

Järnväg för höghastighetståg – alternativa grundläggningsmetoder vid hårda sättningskrav



Trafikverket

Postadress: Trafikverket, 172 90 Sundbyberg

Besöksadress: Solna Strandväg 98, Solna

E-post: trafikverket@trafikverket.se

Telefon: 0771-921 921

Dokumenttitel: Järnväg för höghastighetståg – alternativa grundläggningsmetoder vid hårda sättningskrav

Författare: Marcus Dahlström, Tony Forsberg, Magnus Ruin

Dokumentdatum: 2021-05-06

Version: 1.0

Publikationsnummer: 2021:010

ISBN 978-91-7725-803-2

Innehåll

1	Sammanfattning	7
2	Bakgrund och syfte.....	8
3	Avgränsningar	9
4	Jordförstärkning, allmänt	10
5	Svenska erfarenheter	14
6	Kalkcementpelare.....	14
6.1.	Allmänt	14
6.2.	Geotekniska förutsättningar.....	15
6.3.	Deformationsegenskaper	16
6.4.	Produktion	17
6.5.	Krav på installation	18
6.6.	Kontroll och uppföljning	18
6.7.	Risker osäkerhetsfaktorer.....	18
6.8.	Bedömning av metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.....	18
7	Djupstabilisering (våta metoden, wet deep mixing)..	19
7.1.	Allmänt	19
7.2.	Utförandestandard.....	21
7.3.	Historik	21
7.4.	Metodbeskrivning	21
7.5.	Användningsområden.....	22
7.6.	Material	22
7.7.	Lämpliga jordar.....	23
7.8.	Materialegenskaper	23
7.8.1.	Hållfasthet.....	23
7.8.2.	Deformationsmodul.....	23
7.8.3.	Variationskoefficient.....	23
7.8.4.	Långtidsegenskaper.....	24

7.9.	Produktionsmetoder	25
7.9.1.	Utrustning för tillverkning av cirkulära pelare.....	25
7.9.2.	FMI-metoden	28
7.9.3.	TRD-metoden	28
7.10.	Kontroller under utförande	29
7.10.1.	Suspension	29
7.10.2.	Processparametrar	29
7.10.3.	Blade rotation number (BRN)	30
7.10.4.	Kontroller efter utförande.....	30
7.11.	Våta metoden – erfarenheter från järnvägsprojekt.....	30
7.12.	Bedömning om metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.....	31
8	Stenpelare	31
8.1.	Allmänt	31
8.2.	Standard.....	32
8.3.	Princip	32
8.4.	Stenpelare, våt metod	32
8.5.	Stenpelare, torr metod.....	33
8.6.	Toppvibratormetoden	34
8.7.	Stenpelare med icke-vibrerande teknik.....	34
8.8.	Metodbeskrivning torra metoden	36
8.9.	Lämpliga jordar.....	38
8.10.	Dimensionering	38
8.11.	Förstärkt jords egenskaper	39
8.12.	Material	39
8.13.	Kvalitetssäkring	40
8.14.	Svenska erfarenheter	40
8.15.	Bedömning av metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.....	40
9	Controlled Modulus Columns (CMC) - Rigid inclusions	41
9.1.	Definitioner	42
9.2.	Standarder och vägledning.....	42

9.3.	Metodbeskrivning	42
9.3.1.	Roterande teknik.....	42
9.3.2.	Utförande med vibrerande teknik	43
9.4.	Produktionsparametrar	44
9.5.	Dimensionering	46
9.6.	Lämpliga jordar.....	48
9.7.	Fördelar jämfört alternativa metoder.....	48
9.8.	Dimensionering	49
9.9.	Material	50
9.10.	Traction Compaction Tool (TCT)	50
9.11.	Bedömning av CMC-metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.....	50
9.12.	Referensprojekt.....	51
10	Continuous flight auger (CFA).....	52
10.1.	Allmänt	52
10.2.	Standard.....	52
10.3.	Lämpliga jordar.....	53
10.4.	Utrustning.....	53
10.5.	Material	54
10.6.	Svenska erfarenheter	54
10.7.	Bedömning av metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.....	55
10.8.	Jordförstärkning med oarmerade betongelement utförda med CFA-teknik.....	55
10.8.1.	Milano-Bologna	55
10.8.2.	Glenfield junction, Sydney	56
11	Full-displacement piles (även eng. screw piles eller am. eng. drilled displacement piles)	57
11.1.	Roterande teknik	59
11.2.	Lämpliga jordar.....	59
11.3.	Atlaspålen	59
11.4.	De Waalpålen.....	61
11.5.	Fundexpålen.....	61

11.6. Olivierpålen	62
11.7. Omegapålen.....	63
11.8. Viberande teknik	63
11.9. Produktionsparametrar	64
11.10. Dimensionering	64
11.11. Metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.....	65
12 Slutsatser och rekommendationer.....	66
12.1. Kalkcementpelare.....	66
12.2. Djupstabilisering, våta metoden.....	67
12.3. Stenpelare	67
12.4. CMC-pelare	68
12.5. CFA-pålelement	68
12.6. Full displacement piles	68
13 Referenser.....	69

1 Sammanfattning

De nya stambanorna som projekteras mellan Stockholm, Göteborg och Malmö dimensioneras för största tillåten tåghastighet sth 250 km/h respektive 320 km/h. Till skillnad från i stort sett hela det befintliga järnvägsnätet i Sverige projekteras banan i projekten med sth 320 km/h i huvudsak med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong, istället för slipers med ballasterad överbyggnad.

Möjligheterna till framtida spårjustering med ballastfri överbyggnad är begränsade och därför krävs en i princip sättningsfri konstruktion. Där järnväg för höghastighetståg med sth 320 km/h passerar genom områden med otillräcklig bärighet eller sättningskänslig jord krävs djupgrundläggning med pålar eller förstärkning av undergrunden.

De i Sverige vedertagna jordförstärkningsmetoderna kalkcementpelare och vertikaldränering är inte direkt tillämpbara eftersom viss krypsättning är svår att helt eliminera. Trafikverket önskar därför öka kunskapsnivån om alternativa grundläggningsmetoder som möjligen kan klara de hårda sättningskrav som en järnväg för höghastighetståg för 320 km/h ställer.

Föreliggande rapport redogör översiktligt för flera metoder och rekommenderar fördjupad analys och utredning av Wet Deep Mixing, dvs djupstabilisering med den våta metoden. Detta motiveras av följande skäl:

- Erfarenheterna av djupstabilisering för järnvägsbankar i Sverige är generellt mycket goda.
- Principerna för dimensionering, utförande och kontroll av kc-pelare är i vissa delar även tillämpliga på den våta metoden.
- Våta metoden medger utförande av djupstabiliseringspelare med högre kompressionsmodul, samt sannolikt lägre variationskoefficient, i jordar som inte är lämpade för den torra metoden.
- Djupstabilisering är en effektiv metod för att reducera effekten av skadliga skjuvvågor (höghastighetsfenomenet).
- Den våta metoden har använts i Japan i samband med utbyggnad av det japanska höghastighetståget Shinkansen.

De japanska referenserna är inte lättillgängliga eftersom språket ofta begränsas till japanska. Författarna till rapporten har fått ta del av vissa referenser från en japansk specialistentreprenör. Det vore värdefullt att undersöka och få ta del av fler japanska referenser eftersom Japan besitter de kanske största samlade erfarenheterna av djupstabilisering med den våta metoden. De har även betydande erfarenhet av höghastighetsbanor.

Om något större krypsättningar kan tillåtas kan fler av de häri analyserade metoderna vara intressanta. tex kalkcementpelare med hög hållfasthet eller stenpelare.

Fullskaleförsök rekommenderas under alla omständigheter för att verifiera funktion innan någon metod föreskrivs i handlingar.

2 Bakgrund och syfte

För att öka kapaciteten på de belastade järnvägssträckorna mellan storstadsregionerna har Trafikverket fått i uppdrag att projektera och bygga nya stambanor mellan Stockholm, Göteborg och Malmö vilka får en ungefärlig längd på totalt 730 km. Programmet Nya stambanor omfattar ett antal program där Ostlänken (Järna-Linköping), Göteborg–Borås och Hässleholm–Lund utgör de första startade deletapperna. I denna rapport definieras banor med största tillåten hastighet om högre än 250 km/h som järnväg för höghastighetståg, nedan kallat HHJV. De nya stambanorna dimensioneras för hastigheter på upp till 250 km/h respektive 320 km/h varav den högre hastigheten tillämpas främst på delar söder om Jönköping vilket är fallet för Hässleholm–Lund.

För program som projekterar med största tillåten hastighet sth 320 km/h planeras utförandet vara med så kallad ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong. Maximal tillåten sättning efter färdigställd anläggning begränsas till ca 20 – 40 mm. Detta ställer krav på en i stort sett sättningfri undergrund och bankuppfyllnad. Därav är det av intresse att utvärdera alternativa grundläggningsmetoder som möjligen erbjuder rimlig totalkostnad och samtidigt klarar de hårda sättningsskraven.

För de program (Ostlänken och Göteborg-Borås) som projekteras för en sth om 250 km/h utformas anläggningen med mer traditionell ballasterad spårteknik där gällande TDOK kan tillämpas med vissa skärpta och tillagda krav. Detta mera konventionella sätt att anlägga järnvägen tillåter även större sättningstoleranser. Denna förutsättning har inte beaktats vid skrivandet av denna rapport då det vid tidpunkten för uppdragets start endast diskuterades en högre hastighet om 320 km/h. Rapporten fokuserar därför endast på metoder som kan anses lösa de strängare sättningsskraven som den högre tåghastigheten medför. Följande metoder tas upp i föreliggande rapport:

- Kalkcementpelare
- Djupstabilisering, våta metoden
- Stenpelare
- CMC-pelare
- CFA-pålelement
- Full displacement piles

Tabell 1 redovisar översiktligt tidigare erfarenheter, utmärkande egenskaper och egenskaper för de utvärderade metoderna.

Utvärderad parameter	Referenser		Utmärkande egenskaper					Deformationsegenskaper
	Har nyttjats för ballastfri överbyggnad	Finns svenska erfarenheter	Installationsprocess	Kräver förborring vid sten/block	Överlast erfordras	Möjligt att utföra överlappande pelare	Dränerande funktion	Kompressionsmodul i pelare
Metod	ja/nej	ja/nej	Deplacering ja/nej	ja/nej	ja/nej/ osäkert	ja/nej	ja/nej	MPa
Kalkcementpelare	nej	ja	ja	ja	ja	ja	måttlig	<40
Wet Deep Mixing	ja	nej	ja	ja	osäkert	ja	nej	200 – 3 000
Stenpelare	ja, (160 km/h)	ja	ja	ja	ja	nej	ja	60 – 120
CMC-pelare	osäkert	nej	ja	ja	nej	nej	nej	10 000 – 20 000
CFA-element	osäkert	ja (som påle)	nej	ja	nej	ja	nej	20 000 – 30 000
Full Displacement Piles	osäkert	osäkert	ja	ja	nej	nej	nej	20 000 – 30 000

Tabell 1. Tidigare erfarenheter, utmärkande egenskaper och deformationsegenskaper för utvärderade metoder

3 Avgränsningar

Rapporten redogör översiktligt för upptagna metoder, dvs metodbeskrivning, materialegenskaper, kontroller under utförande och kontroller efter utförande. Principerna för dimensionering redovisas i förekommande fall övergripande. För fördjupad förståelse hänvisas till facklitteratur.

4 Jordförstärkning, allmänt

Djupgrundläggning innebär att all väsentlig spänningsökning till följd av påförda laster från ovanliggande konstruktion förs ner till fasta jordlager eller berg via pålar. Jorden mellan pålarna förblir obelastad och nyttjas endast för sidomotstånd. Pålarna är strukturellt anslutna till ovanliggande konstruktion via pålplattor, pålsulor eller påldäck.

Med jordförstärkning avses förbättring av en naturlig jords hållfasthets- och deformationsegenskaper så att den förstärkta jorden kan belastas utan risk för bärighetsbrott eller uppkomst av skadliga deformationer. Jordförstärkning innebär att spänningsökning till följd av påförda laster helt förs över till den förstärkta jordvolymen eller fördelas mellan oförstärkt och förstärkt jord. I allmänhet sker lastöverföring från påförda laster till förstärkt jord via lastfördelande lager. Jordförstärkning är ett vitt begrepp som omfattar ett stort antal tekniker. Dessa förbättrar egenskaperna hos den naturliga jorden genom en eller flera av följande processer:

- Packning
- Konsolidering
- Förstyvning (eng. stiffening)

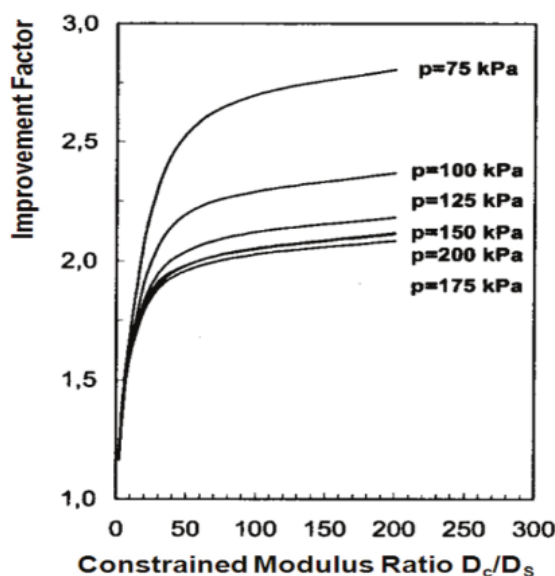
Packning av friktionsjord kan åstadkommas genom tex fallviktspackning, djuppackning eller ytpackning. Packning utförs normalt i friktionsjord där halten av silt och lera (fraktionsstorlek < 0,06 mm) inte uppgår till mer än ca 10 %. Gemensamt för packningsmetoderna är att all spänningsökning till följd av påförda laster förs över till den förstärkta jordvolymen. Packningsresultatet kontrolleras vanligen med CPT-sondering som utförs före och efter packning. Där packningsmetoder är lämpliga är de ofta kostnadseffektiva och konkurrenskraftiga jämfört alternativa jordförstärkningsmetoder.

Metoder som syftar till att öka konsolideringshastigheten används i finkorniga jordar med låg permeabilitet. Den traditionella metoden i Sverige är prefabricerade vertikaldräner i kombination med överlast. Metoden är kostnadseffektiv men förutsätter att den övergripande tidplanen medger erforderlig tid för reduktion av de porövertryck som uppkommer i samband med förbelastningen. All spänningsökning till följd av påförda laster tas upp av den förstärkta jorden. De totala sättningarnas storlek reduceras inte men en ökning av hållfastheten över tid kan tillgodoräknas. Med tillämpning av överlast kan del av de totala sättningarna tas ut under byggtiden. Sättningsutvecklingen instrumenteras lämpligen med kontroll av såväl sättningarnas storlek som reduktion av porövertryck. Ökad konsolideringshastighet kan också åstadkommas med tex sanddräner som är en vanligt förekommande metod i Japan för konsolidering av finkornig jord. Sandräner och sandpelare (sand compaction piles) används också för att minska risken för jordförvätskning (eng. liquefaction mitigation).

Den sistnämnda gruppen av jordförstärkningsmetoder baseras på installation av relativt styva lastbärande element eller pelare av betong, cementerande bruk eller krossmaterial. Internationellt används ofta termen *stiffening methods* om denna typ av jordförstärkningsmetoder. Dessa klassificeras beroende på ingående material i två huvudgrupper:

- Pelare tillverkade av krossprodukter (stenpelare, aggregate piers, dynamic replacement)
- Pelare tillverkade med cementerande bindemedel (wet deep mixing, jet grouting, grouted stone columns, vibro concrete columns, CMC, rigid inclusions)

Spänningsökningen till följd av påförda laster från ovanliggande konstruktion förs över till såväl pelare/element som omkringliggande oförstärkt jord. Fördelning av last mellan pelare och omkringliggande jord påverkas av pelarnas kompressionsmodul, den naturliga jordens deformationsegenskaper samt täckningsgraden. Lastkoncentrationen till pelarna varierar kraftigt beroende på metod och kan vara 40 – 95 %. Samverkan mellan pelare och omkringliggande jord minskar med ökad kompressionsmodul. Möjligheten att effektivt reducera sättningar med styva pelare avtar med stigande kvot mellan pelarnas- och omkringliggande jords styvhet (eng. *stiffness ratio*). Kirsh (2004) visade att för en given lösning reduceras sättningarna effektivt för *stiffness ratio* < ca 50. Att tillverka ännu styvare pelare och därmed öka kvoten mellan pelarens och den naturliga jordens deformationsmodul bidrar endast måttligt till ytterligare reduktion av sättningarna (se figur 1.)



Figur 1. Sättningsreduktion som funktion av stiffness ratio (från K. Kirsh, 2004)

Mekanismerna för hur pelarna samverkar med omkringliggande jord varierar beroende på metod. Vissa samverkar relativt begränsat med omkringliggande jord medan andra tex. stenpelare förbättrar jordens egenskaper genom flera mekanismer:

- Stenpelarens kompressionsmodul är högre än omkringliggande jords vilket medför en lastkoncentration till pelarna och minskning av de totala sättningarna.
- När stenpelare utförs i en friktionsjord sker packning av mellanliggande jord vilket bidrar till minskande totala sättningar.
- Pelarna har stor dränerande kapacitet och bidrar till ökad konsolideringshastighet när de utförs i en finkornig jord.

Pelare som tillverkas med hög mängd cementerande bindemedel har ofta hög kompressionsmodul och begränsad samverkan med omkringliggande jord. En följd av detta är att någon faktisk konsolidering mellan pelarna knappast sker.

Den snabba utvecklingen och kontinuerliga innovationen inom jordförstärkning gör att tillämpliga standarder inte alltid finns att tillgå. Det är därför viktigt att såväl geoprojektör som jordförstärkningsentreprenör har egen erfarenhet av de metoder som föreslås. Ett

liknande förhållande förelåg i Sverige avseende kalkcementpelare. Metoden och principerna för dimensionering utvecklades och förfinades under många år för att idag utföras enligt vedertagna principer.

Jordförstärkning används rutinmässigt för reduktion av sättningar, ökad bärförmåga, minskad risk för jordförvätskning, tätning eller reparationer. Några av metoderna som förekommer i olika delar av världen redovisas i tabell 2, men listan skulle sannolikt kunna göras längre.

Category	Method	Principle
A. Ground improvement without admixtures in non-cohesive soils or fill materials	A1. Dynamic compaction	Densification of granular soil by dropping a heavy weight from air onto ground.
	A2. Vibrocompaction	Densification of granular soil using a vibratory probe inserted into ground.
	A3. Explosive compaction	Shock waves and vibrations are generated by blasting to cause granular soil ground to settle through liquefaction or compaction.
	A4. Electric pulse compaction	Densification of granular soil using the shock waves and energy generated by electric pulse under ultra-high voltage.
	A5. Surface compaction (including rapid impact compaction).	Compaction of fill or ground at the surface or shallow depth using a variety of compaction machines.
B. Ground improvement without admixtures in cohesive soils	B1. Replacement/displacement (including load reduction using lightweight materials)	Remove bad soil by excavation or displacement and replace it by good soil or rocks. Some lightweight materials may be used as backfill to reduce the load or earth pressure.
	B2. Preloading using fill (including the use of vertical drains)	Fill is applied and removed to pre-consolidate compressible soil so that its compressibility will be much reduced when future loads are applied.
	B3. Preloading using vacuum (including combined fill and vacuum)	Vacuum pressure of up to 90 kPa is used to pre-consolidate compressible soil so that its compressibility will be much reduced when future loads are applied.
	B4. Dynamic consolidation with enhanced drainage (including the use of vacuum)	Similar to dynamic compaction except vertical or horizontal drains (or together with vacuum) are used to dissipate pore pressures generated in soil during compaction.
	B5. Electro-osmosis or electro-kinetic consolidation	DC current causes water in soil or solutions to flow from anodes to cathodes which are installed in soil.
	B6. Thermal stabilisation using heating or freezing	Change the physical or mechanical properties of soil permanently or temporarily by heating or freezing the soil.
	B7. Hydro-blasting compaction	Collapsible soil (loess) is compacted by a combined wetting and deep explosion action along a borehole.
C. Ground improvement with admixtures or inclusions	C1. Vibro replacement or stone columns	Hole jetted into soft, fine-grained soil and back filled with densely compacted gravel or sand to form columns.
	C2. Dynamic replacement	Aggregates are driven into soil by high energy dynamic impact to form columns. The backfill can be either sand, gravel, stones or demolition debris.
	C3. Sand compaction piles	Sand is fed into ground through a casing pipe and compacted by either vibration, dynamic impact, or static excitation to form columns.
	C4. Geotextile confined columns	Sand is fed into a closed bottom geotextile lined cylindrical hole to form a column.
	C5. Rigid inclusions	Use of piles, rigid or semi-rigid bodies or columns which are either premade or formed <i>in-situ</i> to strengthen soft ground.
	C6. Geosynthetic reinforced column or pile supported embankment	Use of piles, rigid or semi-rigid columns/inclusions and geosynthetic girds to enhance the stability and reduce the settlement of embankments.
	C7. Microbial methods	Use of microbial materials to modify soil to increase its strength or reduce its permeability.
	C8 Other methods	Unconventional methods, such as formation of sand piles using blasting and the use of bamboo, timber and other natural products.
D. Ground improvement with grouting type admixtures	D1. Particulate grouting	Grout granular soil or cavities or fissures in soil or rock by injecting cement or other particulate grouts to either increase the strength or reduce the permeability of soil or ground.
	D2. Chemical grouting	Solutions of two or more chemicals react in soil pores to form a gel or a solid precipitate to either increase the strength or reduce the permeability of soil or ground.
	D3. Mixing methods (including premixing or deep mixing)	Treat the weak soil by mixing it with cement, lime, or other binders <i>in-situ</i> using a mixing machine or before placement
	D4. Jet grouting	High speed jets at depth erode the soil and inject grout to form columns or panels
	D5. Compaction grouting	Very stiff, mortar-like grout is injected into discrete soil zones and remains in a homogenous mass so as to densify loose soil or lift settled ground.
	D6. Compensation grouting	Medium to high viscosity particulate suspensions is injected into the ground between a subsurface excavation and a structure in order to negate or reduce settlement of the structure due to ongoing excavation.
E. Earth reinforcement	E1. Geosynthetics or mechanically stabilised earth (MSE)	Use of the tensile strength of various steel or geosynthetic materials to enhance the shear strength of soil and stability of roads, foundations, embankments, slopes, or retaining walls.
	E2. Ground anchors or soil nails	Use of the tensile strength of embedded nails or anchors to enhance the stability of slopes or retaining walls.
	E3. Biological methods using vegetation	Use of the roots of vegetation for stability of slopes.

Tabell 2. Jordförstärkningsmetoder (från Chu et al, 2009)

5 Svenska erfarenheter

- Kalkcementpelare är en förstyvande metod och den mest använda jordförstärkningsmetoden i Skandinavien. Metoden är upptagen i TK Geo 13.
- Vertikaldränering är en metod som bygger på principen konsolidering. Metoden är upptagen i TK Geo 13. Metoden användes mer förr, men användandet har minskat på grund av ökad användning av kalkcementpelare.
- Jetinjektering är en eroderande jordförstärkningsmetod där in-situ tillverkade pelare skapas genom blandning och delvis ersättning av naturlig jord med en cementsuspension. Metoden är inte upptagen i TK Geo 13. Den anses inte lämplig för användning som grundförstärkningsmetod i större skala. Skälen är främst kostnad och svårigheten att hantera stora mängder returslam.
- Stenpelarmetoden har bl a nyttjats för grundläggning av tankar (Kemira i Helsingborg), en järnvägsbank i Frövifors samt för en vägbank inom väg 73 mellan Stockholm och Nynäshamn. Metoden är inte upptagen i TK Geo 13. Det har även utförts geotextilomslutna stenpelare nära Örnsköldsvik.
- Omega-pålar är en typ av massundanträngande påle som utförs genom borrhning. Metoden har använts åtminstone en gång (Mellansel). Metoden är inte upptagen i TK Geo 13.
- CFA-pålar är en typ av icke-massundanträngande påle som utförs med en kontinuerlig augerskruv. Ett fåtal projekt med CFA-pålar har utförts i Sverige, främst i Skåne.

6 Kalkcementpelare

6.1. Allmänt

Kalkcementpelare (KC-pelare) är den vanligast förekommande jordförstärkningsmetoden i Norden. Metoden utvecklades i slutet av 60-talet av Kjell Paus och Bengt Broms. Samtidigt med den svenska utvecklingen utvecklades samma metod med inblandning av torrt bindemedel i lera i Japan. Utvecklingen i Sverige och Japan skedde oberoende av varandra och metodens användningsområde och produktens tekniska egenskaper skiljer sig från varandra.

I Sverige och Norden utförs KC-pelare med relativt små pelardiametrar, vanligen 0,6 – 0,8 m. Dimensionerande tryckhållfasthet begränsas till 200 – 300 kPa vilket påverkar erforderlig mängd pelare i förhållande till oförstärkt omkringliggande jord. I Japan drevs utvecklingen mot pelare med större pelardiameter. Man använder fasta blandarstationer och blåser ut materialet till installationspunkten.

Den skandinaviska utvecklingen baserades på att inblandning utfördes med osläckt kalk där pelarna betraktades som en förstärkt vertikaldrän medan i Japan betraktades stabiliseringen som ett konstruktionselement. De olika synsätten har präglat den torra metodens utveckling där det skandinaviska synsättet är att KC-pelarna är en jordförstärkning som samverkar fullt ut med omgivande lera/ jord. Synsättet har gjort att KC-pelarnas skjuvhållfasthet begränsats < 150 kPa vid dimensionering (oftast är begränsningen satt till 100 kPa).

Sedan början av 2000-talet har den skandinaviska maskinparken utvecklats betydligt både genom kraftigare maskiner och att möjliggöra installation av pelare upp till ca 25 m djup. Utvecklingen har inneburit bättre och säkrare inblandningsarbete, vilket renderat i att

uppmätt skjuvhållfasthet (genom kontrollsonderingar) ofta varit betydligt högre än dimensionerande skjuvhållfasthet på 100 å 150 kPa.

Omfattande forsknings och utvecklingsarbete av metoden har skett under de senaste 10 till 15 åren, dels genom Svensk Djupstabilisering (SD) och i projekt såsom Norge-Vänernbanan. Forskning internationellt på jordförstärkning med inblandning av torrt bindemedel har, förutom Japan som är den mest aktiva nationen, haft en expansiv utveckling med omfattande forskningsrapporter från USA, Europa, Asien och Australien.

Forskning och utvecklingen i Sverige avseende KC-pelares egenskaper har främst fokuserat på inblandningsarbete, provtagningsmetoder, dynamiska egenskaper i förstärkt jord, brottmekanismer och bindemedel (olika typer av bindemedel och dess egenskaper). Design och beräkningsnormer har även utvecklats med bland annat införande av lastspridning vid flytande pelare och beräkningsmetodik för dimensionering av tillåten vertikalspänning i pelarna.

I princip all forskning i Sverige och Norden har fokuserats på KC-pelare som klassificeras som mjuka till medelhårda, vilket innefattar förstärkt jord med odränerad skjuvhållfasthet upp till 150 kPa.

För att KC-pelare ska vara applicerbara i konstruktioner med stränga sättningskrav krävs att jorden kan förstärkas så pass mycket att den odränerade skjuvhållfastheten överstiger 250 å 300 kPa, och således en tryckhållfasthet $q_u > 0,5$ MPa.

Referenser till att förstärkningen uppnår dessa hållfasthetsegenskaper finns i stor omfattning både i nordiska projekt och internationellt. Flertalet forskningsprojekt med inblandningsförsök visar på mycket höga hållfastheter i inblandningsförsök. Likaså visar många utförda projekt att hållfastheten, vid utförda kontrollsonderingar, är mycket hög ($c_{uk} > 300$ kPa) i utförda pelare. Internationella erfarenheter och forskning visar också på mycket höga uppmätta hållfastheter i installerade KC-pelare.

De nordiska (Sverige, Norge och Finland) ländernas regelverk och dimensioneringsanvisningar är anpassade till mjuka och medelhårda KC-pelare. Detta innebär att projektering/dimensionering av konstruktioner där kravet på odränerad skjuvhållfasthet är högre än 150 kPa är sällsynta. Det finns projekt t ex. grundläggning av byggnader där KC-pelarna är dimensionerade med skjuvhållfasthet > 150 kPa.

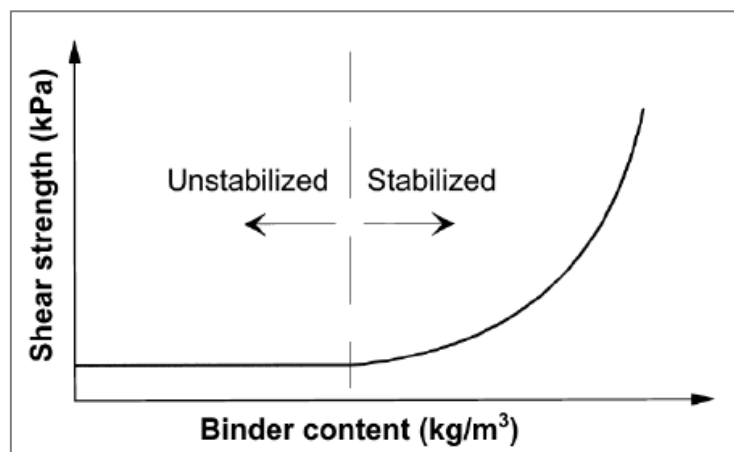
Regelverk för utförande av Djupstabilisering med bindemedel är SS-EN 14679:2005. Trafikverket har därtill egna tekniska krav för geokonstruktioner – TK Geo 13, där dimensioneringen av KC-pelare, klassificerade som mjuka pelare beskrivs.

Regelverk SS-EN 14679:2005 ger utrymme för att kunna tillämpa högre hållfasthet i förstärkt jord jämfört med Trafikverkets tekniska krav, TK Geo 13.

6.2. Geotekniska förutsättningar

Stabiliserad jords hållfasthet är främst kopplad till jordens naturliga vattenkvot, jordart, bindemedelsmängd och inblandningsarbete. Forskningsarbete på torra metoden visar entydigt att en avgörande faktor för stabiliseringseffekten är förhållandet bindemedel/naturlig vattenkvot ($v_{ct} = v_{tencementtal}$) samt även vilken typ av jordart som stabiliseringen är utförd i. För svenska förhållanden har ett stort antal studier utförts där de mest tongivande studierna publicerats i SGI:s rapport nr. 48 "Cement och kalk för djupstabilisering av jord", samt Helen Åhnbergs doktorsavhandling "Strength of stabilized soil". Båda dessa rapporter tillsammans med samlade erfarenheter från andra studier

världen över, främst Japan, visar att tryckhållfastheten ökar exponentiellt med minskat vct-tal, se figur 2.



Figur 2. Generellt förhållande mellan mängd bindemedel och skjuvhållfasthet i stabiliserad jord (från Janz och Johansson 2002)

Projekt och forskning i Svenska förhållanden där stabilisering utförts i främst mellan till högplastiska leror ($w_L = 30$ till ca 65 %) har man i vissa fall uppmätt höga skjuvhållfastheter i den stabiliserade jorden se t.ex. [1] s.73, där siltig lera, lerig silt och högsensitiv lera samt i viss mån även leror visar uppmätta skjuvhållfastheter $c_{uk} > 400$ kPa vid vct-tal mindre än 6. Inblandningsförsök som utförts med vct-tal mellan 3 till 6 (motsvarar 120 till 160 kg/m³ i en siltig lera med $w_N \approx 60$ %) visar skjuvhållfastheter mellan 400 - 500 kPa.

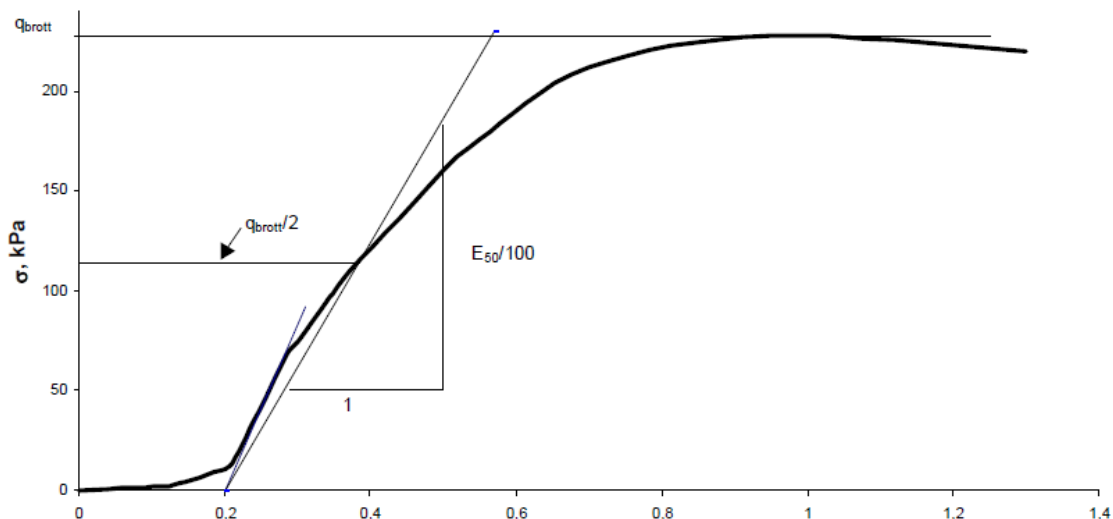
Kontrollsonderingar i produktionspelare som utförts i sådana jordar antyder god samstämmighet med motsvarande laboratorieförsök.

Däremot har hållfasthetsutvecklingen i mycket högplastiska leror, jordar med organiskt innehåll > 6 % och leror med hög sulfidhalt visat på sämre hållfasthetstillväxt även vid låga vct-tal.

Utifrån både forskningsstudier och erfarenheter från projekt i skandinaviska förhållanden bedöms förutsättningar finnas för att kunna stabilisera mellan- till högplastiska leror med torrt bindemedel (KC-pelare och masstabilisering) till att uppnå krav på tryckhållfasthet $q_u > 0,5$ MPa, vilket skulle ge en odränerad skjuvhållfasthet $c_{uk} > 250$ kPa.

6.3. Deformationsegenskaper

Deformationsegenskaper beror av spänningsnivån i pelaren. För att uppfylla hårt ställda sättningskrav krävs att pelarnas vertikalspänningar ej överskrider 50% av dess brottspänning. Vid max 50% av brottspänningen utvärderas deformationsmodulen $E_{pel} = E_{50}$, se figur 3.



Figur 3. Utvärdering av deformationsmodul E_{50} vid 50% av brottspänningen i en KC-pelare (från SD-Rapport 17, Larsson 2006)

Studier på inblandningsförsök och upptagna prover i fält visar på deformationsmoduler om $E_{50} = 75 - 200 \cdot q_u$ i stabiliserad jord. Förhållandet mellan E_{50} och q_u varierar med jordart och hållfasthet. Deformationsmodul $E_{50} \approx 35 - 100$ MPa utifrån ovanstående resultat. Liknande moduler har uppmätts i KC-pelare av bland annat Baker i sina studier.

För att möta hårda sättningkrav bör en förstärkning dimensioneras så att vertikalspänningen på pelarna inte överstiger 50 % av dess brottspänning i skedet för förbelastning. Förbelastningen bör vara i storleksordningen 1,2 till 1,3 ggr. Permanent last. En förbelastning har även ett viktigt syfte att ta ut sättningar vid underkant pelare. Med dagens inblandningsteknik fås en försvagning vid underkant pelare till följd av osäkerheten att injektera bindemedel.

Provtagning på KC-pelare i Sverige som härdat i ca 10 år visade att $E_{50} = 200 - 230 \cdot q_u$. Samtidigt var den uppmätta skjuvhållfastheten vid kontrollsondering med KPS-vinge ca 2 gånger högre än de resultat som redovisades 28 dygn efter installation. Liknande studier i Japan på pelare äldre än 10 år visar på en hållfasthetstillväxt med tiden på 2 å 3 gånger den uppmätta efter 28 dygn.

6.4. Produktion

Installationsförfarandet för KC-pelare är allmänt känt och beskrivs ej närmare i denna rapport. Vissa installationsparametrar är dock viktiga att belysa, likaså är dagens produktionshastighet viktig att diskutera.

I dag sker installationsförfarandet med hög rotationshastighet 150 – 200 varv/min och en stigningshastighet av 15 – 35 mm/varv. Med nämnda rotationshastighet och stigningshastighet kan en entreprenör installera 2,5 – 6m KC-pelare/ minut. Till detta kommer sedan tid för ansättning av ny pelare och tankning, raster etc. Produktionskapacitet av 1 400 – 1 800 m/skift kan idag uppnås under gynnsamma förhållanden. Vid installation av pelare med hög hållfasthet kommer produktionskapaciteten att reduceras på grund av ökad bindemedelsmängd, och ökad mängd inblandningsarbete. Beroende på syftet med jordförstärkningen kan nuvarande krav på installationen (rakhet, ansättningsnoggrannhet

(tolerans i plan), homogenitet) komma att kräva anpassning. Bedömningen är att nuvarande krav på utförande och kontroller måste ses över om KC-pelare med väsentligt högre hållfasthets- och deformationsegenskaper skall tillåtas.

6.5. Krav på installation

Kravställande på entreprenörens installationsförfarande bedöms vara en viktig del för att säkerställa att efterfrågad kvalitet kan uppnås. För att om möjligt förbättra homogeniteten hos pelarna och minska risken för krypsättningar kan en översyn av följande vara intressant:

- Stigningshastighet och utformning av inblandningsverktyg. Högre blandningsarbete är en viktig parameter för att öka homogeniteten i pelarna.
- Inblandning i underkant pelare. I dag står man stilla några sekunder och bara roterar blandningsverktyget med utmatning av bindemedel och därmed har man lagt ut material i pelarfoten. Med stränga sättningskrav innebär dagens metodik att en uppluckring av jorden vid pelarfot sker samtidigt som ett säkerställande av att bindemedel verkligen pressar ner (utblåsningshålet sitter ca 40 cm över inblandningsverktygets botten, se figur 4), ej går att säkerställa.
- Pelartoppen är en kritisk del av en KC-pelare avseende kvalitet och bärighet.



Figur 4. exempel på verktyg (pinnborr och vingborr)

6.6. Kontroll och uppföljning

Den vedertagna metoden för kontroll av pelarhållfasthet är den så kallade kalkpelarsonden. Metoden finns beskriven bl a i SGF rapport 2:2000.

6.7. Risker osäkerhetsfaktorer

- Underkant pelare
- Krypdeformationer
- Homogenitet
- Pelartopp
- Kompressionsegenskaper

6.8. Bedömning av metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong

Kalkcementpelare bedöms vara en lämplig metod som med nyttjande av förbelastning möjligen kan uppfylla de hårda sättningskraven för HHJV med ballastfri överbyggnad med

spårplatta i betong. För att klara detta kan det vara nödvändigt att förbättra kontroll av installationsprocessen och ställa hårdare krav på utförandet. Kontroll och uppföljning som sondering i pelarna och provtagning behöver anpassas till de skjuvhållfastheter man eftersträvar i dimensioneringen. En möjlig sonderingsmetod är jb-totalsondering eller norsk totalsondering i stället för dagens KPS-vinge, även andra kontrollmetoder såsom kärnprovning och seismiska undersökningsmetoder kan vara aktuella att undersöka för närmare som alternativ.

7 Djupstabilisering (våta metoden, wet deep mixing)

7.1. Allmänt

Med wet deep mixing avses stabilisering genom mekanisk blandning av jord och en cementerande suspension med hjälp av roterande mekaniska inblandningsverktyg, se figur 5 och 6). Flera olika benämningar förekommer, tex *cement deep mixing*, *deep wet mixing*, *deep soil mixing*, *soil mixing*, *wet mixing* mm. Andra processspecifika namn som tex *cutter soil mixing* förekommer också där namnet har koppling till en särskild teknik. I föreliggande rapport används begreppet *våta metoden* för att särskilja den från den skandinaviska *torra metoden* (kc-pelare).

Stabilisering med våta metoden medför en förbättring av jordens hållfasthets- och deformationsegenskaper. Våta metoden används även för att solidifiera eller stabilisera förorenad jord. Principerna för den våta metoden lades fram redan på 1950-talet i USA men utvecklades därefter främst i Japan. Idag torde den våta metoden vara den mest använda djupstabiliseringsmetoden i världen. Maskiner och utrustning som är mer eller mindre anpassade för kohesions- och/eller friktionsjord förekommer. I allmänhet tillverkas enskilda element vars geometriska utformning ofta är cirkulära element, rektangulära paneler eller kontinuerliga lameller. Som för kc-metoden kan elementen utföras överlappande innan de härdar. Det är därför möjligt att tillverka kontinuerliga skärmar eller lameller av stabiliserad jord. Nedan listas några exempel på tekniker för utförande av den våta metoden:

- Med horisontellt roterande verktyg och enkel borrhållstång (eng. single shaft, single axis)
- Med horisontellt roterande verktyg och dubbla borrhållstänger (eng. twin-shaft, double axes)
- Med horisontellt roterande verktyg och multipla-stänger (upp till sex stänger samtidigt för on-shore och åtta för off-shore applikationer)
- Med vertikalt roterande verktyg (cutter soil mixing)
- Med kedjesågsliknande blad (FMI-metoden, TRD-metoden)



Figur 5. Enkel borrhång (T. Forsberg)

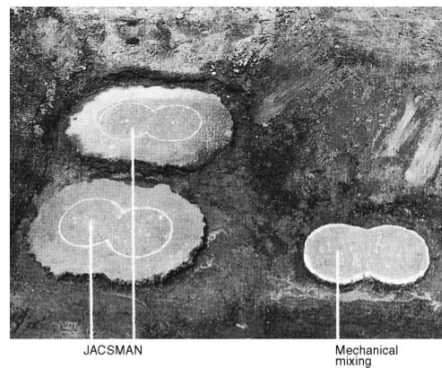


Figur 6. Dubbla borrhångar (från Keller PLC)

Hybridtekniker förekommer också där den mekaniska inblandningen kompletteras med utmatning av suspensionen under högt tryck. Syftet kan då vara att förbättra inblandningsarbetet och uppnå större homogenitet och/eller öka produktiviteten. Till skillnad från den konventionella våta metoden genom mekanisk inblandning medger hybridtekniker viss förstärkning av jorden ett stycke utanför inblandningsverktygets diameter (se figur 7 och 8). Med hybridteknik är det möjligt att tillverka pelare med förhållandevis större diameter än vad en viss maskin skulle mäka med genom enbart mekanisk inblandning.



Figur 7. Trevi Turbojet – mekanisk inblandning med högt utmatningstryck (från TREVIICOS, TREVI GROUP)



Figur 8. Jacsman (hybridteknik) och konventionell våt metod, State of the art in deep mixing (från A. Porhaba, Ground Improvement, p. 81-92, 1998)

7.2. Utförandestandard

Den våta metoden är upptagen som svensk standard: SS-EN 14679:2005 Execution of special geotechnical works – Deep Mixing.

Svensk praxis för dimensionering förekommer inte utan metoden skulle vara föremål för så kallad särskild utredning enligt Trafikverkets TK Geo 13.

7.3. Historik

Den våta metoden utvecklades främst i Japan på 1970-talet, före utvecklingen av den torra metoden i Japan och Skandinavien. Maskiner och utrustning för utförande på land och från flytetyg utvecklades tidigt och redan 1977 utfördes omfattande förstärkningsarbeten från pråm. Sedan dess har ett relativt stort antal olika tekniker utvecklats, främst i Japan. Entreprenörerna och forskningsinstitut i Japan organiserade sig i två branschorganisationer med syfte att utveckla och marknadsföra djupstabilisering:

- the Cement Deep Mixing Association (CDM) avseende våta metoden
- the Dry Jet Mixing association (DJM) avseende torra metoden

Imponerande arbeten har utförts från pråm till ca 70 m djup. På land används den våta metoden ofta för att minska risken för jordförvätskning (liquefaction mitigation), sättningsskontroll och stabilitetshöjande åtgärder. En typisk maskin för utförande av våta metoden består av dubbla individuellt motroterande borrhängar försedda med inblandningsverktyg med ca 1,0 m diameter. Sådana maskiner för applikationer på land kan tillverka pelare till åtminstone ca 33 m djup.

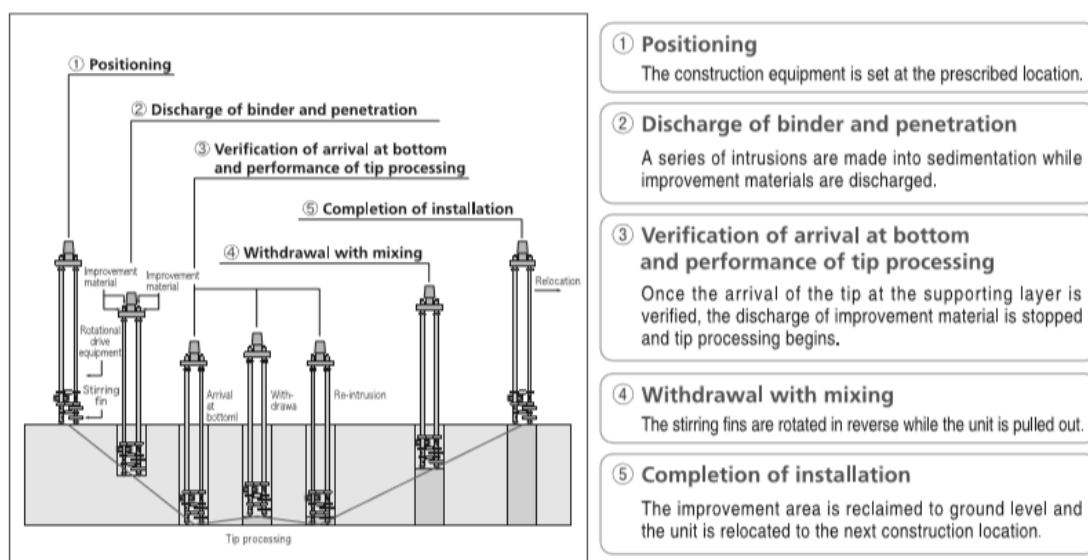
Den målmedvetna forskningen och utvecklingen av maskiner samt framtagandet av metoder för utförande och kontroll har bidragit till en kraftig ökning av våta metodens användande. I slutet av år 2001 hade ca 70 miljoner m³ jord stabiliserats i Japan (Terashi, 2003) fördelat på ca 1/3 CDM på land, 1/3 CDM från pråm och ca 1/3 DJM.

Utvecklingen av djupstabilisering i USA tog fart på 1980-talet och då främst via japanska entreprenörer. Sedan 2000-talet har användningen av den våta metoden i USA ökat markant. I västra USA används den ofta i samband med rehabilitering och förstärkning av befintliga dammar samt för att minska risken för jordförvätskning. I södra USA används metoden för grundläggning av bl a oljetankfarmar. Det förmodligen enskilt största projektet utanför Japan utfördes i New Orleans efter orkanen Katrina (East Back Levee Improvement, LPV 111). Den våta metoden användes då för förstärkning av drygt 8 km dammvallar runt staden.

7.4. Metodbeskrivning

Med våta metoden blandas cementsuspension och jord med hjälp av roterande mekaniska inblandningsverktyg. Dessa kan utgöras av ett eller flera vingpar av stål som är monterade på en eller flera borrhängar, och/eller partiella augerskruvar eller vertikalt roterande hjul, försedda med skär. När verktyget roterar och skär genom jorden skapas en kavitet som fylls med suspension. Efterföljande vingpar blandar suspensionen med jorden till ett homogent kompositmaterial, se figur 9. Precis som för torra metoden sker inblandningen av tillfört bindemedel mekaniskt vilket för med sig att pelardiametern normalt blir väl definierad. Suspensionen tillverkas i en blandare, vanligen en kolloidalblandare. Suspensionen pumpas från blandaren till en omrörare där den fortsätts blandas så att materialseparation inte sker.

Suspensionen pumpas därefter från omröraren till inblandningsverktyget. Volymen suspension som pumpas till inblandningsverktyget kontrolleras med flödesmätare placerad vid pumpen eller med hjälp av flödesmätare monterade på borrhjulet. Utmatning av suspension sker vanligen via ett eller flera munstycken som är placerade på inblandningsverktyget och/eller nära borrhjulets spets. Utmatning av suspensionen sker i huvudsak vid nedföring av verktyget till erforderligt djup. Utmatningstrycket är vanligen 5 – 10 bar, och flödet av suspension hålls konstant under hela nedföringsfasen. Volymen bindemedel per ytenhet kontrolleras istället genom att variera den vertikala hastigheten hos inblandningsverktyget. Ett visst flöde bibehålls även vid uppdragning av verktyget för att undvika igensättning av munstycken. Vid behov kan verktyget föras ner i samma pelarläge ytterligare en eller flera gånger för åstadkomma bättre inblandning.



Figur 9. Princip för utförande av våt metod (CI-CMC), (från FUDO Tetra Corporation)

7.5. Användningsområden

Likt torra metoden är den våta metoden mångsidig och nyttjas i flera olika tillämpningar, tex:

- kontroll av sättningar
- ökad stabilitet
- stödkonstruktioner
- grundläggning
- tätskärmar
- reaktiva barriärer
- förhindra jordförvätskning

7.6. Material

Det vanligaste bindemedlet är cement men kalk, masugnsslagg, gips, aska och andra restprodukter från industrin förekommer också.

Cementen levereras i bulk till cementsilos på arbetsplatsen. I allmänhet krävs en eller flera leveranser cement per dag och det är därför viktigt att logistiken fungerar smidigt.

7.7. Lämpliga jordar

Den våta metoden är mer flexibel än den torra metoden. Eftersom bindemedlet tillsätts som suspension är det möjligt att blanda jordar som är svåra eller omöjliga att blanda med torrt bindemedel. Maskinerna har i allmänhet väsentligt högre vridmoment jämfört maskinerna som används för den torra metoden. Våt metod kan därför utföras i såväl lös som halvfast lera, silt och tom löst lagrad sand. Maskinerna har i allmänhet betydligt bättre förmåga att penetrera mellanliggande fasta lager jämfört kc-maskiner. Vid behov utförs förborrning.

7.8. Materialegenskaper

7.8.1. Hållfasthet

Hållfasthetstillväxten påverkas av jordens egenskaper, typ och mängd av bindemedel, inblandningsarbetet, verktygens utformning, temperatur m.m. Tabellen nedan redovisar typiska bindemedelsmängder och materialegenskaper för den våta metoden.

Jordtyp	Dosering α (kg/m ³ jord)	UCS, q_u 28-dygn (MPa)	Permeabilitet, k (m/s)
Torv, organisk silt/lera	150 - 350	0,2 - 1,2	5×10^{-9}
Lös lera	150 - 300	0,5 - 1,7	5×10^{-9}
Halvfast/fast lera	120 - 300	0,7 - 2,5	5×10^{-9}
Silt och siltig sand	120 - 300	1,0 - 3,0	1×10^{-8}
Halvfast lagrad finsand	120 - 300	1,5 - 5,0	5×10^{-8}
Grovsand och grus	120 - 250	3,0 - 7,0	1×10^{-7}

Tabell 3. In-situ hållfasthet och permeabilitet för varierande bindemedelsdosering och jordtyp (uppgifter avser jord stabiliserad med våt metod), (från M. Topolnicki, *Ground Improvement, Second edition 2004*)

7.8.2. Deformationsmodul

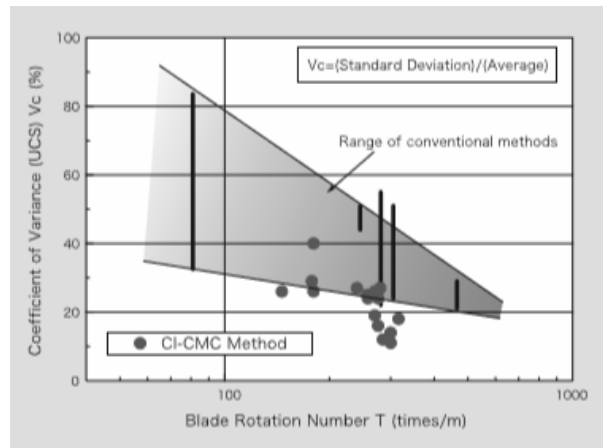
Sekantmodulen, E_{50} , kan uppskattas med nedanstående samband (efter M. Topolnicki *Ground Improvement, Second edition 2004*).

- $50 - 300 \times \text{UCS}$ för $\text{UCS} < 2,0 \text{ MPa}$
- $300 - 1\,000 \times \text{UCS}$ för $\text{UCS} > 2,0 \text{ MPa}$ (högre kvot för högre UCS)

7.8.3. Variationskoefficient

Variationskoefficienten hos kompositmaterialet beror på inblandningsarbetet och jordens- och suspensionens egenskaper. Måttet på inblandningsarbetet definieras med det sk blade rotation number (BRN), se vidare i rapporten eller TK Geo 13. BRN för inblandning i lera varierar normalt inom intervallet 300 – 500 och anpassas efter aktuella förhållanden. I

normala tillämpningar är variationskoefficienten 0,2 – 0,6. Figur 10 visar variatonskoefficient som funktion av BRN för CI-CMC-metoden (våt metod med sk ejector-discharge av bindemedel).



Figur 10. BRN vs variationskoefficient för CI-CMC (från FUDO Tetra Corporation)

7.8.4. Långtidsegenskaper

Långtidsegenskaperna hos den stabiliserade jorden har analyserats av bland annat Terashi (2002) genom att studera två parametrar;

- Hållfasthetstillväxt
- Nedbrytning

Terashi studerade jordar som stabiliserats med kalk respektive cementsuspension (torr- och våt metod), se tabell 4.

Metod	Jordtyp	Bindemedel	UCS och standardavvikelse, s_d		UCS kvot
			korttid	Långtid ¹	
Torra metoden	60% ler, 39% silt, 1% sand	Osläckt kalk 12,5% torrsvikt	64-dygn: medel 1,02 MPa, s_d 0,2 MPa	11 år: medel 3,5 MPa, s_d = 0,78 MPa	3,4
Torra metoden	Överst vulkanisk aska som överlagrar torv, lera, siltig finsand och silt.	Slaggcement typ B, 290 kg/m ³ de översta 3 m, 130 kg/m ³ de undre 5 m	28-dygn: 0,2-0,5 MPa vid djup 0-1 m, 0,2-0,5 MPa vid djup 4-6 m.	17 år: medel 1,5 MPa, s_d = 0,98 MPa	>3 1,5
Torra metoden	4,5 m torv, w = 300 – 500%, 5,5 m organisk lera, w = 150 – 200%	Cement 265 kg/m ³	28-dygn: medel 0,58 MPa	14 år: medel 3,5 MPa	6,0
Våt, ytstabilisering	30% lera, 70% silt	Cement med w/c 1,5, 5% av skrymdensitet- en	21-dygn: medel 74 kPa	15 år: medel 220 kPa, s_d = 139 kPa	3,0
Våt metod, djupstabilis- ering	Djup marin lera (offshore)	Cement	93-dygn: medel 6,1MPa, s_d = 2,0 MPa	20 år: medel 13,2 MPa, s_d = 5,19 MPa	2,2

Tabell 4. Långtidedegenskaper baserat på japansk fältdata (från M. Topolnicki *Ground Improvement, Second edition 2004. Data insamlat från Terashi (2002b), baserat på undersökningar av Terashi och Kitazume (1992), Yoshida et al. (1992), Haryashi et al. (2003), Inagaki et al. (2002), Ikegami et al. (2002).*

Nedbrytningen av pelare över tid studerades och kunde konstateras i pelarnas periferi. Omfattningen verkar bero på flera faktorer som typ av bindemedel, jorden som pelarna tillverkats i men framförallt pelarnas hållfasthet. Urlakning av kalcium kunde i vissa fall konstateras i en zon närmast pelarnas periferi. Observationer från labb och fält antyder att nedbrytningshastigheten är i stort sett linjär mot logaritmen för tiden. För närvarande antas vid dimensionering att hållfasthetstillväxten kompenserar för nedbrytningen, dvs ingen hänsyn till nedbrytning görs i dimensioneringen.

7.9. Produktionsmetoder

Som nämnts tidigare förekommer ett stort antal tekniker för utförande av den våta metoden. Vid val av metod är det viktigt att känna vad de olika teknikerna anpassats för och eventuella begränsningar.

7.9.1. Utrustning för tillverkning av cirkulära pelare

Den vanligaste typen av djupstabilisering med våt metod är tillverkning av cirkulära pelare. Dessa utförs med enkel eller multipla borrhävar försedda med roterande inblandningsverktyg. Borrhävarna är hydrauliska och marknadsförs av flera av de ledande

maskintillverkarna (Bauer-RTG, Soilmec, Liebherr, Casagrande, ABI m.fl), se exempel figur 11 och 12.



Figur 11. Borrigg våt metod, två borraxlar, 2 x \varnothing 1,6 m (T. Forsberg)



Figur 12. Borrigg våt metod, enkel axel, 1 x \varnothing 2,4 m (T. Forsberg)

I Europa är det vanligt med maskiner försedda med två eller tre borrstänger. I USA har man istället gått mot en borrstång och pelare med mycket stor diameter för att öka produktiviteten.

Nedmatningshastigheten är normalt 0,5 – 1,5 m/min. Pumpflödet anpassas efter erforderlig bindemedelsmängd. Tabell 5 visar typiska installationsparametrar för några utvalda metoder/företag.

Parameter	CDM standard*	Keller Europa/USA	Bauer
Antal stänger	2, 1 med äldre system	1	3
Diameter inblandningsverktyg (m)	1,0	0,5 – 2,4	3 x 0,37 3 x 0,55
Max nedborrningsdjup (m)	50	20: USA 12: Europa**	0,37: 10,5 0,55: 15,7
Nedborrnings/uppdraagningshastighet (m/min)	Ner: 0,5 – 1,0 Upp: 0,7 – 1,0	Ner: 0,3 – 0,5 Upp: 1,0	Ner: 0,2 – 1,0 Upp: 0,7 – 1,0
Rotationshastighet (ner/upp)	Ner: 20 Upp: 40	Ner: 20 – 25 Upp: högre	20-40
Utmatning av slurry (ner/upp)	Ner och/eller upp	Ner och upp: USA	Ner och upp
Vattencementtal (-)	0,6 – 1,3	1 – 1,5: USA 0,6 – 1,2:	0,6 – 2,5
Tvårsnittsyta inblandningsverktyg (m ²)	1,5 med 2 stänger	1,1-4,5: USA 0,5: Europa	0,44: 3 x 0,44 0,94: 3 x 0,55
Mängd tillsatt bindemedel (torrvikt) (kg/m ³)	70-300	150-275: USA 250-450:	80-500
Produktivitet per skift (en maskin), (m ³)	100-200	250-750: USA 75-120: Europa	30-300

Tabell 5. Installationsparametrar våta metoden (CDM Japan, Keller USA/Europa, Bauer), från M. Topolnicki Ground Improvement, Second edition 2004

*Cement Deep Mixing Association (CDM), se även stycke 6.3 ovan.

**Sedan tabellen presenterades 2004 har fortsatt utveckling av maskiner skett. Keller EU klarar 2019 åtminstone 20 m borrhjup.

Eftersom den våta metoden utförs med suspension är ett visst returflöde oundvikligt. Detta returflöde måste hanteras och tas om hand. Volymen returflöde påverkas av aktuell jord, vattenmättnadsgrad, inpumpad volym suspension.

7.9.2. FMI-metoden

FMI-metoden (Fräs-Misch-Injektionsverfahren, eng. cut-mix-injection) utvecklades i Tyskland i början på 1990-talet och användes första gången 1996. FMI-maskinen består av ett kedjesågsliknande blad med två roterande kedjor försedda med skär, se figur 13. Bladet, som kan vinklas upp till 80 grader från horisontalplanet, dras genom jorden i en kontinuerlig rörelse. Suspensionen tillförs jorden genom flera munstycken som sitter monterade på bladet. Den geometriska formen av den förstärkta jorden är längsgående lameller. Installationskapaciteten är hög, 70 - 100 m³ stabiliserad jord per timme. Med FMI-metoden är det möjligt att tillverka 1,0 m breda lameller till 6 m djup eller 0,5 m breda lameller till 12 m djup (uppgift Allcons Mashinenbau GmbH), se figur 14. Metoden används främst för förstärkning av jord längs med järnvägsbankar.



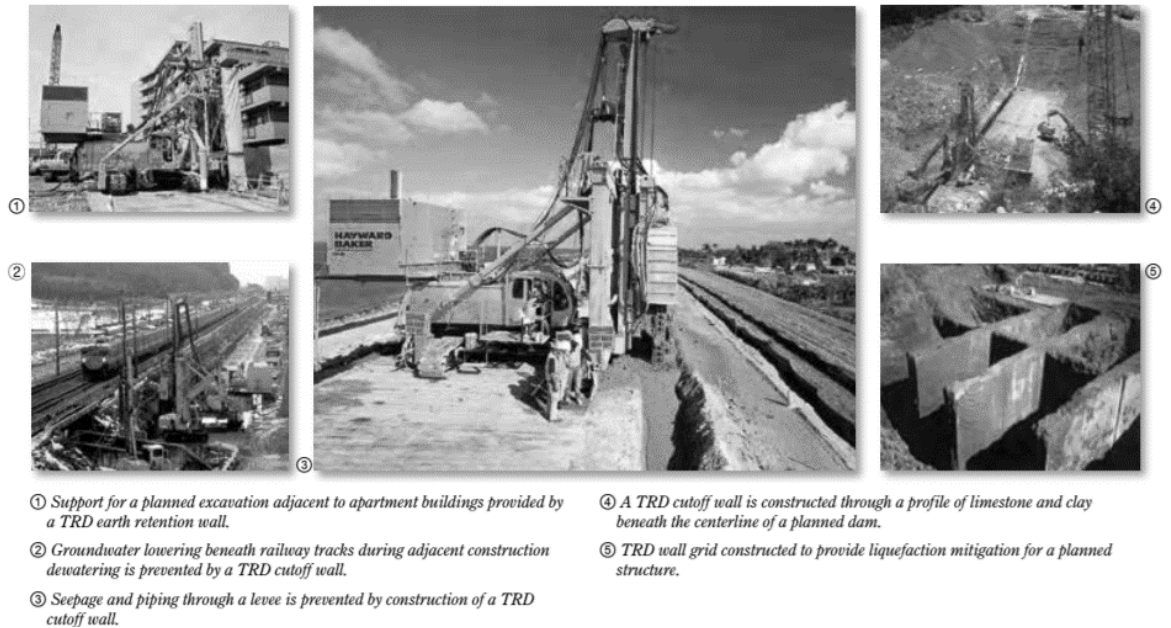
Figur 13. FMI-maskin (från Allcons Mashinenbau GmbH)



Figur 14. FMI-lamell (från Allcons Mashinenbau)

7.9.3. TRD-metoden

I Japan har en metod liknande FMI-metoden utvecklats vilken sedermera exporterats och använts i USA under namnet TRD-metoden. TRD står för trench cutting and remixing deep wall method och utförs enligt liknande princip som sin tyska motsvarighet FMI-metoden, se figur 15. TRD-metoden tillverkar lameller i en kontinuerlig process och kan utföras till åtminstone 50 m djup. Metoden kan enligt uppgift utföras i organiska jordar till fast sand. Visst inslag av grus och sten ska enligt uppgift inte heller utgöra hinder för metoden. Till skillnad från konventionell våt metod blandar TRD-metoden jorden i vertikalled. Metoden medger enligt uppgift tillverkning av mycket homogena lameller av förstärkt jord. Tekniken har bla använts för utförande av tätskärmar vid Herbeert Hoover Dike i Florida.



Figur 15. TRD-metoden (från Hayward Baker, USA)

7.10. Kontroller under utförande

7.10.1. Suspension

Följande egenskaper hos suspensionen kontrolleras dagligen:

- Densitet
- Viskositet
- Sättnmätt

7.10.2. Processparametrar

Moderna utrustningar medger noggrann styrning och kontroll av alla viktiga installationsparametrar. Följande parametrar kontrolleras normalt vid tillverkning:

- Element-ID
- Installationsdatum
- Klockslag start/slut installation
- Total tid nedborrning, total tid uppdragning
- Pelardiameter
- Vertikalitet mast (xy-led)
- Tomborrningsdjup (m)
- Pelardjup (m)
- Rotationshastighet (varv/min) - ner/upp
- Vertikal hastighet (meter/min) – ner/upp
- Pumpflöde (liter/min) - ner/upp
- Pumptryck (bar) ner/upp
- Total mängd bindemedel (kg)
- Bindemedel vs djup (kg/m³)
- BRN (-)

Modern utrustning redovisar utöver informationen ovan även några parametrar grafiskt som funktion av djup; dosering (kg/m³), BRN, ner/upp hastighet (m/min), pumpflöde (liter/min), pumptryck (bar).

7.10.3. Blade rotation number (BRN)

Med den våta metoden är det möjligt att tillverka förhållandevis homogena pelare med relativt hög tryckhållfasthet även i lågsensitiva, plastiska leror. Bindemedlet tillförs jorden i suspension vilket ökar effektiviteten av inblandningen. Eftersom bindemedlet tillförs som suspension är det möjligt att tillföra relativt stor mängd bindemedel i en jord med låg naturlig vattenkvot.

För att standardisera och kvantifiera inblandningsarbetet används begreppet Blade Rotation Number. Blade rotation number eller BRN definieras som antalet gånger ett blad på ett inblandningsverktyg skär en 1,0 m lång sträcka av jorden givet verktygets rotations- och vertikala hastigheter. Ju högre BRN, desto mer inblandningsenergi som tillförs jorden.

$$T \text{ (rot/m)} = M \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_{pi}}{V_{pi}} + \frac{R_{wi}}{V_{wi}} \right)$$

n = antal gånger inblandning utförs

M = antal skärande vingar på inblandningsverktyget (för en enkel vinge är M = 2, jmf M = 6 för pinnborr med 3 nivåer)

R_p, R_w = rotationshastighet vid nedborrning/uppdragning (RPM)

V_p, V_w = nedmatningshastighet/uppdragningshastighet (meter/min)

BRN för konventionell våt metod är normalt 300 – 500 beroende på jordens och suspension egenskaper, verktygets utformning mm. Högre BRN tenderar att bidra till ökad hållfasthet och lägre variationskoefficient.

7.10.4. Kontroller efter utförande

Den vedertagna metoden för kontroll av pelarhållfasthet är enaxliga tryckförsök. Dessa kan utföras på prover från kärnprovtagning eller sk wet-grab sampling. För den senare fylls en provcylinder med upptaget material från den ännu ej härdade pelaren. Materialet tas från pelaren genom att nyttja en speciell provtagningslåda eller provtagningscylinder som utformats för att medge upptagning av ett prov på valfritt djup. Vanligt förekommande kontrollmetoder är:

- Kärnprovtagning och enaxliga tryckförsök
- Wet grab sampling och enaxliga tryckförsök
- Permeabilitet in-situ (falling head eller constant head)

7.11. Våta metoden – erfarenheter från järnvägsprojekt

Den våta metoden har använts i Japan i samband med utbyggnad av det japanska höghastighetståget Shinkansen. De japanska referenserna är inte lättillgängliga eftersom språket ofta begränsas till japanska. Rapportförfattarna har fått ta del av vissa referenser från en japansk specialistentreprenör och det finns sannolikt fler erfarenheter. Det vore värdefullt att undersöka och få ta del av dessa eftersom Japan besitter de kanske största samlade erfarenheterna av djupstabilisering. De har även betydande erfarenhet av höghastighetsbanor.

Wet Deep Mixing används ofta på västkusten i USA för att minska risken för jordförvätskning (liquefaction mitigation). Den nordamerikanska västkusten är ett välkänt riskområde för jordbävningar och pelarna eller lamellerna dimensioneras därför för kraftiga vibrationer i samband med jordbävningar.

7.12. Bedömning om metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong

Den våta metoden bedöms vara intressant för HHJV med ballastfri överbyggnad av flera skäl:

- Erfarenheterna av djupstabilisering för järnvägsbankar i Sverige är generellt mycket goda.
- De grundläggande principerna för dimensionering, utförande och kontroll av kc-pelare är i vissa delar även tillämpliga på den våta metoden.
- Djupstabilisering är en effektiv metod för att reducera uppkomst av skadliga skjuvvågor (höghastighetsfenomenet).

Metoden har utförts i flera decennier och betydande erfarenhet finns i flera europeiska länder, bl. a. Polen och Tyskland.

Principerna och funktionen påminner mycket om torra metoden. Skillnaden ligger framförallt i pelarnas egenskaper och inblandningsprocessen där våt metod i regel medför ett bättre inblandningsarbete och homogenitet. Till följd av ökad kunskap och tillförlitlighet används metoden även för grundläggning av industribyggnader, varuhus, (under plintar, sulor), tunga och sättningssänsliga oljetankar, broar (framförallt i Polen) förutom de enklare applikationerna vägar.

Metoden är generellt dyrare än jmf torra metoden per kubikmeter stabiliserad jord. Jämförelsen är dock mer komplicerad eftersom våta metoden i regel medför avsevärt högre hållfasthet och högre deformationsmodul, samt utförs i jordar där torra metoden ofta inte utförs på grund av ogynnsamma förhållanden. Det bör finnas goda möjligheter att anpassa våta metoden efter svenska förhållanden.

8 Stenpelare

8.1. Allmänt

Stenpelare (eng. stone columns eller gravel columns) är en internationellt accepterad och mycket vanlig jordförstärkningsmetod där lastbärande semi-cirkulära element av dränerande krossmaterial tillverkas in-situ. Stenpelarmetoden är främst tillämplig i finkorniga jordar men fungerar också i löst lagrad friktionsjord. Metoden används ofta för utbredda laster som väg- och järnvägsbankar och bankuppfyllnader men även för att minska risken för jordförvätskning (liquefaction mitigation) och grundläggning av lättare byggnader. Föregångslandet är Tyskland där djupvibratorer tillverkades redan på 1930-talet. Dessa utvecklades först för packning av friktionsjord men så småningom utvecklades vibroflotation eller våta metoden där tillverkning av stenpelare sker genom tillförande av krossmaterial från markytan. På 1970-talet utvecklades sedermera den torra metoden som vunnit betydande framgångar i ett stort antal länder. Stenpelare torde idag utgöra en av de mest tillämpade jordförstärkningsmetoderna i världen. Stenpelare utförs rutinemässigt på kontinenten i Europa, i Mellanöstern och Sydostasien samt USA. De har även exporterats till

8.2. Standard

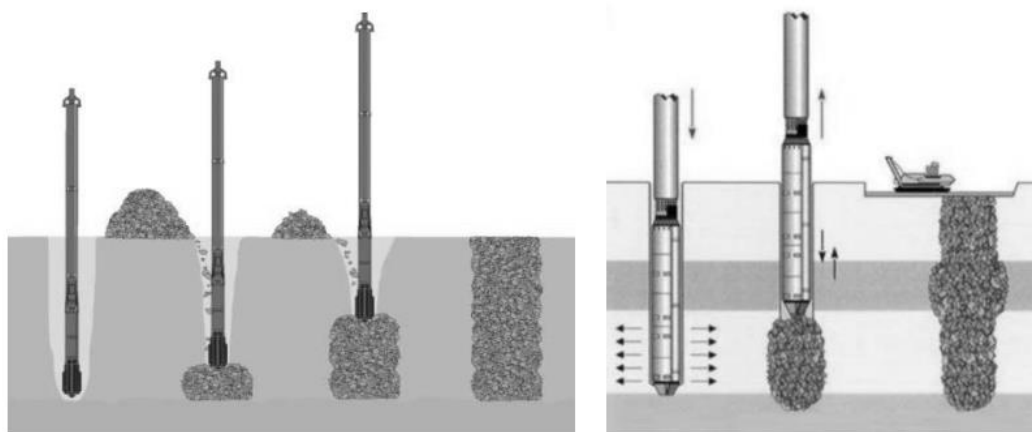
Metoden omfattas av Eurocode utförandestandard EN 14731:2005 Execution of Ground Treatment by Deep Vibration.

8.3. Princip

Stenpelare tillverkas från fast botten upp till markytan i ett förutbestämt pelarmönster. Metoden tillämpas främst i finkorniga jordar med låg permeabilitet där pelarnas dränerande effekt och höga kompressionsmodul bidrar till ökad konsolideringshastighet och reducerade totalsättningar. I en typisk stenpelarförstärkt jord kan de totala sättningarna ofta minska med 50 % eller mer jämfört oförstärkt jord. Pelarnas kompressionsmodul kan vara upp till 50 gånger högre än omgivande oförstärkt jords modul vilket medför en betydande lastkoncentration till pelarna. Konsolideringshastigheten ökar kraftigt eftersom pelarna har stor dränerande kapacitet. Avgörande för dräneringskapaciteten i en stenpelarförstärkt jord är det fria avståndet mellan pelarna, det tillförda krossmaterialets dränerande kapacitet och den naturliga jordens horisontalpermeabilitet. Ofta utvecklas en betydande del av de totala sättningarna under utförande av uppfyllanden. Byggtiden kan därmed förkortas väsentligt.

Stenpelare utförs i huvudsak enligt en av tre följande installationsmetoder:

- våt metod (eng. wet method, top feed method), se figur 16
- torr metod (eng. dry-bottom feed method), se figur 16
- toppvibratorometoden (eng. top vibrator method)



Figur 16. Princip utförande våt respektive torr metod (från Keller PLC)

Hållfasthets-, och deformationsegenskaperna hos den färdiga produkten skiljer sig åt beroende på tillverkningsätt. Faktorer som den naturliga jordens egenskaper, det tillförda krossmaterialet och installationsmetoden påverkar pelarens egenskaper.

8.4. Stenpelare, våt metod

En kraftig djupvibrator är via ett förlängningsrör upphängd i en fackverkskran. Under inverkan av egenvikt och vibrationer sänks djupvibratoren ner i jorden. Till följd av vibratorns vibrationer uppstår en kavitet omkring denna. Ett dränerande, packningsbart krossmaterial tillförs kaviteten vid markytan. Genom att föra djupvibratoren upp- och ner trillar krossmaterialet ner i kaviteten allt djupare ner i jorden. Processen upprepas tills

djupvibratören och krossmaterialet nått erforderligt djup. För att krossmaterialet skall trilla ner i jorden krävs tillsättande av spolvatten, därav benämningen ”våta metoden”. När krossmaterialet nått fast botten dras djupvibratören långsamt upp igen, med fortsatt små upp- och nedåtgående rörelser. Dessa medför att krossmaterialet under vibratören packas och förskjuts lateralt. När vibratören inte förmår tränga ner i det underliggande krossmaterialet har pelaren uppnått erforderlig packningsgrad och vibratören dras upp ytterligare ett stycke. Processen upprepas tills hela pelaren är tillverkad. Slutresultatet är en homogen, packad pelare med hög inre friktionsvinkel. Stenpelare utförda med våt metod har utförts till åtminstone 20 m djup. Metoden är snabb men delvis begränsad eftersom spolvattnet i finkorniga, vattenmättade jordar resulterar i en betydande mängd returslam. Detta returslam är i regel uppblandat med finjord och måste därför sedimentera i stora sedimentationsbassänger innan det kan ledas bort från arbetsplatsen, se figur 17. Sedimentationsbassängerna är mycket utrymmeskrävande och ofta besvärliga att hantera på arbetsplatsen.

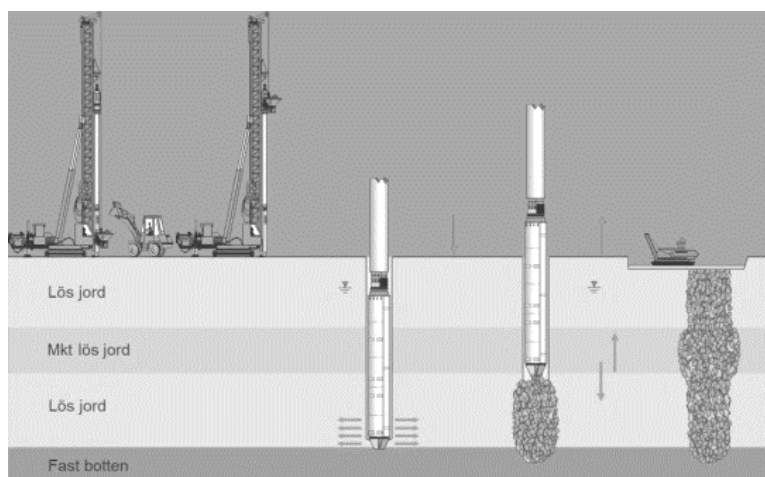


Figur 17. Utförande av våt metod (från Keller PLC)

8.5. Stenpelare, torr metod

Som namnet antyder används inte vatten i den torra metoden. Istället tillförs krossmaterialet genom ett separat materialrör som mynnar vid djupvibratörens undre del, se figur 18. Materialrörets övre del är försett med en ventil och trycksätts efter påfyllning av krossmaterial. Trycksättningen underlättar efterföljande utmatning av krossmaterial i jorden. Tillverkning av pelare sker från fast botten upp till markytan med små upp- och nedåtgående rörelser. Ofta används maskiner med gejderstyrda djupvibratörer som kan skapa en nedåtriktad kraft för att underlätta nedföring av verktyget.

Eftersom vatten inte tillsätts i processen genereras begränsade mängder returslam. Den torra metoden anses därför vara mer miljövänlig och den tar väsentligt mindre arbetsyta i anspråk jämfört med den våta metoden.



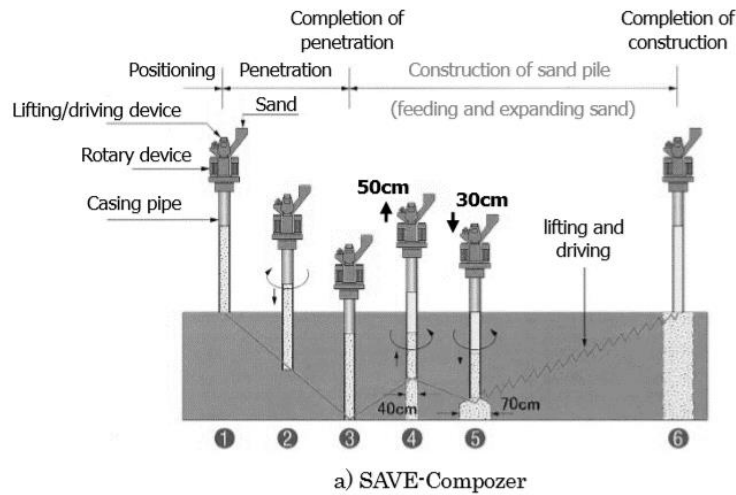
Figur 18. Installationsprocess stenpelare torr metod (från Keller PLC)

8.6. Toppvibratormetoden

Den tredje metoden innebär att ett stålrör drivs ner till erforderligt djup med hjälp av en toppvibrator. För att undvika inträngning av jord i röret är dess undre del försett med öppningsbara plattor alternativt med en stålplatta som sedan lämnas kvar i marken. När röret nått fast botten fylls detta med krossmaterial och därefter dras röret upp till markytan. Det finns ingen möjlighet att förskjuta krossmaterialet lateralt med ett öppet rör och därför packas krossmaterialet relativt sätt sämre med toppvibratormetoden jämfört tekniker som utnyttjar djupvibratörer. Stenpelare tillverkade med toppvibratormetoden uppvisar därför ofta lägre kompressionsmodul. De samverkar inte heller i lika hög grad med omkringliggande jord jämfört pelare utförda med djupvibrator. Toppvibratormetoden omfattas inte av Eurocodestandarden Execution of Ground Treatment by Deep Vibration, EN 14731:2005 utan istället EN 15237:2007 Vertical drainage.

8.7. Stenpelare med icke-vibrerande teknik

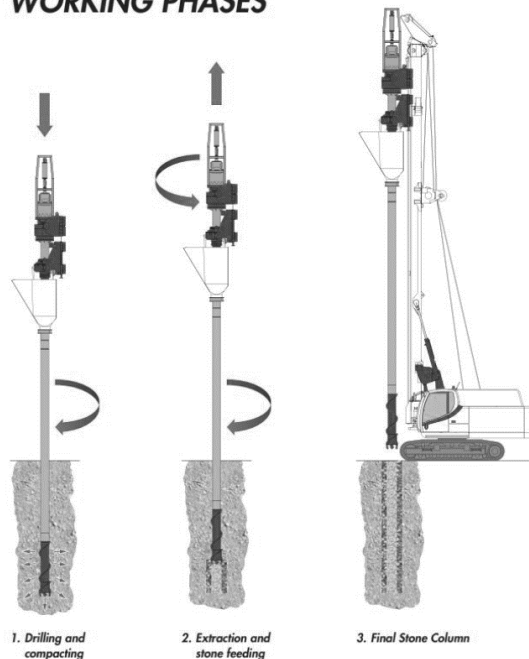
I Japan används sedan slutet av 1990-talet en icke-vibrerande metod för tillverkning av stenpelare. Metoden kallas SAVE Compozer (Silent-Advanced-Vibration-Erosion), se figur 19. Ett foderrör fylls med sand eller grus (max fraktionsstorlek ca 40 mm) och roteras ner till erforderligt djup. Därefter dras foderröret upp ca 0,5 m varpå sand eller krossmaterialet åker ur det öppna, lätt trycksatta, foderröret. Röret roteras och trycks därefter ner ca 0,3 m och packar därmed det utmatade materialet ca 0,3 m. Den upp- och nedåtgående rörelsen upprepas tills foderörets underkant når markytan. Figuren nedan redovisar översiktligt principerna för tekniken. Fördelarna med metoden uppges vara minskad omgivningspåverkan i form av mindre störning av omgivande jord samt minskat buller i samband med installation. Metoden används främst i tätbebyggda områden där kraven på minskad omgivningspåverkan är höga.



Figur 19. Installationsförfarande sand/stenpelare enligt SAVE Compozer (från FUDO TETRA Corporation)

En annan icke-vibrerande teknik för tillverkning av stenpelare har utvecklats och patenterats av den italienska maskintillverkaren Casagrande. En maskin är försedd med en gejdermonterad basker för stenmaterial, se figur 20. Baskern är försedd med en genomföring för ett foderrör med invändigt monterad augerskruv. Två separata rotationsenheter medger oberoende rotation av foderrör och augerskruv. Pelare tillverkas genom att foderörret och augerskruven roteras ner till erforderligt djup. Därefter roteras den invändiga augerskruven under samtidig uppdragning av foderrörret. Augerskruvens utformning medför att krossmaterialet förs ner via augerskruven och ut i jorden. Augerskruven är utformad på ett sätt som möjliggör effektiv packning av krossmaterialet. Varken luft eller vatten krävs för utmatning av materialet, som tillförs med en lastmaskin.

WORKING PHASES



Figur 20. Installationsförfarande stenpelare enligt non-vibration stone columns (från www.casagrandegroup.com, Casagrande S.p.A.)

Det bedöms som särskilt intressant att utvärdera dessa enligt uppgift skonsamma stenpelarmetoder, då de utvecklats för att minimera störning av omgivande jord. En roterande rörelse borde störa sensitiva leror i mindre utsträckning jämfört den konventionella torra metoden som genererar kraftiga vibrationer.

Den torra metoden är dock alltjämt den mest vedertagna av de nämnda metoderna. De icke-vibrerande teknikerna bör analyseras närmare då kunskapen om dessa inte är allmänt känd i samma utsträckning. Med stenpelare avses fortsättningsvis pelare utförda med den torra metoden om inget annat specifikt anges.

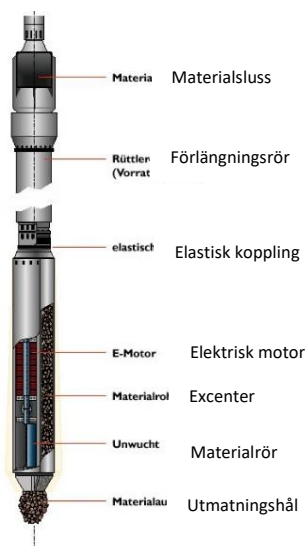
8.8. Metodbeskrivning torra metoden

Stenpelarmetoden baseras på nyttjandet av kraftiga djupvibratorer. Vibrationerna i djupvibratören genereras med hjälp av en elektrisk eller hydraulisk motor som driver en excentrisk vikt. Viktens rotation genererar kraftiga vibrationer. Då den elektriska motorn är placerad i djupvibratören är verkningsgraden i princip oberoende av djupet och därav medges hög verkningsgrad pga mycket små energiförluster. Belastningen på motorn i djupvibratören ökar med ökat nerdrivningsmotstånd. Detta utgör grunden för kontrollen av installationsförfarandet där operatören är instruerad att uppnå ett visst motstånd i el eller hydraulmotorn. Motståndet mäts som funktion av tid och djup vilket säkerställer mycket bra kontroll av packningsarbetet. Operatören jämför också djupet till fast botten med information om förväntade djup från den geotekniska undersökningen. Packningsgraden som uppnås är ofta betydande. Efter avslutad pelarinstallation schaktas 30-50 cm av överytan bort och pelartopparna exponeras, se figur 21. Detta säkerställer den dränerande förmågan i den övre delen av pelaren. Därefter placeras en geotextilduk och ett dränerande lager av genomsläppligt krossmaterial ut på den stabiliserade ytan. Detta lager syftar till att föra bort det porvatten som tränger upp ur pelarna vid efterföljande konsolidering. Viktigt att tänka på är att anpassa tjockleken på det dränerade lagret efter förväntade sättningar så att den dränerande effekten bibehålls under hela konsolideringsförloppet. Konsolidering sker när en yttre last påförs. Initialt ökar då porvattentrycket för att sedan dräneras till stenpelarna. Vid mycket stora laster, t.ex. upplagsytor för järnmalm, krävs ibland s.k. staged construction, d.v.s. upplastning i flera laststeg med mellanliggande tid för konsolidering. Detta för att undvika för stora porvattentryck under upplastningsfasen. Vid behov kan överlast tillämpas för att minimera storleken på krypsättningarna.



Figur 21. Framschaktat pelartvärsnitt (T. Forsberg)

Stenpelarmetoden utförs vanligen med självgående hydrauliska stenpelarmaskiner utrustade med gejdermonterade djupvibratörer. Huvudkomponenterna utgörs av en kraftig el eller hydraulmotor, excenter, utmatningshål för material, förlängningsrör för vibrator samt sidomonterat materialrör, se figur 22. Moderna maskiner instrumenterar alla viktiga parametrar i realtid. Pelarlängd, materialåtgång och packningsarbete redovisas grafiskt som funktion av tid vilket medger kontroll av pelarmaterialets distribution samt utfört packningsarbete över hela pelarens längd. Pelare utförs idag rutinmässigt till 20 m djup med gejdermonterade djupvibratörer. Genom att nyttja fackverkskran och frihängande djupvibrator har stenpelare installerats till åtminstone 43 m djup.



Figur 22: Elektrisk djupvibrator (från Keller PLC)

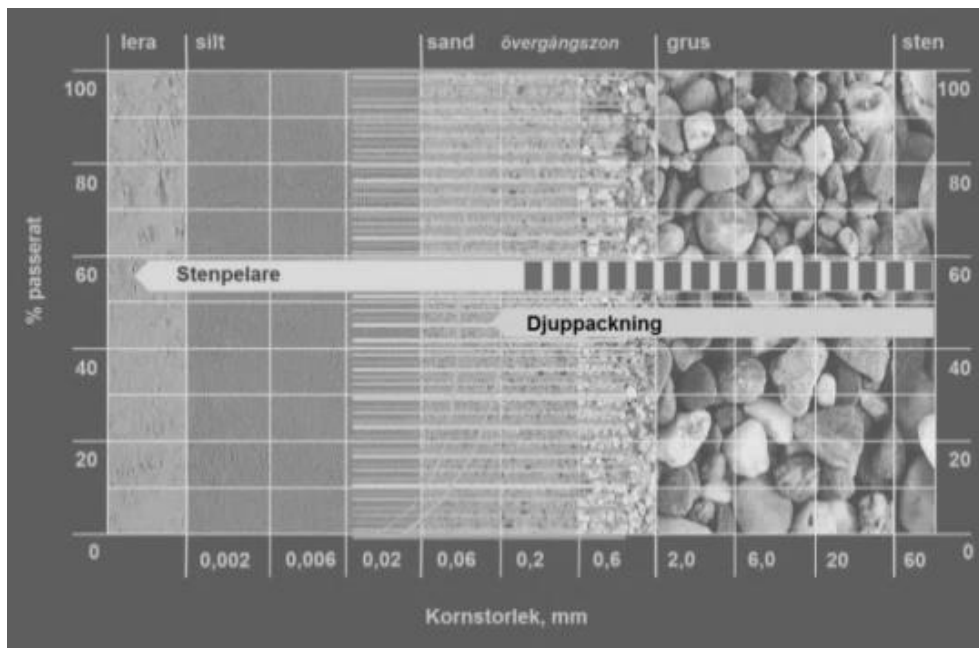
Installationsprocessen är relativt okomplicerad. En arbetsbädd av måttligt packat krossmaterial är normalt tillräckligt för maskinens stabilitet. Krossmaterial förs fram till stenpelarmaskinen med en hjullastare eller liknande. Upplaget bör finnas inom en radie av 70 m för att inte hämma produktionskapaciteten.

Resultatet av en stenpelarförstärkning påverkas i hög grad av omgivande jords förmåga att stötta och ge mothåll åt pelaren. Pelarhållfastheten blir förhållandevis högre när pelarna tillverkats i en relativt fast jord. Avsedd packningsgrad uppnås med begränsad materialåtgång eftersom omgivande jord stöttar pelaren väl. I en lösare jordformation ökar materialåtgången vid samma packningsarbete eftersom omgivande jord har större benägenhet att förskjutas lateralt. Praktiskt möjlig pelarfasthet och kompressionsmodul är då också lägre än för en fastare jordformation. Pelare tillverkade under gynnsamma förhållanden, t.ex. löst lagrad sand eller halvfast lera, har normalt en diameter av 60 - 80 cm. I mycket lös lera kan diametern istället uppgå till 90 - 110 cm. Det anses knappast motiverat vare sig tekniskt eller ekonomiskt att utföra pelare med diameter större än 1,0 m.

Ovanstående bör särskilt beaktas om den oförstärkta lerans odränerade skjuvhållfasthet är mycket låg. För bra resultat rekommenderas att stenpelare utförs i jordar med odränerad skjuvhållfasthet > 15 kPa. Omrörd skjuvhållfasthet är självfallet också av betydelse. Extra varsamhet rekommenderas därför för leror med sensitivitet > 10. Vidare utgör en organisk halt > 15 % normalt en övre gräns för effektivt nyttjande av stenpelarmetoden pga krypeffekter. Det bör dock noteras att betydande erfarenheter finns från stenpelarförstärkningar i leror med odränerad skjuvhållfasthet så låg som 5 kPa (Raju, Krishna, Wegner, 2004).

8.9. Lämpliga jordar

Stenpelare är lämpliga i finkorniga jordar som lera, siltig lera, lerig silt och silt, se figur 23. De fungerar utmärkt även i löst lagrad sand.



Figur 23. Lämpliga kornfraktioner för stenpelarmetoden (från Keller PLC)

8.10. Dimensionering

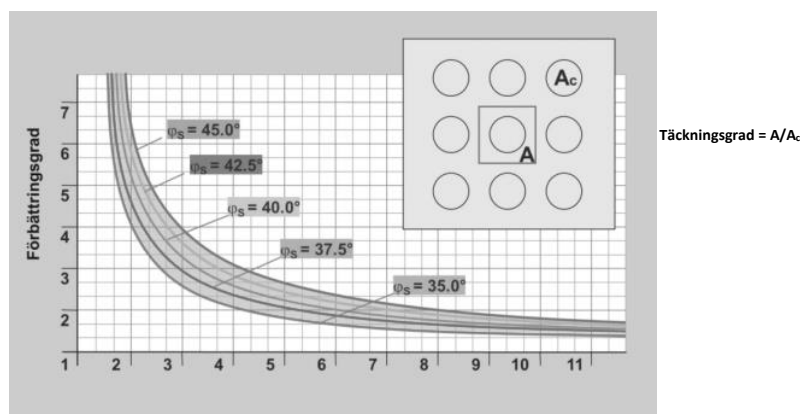
Dimensionering utförs exempelvis enligt någon av följande tre metoder:

- Priebe (1995)
- Balaam and Booker (1981)
- Goughnour and Bayuk (1979)

Priebe (1995) utgår från att man tillförlitligt kan utvärdera den förbättringsgrad som uppstår till följd av förekomsten av stenpelare i en i övrigt opåverkad jordvolym. Detta är möjligt eftersom man känner till det tillförda materialets mekaniska egenskaper och dess geometriska utformning (diametern). Följande förenklade antagen görs:

- Pelarna installeras till fast botten
- Pelarmaterialets töjning försummas
- Jordens och pelarnas densitet försummas

Sättning för oförstärkt jord beräknas och jämförs med sättnings för förstärkt jord. Egenskaper hos förstärkt jord bestäms av den förbättring som uppstår till följd av installation av pelare med given täckningsgrad A/A_c och inre friktionsvinkel ϕ i den i övrigt opåverkade jordvolymen, se figur 24. Normalt utförs sättnings- och stabilitetsanalyser med hjälp av analytiska beräkningar och/eller finita elementprogram. Konsolidering kan exempelvis beräknas enligt Balaam/Booker (1981). Analysen utförs lämpligen med datorbaserade beräkningsprogram.



Figur 24.: Förbättringsgrad enligt Priebe (1995) vid olika täckningsgrad och inre friktionsvinkel hos krossmaterialet (från Keller PLC)

8.11. Förstärkt jords egenskaper

Rätt utförd erbjuder metoden en rad fördelar:

- Väsentligt ökad konsolideringshastighet pga att pelarna har stor dränerande kapacitet.
- Metoden kombineras med förbelastning för att minimera krypsättningar. Liggtiden är då ofta väsentligt kortare jämfört vertikaldränering.
- Den förstärkta jordens förmåga att motstå skjuvbelastning ökas väsentligt till följd av pelarnas höga inre friktionsvinkel (40 - 42°).
- Sättningarna reduceras till följd av pelarnas höga sättningsmodul. Sättningarnas storlek kan normalt reduceras 1,5 – 4,0 gånger jämfört oförstärkt jord vid vanligt förekommande centrumavstånd mellan pelarna.
- Minskad risk för differentialsättningar till följd av homogenisering av omgivande jord.
- Endast beständiga naturliga material tillförs jorden vilket är en fördel ur miljösynpunkt.
- Den mängd CO₂ som produceras är mycket låg jämfört cementbaserade jordförstärkningsmetoder.

8.12. Material

Krossprodukter av vanligt förekommande bergarter som granit eller gnejs fungerar utmärkt som material till stenpelare. Hårda bergarter medför dock stort slitage på utrustningen. Den dränerande funktionen hos pelarna är viktig för att få snabb konsolidering. Det är därför viktigt att krossmaterialet inte innehåller stor andel finmaterial och att krossmaterialet inte heller krossas i för stor utsträckning under installationsförfarandet. För stenpelare utförda med på marknaden vanligt förekommande gejdermonterade djupvibratorer bör man således ställa följande krav på krossmaterialet:

- Kornfraktion 10 – 35 mm enligt ASTM C-136.
- Los Angeles Abrasion test vid 1000 varv < 50 % enligt ASTM C-535.
- Specifik densitet > 24 kN/m³ enligt ASTM C-88.

8.13. Kvalitetssäkring

Till skillnad från djuppackning där resultatet enkelt kan utvärderas med konventionella sonderingsmetoder begränsas tillförlitlig verifiering av stenpelarförstärkningar till stora provbelastningar. Verifiering av en stenpelarförstärkning sker ofta genom statisk provbelastning av en grupp pelare. Portryck och deformationer mäts och jämförs med beräkningar. Nackdelen med metoden är att provbelastning är relativt dyrt och tidskrävande att utföra vilket medför att endast en begränsad del av en jordförstärkning provas. Att tillförlitlig provning av stenpelarförstärkt jord i praktiken begränsas till fullskaleförsök utgör vanligen inte någon större komplikation. Till följd av metodens stora utbredning och nyttjande finns stor erfarenhet och därmed även större tilltro till dimensioneringsprinciperna. Det går även att utföra provbelastning av en enskild pelare.

8.14. Svenska erfarenheter

Stenpelare enligt den torra metoden har utförts i Sverige, bla i Helsingborg (Kemira) och i Stockholm (Nynäsvägen). Stenpelare med omgivande geotextilduk, s.k. Geotextile Encased Columns (GEC) har också utförts i Sverige. Ett intressant projekt med cementförstärkta stenpelare har utförts i Frövifors för grundläggning av en vägbank. Bankens höjd är 9 m och stenpelarna valdes som ett mer fördelaktigt alternativ till kalkcementpelare. Uppföljning visade på mycket små sättningarna efter uppbyggnad av banken (21 mm).

8.15. Bedömning av metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong

All jordförstärkning med så kallade stiffening methods baseras på principen att en viss andel av en yttre påförd last förs över till lastbärande pelare och att resterande del tas upp av jorden mellan pelarna. Lastfördelningen mellan jord och installerat pelare varierar beroende på pelarens deformationsegenskaper.

Stenpelare uppvisar i regel en relativt hög kompressionsmodul, ofta 80 – 100 MPa. Med normalt förekommande centrumavstånd mellan pelarna erhålls under gynnsamma förhållanden endast mycket måttliga sättningar. Till följd av stenpelarnas dränerande funktion kan krypsättningar i gynnsamma fall minimeras genom nyttjande av förbelastning.

Den höga produktiviteten gör att metoden ofta är fördelaktig ur ett ekonomiskt perspektiv. Metoden lämpar sig synnerligen väl för bankuppfyllnader eftersom konsolideringssättningar till stor del utvecklas under byggskedet. Genom att nyttja förbelastning kan primärsättningar i stort sett elimineras. Metoden nyttjas rutinmässigt för grundläggning av järnvägsbankar och utförs av flera internationella aktörer, t.ex. Keller, Penine, Menard m. fl. Ett mycket stort antal maskiner är i bruk i Europa, bla i Tyskland, Polen, Österrike, och England, vilket är en fördel för ett omfattande projekt.

Pelaravståndet och därmed stabiliseringseffekten kan enkelt optimeras för aktuella förhållanden. Modern instrumentering i realtid medger säker och snabb kvalitetskontroll. Viktigt är ställa rätt krav på specialistentreprenören avseende redovisning och verifiering av pelarkvaliteten. Detta bör rimligen ske nära inpå installationen så att eventuella brister snabbt kan identifieras och avhjälpande åtgärder snabbt kan sättas in. En normal genomsnittlig installationskapacitet är åtminstone 250 m/8-tim skift. Vid ett centrumavstånd mellan pelarna om 2,5 m och 10 m pelarlängd kan en maskin därmed stabilisera drygt 150 m² yta per 8-timmars skift.

En annan intressant fördel med metoden är då det finns överskott på berg inom ett projekt. Genom att krossa och nyttja överskottet för tillverkning av krossmaterial till pelarna kan transportbehovet reduceras. Metoden har dessutom mycket låg CO₂ påverkan jämfört cement- och baserade jordförstärkningsmetoder.

I Tyskland har stenpelare nyttjats flera gånger för grundläggning av HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong. För utbyggnad av järnvägen Hochgeschwindig nyttjades stenpelare i kombination med spårplatta i betong (system Dywidag) för breddning av en befintlig järnväg. Underliggande finkorniga jordar stabiliserades med stenpelare i ett triangulärt mönster c/c 1,45 – 1,50 m, pelardiameter 0,6-0,8 m. Utförlig projektbeskrivning (på tyska) i bilaga.

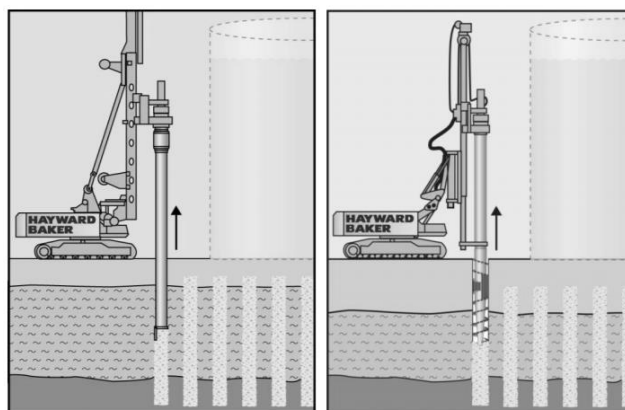
Sammanfattningsvis bedöms stenpelare vara en intressant metod som med nyttjande av förbelastning eventuellt kan uppfylla de hårda sättningskraven för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong. Ett fullskaleförsök rekommenderas där viktiga parametrar som installationskapacitet, sättningsutveckling och långtidseffekter utvärderas.

9 Controlled Modulus Columns (CMC) - Rigid inclusions

Controlled Modulus Columns (CMC) är en jordförstärkningsmetod som utförs med betongliknande, slanka lastbärande pelare som utförs till fasta jordlager. Pelarna tillverkas av betong eller cementbaserat bruk beroende på önskade egenskaper. Pelarnas kompressionsmodul är betydligt högre än för tex wet deep mixing eller icke-cementförstärkta stenpelare och typiska täckningsgrader är därför förhållandevis låga. Pelarna separeras från ovanliggande konstruktion genom ett lastfördelande lager. Installationsprocessen medför partiell eller fullständig massundanträngning av omkringliggande jord som därmed packas om pelarna utförs i en friktionsjord eller orsakar viss hävning om de utförs i en kohesionsjord. Mekanismerna för lastöverföring till pelarna är komplexa: lastöverföring sker dels i det lastöverförande lager (eng. load transfer platform, LTP) dels genom negativ mantelfriktion i den övre delen av den förstärkta jorden. Längre ner i jorden förs lasterna i pelarna över till omkringliggande fastare jordlager genom positiv mantelfriktion och via spetsen. I denna rapport används benämningen Controlled Modulus Columns (CMC) om metoden. I själva verket är Controlled Modulus Column (CMC) ett registrerat varumärke hos det franska företaget Ménard. Andra entreprenörer erbjuder CMC-liknande pelare, tex Controlled Stiffness Columns (Keller Group) och Traction Compaction Tool (Trevi Group). En term som också används i dessa sammanhang är Rigid Inclusions som i princip även omfattar förstyvande element av krossmaterial. De olika produktnamnen kan ibland verka förvirrande och för enkelhetsskull används här benämningarna CMC-pelare, CMC-metoden alternativt CMC-liknande pelare även om de strikt endast avser Ménards produkt.

CMC-liknande pelare utförs med två principiellt olika installationstekniker, se figur 25:

- Roterande (ursprunglig CMC)
- Vibrerande



Figur 25. Principskiss vibrerande teknik och roterande teknik (från Hayward Baker, USA)

Vid val av installationsteknik tas hänsyn till bland annat aktuella jordförhållanden, närhet till befintliga konstruktioner och drivbarhet. Oavsett val av installationsteknik anses pelarnas egenskaper och slutprodukten mestadels vara likvärdiga. Några rapportförfattare menar dock att bärförmågan påverkas av installationstekniken och att detta därför bör beaktas.

9.1. Definitioner

- Rigid inclusion – styvt lastbärande element tillverkat med cementerande bindemedel, betong eller krossmaterial. I detta dokument används benämningen ”CMC-liknande pelare”.
- Lastöverförande lager – bädd som ofta utgörs av krossmaterial, ibland även förstärkt med geonät. I detta dokument används den engelska akronymen ”LTP” Load Transfer Platform.
- CMC – akronym för Controlled Modulus Columns, en rigid inclusions metod som introducerades av det franska företaget Ménard 1994.

9.2. Standarder och vägledning

Dimensionering av jordförstärkning med CMC-metoden utförs vanligen enligt rekommendationer i ASIRI - Améliorations de Sols par Inclusions Rigides 2012. Handlingen finns översatt till engelska. Utförandestandarden SS EN 12699:2016 Utförande av geokonstruktioner – massundanträngande pålar är också tillämplig.

- ASIRI - Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvement
- SS EN 12699:2015 Utförande av geokonstruktioner – massundanträngande pålar

9.3. Metodbeskrivning

Tillverkning av CMC-pelare sker från botten och upp med såväl roterande som vibrerande teknik.

9.3.1. Roterande teknik

Med roterande teknik borrar ett cirkulärt- eller konformat verktyg försett med vingar (eng. flights) ner i jorden till erforderligt djup. Verktöget sitter monterat i nedre delen av en ihålig borrarstång och är utformat så att det helt eller delvis tränger undan jorden lateralt (se figur 26). De undre vingarna skruvar jorden upp mot det breda mittenpartiet som i sin tur tränger

ut jorden mot borrhålsväggarna. De övre vingarna har motsatt riktning och skruvar ner jorden mot det breda mittenpartiet som tränger ut jorden mot borrhålsväggarna. När metoden utförs i en friktionsjord packas omkringliggande jord mellan pelarna vilket ökar bärformågan. Metoden kräver maskiner med hög vridmomentkapacitet och hög nedmatningskraft.



Figur 26. Exempel på verktyg för CMC-liknande pelare (från Soilmec broschyr, Trevi Group)

När verktyget nått erforderligt djup påbörjas pumpning av betong eller cementbaserat bruk. Betongen pumpas ut i jorden genom ett munstycke i verktygets undre del. Betongen pumpas ut under samtidig uppdragning och rotation av verktyget och fyller då ut den kavitet som skapas under verktyget. Betongen/bruket pumpas med visst övertryck för att säkerställa pelarens integritet och undvika inträngning av jord i pelartvärsnittet. Pelarna är ofta oarmerade men kan vid behov armeras. Armeringskorgen sänks då ner i den nyss tillverkade pelaren innan betongen härdat.

9.3.2. Utförande med vibrerande teknik

Med vibrerande teknik vibreras ett stålrör ner i jorden till erforderligt djup med hjälp av en sk ring-vibrator monterad på en gejder, se figur 27. Rörets nedre ände är försett med en anordning som förhindrar inträngning av jord i röret under neddrivningsfasen, se figur 28, 29. När stålröret nått erforderligt djup fylls detta med betong/cementbaserat bruk till en nivå ovan arbetsytan. Därefter påbörjas uppdragning av stålröret. Betongen i röret tränger då ut i den kavitet som skapas under röret vid uppdragning av detsamma. Vid behov kan pelarna armeras, med balk eller en armeringskorgen som sänks ner i stålröret innan pumpning av betong påbörjas. Armeringskorgen kan även sänkas ner i den nyss tillverkade pelaren.



Figur 27. Pelare typ CMC med vibrerande teknik (T. Forsberg)



Figur 28. Ventil som öppnas när röret dras uppåt (T. Forsberg)



Figur 29: Ledad platta (T. Forsberg)

Som nämnts ovan är CMC-metoden en massundansträngande metod. När metoden utförs i en friktionsjord sker därför packning av omkringliggande jord vilket bidrar till ökad bärformåga. När metoden utförs i vattenmättade finkorniga jordar uppstår en viss hävning till följd av den tillförda volymen material.

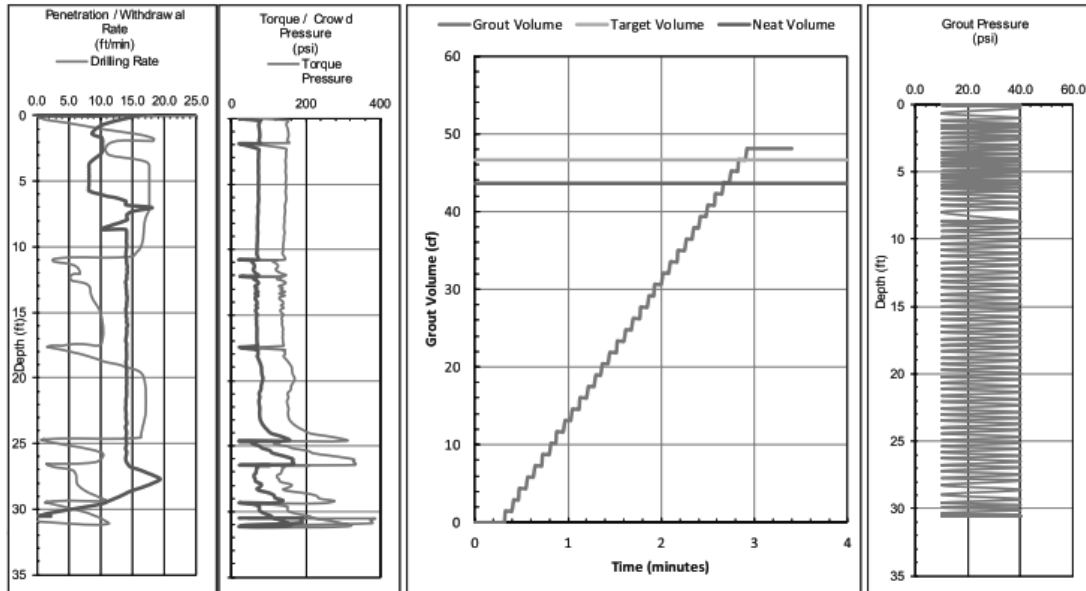
9.4. Produktionsparametrar

Följande produktionsparametrar kontrolleras för att säkerställa korrekt utförande:, se figur 30

- Levererad betongkvalitet
- Position (xy-led)
- Lutning pelare (vertikalitet gejder)
- Vridmoment och nedmatningskraft (roterande teknik)
- Hydraultryck (vibrator)
- Övertryck betong
- Nedmatnings och stigningshastighet
- Materialkonsumtion
- Pelarnas integritet (Pile Integrity Test, PIT)
- Pelardiameter (framschaktade pelartoppar)
- Utförande av load transfer platform (tjocklek, material, packning)

Rigid Inclusion Installation Report

RI Name: r1 Installation Date: 5/13/2015 Neat Volume: 43.56 cf Stroke Count: 66
Job No.: 12345 Diameter: 16 in Actual Volume: 48.17 cf Stroke Factor: 0.73
Location: Installed Length: 31.20 ft Grout Factor: 1.11 Target Grout Factor: 1.07



Notes:

No notes provided for this pile.

Figur 30: Exempel redovisning (från Hayward Baker, USA)

Typiska installationsparametrar

- Vridmoment: 200 – 350 kNm
- Nedmatningskraft: 200 – 300 kN
- Pelardiameter: 0,3 till 0,5 m (större diametrar förekommer)
- Installationsdjup: 3 – 25 m (ca 50 m långa pelare har utförts)
- Deformationsmodul: 5 – 20 MPa
- Minsta avstånd mellan element: 4 x diameterpelare
- Tjocklek LTP: > 0,40 m

Som nämnts ovan pumpas betongen/cementbaserade bruket med övertryck för att säkerställa homogeniteten hos pelarna och undvika inträngning av jord i pelartvärsnittet. Övertrycket är normalt ca 2 bar men kan varieras beroende på jordförhållanden och aktuell överkonsumtion. Om överkonsumtionen vida överstiger vad som är brukligt kan pumptrycket anpassas för att uppnå en normal överkonsumtion. Anpassning av pumptryck sker vid pump eller genom anpassning av uppdragningshastigheten. En normal överkonsumtion är ca 10%, dvs materialåtgången är 1,1 x den teoretiska volym jord som pressas undan.

CMC-metoden tillämpas för kontroll av sättningar och för att öka bärförmågan. Metoden används främst i följande tillämpningar:

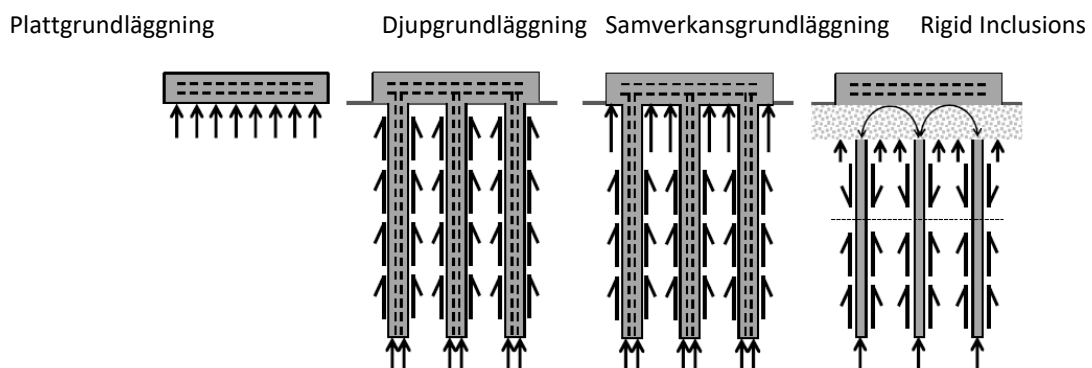
- Lagerlokaler (platta på mark, sulor)
- Olje- och bränsletankar
- Vägbankar
- Järnvägsbankar

CMC-metoden används som ett alternativ till följande metoder:

- Slagna pålar
- CFA pålar
- Djupstabilisering med våt metod (eng. Wet Deep Mixing)
- Stenpelare
- Vibro aggregate piers

9.5. Dimensionering

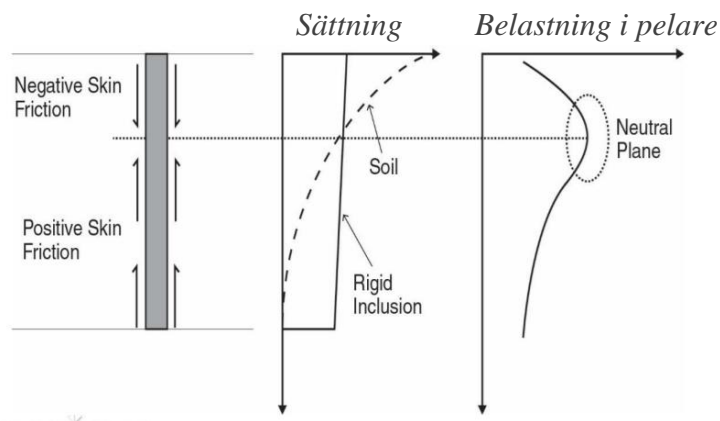
Principen för jordförstärkning med CMC-metoden skiljer sig från andra jordförstärkningsmetoder som baseras på installation av styva pelare. För metoder som tex. deep mixing och stenpelare antas den förstärkta jorden ha homogena hållfasthets- och deformationsegenskaper. Den förstärkta jordens egenskaper fås genom att vikta den naturliga jordens respektive pelarens egenskaper. Det förutsätts då att lika stora sättningar uppkommer i pelare och omkringliggande jord (equal strain compatability), se figur 31. Detta antagande antas vara rimligt om förhållandet mellan deformationsmodulen hos de introducerade pelare och omgivande jord (*stiffness ratio*) är mindre än 40 - 50.



Figur 31. CMC-metodens verkningsätt (från broschyr Hayward Baker, USA)

Deformationsmodulen hos CMC-pelare däremot är ofta så hög att någon egentlig samverkan mellan pelare och jord inte kan anses råda. CMC-pelare kräver olikt tex stenpelare inte något omgivande jordtryck för sin egen inre hållfasthet. CMC-pelare kan därför verka förvillande lika utförande med pålar. Den stora skillnaden ligger i utnyttjandet av ett lastfördelande lager som separerar CMC-pelaren från ovanliggande konstruktion. Eftersom CMC-pelare har deformationsmodul som vida överstiger omgivande jords deformationsmodul uppstår differentialsättningar i det lastfördelande lagret. Lagret dimensioneras därför så att full valvverkan medges inom det lastfördelande lagret tjocklek. Detta medför att sättningar i pelare och jord ovanför detta valv är lika stora (equal strain) och att skjuvkrafter i de slanka pelarna inte uppstår eller åtminstone kraftigt begränsas. Den styva pelaren stansas in ett kort stycke i det lastfördelande lagret (eng. punching) eftersom sättningarna i omgivande jord är större än sättningen i CMC-pelaren.

Lastöverföring från omgivande jord till pelare sker via negativ mantelfriktion i systemets övre del. Den relativa rörelsen mellan pelare och jord minskar successivt med ökat djup för att upphöra i ett neutralt lager som definieras som det plan där den relativa sättningen mellan pelare och jord upphört, se figur 32. Under det neutrala planet sker lastöverföring från pelare till fasta jordlager genom positiv mantelfriktion och slutligen via pelarspetsen. Den maximala belastningen i pelaren uppstår inte vid markytan utan i det neutrala lagret.



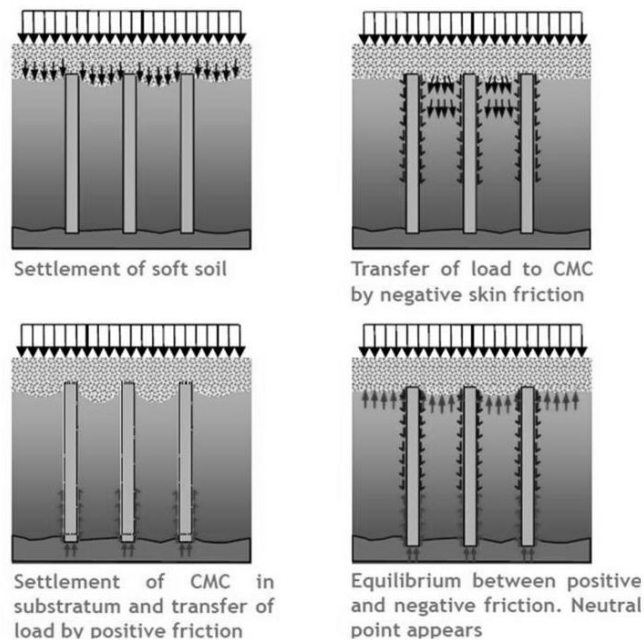
Figur 32. Plan med lika sättning i pelare och jord, belastning i pelare

Sambanden mellan last och deformation är krävande att analysera och därför används vanligen finita elementmetoder vid dimensionering av jordförstärkning med CMC-metoden, se figur 33. Dimensioneringen omfattar följande delar:

- Pelarens hållfasthet
- Geoteknisk bärförmåga
- Lastöverföring i det lastfördelande lagret
- Sättning i den förstärkta volymen

Storleken på spänningarna som uppkommer i pelarna beror på:

- fördelning av spänningsökning mellan pelare och omkringliggande jord
- negativ mantelfriktion i den övre delen av den förstärkta jorden



Figur 33. Belastning, lastfördelning och jämvikt (från S. Varaksin, Perth 2010, Ménard)

9.6. Lämpliga jordar

CMC-metoden har framgångsrikt använts i fyllnadsjord, friktionsjord och finkornig jord. Erfarenheter finns även från jordar med visst organiskt innehåll. Emellertid bör speciell försiktighet iakttas i organiska jordar och lösa leror med lagertjocklek > 1,5 m. Lösa leror eller förekomst av organisk jord vid eller omedelbart under det lastfördelande lagret utgör också en förhöjd risk, speciellt om man kan befara framtida grundvattensänkning.

Kontinuerlig utveckling av maskiner och verktyg gör att uppgifter om metodens begränsningar relativt snabbt blir inaktuella. Nedanstående begränsningar avseende maskinernas kapacitet bör uppfattas som generella:

Kohesionsjord:

Odränerad skjuvhållfasthet c_u : lös lera till leror med 100 – 120 kPa

Spetstryck, q_c : < 10 MPa

Friktionsjord:

Relativ densitet < 65%

SPT_N: < 30 (SPT_N ungefär lika HfA)

9.7. Fördelar jämfört alternativa metoder

CMC-metoden erbjuder följande fördelar jämfört alternativa metoder:

- Pelarnas hållfasthet är oberoende av naturlig jords egenskaper (jmf. deep mixing, stenpelare)
- Inget eller mkt lite returslam (jmf. tex CFA eller wet deep mixing)
- Inga vibrationer alstras vid tillverkning av pelare med roterande teknik
- I friktionsjord packas och förstärks jorden mellan pelarna, vilket förbättrar bärförmågan.
- Snabb installation
- Snabb konsolidering
- Kort byggtid

9.8. Dimensionering

Dimensionering sker vanligen med hjälp av finita elementmetoder (Plaxis).

Pelarnas tryckhållfasthet anpassas och är ofta mellan 5 till 20 MPa. Den relativt höga tryckhållfastheten medger relativt glesa centrumavstånd, vanligen 2,0 till 3,5 m. Andelen av påförd last som förs över till pelarna varierar, vanligen mellan 50 till 95%. Tillskottslasten i omkringliggande oförstärkt jord är därmed relativt begränsad. Eftersom pelarna belastas förhållandevis mindre än för motsvarande lösning med pålar krävs ofta mindre längd i kompetenta, fasta jordlager jämfört motsvarande alternativ med pålar.

En sammanfattning av principerna för dimensionering av CMC pelare redovisas i tabellen nedan.

	CMC-liknande pelare	Pålning
Djup	3 – 50 m	3 - > 50 m
Material	sand-cement bruk, ibland med armering för dragpåkänningar eller skjuvlaster	betong, stål, trä
Diameter	0,3 – 0,45 m	0,2 - > 1,5 m
Lastöverföringsmekanism	påförd last fördelas mellan pelare och jord	bär 100% av påförd last
Kostnad	ofta mer ekonomiskt, medger enklare klenare och billigare platta	ofta dyr, kräver pålplatta eller påldäck
Strukturellt kopplad till konstruktion	nej	ja
Lastöverföringsmekanism lika i hela förstärkta jordvolymen	ja	nej
Dimensionerad för höga spänningskoncentrationer	nej	ja

Tabell 6. Jämförelse CMC-pelare och pålar

Som beskrivits ovan är CMC-pelare styva och slanka vilket medför att de är förhållandevis känsliga för skjuvkrafter. Ett lastöverförande lager (eng. load transfer platform, LTP) krävs så att påförda laster förs över till elementen i axiell riktning. Det lastöverförande lagret utförs normalt med krossmaterial och ett eller flera lager geonät.

9.9. Material

CMC-liknande pelare utförs med betong eller cementbaserat bruk beroende på erforderlig hållfasthets- och deformationsegenskaper.

- Betong: minst C8/C10
- Enaxlig tryckhållfasthet: > 5 MPa

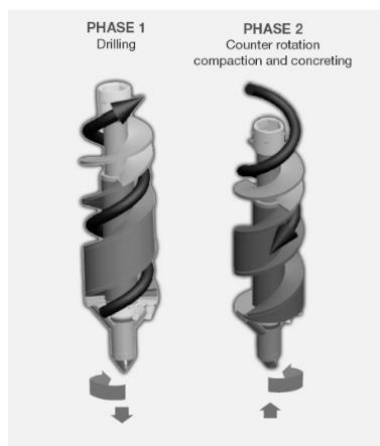
9.10. Traction Compaction Tool (TCT)

CMC-metoden i sin ursprungliga form baseras på massundanträngning i samband med *nedföring av verktyget* till erforderligt djup. Som nämnts innan kräver detta mycket hög vridmomentkapacitet och stor nedmatningskraft. Detta i sin tur förutsätter användande av stora, tunga borrhjuggar.

Den italienska specialistföretaget Soilmec (Trevi Group) har utvecklat ett sinnrikt verktyg som istället baseras på massundanträngning vid *uppdragning* av verktyget, se figur 34. Eftersom grundläggningsmaskiner har större uppdragskapacitet än nedmatningskapacitet medger TCT-metoden nyttjande av mindre maskiner jämfört konventionella rigid inclusions maskiner.

TCT- verktyget består av ett konformat, ledat verktyg enligt figur nedan.

1. En nedre del, fast monterad i borrhjuggen, försedd med vingar (eng. flights), borrhjuggtänder och ett munstycke för utmatning av betong.
2. En övre del, fast monterad i borrhjuggen, försedd med vingar (eng. flights).
3. En bred mittdel som kan röra sig fritt, försedd med vingar (eng. flights)



Figur 34. TCT-verktyg (från Soilmec broschyr, Trevi Group)

TCT-metoden resulterar i pelare som är likvärdiga med konventionella CMC-metoden.

9.11. Bedömning av CMC-metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong

CMC-metoden bedöms vara en intressant metod för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong. Metoden har sedan den uppfanns 1994 utvecklats och utgör idag sannolikt en av de snabbast växande jordförstärkningsmetoderna. Metoden har använts för grundläggning av åtminstone några delsträckor av höghastighetsbanor i Europa och kan

skräddarsys genom anpassning av pelardiameter, pelarelementets hållfasthets och deformationsegenskaper, centrumavstånd och täckningsgrad. Med dagens maskiner medges installation av pelare i relativt fasta jordar samt till stora djup.

Metoden har ännu inte använts i Sverige. Dock har åtminstone en liknande applikation utförts i Arboga (High Speed Piles) men den kan knappast utgöra en referens för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.

En annan begränsning utgörs av de mycket lösa svenska lerorna. Även om metoden använts i finkornig jord anser rapportförfattarna att stor försiktighet bör iakttas i dessa fall. De relativt slanka, oarmerade CMC-pelarna har mycket begränsad förmåga att ta upp skjuvkrafter vilket är en försvårande omständighet i typiska svenska leror. Metoden bör provas i svenska förhållanden, i synnerhet om den kan komma att föreskrivas för förstärkning av lösa leror.

Metoden är likt andra jordförstärkningsmetoden känslig för hindrande sten och block som försvårar eller gör metoden omöjlig att utföra utan utskiftning eller förborring. Det är därför av stor vikt att undersöka och bedöma risken för påträffande av sten- och block i den aktuella jordprofilen.

CMC-metoden är sannolikt intressant i vissa situationer där speciella restriktioner avseende omgivningspåverkan föreligger. Den roterande metoden innebär vibrationsfri installation av mycket styva, lastbärande element i ett system som medger mycket begränsade totalsättningar. Maskinerna genererar mindre buller jämfört slagna betongpålar.

På marknader där metoden är väletablerad är installationskostnaden låg, kanske tom lägre än prefabricerade betongpålar.

CMC-metoden har i Frankrike använts för åtminstone en delsträcka med höghastighetsbana. Det vore önskvärt med fler referenser från järnvägsprojekt och en djupare analys av dynamiska effekter och dess inverkan på den CMC-förstärkta jorden.

9.12. Referensprojekt

- Channel tunnel rail link, CTRL 310
- A case study of ground improvement using semi-rigid inclusions for breakwater bridge
- Ground Improvement for a high speed railway near Madrid (Spain)
- Embankment on soft soil reinforced by CMC semi-rigid inclusions for the high speed railway SEA

10 Continuous flight auger (CFA)

10.1. Allmänt

Continuous Flight Auger eller CFA är in-situ tillverkade betongpålar. Metoden klassificeras som icke-massundanträngande eftersom en jordvolym motsvarande pålens nominella volym skruvas upp vid tillverkning av pålen. En skruvborr försedd med vingar längs med hela sin längd borrar ner till erforderligt djup, se figur 35. Skruvborren är ihålig för att medge pumpning av betong genom ett hål i skruvens nedre del. När skruven nått erforderligt djup pumpas betong ut i jorden under samtidig uppdragning av skruvborren. Därefter sänks en armeringskorg ner i det färska betongelementet. Installationsförfarandet bygger på principen att pålelementet kan tillverkas in-situ utan foderrör eller stödvätska. Metoden förutsätter istället att borrar-skrubborren fylls med lagom mycket jord vid borrning till erforderligt djup. Jorden mellan vingarna stöttar då borrhålsväggarna och förhindrar kollaps av omkringliggande jord. Volymen uppskruvad jord anpassas genom kontroll av förhållandet mellan skruvborrens rotations- och sjunkningshastighet. För långsam eller snabb rotation i förhållande till sjunkningshastigheten kan medföra att de horisontella spänningarna i jorden reduceras och att risken för okontrollerade sättningar ökar. När metoden utförs korrekt säkerställs pålens diameter och kontinuitet. Minsta erforderliga sjunkningshastighet som krävs för att säkerställa fylld auger vid borrning kan beskrivas enligt nedanstående formel (Viggiani, 1993):

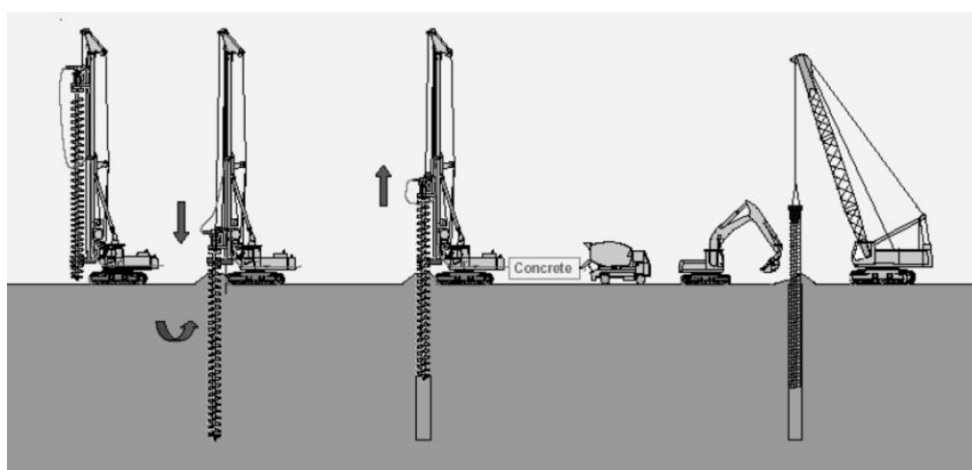
$$V_{a(\min)} \geq nl (1 - (d_0^2/d^2))$$

Where $V_{a, (\min)}$ = minimum penetration rate (m/min), n = rate of rotation of the drill tool (rev/min), l = auger pitch (m), d = outer auger diameter (m) and d_0 = auger stem diameter (m)

Då installationsförfarandet är skonsamt och i praktiken fritt från vibrationer nyttjas metoden ofta vid pålning nära känsliga konstruktioner.

10.2. Standard

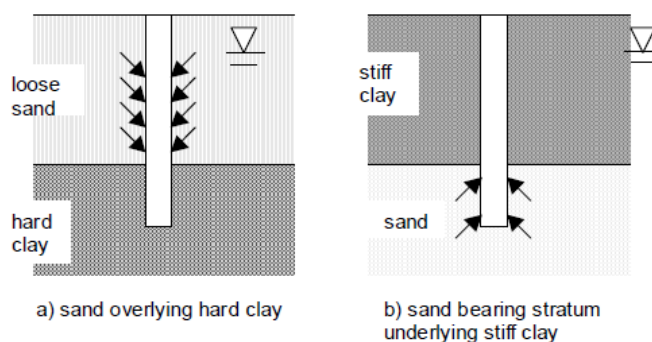
Metoden omfattas av utförandestandarden Eurocode EN 1536:2010 borrarade pålar.



Figur 35. Installationsprocess CFA-pålar (från Bauer Mashinen)

10.3. Lämpliga jordar

Metoden lämpar sig väl i homogena halvfasta till fasta leror, siltiga, sandiga och grusiga jordar. Betydande erfarenhet och noggrannhet erfordras framförallt i icke-homogena jordar där t.ex. ett lösare jordlager överlagrar ett fastare lager som måste passeras. I sådana fall kan det vara svårt att bibehålla jämn borrhjunktshastighet när det hårdare lagret genomborras. Delen av skruvborren ovan det hårda lagret kan då skruva upp för mycket jord, vilket kan medföra kollaps av borrhålväggar, se figur 36. Följden kan i värsta fall bli att pålens verkliga diameter blir mindre än nominell diameter.



Figur 36. Over-flightning (från Dan A. Brown)

CFA pålar är en fördelaktig metod framförallt när pålar skall installeras i en jord med relativt homogena egenskaper. Installationskapaciteter om 300 - 450 m/dag rapporteras för Φ 45 cm diameter pålar vid pällängder < 20 m.

Metoden har vunnit stora framgångar internationellt och utförs i en rad olika länder.

Eftersom pålarna tillverkas in-situ har de geotekniska förutsättningarna stor inverkan på resultatet. Vissa förhållanden ställer avsevärt större krav på vald utrustning och erfarenheten hos entreprenören:

- Mycket lösa leror
- Löst lagrad sand vid ytligt belägen grundvattenyta
- Kraftigt varierande jordlagerföljd
- Pällängder > 25 m
- Blockig jord

Införandet av datorstyrd installationsprocess och moderna, kraftiga maskiner utgör en viktig milstolpe avseende metodens tillämpbarhet. Normalt armeras de översta 10-15 m där momentpåkänningarna i pålen är som störst. Betongen måste givetvis ha rätt konsistens med avseende på pumpbarhet men hänsyn måste också tas till efterföljande installation av armeringskorg.

10.4. Utrustning

CFA pålar utförs vanligtvis med larvgående, hydrauliska maskiner, se figur 37. En normal betongpump krävs också samt kontinuerlig tillgång till betong. CFA pålar har utförts till mycket stora djup (35 m) och med diameter upp till 1 200 mm. Mer vanligt är pällängder upp till 20 m och pelardiameter upp till 800 mm.



Figur 37. CFA-maskin typ Soilmec (från Trevi Group)

Följande parametrar mäts och dokumenteras kontinuerligt under borrhning till erforderligt djup:

- Sjunkningshastighet
- Rotationshastighet
- Spetsens djup
- Vridmoment
- Matningskraft

Följande parametrar mäts och dokumenteras kontinuerligt under uppdragning av skruven och pumpning av betong:

- Pumpad betongvolym
- Pumptryck
- Rotation under uppdragning
- Spetsens djup under markyta

10.5. Material

- Normal föreskriven betongkvalitet för CFA-pålar är C25/30.
- Sättnmättet för betong kontrolleras för varje betongleverans och är normalt 200 mm +/- 25 mm.
- Betongkvaliteten provas med cylindriska provkroppar, 150 mm x 300 mm.

I stora projekt rekommenderas statisk provbelastning för att utvärdera pålens bärförmåga.

En viss överkonsumtion av betong är oundviklig. Typiska värden på överkonsumtion är 15 - 20% av teoretisk volym och beror på jordens egenskaper och installationsförfarandet.

10.6. Svenska erfarenheter

CFA pålar har använts i Sverige åtminstone en gång (sockersilo Eslöv, Skåne). Ett projekt med en variant av CFA, s.k. cased CFA, har nyligen utförts för ett påldäck i Stockholm. En maskin med s.k. dubbelrotation nyttjades där skruvborren roterar skruvborren invändigt ett foderrör som också roterar. Fördelen är minskad risk för over-flighting, d.v.s. att för mycket jord skruvas upp. Foderöret är försett med skär vilket möjliggör effektivt tillverkning av s.k. sekantpåleväggar.

10.7. Bedömning av metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong

CFA pålar främsta användningsområde är som individuella lastbärande pålelement. De har i vissa fall också dimensionerats och använts som oförstärkta betongelement för grundläggning av järnvägsbankar. Vid gynnsamma geotekniska förutsättningar är installationsprocessen snabb och säker. Överkonsumtion av betong kan minimeras pga utebliven överlängd. Pålelementen kan vid behov armeras men behöver då endast dimensioneras för slutskede. Hänsyn till påkänningar vid lyft som för prefabricerade betongpålar erfordras inte.

Metoden kan vara intressant vid pålning nära befintliga konstruktioner där vibrationskraven är höga. Metoden är också relativt tyst jämfört slagna betongpålar. Den bedöms generellt vara ett dyrare alternativ jämfört slagna betongpålar och är sannolikt inte ekonomiskt försvarbar, annat än i undantagsfall.

10.8. Jordförstärkning med oarmerade betongelement utförda med CFA-teknik

10.8.1. Milano-Bologna

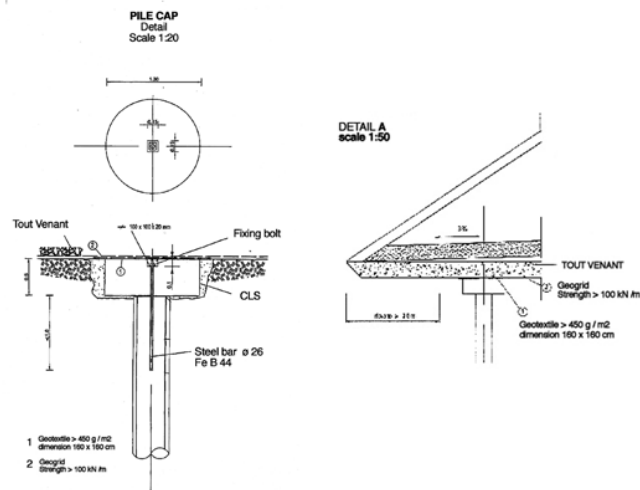
En höghastighetsbana belägen mellan Milano och Bologna i Po-dalen i Italien är delvis grundlagd på 6-7 m höga bankar. Undergrunden på delsträckan utgörs av upp till 60 m mäktiga lager av lösa alluviala sediment av halvfast till fast kohesionsjord med följande utvärderade egenskaper:

- γ_n : 19 kN/m³
- q_y : 850 - 1700 kPa
- C_y : 50-100 kPa
- c' : 5 - 10 kPa
- φ' : 25°

Inledningsvis förordades konsolidering av de alluviala sedimenten genom nyttjande av vertikaldräner och förbelastning för bankhöjder understigande 5 m. För högre bankhöjder projekterades konventionella CFA pålar med centrumavstånd 2,8 x 2,8 m i kvadratisk rutmönster. Generalentreprenören antog sedermera ett sidoförslag och utförde i stort hela grundläggningen av delsträckan med oarmerade betongelement installerade med CFA utrustning, se figur 39. Trots att kostnaden för CFA-elementen vida översteg motsvarande kostnad för vertikaldräner och förbelastning kunde god totalekonomi erhållas då byggtiden kortades väsentligt för alternativet med CFA-element. De oarmerade CFA betongelementen har en diameter av 500 mm och utfördes med längder mellan 8 – 30 m.

De oarmerade betongelementen har endast liten förmåga att ta upp skjuvkrafter. Dessa måste därför tas om hand i det lastfördelande lagret. I detta fall försågs betongelementen med pålplattor för överföring av lasterna ner till betongelementen, se figur 38. Dimensionering och utförande av det lastfördelande lagret är därvid viktigt för ett lyckat

resultat. Hänsyn måste tas till betongelementens lastkapacitet, lastöverföring mellan betongelementen och även stansning.



Figur 38. Pålplatta och lastfördelande lager (från Trevi Group)

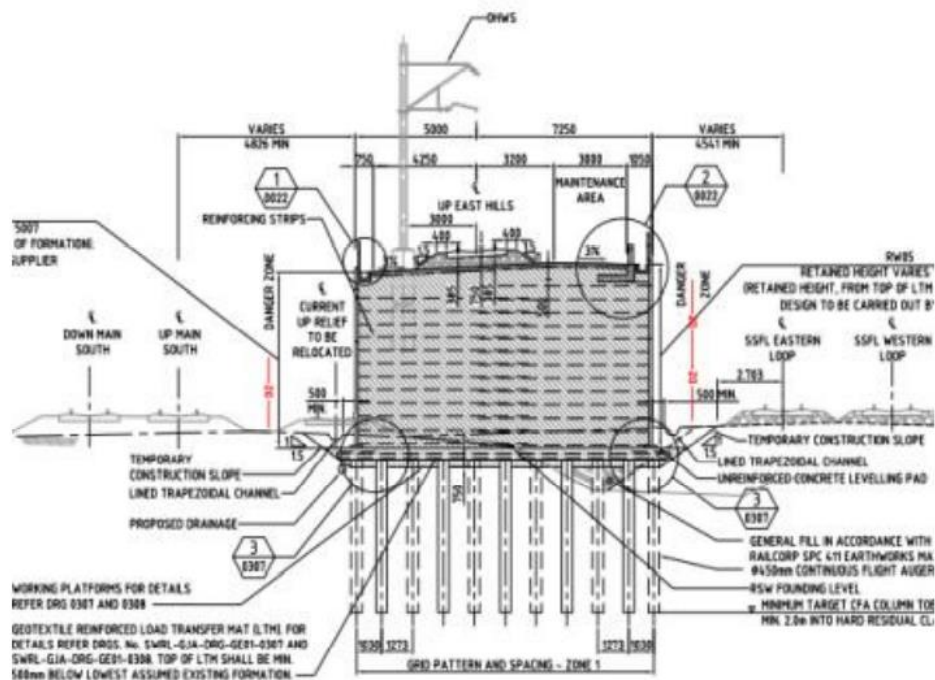


Figur 39. CFA-element för Milano-Bologna high-speed railway (från Trevi Group)

10.8.2. Glenfield junction, Sydney

Denna befintliga järnväg i Sydney, Australien, behövde uppgraderas med nya spår intill de befintliga. För del av sträckan där undergrunden utgörs av lösa till fasta alluviala sediment krävdes bankhöjder upp till 7,6 m. Dessa bankar uppfördes enligt principen armerade jordväggar (eng. "reinforced earth walls"), se figur 40.

För grundläggningen valdes oarmerade CFA betongelement och ett lastfördelande lager.



Figur 40. CFA-element för tillfartsramp (från Pan, Merry, Faulkner, Li, Parsons Brinkerhoff)

11 Full-displacement piles (även eng. screw piles eller am. eng. drilled displacement piles)

Massundanträngande pålar omfattar ett stort antal olika påltyper, från slagna betongpålar till skruvpålar (eng. screw piles eller am. eng. drilled displacement piles). Med massundanträngande pålar avses i denna rapport pålar som tillverkas in-situ genom företrädesvis rotation. En annan benämning på denna typ av pålar är Full Displacement Piles (FDP). Massundanträngning sker helt eller delvis dels genom lateral undanträngning av jorden dels genom en nedåtriktad matningskraft. Ofta klassificeras metoderna efter verktygets utformning och installationsmetod.

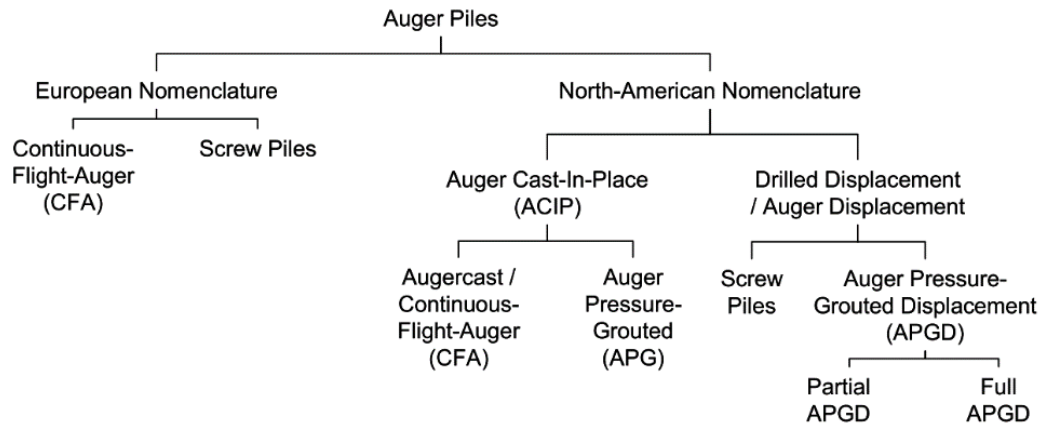
Två principiellt olika tekniker för FDP förekommer;

- Roterande
- Vibrerande

I dagligt tal avser begreppet full displacement piles vanligen roterande teknik. FDP är en modifiering av continuous flight auger påltekniken. Användandet av FDP med roterande teknik ökar på många håll i världen, till stor del beroende på utvecklingen av allt kraftfullare maskiner. FDP pålar har bärförmåga som överstiger bärförmågan för geometriskt motsvarande icke-massundanträngande pålar utförda i samma jordprofil.

Tillverknings sättet och utrustningen är lika som för CMC-metoden men FDP pålar armeras och dimensioneras som pålar. Installationsprocessen ger upphov till förhållandevis lite buller och är för roterande teknik även vibrationsfri. Den lämpar sig därför väl för tätbebyggda områden där kraven på minimal omgivningspåverkan är stora.

Nomenklaturen för FDP skiljer sig mellan Europa och Nordamerika. Klassificering av de olika teknikerna kan ske enligt figur nedan.¹

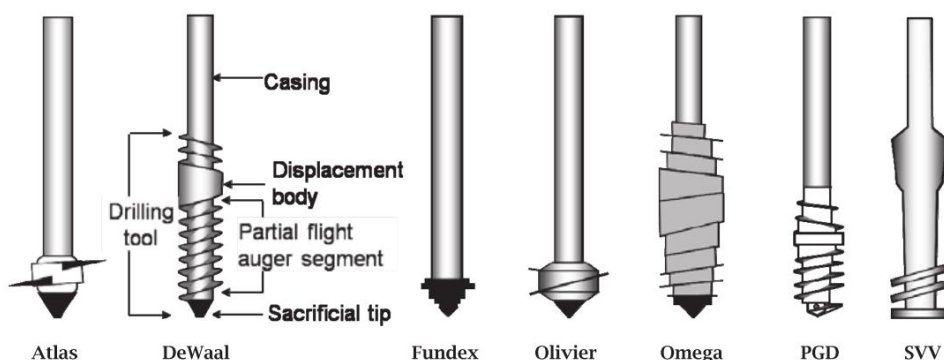


Figur 41. Nomenklatur FDP i Europa och Nordamerika (M. Prezzi, Purdue University, USA)

Fördelarna med delvis eller helt massundanträngande pålar av typen FDP enligt detta avsnitt jämfört helt massundanträngande pålar som tex. slagna betongpålar eller slagna stålrörspålar är framförallt:

- Snabb installation
- Lite eller ingen returspoil (jmf. med CFA-pålar eller grävpålar)
- Inga vibrationer
- Mindre buller
- Lämpliga vid förhållanden som inte är gynnsamma för helt massundanträngande pålar

FDP-metoderna klassificeras vanligen enligt det verktyg som används. Nedan redovisas översiktligt några kommersiellt tillgängliga metoder, som alla räknas till drilled displacement piles med roterande teknik, se figur 42.



Figur 42. Exempel på olika drilled displacement piles (från Prasenjit, Prezzi, Basu, 2010)

¹ Overview of construction and design of auger cast-in-place and drilled displacement piles, Monica Prezzi, Purdue University, USA

11.1. Roterande teknik

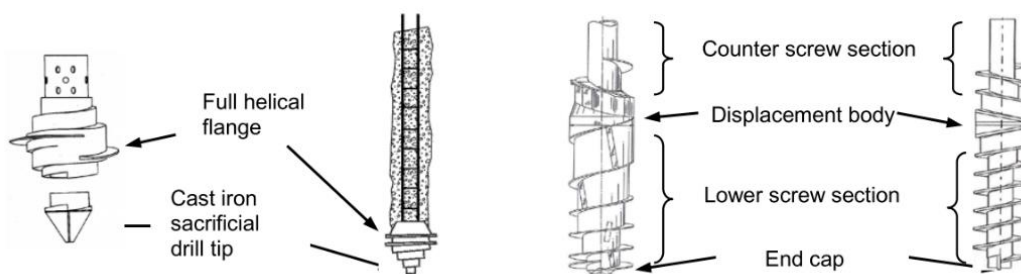
Verktygen som används är utformade på olika sätt beroende på tillverkare men utgörs i regel av följande huvudkomponenter:

- En koniskt formad nedre del försedd med vingar (eng. flights)
- Ett bredare mittenparti där massundanträngningen sker
- En anordning för utmatning av betong i verktygets nedre del

Verktyget sitter monterat i den nedre delen av en ihålig borrstång, se figur 43. Beroende på metod roteras verktyget medurs eller moturs vid nedmatning och uppdragning, intermittent medurs/moturs eller så sker uppdragning utan rotation. Beroende på metod och tillverknings sätt erhålls pålar med slät eller skruvformad mantelyta.

FDP-metoden bör tillämpas med försiktighet i jordar med spetsmotstånd $CPT_{qc} < 1 \text{ MPa}$ eller $SPT_N < 5^1$.

I regel erfordras maskiner med stor nedmatningskraft, 200 – 300 kN och mycket höga vridmoment 150 – 500 kNm där FDP-metoden är vanligt förekommande.



Figur 43. Korta och långa skruvspetsar, Atlas, Fundex till vänster, Omega och De Wall till höger (från Larish. M.D, Williams D. J, Sheurman A., 2017)

11.2. Lämpliga jordar

En lämplig jord för FDP-pålar rapporteras vara ren sand, lös lagrad vid ytan med ökande densitet mot djupet. Risken för sk over-flightning är lägre hos FDP-pålar jämfört CFA pålar och är därför i detta avseende därför är ett säkrare alternativ. Å andra sidan är möjliga installationsdjup med FDP-pålar kanske något mer begränsande jämfört CFA, åtminstone för närvarande. Sandiga jordar är fördelaktiga eftersom en packningseffekt sker i samband med installationen och därmed medför jordförstärkning av omkringliggande jord. Lösa leror anses vara mindre lämpliga. Block i jord eller fyllning kan försvåra utförandet och medföra skador på installationsverktyget.

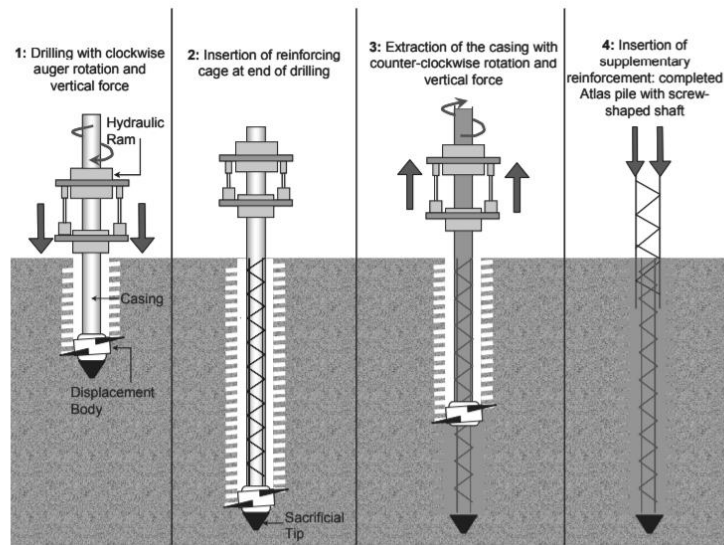
FDP-pålar kan för närvarande utföras i jordar med CPT_{qc} upp till 20 MPa (tunna lager med högre motstånd kan ofta penetreras).

Nedan redovisas översiktligt några av de FDP-metoder som erbjuds kommersiellt.

11.3. Atlaspålen

Atlaspålen är en in-situ tillverkad betongpåle av så kallad dual-displacement typ vilket innebär att massundanträngning sker både vid nedborrning och uppdragning, se figur 44. Ett verktyg som är monterat i nedre delen av ett stålrör roteras ner med hjälp av en

hydraulisk rotationsmotor. Två av varandra oberoende hydrauliska cylindrar medger kontinuerlig nedföring av verktyget. Vid svår drivning genom hårda jordlager kan båda cylindrarna verka tillsammans så att borrhning ändå medges. Vid nedföring av verktyget är materialhålet i verktygets undre del försett med en så kallad offerspets så att vatten och jord inte tränger i stålroret. När verktyget nått erforderligt djup sänks en armeringskorg ner i stålroret. Därefter roteras verktyget motsols vilket får offerspetsen att lossna. Betong pumpas ut genom materialhålet under samtidig uppdragning av verktyget. Verktygets utformning och rotationsriktning vid uppdragningen medför att en räfflad yta bildas, se figur 45. När verktyget nått markytan kan kompletterande armering sänkas ner i den färska pålen. Normala borrhångsdiametrar för metoden är 0,31 – 0,56 m och normala diametrar för den massundanträngdande delen är 0,45 – 0,81 m. Installationsdjupen för påltypen är 22 - 25 m djup. Vid installation i mycket lösa jordar kan ett tunnväggigt foderrör användas som lämnas kvar i borrhålet tillsammans med offerspetsen.



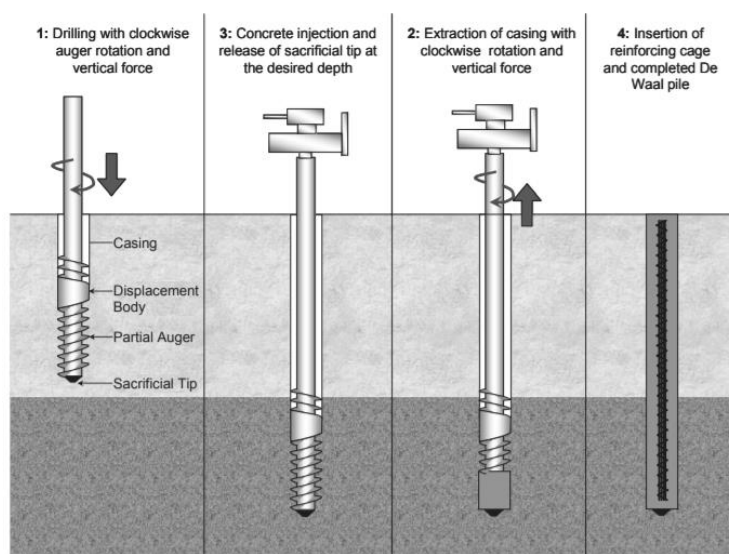
Figur 44. Atlas-påle (från M. Prezzi, p. Basu)



Figur 45. Framschaktade Atlas-pålar (från Franki Grundbau)

11.4. De Waalpålen

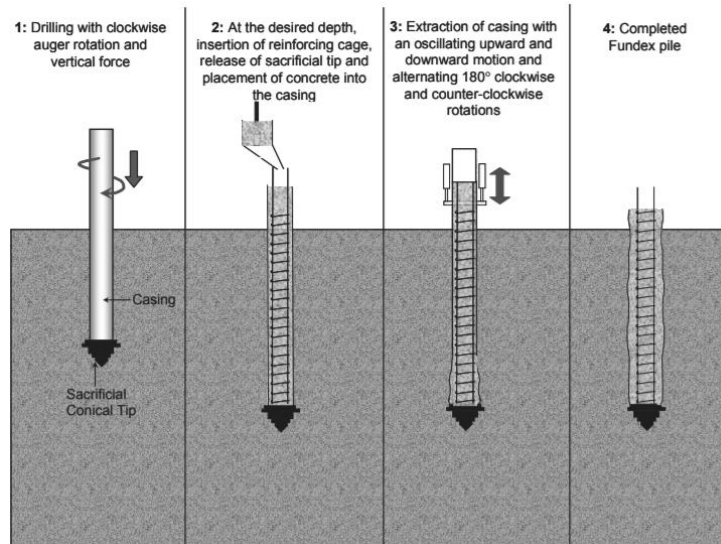
Verktyget för utförande av De Waal-pålar består av en offerspets, en delvis massundanträngande skruv och en massundanträngande mittendel enligt figur 46. Verktyget sitter monterat i nedre delen av en ihålig borrstång. Hålet i botten av verktyget för utpumpning av betong är förslutet av offerspetsen under neddrivningsfasen. Under neddrivning roteras verktyget och borrstången medsols till erforderligt djup. Röret fylls därefter med betong till en nivå ovan befintligt markyta varefter verktyget förs tillbaka upp mot markytan under samtidig rotation medsols. Skruvens vingar ovanför det breda mittenpartiet förhindrar jordtransport uppåt längs med stålröret. Betongens nivå i stålröret bibehålls på en nivå ovan markytan under hela uppdragningsfasen. Armeringen sänks ner i den färska pålen. Manteltytan hos De Waal pålar blir i det närmaste slät.



Figur 46: De Waal-pålen (från M. Prezzi, P. Basu)

11.5. Fundexpålen

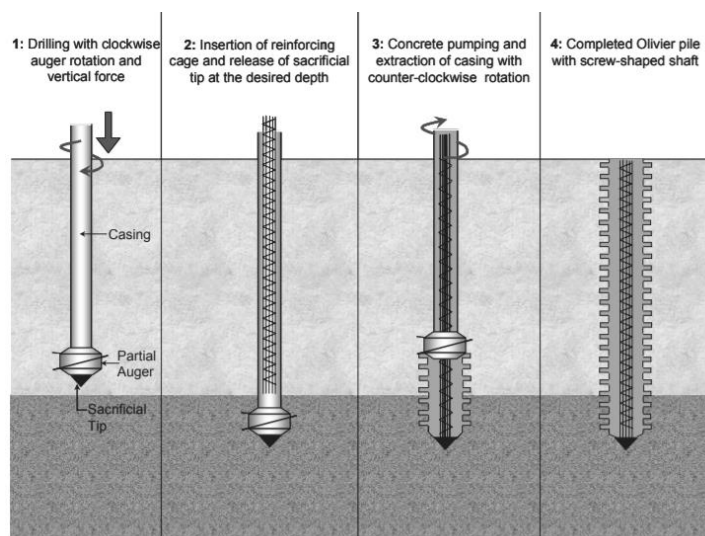
Vid installation av Fundexpålar används en kort, koniskt formad spets försedd med vingar som monteras i nedre delen av ett stålrör, se figur 47. Röret roteras medurs och trycks samtidigt ner i jorden. Skarven mellan spetsen och stålröret är vattentät. I samband med nedborrning av stålröret trängs jord ut mot borrhållsväggarna. Vid behov kan borring kombineras med vattenspolning eller injektering genom spetsen för att underlätta nedborrning till erforderligt djup. Därefter frigörs den koniska spetsen som formar den förstora spetsen på pålen. Armeringskorgen sänks ner i foderröret och betong pumpas under samtidig uppdragning och växelvis rotation av stålröret. Stålröret roteras växelvis medurs/moturs med 180° vinkel. Pålens manteltyta blir i det närmaste helt slät. Den koniska spetsens diameter varierar mellan 0,45 – 0,67 m medan stålrörets diametrar vanligen varierar mellan 0,38 – 0,52 m. Pålar med längder upp till åtminstone 25 - 35 utförs rutinmässigt medan maskiner för utförande av pålar till ca 50 m förekommer i södra USA.



Figur 47. Fundex-pålen (från M. Prezzi, P. Basu)

11.6. Olivierpålen

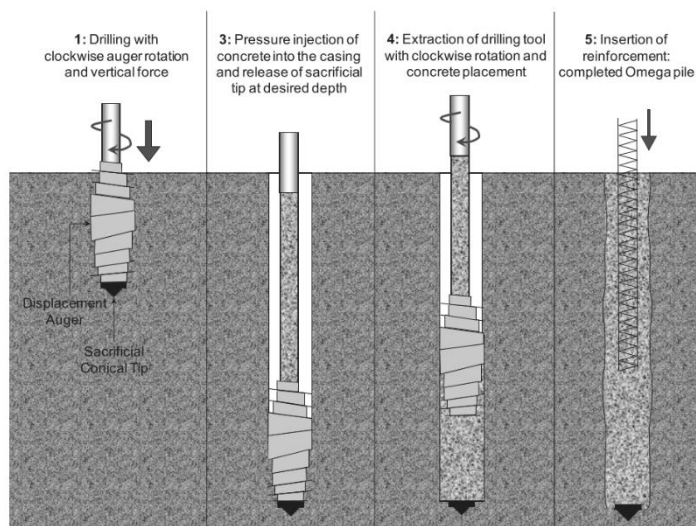
Installationsprocessen för Olivierpålen påminner om den för Atlaspålen. Atlaspålen utförs med så kallad bottom-drive, det vill säga placering av rotationsenheten nertill på maskinen. Nedmatningshastigheten med Atlaspålen är också konstant. Olivierpålar däremot utförs med så kallad top-drive (rotationsenhet monterad i toppen av gejdern på maskinen) och med möjlighet att variera nedmatningshastigheten. Även här är det koniska verktyget försett med en så kallad offerspets, se figur 48. Verktyg sitter monterat i nedre delen av ett stålrör. Vid nedborrning roteras stålröret medurs under samtidig inverkan av en nedåtriktad matningskraft. När verktyget nått erforderlig djup frigörs offerspetsen och en armeringskorg sänks ner i foderröret. Betong pumpas därefter ner i röret genom en trätt. Stålröret och verktyget dras upp ur jorden under samtidigt rotation moturs. Likt Atlaspålen antar mantelytan hos Olivierpålar en skruvformad yta.



Figur 48. Olivier-påle (från M. Prezzi, P. Basu)

11.7. Omegapålen

Omegapålar utförs med ett massundanträngande, koniskt format verktyg, i botten försett med ett materialhål för utmatning av betong. Avståndet mellan vingarna ökar från ändarna upp till motsvarande den massundanträngande mittendelens diameter. Verktöget är monterat i nedre delen av ett stålrör som under nedborrning är förslutet med en så kallad offerspets, se figur 49. Offerspetsen frigörs från verktyget vid erforderligt djup. Pumpning av betong med övertryck sker under samtidig medsols uppdragning av verktyget. Mantelytan blir i det närmaste slät. Armeringskorgen vibreras ner i den nyss tillverkade pålen. Det är också möjligt att sänka ner armeringskorgen i stålröret innan uppdragning av verktyget.



Figur 49. Omegapålen (från M. Prezzi, P. Basu)

11.8. Vibrerande teknik

Med vibrerande teknik vibreras ett stålrör ner i jorden till erforderligt djup med hjälp av en så kallad ring-vibrator (se figur 50). Rörets nedre ände förses med en så kallad offerplatta för att undvika inträngning av jord i röret under neddrivningsfasen. Vid erforderligt djup sänks armering ner i röret. Därefter pumpas betong ut i rörets undre del samtidigt som stålröret dras upp ur jorden. Betongen fyller ut den kavitet som skapas när röret dras upp. Betongen pumpas med visst övertryck för att säkerställa pålens integritet.



Figur 50. Full-displacement pile med vibrerande teknik från (www.liebherr.com)

Med hjälp av moderna maskiner medges nedmatnings/uppdragningskrafter upp till åtminstone 400 kN. Vid behov kan spolning genom rör som monteras på stålröret nyttjas för att öka installationshastigheten och minska alstrade vibrationer.

11.9. Produktionsparametrar

Dagens moderna maskiner är försedda med sensorer som mäter och lagrar information om nedmatningskraft, vridmoment, pumptryck och pumpflöde.

Följande produktionsparametrar kontrolleras för att säkerställa korrekt utförande:

- Betongkvalitet (tryckprover)
- Pelarplacering i plan
- Lutning pelare (vertikalitet gejder)
- Vridmoment och nedmatningskraft (roterande teknik)
- Hydraultryck (vibrator)
- Övertryck betong
- Stigningshastighet
- Materialkonsumtion
- Armering (utförande)
- Integritet pelare (Pile Integrity Test, PIT)
- Diameter (framschaktade pelartoppar)

11.10. Dimensionering

Dimensionering av skruvpålar sker i stort enligt principen för massundanträngande pålar.

$$Q_{ult} = Q_{base, ult} + Q_{skaft, limit}$$

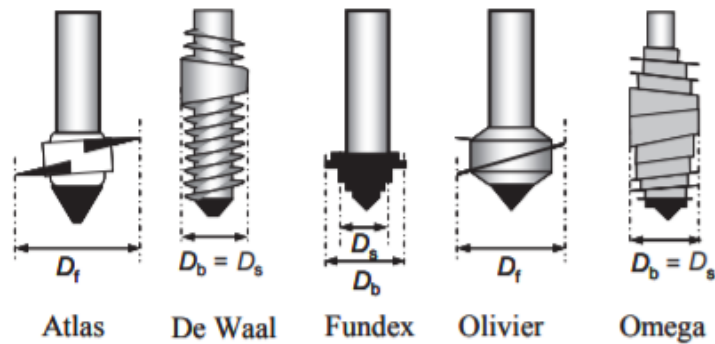
där $Q_{base, ult}$ och $Q_{skaft, limit}$ är brottbärförmåga vid spets respektive bruksbärförmåga längs med mantelytan.

$$Q_{base, ult} = q_b A_b$$

$$Q_{base, ult} = A_s \sum_i^n q_{si} h_{si}$$

Där i representerar antalet jordlager där mantelbärförmågan beräknas; n är totala antalet lager som korsar pålen; q_b och q_{si} är spets och mantelbärförmåga; A_b är pålskaftets diameter; D_b och D_s är pålspetsens och pålskaftets nominella diametrar; h är tjockleken av i :nte jordlagret. De nominella pålspets- och pålskaftdiametrarna beror på verktygets geometri. För Atlas och Olivierpålar antas D_b och D_s vara lika med den uppmätta maximala diametern av verktygets vingblad. För Fundexpålen är D_b lika med den maximala uppmätta diametern av den koniska spetsen, och D_s är lika med stålrörets maximala diameter. För andra massundanträngande pålar med släta mantelytor, tex De Waal och Omegapålar antas D_s och D_b vara lika med diametern hos den breda massundanträngande mittendelen.

Den dimensionerande diametern för beräkning av mantelfriktion för de olika metoderna antas enligt figur 51.



Figur 51. Antagen diameter för olika påltyper (från M. Prezzi, P. Basu, 2010)

Dimensionering sker enligt samma princip som för CFA pålar, men utan den spänningslättning som uppstår kring CFA-pålar. Förhållandet mellan horisontella och vertikala spänningar i jorden kan för massundansträngande pålar vara väsentlig högre än 1,0 olikt borrarade pålar och CFA pålar.

Dimensionering baseras ofta på in-situ metoder som CPT_{qc} spetsmotstånd, SPT_N värde och pressometerförsök.

Dimensionering kan utföras enligt de Belgiska rekommendationerna som följer Eurocode 7.

11.11. Metodens lämplighet för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong

Massundansträngande pålar av roterande eller vibrerande typ är intressanta när slagna betongpålar bedöms orsaka för stor omgivningspåverkan. En fördel är att de gjuts in-situ vilket gör kostnaden oberoende av avståndet till pålfabriken.

Metoden bedöms inte vara konkurrenskraftig jämfört slagna betongpålar annat än i undantagsfall där slagna pålar inte medges med hänsyn till buller och/eller vibrationer.

12 Slutsatser och rekommendationer

Nyttjandet av jordförstärkning med styva pelare tillverkande med cementerande bindemedel eller krossmaterial har ökat de senaste decennierna. Innovation och utveckling inom området är omfattande och på kontinenten och i övriga världen finns betydande erfarenhet av metoder som ännu inte introducerats eller provats i Sverige.

De delar av den nya stambanan som har sth 320 km/h blir Sveriges första höghastighetsbana som grundläggs med ballastfri överbyggnad inklusive spårplatta i betong. Detta ställer krav på en i stort sett sättningsfri undergrund (20-40 mm efter 10 år). Vissa jordförstärkningsmetoder kan trots detta stränga krav övervägas, men det förutsätter att kraven som är ställda på den nya stambanan för 320 km/h noga beaktas och att funktionen utprovas i ett fullskaleförsök före godkännande i större skala.

Föreliggande rapport behandlar följande metoder:

- Kalkcementpelare
- Djupstabilisering, våta metoden
- Stenpelare
- CMC-pelare
- CFA-påelement
- Full displacement piles (FDP)

Författarnas bedömning av dessa metoders lämplighet sammanfattas enligt nedan:

12.1. Kalkcementpelare

Det finns betydande erfarenhet av jordförstärkning med kalkcementpelare i Sverige. Regelverk för dimensionering, utförande och kontroll är väletablerade. Betydande erfarenhet finns från bl a tågsträckan mellan Göteborg och Trollhättan där en mycket stor mängd kalkcementpelare utfördes för järnvägsbankar i områden med mycket sättningskänsliga lösa leror. Omfattande fullskaleförsök utfördes före utbyggnaden påbörjades. Därtill pekar forskning på att kalkcementpelarmetoden är speciellt lämplig för minskning av de dynamiska effekter som uppstår när tåg med hög hastighet passerar över områden med lös undergrund (se vidare forskningsprojekt Ledsgård).

En nackdel med metoden är att den vanligen inte dimensioneras för de stränga sättningskrav som råder för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong. Det är sannolikt nödvändigt att tillämpa överlaster för att ta ut sättningarna innan gjutning av betong kan ske. Nyttjande av överlast innebär ökande kostnader och kanske framförallt längre byggtid. Ytterligare en nackdel kan vara maskinernas förmåga att effektivt blanda leror med skjuvhållfasthet > 40 kPa eller leror där naturlig vattenkvot är väsentligt lägre än flytgränsen. Den svenska maskinparken uppgår idag till ca 15 – 20 maskiner och den totala kapaciteten bör beaktas om stora mängder kalkcementpelare planeras.

Kalkcementpelarmetoden kan vid behov kombineras med inblandning av vatten för att förbättra inblandningsarbetet och skapa homogena pelare även i svårblandande leror. Tekniken har framförallt utprovats genom Modified Deep Mixing (MDM) metoden men andra erfarenheter finns också. Erfarenheterna av att kombinera den torra metoden med vatten är dock trots allt begränsade och fullskaleförsök rekommenderas i de fall att lämpliga leror finns inom sträckningen för aktuell del av planerad HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.

12.2. Djupstabilisering, våta metoden

Trots att vi i Norden är ledande när det gäller djupstabilisering med den torra metoden är den våta metoden i det närmaste okänd. De erfarenheter som författarna känner till är relaterade till Modified Dry Mixing.

Den våta metoden är flexibel och kan utföras i jordar där kalkcementpelare inte är lämpliga. Metoden anses vara intressant för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong bl.a. av följande skäl:

- Erfarenheterna av djupstabilisering för järnvägsbankar i Sverige är generellt mycket goda.
- De grundläggande principerna för dimensionering, utförande och kontroll av kc-pelare är i vissa delar även tillämpliga på den våta metoden.
- Wet Deep Mixing medger utförande av djupstabiliseringspelare med högre kompressionsmodul, sannolikt lägre variationskoefficient, även i jordar som inte är lämpade för den torra metoden.
- Djupstabilisering är en effektiv metod för att reducera effekten av skadliga skjuvvågor (höghastighetsproblemet).
- Den våta metoden har använts i Japan i samband med utbyggnad av det japanska höghastighetståget Shinkansen.

De japanska referenserna är inte lättillgängliga eftersom språket ofta begränsas till japanska. Rapportförfattarna har fått ta del av vissa referenser från en japansk specialistentreprenör. Sannolikt finns betydligt fler erfarenheter. Det vore värdefullt att undersöka och få ta del av dessa eftersom Japan besitter de kanske största samlade erfarenheterna av djupstabilisering. De har även betydande erfarenhet av höghastighetsbanor.

12.3. Stenpelare

Svenska erfarenheter av stenpelare är relativt begränsade och utgörs främst av grundläggning för tankar i Helsingborg. Ett intressant projekt för en vägbank har utförts i Frövifors, då med cementförstärkta stenpelare med mycket hög tryckhållfasthet och kompressionsmodul. Ett projekt har även utförts för väg 73 Stockholm-Nynäshamn.

Stenpelare utförs vanligen utan tillsats av cementslurry i silt- och lerjordar och den förstärkta jordens egenskaper förbättras till följd av:

- Pelarnas höga inre friktionsvinkel
- Lastöverföring till pelarna som har hög kompressionsmodul, vanligen 20 – 50 gånger högre än omkringliggande jord.
- Snabb konsolidering av omkringliggande jord pga pelarnas höga dränerande förmåga
- Packning av omkringliggande jord (sker främst i friktionsjord)

Installationen är relativt okomplicerad och snabb. Pelarnas förmåga provas indirekt vid tillverkning av varje enskild pelare eftersom otillräckligt mottryck hos omkringliggande jord resulterar i minskat motstånd i vibratorn samt ökad materialåtgång. Stenpelarmetoden bygger på konsolidering av omkringliggande jord. Vid uppbyggnad av järnvägsbankar utvecklas ofta en betydande del av sättningarna. En möjlighet för HHJV med ballastfri överbyggnad kan vara att tillämpa förbelastning utöver bankuppfyllnad innan gjutning av den fasta spårplattan. Stenpelarmetoden har stora miljömässiga fördelar eftersom inert

krossmaterial används. I Sverige finns ofta tillgång till relativt billigt krossmaterial vilket kan medföra ekonomiska fördelar.

En nackdel med metoden är att provning av pelarnas egenskaper inte medges på ett rationellt sätt därav rekommenderas fullskaleförsök för kommande järnväg för höghastighetståg. Stenpelare kan utföras i mycket lösa leror men riskerna för efterföljande krypdeformationer ökar, speciellt i jordar med högt organiskt innehåll. En konservativ nedre begränsning kan vara skjuvhållfasthet > 15 kPa.

Teknikerna med vibrationsfri tillverkning av stenpelare bedöms vara intressanta. Enligt uppgifter från Japan medger de skonsammare installation, vilket skulle kunna utöka metodens tillämpningsområde till jordar med skjuvhållfasthet < 15 kPa.

12.4. CMC-pelare

CMC-metoden har vuxit markant på flera kontinenter de senaste 10-15 åren. Metoden har tagit marknadsandelar från såväl stenpelare som wet deep mixing. CMC-metoden används framförallt för grundläggning av lättare industri- och lagerbyggnader och vägbankar men referenser finns även från tyngre och mer sättningskänsliga konstruktioner som oljetankar och järnvägsprojekt. De slanka, oarmerade och styva CMC-elementen som ofta placeras med glesa centrumavstånd förefaller dock utgöra en osäkerhetsfaktor. Fördjupade studier anses nödvändiga och detta anses speciellt viktigt i lösa, sensitiva leror.

Sammanfattningsvis anses CMC-metoden vara intressant men mer information och fler referenser krävs från projekt som dimensionerats för dynamiskt belastningsfall för att metoden ska anses lämplig för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong.

12.5. CFA-pålelement

Oarmerade CFA-pålelement har nyttjats för jordförstärkning, även i järnvägsprojekt. Precis som för CMC-pelare anses styva, oarmerade CFA-element utgöra en risk om de utförs i lösa, sensitiva leror. CFA-metoden är kanske framförallt intressant när omgivningspåverkan och vibrationer utgör hinder för slagning av betongpålar. Metoden är sannolikt inte mer ekonomiskt än slagna betongpålar, annat än i undantagsfall.

Sammanfattningsvis anses oarmerade CFA-pålelement inte vara intressanta för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong, åtminstone inte som en generell metod tänkt att utgöra ett alternativ till slagna betongpålar.

12.6. Full displacement piles

Skillnaden mellan full displacement piles och oarmerade CFA-pålelement är framförallt att de förra är massundansträngande och därför genererar obetydligt med spilljord.

Deplaceringen i samband med installation medför risk för störning av omgivande jord och ökad risk för krypsättningar. Precis som för CMC-pelare anses styva, oarmerade full displacement piles-element därför utgöra en risk om de utförs i lösa, sensitiva leror.

Metoden är sannolikt inte mer ekonomiskt än slagna betongpålar, annat än i undantagsfall.

Sammanfattningsvis anses oarmerade full displacement piles metoden inte vara intressant för HHJV med ballastfri överbyggnad med spårplatta i betong, åtminstone inte som en generell metod tänkt att utgöra ett alternativ till slagna betongpålar.

13 Referenser

Bauer hemsida. www.bauer.de

Blackburn T., Franz R. (2016). Hayward Baker Design and Construction of rigid inclusions ground improvement projects. 45th Annual Midwest Geotechnical Conference, Michigan, USA

Buschmeier B., Masse F. (2012). Discussion of differences in design methodology between granular and grouted inclusions. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancun, Mexico.

Brown, D. A. (2005). Practical considerations in the selection and use of Continuous Flight Auger and Drilled Displacement Piles. Geotechnical Special Publications No. 132, ASCE.

Bruce, M.E., Berg, R., Collin J., Filz G., Terashi M., Yang D. (2013). Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. US Department of Transportation.

Burtins, Racinais (2016). Embankment on soft soil reinforced by CMC semi-rigid inclusions for the highspeed railway SEA. The third International Conference on Transportation Geotechnics ICTG.

Casagrande hemsida. www.casagrandegroup.com

Deep Foundations Institute (2016). Guidelines for Soil Mixing.

Eriksson L., Andersson M. (2006). Väg 641 Anslutning till Frövifors, Cementförstärkta stenpelare. Statens Geotekniska Institut.

Eurocode SS-EN 14679:2005 Execution of Geotechnical Works, Ground Treatment by Deep Mixing.

Eurocode SS-EN 14731:2005 Execution of Geotechnical Works, Ground Treatment by Deep Vibration.

FUDO Tetra Corporation hemsida. www.fudotetratetra.co.jp

Jiping Pan, Muliadi Merry, Andrea Faulkner and Tao Li (2011). Design of Ground Improvement using Continuous Flight Auger Columns for Railway Embankment. Parsons Brinckerhoff, Sydney, New South Wales, Australia

Keller Fondations Spéciales (2006). Cahier des charges du proceed Colonnes à Module Mixte CMM®.

Keller Grundläggning AB info 15-35Sei. Frövifors, Sverigepremiär för cementförstärkta stenpelare. Company case history sheet.

Kirsch K. (Editor), Bell A. (Editor) (2013). Ground improvement Third edition. CRC Press.

Kirsch K., and Kirsch F. (2010). Ground Improvement by Deep Vibratory Techniques

Kitazume M. and Terashi M. (2013). The Deep Mixing method. ISBN-13: 978-1138000056.

Larish M.D., Williams D.J., Slatter J.W. (2012) Load capacity of auger displacement piles, International Conference on Ground Improvement and Ground Control, University of Wollongong, Australia.

Larish. M.D, Williams D. J, Sheurman A. (2017), Effects of installation parameters of drilled displacement piles on in-situ stress conditions on stiff clays.

- Larsson S. (2005) State of Practice report: Execution, monitoring and quality control. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige.
- Mosely M.P. and K. Kirsh (2004). Ground Improvement, Second Edition.
- Pagliacci F., Bertero A., Siepi M., Zuffi P. Recent developments on Continuous Flight Auger (CFA) pile: Technology, Equipment and Applications. Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar on Bored and Auger Piles, Ghent.
- Prasenjit, Prezzi, Basu (2010). Drilled Displacement Piles – Current Practice and Design. DFI Journal Vol 4 No. 1
- Prezzi M., Basu P. (XX). Overview of construction and design of augercast cast-in-place and drilled displacement piles. Purdue University, USA.
- Priebe H. (1995). The Design of Vibro Replacement. Keller Grundbau GmbH.
- Raju, V. R., Krishna H., Wegner R. (2004). Ground Improvement using Vibro Replacement in Asia 1994 to 2004, A 10 year Review. Keller (M) Sdn. Bhd. Malaysia.
- Rogbeck Y., Carlsten P., Dehlbom B., Geotextilarmerade pelare (GCC-pelare) på Botniabanan vid Stranne (2001), Scandiaconsult
- Siegel T. et al (2007). Ground Improvement resulting from installation of drilled displacement piles. 32nd DFI Annual Conference, Colorado Springs, Colorado
- International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 5, 379-403
- Soilmec Drilling and Foundation Equipment commercial folder (2016). Displacement Piles. TREVI Group S.p.A.
- Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner, TK Geo 13 (2016), TDOK 2013:0667.
- Trafikverkets tekniska råd för geokonstruktioner, TR Geo 13 (2016), TDOK 2013:0668.
- Varaksin S., Hamidi B., Huybrechts, N. (2016). Denies Ground improvement vs. pile foundations? ISSMGE-ETC 3 International Symposium on Design of Piles in Europe.
- Åhnberg H., Johansson S.E., Retelius A., Ljungerantz C., Holmqvist L., Holm G. (1995). Rapport No 48 Cement och kalk för djupstabilisering av jord. Statens Geotekniska Institut.
- Åhnberg H. (2006). Strength of stabilized soils. Swedish Deep Stabilization Research Centre.

