

## MOT STOPPDRIVNINGSKRITERIER FÖR VIBRODRIVNING AV SPONT I SKANDINAVISK LERMORÄN

*Thaleb Abdallah<sup>A</sup>, Erika Tudisco<sup>A</sup>, Kent Persson<sup>A</sup>, Per-Erik Austrell<sup>A</sup>, Kenneth Viking<sup>B</sup>*

<sup>A</sup> *Lunds universitet, LTH*

<sup>B</sup> *Trafikverket*

### SAMMANFATTNING

Vibrodrivning av spont är en av de vanligaste metoderna för spontinstallation. Denna teknik går ut på att en spont vibreras i samband med neddrivning i jorden, varvid en effektiv neddrivning erhålls. En spont kan dock påträffa block och sten, i samband med vibrodrivning i skandinavisk lermorän. Detta kan leda till lokala brott i spontfoten (se Figur 1) vilket kan orsaka flera utmaningar för entreprenören. Dessa utmaningar kan bestå av omfattande åtgärder och merkostnader för att t.ex. upprätthålla tätningen mot grundvattenflödet, samt den laterala stabiliteten av stödstrukturen. Sponten bör därför stoppas vid vibrodrivning mot block eller sten för att undvika allvarliga skador i spontfoten. För närvarande saknas regelverk som hanterar en sådan situation. Ett steg mot ett sådant regelverk är att utveckla stoppdrivningskriterier för när vibrodrivning av en spont bör stoppas.

Detta har undersökts i tidigare arbeten som har visat lovande resultat för bedömning av vibrodrivbarhetsanalyser, genom att prediktera brott i spontfoten. Predikteringen baserades på förändringar i den longitudinella accelerationsresponsen hos sponten, vid finita elementsimuleringar av kollisionfri vibrodrivning kontra vibrodrivning där kollision förekommer. Ett förslag för att ytterligare förbättra predikteringen av brott i spontfoten, vid vibrodrivning mot block eller sten, är att även analysera den transversella accelerationsresponsen hos sponten. I denna studie användes finita elementmetoden för att simulera vibrodrivning av en spont i kollision mot granit, i olika kontaktpunkter i spontens tvärsnitt. Den omgivande jorden modellerades med en reologisk elastisk-viskoplastisk materialmodell och kollisionen hanterades med en kontaktmekanisk formulering. Resultaten indikerar att den transversella accelerationsresponsen hos sponten kan användas för prediktering av brott i spontfoten innan plastiska deformationer uppkommer, på grund av kollision mot granit vid vibrodrivning. Dessutom indikerar resultaten att predikteringen var oberoende av kontaktpunktens läge i spontens tvärsnitt

### SUMMARY

Vibratory driving of sheet piles have gained traction in infrastructure projects in the recent decades. This technique involves vibrating the sheet piles which facilitates

effective driving of the sheet piles into the soil. The method of vibro-driving may also be utilized with other types of piles, as an alternative to impact-driven methods. However, as sheet piles are being vibro-driven, they may encounter boulders or densely packed soil. This then leads to local failure of the sheet pile toe, which causes several challenges for the contractors in terms of additional costs and groundwater leakage, to name a few. Thus, there is a need of a stop-driving criterion for vibro-driven steel sheet piles.

Previous work has shown promising results of assessing vibrodrivability by predicting failure of the steel sheet pile toe, whereby the longitudinal acceleration response of the sheet pile was studied. In those works, collision with a boulder was modelled with FEM and the longitudinal acceleration response showcased substantial discrepancy from a collision-free analysis. However, the response was insignificantly affected when only the sheet pile flanges collide with the boulder. A proposal to improve the earlier studies is to analyse the transversal acceleration response as well. Furthermore, a more refined material model for both soil and sheet pile will be adopted. The soil model will be a more general elastic viscoplastic material model, while the model for the sheet pile will be based on a contact mechanical formulation. Thus, simulations may provide a nuanced prediction of the failure of the vibro-driven sheet pile in collision with a boulder, regardless of the point of contact on the sheet pile cross-section.

## 1 BAKGRUND

Spontning utförs ofta för att hålla kvar jordmassor samt för att begränsa grundvattenflöde från schaktområden under byggarbeten. Spontning utförs genom stegvis installation av enskilda sponter som låses samman med den tidigare placerade profilen och bildar en kontinuerlig vägg. Sponter installeras vanligen genom vibrodrivning. Vibrodrivning utförs genom att montera en spont på en vibrator som producerar vertikala svängningar genom roterande excentriska massor, tillsammans med en statisk drivkraft som vanligtvis produceras av ett hydraulsystem. Sponter drivs ofta ner till bergövertytan för att möjliggöra en adekvat tätning genom måttlig jetinjektering, vilket förhindrar grundvattenläckage samt säkerställer stödskonstruktionens rotationsstabilitet. Rotationsstabilitet uppnås genom dymplingsverkan som tillhandahålls av bergdubbar installerade i berggrunden, vilka stödjer spontföten. Bergdubbar installeras genom att först borra i jorden, så nära sponten som möjligt, och därefter i berggrunden. Således är växelvisa sponter försedda med ett stålrör som är svetsat längs hela spontens längd för en smidig borrhinsprocess.

På grund av omfattande glaciationer under istiden kännetecknas skandinavisk jord som kraftigt överkonsoliderad, vilket innebär tätt packad jord. Den tättpackade jorden kan leda till betydande motstånd mot vibrodrivning vilket kan orsaka svårigheter i att uppnå önskad inbäddningslängd för sponten. Dessutom består skandinavisk jord vanligen av glaciala avlagringar, i synnerhet lermorän. Därför förekommer stora

kornfraktioner såsom sten och block vanligen i jorden. Denna sammansättning av morän utgör en risk för kollisioner med block under spontdrivningen, vilket förhindrar full genomträngning av sponten till måldjupet.

Spontfoten är känslig för allvarliga skador vid kollision mot block, se Figur 1. Konsekvenserna av sådana skador är betydande med avseende på funktionen hos spontväggen som ska byggas. När spontfoten skadas riskerar grundvatten att läcka in på byggarbetsplatsen och att förhindra detta kräver omfattande jetinjektering. Dessutom skulle en allvarligt skadad spontfot förhindra borrhingsprocessen som ska installera bergdubbarna så nära sponten som möjligt. För att säkerställa rotationsstabilitet hos sponterna måste omfattande åtgärder vidtas. Till exempel att borra och installera bergdubbarna längre bort från spontfoten och sedan svetsa stålplåtar mellan sponten och bergdubben för att säkerställa omedelbar interaktion. Dessutom kan kollision mot block under vibrodrivning riskera att spontlåset brister, varvid låsmekanismen förlorar sin funktion, vilket resulterar i förlust av rotationsstabilitet.



*Figur 1. En fördärvad spontfot som följd av kollisionsdrivning (Foto: Kenneth Viking).*

Ytterligare svårigheter uppstår vid utdragning av de skadade sponterna. Förekomsten av omfattande jetinjektering vid spontfoten kan innebära behov av tyngre utrustning för att dra ut sponten. Trots detta kan jetmassan skada jorden vid utdragning av sponten. På samma sätt skulle en allvarligt skadad och krokig spontfot förorsaka liknande svårigheter vid utdragningsprocessen av sponten. Dessutom skulle utdragningsprocessen i sådana fall förorsaka intensiva vibrationer i omgivande mark, vilket utgör en risk för att skada infrastrukturen i närheten, såsom den nybyggda

anläggningen, eller närliggande vägar, byggnadsfundament och markledningar. Om utdragningsprocessen av sponterna anses vara för kostsam eller svår, tvingas entreprenören lämna sponterna kvar på plats. Detta kan emellertid påverka den naturliga grundvattennivån samt grundvattenflödet.

## 1.1 Problemställning

Från ett projektledningsperspektiv utgör varje åtgärd som ska vidtas av entreprenören, som svar på uppkommande svårigheter under vibrodrivningen och utdragningen av sponter, kostnads- och tidsöverskridanden. Detta kan förorsaka en tvist mellan entreprenören och beställaren, avseende fördelningen av ansvaret för kostnadsöverskridanden som uppkommit under projektarbetet. Sådana oenigheter kan lösas genom en förhandlad uppgörelse. Trots detta kan tvisten eskalera till en rättegång om ingen överenskommelse uppnås.

Vid rättsliga förfaranden granskar domstolen de anspråk som presenteras av både entreprenören och beställaren. Detta omfattar utvärdering av tillämpliga byggregler och förordningar, samt avtalsmässiga förpliktelser avseende byggarbetet. I Sverige har det dock noterats en markant brist på specifikt regelverk avseende vibrodrivning av sponter (Viking & Benito, 2021). Följaktligen kan domstolen finna att det saknas en tydlig rättslig grund för att hålla entreprenören ansvarig om komplikationer uppstår på grund av entreprenörens agerande. Efter vederbörlig process kan det ekonomiska ansvaret för kostnadsöverskridanden falla på beställaren, särskilt om beställaren är en statlig myndighet varvid entreprenören anses vara en betydligt mindre enhet.

Därför finns det ett behov av att utveckla regelverk för vibrodrivning av sponter, nämligen för att ta hänsyn till situationen när kollision inträffar mellan spontfoten och block. Detta föranleder utveckling av stoppdrivningskriterier för vibrodrivna sponter, i analogi med de befintliga stoppdrivningskriterierna för slagna pålar. Syftet med stoppdrivningskriterier är att indikera när det är lämpligt att stoppa vibrodrivningen av en spont innan betydande skada uppstår på grund av kollision mot block eller tätt packad bottenmorän.

Tidigare arbeten (Andersson & Jonsson, 2022) och (Tebäck, 2019) undersökte FE-modellering och simulering av vibrodriven spont vid kollision med ett hinder, i kontrast till en kollisionsfri drivningsanalys. I synnerhet drogs slutsatsen att spontens axiella accelerationsrespons under vibrodrivning kan indikera kollision med ett block (Andersson & Jonsson, 2022). Dessa resultat visade dock även att kontaktpunkten under kollision signifikant påverkade den axiella accelerationsresponsen, med kontakt i flänsarna som gav en icke-störd respons relativt referensfallet för en kollisionsfri drivning. Därför användes ett liknande tillvägagångssätt i denna artikel, genom att utvidga analysen av accelerationsresponsen och komplettera den axiella accelerationsresponsen med den transversella accelerationsresponsen.

## 2 VIBRODRIVNING AV SPONT

### 2.1 Mekaniska vibrationer

Det finns huvudsakligen två olika system för vibrodrivning av sponter, nämligen frihängande och ledarmonterad. Frihängande vibrodrivning innebär en vibrator upphängd från en kran, varvid sponten drivs ner i jorden genom vikten av vibratorarrangemanget. Ledarmonterad vibrodrivning utförs genom att applicera en hydraulisk kraft på vibratorarrangemanget, vilket driver sponten ner i jorden. Således ger ledarmonterad vibrodrivning större kontroll vid justering av den statiska drivkraften, i kontrast till frihängande vibrodrivning som är begränsad av egentungden hos det hängande systemet (Bienen, et al., 2025).

Den vibratoriska rörelsen under drivningsprocessen genereras av motroterande excentriska massor med massa  $m_e$ , samt excentricitet  $e$  mellan rotationspunkten och massans tyngdpunkt. De vertikala svängningarna kan således beskrivas genom summan av en statisk kraft och en centripetalkraft (Holeyman, 2000):

$$F_{vert} = F_0 + F_{cp}$$

där  $F_0$  betecknar den statiska kraften och  $F_{cp}$  betecknar centripetalkraften. Baserat på grundläggande mekanik kan centripetalkraften definieras som

$$F_{cp} = \sum m_e \cdot e \cdot \omega^2 = M_e \cdot \omega^2$$

där  $M_e$  är den totala summan av det excentriska momentet och  $\omega$  är vinkelfrekvensen hos de roterande massorna. Uppenbarligen styrs centripetalkraften av storleken på det excentriska momentet, förutsatt en konstant vinkelfrekvens. En kraftjämvikt för systemet av motroterande massor skulle ge en nollsumma av krafter i horisontell riktning, medan summan av krafter i vertikal riktning skulle motsvara

$$F_{vib} = F_0 + \sum F_{cp} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Förskjutningsamplituden för svängningarna kan definieras som (Holeyman, 2000):

$$s_{amp} = M_e \cdot \omega^2 / m_d$$

där  $m_d$  vanligen benämns som den dynamiska massan, vilken är den accelererade massan hos det betraktade systemet, enligt Newtons andra lag. Till exempel kan den dynamiska massan sättas till att inkludera massan av vibratoren, massan av klämanordningen som fästs vid sponthuvudet, samt massan av sponten.

Den styrande differentialekvationen som ska lösas, med användning av finita elementmetoden, är rörelseekvationen för ett system med flera frihetsgrader (Chopra, 2019):

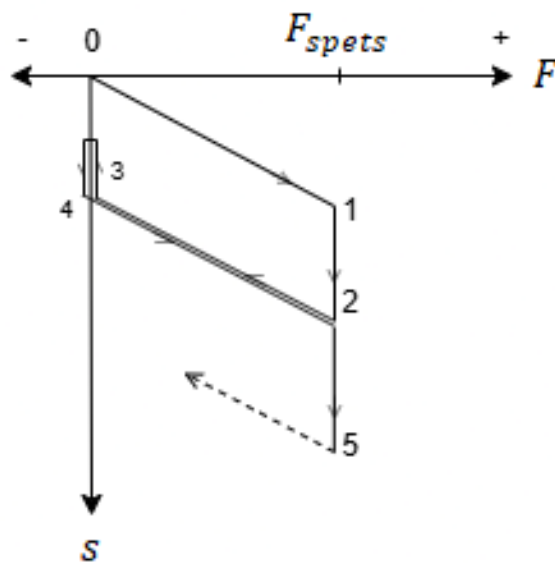
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t)$$

där  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  är mass-, dämpnings- och styvhetsmatriserna,  $\mathbf{F}(t)$  är den tidsvarierande kraftvektorn och  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{u}}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$  är accelerations-, hastighets- och förskjutningsvektorerna.

## 2.2 Spont-jordinteraktion

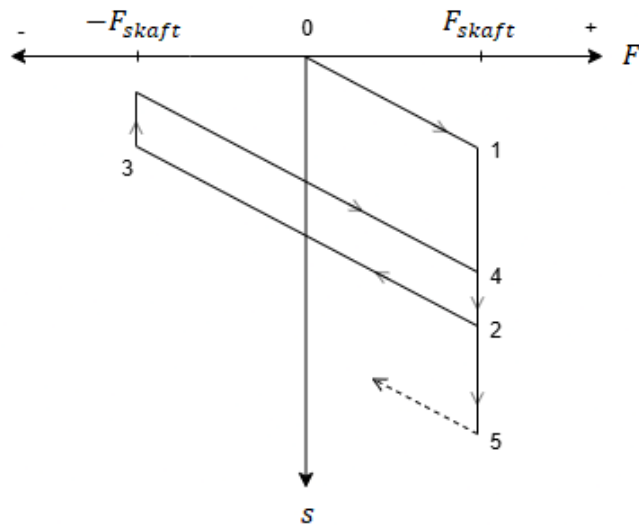
Under vibrodrivningen interagerar sponten med omgivande jord genom kontakt längs spontens mantelyta, samt vid spontfoten. Interaktionen vid spontfoten kan kännetecknas av spetsmotståndet  $F_{spets}$  med avseende på den vertikala förskjutningen  $s$ , vilket visas schematiskt i Figur 2.

En linjär jordmodell kan beskriva detta spetsmotstånd, som representerar reaktionskraften från jorden på spontfoten. När sponten rör sig nedåt in i jorden ökar reaktionskraften linjärt upp till begynnande plasticering i jorden. Sponten fortsätter nedåt tills den når den maximala förskjutningsamplituden i nedåtgående riktning. Under uppåtgående rörelse minskar spetsmotståndet tills kontakten med jorden upphör helt. När sponten rör sig nedåt igen i nästa cykel återupptas kontakten vid i spontfoten och spetsmotståndet ökar igen.



Figur 2. Spont-jordinteraktion i spontfot, efter (Dierssen, 1994).

På liknande sätt kan en linjär jordmodell beskriva skaftmotståndet,  $F_{skaft}$ , längs spontplankans mantelyta, se Figur 3. När sponten rör sig nedåt ökar skaftmotståndet med ökande lateralt jordtryck upp till begynnande plasticering uppnås i jordstrukturgränsytan. Motståndet minskar sedan när sponten rör sig uppåt och når en topp i motsatt riktning, som på liknande sätt motsvarar begynnande plasticering. När nedåtgående rörelse återupptas ökar skaftmotståndet igen, där plastisk deformation återuppträffas innan riktningen återigen växlar inför nästa cykel.



Figur 3. Spont-jordinteraktion i spontskraft.

### 2.3 Spont-berginteraktion

Interaktionen mellan spontfoten, blocket och omgivande jord kan även idealiseras som linjärt enligt Figur 2. Den huvudsakliga skillnaden är att blocket skulle pressa mot jorden och därigenom dämpa stötarna in i jorden. Blocket kan dock uppvisa olika typer av brottmoder, samt stelkroppsrorelse på grund av jordkompaktering under blocket. Emellertid ligger tonvikten i denna artikel på kontaktförhållanden som är övervägande inom det elastiska området för blocket, med endast begränsad lokaliserad plasticitet i blocket. Dessutom kommer spont-block-jordinteraktionen att omfatta stelkroppsrorelsen längs drivningsriktningen.

## 3 FINITA ELEMENTMODELLERING

Finita elementmodellering utnyttjas för att simulera stötförloppet vid vibrodrivning av en spontplanka. Litteraturen avseende FE-modellering av spontinstallation, särskilt vibrodrivning, har visat sig vara begränsad. Därför kommer endast den konventionella Lagrange-formuleringen att användas i modelleringen för enkelhetens skull, där det kommersiella finita elementanalys-programmet Abaqus<sup>®</sup> utnyttjas.

### 3.1 Geometri och materialmodeller

Sponten modellerades som en tredimensionell deformerbar kropp, med användning av skalelement. Detta är lämpligt då sponten är en tunnväggig struktur. Stålmaterialet antogs som elastisk-idealplastisk. och de valda materialparametrarna presenteras i Tabell 1.

Tabell 1. Materialparametrar för stål.

Parameter	Symbol	Värde	Enhet
Elasticitetsmodul	$E$	210	GPa
Poissons tal	$\nu$	0.3	-
Densitet	$\rho$	7850	kg/m <sup>3</sup>
Sträckgräns	$f_y$	355	MPa
Längd	$L_{spont}$	10	m
Vikt	$m_{spont}$	774	kg

Graniten modellerades som en tredimensionell deformerbar kropp, med användning av solida element. Formen valdes till en ellipsoid med stora halvaxeln på 0,25 m och lilla halvaxeln på 0,15 m. Granitmaterialiet modellerades som elastisk-idealplastisk enligt Mohr-Coulombs flytvillkor

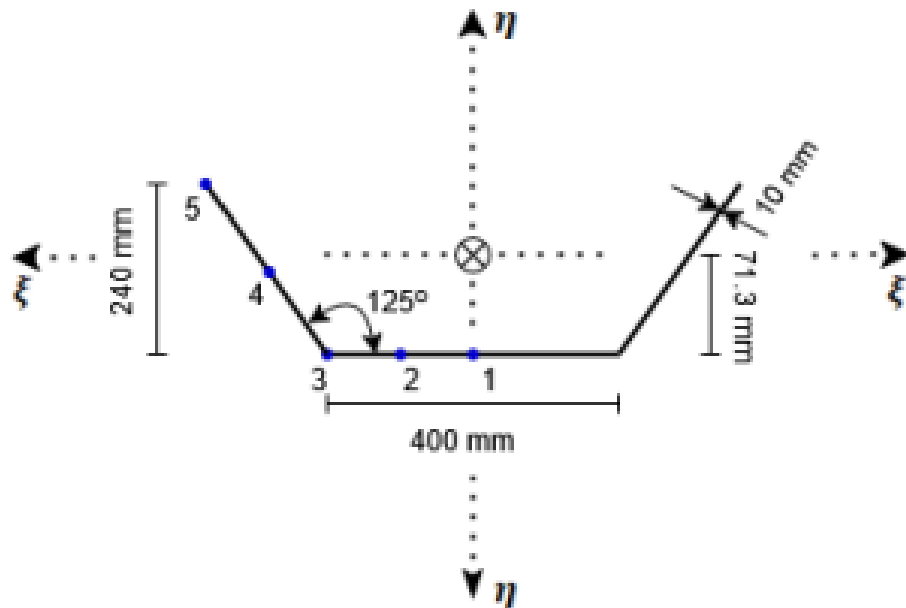
$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$$

där  $c$  är kohesionen i skjuvplanet,  $\sigma_n$  är normalspänningen i skjuvplanet och  $\phi$  är friktionsvinkeln. Vidare specificerades en dilatationsvinkel  $\psi$  och de valda materialparametrarna för granit presenteras i Tabell 2.

Tabell 2. Materialparametrar för granit.

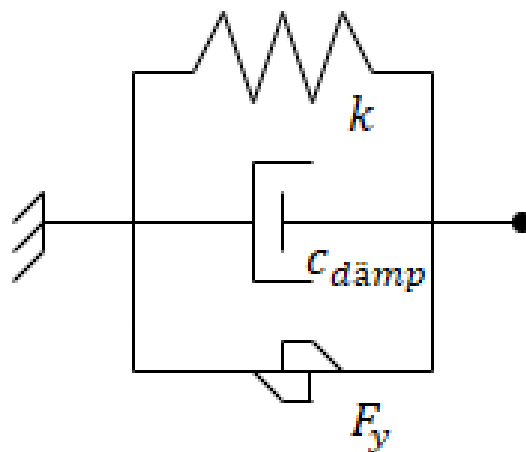
Parameter	Symbol	Värde	Enhet
Elasticitetsmodul	$E$	50	GPa
Poissons tal	$\nu$	0.2	-
Densitet	$\rho$	2700	kg/m <sup>3</sup>
Friktionsvinkel	$\phi$	40	°
Dilatationsvinkel	$\psi$	5	°
Kohesion	$c$	6	MPa

Kollisionen mellan spont och granit simuleras i fem olika kontaktpunkter i sponttvärsnittet, se Figur 4. Dessa kontaktpunkter är i mitten av livet, en fjärdedel av livet, liv-flänshörnan, mitten av flänsen samt flänsspetsen.



Figur 4. Spontplankans tvärsnitt.

Jorden har modellerats med användning av en elasto-viskoplastisk (EVP) reologisk modell, genom att definiera parallellkopplade fjäder-, friktions- och dämpelement, se Figur 5. Dessa fördelades diskret på samtliga noder i spontens mantelyta, se Figur 6. Mantelytan delades in i 0.5 m segment, respektive kännetecknades av en fjäderkonstant,  $k$ , en dämpningskonstant,  $c_{dämp}$ , samt en sträckgräns  $F_y$  vid spontjordgränsytan. Tabell 3 presenterar de antagna värdena för de erforderliga parametrarna för EVP-modellen.

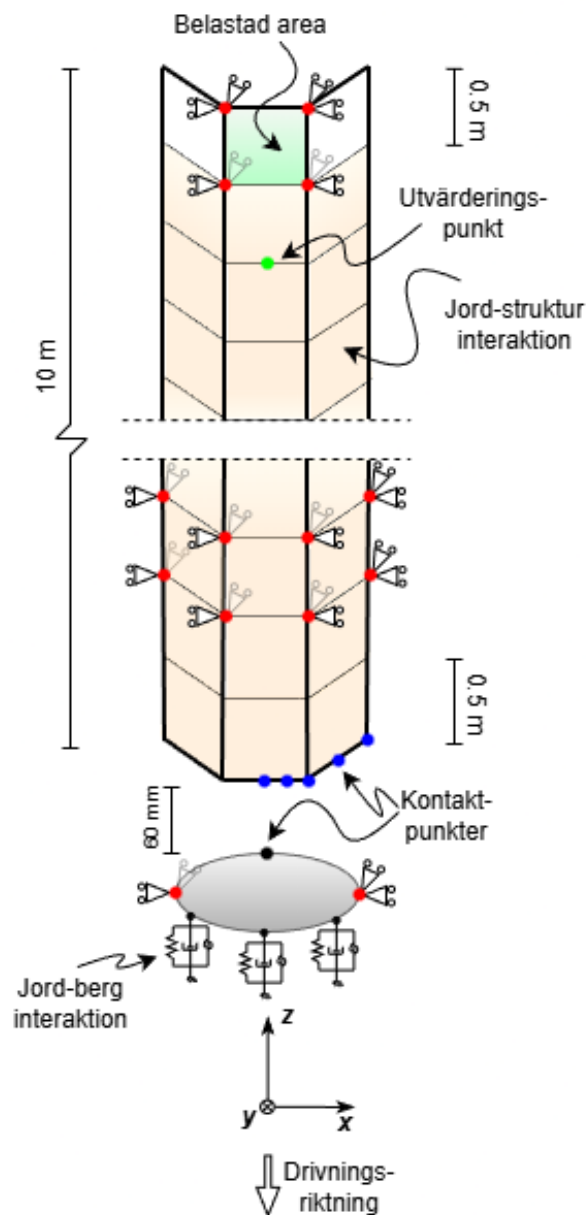


Figur 5. Elastisk-viskoplastisk reologisk modell.

Tabell 3. EVP parametrar.

Parameter	Symbol	Värde – Spont	Värde – Granit	Enhet
Fjäderkonstant	$k$	0.5-4	10	MN/m
Dämpkonstant	$c_{dämp}$	100	1000	N/(m/s)
Sträckgräns	$F_y$	6-11	120	kN

Värdet på fjäderkonstanten och sträckgränsen kalibrerades för att erhålla en adekvat förskjutningsprofil för sponten. Dämpkonstanten valdes så att den dissiperade energin i genomsnitt var ungefär 5% av det totala fysikaliska arbetet.



Figur 6. Uppsättning av spontplanka och granit.

### 3.2 Finita elementmodell

På grund av den harmoniska naturen hos vibrodrivning, samt de stora förskjutningar som uppkommer därtill, antogs ett explicit integrationsschema i Abaqus®. Under en explicit analys beräknar Abaqus® automatiskt det lämpliga tidssteget för att lösningen ska konvergera, baserat på Courant-villkoret (Abaqus, 2024):

$$\Delta t_{stab} \leq l / \sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right)}$$

där  $\rho$ ,  $E$  är materialets densitet och elasticitetsmodul, medan  $l$  är den minsta finita elementstorleken. Sponten tilldelades linjära 4-nods skalelement med reducerad integration, medan graniten tilldelades 8-nods linjära solida element med reducerad integration. Elementnätets storlek valdes, efter ett enkelt konvergenstest, till  $0.12 \times 0.12$  m för sponten och en approximativ global storlek på  $0.05 \times 0.05$  m för graniten.

En förskjutningsprofil som är typisk för vibrodrivning, se Figur 7, användes som vägledning för tillämpningen av kraftstyrd belastning under analysen. Denna profil representerar den statiska kraften  $F_0$ , samt svängningarna  $F_{cp}$  genererade av vibratorn. Förskjutningen kännetecknades av en genomsnittlig drivhastighet på  $v_p = 80$  mm/s och genomsnittlig förskjutningsamplitud  $s = 4$  mm. Valet av krafter, kalibrerade mot förskjutningsprofilen, samt de återstående vibrodrivningsparametrarna, presenteras i Tabell 4.

Tabell 4. Parametrar för vibrodrivning.

Parameter	Symbol	Värde	Enhet
Statisk last	$F_0$	70 (0.35)	kN (Mpa)
Centripetalkraft	$F_{cp}$	758 (3.79)	kN (MPa)
Drivfrekvens	$\omega$ (f)	$2\pi 40$ (40)	rad/s (Hz)
Dynamisk massa	$m_d$	1774	kg
Excentermoment	$M_e$	6	kgm
Drivhastighet	$v_p$	80	mm/s
Förskj.amplitud	$s$	4	mm

Krafterna appliceras som skjuvspänningar, på den översta  $0.4 \times 0.5$  m<sup>2</sup> delen av spontlivet. Förskjutningarna längs kanterna av det belastade området låstes i x- och y-riktning och rotationer låstes kring x-axeln. Detta simulerar en styv och adekvat klämanordning. Liknande randvillkor applicerades på ett parti 1 till 2 m från spontfoten, vilket simulerar högt kompakterad jord med betydande inneslutning. Inga randvillkor sattes på själva spontfoten för att undvika artificiell restriktion på accelerationsresponsen. Dessutom applicerades punktmassor längs den övre kanten av sponten, till totalt 1000 kg, för att ta hänsyn till trögheteffekter från vibratorn, varvid en gravitationsacceleration på 1 g applicerades på hela modellen.

Två huvudsakliga modellkonfigurationer beaktades under analysen. Den första modellen representerar referensfallet för kollisionfri drivning, varvid graniten exkluderades från simuleringen. Den andra modellen representerar kollision drivning, varvid sponten placerades ett avstånd på 60 mm från graniten, i drivningsriktningen.

Graniten begränsades mot rörelser längs de laterala axlarna, samt mot rotationer kring samtliga huvudaxlar. Således tilläts endast rörelse längs drivningsriktningen, varvid EVP-modellen applicerades på undersidan av graniten för att simulera ett fjädrande upplag.

Kontaktinteraktionen mellan sponten och graniten modellerades med användning av en i Abaqus<sup>®</sup> inbyggd kontaktalgoritm, som medför att sponten ej tränger in i graniten. Vidare ansattes en fullständigt förhindrad relativ glidning mellan spontfoten och graniten. All kontakt mellan spont och granit skedde i centrum av graniten, medan kontaktpunkten i sponttvärsnittet varierades.

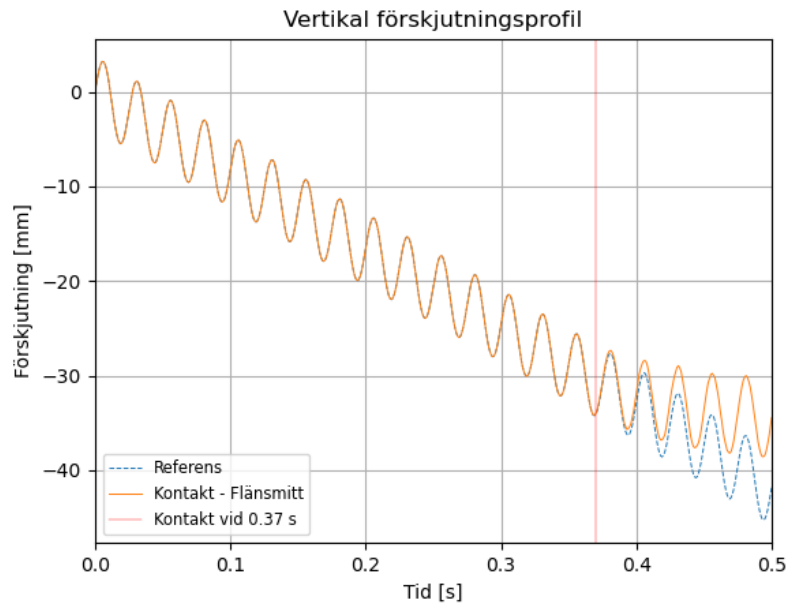
De numeriska simuleringarna kördes under en total tid på 0.6 s, uppdelad i två sekventiella delar. Den första delen utgjorde 0.1 s, vari systemet tilläts att nå ett dynamiskt jämviktstillstånd. Den andra delen omfattade de återstående 0.5 s, i vilken de primära simuleringarna av intresse utfördes.

## **4 RESULTAT**

Resultaten utvärderades i tre noder längs mittlinjen av spontlivet, nämligen vid 1 m från spontfoten, i mittspannet och 1 m från sponthuvudet. För att undvika redundans kommer dock endast resultaten för den sistnämnda noden att presenteras. Vidare kommer endast den transversella accelerationsresponsen i y-riktningen att presenteras, hädanefter benämnd som transversell acceleration. Notera att de första 0.1 s av analyserna har utelämnats.

### **4.1 Förskjutningsprofil**

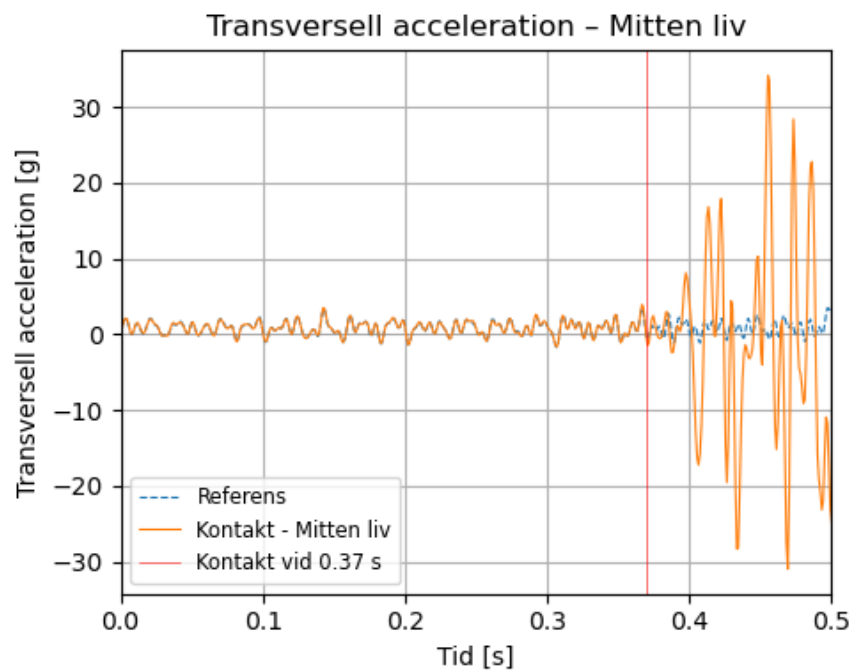
Förskjutningsprofilen som erhöles, efter kalibrering av de påförda krafterna, utgör referensfallet för den kollisionfria simuleringen, se Figur 7. Förskjutningsprofilerna för kollision drivningarna var liknande och således kontrasteras endast den som avser kontakt i mitten av spontfotens fläns med referensfallet.



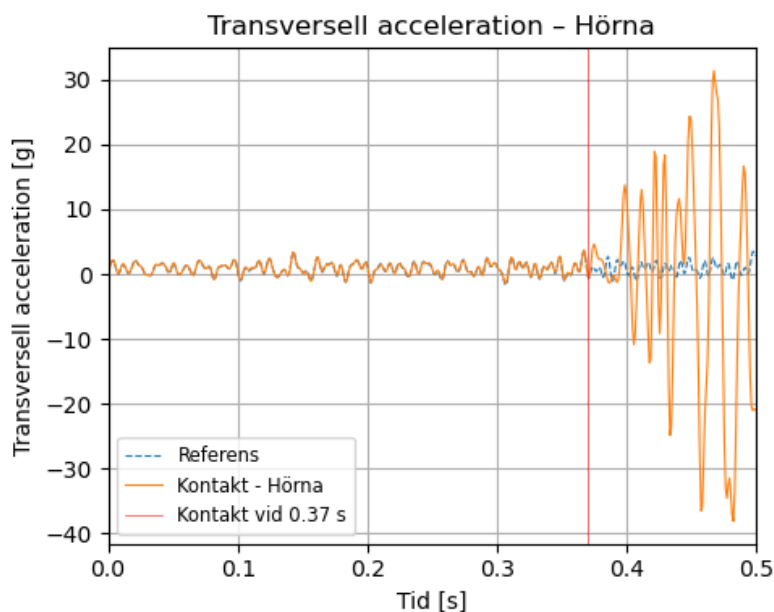
Figur 7. Förskjutning för kontakt i flänsmitt i kontrast med referensfallet.

## 4.2 Kollisiondrivningssanalyser

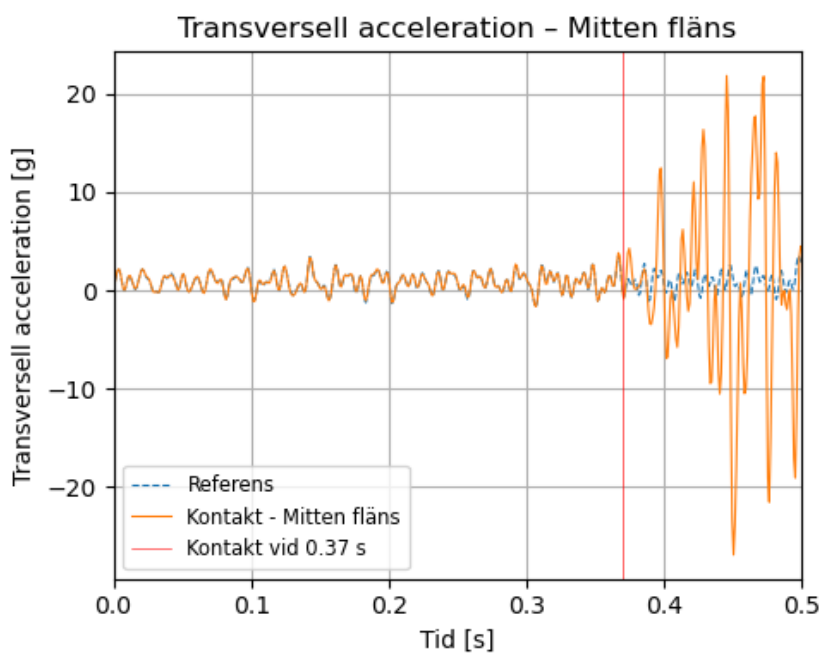
För att undvika redundans presenteras endast tre av de transversella accelerationsresponsen för kollisiondrivningarna. Ett Butterworth-filter har applicerats med en brytfrekvens på 120 Hz, för att dämpa högfrekvent numeriskt brus.



Figur 8. Accelerationsrespons i spontplankan för kontakt i livmitt.



Figur 9. Accelerationsrespons i spontplankan för kontakt i liv-fläns hörnan.



Figur 10. Accelerationsrespons i spontplankan för kontakt i flänsmitt.

## 5 DISKUSSION

Resultaten visar att betydande störningar uppstår i den transversella accelerationsresponsen vid kollisionsdrivning mot graniten, oavsett kontaktpunkt i sponttvärsnittet. Således kan stoppdrivningskriterier möjligen inkludera den transversella accelerationsresponsen.

Accelerationsamplituden noteras dock fortsätta att öka, vilket beror på den intensiva vibrodrivningen, som i sin tur är en följd av de valda krafterna. En mildare vibrodrivning kan ge mindre uttalade skillnader i accelerationsresponsen, såsom för de initiala stötarna precis vid initieringen av kontakten. Diskrepansen i accelerationsrespons är dock fortfarande betydande under de första slagen, mellan 0.37-0.40 s. Dessutom är randvillkoren syntetiska och olika val av randvillkor kan möjligen återspegla olika beteenden hos sponten under vibrodrivning. Vidare definierades och upprättades den använda jordmodellen heuristiskt. Således är samspelet mellan den valda FE-modellen och resultaten betydande. Andra möjliga modelleringstekniker kan ge olika resultat, såsom att modellera jorddomänen som ett kontinuerligt medium

Kontinuerlig övervakning av accelerationsamplituden under drivning kan visserligen vara genomförbar, men att enbart förlita sig på de absoluta amplituderna är möjligen inte tillräckligt. I stället skulle vissa statistiska mått fortfarande behöva definieras för att indikera när stopp skulle vara lämpligt. Till exempel kan kollision mot sten förorsaka toppar i accelerationsresponsen, dock endast under en begränsad tid då sponten skulle krossa eller förflytta bort stenen, och accelerationsresponsen skulle återgå till ett dynamiskt jämviktstillstånd. Därför behöver dessa mått ta hänsyn till minst ett parti av accelerationsresponsprofilen. Dessa mått kan dock definieras baserat på olika uppsättningar av accelerationsrespons. Till exempel skulle ett mått kunna definieras enbart baserat på den longitudinella eller transversella accelerationsresponsen. Ett annat alternativ är att definiera ett mått baserat på en kombination av accelerationerna längs flera principiella axlar. Ett exempel på ett sådant mått är det kvadratiska medelvärdet av accelerationsresponsen.

Vidare var stöten mellan sponten och graniten i samtliga fall mot centrum av granitytan, även om kontaktpunkterna var olika i sponttvärsnittet. Olika kontaktpunkter i graniten kan ge olika beteende hos responsen.

Viktigt är dock att den transversella accelerationsresponsen kan antyda en möjlighet att vidareutveckla stoppdrivningskriterier för vibrodrivna sponter, med avseende på kollision mot block. Detta är viktigt med tanke på den nuvarande avsaknaden av specifika svenska regelverk som hanterar denna situation, då de presenterade resultaten kan bidra till att forma en grund för framtida regulatorisk vägledning i detta avseende. I slutändan skulle adressering av denna lucka i regelverken kunna bidra till en mer nyanserad och rättvis rättslig process, när tvister eventuellt uppstår som följd av konsekvenserna av kollisioner under vibrodrivning av sponter, såsom inlett i denna artikel.

## 6 SLUTSATSER

Syftet med denna artikel var att undersöka möjligheten att förlita sig på den transversella accelerationsresponsen vid definition av stoppdrivningskriterier för vibrodrivna sponter. Resultaten visar att den transversella accelerationsresponsen kan

användas för att prediktera stöt mot block, genom att kontrastera den transversella accelerationsresponsen mot ett referensfall av kollisionfri drivning. Detta kan även kompletteras med den longitudinella accelerationsresponsen. Komplementet skulle vara hjälpsamt i de fall där den longitudinella accelerationsresponsen möjligen inte uppvisar tillräckligt signifikant störning för att kunna dra några slutsatser om en stöt under vibrodrivning av sponter. Ytterligare studier bör dock göras avseende lämpliga spont-jord respektive spont-jord-berg interaktionsmodeller för vibrodrivning av spont. Dessutom kan vidare analyser av olika konfigurationer av spontplankan utföras för att undersöka hur accelerationsresponsen påverkas av bl.a. lastfall och randvillkor. Ett tillvägagångsätt för att validera de numeriska simuleringarna kan vara genom att utföra omfattande fältstudier, där de numeriska resultaten kontrasteras mot de uppmätta resultaten. Vidare kan framtida arbete i detta avseende dra nytta av andra modelleringsmetoder, såsom att modellera jorddomänen som ett kontinuerligt medium.

## 7 TACKORD

Detta arbete har genomförts som en del av ett doktorandprojekt vid LTH. Författarna är tacksamma för den finansiering som tillhandahållits av Trafikverket genom Branschsamverkan i Grunden (BIG-Geo) [TRV 2023/61533] och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).

## 8 REFERENSER

Abaqus, 2024. *Abaqus Analysis User's Manual*. Dassault Systemes SE.

Andersson, A. & Jonsson, J., 2022, *Modeling and simulation of vibratory driven sheet piles – Development of a stop criterion*, Examensarbete TVSM-5254, Avd. För Byggnadsmekanik, Inst. För Byggvvetenskaper, LTH.

Bienen, B. et.al., 2025. *Influence of hook load on vibro-driven pile installation in sand*. Nantes, 5th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics.

Chopra, A. K., 2019. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Fifth Edition. Pearson Education.

Dierssen, G., 1994. *Ein Bodenmechanisches Modell zur Beschreibung der Vibrationsrammung in Körnigen Böden*. Doctoral thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany (på tyska).

Holeyman, A. E., 2000. *Keynote lecture: Vibratory driving analysis*. Rotterdam, Application of Stress-Wave Theory to Piles.

Tebäck, R., 2019, *Dynamisk finita element analys av vibrodriven spontplanka*, Examensarbete TVGT-19/5066, Avd. för Geoteknik, Inst. För Byggvvetenskaper, LTH.