

Rock & roll på KTH

– 40 år av jorddynamisk forskning



Figur 1: Nya Ullevi i Göteborg som kom i gungning i samband med Bruce Springsteens konsert 1985.

1980 tillsattes vid avdelningen för jord- och bergmekanik på KTH en adjungerad professor i ämnet "geodynamik". Syftet var att strukturera forskningen och undervisningen inom området. Vid denna tidpunkt var vibrationsmätningar fortfarande tids- och kostnadskrävande. Under de följande 40 åren inträffade en revolution av mät- och analystekniken, tack vare tillgången till allt kraftfullare datorutrustning. Nya möjligheter öppnades att använda även avancerade mätmetoder i fält. Det blev möjligt att analysera mätresultaten i realtid och stora datamängder kan idag bearbetas och överföras via internet. Denna explosionsartade utveckling öppnade nya möjligheter även inom jord- och bergdynamiken.

Verksamheten vid KTH har resulterat i 12 doktorsavhandlingar vid avdelningen för jord och bergmekanik, flera licentiatavhandlingar samt ett stort antal examensarbeten. På grund av medvetenheten om miljöaspekter har vibrationsfrågor fått ökad betydelse för samhällsutvecklingen. Föreliggande bidrag beskriver kort den historiska utvecklingen

inom ämnesområdet och ger några exempel på resultaten av från FoU-verksamheten vid främst KTH.

Bruce Springsteen skakar om Nya Ullevi

Under sommaren 1985 höll *Bruce Springsteen* två utsålda konserter, som inte bara skakade om de 64312 åhörarna utan också satte hela anläggningen i

kraftig gungning. På grund av de starka svängningarna i pelarkonstruktionen fick anläggningen byggas om. Problemet med resonanssvängningar studerades i en doktorsavhandling av Erlingsson (1993). Nya Ullevi var grundlagd på slagna pålar i den mycket lösa leran. Förklaringen till de kraftiga vibrationerna var att takten av Springsteens låtar, och därmed frekvensen av belastningen från den hoppande publiken, sammanföll med egenfrekvensen av lerlagret under åhörarområdet. Vibrationerna överfördes vidare till pelarna som hade samma egenfrekvens. Efter en misslyckad åtgärd med kalk-cementpelare ersattes den lösa leran med ett påldäck för att undvika resonansproblem.

Allt började med pålningstekniken...

Sverige har under lång tid varit internationellt ledande inom pålslagningstekniken. Bildandet av Pålkommisionen 1959 är en milstolpe inom svensk geoteknik. Den svenska grundläggningsbranschen har länge präglats av att aktörer, såsom entreprenörer, myndigheter och forskare, bedriver FoU verksamhet i nära samarbete. Redan i mitten av femtiotalet utförde SJ:s geotekniska kontor (*Bror Fellenius*, *Erik Sandegren* och *Lars Hellman*) de första stötvägmätningarna i samband med grundläggningen av Centralstationen i Stockholm. Ombyggnaden krävde slagning av klena stålplåtar med tryckluftshejare. *Bror Fellenius* tog kontakt med *Hans-Christian Fischer*, som arbetade med stötvågsteori för borrhäls. SJ och Atlas Copco gjorde en serie provningar som *Lars Hellman* (1958) rapporterade. Dynamiska mätningar genomfördes med mycket enkel utrustning men detta arbete lade grunden för den praktiska användningen av stötvägmätningen. 1959 beskrev Fischer hur stötvågsteorin kunde användas för att beräkna dynamiska spänningar i pålar. Han utvecklade vid Institutionen för fysik vid Uppsala Universitet ett då unikt datorprogram för analys av stötvägmätningar, som var banbrytande. Pålkommisionen fortsatte detta arbete som ledde till övergången



Rainer Massarsch
f.d. adjungerad professor, KTH



Anders Bodare
f.d. universitetslektor, KTH



Carl Wersäll
forskare, KTH



Stefan Larsson
professor, KTH

från enkla stoppslagningsformler, utgående från energibetraktelser, till effektiva förfaranden baserade på analys av stötvågor. Introduktionen av stötvågmätningar har revolutionerat pålningstekniken och resulterat i stora samhällsbesparingar.

Bengt Broms - initiativtagare

Efter studier och forskning i USA återvände *Bengt Broms* 1964 till Sverige och utsågs till generaldirektör för Statens Geotekniska Institut (SGI). Han var samtidigt speciallärare i geoteknik vid KTH och utnämndes 1974 till professor i jord och bergmekanik. Under denna period startade han ett flertal forskningsprojekt med anknytning till jord- och bergdynamik. Han var också den drivande kraften bakom tillsättningen av en adjungerad professur i jord- och bergdynamik vid KTH 1980. Som medlem av IVAs Pålkommision tog Prof. Broms initiativ till flera forskningsprojekt med anknytning till påldynamik som även blev internationellt uppmärksammat. Bland dessa kan nämnas undersökningar beträffande pålars dynamiska bärförmåga, till exempel *Hellman* (1967) och *Bredenberg* (1982). På Broms initiativ anordnade Sverige de första två stötvågskonferenserna ("Application of stress-wave theory on piles") som hölls i Stockholm i juni 1980 (*Håkan Bredenberg* sekr.) respektive maj 1984 (*Göran Holm* sekr.). Prof. *Broms* var också en av initiativtagarna till bildandet av IVAs kommitté för vibrationsfrågor, som startades 1976 och som senare ombildades till nuvarande Skandinaviska Vibrationsföreningen (SVIB).

Broms utförde en internationellt uppmärksammat undersökning beträffande dynamiska jordtryck som kunde uppstå i samband med vibrationspackning.



Figur 2: Prof. Bengt Broms, initiativtagare till utvecklingen av jorddynamisk forskning i Sverige.

Genom fältmätningar identifierades höga horisontella jordtryck som kunde uppgå till nivåer av det passiva jordtrycket och medföra kostsamma skador vid packning bakom källarväggar (*Rehman och Broms*, 1970 och *Broms*, 1970). Undersökningen presenterade en beräkningsmetod för ökningen av horisontalspänningen.

Insatserna inom jord- och bergdynamik som Broms initierade har gett upphov till en lång tradition av dynamisk forskning och utbildning på KTH. År 1980 utsågs *Rainer Massarsch* till adjungerad professor, som efterträdes 1984 av *Anders Bodare* som universitetslektor i jord- och bergdynamik. Under den perioden undervisade Bodare och Massarsch kurser i jord- och bergdynamik, både på civilingenjörs- och doktorandnivå samt handledde flera doktorsavhandlingar och ett stort antal examensarbeten. Många verksamma geotekniker i Sverige har genom dessa kurser och examensarbeten erhållit kunskaper inom jord- och bergdynamik, vilket har bidragit till ökad medvetenhet om betydelsen av dynamiska frågeställningar vid lösning av geotekniska problem. Bodare och flera av hans examensarbetare arbetade också med jordskalvsteknik i internationella projekt, ofta genom Sida.

Innan tillgången till dagens kraftfulla elektroniska mätutrustning var dynamiska och seismiska mätningar dyra och tidskrävande. Trots detta var svenska forskare tidiga med att utföra olika typer av dynamiska och seismiska mätningar. Tack vare den snabba utvecklingen av mät- och analystekniken under 80-talet öppnades nya möjligheter att utföra elektroniska mätningar även i fält och under ibland svåra yttre förutsättningar. Seismiska mätningar har varit en viktig del av institutionens forskningsverksamhet, som hade tillgång till mycket kompetent personal, såsom *Elis Svensson*, *Kent Allard*, *Per Delin* och *Kent Lindgren*. Vid institutionen tillverkades och utvecklades olika typer av seismiska mätsystem, som var en viktig förutsättning för de många examensarbeten, licentiat- och doktorandprojekt.

Markvibrationskommittén

År 2006 bildades Markvibrationskommittén inom SGF (numera Arbetsgrupp Markvibration). Kommittén samlar yrkesverksamma inom jord- och bergdynamik från konsulter, myndigheter, universitet och entreprenörer och har som målsättning att förbättra geoteknikers kunskap om jorddynamiska frågor samt att informera om de geotekniska förutsättnings betydelse vid lösning av

olika vibrationsproblem. Förutom framtagande av informationsskrifter, anordnande av kurser i jorddynamik och medverkan i standardiseringsarbete hölls från 2006 till 2010 den årliga svenska markvibrationsdagen. År 2012 omarbetades denna till en nordisk konferens, Nordic Ground Vibration Day (NGV), som genomförs vartannat år. NGV hölls i Oslo 2012, i Aalborg 2014, i Stockholm 2016 och i Trondheim 2018. För att hedra Bengt Broms insatser inom jord- och bergdynamik instiftades "Bengt Broms Lecture" som har hållits vid varje tillfälle av framstående föreläsare som har lämnat betydande bidrag inom markvibrationsområdet.

Fallviktsförsök och fallviktspackning

Redan under mitten av 1960-talet utfördes vid KTH ett forskningsprojekt där friktionsjords deformationsegenskaper studerades medels fallviktsförsök. Resultaten från dynamiska försök jämfördes med statiska belastningsförsök (*Orrje*, 1968). Detta arbete avslutades nästan 30 år senare med en doktorsavhandling (*Orrje*, 1996). Vid fallviktsförsök mäts retardationen då en fritt fallande platta/vikt träffar markytan. Genom att integrera retardationstidsförloppet kan jordens reaktion (styvhet) bestämmas som en funktion av plattans nedträngning i jorden. Försöksresultat visar bland annat att den ekvivalenta dynamiska modulen och den dynamiska brottlast som erhålls ur fallviktsförsöken kan vara betydligt större än de resultat som erhålls från statiska plattbelastningsförsök. Dynamiska plattbelastningsförsök började användas även vid institutionen för vägbyggnad, KTH, med syftet att utföra bärighetsmätningar (*Tholén*, 1980).

Omfattande forskning om dynamisk fallviktspackning bedrevs också vid Chalmers Tekniska Högskola, CTH av Eresund (1972). Tyvärr var dessa mycket intressanta undersökningar för tidiga för den praktiska tillämpningen eftersom det vid denna tidpunkt saknades effektiv mätutrustning som kunde användas i fält. Samma koncept (dynamisk förbelastning) föreslogs av *Berggren* (1980) för att förbättra borrar pålars sättningsegenskaper.

Tack vare utvecklingen av kraftfulla seismiska mätmetoder blev det möjligt att utföra seismiska mätningar vid fallviktspackning. I samband med utbyggnaden av Changi flygplats i Singapore utfördes omfattande packningsförsök med fallvikt (massa: 25 ton, fallhöjd: 25 m). Fallvikten och markytan instrumenterades med seismiska givare



Figur 3: Jordpackning med fallvikt för Changi flygplats, Singapore (Krogh och Lindgren, 1997).

(accelerometrar och geofoner), figur 3. Retardationen av massan i samband med nedslaget registrerades och omvandlades till last-deformationskurvor för att utvärdera packningsprocessen, Krogh och Lindgren (1997). Med stöd av dessa mätningar kunde packningseffekten analyseras och jämföras med andra fältmetoder.

Seismiska undersökningar

Seismiska undersökningar kan användas för analys av dynamiska men även statiska problem. En viktig parameter är jordens styvhet, som kan mätas genom seismiska mätningar. Dahlberg (1974) använde i sitt doktorsarbete olika typer av statiska och seismiska undersökningsmetoder för att studera deformationsegenskaperna av överkonsoliderad sand.

Ett forskningsprojekt som utfördes i samarbete mellan Uppsala Universitet och KTH var bestämningen av skjuvvågshastighet och dämpning med vibrerande skruvplatta (Bodare, 1983). Den teoretiska modellen som utvecklades har visat sig vara användbar vid analysen av många dynamiska frågeställningar, såsom samverkan mellan vibrerande fundament och undergrunden. Som ett exempel kan nämnas doktorsavhandlingen av

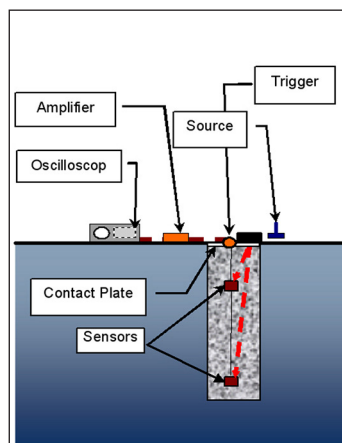
Weiner (1983), som behandlade vibrationsproblem vid drift av ramsågverk. Avhandlingen kan användas av den praktiskt verksamme ingenjören som en handbok vid projektering och dimensionering av direkt på marken grundlagda massiva fundament för maskiner med stationära, periodiska krafter.

Seismiska undersökningar (down-hole-försök) användes för att bestämma kalk-cementpelares styvhet och hållfasthetstillväxt. Resultaten har beskrivits av Massarsch och Eriksson (2002). Mätprincipen visas i figur 4. Seismiska givare (till exempel geofon eller accelerometer) installeras i en KC-pelare kort efter tillverkningen och innan blandningen har hårdnat. En horisontellt polariserad våg (skjuvvåg) genereras genom ett hammarslag mot en platta. Vågens ankomsttid registreras på olika nivåer. Eftersom avståndet mellan givarna är känt, kan skjuvvågens utbredningsfart bestämmas. Utgående från skjuvvågshastigheten kan KC-pelarens styvhet (skjuvmodul) registreras. Genom upprepade mätningar vid olika tidpunkter kunde förändringen av styvheten (och därmed hållfasthetstillväxten) bestämmas (Massarsch, 2005).

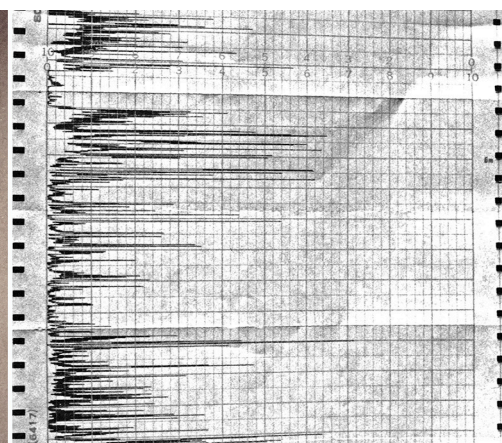
Akustisk sondering

I början av 80-talet utvecklades vid KTH en metod för att kunna identifiera tunna skikt av silt eller sand i lera (Massarsch, 1986). En seismisk sensor installerades i spetsen av en trycksond och ljudet registrerades. Syftet med den akustiska sonderingen var att mäta de skrapljud som uppstår när sondspetsen passerar genom sand- och siltskikt i lös lera. Mätanordningen och ett exempel på ljudregistreringen visas i figur 5. Eftersom det vid denna tidpunkt inte var möjligt att spara så stora datamängder skrevs ljudstyrkan under sonderingen ut i fält. Resultaten visar att den glaciala leran innehöll ett stort antal skikt med högre friktion, som förorsakade vibrationer i sondspetsen.

En annan, ofta förekommande undersökningsmetod är jord-berg-sondering (Jb). Även vid Jb-sondering alstras under borrhänsförloppet vibrationer som propagerar genom jordlagren till markytan. Dessa vibrationers egenskaper återspeglar förutsättningarna vid borrhänsspetsen och kan registreras genom vibrationsgivare som installeras på markytan. För att närmare studera sambandet mellan vibrationernas styrka och frekvensinnehållsamband med Jb-sondering har ett doktorandprojekt initierats vid KTH. Projektet, som finansieras av BIG (Trafikverket) och SBUF, bygger på två pilotstudier, finansierade av SGF, och ett examensarbete. Målsättningen är att utveckla ett komplett mät- och analysystem som ska vara lätt att använda. Inledande försök har visat att genom en frekvensanalys av vibrationssignalen kan kompletterande information erhållas om materialegenskaper när sondspetsen penetrerar olika jordlager eller berg/block. De hittills utförda analyserna visar att metoden har stor potential som komplement till olika sonderingsmetoder (Jb-sondering, hejarsondering mm) för



Figur 4: Seismisk down-hole-mätning i kalk-cementpelare (Massarsch och Eriksson, 2002).



Figur 5: Spetstrycksond med akustisk mätutrustning och ljudregistrering under sonderingen.



Figur 6: Installation av gasfylld matta intill en byggnad när järnvägen i Düsseldorf, Tyskland.

identifiering av exempelvis sand- och siltskikt eller fasta material (morän eller block).

Trafikvibrationer

Svenska geotekniska förutsättningar med mäktiga lager av lös lera ökar risken för vibrationsproblem påtagligt. Det svenska järnvägsnätet är till stor del mer än hundra år gammalt och inte dimensionerat för dagens trafikintensitet. Ofta saknas också dokumentation om järnvägsbankens och undergrundens materialegenskaper. Under de senaste 25 åren har uppgradering utförts av befintliga banor för högre hastigheter, högre axellaster och högre linjelaster. För att kunna öka järnvägstrafikens effektivitet samt för att minska omgivningspåverkan har omfattande forskning inom tåg vibrationsområdet genomförts.

Ett vanligt problem vid tågtrafik är vibrationsstörningar i byggnader som är belägna nära hårt trafikerade järnvägar. Genom installation av en skärm med låg styvhet (impedans) är det möjligt att reflektera en del av vibrationsenergin som passerar genom jordlager (Massarsch och Ersson, 1985). Gaskuddemetoden har framgångsrikt använts i Sverige, Belgien, Tyskland och Japan. Figur 6 visar installationen av en cirka 12 m djup, gasfylld (kväve) skärm samt området efter den framgångsrika isoleringsåtgärden.

Banverket initierade år 2001 ett forsk-

ningsprojekt, ENVIB (Environmental Effects of Train-Induced Ground Vibrations) med syfte att utveckla en semi-empirisk modell för prognos av markvibrationer förorsakade av tågtrafik. En del av forskningsarbetet genomfördes vid KTH och resulterade i tre doktorsavhandlingar.

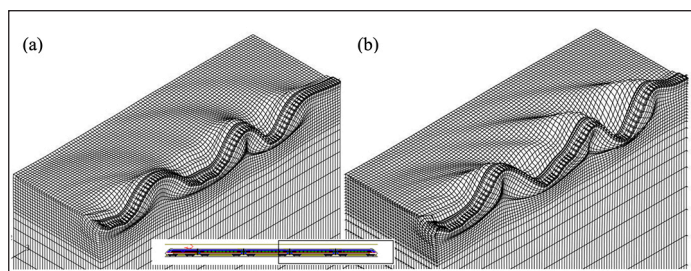
Kraftiga markvibrationer observerades i en järnvägsbank vid Ledsgård när snabbtågen X2000 passerade med hög hastighet på sträckan mellan Göteborg och Malmö. Järnvägsbanken bestod av 1,3 m krossmaterial på 1 m torrskorpa, följt av 3 m gytta på ett 50 m mäktigt lager av lös lera. Vibrationsmätningar visade stora rörelser i banken och kraftiga vibrationer i omgivningen när tåget passerade vid en hastighet av cirka 200 km/tim. Vibrationsmätningar utfördes på olika avstånd och djup, i och utanför järnvägsbanken. De dynamiska egenskaperna i jorden bestämdes både genom fält- och laborieförsök. Lerlagrets skjuvvägsfart, C_s , var extremt låg nära markytan (40 m/s) och ökade med djupet till 130 m/s.

Hall (2000) analyserade vibrationer från tågtrafik med numeriska beräkningar som visade att tvådimensionella modeller kan användas för att studera vissa effekter av tåginducerade markvibrationer. Där emot krävs tredimensionella modeller för att på bästa sätt kunna simulera vågutbredningen från tåget till omgivningen. Viktiga jordparametrar för dy-

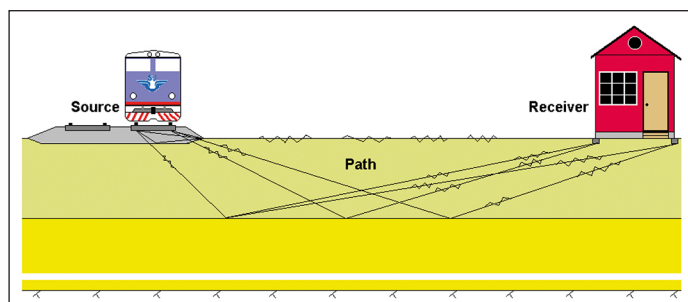
namiska analyser är främst skjuvvägsfarten och materialdämpningen. Dessa jordparametrar är beroende av töjningsnivån, som måste beaktas vid analyserna. I de tredimensionella analyserna observerades relativt stora skjuvtöjningar i de lösa jordlagerna under järnvägsbanken. Hänsyn till dessa skjuvtöjningar togs genom att på iterativ väg reducera skjuvmodulen för de aktuella materialen, genom en ekvivalent-linjär analys. De tredimensionella analyserna visar att stora skjuvtöjningar kan uppstå i järnvägsbanken vid ökande tågfart och i de lösa jordlagerna under järnvägsbanken, figur 7.

Bahrekazehmi (2004) utvecklade inom ramen för ENVIB-projektet en modell för att beskriva utbredningen av vibrationer från ett passerande tåg, genom undergrunden och till omgivningen, figur 8. I arbetet ingick också att beskriva åtgärder för att minska rörelser under järnvägsbanken och att begränsa störningar i omgivande bebyggelse. En prognosmodell utvecklades som tillsammans med ett GIS-system kan användas för att undersöka stora områden och där bestämma den bästa möjliga positionen för en ny bana. De framtagna teoretiska modellerna har verifierats och visar god överensstämmelse mellan prognos och mätningar.

With (2008) undersökte vibrationer förorsakade av tågtrafik och föreslog fyra analysmodeller. Dessa kalibrerades mot fältmätningar som utfördes med en rullande spårstyvhetsmätvagn (RSMV). Genom vikter i mätvagnen genereras vibrationer som överförs till spåret och järnvägsbanken. Denna mätvagn kan användas för att bestämma järnvägsbankens och undergrundens dynamiska respons, figur 9. Genom vibrationsmätningar i marken eller närläggna byggnader kan också överföringsfunktioner till byggnaderna bestämmas. RSMV vagnen har stor potential för framtida studier och har börjat användas även internationellt, till exempel i samband med ett europeiskt forskningsprojekt som



Figur 7: Deformerat FE-nät med rörliga laster simulerande ett tåg med a) en tåghastighet långsammare än Rayleigh-vågens utbredningsfart och b) en tåghastighet snabbare än Rayleigh-vågens utbredningsfart, Hall (2000).



Figur 8: Vibrationsutbredningen från källan (tågtrafik) genom undergrund till omgivningen, Bahrekazemi (2004).



Figur 9: Insidan av RSMV, vikterna ovanför den bakre tågaxeln kan aktiveras genom hydraulisk domkraft, With (2008).



Figur 10: RSMV mätvagn vid dynamiska styvhetsmätningar i Nederländerna.

omfattade mätningar i bland annat Tyskland, Frankrike, Schweiz och Tjeckien. I Sverige testas nu även styvhetsmätningar med specialutrustning på Infranords höghastighetsmätvagn IMV200, jfr figur 10.

Vibrationsdrivning av spont

Drivning av spont eller pålar kan vara kostnadseffektiv i friktionsjord men kan leda till markvibrationer som kan skada byggnader eller orsaka komfortstörningar. Möjligheten att på ett tillförlitligt sätt förutsäga vibrationsnivåerna är därför önskvärd. En tillförlitlig prognos av vibrationsnivåer i samband med vibrodrivning av spont kräver god kännedom om vibrationsöverföringsprocessen, från källan till det

potentiella skadeobjektet.

Viking (2002) undersökte vibrodrivning av spont i friktionsjord. Vibreringstekniken är i friktionsjord en effektiv metod att installera spont jämfört med konventionell fallhejare. Den begränsade erfarenheten av vibreringstekniken både nationellt och internationellt sett begränsat användningen av tekniken till huvudsakligen installation av spont, men borde också kunna tillämpas vid drivning av till exempel rörpålar. En av de primära svårigheterna är förståelsen av jordens reducerade penetrationsmotstånd under själva drivförloppet. Avhandlingen presenterar resultat från fältmätningar på vibratorn, på spontan samt i marken och studerar de grundläggande mekanismerna bakom det reducerade jordmotståndet i samband med vibrodrivning av spont i friktionsjord. Den reducerade skjuvhållfastheten i friktionsjord kan inte enbart förklaras med jordförvätskning (liquefaction), då fenomenet också observerades i laborieförsök på torr friktionsjord. Tidigare försummade effekter av såväl vibratorrelaterade som spontrelaterade faktorer diskuteras utifrån de i fält registrerade resultaten. En enligt Viking viktig observation är den excentriska fasthållningen av spontan som kan framkalla horisontalsvängningar i jorden.

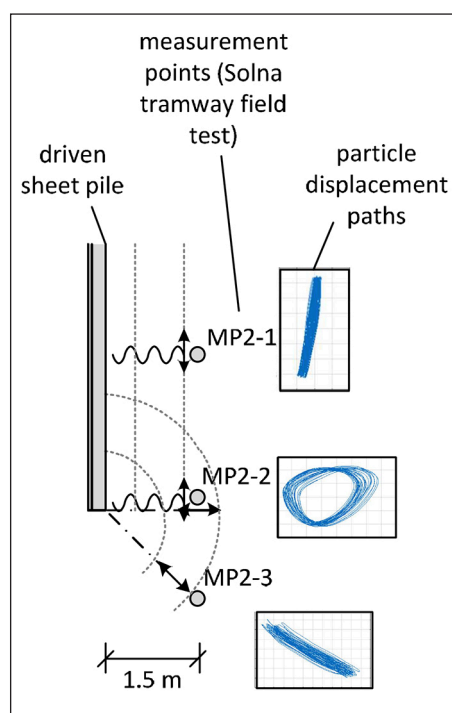
Överföringen av vibrationer från vibratorn och spontan till omgivningen undersöktes av Deckner (2017) med syftet att utveckla en tillförlitlig prognosmodell med fokus på vibrationskällan och vibrationer i omgivande jordlager. Avhandlingens huvudsakliga vetenskapliga bidrag är identifieringen av spontens beteende under neddrivning. För detta ändamål utvecklades ett nytt instrumenteringssystem. Fältförsök utfördes för att studera vibrationsöverföringen mellan

spont och jord, vibrationsöverföringen inom en spontvägg samt vågmönstret i jorden under drivning. Med hjälp av vibrationsgivare som installerades på olika djup under markytan kunde vibrationsamplituden registreras i vertikal och horisontell riktning. Ett exempel på vibrationsamplitudens variation under neddrivningen av en spont visas i figur 11. Spontens beteende under drivningen styrs i huvudsak av dess geometri, den excentriska fasthållningen samt drivfrekvensen. Överföringen av vibrationer från spont till jord påverkas i hög grad av den störda zonen i jorden närmast spontan.

En sammanfattning av de faktorer som påverkar vibrationsdrivningen av spont eller pålar har presenterats av Massarsch, Fellenius, och Bodare (2017). En ofta inte beaktad parameter som påverkar vibrationsdrivningen och omgivningens påverkan är vibrationsfrekvensen. Om en spont eller påle vibreras vid eller nära resonansfrekvensen av vibrator-påle-jord systemet finns risk för kraftiga markvibrationer. Samtidigt minskar drivningseffektiviteten eftersom pålen eller spontan svänger i fas med omgivande jord. Denna effekt utnyttjas vid resonanspackning av friktionsjord.

Ytpackning med vibrerande vält

Vibrationspackningstekniken och dess praktiska användning har en lång tradition i Sverige och har beskrivits av Massarsch och Wersäll (2019). I en riktningssvisande doktorsavhandling beskrev Forssblad (1965) de grundläggande begreppen och faktorer som är av betydelse för jordpackning med vibrationsvält. Heinz Turner, som disputerade 1970 vid institutionen för vattenbyggnad med en avhandling inom ämnesområdet jordfyllnadsdammar, började 1975 i samarbete med Åke Sandström utveckla ett nytt



Figur 11: Svängningsrörelser vid nedträngningen av spontpetsen på 4,7 m djup. Mätning på 1,5 m avstånd på 2,7, m 4,7 m och 6,2 m djup under markytan, Deckner (2017).



Figur 12: Packningsförsök med automatisk frekvensstyrning med vibrationsvält.

koncept för packningskontroll. Den första mätutrustningen för vibrerande vältar, som kallades "Compactometer", lanserades 1976. Sedan dess har konceptet av en yttäckande packningskontroll, YPK (continuous compaction control,

CCC), fått stor internationell spridning. Compactometer™ är baserad på principen att ju mer packad jorden är, desto kraftigare respons får valsen från underlaget vid anslag. En accelerometer monterad på vallslagret mäter kontinuerligt

vibrationerna på valsen under packningsarbetet. Accelerationssignalen ändrar karaktär när underlaget blir styvare och mer stabilt under packning. Ytterligare en innovativ packningsmetod introducerades 1981 med den första skjuvande packningsvälden.

I ett nyligen avslutat forskningsprojekt som utfördes vid KTH i samarbete med Dynapac har, med stöd av Trafikverket, BIG, SBUF och Peab, en ny metod för vibrationspackning av friktionsjord utvecklats. I ett doktorandprojekt studerades inverkan av vibrationsfrekvensen på packningen (Wersäll, 2016). Laboratorieförsök och fullskaleförsök med enkelvalsvält fann att packning vid resonansfrekvensen ger ett betydligt mer effektivt packningsarbete, figur 12.

Utifrån dessa resultat utvecklades en automatisk frekvensstyrningsteknik för vibrationsvältar som kontinuerligt justerar packningsfrekvensen för att erhålla resonans i jord-vält-systemet. Detta åstadkoms genom vibrationsmätning på valsen och kontinuerlig analys av vibrationssignalen som används av vältens styrsystem till att optimera packningsfrekvensen. Genom att utnyttja resonansförstärkning erhålls ett bättre packat material och en minskning av bränsleförbrukningen.

Doktorsavhandlingar med anknytning till jorddynamik

Författare	År	Titel
Hans-Christian Fischer	1960	On longitudinal impact, Uppsala Universitet
Lars Forssblad	1965	Investigation of soil compaction by vibration, KTH, Vattenbyggnad
Sture Eresund	1972	Sättningar hos cirkulära, stela fundament på friktionsjord. Inverkan av dynamisk förbelastning, CTH, Geoteknik
Rune Dahlberg	1975	Settlement characteristics of preconsolidated natural sands. In-situ screw-plate, pressuremeter and penetration tests
K. Rainer Massarsch	1976	Soil Movements Caused by Pile Driving in Clay
Olle Tholén	1980	A device for bearing capacity measurement: Properties and performance, KTH, Vägbyggnad
Bo Berggren	1981	Grävpalar på friktionsjord- sättningar och bärformåga, CTH
Anders Bodare	1983	Dynamic screwplate for determination of soil modulus in situ, Uppsala universitet
David Weiner	1983	Vibrationsskador i sågverk - orsaker och åtgärder
Anders Bodare	1983	Dynamic screwplate for determination of soil modulus in situ, Uppsala universitet
Håkan Eriksson	1992	Behaviour of driven piles evaluated from stress wave measurements performed during dynamic probing
Sigurdur Erlingsson	1993	Dynamic soil analysis with an application to rock music induced vibrations in Ullevi Stadium
Olle Orrje	1996	The use of dynamic plate load tests in determining deformation properties of soil
Lars Hall	2000	Simulations and analyses of train-induced ground vibrations. A comparative study of two- and three-dimensional calculations with actual measurements
Mats Svensson	2001	Application of the SASW-technique in geotechnical in-situ testing, LTH
Kenneth Viking	2002	Vibro-driveability a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils
Mehdi Bahrekazemi	2004	Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction
Nils Rydén	2004	Surface Wave Testing of Pavements, LTH
Carl Wersäll	2016	Frequency Optimization of Vibratory Rollers and Plates for Compaction of Granular Soil
Fanny Deckner	2017	Vibration transfer process during vibratory sheet pile driving: from source to soil.

Avslutande kommentarer

Forskning och utveckling inom jord- och bergdynamikområdet har resulterat i praktiskt användbara lösningar vid olika samhällsproblem. Föreliggande uppsats sammanfattar kort utvecklingen under de senaste 40 åren och beskriver några praktiska tillämpningsområden.

Jorddynamiken är inte enbart av be-

Kompendier och informationsskrifter

- Massarsch, K.R. 1984. Vibrationer i jord och berg. Handboken Bygg, Kapitel G 20, Stockholm, s. 517 - 524.
- Bodare A. 1997. Jord och bergdynamik, kompendium, Avd. för Jord och bergmekanik, KTH, rapport 1B1435, oktober 1997, Universitetservice US AB, 166 s.
- Möller, B, Larsson, R, Bengtsson, PE, Moritz, L (2000) Geodynamik i praktiken. Statens geotekniska institut, SGI. Information 17, 51 s.
- Informationsskrift Markvibrationer. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF. Informationsskrift 1:2012. SGF:s Markvibrationskommitté, 98 s.

tydelse vid lösning av dynamiska problem utan har också användning inom den konventionella geotekniken, till exempel vid bestämning av olika jordars deformationsegenskaper.

I många fall bortser man vid dynamiska problem från undergrundens betydelse. Som exempel kan nämnas riskbedömningen av skador på byggnader eller installationer i eller på mark. Här återstår fortfarande en viktig arbetsinsats för att sprida information jorddynamikens betydelse.

Undervisningen inom jord- och bergdynamiken har nu integrerats i andra ämnesområden. Trots detta bedrivs intensiv forskning vid institutionen för jord och bergmekanik inom till exempel jordpackningsområdet samt vid olika typer av seismiska fältundersökningar. ■

Referenser

[1] Bahrekazemi, M. (2004). *Train-induced ground vibration and its prediction*. Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan. Jord- och bergmekanik. TRITA-JOB PHD 1005, 168 s.

[2] Berggren, B., 1981. *Grävpalar på friktionsjord - sättningar och bärformåga*. Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg 1981, 225 s.

[3] Bredenberg, H. (1982). *Dynamic test loading of point bearing piles*. Dissertation, Jord och Bergmekanik, Kungl. Tekniska Högskola, Stockholm. 392 s.

[4] Bodare, A. (1983). *Dynamic screwplate for determination of soil modulus in situ*. Doktorsavhandling, Uppsala Universitet. UPT-TEC 83 79 R, 273 s.

[5] Broms, B. (1970). *Beräkning av jordtryck mot källarväggar*. Statens geotekniska institut, SGI. Särtryck och preliminära rapporter 37, 14 s.

[6] Deckner, F. (2017). *Vibration transfer process during vibratory sheet pile driving - from source to soil*. Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan. Jord- och bergmekanik, TRITA-JOB PHD 1026, 145 s.

[7] Eresund, S. (1972). *Sättningar hos cirkulära, stela fundament på friktionsjord. Inverkan av dynamisk förbelastning*. Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Byggforskningen. Rapport R41:1972, 168 s.

[8] Fischer, H. C. (1959). *On longitudinal impact, Fundamental cases of one-dimensional elastic impact, Theories and experiments*. Appl. Science. Research AS, 105 s.

[9] Forssblad, L. (1965). *Investigation of soil compaction by vibration*. Acta Polytechnica Scandinavia, No 34, Stockholm 185 s.

[10] Hall, L. (2000). *Simulations and analysis of train-induced ground vibrations. A comparative study of two- and three-dimensional calculations with actual measurements*. Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan, Jord- och bergmekanik. TRITA-AMI PHD 1034, 196 s.

[11] Hellman, L. (1958) *Pålförsök vid Centralstationen i Stockholm*. Opublicerad rapport, Kungl. Järnvägsstyr. Stockholm.

[12] Hellman, L. (1967). *Om stoppslagning av stödpålar*. IVAs Pålkommission, Särtryck och preliminära rapporter, nr. 6, 8 s.

[13] Krogh, P, Lindgren, A. (1997). *Dynamic field measurements during deep compaction at Changi Airport*, Singapore, Kungl. Tekn. Högskolan, Avdelning för Jord- och Bergmekanik. Examensarbete 97/9. 88 s.

[14] Massarsch, K.R. och Ersson, L-E. (1985). *Vibrationsisolering i jord*. Kungl. Tekn. Högskolan, Avdelning för Jord- och Bergmekanik, Stockholm, Job Report No. 20, 32 s.

[15] Massarsch, K.R. 1986. *Acoustic Penetration Testing, International geotechnical seminar on field instrumentation and in-situ measurements*, 4, Singapore, Nov. 1986. Proceedings, s. 71 -76.

[16] Massarsch, K.R. 2001. *Nya erfarenheter från vibrationspackning*. Väg och Vattenbyggen, No. 5, 2001, s. 36 - 41.

[17] Massarsch, K.R. and Eriksson, H. 2002. *Deformation Properties of Dry Mixed-in-place Columns from Seismic Field Tests*. Proceedings, Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing, Port and Airport Research Institute, Coastal Development Institute of Technology; s. 58 - 74.

[18] Massarsch, K.R. 2005. *Deformation Properties of Stabilized Soil Columns*, Proceedings,

Intern. Conf. On Deep Mixing, Stockholm, 23 - 25 May, 2005. Vol. 1, s. 129 - 144.

[19] Massarsch, K.R., Fellenius, B.H. & Bodare, A. 2017. *Fundamentals of the vibratory driving of piles and sheet piles*. Geotechnik. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin - geotechnik (2017), s. 1 - 16.

[20] Massarsch, K.R. and Wersäll, C. 2019. *Vibrationspackning - en svensk specialitet!*. Bygg & teknik 1/19, s. 68 - 75.

[21] Orrje, O. (1968) *Dynamic load tests on cohesionless soils with free falling weights, compared with static plate loading tests*, Kungl. Tekn. Högskolan, Avdelning för Geoteknik.

[22] Orrje, O. (1996). *Use of dynamic plate load tests in determining deformation properties of soil*. Doktorsavhandling, Kungl. Tekn. Högskolan, Avdelning för Jord- och Bergmekanik. TRITA-AMI PHD 1007, 111 s.

[23] Rehnman, S.E. och Broms, B. (1970). *Jordtryck mot murar av lecablock*. Statens geotekniska institut, SGI. Särtryck och preliminära rapporter 37, 14 s.

[24] Tholén, O. (1980). *Falling weight deflectometer. A device for bearing capacity measurement: properties and performance*. Kgl. Tekniska högskolan, institutionen för vägbyggnad. Stockholm, 113 s.

[25] Viking, K. (2002). *Vibro-driveability - a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils*. Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan. Jord- och bergmekanik. TRITA-JOB PHD 1002, 281 s.

[26] Weiner, D. (1983) *Vibrationsskador i sågverk. Orsaker och åtgärder*. Doktorsavhandling Kgl. Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik, 228 s.

[27] Wersäll, C. (2016). *Frequency optimization of vibratory rollers and plates for compaction of granular soil*. Doktorsavhandling, Kungliga tekniska högskolan. Jord- och bergmekanik. TRITA-JOB PHD 1022, 99 s.