

STENPELARE MED LÅG KLIMATPÅVERKAN ERFARENHETER FRÅN NORRBOTNIABANAN

Magnus Ruin ^A, Tony Forsberg ^A

^A Nordic Geo Construction AB

SAMMANFATTNING

De största källorna till klimatpåverkan vid infrastrukturutbyggnad är tillverkning av material som cement, betong och stål samt utsläpp från anläggningsmaskiner och transporter. Trafikverket har som mål att nettoutsläppen vid byggande, drift och underhåll av infrastrukturen ska vara noll senast år 2040. Utbyggnad av järnvägar och vägar genom områden med ogynnsamma markförhållanden kräver ofta omfattande jordförstärkningsåtgärder. Klimatpåverkan från jordförstärkningen kan utgöra upp till 50% av det totala klimatavtrycket vid anläggning av ny järnväg. Ökad användning av jordförstärkningsmetoder med lågt klimatavtryck är därför angeläget och troligen nödvändigt för att nå de övergripande klimatmålen.

Trafikverket har genom forskningsportföljen FOI-BYGGGA delfinansierat ett forskningsprojekt avseende en i Sverige ny teknik för installation av stenpelare. Denna teknik baseras på installation av stenpelare genom rotation och en nedåtriktad matningskraft. Installationsförfarandet är mycket skonsamt med begränsad påverkan på omgivande jord. Syftet med projektet är att verifiera om klimatvänliga stenpelare utförda med den skonsamma tekniken kan vara lämpliga i typiska svenska störningskänsliga leror med låg hållfasthet. Forskningsprojektet baseras på en provbank som utförts i Robertsfors, ca 40 km norr om Umeå, inom program Norrbotniabanan. Provbanken har grundlagts med stenpelare som installerades med icke-vibrerande teknik. Markförhållandena vid provbanken utgörs främst av sulfidlera och sulfidsilt med skjuvhållfasthet, $c_u \geq 10$ kPa och sensitivitet, $s_t < 30$. Stenpelarnas diameter är ca. 85 cm och medellängden är 7,65 m. Banken instrumenteras och följs upp kontinuerligt under lång tid för noga uppföljning av konsolideringssättningar, krypsättningar och horisontella rörelser.

Den primära konsolideringen bedömdes vara avslutad ca. fyra månader efter sista laststeg och påförd överlast. Små krypsättningar pågår alltså med en kryphastighet av ca 1,8 mm per månad och är avtagande. Överlastens storlek utgör ca. 22% av bankens permanenta last. För att kunna följa upp krypsättningarnas utbildande under lång tid har överlasten inte tagits av och planeras att tas bort ca två år efter färdig uppfyllnad. De horisontella rörelserna har varit små. De uppmätta rörelserna och sättningshastigheten visar bra samstämmighet med förväntade rörelser enligt beräkningar utförda i projekteringsskedet. Det kan konstateras att grundläggningen av provbanken med icke-vibrerade stenpelare uppfyllt funktionskraven.

Resultaten indikerar att stenpelare utförda med icke-vibrerad metod kan utgöra ett lämpligt och klimatvänligt alternativ för jordförstärkning av mellansensitiva leror med låg skjuvhållfasthet.

SUMMARY

The dominant contributors to greenhouse gas emissions during construction are the production of construction materials such as cement, concrete, and steel, as well as emissions from construction equipment and transportation. The Swedish Transport Administration (Trafikverket) has established a target of achieving net-zero greenhouse gas emissions from the construction, operation, and maintenance of infrastructure by 2040. The construction of railways and roads in areas with unfavourable subsoil conditions often requires extensive ground improvement measures. These ground improvement measures may account for up to 50% of the total carbon footprint associated with the construction of a new railway. Consequently, increased use of ground improvement methods with low carbon footprint is both urgent and likely necessary to meet overarching climate objectives.

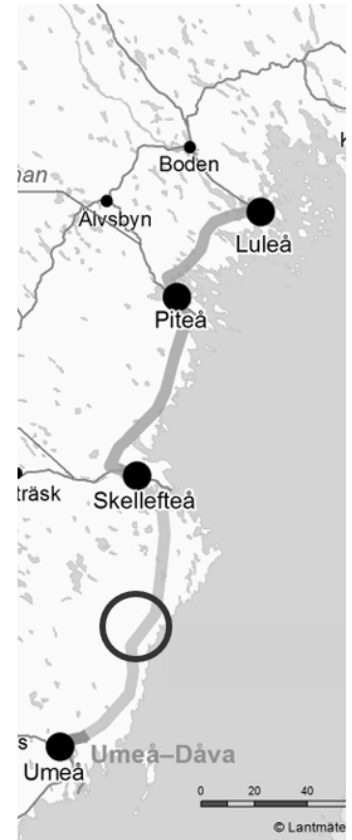
Within the research portfolio FOI-BYGGGA, Trafikverket has co-financed a research project investigating a stone column installation technique that is new to Sweden. The technique is based on the installation of stone columns by means of rotary action combined with a downward crowd force. The installation procedure is hence non-vibratory and results in minimal disturbance to the surrounding soil. The objective of the research project is to evaluate whether low carbon footprint stone columns installed using the non-vibratory method are suitable for typical Swedish, sensitive clays with low strength. The research is based on a test embankment constructed in Robertsfors, app. 40 km north of Umeå, within the Norrbotniabanan program. The embankment was founded on stone columns installed using the non-vibratory method. The subsoil conditions at the test site consist primarily of sulphide clay and sulphide silt with undrained shear strength $c_u > 10$ kPa and sensitivity $S_t < 30$. The stone columns have a diameter of approximately 85 cm and an average length of 7.65 m. The embankment is being instrumented for long-term monitoring of consolidation settlements, creep settlements, and horizontal displacements.

Primary consolidation was assessed to be completed app. four months after the last load step and applied surcharge. Secondary (creep) settlements are ongoing, with an estimated creep rate of app. 1.8 mm/month with decreasing rate. The applied surcharge corresponds to approximately 22% of the permanent embankment load. Measured horizontal displacements have been small. The observed deformations and settlement rates are in good agreement with predicted behaviour based on design-stage calculations. It may be concluded that the foundation of the test embankment using non-vibratory stone columns satisfies the specified performance requirements. The results indicate that stone columns installed with a non-vibratory method can constitute a suitable and climate-friendly alternative for ground improvement of medium-sensitive clays with low shear strength.

1 OM PROJEKTET

Norrbotniabanan är en 27 mil ny kustnära järnväg mellan Umeå och Luleå (Figur 1) för snabbare, säkrare och mer miljövänliga resor och transporter, som stärker samhällsutvecklingen och näringslivets konkurrenskraft i hela Sverige (www.trafikverket.se). Utbyggnaden planeras att ske i fyra huvudetapper; Umeå-Dåva, Dåva-Skellefteå, Skellefteå-Luleå samt Luleå C. Den totala investeringen i 2025-02-års prisnivå är ca 63 miljarder SEK (1).

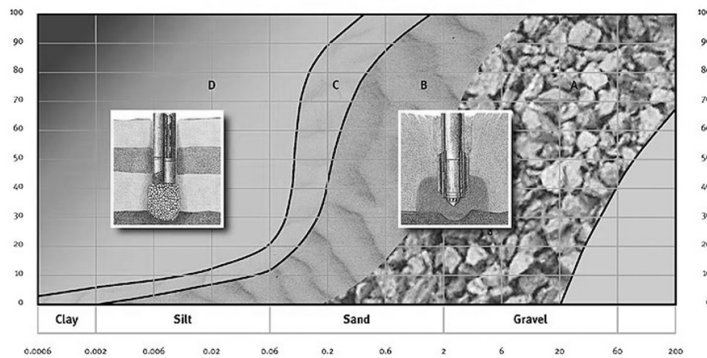
Den nu aktuella delsträckan avser höghastighetsbanan mellan Gryssjön och Robertsfors, närmare bestämt Degermyranområdet som är belägen mellan km 54+100 och 55+200. Här projekteras en delsträcka med en i Sverige ny jordförstärkningsmetod; icke-vibrerade stenpelare. Projekteringen av delsträckan utförs av AECOM. Resultaten från provbanken kommer att validera val av teknisk lösning och produktionsteknik. Flera olika alternativ utreddes och icke-vibrerade stenpelare utan ”geotextilstrumpa” bedömdes vara det mest intressanta alternativet för banken i Degermyranområdet.



Figur 1
Norrbotniabanan

2 STENPELARMETODEN

Stenpelarmetoden är en vedertagen jordförstärkningsmetod som används frekvent i stora delar av världen. Metoden innebär tillverkning av pelare genom packning av krossmaterial från fast botten till markytan. Packning sker vanligen med en djupvibrator som förs ner i jorden. Pelarna tillverkas genom att upprepade gånger föra djupvibratören med tillhörande materialrör upp och ner korta rörelser under samtidig successiv utmatning av krossmaterial och uppdragning mot markytan. Pelarnas diameter är vanligen mellan 0,6 och 1,2 m med centrumavstånd 1,5 till 3,0 m. Metoden är främst lämplig i finkornig jord och löst lagrad friktionsjord, område C & D enligt Figur 2. Metoden förutsätter att jorden mellan pelarna ger erforderligt mothåll. I litteraturen anges att den naturliga jordens skjuvhållfasthet bör vara minst 5-10 kPa (2). Det anges vidare att vibrerade pelare inte är lämpliga i jordar med naturlig vattenkvot nära kornflytgränsen. Ökad sensitivitet medför därtill särskild risk för uppkomst av flytjord till följd av vibrationerna från vibratören (3). I praktiken har dessa omständigheter begränsat användandet av vibrerade stenpelare i Sverige.

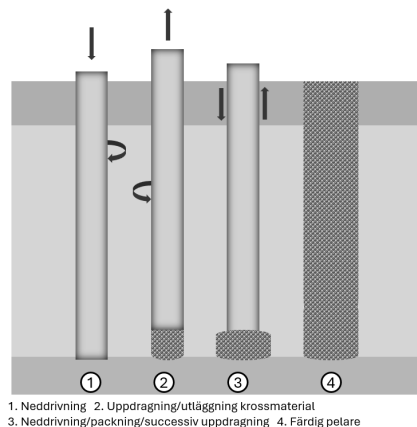


Figur 2 Lämpiga partikelstorlek för stenpelare, omr. C&D. Källa: Bauer

3 ICKE-VIBRERADE STENPELARE

3.1 Princip

Icke-vibrerade stenpelare är en i Sverige hittills oprövad metod för tillverkning av stenpelare. Metoden utvecklades i Japan i slutet av 1990:talet (5). Likt stenpelare utförda med konventionell vibrerad metod nyttjas ett materialrör för tillförsel av krossmaterial. Skillnaden består i att nedföringen av materialröret sker utan vibrationer genom en kombination av roterande verkan och en nedåtriktad matningskraft. Packning av icke-vibrerade stenpelare sker således statiskt utan alstring av skadliga vibrationer. Principen redovisas skissartat i Figur 3.



Figur 3 Princip icke-vibrerade stenpelare

3.2 När kan icke-vibrerade stenpelare vara lämpliga?

Icke-vibrerade stenpelare innebär skonsam tillverkning av stenpelare vilket utökar stenpelarmetodens användningsområde och gör den lämplig även för typiska svenska leror med låg till mycket låg hållfasthet. Den kan ses som ett alternativ till såväl vertikaldränering som kalkcementpelare. Stenpelarmetoden används främst för väg- och järnvägsbankar och uppfyllnader men kan även nyttjas för grundläggning av lättare industribyggnader eller vid höga golvlaster i tex logistikhallar.

Jämfört vertikaldräner erbjuds generellt kortare byggtid. Behovet av stabiliserande tryckbankar minskar pga ökad hållfasthet och styvhet hos den förstärkta jorden. En stenpelarförstärkt jord med ökad skjuvhållfasthet i mellanliggande jord utgör vidare ett robust system som troligen vore mycket lämpligt för tex höghastighetsbanor. Jämfört kalkcementpelarmetoden är den stora fördelen avsevärt minskad klimatpåverkan. Dock förutsätter stenpelarmetoden, liksom vertikaldräner, tillräcklig byggtid för konsolidering. Stenpelarmetoden kräver troligen generellt något längre byggtid jämfört kalkcementpelare men kortare än vertikaldränering. En relativ jämförelse mellan metoderna redovisas i Tabell 1.

Tabell 1 Jordförstärkningsmetoder, relativ jämförelse

Metod	Relativ klimatpåverkan	Relativ byggtid	Relativ installationskostnad
Kalkcementpelare	Hög	Kort	Medel
Vertikaldräner + överlast	Låg	Lång	Låg
Icke-vibrerade stenpelare	Låg	Medel	Medel

4 PROVBANKEN

För den aktuella delsträckan har flera olika förstärkningsåtgärder övervägts, bl.a. stenpelare försedda med geotextilstrumpa, kalkcementpelare, stenpelare utan geotextil, träpålning och utskiftning. Stenpelarmetoden var den sammantaget mest intressanta lösningen. Provbanken har projekterats av AECOM.

4.1 Geotekniska egenskaper

Inom aktuell delsträcka passerar den planerade bansträckningen ett lösmarksområde med torv som överlagrar sulfidlera/sulfidsilt med låg hållfasthet ovan fast morän. Leran/silten är ställvis mellansensitiv. En sammanfattning av jordens egenskaper redovisas i Tabell 2.

Tabell 2 Geotekniska förhållanden (4)

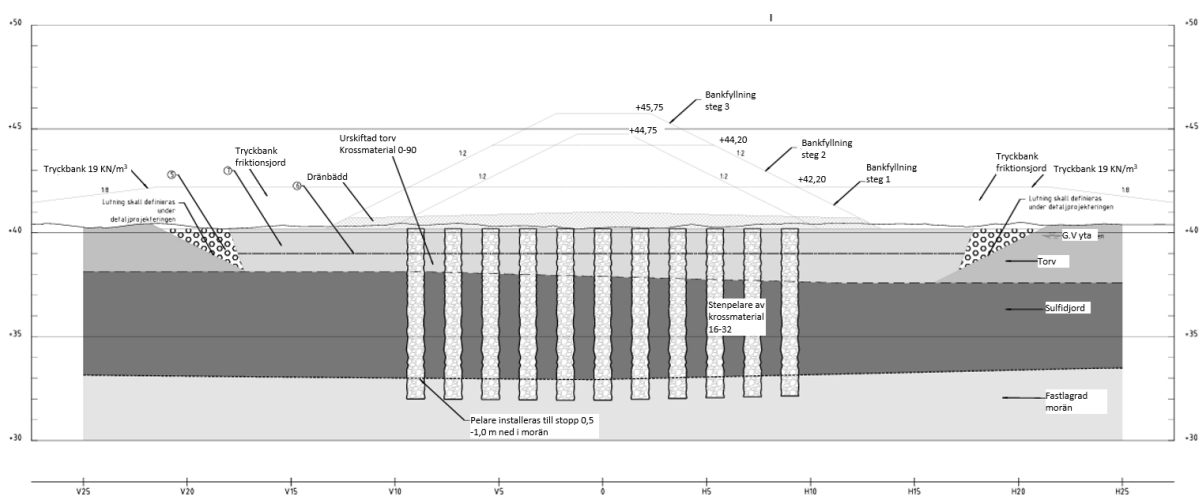
Lager	Jordtyp	M (MPa)	E (MPa)	Φ (°)	S_u (kPa)	γ (ton/m ³)	K (m/s)
A	Pt	0,64	0,298	-	6,1	1,17	9,30E-07
B	(gy)siCl, (gy)clSi	1,64	1,105	-	7,8	1,48	1,46E-09
C	saSi, fsaSi	13,99	9,443	34	-	1,81	1,74E-06
D	clgySi, gyclSuSi	2,10	1,415	-	12,4	1,70	6,70E-10
E	grsaSiTi, saSiTi, siSaTi	66,79	45,08	37	-	2,09	2,29E-06

4.2 Provbanken och förstärkning med stenpelare

Provbanken utgjordes av en plan rektangulär yta med måtten ca 30 x 20 m. De översta 2 m av jorden utgjordes av torv, som schaktades bort och ersattes med krossmaterial före installation av pelare. Det utskiftade materialet utgjorde också en mycket stabil arbetsplattform för borrhjgen. Stenpelarna placerades i kvadratisk pelarmönster med centrumavstånd 1,8 m och med nominell pelardiameter 0,8 m. Antagna egenskaper hos pelarna är enligt Tabell 3. En tvärsektion redovisas i Figur 4.

Tabell 3 Antagna egenskaper hos stenpelare

Diameter, utförd	0,85 m
Kompressionsmodul	40 MPa
Friktionsvinkel	36°
Krossmaterial, fraktion	16 - 32 mm
Pelarlängd, medel	7,7 m



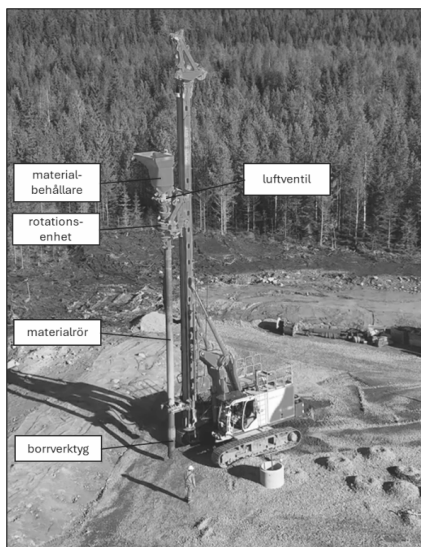
Figur 4 Tvärsektion provbanken

Installationen utfördes av Bauer Spezialtiefbau GmbH. För installation utnyttjades en modifierad borrhjg av modell Bauer BG23H. För trycksättning av materialröret användes en extern kompressor. Borrhjgen och dess huvudkomponenter redovisas i Figur 5. Krossmaterialet togs från ett upplag som placerats ca 100 m från installationsplatsen och transporterades till installationspunkten med en hjullastare och lastades med en höglastare i stenbehållaren på borrhjgen ovan materialröret.

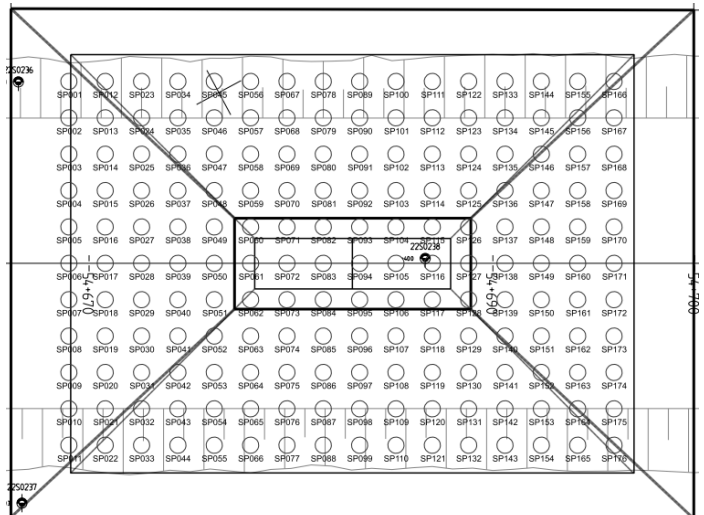
För att bestämma lämpliga processparametrar för de aktuella markförhållandena utfördes kalibreringspelare. Dessa placerades i randen av arbetsplattformen och utgjorde inte produktionspelare.

4.3 Installationsförfarande

Installationsverktyget har ett materialrör med Φ 380 mm och borr/packningsverktyg med Φ 440 mm. Inför installation av en pelare placerades materialröret ovanför den aktuella punkten. Gejderns raket kontrollerades med hjälp av sensorer och materialrörets raket kontrollerades med vattenpass. Materialröret fylldes med krossmaterial och luftventilen slöts. Materialröret fördes därefter ner i jorden under samtidig rotation och nedåtriktad tryckkraft. Materialröret trycksattes när borrarverktyget befann sig ca 1 m under arbetsplattformens överyta. Det var helt problemfritt att borra genom arbetsplattformen som utgjordes av ca två meter krossmaterial med fraktion 0-90 mm efter urskifting av torven. Materialröret fördes ner till fast botten som verifierades genom att dra upp röret ett kort stycke och därefter åter föra ner röret. Övergången mellan lera och morän var mycket tydlig. Därefter drogs röret upp ca 0,5 m varpå krossmaterialet passerade ut genom materialröret och fyllde det hålrum som skapats av röret. Därefter applicerades ånyo nedmatningskraften varpå röret fördes ner i det nyss utlagda krossmaterialet. Röret trycktes då ner ca 0,4 m i krossmaterialet varvid detta trycktes ut och skapade en packad pelare med medeldiametern ca 0,85 m. Nedföring/packningen i lera skedde utan rotation medan del av pelare utförd i fyllning krävde roterande rör för att åstadkomma önskad utmatning av material. Materialåtgången kontrollerades genom att räkna antalet påfyllningar av stenbehållaren med krossmaterial. Pelarnas medellängd var 7,7 m och den uppnådda pelardiametern var ca 0,85 m. Pelarnas placering i plan redovisas i Figur 6.



Figur 5 Borrrigg icke-vibrerade stenpelare

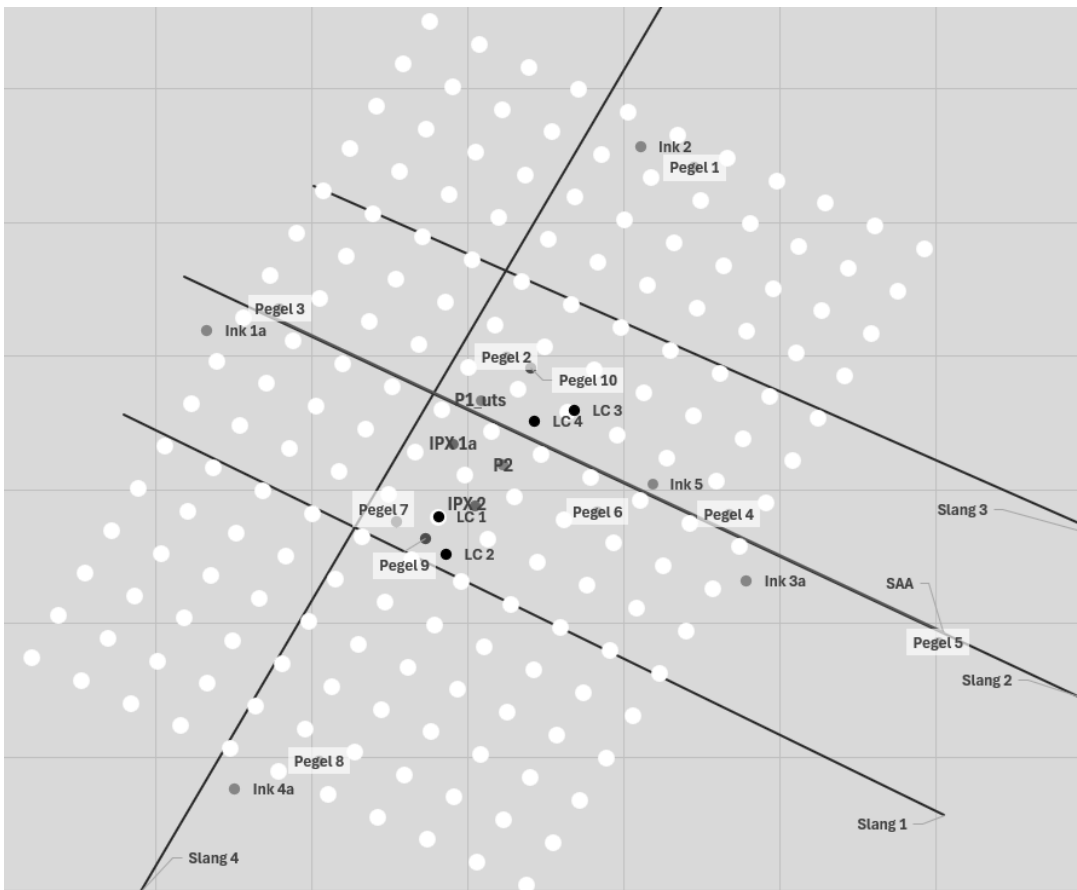


Figur 6 Provbanksplan

5 INSTRUMENTERING OCH MÄTRESULTAT

Provbanken har instrumenterats enligt följande:

- Markpeglar placerade på nivå arbetsplattform (5 st)
- Markpeglar placerade på nivå ök överlast (2 st)
- In-place extensometer, IPX, (2 punkter, 4 - 5 nivåer per punkt)
- Porttrycksmätare under bank, Vibrating wire piezometer, fully grouted (2 punkter, 3 nivåer per punkt)
- Referensporttrycksmätare, (1 punkt, 3 st nivåer)
- In-place-inklinometer (5 rör med 5 givare st)
- Horisontalslangar för slangättningsmätning (4 st)
- Horisontell Shape-array för automatisk sättningmätning (1 st)
- Lastceller placerade på pelare (2 st)
- Lastceller placerade mellan pelare (2 st)

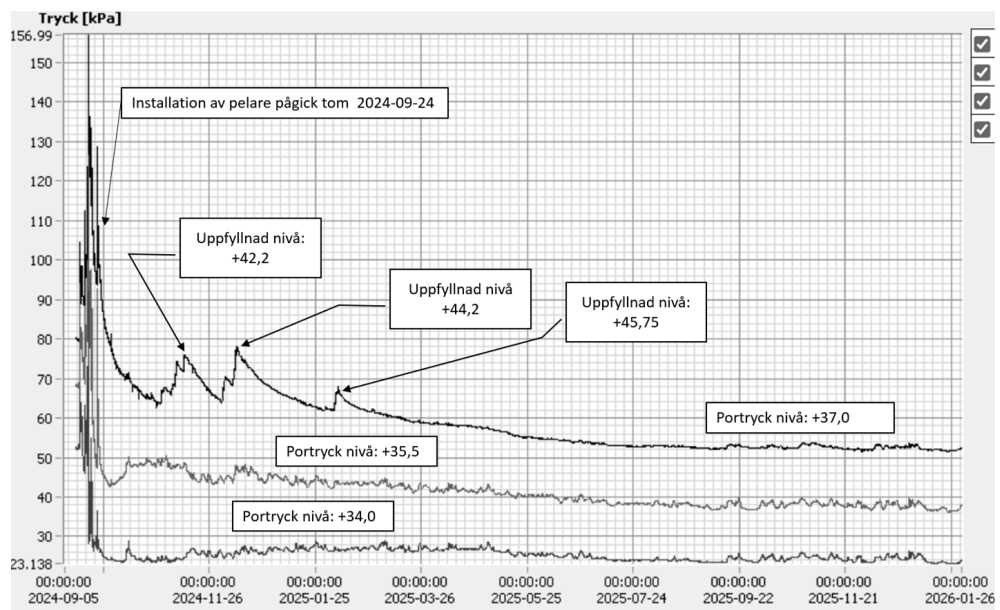


Figur 7. Placering av instrumentering

Samtliga mätningar har god samstämmighet och visar att provbanken uppför sig som förväntat. Nedan visas typiska resultaten från mätningarna för ett urval av mätutrustningen.

5.1 Portrycksmätningar

Det installerades tre portrycksstationer med givare i tre nivåer. Två portrycksstationer under banken, varav en installerades före pelarinstallation. En referensportrycksstation installerades utanför banken för att ha koll på naturliga portrycksvariationer. Installerade givare är av typen vibrerande sträng piezometer. För att kunna mäta mitt mellan pelare i samtliga nivåer installerades givarna med ”Fully grouted method”. Detta innebär att givarna installeras i ett foderrörsborrat hål och gjuts fast med cement-bentonitsuspension, varefter foderröret dras upp. Metoden är vedertagen och vanlig utomlands (6), men har använts sparsamt i Sverige. Metoden har visat sig fungera mycket väl och förhindrar effektivt kommunikation i vertikal-led mellan givare, vilket skulle kunna vara en risk om traditionella portrycksgivare installeras nära varandra. Nedan i Figur 8 redovisas resultat från mätningar i portrycksstationen som installerades under bank innan installation av pelare. Portrycken stiger vid installation av pelare och klingar av snabbt både efter installation och efter respektive bankuppfyllnadssteg. Cirka fyra månader efter sista uppfyllnad har portrycken under banken utjämnats.



Figur 8 Resultat från portrycksmätning under bank från station P1

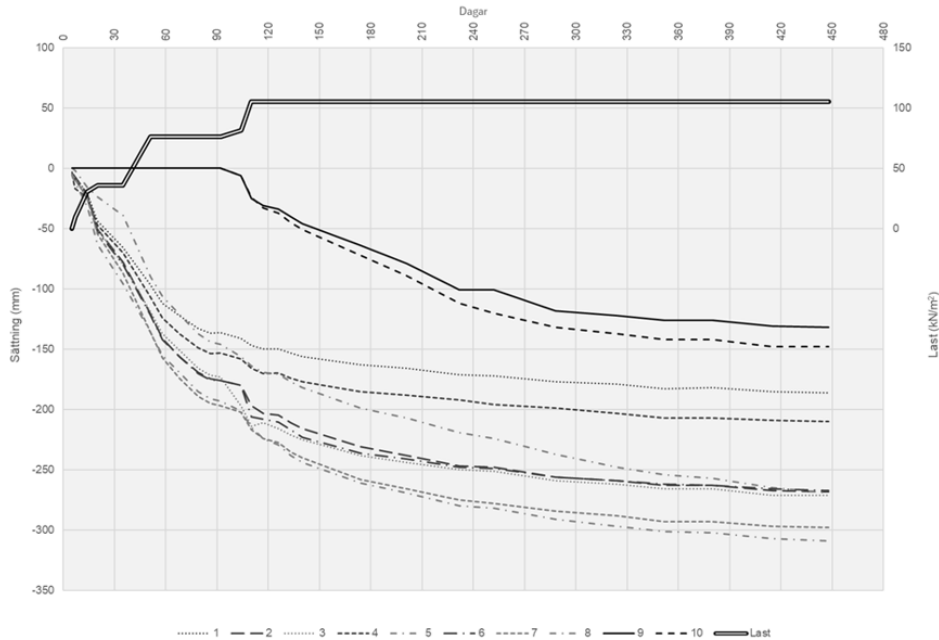
5.2 Sättningsmätningar

Sättningsmätningar har utförts med fyra olika metoder. Markpeglar, placerade på arbetsbädd och på uppfylld bank. Horisontalslangar lagda på arbetsbädd innan uppfyllning, Shape-array för automatisk sättningsmätning samt sättningar mot djup med ”In place Extensometer. Nedan redovisas representativa resultat från respektive mätmetod. Resultat från Shape-Array har inte redovisats, då denna troligtvis roterat i röret och inte bedöms som representativa.

Samtlig utrustning för sättningsmätningar visar på samstämmiga resultat med viss variation, med en totalsättning på ca 300 mm.

5.3 Markpeglar

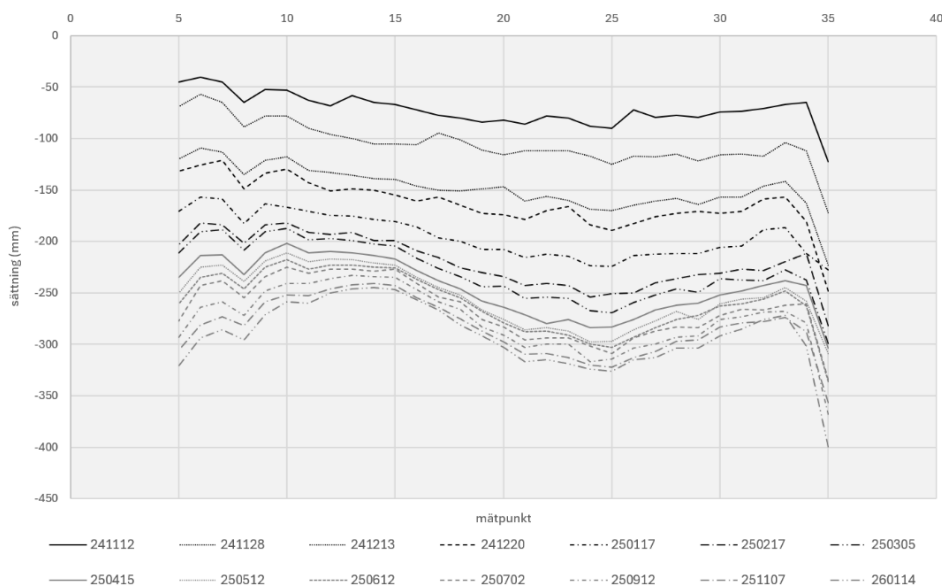
Markpeglarna installerades på utförd arbetsbädd efter pelarinstallation, utanför provbanken under tryckbank, samt på bank innan sista laststeget är utfört. Resultat från markpeglarna redovisas i Figur 9 nedan.



Figur 9 Resultat från sättningsmätning av markpeglar.

5.4 Slangsättningsmätning

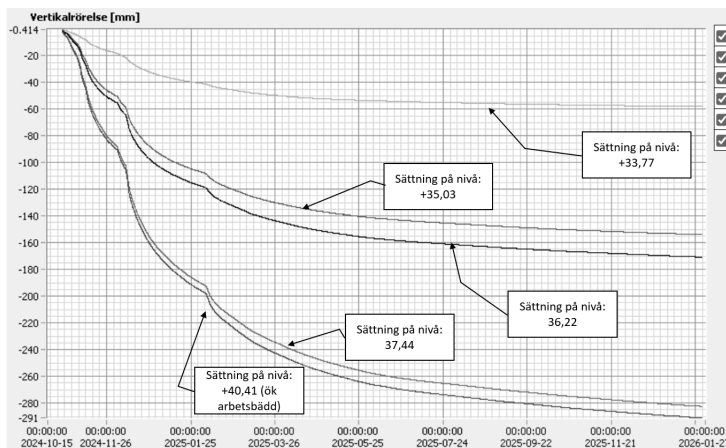
Fyra horisontalslangor för slangättningsmätning installerades, tre tvärs banken och en längs banken. Resultat från slangättningsmätning i slang 2 redovisas i Figur 10.



Figur 10 Resultat från slangättningsmätning slang 2, mitt under bank.

5.5 Vertikalrörelser mot djup

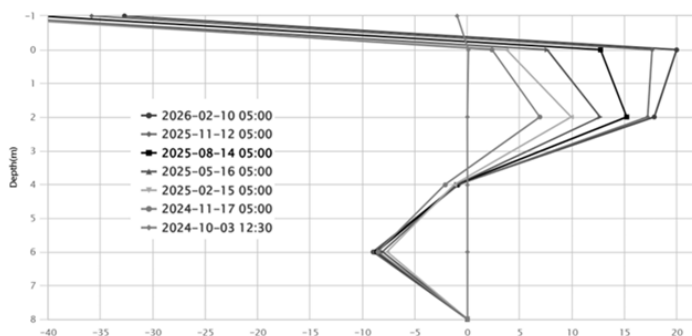
Sättningar mot djup har mätts med IPX- ”in-place extensometer” i två punkter under den centrala delen av banken med fem mätnivåer. IPX består av ett korrugerat rör med magneter installerade på varje mätnivå. Det korrugerade röret installeras till fast botten med foderrörsborrning och gjuts fast med cement-bentonitsuspension. En stång med en givare som mäter magneternas förskjutning, installeras i det korrugerade röret. Fördelen med IPX är att sättningen mot djup kan mätas automatiskt med hög noggrannhet. Systemet är relativt nytt, men har visat sig fungera mycket bra. Nedan i Figur 11 redovisas sättningar mot djup i IPX 2.



Figur 11 Resultat IPX 2 placerad i centrala delen av banken

5.6 Horisontalrörelser – inklinometermätningar

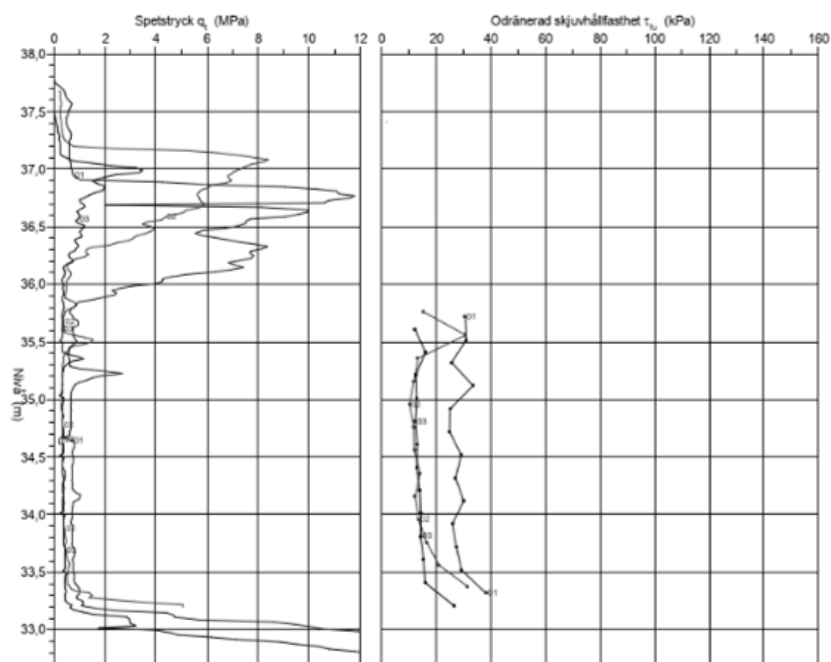
För att mäta horisontalrörelser har fem inklinometerrör installerats. Ett rör på varje sida om banken och ett rör på ena långsidan ca 6 m från bankfot, enligt Figur 7. Inklinometerrören installerades före pelarinstallation för att kunna se effekter av installationen. Resultaten från dessa mätningar kommer att redovisas i Trafikverkets FOI-BYGGGA rapport som publiceras våren 2026. Tre av rören fick sättas om efter installationen av pelarna, då utböjningen av pelare närmast rören skadat dessa. Horisontalrörelserna längs med långsidorna är ca 20-30 mm. I Figur 12 visas inklinometer 1a som är på ena långsidan av banken.



Figur 12 Ink. 1a

5.7 Hållfasthetstillväxt i bank och påverkan från installation

För att undersöka påverkan från installation och konsolidering har CPT-sondering utförts, före pelarinstallation, efter pelarinstallation och innan uppplastningen av sista lastseget. I Figur nedan redovisas resultaten från sonderingen. I det vänstra diagrammet ses CPT-sondering före och efter pelarinstallation som utfördes mitt mellan pelare. Ingen hållfasthetsnedsättning kan observeras efter utförd installation. Dock kan en hållfasthetsökning observeras i sandlager som finns på nivån ca +37 till ca +36. I det högra diagrammet observeras en tydlig ökning av hållfastheten efter laststeg 2, strax före uppfyllnad med överlast, vilket bekräftar pelarnas dränerande funktion.



Figur 13 Resultat CPT sondering före och efter installation av pelare samt innan pålastning av sista laststeget.

6 SLUTSATSER

Provbanken uppför sig som förväntat avseende såväl sättningarnas storlek som sättningshastighet och horisontalrörelser. Det var möjligt att packa krossmaterialet och tillverka pelare med förväntad diameter utan kraftig störning av omkringliggande jord. Installationsprotokollen visar en tydlig ökning av den påförda kraften vid nedföring av verktyget i det utlagda krossmaterialet, vilket bekräftar pelarnas och jordens mothållande förmåga. Utförda sonderingar mellan två intilliggande pelare, före och efter installation, bekräftar att skjuvhållfastheten inte mätbart försämrats under installationen och visar även tydlig hållfasthetsökning efter konsolidering. Baserat på dessa samstämmiga resultat bedöms stenpelarmetoden med icke vibrerande installationsmetod vara tillämpbar i jord med låg eller mycket låg

skjuvhållfasthet. Det anses möjligt att på sikt tillämpa metoden med förutsägbarhet motsvarande andra vedertagna jordförstärkningsmetoder. För tillämpning i typiska svenska leror bedöms stegvis upplastning med partiell konsolidering mellan enskilda laststeg och överlast vara nödvändig. Noggrann uppföljning av portryck, vertikal- och horisontalrörelser är då av stor vikt.

Vid utbyggnad av järnväg genom lösmarksområden utgör klimatpåverkan från jordförstärkning ofta en betydande andel av anläggningens totala klimatavtryck. Stenpelare har mycket låg klimatpåverkan jämfört de vanligaste jordförstärkningsmetoden kalkcementpelare och ökad användning av metoden skulle utgöra ett viktigt bidrag för att nå klimatmålen.

REFERENSER

1. <https://bransch.trafikverket.se/contentassets/adda2319fea14b56b506534ecbb305a9/informationstraff-4-november-2025.pdf>
2. Kirsh & Kirsh, Ground Improvement by Deep Vibratory Methods, 2nd Edition, 2017.
3. Federal Highway Administration Design and Construction of Stone Columns Vol. 1, December 1983.
4. Trafikverket, Norrbotniabanan, Gryssjön-Robetsfors, NBE2216 - Geo PM Projektering Testbank, 2024-04-26.
5. Dahlström, Forsberg, Ruin, Järnväg för höghastighetståg - alternativa grundläggningsmetoder vid hårda sättningskrav, 2021.
6. Contreras, Grosser, Ver Strate, The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation, Geotechnical Instrumentation News, 2008.