

Vibrationspackning – en svensk specialitet!

Under de senaste femtio åren har svenska geotekniker på olika sätt bidragit till den teoretiska och praktiska utvecklingen av jordpackningstekniken. Utomlands anses Sverige vara världsledande inom till exempel ytpackningen medels vibrationsvält. Under november 2018 hölls i Wien ett internationellt symposium om ytpackning – i samarbete mellan Wiens Tekniska Universitet och KTH – till minne av det banbrytande arbetet som startades i Sverige. Men även inom djuppackningen har Sverige bidragit med nya idéer som har fått användning runtom i världen. Den planerade utbyggnaden av transportinfrastrukturen, såsom höghastighetsjärnväg, kommer att ställa höga krav med avseende på projektering, genomförande och övervakning av packning. Föreliggande artikel beskriver även utvecklingen av ny packningsteknik samt dess tillämpning i praktiken. Ett praktikfall presenteras där VibroWing användes för att packa siltig sand. Packningseffekten kontrollerades genom detaljerade fältmätningar. Avslutningsvis illustreras hur sättning i sand kan beräknas där inverkan av ökningen i horisontellt jordtryck, som uppstår på grund av djuppackning, kan beaktas.

Vibrationspackning kan vara en kostnadseffektiv jordförstärkningsmetod, förutsatt att den planeras och utförs på ett ändamålsenligt sätt, men kräver en aktiv medverkan av geoteknikern redan vid projekteringen och under genomförandet. En central, men ofta bortglömd fråga är, om – och i vilken utsträckning – jordpackning erfordras. Den andra, för projektets kostnadseffektivitet viktig fråga är valet av adekvata packningskriterier. Ibland väljs packningskrav utan närmare eftertanke, som kan leda antingen till överpackning och för höga kostnader, eller otillräcklig packning med oönskade sättningar till följd. Användningen av moderna fältundersökningsmetoder, såsom trycksondering med porvattentrycksmätning (CPTU) eller dilatometer sonden (DMT) och nya tolkningsmetoder

ger värdefull information som lämpar sig särskilt för sättningsberäkningar. En viktig aspekt, som normalt inte beaktas vid sättningsberäkningar, är den överkonsolideringseffekt som uppstår i samband med ökningen av det horisontella effektivtrycket.

Nya stambanor för höghastighetsjärnväg

I Sverige planeras i dagsläget en omfattande utbyggnad av järnvägsnätet i form av nya stambanor för höghastighetsjärnväg med största tillåtna hastighet (STH) upp till 320 km/h. De första etapperna, Ostlänken (Järna-Linköping) och Göteborg-Borås, projekteras för STH 250 km/h på konventionellt ballastspår medan övriga sträckor (Linköping-Borås, Jönköping-Malmö) planeras med fixerat spår i spårplatta av betong och STH 320 km/h. Med fixerat spår minskar möjligheten till spårjustering påtagligt vilket resulterar i mycket strikta sättningskrav under bankens livslängd. För att kontrollera egensättningarna i banken kommer därför stor vikt befinnas på packningsarbetet och materialegenskaperna som ska ge ett styvt och homogent packat material som minimerar omlagring och nedbrytning under driftskedet. Även för

konventionellt ballasterat spår finns det stora potentiella besparingar i form av minskat underhåll om packningen utförs med omsorg. I AMA Anläggning, tabell CE/3, föreskrivs att packning med vält ska ske i minst 6 överfarter. För att uppnå de egenskaper som krävs för höghastighetsjärnväg kommer ett mer omfattande packningsarbete att krävas och således nya rekommendationer eller föreskrifter.

Svensk ytpackningsteknik med vibrerande vält

Packningen av väg- och järnvägsbankar utförs ofta med vibrerande vält. Ett viktigt steg inom den moderna ytpackningsmetoden var Compactometern, som uppfanns av Heinz Thurner och utvecklades tillsammans med Åke Sandström inom företaget Geodynamik. Den yttäckande packningskontrollen, som introducerades i samarbete med Dynapac, förändrade möjligheterna till kontinuerlig packningskontroll och elektronisk dokumentation. Nästa steg var introduktionen av den oscillerande välten – den första skjuvande packningsvälten. Sedan följde en rad förbättringar av ytpackningen, som snabbt anammades först i Centraleuropa och senare i andra delar av världen. Under november 2018 hölls till 40-årsminne av Thurners första patent ett specialistsymposium, "40 Years of Roller Integrated Compaction Control (CCC)" med deltagare från hela världen, figur 1. Symposiet dokumenterades genom konferenshandlingar (Extended Abstracts). En specialutgåva av den prestigefyllda Geotechnical Journal, Institution of Civil Engineering (ICE) kommer att innehålla bidrag som belyser olika aspekter av ytpackningen.

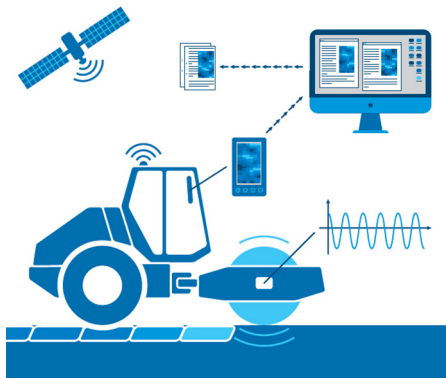
Under senare tid har stora ansträngningar gjorts för att bestämma samband mellan av vältens registrerade parametrar och undergrundens deformationsegenskaper. Trots betydande framsteg krävs fortfarande åtminstone punktinsatser där uppmätta parametrar verifieras mot konventionella undersökningar såsom plattbelastningsförsök



Karl Rainer Massarsch
Geo Risk & Vibrations Scandinavia AB



Carl Wersäll
KTH, Avd. Jord- och Bergmekanik

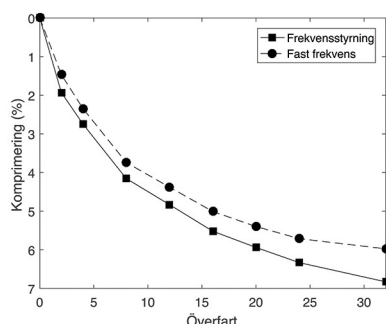


Figur 1: Internationellt symposium om yt-täckande packningskontroll (CCC) i Wien, 2018.



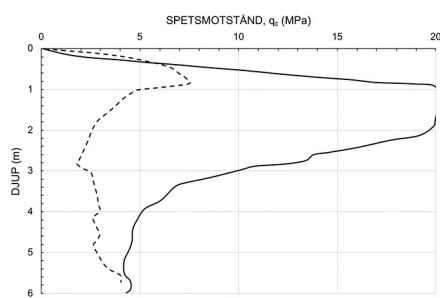
Figur 2: Fältförsök med automatisk frekvensstyrning.

a) Vibrationspackning med automatisk frekvensstyrning. b) Resultat från packningsförsök.



Figur 3: Ytpackning med vibrationsplatta i samband med utbyggnaden av hamnen i Rostock.

a) Ytpackning med platta 2,5 m x 3,0 m.



b) Sonderingsmotstånd före och efter ytpackning.



Figur 4: Vibrationspackning med platta och frekvensvariabel vibrator Dieseko PVE 38M.

eller densitetskontroll i fält. I samband med ovan nämnda utbyggnad av höghastighetsjärnvägen utförs för närvarande omfattande fältundersökningar.

Frekvensstyrd packning med vibrerande vält

I ett projekt vid KTH, i samarbete med Trafikverket, Dynapac och med stöd av BIG, SBUF och Peab, har en ny packningsmetod utvecklats som tillämpar automatisk frekvensstyrning. Metoden bygger på tidigare fullskaleförsök [1] och har nyligen använts i fältförsök med provbankar av krossmaterial. Genom

en kontinuerlig justering av frekvensen erhålls resonansförstärkning i jordmaterialet som ger en större skjuttöjning och mer effektiv packning. *Figur 2a* visar utförande av fältförsök med en frekvensstyrd vält. *Figur 2b* visar komprimering av bankmaterialet (förstärkningslager 0-150 mm) uppmätt med töjningsgivare i form av EMU-spolar där samma totala komprimering erhålls vid ett lägre antal överfarter med frekvensstyrning. Automatisk frekvensstyrning resulterar dessutom i mindre uppluckring i ytan och ett mer homogent packat material. Samtidigt minskar bränsleförbrukningen och maskinslitaget påtagligt.

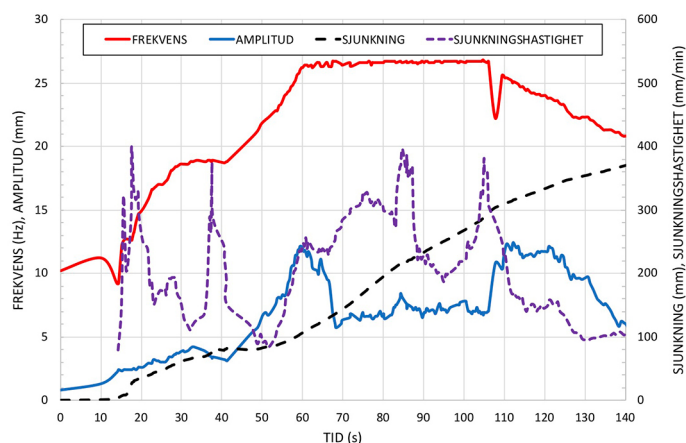
Effektiv ytpackning med vibrationsplatta

Den första tillämpningen av ytpackning med en vibrerande platta rapporterades redan 1952 från storskaliga försök i Kalifornien [2]. I början av åttiotalet genomförde NCC (dåvarande BINAB) ytpackning i samband med utbyggnaden av en hamn i Rostock. Packningen utfördes med en elektrisk vibrator av typ Tomen VM2-5000A med en maximal centrifugalkraft av 670 kN. Plattans storlek var 2,5 m x 3,0 m. Utrustningen visas i *figur 3a*. Packningseffekten kontrollerades genom trycksondering och visas i *figur 3b*. Av trycksonderingen framgår att sonderingsmotståndet ökade markant ner till cirka 3 m djup, som motsvarar plattans sidlängd.

Erfarenhet från ett flertal projekt har visat att djupverkan huvudsakligen beror på plattans storlek. Däremot påverkas packningseffekten främst av vibratorns excentermoment, vibrationsfrekvens och packningens varaktighet (antal svängningscykler). Vibrerande plattor har även använts framgångsrikt för undervattenspackning.

Ökad ytpackningseffekt med frekvensstyrd platta

Plattpackningen kan optimeras genom dynamisk avstämning av det vibrerande systemet vibrator/platta med undgrundens dynamiska egenskaper. Redan på 50-talet utfördes försök med en stor hydraulisk vibrator med variabel frekvens [2]. Det konstaterades att den bästa packningseffekten uppnåddes vid systemresonans: "The results of these tests indicated that very excellent densities were obtained to depths of at least one and one-half times the width of the surface plate." Tyvärr begränsade den tidens tekniska möjligheter att dessa kunskaper kunde omsättas i praktiken. Modellförsök vid KTH har senare bekräftat att den



Figur 5: Registrering av packningsprocessen med elektroniskt mät- och processstyrningssystem. Minskningen av den statiska massan efter cirka 70 sekunder resulterar i en reducerad svängningsamplitud.



Figur 6: Vibrationspackningsmetoder.
a) VibroWing Rostock, 1982 (t.v.)
b) TriStar packning Hamburg, 1986. (t.h.)



Figur 7: Användningen av resonanspackning i Sverige och utomlands.
a) Djuppackning i Changi, Singapore (t.v.)
b) Undervattenspackning, Sundsvall. (t.h.)

optimala packningen erhålls vid resonans av det vibrerande systemet [3].

Tack vare den snabba maskintekniska utvecklingen av kraftfulla vibratorer är det idag möjligt att utnyttja resonanspackningens fördelar. En viktig faktor är den elektroniska styrningen av packningsprocessen. Fältförsök har visat att plattans maximala svängningsamplitud (och därmed packningseffekt) uppnås vid systemets resonansfrekvens. I figur 4 visas en massiv packningsplatta (2,6 m x 2,6 m) som drivs av en hydraulisk vibrator av typ PVE 38M

med en maximal centrifugalkraft av 1200 kN. Den svängande massan (vibrator + platta) var 12 ton. En viktig komponent av systemet är den statiska massan (32 ton) som monteras medels dämpare ovanför vibratoren. Packningsutrustningens totala massa (vibrator, platta samt statisk massa ovanför vibratoren) var 45 ton. Packningen optimerades genom elektronisk styrning av vibratorns frekvens. Plattan placeras medels en lyftkran på marken och plattans sjunkning mäts under packningsförloppet.

Fältförsöken utfördes på en fast packad,

grusig sand. För att bestämma den optimala packningsproceduren varierades vibrationsfrekvensen och den statiska massans storlek (genom avlastning). I figur 5 visas en registrering där vibratorns frekvens ökades stegvis från 10 till 27 Hz (vibratorns maximala frekvens). Den största svängningsamplituden (12 mm) erhöles vid full statisk last (45 ton) efter cirka 60 sekunder vid 27 Hz som också var nära systemets resonansfrekvens. Därefter reducerades den statiska massan ovanför vibratoren vid konstant frekvens (27 Hz). Detta resulterade i en markant minskning av svängningsamplituden från 12 mm till cirka 7 mm och visar betydelsen av den dynamiska avstämningen. En viktig parameter för kontroll av packningen är plattans sjunkning och sjunkningshastighet. Med ökad packningsgrad minskar sjunkningshastigheten, jämför figur 5.

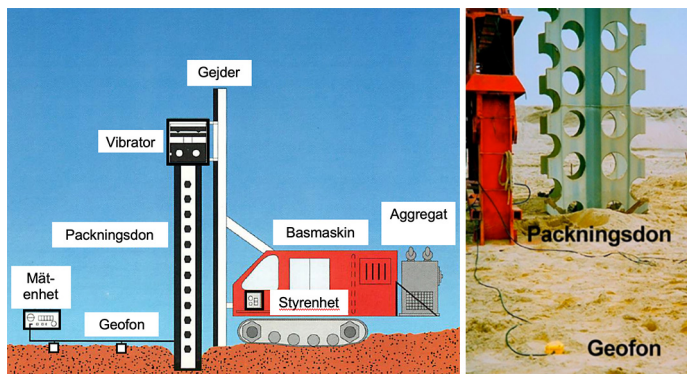
Utvecklingen av djuppackningsteknik

Den svenska djuppackningsmetoden "VibroWing" tillämpades i samband med utbyggnaden av hamnen i Rostock. Vid packningen användes en elektrisk vibrator av typ Tomen VM2-5000A med en maximal frekvens av 25 Hz och en centrifugalkraft av 670 kN. Packningsdonet utgjordes av en 15 lång stålstång med 0,8 m långa flyglar som var fastsatta på ett vertikalt avstånd av 0,5 m, se figur 6a. Packningen utfördes med konstant frekvens av cirka 20 Hz. Samma metod har använts senare på projekt i Sverige, Danmark och Norge. I Belgien utvecklades ett Y-format packningsdon, TriStar, som visas i figur 6b. För att öka vibrationsöverföringen mellan packningsdonet och den omgivande jorden installerades horisontella stålplattor.

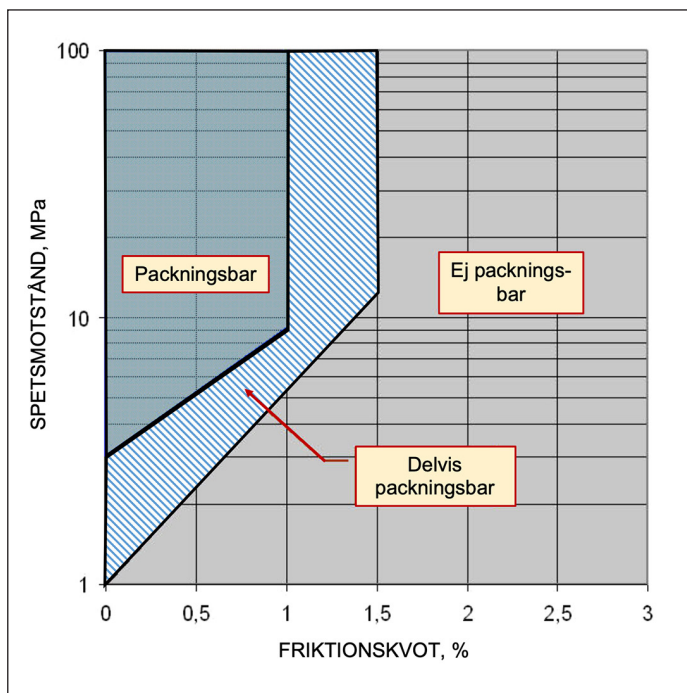
Ökad packningseffekt genom resonanspackning

Resonanspackningsmetoden skiljer sig från konventionell vibrationspackning på flera sätt. Packningsdonet utgörs av en flexibel balk med tre eller fyra flyglar, som förses med cirkulära öppningar, figur 7a. Tack vare packningsdonets reducerade massa uppnås en större vibrationsamplitud och därmed ökad packningseffekt. Dessutom ger öppningarna en bättre kontakt med den omgivande jorden. Resonanspackningen användes med framgång vid den komplicerade grundläggningen av brofundamenten i Sundsvall, figur 7b, där inspolad sand packades under vatten utan att påverka den vibrationskänsliga stålsponden.

Vid resonanspackning varierar vibra-



Figur 8: Komponent-
ter av resonans-
packningssystemet.



Figur 9: Bedömning
av jordars packnings-
barhet utgående från
CPT.

Jordart	β	Intervall, m	Medelvärde, m
Morän, mycket fast till fast	1	1,000 – 300	650
Grus	1	400 – 40	220
Sand			
fast	1	400–250	325
medelfast		250-150	200
lös	0,5	150-150	125
Silt			
fast	1	200-80	140
medelfast	0,5	80-60	70
lös	0,5	60-40	50

Tabell 1: Typiska
värden för spännings-
exponenten, β och
modulalet, m [4].

torns frekvens för att uppnå resonans mellan packningsdonet och den omgivande jorden. Packningsprocessen styrs med ett elektroniskt mät- och kontrollsystem (MPCS), vars komponenter visas i figur 8a. Resonansfrekvensen kan enkelt registreras medels en geofon som placeras på marken, figur 8b.

Vilka jordarter kan packas?

En ofta förekommande fråga är, i vilka jordarter vibrationspackning är effektiv. I den geotekniska litteraturen används ofta kornfördelningen som ett packningskriterium, där andelen silt-

och lerjord rekommenderas vara lägre än cirka 10 procent. Mer tillförlitlig information kan erhållas från CPT. Figur 9 visar sambandet mellan jords fasthet (spetsmotstånd) och kornfördelningen (friktionskvot), där områden indikeras som är lämpliga och delvis lämpliga för vibrationspackning.

Hur kan sättningar i friktionsjord beräknas?

Den i Sverige vanligaste anledningen att packa friktionsjord är att minska totalsättningar och sättningsskillnader. För att bedöma om packning erfordras

är en nödvändig förutsättning att kunna beräkna sättningar i den opackade jorden. Om det visar sig att de beräknade sättningarna överskrider tillåtna värden måste även sättningen efter packningen beräknas. En lämplig beräkningsmetod bygger på Janbu's tangentmodulteori, som beskrivs i Trafikverket TK Geo 13. Sättningen, ε , kan beräknas enligt följande samband

$$\varepsilon = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma'_{v1}}{\sigma_r} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_r} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

där: m : är kompressionsmodulalet, β : spänningsexponent; σ_r : jämförelsetryck (100 kPa); σ'_{v0} : vertikal effektivspänning före belastningen; σ'_{v1} : vertikal effektivspänning efter belastningen.

Empiriskt valda modultal

En viktig fråga vid alla sättningsberäkningar är valet av modulalet, m . För friktionsjord finns rekommendationer i Canadian Foundation Engineering Manual, se tabell 1 [4].

I sin "Rankine Lecture" 1985 har Janbu publicerat uppdaterade värden av modulalet för friktionsjord, som visas i en något reviderad form i figur 10. Dessa värden rekommenderas för sättningsberäkning i opackad sand och silt.

Modultal utgående från CPT försök

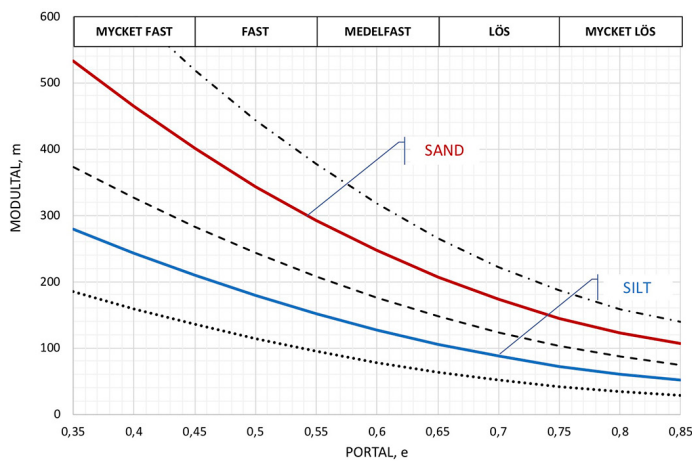
Det är önskvärt att kunna uppskatta modulalet utgående från CPT-försök. I sandig jord behöver det uppmätta sonderingsmotståndet, q_c , inte korrigeras för porvattentrycket, $q_c \approx q_t$. Spetsmotståndet bör dock justeras med avseende på den effektiva medelspänningen, σ_m (som återspeglar djupets inverkan)

$$q_{CM} = q_c C_M = q_c \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_m} \right)^{0.5} \quad (2)$$

där: q_{CM} : spänningsjusterade spetsmotståndet; q_c : uppmätta spetsmotståndet; C_M : spänningsfaktor (<2,5); σ'_m : effektiv medelspänning; σ_r : referensspänning (100 kPa). Följande samband har visat sig vara användbar för att korrigera sonderingsmotståndet med avseende på den effektiva medelspänningen

$$C_M = \left(\frac{\sigma_r}{\sigma'_m} \right)^{0.5} \quad (3)$$

där: C_M : spänningsfaktor; σ_r : referensspänning (100 kPa); σ'_m : effektiv medelspänning. För normalt konsoliderad jord kan den effektiva medelspänningen uppskattas enligt följande



Figur 10: Typiska värden på modultalet för normal-konsoliderad sand och silt som funktion av portalet, e [5]. Lägre och övre gränser för respektive jordart har indikerats enligt tabell 1.

Tabell 2: Modulparameter a för olika jordarter [6].

Jordart	Modulparameter, a
Silt, organisk, mycket lös	7
Silt, lös	12
Silt, medelfast	15
Silt, fast	20
Sand, silting, lös	20
Sand, lös	22
Sand, medelfast	28
Sand, fast	35
Grus, lös	35
Grus, medelfast	40
Grus, fast	45

$$\sigma'_m = \sigma'_v \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right) \quad (4)$$

där: σ'_m : effektiv medelspänning; σ'_v : vertikalt effektivtryck; K_0 : vilojordtrycks-koefficient. För normalkonsoliderad friktionsjord kan jordtrycks-koefficienten uppskattas

$$K_0 \sim 1 - \sin(\phi') \quad (5)$$

där: ϕ : effektiv friktionsvinkel. I normal-konsoliderad (opackad) sand ($\phi: \approx 33^\circ$) är $K_0 \approx 0.43$. Jordtrycks-koefficienten ökar vid packningen. Nästa steg är att beräkna modultalet, m utgående från det spänningsjusterade spetsmotståndet, q_{CM}

$$m = a \left(\frac{q_{CM}}{\sigma_r} \right)^{0.5} \quad (6)$$

där: m : modultal; a : empiriskt vald modulparameter, se tabell 2.

Vibrationspackning medför överkonsolidering!

Erfarenheten från ett stort antal vibrationspackningsprojekt har visat att – oberoende av använd packningsmetod – horisontalspänningen ökar i jorden på grund av packningen. Denna ökning innebär att jordlagret blir överkonsoliderat. För en realistisk sättnings-

beräkning är det viktigt att överkonsolideringseffekten beaktas. Detta kan göras med stöd av CPT där mantelmotståndet, f_s återspeglar det horisontella jordtrycket. Om mantelmotståndet bestäms före och efter packningen, så erhålls kvoten mellan jordtrycks-koefficienterna

$$\frac{K_{01}}{K_{00}} = \frac{f_{s1} \tan(\phi'_0)}{f_{s0} \tan(\phi'_1)} \quad (7)$$

där: K_{00} : jordtrycks-koefficienten före packning; K_{01} : jordtrycks-koefficienten efter packning; f_{s0} : mantelmotståndet före packningen; f_{s1} : mantelmotståndet efter packningen; ϕ'_0 : friktionsvinkeln före packningen; ϕ'_1 : friktionsvinkeln efter packningen. Vid packning ökar friktionsvinkeln med cirka 5 grader. Denna effekt kan beaktas genom en korrektionsfaktor, 0,85.

$$\frac{K_{01}}{K_{00}} = 0,85 \frac{f_{s1}}{f_{s0}} \quad (8)$$

Med stöd av denna ekvation kan den relativa ökningen av horisontalspänningen uppskattas utgående från CPT.

Hur kan överkonsolideringseffekten beräknas?

Det finns ett direkt samband mellan ökningen av horisontalspänningen och överkonsolideringen

$$\frac{K_{01}}{K_{00}} = OCR^a \quad (9)$$

där: K_{00} och K_{01} : horisontala jordtrycks-koefficienten före respektive efter packningen; OCR : överkonsoliderings-koefficient; a : empirisk exponent. Genom omflyttning av termer erhålls följande samband, som kan användas för att uppskatta överkonsolideringseffekten utgående från ökningen av horisontalspänningen

$$OCR = \left(\frac{K_{01}}{K_{00}} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (10)$$

Den empiriska spänningsexponenten a har undersökts genom laboratorieförsök och ett rimligt värde kan antas vara $a \approx 0,48$. Det är viktigt att uppmärksamma att redan en relativt liten ökning av horisontalspänningen har stor betydelse för OCR . Om det antas att $K_{01}/K_{00} \approx 2$ så erhålls $OCR \approx 4$, en ökning som kan ha stor betydelse vid sättningsberäkningar.

Användningsexempel – Djuppackning med VibroWing

VibroWing metoden har använts som grundförstärkningsmetod vid ett flertal projekt i Norden. Ett väldokumenterat exempel är grundläggning av hus i Värnamo där ett flertal byggnader skulle grundläggas på ett lager av silting sand [7]. Området var i huvudsak horisontellt med en grundvattenyta cirka 3 m under markytan. Grundläggningen skulle ske med platta direkt i mark, en betydande tids- och kostnadsbesparing jämfört med pålgrundläggning. Det fanns dock risk att ett mycket löst lagrat sandskikt skulle innebära risk för snedsättningar. I början av projektet utfördes därför provpackning med VibroWing samt detaljerade geotekniska undersökningar med CPT och DMT. Samma utrustning (vibrator VM2-5000) och packningsförfarande (vibrering vid 20 Hz) användes som vid projektet i Rostock, jämför figur 6a. Provpäckning utfördes till 8 m djup i ett triangulärt rutnät (2,2 m). Djuppackningen kompletterades inom en testyta även med ytpäckning enligt figur 3a. Plattans storlek var 2,5 m x 3,0 m.

Resultat från CPT

I anslutningen till packningen utfördes CPT och DMT-försök före och efter packningen. Provtagningen visade att silthalten i sanden varierade mellan 6 och 19 procent. För den nedan redo-visade sättningsanalysen har resultaten från CPT och DMT analyserats. Medelvärden av två sonderingar (spetsmotstånd och mantelmotstånd) visas i figur 11 (före packningen, efter VibroWing packning mellan stickpunkterna samt efter kompletterande ytpäckning med vibrationsplatta 3 månader senare). Ner till cirka 3 m djup har VibroWing packningen inte ökat spets- eller mantelmotståndet. Däremot höjdes såväl spets- som mantelmotståndet på större djup, med undantag av ett lager på 5 m som innehållit siltskikt. Det bör observeras att packningen åstadkom en lika stor ökning av mantelmotståndet som spetsmotståndet, det vill säga med i genomsnitt en faktor 2.

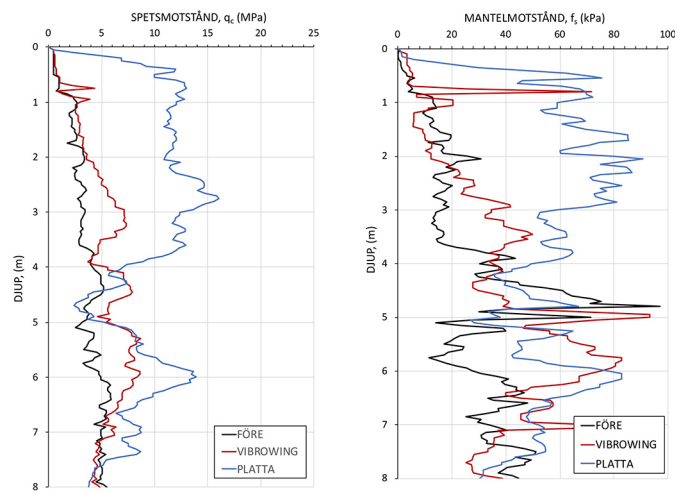
en faktor 2. Djuppackningen kompletterades senare genom ytpackning med vibroplatta, *figur 3a*. Plattpackningen hade en tydlig effekt ner till cirka 3,5 m djup, vilket motsvarar plattans sidlängd. Sonderingen efter plattpackningen utfördes 3 månader senare och inkluderar därför också en viss tidsberoende ökning som kan uppstå efter packningen. Ytpackningen ger en markant ökning av såväl spets- och mantelmotståndet. Enligt ovan redovisade samband indikerar ökningen av mantelmotståndet att jorden har blivit kraftigt överkonsoliderad.

Resultat från DMT

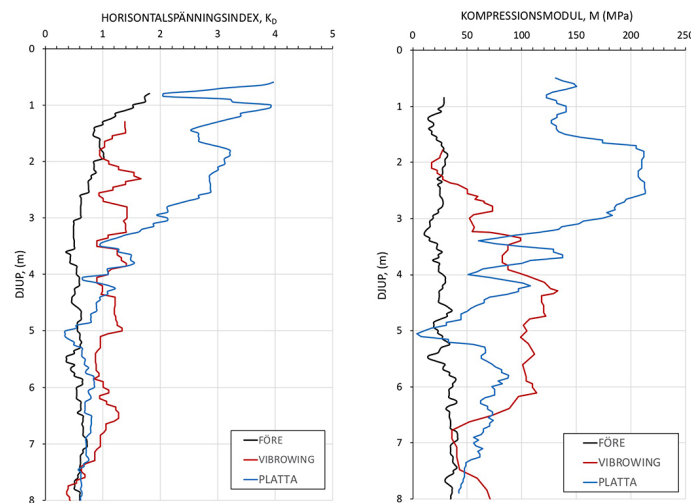
DMT-försök utfördes i motsvarande punkter som CPT, före packning, efter VibroWing packning samt tre månader efter den kompletterande ytpackningen. I *figur 12* visas horisontalspänningsindex, K_D och kompressionsmodulen, M . Efter VibroWing packningen ökade horisontalspänningsindex, K_D under ett djup av cirka 3 m. Däremot har ytpackningen haft en stor inverkan på K_D , även nära markytan ner till cirka 3 m djup. Denna ökning bekräftas också av mantelmotståndsmätningen enligt CPT, *figur 11*. Horisontalspänningen ökade efter VibroWing packningen mellan 3 och 7 m djup med en faktor 2; efter den kompletterande ytpackningen ökade horisontalspänningsindexet mellan 1 och 3 m djup med en faktor 3 – 4. Detta innebär att VibroWing i kombination med ytpackning har resulterat i en betydande överkonsolidering, som kan uppskattas enligt ekvation 10 ($a = 0,48$; OCR: $4 \approx 10$).

Sättningsberäkning – Värnamo

I detta avsnitt illustreras den praktiska



Figur 11: Resultat av CPT före packning, efter VibroWing packning samt efter kompletterande ytpackning med vibroplatta.

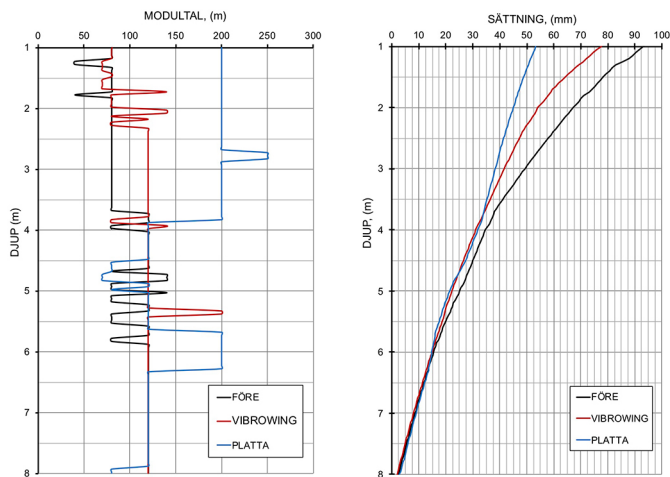


Figur 12: Resultat av DMT före packning, efter VibroWing packning samt efter kompletterande ytpackning med vibroplatta.

tillämpningen av den ovan beskrivna sättningsberäkningsmetoden enligt tangentmodulteori. Det har antagits att en fiktiv byggnad (10 m x 15 m) ska grundläggas 1 m under markytan. Belastningen har antagits till 200 kPa. Spänningsfördelningen har beräknats enligt 2:1 metoden under plattans mittpunkt.

Empiriskt valda modultal

Ingångsparametrarna β och m har baserats på den översiktliga beskrivningen av jordlagerföljden enligt *tabell 1*. I *figur 13a* visas variationen av modultalet med djupet: före packning; efter packning med VibroWing samt efter kompletterande packning med platta. I *figur 13b* visas beräknande sättningarna



Figur 13: Sättningsberäkning enligt tangentmodulmetoden utgående från empiriska värden, tabell 1. [4].
a) Modultal beräknat enligt tabell 1.
b) Resultat av sättningsberäkning utan överkonsolidering.

enligt tangentmodulmetoden. I analysen har inte tagits hänsyn till överkonsolideringseffekten ($OCR = 1$). I den opackade jorden erhålls en sättning av cirka 95 mm, som efter VibroWing packningen minskar till strax under 80 mm. Som ett resultat att den kompletterande ytpackningen minskar sättningen till cirka 55 mm.

Modultal och OCR från CPT

Den ovan föreslagna beräkningsmetoden, som utgår från informationen från CPT, har använts för att beräkna modultalet, jämför figur 14a. De CPT-baserade modultalen är betydligt mer känsliga för variationer i jordlagrens fasthet, jämfört med empiriskt valda modultal, jfr figur 13a. Överkonsolideringen har stor betydelse för sättningsberäkningen och kan beaktas genom ökningen av mantelmotståndet, som återspeglar ökningen av det horisontella jordtrycket. Sättningen efter packning med VibroWing har beräknats med $OCR = 3$. Modultalet för den överkonsoliderade sanden, m_r , har antagits vara 4 gånger högre än för det normalkonsoliderade fallet, m . Sättningen efter packning med VibroWing har beräknats med $OCR = 3$. Modultalet för den överkonsoliderade sanden, m_r , har antagits vara 4 gånger högre än för det normalkonsoliderade fallet, m . Sättningen efter plattpackningen har beräknats med $OCR = 6$. Resultaten från sättningsberäkningen har ställts samman i figur 14 b. I det opackade jordlagret är sättningen cirka 50 mm, det vill säga nästan hälften av sättningen med utgångspunkt från empiriska värden. Efter VibroWing packningen minskar sättningen till cirka 15 mm. Efter den kompletterande plattpackningen minskar sättningen ytterligare till cirka 8 mm.

Val av relevanta packningskriterier

En viktig förutsättning vid projektering av jordpackningsprojekt är valet av relevanta packningskriterier som baseras på tillåtna sättningar. Dessa väljs ofta utan att en sättningsanalys av den opackade jorden genomförs. Ovan redovisade förslag gör det möjligt att analysera sättningar i friktionsjord före packningen.

Om sättningarna är för stora kan jordpackning vara en kostnadseffektiv och tillförlitlig grundförstärkningsmetod.

För liten – eller ojämn – packning kan leda till sättningsproblem. Därför bör detaljerade geotekniska undersökningar (CPT eller DMT) utföras i ett tidigt skede av projektet. En ny, ofta inte observerad effekt av packningen är ökningen av horisontalspänningen och den därigenom framkallade överkonsolideringen. Genom att beakta denna effekt kan betydande kostnadsbesparingar vid jordpackning göras.

Slutord

Jordpackning har en lång och gedigen tradition i Sverige. Svenska geotekniker har bidragit till utvecklingen av nya, effektiva packningsförfaranden. Djuppackning genom VibroWing och resonanspackning har fått omfattande tillämpning internationellt. Därför är det anmärkningsvärt att djuppackning har använts endast i begränsad omfattning i Sverige.

Vibrationspackningen kan användas i friktionsjord för att öka jordens densitet (som återspeglas av spetsmotståndet). En viktig lärdom från vibrationspackningsprojekt i Sverige och utomlands är att vibrationspackningen även leder också till en kraftig ökning av horisontalspänning, som innebär att jordlagret blir överkonsoliderat. Denna effekt bör beaktas vid sättningsanalyser.

Tack

Till sist vill författarna härmed tacka SGIs bibliotekstjänst och särskilt Ingrid Gärllin som har varit till stor hjälp vid litteratursökningen. ■

Läs mer:

CCC Symposium Wien: www.igb.tuwien.ac.at/en/ccc/

Om Resonanspackning: <http://www.georisk.se/web/page.aspx?refid=63>

Referenser

- [1] Wersäll, C., Nordfelt, I., & Larsson, S. (2018). Resonant roller compaction of gravel in full-scale tests. *Transportation Geotechnics*, 14, s. 93-97.
- [2] Converse, F. (1952). *Soil compaction by vibration*. Engineering and Science 15(4), ISSN 0013-7812. s. 12 – 14.
- [3] Wersäll, C., Larsson, S., Rydén, N. and Nordfelt, I. (2015). *Frequency Variable Surface Compaction of Sand Using Rotating Mass Oscillators*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 38, No. 2, 2015, s. 1–10.
- [4] *Canadian Foundation Engineering Manual* (CFEM) (1992) Canadian Geotechnical 3rd Edition. BiTech Publishers Ltd., 512 s.
- [5] Janbu, N. (1985) *Soil models in offshore engineering*. Geotechnique 35(3) s. 241-281.
- [6] Massarsch, K.R. and Fellenius, B.H. *In situ tests for settlement design of compacted sand*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, <https://doi.org/10.1680/jgeen.18.00046>, 11 s.
- [7] Jendeby, L. (1992). *Djuppackning med vibro-sond av typ vibro-wing*. Nordiske Geoteknikermöde, NGM-92, 11, Aalborg, maj 1992. Vol. 1, s 19-24.