SBUF

ID: 13564/A2018-25

MINIMERING AV MARKVIBRATIONER VID VIBRODRIVNING AV SPONT – PRAKTISKA RÅD

Fanny Deckner

2020-11-07

SBUF stödjer
forskning & utveckling
som leder till
praktisk handling

FÖRORD

Slutsatserna och de praktiska råden presenterade i denna rapport är framtagna utifrån litteraturstudier, forskningsresultat, fältförsök och projektgruppens mångåriga praktiska erfarenhet inom ämnet. De praktiska råd som presenteras i denna skrift ska inte betraktas som facit utan just råd. Råden kan användas vid framtagande av utredningsdokument, projektering och vid utförande men de ska alltid användas med omdöme och eftertanke utifrån rådande förhållanden i aktuellt projekt.

Arbetet har utförts som ett forskningsprojekt som samfinansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Trafikverkets Branschsamverkan i Grunden (BiG). Projektet har utförts i samverkan med entreprenörer, konsulter, beställare och högskola (KTH).

Följande har medverkat i projektet:

- Fanny Deckner, GeoMind – projektledare
- Staffan Hintze, NCC – expertstöd
- Kenneth Viking, Trafikverket – expertstöd
- Kent Allard, Metrometrik AB – instrumentering
- Kent Lindgren, KELI-Mätteknik – instrumentering
- Jorge Yannie - fältplanering
- Haftom Tesfay Tsegay – examensarbetare
- Anian Kriege – examensarbetare

Följande har medverkat i projektets referensgrupp: Stefan Larsson, KTH; Olle Båtelsson, Trafikverket; Anne Unverzagt, Hercules; Nils Rydén, PEAB/LTH; Christoffer With, SGI; Johan Olovsson, Besab; William Bjureland, Skanska och Håkan Eriksson, GeoMind.

Ett tack riktas till Hercules Grundläggning som bistått med arbetsplats, utrustning och personal vid fältförsöken.

Stockholm, Oktober 2020

SAMMANFATTNING – PRAKTISKA RÅD

Detta forskningsprojekt har resulterat i ett antal praktiska råd i syfte att minimera uppkomsten av markvibrationer vid vibrodrivning av spont. Råden som presenteras i rapporten är tillämpbara i alla skeden av byggprocessen; från riktigt tidiga skeden, såsom vid upprättande av miljökonsekvensbeskrivning och riskanalys, vidare till projektering och slutligen utförande.

Det är viktigt att både minimera storleken på uppkomna vibrationer samt tiden som vibrationerna pågår, varför följande råd fokuserar på endera eller båda av dessa. Samtliga nedan presenterade råd finns mer utförligt beskrivna under kapitel 5 och 6.

Baserat på tidigare studier och forskning samt på de fältförsök som är gjorda inom ramarna för det här projektet föreslås följande åtgärder i syfte att minimera markvibrationer i samband med vibrodrivning:

- Förborra genom, alternativt ta bort, fyllning som innehåller hinder eller består av riktigt fast material då vibrationerna i marken tenderar att öka då spontfoten penetrerar ett fastare jordlager eller stöter på hinder.
- Driv med så högt excentriskt moment som möjligt. Ett högre excentriskt moment resulterar i både högre neddrivningshastighet och lägre uppmätta vibrationsnivåer.
- Driv med så hög frekvens som möjligt för att minimera risken för resonansproblem i jord och närliggande konstruktioner.
- Använd en så kallad resonansfri vibrator, där möjlighet finns att reglera det excentriska momentet i samband med uppstart och avstängning av maskinen.
- Minimera friktion i spontlåsen. Spontlås ska vara rena och i god kondition samtidigt som operatören ska vara noggrann med lutning och vinkel på spontplankan i relation till redan installerad spontplanka.
- Vid användning av grävmaskinsmonterad vibrator försök att greppa från toppen av plankan i så stor utsträckning som möjligt.
- Undvik att driva spont in i fast morän eller mot berg mer än nödvändigt då maximala vibrationsnivåer ofta uppstår då spontfoten ska penetrera ett fastare jordlager.
- Efterslagning av spont med fallhejare bör minimeras då det tenderar att ge upphov till vibrationer såväl som skador på sponten.
- En erfaren och kunnig operatör, som har vana av den aktuella maskinen, har större chans att få ner sponten på ett skonsamt och effektivt sätt.
- Vid riktigt känsliga förhållanden och stora konsekvenser vid överskridande av gränsvärden för vibrationer; välj installation med borrning eller pressning.

Vidare så visas i samtliga fältförsök att generellt så avtar markvibrationerna snabbt med avståndet från spontlinjen. I rapporten presenteras ett verktyg som kan användas för att prognostisera vibrationsnivåer och dess avtagande med avståndet.

Vid osäkerhet rörande risken för problem med markvibrationer rekommenderas provspontning, både för att undersöka drivbarheten och uppkomsten av markvibrationer.

I de fall då en provspontning inte är möjlig men då risken för vibrationsproblem är överhängande rekommenderas realtidsmätningar där maskinoperatören kan se uppkomna vibrationer i realtid och utifrån det anpassa installationen för att erhålla lägsta möjliga vibrationspåverkan.

SUMMARY – PRACTICAL ADVICE

This research project has resulted in several practical advices aimed at minimizing ground vibrations during vibratory sheet piles driving. The advices presented in the report are applicable at all stages of the construction process; from early stages, such as in the preparation of environmental impact assessment and risk analysis on to design and finally production.

It is important to both minimize the vibration magnitude as well as the duration of the vibration. Hence, the following advices focus on either one or both. All the advices presented below are described in more detail in Chapters 5 and 6.

Based in previous studies and research as well as on the full-scale field tests carried out within the framework of this project, the following measures are proposed in order to minimize ground vibrations during vibratory driving:

- Pre-drill through, or remove, fill that contains obstacles or consists of really stiff materials as the vibrations in the ground tend to increase as the sheet pile penetrates a stiffer soil layer or encounters obstacles.
- Drive with as high an eccentric moment as possible. A higher eccentric moment results in both higher penetration speed as well as lower ground vibration levels.
- Operate at as high as frequency as possible to minimize the risk of resonance problems in the soil and nearby structures.
- Use a so-called resonance-free vibrator, where it is possible to regulate the eccentric moment during start and stop of the machine.
- Minimize friction in the interlocks. Interlocks must be clean and in good condition and at the same time the operator must be careful with the inclination of the driven sheet pile in relation to the already installed sheet pile.
- When using an excavator-mounted vibrator, try to grip from the top of the sheet pile as much as possible.
- Avoid driving the sheet pile into stiff moraine or bedrock more than necessary as maximum vibration levels often occur when the sheet pile penetrates a stiffer soil layer.
- Using impact driving to drive the sheet pile further when vibratory driving is no longer should be avoided or minimized as it tends to give increased ground vibrations as well as damage to the sheet pile.
- An experience and knowledgeable operator, who is used to the machine in question, has a greater chance of getting the sheet pile down in a gentle and efficient way.
- In really sensitive conditions and when the consequences of exceeding limit values are great; select installation by drilling or pressing.

Furthermore, it is shown in all field tests that in general the ground vibration magnitude decreases rapidly with increasing distance from the sheet pile line. The report presents a tool that can be used to predict vibration levels during vibratory sheet pile driving.

In case of uncertainty regarding the risk of problems with ground vibrations, a sheet piling test driving is recommended, both to investigate drivability as well as the level of ground vibrations induced.

In cases where a test driving is not possible, but the risk of vibration problems is imminent, real-time measurements are recommended. The machine operator can see vibrations levels occurring in real time and based on that adapt the installation to obtain the lowest possible vibration level.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord ... III
Sammanfattning – praktiska råd ... V
Summary – practical advice ... VII
Innehållsförteckning ... IX
1 Introduktion ... 1
1.1 Bakgrund ... 1
1.2 Problemställning ... 1
1.3 Mål och syfte ... 2
1.4 Begränsningar ... 3
2 Drivning av spont ... 5
2.1 Introduktion ... 5
2.2 Installation med vibrodrivning ... 5
3 Vibrationstransport i jorden ... 11
3.1 Introduktion ... 11
3.2 Dämpning ... 12
3.3 Prognosmodeller ... 13
4 Fältförsök ... 15
4.1 Introduktion ... 15
4.2 Instrumenteringssystem ... 15
4.3 Uppsala 2018 ... 16
4.4 Västerås 2019 ... 21
4.5 Sammanfattning ... 27
5 Resultat och diskussion ... 29
5.1 Introduktion ... 29
5.2 Inverkan av vibratorutrustning ... 29
5.3 Inverkan av spontparametrar ... 30
5.4 Inverkan av geotekniska förhållanden ... 30
5.5 Mätning i fält ... 31
6 Slutsatser och förslag på fortsatta studier ... 33
6.1 Introduktion ... 33
6.2 Slutsatser ... 33
6.3 Förslag på fortsatta studier ... 34
Referenser ... 35

1 INTRODUKTION

1.1 BAKGRUND

Många infrastruktursatsningar och byggprojekt innefattar djupa schakter, ofta i närhet till befintliga byggnader och andra konstruktioner. Detta innebär att dessa byggprojekt i de flesta fall kräver stödkonstruktioner, samtidigt som närheten till befintligheter ställer krav på omgivningspåverkan. I dagsläget är vibrodriven spont den mest kostnadseffektiva lösningen för en större stödkonstruktion. Installation av spont genom vibrodrivning ger dock upphov till markvibrationer.

Markvibrationer i samband med vibrodrivning av spont är idag ett stort problem då dessa vibrationer riskerar att sprida sig till närliggande byggnader och konstruktioner där de kan orsaka skada och/eller obehag för människor. Men framförallt så leder överstigna gränsvärden gällande vibrationer till stillestånd i produktion med stora förseningar och fördyrningar som följd.

Under det senaste 10 åren har forskning bedrivits vid avdelningen för Jord- och Bergmekanik på KTH inom ämnet vibrationer i samband med spontdrivning. I en avhandling från KTH (Deckner, 2017) studeras överföring av vibrationer i samband med vibrodrivning av spont. Avhandlingen ger en ökad förståelse kring vibrationsöverföring från spont till jord. Samtidigt identifieras att kunskapen om överföring av vibrationer från drivutrustning till spont fortfarande är begränsad. Drivutrustningen är en av få saker som kan varieras i samband med drivningen. Idag finns inte tillräcklig kunskap om drivutrustningens inverkan på uppkomna markvibrationer för att kunna välja vibratortyp och vibratorparametrar för att minimera uppkomna markvibrationer och minska risken för skador, obehag eller stillestånd.

För att möjliggöra det fortsatta användandet av vibrodriven spont i tätbebyggda områden krävs praktiska råd i syfte att minimera uppkomsten av vibrationer från drivningen. I dagsläget är det utlämnat till den enskilda maskinoperatörens skicklighet och erfarenhet att driva sponten med så liten vibrationspåverkan som möjligt.

1.2 PROBLEMSTÄLLNING

I stort består utrustningen vid vibrodrivning av en vibrator, en spontmaskin samt ett kraftaggregat. De parametrar som främst kan varieras är kopplade till vibratorn. För de flesta spontvibratorer är drivfrekvensen samt excentermassornas placering i förhållande till varandra oftast variabel, vilket påverkar drivkraften och förskjutningsamplituden.

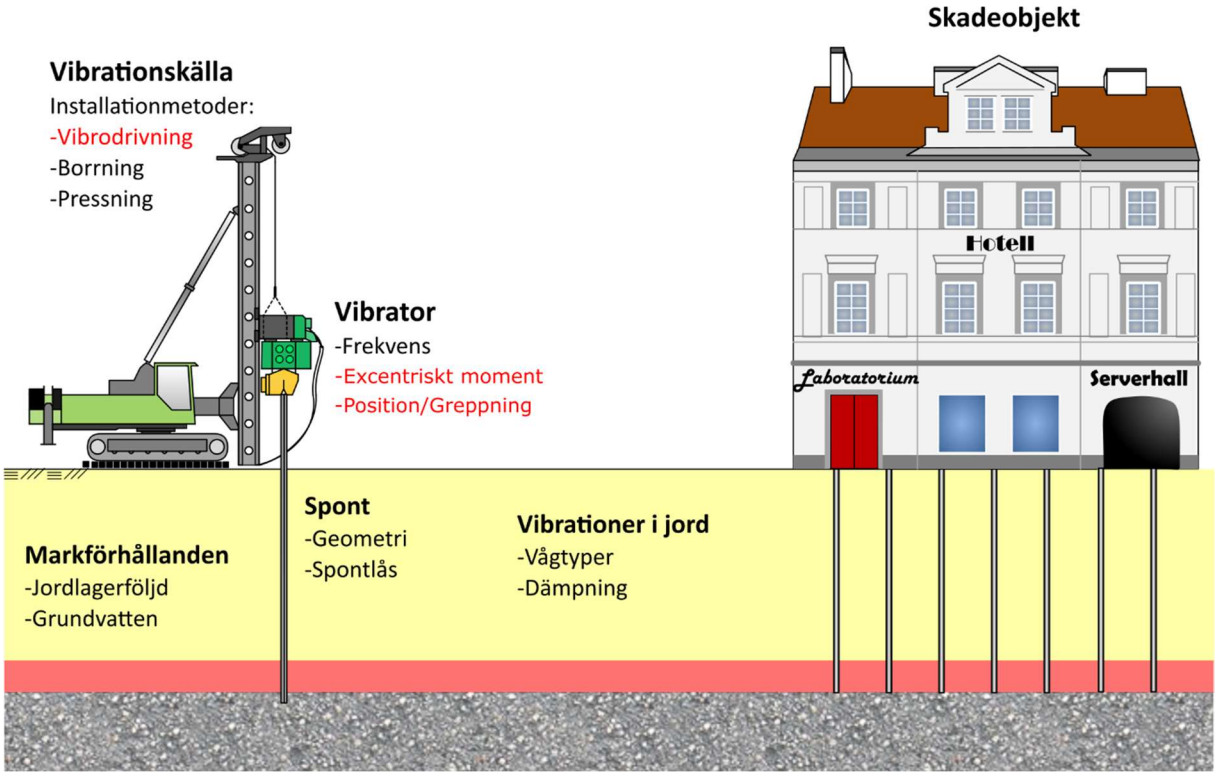
Frekvensens inverkan har tidigare studerats, däremot saknas relevanta studier av övriga vibratorparametrars inverkan på uppkomna markvibrationer.

Föreliggande rapport fokuserar på faktorer som kan kontrolleras i praktiken och då i första hand installationsparametrarna excentriskt moment och vibratorns position. Detta illustreras i Figur 1.1. Det excentriska momentet ger ett bra mått på den vibrationskraft som genereras och även på amplituden. Excentermomentet kan dock främst varieras på större vibratorer. På de alltmer vanliga grävmaskinsmonterade vibratorerna finns oftast inte möjlighet att variera excentermomentet. På dessa maskiner är istället sättet att greppa sponten, dvs vibratorns position, det som i första hand kan varieras.

1.3 MÅL OCH SYFTE

Målet med detta forskningsarbete är att ta fram verktyg och riktlinjer för minimering av uppkomst av markvibrationer kopplat till befintlig maskinpark hos Sveriges grundläggningsentreprenörer. Detta uppnås genom utförande av två fältförsök samt tillgodogörande av tidigare forskning inom området.

Projektet syftar primärt till att klargöra vibratorns och dess parametrars inverkan på uppkomsten av markvibrationer i samband med vibrodrivning av spont. I huvudsak har excentermomentet, det vill säga produkten av excentermassornas massa och deras avstånd från rotationsaxeln, studerats. Vidare har också sättet att greppa sponten i samband med drivning med en grävmaskinsmonterad vibrator studerats.



Figur 1.1 Faktorer som påverkar uppkomsten av markvibrationer i samband med spontdrivning, efter Deckner (2017).

1.4 BEGRÄNSNINGAR

Studien är begränsad till vibrodriven stålspont, som är det vanligaste i Sverige.

Rapporten behandlar vibrationer som uppkommer i spontvibratorn och sedan överförs via sponten till jorden. Överföring av vibrationer till närliggande byggnader eller andra konstruktioner liksom vibrationers påverkan på dessa behandlas ej.

Stora delar av arbetet är baserat på försök utförda i svenska förhållanden och erfarenheter från Sverige. Således är resultaten i första hand applicerbara i Sverige och i andra länder med liknande geologiska förutsättningar.

Vid inkluderade fältförsök har enbart gejdermonterad och grävmaskinsmonterad vibrator använts. Inga försök med frihängande vibrator har studerats. Det finns dock inget som talar för att de råd som ej är specifika för en vibratortyp inte skulle vara applicerbara även vid användande av frihängande vibratorer.

2 DRIVNING AV SPONT

2.1 INTRODUKTION

De idag vanligaste metoderna för installation av spont i Sverige är; vibrodrivning, borrning, pressning och slagning.

Vibrodrivning är i dagsläget den allra vanligaste metoden och den kan användas till allt ifrån stålrör och stålprofiler till plastspont. Fördelen med vibrodrivning är att det är en snabb och kostnadseffektiv metod. Nackdelen med vibrodrivning är att hinder i marken i form av tex block eller gamla grundläggningsrester inte kan penetreras. Dessutom ger vibrodrivning upphov till vibrationer i marken.

Borrning kan användas för geometrier som lämpar sig för det, tex runda profiler eller balkprofiler. Således kan inte borrning användas för tex stålprofilspont. Fördelen med borrning är att hinder i marken oftast kan genomborras och sponten kan drivas till önskat djup. En annan fördel med borrning är att det ger upphov till mindre omgivningspåverkan i form av vibrationer (se Daniels & Lovén, 2014). Den stora nackdelen med borrning är kostnaden. Det tar generellt längre tid att installera en borrad rörspont och således ökar kostnaden.

Pressning, med tex en så kallad silent piler, bygger på att sponten pressas ner i jorden med hjälp av hydrauliska pressar. Metoden är skonsam ur ett omgivningspåverkansperspektiv eftersom den knappt ger upphov till vare sig buller eller vibrationer. Nackdelen med metoden är att den är begränsad till enbart drivning genom lösa jordar.

Enbart slagning är idag ett ovanligt metodval för installation av spont, även om den fortsatt används frekvent för installation av pålar. Däremot används slagning med fallhejare relativt ofta då sponten ej har drivits till erforderligt djup med vibrodrivning. Slagning används då för att försöka slå ner sponten ytterligare. Denna slagning tenderar att ge stor omgivningspåverkan såväl som skador på sponten.

I denna rapport fokuseras på vibrodrivning på grund av att det är den mest använda metoden samt också den mest kostnadseffektiva metoden för installation av spont.

2.2 INSTALLATION MED VIBRODRIVNING

Vid vibrodrivning av spont används en vibrator som kan vara frihängande, fäst på en mast/gejder alternativt fäst på en grävmaskinsarm. Vilken typ av vibrator som används styrs

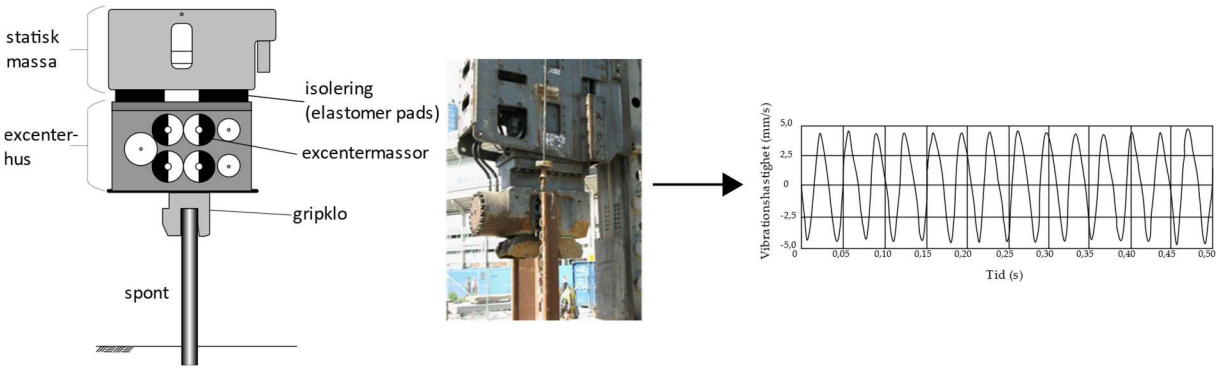
mycket av tillgänglig utrustning. I Sverige är det vanligaste gejdermonterade vibratorer, men grävmaskinmonterade blir allt vanligare på grund av dess smidighet relaterat till plats och hantering av spontplankor. Användning av frihängande vibratorer är mer ovanligt men väljs tex i fall då det är svårt att nå med en gejdermonterad vibrator eller då en kraftfullare vibrator krävs.

2.2.1 Vibratorn

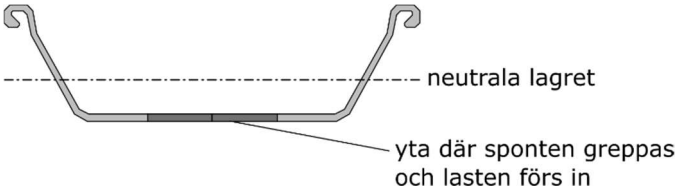
Enkelt uttryckt så fungerar en spontvibrator som så att excentermassorna i vibratorn roterar med en viss hastighet (frekvens) och genererar en rörelse i vertikal riktning. Denna rörelse överförs till spontplankan som rör sig upp och ner med samma frekvens som excentermassorna. Detta illustreras schematiskt i Figur 2.1.

Vibratorn består av tre huvudsakliga delar; den statiska massan, excenterhuset och gripklon, se Figur 2.1. Mellan den statiska massan och excenterhuset finns isolering, oftast i form av elastomer pads, för att förhindra att vibrationen från excenterhuset överförs till den statiska massan.

Gripklon består av två ”käftar”, som pressas samman med hydraulik och håller fast i sponten. Gripklon är utformad för att kunna överföra den vertikala vibrationen som genereras i excenterhuset till spontplankan. Det vanligaste är att gripklon greppar i spontens liv, dvs excentriskt i förhållande till spontprofilens neutrala lager, se Figur 2.2. Fältförsök (se Whenham, 2011) och numerisk modellering (se Deckner, 2017) har visat att detta sätt att greppa sponten ger upphov till horisontella rörelser i sponten. Vid användning av frihängande- och gejdermonterade vibratorer greppas sponten ovanifrån medan vid användning av en grävmaskinsmonterad vibrator kan sponten greppas både från sidan och ovanifrån.



Figur 2.1 Schematisk illustration av funktion hos en spontvibrator samt ingående delar i en vibrator, efter Massarsch (2000).



Figur 2.2 Spontplankans neutrala lager i relation till var lasten förs in då gripklon greppar livet.

I excenterhuset finns excentermassorna, vilka genom sin rotation skapar vibrationen. Den vertikala vibrationen genereras genom att excentermassorna roterar i motsatt riktning. På detta sätt adderas hela tiden de vertikala kraftkomposanterna medan de horisontella hela tiden tar ut varandra, se Figur 2.3. På detta sätt skapas en vibration i vertikal riktning.

Excentermassorna roterar kring sin egen axel med en viss frekvens. Hur mycket kraft som genereras i vibratorn beror av avståndet mellan rotationscentrum och masscentrum för excentermassan samt frekvensen. Det excentriska moment som skapas av de roterande massorna brukas betecknas med M_e och erhålls med Ekv. 2.1.

Ekv. 2.1 $$M_e = \sum mr_e$$ (kNm)

Där m = tyngd av excentriska massa (kN)
r_e = tyngdpunktens avstånd från rotationscentrum (m)

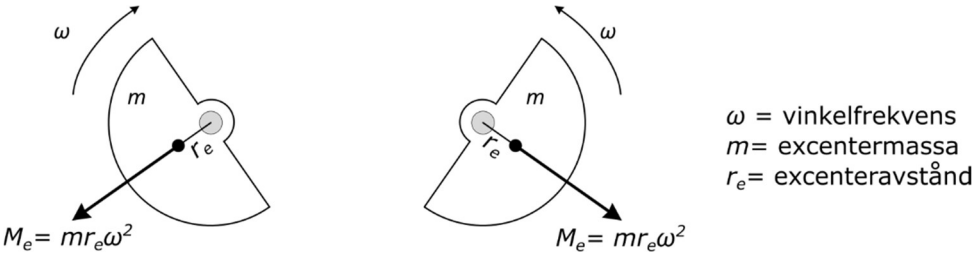
När excentermassorna roterar med en viss vinkelfrekvens skapas en centrifugalkraft enligt Ekv. 2.2.

Ekv. 2.2 $$F_V = M_e\omega^2$$ (kN)

Där ω = vinkelfrekvens (rad/s)

På grund av rotationen av excentermassorna är centrifugalkraften en harmonisk funktion av tiden, t, enligt Ekv. 2.3.

Ekv. 2.3 $$F_v(t) = M_e\omega^2\, sin(\omega t)$$ (kN)



Figur 2.3 Schematisk illustration av de roterande massorna i vibratorn och de tillhörande kraftvektorerna, efter Viking (2002).

En annan viktigt parametrar i samband med vibrodrivning är förskjutningsamplituden. Förskjutningsamplituden är direkt relaterad till det excentriska momentet och är ett mått på den totala rörelsen upp och ner under en cykel. Den nominella förskjutningsamplituden (ibland kallad dubbelamplituden), *S*, fås ur Ekv. 2.4.

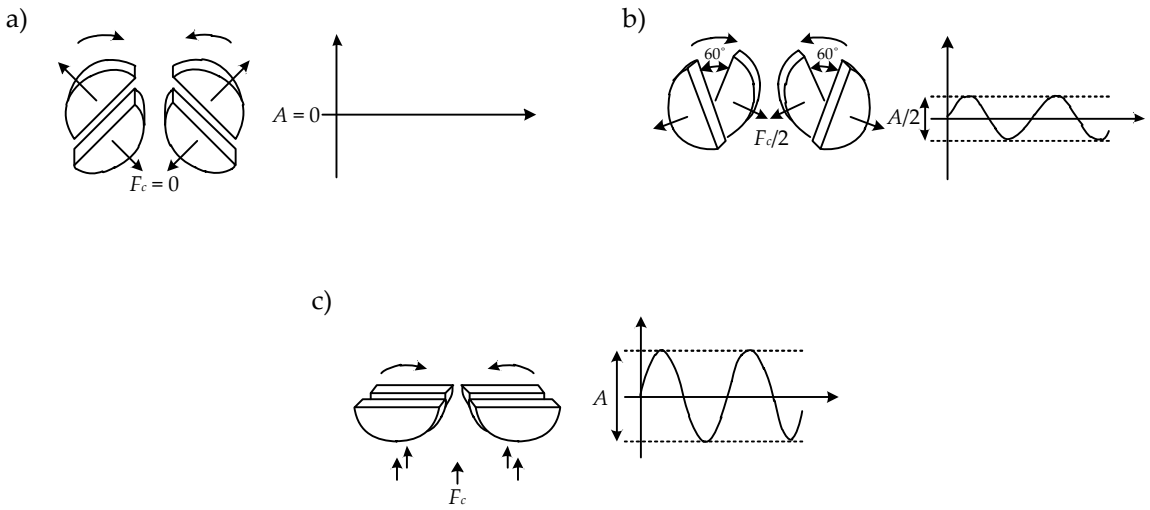
Ekv. 2.4 $$S = \frac{2M_e}{m_{dyn}} \quad \text{(m)}$$

Där m_{dyn} = total vibrerande massa (vibrator + gripklo + spontplanka) (kN)

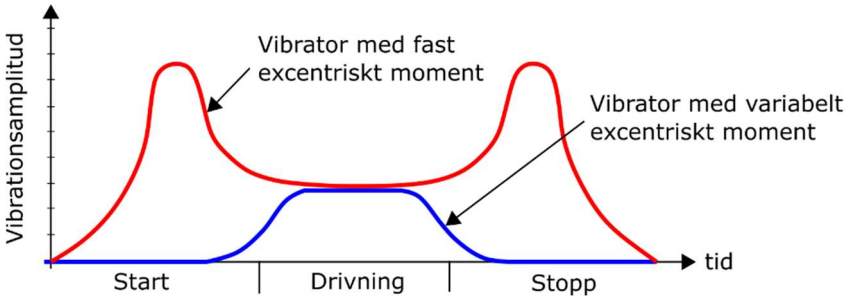
Den verkliga förskjutningsamplituden kommer alltid att vara mindre än den nominella pga. jord som fastnar på spontplankan och adderas till den totala vibrerande massan samt motståndet i jorden.

2.2.1.1 Variabel amplitud-vibrator

För en del vibratorer finns möjlighet att styra kraften. I dessa vibratorer sitter excentermassorna i par, där positionen mellan excentermassorna kan varieras beroende på hur mycket de ska samverka, se Figur 2.4.
Vibratorer med möjlighet till variabel amplitud brukar marknadsföras som resonansfria vibratorer då de ofta fungerar som så att de i samband med start och stopp av maskinen automatiskt sätter excentermassorna så att ingen samverkan erhålls. Först när vibratorn har varvat upp till aktuell drivfrekvens sätts excentermassorna i samverkan och vibratorn börjar generera vibrationer, se Figur 2.5. Detta är skonsamt då de flesta jordar, byggnader och andra system har resonansfrekvenser som ligger lägre än drivfrekvensen. På detta sätt undviks resonansfenomen i samband med start och stopp av vibratorn.



Figur 2.4 Funktionen hos en vibrator med möjlighet till variabel amplitud, a) ingen samverkan – noll amplitud, b) halv samverkan – halverad amplitud och c) full samverkan – maximal amplitud, efter Houzé (1994).

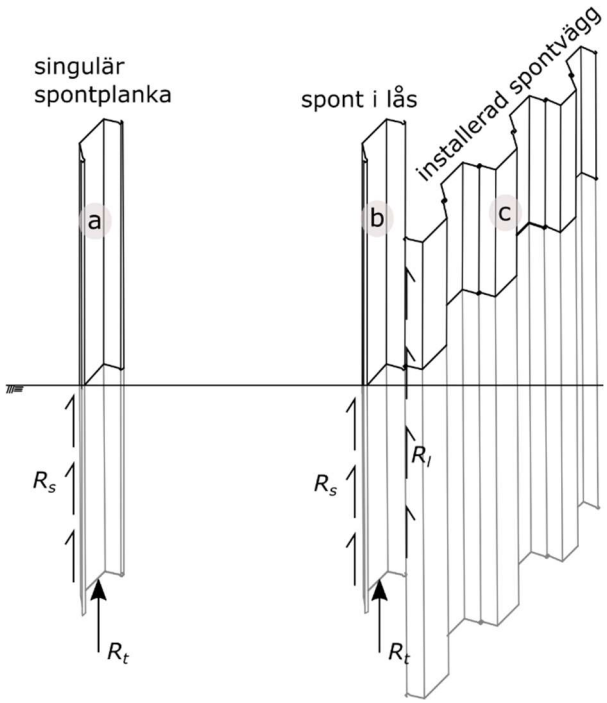


Figur 2.5 Illustration av uppkomsten av markvibrationer vid start och avslut vid drivning med vibrator med och utan funktion att reglera excentriskt moment, efter Massarsch (2000).

2.2.2 Överföring från spont till jord

Vibratorn ger upphov till att spontplankan vibrerar. Denna vibration är det som möjliggör att sponten kan tränga ner i jorden, utan att tillföra mer last än vibratorns vikt (då gejdermonterad eller grävmaskinmonterad vibrator används finns viss möjlighet att också trycka sponten nedåt till viss del). Spontens vibration överförs till jorden som störs i så hög grad att partiklarna i jorden tappar kontakt med varandra, vilket möjliggör att sponten kan tryckas ned i jorden.

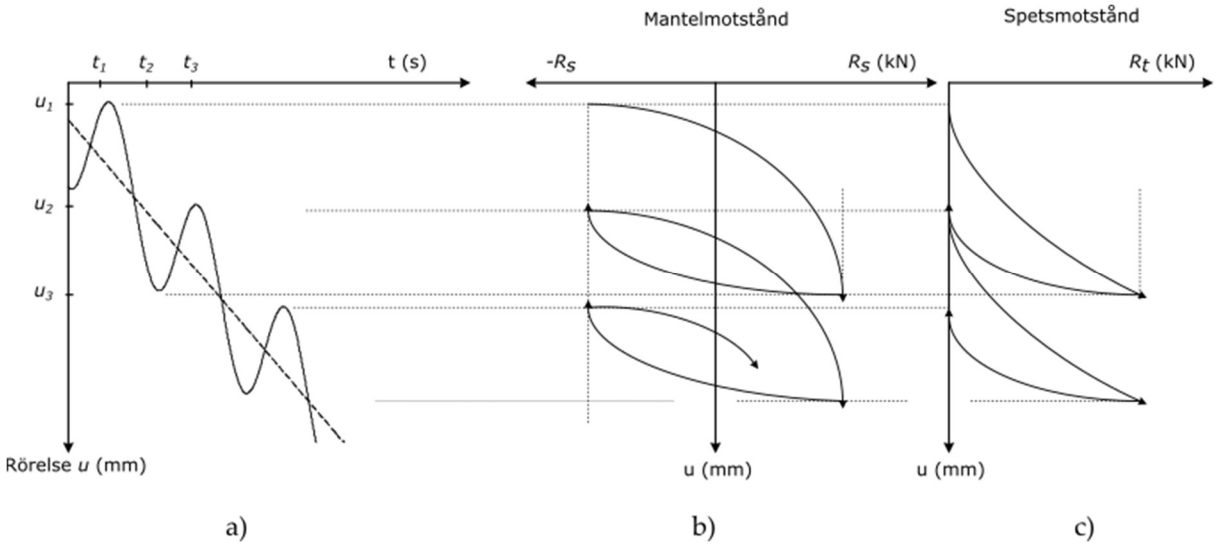
Vid spontdrivning kan särskiljas på två olika stadier, drivning av spont som singelplanka samt drivning av spont i lås, se Figur 2.6. Vid en normal spontdrivning så drivs den stora merparten av alla plankor i lås med en tidigare installerad planka som i sin tur samverkar med den tidigare installerade spontväggen.



Figur 2.6 Olika stadier samt motstånd (R_t, R_s och R_l) vid spontdrivning: a) drivning av en singulär planka, b) drivning av spont i lås, och c) tidigare installerad spontvägg, efter Deckner (2017).

Vid nedträngning i jorden är det för en singelplanka två och för en planka i lås tre olika motstånd som ska överkommas för att sponten ska kunna röra sig nedåt och tränga ned i jorden, se Figur 2.6.

1. Spetsmotståndet, R_t – i samband med att sponten vibrerar, dvs rör sig snabbt upp och ner, varierar motståndet vid spetsen från fullt motstånd när sponten rör sig nedåt till noll motstånd när sponten rör sig uppåt, se Figur 2.7c.
2. Mantelmotståndet, R_s – varierar också i relation till spontens vibration. Mantelmotståndet är maximalt i ena riktningen när sponten rör sig nedåt och maximalt i andra riktningen när sponten rör sig uppåt, se Figur 2.7b.
3. Låsfriktionen, R_l – är det motstånd som uppstår i låset. Precis som mantelmotståndet så varierar låsfriktionen med spontens vibration. Låsfriktionens storlek kan variera mycket beroende på låsets kondition (ofta används återanvänd spont), små vinkelavvikelser mellan redan installerad spont och spontplanka som drivs m.m.



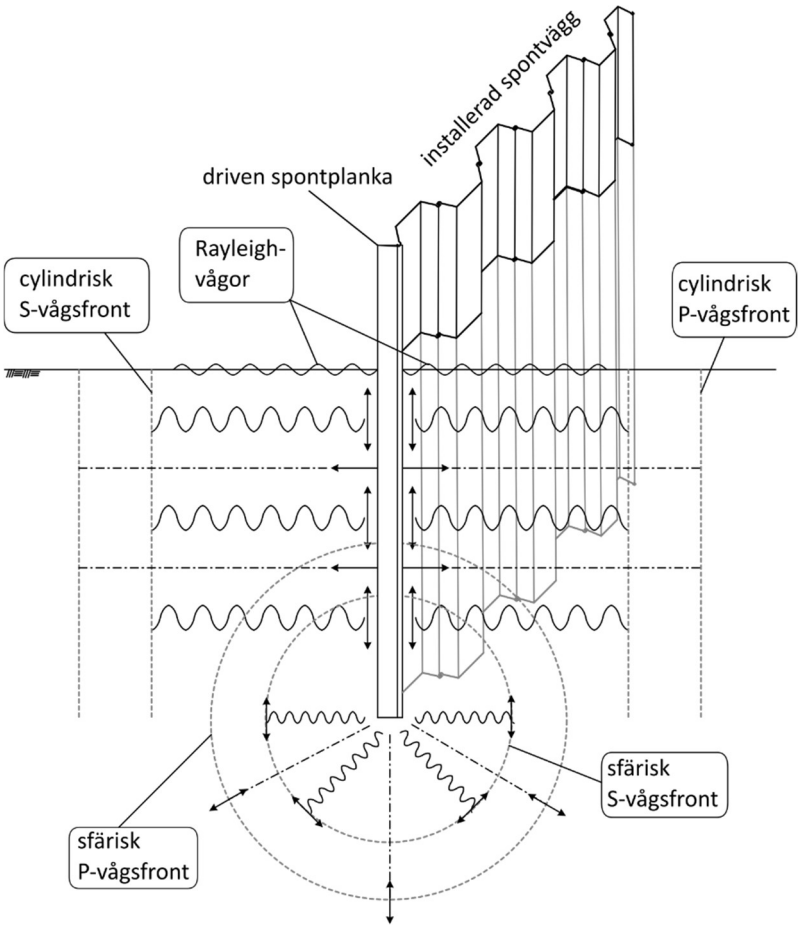
Figur 2.7 Illustration av a) spontens rörelse i samband med att sponten rör sig (u) som en funktion av tiden (t) vid nedträngning i jorden, b) mantelmotståndets (R_s) variation vid neddrivning, och c) spetsmotståndets (R_t) variation i samband med neddrivning, efter Viking (2000).

3 VIBRATIONSTRANSPORT I JORDEN

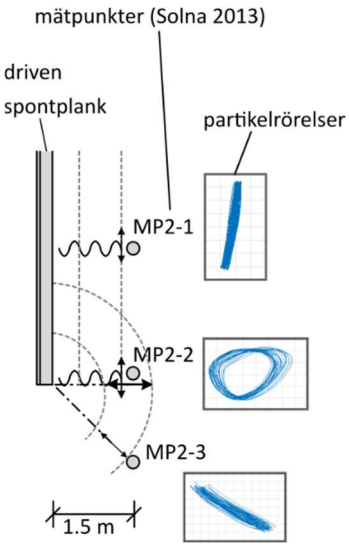
3.1 INTRODUKTION

När vibrationerna från sponten når jorden sprids vibrationerna vidare genom jorden i olika typer av vågor, se Figur 3.1. Från både spontfoten och manteln utgår skjuvvågor (S-vågor) och tryckvågor (P-vågor). När dessa når markytan övergår de till att spridas som ytvågor (Rayleigh vågor). Resultat från fältförsök har visat att ytvågor uppstår så nära som 1 m från sponten (Deckner et al., 2017).

Resultat från tidigare fältförsök beskrivna i Deckner et al. (2015a) och numerisk modellering, se Deckner et al. (2019) har visat att vibrationer till största delen överförs från tån till jorden.



Figur 3.1 Vibrationsöverföringsmodell i samband med spontdrivning, efter Deckner et al. (2015b).



Figur 3.2 Partikelrörelser från fältförsöket i Solna 2013 uppmätta när en singulär planka drivs och spontens tå är 4,7 m under markytan i mätpunkter placerade på 2,7 m, 4,7 m och 6,2 m djup 1,5 m från sponten (efter Deckner, 2017).

Resultat från fältförsöket i Solna 2013 (Deckner et al., 2015a och Guillemet, 2013) visar tydligt att teorin i Figur 3.1 överensstämmer väl med uppmätta resultat på djup i jorden, se Figur 3.2.

Vidare har resultat från flertalet fältförsök visat att i mätpunkterna längst från sponten är partikelrörelsens mönster stört (Deckner et al., 2017). Troligtvis beror detta på att vågor reflekteras och refrakteras vilket gör att det inte längre är möjligt att urskilja tydliga vågtyper.

3.2 DÄMPNING

Generellt så avtar vibrationsamplituden med avståndet från vibrationskällan på grund av dämpning. Det handlar dels om geometrisk dämpning, dvs vågenergin sprids över en större och större volym, dels om materialdämpning. Materialdämpningen uppstår på grund av att partiklarna i jorden rör sig relativt varandra när vibrationen överförs från en partikel till en annan, vilket leder till förluster. Det finns dock dokumenterade fall där vibrations-amplituden ökar igen på ett visst avstånd från källan, se Athanasopoulos & Pelekis (2012) och Lidén (2012). Detta beror troligtvis på att reflekterade och refrakterade vågor sammanstrålar på ett visst avstånd samt i vissa fall pga. resonans.

Matematisk brukar dämpningen beskrivas med Ekv. 3.1, som har sitt ursprung i arbete av Lamb (1904) och Galitzin (1912), vilken kan användas för att uppskatta vibrationsamplituden i en punkt givet att amplituden är känd i en annan punkt.

Tabell 3.1 Förslag på värden på absorptionskoefficienten, α, utifrån jordmaterial och frekvens, efter Dowding (1996).

Jordmaterial	**Absorptionskoefficient, α (m^{-1})**		
	5 Hz	**40 Hz**	**50 Hz**
Lös jord	0,01–0,033	0,08–0,26	0,1–0,3
Fast jord	0,0033–0,01	0,026–0,08	0,03–0,1
Mycket fast jord	0,00033–0,0033	0,0026–0,026	0,003–0,03
Berg	< 0,00033	< 0,0026	< 0,003

Ekv. 3.1

$$A_2 = A_1 \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n e^{-\alpha(r_2 - r_1)} \quad \text{(mm)}$$

Där A_1 = vibrationsamplitud på avstånd r_1 från källan (mm)
A_2 = vibrationsamplitud på avstånd r_2 från källan (mm)
α = absorptionskoefficient beroende av jordförhållanden och frekvens (-)
n = koefficient beroende av vågtyp, sätts till 0,5 för ytvågor, 1 för volymvågor och 2 för volymvågor längs ytan (-)

Absorptionskoefficienten, α, som förutom vågtypen, styr dämpningens storlek, beror på vågutbredningshastighet och vibrationsfrekvens. En våg med hög frekvens dämpas mer än en våg med låg frekvens (Holmberg et al., 1984). Vågutbredningshastigheten är en materialparameter och generellt gäller att ju lösare en jord är desto lägre är dess vågutbredningshastighet och desto större är dess dämpningsförmåga (Holmberg et al., 1984). I Tabell 3.1 visas olika värden på α för olika typer av jordmaterial och frekvenser.

Det finns dock fall där dämpningen blir väldigt liten eller då vibrationsnivåer till och med ökar med avståndet från källan. Detta beror ofta på resonans i ett jordlager (Erlingsson, 1999). Jordlagers resonansfrekvenser är ofta relativt låga vilket innebär att en ökning av frekvensen ofta minimerar problemet.

3.3 PROGNOSMODELLER

I Deckner et al. (2012) studeras befintliga prognosmodeller för prognostisering av uppkomna markvibrationer i samband med vibrodrivning av spont. Slutsatsen är att tillgängliga prognosmodeller saknar erforderlig tillförlitlighet samtidigt som det ofta är svårt att hitta bra indata. De metoder som är enklast att använda är de empiriska modellerna. Dessa tenderar dock att i hög grad överskatta vibrationerna, speciellt nära källan. Det finns några mer avancerade modeller, dock kräver dessa stor kunskap av användaren såväl som en stor mängd mer eller mindre kända indata.

I dagsläget rekommenderas att en uppskattning av uppkomna markvibrationer görs utifrån tidigare uppmätta värden i liknande geotekniska förhållanden. Nedan presenteras en empirisk modell framtagen av Attewell et al. (1992) som har visat sig ge värden som i stort följer uppmätta vibrationer (se Figur 4.17). Observera att uppskattning ska göras baserad på

tidigare erfarenhet och grundas på en ingenjörsmässig bedömning utifrån risk i samband med överträdelse av gränsvärden.

3.3.1 Attewell et al. (1992)

Attewell et al. (1992a and 1992b) utvecklade den modell som föreslogs av Attewell & Farmer (1973) för slagna pålar. De kom fram till att en kvadratisk kurva passade data från fältmätningar av vibrationer från pål- och spontdrivning bättre än den tidigare föreslagna linjära kurvan. Den framtagna modellen föreslår Ekv. 3.2 för att kunna förutsäga vibrationshastigheten vid pål- och spontdrivning.

Ekv. 3.2
$$log\, v = x_1 + x_2\, log\left(\frac{\sqrt{W_0}}{r}\right) + x_3\, log^2\left(\frac{\sqrt{W_0}}{r}\right)$$

Där v = vibrationshastighet (mm/s)
x_1, x_2 och x_3 = *proportionalitetskonstanter, se* Tabell 3.2
W_0 = energi (J)
r = avstånd mellan källa och mätpunkt (m)

För vibrodrivning kan W_0 uppskattas från Ekv. 3.3 (Head & Jardine, 1992).

Ekv. 3.3
$$W_0 = \frac{1000W}{f}$$

Där W = power input (kW)
f = drivfrekvens (Hz)

Föreslagna värden på konstanterna x_1, x_2 och x_3 är angivna i Tabell 3.2. I tabellen anges värden på konstanterna för en bästa kurvanpassning, en halv standardavvikelse och en hel standardavvikelse. Attewell et al. (1992b) föreslog att värden för en halv standardavvikelse ska användas för normala byggprojekt medan värden för en hel standardavvikelse ska användas där risken för vibrationsproblem är hög. För bästa kurvanpassningslinjen är det en risk för överträdelse av uppskattade värden med 50 %, för en halv standardavvikelse är risken 31 % och för en standardavvikelse är risken 16 % (Attewell et al., 1992b).

Tabell 3.2 Värden för x_1, x_2 och x_3 för vibrodrivning (Attewell et al., 1992b)

Kurvanpassning	x_1	x_2	x_3
Bästa kurvanpassning	-0.464	1.64	-0.334
En halv standardavvikelse	-0.213	1.64	-0.334
En hel standardavvikelse	0.038	1.64	-0.334

4 FÄLTFÖRSÖK

4.1 INTRODUKTION

Inom ramarna för detta forskningsprojekt har två fältförsök utförts (Uppsala, 2018 och Västerås, 2019). Det här kapitlet redovisar en beskrivning av fältförsöken. Dessa två försök är en fortsättning på tidigare försök utförda inom forskningsarbetet på KTH under 2010-talet. Avslutningsvis finns en sammanställning av samtliga fältförsök som har utförts inom forskningsarbetet och vars resultat inarbetats i denna rapport.

4.2 INSTRUMENTERINGSSYSTEM

Ett instrumenteringssystem utvecklat för det tidigare doktorandprojektet (Deckner, 2017) har använts vid fältförsöken. En kort beskrivning av systemet följer nedan.

Instrumenteringssystemet är uppdelat i fem delar (se Figur 4.1):

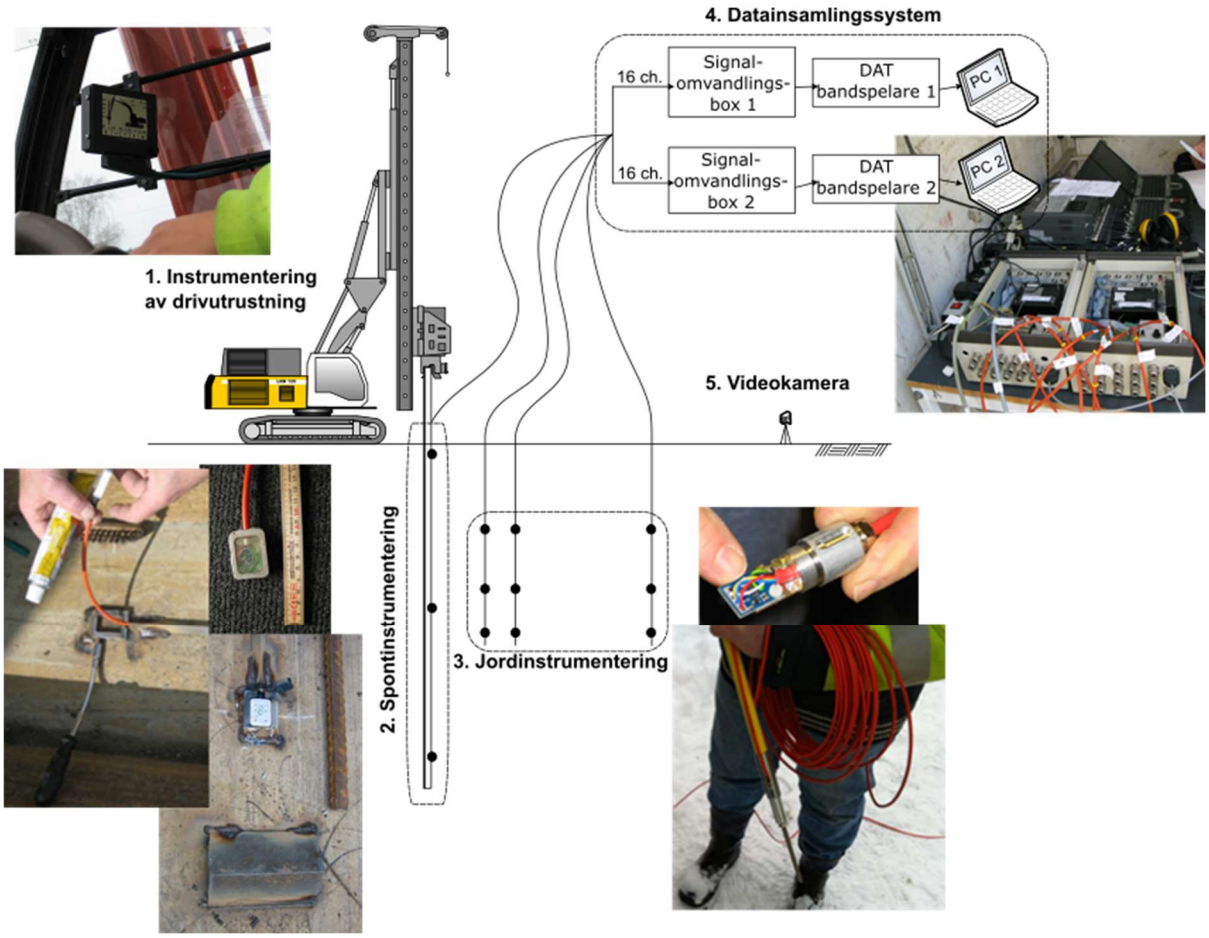
1. **Instrumentering av drivutrustning (denna del har endast använts i Uppsala)** – Spontmaskinens egna loggningssystem används för att registrera parametrar kopplade till drivningsutrustningen, såsom nedträngningsdjup, vibrationsfrekvens och amplitud.

2. **Spontinstrumentering –** Triaxiella accelerometrar används för att registrera spontens accelerationer. Givarna är monterade i skyddande stålramar som svetsas fast på sponten.

3. **Jordinstrumentering –** Triaxiella accelerometrar används för att registrera vibrationer i Jorden. Givarna är placerade i skyddande stålhöljen, som installeras i jorden med specialtillverkade glasfiberstavar.

4. **Datainsamlingssystem –** För att samla in data används en signalomvandlingsbox, en DAT-bandspelare och en bärbar dator. Genom att använda två separata serier finns tillgång till totalt 32 kanaler. I fältförsöken beskrivna i denna rapport används endast 16 kanaler.

5. **Videokamera –** En videokamera för utomhusbruk placeras på en tripod för att visuellt dokumentera neddrivningen. Vid fältförsöket i Västerås användes ytterligare en kamera placerad i hytten på grävmaskinen. Kameran filmade en display i hytten som visade information om drivfrekvens, hydrauliskt tryck och vibratorns position.



Figur 4.1 Schematisk illustration av det framtagna instrumenteringssystemet, efter Deckner (2017).

Inför varje fältförsök utförs kalibrering av utrustningen för att kontrollera funktion samt erhålla aktuella kalibreringskoefficienter.

4.3 UPPSALA 2018

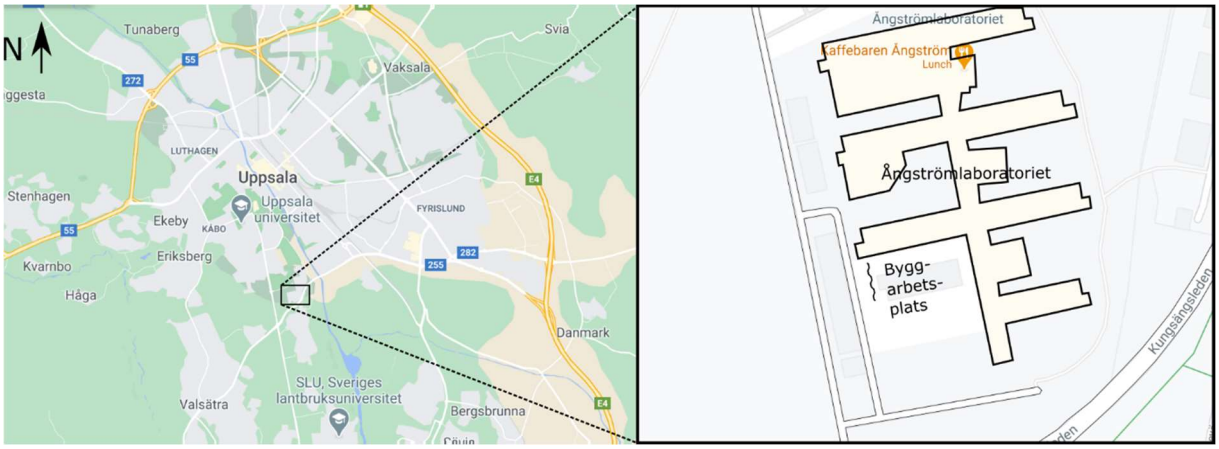
4.3.1 Introduktion

Fältförsöket utfördes i Uppsala i juni 2018. Platsen för försöket var inom området för Uppsala universitet på ett projekt för utbyggnad av Ångströmlaboratoriet, se Figur 4.2 för läge i plan. Syftet med fältförsöket var att studera excentermomentets påverkan på uppkomna markvibrationer. En beskrivning av fältförsöket återfinns också i Tsegay (2018).

4.3.2 Geotekniska förhållanden

Jordlagerföljden i området består av fyllning ovan fast lera överlagrande friktionsjord på berg.

Fyllningen har en mäktighet på 1–1,5 m och består av sten, grus, sand och lera. Leran har en mäktighet på ca 4–5 m och består av lera av torrskorpekaraktär. Lerans utvärderade skjuvhållfasthet är ca 90–100 kPa. Friktionsjorden består av siltig sand eller sand med silt- och lerlager. På större djup övergår materialet till morän. Berget ligger på ca 12–15 m under markytan.



Figur 4.2 Läge för fältmätningar i Uppsala 2018.

Grundvattnets trycknivå bedöms ligga ca 25–26 m under markytan.

4.3.3 Drivutrustning

För drivning av spont Larssen 603 användes en spontmaskin Liebherr LRB 125 utrustad med en vibrator av modell 1100 H, se Figur 4.3 och Tabell 4.1.

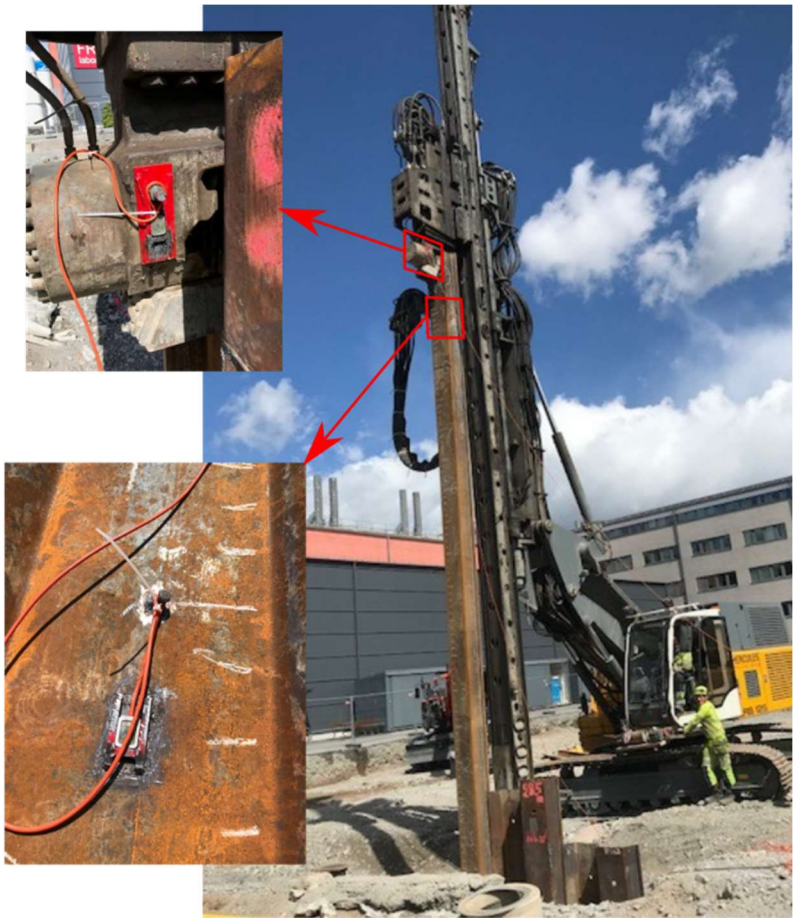
Tabell 4.1 Data för vibrator 1100 H.

Vibratormodell	Liebherr 1100H
Excentriskt moment (M_e)	0-20 kgm
Maximal frekvens ($f_{d,max}$)	38 Hz
Maximal centrifugalkraft (F_v)	1160 kN
Maximal amplitud (S)	19 mm
Total vikt utan gripklo	3 250 kg
Total vikt med gripklo	4 200 kg
Dynamisk vikt med gripklo	2 980 kg

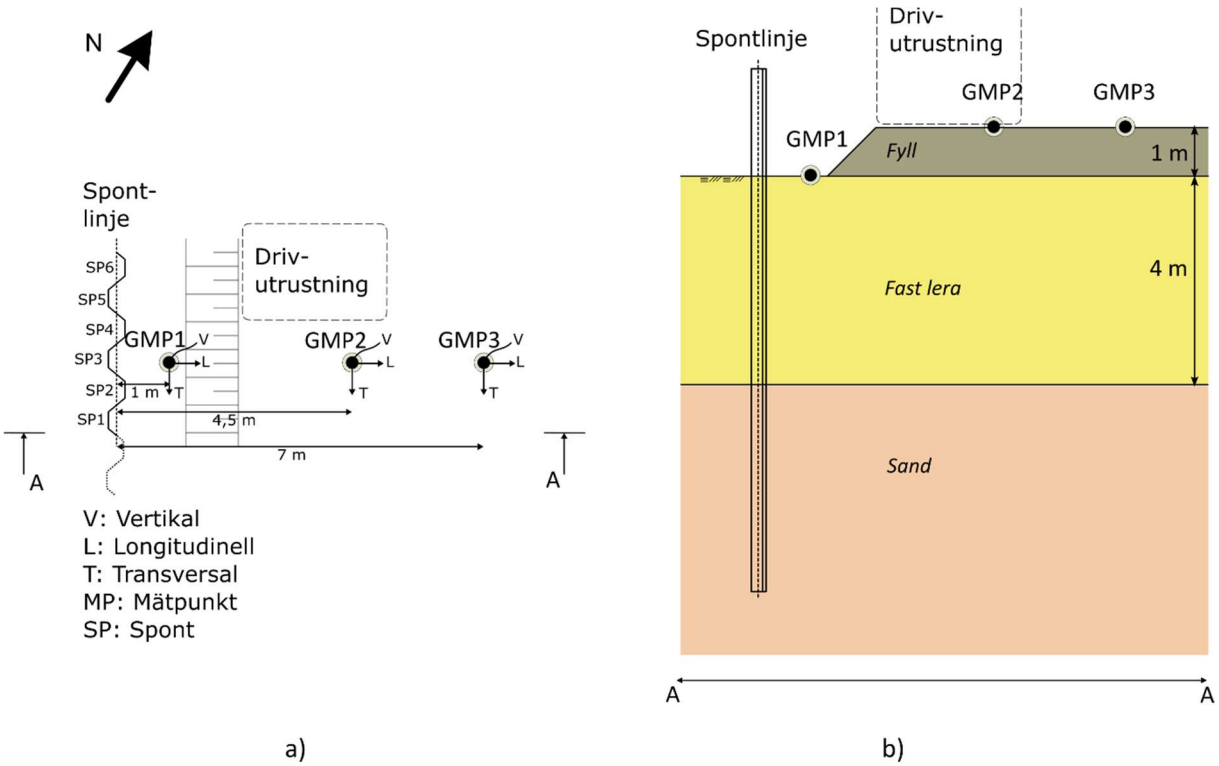
4.3.4 Mätningar

I försöket drevs sex spontplankor. Samtliga plankor drevs i lås. De tre första drevs med ett lägre excentermoment och de tre sista drevs med ett högre excentermoment. Samma drivfrekvens användes för samtliga plankor.

I samband med drivning mättes vibrationer på vibratorn, på sponten och i jorden. På vibratorn placerades accelerometern på sidan, se Figur 4.3. På sponten placerades givarna 1,5 m från spontens överkant, se Figur 4.3. I jorden placerades givarna på tre olika avstånd från spontlinjen, se Figur 4.4. Givarna trycktes ner till ca 30 cm djup och täcktes sedan med jord.



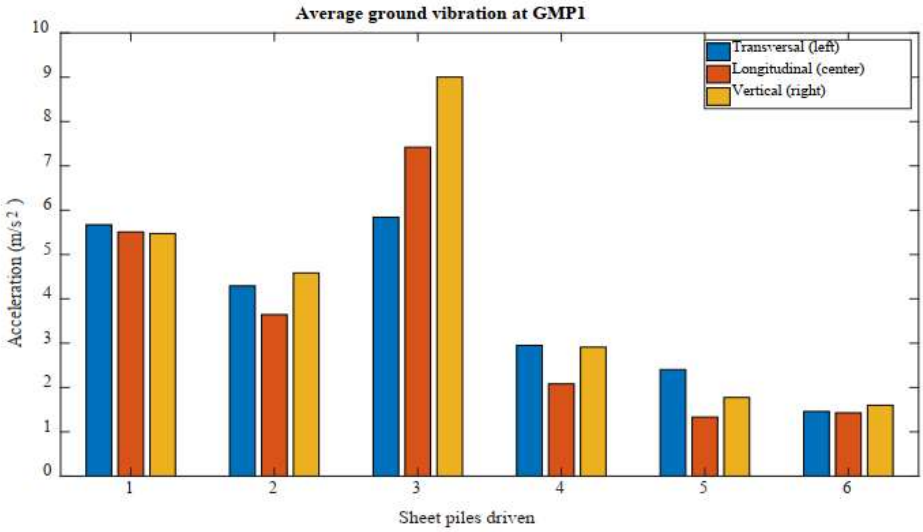
Figur 4.3 Maskinen som användes vid fältförsöket i Uppsala och placering av accelerometer på vibratorn och på sponten.



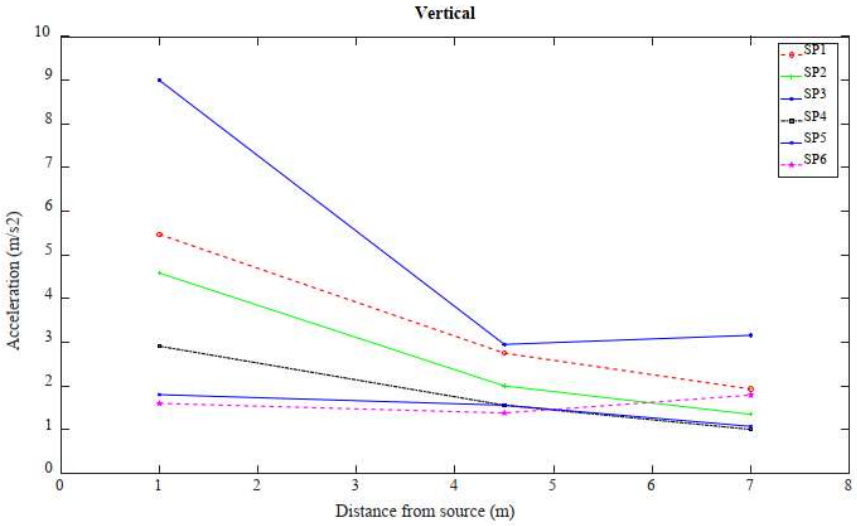
Figur 4.4 Placering av mätpunkter i jorden i a) plan och i b) sektion.

4.3.5 Utvalda resultat

De uppmätta resultaten från givarna i jorden visar tydligt att markvibrationerna är högre när sponten drivs med ett lägre excentermoment. I Figur 4.5 visas ett medelvärde av uppmätta vibrationer i mätpunkt GMP1, dvs i jorden närmast sponten, för de sex drivna spontplankorna. Spontplanka SP1 – SP3 är drivna med ett lägre excentriskt moment och spontplanka SP4 – SP6 är drivna med ett högre excentriskt moment. Liknande resultat syns för samtliga mätpunkter i jorden, även om trendens tydlighet avtar något med ökande avstånd från sponten, se Tabell 4.2.



Figur 4.5 Uppmätta accelerationer i jord i mätpunkt närmast spontlinjen, vid drivning av de sex spontplankorna (Tsegay, 2018).



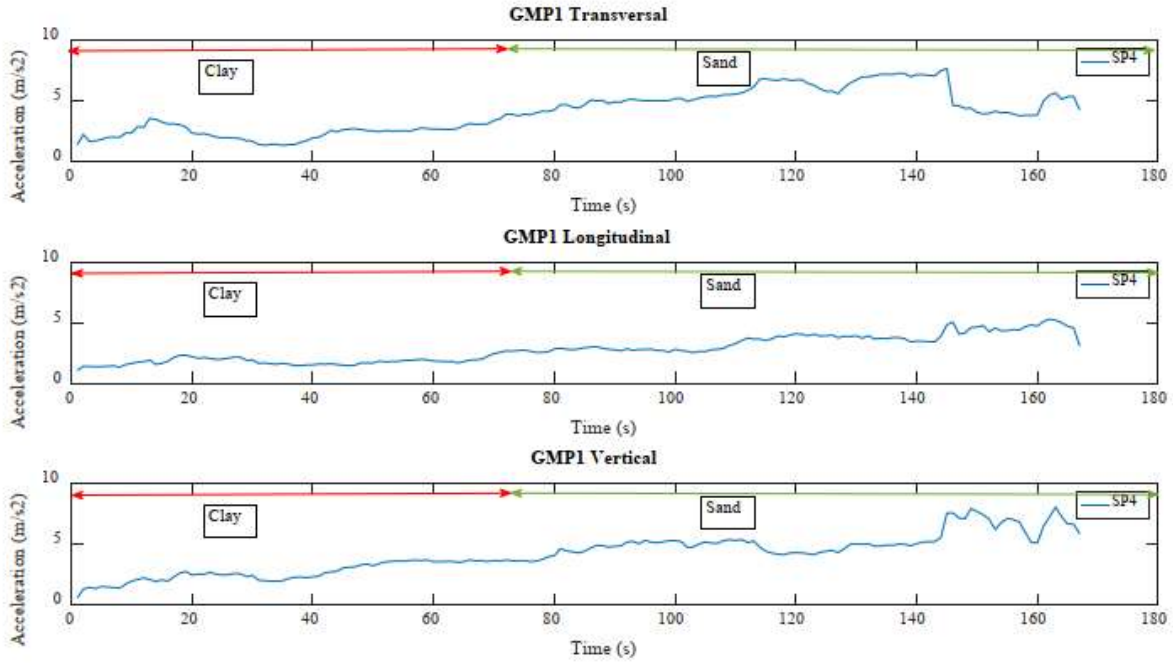
Figur 4.6 Uppmätta vibrationer mot avstånd från sponten för de sex drivna spontplankorna (Tsegay, 2018).

Tabell 4.2 Maximala partikelaccelerationer, a_{max}, i tre riktningar vid de tre mätpunkterna i jorden för varje driven spontplanka.

		a_{max} (m/s²)		
Spont	**Riktning**	**GMP1**	**GMP2**	**GMP2**
	Vertikal	11,14	2,66	1,84
1	Longitudinell	14,40	3,93	5,26
	Transversell	15,33	5,85	6,22
	Vertikal	13,23	3,25	1,64
2	Longitudinell	10,13	3,80	2,33
	Transversell	12,88	6,30	3,59
	Vertikal	16,13	3,33	1,64
3	Longitudinell	17,52	4,99	3,45
	Transversell	13,05	6,14	3,93
	Vertikal	7,64	2,79	2,64
4	Longitudinell	5,21	3,32	2,48
	Transversell	8,03	3,67	2,97
	Vertikal	6,01	2,07	1,56
5	Longitudinell	3,00	2,00	2,83
	Transversell	3,84	3,31	3,04
	Vertikal	2,90	0,97	0,90
6	Longitudinell	2,26	1,40	1,74
	Transversell	2,50	2,62	2,93

Precis som tidigare fältförsök visat (Lidén, 2012; Guillemet, 2013) så avtar vibrationerna markant med avstånd från sponten, se Figur 4.6. De undantag som finns beror troligtvis på reflektion och refraktioner i jorden, vilket även observerats vid tidigare försök (se tex Lidén, 2012).

Vid studie av vibrationsnivåns variation med spontdjupet syns att generellt så uppnås maximal vibrationsnivå då spontfoten har nått ett fastare jordlager, se Figur 4.7 där vibrationsnivån successivt ökar när tån når längre ner i sanden, vars fasthet ökar med djupet.



Figur 4.7 Accelerationen mot tiden för mätpunkt GMP1 i de tre mätriktningarna vid drivning av SP4.

4.4 VÄSTERÅS 2019

4.4.1 Introduktion

Fältförsöket utfördes i maj 2019 vid Östra Mälarstrands Allé i Västerås i samband med utbyggnaden av ett nytt bostadsområde, se Figur 4.8. Området är ett tidigare industriområde som nu omvandlas till bostadsområde. Syftet med fältförsöket var att studera hur sättet att greppa sponten påverkar uppkomsten av markvibrationer.

Figur 4.8 Läge för fältförsök i Västerås.

4.4.2 Geotekniska förhållanden

Jordlagerföljden i området består av fyllning ovan lera överlagrande friktionsjord på berg, se Figur 4.12b.

Fyllningen har en mäktighet på 1–1,5 m. Fyllningen består av sand och grus med inslag av trärester, slagg och kol. Leran har en mäktighet på ca 7–11 m. Lerans klassificeras som varvig lera med visst sulfidinnehåll och dess utvärderade skjuvhållfasthet varierar mellan 13–19 kPa med ökande hållfasthet mot djupet. Friktionsjorden består av morän och har en mäktighet på ca 4 m. I den geotekniska undersökningen rapporteras om förekomst av block i moränen. Berget ligger ca 14 m under markytan.

Grundvattnets trycknivå ligger ca 2 m under markytan.

4.4.3 Drivutrustning

Vid fältförsöket användes en grävmaskinsmonterad vibrator. Grävmaskinen var av modell Hitachi ZX350-3 och vibratorn var en Movax SPH-80, se Figur 4.9. En specifikation av aktuell vibratortyp ges i Tabell 4.3.

Vibratorn har möjlighet att hålla i sponten på två olika sätt, dels ovanifrån i överkant av plankan dels från sidan. I båda fallen greppas plankan i livet.

Den använda vibratorn använder en speciell vibrationsteknik som kallas *directional driving*. Vanligen ger de roterande vikterna i vibratorn upphov till en harmonisk signal med en huvudsaklig frekevens. Genom att modifiera de excentriska vikterna ger directional driving upphov till en periodisk signal innehållande två huvudfrekvenser. Den periodiska signalen plattar ut den harmoniska signalen i rörelsen uppåt och förstärker signalen i rörelsen nedåt (Viking, 2006). Drivfrekvens är således något svårutvärderad men enligt Movax tekniska support är drivfrekvensen runt 33 Hz.

Sponten som drevs var av typ VL 604 och plankorna var 13 m långa.

Figur 4.9 Bild visande den grävmaskin (a) och den grävmaskinsmonterade vibrator (b) som användes vid fältförsöket i Västerås 2019.

Tabell 4.3 Specifikation för vibrator Movax SPH-80.

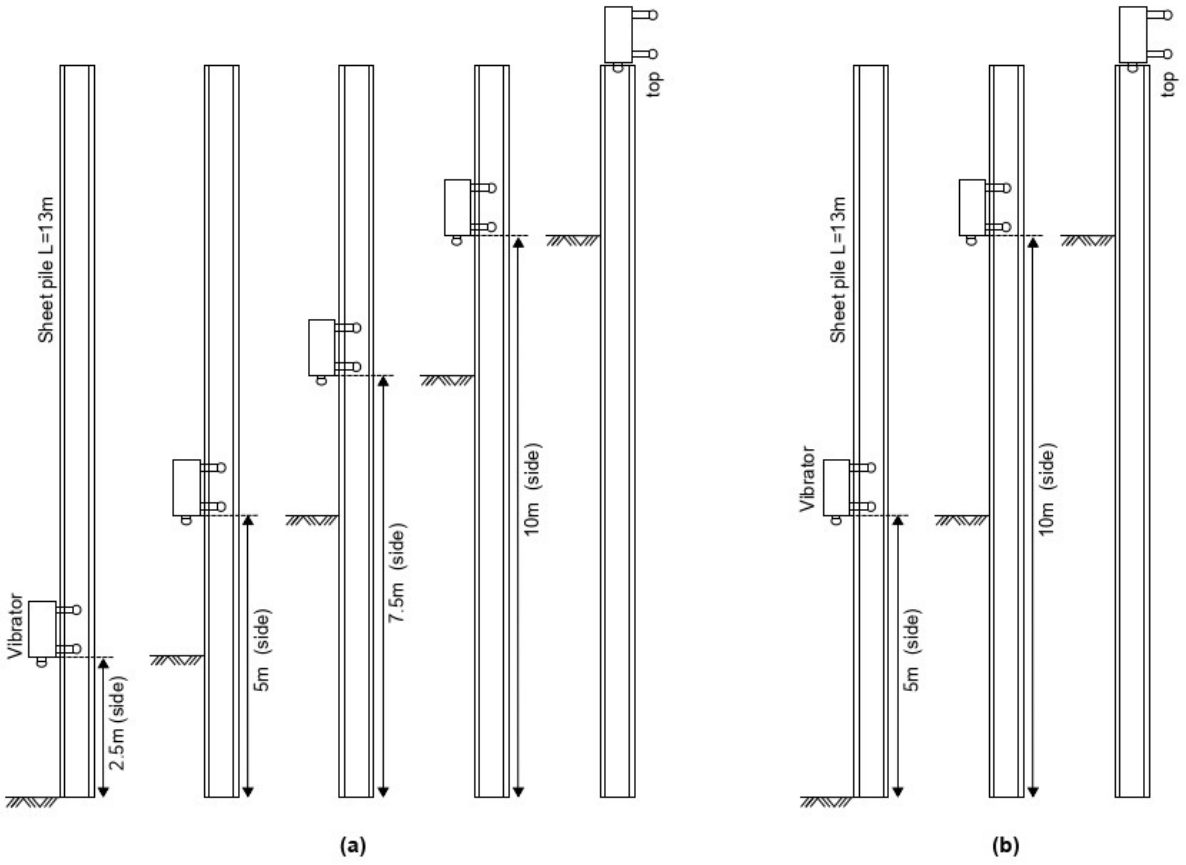
Vibratormodell	SPH80-6
Kraft	112 kW
Maximal centrifugalkraft (F_v)	800 kN
Total vikt utan gripklo	2 896 kg

4.4.4 Mätningar

Inom ramarna för fältförsöket drevs sex spontplankor. Plankorna drevs på den nordöstra sidan av arbetsplatsen, se Figur 4.8. För att kunna studera hur sättet att greppa sponten påverkar uppkomsten av markvibrationer användes två olika greppsekvenser (se Figur 4.10):

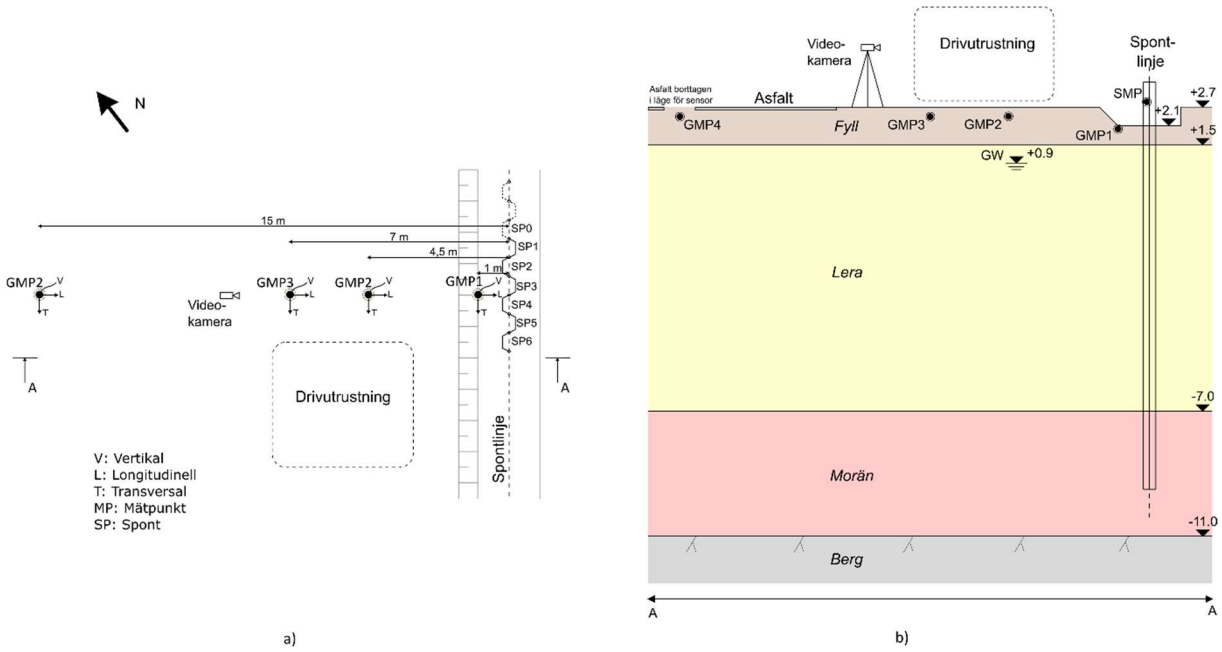
- Set-up A – sponten greppas varje 2,5 m. Dvs första greppet togs 2,5 m från nederkant spont, därefter 5 m, 7,5 m, 10 m och slutligen greppades i toppen av sponten.
- Set-up B – sponten greppas varje 5 m. Dvs första greppet togs 5 m från nederkant spont, därefter greppades på 10 m från nederkant spont och slutligen greppades i toppen av sponten.

De tre första spontplankorna (SP1, SP2 och SP3) drevs med set-up A och de tre resterande spontplankorna (SP4, SP5 och SP6) drevs med set-up B. I Figur 4.11 visas drivning av SP5 med Set-up B. Samtliga spontplankor drevs i lås med en redan installerad spontplanka.



Figur 4.10 Illustration av greppsekvenserna (a) set-up A och (b) set-up B (Kriege, 2019).

Figur 4.11 Bilderna visar drivning av SP5 med set-up B. I (a) greppas på 5 m, i (b) på 10 m och i (c) från toppen.



Figur 4.12 Placering av givare i a) plan och i b) sektion.

För att mäta accelerationer i samband med drivning placerades accelerometrar på vibratorn (se Figur 4.13 (b)), på tre spontplankor (se Figur 4.13 (c)) samt i jorden på fyra olika avstånd från spontlinjen, se Figur 4.12. De tre spontplankor som instrumenterades var SP1, SP3 och SP5. Accelerometrarna i marken placerades på 1 m, 4,5 m, 7 m och 15 m från spontlinjen.

(b) (c)

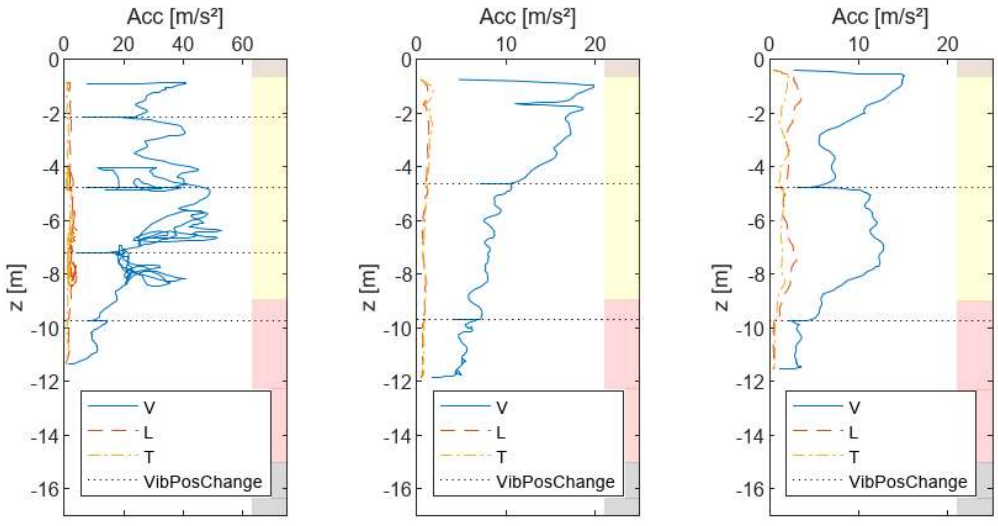
Figur 4.13 (b) givare monterad på vibratorn och (c) givare monterad på spont.

4.4.5 Utvalda resultat

4.4.5.1 Spontvibrationer

Givarna placerade på sponten visar tydligt att vibrationerna på sponten är betydligt större för drivning av SP1 än för drivning av SP5 och SP6, se Figur 4.14. SP1 drevs med Set-up A medan SP5 och SP6 drevs med Set-up B. Utifrån resultaten ser det dock inte ut som att detta har haft någon betydande inverkan då vibrationerna redan från start av drivningen är betydligt större. Det är mer troligt att de större vibrationerna i SP1 beror på en större låsfriktion vid drivning av denna som enligt operatören till stor del påverkades av att maskinen var tvungen att vara placerad snett i förhållande till den drivna plankan, se Figur 4.12a där det framgår var maskinen stod placerad.

En annan påtaglig trend från samtliga drivna spontplankor är att vibrationerna i sponten minskar med ökande neddrivningsdjup. Det är tydligt att neddrivningen stabiliserar upp sponten och håller tillbaka dess rörelse.

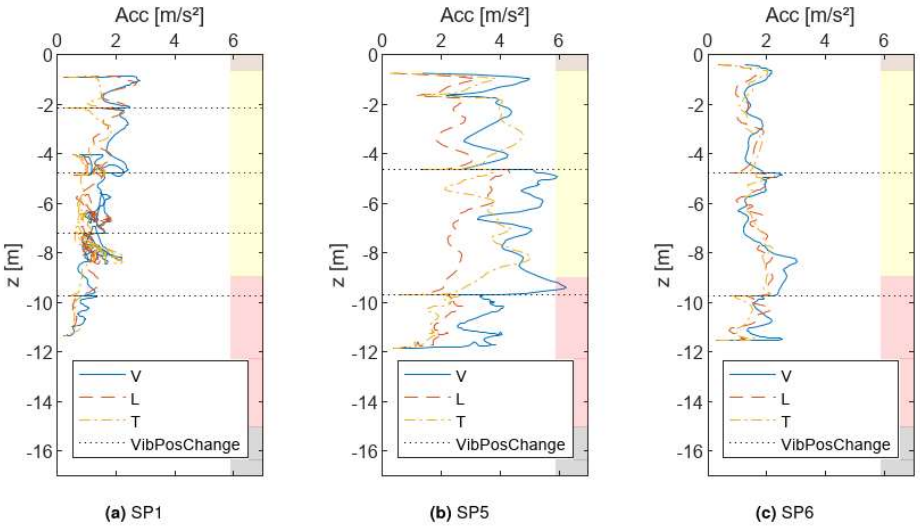


Figur 4.14 Acceleration uppmätt på spontplankor mot spontfotens neddrivningsdjup. Färgkodningen till höger indikerar jordprofilen med uppifrån fyllning, lera, morän respektive berg. ***Observera*** *olika skalor på x-axeln.*

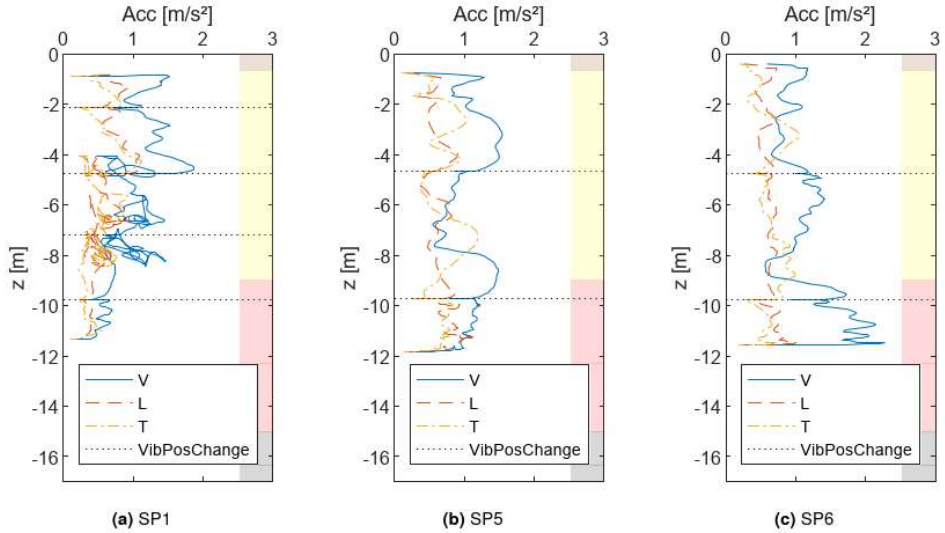
4.4.5.2 Markvibrationer

Resultaten indikerar att sättet att greppa sponten har låg inverkan på uppkomna markvibrationer. I Figur 4.15 och Figur 4.16 visas uppmätt acceleration i mätpunkt GMP1 och GMP2 och resultaten visar att maximalt uppkomna vibrationer varierar mellan de olika drivna spontplankorna. Problemet med positionering av maskinen vid drivning av SP1 syns även tydligt i resultaten från markgivarna i ett betydligt mer irrationellt mönster än vid drivningen av SP5 och SP6.

För SP1 och SP5 ger drivning från toppen något lägre markvibrationer. För SP6 syns detta i GMP1 men inte i GMP2. Även om skillnaden i uppkommen markvibration inte är betydande ger observationer från fält att drivningen blir betydligt mer kontrollerad i samband med att sponten greppas från toppen.



Figur 4.15 Acceleration uppmätt i mätpunkt GMP1 *mot sponttåns neddrivningsdjup. Färgkodningen till höger indikerar jordprofilen med uppifrån fyllning, lera, morän respektive berg.*



Figur 4.16 Acceleration uppmätt i mätpunkt GMP2 *mot sponttåns neddrivningsdjup. Färgkodningen till höger indikerar jordprofilen med uppifrån fyllning, lera, morän respektive berg.*

För SP5 och SP6 syns, precis som vid tidigare försök, en ökning i vibrationsnivåer när sponten når moränlagret.

4.5 SAMMANFATTNING

I Tabell 4.4 återfinns en sammanfattning av de fältförsök som är utförda inom det här projektet tillsammans med försök utförda inom tidigare doktorandprojekt av Deckner (2017). Närmare beskrivning av fältförsök Karlstad teater 2010 återfinns i Lidén (2012) samt Deckner et al. (2017). Närmare beskrivning av fältförsök Solna 2013 återfinns i Guillemet (2013) samt Deckner et al. (2017). Närmare beskrivning av fältförsök Värtahamnen 2014 återfinns i Daniel & Lovén (2014) samt Deckner et al. (2017).

Tabell 4.4 Sammanfattning av fältförsök gjorda i Sverige inom forskningsarbetet vid KTH Jord- och Bergmekanik under 2010-talet.

	Karlstad teater 2010	**Solna 2013**	**Värta-hamnen 2014**	**Uppsala 2018**	**Västerås 2019**
Jordlager	fyll-sand (silt)-lera	fyll-lera-morän-berg	fyll-lera-morän-berg	fyll-fast lera-sand-morän-berg	fyll-lera-morän-berg
Spont-profil	PU12	Larssen 603	Larssen 604	Larssen 603	VL 604
Spont-längd	12 m	13,8 & 11 m	12 m	10 m	13 m
Vibrator	Dieseko 2316VM	Liebherr 1100H	ABI TM 14/17V	Liebherr 1100H	Movax SPH-80
Montering	Gejder	Gejder	Gejder	Gejder	Grävmaskin
Driv-frekvens	28 Hz	35 Hz	36 Hz	31 Hz	33 Hz
Antal givare på spont	0	9	1	3	3
Antal givare i jord	0	9	0	0	0
Antal givare på markytan	3	0	3	3	4

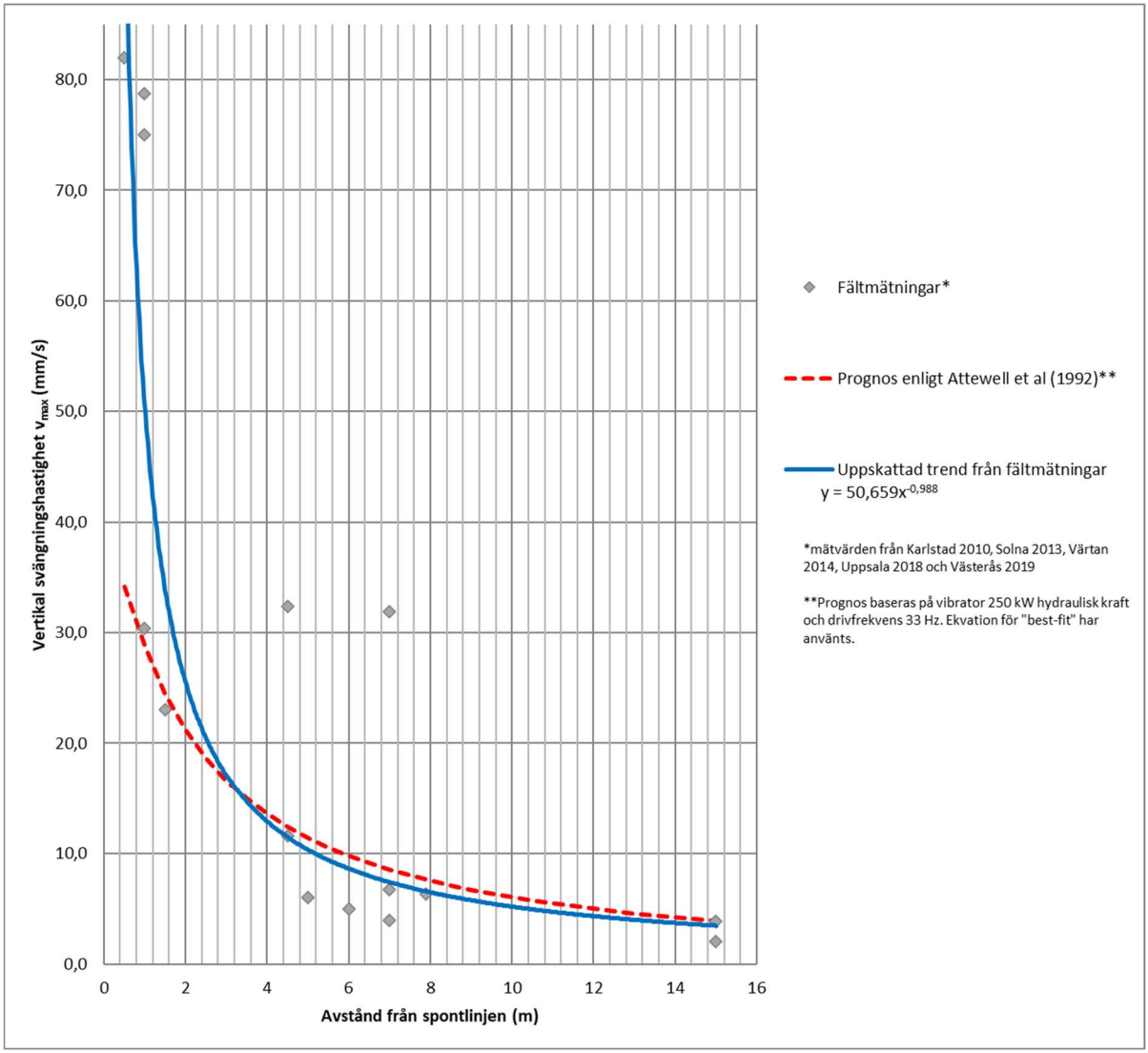
I Figur 4.17 visas en sammanställning av maximal vertikal svängninghastighet, v_{max}, från de fem fältförsöken sammanställda i Tabell 4.4 mot avståndet från vibrationskällan, i det här fallet den drivna sponten. Uppmätta värden från fältmätningarna redovisas som gråa romber. Utifrån dessa uppmätta värden har en trendlinje skapats med hjälp av funktionen trendlinje i Excel. Trendlinjen har erhållits genom bästa kurvanpassning utifrån de uppmätta värdena och erhållit Ekv. 4.1 för v_{max}.

Ekv. 4.1 $$v_{max} = 50{,}659x^{-0{,}988}$$

Där x = avståndet från spontlinjen (m)

I Figur 4.17 har också adderats en prognos utförd med hjälp av Ekv. 3.2 och en antagen power input på 250 kW och en drivfrekvens på 33 Hz. Prognos enligt Attewell et al. 1992 har adderats till Figur 4.17 för att visa att prognosen väl följer uppmätta värden. Ska prognos enligt Attewell et al. (1992) användas i ett verkligt projekt rekommenderas att värden enligt en halv- eller en standardavvikelse används.

Det ska också observeras att det finns mätvärden som tydligt avviker från prognosvärden, varför prognostisering alltid ska göras med en riskbedömning. Båda de värden som avviker rejält uppmättes vid projektet i Uppsala 2018, det är dock oklart varför dessa värden är så pass mycket höge än på motsvarande avstånd i de andra försöken.



Figur 4.17 Maximala vertikala svängningshastigheter uppritade mot avstånd från sponten tillsammans med en trendlinje samt en prognos baserad på Attewell et al. (1992).

5 RESULTAT OCH DISKUSSION

5.1 INTRODUKTION

Forskningsprojektet och de båda fältförsöken har genererat stora mängder data och resultat. I det här stycket belyses viktiga trender genom ett urval av resultat. Vidare diskuteras kring trender i mätresultaten och åtgärder för att minimera markvibrationer utvecklas.

5.2 INVERKAN AV VIBRATORUTRUSTNING

Tidigare forskning har visat att det är fördelaktigt att använda en så hög frekvens som möjligt vid drivning. Detta för att undvika risken för resonansproblem i jorden, byggnader eller andra strukturer. Frekvensen har inte aktivt studerats i detta forskningsprojekt då de bedömts att tidigare forskning är tillförlitlig och väl underbyggd.

Arbetet pekar på att drivning med högt excentriskt moment (amplitud) minskar uppkomsten av markvibrationer. Detta är i linje med det faktum att en störd jord överför vibrationer sämre än en ostörd jord, och ju högre excentriskt moment desto mer störs jorden.

Fältförsöket i Västerås visade tydligt att drivningshastigheten ökade då maskinen stod placerade så att föraren hade god sikt över spontplankan i relation till redan installerad spontvägg. Drivhastigheten och ”problemen” i samband med drivning är tydligt relaterade till hur maskinen var positionerad. Vid optimal positionering, dvs när maskinen är i rät vinkel mot spontlinjen, drivs sponten med högsta hastighet och minimalt med problem. Dock syns ingen påverkan på storleken på uppkomna markvibrationer utifrån maskinens position, däremot var drivhastigheten betydligt lägre och då även drivtiden är en betydande faktor är det viktigt att även optimera maskinens position.

En så kallad resonansfri vibrator, där möjlighet finns att reglera det excentriska momentet i samband med uppstart och avstängning av maskinen, minimerar uppkomsten av resonans i samband med att maskinen varvar upp och ner vid start och avslut av drivning. Då tex jordlager har en betydligt lägre resonansfrekvens än den som normalt sett används vid drivning finns risk att vibrationer i jorden förstärks då denna frekvens passeras vid start och stop av maskinen.

För optimal spontdrivning ska sponten röra sig enbart i den vertikala riktningen. När spontens greppas i livet ger det upphov till att sponten även rör sig horisontellt till viss del. Vid användande av grävmaskinsmonterade vibratorer och greppning från sidan förstärks spontens horisontella rörelse ytterligare. Således finns optimering och energibesparing att

göra om sponten greppas och vibratorn placeras så nära spontens neutrala lager som möjligt i plan.

Operatörens kunskap och erfarenhet har visat sig vara viktig när det gäller både markvibrationer och neddrivningshastighet. En erfaren och kunnig operatör, som är van vid den aktuella maskinen har större chans att få ner sponten på ett skonsamt och effektivt sätt.

Vid riktigt känsliga förhållanden gällande omgivningspåverkan; välj borrning eller pressning.

5.3 INVERKAN AV SPONTPARAMETRAR

Friktion i låsen kan vara ett problem vid installation av spont. Dock är det väldigt lite analyserat och det är oklart hur en högre låsfriktion påverkar storleken på uppkomna markvibrationer. Det är dock klart att låsfriktion påverkar möjligheten att få ner en spontplanka samt drivningshastigheten. Detta syntes bland annat tydligt vid fältförsöket i Västerås 2019. Vid fältförsöket i Västerås 2019 syntes ingen märkbar skillnad i markvibrationernas storlek mellan de fall där låsfriktionen var stor jämfört med de fall där låsfriktionen var lägre. Men då en ökad låsfriktion minskar drivningshastigheten och således ökar tiden då markvibrationer pågår finns fördelar med att minska låsfriktionen. En minskad låsfriktion kan uppnås genom att använda spontplankor med oskadade och rena lås samt noggrannhet rörande vinkelavvikelse mellan installerad spont och spontplanka som drivs.

Speciellt i lera så ger en ökad vibration av den drivna spontplankan inte nödvändigtvis ökade markvibrationer. Detta är något som ses i såväl fältförsöket i Västerås 2019 samt i den numeriska modellering som presenteras i Deckner et al. (2019).

Arbetet visar också på att spontens längd i jorden inte nämnvärt påverkar uppkomsten av markvibrationer, vilket är i linje med resultat från Deckner et al. (2019), som visar att störst andel vibrationer kommer från spontfoten.

5.4 INVERKAN AV GEOTEKNISKA FÖRHÅLLANDEN

Fältförsöken utförda i detta projekt bekräftar tidigare trend att vibrationerna i marken tenderar att öka då spontfoten penetrerar ett fastare jordlager. För att minimera markvibrationer som uppkommer på grund av det kan förborrning eller förschakt användas för att luckra upp materialet.

Omgivningspåverkan i form av vibrationer hänger ofta ihop med drivbarhet då båda dessa påverkas av hur svårt- eller lättdrivet det är, vilket i sin tur påverkas av de geotekniska förhållandena på platsen. Svårighet att får ner sponten till avsett djup kan antingen bero på att jordens fasthet är mycket hög eller att jorden innehåller block som sponten som förhindrar vidare nedträngning. I praktiken används ofta efterslagning med fallhejare då sponten ej har nått erforderligt djup. Användning av efterslagning bör endast göras med stor försiktighet och i möjligaste mån minimeras. Efterslagningen ger upphov till ökade markvibrationer såväl som skador på sponten samtidigt som dess effekt i många fall är begränsad.

Stora problem med markvibrationer beror ofta på resonansproblem i jordlager eller resonans i andra system såsom byggnader, konstruktioner m.m. Jordlagers resonansfrekvenser är ofta relativt låga vilket innebär att en ökning av frekvenser ofta minimerar problemet. I andra system kan det vara andra resonansfrekvenser som styr, även för dessa hjälper det ofta att öka frekvensen då högre frekvenser dämpas fortare. Skulle dock problemet kvarstå vid ökad frekvens eller om maximal frekvens redan används kan lösningen vara att minska frekvensen. För att veta om resonans i jordlager kommer att vara ett problem är det viktigt att ha en god kännedom om jordlagerföljen inom området samt enskilda jordars egenskaper.

5.5 MÄTNING I FÄLT

5.5.1 Provspontning

Provspontning rekommenderas som ett bra verktyg, både för att undersöka drivbarheten och uppkomsten av markvibrationer. Vid en provspontning bör följande beaktas:

- Väl undersökta geotekniska förhållanden, speciellt viktigt är jordlagerföljd och skiktgränser, jordens styvhet/fasthet samt förekomst av block eller andra hinder.
- Instrumentering med geofoner eller accelerometrar på olika avstånd från sponten placerade i jorden samt gärna på grundmuren på en närliggande byggnad eller annan konstruktion.
- Filma provspontningen

5.5.2 Realtidsmätning

I de fall då en provspontning inte är möjlig men då risken för vibrationsproblem är överhängande rekommenderas realtidsmätningar där maskinoperatören kan se uppkomna vibrationer i realtid och utifrån det anpassa installationen för att erhålla lägsta möjliga vibrationspåverkan. I Massarsch et al. (2017) ges förslag på instrumentering och utförande av realtidsmätning i samband med vibrodrivning av spont.

Realtidsmätningar bör omfatta registrering av följande parametrar (Massarsch et al., 2017):

- Spontens läge
- Spontfotens djup
- Drivfrekvens
- Vibration i marken
- Vibration på närliggande byggnad eller annan konstruktion

6 SLUTSATSER OCH FÖRSLAG PÅ FORTSATTA STUDIER

6.1 INTRODUKTION

Inom ramarna för forskningsprojektet, som finansierat av SBUF och BiG, har två fältförsök utförts. Dessa fältförsök har kompletterat tidigare utförda fältförsök och forskning vid KTH Jord- och bergmekanik under 2010-talet. Utifrån detta presenteras nedan slutsatser i form av praktiska råd i syfte att minimera uppkomsten av markvibrationer i samband med vibrodrivning av spont.

Slutsatserna kompletteras också med förslag på fortsatta studier inom ämnet för att utöka kunskapen ytterligare och möjliggöra bättre prognostisering av uppkomna markvibrationer.

6.2 SLUTSATSER

Baserat på tidigare studier och forskning samt på de fältförsök som är gjorda inom ramarna för det här fältförsöket föreslås följande åtgärder i syfte att minimera markvibrationer i samband med vibrodrivning:

- Förborra genom, alternativt ta bort, fyllning som innehåller hinder eller består av riktigt fast material.
- Driv med så högt excentriskt moment som möjligt.
- Driv med så hög frekvens som möjligt.
- Använd en så kallad resonansfri vibrator, där möjlighet finns att reglera det excentriska momentet i samband med uppstart och avstängning av maskinen.
- Vid riktigt känsliga förhållanden; välj installation med borrning eller pressning.
- Minimera friktionen i låsen
- Vid användning av grävmaskinsmonterad vibrator försök att greppa från toppen av plankan i så stor utsträckning som möjligt.
- Efterslagning av spont med fallhejare bör minimeras då det tenderar att ge upphov till vibrationer såväl som skador på sponten.
- En erfaren och kunnig operatör, som är van vid den aktuella maskinen, har större chans att få ner sponten på ett skonsamt och effektivt sätt.

Vidare så visas i samtliga fältförsök att generellt avtar markvibrationerna snabbt med avståndet från spontlinjen.

Även om inte huvudsyftet var att studera drivningshastighet har drivtiden en indirekt påverkan på vibrationsproblematiken. Drivtiden är viktig då det inte bara är storleken på vibrationen som är viktig utan också hur många cykler som innefattas och hur länge vibrationen pågår. Det är således viktigt att både minimera storleken på uppkomna vibrationer samt tiden som vibrationerna pågår. Gällande neddrivningshastighet har följande observationer gjorts:

- Vid drivning med grävmaskinsmonterad vibrator ska maskinen placeras så att föraren har god sikt över spontplankan i relation till redan installerad spontvägg.
- Drivning med ett högre excentriskt moment resulterade i högre neddrivningshastighet
- Var noggrann med lutning och vinkel på spontplankan i relation till redan installerad spontplanka för att minimera låsfriktion.

Som ett bra verktyg, både för att undersöka drivbarheten och uppkomsten av markvibrationer rekommenderas provspontning. Vid en provspontning bör följande beaktas:

- Väl undersökta geotekniska förhållanden
- Instrumentering med geofoner eller accelerometrar på olika avstånd från sponten placerade i jorden samt gärna på grundmuren på en närliggande byggnad eller annan konstruktion.
- Filma provspontningen

I de fall då en provspontning inte är möjlig men då risken för vibrationsproblem är överhängande rekommenderas realtidsmätningar där maskinoperatören kan se uppkomna vibrationer i realtid och utifrån det anpassa installationen för att erhålla lägsta möjliga vibrationspåverkan. Realtidsmätningar bör omfatta instrumentering med geofoner eller accelerometrar placerade i jorden på ett eller flera avstånd från sponten samt på grundmuren på den närliggande byggnad eller annan konstruktion där vibrationskraven är som hårdast.

6.3 FÖRSLAG PÅ FORTSATTA STUDIER

Denna rapport sammanfattar ett forskningsarbete vid Jord- och Bergmekanik på KTH som har pågått under hela 2010-talet. Arbetet har resulterat i en större förståelse för uppkomsten av markvibrationer i samband med vibrodrivning av spont samt vilka åtgärder som kan vidtas för att minimera vibrationerna. Det som fortfarande saknas är ett tillförlitligt sätt att prognostisera uppkomsten av markvibrationer innan ett byggprojekt startar. En bättre prognostisering skulle innebära möjligheter att redan tidigt i projekteringen göra adekvata val kring installation av spont för att minimera omgivningspåverkan.

Således rekommenderas fortsatta studier kring framtagande av en prognosmodell för markvibrationer i samband med vibrodrivning av spont.

REFERENSER

Referenser som del av det forskningsarbete som bedrivits på KTH under 2010-talet:

Daniels, M. and Lovén, K. (2014). *Differences in ground vibrations generated from installation of bored and vibrated retaining walls – A field study*. Master of Science Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

Deckner, F. (2013). *Ground vibrations due to pile and sheet pile driving – influencing factors, predictions and measurements*. Licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

Deckner, F. (2017). *Vibration transfer process during vibratory sheet pile driving – from source to soil*. Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

Deckner, F., Viking, K. & Hintze, S. (2012). Ground vibrations due to pile and sheet pile driving – prediction models of today. *Proceedings of the European Young Geotechnical Engineers Conference* (Wood T and Svahn V (eds)). Swedish Geotechnical Society, Gothenburg, Sverige, pp 107-112.

Deckner, F., Guillemet, C., Viking, K. & Hintze, S. (2015a). Instrumentation System for Ground Vibration Analysis during Sheet Pile Driving. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 38, No. 6, pp. 893-905, DOI: 10.1520/GTJ20140275.

Deckner, F., Viking, K. & Hintze, S. (2015b). Vibration transfer during vibratory sheet pile driving – a full-scale field test. *Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 1-4 November, Christchurch, New Zealand.

Deckner, F., Viking, K. & Hintze, S. (2015c). Aspects of Ground Vibrations due to Pile and Sheet Pile Driving. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 20, Bund. 19, pp. 11161-11176.

Deckner, F., Viking, K. & Hintze, S. (2017). Wave Patterns in the Ground: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 35, No. 6, pp. 2863–2878. DOI 10.1007/s10706-017-0285-x.

Deckner, F., Johansson, J., Viking, K. & Hintze, S. (2019). Major vibration source during vibratory sheet pile driving – shaft versus toe. *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019*, 1-6 September, Reykjavik, Iceland.

Guillemet, C. (2013). *Pile-Soil Interaction during Vibratory Sheet Pile Driving*. Master of Science Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

Kriege, A. (2019). *Minimization of ground vibrations caused by vibratory driven sheet piles: a Full-scale field study*. Zentrum Geotechnik, Technischen Universität München, Examensarbete.

Lidén, M. (2012). *Ground vibrations due to vibratory sheet pile driving*. Master of Science Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

Tsegay, H.T. (2018). *Vibration caused by sheet pile driving – effect of driving equipment*. Master of Science Thesis. Division of Soil- and Rock Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sverige.

Övriga referenser:

Athanasopoulos, G.A. & Pelekis, P.C. (2000). Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 371-387.

Attewell, P.B., Selby, A.R. & O'Donnell, L. (1992a). Estimation of ground vibration from driven piling based on statistical analyses of recorded data. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 10, pp. 41-59.

Attewell, P.B., Selby, A.R. & O'Donnell, L. (1992b). Tables and graphs for the estimation of ground vibration from driven piling operations. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 10, pp. 61-87.

Attewell, P.B., Farmer, I.W. (1973). Attenuation of ground vibrations from pile driving. Ground Engineering, Vol. 3, No. 7, pp. 26–29.

Dowding, C.H. (1996). *Construction Vibrations*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, USA.

Erlingsson, S. (1999). Three-dimensional dynamic soil analysis of a live load in Ullevi Stadium. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 373-386.

Galitzin, B. (1912). Über die Dispersion und Dämpfung der seismischen Oberflächenwellen. *Bulletin de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Pétersbourg*, pp. 219-236.

Head, J.M. & Jardine, F.M. (1992). *Ground-borne vibrations arising from piling*. CIRIA Technical Note 142, CIRIA, London, UK.

Holmberg, R., Arnberg, P.W., Bennerhult, O., Forssblad, L., Gereben, L., Hellman, L., Olsson, K., Rundqvist, G., Sjöberg, C., Sjökvist, K. & Wallmark, G. (1984). Vibrations generated by traffic and building construction activities. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sverige.

Houzé, C. (1994). HFV Amplitude Control Vibratory Hammers: Piling Efficiency without the Vibration inconvenience. *Proceedings of the Fifth International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations*, Bruges, Belgium, pp. 2.4.1-2.4.10.

Lamb, H. (1904). On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Vol. 203, pp. 1-42.

Massarsch, K.R. (2000). *Vibratorers användningsmöjligheter vid drivning av pålar och spont*. Pålkommissionen rapport 99, Linköping, Sverige.

Massarsch, K.R., Fellenius, B.H. & Bodare, A. (2017). Fundamentals of the vibratory driving of piles and sheet piles. *Geotechnik*, Vol. 40, No. 2, pp. 126-141. DOI 10.1002/gete.201600018.

Viking, K. (2000). Full-scale field-test study of dynamic soil resistance of vibratory driven sheet piles. *Proceedings of the sixth international conference on the application of stress-wave theory to piles*, Sao Paulo, Brazil, 11-13 September 2000.

Viking, K. (2002). Vibro-driveability – a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils. Doctoral Thesis 1002, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Viking, K. (2006). The vibratory pile installation technique. *Proceedings of TRANSVIB 2006*, Paris, Frankrike, pp. 65-82.

Whenham, V. (2011). *Power Transfer and Vibrator-Pile-Soil Interactions within the framework of vibratory pile driving*. Doctoral Thesis, University of Louvain, Belgium.