

RESONANSPACKNING AV BROFUNDAMENT FÖR SUNDSVALLSBRON

K. Rainer Massarsch

Sammanfattning/Summary

Resonanspackningsmetoden användes för första gången i Sverige för undervattenspackningen av sanden. Brofundamenten av Sundsvallsbron består av sandfyllda stålkassuner som ger högt motstånd vid horisontell belastning. Utgående från omfattande fältförsök var det möjligt att optimera packningsförfarandet för att uppnå ställda krav. Viktiga parametrar var den resonansfrekvens och packningsdonets sjunkningshastighet, som kunde korreleras mot sonderingsmotståndet från CPTU. Ett omfattande kontroll- och övervakningsprogram tillämpades för att säkerställa att vibrationspackningen inte skadade stålkassunen under packningen.

For the first time, resonance compaction was used in Sweden for the underwater compaction of sand. The foundation of the Sundsvallsbridge consist of sand-filled steel caissons which can accommodate high horizontal dynamic forces. Based on extensive field tests it was possible to optimize the execution procedure to achieve the high compaction requirements. The two most important compaction parameters are the resonance frequency and the sinking speed of the compaction probe, which can be correlated to the cone penetration resistance from CPTU. A comprehensive control and monitoring program was applied in order to assure that vibratory compaction did not negatively affect the sensitive steel caissons during compaction.

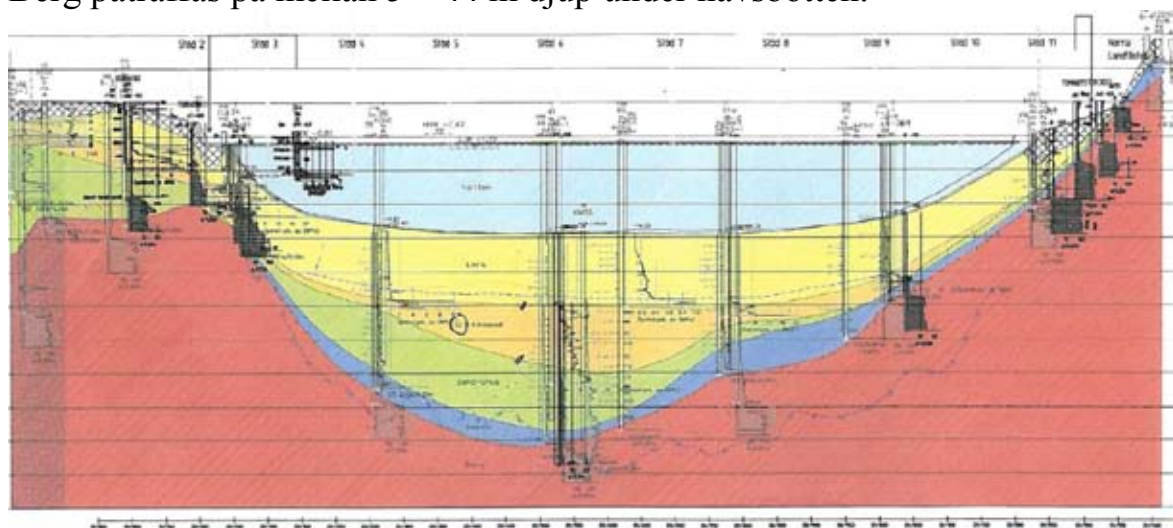
1. INLEDNING

Sundsvallsbron, som byggdes 2011-2015, är Sveriges längsta motorvägsbro (2109 m). Konsortiet JV Sundsvallsbron föreslog en i Sverige ny metod för grundläggningen av de åtta brofundamenten som står i vatten. I stället för konventionella pålar användes kofferdammar (stålkassuner) bestående av stålspons som fylldes med packad sand. De rektangulära kofferdammarna är mycket starka och klarar de stora krafterna som uppstår vid en eventuell skeppskollision mot en bropelare. För packningen av sanden i kofferdammarna användes för första gången i Sverige resonanspackningsmetoden, som ursprungligen utvecklades vid Kgl. Tekniska Högskolan (KTH) i början av 80-talet. Tack vare den snabba utvecklingen inom elektronikområdet är det idag möjligt att optimera packningsförfarandet för att uppnå erforderlig packningsgrad.

Djuppackningen för brofundamenten utfördes under vatten och beställaren, Trafikverket, ställde höga krav på kontroll och dokumentation samt övervakning av packningens utförande.

2. GRUNDFÖRHÅLLANDEN

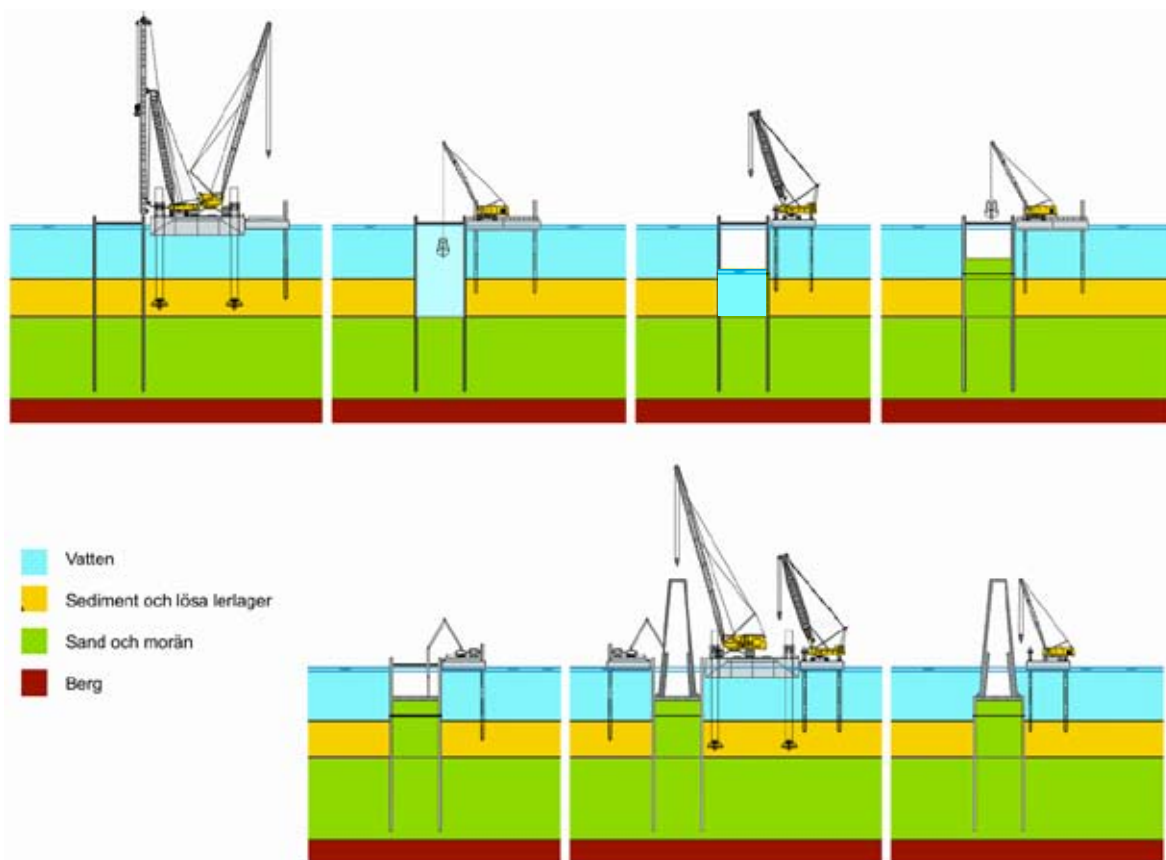
Genomförandet av den komplexa grundläggningen i vatten har varit en stor utmaning för entreprenören. Det maximala vattendjupet var 14 m. Geotekniska undersökningar utfördes i olika etapper och omfattade hej Larsondering, jordbergsondering, viktsondering, vingförsök och trycksondering med porvattentrycksmätning (CPTU), som gav en jordlagerföljd som visas i Figur 1. Under sjöbotten finns mycket lös gyttjig, siltig lera där översta delen är förorenad. Därunder följer 1 – 10 m silt som övergår i sand som har en mäktighet av upp till 8 m. Sanden överlagrar morän i mellersta och norra delen av broläget. Moränen har begränsad mäktighet. Berg påträffas på mellan 5 – 44 m djup under havsbotten.



Figur 1. Geoteknisk längdprofil för Sundsvallsbrons fundament.

Grundläggningen av brofundamenten utfördes i flera etapper och visas i Figur 2. Först slogs stålspont från en ponton ner till i vissa fall mer än 40 meter, där berg eller bärkraftig jord påträffades. Sponten drevs först med en frekvensvariabel vibro-hejare, Müller MS 32 HVF genom de lösa jordlagren och sedan genom sand och morän. Stoppslagningen utfördes med 12 tons hydraulisk hejare, IHC S-120. Bärförmågan av stålsponten verifierades genom stötvågsmätningar. CAPWAP analysen på provsponter utfördes av Universität Braunschweig. Sedan bortschaktades det lösa silt- och lerlagret under vatten ur den 12 m x 20 m stora kofferdammen, som sedan fylldes med runt 2 400 m³ sand per pelare. Detta gav ett i snitt tio meter tjockt sandlager som skulle packas. Vibrationspackningen utfördes under vatten tills erforderlig fasthet var uppnådd. Därefter lnsades kassunen och

betongfundamenten gjöts mot dubbar som fastsvetsades i kofferdammarnas stålväggar. Till sist utfördes gjutningen av brons betongfundament.



Figur 2. Principskiss visar olika etapper vid grundläggningen av brofundamenten.

3. VIBRATIONSPACKNING

Jordpackning har en lång tradition i Sverige och olika innovativa metoder har utvecklats. Den vanligaste packningsmetoden sker med vibrovält som används för att förstärka till exempel vägbankar eller jorddammar. En viktig, men ofta förbisedd faktor vid packning är vibrationsfrekvensen. För närvarande pågår ett forskningsprojekt på Kgl. Tekniska Högskolan (KTH) för att öka vibrovältars effektivitet genom val av optimal packningsfrekvens, Wersäll (2013). Eftersom ytpackningen endast når ner till maximalt ca 1 m djup, begränsas metodens användning vid djupgrundläggning. För att kunna packa jordlagren till stora djup har speciell utrustning utvecklats, så tidigt som under trettioåret i främst Ryssland och Tyskland. En internationellt mycket vanlig metod, "Vibroflotation", använder en elektrisk motor som roterar i nedre änden av en tub, liknande en torktumlare. Packningsdonet sänks ner i omgångar tills den eftersträlvade packningseffekten har uppnåtts. Metodblad för olika packningsmetoder har utarbetats inom ramen för SGF (2012).

Djuppackningsmetod kan också utföras med en stor vibrator som är fastsatt på toppen av ett packningsdon. Den i Norden vanligaste metoden kallas ”VibroWing”, Massarsch och Broms, (1983) och Jendeby (1992), jfr. Figur 3a. Med tiden utvecklades vibratorer, där frekvens och amplitud kan varieras för att uppnå optimal spontdrivning och packning. I samband med ett jordpackningsprojekt i Rostock, genomförde institutionen för jord och bergmekanik vid KTH omfattande modellförsök och fältundersökningar. Syftet var att ta fram kunskap hur vibrationspackningsförfarandet kunde optimeras. Detta forsknings- och utvecklingsarbete resulterade i den s.k. ”Resonanspackningen”, som på ett mycket effektivt sätt kan komprimera lös, vattenmättad sand till stora djup, Figur 3b.



a) VibroWing



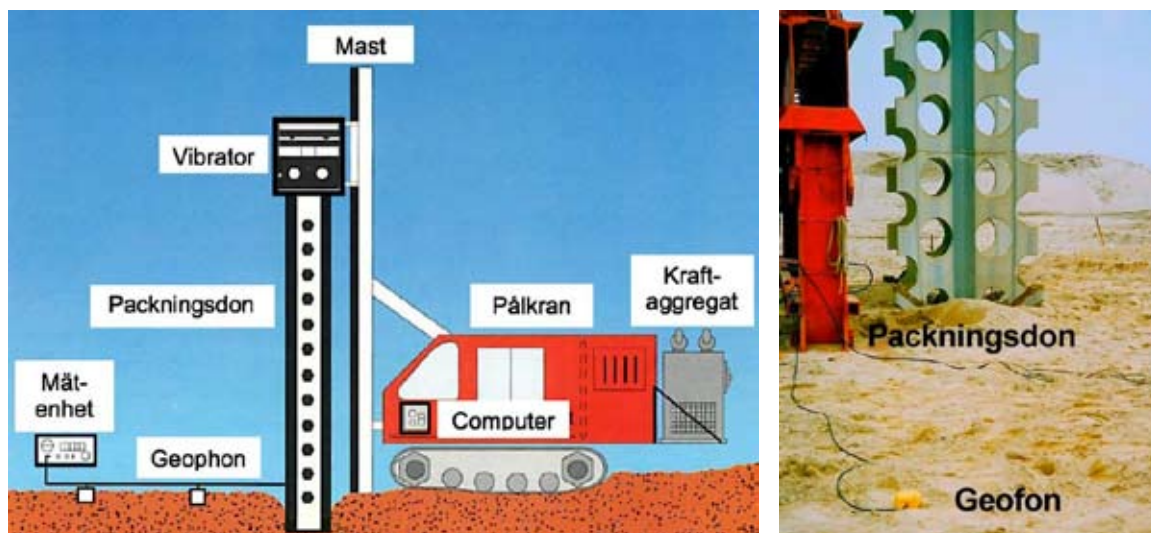
b) Resonanspackning

Figur 3. Två i Sverige utvecklade djuppackningsmetoder

4. HUR FUNGERAR RESONANSPACKNING?

Ett speciellt utformat packningsdon vibreras ner i jordlagret med hjälp av en kraftfull frekvens-variabel vibrator, på liknande sätt som vid spontningsarbeten. På djupet där jordpackningen ska utföras, sänks vibrators frekvens tills resonans uppstår. Vid resonans förstärks vibrationsintensiteten i jordlagret som skall packas. Resonanspackningen utförs lämpligen med hjälp

av en elektronisk styrenhet, Figur 4a). En viktig komponent av kontrollsystemet är geofonen på markytan, som registrerar den vertikala svängningsintensiteten. Det flexibla packningsdonet fungerar som en antenn som strålar ut vibratorns energi till de omgivande jordlagren.



a) Komponenter av resonanspackningen b) Geofonen styr vibratorn

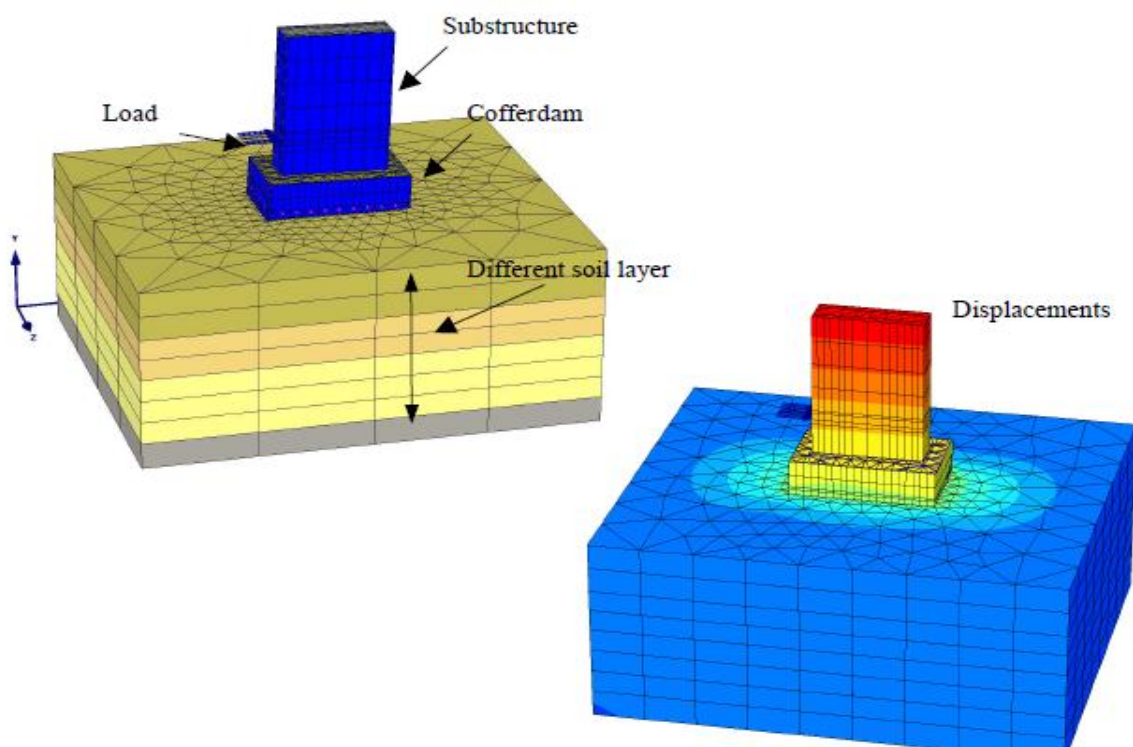
Figur 4. Komponenter av resonanspackningsmetoden.

Resonanspackningen har sedan mitten av åttiotalet använts med framgång vid stora byggprojekt i Nord Amerika, Fjärran Östern och inte minst Europa. Som exempel på välkända projekt kan nämnas infrastrukturprojekt för Hong Kongs nya flygplats och Changi flygplatsen i Singapore. Vid lämpliga förutsättningar är metoden kostnadseffektiv och kan uppnå mycket hög packning. En annan viktig fördel är att hela packningsprocessen kan styras och övervakas elektroniskt. Ett flertal examensarbeten vid KTH, som utfördes i olika länder (Thailand, Hong Kong, Singapore och Sverige) har bidragit till en bättre förståelse av vibrationspackningsprocessen och legat till grund för vidareutvecklingen av metoden, Massarsch (1997). I Sverige användes resonanspackningen för första gången vid jordpackningen för Sundsvallsbrons fundament.

5. DIMENSIONERING AV BROFUNDAMENTEN

En viktig aspekt vid dimensioneringen av pelarfundamenten för Sundsvallsbron var att dessa måste motstå krafterna som skulle uppstå vid skeppspåsegling. För att kunna ta upp och dämpa dessa höga horisontalkrafter utvecklade konsortiet JV Sundsvallsbron en innovativ lösning, där den sandfyllda kofferdammen kan fungera som ett stötdämpande element. Med hjälp av bland annat 3-dimensionell Plaxis analys, vilka utfördes av Pihl &

Søn AS i Danmark, studerades samverkan mellan bropelare, den packade sanden i kofferdammen och de omgivande jordlagren. En viktig faktor vid dimensioneringen var att hållfastheten och styvheten av den packade sanden i kassunen inte skulle påverkas av de höga statiska och cykliska krafterna, jfr. Figur 5.



Figur 5. Samverkan mellan brofundament och undergrund vid vertikal och horisontell belastning.

6. GRUNDLÄGGNINGSARBETEN

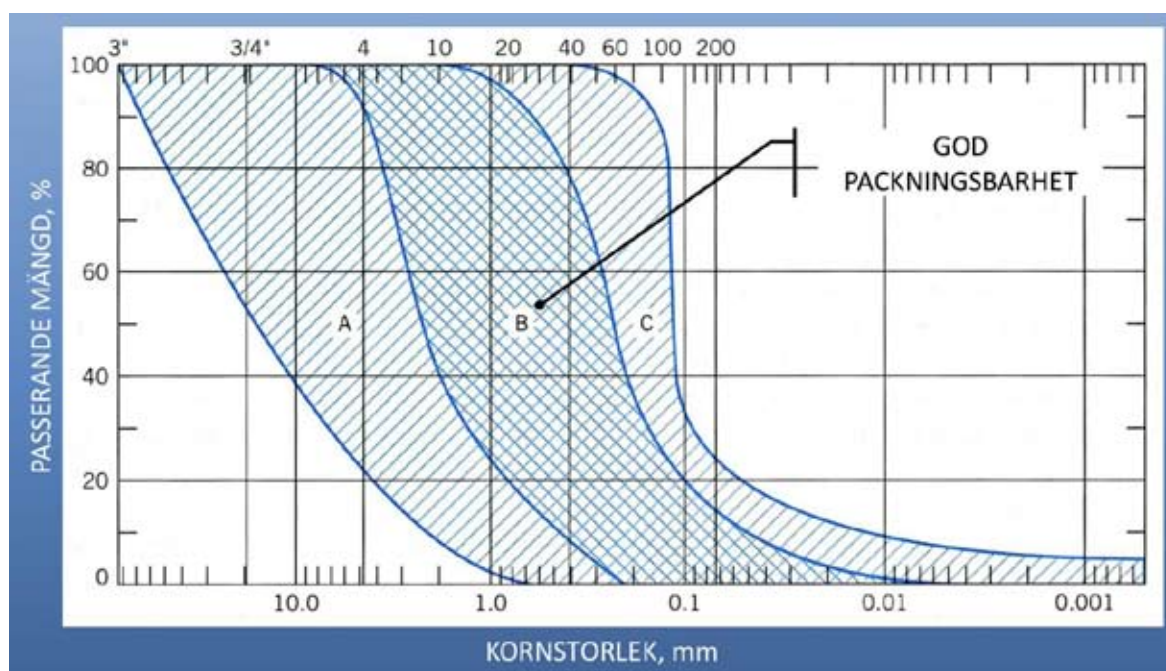
Grundläggningsarbetena för brofundamenten utfördes av företagen Max Bögl och Strabag Wasserbau. Vibrationspackningen av sanden behövde utföras under vatten. Trafikverket ställde höga krav med avseende på packningskvalitet och övervakning; bl. a. kontrollerades stålkaassunernas sidoförskjutning och eventuell vibrationspåverkan under packningen. Därför var en nära samverkan mellan entreprenören och Trafikverket av stor betydelse.

Utgående från den statiska och dynamiska analysen var det möjligt att fastställa de geotekniska egenskaperna av den packade sanden, jfr Tabell 1. Två viktiga parametrar var sandens hållfasthet (friktionsvinkel) styvhet

(elasticitetsmodul). För att kunna uppnå effektiv packning ställdes höga krav med avseende på sandens kornfördelning (zon B), som visas i Figur 6.

Tabell 1. Kravspecifikation för den packade sanden.

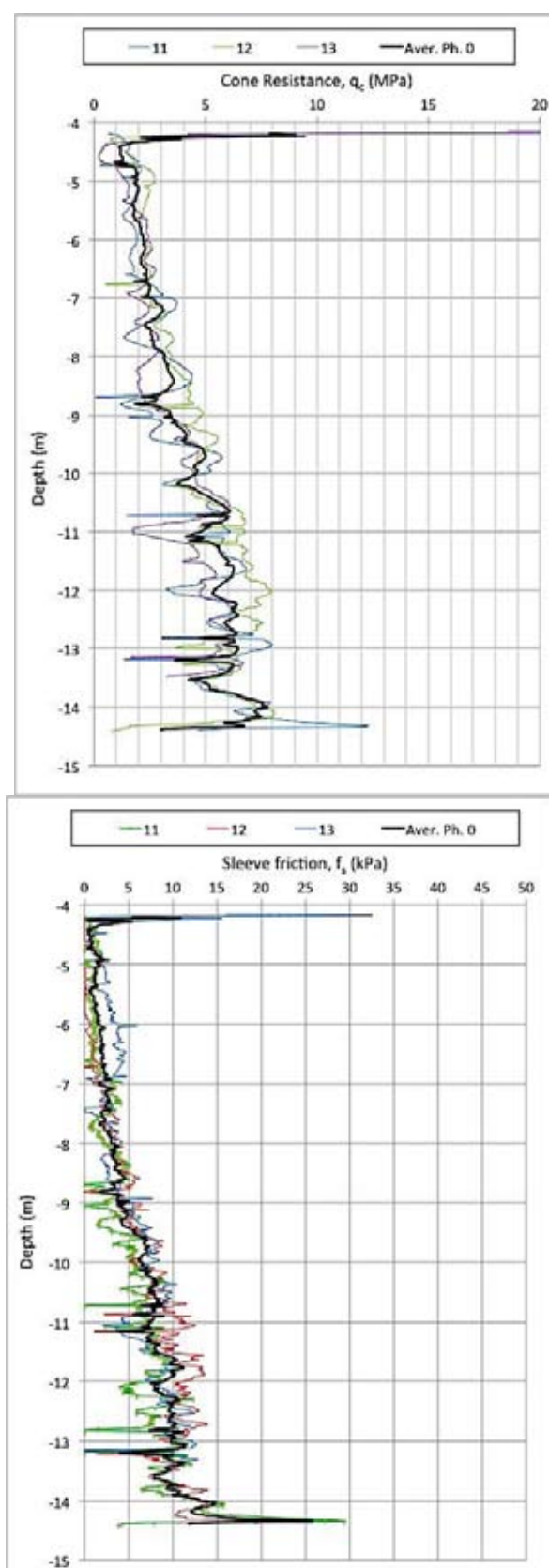
Beteckning		Enhet
Densitet, ρ	1,8	t/m ³
Friktionsvinkel, ϕ	35	grader
Kompressionsmodul, E_{oed}	40	MPa
Elasticitetsmodul, E_{50}	30	MPa
Poissons tal, ν	0,30	



Figur 6. Sandens kornfördelning föreskrevs falla inom zon B.

Sandmaterialets egenskaper och packningseffekten kontrollerades genom omfattande provtagning, sondering, vibrations- och sättningsmätning. Sandens geotekniska egenskaper bestämdes genom CPTU sondering (spetsmotstånd, mantelfriktion och porvattentryck). Resultaten från inledande försök i den opackade sanden visas i Figur 7. Spetsmotståndet ökade linjärt med djupet från 1,5 MPa till ca 6 MPa på 10 m djup. Vattendjupet ovanför sanden var i det aktuella fallet 4 m. Även mantelfriktionen var mycket låg och ökade från 0 till 10 kPa. Ett viktigt krav var att sanden skulle uppnå en homogen packningsgrad utan att framkalla för höga horisontaltryck mot kassunväggarna (risk för låssprängning). För att kontrollera utböjningen av

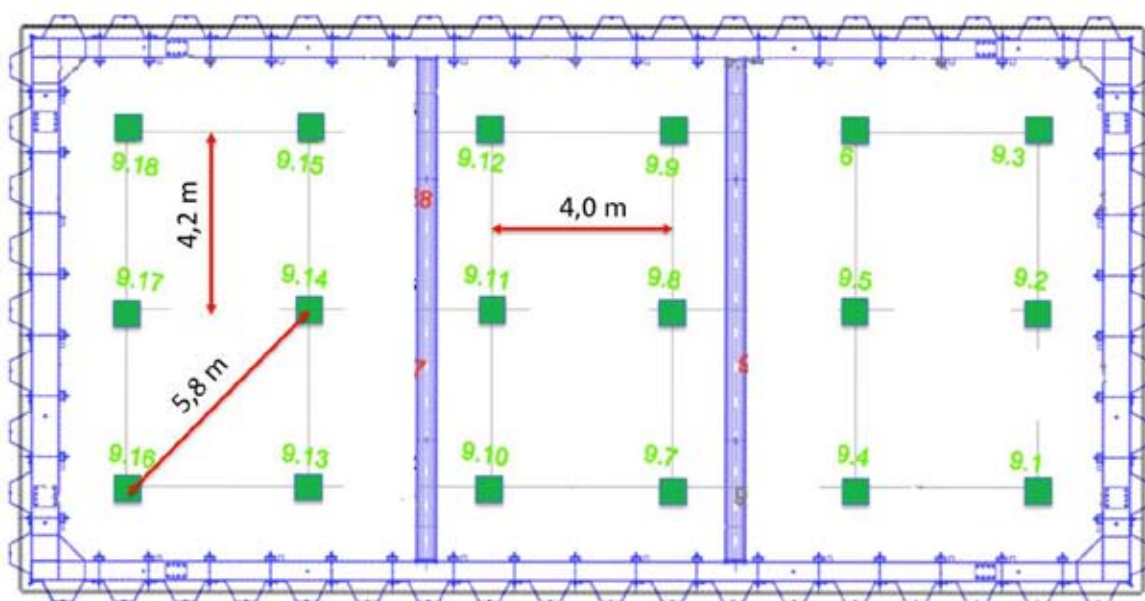
kassunens stålväggar instrumenterades dessa med vibrationsgivare och inklinometererrör.



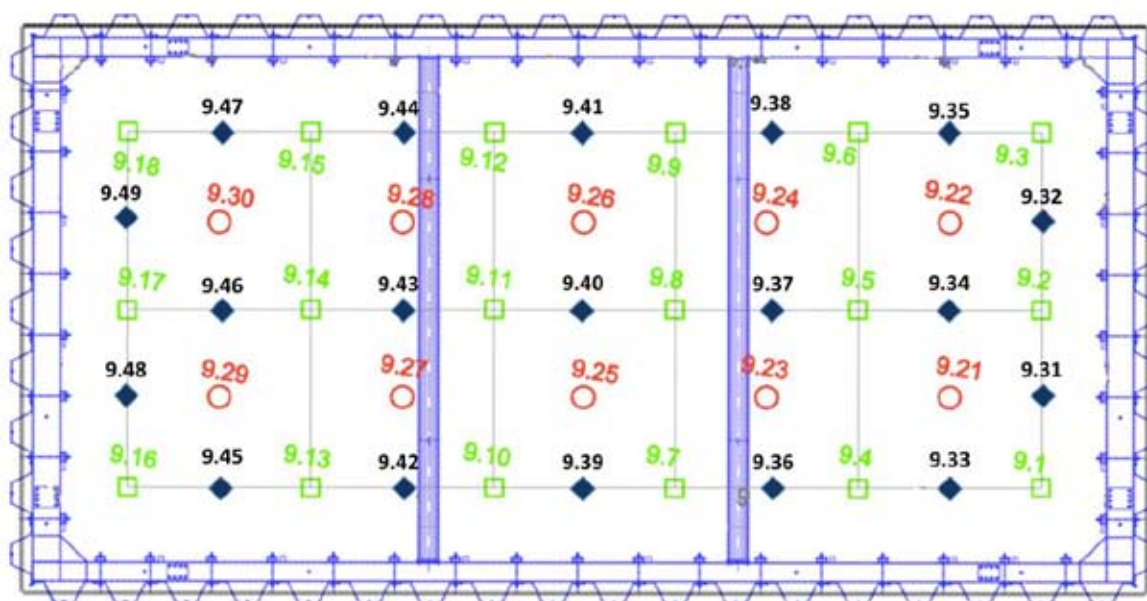
Figur 7. Spetsmotstånd och mantelfriktion av den opackade sanden

7. UNDERVATTENSPACKNINGEN

Inledningsvis undersökte entreprenören olika packningsmetoder, men urvalet begränsades på grund av de högt ställda packningskraven, tidsaspekten och de speciella förutsättningarna vid undervattenspackning inom kofferdammarna. Valet föll på resonanspacknings-alternativet som kunde genomföras under relativt kort tid och bedömdes kunna uppnå Trafikverkets högt ställda krav. Packningen utfördes i varje kofferdamm i tre etapper. För att minska vibrationspåverkan på stålkaassunens väggar packades sanden från ytterväggarna in emot kassunens mitt. Under den första etappen (18 punkter) var avståndet mellan packningspunkterna 4,0 x 4,2 m, jfr Figur 8a). I den andra etappen packades 10 punkter i diagonalen och i den tredje etappen de 19 punkter, Figur 8b).



a) Packningsetapp 1



b) Packningsetapp 3

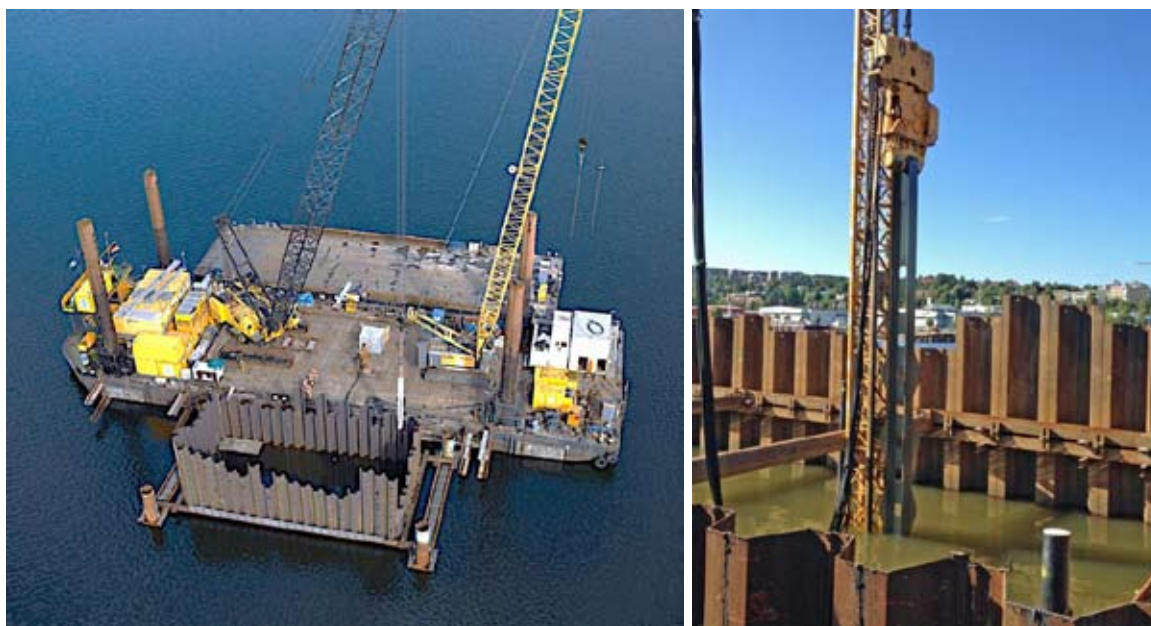
Figur 8. Genomförandet av packningen i tre etapper.

En fördel med resonanspackningen är att den utförs med en kraftfull vibrator som under packningsproceduren kan sänkas ner under vattnet. Detta möjliggjorde användningen av ett kortare packningsdon, med viktbesparingar och ökad packningskapacitet som följd. Vid resonanspackningen användes en högfrekvent vibrator med variabelt moment av fabrikat Dieseko PVE 2319 VM, Tabell 2.

Tabell 2. Tekniska egenskaper av vibratorn Dieseko PVE 2319 VM.

Specifikation	Storhet	Enhet
Excentriskt moment	0 – 190 Nm	Excentriskt moment
Maximal frekvens	38 Hz (2300 rpm)	Maximal frekvens
Maximal centrifugalkraft	1 100 kN	Maximal centrifugalkraft
Maximal dragkraft	300 kN	Maximal dragkraft
Totalvikt utan infästning	31 kN	Totalvikt utan infästning

Figur 9a) visar den vattenfyllda stålkassunen innan packningen påbörjades, samt utrustningen som användes för resonanspackningen.



a) Stålkassunen innan packningen

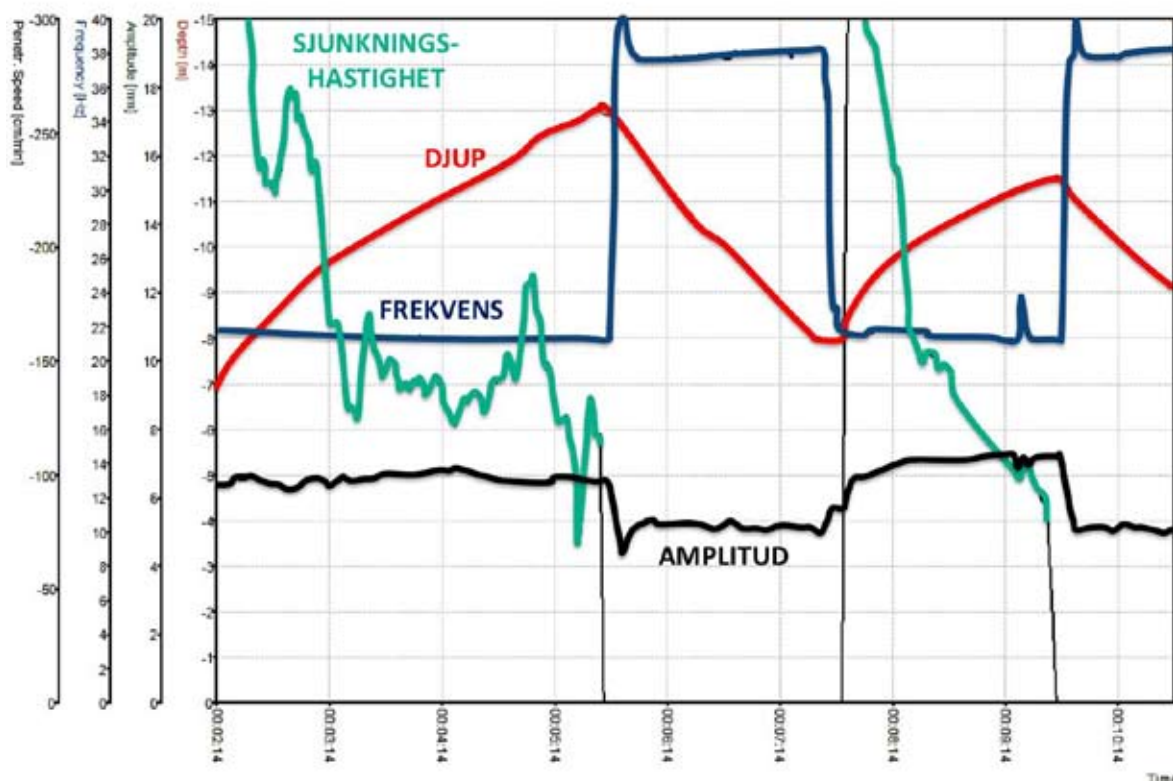
b) Resonanspackning

Figur 9. Resonanspackning inom stålkassun med hydraulisk vibrator.
Förgrunden syns inklinometerröret för övervakning av spontens rörelser.

8. GENOMFÖRANDET

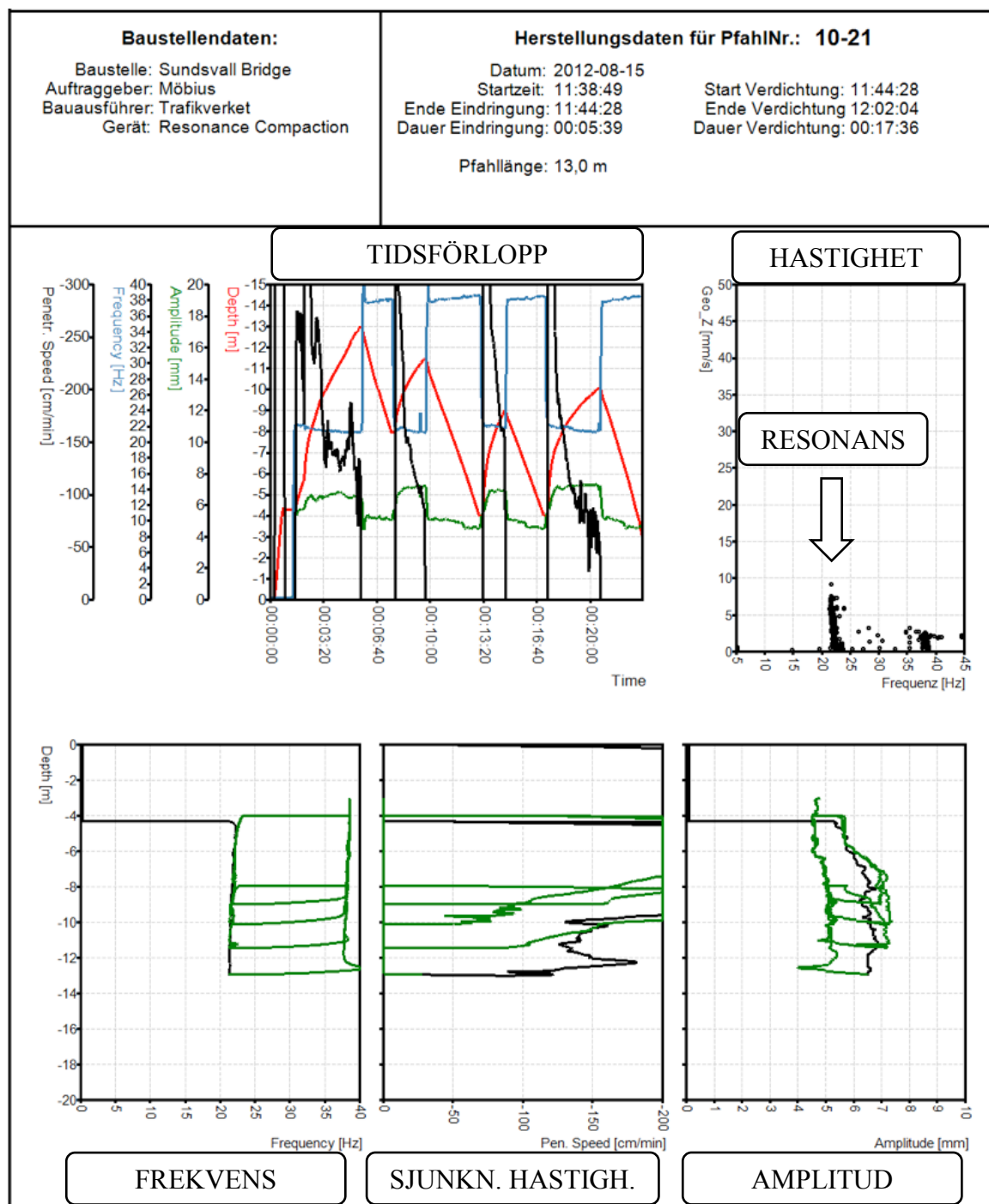
För att fastställa den optimala packningsproceduren (avstånd mellan packningspunkter, antal packningscykler, packningstid mm) utfördes omfattande packningsförsök. CPT-sondering utfördes före och efter respektive packningsetapp för att kontrollera packningseffekten. Vid vibrering av packningsdonet med hög frekvens uppstår det huvudsakliga motståndet vid spetsen – packningsdonet uppför sig som en storskalig penetrometer. Sjunkningshastigheten kan därför relateras till CPT spetsmotståndet i en närbelägen punkt.

Figur 10 visar en typisk registrering under resonanspackningen. Vid resonanspackning användes en låg frekvens (22 Hz - blå linje). Under packningen sjunker donet (spets) från 7 till 13 m djup (röd linje). Sjunkningshastigheten minskar med ökande packningsgrad (grön linje) från > 300 cm/min till ca 80 cm/min. Under packningen är packningsdonets svängningsamplitud närmast konstant, 6,5 mm (svart linje). Under uppdragningen av packningsdonet höjs vibratorfrekvensen från 22 till 38 Hz och vibrationsamplituden minskar till 4 mm.



Figur 10. Registrerade mätvärden under resonanspackningens gång.

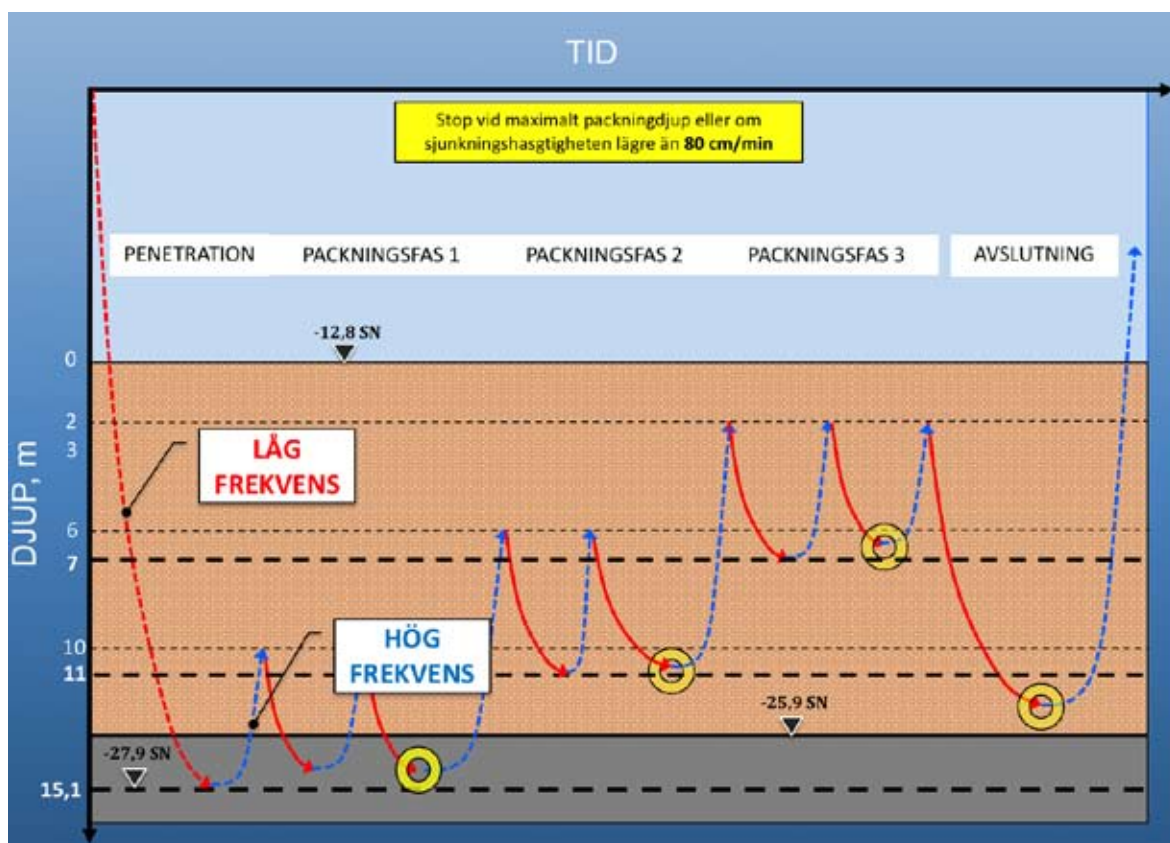
Packningsparametrarna registrerades för varje packningspunkt. Ett exempel på ett packningsprotokoll visas i Figur 11. Packningsförloppet redovisas i diagramform. Tidsförloppet visar packningsparametrarna enligt Figur 10. Dessutom visas kassunens vertikala svängningshastighet. Av diagrammet framgår att resonansfrekvensen ligger vid 22 Hz och var som störst 10 mm/s. Dessutom visas vibrationsfrekvens (Hz), sjunkningshastighet (cm/min) och svängningsamplituden (mm). En viktig aspekt är att uppdragningen sker vid hög vibrationsfrekvens för att bryta kontakten mellan packningsdonet och den omgivande jorden. Dessutom undviks att den packade jorden luckras upp igen. Packningsproceduren utförs genom upprepad sänkning och uppdragning av packningsdonet.



Figur 11. Redovisning av olika mätparametrar – övre diagram: packningsförlopp och vibrationshastighet – nedre diagram: vibrationsfrekvens, sjunkningshastighet och svängningsamplitud.

Utgående från de inledande packningsförsöken kunde det fastställas att den erforderliga packningsgraden var uppnådd när sjunkningshastigheten var ca 80–100 cm/min. Packningsproceduren programmerades för varje pelarfundament och respektive packningsetapp och visades i maskinistens

förarhytt. Figur 12 visar ett exempel på packningsinstruktionen som visades maskinisten. Först vibreras packningsdonet till fullt djup med låg frekvens (ca 22 Hz) – resonansfrekvens (röd linje). Därefter dras packningsdonet upp 5 m med hög frekvens (38 Hz – blå linje) för att därefter sänker ner packningsdonet med låg frekvens (röd linje), antingen till fullt djup (15 m) eller när sjunkningsfrekvensen är lägre än 80 cm/min. Denna packningsprocedur upprepast på tre nivåer (10 – 15 m, 11 – 6 m och 7 – 2 m). Packningen avslutas genom att penetrera sanden vid låg frekvens (22 Hz). Därefter dras packningsdonet upp med hög frekvens och packningen är avslutad. Det är viktigt packningsdonet inte dras upp vid resonans eftersom jorden då kan luckras upp och uppdragningsmotståndet blir mycket högt.



Figur 12. Diagrammet illustrerar resonanspackningens olika etapper, där sjunkningshastigheten (80 cm/min) används som kriterium när packningen kunde avslutas på olika nivåer.

Ett viktigt krav från Trafikverket var den omfattande utförandekontrollen. Packningen skedde med stöd av ett specialutvecklat elektroniskt styrsystem, där följande parametrar registrerades i varje packningspunkt, jfr. Figur 11:

- *Packningspunkt ID*
- *Packningsposition (GPS)*
- *Datum och tid*
- *Packningsdonets sjunkningshastighet*
- *Packningsdonets maximala djup (m)*
- *Kraftaggregatets hydrauliska tryck (MPa)*
- *Svängningsamplitud (mm)*
- *Vibratorfrekvens (Hz)*
- *Svängningshastighet (mm/s).*

Genom den detaljerade redovisningen av alla packningsparametrar var det möjligt att verifiera att den erforderliga packningsgraden var uppnådd. Maskinisten i förarhytten kunde följa packningsprocessen och variera vibratorns frekvens och packningsdonets rörelse (sänkning/uppdragning), Figur 13.



a) Datorstyrd packning

b) Indikation av packningsparameter

Figur 13. Elektroniskt övervakningssystem med vars hjälp maskinisten kunde utföra undervattenspackningen.

Utan den elektroniska styrningen och redovisningen av packningsförfarandet hade det varit svårt att utföra undervattenspackningen eftersom packningsutrustningen arbetade under vatten. Figur 14 illustrerar packningen i den vattenfyllda kassunen.



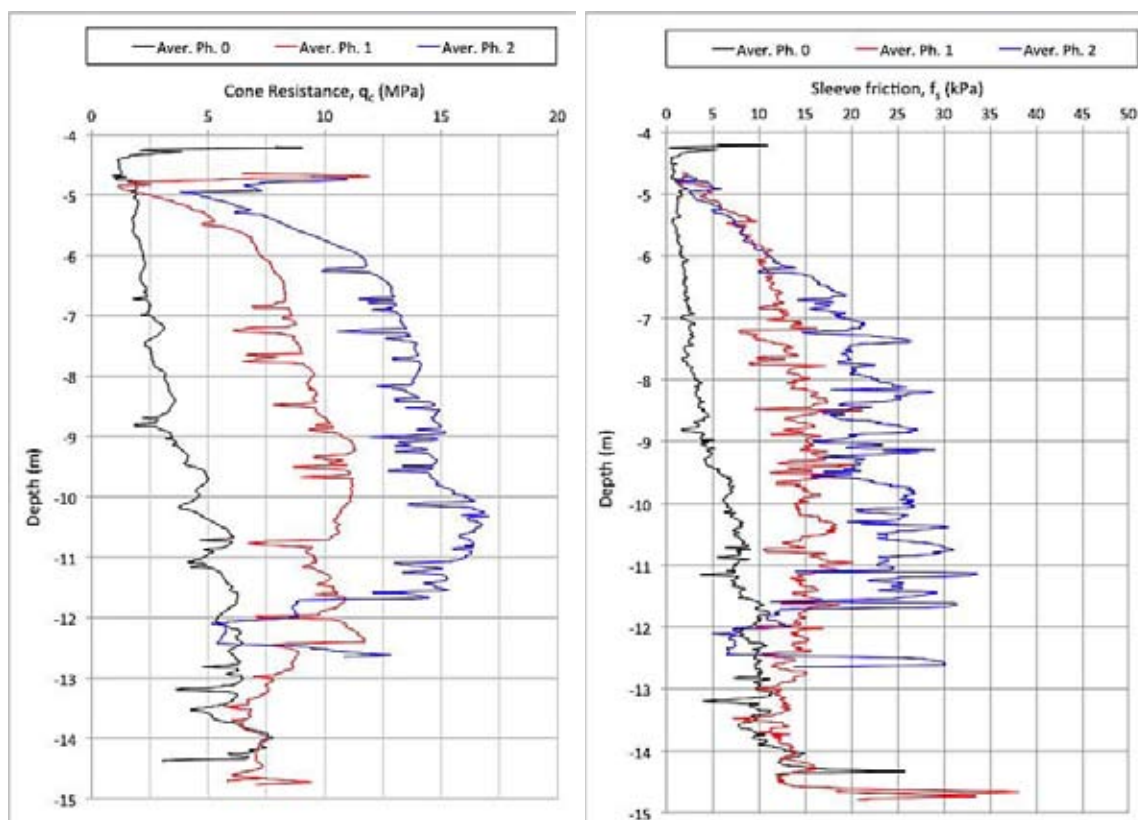
Figur 14. Undervattenspackningen utfördes inom stålkassunen där vibratorn arbetade huvudsakligen under vattenytan.

9. PACKNINGSKONTROLL

Packningskontrollen utfördes genom sättningsmätning av sanden samt olika typer av sondering (trycksondering, viktsondering). Eftersom den kritiska nivån vid påsegling är nära vattenytan, gjordes stora ansträngningar att öka packningsgraden i det övre sandlagret. Därför var packningskraven lägre i övergången från sandlagret till den underliggande – ibland finkorniga jorden – inte lika höga.

Figur 15 visar typiska resultat (medelvärden) av CPT sondering före samt efter den första och den andra packningsfasen. Det ursprungligen mycket låga spetsmotståndet (Figur 7) ökade genom packningen till mellan 7 och 15 MPa. Även mantelmotståndet steg mycket kraftigt. En något lägre packningsgrad konstateras i övergångslagret till det underliggande, naturliga jordlagret (siltig sand).

Efter avslutad packning tömdes stålkassunen och fyllningens yta blev synlig, Figur 16.



Figur 15. Resultat av CPT sondering efter packning.



Figur 16. Sandytan i stålkassunen efter resonanspackningen.

10. SLUTORD

Brofundamenten för Sundsvallsbron är grundlagda på sandfyllda koffer-dammar. För packningen användes för första gången i Sverige resonans-packningsmetoden. Förfarandet fastställdes med stöd av omfattande fältförsök. Packningseffekten kontrollerades genom CPTU sondering före och efter olika packningsfaser.

En kritisk aspekt var att vibrationspackningen inte fick förorsaka rörelse i stålkassunen. Därför tillämpades ett omfattande kontrollsystem, där stål-kassunens rörelser övervakades genom inklinometerrör och vibrationsgivare. Trafikverket ställde mycket höga krav med avseende på kontinuerlig kontroll och dokumentation av hela packningsförloppet.

Vid resonanspackningen användes avancerad elektroniskt processtyrning, där för packningen viktiga parametrar registrerades och visades maskinisten i förarhytten. Packningsdonets sjunkningshastighet är en viktig parameter eftersom den kan jämföras med spetsmotståndet från CPTU sondering. De två viktigaste parametrarna för packningen var resonansfrekvensen (22 Hz) samt packningsdonets sjunkningshastighet. Packningsprocessen programmerades för varje packningspunkt och redovisades för maskinisten i förarhytten. Detta var en viktig förutsättning, eftersom packningen i huvudsak utfördes under vatten.

Trafikverkets expert för grundläggningsfrågor var Peter Zackrisson, tillsammans med Jörgen Stenersen, Trafikverket, som hade ansvaret att kontrollera och övervaka djuppackningen. Max Bögl och Strabag Wasserbau utförde resonanspackningen under ledning av Dipl. Ing. Oliver Tomaschewski. Det har varit ett stort nöje att ha medverkat i detta mycket intressanta projekt.

11. REFERENSER

Metodblad (2012). Resonanspackning. Svenska Geotekniska Föreningen, metodblad.

Jendeby, L. (1992). Djuppackning med Vibro-sond av typ Vibro-wing. Nordic Geotechnical Meeting NGM-92, Vol. 1, 19-24.

Massarsch, K.R. and Broms, B.B. 1983, Soil Compaction by VibroWing Method. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 23 - 26 May, 1983, Proceedings, Volume 1, s. 275 - 278.

Massarsch, K. R. 1997. Djuppackning enligt MRC-Metoden, erfarenheter från flygplatsprojektet i Singapore, Grundläggningdagen 97, 15 p.

Wersäll, C. (2013). Influence of Frequency on Compaction of Sand in Small-scale Tests. Lic. Thesis, Kgl. Tekniska Högskolan (KTH), Samhällsbyggnad. TRITA-JOB LIC 2023.