

**Sättningar vid cyklisk och dynamisk lastpåverkan i  
sand**

*Settlements of sand under the impact of cyclic and  
dynamic load*

**Mohammed Ahmed  
Taymor Majrom**

Huvudområde: Geoteknik  
Handledare: Lars Johansson  
Examinator: Rolf Andersson

Datum: 2017-07-30



**MALMÖ HÖGSKOLA**  
Fakulteten för teknik och samhälle

# Sättningar vid cyklisk och dynamisk lastpåverkan i sand

Settlements of sand under the impact of cyclic and dynamic load

Examensarbete – Byggingenjör 180 hp

VT2017

**Ahmed, Mohammed**

**Majrom, Taymor**

Handledare: Lars  
Johansson

Examinator: Rolf  
Andersson



# Förord

Detta examensarbete är utfört vid Malmö Högskola; fakulteten för teknik och samhälle under hösten 2016. Arbetet utgör del av byggingenjörsprogrammet i byggteknik och motsvarar 15 högskolepoäng av totalt 180.

Vi vill ge ett stort tack till vår externa handledare Lars Johansson, geotekniker vid ÅF infrastructure AB och lärare i geoteknologi på Malmö Högskola. Han har hjälpt med arbetets frågeställningar, vägledning och gett kritik under projektets förlopp.

*Mohammed Ahmed, Taymor Majrom  
Malmö 2016*

# Sammanfattning

Sättningar i friktionsjord är ett av nutidens kontroversiella problem inom geoteknik. Jordbävningar, trafikrörelser, sprängnings- och pålningsarbeten ger upphov till vibrationer, vilket orsakar sättningar i friktionsjord och estetiska, funktionella samt strukturella byggnadsskador. Idag anser geoteknikerna detta vara en komplicerad utmaning på grund av yttre och oförutsägbara faktorer såsom klimatförändringar. Klimatförändringar kan påverka jordens inre struktur och dess mekaniska egenskaper. Generellt betraktas friktionsjord som god mark, men kan ändå ha ett riskbeteende ur ett geotekniskt perspektiv, speciellt när den utsätts för cykliska eller dynamiska krafter.

Studien syftar till att klarlägga hur friktionsjord beter sig under inverkan av vibrationer av olika slag. Studien visar identifiering av risker och olika åtgärdsmetodiker för tidigt skede av nybyggnationsplaneringar samtidigt för konstruerade byggnader.

En svensk Standard beskrivs även i studien. Denna baseras på sprängningsvibrationer i jord och är en metod som bedömer de tillåtna riktvärdena för vibrationsnivåerna.

Information från litteraturstudier och dokumentärvideor har analyserats och använts vid skrivandet av teoridelen. Ett modellförsök har även genomförts i slutet av arbetet. Modellförsökets effektmål var att kartlägga vibrationspåverkan i friktionsjord och sättningsförloppet ur ett visuellt perspektiv.

Resultatet av detta arbete har bland annat visat att cykliska och dynamiska lastpåverkan framkallar sättningar i friktionsjord, som i sin tur medför olika typer av skador på befintliga byggnader byggda på denna jord.

**Nyckelord:** sättning, byggnader, vibrationer, cyklisk lastpåverkan, dynamisk lastpåverkan, geoteknik, sand, friktionsjord, liquefaction.

# Abstract

Settlements in friction soil are one of today's controversial issues within geotechnics. Earthquakes, traffic, blasting and pile driving work generate vibrations to the existing buildings, causing settlements in friction soil and aesthetic, functional and structural damage. Nowadays the geotechnical engineers consider this as a complicated challenge because of external and unpredictable factors such as climate change. Climate changes affect the soil's internal structure and its mechanical properties. Generally the friction soil is regarded as good soil, but can still have a risk behavior from a geotechnical perspective, especially in terms of cyclic or dynamic load impact.

The study aims to clarify how friction soil behaves under the influence of vibrations in various kinds. The study shows the identification of risks and the intervention methodologies in the early stages of construction plans and constructed buildings simultaneously.

A Swedish standard is also described in the study. This is based on blasting vibration in soil and is a method that estimates the permissible guideline values for vibration levels.

Information from literature and documentary videos have been analyzed and used for the writing of the theoretical part. A model experiment has also been carried out at the end of the essay. The model experiment's goal was to identify the impact of vibration in friction soil and settlement progress from a visual perspective.

The result of this work has shown that the cyclic and dynamic load impact generates settlements in friction soil, which in turn causes various types of damage to existing buildings built on this soil.

**Keywords:** settlement, buildings, vibrations, cyclic load impact, dynamic load impact, geotechnics, sand, friction soil, liquefaction.

# Innehållsförteckning

<b>Förord</b> .....	<b>i</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Innehållsförteckning</b> .....	<b>iv</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>7</b>
1.1 Bakgrund .....	7
1.2 Liknande studier .....	7
1.3 Syfte .....	8
1.4 Frågeställningar .....	8
1.5 Metod .....	8
1.6 Avgränsningar .....	8
<b>2 Jordartsteori</b> .....	<b>9</b>
2.1 Jordklassificering .....	9
2.1.1 Kornfraktionsfördelning .....	9
2.1.2 Siktningsanalys och graderingstal .....	10
2.2 Friktionsjords egenskaper .....	11
2.2.1 Sands egenskaper .....	11
2.2.2 Dynamiska egenskaper .....	12
2.2.3 Cykliska belastningar .....	13
2.2.4 Sinussvängningar i verkligheten .....	14
<b>3 Vibrationer och sättningar i sand</b> .....	<b>16</b>
3.1 Negativitet inom vibrationer .....	16
3.2 Vibrations- och geodynamikkällor .....	17
3.2.1 Trafiklast .....	18
3.2.2 Byggnationssysselsättningar .....	20
3.2.3 Seismiska aktiviteter .....	23
3.3 Påverkan i befintliga byggnader .....	24
3.3.1 Omdöme av sprickbildning .....	25
3.3.2 Sprickskador och kritiska töjningen .....	27
3.4 Bedömning enligt Svensk Standard SS 4604866:2011 .....	27
3.5 Åtgärder .....	29
3.5.1 Genomförande .....	29
<b>4 Liquefaction och tillämpning av modellförsök (fallstudie)</b> .....	<b>31</b>
4.1 Inledning .....	31
4.1.1 Allmänt om liquefaction .....	31
4.2 Modellförsökets syfte .....	32
4.3 Utrustning .....	32
4.4 Utförande .....	33
4.5 Resultat & analys .....	41
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>45</b>
<b>6 Slutsats</b> .....	<b>46</b>
<b>Referenser</b> .....	<b>48</b>







# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

I takt med att ”god mark” (det vill säga mark som inte visar några egentliga geotekniska problem) har bebyggts, och därmed tagit slut, måste nybyggnationer idag även uppföras inom samma områden (Trafikverket, 2002). I samband med det kan det finnas större eller mindre geotekniska utmaningar, även om den dominerade jordarten är friktionsjord, som vanligtvis är en mycket bra jord att bygga på (Massarsch, 2013). Vid högt vatteninnehåll, medelfast till löst lagrad, kan friktionsjord ge betydande geotekniska problem, om den utsätts för cyklisk eller dynamisk belastning, exempelvis trafiklast eller seismisk last såsom jordbävninglast (Möller et al., 2000).

## 1.2 Liknande studier

Det har gjorts en studie vid Luleå Tekniska Universitet som beskriver sättningar i sulfidjord, en jordart som skapar problem både deformations- och miljömässigt. Arbetets syfte har endast fokuserats på att utvärdera och prognostisera sättningens storlek och tidsförlopp med hjälp av olika prover och beräkningar för ett vägarbete i Norrbotten, utan hänsyn till vibrationspåverkan (Johansson, 2010). Kornstorleken för sulfidjordar är i huvudsak inom fraktionen silt, och kan därmed inte klassas som en renodlad friktionsjord. Studien är därför inte relevant för detta arbete.

I en annan studie vid Lunds Tekniska Högskola har en riskanalys av byggnader i samband med en grundvattensänkning tagits fram i syfte att undvika differenssättningar som kan ge upphov till skador på byggnationen. (Emanuelsson & Johansson, 2016) I arbetet har det enbart fokuserats på grundvattennivåstyrning för elimination av eventuella risker som kan uppstå. Jordar som studien har redovisat omfattar både friktions- och kohesionsjord, vilket är någorlunda relevant.

Ytterligare vid Lunds Tekniska Högskola har en studie behandlat vibrationer som uppkommer under byggarbeten som ger en negativ påverkan på omliggande jord. Arbetet har endast lagt fokus på vibrationer som orsakas av olika pålnings- och markförstärkningsarbeten. (Sulander & Olivecrona, 2016) Dock beaktas inte vibrationer som uppstår vid andra faktorer såsom jordbävningar och sprängningsarbeten. Studien tar hänsyn till alla typer av jordar, och avgränsar sig inte till en viss jordart.

Vid Chalmers Tekniska Högskola har en jämförelse gjorts mellan två olika beräkningsprogram som beräknar krypsättningar i lera. (Meijer & Åberg, 2007) I det fallet avser studien endast jordar som klassificeras som ler, vilket är icke relevant för detta arbete.

## 1.3 Syfte

Syftet med arbetet är att utreda beteendet hos friktionsjord för cyklisk och dynamisk last, för att i tidigt skede under en projekteringsfas kunna identifiera risker som annars, när de upptäcks senare, kan kräva stora merkostnader och mycket medarbete för att beakta. Detta med hänsyn till klimatförändringar som orsakar geofysikaliska processer till exempel extrema väderprognoser, kraftig nederbörd, ökning av havs- och grundvattennivån, vilka samtliga ökar risken för jordflyttningar och seismiska aktiviteter och resulterar i bland annat sättningar.

## 1.4 Frågeställningar

- Vilken påverkan har cyklisk och dynamisk last på befintliga byggnader samt vilka scenarier kan det uppstå efter?
- Vilka risker kan geotekniker bortse ifrån under projekteringsfasen?

## 1.5 Metod

Studien inleds med en litteraturstudie, där bland annat forskningsrapporter, vetenskapliga artiklar men även dokumentärer analyseras. Därefter genomförs ett modellförsök (fallstudien), som omfattar en sandlåda som utsätts för skakningar som ska simulera olika fall av vibrationspåverkan samt att kunna få en bild av hur sättningar utbildas. Resultatet från litteraturstudien kommer att utgöra ett av underlagen för utformningen av modellförsöken.

## 1.6 Avgränsningar

Friktionsjord omfattar ett brett spektrum av jordarter; sand, grus, sten och block. Beroende på kornstorleksfördelning och dominerande kornstorlek, kan dessa förväntas att uppvisa olika egenskaper. Arbetet har därför begränsats till att omfatta endast jordar som klassificeras som sand.

## 2 Jordartsteori

Jordart är den dominerande, lösa strukturen som utgör den översta delen på jordskorpan, även kallat lösavlagring, som i sin tur har skapats genom sönderdelning till mindre strukturer av fasta och förenade strukturer, vilka också kallas för bergarter (Lundqvist, 2006). Vittring och erosion är de vanligaste exogena faktorer som leder till lösavlagringsbildningen. Innehållsmässigt består jordarterna av mineraler (oorganiska material), såsom metaller, eller av organiska material (fossiler) (Larsson, 2008).

### 2.1 Jordklassificering

Inom jordklassificering uppdelas de olika jordarterna efter deras kornstorleksintervaller (Forssblad, 1987). Utifrån detta kan jordarterna grupperas, nämnas och studeras enligt dess mekaniska egenskaper ur ett geotekniskt perspektiv. Man har använt olika jordklassificeringssystem i Sverige sedan 1953, då fokus har lagts på exempelvis organiskt innehåll av jordart och plasticitet. Klassificeringssystemet som används idag baseras på Atterbergsskalan och är uppdelad i sex olika mineraljordarter.

#### 2.1.1 Kornfraktionsfördelning

Idag grupperas, enligt det svenska klassificeringssystemet, lösavlagringen i sex olika jordarter; block, sten, grus, sand, silt och ler (Larsson, 2008). De olika kornfraktionerna delas sedan ytterligare in i fyra huvudgrupper baserat på fin- och grovjordsinnehållet såsom figuren nedan visar:

**Tabell 2.1:** En detaljerad beskrivning av de fyra olika grupperna (Larsson, 2008) .

- Mycket grov jord jordar som huvudsakligen består av block och sten
- Grovjord grus- och sandjordarter
- Blandkornig jord siltiga eller leriga grus- och sandjordar
- Finjord silt-och lerjordar

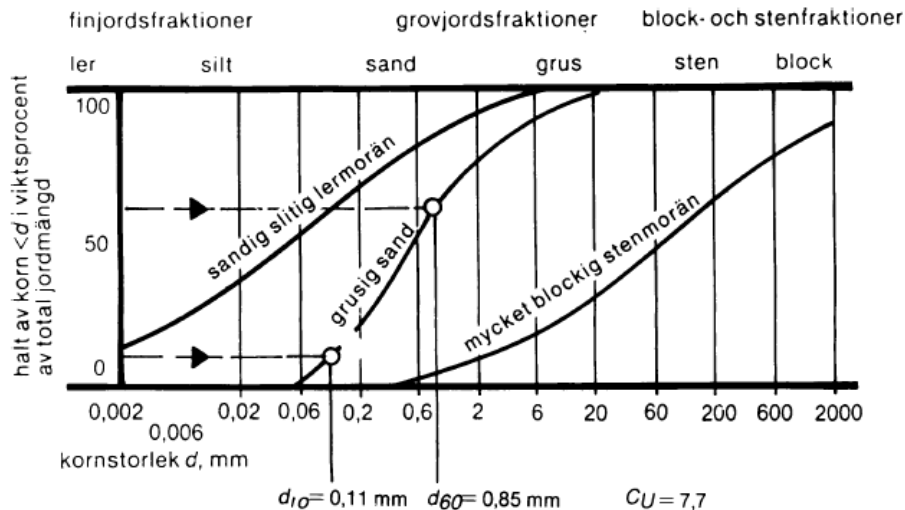
Vad gäller fraktionsfördelning varierar det från land till land (Larsson, 2008). I Sverige används Atterbergsskalan numera för att dela upp lösavlagringen i sex olika underjordarter respektive kornfraktionsgränser, som är kornstorleken i millimeter (Forssblad, 1987). Utifrån kornstorleken klassificeras jordarna enligt tabellen nedan:

**Tabell 2.2:** Kornfraktionsfördelning och klassificering av de olika jordarterna baserad på fraktionsgränserna (Larsson, 2008).

Huvudfraktion	Underfraktioner	Beteckning	Fraktionsgränser mm
Mycket grov jord	<b>Stora block</b>	<b>LBo</b>	<b>&gt; 630</b>
	<b>Block</b>	<b>Bo</b>	<b>&gt; 200 till 630</b>
	<b>Sten</b>	<b>Co</b>	<b>&gt; 63 till 200</b>
Grovjord	<b>Grus</b>	<b>Gr</b>	<b>&gt; 2 till 63</b>
	Grovgrus	CGr	> 20 till 63
	Mellangrus	MGr	> 6,3 till 20
	Fingrus	FGr	> 2 till 6,3
	<b>Sand</b>	<b>Sa</b>	<b>&gt; 0,063 till 2,0</b>
	Grovsand	CSa	> 0,63 till 2,0
	Mellansand	MSa	> 0,2 till 0,63
	Finsand	FSa	> 0,063 till 0,2
Finjord	<b>Silt</b>	<b>Si</b>	<b>&gt; 0,002 till 0,063</b>
	Grovsilt	CSi	> 0,02 till 0,063
	Mellansilt	MSi	> 0,0063 till 0,02
	Finsilt	FSi	> 0,002 till 0,0063
	<b>Ler</b>	<b>Cl</b>	<b>≤ 0,002</b>

### 2.1.2 Siktningsanalys och graderingstal

Vidare i kornfördelningen klassificerar man de grovkorniga fraktionerna utifrån siktningsanalys (Forsblad, 1987). Under siktningsanalysen uppvärms materialet i en ugn med en temperatur på högst 105 °C för att torka. Därefter kartläggs resultatet i form av en kurva för materialet i ett diagram (kornstorleksfördelningsdiagram) som illustreras nedan.



**Figur 2.1:** Ett exempel på en kornfördelningskurva och hur graderingstalet för en viss jordart bestäms (Larsson, 2008).

Jordarter som kornfördelas vid en kornstorlek mindre eller lika med 60 mm indelas i engraderade, mellangraderade eller månggraderade jordarter (Forsssblad, 1987). Ett värde på graderingstalet ( $C_u$ ), som är kvoten mellan korndimensionen vid 60 % av vikten ( $d_{60}$ ) och korndimensionen vid 10 % av viktmängden, kan hämtas från kornfördelningskurvan ovan (Forsssblad, 1987). Resultatet av kvoten visar graderingstalet, som beskrivs i intervallform och kan antingen vara engraderad ( $C_u < 5$ ), mellangraderad ( $5 \leq C_u \leq 15$ ) eller månggraderad ( $C_u > 15$ ).

## 2.2 Friktionsjords egenskaper

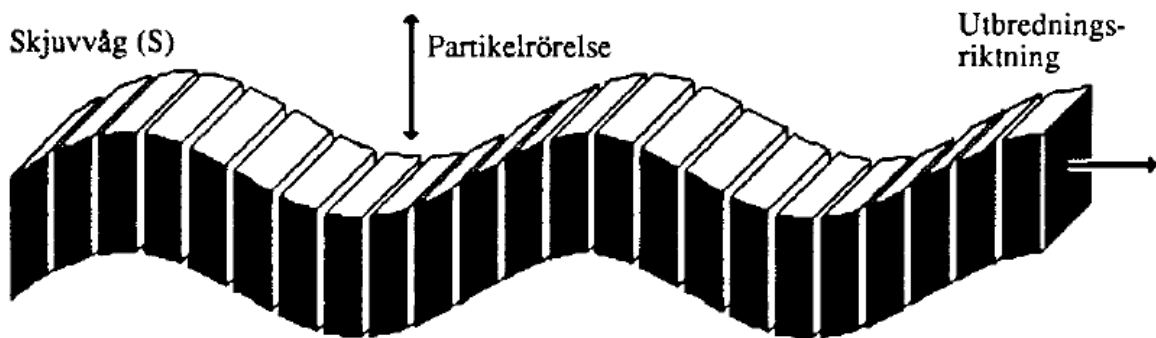
I friktionsjord byggs hållfastheten främst upp av friktionskrafter mellan jordkornen. (Larsson, 2008) Storleken på krafterna påverkas av jordens placering, med andra ord hur jorden förhåller sig till grundvattennivån. Friktionsjords egenskaper indelas i dynamiska och statiska egenskaper.

### 2.2.1 Sands egenskaper

Sand betraktas som en viktig komponent inom byggbranschen, då den används som ballast, och som fyllnadsmaterial (SGU, 2015). Sandjord dominerar sandfraktionen med kornstorlek mellan 0,06 och 2 mm. Den brukar vara känslig för erosion genom vind och vatten. Eftersom sandjord tillhör friktionsjordarter, kan höga slänter bildas så till vida att friktionsvinkeln inte överstiger cirka (30-40°) (SGI, 2016).

## 2.2.2 Dynamiska egenskaper

Farten är en av de viktigaste parametrar med hänsyn till olika vågsorter som sträcker sig i undergrunden (Massarsch, 2013). Skjuvvågsfarten har den dominerande faktorn på sättningar. Vågen i sig beskrivs också som en transversell våg (exempelvis havs- och elektromagnetiska vågor) i elastisk rörelse och sprider sig genom skjuvning i ett visst material. Vågens riktning är vinkelrät mot utbredningsriktningen (se fig. 2.2).

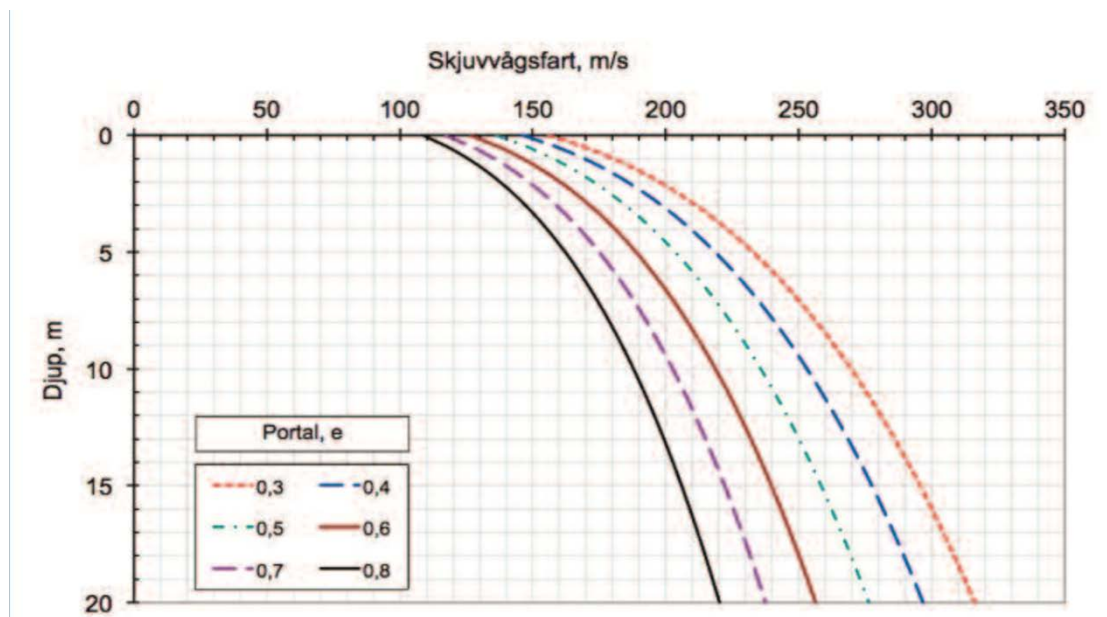


**Figur 2.2:** Skjuvvågens form och utbredning (Möller et al., 2000).

Faktorer som spänningsvariation, djupet, materialets porvolym, dess vattenhalt, vattenmättnadsgrad, jordens densitet och läget för grundvattennivån ger ett starkt upphov till jorddynamikens vågfart respektive skjuvmodulen (Massarsch, 2013).

När figuren nedan iakttogs ökar skjuvvågsfarten proportionellt med djupet. Exempelvis ligger skjuvvågsfarten på 190 m/s under en tio meters djup i löst sand. Motsvarande siffra uppgår till 270 m/s om det är i lagrad sand.

**Observation:** Diagrammet förställer medelvärdet av jordens totala densitet  $\gamma = 1800\text{kg}/\text{m}^3$ , med grundvattentytan på 1 m under markytan.



**Figur 2.3:** Visar djupberoende av skjuvvågsfarten i sand med olika portal  $e$ : grundvatten ligger 1 m under markskikt (Massarsch, 2013).

En väsentlig parameter vid beräkning av sättningen är skjuvtöjningen  $\gamma$  (Massarsch, 2013). Skjuvtöjningen är en relativ deformation mellan två partiklar i ett medium där volymen inte ändras. Den kan beräknas med hjälp av sambandet  $\gamma = \frac{v}{\tau_s}$ , då hastighetsamplituden  $v$  och skjuvvågsfarten  $\tau_s$  är givna.

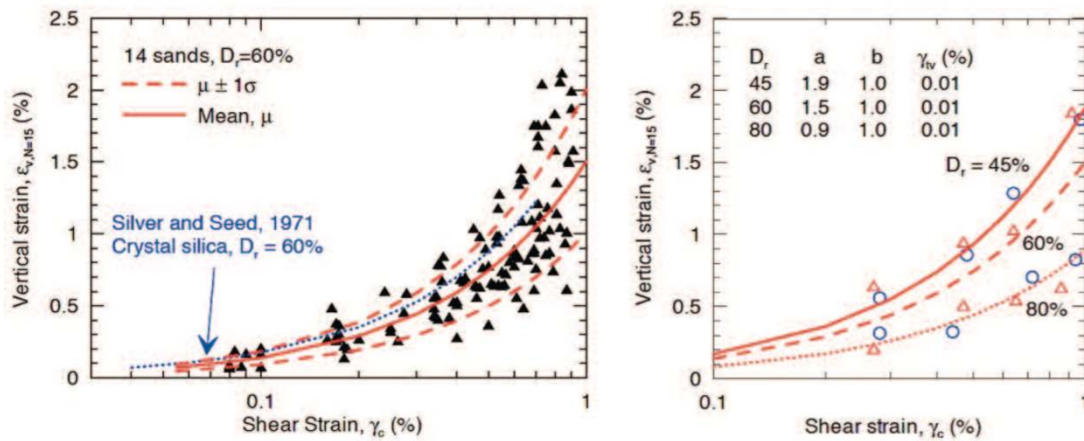
### 2.2.3 Cykliska belastningar

Vid geodynamiska utföranden, fås en cyklisk belastning vilket innebär en upprepning av belastning under ett antal lastcykler. I normala fall har en hastig lastcykel förmågan att ta upp större last även om samma lastcykel är långsam vid rent statisk last. Denna egenskap kallas för inverkan av lastens varaktighet.

I geotekniken nämns dessutom begreppet ”Degradering av hållfastheten”, vilket innebär att förmågan att uppta lasten minskar om upprepad belastning förekommer.

Med hjälp av mätningar i fält och prover från laborationer, finns det möjlighet att tillämpa modellförsök som studerar cykliska belastningars egenskaper (Stewart et al., 2014). På sistone har det utförts en studie på jordsättningar i laboratoriet, där 14 olika sorters sand användes. De tagna sandproven har 60 % i relativ lagringstäthet  $I_D$ , som utsätts för 25 belastningscykler med en skjuvtöjning på 77 %.



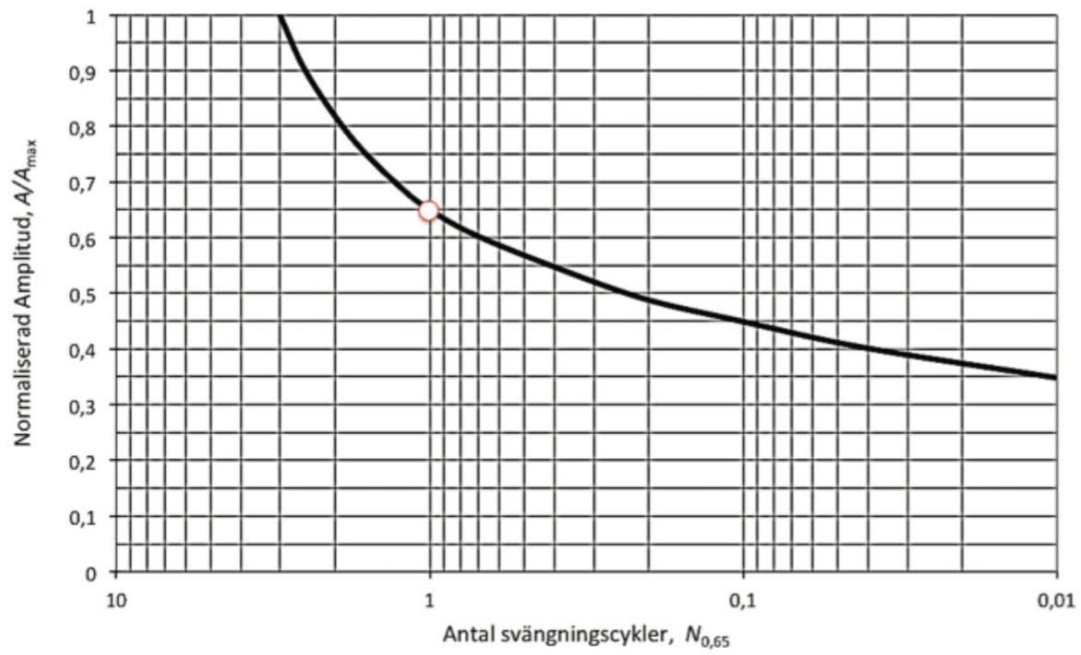


**Figur 2.4:** Skjuvförsök på tagna sandprover med lagringstäthet,  $I_D$ , 60 % (Massarsch, 2013).

Den största kompressionen sker under de första fem till tio svängningscyklerna (Möller et al., 2000). Därefter minskar svängningarna drastiskt, vilka blir  $\varepsilon_v$ ,  $N=15$  som är ett standard värde inom jordbävningsforskning, där de 15 första belastningscykler används.

## 2.2.4 Sinussvängningar i verkligheten

Sinussvängningar förekommer sällan i verkligheten, eftersom svängningsamplituden förändras som en funktion av tiden (Möller et al., 2000). Däremot vid analys av liquefaction (jordförvätskning) (se kapitel 4.1), har en metod tillämpats där en ojämn svängningscykel omvandlas till sinussvängningar (Massarsch, 2013).



**Figur 2.5:** Omvandling av varierande svängningscykler till sinussvängningar (Massarsch, 2013).

## 3 Vibrationer och sättningar i sand

Vanligtvis talar man om vibrationer som sker i friktionsjord och specifikt sand där byggnader och andra fundament sätts i påverkan (Massarsch & Carlsson, 1986). Definitionen av vibrationer är bred, men ur ett vetenskapsmässigt perspektiv är vibrationer alla svängningsrörelser som orsakas av en viss vibrationskälla (Möller et al., 2000). Exempel på källor som orsakar svängningsrörelser i jord är pålningsarbeten, trafikvibrationer, sprängnings- och schaktningsarbeten.

Vissa svängningsrörelser sker momentant (Massarsch & Carlsson, 1986). Det vill säga från ett ögonblick till en kortvarig period av impulser såsom sprängningsarbeten, medan rörelser från pålningsarbeten ger upphov till långvariga impulser.

Dessa svängningsrörelser ger upphov till vågenergi som orsakar skakningar och annan dynamisk påverkan i marken (Magnusson & Sällfors, 1983). Byggnader och andra fundament som är byggda på eller i marken kommer att reagera på något sätt för dessa svängningsrörelser, beroende på grundkonstruktion, stomme, byggnadsmaterial och byggnadshöjd etc.

### 3.1 Negativitet inom vibrationer

Vibrationerna i friktionsjord medger enorma störningar för boendemiljön (komfortproblem) och orsakar allvarliga skador i byggnadens fundament och stomme (strukturella problem), i synnerhet när byggnaderna är vibrationskänsliga och belägna i närheten av vibrationskällorna.

Därmed kan sättningar och deformationer också skapas av vibrationer i friktionsjord (Massarsch, 2013). Enligt Massarsch's artikel *Sättningar i friktionsjord vid vibrationspåverkan* har han kartlagt olika standard för riktvärden och mätmetoder för olika typer av vibrationer som kan uppstå i friktionsjord och som ger negativ påverkan (Massarsch, 2013). Enligt standarden SS 4604866:2011 varierar den vertikala svängningshastigheten beroende på vågutbredningen i markens olika jordarter. En välillustrerad tabell visas nedan för olika jordarters okorrigerade svängningshastighet.

**Tabell 3.1:** Den vertikala svängningshastigheten för olika jordarter (Massarsch, 2013).

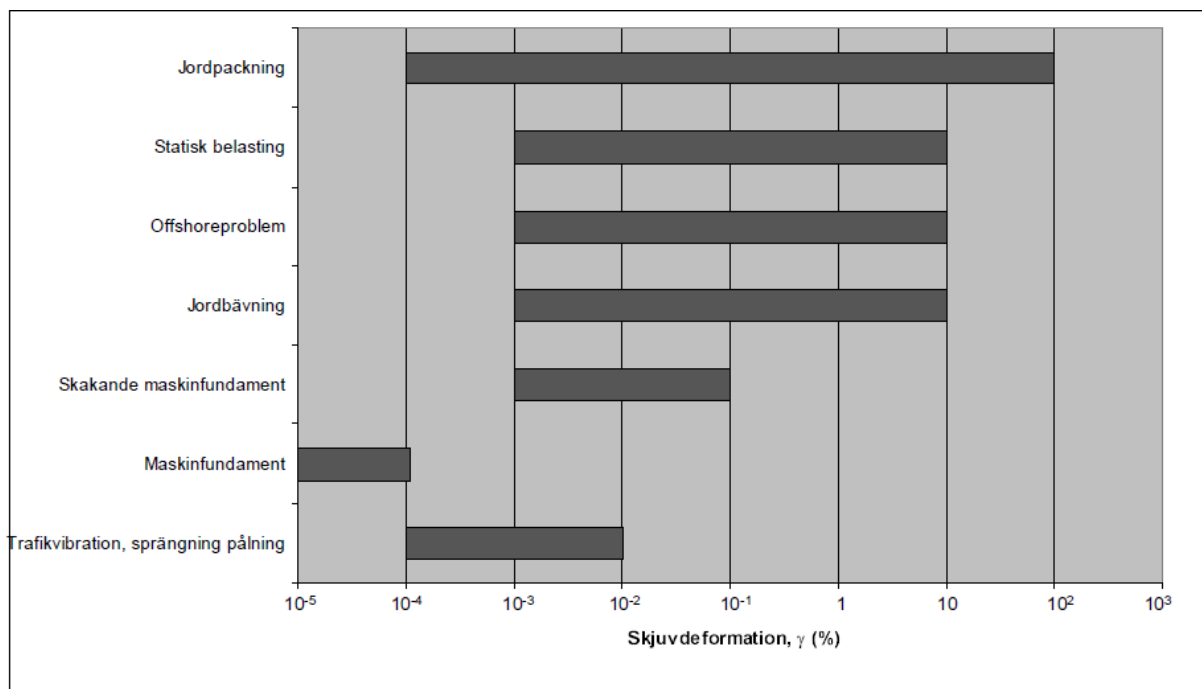
<i>Undergrund</i>	<i>Vertikal svängningshastighet mm/s</i>
Löst lagrad morän, sand, grus, lera	18
Fast lagrad morän, skiffer, mjuk kalksten	35
Granit, gneis, hård kalksten, kvartsitisk sandsten, diabas	70

Massarsch påpekar även att ovannämnda standard inte är tillfredsbringande ur ett geotekniskt perspektiv, utan avser endast byggnadens reaktion vid vibrationsutsättning av mark, inte grundpåverkan (Massarsch, 2013). Man skulle kunna säga att tabellen avser bedömning av komfortproblem men inte strukturella problem. Det beskrivs även att både friktions- och kohesionsjord kombineras samman i denna standard, trots att de beter sig olika vid vibrationspåverkan.

### 3.2 Vibrations- och geodynamikkällor

Orsakerna till sättningar på byggnader och i fundament byggda på sand är inverkan av vibrationer som kommer från vibrations- och geodynamiska källor. Dessa vibrationer varar momentant eller långvarigt, och har antingen aktiv eller passiv aktivitet.

Deformationsmässigt kommer jordens egenskaper att påverkas beroende på storleken av deformationen och dess varaktighet (Möller et al., 2000). Vid geostatiska belastningar blir deformationsproblemet mindre än det som geodynamiska belastningar skapar. Exempelvis last från till exempel trafik och sprängning ger upphov till minimala deformationsproblem i omgivningen vilket ger undergrunden ett linjärt elastiskt beteende. Vid andra geodynamiska problem såsom seismiska aktiviteter (jordbävningar) och jordpackning kommer undergrunden att bete sig som ett icke-linjärt material. Däremot måste antalet lastcykler beaktas eftersom dessa kan ge upphov till stora massrörelser Dessa vibrationskällor kommer att beskrivas vidare i detalj.



**Figur 3.1:** Några olika vibrationskällor med dess skjuvdeformation (Möller et al., 2000).

### 3.2.1 Trafiklast

Vibrationer och laster från trafikerade fundament och anläggningar är en av de vanligaste källorna som påverkar våra befintliga byggnader, speciellt under en längre tidsperiod (Massarsch, 2013). Trafiklast och dess vibrationer brukar delas in i två olika typer, järnvägslast från tåg och motortrafikerad last från diverse motorfordon.

Vibrationer från järnvägstrafik är brett och väldigt varierande utifrån olika faktorer, som tågets längd, transportmedel (passagerare, gods), axiallasten, järnvägsgeometri och typ av undergrund (Möller et al., 2000). I Sverige är den totala sträckan av järnvägsnätet cirka 10 000 km. Förutom de ovannämnda faktorerna ~~ovan~~, baseras även inverkan av vibrationerna från järnvägstrafik på andra faktorer som tågets hastighet, bankens utformning och uppbyggnad, grundläggningen, spårkvalitet och ojämna hjul. Andra faktorer som frusen mark (tjäle) och byggnadskonstruktion kan även ha en inverkan på vibrationer från tågtrafikerade källor.

Den vibrationspåverkan som uppstår vid järnvägstrafik både dynamisk och omgivningsmässigt är störst vid ökning av tågets hastighet och last (Möller et al., 2000). Därmed medför långa tåg enorma och kontinuerliga vibrationsstörningar från rälsen i form av transversalvågor.

Dessa vågor, som då symboliserar vibrationerna, är störst inom det närmaste området kring vibrationsskällan och intensiteten avtar snabbt med avståndet om grunden består av fast, finkornig jordart, men sker långsammare i grovkorniga eller lösa jordarter, då fallet är vanligtvis friktionsjord (Massarsch & Carlsson, 1986).

Vibrationsvågorna som emitteras delas upp i volymvågor som sker inne i jordstrukturen och ytvågor, som är bundna i ytan (Möller et al., 2000). Volymvågor är elastiska vågor som utbreder sig i mediets inre volym och definieras som longitudinella vågor, exempelvis ljudvågor. Ytvågor är däremot transversella, slutna till ytan och sprider sig gentemot gränsytan från ett medium till ett annat. Ytvågorna beter sig lite olikt än volymvågorna då de har en avsevärt större effekt och avtar betydligt långsammare än volymvågorna, tack vare dess utbredningsgrad. Vågorna påverkas även av lagertjockleken och landskapets utformning. Exempelvis bildas ytvågor bland annat vid jordbävning.

Svängningshastigheten och frekvensen är huvudfaktorerna som orsakar eventuella byggnadsskador och störningar (Möller et al., 2000). Frekvensen är optimal vid vibrationer som uppträder i friktionsjordar. Kohesionsjordar däremot, har längre våglängd (lågfrekventa vågor) med en svängningshastighet som är mindre än 10 Hertz.

Amplituden från svängningshastigheten blir störst från tåg med hög massa, då frekvensens intervall ligger mellan 1 och 10 Hertz och undergrunden är av kohesionsjord, specifikt ler, men betydligt mindre i friktionsjord (Möller et al., 2000).

Vibrationer från motortrafikerade väg är även varierande utifrån olika faktorer (Möller et al., 2000). Vågorna som uppstår från vibrationer blir till när vägbanan pressas nedan från hjulfordon. Vid pressningen orsakas en nedsänkning av vägbanken och stötmoment om vägen inte är jämn. Rörelseenergin kommer då att överföras från fordonets hjul till undergrunden, som sedan då sprids vidare och omvandlas till vågor.

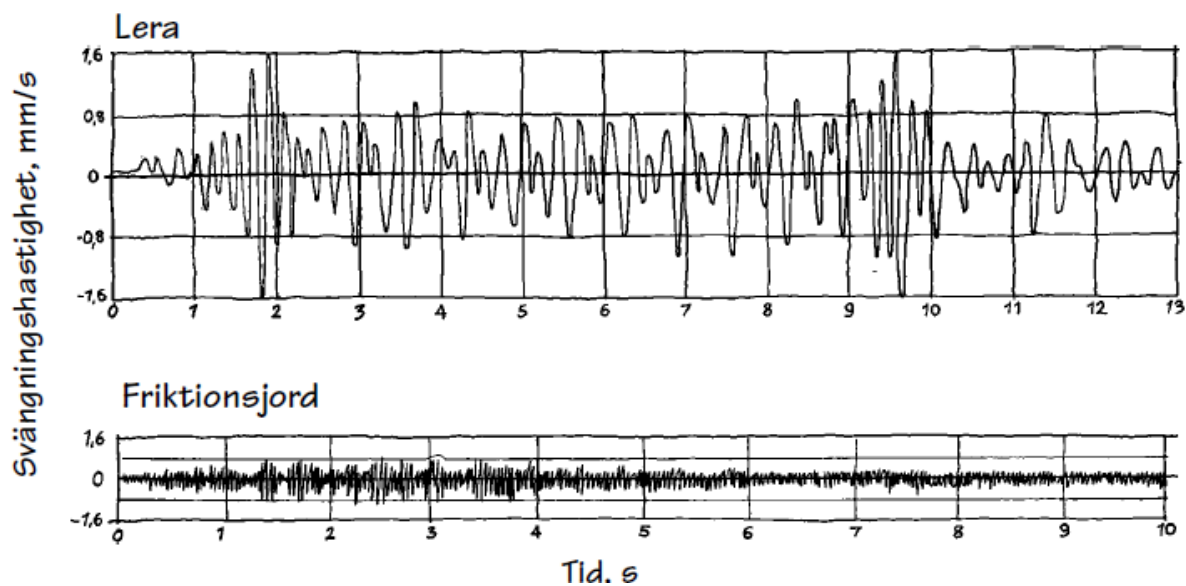
För att upplevelsen av vibrationen som uppstår från motortrafikerad väg ska kännas obehagligt måste detta ske under en vägbank som består av lösa jordarter. (Möller et al., 2000). Detta förekommer även i friktionsjordar.

Vågornas utbredning beter sig likadant som det är hos järnvägstrafik, då de emitterade vågorna delas upp till ytvågor och volymvågor (Möller et al., 2000). Med avståndet dämpas vågutbredningarna, och snabbare vid ytvågorna.

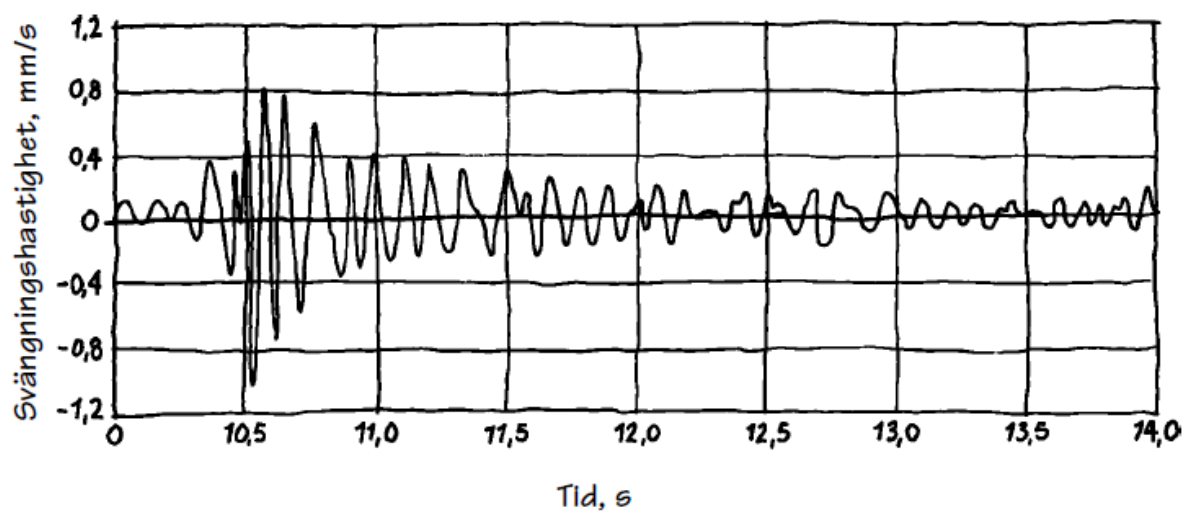
Ytvågorna utgör den dominerande typen av vibrationspåverkan från motortrafikerad väg, på grund av att de utbreder sig i olika positioner och riktningar (Möller et al., 2000). Detta fenomen beror på accelerationen och hastigheten av partikeln, vilket gör det praktiska bedömningen av vibrationsstörningar och storlek komplicerad.

Likaväl hos järnvägstrafik, är vibrationernas svängningshastighet, störningsförmåga och effekt beroende av olika faktorer (Möller et al., 2000).

- Fordonstyp och tjänstevikt
- Hastighet
- Vägens yta (jämn, ojämn)
- Markens jordstruktur
- Avståndet mellan fundament/byggnad och källan



**Figur 3.2:** Skillnaden mellan svängningshastigheten och amplitudlängd hos lera och friktionsjord (järnvägstrafik) (Möller et al., 2000).



**Figur 3.3:** Svängningshastighet och dess amplitudlängd från motortrafikerad väg (Möller et al., 2000).

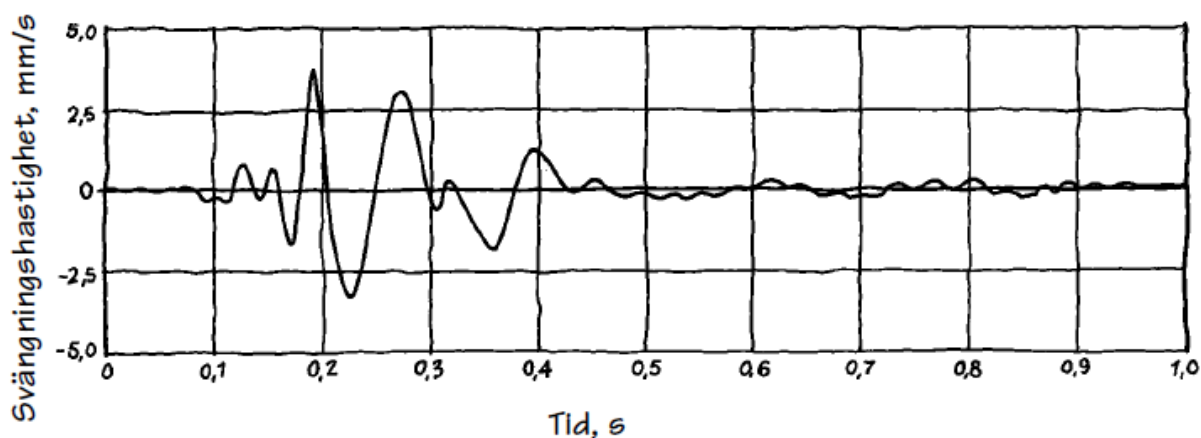
### 3.2.2 Byggnationssysselsättningar

Verksamheter som pål- och spontslagning, sprängningsarbeten och jordpackning är de allra viktigaste vibrationskällorna som påverkar svängningsrörelser och anses vara direkt störande på människor och byggnader i omgivningen.

Påslagning är en metod för markförstärkning och utgör den allra första fasen inom byggverksamheten (Möller et al., 2000). I Sverige har man använt fallhejare som redskap för att hamra ner pålarna, men idag är vibrationshejaren det dominerande verktyget för samtliga pålningsarbeten. Nackdelen med fallhejaren är att den bidrar till större vibrationstörningar och buller i omgivningen än den övervägande vibrationshejaren. Vibrationshejaren är därmed avsedd med att påla in i friktionsjord utan större problem och med minimala risker.

Påslagningen samt spontningen ger upphov till störande vibrationer i omgivningen (Möller et al., 2000). Vibrationens härkomst ligger vid spetsen och slagytan på pålen, vilket skapar rörelseenergi, som kommer mestadels från pålspetsen och sprider sig därefter som kompressionsvågor och ytvågor (Fellenius & Massarsch, 2008). Effekten av vibrationsvågor avtar med avstånd från vibrationskällan. Detta gäller även vibrationer skapade från pålnings- och spontningsarbeten (se figur 3.4).

Vibrationsstyrkan och dess förmåga att påverka omgivningen vid pålningsarbeten respektive spontning beror på olika faktorer, bland annat slagytan, slagkraften från hejaren, slaghastighet, pålens sektionensarea, jordens egenskaper och slagfrekvens (Möller et al., 2000).



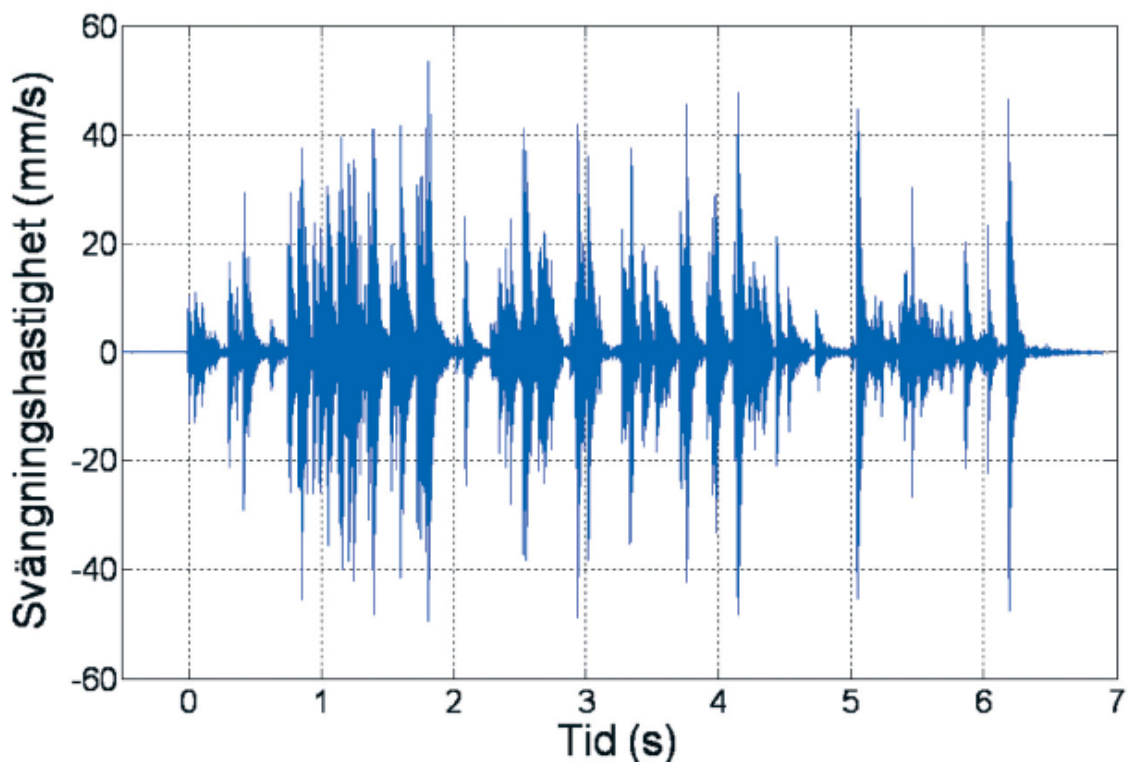
**Figur 3.4:** Svängningshastigheten med frekvensförskjutningar hos påslagning (Möller et al., 2000).

En annan vibrationsskälla som även bidrar till stora vibrationsrörelser i omgivningen är diverse sprängningsarbeten (Massarsch & Carlsson, 1986). Sprängning används för många bygganläggningar, främst till underjordiska konstruktioner. Nutidens sprängningsteknik bidrar till bra möjligheter för reduktion av vibrationer och därmed minskar risken för sprickbildning på byggnadens konstruktionselement.



Sprängning ger ett starkt bidrag till vibrationer i omgivningen med momentana impulser (Möller et al., 2000). Vid stora sprängningsområden med ett approximativt avstånd på 1 km från omgivningen är sprängladdning den avgörande faktorn för vibrationsupplevelsen samt dess utsträckning (se figur 3.5) (Wersäll et al., 2009). Vid 100 m från sprängningskällan till omgivningen är det istället den ögonblickliga, exploderade laddningsmängd som är den styrande faktorn.

Följaktligen är laddningsmängden, berggrundens egenskaper, avståndet från sprängplatsen till omgivningen och förbindelser av inspänningar de medverkande krafterna som mäter vibrationernas storlek samt störningsförmågan vid sprängningsarbeten (Möller et al., 2000).



**Figur 3.5:** Svängningshastighet hos tunnelsprängning med 1.6 kg laddningsmängd (Wersäll et al., 2009).

En annan sysselsättning som tillhör byggnadsverksamhetens ram är packning av främst jord och stenar från sprängningsprocessen (Massarsch, 2013). För att kunna utjämna och utsätta jord och sprängsten för packning krävs det vibrationsmaskiner och verktyg, exempelvis vibratorplattor, stavvibratorer och svältar (Massarsch & Carlsson, 1986).

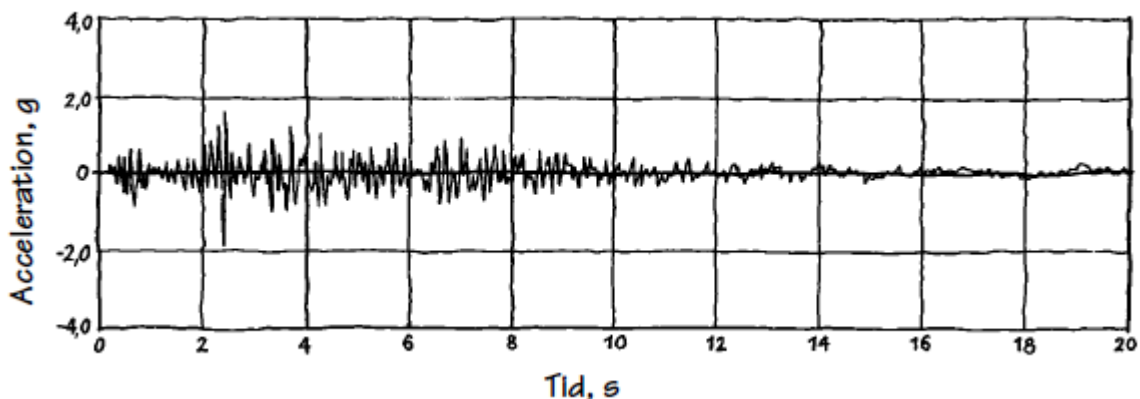
När jorden packas med en vibratorplatta eller en vibratorssvält påverkas ytan med stötkrafter som hastigt återkommer. (Möller et al., 2000). Ytvågorna som genereras från dessa maskiner sätter partiklarna i rörelse och då sker det både omlagring och packning. Även den dynamiska tryck- och skjuvpåfrestningarna kommer att öka på grund av de genererade stötkrafterna på ytan.

Förstadiet börjar med den alstrande energin som tillförs till jordmaterialets plastiska tillstånd, som i sin tur sugts in under jordpackningsfasen (Möller et al., 2000). Under processen packas jorden och energitillförseln kommer att utsträcka sig till större avstånd och djup i undergrunden från vibrationsmaskinen och övergår till elastisk deformation. Djupet och avståndet som skapas beror på verktyget som används vid packning, berggrundens attribut och antalet överfarter. Det är viktigt att välja det lämpliga vibrationsredskapet för den aktuella jordarten vid arbete. Annars skapas det störande vibrationer till omgivningen på grund av de dynamiska utsättningar och beteenden som sker i undergrunden.

### 3.2.3 Seismiska aktiviteter

Seismiska aktiviteter är naturkatastrofer som skapar enorma vibrationsmängder. Dessa vibrationer anses vara direkt störande och skadande för infrastrukturen i omgivningen. (Möller et al., 2000). Jordbävningar och andra massiva massrörelser i litosfären (jordskorpan inklusive den övre delen av manteln) är huvudexempel på seismiska rörelser.

Inledningsvis är en jordbävning den oväntade, robusta rörelsen och förkastningen i jordskorpan, vilket startar från epicentret och sprider sig gentemot jordytan i form av seismiska vågor (Möller et al., 2000). Dessa rörelser ger upphov till spänningar och chockvågor som bildar sprickor och skalv på jordskorpan. Vibrationerna från jordbävningen ökar successivt proportionellt mot kraften, och dess vågamplitud ökar även i längd (se figur 3.6).



**Figur 3.6:** Vibrationsaccelerering för seismiska vågor orsakade av jordbävning (Möller et al., 2000).

Faktorer som beror på vibrationsstyrkan orsakade av seismiska aktiviteter är magnituden (energiemittansen och styrkan av jordbävningen mäts i Richterskalan), omgivningens proximitet till jordskalvets epicentrum och vågens svängningshastighet (Möller et al., 2000).

### 3.3 Påverkan i befintliga byggnader

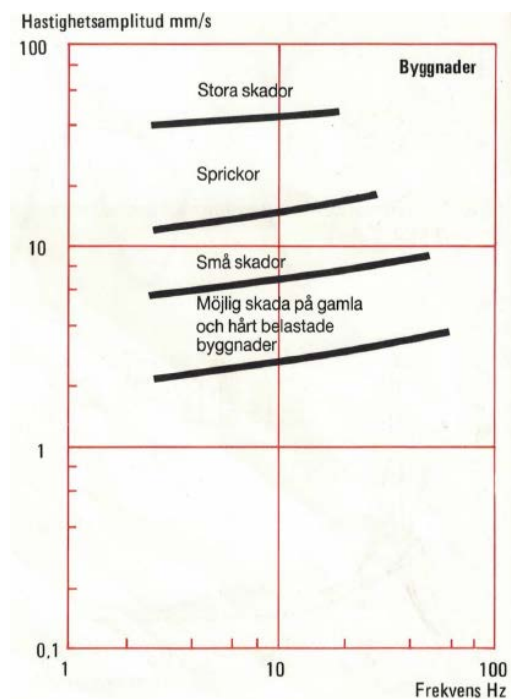
De olika vibrationskällorna och dess faktorer resulterar i störningar och olägenheter i omgivningen, främst i byggnader och konstruktioner (Massarsch & Carlsson, 1986). Vibrationer i byggnader, där den svaga länken som blir mest utsatt under vibrationsförloppet studeras först. Vissa delar av byggnaden är vibrationskänsliga och kan lätt ta skada under ett vibrationsförlopp exempelvis byggnadsmaterial, elektroniska utrustning och apparater.

Inom den svenska byggnationen kartlades ett värdesintervall av hastighetsamplituden för vibrationsvågorna. Värdet brukar sättas från 3 till 15 mm/s då detta är typisk för en byggnad (Massarsch & Carlsson, 1986). Ibland kan detta värdesintervall ändras beroende på vibrationskällan, till exempel sprängningsarbeten. Vanliga bristfälligheter som kan inverka på en byggnad under en vibrationspåverkan är sprickbildningar och materiella skador. Dessutom är vågresonans av stor betydelse, eftersom den kan bidra till störningar och olägenheter i byggnader, specifikt höga byggnader då vibrationerna amplifieras proportionellt mot byggnadens höjd.

Vibrationseffekten är proportionell mot byggnadshöjden och blir större ju högre upp man kommer, således bjälklag som ligger högst upp i byggnaden är det mest utsatta elementet för vibrationer (Massarsch & Carlsson, 1986). Detta eftersom byggnadens horisontala riktning är vekare än det vertikala, och har lägre värde på egenfrekvens som ligger vid 10 Hz eller lägre för en vanlig bostadsbyggnad (se figur 3.7). Gällande grundkonstruktionens uppläggning för en byggnad sätts den i påverkan av vibrationerna från jorden, men i de flesta fallen reduceras denna påverkan. Denna reduktion är störst hos vertikala rörelser och svängningsamplituder i byggnader som i grund och botten är pålade eller inkluderar ett källarutrymme, och har lägre effekt vid horisontala svängningar.

Även om denna reduktion är uppenbar vid genomgång från jord till grundbeläggning kommer vibrationer att påverka enstaka byggnadselement (Massarsch & Carlsson, 1986). Detta beror främst på att dessa byggnadsdelar har olika värden på styvhet, reduktionsförmåga och massa. I vissa fall aktiverar dessa vibrationer resonansfrekvenser på byggnadsmaterialen.

Bjälklagets egenfrekvens, som tidigare nämnts, är beroende av bredden, den svängande massan ovanför golvet samt dess position (Massarsch & Carlsson, 1986). Ju högre värden på massan och bredden av golvet, desto lägre blir egenfrekvensen. Enligt Massarschs och Carlssons *Vibrationer i jord* har det en praktisk metod redovisats i syfte att skaffa en bredare förståelse för golvets vibrationskänslighet, som i publikationen går kallas för "tåhåvningsprovet" (Massarsch & Carlsson, 1986). Detta kan utföras genom att vibrationen mäts från en person som står mitt på golvet på sina tår och slår golvet med hämlarna. Detta för att få en kännedom av golvets egenfrekvens och vibrationsreduktion.



**Figur 3.7:** Vibrationspåverkan och dess upplevelser på byggnader (Massarsch & Carlsson, 1986).

### 3.3.1 Omdöme av sprickbildning

Resultatet av vibrationspåverkan i befintliga byggnader medger olika typer av skador, särskilt sprickbildningar på grundläggningen, fasaderna och byggnadsmaterialen. Enligt en studie utförd i Schweiz har ett klassificeringssystem presenterats för olika skadegrad på byggnader (Leca & New, 2007). Dessutom beskriver studien skadegradens effekter. Utöver detta indelades sprickskadorna på byggnader i tre olika kategorier.

- Arkitekturskador: skador som påverkar materialets eller elementets visuella och estetiska egenskaper
- Funktionella skador: skador som har verkan på materialets eller elementets funktioner
- Strukturella skador: skador som påverkar egenskaper för stabiliteten och dess hållfasthetsförmåga

Sprickor sker främst på byggnadsmaterial som har en låg draghållfasthet (Leca & New, 2007). Exempelvis oarmerad betong, murverk och gipsbeläggningar. Bärande konstruktioner kan även bli negativt påverkade av sprickbildning som orsakar funktionsförsämring. Sprickbildningen kan även uppstå vid överdimensionerad armering.

Vid granskning av sprickans bredd kan man bedöma skadans mått, beskrivningen och dess påverkan (Leca & New, 2007). Tabellen nedan (tabell 3.2) visar en klassificering av olika skadetyper, dess egenskaper samt påverkningsgraden av dessa på vanliga byggnader.

**Tabell 3.2:** Beskrivning av varje skadegrad och dess påverkan utifrån sprickvidden (Leca & New, 2007).

Damage Type	Damage degree	Damage description	Crack width in mm (1)
0	Negligible damage	Micro-cracks	<0.1
1	Very slight damage	Architectural	<1
2	Slight damage	Architectural, to be treated	<5
3	Moderate damage	Functional	5–15, or several cracks >3mm
4	Severe damage	Structural	15–25 (2)
5	Very severe damage	Structural	>25 (2)

Note: (1) crack width is only one aspect of the damaged and cannot be used as a direct measurement.

(2) the number of cracks is also to be considered.

Vid sprickvidd mindre än 0.1 mm klassificeras skadan som mikrosprickor, (Grad 0). (Leca & New, 2007) Dessa är försumbara skador som har nästintill ingen påverkan på byggnadens stabilitet och dess viktiga funktioner såsom väggens isoleringsförmåga.

Grad 1-2 skador är lätta skador med en sprickvidd mellan 1-5 mm. Skadorna tillhör arkitekturskador och kan åtgärdas genom fyllning och renoveringsarbeten. Sprickorna är små, och kan enkelt upptäckas med god granskning.

Grad 3 är medelstora sprickskador med måttlig påverkan på byggnader. Sprickvidden ligger mellan 5-15 mm och tillhör gruppen skador på funktionella karaktärsdrag för byggnader. Öppning och fyllning av sprickorna måste utföras för att undvika försämring av kvalitet, beständighet, värmeisolering och vattentätet.

Grad 4-5 sprickor ligger mellan 15-25 mm och orsakar mer allvarliga skador. Den strukturella funktionen för byggnaden påverkas negativt med en signifikant försämring av stabiliteten. Sprickorna ställer till ett enormt hot mot boendens säkerhet. Byggnaden kan riskera bli instabil om sprickskadorna uppnår grad 5. Nödvändiga reparationsarbeten samt byten av skadade element bör göras omedelbart.

### 3.3.2 Sprickskador och kritiska töjningen

Den kritiska töjningen  $\varepsilon_{crit}$  har en stor betydelse i sprickbildning i synnerhet på byggnadsdelar (Leca & New, 2007). Vid sprickbildning i förhållande till skadegraden och det procentuella värdet på töjningen uppnår  $\varepsilon_{crit}$  sitt maximala värde. Tabell 3.3 visar förhållandet mellan skadegraden och den kritiska töjningens värde:

**Tabell 3.3:** Förhållandet mellan skadegraden och kritiska töjningen (Leca & New, 2007).

Damage type	0	1	2	3	4 & 5
$\varepsilon_{crit}$ (%)	$\leq 0.050$	$0.050 < \leq 0.075$	$0.075 < \leq 0.150$	$0.150 < \leq 0.300$	$0.300 <$

I praktiska fall kan det vara svårt att mäta och komma fram till  $\varepsilon_{crit}$  (Leca & New, 2007). Dock kan andra parametrar tilläggas för att skapa en korrelation såsom den tidigare nämnda skadegraden (Emanuelsson & Johansson, 2016). Vissa skador kan även påverka beteendet hos en byggnadsstruktur som är nära belägen till de underjordiska arbetsställen. En lösning till detta är att inte erbjuda dessa parametrar då det ständigt resulterar till allmänna värden.

## 3.4 Bedömning enligt Svensk Standard SS 4604866:2011

Vid bedömning av byggnaders vibrationspåverkan och dess riktvärden utifrån sprängningsförhållanden i Sverige används standarden SS 4604866:2011; *Vibration och stöt – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader* (SIS Swedish Standards Institute, 2011).

Standard i menighet är en princip för beräkning av riktvärden för de tillåtna vibrationsnivåerna med acceptabel svängningshastighet för byggnader i vertikal riktning i åtanke.

Kvantitativt bestäms riktvärdena för de tillåtna nivåerna för sprängningsinducerade vibrationer enligt följande samband:

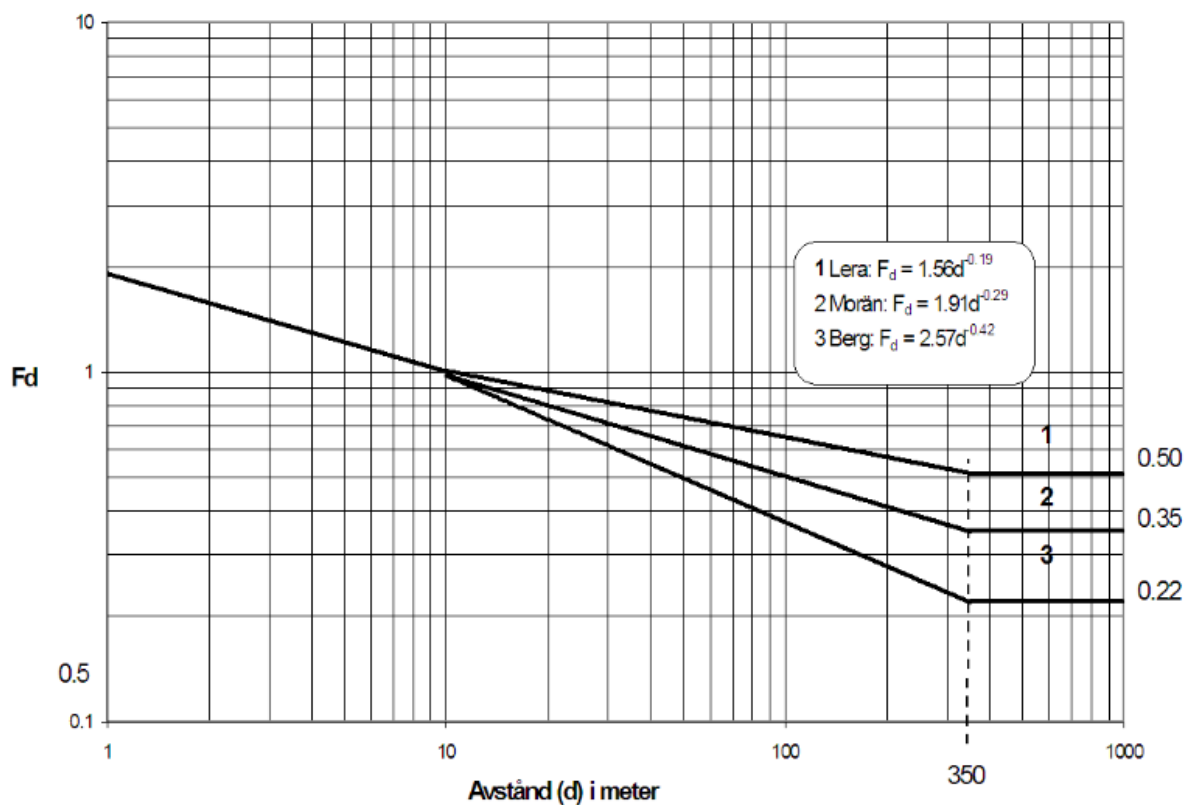
$$v = v_0 F_k F_m F_d F_t$$

$v_0$ : Den okorrigerade svängningshastigheten för jordarten vilken byggnaden är belägen på. Denna värde är konstant beroende på jordarten, enligt tabell 4.

$F_k$ : En faktor som iakttar vilken typ av konstruktion och dess kondition. Vanligtvis när arbetet involverar vanliga byggnader sätts värdet till 1,0. Dock vid arbete med tunga konstruktioner, såsom broanläggningar, sätts värdet till 1.7.

$F_m$ : En faktor som iakttar byggnadsmaterialet. Värdet för armerad betong, stål och trä sätts till 1.25 och för murbruk och oarmerad betong sätts värdet till 1.0.

$F_d$ : En faktor som iakttar distansen mellan byggnaden och sprängningsplatsen (sprängsalvan). Värdet utläses ur ett diagram avsedd för olika grundtyper enligt figur 3.8:



**Figur 3.8:** Förhållandet mellan avståndet och  $F_d$  (avståndsfaktorn) för olika grundtyper (Jern & Kilebrant, 2012).

$F_t$ : Är verksamhetsfaktorn och bestäms av tiden vilket sprängningsförloppet pågår i.

Värdesintervallen ligger mellan 0.75-1.

## 3.5 Åtgärder

Tidigare under föregående avsnitt har vikten lagts på jordens dynamiska egenskaper, eftersom geotekniker behöver analysera jordens inre struktur för att kunna identifiera riskobjekt i proaktivt syfte.

Att kontrollera de väsentliga parametrarna, till exempel utbredningshastigheten för diverse vibrationsvågor, är viktigt för geotekniska undersökningar samt mätningar (Möller et al., 2000). Inte minst att säkerställa dämpningen på ett sätt att de farliga vågorna inte reflekteras och återkommer från andra vibrationskällor. Detta sker med teoretiska beräkningar och utredningar både i laboratorium och i fält.

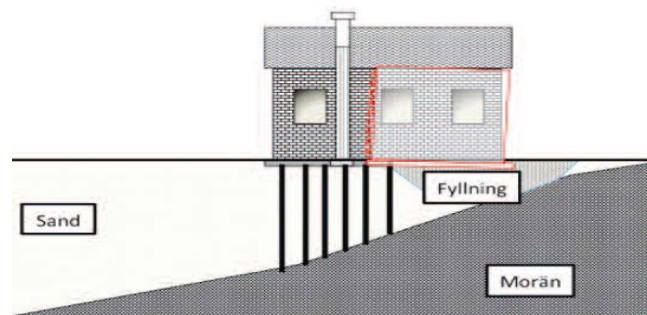
### 3.5.1 Genomförande

**Steg 1:** Utredda vilka problem som kan inträffa, skaffa information om omgivningen, identifiera problemkällor från tidigare erfarenheter och utnyttja gamla projekt som referenser (Massarsch, 2013).

**Steg 2:** Välja vilken typ av åtgärd som är relevant med hänsyn till ekonomiska och tekniska aspekter (Massarsch, 2013).

**Aktiva åtgärder:** Dessa tillämpas i byggnaden genom att ändra grundkonstruktionen, till exempel styvare grundläggning med hjälp av pålning i marken (se figur 3.9), grundläggningens dimensioner eller armering av grundplatta (Massarsch, 2013).

*Korrigeringsfaktorer* som *materialfaktorn*  $F_m$  från Svensk Standard SS 4604866:2011, delar in byggnadsmaterialen efter vibrationskänslighet och är viktig för riskbedömning inför val av material under projekteringsfasen.



**Figur 3.9:** Sättningsdifferensen mellan pålanläggning och fundament på sand vid vibrationspåverkan (Massarsch, 2013).

Genom att ändra projektets förutsättning kommer vibrationens storlek att reduceras markant i grundläggning, men att fullständigt eliminera vibrationseffekten förblir svårt (Massarsch, 2013).



**Passiva åtgärder:** Dessa innebär en ordning av ett isoleringssystem som en dämpningsmetod mellan vibrationskällan och blivande konstruktion, helst så nära vibrationskällan som möjligt (Möller et al., 2000). Åtgärder kan vara en isolering i form av sponter, tryckbankar, betongbarriär eller slitsar som förekommer i åtskilda varianter, såsom styva eller mjuka, med avseende på projekt.



**Figur 3.10:** Mjukslitsar som vibrationsdämpare vid installation (Geo Risk & Vibration Scandinavia AB, n.d.).

Styva slitsar brukar innehålla skivor av cement eller kalkpelare och är anpassade till att reducera amplituden i de kommande vågorna (Möller et al., 2000). Detta betyder att energin som går förbi slitsarna kommer att minska drastiskt.

Dock släpper mjuka slitsar, även kända som gasfyllda kuddar, endast igenom små mängder vågor och reflekterar resten till sina ursprungliga källor. (se figur 3.11), (Geo Risk & Vibration Scandinavia AB, n.d.). Likväl måste skivorna i slitsarna vara tillräckligt djupa för att undvika skapandet av nya problem.

## 4 Liquefaction och tillämpning av modellförsök (fallstudie)

I det här avsnittet kommer liquefactionfenomenet (förvätskning) att presenteras med två scenarier med hjälp av ett modellexperiment som utgångspunkt. Första scenariot kommer att föreställa en byggnation på sand som fyllningsmaterial (lös lagrad sand) med hög grundvattennivå, medan det andra ska framställa en byggnation nära havet. Båda försöken ska utsättas för syntetiska vibrationspåverkan (skakning) vilka ska illustrera jordbävningar i verkligheten.

### 4.1 Inledning

Innan demonstrationen av modellförsöket bör vi ha vetskap om liquefaction, dess egenskaper och hur den beter sig i friktionsjord.

#### 4.1.1 Allmänt om liquefaction

Liquefaction (förvätskning) innebär en omvandling till vätskeform, när finkorniga jordar (lös vattenmättad silt eller finsand) får en snabb tryckförväxling i porvattnet, eller utsätts för dynamisk kraft av till exempel pålning, jordbävning mm (Möller et al., 2000). Då förloras jordens styvhet och hållfasthet, vilket resulterar i bildning av flytande vätska med en hög massa. Detta fenomen är ganska oförutsägbart, eftersom den dyker upp på flera olika aspekter och sker oftast i ett jordskikt på 3-5 m djup under markytan samt vid en marklutning på över 3 grader kan ett jordras ske.

Det är väsentligt att studera jordens uppbyggnad med sin spänningskondition för att kunna analysera och värdera egenskaper för liquefaction i jorden (Möller et al., 2000). En jord innehåller enskilda partiklar som är i kontakt med andra, vilka kallas för kontaktpunkter. Den tyngd som överliggande jord medför skapar kontakttryck med närliggande partiklar och av dessa krafter bildas hållfastheten i jordens struktur.

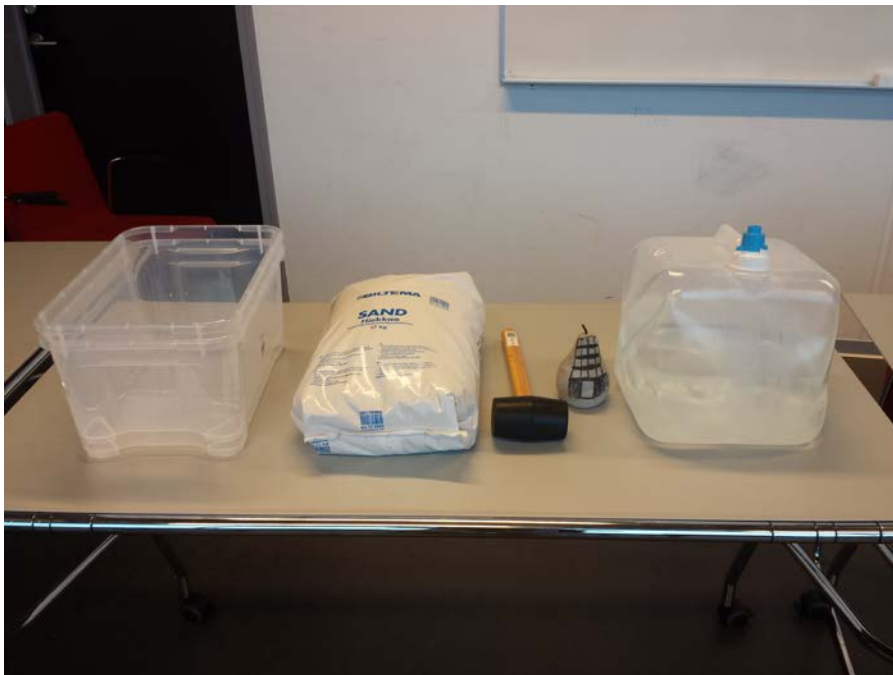
Vid strukturnedbrytning av den löst lagrade finkorniga jord, förloras kontaktpunkten mellan partiklarna (Möller et al., 2000). Partiklarna strävar efter en stabil lagringsform. Men på grund av tidsbrist för porvattnet att dränera ut från partiklarna kommer porvattnet att bli instängt mellan de individuella partiklarna och hindra dem från att komma i kontakt med varandra på nytt. Detta leder till uppmjukning och till reduktion av hållfastheten och jorden kollapsar. Ett exempel på detta är dammen i San Fernando som fick ett undervattenskred efter en jordbävning 1971 (Möller et al., 2000).

## 4.2 Modellförsökets syfte

Avsikten med detta modellförsök är att illustrera en bild av hur skadlig liquefaction är på byggnader samt få en bredare uppfattning av olika sättningar som skapas av detta fenomen. Dessa sättningar kommer att analyseras i synnerhet för framtidens riskbedömning samt i proaktivt ändamål.

## 4.3 Utrustning

- Två genomskinliga plastlådor
- Finsand
- Vatten
- Prydnad/modell som föreställer en byggnad
- Gummiklubba



**Figur 4.1:** Modellförsökets utrustning (Egen bild).

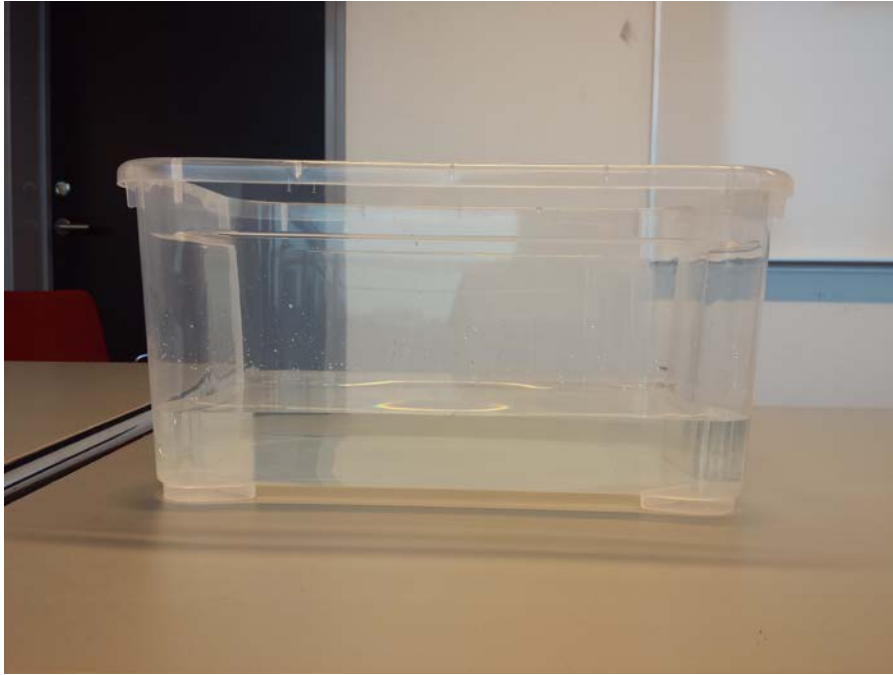
## 4.4 Utförande

### Scenario 1 (Grundvatten):

Till att börja med hälls vattnet, som ska efterlikna grundvattnet, till approximativt  $\frac{1}{4}$ -del av lådans totala höjd (se figur 4.2-4.3). Därefter hälls successivt en mängd finsand i lådan tills vattenytan täcks och ett litet samt torrt, 3-5 cm högt, sandlager skapas ovanpå (se figur 4.4).



**Figur 4.2:** Påbörjan med scenario 1 (Egen bild).



**Figur 4.3:** Fas 1; grundvattnet (Egen bild).



**Figur 4.4:** Finsanden hälls på grundvattnet (Egen bild).

Vid helikopterperspektivet skall inget vatten eller fuktig sand synas överhuvudtaget. Detta ska föreställa det sand, mark som finns över havet oavsett mängden grundvatten under. På sidorna kan det ses ungefär 4/5-del av sanden fuktig och blöt och de resterande 1/5-del som sagt torr sand (se figur 4.5).



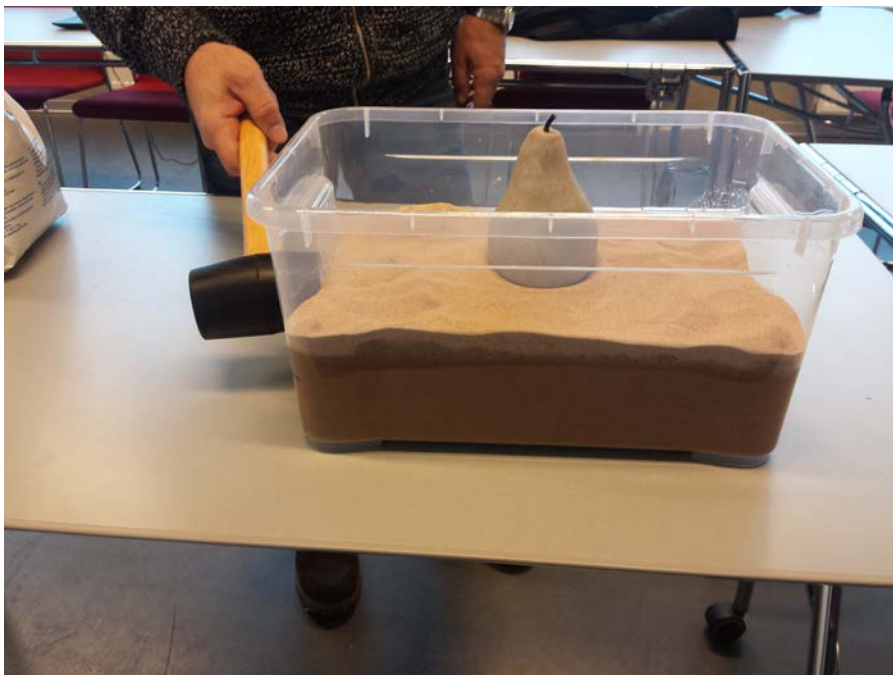
**Figur 4.5:** Fas 2; Sektion för den torra sandytan och dess grundvattennivå (Egen bild).

Efteråt skall prydnaden, som då föreställer byggnaden, appliceras på sandytan (se figur 4.6). Detta eftersom denna modell specifikt ska föreställa en byggnad som byggs på torr sand. När lådan inte utsätts för jordbävning står byggnaden stilla på den torra sandytan.



**Figur 4.6:** Fas 3; Föreställda byggnaden på sandytan (Egen bild).

Slutligen för att utsätta modellen för jordbävning slås en av lådans sidor frekvent (3 gånger/sekund) med gummiklubban, under ett tidsintervall på 10 sekunder (se figur 4.7). Detta skapar skakning vilket ska föreställa en naturlig jordbävning.



**Figur 4.7:** Påbörjan av jordbävningens skede (Egen bild).

## Scenario 2 (Havsvatten):

Under detta experiment ska måttlig mängd sand hällas i lådan, till approximativt 1/10-del av lådans volym (se figur 4.8-4.9). Efter detta skapas en höjd med 3-4 cm av sanden i lådan, som ska föreställa en ö eller kustlinje och sedan packas manuellt. (se figur 4.9-4.10).



**Figur 4.8:** Fas 1; Påbörjan med Scenario 2 och "sandön" (Egen bild).





**Figur 4.9:** Fas 1; Sett ur helikopterperspektivet (Egen bild).

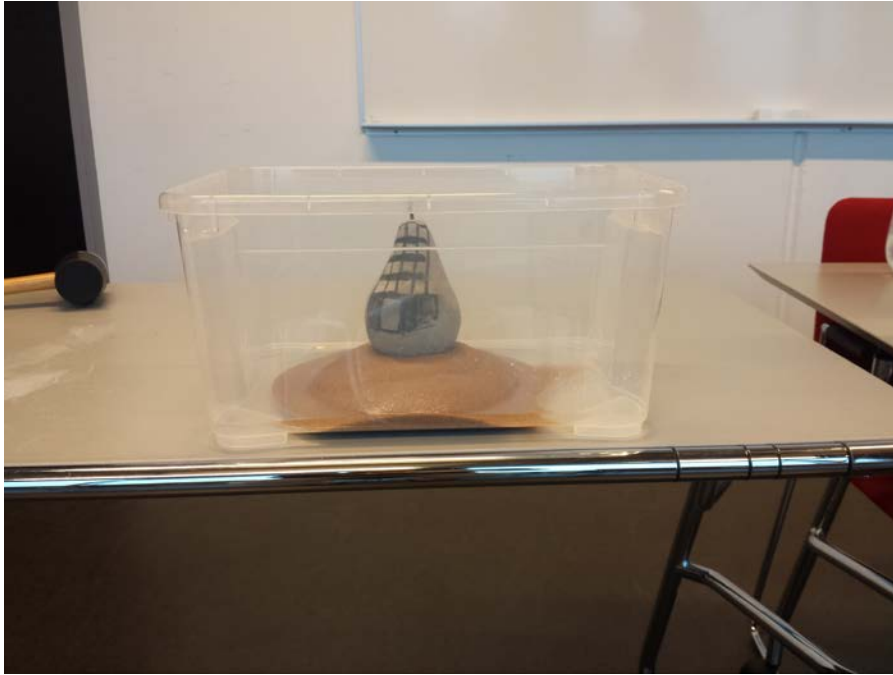


**Figur 4.10:** Manuell packning av sanden (Egen bild).

Därefter skall byggnadsmodellen appliceras på denna ö (se figur 4.11). Precis som den beskrivna principen under Scenario 1, skall denna modell föreställa en byggnad vilket står helt stilla utan någon jordbävningpåverkan på den torra sanden. På "dalen" omkring ön hålls vatten till en måttlig nivå, vilket ska föreställa havet runt omkring (se figur 4.12).



**Figur 4.11:** Fas 2; föreställda byggnaden på sandön (Egen bild).



**Figur 4.12:** Fas 3; havet runtom ön (Egen bild).

Precis som utfört vid Scenario 1, utsätts en av lådans sidor för skakningar med gummiklubban, med en approximativ slaghastighet på 3 gånger/sekund under tio sekunder. Dessa slag illustrerar istället en havsbävning i området (se figur 4.13).



**Figur 4.13:** Påbörjan av havsbävningens skede (Egen bild).

## 4.5 Resultat & analys

Resultaten av båda scenarion tyder på ett katastrofalt händelseförlopp. Inte mer än sekunder in på den syntetiska jordbävningen och havsbävningen sjönk byggnadsmodellen i sanden. Detta är på grund av att sandens porer från grundvattennivån är helt vattenmättade. Under scenarion ett steg grundvattennivån på grund av den skapade skjuvspänningen från skallet vilket resulterade i att grundvattnet mellan sandkornen pressades upp. En stegrad grundvattennivå innebär uppmjukning, hållfasthets- och styvhetsförlust av sanden samt eventuella översvämningar vilka alla försämrar hållfastheten och leder till sjunkning av byggnaden mot den förvätskade sanden (se figur 4.14).



**Figur 4.14:** Resultat av Scenario 1 (Egen bild).

Under Scenario två försvann ön och blev uppslukad av havsvattnet, trots den manuella packningen den fick under genomförandet. Detta sker på grund av att när sanden utsätts för vibrationer kommer sandkornen att sjunka neråt och packas ihop vilket gör att vattnet pressas upp mellan sandpartiklarna och gör sandytan förvätskad. Detta fick den syntetiska havsbävningen att orsaka samma nämnda problem under scenarion ett och därmed sjönk byggnadsmodellen (se figur 4.15).





**Figur 4.15:** Resultat av Scenario 2 (Egen bild).

Resultat från scenario två kan likställas med byggandet av den konstgjorda sandön Palm Jumeirah i Dubai (National Geographic, n.d.). Sanden på den konstgjorde berggrunden av block var i lös lagrad form och måste vara hårdpackad innan byggnationen påbörjas. Projektledaren Robert Berger berättar i dokumentärvideon att ingenjörerna måste hitta ett sätt att packa sanden hårt innan byggstart. Om detta inte utförs kommer ön att dränkas ner under vattnet om en jordbävning inträffar i området, eftersom Dubai ligger vid en kollisionszon. Han bevisade detta genom att ta ett sandprov i en skål som skulle föreställa ön. Därefter hällde han en mängd vatten runt om sandprovet som skulle simulera havet. När han skakade skålen, vilket då föreställde jordbävningen, uppslukades hela ön under vattnet. I det här fallet beskrevs fenomenet liquefaction.

Enligt teoretiska förutsättningar borde byggnadsmodellen sjunka jämt neråt vid hållfasthetsförlust av jorden, men på båda scenarierna insågs det att modellen lutade åt sidan i samband med den syntetiska jordbävningen.

Det finns två teorier som förklarar anledningen till lutandet av byggnadsmodellen:

Första teorin beror på att kraften från vibrationskällan(gummiklubban) har startats från högersidan av lådan, vilket orsakade ojämna impulser och skakningar mot byggnadsmodellen. Detta gjorde att byggnaden lutade sig åt sidan i samband med sänkningen.

Andra teorin bygger på att formen av byggnadsmodellen (päronform) har en mindre kontaktyta på botten jämfört med resten av modellen, vilket leder till instabilitet vid kraftfulla skakningar. Då sker en lutning av modellen.

## 5 Diskussion

I arbetet har det pekats på samtliga vibrationskällor som negativt påverkar byggnader, vilka orsakar vidare sättningsproblem. Eftersom det finns många faktorer som inte går att simulera i laboratorieförsök, förutom utvärderingen av jordens momentana dynamiska egenskaper (exempelvis vibrationens frekvens, amplitud, svängningshastighet och skjuvvågsfart), är det ganska svårt att evaluera resultaten och dra tydliga slutsatser för andra externa påverkan såsom höjning av grundvattennivån i jord eller kraftig nederbörd.

R. K. Massarsch klarlägger att det är såväl den relativa förskjutningen av jordpartiklarnas skjuvtöjning som framkallar sättning i friktionsjord som hur ofta det blir utsatt under påverkningsprocessen (Massarsch, 2013). Skjuvtöjningens storlek och antalet lastcykler för svängningar är då orsaken till sättning under en cyklisk eller dynamisk lastpåverkan.

Inom jordbävningsforskningen har enbart få undersökningar gjorts vad gäller sättningar och dess problematik, vilket är ett intresseväckande forskningstema (Massarsch, 2013). Denna forskning kan även bidra till flera åtgärdsmetodiker och lösningar till olika sättningar och andra stabilitetsproblem i förebyggande syften men även i befintliga byggnader.

Fallstudien har genomförts med ett modellförsök som presenterar hur sättningar kan ske även i en välgjord grundläggning av byggnader. Försöket har även bidragit till en visuell analys av jordens instabilitet (förmjukning) vid ett jordbävningsförlopp med en ökning av grundvattennivån, vilket ledde till jordförvätskning (liquefaction). Som en jämförelse med verkligheten är den enorma jordbävningen i Japan 2011, som orsakade mycket svåra skador på infrastrukturen på grund av jordflytning i många städer (Yasuda et al., 2012). Denna typ av jordbävning satte igång som en väckarklocka till hela världen.



## 6 Slutsats

Med hjälp av analys av jordens cykliska och dynamiska egenskaper samt modellförsöken, vilka har redovisats i tidigare avsnitt, har vi dragit flera slutsatser som tyder på sättningar och negativa påverkan i sand.

Cykliska och dynamiska belastningar bidrar till sättningar på sand som fyllningsmaterial och löst, lagrad sand, specifikt vid ett högt vatteninnehåll. Exempel på sådana belastningar är trafiklast eller seismisk last.

Jordens deformationsegenskaper sker både momentant och varaktigt. Vid båda fallen sker olika påverkan på grund av att vibrationsvågen förflyttar sig antingen linjärt eller icke-linjärt. Vid icke-linjära förhållanden ska antalet cykler av dynamiska laster vara hänsynstaget, då det leder till enorma massrörelser i grunden.

Under vibrationspåverkan från en viss källa till den befintliga byggnadens grundläggningssätt sker ofta en påtaglig reduktion av vibrationens effekt. Men eftersom byggnaden innehåller flera byggnadselement med olika styvheter och vibrationskänslighet, kan vibrationseffekten fortfarande påverka dessa egenskaper. Detta på grund av vågens resonansfrekvens.

Liquefaction är ett oförutsägbart hot mot byggnader som sker utan förvarningar i samband med jordbävningar i löst lagrad sand. Modellförsöket gav en klar bild av detta och utifrån det kunde man studera de katastrofala händelserna.

Klimatförändringarna påverkar långsiktigt jordens karakteristiska egenskaper som till exempel ökning av grundvattennivån, havsnivåer i samband med kraftiga, långa periodiska nederbörd, samt smältning av glaciärer som ger upphov till flera seismiska aktiviteter.

Arbetet har sammanfattat olika åtgärdsmetodiker som utförs både i planeringsfas och även i befintliga, gamla byggnader, i syfte att identifiera risker som geotekniker kan bortse ifrån.



# Referenser

- Emanuelsson, A. & Johansson, M., 2016. *Metodik för riskklassificering av byggnader i samband med en grundvattensänkning*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.
- Fellenius, B.H. & Massarsch, R.K., 2008. *Ground vibrations induced by impact pile driving*. Arlington, Virginia: The Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering Missouri University of Science and Technology.
- Forsblad, L., 1987. *Packning av jord- och bergmaterial*. Stockholm: AB Svensk byggtjänst.
- Geo Risk & Vibration Scandinavia AB, n.d. *Vibrationsisolering*. [Online] Available at: <http://www.georisk.se/web/page.aspx?refid=56> [Accessed 19 Januari 2017].
- Jern, M. & Kilebrant, M., 2012. *Risikanalyser och vibrationsutredning för Cementas bergtäkt, Skövde*. Rapport 1231 2033 R 01. Skövde: CEMENTA AB Nitro Consult.
- Johansson, F., 2010. *Sättningar i sulfidjord - - uppföljning och utvärdering av sättningars storlek och tidsförlopp, väg 760 i Norrbotten*. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.
- Larsson, R., 2008. *Jords Egenskaper*. Linköping: STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT.
- Leca, E. & New, B., 2007. Settlements induced by tunneling in Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), pp.119-149. DOI: 10.1016/j.tust.2006.11.001.
- Lundqvist, J., 2006. *Geologi: Processer - Utveckling - Tillämpning*. 4th ed. Stockholm: Studentlitteratur.
- Magnusson, O. & Sällfors, G., 1983. Förbelastning av jord. *Bygghälsorådet*, 17, p.12.
- Massarsch, K.R., 2013. Sättningar i friktionsjord vid vibrationspåverkan. *SGF:s Markvibrationskommitté*, pp.12-18.
- Massarsch, R. & Carlsson, B., 1986. Vibrationer i jord. *Bygghälsorådet*, p.15.
- Meijer, K. & Åberg, A., 2007. *Krypsättningar i lera - en jämförelse mellan två beräkningsprogram*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola, Avdelningen för geologi och geoteknik.
- Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P.-E. & Moritz, L., 2000. *Geodynamik i Praktiken*. Linköping: SGI, Statens Geotekniska Institut.
- National Geographic, n.d. *Megastructures Documentary Palm Island Dubai*. [Online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=0BXGh0EYJtE> [Accessed 28 Oktober 2016].
- SGI, 2016. *Jordarter*. [Online] Available at: <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jords-hallfasthet/lera-och-kvicklera/> [Accessed 20 Oktober 2016].
- SGU, 2015. *Grus, sand och krossberg*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning.

SIS Swedish Standards Institute, 2011. *Vibration och stöt - Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader*. Utgåva 3.

Stewart, J.P., Whang, D.H., Moyneur, M. & Duku, P., 2014. *Seismic compression of as-complicated fill soils with variable levels of fines content and fines plasticity*. CUREE Publication No. EDA-05. Los Angeles: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering University of California; Department of Civil and Environmental Engineering.

Sulander, R. & Olivecrona, S.A., 2016. *Numerical analysis of vibrations due to impact pile drivning*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.

Trafikverket, 2002. *Väguredning med miljökonsekvensbeskrivning*. Umeå: Umeå Kommun.

Wersäll, C., Massarsch, R.K. & Bodare, A., 2009. Planering och övervakning av sprängningsarbeten i bebyggda områden. *SGF:s Markvibrationskommitté*, pp.64-72.

Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K. & Kanemaru, Y., 2012. Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake. *Soils and foundations*, 52(5), pp.793-810. <http://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.004>.