

Geodynamik i praktiken

BJÖRN MÖLLER
ROLF LARSSON
PER-EVERT BENGTTSSON
LOVISA MORITZ



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Information 17

Geodynamik i praktiken

Björn Möller
Rolf Larsson
Per-Evert Bengtsson
Lovisa Moritz

Information	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Litteraturtjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: http://www.sgi.swedgeo.se
ISSN	0281-7578
ISRN	SGI-INF--00/17--SE
Projektnummer SGI	10191
Dnr SGI	3-9902-097
Redigering och layout	SGI
Upplaga	400
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, december 2000

Förord

I denna informationsskrift behandlas geodynamiska frågeställningar som främst är aktuella och relevanta för svenska förhållanden. Skriften är framtagen av SGI på uppdrag av Banverket. Tanken med skriften är att fokusera på frågeställningar som inte enbart finns inom Banverkets område, utan som gäller allmänt för geodynamik inom plan- och byggprocessen.

Informationsskriften visar hur jord- och bergdynamiken påverkar oss, utan att det för den skull inträffar jordbävningar eller andra storskaliga dynamiska rörelser. Ett annat syfte är att försöka binda ihop de informationsskrifter inom olika delområden som utarbetats under den senaste 30-årsperioden och ”popularisera” ämnesområdet.

Komplexiteten inom geodynamiken är stor och därför är den undersökande verksamheten lika nödvändig som kontroll av utförande.

Skriften vänder sig i första hand till geotekniker som är involverade i den geotekniska utredningsprocessen och beställare av geotekniska utredningar.

Skriften har granskats av Tekn. dr. Bo Andreasson, Jacobsson och Widmark AB och Informationschef Bengt Rydell, SGI.

Linköping i augusti 2000

Författarna

Innehållsförteckning

Förord

Läsanvisning	7
1. Inledning	8
2. Geodynamik i samhället	9
3. Definitioner och begrepp	10
3.1 Vågrörelse	10
3.2 Vibration och stöt	10
3.3 Svängningsrörelse	10
3.4 Vågutbredningshastighet	11
3.5 Refraktion och reflektion	12
3.6 Interferens	12
3.7 Dämpning	12
3.8 Egenfrekvens, resonans i jordprofil	15
3.9 Mer att läsa	15
4. Dynamisk påverkan på jord	16
4.1 Allmänt	16
4.2 Trafik	17
Vibrationer från järnväg	17
Vibrationer från väg	18
4.3 Byggnadsverksamhet	19
Pålslagning	19
Sprängning	19
Packning	20
4.4 Maskiner	20
Dynamiskt belastade fundament	20
4.5 Jordbävning	21
4.6 Mer att läsa	22
5. Effekter av geodynamisk påverkan	23
5.1 Allmänt	23
5.2 Omgivningspåverkan	23
5.3 Tumregler	24
5.4 Liquefaction	24
5.5 Mer att läsa	25
6. Dynamiska egenskaper hos jord	26
6.1 Allmänt	26
6.2 Våghastighet	26
6.3 Skjuvmodul	26
6.4 Portryck	27
6.5 Skjuvhållfasthet	27
6.6 Plasticitetsindex	27
6.7 Mer att läsa	27

7. Geodynamiska undersökningsmetoder	28
7.1 Allmänt	28
7.2 Planering	28
Omfattning och syfte	28
Val av metod och mätutrustning	28
Exitering	29
7.3 Fältmetoder	30
Metoder för vibrationsmätning och kontroll av omgivningspåverkan	30
Metoder för bestämning av vågutbredningshastighet och modulvärde	30
Storskaliga försök och plattbelastningar	34
Risk för flytjordsfenomen	34
7.4 Laboratoriemetoder	35
Allmänt	35
Metoder för mätning av jords dynamiska egenskaper i laboratorium	35
Resonant column	35
Benderelement	35
Cykliska triaxialförsök	36
7.5 Mer att läsa	37
8. Utvärdering och modellering	38
8.1 Allmänt	38
8.2 Skjuvmodul vid små töjningar	38
Friktionsjord	38
Kohesionsjord	39
8.3 Inre dämpning	40
8.4 Inverkan av töjningens storlek	40
8.5 Inverkan av cyklisk last på skjuvhållfasthet	41
8.6 Seismik – lagerföljd	41
8.7 Modellering	41
8.8 Mer att läsa	42
9. Åtgärder	43
9.1 Allmänt	43
9.2 Resonans hos konstruktion	43
9.3 Vibrationer i jord	43
Åtgärder vid källan	43
Åtgärder på överförande konstruktion	43
Åtgärder i mottagande konstruktion	44
9.4 Mer att läsa	44
10. Kontroll	45
10.1 Allmänt	45
10.2 Exempel på mätningar	45
10.3 Rapport	48
11. Regler och standarder	49
11.1 Svenska standarder	49
Synförrättning	49
Sprängning	49
Byggverksamhet	49
Komfortmätning	50
11.2 Miljöbalken	50
11.3 Riktlinjer för vägar och järnvägar	50
11.4 Mer att läsa	51

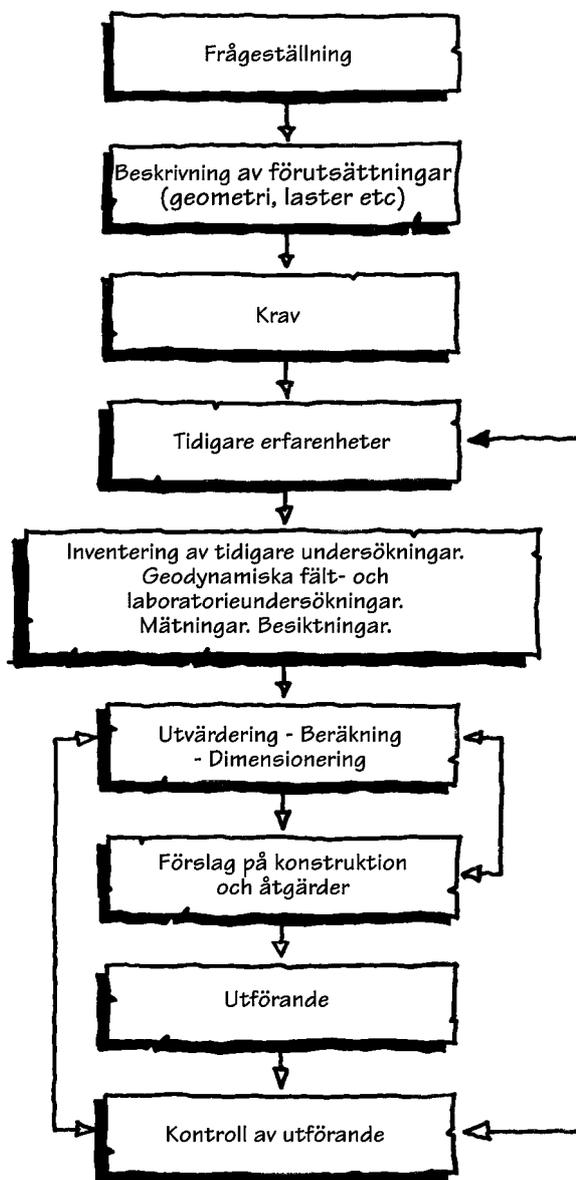
Läsanvisning

Strukturen på denna informationskrift följer det klassiska sättet för utredning av geotekniska frågeställningar i vårt samhälle, se vidstående figur.

För läsare som vill fokusera på det som kan vara aktuellt för sin verksamhet ges följande läshänvisning:

- Användare/Beställare, kapitel 2, 4, 5 och 9
- Undersökning och kontroll, kapitel 7, 8 och 10
- Analys och utvärdering, kapitel 8
- Teori och jords egenskaper, kapitel 3 och 6
- Regler och standarder, kapitel 11

Vidare, för de som är intresserade av att fördjupa sig i något avsnitt, finns efter varje kapitel litteraturreferenser om det som avhandlats i kapitlet.



Flödesschema för geodynamisk utredning.

1. Inledning

Geodynamiska undersökningar och analyser bör ingå som en naturlig del vid projektering av t.ex. infrastrukturprojekt.

Geodynamik är ett relativt nytt teknikområde, som med tvärvetenskaplig inriktning behandlar jords och bergs egenskaper vid dynamisk och upprepande belastning.

Geodynamiska frågeställningar förekommer inom många områden där geotekniker är verksamma. Myndigheter ställer numera ökade krav beträffande värderingen av skaderisker och omgivningspåverkan (miljöinverkan). För att kunna tillfredsställa dessa behov erfordras förbättrad kunskap inom området.

Kännedom om geodynamiska förhållanden är i många fall avgörande för en tillförlitlig bedömning och lösning av vibrationsproblem. Därför bör geodynamiska undersökningar och analyser ingå som en naturlig del vid projektering av t.ex. infrastruktur- och större industriprojekt. Naturligt är att geotekniker ingår i denna process.

Dynamiska problemställningar inom geotekniken gränsar till andra teknikområden, som akustik (markvibrationer och buller), mekanik (maskinfundament), bergteknik (sprängning), seismologi/geologi (jordbävningar), geofysik (undersökningsmetoder) eller strukturdynamik (byggnadsvibrationer).

Under de senaste trettio åren har utvecklingen inom geodynamiken genomgått en snabb utveckling internationellt. Huvudorsaken till detta har varit jordbävningssproblematiken och behovet att kunna bygga känsliga anläggningar, som t.ex. dammar och kärnkraftverk, höga byggnader och infrastrukturobjekt i seismiska riskområden. Samtidigt påbörjades också utvinningen av olja och gas till havs, vilket ställde nya krav beträffande dimensionering av stål- och betongkonstruktioner på stora vattendjup för dynamisk/cyklisk belastning från våglaster och/eller jordbävningssinverkan. Även på det militära området har en snabb utveckling skett inom geodynamiken beträffande vapenpåverkan, skyddsanläggningar m.m. Erfarenhet har visat att många forskningsrön inom geodynamiken har en direkt tillämpning också vid lösning av konventionella geotekniska problem.

2. Geodynamik i samhället

Under det senaste decenniet har geodynamiska problemställningar fått ökad betydelse även i länder som inte direkt berörs av jordbävningssproblem eller off-shorefrågor. Allmänhetens och myndigheternas ökande intresse för **omgivningspåverkan** och miljökrav beträffande buller och vibrationer har lett till allt strängare krav i normerna. Dessutom krävs analyser av omgivningspåverkan vid större byggprojekt. Dessa skall inkludera risken för skador på byggnader eller installationer. **Risikanalyser** erfordras således i allt större utsträckning beträffande omgivningspåverkan, liksom kontroll av att dessa krav uppfylls vid genomförande av olika typer av bygg- och infrastrukturprojekt. Dessa kommer att öka såväl i Sverige som utomlands.

Den ökande användningen av elektroniska instrument, datorer och känsliga apparater i hem och på arbetsplatser innebär högre risk för skadeståndskrav vid **byggverksamhet** eller **tung trafik** i bebyggda områden. Inom byggtekniken används allt lättare material med högre hållfasthet. Detta leder till slankare konstruktioner med ökad känslighet för vibrationer från vindlast, markvibrationer etc.

Utbyggnad av **infrastrukturen** (vägar, järnvägar, flygplatser, hamnar m.m.) samt ökande tåghastigheter och tåg- och fordonslast medför nya frågeställningar, där geodynamiken spelar en betydande roll. Till dessa hör bland annat stabiliteten av järnvägsbankar samt risken för vibrationsstörningar vid ökade tåglast, högre tåghastigheter och ökande turtäthet.

Byggverksamheten i Sverige och Europa sker numera till övervägande del i redan bebyggda områden, där omgivningspåverkan måste beaktas vid projektering och genomförande. Exempel på störande aktiviteter är slagning av pålar och spont, sprängning, schaktning och packning av jord. Svenska bygg- och konsultföretag arbetar också på den internationella marknaden där konkurrensen kräver ett brett teknikkunnande, vilket även omfattar geodynamiska och seismiska problem. Kraven på miljövänligt byggande vid t.ex. spont- och pålslagning är generellt högre utomlands än i Sverige.

Sprängning används vid markarbeten i berg, underjordsbyggande och i stenbrott och kan leda till skador på byggnader eller installationer. Begränsningar av maximal laddningsmängd, vilket krävs för att reducera omgivningspåverkan, kan ha stor ekonomisk betydelse för anläggningsprojekt och vid produktionssprängning. Därför erfordras ett gott bedömningsunderlag vid val av lämplig och säker sprängningsmetod.

Svenska skadekriterier bygger huvudsakligen på erfarenheter från sprängning, och kan därför inte direkt överföras till andra vibrationsproblem, som t.ex. trafikvibrationer. Vibrationsutbredningen från källan till omgivningen påverkas i hög grad av jordlagerförhållanden, grundvattenytan och geodynamiska förutsättningar för resonanseffekter, fokusering etc. Dessa faktorer beaktas i allmänhet inte vid dagens riskbedömningar.

Grundläggning av **vibrerande eller slående maskiner** som turbiner, sågverk, skrotsaxar, vindkraftverk är vanliga problem bl. a. vid byggande inom verkstadsindustrin. Kännedom om jords dynamiska egenskaper är då av stor betydelse för att rätt dimensionera maskinfundament. Ett annat fenomen, som har väckt allmän uppmärksamhet, är vibrationer som framkallas av exalterad publik i samband med stora musikarrangemang och som kan skapa kraftiga vibrationer i byggnadsverk (t.ex. Springsteen-effekten i Ullevi-fallet).

Svenskutvecklade produkter och svenskt kunnande vid packning av jord har en framstående roll inom **jordpackningsområdet** (yt- och djuppackning). Flera förfaranden samt packningsmaskiner har utvecklats och exporteras till många länder.

Omgivningspåverkan och riskanalys är nyckelord vad gäller miljökrav beträffande t ex vibrationer.

3. Definitioner och begrepp

Alla typer av vågor uppträder på ett likartat sätt och följer i princip samma lagar.

3.1 Vågrörelse

Det existerar två huvudgrupper av vågor: mekaniska och elektromagnetiska. Skillnaden mellan dessa två är att mekaniska vågor kräver ett materiellt medium för sin utbredning, medan elektromagnetiska vågor är strålning och därför kan utbreda sig i alla medier. De senare utbreder sig med höga hastigheter i en storleksordning motsvarande ljusets hastighet. I detta avsnitt beskrivs begrepp som hänför sig till mekaniska vågor och deras beteende i jord. Alla typer av vågor uppträder på ett likartat sätt och följer i princip samma lagar, oavsett om det t.ex. är elektromagnetiska vågor eller ljudvågor.

3.2 Vibration och stöt

Med vibration menas en fram- och återgående svängningsrörelse kring ett jämviktsläge. En stöt är en plötslig förändring i ett systems rörelse. Med stöt avses vanligen att förändringen sker under en tid som är kort i förhållande till det berörda systemets svängningsperiod. Till skillnad från vibration kan en stöt innebära en nettoförflyttning, dvs. systemets läge efter stöten kan vara ett annat än före stöten.

Vibration och stöt kan illustreras av hur läget för en kropp eller partikel varierar i tiden. Som alternativ till lägets variation, förskjutningen, kan rörelsen beskrivas genom svängningshastigheten eller accelerationen hos kroppar. I dagligt tal benämns förskjutningen ofta amplitud, ett ordval som dock bör användas med urskiljning, eftersom amplitud rätteligen är benämningen för en harmonisk svängnings maximala värde (= toppvärde). För en sinussvängning finns det således en förskjutningsamplitud, en hastighetsamplitud och en accelerationsamplitud.

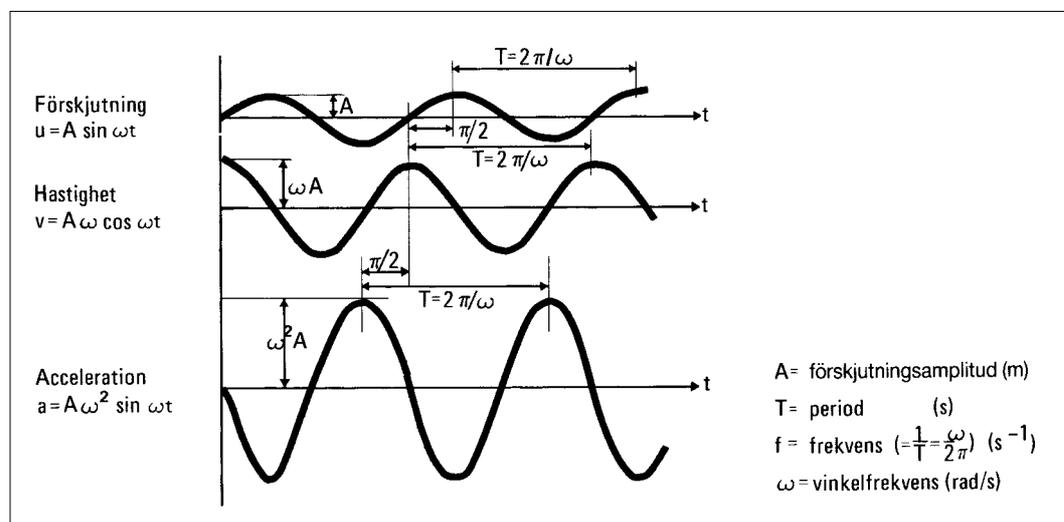
3.3 Svängningsrörelse

Det enklaste sättet att uttrycka en vibration är den enkla harmoniska rörelsen, ofta kallad sinusvibration, se figur 3.1.

$$x(t) = A \sin(\omega t + \Phi)$$

där

- $x(t)$ = förskjutning
- A = förskjutningsamplitud
- ω = vinkelfrekvens
- t = tid
- Φ = fasvinkel

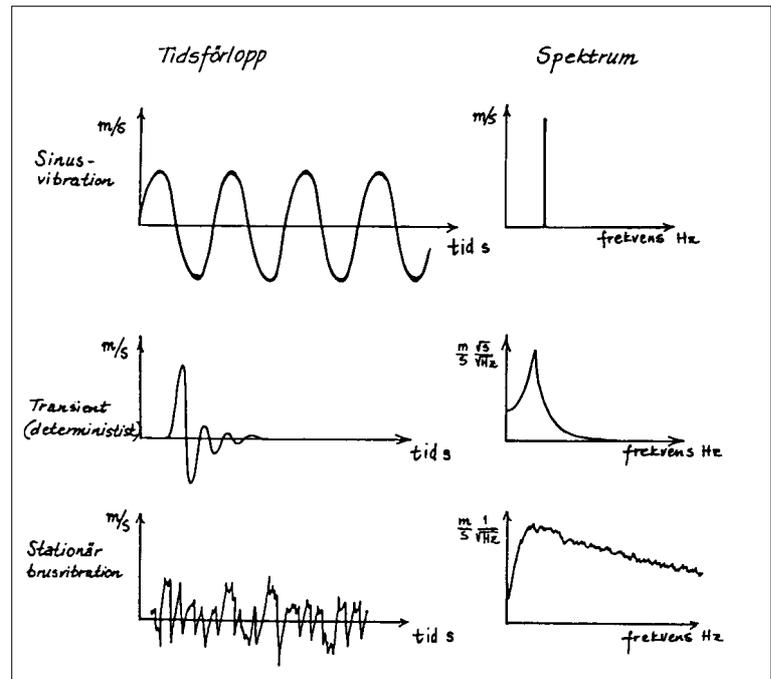


I många praktiska fall saknar fasvinkeln betydelse och sinusvibrationen kan då beskrivas med två parametrar, amplitud och frekvens.

Andra typer av vibrationer av mer komplicerad sammansättning kan inte karakteriseras lika enkelt, se figur 3.2. Brusvibrationer t.ex. kan överhuvudtaget inte beskrivas fullständigt med ett ändligt antal parametrar, utan man får istället beskriva dem som ett antal transienta vibrationer eller harmoniska svängningar.

Med en transient vibration menas en varierande kortvarig rörelse som inleds med hög intensitet. Man eftersträvar normalt en så enkel karakterisering av vibrationerna som möjligt, dvs med användande av så få parametrar som möjligt med hänsyn till det aktuella problemet.

En svängningsrörelse kan karakteriseras i tidsdomän (beskrivning av tidsförlopp) eller i frekvensdomän (frekvensspektrum), se figur 3.2. Det senare är det vanligaste. I tidsdomän kan man utvärdera max- och minbellopp och i frekvensdomän den dominerande frekvensen. En mer detaljerad beskrivning av olika typer av svängningsrörelse och dess principiella utseende finns i Holmberg, (1982).



Figur 3.2 Exempel på olika vibrationers karaktär. Holmberg, m fl (1982)

3.4 Vågutbredningshastighet

Vågutbredningshastigheten för vibrationer av begränsad storlek är en materialkonstant som är beroende av materialets elastiska egenskaper. I en elastisk kropp förekommer elastiska vågor. Man skiljer på volymvågor och ytvågor.

Volymvågor

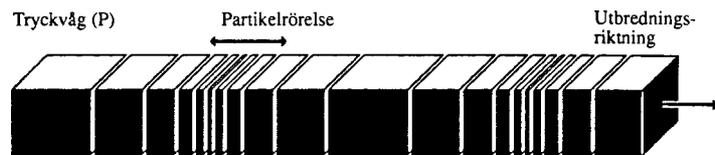
Det finns två typer av volymvågor – kompressionsvågor och skjuvvågor. Kompressionsvågen har den högsta hastigheten och benämns därför också för primärvåg eller P-våg. Kompressionsvågen rör sig endast i vågens utbredningsriktningen med förtätningar och förtunningar, ungefär som en framåtskridande daggmask, se figur 3.3.

Vågens form kan även uttryckas som longitudinell. Exempel på longitudinella vågor är ljudvågor och kompressionsvågor.

Kompressionsvågens utbredningshastighet, c_p (m/s), kan skrivas som:

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}}$$

där E är materialets elasticitetsmodul uttryckt i Pa, ρ är materialets densitet uttryckt i kg/m^3 och ν är materialets tvärkontraktionstal.

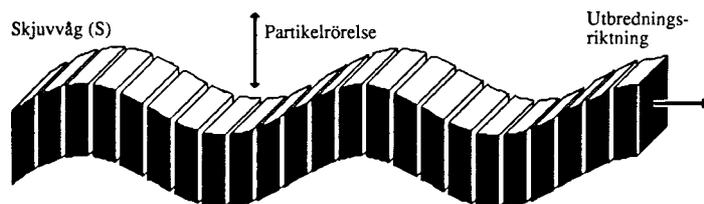


Figur 3.3 Utbredningssätt för kompressionsvåg. IVA Meddelande 225 (1979)

Skjuvvågor

Skjuvvågor benämns också sekundärvåg eller S-våg och rör sig till skillnad från kompressionsvågen vinkelrätt mot utbredningsriktningen, ungefär som en orm förflyttar sig, se figur 3.4.

För att beskriva vågens form används också uttrycket transversell våg. Havsvågor och elektromagnetiska vågor är exempel på transversella vågor.



Figur 3.4 Utbredningssätt för skjuvvåg. IVA Meddelande 225 (1979)

Det finns två typer av volymvågor – kompressionsvågor och skjuvvågor.

Skjuvvågens utbredningshastighet, c_s (m/s), kan uttryckas som:

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}}$$

där G är materialets skjuvmodul uttryckt i Pa.

Kvoten mellan c_p och c_s beror av tvärkontraktionstalet. För en jord, där tvärkontraktionstalet är 0,33, är kompressionsvågen sålunda dubbelt så snabb som skjuvvågen, se *figur 3.5*.

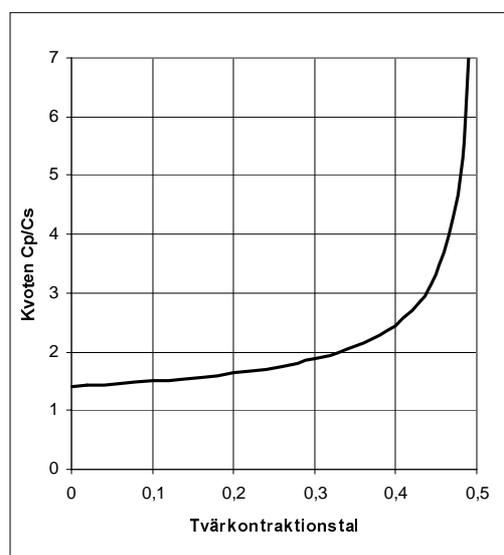
Ytvågor

Längs fria ytor bildas en annan typ av vågor, ytvågor. Ett exempel är Rayleighvågen. Denna våg kan liknas vid de ringar på vattenytan som bildas då man slänger en sten i vatten. Denna typ av vågor bildas bl. a. vid jordskalv. Rayleighvågen är en kombination av transversell och longitudinell våg och dess partikelbana är i princip elliptisk. Eftersom Rayleighvågen är en ytvåg minskar amplituden snabbt mot djupet. Ytvågen uppträder ungefär ned till en våglängds djup under markytan.

Vågutbredning

Vågutbredningen från t.ex. en järnvägsbank kan studeras genom att använda betraktelsen om vågutbredning i en elastisk halvrymd, se *figur 3.6*.

Avstånden från vibrationskällan till fronten för varje vågtyp i *figur 3.6* visar respektive vågtyps utbredningshastighet vid tvärkontraktionstalet $\nu = 0,25$. Volymvågorna breder ut sig längs en halvklotformad vågfront, medan ytvågen, Rayleighvågen, breder ut sig längs ytan med en vertikal och en horisontell komponent.



Figur 3.5
Kvoten mellan kompressionsvågens och skjuvvågens utbredningshastigheter som funktion av tvärkontraktionstalet.

Vågor bryts eller reflekteras olika mycket beroende på material och våghastighet.

3.5 Refraktion och reflektion

När en våg träffar en gränssyta till ett annat material, med en annan densitet och /eller styvhet, bryts vågen och fortsätter med en ny hastighet. Detta fenomen kallas refraktion. Kritisk refraktion inträffar då en refrakterad våg går parallellt med gränsen till det nya materialet. För att man ska kunna utnyttja detta fenomen måste vågen gå med en högre hastighet i det underliggande materialet. Med hjälp av refraktion kan man få en bild av olika skikt i en jordprofil.

Reflektion är när en våg träffar gränsen till ett annat material och därvid reflekteras tillbaka.

Vågorna bryts eller reflekteras olika mycket beroende på material och våghastighet. Refraktion och reflektion uppstår endast vid gränssytor vilket gör att fenomenen uppstår i skiktade material, se *figur 3.7*.

3.6 Interferens

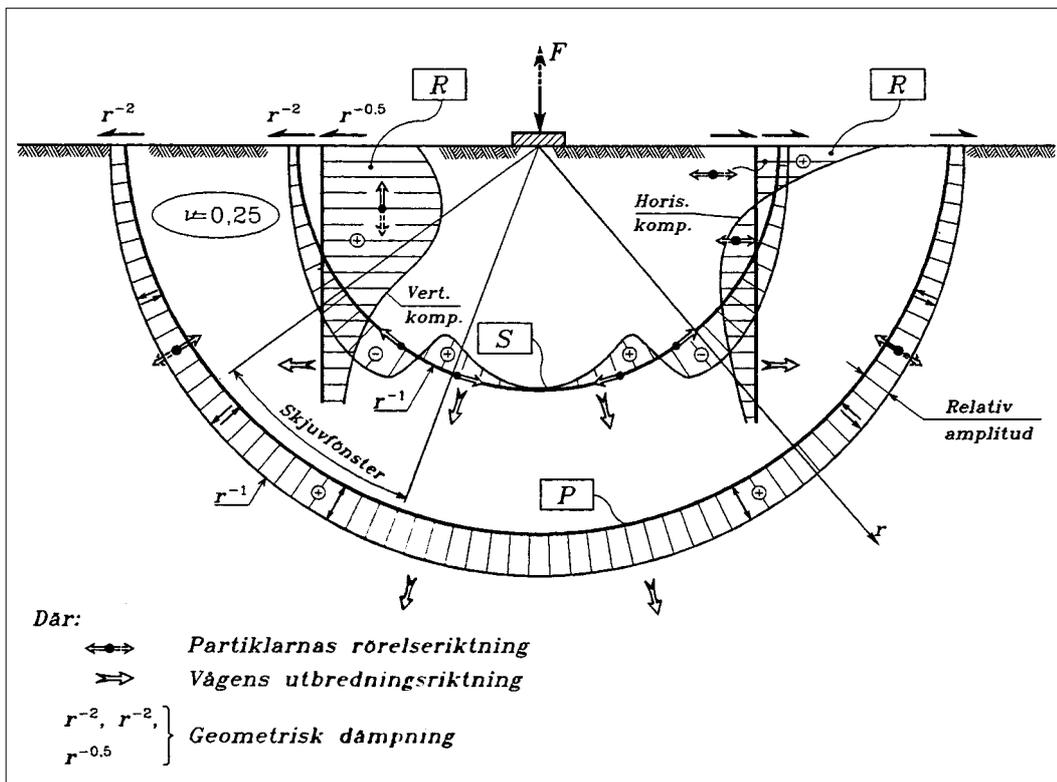
Vibrationer och vågrörelser är oberoende av andra vågor i samma område, så länge elastiska förhållande råder. Vågor kan inte kollidera utan om två eller flera vågor existerar inom samma område adderas dessa till varandra och interferens uppstår. Om vågorna har samma frekvens och når maximum samtidigt, dvs ligger i fas, ger interferens en förstärkning. Är den ena vågen istället förskjuten en halv våglängd kommer de att försvaga varandra. Har vågorna dessutom samma amplitud tar de ut varandra helt, se *figur 3.8*.

Kombinationen av refraktion, reflektion och interferens av vågor innebär att man i skiktade material kan få förstärkningar eller försvagningar som är mycket svåra att teoretiskt förutse. Det är hela tiden frågan om ett komplicerat samspel mellan olika faktorer, vilket gör att man alltid bör utföra omfattande mätningar på plats för att skapa sig en tillräckligt god bild av områdets dynamiska egenskaper.

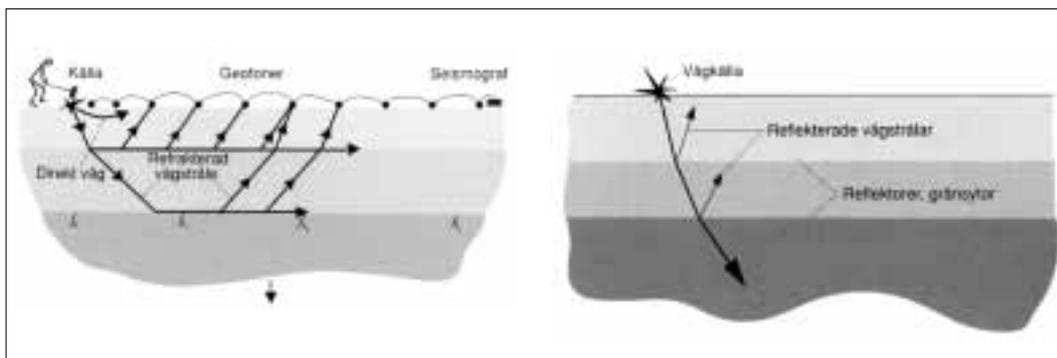
3.7 Dämpning

Då en våg går in i ett annat material sker refraktion jämte reflektion av vågen och inne i materialet sker en viss absorption. Absorptionen innebär att vågen dämpas och att vågenergin omvandlas till värme. Ett exempel är när mikrovågor i en mikrovågsugn möter en vätska och vågen dämpas eller absorberas i vätskan och vågenergin övergår till värme. Vågens hastighet och frekvens är avgörande för hur mycket en våg dämpas.

Inom jorddynamiken är dämpning en viktig parameter. Två olika typer av dämpning kan



Figur 3.6
Vågutbredning i en elastisk oändlig halvrymd utsatt för vertikal excitering i en punkt på ytan.
Bodare (1997)



Figur 3.7
Fenomenen refraction och reflektion i skiktade material.
Triumf (1992)

identifieras, materialdämpning och geometrisk dämpning. Dessa påverkar det dynamiska beteendet och bidrar till avklingningen av det dynamiska förloppet med avståndet från källan.

Materialdämpning, eller s. k. inre dämpning, beskrivs ofta som en dämpningsfaktor, D , och beror främst av skjuvdeformationens storlek och jordmaterialet, se figur 3.9, men även effektivspänningsnivå och jordens vattenmättnadsgrad och övriga egenskaper kan inverka.

Geometrisk dämpning beskriver hur amplituden minskar med ökande avstånd från källan, beroende på att vågorna sprids över en större volym, jämför figur 3.5. I många tillämpningar är det viktigt att kunna beräkna hur vibrationerna från en vibrationskälla avtar med avståndet från källan. För ytvågor, som utbreder sig efter markytan, minskar amplituden teoretiskt med $1/r^{1/2}$. Motsvarande för volymvågor i en helsfär är $1/r$.

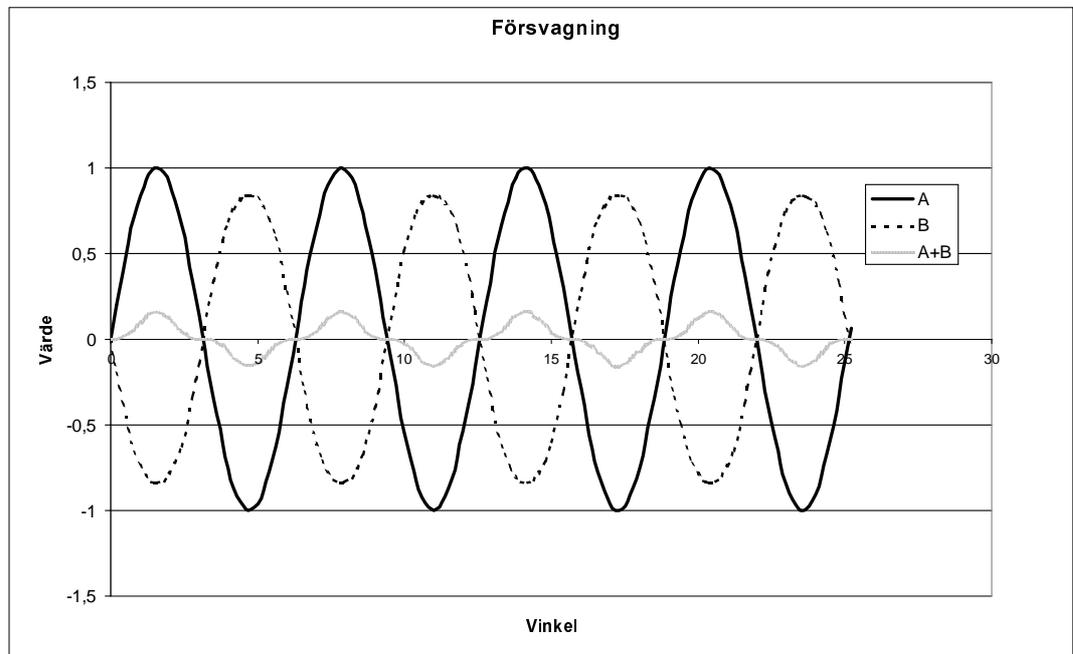
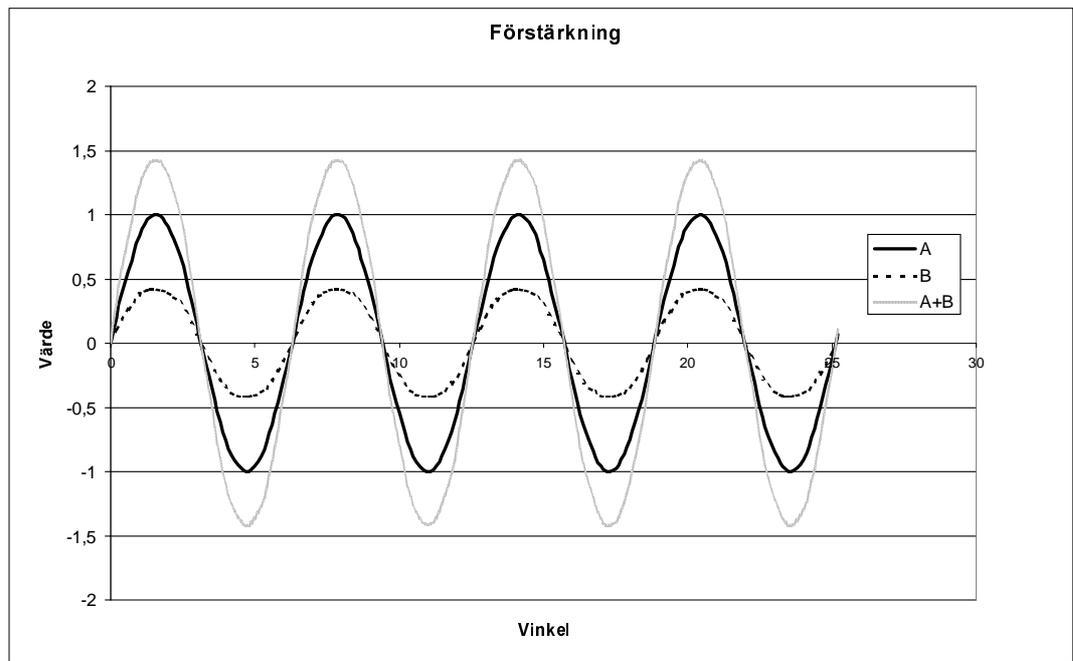
I fält ger den sammantagna effekten av materialdämpningen och den geometriska dämpningen sambandet:

$$A_2 = A_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^n e^{-\alpha(R_2-R_1)}$$

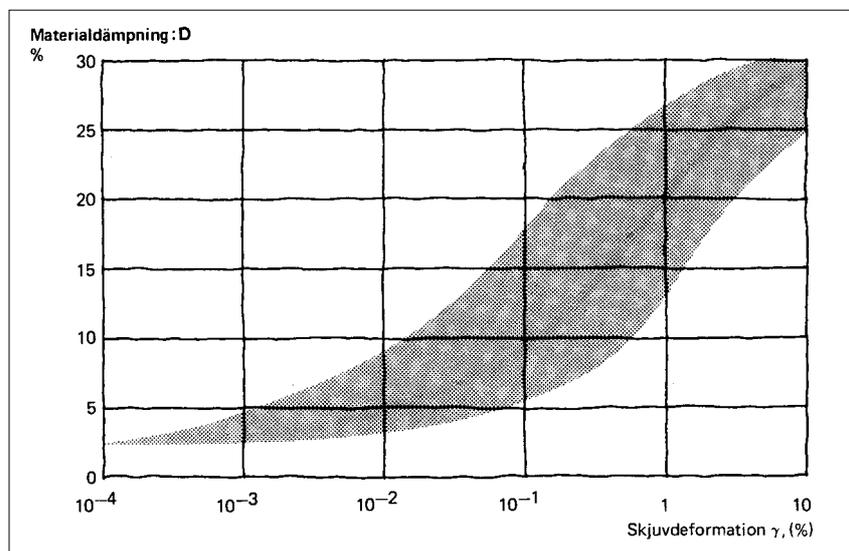
där A_1 och A_2 är svängningsamplituder i två punkter belägna på avståndet R_1 och R_2 från källan. Faktorn n beskriver vågens utseende med $n = 1$ för volymvågor i en helsfär, $n = 2$ för volymvågor på ytan av en helsfär och $n = 1/2$ för ytvågor. e är den naturliga logaritmens bas och α är absorptionskoefficienten, som beskriver materialets inre dämpning. Ovanstående samband förutsätter homogena förhållanden och stort djup till berg.

För vattenmättade lösa jordar (lera, silt och sand) varierar absorptionskoefficienten α mellan 0–0,05 och i fast lagrade, torra jordar mellan 0,05 och 0,50.

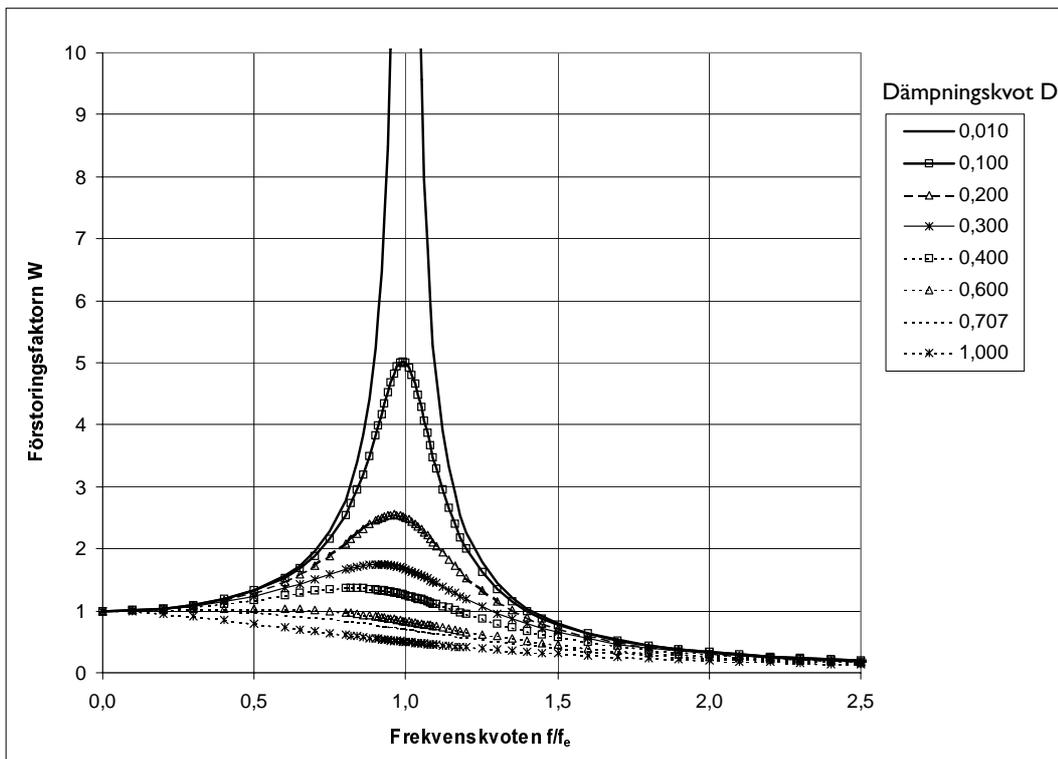
Inom jord-dynamiken är dämpning en viktig parameter.



Figur 3.8
Fenomenet inter-
ferens med för-
stärkning och för-
svagning.



Figur 3.9
Samband mellan ma-
terialdämpning och
skjuvdeformation.
IVA Meddelande 225 (1979)



Figur 3.10
Dynamiska förstoringfaktorn som funktion av frekvenskvoten f/f_e och dämpningskvoten D .

3.8 Egenfrekvens, resonans i jordprofil

En periodisk vågrörelses frekvens, f , kan beräknas som:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

där c är vågutbredningshastigheten och λ är våglängden. Våglängden för en periodisk våg är avståndet mätt vinkelrätt mot vågfronten, mellan två successiva punkter med samma rörelsefas. För en specifik frekvens och våghastighet inträffar det att kroppens höjd blir densamma som våglängden, man får en så kallad *stående* våg. Detta betraktas då som kroppens egenfrekvens. Observera att det för varje system finns flera egenfrekvenser, men det är oftast den lägsta av dessa som är av tekniskt intresse. När belastningsfrekvensen och egenfrekvensen överensstämmer uppstår resonans. Detta orsakar ofta stora rörelser i kroppen. Ett exempel är egenfrekvensen hos ett jordlager på berg. För ett homogent lager av lera med 10 m tjocklek och med en utbredningshastighet hos skjuvvågen av 100 m/s, blir lägsta egenfrekvensen (se t.ex. Bodare, 1998):

$$f = \frac{H}{4 \cdot c} = \frac{100}{4 \cdot 10} = 2,5 \text{ Hz}$$

I verkligheten har man dämpningseffekter i leran och beroende på hur stora dessa är kan effekterna bli mer eller mindre allvarliga, då denna lerpacke utsätts för 2,5 Hz. Dämpningens betydelse framgår av figur 3.10.

3.9 Mer att läsa

Berglund R, Lindberg G (1992). Vågutbredning i jord- Analys och åtgärd. Rapport nr 93/7. Inst. för jord- och bergmekanik, Kungl. Tekniska Högskolan.

Carlsson B, Massarsch R (1986). Vibrationer i jord. Byggeforskningsrådet T16:1986.

Den statiska och dynamiska tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser. Banverkets tekniska rapporter 1994:2.

Holmberg R, m fl (1982). Vibrationer i samband med trafik- och byggverksamhet. Byggeforskningsrådet T43:1982.

Jord- och bergdynamik (1979). Information från IVA:s kommitté för vibrationsfrågor, IVA Meddelande 225.

Ringström U, Selin L-E (1974). Vågrörelselära, akustik, optik. Kungl. Tekniska Högskolan.

Triumf C-A (1992). Geofysik för geotekniker, metoder och tillämpningar. Byggeforskningsrådet T31:1992.

För varje system finns flera egenfrekvenser, men det är oftast den lägsta av dessa som är av tekniskt intresse.

4. Dynamisk påverkan på jord

4.1 Allmänt

En mängd processer av såväl mänskligt som naturligt ursprung genererar vibrationer i vår omgivning. Dessa kan överföras genom jorden till konstruktioner och byggnader och förorsaka både obehag för människan och skador på anläggningar.

Vibrationsproblemen kan delas upp i två kategorier, *aktiva* och *passiva*, figur 4.1. *Aktiva* vibrationsproblem avser i första hand förhållandena vid och i närheten av vibrationskällan, dvs samverkan mellan vibrationskällan och undergrunden. Som exempel kan nämnas dynamiskt belastade maskinfundament, sprängning, neddrivning och stoppslagning av pålar och packning av jord. Ett annat

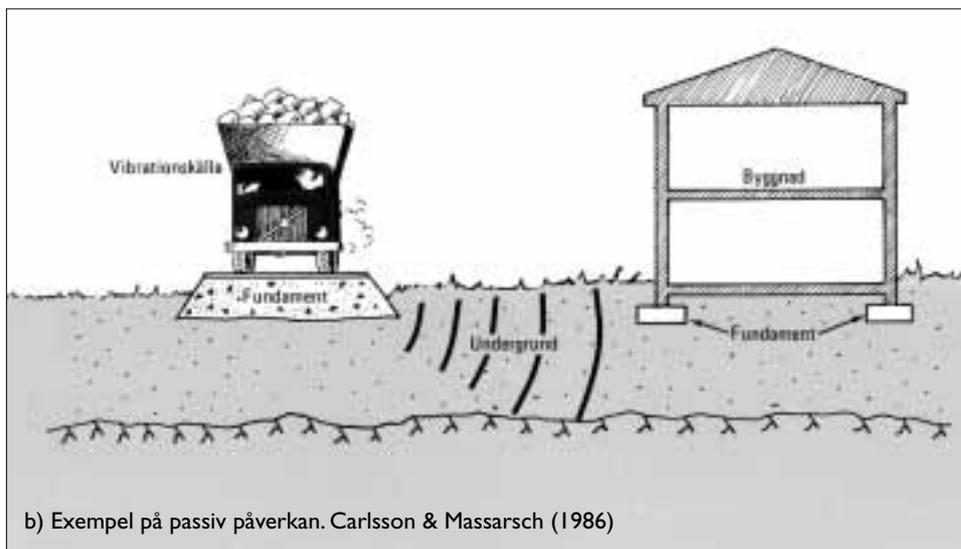
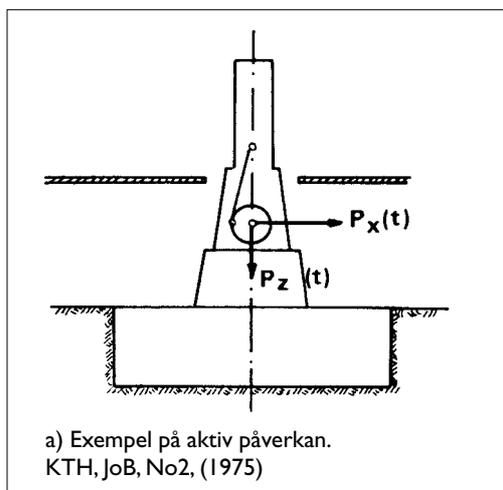
exempel är påverkan av tågtrafik på järnvägsbanken och dess undergrund. Vid *passiva* vibrationsproblem utsätts byggnadsverk, maskiner eller människor för vibrationer från en på avstånd belägen störningskälla, t.ex. jordbävningar, sprängning, byggverksamhet, trafik eller vibrerande maskiner.

Deformationsstorleken i jord i samband med geodynamiska problemställningar är som regel betydligt mindre än vid statisk belastning, se figur 4.2. I vissa sammanhang kan den dynamiska belastningen behandlas oberoende av den statiska, men ibland måste man addera dem, som vid grundläggning av dynamiskt belastade fundament där de inte kan behandlas oberoende av varandra.

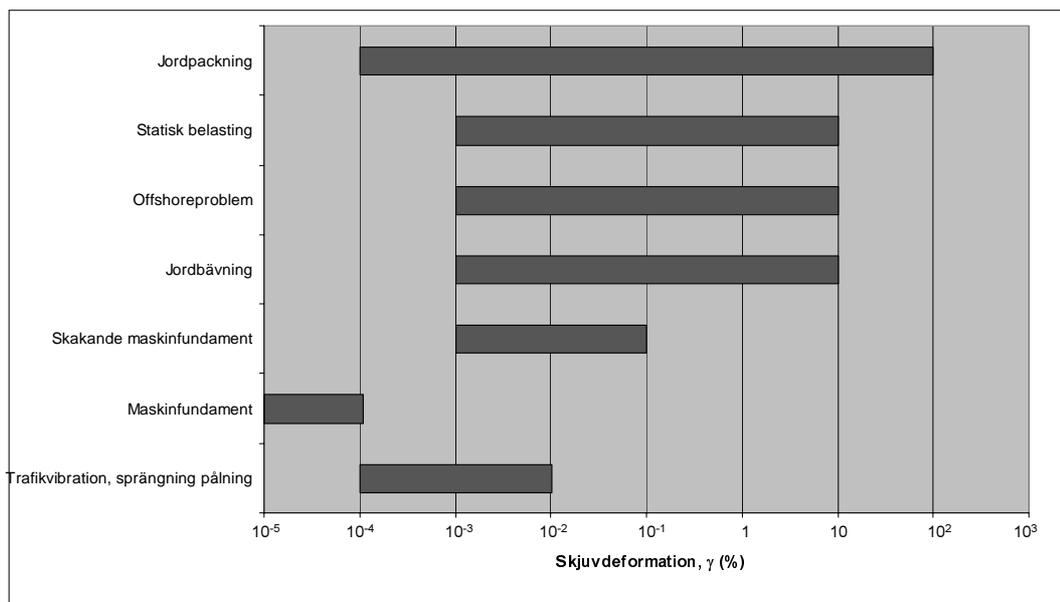
Belastningens karaktär har stor betydelse, eftersom deformationsegenskaperna hos jord- och bergmaterial beror av deformationens storlek och varaktighet. Ur praktisk synpunkt är det därför ofta lämpligt att indela problemområdet med hänsyn till deformationernas storlek vid olika tillämningar.

Trafik och sprängningar ger normalt upphov till mycket små deformationer i omgivningen och därför kan undergrunden betraktas som ett linjärt elastiskt material. Vid andra problemställningar, exempelvis packning och jordbävningar med stora rörelser, måste icke-linjära deformationsegenskaper och deras beroende av antalet lastcykler beaktas.

*Deformations-
egenskaperna
hos jord och
berg beror av
deformation-
ens storlek och
varaktighet.*



Figur 4.1
Aktiva och passiva
dynamiska laster.



Figur 4.2
Skjuvdeformation vid några olika lastfall.

Laster inom geodynamiken kan indelas i cyklisk last, vibration och stöt, se avsnitt 3.

4.2 Trafik

Vibrationer från järnväg

Järnvägsnätet i Sverige består av ca 10.000 km spår av varierande typ och funktion. Här framförs tågsätt av varierande längd, med olika axellaster och hastigheter, för såväl passagerare som godstrafik. Banvallarna har olika geometrisk utformning och är uppbyggda på skilda sätt på en undergrund som kan variera från berg till lös lera, torv eller gyttja. Dessutom är spårkvaliteten mycket skiftande. På grund av dessa variationer och olika kombinationsmöjligheter är det omöjligt att på ett entydigt sätt beskriva den omgivningspåverkan som sker från landets järnvägstransporter. För närvarande undersöks möjligheterna att dels öka axellasten, dels höja hastigheten på stora delar av nätet.

Faktorer som inverkar på vibrationer från tågtrafik är:

- Axellast
- Hastighet
- Tågens geometri och sammansättning
- Ojämna hjul
- Bankens geometriska utformning
- Bankens uppbyggnad
- Undergrundens beskaffenhet
- Grundläggningssätt
- Spårkvalitet
- Påverkad byggnadskonstruktion
- Tjäle

Faktorer som bankens uppbyggnad och spårkvalitet påverkar dessutom åkkomforten för tågens passagerare.

Nedan beskrivs översiktligt dynamiska laster och omgivningspåverkan som uppkommer från järnvägstrafik.

Långa tåg genererar störningar, som under vissa omständigheter kan betraktas som en linjekälla. Hos ytvågorna förekommer då inte någon geometrisk dämpning på avstånd som är mindre än halva tågets längd. All minskning av amplituden sker i form av materialdämpning. Vibrationerna avtar därför endast långsamt med avståndet, speciellt i lösa finkorniga jordar.

Tågens sammansättning spelar stor roll. Tåg som genomgående har ensartade och enhetslastade vagnar, som timmer-, olje- eller malmtåg, ger de största dynamiska störningarna.

Den dynamiska effekten blir normalt större med ökande tåglast och hastighet.

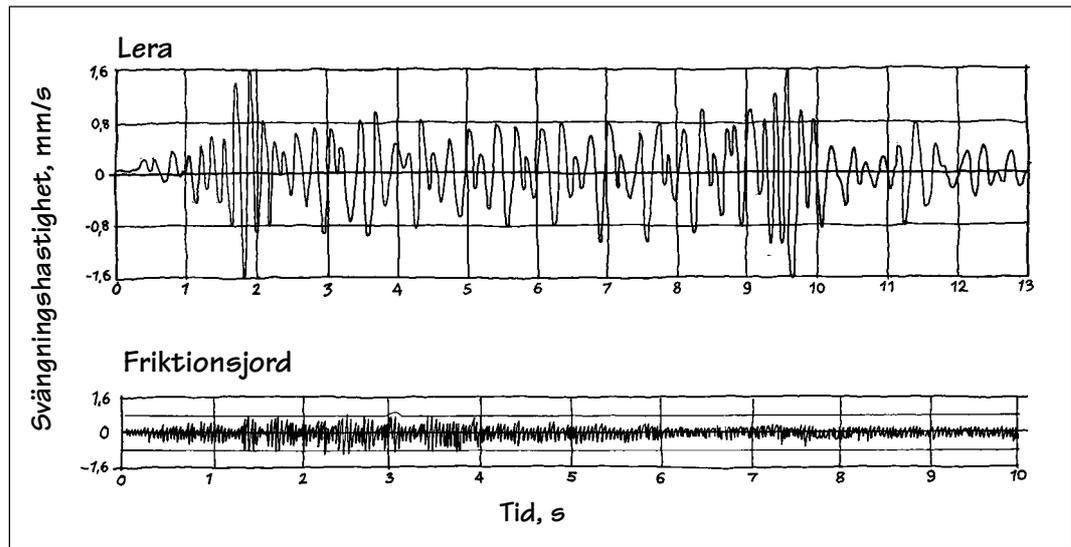
Ytvågorna dämpas normalt mindre än volytvågorna, på grund av utbredningssättet hos ytvågorna. Förändringar i lagertjocklek och jordlagrens sammansättning har stor inverkan på ytvågornas spridning.

Det frekvensområde en svängningsrörelse uppträder inom är av stor betydelse vid bedömning av såväl skaderisker som störningseffekter. Lågfrekventa svängningar (< 10Hz) är karaktäristiska för kohesionsjordar och svängningar med högre frekvenser för friktionsjordar.

Frekvensområdet kan vara tämligen brett beroende på vibrationskällan och jordarten och dess fysikaliska egenskaper.

Vibrationer dämpas mindre med avståndet i lösa finkorniga jordar än i fasta friktionsjordar.

Figur 4.3
Typiskt vibrations-
förlopp från
järnvägstrafik.



På torv- och lerjordar, där de största svängningsamplituderna normalt förekommer, är bankfyllningens tjocklek och utbredning samt dess läge i förhållande till fasta botten primära faktorer. Såväl banöverbyggnaden som banunderbyggnaden har betydelse i detta sammanhang.

Det är inom frekvensområdet upp till 10 Hz de största svängningsamplituderna uppstår från tunga tåg, när undergrunden består av lera. Rörelserna uppträder normalt under ca 5–40 s, beroende på tågets längd och hastighet.

*Torv- och ler-
jordar har
de största
svängnings-
amplituderna.*

Vibrationer från väg

När ett fordon rullar på en väg uppstår en nedpressning av vägbanan under fordonet på grund av dess tyngd. Nedpressningen orsakar masskrafter i vägbanan och underliggande bank. Är vägbanan dessutom ojämn eller gropig tillkommer ett stötförlopp. På dessa sätt överförs kontinuerligt energi från fordonet till marken. Energin sprider sig i form av vågor till omgivningen.

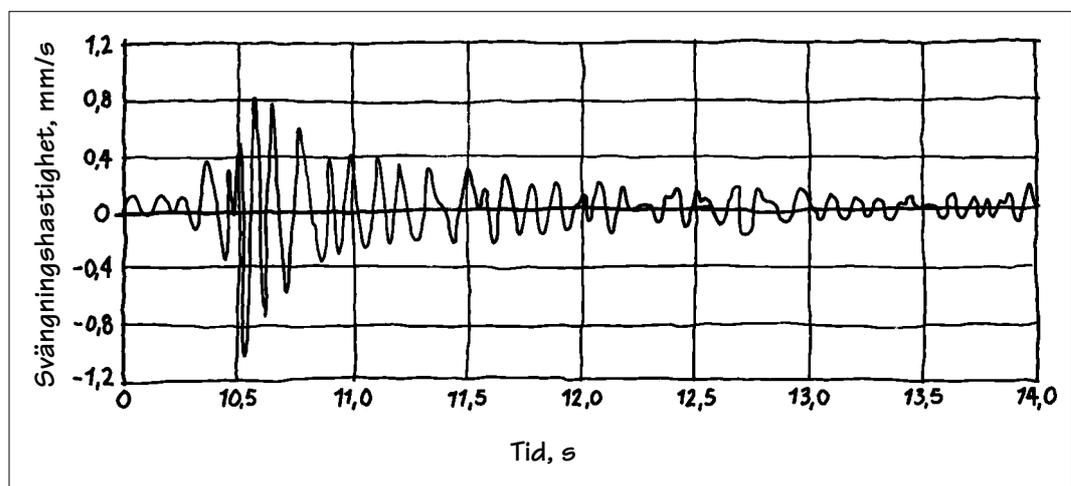
En förutsättning för att dessa vågor skall uppstå och få en sådan storlek på avstånd från vägen att de är störande, är förekomsten av lösa jordarter under och i anslutning till vägen. Även i friktionsjord kan störningar uppstå på kort avstånd.

Dominerande vågtyper är ytvågor, speciellt på avstånd. Detta innebär att markrörelserna sker i olika riktningar och plan, vilket försvårar omräkningen mellan förskjutning, partikelhastighet och accelerationen. I praktiken måste man därför vid kontroll göra direkta mätningar av dessa storheter med lämpliga instrument.

På samma sätt som för tågsvibrationer sker ytvågornas utbredning i horisontella marklager, och de dämpas ut långsammare än volymvågorna. Likaledes har förändringar i mäktighet och sammansättning hos undergrunden en kraftig inverkan på ytvågornas spridning.

Exempel på parametrar som är av betydelse i samband med generering av och störningsgrad på en fastighet från trafikvibrationer från väg är:

Figur 4.4
Typiskt vibrations-
förlopp från vägtrafik.



- Fordonstyp och tjänstevikt.
- Fordonets hastighet.
- Vägbanans ytjämnhet (lagningar, brunnslock, svackor).
- Geologin under och mellan väg och fastighet.
- Avståndet mellan väg och fastighet.
- Grundläggning och konstruktion av fastigheten.
- Förekomst av tjäle.

Här torde den mest avgörande parametern vara vägbanans ytjämnhet.

4.3 Byggnadsverksamhet

Pålslagning

Pålslagning utförs i Sverige 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 och spont i friktionsjord. För fallhejare finns vedertagna stoppslagningskriterier och utveckling av motsvarande kriterier för vibrationshejare pågår. För en utförligare beskrivning av pålning hänvisas till det arbete som bedrivs av Pålkommisionen.

Faktorer som påverkar vibrations-spridning- till omgivningen vid pål- och spontslagning är bl a slagdonets tyngd, anslagshastighet, slagfrekvens, slagdynans utformning, omgivande jord egenskaper, pålens tvärsnittsarea, pålens raket samt excentriska och/eller sneda slag.

Vibrationer genereras både från en påles mantelyta och spets, men den helt dominerande energimängden kommer normalt från spetsen. Närmast pålen är kompressionsvågen helt dominerande men denna dämpas snabbt och på visst avstånd från pålen dominerar ytvågen.

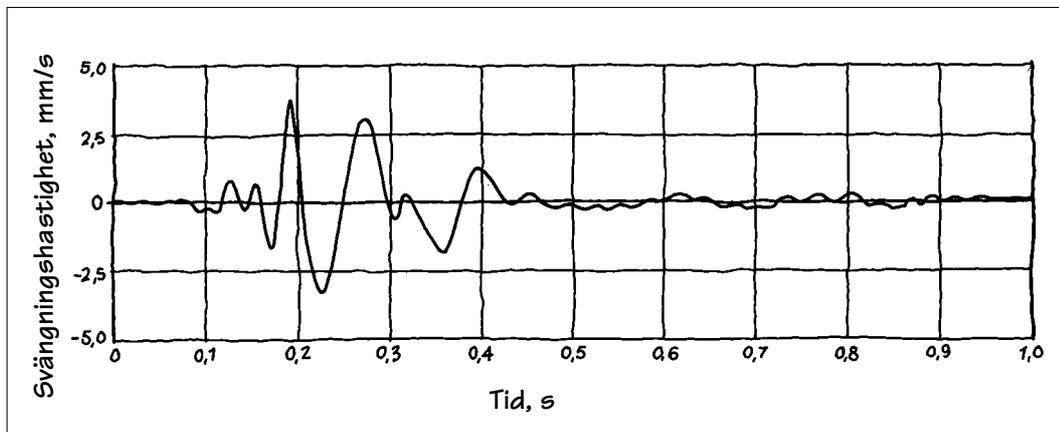
För praktiskt bruk kan man som regel bortse från materialdämning vid uppskattning av vibrationsutbredningen från pålning.

Sprängning

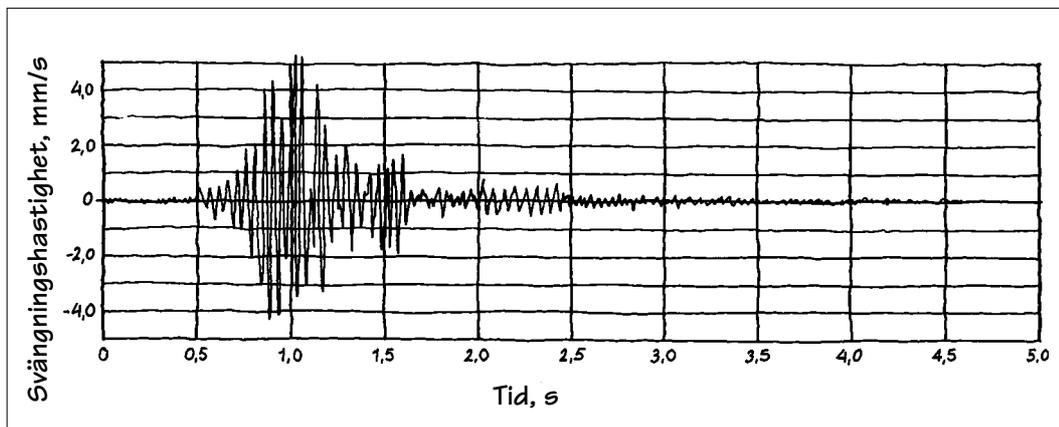
Dagens sprängteknik för anläggning av underjordskonstruktioner ger goda möjligheter att begränsa vibrationerna, samtidigt som sprickbildningen i tak och väggar blir låg, bergkonturen slät och sönderfallet av det utsprängda berget blir godtagbart.

Sprängning 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 kon-

Flera faktorer påverkar vibrations-spridningen till omgivningen vid pål- och spontslagning



Figur 4.5
Typiskt vibrationsförlopp från pålslagning.



Figur 4.6
Typiskt vibrationsförlopp från sprängning.

Vid alla former av dynamiskt packningsarbete alstras vibrationer som fortplantar sig till omgivningen.

trolleras. 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 gruvsdrift och stenbrott är välkända 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. Underlag för en likformighetslag erhålls genom provskjutningar och vibrationsmätning på olika avstånd från sprängplatsen. Med hjälp av diagrammet kan sedan en maximal tillåten momentant detonerande laddningsmängd för olika skadekriterier beräknas för ett givet avstånd.

Packning

Packning av jord- och sprängstensmaterial utförs vanligen med vibrerande redskap och andra dynamiska metoder. Vibreringen påförs antingen från markytan med hjälp av vibratorplattor och vibrationsvältar, eller på djupet genom exempelvis *vibroflotation* med stavvibratörer. Packning till stora djup kan också utföras med fallvikt, s.k. *dynamisk konsolidering*. 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 därmed. Omlagring och packning sker under samtidig inverkan av partiklarnas rörelsetillstånd och de dynamiska tryck- och skjupvåkänningar som störningskrafterna ger upphov till.

Packning av jord innebär i princip en plastisk deformation, varvid den energi som tillförs absorberas i jordmaterialet. När jorden packas förändras dess egenskaper så att det packade jordlagret blir alltmer elastiskt. Detta medför i sin tur att tillförd energi kan utbredas till allt större djup och avstånd från packningsredskapet. Den packade zonens tjocklek ökar härigenom successivt. Den djupverkan som kan erhållas vid packning beror främst av packningsredskapet, antal överfarter och undergrundens egenskaper. Packningsredskapet väljs bl.a. med hänsyn till aktuell jordart och vattenkvot samt arbetets storlek. Dynamiska metoder är inte alltid lämpliga och i silt och lera kan statiska vältar vara bättre alternativ, framförallt vid höga vattenkvoter.

Vid alla former av dynamiskt packningsarbete alstras vibrationer som fortplantar sig till omgivningen. Vid planering av packningsar-

bete måste därför hänsyn tas till påverkan på omgivningen så att inte skador uppkommer på intilliggande byggnader och konstruktioner. Vidare skall man planera och följa upp arbetena så att inte accepterade komfortvärden överskrids för människor som stadigvarande vistas i omgivningen.

4.4 Maskiner

Dynamiskt belastade fundament

Ett maskinfundament är en byggnadsdel som överför belastningar från en maskin till underlaget. Detta kan utgöras av jord-/berggrund, pålar, bjälklag eller annan bärande konstruktion. Skorstenar, vindkraftverk, off-shorekonstruktioner och ledningsstolpar, t.ex. invid järnväg, är andra dynamiskt belastade konstruktioner med motsvarande problemställningar. Dessutom måste hänsyn tas till att omgivningen kan överföra vibrationer till känsliga maskiner och apparater och skada dem.

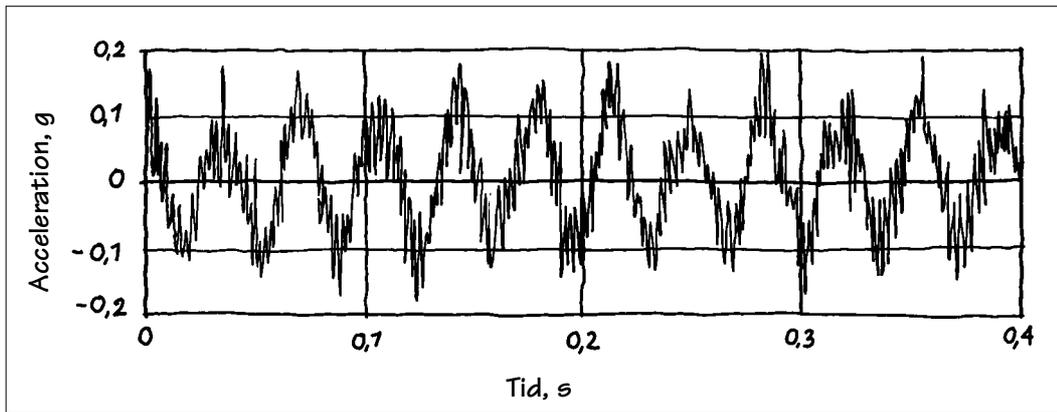
Den tekniska utvecklingen har inneburit allt större, snabbare och känsligare maskiner, vilket medfört att man vid dimensionering av maskinfundament också måste ta hänsyn till den dynamiska belastningen av undergrunden.

Vid dimensionering av maskinfundament tillkommer krav utöver de för statiska konstruktioner. Dessa krav syftar till att säkerställa maskinernas funktion vid drift och att förebygga skador eller olägenheter i omgivningen. Vid dimensioneringen skall man känna till en maskins funktionsätt och den belastning som överförs till fundamentet, undergrundens dynamiska egenskaper, omgivningens vibrationskänslighet samt eventuella ytterligare störningskällor i omgivningen.

Maskiner kan delas in i tre huvudgrupper:

1. Maskiner som själva genererar vibrationer, men är relativt okänsliga för vibrationsstörningar utifrån.
2. Maskiner som inte ger någon nämnvärd dynamisk belastning och som är okänsliga för vibrationsstörningar utifrån.
3. Maskiner som inte ger någon nämnvärd dynamisk belastning, men som är känsliga för vibrationsstörningar utifrån.

En viktig parameter vid dimensionering av maskinfundament är maskinens egenfrekvens jämfört med fundamentets och undergrundens. Dessa egenfrekvenser får inte sammanfalla eftersom det då uppkommer resonans i systemet.



Figur 4.7
Typiskt vibrationsförlopp från vibrerande maskin.

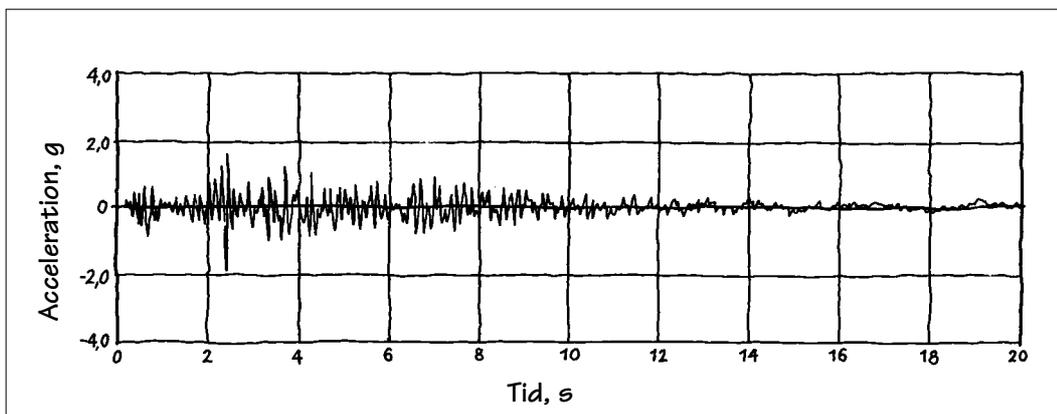
4.5 Jordbävning

Jordbävning, eller jordskalv, är en plötslig, kraftig förkastning, eller brott i jordskorpan, eller övre jordmanteln, som utlöser spänningar och åstadkommer skalv i marken. Området där brottet sker kallas härd, lokus eller hypocentrum, medan området rakt ovanför detta på jordytan kallas epicentrum. Vibrationerna vid en större jordbävning ökar gradvis eller plötsligt i amplitud och åtföljs ofta av mullrande ljud. Sprickor kan öppna sig i marken och förskjutningar kan förekomma. Huvudskalvet följs i regel av en serie mindre efterskalv och ofta förekommer också förskalv. Omfattande skador på egendom kan följa en jordbävning. I smala vattenpassager mot öppet hav kan stora havsvågor torna upp sig och åstadkomma stor förödelse i strandnära områden.

De flesta större jordbävningar uppstår i väldefinierade svaghetszoner i jordskorpan, s. k. seismiska bälten. Normala jordbävningar (fokusdjup 0–70 km) svarar för 85 % av den

totala energin i jordbävningar, mellandjupa (70–300) km för 12 % och djupa för 2 %. Ingen jordbävning med fokus djupare än 720 km har någonsin registrerats, vilket tyder på att materialet i jorden under detta djup är så plastiskt att det saknar styvhet och inte kan överföra spänningar.

Richterskalan anger jordbävningars intensitet och magnitud, dvs mått på energiutlösning. Enligt Richters skala definieras magnituden som 10-logaritmen av den största amplituden ($i \mu\text{m}$) i den vågform som registreras på en standardseismograf på 100 km avstånd från den punkt på jordytan som ligger rakt ovanför jordbävningens fokus (epicentrum). En jordbävning med magnituden 6 ger således en svängningsrörelse med amplituden 1 m på detta avstånd från epicentrum. En ökning i magnituden med en enhet innebär 25 till 30 gånger större energiutlösning. Sveriges energiförbrukning år 1989 uppgick till $1,34 \cdot 10^{18} \text{ J}$ (371 TWh), vilket är ungefär lika mycket som energiutlösningen i en katastrofal jordbävning.



Figur 4.8
Typiskt vibrationsförlopp från jordbävning.

4.6 Mer att Läsa

Carlsson B, Massarsch R (1986). Vibrationer i jord. Byggforskningsrådet T16:1986.

Den statiska och dynamiska tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser. Banverkets tekniska rapporter 1994:2.

Handboken BYGG: Geoteknik, avsnitt G20, Vibrationer i jord och berg, (1984).

Holmberg R, m fl (1982). Vibrationer i samband med trafik- och byggverksamhet. Byggforskningsrådet T43:1982.

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>

Jord- och bergdynamik. Information från IVA:s kommitté för vibrationsfrågor, IVA Meddelande 225, 1979.

Skadlig inverkan av vibrationer. Symposium anordnat av svenska geotekniska föreningen den 7 maj 1973, Särtryck och preliminära rapporter No. 56, SGI, 1974.

Vibrationsdag 1975. Inst. för Jord- och bergmekanik, KTH. Rapporter JoB No.2, 1976.

Weiner, D. (1987). Vibrationsskador inom industrin. Orsaker – bedömningsmetodik – åtgärder, T8:1987, Byggforskningsrådet.

5. Effekter av geodynamisk påverkan

5.1 Allmänt

De olika faktorerna redovisade i kapitel 4 ger upphov till en påverkan på människor, konstruktioner, byggnader och utrustning i olika omfattning. I detta avsnitt redovisas de effekter som kan uppstå på grund av dynamisk belastning.

5.2 Omgivningspåverkan

Vibrationer kan förorsaka försämring av boende- och arbetsmiljö och störa känslig apparatur, som elektroniska instrument och datorer. Dessutom kan påverkan bli så stor att det uppstår skador på hus och andra konstruktioner. Vibrationer från t.ex. vägtrafik förorsakar såväl skador på fastigheter, men tillsammans med inbyggda spänningar i husets konstruktion kan de vara utlösande faktorer för exempelvis sprickbildning.

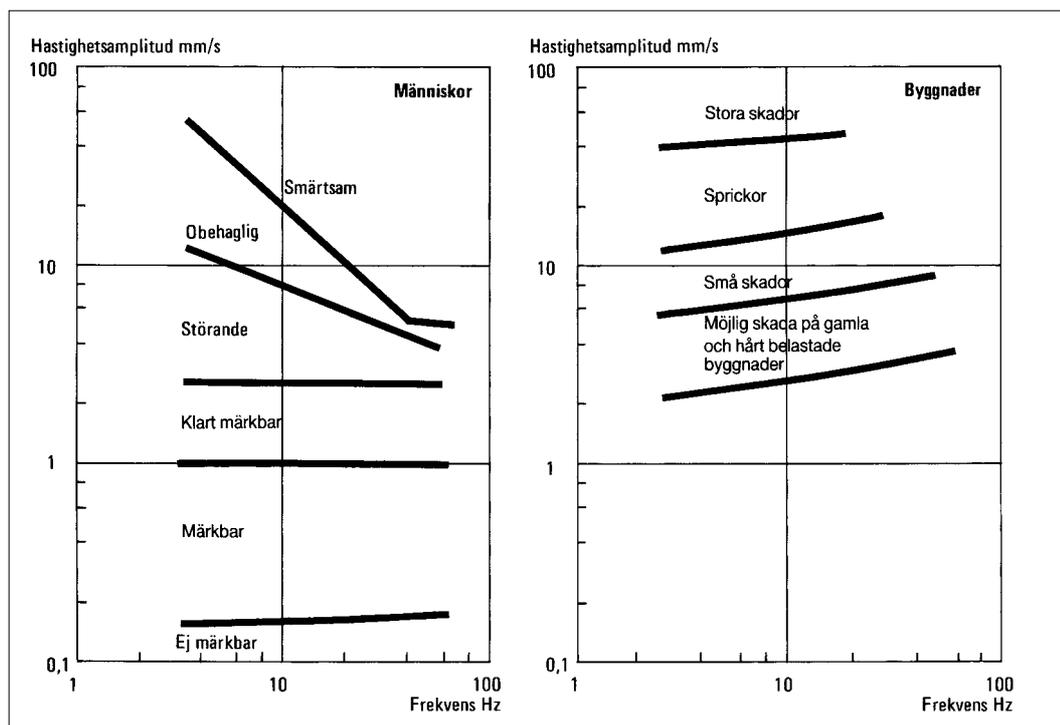
Vibration, eller dynamisk belastning, kan som enstaka förlopp vara ofarligt för en konstruktion, men vid upprepning under lång tid föreligger en risk för degenerering, dvs att

någon form av utmattningsbrott kan inträffa.

En annan effekt är att porvattentrycket i täta jordar eller instängda lager inte hinner minska ut innan nästa påverkan kommer och på så sätt kan en successiv stegring av trycket ske och därmed minskar effektivspänningen i jorden.

Vibrationskällornas dynamiska egenskaper varierar inom vida gränser. Sprängning ger upphov till kortvariga och relativt högfrekventa förlopp. Vid pål- och spontslagning ändras vibrationen med nedträngningsdjupet då den huvudsakliga energin frigörs vid spetsen. Vid schaktningsarbeten kan impulslaster uppstå vid skopans tillslag mot marken, medan varaktigheten för det dynamiska förloppet vid passage av långa tåg kan uppgå till flera minuter. I finkorniga jordar dämpas vibrationen långsammare än i friktionsjordar. De överförda vibrationerna är dessutom mer lågfrekventa, vilket kan öka skaderisken i byggnader. Vid trafikvibrationer ändras avståndet till vibrationskällan kontinuerligt och överlagringseffekter kan uppstå. Vägojämnheter och räls-skarvar ger en ökad dynamisk inverkan.

Vibrationer kan förorsaka försämring av boende- och arbetsmiljö och störa känslig apparatur, som elektroniska instrument och datorer.



Figur 5.1
Påverkan på människor och byggnader.
Carlsson & Massarsch (1986)

Människan är mest känslig för svängningar i kroppens längdriktning.

Detta innebär att det kan vara svårt att exakt förutse vibrationernas sammansättning och därför används ofta förenklade empiriska samband och mätningar framför komplexa dynamiska beräkningar vid bedömning av omgivningspåverkan. Väsentliga parametrar för bedömning av omgivningspåverkan är främst vibrationens amplitud, frekvens och dess varaktighet.

Hänsyn måste tas till en rad olika faktorer vid bedömning av vibrationer och hur de kan påverka omgivningen:

- Vibrationskällans egenskaper och samverkan med dess grundläggning.
- Överföring av vibrationen från fundament till undergrund.
- Vågutbredning och dämpning genom jordlagren.
- Samverkan mellan undergrund och konstruktioner.
- Överföring av vibration från fundament till överbyggnad.

Energin från en vibrerande källa sprids genom marken och påverkas av geotekniska och geologiska förhållanden, se Figur 4.1b. Vibrationer sprids lättare i finkorniga jordar som lera och silt än i mer grovkorniga jordar.

5.3 Tumregler

I MKB-GEO från Vägverket finns det angivet rekommenderade skyddsavstånd mellan väg och byggnader vid olika fordonshastigheter.

I litteraturen finns också flera olika kriterier angivna för hur dels människor störs, dels skadeverkan på byggnader.

Erfarenhetsmässigt gäller att för stående personer är vertikala rörelser mer kännbara ur förnimmelsesynpunkt än horisontala och att liggande personer är mest känsliga för horisontala svängningsrörelser. Det framgår således att människan är mest känslig för svängningar i kroppens längdriktning.

Vidare är människans förnimmelsetryck mer skärpta under den tid på dygnet hon befinner sig i vila. Störningar från trafikrörelser är därför mest påtagliga under kvälls-, natt- och morgontid och särskilt känsliga tider är för- och efternatten. De flesta klagomålen kommer från boende inom områden med kohesionsjordar, men klagomål förekommer även från andra områden.

För medeltunga och tunga traktordragna vibrationsvältar kan som ett riktvärde anges ett normalt säkerhetsavstånd i meter, som är 1 à 1,5 ggr vältens vikt i ton vid vibrering in till byggnader.

5.4 Liquefaction

Liquefaction är övergång till vätskeform när en jord under inverkan av dynamiska krafter, eller plötsliga tryckförändringar i porvattnet, förlorar sin hållfasthet och styvhet och blir en flytande tung vätska.

Den dynamiska inverkan kan härröra från t. ex. jordskalv, pålning, vågkrafter eller stora och snabba tryckförändringar i främst finkorniga jordar.

För att bedöma förutsättningarna för liquefaction i jord är det viktigt att känna jordens initiella struktur och spänningstillstånd. En jord består av enskilda partiklar och varje enskild partikel har kornkontakt med flera intilliggande partiklar. Vikten av överliggande jord gör att kontakttryck uppstår i kontaktpunkterna. Dessa krafter håller de enskilda partiklarna på plats i strukturen och ger jorden hållfasthet.

Liquefaction sker när kornstrukturen i lös vattenmättad silt eller finsand bryts ned av en snabb laständring, som vibrationer vid jordbävning. När den löst lagrade strukturen bryts ned förloras kontakten mellan de individuella partiklarna och dessa vill falla in i en fastare lagring. Det finns dock inte tillräckligt med tid för porvattnet mellan partiklarna att dränera ut. Istället blir porvattnet instängt och förhindrar partiklarna från att komma i ny kontakt med varandra. Detta skeende förstärks genom att porvattentrycket ökar och reducerar kontakttrycken i de kvarvarande kornkontaktpunkterna och därvid sker en successiv uppjukning och försvagning av jorden. I extremfallet blir porvattentrycket så högt att alla partiklar förlorar sina kontaktpunkter och jorden övergår i en vätskeform.

Ökning av portryck kan utlösa jordskred eller förorsaka kollaps av dammar. Ett exempel är den nedre dammen vid San Fernando nära Los Angeles, som drabbades av ett undervattenskred under en jordbävning 1971, figur 5.2. Kollaps undveks tack vare lågt vattenstånd i dammen och lyckligtvis förhindrades en stor katastrof i det tätt befolkade området nedströms.



Figur 5.2
Liquefaction vid dammen i San Fernando.

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/selectpicliqu e/dams/sanfernandodamairview3.jpg>

Liquefaction är ett fenomen som kan visa sig på flera olika sätt. Förvätskning startar ofta i ett jordlager på 3–5 m djup under markytan. En effekt kan bli ”kokning” av sand, varvid det på markytan bildas kratrar av sand som kommer upp från undergrunden. Vid lutande markyta, större än 3 grader, kan jordskred inträffa som oftast utbildas med hög hastighet.

5.5 Mer att läsa

Bodare, A, (1997). Kompendium jord- och bergdynamik, Stockholm 1997.

Carlsson B, Massarsch R (1986). Vibrationer i jord. Byggforskningsrådet T16:1986.

MKB-Geo, Mark- och vattenaspekter i miljökonsekvensbeskrivningar för vägar. Vägverkets publikation 1996:72.

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>

6. Dynamiska egenskaper hos jord

6.1 Allmänt

De dynamiska egenskaperna hos jord skiljer sig något från de statiska. I detta avsnitt behandlas de viktigaste materialparametrarna för att beskriva jordmaterialets dynamiska egenskaper.

Av intresse för utredning av geodynamiska problem är främst vågutbredningshastighet, skjuvmodul och dämpning. Våghastigheten är en parameter som anger med vilken hastighet ett dynamiskt förlopp utbreder sig och dämpningen är ett mått på hur mycket vibrationens amplitud dämpas med avståndet och typ av jordmaterial.

6.2 Våghastighet

Den våg som fortplantar sig med störst hastighet är kompressionsvågen, vilket innebär att den är enkel att registrera ute i fält. Några typiska kompressionsvåghastigheter för olika jordar och bergarter redovisas i figur 6.1.

I figur 6.2 återges några typiska skjuvvågs-hastigheter för olika jordar och bergarter.

Skjuvvågen kan inte fortplanta sig i vätskor och gaser, eftersom dessa material inte kan förmedla skjuvkrafter. Därför förändras inte skjuvvåghastigheten under grundvattenytan, såvida inte densiteten hos jordmaterialet förändras.

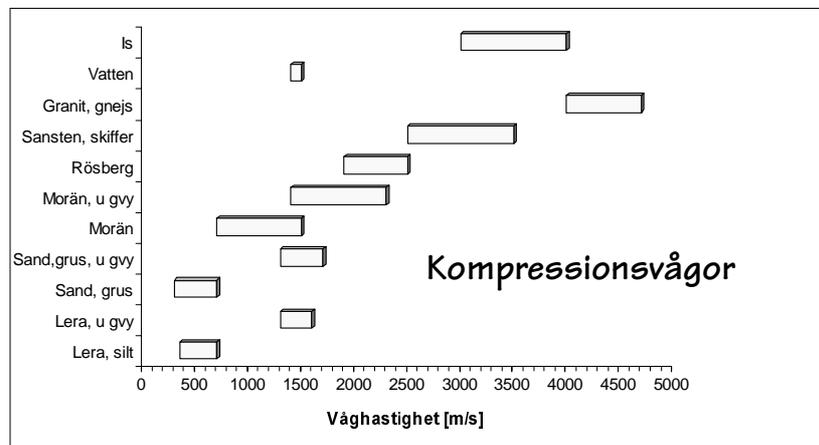
Utbredningshastigheten för Rayleighvågen är omkring 90 % av skjuvvågens hastighet. Den kan därför vara svår att skilja från skjuvvågen, vid mätningar i fält.

6.3 Skjuvmodul

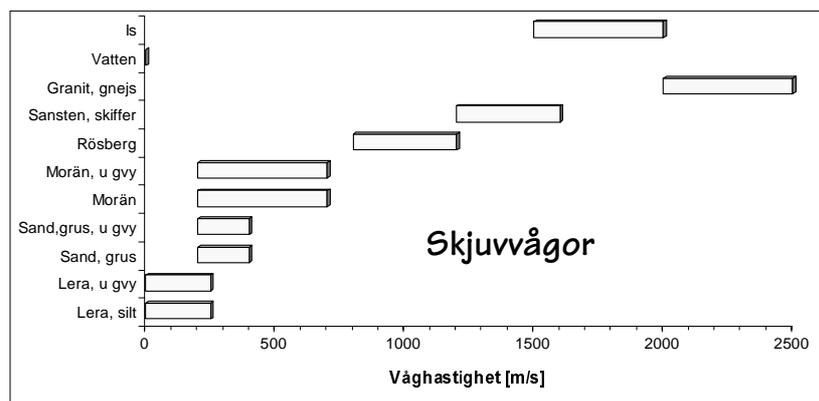
Skjuvmodulen, G , är ett mått på hur styvt materialet uppträder vid skjuvning. Skjuvmodulen i jord varierar med töjningen och har sitt största värde, G_{max} vid skjuvtöjningar mindre än 10^{-5} se figur 6.3. Därefter minskar skjuvmodulen medan den inre dämpningen ökar. Vid skjuvtöjningar större än cirka 10^{-2} påver-

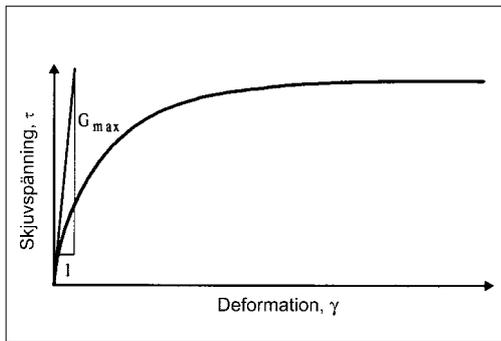
Av intresse för utredning av geodynamiska problem är främst vågutbredningshastighet, skjuvmodul och dämpning.

Figur 6.1
Kompressionsvågornas utbredningshastighet i olika jord- och bergmaterial.
Efter IVA Meddelande 225 (1979), Triumf (1992)



Figur 6.2
Skjuvvågornas utbredningshastighet i olika jord- och bergmaterial.
Efter IVA Meddelande 225 (1979), Triumf (1992)





kas både skjuvmodulen och dämpningen av antalet cykler och frekvensen. Se även figur 8.2 a-b.

Skjuvmodulen är primärt beroende av effektivspänningsnivån och portalet och skall helst bestämmas genom mätning in situ. Det finns dock ett flertal empiriska formler för att uppskatta skjuvmodulen för olika jordmaterial.

6.4 Portryck

Jord och bergmaterial består av fasta partiklar, porvatten och porgas. Jord och berg kan beskrivas som elastoplastiska material. Vid mycket små deformationer kan materialen dock betraktas som helt elastiska.

Belastning på jord överförs dels genom kornskelettet, dels genom porvattnet. I en helt vattenmättad jord överförs trycket vid snabba belastningsförlopp momentant till porvattnet, vilket ger en portrycksförändring. Portrycksökningen är normalt störst i området närmast lasten. Detta innebär att portrycksökningen i sin tur ger upphov till en gradient och porvattenströmning och så småningom kommer ett jämviktsläge att inträda. Hur snabbt utjämnningen av porövertrycket sker styrs av jordens permeabilitetsegenskaper och övriga geohydrologiska förhållandena.

När jorden deformeras så att permanenta deformationer uppstår sker en omlagring av kornskelettet som kan öka eller minska porvolumen i jorden. Förändringarnas storlek och tecken är beroende av jordens initialtillstånd. Om jorden är fast lagrad dilaterar den vid belastning utöver det elastiska området och porvattentrycket minskar. Om jorden däremot är relativt löst lagrad packas jorden och porvolumen strävar efter att bli mindre varvid portrycket ökar. Hur stor portrycksförändringen blir beror på deformationens storlek, jordens permeabilitet, belastningshastighet och sannolikt också tillförd energi.

En dynamisk belastning innebär en serie med upprepade på- och avlastningar. Om ett tätt, löst lagrat material, där dräneringen är begränsad, utsätts för dynamiska laster sker en

portrycksuppbyggnad då lastamplituden är tillräckligt hög. Med tillräckligt hög menas att lastamplituden är så hög att skjuvdeformationen går över den gräns där skjuvmodulen börjar minska. Vid små deformationer (med reducerad modul) är rörelsen reversibel. Först vid större deformationer fås permanenta deformationer.

6.5 Skjuvhållfasthet

Skjuvhållfastheten, τ , för ett friktionsmaterial kan beräknas ur sambandet:

$$\tau = (\sigma - u) \tan \phi$$

där σ är normaltrycket, u är portrycket och ϕ är effektiva friktionsvinkeln. Ur sambandet framgår att om portrycket ökar mer än normaltrycket minskar skjuvhållfastheten. Om portrycket är lika stort som normaltrycket blir skjuvhållfastheten noll och jorden övergår till att flyta, man har fått en jordförvätskning (liquefaction).

För en kohesionsjord är sambandet något mer komplicerat, men också här har en portrycksökning stor negativ inverkan på skjuvhållfastheten.

6.6 Plasticitetsindex

Plasticitetsindex, I_p , är ett mått på sammansättningen i mineralpartiklar och porvatten i finkorniga jordar. I_p har inverkan på skjuvmodulen och jordens dämpning i vattenmättade jordar. En högplastisk jord är linjärt elastisk till större töjningar än andra jordar. Det innebär att dämpningsfaktorn blir mindre och man får större vibrationsproblem, jämför t.ex. Göteborg (Ullevi) och Mexico City. Detta kan också ha stor betydelse i jordbävningssammanhang.

6.7 Mer att läsa

Den statiska och dynamiska tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser. Banverkets tekniska rapporter 1994:2.

Jord- och bergdynamik. Information från IVA:s kommitté för vibrationsfrågor, IVA Meddelande 225, 1979.

Larsson R., Mulabdic M. (1991). Shear moduli in Scandinavian clays. Report No. 40, SGI.

Svensson M. (1998). Modern methods for determination of shear modulus. Geoteknikavdelningen Lunds tekniska högskola.

Triumf C-A. (1992). Geofysik för geotekniker, metoder och tillämpningar. Byggforskningsrådet T31:1992.

Figur 6.3
Utvärdering av maximala skjuvspänningen i ett skjuvspännings-skjuvtöjningsdiagram.
Svensson (1998)

Om portrycket är lika stort som normaltrycket blir skjuvhållfastheten noll och jorden övergår till att flyta

7. Geodynamiska undersökningsmetoder

Den viktigaste parametern är utbredningshastigheten.

7.1 Allmänt

Med en geodynamisk undersökning menas att man tar fram relevanta parametrar, i fält eller laboratorium, för den geodynamiska utredningen. I tidigare avsnitt har redovisats vilka parametrar som är aktuella, men den som oftast bestäms är utbredningshastigheten. Detta beror främst på att den dels är underlag för bestämning av skjuvmodul, dels att den är relativt lätt att mäta. Inom området kontroll är det mest vanliga att vibrationsnivåer mäts för att kontrollera omgivningspåverkan.

Undersökningar betingas av att jord- och bergförhållande är komplexa och att det därför inte är möjligt att bestämma allt ur erfarenhetsmaterial eller handböcker.

7.2 Planering

Omfattning och syfte

Den geodynamiska undersökningens omfattning bör vara sådan att man kan mäta eller bedöma utbredningshastigheten för olika vibrationsvågor, deras frekvensinnehåll och amplituder samt hur dessa dämpas med avståndet från vibrationskällan. Man bör försäkra sig om att dämpade vågor inte åter förstärks på ett något längre avstånd genom interferens mellan ytvågor och vågor som reflekteras från djupare liggande skikt i jorden. I befintliga konstruktioner mäts vibrationerna i grunden och hur dessa fortplantar sig upp genom byggnaden.

Vid mätning av jordens dynamiska egenskaper skall jordlagerföljden klarläggas och mätningarna omfatta alla relevanta jordlager i profilen.

Val av metod och mätutrustning

Allmänt

Syftet med fältförsöken är att mäta påverkan av olika vibrationer i jord och konstruktioner i vibrationskällans omgivning. Vissa av de metoder som används är väl etablerade, men inte standardiserade, medan andra ännu befinner sig i en utvecklingsfas. Även de etablerade metoderna är dock ofta under utveckling, eftersom datortekniken utvecklas och möjliggör mer utvecklade, snabbare och säkrare utvärde-

ring av resultaten. De flesta av metoderna kräver speciellt utbildad personal för genomförandet.

Mätmetodiken varierar beroende på om det rör sig om en existerande, en planerad eller befarad vibrationskälla, samt om det rör sig om befintliga eller planerade konstruktioner. I de fall både källa och konstruktion finns, eller relativt enkelt kan simuleras, görs mätningarna under aktuella eller planerade förhållanden. Exempel på detta är vibrationer från väg- och järnvägstrafik. Före pålnings- och sprängningsarbeten kan provpålning respektive provsprängning utföras för bestämning av acceptabla arbetsgångar. I de fall undersökningen rör planerade eller befarade vibrationskällor, som inte direkt kan simuleras, görs undersökningar för bestämning av markens dynamiska egenskaper, så att inverkan av olika vibrationer kan beräknas teoretiskt. Befarade vibrationskällor är främst jordbävningar, men också olyckor som explosioner och liknande.

Mätning av jordens dynamiska egenskaper görs med fördel i fält. Mätning av hur jordens egenskaper förändras och eventuellt bryts ned genom stor och varaktig dynamisk påverkan, respektive hur de förändras efter t.ex. konsolidering för påförda laster, mäts med fördel i laboratorium.

Risken för flytjordsfenomen (liquefaction) i samband med kraftiga vibrationer bedöms som regel ur resultaten från vanliga geotekniska undersökningar, typ CPT-sonderingar och provtagning.

Mätmetoder

Mätningar av vibrationer i **fält** görs som regel med geofoner eller accelerometrar och signalerna lagras med hjälp av bandspelare, minnesoscilloskop eller dator för senare analys. En geofon är ett instrument för mätning av svängningshastighet. Den är av samma princip som de seismometrar som används av seismologer. Den är dock normalt konstruerad för frekvenser högre än 5 Hz, medan seismometrarna mäter frekvenser ned till 0,01 Hz. Geofoner och accelerometrar mäter i en bestämd riktning, men flera givare kan kopplas ihop vinkelrätt i förhållande till varandra så att instrumentet mäter i tre riktningar. De orienteras

då normalt så att mätningen sker vertikalt, horisontellt i riktning mot vibrationskällan och horisontellt tvärs denna riktning. Valet av givare görs så att man kan mäta de frekvenser som skapas av den aktuella vibrationskällan.

Mätning av dynamiska egenskaper i **laboratorium** görs som regel med speciella utrustningar för detta ändamål, t.ex. dynamiska skjuv- eller triaxialapparater, ”torsional shear” apparater eller ”resonance-column”-apparater. Enklare försök kan utföras med böjelement, (bender elements), som kan byggas in i ett flertal vanliga provningsutrustningar som t. ex. ödometrar eller triaxialapparater. Dessa försök är dock begränsade till att mäta den initiella skjuvmodulen i ”naturligt” tillstånd och efter olika grader av konsolidering för ändrade lastförhållanden.

Exitering

Vibrationerna i fält skapas, beroende på vad som är lämpligast, av den befintliga vibrationskällan, eller med hjälp av slag, stötar eller explosioner i marken eller vibratorer på eller i marken. I laboratoriet skapas vibrationerna genom speciell utrustning för cyklisk belastning, med vilken såväl vågornas form, frekvens och amplitud kan styras. I enklare försök med böjelement skapas en skjuvvåg med hjälp av en elektrisk signal som exiterar ett av elementen.

Mätning vid befintliga eller simulerade vibrationskällor

Mätning av inverkan från en befintlig vibrationskälla görs genom att geofoner eller acce-

lerometrar placeras ut på markytan, samt i befintliga byggnader (på grundmuren och längre upp i byggnaden). Instrumenten skall kunna mäta i tre riktningar och placeras så att de mäter vertikalt samt helst också horisontellt, i princip i riktning mot vibrationskällan och tvärs denna riktning. I fall med rörliga vibrationskällor, typ trafik, kan detta endast göras ungefärligt. Instrumenten på markytan placeras på olika avstånd till vibrationskällan så att vibrationernas dämpning med avståndet kan mätas. Vid utplaceringen av instrumenten tas också hänsyn till jordförhållandenas variationer i plan, så att vibrationer som fortplantas i stråk med lösare jord, vilket inte behöver vara den kortaste vägen, fångas in. Detta gäller speciellt för rörliga vibrationskällor. Instrument i byggnader placeras som regel på grundmuren samt mitt på golvet i översta våningen, eller motsvarande placering vid andra konstruktioner. Gäller mätningen inverkan på en speciellt känslig utrustning med fast placering mäts givetvis också i denna punkt, *Figur 7.1*.

Mätningen utförs då vibrationskällan är igång (eller simuleras). Eftersom vibrationerna varierar i frekvens och amplitud, t.ex. vid uppstartning av maskiner, bör hela förloppet fångas in. Avser utredningen inverkan av en utökning av vibrationerna, som vid tyngre eller snabbare väg- och järnvägstrafik, eller på grund av ojämnheter i farbanan på grund av sättningar och slitage, bör detta nya lastfall simuleras. På motsvarande sätt utförs provpåläggning och provsprängning som simulerar de kommande förhållandena.

Mätning av dynamiska egenskaper i laboratorium görs som regel med speciella utrustningar.

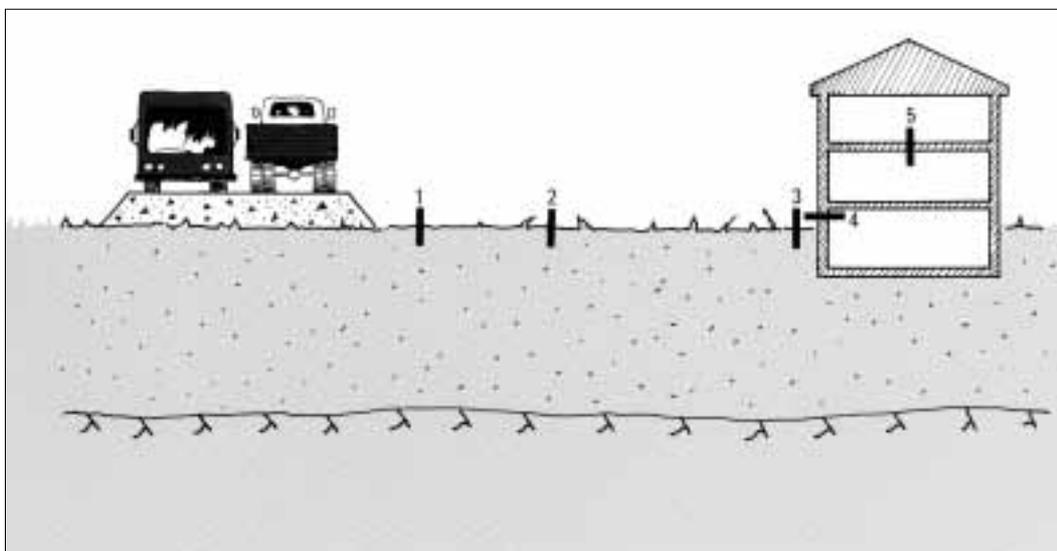


Fig.7.1
Utplacering av givare för mätning av inverkan av befintlig vibrationskälla.

Carlsson & Massarsch (1986)

7.3 Fältmetoder

Metoder för vibrationsmätning och kontroll av omgivningspåverkan

Metoderna för mätning av vibrationer i naturlig jord från befintliga vibrationskällor har översiktligt beskrivits ovan. I detta avsnitt beskrivs hur vibrationer kan mätas och kontrolleras vid vibrationsstyrda processer.

Idag används vibratorer för många processer inom anläggningsindustrin. Vibratorer används både för drivning av förstärkande element som pålar och spont och för packning av jorden. Detta skapar ofta problem med vibrationer och sättningar i omgivningen, vilka måste hållas på en acceptabel nivå. För detta ändamål kan man använda vibrationsmätningar som via en dator styr den använda vibratorns frekvens och amplitud. Vid risk för omgivningspåverkan placeras geofoner ut på samma sätt som vid mätning av inverkan av existerande vibrationskällor. Gränsvärden för maximala acceptabla värden på vibrationerna bestäms och mätarna kopplas till en dator som styr vibratören. Vibratören regleras så att gränsvärdena inte överskrids, samtidigt som effektivaste drivning med bibehållande av kraven ovan fås i olika partier i området och på olika avstånd från de vibrationskänsliga objekten, *Figur 7.2*. Vid dessa arbeten skall man vara observant på att uppstartningen av vibratorerna ofta skapar förhöjda och mer svårkontrollerade vibrationseffekter.

Vid packning gäller det istället för att reducera vibrationerna att skapa en så stor respons i jorden som möjligt. Detta kan åstadkommas genom att låta geofoner på markytan styra vibratorer vid packningsarbeten så att så stora vibrationer som möjligt erhålls. Metoden har

främst använts vid packning med djupvibreringsmetoder.

Metoder för bestämning av vågutbredningshastighet och modulvärde

Allmänt

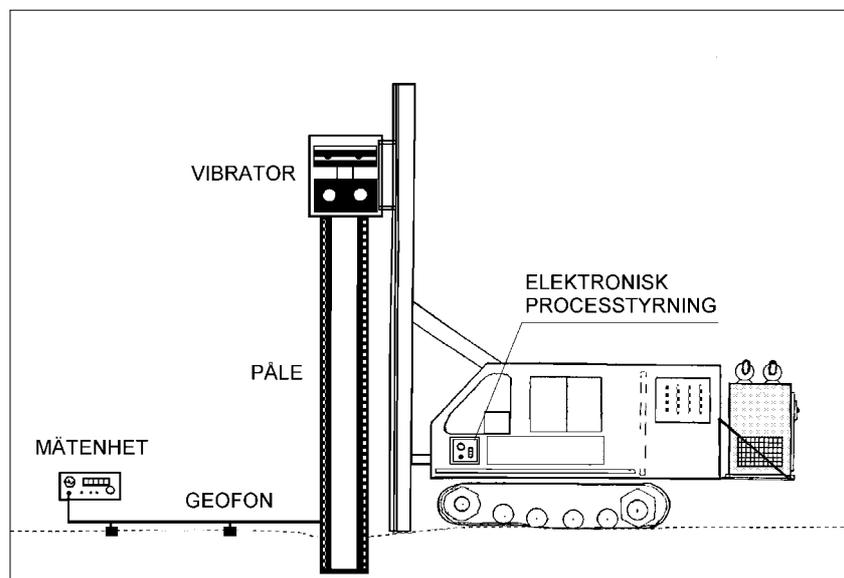
Bestämning av jordens modulvärden vid dynamisk belastning i fält utförs genom en indirekt mätning av vågutbredningshastigheten. Ur exempelvis skjuvvågshastigheten och jordens densitet kan då jordens skjuvmodul vid små deformationer beräknas. Skjuvvågshastigheten vid större deformationer kan sedan bedömas med hjälp av empiriska relationer för hur modulen varierar med töjningen, beroende på typ av jord.

Metoder för direkt mätning av jords dynamiska egenskaper i fält

I *tabell 7.1* redovisas en sammanfattning av de olika metodernas användningsområden samt deras speciella för- och nackdelar. I det följande beskrivs de olika metoderna mer detaljerat.

Refraktions- och reflektionsseismik

Ett vanligt sätt att mäta jordens dynamiska egenskaper är att mäta gångtiden för vibrationsvågor genom refraktions- och reflektionsseismik. I detta fall utnyttjar man det förhållandet att vibrationsvågor bryts och reflekteras vid övergången från lösare till fastare material, respektive vid övergångar mellan material med olika fasthet. Inför mätningen placeras en rad med geofoner på ett visst avstånd ifrån varandra på markytan. Vibrationsvågor skapas sedan i jorden med en lämplig vibrationskälla.



Figur 7.2
Styrning av
vibreringsutrustning.
Massarch (1992)

Tabell 7.1
Olika metoder för direkt mätning av jords dynamiska egenskaper i fält, med för- och nackdelar.

Metod	Användning	Begränsning	Fördel	Nackdel
Refraktionsseismik	Översiktlig bestämning av hastigheter och lagertjocklekar.	Kan endast användas i profiler med kontinuerligt ökande fasthet mot djupet.	Väl beprövad. God yttäckning. Relativt god bestämning av geometrier.	Begränsad användning. Begränsad noggrannhet i icke homogena jordar.
Reflektionsseismik	Översiktlig bestämning av våghastigheter och lagertjocklekar	Starkt begränsad effektivitet vid begränsade jorddjup (≤ 20 m)	Relativt väl beprövad, men hittills begränsat i Sverige. God yttäckning. Kan användas vid alla jordlagerföljder. Bra på stora djup.	Kräver stora resurser. Bör kompletteras med sonderingar för noggrannare bestämning av stratigrafi. Fungerar dåligt på fyllnads-massor
Ytvågsseismik	Översiktlig bestämning av våghastigheter och lagertjocklekar	Begränsad djupnedträngning	Relativt god yttäckning. Kan användas vid alla jordlagerföljder	Relativt obeprövad. Under utveckling. Ger bulkvärden.
Nedhålsseismik och upphålsseismik	Bestämning av våghastigheter och deras variation med djupet.	Mätning i en borrhålspunkt.	Väl beprövad. Relativt enkel.	Värden erhålls endast i en punkt. Möjlig störning på grund av håltagning. Bör kompletteras med sonderingar för noggrannare bestämning av stratigrafi.
Seismisk CPT-sondering	Bestämning av våghastigheter och deras variation med djupet samt jordprofil	Mätning i en borrhålspunkt. Begränsad till jordprofiler där CPT-sonden kan drivas ned.	Väl beprövad. Enkel och rationell. Kompletterande bestämning av jordprofilen erhålls.	Värden erhålls endast i en punkt. Möjlig störning på grund av neddrivning.
Mellanhålsseismik	Bestämning av våghastigheter och deras variation med djupet.	Mätning i begränsad jordvolym	Väl beprövad. Relativt omständlig och kostsam. Anses ge säkrast resultat.	Värden erhålls endast mellan två närliggande punkter. Bör kompletteras med sonderingar för noggrannare bestämning av stratigrafi.

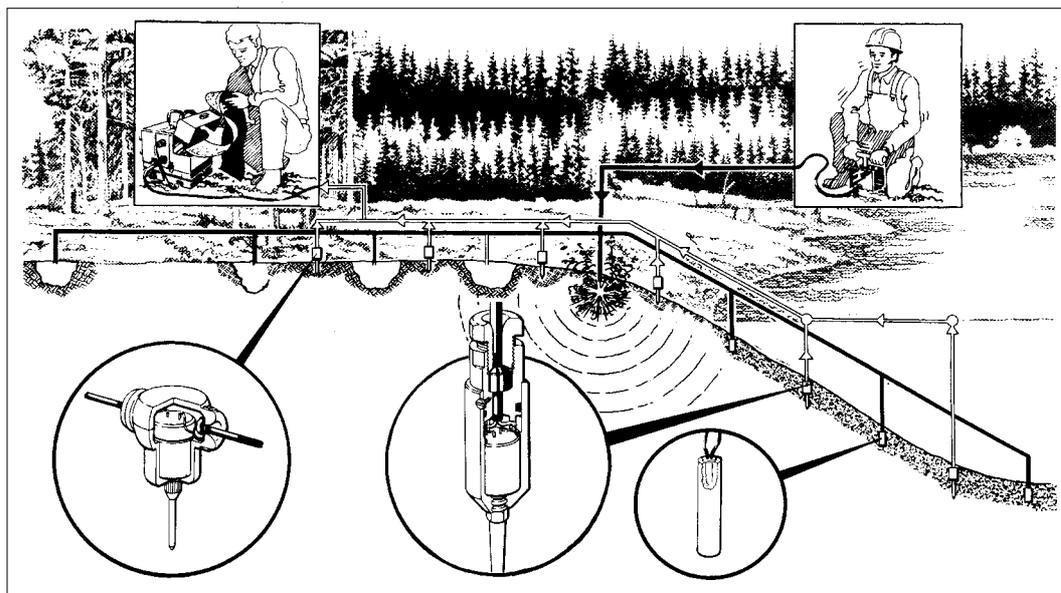
Sprängning är vanlig vid undersökningar över stora ytor, men vid mindre avstånd kan andra källor som slag och stötar bli aktuella, *Figur 7.3*.

Vibrationskällans placering ändras successivt i förhållande till geofonerna och genom att mäta ankomsttiden för de olika reflekterade vågorna kan man erhålla en god bild av vågornas utbredningshastigheter i de olika lagren, lagertjocklekarna och deras variation längs mätprofilen. Undersökningarnas kvalitet förbättras om de kompletteras med vanliga geotekniska sonderingar för bestämning av lagerindelning och lagertjocklekar och mätning av vågutbredningshastigheten i specifika jordlager med nedhåls- eller mellanhålsseismik.

Fördelen med refraktions- och reflektionsseismik är att dessa metoder ger en översiktlig bild av relativt stora ytor och som komplement till andra mer detaljerade punktundersökningar. Giltigheten av de senare för olika partier av det aktuella området kan då bedömas bättre. Utrustningen och uppställningen för refraktions- respektive reflektionsseismik är i princip densamma. Det är främst utvärderingen som skiljer. Båda metoderna är väl beprövade, men är ändå under kontinuerlig utveckling. Refraktionsseismiken är enklast, men fungerar endast i jordlagerföljder där fastheten hela tiden ökar mot djupet. Reflektionsseismiken fungerar också då fastare lager överlagras lösare. Metoden fordrar dock mer tid och resurser per längdenhet och har hittills visat relativt dålig effektivitet vid jorddjup av cirka 20 m eller mindre.

Refraktions- och reflektionsseismik ger en översiktlig bild av relativt stora ytor

Figur 7.3
Instrumentplacering
vid refraktions- och
reflektionsseismik.
IVA (1979)



*Ytvågsseis-
miken är un-
der stark
utveckling*

Ytvågsseismik

Ytvågsseismiken – eller SASW-mätningar använder sig av det förhållandet att det jorddjup som involveras i ytvågsrörelsen (Raleighvågen) ökar med ökande våglängd hos vågrörelsen. Påverkningsdjupet är ca en våglängd. Genom att mäta hur utbredningshastigheten hos ytvågen varierar med frekvensen kan man studera hur utbredningshastigheten varierar med djupet. Metoden blir därmed effektiv vid måttliga jorddjup, utan att ha refraktionsmätningens begränsning att fastheten måste öka mot djupet.

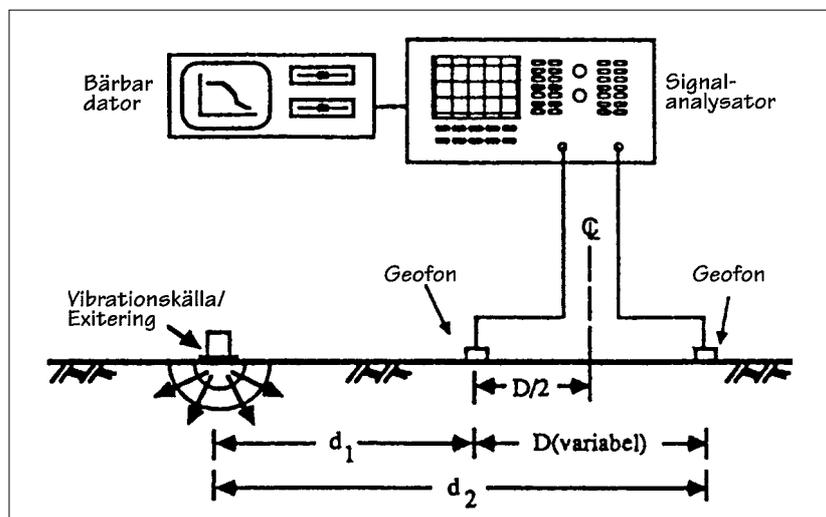
Mätningen går till så att minst två geofoner placeras på markytan med ett visst avstånd från vibrationskällan. De kan placeras med en gemensam mittpunkt, varvid geofonerna placeras på lika avstånd på ömse sidor om en bestämd punkt. Vibrationskällan placeras sedan i linje med och utanför geofonraden på ett avstånd från den närmaste mätaren som är lika med det inbördes avståndet mellan geofo-

nerna. Vid mätningarna flyttas sedan vibrationskällan till ömse sidor om geofonraden och avstånden mellan geofonerna ökas successivt. Vid mätning med en fast placerad vibrationskälla står denna kvar på samma plats och geofonerna flyttas successivt utåt från denna punkt, med ett gemensamt avstånd mellan geofoner och vibrationskälla och närmaste mätpunkt, *Figur 7.4*.

Vibrationskällan kan vara av olika slag. Man kan använda sig av reglerbara vibratorer som ger ”rena” vibrationer med endast den inställda frekvensen. Olika former av generatorer som ger ett spektrum av olika vibrationer, slag från en slägga eller stötar från en fallvikt kan också användas. Också de senare ger ett spektrum av vibrationsfrekvenser som sedan kan separeras och analyseras separat.

Ytvågsseismiken är en relativt ny metod och är under stark utveckling.

Figur 7.4
Geofonplacering vid
gemensam mittpunkt
respektive fast place-
rad vibrationskälla.
Svensson (1998)



Ned- och upphålsseismik

Vid *nedhålsseismik* sänks ett mätinstrument med sensorer (geofoner, accelerometrar, etc) ned i ett vertikalt borrhål. Instrumentet fixeras mot borrhållsväggen och en vibration skapas från markytan. Detta görs ofta genom ett slag med en slägga. Släggan startar samtidigt registreringsutrustningen så att gångtiden för skjuvvågen från markytan till dess ankomst till instrumentet kan mätas. Beroende på antalet geofoner i instrumentet kan skjuvvågor i två vinkelräta horisontella riktningar samt eventuellt också kompressionsvågen mätas, *Figur 7.5*.

Mätningen sker på olika nivåer allteftersom mätinstrumentet sänks ned i borrhålet och man får då en kontinuerlig bild av hur vågutbredningshastigheten varierar med djupet. Man kan också sänka ned flera mätinstrument och på så vis direkt mäta skillnaden i ankomsttid för en och samma våg till olika nivåer.

Upphålsseismik är i princip samma mätmetod, men i detta fall befinner sig källan i borrhålet och de altrade vågrörelserna går upp till en eller flera sensorer på markytan.

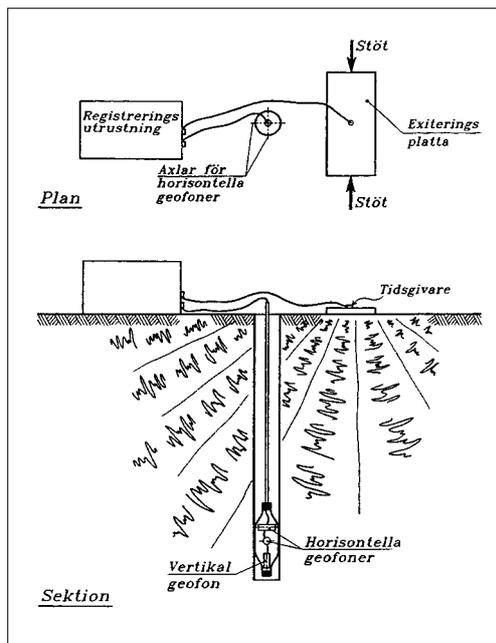
Båda mätmetoderna kan anse väl beprövade. De kräver normalt ett öppet förborrat hål. Utbredningshastigheten i de seismiska vågorna kan i någon mån påverkas av störningseffekter från håltagningen.

Seismisk CPT-sondering

En seismisk CPT-sondering är en CPT-sondering där mätutrustningen i sondspetsen kompletterats med geofoner. Vid sonderingen stoppas neddrivningen på bestämt djup och en mätning med nedhålsseismik utförs på samma sätt som beskrivits ovan.

Fördelarna med den seismiska CPT-sonderingen är att den är mer rationell än traditionell nedhålsseismik eftersom inget förborrat hål behöver tas upp. Man får också samtidigt kompletterande sonderingsresultat, vilka ger en beskrivning av jordens lagerindelning och bättre bedömning av relevansen för de seismiska resultaten och tolkningen av dessa. Till utrustningarna hör också ofta program för utvärdering av resultaten och behovet av specialutbildning för operatören är begränsat.

Metoden är relativt ny, men har ändå provats ut i stor omfattning. Den är begränsad till de jordar i vilka CPT-sonden kan drivas ned. Eventuella nackdelar skulle vara inverkan av störning av jorden i samband med neddrivningen, vilket dock inte konstaterats.

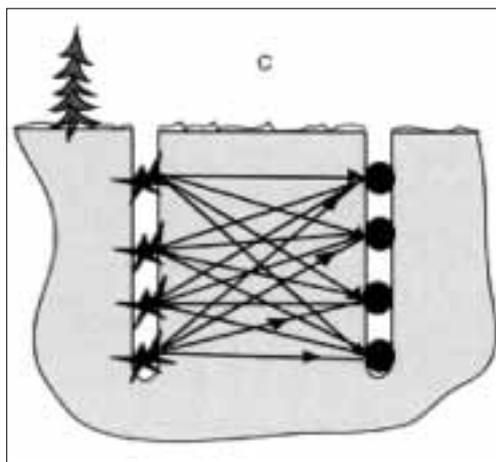


Figur 7.5
Princip för nedhålsseismik.
Bodare (1997)

Mellanhålsseismik ("Cross-hole"mätning)

Mellanhålsseismik utförs genom mätning av gångtiderna för olika vågor mellan två borrhål. I detta fall sänks mätinstrumentet och vibrationskällan ned till samma nivå i var sitt borrhål och fixeras. Tiden för att de av vibrationskällan skapade vågorna skall ankomma till mätinstrumentet i det andra borrhålet mäts, varpå instrument och vibrationskälla sänks ned till nästa nivå och mätningen upprepas. Helst bör tre hål utföras med sensorer i två av dem och excitering i det tredje. Vid mer avancerade mätningar kan mätinstrument och vibrationskällor installeras på flera nivåer och vågornas ankomst till de olika instrumenten för vibrationer skapade på olika nivåer i grannhålet registreras, *Figur 7.6*. Detta kallas seismisk tomografi.

I *Figur 7.6* visas också principiellt vilken jordvolym som mellanhåls-, nedhålsseismik och seismisk tomografi mäter i.



Figur 7.6
Princip för seismisk tomografi.
Triumf (1992)

Jords dynamiska egenskaper kan i många fall uppskattas ur resultaten från vanliga geotekniska undersökningar.

Mellanhålsseismiken kan anses vara en väl beprövad metod. Den är avsevärt dyrare att utföra än ned- eller upphålsseismik, eftersom det normalt behövs minst två förborrade öppna hål. Den ger normalt mer tillförlitligt resultat eftersom vågorna i huvudsak går i mer ostört material. Med mellanhålsseismiken mäts också vågutbredningshastigheten i horisontalled, vilken oftast är av primärt intresse. I vissa jordar kan skillnaden mellan horisontell och vertikal utbredningshastighet vara betydande, cirka 0,5–2 ggr. I skiktade jordar finns dock risken att vågorna letar sig uppåt och/eller nedåt och till stor del går i omgivande fastare skikt och att resultaten i tunnare lösa skikt blir något missvisande.

I likhet med nedhålmätning med seismisk CPT-sondering kan mellanhålmätning utföras genom CPT-sondering. Detta erfordrar dock två kompletta sonderings- och neddrivningsutrustningar, där den ena sonden utrustats med geofoner och den andra med en vibrationskälla. Utrustningarna drivs parallellt med höga krav på kontroll av vertikalitet och stannas på samma nivåer vid mättillfällena.

Indirekt uppskattning av dynamiska egenskaper

Jords dynamiska egenskaper kan i många fall uppskattas ur resultaten från vanliga geotekniska undersökningar, kopplade till empiriska erfarenhetsvärden. Detta gäller främst skjuvmodulen i homogen lera. Denna kan med relativt god noggrannhet uppskattas ur den odränerade skjuvhållfasthet som uppmäts med vingförsök, dilatometerförsök eller CPT-sondering kopplad till jordens flytgräns, som uppmäts i laboratoriet på upptagna prover, se kapitel 8.2.

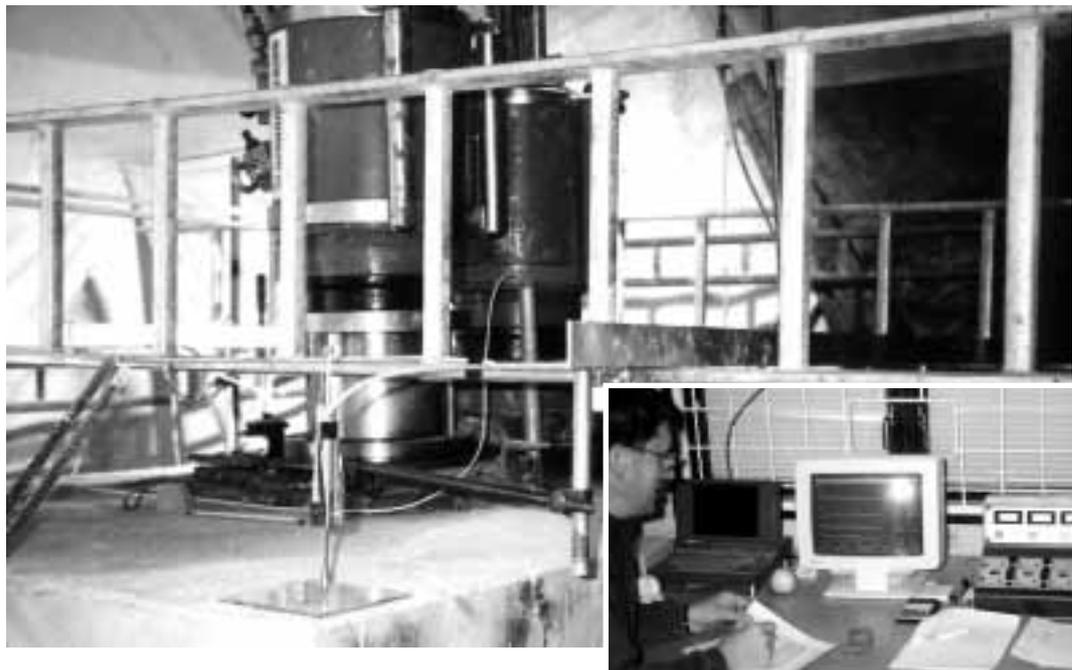
Storskaliga försök och plattbelastningar

Vid planering av större pålnings- eller sprängningsarbeten i närheten av vibrationskänsliga konstruktioner eller vibrationskänslig mark, kan det ofta vara lämpligt att utföra provpålning respektive provsprängning. Den vibrationskänsliga konstruktionen och/eller marken instrumenteras då med geofoner/accelerometrar, som beskrivits ovan, varpå provningen startar. Denna bör inledningsvis utföras försiktigt så att inte åsatta gränsvärden överskrids. Intensiteten i pålnings- och sprängningsarbetena kan sedan ökas under kontrollerade förhållanden. Resultaten från mätningarna används direkt för planeringen av det fortsatta arbetet.

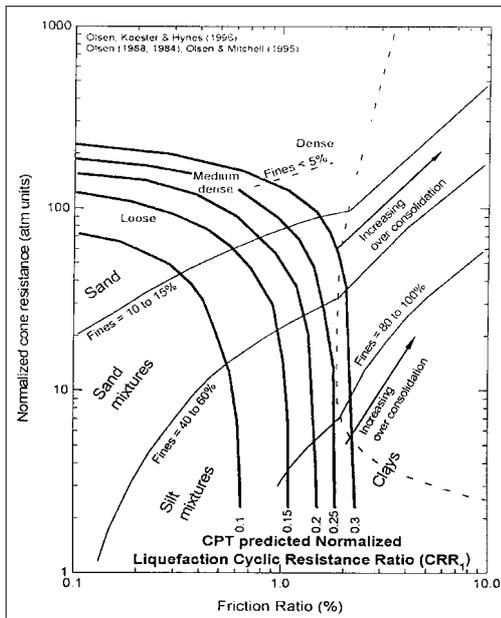
Plattbelastningar med dynamisk belastning i full skala kan bli aktuella vid projektering av fundament i jord (eller berg), där det är mycket svårt att ta ostörda prover och utföra laboratorieförsök. Ett exempel på detta är de dynamiska plattförsök som utfördes på sedimentärt kalkberg inför grundläggningen av Öresundsbron, se *Figur 7.7*.

Risk för flytjordsfenomen

Risken för flytjordsfenomen i samband med vibrationer, och då främst i samband med jordbävningar, uppskattas normalt med hjälp av empiriska relationer baserade på sonderingsresultat. Många av dessa har varit baserade på SPT-sondering, som normalt inte används i Sverige. Senare utvärderade relationer är dock baserade på CPT-sondering. I *Figur 7.8* visas ett diagram baserat på CPT-metoden.



Figur 7.7
Storskalig cyklisk
provbastning av
kalkberg.



7.4 Laboratoriemetoder

Allmänt

Bestämning av jords dynamiska parametrar i laboriemiljö görs främst för speciella ändamål, som t.ex. offshorekonstruktioner. Försöken kräver ostörda prover av hög kvalitet. Eftersom de dynamiska parametrarna främst mäts vid mycket små deformationer kan ett upptaget prov ge missvisande resultat om dess struktur inte kunnat bibehållas. Vissa egenskaper går dock inte att undersöka i fält, t.ex. försök med gradvis nedbrytning av jordens struktur, för att utvärdera begränsningar i belastningscyklernas storlek eller varaktighet då deformationer och/eller portryck ökar för mycket. På laboratoriet kan man även mäta parametrar som skjuvmodul, skjuvstångshastighet och jordens dämpningsfaktor samt hur dessa varierar med töjningsnivå och konsolideringstillstånd. Jordens materialdämpningsfaktor kan inte mätas i fält utan där mäts den samlade dämp-

ningseffekten, avstånds- och materialdämpning.

Metoder för mätning av jords dynamiska egenskaper i laboratorium

I Tabell 7.2 redovisas en sammanfattning av de olika metodernas användningsområden samt deras speciella för- och nackdelar. I det följande beskrivs de olika metoderna mer detaljerat.

Resonant column

Den internationellt mest använda metoden för att mäta jordens dynamiska egenskaper i laboratorium är Resonant Column Test (Resonanspelareförsök). Försöket utförs i en triaxialapparat där ostörda eller packade prover konsolideras för ett visst spänningstillstånd. Provet utsetts därefter för en sinusformad exciteringsvåg, som skapas av elektromagneter kopplade till den stämpel som verkar på provets överdel. Genom oscillerande vridning kring provets axel alstras en skjuvstång i provet. Deformationerna mäts med precisionsinstrument. Frekvensen justeras tills man får resonans i provet, varvid man får en stående våg i provet. Ur försöket kan den dynamiska skjuvmodulen och materialdämpningsfaktorn utvärderas. Metoden är användbar i skjuvtöjningsområdet $10^{-6} - 10^{-4}$. Med speciellt kraftiga utrustningar kan töjningsområdet utsträckas till ca 10^{-3} .

Benderelement

Benderelement är en relativt ny laboriemetod för mätning av skjuvstångshastigheten i jordprover. Benderelement kan monteras i traditionella laboriemetoder, som ödometer, skjuvapparat och främst triaxialapparat. Metoden är enkel och snabb att utföra. Kostnaderna för utrustning och försöksutförande är relativt låga.

Figur 7.8
Utvärdering av liquefaktionskänslighet hos jord från CPT-resultat.
Efter Olsen & Koester (1995)

Metod	Användning	Begränsning	Fördel	Nackdel
Resonant column	Bestämning av våghastighet och modul samt materialdämpning.	Begränsat deformationsområde.	Väl beprövad.	Dyrt och begränsat resultat.
Bender element	Bestämning av skjuvstångshastigheten och skjuvmodul	Begränsat deformationsområde Endast skjuvmodul.	Relativt väl beprövad. Relativt billig, ickeförförande metod.	Begränsat resultat.
Cykliska triaxialförsök	Bestämning av skjuvmodul, materialdämpning och nedbrytnings-effekter.	Frekvens och mätnoggrannhet begränsas av den aktuella utrustningen.	Flexibel.	Dyrt och komplicerat.

Tabell 7.2
Laboriemetoder för mätning av jords dynamiska egenskaper, med för- och nackdelar.

och ett nytt försök utförs med samma antal cykler och samma frekvens. Man kan sedan successivt öka lasten för varje steg tills en tydlig nedbrytning av provet sker. Detta ger ett besked om den belastningsgräns vid vilken nedbrytning sker av den aktuella jorden. Ett exempel visas i *figur 7.12*.

På motsvarande sätt som för cykliska triaxialförsök kan man utföra försöken i en direkt skjuvapparat som kompletterats med en anordning för cyklisk skjuvbelastning.

7.5 Mer att läsa

Andréasson, B. (1979). Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays under Dynamic Loading Conditions, Doktorsavhandling, Inst. för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Bodare, A. (1997). Kompendium i jord- och bergdynamik. Kungl. tekniska högskolan, Stockholm.

Dyvik, R., Madshus, C. (1985). Laboratory measurements of G_{max} using bender elements. ASCE, Detroit Convention. Pp 186-196.

Hansbo, S. (1981). Grundläggning av byggnader och maskinfundament. Chalmers Tekniska Högskola.

Holmberg, R. mfl (1982). Vibrationer i samband med trafik- och byggverksamhet. Byggeforskningsrådet T43:1982.

Jord- och bergdynamik. Information från IVA:s kommitté för vibrationsfrågor, IVA Meddelande 225, 1979.

Massarch, K. R. (1992). Static and Dynamic Soil Displacements caused by Pile Driving. Keynote Lecture, Fourth International Conference on Stress-Wave Theory to Piles. Haag 1992.

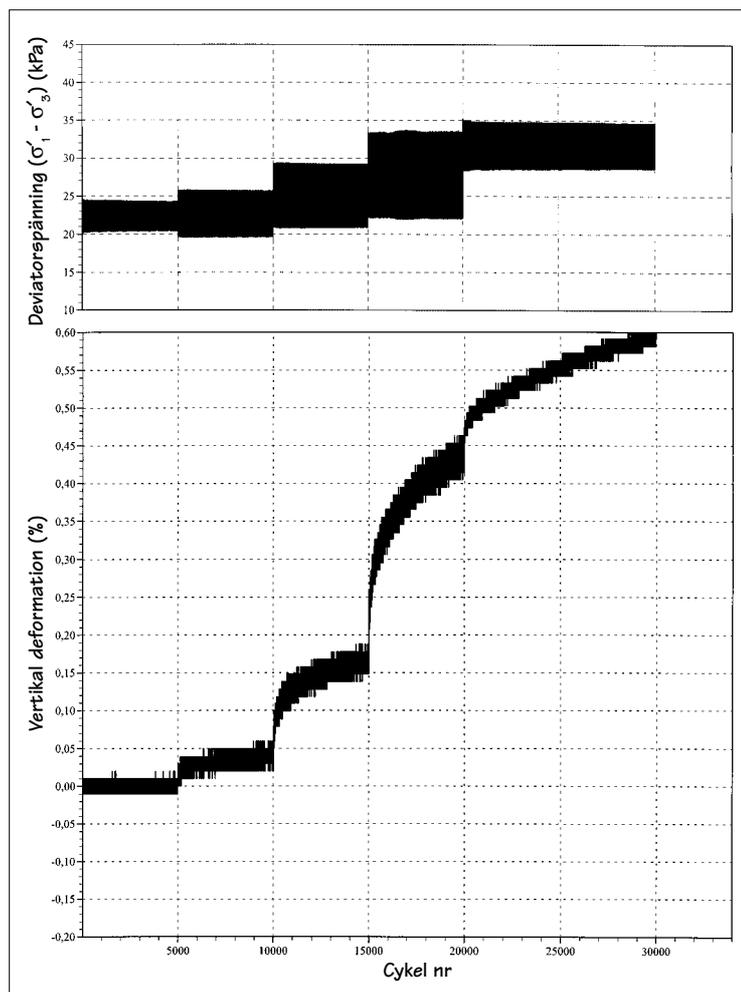
Olsen, RS. & Koester, JP. (1995). Prediction of liquefaction resistance using the CPT. Inst. Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95, Oct. 1995. Proceedings, vol 2. Swedish Geotechnical Society. SGF Report 3:95.



Figur 7.11
Triaxialutrustning för cykliska försök.

Svensson, M. (1998). Modern methods for determination of shear modulus. Geoteknikavdelningen Lunds tekniska högskola.

Triumpf, C-A. (1992). Geofysik för geotekniker, metoder och tillämpningar. Byggeforskningsrådet T31:1992.



Figur 7.12
Exempel på nedbrytning vid dynamiska belastningar i ett triaxialförsök.

8. Utvärdering och modellering

8.1 Allmänt

De jordegenskaper som behövs vid geodynamisk problemlösning är oftast vågutbredningshastighet och inre dämpning. Om den påförda lasten är liten behövs normalt endast dessa egenskaper eftersom förhållandena är "elastiska", dvs endast små töjningar uppstår. Vid större lastnivåer behövs även kunskap om inverkan av töjningens storlek på vågutbredningshastigheten och inre dämpningen.

Den geodynamiska egenskap som är enklast att mäta är vågutbredningshastigheten. Normalt mäts skjuvvågshastigheten eller ytvågshastigheten, i några fall också kompressionsvågens utbredningshastighet. Enligt ovan finns ett flertal möjligheter vad gäller metod att mäta vågutbredningshastighet.

Under åren har man samlat in resultat från mätningar och försökt dra generella slutsatser från dessa. Med stöd av geotekniska basdata har man också försökt skapa geotekniska modeller som ger en förklaring till inverkan av faktorer och vilka av dessa faktorer som är styrande för egenskaperna.

För jordmaterial har empiriska samband på detta vis etablerats mellan geotekniska basdata och geodynamiska egenskaper som initiell skjuvmodul och initiell inre dämpning samt inverkan av töjning på skjuvmodul och inre dämpning.

Det är viktigt att utnyttja de empiriska sambanden för att göra en grov bedömning av storleksordningen på aktuell materialegenskap. Mätningar man kan genomföra i ett pågående projekt är normalt mycket begränsade och man kan uppnå tekniska fördelar om man kan sammanföra mätningarna med resultat från beräkningar ur empiriska relationer. Dessa jämförelser kan då ge stöd för att mätningarna ger rimlig storlek på egenskapen och även ge stöd för utökade mätningar om det är stora avvikelser mellan de verkliga mätningarna och resultaten från de empiriska beräkningarna.

I det följande presenteras en sammanfattning av empiriska samband för friktionsjord och kohesionsjord.

8.2 Skjuvmodul vid små töjningar

Den tekniska storhet som mäts är vågutbredningshastighet (t. ex. skjuvvågshastighet) men normalt redovisas mätningen i form av skjuvmodul. För jord brukar man mäta utbredningshastigheten hos skjuvvågen, ytvågen eller kompressionsvågen. För den initiala skjuvmodulen (små töjningars skjuvmodul) finns följande empiriska samband:

Friktionsjord

För ett granulärt material är deformationsmodulen en funktion av materialets packningsgrad och rådande spänningssituation. Detta innebär för friktionsjord empiriska relationer med packningsgrad beskriven som portal (e) och effektivspänningsnivå i form av den isotropiska medelspänningen, $\sigma'_0 = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3$. Dessa samband gäller för olika typer av friktionsmaterial där de ingående egenskaperna hos kornen (mineralsammansättning, kornstorleksfördelning och kornens ytjämnhet) inverkar.

Den empiriska relationen uttrycks på följande sätt:

$$G_o = \frac{a_1 \cdot (a_2 - e)^2}{(1 + e)} \cdot (\sigma'_0)^{a_3}$$

där a_1 , a_2 , och a_3 är konstanter, e är portalet och σ'_0 är den effektiva isotropa medelspänningen i kPa.

Exempel på dessa empiriska relationer finns sammanfattade i Bodare (1997), se *Tabell 8.1*.

Det finns också ett flertal olika modeller med inverkan av både den isotropiska spänningen och den deviatoriska (skjuvspänning) spänningen. Dessa modeller är vanliga vid beskrivning av obunda friktionsmaterial, se t.ex. Lade och Nelson (1987) och Lade (1988).

Vågutbredningshastighet och inre dämpning är de jordegenskaper som oftast behövs vid geodynamisk problemlösning.

Tabell 8.1 Empiri för bedömning av skjuvmodul i friktionsjord (Bodare, 1997).

Typ av friktionsjord	a_1	a_2	a_3
Sand	16600	2,17	0,4
Grovkorniga material	7230	2,97	0,38
Krossat berg	13000	2,17	0,55
Rundkornigt grus	8400	2,17	0,6

Kohesionsjord

För kohesionsjord finns empiriska samband motsvarande de som ovan givits för friktionsjord, men då normalt hänsyn tagen till överkonsolideringsgrad.

Hardin och Black (1968) föreslår för lågplastiska eller styva leror

$$G_o = \frac{3270 \cdot (2,973 - e)^2}{(1 + e)} \cdot \sqrt{\sigma'_0}$$

När det gäller lera kan de empiriska sambanden även vara baserade på packnings- eller konsolideringsgrad representerad av odränerad skjuvhållfasthet (som i sin tur är en funktion av förkonsolideringstryck och spänningsnivå i form av överkonsolideringsgrad) samt typ av jord i form av antingen flytgräns (svenskt sätt) eller plasticitetstal (internationellt sätt).

De empiriska sambanden har tolkats (utvärderats) ur ett relativt stort antal mätningar utförda under en relativt lång tid (ca 30 år). I Sverige har genomförts undersökningar (se t. ex. Andréasson (1979), Larsson och Mulabdic (1991)) som ger mer eller mindre stöd för de tidigare föreslagna empiriska relationerna. Resultaten av mätningarna har dock inneburit vissa korrekationer av relationerna, beroende på de svenska jordförhållandena med mycket lösa jordar som man normalt inte träffar på i andra delar av världen, t.ex. gyttja och lös högplastisk lera.

För alla typer av lösa och medelfasta kohesionsjordar gäller

$$G_o \approx 504 \cdot \frac{\tau_{fu}}{\omega_L}$$

Marginellt bättre samband kan erhållas ur

$$G_o \approx \left(\frac{208}{I_p} + 250 \right) \cdot \tau_{fu}$$

eller

$$G_o = \left(\frac{72}{I_p} \right) \cdot \tau_{fu} \cdot \ln \left(\frac{\tau_{fu}}{G_o \cdot 1,5 \cdot 10^{-5}} \right)$$

för hög- och medelplastiska leror (Larsson och Mulabdic (1991)). Detta gäller för normalkonsoliderad lera och med stöd av Andersen et al (1988) behövs en korrektion för överkonsoliderad lera

$$G_{o(OC)} = \mu G_{o(NC)}$$

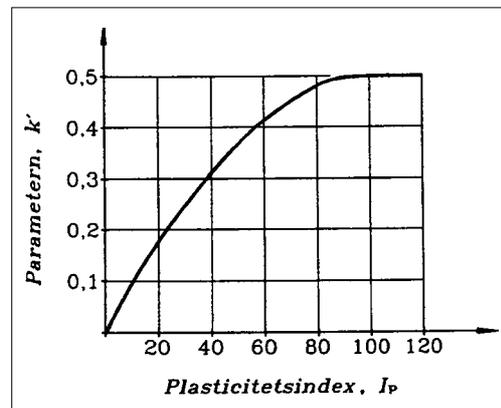
$$\mu = (1 - 0,4 \cdot \log(OCR)) \geq 0,4$$

För lågplastiska leror och för leriga gyttjor har Hardins (1978) samband befunnits stämma väl (Larsson och Mulabdic (1991))

$$G_o = 625 \cdot OCR^{k'} \cdot (\sigma' \cdot p_a)^{0,5} / (0,3 + 0,7 \cdot e^2)$$

I ovanstående formler är

- τ_{fu} = den korrigerade odränerade skjuvhållfastheten bestämd med vingförsök
- ω_L = flytgränsen
- I_p = plasticitetsindex
- OCR = överkonsolideringsgraden
- k' = en empirisk faktor beroende av plasticitetsindex enligt figur 8.1
- p_a = atmosfärstrycket (100 kPa)
- e = portalet.



Figur 8.1 Faktorn k' som funktion av plasticitetstalet.
Efter Hardin (1968) och Bodare (1997)

Utbredningshastigheten hos de övriga vågtyperna brukar uppskattas med stöd av skjuvstångens utbredningshastighet och antaget tvärkontraktionstal. När det gäller kompressionsstångens utbredningshastighet måste man i jord ta hänsyn till vattenmättnadsgrad. För en helt vattenmättad jord kommer kompressionsstångens utbredningshastighet att i stort sett motsvara kompressionsstångens utbredningshastighet i vatten.

8.3 Inre dämpning

För bedömning av den inre dämpningens storlek i materialet måste man genomföra specialundersökningar, som normalt inte är motiverade i ett ordinärt projekt. Med stöd av befintlig empiri kan man oftast få ett tillräckligt gott underlag för bedömning av den inre dämpningens storlek. Inverkan av inre dämpning är normalt relativt ringa i de flesta problemställningar inom geodynamiken.

Den inre dämpningen är på samma sätt som skjuvmodulen en funktion av töjningens (skjuvdeformationens) storlek. Vid små töjningar är den för de flesta jordar av storleken 0,02 – 0,06 och ökar sedan med töjningens (skjuvdeformationens) storlek. För lera är den av storleken 0,02–0,03 vid små töjningar (skjuvdeformationer).

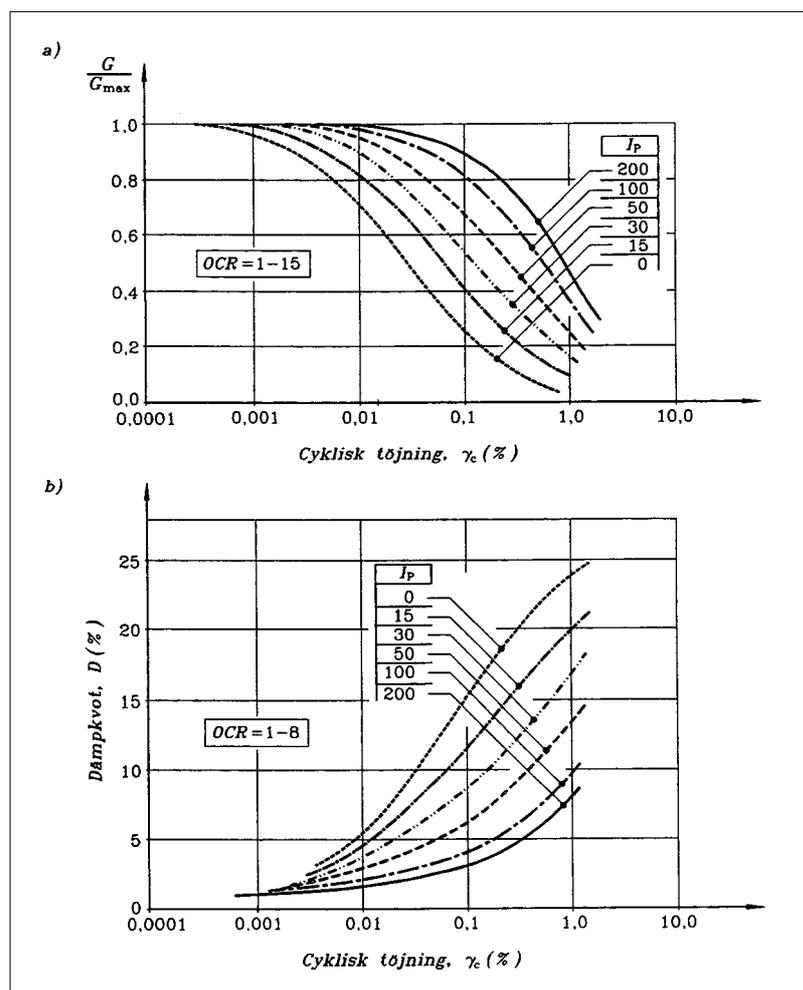
8.4 Inverkan av töjningens storlek

I vissa tillämpningar kommer effekten (spänningsändringen) av påförd last att innebära att man får ”stora” deformationer i jorden. Det är

då nödvändigt att ta hänsyn till töjningens (skjuvdeformationens) storlek vid bedömning av deformationsmodul (vågutbredningshastighet) och dämpning. Om man skall bestämma dessa egenskaper i laboratoriet eller fält kommer detta att kräva en hel del specialundersökningar/provningar. Normalt brukar man därför utnyttja empiriska erfarenheter för att uppskatta dessa egenskaper. Eventuellt genomförs enstaka provningar (se kapitel 7) för att dokumentera att man har rätt storleksordning på aktuell egenskap.

Normalt brukar man utnyttja töjningens (skjuvdeformationens) storlek samt något mått för jordarten för att skatta egenskapen. För lera brukar flytgräns eller plasticitetstal utnyttjas.

I *Figur 8.2a* och *8.2b* redovisas för lera inverkan av skjuvdeformationen på skjuvmodulen (OCR 1–15) och inre dämpningen (OCR 1–8) enligt Vucetic och Dobry (1990), se Bodare (1997). Plasticitetsindex I_p har som synes mycket stor inverkan på effekten av skjuvdeformationens storlek på såväl skjuvmodulen som för den inre dämpningens storlek.



Figur 8.2
a) Inverkan av skjuvdeformation för bedömning av skjuvmodul för lera.
b) Inverkan av skjuvdeformation för bedömning av dämpning i lera.
Vucetic & Dobry (1990) och Bodare (1997)

8.5 Inverkan av cyklisk last på skjuvhållfasthet

Vid i stort sett alla geodynamiska tillämpningar kommer vissa lastsituationer att innebära en upprepning under ett antal lastcykler. För en hastig lastcykel kommer normalt förmågan att ta upp last vara större än om lasten vore en långsam rent statisk last. Denna egenskap brukar benämnas inverkan av lastens varaktighet. En upprepad belastning (cyklisk last) innebär att förmågan att ta upp last avtar och den kan i vissa situationer bli lägre än för en långsam rent statisk last. Denna inverkan av upprepad belastning brukar anges som en degradering av hållfastheten.

I laboratoriet finns möjlighet att genomföra provningar som studerar ovanstående egenskaper. Med stöd av genomförda provningar i laboratoriet och genomförda mätningar i fält har det även här för speciella jordar upprättats empiriska samband för att bedöma inverkan av den speciella lastsituationen. För t.ex. lastfallet inverkan av våglaster på oljeplattformar på lera har NGI upprättat modeller för både bedömning av inverkan på stabilitet och sättning, se t. ex Andersen et al (1234). För fallet tåglast finns redovisat en metodik hos Banverket (2000).

8.6 Seismik – lagerföljd

Med stöd av resultatet från de seismiska undersökningarna kan man genomföra en indelning av jordprofilen i karakteristiska lager. Genomförs de seismiska undersökningarna på olika sätt finns möjlighet till att antingen utvärdera endast en vertikal modell, eller i några fall även en såväl vertikal som horisontell modell. Viktigt att komma ihåg är att man vid seismiska metoder egentligen har en gestaltande mätning, dvs i huvudsak geometri orsakad av skillnader i vågutbredningshastighet. Under antagandet av konstant vågutbredningshastighet i enskilda lager kan man genomföra en utvärdering av en geometrisk modell över jordlagerföljden. Om man sammanför resultaten från den seismiska mätningen med resultat från andra geotekniska borrhningar, kan man få en god bild över jordlagerföljden, både vad gäller geometri och vågutbredningshastighet. Observera att det normalt är mycket svårt att ta hänsyn till att vågutbredningshastigheten är olika i olika riktningar. Med utgångspunkt från andra provningar av jordmaterial kan förväntas att vågutbredningshastigheten i jord är anisotrop.

8.7 Modellering

Vid geotekniska problemställningar är det viktigt att man har en så bra modell av verkligheten som möjligt. Analysen kan då omfatta antingen värdering av en befintlig konstruktions beteende eller värdering av inverkan av åtgärder. Modellens detaljeringsgrad skall vara så bra att man får en möjlighet att med god noggrannhet prognostisera beteende för aktuell konstruktion. Det är viktigt att skilja på modeller som är avsedda att endast utgöra underlag för val av olika alternativ, respektive de som används för att noggrannare värdera ett tänkt utförande. Olika detaljeringsgrad behövs också i olika skeden av en utredning. Detta kan innebära att man vill ha enkla modeller för att sortera bort vissa alternativ och att man för valt alternativ vill genomföra en mer noggrann analys.

Det är också viktigt att komma ihåg samspillet mellan design och utförande. I vissa fall kan det röra sig om konstruktioner som man tidigare har begränsad erfarenhet av och då vill man genomföra en större insats för att följa upp aktuell konstruktion. Detta är normalt fallet för konstruktioner som tillhör geoteknisk klass 3 (GK3). Om man i detta fall får möjlighet att genomföra en mer omfattande beräkning av tänkbart beteende vid utförandet kan man få kunskap om verktygens möjlighet att prognostisera samt förstå konstruktionens verkningssätt bättre. Kunskapsåterföring i detta fall kan innebära stöd för eller revidering av designmetoder.

Idag finns hjälpmedel som möjliggör beräkningar för konstruktioner både i två- och tredimensionella modeller. I de geodynamiska frågeställningarna behövs oftast 3D-modeller för att förstå hela systemets verkningssätt. Detta gäller exempelvis vid hantering/analys av lågexciterade vibrationer. Dagens kraftfulla datorer innebär att man kan genomföra beräkningar för mycket stora komplexa system under relativt kort tid.

Det är dock viktigt att man kan sammanföra möjligheten att genomföra en beräkning med ett bra geotekniskt underlag för beräkningen. När det gäller de geodynamiska egenskaperna har man i de flesta fall goda möjligheter att få ett gott underlag från mätningar eller empiri vad gäller gånghastighet (våghastighet i mark). När det gäller inre dämpning samt inverkan av töjningens storlek på deformationsmoduler och inre dämpning får man lita till de empiriska erfarenheter som har etablerats genom åren. När det gäller geometri hos lagerföljden får man lita till de möjligheter som sondering, möjligtvis kompletterad med geofysiska metoder, ger.

Ett exempel på tillämpning av modeller kan vara bedömning av risken för stora rörelser i banan och betydande omgivningspåverkningar från tåg i hög hastighet på lös jord. Där kan man etablera en fullständig modell som omfattar tåg, räls, slipers, bank och underliggande jord. En annan modell kan vara att tåglasten appliceras som en rörlig last på banken med känd fördelning längs denna. Denna modell kan sedan användas i en numerisk modell med beräkning av beteende vid olika hastigheter hos tåget, se t.ex. Banverket (1999). Detta är då en modell som med relativt stor detaljeringsgrad motsvarar verkligheten. En annat sätt kan vara att man utnyttjar en fysikalisk modell som innefattar det man principiellt tycker är den fysiska processen. I detta fall en superposition av en statisk last i rörelse samt en böjsvängning av en bank. Nedböjningen för den statiska lasten skulle då ge upphov till böjsvängningen av banken. På grund av masskrafter i bank och underliggande jord kommer böjsvängningen att öka i amplitud med ökande tåghastighet och därmed större masskrafter som följd. Det är då fullt möjligt att utnyttja den förenklade modellen till att få ett grovt mått på hur konstruktionen kommer att uppträda. Om risk finns för betydande böjsvängning av banken bör man övergå till den mer noggranna modellen ovan.

Inom geodynamiken finns exempel på ett flertal förenklade modeller för t.ex. dynamiskt belastade fundament. För dessa modeller kan man i bästa fall finna analytiska lösningar, varvid design kan ske med relativt enkla hjälpmedel. Bodare (1997) redovisar flera analytiska lösningar för olika typer av geodynamiska tillämpningar. Det är en stor praktisk fördel om man kan ta fram analytiska lösningar, även om de är approximativa.

8.8 Mer att läsa

Andersen, K.H., Kleven, A. och Heien, D.

(1988). Cyclic Soil Data for Design of Gravity Structures, Publikation nr 175, Norges Geotekniske Institutt, Oslo.

Andréasson, B. (1979). Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays under Dynamic Loading Conditions, Doktorsavhandling, Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg

Banverket (1999). High Speed Lines on Soft Ground, Measurements and Analyses from the West Coast Line, 2 st pärmar.

Banverket, (2000). Tåglastens inverkan vid stabilitetsanalyser, FoU-projekt vid Banverket HK Bansystem, Slutrapport, Teknisk Rapport BB 00:03, Borlänge.

Bodare, A. (1997). Jord- och bergdynamik, IB1435, Kompendium, Institutionen för anläggning och miljö, Avdelning för jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm

Dobry, R. och Vucetic, M. (1987). Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits, Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, Augusti 13-14, Volym 2, sid 52-87.

Erlingsson, S. (1993). Dynamic Soil Analysis with an Application to Rock Music Induced Vibrations in Ullevi Stadium, Doktorsavhandling, Institutionen för jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm

Hansbo, S. (1981). Grundläggning av byggnader och maskinfundament. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg

Hardin, B. O. och Black, W.L. (1968). Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, Nr SM2, Mars 1968, sid 353-368.

Lade, P. V. (1987). Modelling the elastic behaviour of granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Models in Geomechanics, Vol 11, sid 521-542.

Lade, P. V. (1988). Model and parameters for the elastic behaviour of soils, International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck April 1988, Vol 1, sid 359-363.

Larsson, R. och Mulabdic', M. (1991). Shear Moduli in Scandinavian Clays, Measurement of initial shear modulus with seismic cones, Empirical correlations for the initial shear modulus in clay, Rapport Nr 40, Statens geotekniska institut, Linköping

Massarsch, R.K. (1984). Vibrationer i jord och berg, Handboken Bygg, sid 517-525.

Vucetic, M. och Dobry, R. (1990). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Volym 114, Nr SM2, sid 133-149.

9. Åtgärder

9.1 Allmänt

Vilket problem ska åtgärdas? Utredningar och mätningar kan vara nödvändiga för att med säkerhet få fram vad som är det aktuella problemet. Helst skall man i detta stadium även få fram orsaken till problemet, eller inverkan- de faktorer som har skapat eller har avgörande inverkan på det.

Nästa steg är att identifiera vilka åtgärder som kan förhindra problemet.

Normalt i ett vibrationsproblem har man möjligheten att välja mellan att genomföra åtgärder vid källan, åtgärder mellan källan och störd del eller vid den störda delen.

Frågeställningarna är således: Vad är problemet? Vad kan vi göra? I vilken del skall vi göra ingreppet/åtgärden? Vilken åtgärd är den tekniskt och ekonomiskt mest fördelaktiga?

9.2 Resonans hos konstruktion

Om problemet är källans beteende i form av att egenfrekvensen hos systemet är olämplig i förhållande till den last som läggs på måste man göra åtgärder vid källan för att förändra egenfrekvensen. Åtgärderna kan då vara att förändra styvhet, massa och i några fall dämpning i systemet. Exempel på detta kan vara vibrerande fundament där man kan förändra t.ex. grundläggningssätt eller fundamentets dimensioner, se Weiner (1987).

9.3 Vibrationer i jord

Om problemet är vibrations spridning från en källa, t.ex. tågtrafik, har man normalt möjlighet att påverka flera delar i överföring av vibrationerna från källan till mottagande konstruktion (vibrationsutbredningskedjan). Det är då lämpligt att göra åtgärder så nära källan som möjligt.

Man har då valet att ta fram åtgärder som utnyttjas för att minska källans påverkan (aktivt), förbättra överförande konstruktion eller förbättra aktuell störd (mottagande) konstruktion (passivt). Ibland kan man även använda kombinationer av dessa metoder.

Åtgärder vid källan

Man kan försöka åtgärda källan genom att förändra grundläggningen av konstruktionen

och förändra styvheten hos grundläggningen, t ex genom pålgrundläggning. Därmed minskas vibrationernas nivå vid källan och även deras storlek vid störd konstruktion. Detta brukar betecknas som aktiva åtgärder då de minskar storleken på vibrationerna vid källan.

För vissa konstruktioner finns en liten del överförande jord. Exempel på detta är problem med besvärande stomljud från t.ex. järnvägar i tunnlar och tråg. I detta fall har man i några fall utnyttjat vibrationsisolerande mellanlägg i kontakten mellan spårsystemet (räl/slipers) och omgivande konstruktion. I många fall har spårsystemet (räl/slipers) inte legat i ballasten utan haft direkt kontakt med konstruktionen.

Åtgärder på överförande konstruktion

Den överförande konstruktionen kan förändras för att påverka möjligheterna för vågorna i marken att komma fram till störd konstruktion. Vibrationernas nivå kan minskas genom att göra massan i överföringskonstruktionen större, t.ex. i form av en tryckbank utanför banken i fallet järnväg. Om man dessutom påverkar styvheten hos den överförande konstruktionen kan man ytterligare minska vibrationernas storlek. Styvheten kan ökas genom att t.ex. grundlägga en tryckbank på pålar eller förstärka jorden med kalk/cementpelare. Ingrepp kan under vissa omständigheter också öka störningarna.

Ett annat alternativ är att utföra slitsar mellan källan och mottagande konstruktion. Styva slitsar kan bestå av skärmar av slitsmurar eller halvstyva i form av en skärm med kalk/cementpelare. Mjuka slitsar kan bestå av luftfyllda (luftkudde) slitsar. Det är viktigt att man i båda fallen får avsedda egenskaper hos slitsen, egenskaper och geometri, dvs djup, längd och bredd. Det finns flera exempel där man utnyttjat både styva och mjuka slitsar.

De styva slitsarna innebär att amplituden hos den våg som passerar slitsen kommer att bli klart mindre. Detta innebär också att energiinnehållet i de vågor som passerar slitsen minskar. Slitsen kan få helt olika effekter på den vertikala och horisontella delen av den ingående vågen. Det är relativt enkelt att minska den vertikala komponenten, men för att minska även den horisontella kan det behövas en relativt stor bredd på slitsen, speciellt

Vad är problemet? Vad kan vi göra? Var skall vi göra åtgärden? Vilken åtgärd är den tekniskt och ekonomiskt mest fördelaktiga?

om materialet man valt inte är "helt styvt".

De mjuka slitsarna innebär att man får en reflektion av vågorna så att en mindre del kommer att passera slitsen medan huvuddelen vänder tillbaka åt källan. Det är här viktigt att skärmens djup är tillräcklig för att åtgärda problemet.

Andra metoder är kombinationer av tryckbankar och sponter. Det finns praktikfall där dessa metoder har fungerat bra.

Åtgärder i mottagande konstruktion

Den störda konstruktionen kan åtgärdas genom att avskärma ingående vibrationer eller att förbättra de enskilda delarna i konstruktionen. Normalt är det enklast att försöka avskärma ingående vibrationer. Samma metoder som beskrivits för den överförande kan tillämpas.

Det är viktigt att komma ihåg att olika grundläggningssätt innebär olika överförings- tal, dvs samspel mellan ingående vibration (störning) och den vibration (störning) som uppträder i aktuell konstruktion.

9.4 Mer att läsa

Adolfsson, K. och Andréasson, B. (1992).

Vibrationer från tågtrafik – utbredning och åtgärder. Grundläggningdagen 1992, Svenska Geotekniska Föreningen.

Carlsson, B. och Massarsch, R.K. (1986).

Vibrationer i jord, T16:1986, Byggeforskningsrådet.

Hansbo, S. (1981).

Grundläggning av byggnader och maskinfundament. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Hintze, S., Liedberg, S., Massarsch, R.K.,

Hansson, M. och Elvhammar, H. (1997).

Omgivningspåverkan vid pål- och spontslagning, Pålkommisionen, Rapport 95.

Lindberg, G. (1992).

Vågutbredning i jord – analys och åtgärder. Vibrationer från tågtrafik, TRITA-JOB Rapport 93/9, Jord- och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Tholen, O. (1981).

Åtgärder mot vibrationer alstrade av vägtrafik, UPTEC 8143 R, Teknikum, Uppsala Universitet, Uppsala.

Weiner, D. (1987).

Vibrations-skador inom industrin. Orsaker – bedömningsmetodik – åtgärder, T8:1987, Byggeforskningsrådet.

10. Kontroll

10.1 Allmänt

Kontroll är den sista punkten i den geodynamiska utredningsprocessen. Då geodynamik är ett komplext område är det viktigt att kontrollmätningar utförs för att verifiera att konstruktionen blivit rätt dimensionerad, eller att arbetssättet inte ger mer omgivningspåverkan än vad som bestämts, eller att åtgärder har fått avsedd effekt.

Olika typer av mätningar används beroende på vilka parametrar som skall kontrolleras. Omgivningspåverkan kan kontrolleras mot förutbestämda nivåer, eller gränsvärden på vibrationens storlek. I andra sammanhang kan kontrolleras att dynamiska laster överensstämmer med de antagna lastförutsättningarna. Andra kontroller kan utgöras av mätning av töjningsnivåer, genererade dynamiska jordtryck eller porvattentryck och sättningar. Mätningar kan utföras som dynamiska, dvs antingen amplitud eller hela det dynamiska förloppet registreras med därför avsedd utrustning, eller också mäts den permanenta effekten som t.ex. sättningens utveckling med tiden under en järnvägsbank.

Mätningar av dynamiska storheter är i allmänhet komplicerat och kräver därför personer med erfarenhet från sådana mätningar. En noggrann dokumentation av mätningarna är en nödvändighet för att uppnå kvalitetssäkring av resultaten. Dessutom är det en fördel om den parameter som ska kontrolleras mäts direkt. Om man t.ex. avser att mäta deformation är det bättre att mäta den direkt än att t.ex. mäta accelerationen och utföra en dubbelintegrering av denna för att erhålla deformationen. Ibland är det dock inte möjligt att mäta avsedd parameter direkt och då får en feluppskattning av beräkningen göras.

Utrustning för mätningar skall väljas med omsorg. Givare och registreringsutrustning måste ha ett frekvensområde som gör att resultatet återspeglar verkligheten. Vidare skall utrustningen, inklusive givare, vara kalibrerad enligt de regelverk som finns, och i övrigt så att resultaten blir så bra som möjligt.

Det pågår en stark utveckling inom detta område och man kan i framtiden förvänta sig att olika typer av dynamiska mätningar kommer till större användning i olika projekt.

10.2 Exempel på mätningar

I detta avsnitt ges exempel på mätningar som har utförts i samband med kontroll och uppföljning av vibrationer eller andra parametrar från utredningar där dynamisk påverkan på jord varit aktuell. Exemplet omfattas dels av direkta mätningar av dynamiska förlopp, dels mätningar av den ackumulerade effekten vid t.ex. en slagserie på pålar.

- I samband med en utredning kring järnvägsspårets vertikala rörelse vid övergångskonstruktion mellan bro och tillfartsbank mättes bl. a. deformation i tillfartsbanken när tåget passerade och när det stannade över givareinstallationen i tillfartsbanken. Mätningarna utfördes med *sättningsmätare* av typ ASAT som klarar denna typ av dynamiska förlopp. I *Figur 10.1* visas sättningarna i samband med att ett tågsätt passerade tillfartsbanken. Dessutom mättes brons nedböjning med laserinstrument.

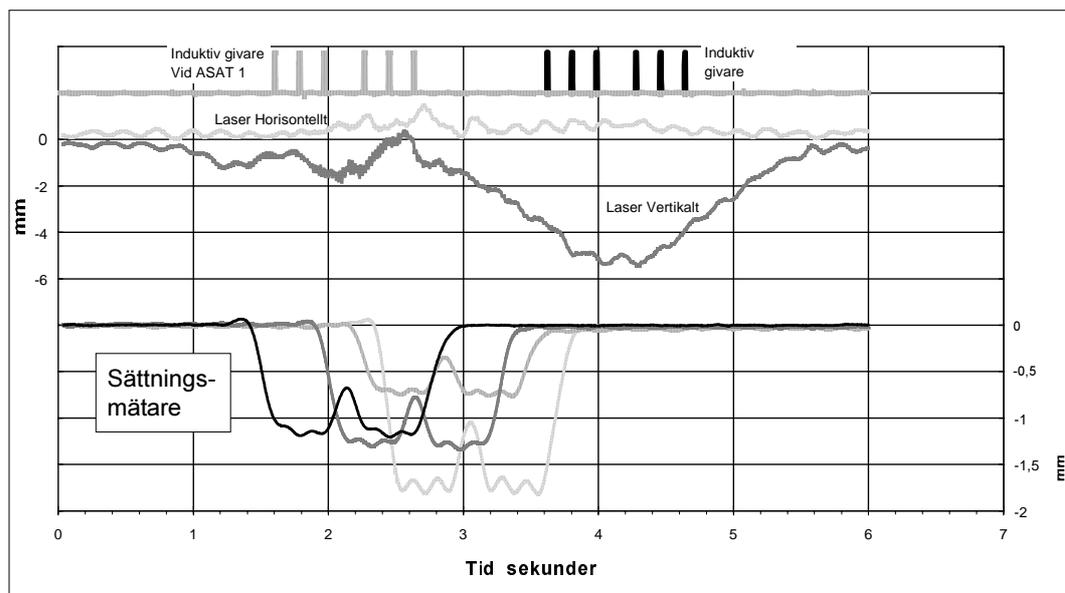
- Mätning av genererat *jordtryck* i underbyggnaden av lös lera utfördes i Alvhem, strax norr om Göteborg. I *Figur 10.2* visas ökningen av vertikalt jordtryck 2,4 m under rälsens underkant, när ett RC-lok passerar. Maximal ökning av jordtrycket är ca 10 kPa. Projektet genomfördes i syfte att undersöka vilka dynamiska tillskottslaster som uppkommer och hur dessa påverkar stabilitetsförutsättningarna.

- Vid pålslagning kan det vara aktuellt att mäta hur *porvattentrycket* genereras vid slagningen och hur det sedan avklingar till ursprunglig nivå. I samband med en utredning om frågeställningen falskt pålstopp mättes portrycksutvecklingen kring en påle under neddrivning. I *Figur 10.3*, visas för några olika nivåer och avstånd från pålspetsen, hur portrycket byggs upp under en slagserie, för att sedan utjämnas. Notera också att denna utveckling sker under pålspetsnivån, men när pålspetsen har passerat mätarna uppstår ingen, eller en negativ, portrycksförändring.

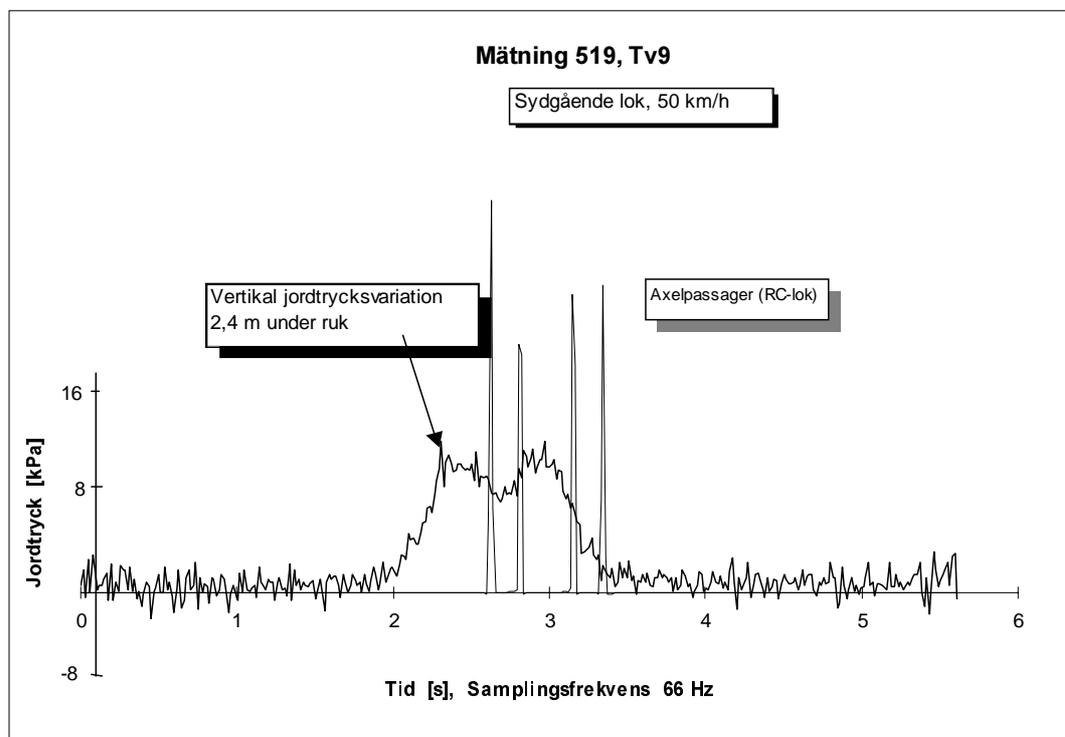
- I samband med kontroll av *omgivningspåverkan* från olika typer av verksamhet mäts ofta vibrationshastigheten med någon typ av geofoner. Emellertid har geofoner vanligtvis en begränsning nedåt i frekvensområdet (~ 5Hz), vilket innebär att när vibrationen befaras innehålla låga frekvenser mäts vibra-

Mätningar av dynamiska storheter är ofta komplicerat och kräver kunskap personlig.

Figur 10.1
Sättningar uppmätta i Utterån vid tågpassage.



Figur 10.2
Genererat jordtryck vid passage av RC-lok. Axelpassagerna mättes i en annan sektion och därför sammanfaller dessa inte med maximalt genererat jordtryck.
Banverket (2000)

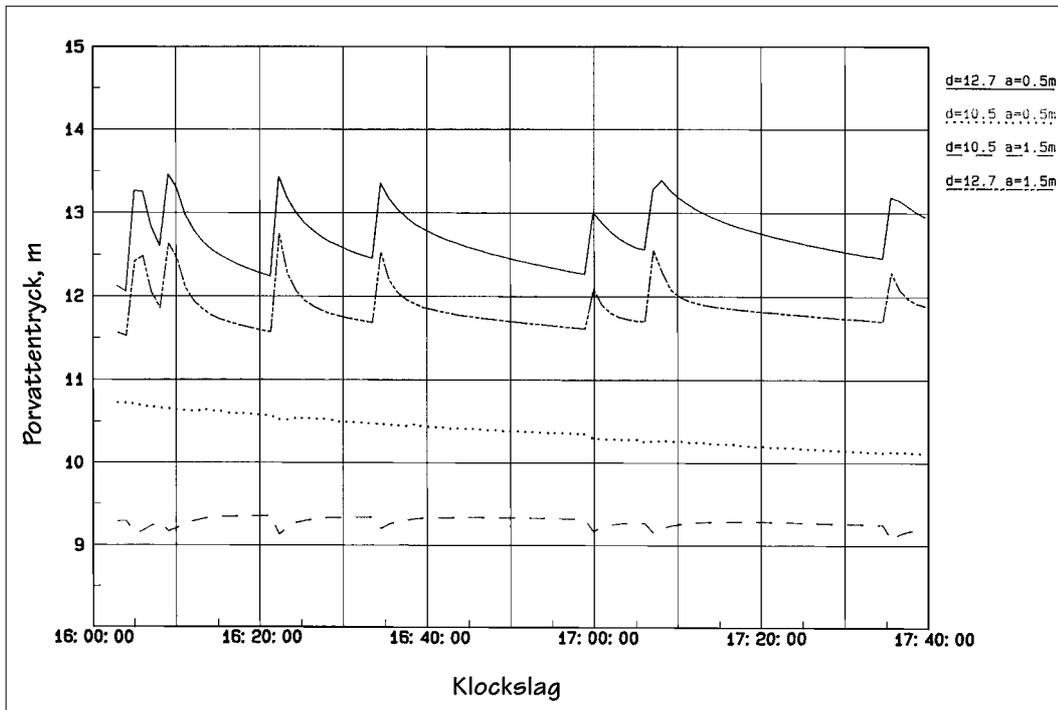


tionen istället med speciella geofoner eller accelerometrar. Genom att integrera accelerationsförloppet en eller två gånger erhålls svängningshastigheten respektive förskjutningen för vibrationen. I *Figur 10.4* visas ett sådant förfarande. Mätningarna är utförda vid Ledsgård i samband med tågtrafik med höga hastigheter.

Förfarandet med integration av en accelerationssignal till svängningshastighet eller förskjutning innebär att alla mätfel summeras en respektive två gånger och därför ställer detta förfarande stora krav på mätningarna och utrustningen. En tumregel är att, om möjligt, alltid försöka mäta det som avses att redovisas!

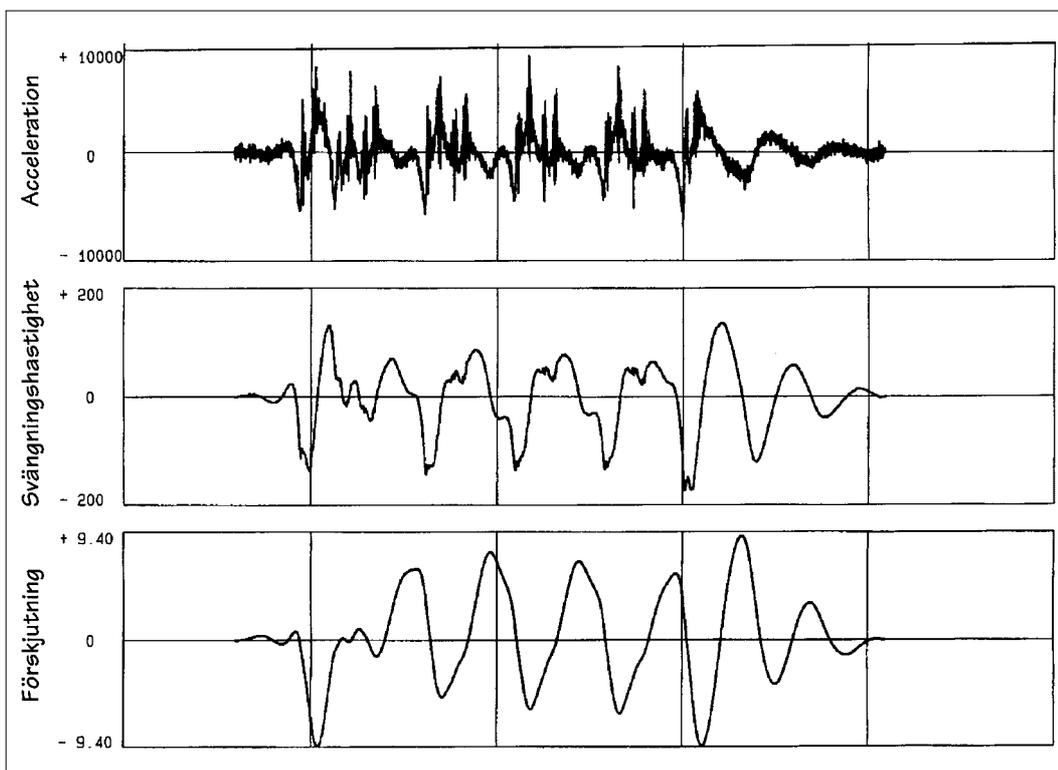
- I *Figur 10.5* visas en sammanställning av *svängningshastigheter* uppmätta med geofoner i ett antal punkter på olika avstånd från en järnväg. Detta förfarande kan användas vid kontroll av omgivningspåverkan i t ex projekteringsskedet och ger information om hur hus och andra konstruktioner påverkas av en vibrerande verksamhet som sprängning, påslagning eller fordons- eller tågpassage.

Ofta är man endast intresserad av det maximala effektivvärdet (RMS-värdet) med tidsvägningen av den vägda accelerations- eller hastighetsnivån. Det finns utrustningar, som endast registrerar sådana värden på en liten inbyggd skrivare. Dessa utrustningar kan också ställas in så att endast värden över en viss



Figur 10.3
Exempel på mätning av porvattentryck under drivning av provpåle. Pålspetsens djup var mellan 11,2 och 11,7 m under markytan.

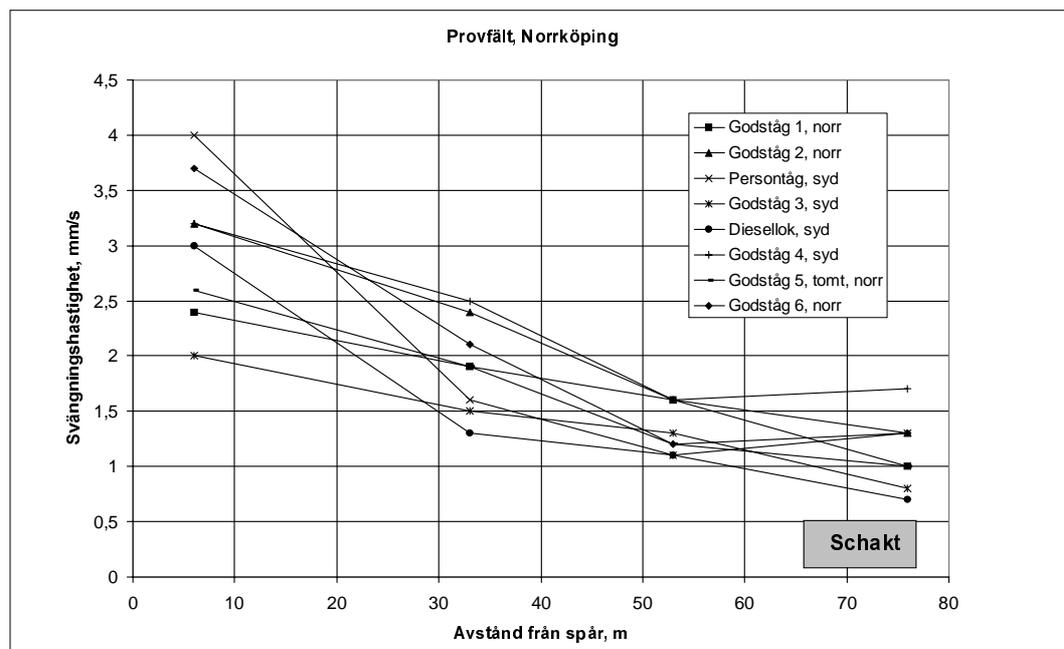
Möller, B. (1991).
 Falskt pålstopp. En jämförelse mellan statisk och dynamisk bärförmåga hos pålar i siltig jord. SGI Varia 342.



Figur 10.4
Exempel på resultat från vibrationsmätning med accelerometrar och framintegrering av svängningshastighet samt förskjutning.

Adolfsson, K. (2000).
 Amplitude and time history versus depth during X2 train passage at 200 km/h. High Speed Lines on Soft Ground. Dynamic Soil-Track Interaction. Ground-Borne Vibrations. Seminar 16-17 March 2000, Gothenburg, Sweden. Banverket.

Figur 10.5
Svängningshastigheter uppmätta med geofoner i ett antal punkter på olika avstånd från en järnväg.



given nivå skrivs ut med tidsangivelse. Utrustningar placeras ut och registrear automatiskt värdena.

10.3 Rapport

Alla typer av mätning måste åtföljas av en rapport, som noggrant beskriver utrustning och mätförfarande. Nedan ges en lista på saker som bör redovisas i tillämpliga delar.

Mätrapporten ska innehålla följande information:

- Mätansvarig och företag
- Beteckning på rapporten, datum
- Beställare

Beskrivning av:

- Uppdrag och eventuellt förekommande klagomål
- Mätpunkter
- Vibrationskällor, dvs tågslag och dess driftförhållanden
- Spårssystem och spårlägen, bankroppens uppbyggnad, korsande vägar
- Topografi och geotekniska/geologiska förhållanden mellan banan och stört objekt, inklusive grundvattenförhållande.
- Byggnadsbeskrivning, grundläggning, konstruktion, bjälklag utformning, skador och belastning samt ålder. Skador av större omfattning skall i tillämpliga delar karteras enligt standarden SS 4604860.
- Mätutrustning
- Eventuella avvikelser
- Resultat
- Kommentarer till mätningarna och resultaten.

11. Regler och standarder

Geodynamiska frågeställningar behandlas i ringa omfattning i de regelverk som finns för byggnadsverksamhet. Det som ny lagstiftning, miljöbalken, däremot tar upp är kravet på miljökonsekvensbeskrivningar, som inom detta område främst behandlar omgivningspåverkan från vibrationsalstrande verksamhet. Vidare finns ett antal svenska standarder som behandlar besiktning, komfortvärdesmätning, beräkning av gränsvärde och mätning vid sprängning och byggverksamhet. Såväl Banverket som Vägverket har också dokument med riktlinjer för miljökonsekvenser med avseende på vibrationer.

I dokument, som beskriver dimensionering med hänsyn till geodynamiska aspekter, anges dynamiska tillskottslaster ofta som en viss del av den statiska lasten. Inom en del områden t.ex. pålning och packning finns ofta tumregler framtagna.

11.1 Svenska standarder

Syneförrättning

Svensk standard SS 460 48 60 ”Vibrationer och stöt, Syneförrättning, Arbetsmetod för besiktning av byggnader och anläggningar i samband med vibrationsalstrande verksamhet” beskriver hur skador skall dokumenteras före, under och efter en vibrationsalstrande verksamhet.

Standarden beskriver förfarandet vid besiktning av byggnader och anläggningar före och efter en vibrationsalstrande aktivitet som t.ex. sprängning, pålning, spontning, schaktning, tjälbearbetning, vibrering, packning och trafik. Standarden är tillämplig vid alla typer av för- och efterbesiktning av byggnader och anläggningar. Syftet är att ge erforderligt underlag för att korrekt kunna bedöma om förändringar (skador) har uppstått under arbetena och i så fall vilken omfattning skadorna har.

Sprängning

Svensk standard SS 460 48 66 ”Vibrationer och stöt, Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader” används för beräkning av riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader.

De beräknade gränsvärdena skall användas vid bestämning av tillåtna vibrationsnivåer, gränsvärden, vid sprängningsarbeten. Gränsvärdena är satta så att skador inte skall uppstå på närliggande byggnader. Standarden gäller alla slags sprängningsarbeten för tunnlar, gruvor och bergtäkter samt grund- och anläggningsarbeten. Däremot tar standarden inte hänsyn till den psykologiska effekt som sprängning kan ha på de som vistas i byggnaderna, eller risk för skador på vibrationskänslig utrustning som datorer, reläer, svepelektronmikroskop, etc. Riktvärdena avser toppvärde av den vertikala svängningshastigheten.

I de fall samband mellan skaderisk och beräknad vibrationsnivå (gränsvärde) eller redovisade värden inte visar sig vara relevanta bör detta förhållande belysas genom utvidgad mätning, t.ex. trekomponentsmätning, mätning uppe i byggnaden och/eller tøjningsmätningar.

Byggverksamhet

Svensk standard SS02 52 11 ”Vibration och stöt - Riktvärden och mätmetod för vibrationer i byggnader orsakade av pålning, spontning, schaktning och packning för bestämning av tillåtna vibrationsnivåer” behandlar beräkning av riktvärden från vibrationsalstrande byggverksamhet.

Standarden gäller för beräkning av riktvärden i byggnader orsakade av pålning, spontning, schaktning och packning. De riktvärden som beräknas utifrån standarden skall användas för bestämning av tillåtna vibrationsamplituder och gränsvärden. Precis som för sprängningsinducerade vibrationer tar dessa riktlinjer inte heller hänsyn till den psykologiska effekt som sprängning kan ha på de som vistas i byggnaderna, eller risk för skador på vibrationskänslig utrustning som datorer, reläer, svepelektronmikroskop, etc. Riktvärdena avser toppvärde av den vertikala svängningshastigheten.

I standarden anges också att en övervakningsmätning skall utföras för att kontrollera att beräknade värden inte överskrids under byggtiden. Vidare anges att en utvidgad mätning bör utföras när det uppkommer skador, trots att beräknade mätvärden inte överskridits

Miljöbalken tar upp kravet på miljökonsekvensbeskrivningar, här främst omgivningspåverkan från vibrationsalstrande verksamhet.

eller om arbetena bedöms bli orimligt dyra att genomföra med beslutade restriktioner.

Komfortmätning

Svensk standard SS 460 48 61 ”Vibrationer och stöt - Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader” ger metoder för mätning av vibrationer och riktvärden för bedömning av komfort i bostäder och kontor.

Standarden tar upp krav på mätinstrument, beskriver mätproceduren och anger hur värdena skall presenteras samt innehållet i en mät-rapport. Dessutom redovisas riktvärden för måttlig störning och sannolik störning, se *Tabell 11.1*. De redovisade värdena är uttryckta som maximala effektivvärden (RMS-värde) med tidsvägning.

Tabell 11.1
Riktvärden för be-dömning av kom-fort i byggnader.

	Hastighet	Acceleration
Måttlig störning	0,4-1,0 mm/s	14,4-36,0 mm/s ²
Sannolik störning	>1mm/s	>36 mm/s ²

Riktvärdena i tabellen bör tillämpas vid nyetablering och vid ny bebyggelse. De kan tillämpas mindre strikt för kontor än för bostäder. Vidare bör värdena tillämpas mer strikt för bostäder nattetid. Värdena skall ses som en målsättning för långsiktigt förbättringsarbete av vibrationsförhållandena i befintliga miljöer. Riktvärdena är inte avsedda för tillfälliga aktiviteter som bygg- och anläggningsverksamhet och inte heller för bergtäkter och gruvsdrift.

11.2 Miljöbalken

Miljöbalken (SFS 1998:808) trädde i kraft den 1 januari 1999 och ersatte 15 tidigare miljölagar, bl.a. miljöskyddslagen, naturvårdslagen, vattenlagen och skötselagen.

Miljöbalken gäller för allt som kan motverka balkens mål om en hållbar utveckling. Det innebär att alla som gör eller ska göra något som t.ex. äventyrar människors hälsa, naturen eller resurshushållningen skall följa de allmänna hänsynsreglerna i balken. ***Miljöbalkens grundläggande bestämmelser gäller alltså både enskilda människor i det dagliga livet och verksamhetsutövare.***

I balken är bl. a. allmänna hänsynsregler formulerade. De som är adekvata för geoverksamhet är:

- **Bevisbörderegeln** – Verksamhetsutövaren har bevisbördan.
- **Kunskapskrav** – Man ska skaffa sig den kunskap som behövs för att skydda människors hälsa och miljön.

- **Försiktighetsprincipen** – Skyldighet att vidta skyddsåtgärder och försiktighetsmått vid risk för skada eller olägenhet.
- **Lokaliseringsprincipen** – Lämplig plats ska väljas med tanke på miljöbalkens mål samt minsta intrång och olägenhet för människors hälsa eller miljön.
- **BAT-principen (Best Available Technique)** – Bästa möjliga teknik ska användas vid yrkesmässig verksamhet.
- **PPP-principen (Polluters Pay Principle)** – Den som orsakar skada eller olägenhet ansvarar för att avhjälpa den. Detta gäller även sådana skador som orsakats tidigare.

Den praktiska sidan av miljöbalken som reglerar geoverksamheter är framförallt kravet på miljökonsekvensbeskrivningar (MKB). De beskrivs i balkens kapitel 6 och skall bl. a. tas fram vid ansökan om tillstånd för användning av mark, byggnader eller anläggningar som kan medföra olägenhet för människors hälsa eller miljö, eller som kan medföra olägenhet för omgivningen genom buller, skakningar (vibrationer), etc.

Syftet med en miljökonsekvensbeskrivning är att identifiera och beskriva de direkta och indirekta effekter som en planerad verksamhet eller åtgärd kan medföra dels på människor, djur, växter, mark, vatten, luft, klimat, landskap och kulturmiljö, dels på hushållningen med mark, vatten och den fysiska miljön i övrigt, dels på annan hushållning med material, råvaror och energi. Vidare är syftet att möjliggöra en samlad bedömning av dessa effekter på människors hälsa och miljön.

Ur geodynamisk synvinkel innebär det att överföring av vibrationer från t.ex. planerad nybyggnad av väg- eller järnväg till omgivningen skall belysas i en MKB. Samma sak gäller vid etablering av ny industri som är buller- eller vibrationsalstrande.

11.3 Riktlinjer för vägar och järnvägar

Vägverket har tagit fram en handbok ”MKB-GEO, Mark- och vattenaspekter i miljökonsekvensbeskrivningar för vägar”. Handboken är ett komplement till Vägverkets allmänna handbok för miljökonsekvenser. I avsnittet ”Vibrationer” hänvisar man till de komfortkrav som är angivna i SS 460 48 61, se ovan. Vidare ges förslag på skyddsavstånd mellan byggnad och väg vid olika tillåten hastighet vid olika grundförhållanden. Detta förslag framgår av *Tabell 11.2*.

I tidiga planeringsskeden kan det finnas möjlighet att justera vägen i plan och profil för

Miljöbalken trädde i kraft den 1 januari 1999 och ersätter 15 tidigare miljölagar.

Jordart	Hastighet (km/h)		
	50	70	90
Lös lera	>80 m	>100 m	>110 m
Sand	>8 m	>10 m	>10 m
Morän	>5 m	>5 m	>6 m

att minska framtida markvibrationer. Vid uppförande av nya byggnader intill befintlig väg kan det vara aktuellt att föreslå vibrationsdämpande åtgärder i fastigheten. I befintlig bebyggelse kan markisolerande åtgärder förbättra situationen. Där vägen, trots risken för störning, förläggs intill vibrationskänsliga byggnader kan det bli aktuellt att lösa in dessa.

Banverket har tillsammans med Naturvårdsverket tagit fram en policy och tillämpning för buller och vibrationer från spårbunden linjetrafik. Policyn anger riktvärden för olika situationer som nybyggnad, väsentlig ombyggnad eller järnväg i befintlig miljö. Riktvärdena är vägledande och således inte bindande. Åtgärdernas omfattning avgörs alltid med utgångspunkt från vad som är tekniskt, ekonomiskt och miljömässigt motiverat i det enskilda fallet. I *Tabell 11.3* visas de i rapporten angivna riktvärdena för olika planeringssituationer.

Situation	Hastighet	Acceleration
Nybyggnad	0,4 mm/s	14 mm/s ²
Väsentlig ombyggnad	0,4 mm/s	14 mm/s ²
Befintlig miljö	1,0 mm/s	36 mm/s ²

Angivna värden i tabellen är enligt SS 460 48 61, dvs max RMS-värden, tidsvägning "slow" och frekvensvägt enligt ISO 8041 inom frekvensområdet 1–80 Hz.

I handboken för pålgrundläggning anges ett sätt att beräkna tillåtna vibrationsnivåer som överensstämmer i princip med det som är angivet i SS 460 48 66 och SS 02 52 11, se ovan.

11.4 Mer att läsa

Hintze, S., Liedberg, S., Massarsch, R., Hansson, M. och Elvhammar, H. (1997). Omgivningspåverkan vid pål- och spontslagning. Pålkommisionen, Rapport 95.

Buller och vibrationer från spårbunden trafik. Policy och tillämpning. Banverket och Naturvårdsverket, 1997, BVPO 724.001.

Miljöbalken. SFS 1998:808.

MKB-Geo, Mark- och vattenaspekter i miljökonsekvensbeskrivningar för vägar. Vägverkets publikation 1996:72.

Olsson, C, Holm, G (1993). Pålgrundläggning. Svensk Byggtjänst och Statens geotekniska institut.

Svensk standard SS 460 48 60. Vibrationer och stöt, Syneförrättning, Arbetsmetod för besiktning av byggnader och anläggningar i samband med vibrationsalstrande verksamhet.

Svensk standard SS 460 48 66. Vibrationer och stöt, Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader.

Svensk standard SS02 52 11 Vibration och stöt - Riktvärden och mätmetod för vibrationer i byggnader orsakade av pålning, spontning, schaktning och packning för bestämning av tillåtna vibrationsnivåer.

Svensk standard SS 460 48 61. Vibrationer och stöt - Mätning och riktvärden för bedömning av komfort i byggnader.

Tabell 11.2
Förslag till skyddsavstånd mellan byggnad och väg enligt Vägverket.

Tabell 11.3
Riktvärde för vibrationsnivåer vid spårbunden linjetrafik.

SGI Information

1. **JORDS EGENSKAPER.**
(48 sid, 1982/1986/1990/1993)
2. **GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR I FÄLT.**
(72 sid, 1984)
3. **UTVÄRDERING AV SKJUVHÅLLFASTHET I KOHESIONSJORD.**
(28 sid, 1985)
- 3E. **EVALUATION OF SHEAR STRENGTH IN COHESIVE SOILS WITH SPECIAL REFERENCE TO SWEDISH PRACTICE AND EXPERIENCE.**
(32 pages, 1985)
4. **GEOTEKNISKA UTREDNINGAR FÖR STABILITETSANALYSER – ALLMÄNNA RÅD FÖR OMFATTNING OCH KVALITET.**
(20 sid, 1988/1993)
5. **NYARE IN-SITUMETODER FÖR BEDÖMNING AV LAGERFÖLJD OCH EGENSKAPER I JORD.**
(64 sid, 1988)
6. **TORV - GEOTEKNISKA EGENSKAPER OCH BYGGMETODER**
(34 sid, 1989)
7. **REPORT ON THE ISSMFE TECHNICAL COMMITTEE ON PENETRATION TESTING OF SOILS – TC 16 WITH REFERENCE TEST PROCEDURES.**
CPT - SPT - DP - WST.
(50 pages, in english and french, 1989))
8. **HÅLLFASTHET I FRIKTIONSJORD.**
(50 sid, 1989)
9. **OLJE- OCH KEMIKALIEUTSLÄPP I JORD.**
(40 sid, 1989)
10. **DILATOMETERFÖRSÖK - EN IN-SITUMETOD FÖR BESTÄMNING AV LAGERFÖLJD OCH EGENSKAPER I JORD. UTFÖRANDE OCH UTVÄRDERING.**
(50 sid, 1990/1993)
11. **MÄTNING AV GRUNDVATTENNIVÅ OCH PORTRYCK.**
(116 sid, 1990)
12. **TERMISKA EGENSKAPER I JORD OCH BERG.**
(28 sid, 1991)
13. **SÄTTNINGSPROGNOSER FÖR BANKAR PÅ LÖS FINKORNIG JORD – BERÄKNING AV SÄTTNINGARS STORLEK OCH TIDSFÖRLOPP.**
(51 sid, 1994)
- 13E. **PREDICTION OF SETTLEMENTS OF EMBANKMENTS ON SOFT, FINE-GRAINED SOILS – CALCULATION OF SETTLEMENTS AND THEIR COURSE WITH TIME.**
(52 pages, 1997)
14. **LÄROBOK I GEOBILD TOLKNING.**
(123 sid, 1991)
15. **CPT-SONDERING. UTRUSTNING – UTFÖRANDE – UTVÄRDERING.**
(80 sid, 1993)
- 15E. **THE CPT-TEST.**
Equipment-Testing-Evaluation
(77 pages, 1995)
16. **Siltjordars egenskaper.**
– Silt som konstruktionsmaterial
– Bestämning av geotekniska egenskaper
(71 sid, 1998)

Geoteknik behandlar markanvändning, grundläggnings- teknik, jordförstärkning, säkerhetsfrågor, markvärme och miljövård.

SGI är landets geotekniska centrum och vi bedriver forskning, information och konsultation inom geoteknik- området.

Forskningen

har stark praktisk anknytning, t ex att utveckla undersöknings- och grundläggningsmetoder och för- bättra kontrollen av skredfarliga områden.

Informationen

innebär att SGI bl a förmedlar kunskap till olika mål- grupper. Föredrag, symposier, kursverksamhet, forsk- ningsrapporter, handböcker och informationsblad är exempel på olika kanaler.

Världens geotekniska litteratur bevakas av SGI litteraturtjänst. Den egna databasen SGI-Line inne- håller ca 60.000 dokument.

Konsultationen

omfattar bl a rådgivning och projektering, geotekniska undersökningar, grundläggningskontroll och mättekniska uppdrag. Vi arbetar åt både offentliga och privata bestäl- lare.



Statens geotekniska institut

Besöksadress: Olaus Magnus väg 35

Postadress: 581 93 Linköping

Tel: 013-20 18 00. Fax: 013-20 19 14.

E-post: info@swedgeo.se. Internet: www.swedgeo.se