

SVENSKA GEOTEKNISKA FÖRENINGEN
SWEDISH GEOTECHNICAL SOCIETY

SGF Rapport 4:95

Kalk- och kalkcementpelare

Vägledning för projektering,
utförande och kontroll

Supplement 1:99

INNEHÅLL

FÖRORD	3
INLEDNING	4
BINDEMEDELSSAMMANSÄTTNING	4
UTRUSTNING	5
Allmänt	5
Dosering av bindemedel	6
Blandningsutrustning	7
TILLVERKNING	7
Tillverkningsprocessen	7
Underlag från projektör	8
Pelares planläge och lutning	9
Inblandning av bindemedel	10
Komplettering vid underkända pelare	11

FÖRORD

Svenska Geotekniska Föreningens (SGF) rapport 4:95 "Kalk- och Kalkcementpelare" har kommit att bli normgivande för projektering, utförande och kontroll vid tillämpning av metoden i anläggningsprojekt. Under senare år har dock nya maskiner för tillverkning av kalk- och kalkcementpelare (kc-pelare) tillkommit, vilka i allt högre grad utnyttjar elektronik för styrning och dokumentation av tillverkningsprocessen. Med de noggrannare mätsystemen har även insikten kommit att vissa toleransvärden i rapport 4:95 varit praktiskt taget omöjliga att uppfylla under normala förhållanden. SGF:s jordförstärkningskommitté har därför sett det som angeläget att revidera de delar av handboken som behandlar utförande och toleranser.

Revideringen har finansierats och genomförts som ett projekt inom Svensk Djupstabiliserings (SD) pågående forskning. Syftet har varit att nå enighet mellan beställare, projektörer och entreprenörer om vilka krav som är relevanta för utförandet och vilka toleransgränser som är rimliga att ställa för dessa krav. Förhoppningen är även att revideringen skall medföra en insikt om kravens betydelse, så att endast välmotiverade krav ställs, och en skärpning vid uppföljning av kraven.

Rapporten utges av SGF med avsikten att den temporärt, tills hela den gamla rapport 4:95 ges ut i ny utgåva, skall ersätta denna i de avsnitt som berörs. Det är SGF:s förhoppning att den reviderade rapporten skall vara en vägledning för projektörer vid upprättande av handlingar för generalentreprenad. För bearbetning och sammanställning av rapporten svarar Ulf B Eriksson. Materialet har remissbehandlats vid entreprenadföretagen Hercules, Stabilator och LC Markteknik samt av ett antal erfarna projektörer och beställare från SD:s teknikstödsgrupp.

Stockholm i april 1999

Ulf B Eriksson

INLEDNING

Svenska Geotekniska Föreningens rapport nr 4:95 (SGF 4:95) ger vägledning för projektering, utförande och kontroll av kalk- och kalkcementpelare. SGF 4:95 har tillämpats i ett stort antal projekt och kritiska synpunkter har framkommit på de krav som projektörer ställer avseende installationsutrustning, utförande och toleranser vid tillverkningen samt på hur dessa krav följs upp. Föreliggande rapport är en uppdatering av avsnitten 6.1, 8.1, 8.2, 9.1.1 och 9.2 i SGF 4:95 och en "state-of-the-art" rapport över dagens tekniknivå.

Rapporten är framtagen av Svensk Djupstabilisering, efter uppmaning från SGF:s jordförstärkningskommitté. Rapporten syftar till att ge vägledning för projektörer om hur utförandekrav och toleranser bör hanteras i samband med projektering för generalentreprenad. Utveckling av pelartekniken pågår dock i snabb takt, inte minst inom Svensk Djupstabiliserings olika projekt, varför varje projektör måste vara öppen för utvecklingen och ange projektanknutna krav med eftertanke.

Rapporten är avsedd att tjäna som underlag vid upprättande av generalentreprenadhandlingar. Det åligger dock projektören att i varje enskilt fall och i varje enskild sak avgöra vilka utförandekrav och vilka toleranser som skall gälla och med hjälp av rapporten eller annan källa formulera dessa krav. Direkt hänvisning till rapportens text får ej ske.

Rapporten är utformad med **vägledande text** i full bredd och med **indragna anvisningar**. Dessa anvisningar syftar till att skapa en de-facto standard för normala förstärkningar med känd och välbeprövad teknik. Genomgående används begreppet "pelare" som ett samlande namn för olika typer av kalk-, kalkcement- och andra liknande pelare oberoende av bindemedelssammansättningen.

BINDEMEDELSAMMANSÄTTNING

Normalt används osläckt kalk och/eller cement i varierande proportioner som bindemedel vid tillverkning av pelare. Andra typer av bindemedel, ofta baserade på någon restprodukt, börjar dock förekomma, speciellt vid förstärkning av organiska jordar. I samband med nya tillämpningar och/eller i speciella jordar kan det finnas skäl att utreda livslängd, nedbrytning, förorenings spridning och andra miljöfrågor vid val av bindemedel.

I de fall som osläckt kalk används skall denna förvaras torrt på arbetsplatsen. Vid provtagning på arbetsplats bör man försäkra sig om att proverna är representativa.

Flytbarheten hos kalk och cement är ett mått på pulvrets rörlighet i rör och munstycke. Mätmetoden för bestämning av flytbarhet är egentligen framtagen som en del av standardiseringen av industrikalk. Den bygger dock på den gamla "Cementas siktningsmetod" för cement varför den även kan gälla för cement.

Genom att ange krav på flytbarhet tillgodoser man även det krav på ”hårdbränd kalk” som tidigare funnits. Enligt Åhnberg et al (1995) har blandningar med kalk/cement visat sig ge god flytbarhet i praktiken trots värden kring 40.

Anvisningar: Kalk, cement och övriga bindemedel till pelare tillverkade med torr metod skall uppfylla nedan angivna krav:

- **Kalk:**

Kornstorlek	0 - 0,2 mm	
CaO-aktiv halt	≥ 80 %	enligt ASTM C 25
Flytbarhet	≥ 70	enligt SS 134005

- **Cement:**

Sammansättning	Kontrollerad och godkänd enligt europeisk standard	
Kornstorlek	0 - 0,2 mm	
Flytbarhet	> 40	enligt SS 134005

- **Övriga bindemedel:**

Sammansättning	Öppet redovisad sammansättning av bindemedlet.	
	Godkända inblandningsförsök i laboratorium samt godkänd installation av provpelare i fält där godkännandet avser platsspecifika krav	

UTRUSTNING

Allmänt

Utrustning för tillverkning av kc-pelare består normalt av en bandgående basmaskin med gejderförsedd mast och borrhållning med blandningsverktyg. Lagringstank/-ar för bindemedel är monterade antingen på basmaskinen eller på en separat bandgående bärare. Basmaskinen är försedd med dieselmotor för drivning av hydraulsystem till positionering, dosering, borrhållning och blandning. Maskinen är även försedd med dieseldriven kompressor för trycksättning och transport av bindemedel från lagringstanken/-arna till blandningsverktyget, samt enheter för dosering, registrering och dokumentation. Maskinuppgifter för idag förekommande maskiner redovisas i tabell nedan.

Lagringstanken för bindemedel kan antingen vara uppdelad i två separata delar, för olika bindemedel, eller enkel. Med en enkel lagringstank förblandas bindemedel innehållande flera komponenter före tankning i maskinen. Med en delad lagringstank blandas bindemedlet i samband med dosering. Det senare förfarandet medför att en större risk för variationer i blandningsförhållandet föreligger.

Basmaskinens mast är försedd med reglerutrustning så att gejderlutningen kan justeras för att kompensera mot varierande marklutningar eller för att utföra speciella tekniska förstärkningslösningar. Möjlighet finns att justera gejderlutningen upp till 70° i en riktning räknat från en vertikal linje.

Bindemedel transporteras normalt till arbetsplatsen med lastbil. Till tankplatser bör därför finnas transportvägar med maximal lutning 1:10 samt vändplats för 24 m bil plus släp. Transportvägar bör vara anpassade för axel-/ boggietryck 11,5 / 19 ton och 60 tons totalvikt.

Maskinuppgifter för nuvarande maskiner

Uppgift	Nuvarande maskiner
Vikt basmaskin (ton)	12 - 39
Marktryck basmaskin (kPa)	24 - 38
Marktryck bulkvagn (kPa)	40 - 60
Pelardiameter (m)	0,4 - 1,0
Pelardjup (m)	< 25
Fördelning kalk / cement eller cement / kalk (%)	0/100 - 100/0
Maximal terränglutning	1:7 - 1:11
Kapacitet (m / 8 timmar)	400 - 1000
Hinder	> 0,1 m tjäle. Stubbar, rötter, sten, block, sprängsten

Anvisningar: Både enkla och delade lagringstankar är godtagbara. Maskiner med delade lagringstankar skall dock ha möjlighet att mäta och registrera den doserade bindemedelsmängden separat för varje lagringstank.

Mätnoggrannhet vid mätning av gejderlutningen skall vara bättre än $\pm 0,6^\circ$ (10 mm/m) i två vinkelräta riktningar. Möjlighet att redovisa verklig gejderlutning (avvikelsens riktning) skall finnas.

Dosering av bindemedel

Dosering av bindemedel från lagringstank till matarledning görs med mekanisk doseringsutrustning. Det är möjligt att variera doseringen med djupet för att åstadkomma olika inblandning i olika jordlager.

Mätning den doserade bindemedelsmängden görs genom att väga lagringstanken/-arna med jämna tidsintervall. Den mätta mängden bindemedel motsvarar dock inte den utmatade mängden från blandningsverktyget vid varje tidpunkt eftersom det tar viss tid att transportera bindemedlet genom matarledningen. Korrigering för denna tidsskillnad kan ske på vissa maskiner.

Redovisning av doserad mängd bindemedel görs i form av ett flytande medelvärde som avser medelvärdet för doseringen den senaste metern.

Transport av bindemedel från lagringstanken/-arna till blandningsverktyget sker med tryckluft. Mätning av lufttrycket görs i lagringstanken/-arna och trycket kan regleras för att styra transporten och utmatningen i jorden. Normala tryck för pelare ner till 15 m djup är 400 - 600 kPa (4 - 6 bar). Utmatningstrycket redovisas normalt ej utan används av maskinisten för styrning av tillverkningsprocessen.

Anvisning: Mätnoggrannhet vid mätning av bindemedelsmängd skall vara bättre än $\pm 10\%$ av nominell mängd, dock lägst ± 2 kg/m.

Dosering av bindemedel skall kunna beräknas och redovisas grafiskt i enheten kg/m (eller kg/m^3) som en funktion av pelarlängden i rullande 0,2 meters intervall eller tätare. Även total mängd bindemedel per pelare skall kunna redovisas.

Blandningsutrustning

Inblandning av bindemedel i jorden sker med ett blandningsverktyg som roteras under samtidig stigning och dosering av bindemedel. Rotationshastighet och stigning kan regleras individuellt med hänsyn till behov av blandningsarbete, jordens egenskaper, blandningsverktygets effektivitet och kapaciteten på bindemedelsmatningen.

Dagens blandningsverktyg har paddlar (vingar) med skrängda blad. Fördelning av bindemedlet vid blandningsverktyget sker med en stråle av tryckluft vilket normalt fungerar väl då leran är sensitiv ($S_t \geq \text{ca } 8$) och högplastisk ($w_L \geq \text{ca } 50\%$).

Anvisning: Mätnoggrannhet vid mätning av blandningsverktygets rotationshastighet och stigning skall vara bättre än ± 10 varv/min respektive ± 2 mm/varv.

Blandningsverktyg skall vara så utformade att fördelning och inblandning av bindemedlet sker jämnt, såväl längs pelaren som över dess tvärsnitt.

TILLVERKNING

Tillverkningsprocessen

Tillverkning av pelare inleds med att blandningsverktygets spets ansätts i utsättningspunkten och att masten riktas till avsedd lutning, vanligen vertikal. Under rotation och samtidig nedpressning drivs därefter blandningsverktyget ner till avsett pelardjup eller till fast botten. För att förhindra igensättning av utmatningshålet för bindemedel renblåses detta med tryckluft.

I bottenläget vänds rotationsriktningen och doseringsenheten vid lagringstanken startas. När bindemedlet matas ut i jorden börjar blandningsverktyget att lyftas med jämn hastighet så att avsedd stigning erhålls.

Under tillverkningsprocessen övervakas, regleras och dokumenteras bindemedelsutmatning, rotationshastighet och lyfthastighet. Tillsammans ger de två sist nämnda parametrarna ett mått på stigningen. Behovet av blandningsarbete, dvs stigningens värde, varierar med jordens egenskaper och med typ av bindemedel.

Underlag från projektör

Vid en generalentreprenad skall projektören ange vilken typ av bindemedel som skall användas och vilken bindemedelsmängd som skall blandas in i olika jordlager. Projektören skall även ange stigning och rotationshastighet för att uppnå dimensionerande hållfasthet i pelarna.

Projektörens beslut baseras i standardfallet, dvs där en viss utrustning och utförande i en känd jord ger godtagbart resultat, normalt på laboratorieinblandningar och på tidigare erfarenheter.

I de fall där jordförhållandena avviker från de normala eller där tidigare produktionserfarenhet saknas, bör resultat från laboratorieinblandningar verifieras med provpelare och kontroll av dessa före produktionsstart.

Vid förstärkningar som utförs för att nå ökad stabilitet är jämn utmatning och ett jämnt blandningsarbete betydelsefullt för att inte lokala svaghetsplan (brottanvisningar) skall uppkomma i pelarna. Vid sådana förstärkningar bör därför låg toleransnivå användas för avvikelser i stigning, rotationshastighet och dosering av bindemedel.

Vid förstärkning som utförs för reduktion av sättningar spelar lokala svaghetsplan mindre roll så länge som pelarnas kryphållfasthet inte överskrids. Vid sådana förstärkningar kan därför högre toleransnivå användas för avvikelser i stigning, rotationshastighet och dosering av bindemedel.

I jordar med lägre vattenkvot än flytgränsen kan klumpar av kalk, cement och lera samt delar med innesluten luft uppkomma i pelarna. I sådana jordar behövs ett mer omfattande blandningsarbete än i "normaljorden" (sensitiv och högplastisk lera) för att få bindemedlet att medverka fullständigt i kemiska reaktioner. Även när cement används i bindemedlet behövs ett mer omfattande blandningsarbete än vid ren kalkinblandning för att uppnå den högre stabiliseringseffekt som cementtillsatsen ger.

Där god kontakt mellan pelarnas underkant och fast bottenmaterial är nödvändig kan tillverkningsprocessen behöva modifieras tex. genom att föra blandningsverktyget upp och ner några gånger den nedersta halvmeteren av pelaren eller genom att modifiera blandningsverktygets utformning. Vid normalt utförande kan pelare antas utbildas från ca 0,1 á 0,2 meter under utmatningshålets nivå.

Projektören skall ange toleranskrav för maximalt tillåten avvikelse från teoretiskt planläge och teoretisk lutning. Toleranskraven bör anpassas till pelarförstärkningens utformning. Större avvikelser kan normalt accepteras vid förstärkning med fristående pelare och vid pelare med stor diameter än vid förstärkning med samverkande pelare i skivor eller gitter.

Exempel; 0,6° avvikelse från teoretisk lutning och 50 mm avvikelse i plan motsvarar en lägesavvikelse vid pelarens botten på 150 mm vid 10 m pelarlängd. I de fall glapp mellan pelare ej kan accepteras bör detta kompenseras genom större projekterad överlappning (mindre c-avstånd) mellan pelarna.

Anvisningar: Vid projektering skall ett flertal faktorer för utförandet beaktas, värderas och redovisas i förfrågningsunderlaget. Av särskild betydelse är:

- Geotekniska egenskaper på jord som skall förstärkas.
- Markens ytskikt och bärighet med avseende på framkomlighet och totalstabilitet.
- Eventuell fyllnings utbredning, mäktighet, sammansättning och fasthet.
- Läge och typ av markförlagda ledningar och andra hinder.
- Hinder för framkomlighet och fri arbetshöjd.
- Känslighet och risker för omgivningen vid normalt utförande.
- Tillgång till el och vatten för föreskriven vattenbegjutning och av säkerhetsskäl.

Dimensioneringsförutsättningar av betydelse för utförandet skall redovisas i förfrågningsunderlaget. Av särskild betydelse är:

- Toleranskrav i planläge och lutning för enskilda pelare.
- Toleranskrav för stigning, rotationshastighet och dosering av binde medel.
- Om provpelare skall utföras samt i så fall hur tillverkning och kontroll av dessa skall ske.
- Information om dimensionerande värden för färdig pelare, speciellt pelarnas hållfasthet och förstärkningens geometri.
- Omfattning av grundkontroll och tilläggskontroll samt med vilka intervall som pelarprotokoll skall redovisas.

Pelares planläge och lutning

Utsättning för pelare sker genom att varje pelares läge markeras på markytan. Avvikelser i plan och lutning från teoretiska lägen, som uppkommer när blandningsverktyget roteras ner, skall motverkas så långt som möjligt.

Vid förstärkningar med pelare i skivor eller gitter är en noggrann ansättning av blandningsverktyget och inriktning av gejderns lutning mycket betydelsefull för att inte glapp mellan pelare skall uppstå. Vid förstärkningar med fristående pelare är en lika noggrann ansättning och gejderns inriktning ofta av mindre betydelse.

Toleranskraven för maximalt tillåten avvikelse från teoretiskt planläge och teoretisk lutning finns angivna på ritningar.

Anvisningar: Toleranskrav för avvikelse från teoretiskt planläge bör inte, ens vid gynnsamma installationsförhållanden, vara mindre än 50 mm, normalt dock mindre än eller lika med 100 mm.

Toleranskrav för avvikelse från teoretisk lutning bör inte, ens vid gynnsamma installationsförhållanden, vara mindre än $0,6^\circ$ (ca 10 mm/m), normalt dock mindre än eller lika med $1,1^\circ$ (ca 20 mm/m).

Inblandning av bindemedel

Vid förstärkning av områden eller jordarter där erfarenhetsmässigt godtagbara resultat erhålls, normalt vid sensitiv och högplastisk lera, ges nedan exempel på godtagbart utförande av inblandningen. Det förutsätts därvid att ett traditionellt blandningsverktyg enligt SGF 4:95 figur 8.1 används.

Rotationshastigheten, såväl vid nedborrning av blandningsverktyget som vid inblandning av bindemedel, bör vara inom intervallet 100 - 200 varv per minut (rpm). Vid högre hastighet finns, enligt vissa uppgifter, risk för slungeffekter och hålbildning, speciellt vid pelardiametrar större än 600 mm. Lägre rotationshastighet än 100 rpm kan, enligt vissa uppgifter, ge sämre inblandning.

Stigningen bör avpassas till typ av bindemedel och jordart. Stigningen bör minskas i jordar med lägre vattenkvot än flytgränsen och i de fall cement används som bindemedel.

Utmatningstrycket för bindemedel, och därmed även luftflödet, skall hållas så lågt som möjligt under blandningsprocessen. Om alltför högt tryck används finns risk för att luftstrålen orsakar hydrauliskt brott i leran och skapar sprickgångar där bindemedlet transporteras utan att blandas med omgivande jord.

För att undvika utblåsning av bindemedel i fria luften utförs normalt s.k. tomborrning, d.v.s. utan luft- och bindemedelstillförsel, i den övre delen av pelaren. Detta medför att pelarnas hållfasthet blir lägre i den övre delen. Någon förstärkningseffekt i torrskorpelera kan inte påräknas.

För att minska risken för utblåsning av bindemedel till markytan kan en extra tätman-schett eller huv på borrstången hjälpa. Om inte kan det bli nödvändigt att avsluta utmatningen på större djup än avsett. I sådana fall måste verifiering av att erforderlig förstärkningseffekt erhållits ske.

Kratrar och hål i markytan, upp till några meters djup, kan uppkomma på grund av undanträngning och markbrott i omgivande jord. Om detta sker måste utmatningstrycket reduceras eller stängas helt tidigare än avsett och verifiering av att erforderlig förstärkningseffekt erhållits ske.

Bindemedelsdoseringen övervakas kontinuerligt under tillverkningen. Om eventuellt underskott uppkommer på någon del av pelaren skall denna del snarast kompletteras.

Anvisningar: Maximal stigning vid användning av normalverktyget bör vara:

- Kalkpelare 25 mm/varv
- Kalkcementpelare med ≥ 30 % cement 15 mm/varv i organisk lera
20 mm/varv för övrigt
- Cementpelare 15 mm/varv

Toleranskrav för avvikelse i dosering av bindemedel bör inte vara mindre än:

- ± 20 % av nominell mängd dock minst ± 3 kg/m inom varje flytande 1-meters intervall av enskild pelare.
- ± 10 % av nominell mängd för varje enskild pelare.
- ± 2 % av total nominell mängd för sammanhängande del av hela förstärkningen.
- Lokala överdoseringar, t ex efter kompletteringar, kan godtas.

Vid användning av blandade bindemedel bör toleranskravet för avvikelse från föreskrivet blandningsförhållande inte vara mindre än ± 10 %-enheter. Exempel; beståndsdelarna i en blandning av nominellt 60/40 cement och kalk bör kunna variera från 50/50 till 70/30.

Komplettering vid underkända pelare

Om grundkontroll visar att något moment av en pelarförstärkning inte uppfyller ställda krav, dvs inte kan godkännas, bör en oplanerad tilläggskontroll utföras.

Behov av oplanerad tilläggskontroll kan uppstå:

- Om hinder i jorden försvårar utförande av pelare.
- Om utblåsning av bindemedel till markytan medfört att utmatningen avslutats på större djup än avsett.
- Om kratrar eller hål i markytan medfört att utmatningen avslutats på större djup än avsett.
- Om toleranskrav för planläge eller lutning på pelare överskridits.
- Om toleranskrav för stigning, rotationshastighet eller dosering av bindemedel överskridits.
- Om något annat skäl ger anledning till misstanke att förstärkningsresultatet är sämre än väntat.

Den oplanerade tilläggskontrollen bör avse den eller de egenskaper som är avgörande för förstärkningens funktion och kan utföras som provning eller i enklare fall som sakkunnigutlåtande. Provning kan ske med sondering, framgrävning av pelare eller upptagning av hela pelardelar eller borrhärnor.

Tilläggskontroll, såväl planerad som oplanerad, bör utföras så snabbt att eventuell komplettering med nya pelare kan ske utan att ny etablering behövs.

I de fall de kontrollerade egenskaperna inte helt svarar mot ställda krav, till exempel om erforderlig hållfasthet ej uppnåtts vid förstärkning för ökad stabilitet, bör kontrollberäkningar utföras för att avgöra i vilken grad de underkända pelarna kan räknas tillgodo i förstärkningen. Komplettering med nya pelare begränsas på så sätt till att enbart täcka den marginaleffekt som krävs.