

MDM ersätter CFA-pålar – en lönsam affär!

Grundläggning av byggnader i känsliga omgivningar utförs oftast med någon typ av borrarad påle, bland annat CFA-pålar. Nu kan listan över lämpliga och konkurrenskraftiga metoder även kompletteras med MDM (Modified Dry Mixing). Denna artikel beskriver de tekniska och ekonomiska fördelarna som utvärderades i samband med grundläggning av ett parkeringshus i Halmstad. Valet av metod föregicks av omfattande analyser och provbelastningar i fält. Efter färdigställt projekt kan det konstateras att MDM halverade både byggtid och kostnader till glädje för alla inblandade parter

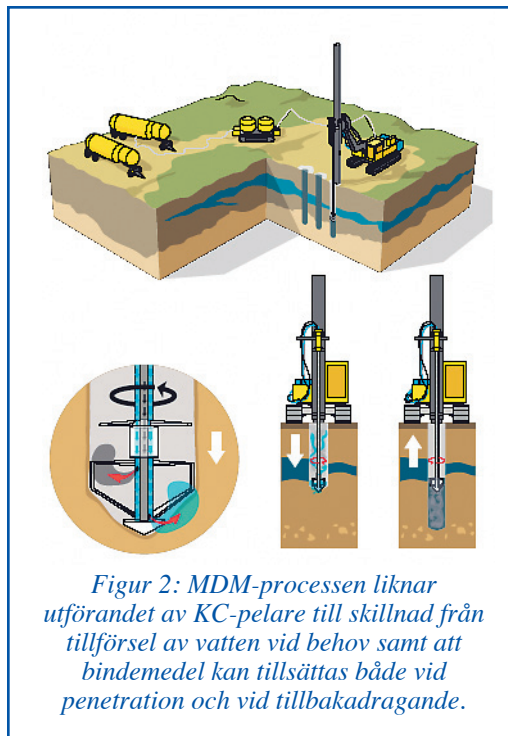
Under hösten 2004 tilldelades NCC i Halmstad entreprenaden att bygga ett nytt parkeringshus för AB Nissastaden som är ett kommunalt bolag. NCC hade det näst lägsta anbudet men konkurrenten ansågs inte uppfylla ställda kriterier på en "borrad eller grävd påle av betong för att undvika omgivningspåverkan". Efter en segdragen juridisk process gick NCC segrande ur striden.

Med hänsyn till den förutvarande processen var det med tveksamhet som AB Nissastaden tog emot vår förfrågan om att byta ut den förutbestämda grundläggningsmetoden till en för beställaren helt ökad metod. Hercules Grundläggning ville utföra fältförsök med den så kallade MDM-metoden för att sedan om möjligt använda denna för grundläggning av parkeringshuset, under förutsättning att kriterier i samtliga gränstillstånd kunde uppfyllas och påvisas. Nissastaden godkände att upplåta



Bild 1: NCC byggde parkeringshus till AB Nissastaden i Halmstad. Huset grundlades på MDM-pålar, en innovativ vidareutveckling av KC-pelarmetoden.

arbetsplatsen till fältförsök. Däremot ställdes tydliga krav på att övertyga juristerna om att metoden uppfyllde rambeskrivningen innan beställaren kunde god-



Figur 2: MDM-processen liknar utförandet av KC-pelare till skillnad från tillförsel av vatten vid behov samt att bindemedel kan tillsättas både vid penetration och vid tillbakadragande.

känna ett eventuellt metodbyte. Juristerna kunde med stöd av geotekniker från WSP konstatera att MDM kunde klassas som en borrarad påle. Däremot var de tveksamma om slutprodukten kunde klassas som betong. Efter konsultation med diverse betongspecialister samt studier av aktuella svenska och internationella standards, exempelvis SS-EN 206-1, SS-EN 12620, ASTM C125-03 och Betonghandbok Ma-

terial, kunde det mycket klart konstateras att den produkt som skapas in-situ när MDM-metoden används ska klassas som betong. För det aktuella projektet användes därför fortsättningsvis beteckningen "borrad påle av betong" när MDM fördes på tal.

För att skapa ett bättre beslutsunderlag inför ett eventuellt metodbyte erbjöd sig Hercules Grundläggning att utföra tester i tre steg med följande indelning:

- Intrimning av systemet och visuell kontroll av uppnådd kvalitet
- Provbekastning av enskilda MDM-pålar
- Provbekastning av pålgrupp bestående av nio stycken MDM-pålar.

Kortfattad processbeskrivning

Det finns alltid en tendens att väl fungerande grundläggningsmetoder, exempelvis KC-pelare, används i applikationer som de inte är bäst lämpade för, exempelvis grundläggning av fastigheter. Tanken med MDM var att med minsta möjliga kapitaltillskott skapa största möjliga flexibilitet med avseende på typ av jord som kan stabiliseras samt lämpliga applikationer där metoden kan tillföra konkurrenskraft. Patentägaren LCTechnology och Hercules Grundläggning har under en treårsperiod utvecklat produktionsmetodik och dimensioneringsfilosofi vilket testats i full skala vid fyra större fältförsök, bland annat två provbankar utanför Uddevalla.

Maskinutrustning och arbetsplatslogistik är vid en första åsyn snarlik KC-pelarmetoden. Vid MDM tillförs dock vatten vid behov via ett separat innerstängssystem. Flöde och tryck kan varieras för att skapa optimal inblandning för aktuell geologi och tillämpning. Beroende på behovet så kan vatten och bindemedel tillsättas samtidigt eller var för sig. Dessutom kan mängden varieras inom tre zoner, både vid penetration samt tillbakadragande.

Detta medför att en betydligt homogenare slutprodukt kan åstadkommas. Dessutom kan såväl traditionella pelare med låg hållfasthet som höghållfasta pelare utföras med samma utrustning.

För att uppnå full hydratisering av exempelvis cement så behöver mängden vatten uppgå till cirka 20 procent av vik-

Artikelförfattare är
Håkan Eriksson,
tekn dr, SolidGeo
AB, Nacka.





Bild 3: Installation av provpålar och intrimning av systemet.

ten cement. För en typisk Mälardalslera med vattenkvot på cirka 50 procent som stabiliseras med 100 kg cement per kubikmeter jord räcker det teoretiskt med en vattenkvot på cirka fem procent. En närliggande tanke är då givetvis att den torra metoden är optimal. Det finns dock många anledningar till varför en hybridmetod som MDM är en bättre lösning, bland annat;

- kan aktivera större mängder bindemedel med bibehållet blandningsarbete
- det krävs mindre blandningsenergi för att uppnå samma resultat som med den torra metoden
- för höghållfasta pelare krävs högre homogenitet vilket lättare skapas när vatten tillförs
- kraterbildning i eventuell torrskorpa undviks, pelarstabiliseringen går ända upp till markytan



Bild 4: Pågående uppdragning av MDM-påle. Ett Gewi-stag med diametern 63,5 mm trycktes ned i pålen direkt efter installation. Efter sju dagars härdning kunde pålen dras upp med hjälp av fästblock i Gewi-staget.

- det krävs mindre lufttryck för att mata ut bindemedlet
- penetration av fasta jordar underlättas vilket behövs när underliggande lösa jordar ska stabiliseras.

Ytterligare detaljer om processen, genomförda fältförsök och lämpliga applikationer återfinns bland annat i Eriksson *et al.* (2004 och 2005).

Några resultat från förprovning och produktionskontroll

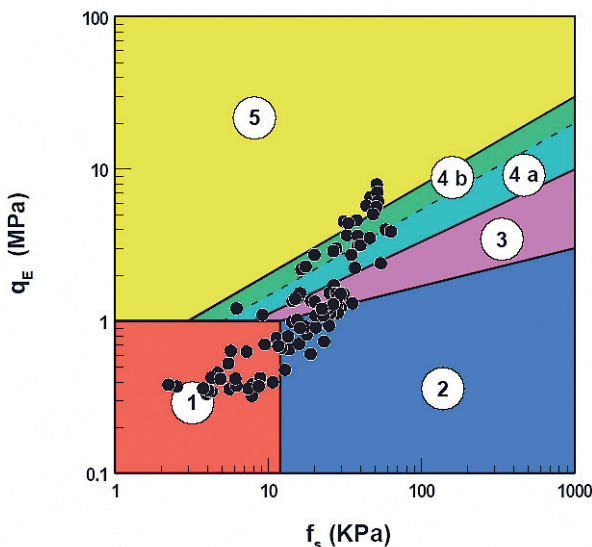
Innan möjligheten vid Gamletull dök upp så hade Hercules Grundläggning och LCTechnology genomfört fyra större fältförsök med MDM-metoden, vilket innebär att samtliga inblandade var övertygade

om att applikationen var den rätta. Innan etablering av CFA-maskin från Italien avstyrdes så var det dock en billig försäkring att komplettera med ett ytterligare fältförsök på Gamletull, dessutom krävde förståeligt nog beställaren AB Nissastaden detta.

Huvudsyftet med den inledande kontrollen var att säkerställa att den aktuella undergrunden inte innehöll några större överraskningar, att det gick att borra till förutsatt djup samt att spillet minimerades eftersom arbetsplatsen var lokaliserad till centrala Halmstad. Samtliga provpelare och efterföljande produktionspelare utfördes med diametern 600 mm och 400 kg byggcement per kubikmeter påle vilket motsvarar cirka 113 kg/m.

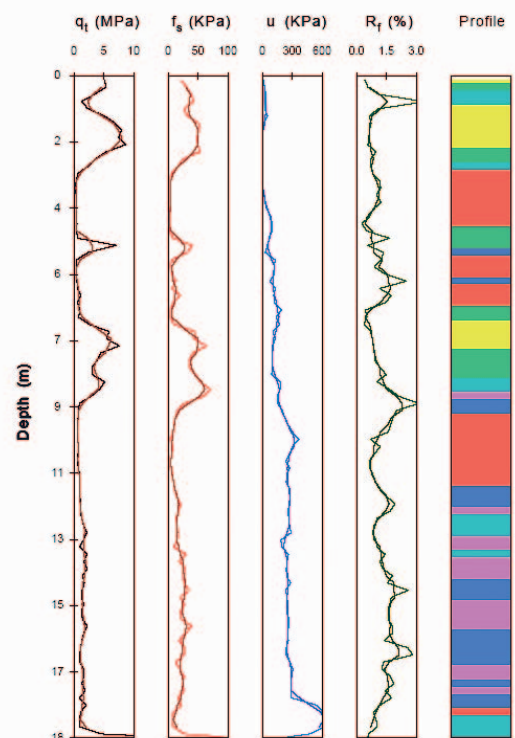
När systemet var stabilt och den visuella kontrollen säkerställt åtminstone den ytliga kvalitén installerades tre pelare med längden sju meter. Efter sju dygn utfördes statisk dragprobelastning på en av pålarna medan de resterande två pålarna drogs upp med mobilkran för efterföljande visuell kontroll, se bild 4. Vid uppdragningen registrerades uppdragningskraft för att erhålla en grov uppskattning av vidhäftning mellan påle och jord. Detta kunde dessutom ytterligare verifieras vid statisk dragprobelastning av den första pålen.

De geotekniska förutsättningarna varierar både i plan och djup men kan genomsnittligt karakteriseras av cirka tre meter sand, fyra meter lös lera, två meter sand, två meter lös lera som överlagrar siltig lera som successivt övergår till att bli mer sandig mot djupet. Klassificering av jorden enligt Eslami & Fellenius (1997) och tillhörande CPTU-sondering visas i figur 5 och 6.



Figur 5 (ovan): Klassificering av jord baserat på CPTU enligt Eslami & Fellenius (1997). Siffrorna och färgmönstret anger: 1/Röd) Mycket lös lera; 2/Blå) Lera 3/Lila) Siltig lera, fast lera 4/Ljusblå,grön) Sandig silt och/eller siltig sand 5/Gul) Sand-Grus.

Figur 6 (th): Resultat från typisk CPTU-sondering med tillhörande klassificering av jorden. För tolkning, se figurtext 5.



Vid provbelastningen uppgick den genomsnittliga vidhäftningsspänningen mellan påle och jord som mest till 35 kPa. Tiden för fullständig rekonsolidering är relativt kort för det aktuella området. Det gjordes dock en bedömning att den registrerade vidhäftningen skulle förväntas öka med ytterligare 30 procent.

Nya forskningsrön har framfört risk för att en svaghetszon utbildas mellan pelare och ostabiliserad jord när bindemedlet består av cement och jorden består av lera, se bland annat Larsson (2005). Med anledning av detta så registrerades hur mycket jord som fäste på pålen vid uppdragning. Ingen synlig effekt av någon svaghetszon kunde konstateras eftersom tjockleken på jordlagret uppgick till mellan 3 och 6 cm. Speciell fokus lades på skiktet mellan tre till sju meters djup under markytan där jorden konstaterats bestå av lös lera, se bild 7.

När den första pålen som dragits upp skulle läggas ned i horisontellt läge gick den av på grund av moment från egen tyngden. Momentet uppgick till cirka 26 kNm, vilket ger en dragspänning på undersidan av cirka 1 100 kPa. Vetenskapliga studier av kvoten mellan drag- och



Bild 7: I det leriga skiktet mellan tre till sju meters djup konstaterades att brottet gick i genomsnitt 5 cm utanför pålens radie. Detta tyder på försumbar effekt av eventuell svaghetszon mellan påle och jord.

tryckhållfasthet har för jordförstärkning resulterat i mellan 10 till 20 procent, se bland annat Terashi (1980). Med en kvot på 15 procent uppgår tryckhållfastheten för den aktuella pålen till 7,3 MPa.

Pelare nummer 2 kapades i vertikal läge hängande i mobilkran innan pålen fälldes horisontellt. Pålen kunde läggas horisontellt utan att brott eller sprickbildning uppträdde, se bild 8. Den 4,5 meter

långa pålen genererade ett moment av cirka 16 kNm vilket motsvarar en tryckspänning av cirka 4,6 Mpa. Detta korresponderade väl mot tryckhållfasthet uppmätt på laboratoriet.

Det slutgiltiga underlaget för att kunna fatta beslut om byte från CFA-pålar till MDM var två stycken statiska provbelastningar på grupper om nio stycken $\phi 600$ mm pålar installerade i kvadratisk mönster med 10 cm överlapp. Grupperna placerades i var sin ände av området där olika geotekniska förutsättningar konstaterats. Den ena gruppen hade en effektiv pållängd på 12 meter medan grupp nummer två hade 16 meter långa pålar. På pålgruppen göts en plint med sidmått 1,6 meter och tjocklek 0,7 meter vilket motsvarar kommande konstruktion. Så kallade ”telltals” installerades för registrering av rörelser ned till sex meters djup. Mothållet anordnades med Titan-stag som förankrades fem meter under pelarnas underkant, för att undvika påverkan vid den statiska provbelastningen, se bild 9.

Dimensionerande lasteffekt för respektive grupp uppgick till:

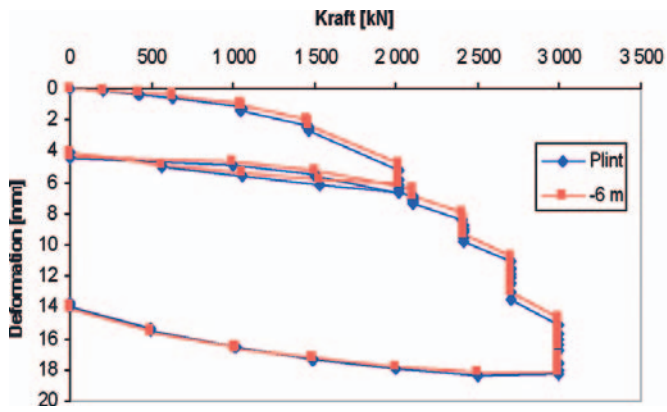
- Brottstadie 2 100 kN
- Bruksstadie 1 700 kN.



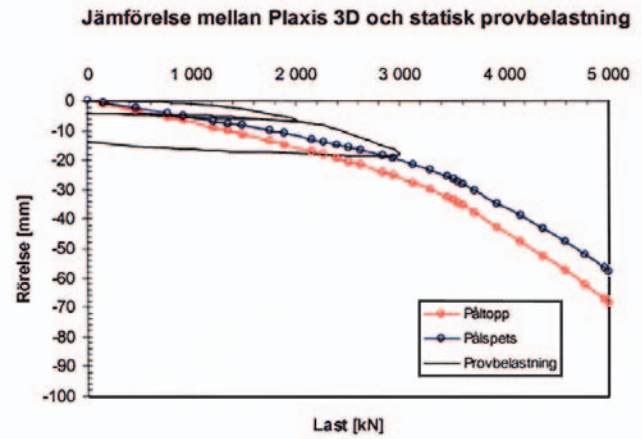
Bild 8: Uppdragning av MDM-pålar efter sju dygns härdning och rekonsolidering. I förgrunden syns den sju meter långa pålen som gick av vid fällning till horisontellt läge. I bakgrunden pågår fällning av den 4,5 meter långa pålen som höll.



Bild 9: Montering av mothållsbalkar för statisk provbelastning av MDM-pålar.



Figur 10: Resultat från statisk provbelastning på grupp av nio MDM-pålar med 12 meters effektiv pållängd.



Figur 11: Kalibrering av FEM-analyser utförda med stöd av statiska provbelastningar.

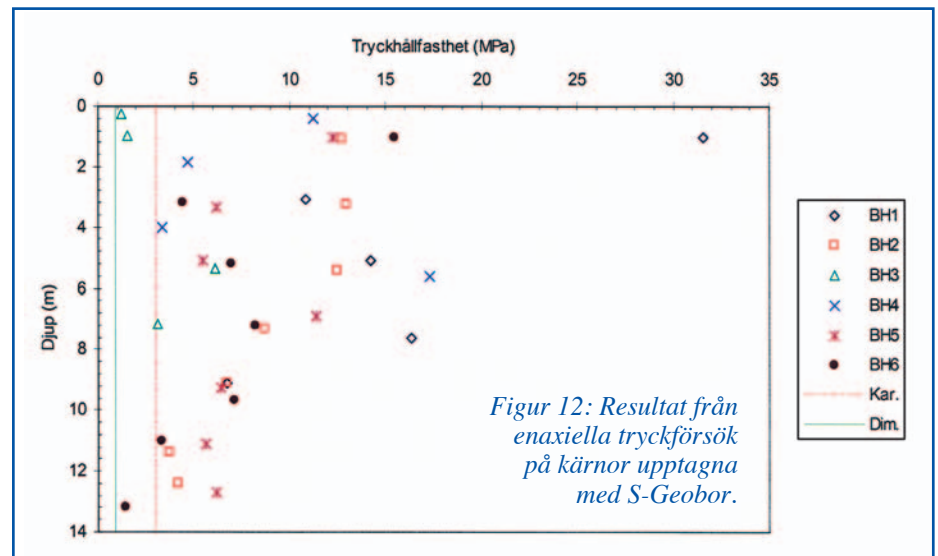
Målsättningen med provbelastningen var att med stegvis pålastning belasta grupperna med 3000 kN. Detta kunde tyvärr endast utföras för en av grupperna eftersom ett av de fyra Titan-stagen lossnade vid cirka 2000 kN total belastning. Plinten betedde sig dock helt elastiskt och den kvarstående rörelsen efter avlastning var försumbar. Grupperna uppträdde som styva block och rörelsen på överkant av den gjutna plinten och på sex meters djup var i stort sett identiska, se figur 10. Baserat på de statiska provbelastningarna beslutades det att utföra pålgrupperna med längder varierande från 14 till 16 meter.

Eftersom lasterna för de totalt 48 pelarna i parkeringshuset varierade, utformades pålplintarna med olika storlek. Antalet MDM-pålar i respektive plint varierade från som minst tre stycken upp till som mest 32 stycken. För att minimera differenssättningen utnyttjades enbart mantelfriktionen vid dimensioneringen medan spetsbärförmågan betraktades som extra säkerhet. Kraftöverföringen från plintar till pålgrupperna sker genom friktion. Friktionskoefficienten är generellt mycket låg, endast i storleksordningen 0,1. För att överföra uppträdande horisontalkrafter till omgivande jord, kontrollerades pål-

gruppen för direkt skjuvning och kontakttryck mot jorden.

För att kunna använda resultaten från de statiska provbelastningarna så optimalt som möjligt utfördes kalibrering mellan fältförsöken och FEM-analyser. Jordens mekaniska egenskaper valdes så att god överensstämmelse erhöles mellan uppmätta och beräknade samband med huvudsyftet att innehålla givna deformationskriterier, speciellt differenssättningar, se figur 11.

När samtliga förprovningar var utförda togs ett enhälligt beslut att byta grundläggningsmetod till förmån för MDM. Omfattning av tilläggskontroll fastställdes till att omfatta kärnprovtagning, visuell inspektion i samband med uppdragning av hela pålar samt kontroll av omgivningspåverkan vid installation av MDM-pålar i anslutning till Östras bageri. Efter färdigställd byggnad skulle rörelserna för tio pelare kontrolleras tills de avstannat helt.



Figur 12: Resultat från enaxiella tryckförsök på kärnor upptagna med S-Geobor.



Bild 13: Enaxiella tryckförsök utförda på SGI i Linköping.

FmGeo ansvarade för kärnprovtagning vilket utfördes med S-Geobor. Det togs prover från sex pålar ingående i tre olika fundament. Efterföljande enaxiella tryckförsök som utfördes på Statens geotekniska institut (SGI) visade att hållfastheten varierade som förväntat och att medelvärdet med god marginal översteg det karakteristiska, se figur 12 på föregående sida. Den dimensionerande tryckhållfastheten i pålarna var vald till cirka 900 kPa, vilket innebär att varje enskild MDM-påle belastades med cirka 250 kN. Med avseende på pålarnas hållfasthet förväntades en säkerhet i brottstadiet på drygt 3,0, vilket med råge blev uppfyllt.

Eftersom den geotekniska profilen var väldigt varierande har inga långtgående slutsatser dragits angående hållfasthetens spridning. De lägsta värdena (1,1 respektive 1,5 Mpa) närmast markytan registrerades i pelare som ingick i den pålgrupp som provbelastades statistiskt. Baserat på

samtliga kärnprover erhöles följande resultat:

- Medelvärde: 8,8 Mpa
- Variationskoefficient: 44,5 procent

Eftersom massförskjutningar och hävningar alltid uppträder vid installation av KC-pelare, var alternativ förberedda när MDM-pålar skulle installeras alldeles intill Östras bageri, där minsta avstånd mellan befintlig byggnad och pålar uppgick till cirka 0,5 meter. Sättningsdubbar och punkter för inmätning installerades och kontrolleras allt eftersom pålningen närmade sig bageriet. Den nyligt grundförstärkta utbyggnaden erhöles dock endast mycket små rörelser, cirka 2 mm både i horisontell och i vertikal riktning, varför något metodbyte inte blev aktuellt.

Vid uppdragning av fem hela pelare, kunde två stycken läggas ner i horisontellt läge (vilket inte var fallet vid förprovnings) utan att de överskred draghållfastheten vilket tyder på att den var i storleksordning 1,6 Mpa och en tryckhållfasthet på 10,7 Mpa. Några av pålarna kapades med kedjesåg för ytterligare visuell kontroll, se bild 14.

Registrering av rörelser för samtliga fundament utfördes under hela byggtiden samt cirka tre månader efter färdigställandet. Rörelserna har konstaterats vara små och i samma storleksordning som förutsägelserna, se figur 15. Efter att hela byggnaden färdigställts har de totala rörelserna klingat av vid cirka 15–20 mm och differenssättningarna har genomgående understigit begränsningen 1:800.

Några slutsatser och framtida utblick

Nu när facit föreligger kan det mycket tydligt konstateras att beslutet att byta grundläggningsmetod från CFA till MDM var klokt. Tiden för installation av 503 pålar med 15 meters medellängd tog cirka fyra veckor i anspråk, inklusive all provning och kontroll. Detta motsvarar cirka 50 procent av den kalkylerade produktions tiden för CFA. Efter att alla ex-

traordinära utvecklingskostnader exkluderats, medförde metodbytet även en halvering av grundläggningskostnaderna när effekter på plintar och golv medräknats. De projektspecifika fördelarna var huvudsakligen;

- kortare byggtid
- lägre kostnader
- skonsam mot omgivning med hänsyn till spill, vibrationer och massundantärning
- konkurrenskraftig grundläggningsmetod för byggnader.

Genom den ökade homogeniteten samt möjligheten att installera pelare med hög hållfasthet bör rimligtvis både stabilisering och solidifiering samt samverkansgrundläggningar bli en framtida potential för MDM. ■

Referenser

Eriksson, H., Gunther, J., Holm, G., Westberg, G., 2004, *Modified Dry Mixing (MDM) – A new possibility in Deep Mixing*, Deep Mixing 2004, International Conference, Los Angeles, USA.

Eriksson, H., Gunther, J., Ruin, M., 2005, *MDM combines the advantages of dry and wet mixing*, Deep Mixing 2005, International Conference on Deep Mixing, Best Practice and recent advances, Stockholm.

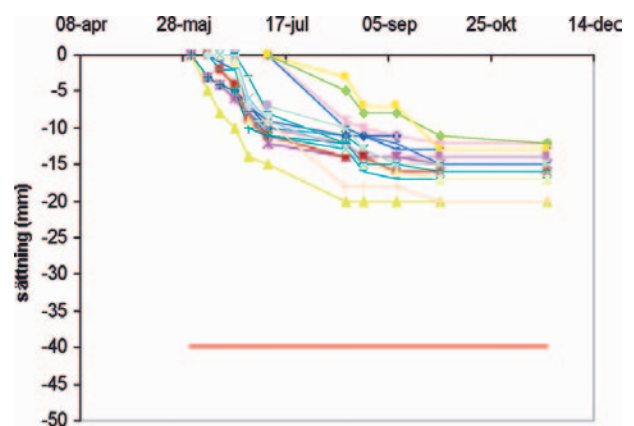
Eslami, A., Fellenius, BH, 1997, *Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories*, Canadian Geotechnical Journal, vol 34, no 6, pp 886–904.

Larsson, S., Kosche, M., 2005, *Laboratory study on the transition zone surrounding lime-cement columns*, Deep Mixing 2005, International Conference on Deep Mixing, Best Practice and recent advances, Stockholm.

Terashi, M., Tanaka, H, Mitsumoto, T, Niidome, Y, Honma, S, 1980, *Fundamental properties of lime and cement treated soils (2nd report)*, Port and Harbour Research Institute. Report, vol 19, nr 1, s 33–62.



Bild 14: Uppdragen påle som kapas med kedjesåg för visuell kontroll av homogenitet.



Figur 15: Resultat från sättningsmätningar utförda på pelare i parkeringshuset. Mätningar pågick under hela byggtiden samt tre månader efter färdigställd byggnad.