGGÅRDEN 12.74 HANDL. AGGARE BS | |

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 780851-8
från Statens råd för byggnadsforskning till Inst. för jord-
och bergmekanik, KTH, Stockholm.**

Art.nr: 6700035

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirkapris: 35 kr exkl moms

R135: 1979

ISBN 91-540-3142-7

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm