

Vibrovältar och jordddynamik – mot effektivare packning

Packning är den vanligaste jordförstärkningsmetoden och används i stort sett i alla byggprojekt. Ökande byggkostnader och striktare utsläppskrav gör att det finns ett behov av att effektivisera packningsprocessen. I ett doktorandprojekt vid Kungliga Tekniska högskolan (KTH) studeras hur jordpackning med vibrovält kan bli mer effektivt genom att ta hänsyn till samspelet mellan vält och jord samt vältens och jordens dynamiska egenskaper. Projektet finansieras av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Dynapac, Peab och KTH och utförs som ett samarbete mellan KTH, Dynapac och Peab.

Användandet av vibrovältar som packningsutrustning för bankar och fyllningar är väletablerat sedan många årtionden (*figur 1*) och Sverige har spelat en stor roll i utvecklingen av vältar och kontrollsystem. Genom ett nära samarbete mellan forskare, tillverkare och entreprenörer utvecklades ny teknik som snabbt fick tillämpning i branschen. Ett exempel är ytäckande packningskontroll (YPK), som började utvecklas i Sverige på 1970-talet, *Thurner & Sandström* (1980) och *Forssblad* (1980), och idag har blivit mer eller mindre standard, både i Sverige och utomlands. YPK revolutionerade branschen och har kommit att bli en oundgänglig del

av packningsprocessen. Det första systemet var Geodynamiks Compactometer, följt av Bomags Terrameter och därefter har olika tillverkare under åren lanserat nya system. Gemensamt för alla är att de bygger på vibrationsmätningar på välten och på antagandet att vält-jordssystemet kan modelleras som ett massa-fjäddämparesystem. Genom att analysera den dynamiska responsen av underlaget fås ett så kallat vältmätarvärde, som är mått på underlagets styvhet. System innefattar också ofta positionering med GPS och på så sätt kopplas vältens läge ihop med vältmätarvärdet och styvheten kan illustreras över hela ytan. Under 2000-talet har så kallad intelligent packning börjat tillämpas då parametrar på välten automatiskt justeras utifrån vibrationsmätningar för att uppnå ett jämnt packningsresultat. Sedan 1970-talet har den huvudsakliga forskningen inom ytpackning behandlat just packningskontroll och intelligent packning.

Under senare år har striktare miljökrav resulterat i mer bränsleeffektiva dieselmotorer med lägre utsläpp. Samtidigt har vältarna blivit större, vilket har ökat packningseffektiviteten men också framtvingat mer avancerade lösningar för motorer. Andra utmaningar för välttillverkare har rört utveckling av förarkomfort, kontrollsystem och säkerhet. Dagens vältar är betydligt säkrare, bekvämare och miljövänliga än för tio till tjugo år sedan. Utvecklingsarbete har skett hos tillverkare, vilket har resulterat i maskinutveckling och rekommendationer avseende lämplig packningsutrustning för olika situationer. Som



Artikelförfattare är **Carl Wersäll**, KTH Jord- och Bergmekanik, **Ingmar Nordfelt**, Dynapac, och **Stefan Larsson**, KTH Jord- och Bergmekanik, Stockholm.

exempel har Dynapac i sin försöksanläggning i Karlskrona empiriskt tagit fram riktlinjer för val av maskin genom databasen CompBase. Dock finns kunskapsluckor avseende fundamentala parametrar och hur de påverkar packningen av jordmaterialet.

I syfte att återuppbygga det samarbete som fanns mellan forskare och olika intressenter i branschen och att undersöka olika parametrars inverkan på packningsresultatet initierades ett doktorandprojekt vid KTH, Avdelningen för Jord- och Bergmekanik, i början av 2011. Projektet finansieras av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Dynapac, Peab och KTH. Projektet bygger på gedigen er-



Figur 1: Dynapac CA6000 vibrovält med enkelvals för jordpackning.

farenhet från välttillverkare och syftar främst till att undersöka inverkan av tre nyckelparametrar:

- Vibrationsfrekvens
- Vibrationsamplitud
- Undergrundens styvhet.

Genom att kombinera småskaleförsök i laboratorium med fullskaleförsök fås resultat från både kontrollerade och verkliga förhållanden som kan få snabb spridning i branschen genom det nära samarbetet med industrin. Sedan projektet startade 2011 har omfattande småskaleförsök utförts som visar på ett starkt samband mellan resonansfrekvens och packning. Ytterligare småskaleförsök planeras för att få större förståelse för detta samband samt att undersöka inverkan av övriga parametrar. Slutligen kommer fullskaleförsök utföras för att studera hur dessa koncept kan implementeras under verkliga förhållanden.

Packningsfrekvens

Under 1950-, 60- och 70-talen bedrevs intensiv forskning för att finna bästa packningsförfarande. Vissa parametrars inflytande på resultatet har dock inte undersökts sedan dess. En sådan är vibrationsfrekvensen. Det diskuterades om den optimala packningsfrekvensen låg under, över eller nära resonansfrekvensen för vält-jordsystemet. Vissa försök gjordes, men svårigheter i dåtidens mätsystem och bristen på frekvensvariabla vibratorer gjorde att inga säkra slutsatser kunde dras. Vältar har normalt en fast vibrationsfrekvens, alternativt ställbar mellan två lägen. En litteraturgenomgång har visat att väldigt få har studerat packning med vibrovält experimentellt och att ingen har undersökt frekvensens inverkan på packningsresultatet sedan 1960-talet. De mest omfattande försöken utfördes av *Bernhard* (1952) och *Converse* (1953) och båda fann att packningen är mycket mer effektiv vid systemets resonansfrekvens. Försöken utfördes dock inte med vält, utan med vibrerande platta. Dessutom var utrustningen och mätsystemen primitiva och skulle inte uppfylla dagens krav på noggrannhet.

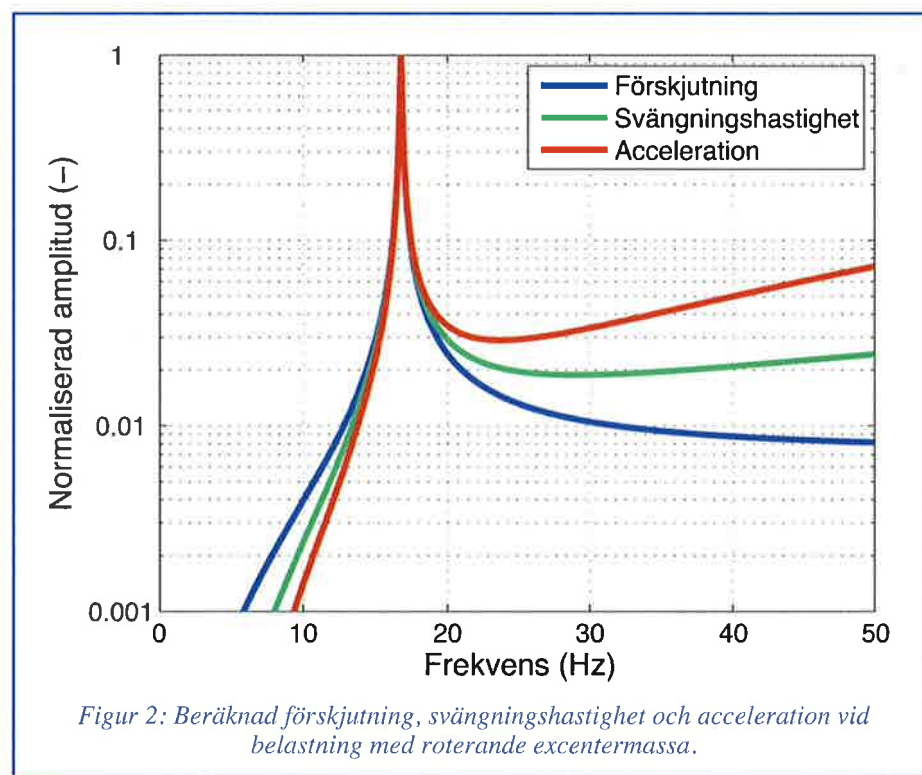
Det är möjligt att packningen kan effektiviseras om resonans i systemet kan utnyttjas. Detta samband har utnyttjats i flertalet projekt för att uppnå bättre djuppackning av naturliga fyllningar, så kallad resonanspackning. Den praktiska användningen av resonanspackning och dess inverkan på den packade jordens egenskaper sammanfattas av *Massarsch & Fellenius* (2002). För vältar är det dock sannolikt att maximal resonans skulle orsaka alltför kaotiska vältrörelser för att kunna erhålla en kontrollerad och effektiv process. Att däremot ligga nära resonansfrekvensen skulle kunna ge en förstärkning utan att påverka resten av systemet i för stor utsträckning. Det är även möjligt att det i projektet framkommer att det är

optimalt att packa vid någon annan frekvens.

Vibrationsamplitud

Vibrationer mäts i förskjutning, svängningshastighet eller acceleration, beroende på tillämpning. Anledningen till att flera mått används är att olika typer av dynamiska påfrestningar och analyser beror av olika parametrar. Till exempel brukar svängningshastighet vara avgörande för skador på byggnader och acceleration anses styrande för människors uppfattning av vibrationer. Även vilken typ av vibrationsgivare som används kan påverka valet. Accelerometrar mäter acceleration och geofoner mäter svängningshastighet. Det går att konvertera mellan de olika mätstorheterna genom derivering och integrering, men det kan innebära vissa numeriska problem och den storhet

se *Richart et al* (1970). Om jordmaterialet antas ha densiteten 1800 kg/m³, Poissons tal 0,30 och skjvmodulen 40 MPa samt välten ha en valsmodulvikt av 8000 kg och en anliggningsyta mellan välten och jorden på 0,50 m² fås förskjutning, svängningshastighet och acceleration enligt *figur 2* (observera semilogaritmisk skala). Amplituden är normaliserad med maxvärdet vid resonans för respektive parameter. Resonansfrekvensen är cirka 17 Hz. När frekvensen ökar väl över resonansfrekvensen konvergerar förskjutningen mot ett konstant värde medan svängningshastigheten ökar linjärt och accelerationen ökar kvadratisk med frekvensen. När frekvensen minskar under resonansvärdet avtar accelerationen snabbare än de övriga parametrarna. Hur amplituden varierar med frekvensen beror alltså på vilket mått på amplitud man väljer att analysera.



som mäts direkt av givaren är därför lättast att analysera.

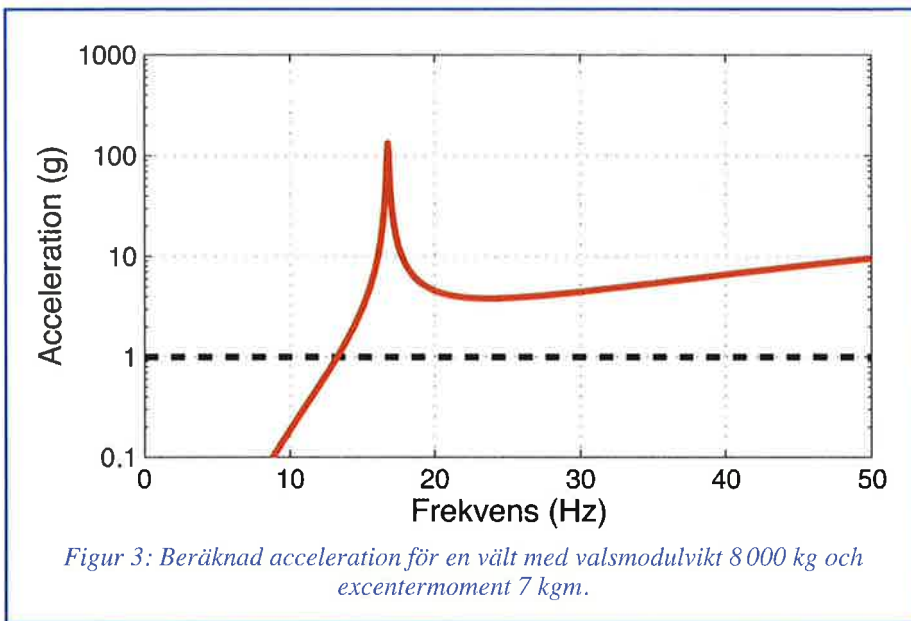
Det råder idag oklarhet om vilket mått på vibrationsamplitud som är styrande för packningen. Förskjutningsamplitud anses av många vara den viktigaste parametern. I detta projekt undersöks om istället svängningshastigheten har ett större inflytande. Svängningshastighet är proportionell mot skjvvtöjning, vilket är avgörande för att uppnå omlagring av partiklar, det vill säga att de förflyttar sig relativt varandra. Den är även proportionell mot effekt, det vill säga energi per tidsenhet, vilket betyder att den vibrationseffekt som packningsutrustningen producerar beror på svängningshastigheten.

Amplituderna vid olika frekvenser kan uppskattas med hjälp av uttryck för vibrerande maskfundament som tar hänsyn till interaktionen mellan vibrator och jord,

Flera studier har visat att packningen är som mest effektiv när accelerationen överstiger 1 g, *D'Appolonia et al* (1969), *Dobry & Whitman* (1973), vilket betyder att packningsutrustningen lyfter från marken i varje cykel. Om excentermomentet antas vara 7 kgm, vanligt för en medelstor vält, fås accelerationen enligt *figur 3 på nästa sida*. Frekvensen bör, i det här fallet, vara högre än cirka 13 Hz. Oavsett vilken parameter som är styrande för packningen bör således frekvensen vara tillräckligt hög för att accelerationen ska överstiga 1 g.

Lös undergrund

En annan parameter som kommer att studeras i projektet är undergrundens styvhet, det vill säga det material som underlagrar det som ska packas. Det kan till exempel vara svårt att packa en bank som är place-



rad på en lös lera. De statistiska aspekterna av detta har studerats av Johansson (2001), men det finns även, framförallt två, dynamiska aspekter som kan ha stor inverkan. Den ena är relaterad till vågutbredning. Vibrationsenergin kan lätt förflytta sig från ett styvt material till ett löst. Däremot är det svårt för vibrationerna att fortplantas från ett löst till styvt material, vilket gör att vibrationsenergin kan "fastna" i det lösa skiktet. Den andra aspekten är att dynamiken i systemet, det vill säga responsen vid olika frekvenser, förändras när någon av systemets styvheter förändras.

Småskaleförsök

För att undersöka frekvensens inflytande på packningsresultatet har 85 småskaleförsök utförts med en elektrisk vibrator monterad på en platta (med diametern 84 mm). Försöksupställningen visas i figur 4 och försöken beskrivs utförligt i Wersäll & Larsson (2012). Torr sand packades ge-

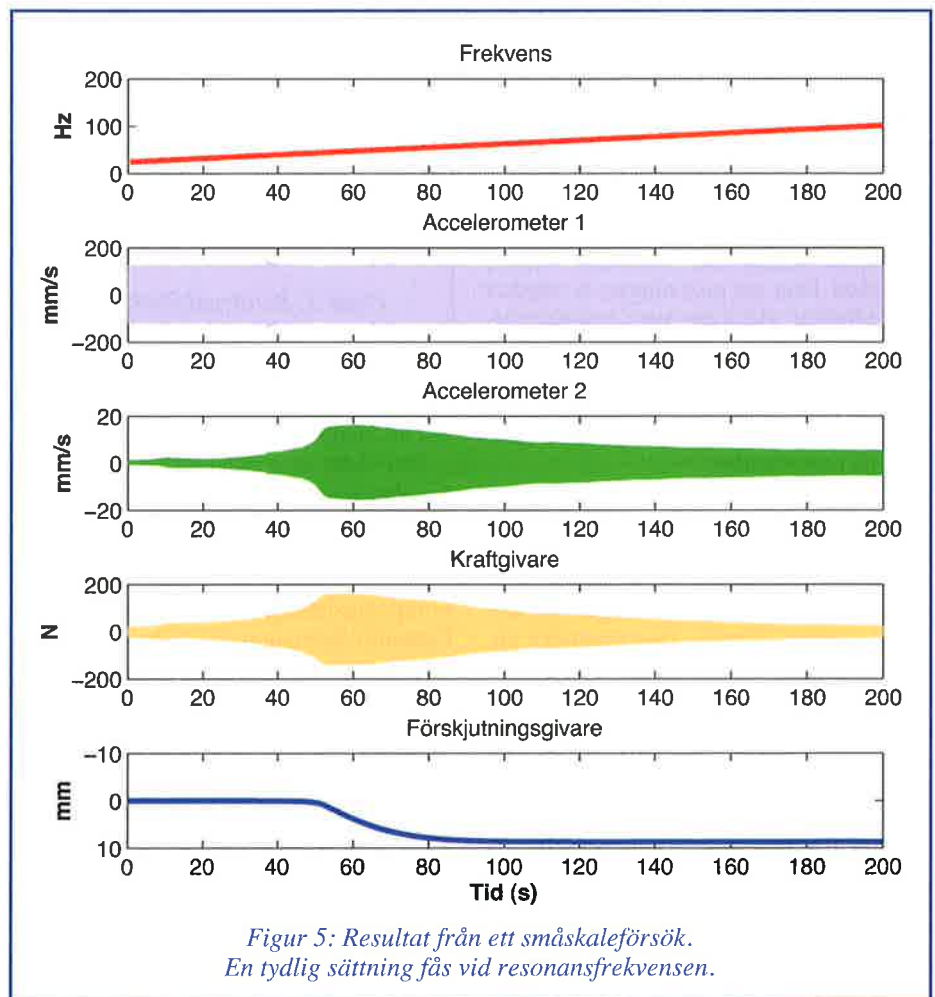


Figur 4: Småskaleförsök med torr sand. Mätning med accelerometrar, förskjutningsgivare, kraftgivare och geofoner.

nom att vibrationsfrekvensen kontinuerligt förändrades samtidigt som svängningshastigheten på vibratorm hölls konstant. Försöken utfördes genom att plattan exciterades med en konstant hastighetsamplitud medan frekvensen sveptes från låg till hög. Plattan kunde röra sig fritt i den vertikala riktningen. Den vertikala förskjutningen (sättningen) visas i figur 5 för ett försök. I figuren visas även frekvensen, svängningshastigheten på den rörliga delen av vibratorm (Accelerometer 1), svängningshastigheten på vibratorms hölje (Accelerometer 2) och den uppmätta kraften ovanför plattan. Signalerna från accelerometrarna integrerades direkt i förstärkarna för att få svängningshastighet. Medan svängningshastigheten på vibratorms rörliga del är konstant uppvisar den andra accelerometern och kraftgivaren tydliga resonansförstärkningar. Samtidigt som resonans inträffar fås en mycket tydlig sättning, vilket kan observeras i signalen från förskjutningsgivaren. En del av sättningen beror på undanträngning av material men en stor del är också packning (volymminskning). Alla 85 försöken, vilka utfördes vid olika amplituder, gav liknande resultat. Det kan således konstateras att det är lättare att packa sanden i den ovan beskrivna försöksupställningen vid resonansfrekvensen, jämfört med högre eller lägre frekvenser.

Resultaten indikerar att packning med vibrovält skulle kunna utföras mer effektivt om frekvensen låg nära jord-vältsystemets resonansfrekvens, liksom vid resonanspackning. Konceptet kan dock inte appliceras direkt på packning med vibrovält, utan ytterligare småskaleförsök och framförallt fullskaleförsök måste utföras. Materialet som användes var torr sand. I verkliga projekt används ofta material vid optimal vattenkvot och det måste undersökas om de koncept som gäller för torrt material också gäller vid optimal vattenkvot. Även det statistiska-dynamiska lastförhållandet var annorlunda än vid packning med vält. Den dynamiska kraften

meter 2) och den uppmätta kraften ovanför plattan. Signalerna från accelerometrarna integrerades direkt i förstärkarna för att få svängningshastighet. Medan svängningshastigheten på vibratorms rörliga del är konstant uppvisar den andra accelerometern och kraftgivaren tydliga resonansförstärkningar. Samtidigt som resonans inträffar fås en mycket tydlig sättning, vilket kan observeras i signalen från förskjutningsgivaren. En del av sättningen beror på undanträngning av material men en stor del är också packning (volymminskning). Alla 85 försöken, vilka utfördes vid olika amplituder, gav liknande resultat. Det kan således konstateras att det är lättare att packa sanden i den ovan beskrivna försöksupställningen vid resonansfrekvensen, jämfört med högre eller lägre frekvenser.



uppnådde maximalt 70 procent av den statiska vikten av vibratorsystemet medan en vibrovält normalt arbetar med en dynamisk kraft som är högre än den statiska vikten. Välten lyfter således från marken i varje cykel. För att skapa detta lastförhållande är nästa steg i projektet att byta till en vibrator med roterande excentermassor, vilken kommer att ha erforderlig dynamisk kraft. Slutligen begränsas försöken av att vibratören står still och har en belastningsyta som är cirkulär istället för cylindrisk. Genom att utföra fullskaleförsök med vibrovält kommer konceptet att undersökas under verkliga förhållanden.

Fortsatta försök

Nästa steg i projektet är att göra liknande småskaleförsök med en vibrator som har ett lastförhållande som liknar det för en vält. I skrivande stund är denna utrustning under tillverkning. Två vibratorer med motriktade roterande excentermassor kommer att användas som tillsammans ger enbart en vertikal komponent. Den dynamiska kraften för denna typ av vibrator är högre än den statiska vikten, vilket gör att den kommer att "hoppa" på underlaget. Detta gäller normalt även för vältrar och ger en mer effektiv packning, Muro & Tran (2006). Utrustningen kommer att kunna frekvensstyras. Dock är det inte möjligt att, som vid tidigare försök, hålla svängningshastigheten konstant, utan denna kommer att öka med frekvensen (jämför figur 2). Istället är excentermomentet konstant i varje försök, vilket också gäller för vältrar. Momentet kan dock varieras mellan varje försök, vilket betyder att amplituden gradvis kan ökas. Resultaten kommer att visa om effekten av resonansförstärkningen är tillräcklig för att öka packningseffektiviteten eller om det finns en annan optimal frekvens.

I dessa försök kommer också andra parametrar att varieras. Vattenkvoten förändras för att undersöka om resultaten blir annorlunda vid optimal vattenkvot. Vidare förändras lagertjockleken. I de inledande försöken packades ett sandskikt med mäktigheten 300 mm medan den

vibrerande plattan var 84 mm i diameter. Om mäktigheten är större än två och en halv till tre gånger plattdiametern brukar normalt responsen anses vara den som fås av en oändligt halvrymd. Genom att minska lagertjockleken kommer underlagets styvhet att påverka responsen av plattan. En undergrund med låg styvhet (till exempel lera) simuleras genom att byta ut betongen i botten av sandboxen mot cellplast. Dessa parametrars påverkan på packningsresultatet kommer att kunna kvantifieras med en stor mängd försök. Eftersom belastningen liknar den vid packning med vibrovält är steget sedan kort till att utföra fullskaleförsök.

Resultaten från försöken ovan kommer att utnyttjas för att planera fullskaleförsök med vibrovält i Dynapacs forskningsanläggning i Karlskrona. I fullskaleförsök är kontrollerbarheten lägre och antalet försök begränsade. Genom omfattande resultat från småskaleförsök kommer det dock att finnas möjlighet att noggrant välja försöksp parametrar för att bekräfta de slutsatser som kunnat dras från tidigare försök.

Frekvensvariabla vältrar?

I tillverkningsprocessen av vältrar måste hänsyn tas till andra aspekter relaterade till frekvens, till exempel resonansförstärkning i maskindelar och vibrationspåverkan på föraren. Om dessa aspekter kan överkommas medan frekvensen tillåts justeras utifrån rådande förutsättningar är det sannolikt att packningen blir mer effektiv. Det finns två alternativ för att tillämpa frekvensvariabel packning. Det första är att kontinuerligt förändra frekvensen medan packningen sker, utifrån dynamiska mätningar. Detta tillämpas ibland inom djuppackning, benämnt "resonanspackning". Det andra alternativet är att ha fortsatt fast frekvens på vältarnas vibratorer, men olika frekvens för olika vältrar. Det skulle då vara möjligt att välja en vält som är anpassad för de rådande projektförutsättningarna. Om frekvensen väljs tidigt i tillverkningsprocessen finns det större möjligheter att anpassa resterande maskindelar

för att undvika lokala resonanser och hålla en god förarkomfort. ■

Referenser

- Bernhard, R. K., 1952, *Static and dynamic soil compaction*, Highway Research Board Proceedings, Vol. 31, pp. 563–592.
- Converse, F. J., 1953, *Compaction of sand at resonant frequency*, ASTM Special Technical Publication, No 156, pp. 124–137.
- D'Appolonia, D. J., Whitman, R. V. & D'Appolonia, E., 1969, *Sand Compaction with Vibratory Rollers*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, No. 1, pp. 263–284.
- Dobry, R. & Whitman, R. V., 1973, *Compaction of Sand on a Vertically Vibrating Table*, ASTM Special Technical Publication, No. 523, pp. 156–170.
- Forsssblad, L., 1980, *Compaction Meter on Vibrating Rollers for Improved Compaction Control*, Proceedings of International Conference on Compaction, Vol. 2, Paris, pp. 541–546.
- Johansson, B., 2001, *Rockfill pavements on soft subsoil – construction and compaction*, Doctoral Thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Massarsch, K. R. & Fellenius, B. H., 2002, *Vibratory Compaction of Coarse-Grained Soils*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, pp. 695–709.
- Muro, T. & Tran, D. T., 2006, *Effects of Vertical Exciting Force of a Tracked Vehicle on the Dynamic Compaction of a High Lifted Decomposed Granite*, Journal of Terramechanics, Vol. 43, pp. 365–394.
- Richart, F. E., Hall, J. R. & Woods, R. D., 1970, *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, 414 p.
- Thurner, H. & Sandström, A., 1980, *A New Device for Instant Compaction Control*, International Conference on Compaction, Vol 2, Paris, pp. 611–614.
- Wersäll, C. & Larsson, S., 2012, *Small-Scale Testing of Frequency-Dependent Compaction of Sand using a Vertically Vibrating Plate*, Submitted to ASTM Geotechnical Testing Journal.



HOCHTIEF

SOLUTIONS AG

www.hochtief-solutions.de