



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 9
1998-06-23

Grunnforsterkning med kalksementpælar

Stein Christensen

Arnstein Watn

Steinar Nordal

Arnfinn Emdal

Torbjørn Lund

Thomas Kristiansen

Svensk Djupstabilisering

Svensk Djupstabilisering (SD) är ett centrum för forskning och utveckling inom djupstabilisering med kalk-cementpelare. Verksamheten syftar till att initiera och bedriva en branschsamordnad forsknings- och utvecklingsverksamhet, som ger säkerhetsmässiga, funktionsmässiga och ekonomiska vinster som tillgodoser svenska intressen hos samhället och industrin. Verksamheten baseras på en FoU-plan för åren 1996-2000. Medlemmar är myndigheter, kalk- och cementleverantörer, entreprenörer, konsulter, forskningsinstitut och högskolor.

Verksamheten finansieras av medlemmarna samt genom anslag från Byggforskningsrådet, Svenska byggbranschens utvecklingsfond och Kommunikationsforskningsberedningen.

Svensk Djupstabilisering har sitt säte vid Statens geotekniska institut (SGI) och leds av en styrgrupp med representanter för medlemmarna.

Ytterligare upplysningar om verksamheten lämnas av SD:s projektledare Göran Holm, tel: 013-20 18 61, 070-521 09 39, fax: 013-20 19 13, e-mail: holm@geotek.se, <http://www.sgi.geotk.se/sd.htm>.

Swedish Deep Stabilization Research Centre

The Swedish Deep Stabilization Research Centre coordinates research and development activities in deep stabilization of soft soils with lime-cement columns. A joint research programme based on the needs stated by the authorities and the industry is being conducted during the period 1996 - 2000. Members of the Centre include authorities, lime and cement manufactures, contractors, consultants, research institutes and universities.

The work of the Swedish Deep Stabilization Research Centre is financed by its members and by research grants.

The Swedish Deep Stabilization Research Centre is located at the Swedish Geotechnical Institute and has a Steering Committee with representatives chosen from among its members.

Further information on the Swedish Deep Stabilization Research Centre can be obtained from the Project Manager, Mr G Holm, tel: +46 13 20 18 61, fax: +46 13 20 19 13 or e-mail: holm@geotek.se, <http://www.sgi.geotk.se/sd.htm>.



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 9

1998-06-23

Grunnforsterkning med kalksementpælar

Stein Christensen SINTEF

Arnstein Watn SINTEF

Steinar Nordal NTNU

Arnfinn Emdal NTNU

Torbjørn Lund JERNBANEVERKET UTBYGGING

Thomas Kristiansen VEIDEKKE ASA

Förord

Svensk Djupstabilisering (SD) baserar verksamheten på sin FoU-plan som bl a innehåller ett antal stora FoU-projekt. För att öka underlaget för dessa forskningsprojekt satsar SD på kompletterande mätningar/analyser i lämpliga förstärkningsprojekt. Redovisningen av dessa mätningar /analyser granskas inte av SD, utan redovisade resultat och framförda åsikter är författarens. Redovisningarna är arbetsrapporter inom SD. De ingår i SD:s arbetsrapportserie och skall endast användas internt inom SD och inte spridas utanför SD.

Föreliggande arbetsrapport är en redovisning av det norska FoU-projektet ”Grunnforsterkning med kalksementpæler”. Projektet utgör ett underlag för SD:s forskningsprojekt inom flera områden, främst inom ”Kontrollmetoder” och ”Installationsprocessen”. FoU-projektet är redovisat i en slutrapport och en delrapport. Både dessa rapporter ingår i arbetsrapporten. Båda rapporterna är publicerade av Veidekke ASA och Jernbaneverket Utbygging.

Linköping i januari 1999

Göran Holm
Projektledare för SD

Arbetsrapport

Beställning
(endast för
medlemmar av SD)

Upplaga

Svensk Djupstabilisering
c/o Statens geotekniska institut
581 93 Linköping

Tel: 013-20 18 62
Fax: 013-20 19 13
E-post: sussyl@geotek.se

150 ex



GRUNNFORSTERKNING MED KALKSEMENTPÆLER

en OFU-kontrakt mellom



OG



Jernbaneverket
Utbygging

støttet av



SND



SINTEF Bygg og miljøteknikk
Geoteknikk

Postadresse: 7034 Trondheim
Besøksadresse: Klæbuveien 153
Telefon: 73 59 46 00
Telefaks: 73 59 53 40

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

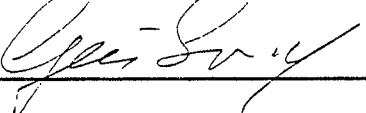
GRUNNFORSTERKNING MED KALKSEMENTPÆLER

FORFATTER(E)

Stein Christensen og Arnstein Watn, SINTEF
Steinar Nordal og Arnfinn Emdal, NTNU

OPPDRAGSGIVER(E)

Veidekke ASA
Jernbaneverket Utbygging

RAPPORTNR. STF22 F98625	GRADERING Prosjektintern	OPPDRAGSGIVERS REF. Per Ola Ulseth (Veidekke) og Torbjørn Lund (JBV)	
GRADER. DENNE SIDE Prosjektintern	ISBN	PROSJEKTNR. 22K079 – FoU kalksementpæler	ANTALL SIDER OG BILAG 53/22
ELEKTRONISK ARKIVKODE ksrapport2206.doc		PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Arnstein Watn 	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Steinar Nordal
ARKIVKODE 611	DATO 1998-06-23	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Geir Svanø, Forskningsjef 	

SAMMENDRAG

Jernbaneverket og Veidekke gjennomfører et FoU-prosjekt rettet mot bruk av kalksementpæler som jordforsterkning. Prosjektet har som formål å øke kompetanse og kunnskap om metoden for å øke konkurransedyktighet i markedet.

Denne rapporten er en sluttrapport for prosjektet, og inneholder evaluering av erfaringer, problemstillinger og utfordringer knyttet til kalksementforsterkning. Rapporten omhandler følgende hovedtema:

- metode og anvendelse
- materialer (jord, kalk, sement og blandingen kalksement)
- prosjektering (felt og laboratorieundersøkelser, anvendelse, kvalitet – og toleransekrav)
- installasjon (forutsetninger, utstyr, utførelse og effekt på omgivelser)
- kvalitetskontroll (kontrollmetoder for styrke)
- forhold som har betydning for resultat.

Det er lagt betydelig vekt på utvikle bedre metoder og prosedyrer for etterkontroll av oppnådd kvalitet av kalksement-forsterkningen. Prosjektet har derfor gitt et viktig bidrag for å få en utvikling mot en mer funksjonsbasert spesifikasjon av kalksementforsterkning.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Geoteknikk	Geotechnical Engineering
GRUPPE 2	Sediment	Sediment
EGENVALGTE	Grunnforsterkning	Soil improvement
	Kalksementpæler	Piles of limecement

INNHOLDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG

1. INNLEDNING	8
1.1 BAKGRUNN	8
1.2 ORGANISERING AV PROSJEKTET	8
2. METODE OG ANVENDELSE	10
2.1 HISTORIE	10
2.2 METODE	10
2.3 ANVENDELSE	10
3. MATERIALER	12
3.1 JORD	12
3.1.1 Mineralsammensetning	12
3.1.2 Kornfordeling	12
3.1.3 Jordartstyper	13
3.1.4 Styrkeegenskaper	14
3.2 KALK	15
3.3 SEMENT	16
3.4 KALKSEMENT I JORD	16
4. PROSJEKTERING	18
4.1 NØDVENDIGE FORUTSETNINGER	18
4.1.1 Grunnundersøkelser	18
4.1.2 Laboratorieundersøkelser på opprinnelig jord	18
4.1.3 Prøveblandinger	19
4.1.4 Prøvepæler i felt	21
4.2 DESIGNKRITERIER OG BEREGNINGSMETODIKK	21
4.2.1 Samvirke	21
4.2.2 Setninger	22
4.2.3 Bæreevne	23
4.2.4 Stabilitet av skråning/skjæring	23
4.2.5 Rystelser	26
4.3 TIDSASPEKTER	26
4.3.1 Fasthetsutvikling av pæl	26
4.4 KVALITETSKRAV OG TOLERANSER	26
4.4.1 Generellt	26
4.4.2 Kravspesifikasjon	26
5. INSTALLASJON	28
5.1 FORUTSETNINGER	28
5.1.1 Tilgjengelighet	28
5.1.2 Miljøhensyn	28
5.2 UTSTYR	28
5.2.1 Rigg	28
5.2.2 Materialtanker og trykkluftaggregat	29
5.2.3 Innblandingsverktøy	29
5.2.4 Kalksement-innblanding	30
5.3 UTFØRELSE	30

5.3.1	Plassering	30
5.3.2	Pældiameter.....	31
5.3.3	Innblandingsmengde	32
5.3.4	Rotasjonshastighet	33
5.3.5	Stigning	33
5.3.6	Trykk.....	34
5.4	EFFEKT PÅ OMGIVELSER	34
5.4.1	Poretrykk.....	34
5.4.2	Blindboring og omrøring	35
5.4.3	Oppblåsning	35
6.	KVALITETSKONTROLL.....	36
6.1	DOKUMENTASJON (PROTOKOLL)	36
6.2	PORETRYKKSÅLING.....	36
6.3	PASSERING	36
6.4	KONTROLLMETODER FOR STYRKE.....	37
6.4.1	KPS - kalkpælsondering	37
6.4.2	FOPS – omvendt kalkpælsondering.....	37
6.4.3	CPTU - trykksøndering.....	38
6.4.4	Kjerneboring	39
6.4.5	Utgraving	40
6.4.6	Opptak av pæl	40
6.4.7	Gravekontroll	41
6.4.8	Andre in-situ kontrollmetoder.....	41
6.4.9	Laboratorieforsøk.....	42
7.	FORHOLD SOM HAR BETYDNING.....	45
7.1	FASTHETSUTVIKLING	45
7.1.1	Fasthetsutvikling av pæl	45
7.1.2	Fasthetsutvikling av materiale omkring pæl	45
7.2	INNFLYTELSE PÅ STABILISERINGSEFFEKT	46
7.2.1	Silt.....	46
7.2.2	Humus	46
7.2.3	Stein	46
7.2.4	Sulfid.....	46
7.2.5	Sulfat	46
7.2.6	Vanninnhold.....	47
7.2.7	Kornfordeling.....	47
7.2.8	Lagdeling	47
7.2.9	Oppsprekking	47
7.2.10	Telefarlighet.....	47
7.3	DIMENSJONERING.....	48
7.3.1	Effektivspenning	48
7.3.2	Totalspenning.....	48
7.3.3	Samvirke	48
7.4	INSTALLERING.....	49
7.5	KONTROLLMETODER.....	49
8.	FORSLAG FOR VIDERE ARBEID	50
9.	REFERANSER	51

FIGURER

SAMMENDRAG

Jernbaneverket Utbygging og Veidekke ASA har gjennomført et FoU prosjekt rettet mot bruk av kalksementpæler som jordforsterkning. Formålet med prosjektet har vært å øke kunnskapene om metoden for optimal anvendelse. Prosjektet er finansiert av Veidekke ASA og Jernbaneverket Utbygging med støtte fra Statens Nærings- og Distriktsutviklingsfond (SND). Norges Geotekniske Institutt (NGI), Statens Geotekniske Institut (SGI) og SINTEF Bygg og miljøteknikk, Geoteknikk ble engasjert for gjennomføring av prosjektet. Disse har også bidratt med betydelig egeninnsats i prosjektet.

Prosjektet har bestått av tre faser:

Fase I	Status over teknologi og metodeanvendelse i Norge
Fase II	Prøveprogram ved Såstad-Haug
Fase III	Sluttrapportering

Grunnforsterkning med kalksementpæler har vist seg å være en effektiv og økonomisk metode med sterkt økende anvendelse for forsterkning av bløt leire. I de senere år har dette fått økt popularitet i Norge, med tradisjonelle anvendelser, såvel som krevende anvendelser helt i forkant av den teknologiske utvikling. Dette har økt behovet for en gjennomgang av metoden, både hva gjelder beregningsprinsipper, praktisk gjennomføring og kontroll av kvalitet. Sverige har vært et foregangsland i utvikling og bruk av kalksementpæler. Mye av grunnlaget for dagens norske praksis stammer fra svensk erfaring. Mens metoden i Sverige primært har vært nyttet til øking av bæreevne og reduksjon av deformasjoner under fyllinger etc., har en på norsk side utvidet anvendelsen til også å omfatte skjæringer i bløte masser. Dette er en interessant utvidelse, men krever forsiktig prosjektering og god utførelse.

Kalksementpæler gir spesielt god styrke- og stivhetsøkning i svært bløte og sensitive jordarter. Ikke minst er reduksjon av sensitiviteten en viktig, gunstig effekt. Metoden har den fordel at den erfaringsmessig virker best jo bløtere forholdene er. Effekten er dårligere i grovere masser som silt og sandig leire.

Pelene installeres ved at kalk og sement i pulverform injiseres gjennom en borstang ved hjelp av trykkluft (ofte 3-6 bar) og vispes inn i jorda når boret trekkes opp. Pælene kan være over 20m lange og vanlig diameter er 400 til 1000mm. Det brukes i all hovedsak ulesket kalk og Standard Portland sement som bindemiddel. Pælene kan settes som enkeltstående pæler, i mønster eller ribber, da ofte med overlapp for å sikre en veggvirkning.

Som grunnlag for prosjektering av kalksement-forsterkning må det gjennomføres forundersøkelser. I felt må lagdeling og sammensetning av løsmassene bestemmes, inklusive dybde til fjell der det er aktuelt. Forekomst av stein bør klarlegges. Normalt kreves opptak av prøver for bestemmelse av geotekniske parametre for styrke og stivhet i laboratorium. I forbindelse med kalksement-forsterkning legges det spesielt vekt på bestemmelse av in situ vanninnhold. Det bør også legges vekt på korngradering og eventuelt humus- og sulfatinnhold. Poretrykksmålinger i felt anbefales for å gi grunnlag for stabilitetsvurderinger.

For å undersøke effekten av en forsterkning med kalk /sement utføres normalt blandeprøver i laboratorium. Ulik mengde og andel kalksement tilsettes jordprøver fra felt og enaksjell trykkstyrke bestemmes etter varierende herdetid (1, 14, 28 dager). Tilsatt mengde varierer fra 6 til 12% kalksement i forhold til jordas tørrvekt. Det nyttes ofte 50/50% forhold mellom kalk og sement om ikke blandeforsøkene gir grunnlag for annet. I Sverige er det utviklet en spesiell

maskin for blandeforsøk for å sikre at resultater fra ulike laboratorier kan sammenlignes. Dette bør vurderes også i Norge. Blandeforsøkene brukes ofte til å anslå en dimensjonerende styrke og stivhet for kalksement-forsterket jord, men slike verdier bør verifiseres ved kontroll i felt etter installasjon.

FoU prosjektet og parallell aktivitet har vist *lav styrke for pæler i ren silt*, mens et visst siltinnhold i leire ofte er gunstig.

Innhold av humus og sulfater/sulfider i leira fører normalt til en dårligere fasthetsoppbygging ved kalksement-stabilisering. Det er indikasjoner på at humusinnhold ned i 1.5-2 % har hatt innvirkning på fasthetsoppbyggingen. Norske leirer har normalt lavt humusinnhold, slik at det relativt sjelden er noe problem. Betydelig humus- eller sulfatinnhold tilsier normalt at sementtilsetningen bør økes på bekostning av kalken. Problemstillingen knyttet til humus og sulfat kan i praksis best avklares ved at det utføres testing av blandeprøver i laboratorium.

Det foreligger en del enkle regnemodeller for beregning av setninger og stabilitet av kalksement-forsterket jord. Graden av samvirke mellom pælene/ribbene styres av stivhetsforskjeller i pæl og jord og ulike antagelser kan ha stor betydning for beregningsresultater og dimensjonering. **Valg av dimensjonerende styrke- og stivhetsparametre og antakelse av samvirke må derfor gjøres ut fra en vurdering av de aktuelle forholdene og belastningstyper.**

Eksisterende metodikk for beregning av setninger ved kalksement-forsterkning under fyllinger, synes å fungere bra. Tilbakeregning av flere instrumenterte tilfeller er likevel ønskelig.

Beregning av stabilitet av kalksement-forsterkede skråninger/skjæringer gjøres i dag primært ved en totalspenningsanalyse, der en kombinerer styrken av kalksementribber med styrken av den uforstyrrede jorda mellom ribbene etter et arealforhold. Enkelte retningslinjer anbefaler et tak på regnemessig styrke av kalksementribbene (f.eks. $s_u < 150 \text{ kPa}$), mens andre anbefaler reduksjon av den regnemessige udrenerte skjærstyrken for jorda mellom ribbene (f.eks. 50%). Andre igjen lar ribbene ta hele belastningen og neglisjerer styrken av jorda mellom ribbene. For skjæringer i leire er som kjent langtidstabiliteten ofte kritisk og det er god geoteknisk praksis å evaluere denne med en effektivspenningsanalyse. Permanente kalksement-stabiliserte skjæringer bør vurderes ved effektivspenningsbaserte stabilitetsanalyser. I denne sammenheng er poretrykksevalueringer / målinger av avgjørende betydning.

FoU-prosjektet har, spesielt gjennom et omfattende testprogram i felt, vært rettet mot vurdering av prosedyrer og metoder for installasjon og kontroll. Forslag til testprogram på ble utarbeidet av NGI. Det ble fokusert på variasjon i jordartsforhold, visstype, stigning, rotasjonshastighet og kontroll av pælkvaliteten. Kvaliteten på pælene ble testet ved omvendt pælsondering (FOPS), trykksondering (CPTU), opptak av hele pæler, Kjerneprøver og testing i laboratorium på opptatte prøver. Veidekke ASA ledet/koordinerte arbeidene under feltforsøkene som ble gjennomført på Rygge i Østfold.

Testprogrammet viser en betydelig effekt av forsterkningsarbeidet.

Resultatene fra testprogrammet viser at installasjonsprosedyrer og utstyr er svært viktig, men mindre variasjon i stighøyde, rotasjonshastighet og innblandingmengder innenfor de grenser som her er undersøkt, er overraskende liten. Utstyrets faktiske evne til god innblanding er helt avgjørende. De opptatte pælene viser til dels betydelig inhomogenitet. En betydelig kvalitetsheving bør etter SINTEF/NTNUs oppfatning være innen rekkevidde med økt forskning på utstyr og på blandefasen.

Det er til dels betydelig lokal variasjon i styrke målt ved CPTU og FOPS, noe som bekrefter at pælen er relativt homogen med vekslende sterke og svake partier. Imhomogenitet og lokal variasjon ble bekreftet ved studier av opptatte pæler. Variasjonene kan være lokale slik at pælene vil kunne oppføre seg rimelig helhetlige under vertikal belastning idet variasjonene motvirkes noe over pæltverrsnittet. Men for noen pæler var variasjonene så betydelige at det kan være grunnlag for bekymring for at de svake partiene vil kunne være av vesentlig betydning for oppførselen også under vertikal belastning.

Styrke målt ved CPTU og FOPS samstemmer rimelig godt, men CPTU sonden skar ut av pelen i 4-12m dybde, med et gjennomsnitt på 7 m for pæler med lengde 12 m. Testprogrammet er oppmuntrende med tanke på bruk av CPTU for kvalitetskontroll så lenge man ikke skal dypt i lange pæler. Testprosjektet har gitt verdifull erfaring vedrørende tolking av CPTU i kalksementpæler.

Enaksielle trykkforsøk på utvalgte prøver fra opptatte pæler (NGI) viser en relativt høy trykkstyrke i størrelsesorden lik den som finnes ved CPTU og FOPS. Enaksielle trykkforsøk på kjerneprøver boret ut og testet av SGI gir meget lav trykkstyrke (ca 25% av NGI forsøkene) med et par unntak. Avvikene kan ikke forklares fullt ut. NGI prøvene er skåret ut av intakte blokker fra opptatte pæler, mens SGI prøvene er systematisk tatt fra spesifiserte dybder. NGI prøvene kan ha blitt svekket ved opptak av pæl, samtidig som de utvalgte prøvestykkene lett vil bli de mest intakte og beste. Disse effektene kan i noen grad motvirke hverandre (for NGI prøvene). SGI resultatene viser trolig en lav styrke på grunn av forstyrrelse ved utboring. Den styrken som er målt, er imidlertid overraskende lav, og dette forhold burde avklares gjennom videre forskning.

Skråstilt CPTU gjennom ribber er utført i testprogrammet og setter fokus på bl.a. installasjonsnøyaktighet og retningsavvik under boring. Det må forventes at ribber får svake gliper i lengderetningen. Pæler prosjektert som doble ribber med overlapp, kan til eksempel gå i hverandre under installasjon og gi redusert faktisk tverrsnitt. Samtidig kan imidlertid homogeniteten bli bedre. Testprosjektet viser at det er ønskelig med en bedre kontroll med den faktiske plasseringen av pælen. Dette kan f.eks. gjøres gjennom en helningskontroll med inklinometermåling som fast del av installasjonsprosessen.

En sammenstilling av skjærfasthet mot vanninnhold i enaksielle trykkprøver, viser stor spredning, men bekrefter tidligere erfaring at høyt vanninnhold ofte gir sammenligningsmessig lav styrke. Bruddtøyningen i de enaksielle trykkforsøkene ligger rundt 1%, noe som ikke er skremmende med tanke på samvirke med jorda rundt pælene.

Testprogrammet understreker betydningen av at det settes prøvepæler i større prosjekter og at det legges opp til god kontroll under og etter installasjon i det endelige prosjekt.

Det har vært pekt på at en på sikt må komme bort fra kontroll basert primært på spesifikasjon og dokumentasjon av utførelse og over på en funksjonskontroll, der kvaliteten på det ferdige produkt kontrolleres. Prosjektet viser at CPTU kan være et godt hjelpemiddel i denne sammenheng, så lenge konen ikke skjærer ut av pelen. Problemer med kjerneboring og annen prøvetaking i herdet pæl og derpåfølgende testing, er betydelige. Det foreslås at man alternativt bør videreutvikle prøvetaking i fersk pæl, med tilhørende rutiner for herding og testing i laboratorium under kontrollerte betingelser.

Noen erfaringer fra andre prosjekter er av generell interesse og fremheves også her:

Virkning av blindboring kan være en betydelig nedsatt skjærstyrke i blindboringssonen, spesielt på kort sikt. Omfattende blindboring i jord som ikke skal fjernes i etterkant, bør normalt unngås.

Ved installasjon av kalksementpæler kan en midlertidig få satt opp poreovertrykk i jorda, noe som er klart ugunstig i forbindelse med stabilitet av skråninger. Målinger har imidlertid vist at poreovertrykket normalt reduseres rimelig raskt etter installasjon, uten at dette bør påregnes og erstatte egne målinger i aktuelle tilfeller.

Det høye innblåsingstrykket kan i spesielle tilfeller føre til at luft penetrerer inn i omkringliggende jord (fortrinnsvis i linser av silt/sand?) og redusere skjærstyrken i den intakte leira.

Blandeprøver i rene siltmasser gir en annen struktur på de ferdige kalksementprøvene. Disse prøvene har betydelig lavere styrke og høyere brudddeformasjon sammenlignet med tilsvarende prøver blandet med masser av siltig leire og leire.

Bruk av kalksementpæler har et betydelig potensiale som jordforsterkning for ulike problemstillinger. For å kunne oppnå optimal bruk bør det fokuseres på problemstillinger knyttet til:

- installasjon (utstyr, prosedyrer, plasseringsavvik)
- kontroll (kontrollmetoder i felt og laboratorium, med vekt på bestemmelse av effektivspenningsparametre)
- dimensjonering (effektivspenningsbaserte dimensjoneringsmodeller for skjæringsstabilisering, etablering av erfaringsdatabase)

FoU prosjektet avsluttes med denne rapporten. Prosjektet har bekreftet at jordforsterkning med kalksementpæler er et godt alternativ i bløte leirer. Prosjektet har bidratt til økt kompetanse innen de deltagende miljøer, som vil bidra til at denne kompetanse bringes videre. Prosjektet har vist at det er nødvendig med videre forskning og utvikling innen feltet, et arbeid som vil bli fulgt opp i andre sammenhenger.

Prosjektet har spesielt fokusert på å utvikle bedre metoder og bedre prosedyrer for etterkontroll av oppnådd kvalitet av kalksement-forsterkningen og har gjennom dette gitt et viktig bidrag til å få en utvikling mot en mer funksjonsbasert spesifisering av kalksement-forsterkning.

1. INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Prosjektet "Kalksementpæler som grunnforsterkning" er et FoU-samarbeid mellom Jernbaneverket Utbygging og Veidekke ASA om videreutvikling av kalksement-stabilisering som grunnforsterkning. Prosjektet støttes av Statens Nærings- og Distriktutviklingsfond, og blir gjennomført i 1997-1998.

Prosjektets hovedmål er å øke kompetanse og kunnskap om metoden med kalksementpæler for å øke konkurransedyktighet i markedet.

Formålet med denne rapporten er å trekke hovedkonklusjoner fra de forsøkene som er gjort, videre vurdere hovedtrekk av status for metoden i dag, samt å dra konklusjoner ut av de erfaringene som er gjort fra feltforsøk og de siste års erfaringer fra bruk av metoden i Norge (f. eks. Vestfoldbanen). Bakgrunnen for denne rapporten er:

- tidligere erfaringer fra bruk av kalksement-metoden (prosjektrapport fra fase I)
- erfaringer fra prøveprogram ved Såstad-Haug (prosjektrapporter fra NGI og SGI i fase II)
- erfaringer fra dypstabiliseringsprosjektet i Sverige
- rapporter fra SGI og veiledning fra SGF
- erfaringer fra utbygging av Vestfoldbanen
- eksamensarbeid og prosjektoppgaver ved NTNU
- erfaringer fra andre eksterne kilder (Vegvesenet, konsulenter, entreprenører)

Denne rapporten gir en gjennomgang av anvendelsesområder, forutsetninger og retningslinjer for prosjektering, utførelse og kontroll. Hovederfaringene fra det gjennomførte F&U-prosjektet er gitt med råd om hvordan dette bør innvirke på videre praksis. Det er gitt en vurdering av hvor metoden står i dag, samt forslag til prioriterte oppgaver i videre arbeid.

1.2 ORGANISERING AV PROSJEKTET

Prosjektet er delt i 3 faser

- Fase I Status over teknologi og metodeanvendelse i Norge
- Fase II Gjennomføring av prøveprogram i felt ved anleggsprosjektet Såstad-Haug på Østfoldbanen som Veidekke utfører for Jernbaneverket
- Fase III Sluttrapportering. Evaluering av erfaringer, problemstillinger og utfordringer knyttet til kalksementpæler

Prosjektet er blitt finansiert av Veidekke ASA og Jernbaneverket Utbygging med støtte fra Statens Nærings- og Distriktutviklingsfond (SND). Arbeidet har vært gjennomført som en Offentlig Forsknings- og Utviklingskontrakt (OFU-kontrakt). Prosjektet har vært organisert i en arbeidsgruppe og en styringsgruppe. Sammensetningen av arbeidsgruppen har variert fra fase til fase i tråd med aktørenes aktivitetsnivå i prosjektet.

Fase I er gjennomført av Veidekke ASA og Jernbaneverket Utbygging. Rapporten er utført av:

Thomas Kristiansen Veidekke ASA
Torbjørn Lund Jernbaneverket Utbygging

Thomas Kristiansen og Torbjørn Lund har vært faste medlemmer av arbeidsgruppen i alle faser av prosjektet.

Fase II er gjennomført i samarbeid med Norges Geotekniske Institutt (NGI), Statens Geotekniske Institut (SGI), Herkules Grundläggning, Bj. Kynningsrud, Ingemar Forsgren Consult, Norcem og Franzefoss Bruk. Arbeidet med rapporter fra felt- og laboratoriearbeid er utført av:

Astrid Eggen NGI
Fritz Nowacki NGI
Arne Kleven NGI
Göran Holm SGI

Fase III er koordinert av SINTEF Bygg og miljøteknikk, Geoteknikk og NTNU, Institutt for Geoteknikk. Arbeidet med sluttrapport fra prosjektet er utført av:

Stein Christensen SINTEF
Arnstein Watn SINTEF
Steinar Nordahl NTNU
Arnfinn Emdal NTNU

Styringsgruppen har hatt fast sammensetning fra Veidekke ASA og Jernbaneverket Utbygging og har bestått av følgende personer:

Thomas Kristiansen Veidekke ASA
Torbjørn Lund Jernbaneverket Utbygging
Eldgrim Ødemotland Veidekke ASA (fram til august 97)
Per Ola Ulseth Veidekke ASA (fra og med august 97)
Ole Kontorp Jernbaneverket Utbygging
Tor Olaf Andersen NSB/Jernbaneverket Stab

Jan-Henrik Sæther fra SND har i tillegg møtt jevnlig på styringsgruppemøtene.

I løpet av prosjektet er det avholdt flere møter og "mini seminar" med bred deltagelse fra det geotekniske fagmiljøet i anleggsbransjen. I forbindelse med prosjektet har følgende virksomheter bidratt med betydelig egeninnsats utover det som er godtgjort fra prosjektet:

NGI
SGI
SINTEF/NTNU

Til feltforsøkene i fase II har Norcem og Franzefoss levert materialer og laboratorietjenester fritt. Norcem har dessuten bidratt med noe økonomisk støtte til gjennomføring av forsøkene.

I tillegg til de tidligere nevnte har følgende bidratt med verdifulle faglige innspill underveis:

Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling
Norconsult (tidl Berdal Strømme)
Hjellnes COWI (Tomas Kristiansen fra 01.04.98)
Kjeld Paus og Bengt Broms

2. METODE OG ANVENDELSE

2.1 HISTORIE

Siden midten av 1970-tallet har kalkpælmetoden blitt anvendt i Norden for å stabilisere løse uorganiske leirjordarter. Frem til midten på 1980-tallet ble det hovedsaklig brukt kun kalk som bindemiddel, mens det i de siste ca 10 år hovedsaklig har blitt brukt blandinger av kalk og sement. Metoden er utviklet i Sverige (Paus 1979), og har i økende grad blitt brukt som setningsreduserende og stabiliserende tiltak spesielt i forbindelse med veg- og jernbaneutbygging.

2.2 METODE

I Norge brukes kalksementpæler til å forbedre bæreevne og stabilitet av bløt og sensitiv leire til dybder inntil 15-22 m. Installasjonen foregår ved hjelp av en beltegående rigg med boretårn. En visp montert på borstangen bores ned i jorden (med klokken) til ønsket dybde og stabiliseringsmiddelet (kalk og sement) blåses tørt ut i jorden gjennom en dyse samtidig som vispen trekkes opp og roteres (mot klokken). En prinsippfigur med beskrivelse av selve metoden er vist i figur 1.

Ønsket funksjon for pælene og dermed ønskede egenskaper kan variere i de ulike anvendelser. Kalksementpælene er egentlig søyler av forbedret jord i forhold til omkringliggende jordmasser, der pælkvaliteten normalt ikke er homogen men avhengig av variasjoner i grunnforhold og prosedyrer ved innblanding. Det er viktig at det på forhånd er klarlagt hvilken funksjon pælene skal ha og at konfigurasjon, utstyr, prosedyrer og kontrollfunksjoner er tilpasset dette.

2.3 ANVENDELSE

Kalk- og sementpæler benyttes i hovedsak:

- for å øke jordens bæreevne, f.eks. under fyllinger, veger, jernbaner o.l.
- for å forbedre stabiliteten av skjæringer, naturlige skråninger og utgravninger
- som setningsreduserende eller setningsutjevnende tiltak i forbindelse med fyllinger
- som forsterkning av fundamenter i ledningsgrøfter
- som tiltak for dempe rystelser
- som horisontal jordavstiving for å ta opp krefter fra konstruksjonselementer

Pælene kan settes enkeltvis eller som ribber, gitter og blokker ved at de settes med en viss overlapp. Enkeltpæler kan som hovedregel bare regnes å ta aksiallast. Kalksementpæler settes sammen i mønster av blokker, skiver eller buer for å øke skjærkapasiteten.

Eksempler på de ulike pælemønstre er vist i figur 2.

Hvilke konfigurasjoner som er aktuelle vil avhenge av formålet med kalksement-stabiliseringen. Noen generelle retningslinjer for valg av pælemønstre er gitt i tabell 2.3.1.

Tabell 2.3.1 Anvendelse av ulike pælemønstre

FORMÅL	PLASSERING AV PÆLER
Bærevneforbedring.	Installering av pæler enkeltvis, i ribber eller gitter under vegger, jernbaner og andre faste installasjoner.
Stabilitetsforbedring	Installering av pæler i ribber normalt (i fallretningen) på skråningen.
Spuntavstivning.	Plassering av kalksementpæler som ribber vinkelrett mellom spuntveggene for å øke avstivning av spuntfot og for å hindre bunnoppressing.
Sikring ved utgraving.	Installering av pæler i blokker eller ribber som erstatning for spunt for byggegroper og ledningsgrøfter
Setningsreduksjon.	Installering av enkeltpæler i trekant- eller firkantmønster under vegger og jernbaner. Foruten setningsreduksjon vil kalksementpæler øke permeabiliteten og dermed setningshastigheten og redusere setningstiden for konstruksjonen.
Rystelsesreduksjon.	Installering av pæler som doble ribber forbundet med hverandr (gitter) mellom kilde og mottager kan brukes til å redusere (dempe) rystelser. For nyanlegg kan pælene med fordel installeres under kilden (f.eks. jernbanen) i stedet for mellom kilde og mottaker. Løsninger må utformes slik at de ikke virker som forplantningsmedium for vibrasjoner.

Eksempler på ulike anvendelser av kalksementpæler er vist i figur 3 og 4.

3. MATERIALER

Ved starten av bruken av kalkpælmetoden ble det brukt bare ulesket kalk som bindemiddel, og metoden ble brukt for å begrense totalsetninger og for å fremskynde setningsforløpet. Kalk alene ga en myk pæl med relativt godt samvirke med jorda. Etterhvert ble det også funnet at gips, flyveaske og aluminiumshydroksyd som tilsetning i tillegg til kalk også hadde positiv effekt (styrkeøkning) på pælens egenskaper. Videre forskning og utvikling viste at innblanding av sement sammen med kalk ga en ytterligere forbedring av pælens egenskaper, ved en kombinasjon av kalkens plastiske egenskaper og sementens evne til å øke trykkfastheten. Erfaringsmessig har blandingen kalksement sammenlignet med bare kalk vist seg å kunne anvendes med fordel i de fleste jordarter, og gi en raskere økning av skjærstyrken for samme totale innblandingsmengde. I Norge i dag er det mest vanlig å bruke et blandingsforhold 50/50 kalk og sement. Bruk av andre blandingsforhold er aktuelt for å oppnå optimal effekt avhengig av grunnforhold og bruksområde.

3.1 JORD

Jord kan bestå av enten mineralsk materiale, organisk materiale eller en sammensetning av disse. Med jordart menes jord med spesiell mekanisk eller kjemisk sammensetning, fysiske egenskaper eller geologisk opprinnelse. Kornstørrelse og fordeling, plastisitet og organisk innhold er noen av de viktigste faktorene for å karakterisere jordarten. Plastisiteten (formbarheten) er avhengig av jordartens innhold av finstoff (silt- og leirfraksjon).

Mineralkornene er dannet ved nedbrytning av bergarter og kan ha stor variasjon i størrelse og form. Dette avhenger av flere faktorer, der bergartenes struktur og styrke (mineralogi), erosjons- og nedslipingsprosesser er de viktigste. Avsetningsbetingelsene har stor betydning, og man skiller gjerne mellom marine og ikke-marine avsetninger. Ved avsetning under vann vil sedimenteringsforholdene avgjøre et materiales fordeling og mektighet av grove og fine materialer. Sedimentenes kornfordeling, kornform og mineralogi vil ha stor betydning på materialoppførselen og de mekaniske egenskapene.

3.1.1 Mineralsammensetning

Mineralsammensetningen, og spesielt fordelingen mellom krystallinsk og amorf materiale, har betydning for hvordan jorda reagerer ved innblanding med kalksement. Generelt vil økende innhold av amorf materiale tilsi økte bindinger og dermed større styrke ved blanding av jord og kalksement.

3.1.2 Kornfordeling

Kornfordelingen har stor innvirkning på jordas egenskaper. For kalksement-innblanding har blant annet kornfordelingen både innvirkning på omrøringsegenskapene (hvor lett er det å oppnå en god innblanding) og effekten av innblanding.

Mineralske jordarter inndeles med hensyn til kornstørrelse som vist i Tabell 3.1.1.

Tabell 3.1.1 Fraksjonsinndeling

Fraksjon		Kornstørrelse i mm
Grovinndeling	Fininndeling	
Blokk	-	>600
Stein	-	600 – 60
Grus	Grov	60 – 20
	Middels	20 – 6
	Fin	6 – 2
Sand	Grov	2 – 0.6
	Middels	0.6 – 0.2
	Fin	0.2 – 0.06
Silt	Grov	0.06 – 0.02
	Middels	0.02 – 0.006
	Fin	0.006 – 0.002
Leir	-	<0.002

3.1.3 Jordartstyper

Regler for benevnning av jordarter kan finnes i "Veiledning for symboler og definisjoner i geoteknikk. NGF melding nr.2 1982". Det er viktig å legge merke til at betegnelsen leire bare brukes om en jordart dersom den inneholder > 30% av materiale mindre enn 2µm. Dersom 15-30% av materialet er mindre enn 2µm karakteriseres materialet som leire med angivelse av annen fraksjon, f.eks. siltig leire. Ved 5-15% av materialet mindre enn 2µm er jordarten leirig, f.eks. leirig silt, og dersom det er <5% av materialet som er mindre enn 2µm kan ikke jordarten betegnes med leire. Benevningsreglene avviker noe fra land til land, og **svenske betegnelser er ikke samsvarende med norsk praksis**. Dette medfører f.eks at en jord som i Sverige vil bli betegnet som en silt i Norge vil bli betegnet som siltig leire.

En oversikt over forskjellige jordarter sammen med noen hovedtrekk i forhold til kalksementstabilisering er presentert nedenfor.

Morene

Morene er en usortert breavsetning som kan inneholde alle kornstørrelser fra leir til blokk. Morenejord i granittstrøk er ofte fattig på leire, mens leiren kan være en viktig bestanddel i skiferstrøk. Morene er som regel fast pakket, og avrundingsgraden av kornene bærer bud om transportlengden. Kalksementpæler brukes ikke i morene.

Friksjonsjordarter

Blokk-sandfraksjonen blir ofte betegnet som friksjonsjordart, og kan lett kjennes igjen ved å betrakte kornstørrelsen på de enkelte elementene. Friksjonsjordartene har ofte stor styrke og byr normalt ikke på noe stabilitetsproblem. Unntaket er løst lagret siltblandet sand som ved rystelser kan få kornene til flyte i sitt eget porevann og forårsake skred. Vanlige kalksementpæler brukes ikke i friksjonsjordarter.

Mellomjordarter

Sand-siltblandinger med innslag av leire kalles mellomjordarter, og er telefarlig fordi det har evne til å suge opp vann i løpet av forholdsvis kort tid. Det er ofte vanlige med silt og sandlinser i avsetninger med leire, som skyldes variasjon i utspylingshastigheten ved fronten av avsetningen. Egenskapene mht innblanding og effekt av kalksement-innblanding kan variere betydelig mellom silt og leire. Silt vil ofte ha en tendens til å dilatere ved skjærpåkjenning noe som kan gjøre det vanskelig å få skikkelig omrøring og innblanding. Det er derfor viktig å kartlegge fordeling av silt og leire i løsmassen som grunnlag for å vurdere effekten av kalksement-stabilisering. Kalksementpæler kan brukes i siltjordarter men setter spesielle krav til innblandingsmengde, blandeforhold og utførelse for å oppnå et tilfredstillende resultat.

Kohesjonsjordarter

Jordarter som er dominert av silt-leirefraksjonen blir ofte benevnt som kohesjonsjordarter. Kornene har en evne til å feste seg sammen i motsetning til sandmaterialer. Ferskvannsavsett leire skiller seg fra marint avsatt leire ved at mineralkornene ligger mer parallellorientert i motsetning til de marine leirene hvor mineralkornene har en "korthus"-struktur. Normalkonsolidert leire dannes ved en naturlig, uforstyrret avsetning som kun har vært utsatt for et trykk som tilsvarer leiras egenvekt. Overkonsolidert leire har i lengre tid vært utsatt for en større belastning i form av enten istrykk eller at overliggende masse er erodert vekk.

Kvikkleire blir dannet ved at saltinnholdet i marint avsatt leire vaskes ut tilførsel/gjennomstrømning av ferskvann. Kvikkleire defineres ved en omrørt skjærfasthet $s_r < 0.5$ kN/m². Sensitiviteten i kvikkleire er ofte meget stor (>50), saltinnholdet lavt ($<0.5\%$) og det naturlige vanninnholdet er større enn flytegrensen ($w > w_l$). Kvikkleira blir normalt meget lett omrørt og får en tilnærmet flytende konsistens etter omrøring. Dette gjør det lettere å oppnå en jevn innblanding og kalksement-stabilisering er utstrakt brukt i bløte og kvikke leirer. Kalksementpæler blir primært brukt i normalkonsoliderte marine jordarter, og resultatet blir relativt sett best ved høy sensitivitet.

Organiske jordarter

Organiske jordarter kan inndeles i torv, gytje og mold. Torv er mer eller mindre omdannede rester av myrplanter. Det skilles mellom fibertorv (lett synlige planterester) og svarttorv (planterester ikke synlige). Gytje består av vannavsatte plante- og dyrerester. Grovgytje viser vanlig plantestrukturer og er oftest brun, mens finygtje er strukturløs og består for en stor del av dyrerester. Farven kan være gul, grønn eller brun. Mold er sterkt omdannet organisk materiale med løs struktur. Humus er en fellesbetegnelse på organisk materiale i jord. Generelt vil humusinnhold i jorda medføre dårlig reaksjon med sement. Kalksement-stabilisering har vært lite brukt i organiske jordarter. Innhold av organisk materiale i leire kan virke hemmende på fasthetsoppbyggingen. Kalksementpæler kan brukes i organiske jordarter men setter spesielle krav til innblandingsmengde, blandeforhold og utførelse for å oppnå et tilfredstillende resultat.

3.1.4 Styrkeegenskaper

Udrenert og drenert styrke

Den udrenerte skjærstyrken (s_u) kan bestemmes ved både felt- og laboratoriemålinger på ulike måter. Noen av målemetodene er beskrevet i kapittel 4 og 6. Betegnelse av leire og udrenert skjærstyrke er kan gis ved Tabell 3.1.2

Tabell 3.1.2 Skjærstyrke og betegnelse i leire

Skjærstyrke, s_u (kN/m ²)	Betegnelse
$s_u < 12.5$	Meget bløt leire
$12.5 < s_u < 25$	Bløt leire
$25 < s_u < 50$	Middels fast leire
$50 < s_u < 100$	Fast leire
$s_u > 100$	Meget fast leire

Drenert skjærstyrke avhenger av effektivspenningen normalt på bruddplanet og kan uttrykkes ved:

$$\tau_f = c + \sigma' \cdot \tan \phi = (a + \sigma') \tan \phi$$

hvor c = kohesjon

$a = c / \tan \phi$ = attraksjon

σ' = effektiv normalspenning

$\tan \phi$ = friksjon

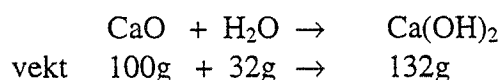
 Tabell 3.1.3 Typiske effektivspenningsparametre, a og $\tan \phi$, for ulike jordarter.

Materiale	Jordart	$\tan \phi$	a (kN/m ²)
Friksjonsmateriale	sand, grus	0.6 – 0.9	0
Mellomjordart	silt	0.5 – 0.7	0 – 20
Kohesjonsmateriale	leire	0.4 – 0.6	10 – 30

3.2 KALK

Ulesket eller brent kalk tilvirknes ved brenning av høyverdig kalkstein ved ca 900 °C og inneholder opptil 95% CaO (ulesket kalk). Ved tilsetning av vann reagerer kalken under en sterkt varmeutvikling og danner Ca(OH)₂ (kalsiumhydroksyd). Ved denne reaksjonen stiger pH til ca 12.5.

Reaksjon med vann (slokning/lesking):



Reaksjonen starter umiddelbart og når sitt maksimum etter 5 min. Temperaturen stiger til ca. 70 °C. Kalkens reaktivitet påvirkes av kornstørrelse og brenningsgrad. For jordstabilisering brukes normalt finmalt, hardbrent kalk med store krystaller som gir lav reaktivitet.

Ved innblanding i jord kan både lesket og ulesket kalk benyttes, men reaksjonsmønsteret er forskjellig og anvendelsesområdet er ulikt. Ulesket kalk leskes ved tilgang på vann og egner seg best i jordarter med høyt vanninnhold (silt, leire), mens lesket kalk kan med fordel anvendes på jordarter med lavere vanninnhold (sand). Begge kalktyper vil medføre at pH i jorda økes, og vil sette i gang et ionebytte i leirmineralene som vil føre til en flokkulering av leirmineraler (grovere struktur).

For kalksementpæler blir det vanligvis benyttet ulesket kalk.

Flytbarheten er mål på hvor lett pulveret strømmes gjennom rør og munnstykke. Denne bestemmes etter en standardisert metode (von Imse), ved å måle andelen av kalk som passerer et bestemt sikt (0.5 mm maskevidde) etter et visst antall ristinger.

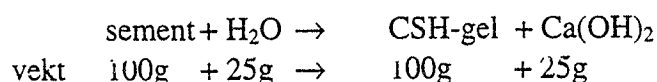
Vanlige krav til ulesket kalk for kalk(sementstabilisering (hardbrent)):

Kornstørrelse 0-0.2 mm
CaO_a-innhold >80% (aktivt)
Flytbarhet >70

3.3 SEMENT

Ved dypstabilisering benyttes vanligvis Standard Portland sement, som tilvirkes ved knusing av sementklinker og gips (bindetidsregulator). Sementklinkeren fremstilles i ovn ved sintring av kalkstein og leire ved temperatur på ca 1450 °C.

Reaksjon av sement med vann:



CSH-gelen dannes på sementkornenes overflate, vokser sammen og fyller ut hulrommet mellom kornene. Porøsiteten reduseres og kornene limer sammen leirpartiklene. Dette medfører en økning av skjærfastheten.

Umiddelbart etter tilsetning av vann i sementen avgis varme ved at lettløselige salter løses opp. Varmeutviklingen øker mot et maksimum etter ca 10 timer, for deretter å avta. Total varmeutvikling av sement er ca 450 kJ/kg, mens kalk har til sammenligning total varmeutvikling på 1163 kJ/kg. Kalsiumhydroksid gir sammen med lettløselige alkalisulfater en høy pH på ca 13.

Vanlige krav til Standard Portlandsement:

Kornstørrelse 0-0.2 mm
Flytbarhet >40

3.4 KALKSEMENT I JORD

Når kalk og sement blandes med jorda skjer det hovedsaklig to reaksjoner. Den ene er reaksjonen av kalsiumioner (Ca⁺) med vann, som gjør at leiren flokkulerer og får en annen struktur (endring i kornfordeling). Den andre er at aluminium- og kiselholdige mineraler i jorda som har puzzolane egenskaper (dvs at de kan reagere med kalsiumhydroksyd, Ca(OH)₂). Ved denne reaksjonen dannes det reaksjonsprodukter som øker fastheten til jorda. Mengden av Ca(OH)₂ har betydning for hvor mye reaksjonsprodukter som dannes, og hvor stor styrkeøkning som skjer. Kalsiumhydroksyd forbrukes og omdannes, men selv ved høy temperatur og etter lang tid er det vanskelig å påvise større mengder med reaksjonsprodukter. Dette skyldes at reaksjonen er meget langsom, men også at kalsiumhydroksyd karbonatiserer og blir inaktiv dersom det er tilgang på luft.

Normal temperatur i jorda er ca 8 °C, som gjør at både sementen og kalken reagerer relativt langsomt med jordpartiklene. Reaksjonen mellom bindemiddel og vann gir en varmeutvikling, og jordtemperaturen stiger. Økning i jordtemperaturen når kalken slukkes blir gjerne 40-50 °C, og lokalt kan temperaturen øke opp mot 100 °C. Med både kalk og sement vil kalkens leskevarme øke sementens reaksjonshastighet og gi en tidlig økning i fasthet.

4. PROSJEKTERING

4.1 NØDVENDIGE FORUTSETNINGER

4.1.1 Grunnundersøkelser

Ved enhver utbygging må nødvendig kunnskap om grunnforholdene og de geotekniske egenskapene til jorden skaffes til veie på et så tidlig stadium som mulig i prosjektet. Dette er viktig for å vurdere om tiltak som kalksementpæler er nødvendig for å øke bæreevnen og stabiliteten, eller redusere setningene for den planlagte konstruksjonen.

Feltundersøkelsene må planlegges og gjennomføres på en slik måte at lagdeling, løsmassekonsistens, grunnvannstand og poretrykksfordeling i området blir kjent. I tillegg vil forekomsten av stein i løsmassen og nivå og forløp for fjell ha stor betydning.

Sonderinger kan gi informasjon om lagdeling og sammensetning av løsmasser og fjell. Aktuelle sonderingsmetoder er:

- dreiesondering
- dreietrykksondering
- vingebor
- trykksondering m/poretrykksmåling
- totalsondering m/fjellkontrollboring

Grunnvannsnivå og poretrykksforhold undersøkes med poretrykksmålere.

Det må tas opp prøver fra løsmassen for undersøkelse av karakteristiske egenskaper for opprinnelig jord og for å kunne gjennomføre prøveblandinger i laboratorium.

Ved prosjektering av kalksementpæler må kabler og ledninger i luft og jord registreres dersom disse er til hinder for utførelse.

4.1.2 Laboratorieundersøkelser på opprinnelig jord

Laboratorieundersøkelser som gjennomføres på opptatte løsmasseprøver fra feltundersøkelsen bør foruten standard rutineundersøkelser, innbefatte undersøkelser som har betydning for blandingsforhold, mengde og styrke av kalksementpæler i den aktuelle jordarten. Aktuelle laboratorieundersøkelsene som grunnlag for prosjektering av kalksementpæler er gitt i tabell 4.1.1.

Tabell 4.1.1 Aktuelle laboratorieundersøkelser som grunnlag for vurdering av kalksement-stabilisering

FORSØK	PARAMETER	FORMÅL
ROUTINEFORSØK		
Beskrivelse	Jordartsbeskrivelse	Vurdering av egnethet.
Veiing	Romvekt (γ)	Vurdering av relativ endring ved blandeprøver
Tørking	Vanninnhold (w)	Grunnlag for vurdering av egnethet og nødvendig tilsatsmengde
Flyte- og utrullingsforsøk	Flyte- og utrullingsgrenser (w_l og w_p)	Grunnlag for vurdering av omrøringsegenskaper
Konusforsøk, enaksiale trykkforsøk	Uomrørt udrenert skjærfasthet (s_u) fra konus og enaksiale trykkforsøk	
	Omrørt udrenert skjærfasthet (s_u)	
	Sensitivitet (s_t)	
SPESIALFORSØK		
Sikteanalyse	Kornfordeling	Vurdering av omrøringsegenskaper og reaksjon med kalksement
	Sulfidinnhold	Vurdering av reaksjon med kalksement
Glødetapsanalyse	Humusinnhold	Vurdering av reaksjon med kalksement
Treksialforsøk	Effektive styrkeparametre: attraksjon, friksjonsvinkel og dilatans (a , $\tan\phi$, D)	Vurdering av omrøringsegenskaper Vurdering av samvirkeegenskaper
Skjærforsøk	Effektive styrkeparametre: attraksjon, friksjonsvinkel (a , $\tan\phi$)	Vurdering av omrøringsegenskaper Vurdering av samvirkeegenskaper
Ødometerforsøk	Deformasjon- og konsolideringsegenskaper (M , c_v , k)	Vurdering av setningsegenskaper Vurdering av samvirkeegenskaper

Resultat fra enaksiale trykkforsøk, treksialforsøk, ødometerforsøk og kornfordeling bør fremstilles i egne plott. I tillegg skal de tolkede resultatene fra laboratorieforsøkene i så stor grad som mulig fremstilles som dybdeplott for de forskjellige borehullene.

Eksempler på resultat og sammenstillinger fra laboratorieforsøk erfart i FoU-prosjektet på Rygge er vist i Figur 5 og 6.

4.1.3 Prøveblandinger

Som underlag for å vurdere egnethet og dimensjonering av kalksementpæler bør det utføres blandingsforsøk i laboratoriet for karakteristiske jordlag. Stedlig masse kan skaffes ved prøveutgraving eller i forbindelse med prøvetaking (feltundersøkelse). Det er meget viktig å kontrollere at de massene som blir tatt ut for prøveblandinger er representative for forholdene i det området som skal kalksement-stabiliseres. Det bør tas sikte på å bruke prøver som også gir grunnlag for å vurdere effekten av variasjonen i løsmassene.

En skal være oppmerksom på at herde- og innblandingsforholdene i laboratoriet er vesensforskjellig fra forholdene i jorda. Det innebærer at resultatene kan bli forskjellige.

Prosedyre for prøveblanding

Det er i dag ingen standard prosedyre for tillaging av laboratorieblandete prøver i Norge. Hvert firma som utfører slikt arbeid har sin egen prosedyre. Det antas at prosedyrene er relativt like. I Sverige er det nylig utarbeidet et forslag til utstyr og prosedyre med det mål at prøvene skal lages likt. Det vil trolig komme forslag til en slik prosedyre også i Norge.

Bindemiddelet kan vispes inn i jordprøvene for hånd eller ved hjelp av en tvangsblender (stor kjøkkenmaskin). Ferdige blandinger fylles i Ø40-54 mm plastsylindre med stamping for hvert lag på ca 2-3 cm tykkelse.

For kalksementpæler med Ø600 mm blander man som regel inn 23-37 kg/m pæl, tilsvarende 80-130 kg/m³ eller 5-12% av tørrvekt. I Figur 7 er det vist et eksempel på dimensjoneringsdiagram for tilsetting av kalksement i innblandingsforsøk i laboratorium.

Blandingstiden bør ligge på ca 5 minutter.

Det mest vanlige blandingsforholdet i Norge er 50% kalk og 50% sement, og det er vist gjennom laboratorie- og feltforsøk at stabiliseringseffekten øker med økende innblandingsmengde (kg/m³, kg/m pæl), innen visse grenser. Ref. SGI No.48

Prøvene forsegles på en slik måte at fuktigheten i prøven bevares. Jordprøver med kalksement som bindemiddel bør normalt oppbevares ved en temperatur som er mest lik in-situ marktemperatur, ca 7-8°C, i et rom med 100% fuktighet.

Enaksiale trykkforsøk

Enaksiale trykkforsøk utføres normalt etter en herdetid på 1, 7 og/eller 14, og 28 døgn. Prøvestykkene er normalt Ø40-50 mm med høyde 80-108 mm. Kraften måles kontinuerlig ved en sammentrykkingshastighet på 1-2%/min (tilsvarer 1-2 mm/min for 100 mm høye prøver). Den udrenerte skjærstyrken regnes normalt ut fra:

$$s_u = \frac{P}{2 \cdot A_0} \cdot (1 - \epsilon)$$

hvor P_f = registrert kraft ved brudd (N)
 A_0 = opprinnelig areal (mm²)
 $\epsilon_f = \delta_f/H$ = vertikal tøying ved brudd (%)

Udrenert skjærstyrke har benevnning kPa (kN/m²).

Eksempel på enaksialt trykkforsøk av prøveblanding med kalksement i materiale fra Rygge er vist i Figur 8.

Treksialforsøk

Treksialforsøk brukes for å finne udrenert skjærstyrke (s_u) og de effektive styrkeparametrene attraksjon (a) og friksjon ($\tan\phi$). Treksiale trykkforsøk gjenspeiler aktuell spenningsituasjon i

jorda i motsetning til enaksiale trykkforsøk som ikke har noen form for sidestøtte. Prøvestykkene tilvirkes på samme måte som for enaksiale trykkforsøk, og testes etter en viss herdetid. I treaksialforsøk kan horisontalspenningen simuleres ved hjelp av trykket i væsken som omgir prøven, og vertikalspenningen påføres ved å trykke prøven mot et fastholdt toppstykke. Etter konsolidering for in-situ spenningsstilstand (eller et valgt spenningsnivå), påføres aksialspenning ved drenert eller udrenert tilstand ved en konstant tøyningshastighet (vanligvis 2%/time). Metoden er egnet for å vurdere styrke både på total- og effektivspenningsbasis.

Resultat fra forsøk på prøvepæler bør i størst mulig grunnlag sammenstilles med resultat fra undersøkelser av opprinnelig materiale som grunnlag for vurdering av effekt av variasjoner i opprinnelige løsmasser.

Eksempel på treaksialforsøk av prøveblanding med kalk i Bangkok-leire er vist i Figur 9.

4.1.4 Prøvepæler i felt

For store byggeprosjekter hvor kalksementpæler vurderes som grunnforsterking bør det gjennomføres prøvepæling. Det er viktig at topografi og grunnforhold ved prøvefeltet er representativt for prosjektet hvor kalksementstabilisering er planlagt. Mengde og type bindemiddel angis da som foreløpige, og pælens styrke må dokumenteres med både in-situ målemetoder og prøvetaking for testing av innblandingsprøver i laboratoriet (se kap. 6). Det er viktig at det blir brukt samme utstyr ved prøveinstallasjon og produksjon. Dette fordi det er stor forskjell på utstyret til de ulike entrepenører.

Som grunnlag for prøvepæling må det bestemmes hva som er formålet med prøvepælingen og dermed hvilke parametre som skal undersøkes. Eksempel på dette kan være:

- variasjon i effekt med ulike løsmasseforhold
- variasjon av effekt med bruk av ulike typer utstyr og prosedyrer (visptyper, omdreiningshastighet, stighøyde)
- variasjon i mengde kalksement
- variasjon i forhold mellom kalk og sement

Prøvebelastning av pæler i felt kan utføres med statisk belastning på pæletopp. Videre kan et mål for pelens styrke finnes fra CPTU og FOPS eller andre in-situ målinger. Ved opptak av hel pel kan kvaliteten av innblandingen med kalksement vurderes utfra homogenitet og indeksforsøk på selve pelen. Kjerneboring for opptak av prøvestykker eller prøvestykker fra opptatte prøver kan testes i laboratorium. Resultatene fra de forskjellige testene som utføres i forbindelse med prøvepælingen bør være veiledende i dimensjoneringen av stabilisering med kalksementpæler.

4.2 DESIGNKRITERIER OG BEREGNINGSMETODIKK

4.2.1 Samvirke

Den kalksement-stabiliserte sonen skal ofte fungere sammen med omkringliggende soner med opprinnelig materiale. I stor grad er effekten av kalksement-stabiliseringen avhengig av et samvirke med det opprinnelige materialet. Antagelser om samvirke har derfor stor betydning for utforming av kalksement-stabiliseringen og hvilke effekter som kan påregnes.

Med fullt samvirke mellom pæler og mellomliggende ustabilisert jord skal skjærdeformasjonen i ethvert snitt i pælen være mindre enn dimensjonerende bruddverdi, og aksial deformasjon og skjærdeformasjon skal opptre likt i både pæl og ustabilisert jord. Karakteristiske styrke- og deformasjonsegenskaper for opprinnelig jord og kalksement-stabilisert jord vil være forskjellige. Tidligere ble det brukt kun kalk som stabiliseringsmiddel, og dette resulterte i pæler som var relativt myke og hadde en plastisk oppførsel som lignet mer på jordas oppførsel. I dag benyttes for en stor del kalksementpæler, og sementen bidrar til en stivere og mindre plastisk pæl, som har ulik oppførsel i forhold til den omkringliggende ustabiliserte jorda. En skisse som viser prinsippet for mobilisering av skjærstyrke for typisk kalk og kalksement-stabilisert materiale i forhold til opprinnelig jord er vist i Figur 10.

Erfaringer viser at kalksementpæler kan være mer eller mindre inhomogene med en uregelmessig struktur, og med varierende egenskaper når de blir utsatt for aksiell belastning sammenlignet med skjærpåkjenning. Dette tilsier at graden av samvirke mellom den kalksement-stabiliserte sone og mellomliggende soner med opprinnelig materiale vil variere avhengig av hvilken type belastning som opptrer.

Det er stor variasjon i praksis i Norge for antagelse av samvirke. Svenske retningslinjer (SGF-rapport 4/95) angir en del generelle retningslinjer som grunnlag for antagelse av samvirke

Erfaringer har vist at det i noen tilfeller er vanskelig å oppnå samvirke mellom kalksement-stabilisert sone og mellomliggende jord ved skjærpåkjenninger. Det har vært registrert tendenser til oppsprekking mellom kalksementribber og mellomliggende jord med manglende overføring av skjærkrefter som resultat.

Generelt tilrås det stor forsiktighet med antagelse av samvirke mellom kalksement-forsterket sone og mellomliggende jord ved skjærpåkjenninger, spesielt ved bruk av høyfaste, stive ribbekonstruksjoner i bratte skjæringer med lav styrke i ustabilisert sone.

4.2.2 Setninger

Konseptet for kalkstabilisering ble i første rekke utviklet for å redusere setninger i bløt leire, og for å fremskynde setningsutviklingen. Setningene i den kalksement-stabiliserte sone påvirkes av modulforholdet $M_{\text{jord}}/M_{\text{pæl}}$, og dekningsgraden (pælenes andel av det stabiliserte arealet som belastes). Videre vil tiden etter installasjon og tidspunkt for belastning av pælene ha innvirkning på setningene. Tidsforløpet av setningene i den kalksement-stabiliserte sone styres i stor grad av pælenes egenskaper, ved at permeabiliteten i kalksement-stabilisert jord er vesentlig høyere enn i mellomliggende jord. Pælene vil derfor virke drenerende og dremsveien for mellomliggende jord blir derfor betraktelig redusert. Lastfordelingen mellom ustabilisert jord og kalksementpæler vil innstille seg på en likevekt, og en antar at det kalkstabiliserte volumet oppfører seg monolittisk med lik setning i pæler og mellomliggende jord. Dersom kalksementpælene avsluttes til fjell eller faste lag, kan det regnes lastspredning i det underliggende lag på konvensjonell måte. Dette gjøres også ved avslutning i leire. Tidsforløpet av setningene i det underliggende lag influeres av kalksementpælenes drenerende funksjon. Metode for beregning av setninger og setningers tidsforløp er gitt i SGF-rapport 4:95 og Statens vegvesen håndbok 188.

Kalksement-forsterkning er benyttet som setningsreducerende tiltak ved flere store samferdselsprosjekter i Norden, med gode resultat.

4.2.3 Bæreevne

Beregningsmodellene for bæreevne som eksisterer i dag er basert på fullt samvirke mellom pæl og ustabilisert jord. Ved kalksement-stabilisering i jordarter utsatt for kryp (setninger ved konstante effektivspenningsforhold) kan det ikke antas fullt samvirke. Retningslinjer for antagelse av samvirke er gitt i SGF-rapport 4/95.

De eksisterende regnemodellene for bæreevne baserer seg på totalspenningsanalyse. Modellen forutsetter fullt samvirke, aksial belastning av pælene og ingen horisontal bevegelse i grunnen. Pælene forutsettes plassert under fyllingen slik at de dekker glideflatens aktive del. Dersom pæler også blir installert i glideflatens direkte og passive sone skal pælene settes sammen til ribber, skiver eller blokk.

Den karakteristiske verdien (s_{uk}) på udrenert skjærfasthet funnet fra felt- eller/og laboratorieforsøk legges til grunn for analysene. Svenske retningslinjer angir at maksimal verdi av s_{uk} ikke skal overstige 150 kN/m^2 , uansett hva felt- og laboratorieresultatene viser (SGF 4:95).

4.2.4 Stabilitet av skråning/skjæring

Hovedprinsipper ved skråningsstabilisering med kalksementpæler er:

- 1) Kalksement som middel til økning av gjennomsnittlig skjærstyrke i jorden.
- 2) Kalksement som middel til insitu produksjon av sammenhengende konstruksjonselement i skiveform, laget ved setting av kalksementpæler i ribber.

I Sverige er det betydelig forsiktighet med bruk av kalksement for stabilisering av permanente skråninger. I SGF 4:95 er dette uttrykt slik: "Beroende på dagens begränsade erfarenhet bör jordförsterkning med kalk- och kc-pelare i skärningar **undvikas** eller endast utföras i undantagsfall och med iakttagande av stor försiktighet beträffande utnyttjad skjuvhållfasthet och utformning."

Dagsaktuelle kommentarer fra svensk side er blant annet (fra Gøran Holm, SGI):

"Ved anvendning i skjæringer og skråninger for stabilitet skal stor forsiktighet iaktas. Dette utifra:

- at initialspenningene i leiren i opprinnelige skråninger kan gjøre at leiren behøver liten og kanskje mindre deformasjon enn pælene før brudd oppstår.
- pælene utsettes for avlastning, og ikke bare for trykk, som man har gode erfaringer fra i Sverige.
- man er utelukket fra å verifisere skråningens oppførsel på samme måte som det gjøres ved vegfyllinger gjennom forbelastning og overhøyde."

Dette er også gjeldende for norske forhold.

Det er fremdeles et begrenset antall prosjekter som er gjennomført i Sverige. Et vellykket eksempel er vist av Adestam (NGM-96), beskrivende en utgraving for motorveg ved Norrkøping. En omfattende skråningsstabilisering med Ø600mm kalksementpæler i ribber med c/c 1,2m, og blokker er benyttet. Udrenert skjærstyrke (s_u) insitu var 10-13kPa, og det ble beregningsmessig benyttet $s_u=100\text{kPa}$ i ribbene, forsiktig estimert i forhold til resultater fra innblandingsforsøk. Sikkerhetsfaktoren ble beregningsmessig øket fra 0,66 (utgraving uten kalksementpæler) til 1,64 (med kalksementpæler i ribber og blokker).

I Norge er det etterhvert tatt i bruk å stabilisere skjæringer ved setting av kalksementribber. Skivene settes i fallretningen av skjæringen, og i noen tilfeller forsterkes også jorden mellom ribbene i form av skiver parallellt med trauet i forskjellige nivå i skråningen.

Kravet til ribber har vært fokusert på **kontinuitet** (dvs. god overlapp mellom pæler), **korrekt dimensjon av ribbe**, kvalitet av enkeltpæler for å oppnå **homogene og sterke** pæler uten horisontal skiktning og hvordan ribben som et stivt element kan **samvirke** med jorden for overføring av skjærkrefter ved sammenlignbare deformasjoner.

Betydningen for jorden forøvrig har vært konsentrert om **styrkereduksjon** på grunn av installasjonsprosessen, **poretrykksoppbygging** og **svakheter i overgang i mellom jord og ribbe**.

Kontinuitet

Pælene settes vertikalt eller skråstilt, og man kan se en fare for at det i en ribbe ikke alltid oppnås overlapp mellom pælene. Dette kan føre til vertikale snitt med liten eller ingen jordforsterkning, med resulterende dårlig styrke. Mulige konsekvenser blir drøftet i det følgende:

Det tas utgangspunkt i en stabilitetsanalyse med lamellemetoden. Skjærkapasitet i vertikalsnitt mellom lameller har som kjent ingen betydning for sylindriske skjærflater. Manglende overlapp i kalksementribben har etter dette liten betydning.

I en s_u -analyse med en nær sirkulærsylindrisk skjærflate betyr bortfall av skjærkapasitet langs vertikalsnitt fremdeles lite. Styrketaket i jorden er ikke spenningsavhengig, og sikkerheten t derfor lite påvirket av manglende overføring av skjærkrefter mellom lamellene.

I en $a\phi$ -analyse er styrken avhengig av effektivspenninger, og en antagelse av glatte lamellesider, altså en antagelse om null skjærstyrke i et vertikalsnitt, vil gi mangelfull overføring av spenninger fra topp til bunn av skråningen. Dette fører normalt til at sikkerhetsfaktoren i en lammellanalyse på $a\phi$ -basis reduseres med 5-10% dersom glatte lamelleflater antas. Denne forskjellen i beregnet sikkerhetsfaktor med og uten glatte lamellesider vil sjelden være avgjørende, og heller ikke ved en $a\phi$ -analyse vil enkelte gliper i rekken av kalksementpæler være et stort problem.

Homogenitet og styrke. Skjærflatens gang gjennom pælen

Pæler vil av og til få en "skivestruktur" på grunn av innblandingsmetode, rotasjon, visptype mm. De horisontale "skivene" får pælen til å ha noe likhet med en myntstabel.

Om en skjærflate går horisontalt eller endog skrått gjennom en enkelt pæl vil den lett finne svakeste snitt, og en horisontal skivestrukturert pæl vil ha redusert effekt.

Dersom det produseres ribber blir utførelse og overlapping svært viktig. Dette er fordi overlapp og skikkelig gjentatt bearbeiding av jorden vil bedre forholdene betydelig ved at andelen av gjennomgående horisontalsnitt med uomrørt og uforsterket materiale blir sterkt redusert.

Doble ribber er i henhold til dette trolig gunstigere enn enkle.

Med dagens regler for overlapp i ribber er det dog kun et begrenset areal av ribben som opplever gjentatt omrøring, og kvaliteten på enkeltpæler fremstår som svært viktig for skivens egenskaper.

Samvirke med ubehandlet jord

Samvirke er det kanskje vanskeligste moment vedrørende skråningsstabilitet og kalksement-forsterkning. Forskjellen i styrke og stivhet mellom forsterket og uforsterket jord er antatt å være at leiren er betydelig mykere enn kalksementskiven, og at selve prosessen ved setting av pælene kan forsterke dette.

Som oftest vil en ribbe ha noe høyere stivhet enn insitu jord, og dette fører normalt til at den vil pådra seg større krefter jo stivere den er. En ribbe med lav styrke/stivhet kan gi den nødvendige fleksibilitet som trengs for å mobilisere jordas styrke. Det er derfor ikke en ubetinget ulempe om en ribbe skulle ha manglende kontinuitet på grunn av dårlige vertikalsnitt. Et unntak er imidlertid at dersom jorden i utgangspunktet er mobilisert på grunn av anisotrope initialspenninger kan bruddtaket i jorden nås ved små tilleggstøyninger. I slike tilfeller vil totaliteten bli bedre jo stivere kalksementribben er.

Den mellomliggende jords mulighet for å overføre spenninger til ribbene avhenger av tid fra kalksement-behandlingen til eventuelle utgravinger, og om behandlingen i stor grad har skadet det omkringliggende materialet. Det er ved design viktig å føre ribben så langt ned under forventet skjærflate at skiveelementet er tilstrekkelig forankret i jorden under, aller helst til fjell eller faste lag. Forankringen her er helt eller delvis avhengig av sideskjær på ribben, og bør designes med forsiktig antatte verdier.

Styrkereduksjon eller mobilisert styrke i ubehandlet jord

Ved analyser vil det være en fordeling av styrke mellom uforsterket jord og kalksementelementet, og den styrke man kan utnytte i den mellomliggende jord må estimeres forsiktig.

I Statens Vegvesens håndbok nr 188 (Veiledning til 018) regnes totalstabiliteten på s_u -basis, og det antas at den omkringliggende jord ikke tar noe last mens kalksementribbene tar all last. Dette er en konservativ antagelse og forutsetter at ribbene er så stive at de tiltrekker seg all last og jorden dermed ikke får utvikle tøyninger til å mobilisere sin styrke. Denne beregningsmetoden ivaretar forøvrig også totalstabilitet for tilfellet der jorden mellom ribbene har fått sin skjærstyrke redusert til null.

Ved lokale stabilitetsanalyser av jorden mellom ribbene regner Staten Vegvesens håndbok nr 188 full skjærkapasitet i grensen jord/ribbevegg.

Det er finnes norske eksempel på design der full beregningsmessig s_u i jorden mellom ribbene er kombinert med relativt høye s_u -verdier for kalksementribbene. **I slike tilfeller bør det settes høye krav til materialfaktor.**

Andre løsninger er å benytte en delvis reduksjon av beregningsmessig skjærstyrke i jorden mellom ribbene sammen med en forsiktig anslått styrke i kalksementen.

Anbefalinger

For beregning av langtidsstabilitet i skråninger anbefales det bruk av effektivspenningsanalyse i tråd med vanlig norsk praksis for skråningsstabilitet forøvrig.

Det er knyttet stor usikkerhet til kontroll av reell skjærkapasitet av pæler og ribber. Uten meget god dokumentasjon bør det ikke antas skjærkapasitet $> 150\text{kPa}$ ved dimensjonering av ribber i skjæringer.

Det ovenstående viser et behov for gjennomgang og avklaring av hvilke premisser som bør legges til grunn for norsk designpraksis fremover.

4.2.5 Rystelser

Installering av kalksementpæler kan brukes til å dempe vibrasjoner i grunnen ved nye eller eksisterende veg- og jernbaneanlegg. Ved nyanlegg kan kalksementpælene enten settes under vibrasjonskilden (enkeltpeeler) eller mellom kilde og mottaker (ribber). For eksisterende anlegg er det mest aktuelt å sette pælene mellom kilde og mottaker. I dag er det mest vanlig å sette dem som to parallelle ribber med gitter i mellom. Det gjøres også forsøk med enkle ribber mellom kilde og mottaker.

4.3 TIDSASPEKTER

4.3.1 Fasthetsutvikling av pæl

Ved vurdering av kalksementpæler som løsning må det innberegnes tilstrekkelig tid til felt- og laboratorieanalyser, samt tilstrekkelig herdetid for pælene i anleggsperioden.

4.4 KVALITETSKRAV OG TOLERANSER

4.4.1 Generellt

I utbyggingsprosjekter skal det stilles krav til prosjektering, installasjon og kontroll. Dette innebærer at dimensjonering skal foregå etter gjeldende regler og retningslinjer, og at det stilles krav til utstyr, blandemiddel og gjennomføring ved installasjon og etterkontroll. Det skal med andre ord sikres at produktet holder den kvalitet som er nødvendig for at krav til funksjon og sikkerhet er tilfredstillende i henhold til gjeldende standarder og prinsipper i geoteknikk. Ved dimensjonering av kalksement-forsterkninger skal konsulenten vurdere konsekvensen av funksjon til forsterkningen dersom en eller flere pæler avviker fra spesifikasjonene. Dette kan f.eks være avvik med hensyn til plassering, kontinuitet, dybde, innblandingsmengde, helning og forutsatt styrke. Det må foreligge kvalitetskrav og utføres kontroll/oppfølging som danner grunnlag for å vite når beslutninger må gjøres og hvilke beslutninger som er nødvendige for at forsterkningen med kalksement skal oppfylle kravene.

4.4.2 Kravspesifikasjon

Krav til kalksementpæler kan enten gis ved å sette installasjonskrav (mengde av kalksementpæler, visstype, stigning, rotasjon o.l.) eller produktkrav (krav til ferdig pæl, styrke, kontinuitet, helning o.l.). I dag er det mest vanlig å sette installasjonskrav. Dette fordi man enda ikke har kommet fram til en egnet kontrollmetode slik at produktkrav enkelt kan dokumenteres. Et problem med å gi installasjonskrav er at entrepenørene har ulikt utstyr. På sikt er det et mål å kunne sette produktkrav som skal dokumenteres etter en fastlagt kontrollprosedyre. I dette prosjektet er det lagt betydelig vekt på å utvikle metoder og prosedyrer for å kunne etterprøve oppnådd pælekvalitet. Ved å bygge videre på de erfaringene som er gjort i prosjektet bør det på sikt være mulig å oppnå en utvikling slik at krav til kalksement-forsterkning i all hovedsak er funksjonsbasert.

Med bakgrunn i generelle krav til produktkvalitet kan det lages kravspesifikasjon for kalksement-stabiliseringen. Kravene utformes på en slik måte at det gir det mest optimale forhold mellom egenskaper, dimensjoneringsmetode, installasjon og kontroll hvor hver av disse delene skal bidra til at konstruksjonen har den nødvendige sikkerhet og at sluttproduktet møter spesifikasjonene. I utgangspunktet bør kravspesifikasjonen i størst mulig grad utformes med funksjonskrav for det ferdige resultatet men der dette ikke er mulig må det settes spesifikke utførelseskrav med angitte toleranser.

Kravspesifikasjonen bør inneholde:

- beskrivelse av prosjektet
- opplysninger om grunnforhold
- funksjon til kalksement-forsterking (setning, bæreevne, stabilitet, rysteler)
- miljøkrav (støy, støv og spill)
- forutsetninger om tidspunkt og rekkefølge for utførelse
- krav til oppnådd kvalitet (plassering, styrke, homogenitet) (må relateres til metoder for kvalitetskontroll)
- metoder og hyppighet av kvalitetskontroll
- type, sammensetning og mengde innblandingsmiddel
- krav til utstyr for installasjon (kapasiteter, utforming)
- utførelse (rotasjonshastigheter, stigehøyde, innblåsingstrykk)
- krav til dokumentasjon av utførelse
- krav til oppfølging (aktiv design)

5. INSTALLASJON

5.1 FORUTSETNINGER

5.1.1 Tilgjengelighet

Områdets tilgjengelighet for borrygger, lastebiler og tankbiler med kalksement i anleggsfasen må vurderes. På bakgrunn av befaring og grunnundersøkelser må det vurderes om terrenget kan trafikkeres av borryggene, med hensyn til maskinenes beltetrykk og framkommelighet. Det kan være aktuelt med spesielle tankplasser for kalk og sement, og grunnet stor vekt må disse velges slik at hensyn til bæreevne og stabilitet er ivarettatt. Anleggsveger for tankbiler må ikke være brattere enn 1:7, og disse må planlegges slik at snuplasser for lange slep (>25 m) eksisterer.

5.1.2 Miljøhensyn

Ved enhver utbygging har entreprenøren ansvar for arbeidsmiljø og hensyn til omgivelser ved byggeplassen. Ulesket kalk er sterkt etsende, og nødvendige forutsetninger må tas for å unngå skader. Tanking av maskiner med kalk og sement må ikke utføres i nærheten av bebyggelse, trafikkerte veger eller drikkevannskilder uten at spesielle tiltak er gjort for å hindre ukontrollerte utslipp. Avlufting ved tanking må gjøres via godkjente filtre eller gjennom vannfylte beholdere. Avslutning av innblanding må skje minimum 0.5-1 m under marknivå for å hindre utblåsning, og hullene må dekkes forsvarlig med stedlige masser.

Eventuelle utslipp av kalksement ved f.eks maskinhavari eller på annen måte skal slukkes med vann og blandes med stedlige masser. Ved kalkstøv i øynene må det straks skylles med store mengder vann og tas kontakt med lege/sykehus.

5.2 UTSTYR

Det finnes i dag 5-6 entreprenører på markedet som installerer kalksementpæler, og alle opererer med ulikt utstyr. Noen av entreprenørene har flere rigger av ulikt merke, og systemet for oppbevaring og blanding av bindemiddel varierer.

5.2.1 Rigg

Med utgangspunkt i en konvensjonell pælemaskin har man konstruert en kalksementrigg som ved hjelp av en roterende borstang kan installere pælene i bakken. Rikken har brede belter for framkommelighet og for å gi lav belastning på grunnen. Største pælelengde var tidligere 15 m, men nå settes pæler med lengde inntil 20 m og ved omkobling av utstyr kan det i dag installeres pæler med lengde på inntil 22 m. Borstangen beveger seg langs det avstivede boretårnet, og ved hjelp av en dreiemotor drives stang påmontert innblandingsverktøy ned i jorda. Gjennom et hull i innblandingsverktøyet øvre del drives kalksement ut jorda ved hjelp av trykkluft mens stanga roteres med en viss hastighet motsatt veg oppover i jordkolonnen med en viss stighøyde per omdreining.

5.2.2 Materialtanker og trykkluftaggregat.

Det eksisterer på markedet i dag selvgående materialtanker med separate beholdere for kalk og sement. Tankene er knyttet til et motoraggregat med kompressor som skaffer trykkluften som driver blandemiddelet ned gjennom borestangen og ut i jorda gjennom vispen. Materialtanken har et avfuktingssystem som holder mateluften tørr og forhindrer at kjemiske reaksjoner skjer i bindemiddelet før det blåses ut i jorda. Materialtankene har begrenset kapasitet og det må etableres enten stasjonære forsyningstanker på anlegget eller forsyning av kalk og sement direkte fra tankbiler.

5.2.3 Innblandingsverktøy

Det finnes en rekke varianter av innblandingsverktøy, og de ulike entrepenørene har forskjellig utstyr hvorav noe er patentsøkt for å brukes i konkurranse i dagens marked. Innblandingsverktøyet eller vispen er montert nederst på borstangen og har en utforming som gjør at jord og kalksement blandes med en jordforsterket pæl som resultat. Vispene i markedet kan brukes til å installere kalksementpæler med diameter 0.4-1.0 m. Entreprenørene må som et minimum ha to visptyper, en som egner seg i bløte homogene leirlag, og en som egner seg i overkonsoliderte masser av grovere fraksjoner.

Vispen må fungere slik at den prosjekterte diameter av pælene oppnås og at innblandingsmiddelet blir jevnt fordelt både i tverrsnitt og dybde av pælene (homogen pæl).

En sammenligning av 4 visptyper ble utført i forbindelse med eksamensarbeid ved Chalmers (Johansson og Jons). Forsøkene ble utført med 50/50 kalksementpæler med Ø600 mm i en leire med vanninnhold $w=70-90\%$ og udrenert skjærfasthet $s_u=15-20$ kPa. Resultatene fra installasjon, feltmålinger og inspeksjon og laboratorieforsøk på opptak av hele pæler viste at det var stor forskjell på pælenes kvalitet. En av visptypene viste seg å være overlegen med hensyn på homogenitet og styrke.

Vispens utforming er svært viktig med hensyn til kvaliteteten på kalksementpælene. Entreprenørene i markedet må kunne dokumentere eller sannsynliggjøre at den valgte visptypen for å utføre installasjonen er godt egnet med hensyn til kvalitet på pælene i de stedlige jordmassene.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I Fou-prosjektet ble benyttet to typer visp

-en standard visp

-en forsøksvisp med et ekstra vinkeljern ved utblåsningsdysa.

På Bjølsen ble det satt 9 pæleserier med standardvispen og 1 pælserie med forsøksvispen. På Voll ble det satt 2 pæleserier, en med hver visptype. Ved opptak av pæl 4E (Bjølsen), som ble satt med forsøksvispen, ble det konstatert meget ujevn kvalitet.

Enaksiale trykkforsøk utført på prøvestykker fra hel opptatt pæl viser verdier som er noe høyere for pæl 4E (forsøksvisp) enn for pæl 2D (standardvisp) som er sammenlignbar. Problemet var at dette gjaldt bare for et dybdeintervall (5-6.5 m) hvor det i hele tatt var mulig å få ut prøver, da resten av pæl 4E var av meget ujevn og til dels dårlig kvalitet. Det ble derfor konkludert med at visptypen med ekstra vinkeljern ikke var egnet til forhold representative for Rygge. (Figur 13).

Prosjektet har vist at for å oppnå god effekt må vispen/utstyret oppfylle flere betingelser:

- sørge for god omrøring
- sørge for jevn innmating og god distribusjon av kalksement
- sørge for at innblandingen kan gjøres uten at det oppstår "løft" og lommer i massene.

Det vil sannsynligvis være fornuftig å benytte ulike visptyper avhengig av grunnforhold og pælediameter. Det er så langt ikke grunnlag for å gi genrelle retningslinjer for utforming av vispene, men det anbefales å gjennomføre forsøk med ulike typer i forbindelse med prøvepæling.

5.2.4 Kalksement-innblanding

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I FoU-prosjektet ble pæl 2D satt med 50/50 kalksement og pæl 8E satt med 25/75 kalksement. Et forventet resultat utfra svenske laboratorieforsøk (SGI No.48) ville være at pæl 8E med størst andel av sement skulle utvise størst skjærstyrke. Dette var ikke tilfelle. For disse pælene ble det brukt standard visp, og erfaringer (NGI) tilsier at innblandingsenergien må økes for å oppnå høyere fasthet ved økende forhold mellom sement og kalk. Pæl 2D med blanding kalk/sement 50/50 ga en bedre pæl med hensyn til fasthet og jevnhet enn tilfellet var for pæl 8E. (Figur 14).

Ved visuell inspeksjon av hele opptatte pæler fra Rygge ble det konstatert at det i store deler av pælene forekom oppsmuldring, noe som tyder på ufullstendig innblanding uavhengig av visptype.

5.3 UTFØRELSE

5.3.1 Plassering

Ved prosjekteringen er det forutsatt at pælene blir plassert i et gitt mønster og det er derfor viktig å sikre at dette blir oppfylt ved utførelsen. Nedenfor er gjengitt krav til plassering i henhold til svensk veiledning (SGF 4:95).

Pælene skal plasseres i henhold til prosjektert plan. Enkeltpæler i trekant- eller firkantnett brukes hovedsaklig som setningsreducerende tiltak, og avvik i plan skal være den minste verdien av enten 15-20% av pældiameter, 10% av senteravstand mellom pælene eller 0.1 m. Det betyr at for Ø500 mm pæler med senteravstand 1.0 m vil den minste verdien av alle kravene være 0.1 m avvik fra plan. Maksimal tillatt helning fra vertikalen (loddavvik) for pæler med lengde inntil 10 m er 15mm/m, ellers er kravet for pæler i nett at nabopæler ikke kolliderer.

Pæler i ribbe, gitter eller blokk brukes gjerne til forbedring av bærevne og stabilitet, og disse pælene skal settes med minimum 50 mm overlapp. I tillegg skal nominell senteravstand mellom pælene være høyst $0.8 \cdot d_{\text{pæl}}$ for Ø500-Ø600 mm pæler, og høyst $0.9 \cdot d_{\text{pæl}}$ for større pældiameter.

Erfaringer fra FoU-prosjektet:

Erfaringene fra prosjektet har vist at lett oppstår avvik i plassering av pælene i dybden og at plasseringsavvikene i dybden, spesielt i forbindelse med pæler satt med overlapping (ribber, gitter, blokk) kan avvike vesentlig fra de som er forutsatt.

Ved oppgraving av pæler og utgraving av skjæringer der pæler er satt med overlapp er det en klar tendens til at pæl nummer to søker inn mot den første pælen. Dette skyldes sannsynligvis at overlappende pæler blir satt umiddelbart etter den første for å unngå at herdingen gjør omrøring vanskelig. Ved pæl nummer 2 vil denne da naturlig søke inn mot den omrørte sonen med lavere skjærfasthet enn den opprinnelige løsmassen.

I tillegg kan andre forhold som forekomst av stein eller hellende lagdelinger medføre at pælene får plasseringsavvik i dybden.

For enkeltpæler vil noe plasseringsavvik i dybden vanligvis ha mindre betydning, mens det for sammensatte pæler, der det er forutsatt samvirke mellom pælene kan dette ha stor betydning for resultatet.

For å oppnå et godt resultat av kalksement-stabiliseringen er det viktig å oppnå best mulig plassering av pælen og at oppnådd plassering og ønsket helning av pælen kan dokumenteres godt. Utvikling av utstyr og prosedyrer som kan sikre lite plasseringsavvik og gir mulighet for å kontrollere plasseringen er derfor meget viktig for videre anvendelse.

5.3.2 Pældiameter

Vanlige vispediametere er 400, 500, 600, 800 og 1000 mm. Disse er utviklet av entreprenørene av erfaringen og det finnes ikke noen absolutte bruksområder for noen av disse. Valg av vispediameter vil være avhengig av mønster på pælene og skjærfastheten i ustabilisert jord, og der man installerer ribber vil man normalt benytte seg av små diametre (500 – 600 mm). Forholdet mellom maskinkapasitet og skjærfasthet i ustabilisert jord er ofte avgjørende for valg av pældiameter. I Sverige installerer man stort sett bare enkle ribber med $D = 600\text{mm}$. I Norge, der kalksement-stabilisering i større grad har vært benyttet for skjæringsstabilisering er det i større grad benyttet doble ribber. På grunn av tendensen til plasseringsavvik ved doble ribber det i mange tilfelle sannsynligvis være bedre å benytte enkle ribber med større diameter.

Dersom man vil øke grunnens bæreevne for f.eks. en veifylling vil det være aktuelt med enkeltpæler med store diametere (800 – 1000 mm). I gitter-installasjoner benyttes oftest 600 mm. I blokkonstruksjoner vil små diametere skape merarbeid, og så fremst jordarten og maskineriet tillater det anbefales diameter på 1000 mm.

I tabell 5.1 er det gitt noen retningslinjer for valg av pældiameter avhengig av problemstilling, grunnforhold og pælemønster.

Tabell 5.1 Antatte bruksområder for de forskjellige diametre.

Diameter	Bruksområde
400 mm	Innstallering av støttevegger til spuntvegger. Blokketablering i jordarter med stor motstand mot omrøring, og i masser med stein/blokk for å redusere utstyrs slitasje. Gitterkonstruksjoner.
500 mm	Innstallering av støttevegger til spuntvegger. Blokketablering i jordarter med stor motstand mot omrøring. Gitterkonstruksjoner.
600 mm	Innstallering av enkle og doble ribber. Enkeltpæler i jord med stor motstand mot omrøring. Gitterkonstruksjoner.
800 mm	Enkle ribber i bløte jordarter. Blokketablering i bløte jordarter.
1000 mm	Enkeltpæler i bløte jordarter. Blokketablering i bløte jordarter. Selvstendige støttevegger.

(Fra prosjektoppgave T. Mjølkarli, HiST 1998).

5.3.3 Innblandingsmengde

Innblandingsmengden av kalksement blir valgt under prosjekteringen, og/eller på bakgrunn av prøvepæling. Et trykk blir innstilt i materialtankene for at en viss mengde kalksement (kg/m pæl) skal tilføres via slanger til borstangen og ut i jorda. Trykket justeres med dybden. Under installasjon registreres stighastighet, og datastyring gjør at vispens stighastighet reguleres i forhold til målt vekt av innblåst masse. Jordtrykket og poretrykket er bestemmende faktorer for hvor mye kalksement som blåses ut i jorda. Ved inhomogen jord, røtter og steiner, eller ved skarpe overganger mellom jordarter kan dette føre til variasjoner i innblåst mengde. Styringen av vispens stighastighet kan reagere for sakte, og det kan bli et avvik i innblåst mengde i forhold til spesifisering.

For å oppnå en homogen pæl med høy kvalitet er det viktig at kalksementen blir jevnt fordelt i pælen. Toleransekrav til innblandingsmengde bør være 10%, som kan utgjøre $\pm 2\text{--}3.5$ kg/m i avvik fra prosjektert mengde for pæler med Ø600 mm. Dette kravet bør gjelde både for singulære pæler og pælegrupper. I Norge i dag er det vanlig å gi toleransekrav til innblandingsmengde på 20%.

Erfaringer fra FoU-prosjektet.

Resultat fra laboratorieforsøk på blandeprøver viser at skjærstyrken generelt øker med innblandingsmengde (SGI No.48, Grunnforsterkning kap. 11 von der Lippe). Dette kommer også frem i prosjektoppgaven utført ved NTNU på blandeprøver fra Sande (Ånensen og Eknes). Erfaringene fra felten bekrefter i hovedtrekk dette resultatet. I Figur 15 er det vist erfaringen fra laboratorieforsøk som indikerer en tilnærmet lineær økning av oppnådd styrke av pælen med økende innblandingsmengde.

I FoU-prosjektet ble det ikke undersøkt effekt av variasjon av total innblandingsmengde, som i dette prosjektet var 30 kg/m for Ø600 mm. Effekten av fordeling med kalk/sement ble undersøkt,

og alle pæleseriene på Bjølsen unntatt en ble satt med 50/50 kalk/semment mens den ene pæleserien ble utført med 25/75 kalk/semment.

Erfaringene fra prosjektet viser imidlertid at det kan være til dels stor variasjon i oppnådd innblanding av kalksementen i pælen. Ved visuell observasjon av oppgravde pæler og ved måling av fordeling av kalksement på opptatte kjerneprøver fra pælene er det påvist at kalksementen i mange tilfelle ligger i linser og lommer i pælen. Slike oppsamlinger vil resultere i vesentlig dårligere homogenitet av pælen og dermed redusere effekten av stabilisering. Slike inhomogeniteter vil være spesielt uheldige dersom det er forutsatt opptak av skjærkrefter i pælen.

Nåværende prosedyrer for kontroll av innblandingsmengde vil ikke fange opp slike inhomogeniteter selv om det er basert på registrering av medgått kalksement over en viss dybde. Det anbefales derfor at muligheten for evt trykkopphopning og "pulsing" blir undersøkt i forbindelse med gjennomføring av prøvepæling.

5.3.4 Rotasjonshastighet

Rotasjonshastighet er definert som antall omdreininger per tidserhet (omdr./min). Maskinens kapasitet, pælediameter, innblandingsmengde og grunnens beskaffenhet (skjærstyrke, kornfordeling, røtter og stein) styrer maksimal rotasjonshastighet, som normalt ligger mellom 60-200 omdr./min. I følge Statens Vegvesen (håndbok 188) skal rotasjonshastigheten være minst 150 omdr./min for Ø500-Ø600 mm pæler, og 175 omdr./min for grovere pældimensjon. Det er ikke gjort noen større studie av rotasjonshastighetens betydning for skjærstyrken til kalksementpæler, men foreløpige resultater tyder på at økt rotasjonshastighet gir indikasjon på økt skjærstyrke.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I feltforsøket i FoU-prosjektet ble det benyttet rotasjonshastigheter på 100, 150 og 200 omdr./min. uten at dette viste nevneverdige forskjeller i skjærstyrke målt med FOPS. (Figur 16).

Som hovedregel anbefales det at det ikke benyttes rotasjonshastigheter under 150 omdr/min.

5.3.5 Stigning

Innblandingsverktøyets (vispens) stigning er den strekning borstangen dras opp med i løpet av den tiden vispen roterer en omdreining, og angis som mm/omdreining. Dersom for lite bindemiddel mates ut vil stigningen avta, og ved for store utmatningsmengder vil stigning øke. Styresystemet må sikre at stigningen ikke overskrider maksimal foreskrevet stigning. I SGF-rapport 4:95 anbefales maksimal stigning for standardverktøy til 15 mm/omdr i gytjige og organiske jordarter og 20 mm/omdr. i øvrige jordarter. I rapporten fra Chalmers (Johansson og Jons) viser forsøk at en variasjon av stigningen i området 15-30 mm/omdr. har liten effekt på skjærfastheten for samme innblandingsmengde. Dette gjelder vel og merke for bløt leire med relativt høyt vanninnhold, man kan få større variasjon i andre leirer.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I feltforsøkene i SND-Fou-prosjektet ble det brukt stigning på 10, 20 og 30 mm/omdr. Resultatene indikerer at pælene med lavest stigning gir best resultat men forskjellene er forholdsvis små. (Figur 17).

Effekten av variasjon i stigning vil trolig være størst i jordarter som har stor motstand mot omrøring. Erfaringene fra Vestfoldbanen tyder på at bruk av stigning på over 30 mm kan medføre dårlig omrøring og innblanding i silt og siltige leirer med forholdsvis lavt vanninnhold (<35%) og høy omrørt skjærfasthet (liten sensitivitet). I slike jordarter anbefales det å ikke bruke stigning over 20 mm/omdr.

5.3.6 Trykk

Det er i dag vanlig at med separate tanker for kalk og sement. Trykkluften som driver bindemiddelet fra tankene må kunne justeres på en tilfredstillende måte. Det utstyret som er vanlig anvendt pr i dag kan benytte trykk ved innblåsing helt opp til 10 bar, mens det normale trykket er 3-6 bar. Dette tilsier at innblandingen skjer ved et betydelig trykk noe som både kan innvirke på omkringliggende jord (bryter ned struktur og reduserer styrke) samtidig som det kan medføre utblåsing langs borstangen. Trykket har også betydning for oppbygging av poretrykk i løsmassen som har stor betydning i forbindelse med stabilitetsvurderinger (se under)

Svenskene har som krav at innblandingen av kalksement skal avsluttes i en viss avstand under terreng (0.5-1.0 m). Trykket må derfor justeres de siste metrene for å unngå utblåsning av toppmassene og bindemiddel. I tillegg bør det vurderes å sette krav til maksimalt trykk som kan benyttes under installasjon for å unngå nedbryting av omkringliggende materiale og oppbygging av poretrykk.

Det observeres ofte en pulsing i slangen som leder bindemiddel til boretårnet, noe som kan bety at bindemiddelet blåses ut i doser av varierende grad.. Dette kan skyldes at trykkoppbygging ved dysene medfører at innblandingen ikke skjer jevnt men ved plutselige utslipp. Det bør derfor vurderes å finne løsninger som f.eks. kan måle trykket og bindemiddelmengden nærmere utblåsningshullet ved vispen.

5.4 EFFEKT PÅ OMGIVELSER

5.4.1 Poretrykk

Ved installasjon og en tid etter installasjonen av kalksementpæler er det viktig å holde kontroll med poretrykket. Bindemiddelet blir presset ut i jorda under høyt trykk, som kan gi poreovertrykk i områder rundt pælen og forringe stabiliteten. Dette gjelder spesielt for skråningstabilitet i områder med lav initiell sikkerhet. Avsetningsbetingelsene kan i enkelte tilfeller ført til tynne lag i jorda med lav styrke og relativt høy permeabilitet (f.eks. løst lagret silt). Det høye innblåsingstrykket kan føre til at poretrykket øker betydelig i slike lag i stor avstand fra pælen, og dette kan føre til redusert områdestabilitet ved at slike lag kan fremstå som glideskjikt.

Ved stabilisering med kalkpæler av et skredområde i Ødesby (Engstrøm et al) oppstod ytterligere glidninger i massen. Dette ble forklart ved poreovertrykk som skyldes utblåsingstrykket av bindemiddelet i jorda.

Ved utførelsen av feltforsøket i FoU-prosjektet ble det observert bobledannelse i overflaten med en slags "koking" av vann som strømmet opp til overflaten ved installasjon. Dette kan spores tilbake til høyt installasjonstrykk.

5.4.2 Blindboring og omrøring

Ved installasjon av kalksementpæler i ribber og skiver for å bedre skråningsstabilitet ved utgraving er det ofte spesifisert varierende mengde blindboring fra installasjonsplanet. Blindboring er en sone fra terreng ned til pæletopp hvor det ikke tilføres bindemiddel. Blindboring medfører en omrøring av løsmassen som dermed får brutt ned strukturen og redusert styrken.

I en sone under og til siden for pælen vil jorda bli omrørt/forstyrret på grunn av vispens geometri og plasseringen av utblåsningshullet for bindemiddel. Det er normalt å regne at den forstyrrede sonen kan ha en utstrekning på inntil 0.5 m under pælens fot.

Over tid vil de omrørte massene rekonsolidere og gjenvinne styrke. Tidsutviklingen vil avhenge av permeabilitet for løsmassen og den kalksement-stabiliserte sonen.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I feltforsøkene ved Rygge ble det gjort forsøk med trykksondering i omkringliggende jord til en kalksementribbe. Forsøkene viste en klar tendens til redusert styrke i jorda i nærheten av ribba. Resultatene indikerer at jorda kan være påvirket i en sone på over 1 m fra installasjonen.

I prosjektet på Sande ble det ved installering av kalksementribber gjennomført blindboring i en sone der det senere oppsto deformasjoner ved utgraving av en skjæring. Senere forsøk har vist at massene i den omrørte sonen hadde fått betydelig redusert styrke. Slik omrøring vil være spesielt uheldig i områder med sensitive jordarter.

Det anbefales derfor å unngå bruk av blindboring i masser som ikke skal graves bort i områder med lav initiell sikkerhet. Det anbefales også at det tas hensyn til at jorda i nærheten av installasjonen vil være forstyrret og ha redusert styrke i en periode etter installasjonen.

5.4.3 Oppblåsning

Det stilles store krav til kontroll ved avslutning av en pæl for å unngå at oppblåsning av bindemiddel skjer. Ulesket kalk og sement er sterkt etsende, og all kontakt med slimhinner, øyne og innånding må unngås. Boringen skal avsluttes minimum 0.5 m under terreng, og slanger, koblinger og materialtanker skal være i en teknisk forsvarlig stand.

6. KVALITETSKONTROLL

6.1 DOKUMENTASJON (PROTOKOLL)

Registrerte data ved installasjon skal leveres byggherren med jevne mellomrom under arbeidene. Det skal føres protokoll som viser:

- pælnummer og dato for setting av pæl
- helning, lengde og diameter
- tidspunkt av leveranse og spesifikasjon av levert bindemiddel
- medgått bindemiddel totalt og per løpemeter pæl (grafisk + tabell)
- plassering
- visptype
- riggtype
- utførte feltforsøk
- horisontale og vertikale deformasjoner
- avvik fra forutsetninger

6.2 PORETRYKKSMÅLING

Ved installering av kalksementpæler blir bindemiddelet tilført under stort trykk, og poretrykket i omkringliggende masser kan øke og dermed redusere stabiliteten i området. Dersom sikkerheten for området før stabilisering er lav må deformasjoner og poretrykk observeres mens installasjonsarbeidet pågår og for en gitt periode etter avsluttet arbeid. Poretrykket kan registreres ved installasjon av piezometre og grunnvannstanden kan registreres ved nedsetting av foringsrør.

6.3 PLASSERING

I mange tilfelle vil avvik i plassering av pælen ha stor betydning for effekten av kalksementstabiliseringen. Forutsatt riktig utsett av pælen og at pælen blir plassert i hht utsett vil det først og fremst være kontroll av avvik i dybden som er aktuelt. Det er da viktig å kunne kontrollere avvik både i vertikalplanet og avslutning av pælen. Som tidligere nevnt er det registrert betydelige problemer med avvik i vertikalplanet. Mulighetene for å kunne kontrollere slike avvik er imidlertid meget begrenset. En viss indikasjon kan oppnås gjennom sonderinger i pælen, men fordi disse har en tendens til å bryte ut etter en viss dybde er muligheten for kontroll med slike metoder begrenset. Det samme gjelder til en viss grad for kontroll av avslutningsnivå for pælen der dette i all hovedsak bare kan skje ved kontroll av loggrapporter fra operatør.

Det bør sterkt vurderes å utvikle metoder for kontinuerlig måling av plasseringsavvik ved setting av pælene.

6.4 KONTROLLMETODER FOR STYRKE

6.4.1 KPS - kalkpælsondering

Metoden er en tradisjonell pælsondering og utføres ved at en sonde med vinger trykkes ned i pælsens sentrum, og kraften som registreres ved nedtrykking brukes til å beregne udrenert skjærfasthet. Metoden kan anvendes for pæler med Ø 500-800 mm. Svensk Geoteknisk Forening (SGF) har i sin veiledning (SGF-rapport 4:95) gitt spesifikasjoner for geometri av sonden for de forskjellige pældiametrene.

Metoden har sin begrensing for pæler med maksimal lengde på 8 m og maksimal skjærfasthet på 150 kPa. Ved forboret hull i pælen (Ø 44 mm) kan KPS med en mindre dimensjon på vingen brukes for pæler med maksimal skjærfasthet på 300-350 kPa.

Udrenert skjærfasthet kan finnes som 10% av nettotrykket mot sondens vinger og spiss. Nettotrykket finnes som nedpressingskraft redusert for stangfriksjon dividert på tverrsnittsarealet på sondens vinger og spiss (0.01m^2). Ved forboret hull må tverrsnittsarealet reduseres. Sonderingen utføres med en konstant nedtrykkingshastighet på $20\text{ mm/s} \pm 20\%$, og avsluttes minst 2 m under pælsens underkant.

Ulempen med metoden er at sonden har en tendens til å gå minste motstands veg, og skjære ut a pælen slik at skjærfasthet for hele pælsens lengde ikke kan oppveies med KPS. Metoden er relativt rimelig i bruk.

Prinsippskisse av utforming av KPS er vist i figur 18.

KPS-sondering er ikke benyttet i FoU-prosjektet.

6.4.2 FOPS – omvendt kalkpælsondering

Omvendt kalkpælsondering utføres med en forinstallert sonde med vinger festet til wire som løper gjennom hele pælsens lengde. Metoden kan anvendes for pæler med Ø 500-1000 mm. Svensk Geoteknisk Forening (SGF) har i sin veiledning (SGF-rapport 4:95) gitt spesifikasjoner for geometri av sonden for de forskjellige pældiametrene.

Metoden kan normalt brukes for pæler med maksimal lengde 15 m og maksimal udrenert skjærstyrke på 600 kPa.

FOPS installeres umiddelbart etter at pælen er laget ved at sonde og sonderingstang presses gjennom pælen ved hjelp av et foringsrør. Motstanden mot nedpressing registreres for å vurdere om utstyret holder seg inn i pælen. Vingen plasseres ca 2 m under pælespiss for å kunne vurdere wire-friksjon ved opptrekk av sonden. Alternativt kan FOPS installeres før pælen tilvirkes ved at sonden monteres i underkant av et spesielt innblandingsverktøy, og trykkes ned i massen med sondens vinger under vispen. Wiren løper da gjennom matestangen til blandemiddelet, og pakninger sørger for at wiren holdes tørr og ren. Sonderingen utføres med en konstant opptrekkshastighet på $20\text{ mm/s} \pm 20\%$, og med kontinuerlig registrering av kraften. Nettotrykket finnes som totalkraft redusert for friksjon langs wire. Udrenert skjærfasthet bestemmes som 10% av nettotrykket.

Fordelen med metoden er at den gir et kontinuerlig bilde av skjærstyrken i hele pælens lengde, men det er ikke en objektiv kontrollmetode fordi pælene som testes er bestemt på forhånd.

Svensk geoteknisk forening (SGF) antyder at udrenerte skjærfastheter utover 250 kPa tolket ved FOPS ikke bør anvendes. Prinsippskisse av utformingen av FOPS er vist i Figur 19.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I FoU-prosjektet viser resultater fra FOPS verdier for skjærstyrke som er sammenlignbare med verdier for skjærstyrke fra CPTU for enkeltpæler. En sammenligning av FOPS og CPTU fra flere pæler viser stor variasjon i beregnet gjennomsnittlig skjærstyrke. FOPS-verdier for skjærstyrke ligger 50-100% høyere enn verdier for skjærstyrke tolket fra CPTU for pæleserier 2 og 7 som vist i figur 20 (A). For disse pæleseriene er blandingsforholdet kalk/ement 50/50. Skjærstyrkeverdier fra FOPS og CPTU fra pæleserie 8 gir mindre variasjon som vist i figur 20 (B). Her er blandingsforholdet kalk/ement 25/75.

Generelt bør tolkning av udrenert skjærstyrke basert på FOPS-sonderinger gjøres med stor forsiktighet. FOPS-sonderingene undersøker i utgangspunktet ikke skjærstyrkeegenskaper men disse blir empirisk tolket ut fra motstand mot opptrekk. Med dette utgangspunkt bør FOPS-sonderingene primært benyttes som en kontroll av relativ homogenitet og trykkstyrke av pælen og ikke som utgangspunkt for en vurdering av skjærkapasitet.

6.4.3 CPTU - trykksondering

Trykksondering med poretrykksmåling (Cone Penetration Testing) utføres ved at en trykksonde presses kontinuerlig ned i pælen med en hastighet på $2 \text{ cm/s} \pm 0.5 \text{ cm/s}$. Ved trykksondering måles spissmotstand (q_c), sidefriksjon (f_s) og poretrykk (u). Trykksondering har til nå vært brukt i de fleste jordarter til å bedømme lagdeling og klassifisering, og for å finne styrkeparametre på total- og effektivspenningsbasis. Dersom en antar udrenerte forhold med poreovertrykk i kalksementpælen kan aktiv skjærstyrke (s_{uA}) finnes ut fra den klassiske bæreevneformelen:

$$q_t = N_{kt} s_u + \gamma z$$

eller

$$s_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt}$$

Korrigert spissmotstand (q_t) finnes ved å justere den målte spissmotstand for virksomt poretrykk målt bak spissen. For intakt normalkonsolidert leire er det utfra korrelasjoner med laboratorieforsøk funnet et variasjonsområde for $N_{kt} = 8-15$. For typiske overkonsoliderte leirer er variasjonsområdet $N_{kt} = 15-20$. For leire stabilisert med kalksement er det lite erfaringsgrunnlag med laboratorieforsøk, og det er forventet at bæreevnefaktoren har en variasjon $N_{kt} = 10-20$. Ved bruk av CPT på Rygge i Vestfold ble det valgt å bruke $N_{kt} = 15$.

Fordelene med metoden er at svakhetssoner i pælen kan kartlegges bedre enn med KPS og FOPS, og at et kontinuerlig forløp av skjærstyrke i pælen kan finnes. Videre er det en fordel at det kan avgjøres etter installasjon av kalksementpæler hvilke pæler som skal testes. Ulempen med metoden er at sonden har en tendens til å skjære ut av pælen på grunn dybde. Dette kan skyldes to forhold, pælen kan ha et avvik fra vertikalen og trykksonden kan både ha et loddavvik og tendere til å gå minste motstands veg.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

Ved bruk av CPT på Rygge i FoU-prosjektet ble 37 enkeltpæler testet, og sonden ble antatt å ha gått ut av pælen mellom 3.8 m og 12 m dybde og den gjennomsnittlig dybden før sonden gikk ut av pælene var 7 m. (Figur 21).

Det empiriske grunnlaget for tolkning av skjærstyrke er forholdsvis begrenset. Innenfor det dybdeområdet der CPTU-sonderingene kan gjennomføres synes disse imidlertid å gi et brukbart grunnlag for en vurdering av pælens styrke. Det er imidlertid usikkert hvor godt metoden vil fange opp effekten av inhomogeniteter i form av gjennomgående tynne svakhetssjikt i pælen. Disse kan ha stor betydning for vurdering av pælens motstand mot skjærkapasitet. Med dette utgangspunkt bør CPTU-sonderingene primært benyttes som en kontroll av relativ homogenitet og trykkstyrke av pælen og ikke som utgangspunkt for en vurdering av skjærkapasitet for prosjektering.

6.4.4 Kjerneboring

Vanlig prøvetakingsutstyr med stang påmontert stempælprøvetaker (Ø54 mm) som presses ned i jorda, egner seg dårlig for prøvetaking av i kalksementpæler hvor skjærstyrken kan komme opp i over 500 kPa. Derfor er kjerneboring alternativet hvis en skal ta opp prøver fra kalksementpæler. Ved kjerneboring i kalksementpæler er det mest vanlig å benytte prøvetaker med en indre diameter på 102 mm. Kjerneboring med Ø102 mm ble første gang gjennomført i kalksementpæler i Norge ved Såstad-Haug, Vestfoldbanen. Et stålrør med borkrone bores ned i pælen med vannspyling rundt spissen for å kjøle ned borkronen. Det er vanlig at kjerneboringen blir gjort med en viss avstand fra pælens senter for å få størst mulig representativitet for pæltverrsnittets skjærfasthet. Det gjøres også fordi det viser seg at det ved innblanding av bindemiddelet kan skje at partier ved pælens kjerne har forhøyet mengde med bindemiddel. Selve prøven blir tatt opp med et indre rør av plast. Opptatte prøver må behandles varsomt og transporteres på en slik måte at prøven inne i plastsynderen ikke blir påført slag og rystelser.

Fordelen med metoden er at den kan brukes selektivt, ved at valg av pæler for kjerneprøvetaking kan bestemmes vilkårlig etter nedsetting av pælene. Ulempen ved metoden er at loddavvik ved setting av pælen og loddavvik ved kjerneboringen kan føre til at boringen skjærer ut av prøven ved en viss dybde, selv om det på Såstad-Haug fungerte utmerket ned til 12 m dybde. Inklinometermåling i hullet etter endt kjerneprøvetaking kan gi informasjon om dette. I tillegg kan vannspyling ved boring vaske ut en del av materialet og indusere svakhetssoner i prøven. Erfaringer fra Sverige viser at dersom vanddysen vinkles utover vil dette gi mindre utvasking av selve prøvematerialet ved boring. Utskyving av prøvematerialet fra plastsynderen og oppdeling av teststykker kan også føre til prøveforstyrrelse.

Erfaringer fra FoU-prosjektet:

I FoU-prosjektet ble det foretatt kjerneboring for opptak av prøver i to pæler (2D og 4E) og det ble også kjerneboret i en vertikal og en hellende ribbe av pæler. Resultater fra enaksiale trykkforsøk utført ved SGI på dette materiale fra Rygge i Vestfold viser vesentlig lavere udrenert skjærfasthet enn de som er funnet fra enaksiale trykkforsøk på prøver tilvirket fra opptatte hele pæler, og udrenert skjærfasthet tolket fra CPT og FOPS. (Figur 22). Dette kan skyldes flere årsaker:

- ulik representativitet av prøvene (trykkforsøk på kjerneprøvene er tatt regulært fra hver meter av pælen, mens prøvene fra hel pæl primært er tatt for hver meter, men ved dårlig materiale er tatt der uttak av prøvestykker var mulig)

- ulike dimensjoner på prøvene (trykkforsøk på kjerneprøvene er tatt på lengre prøvestykker og kan dermed ha fått med seg flere svakhetssoner)
- eventuell skade på kjerneprøvene ved transport fra felt til laboratorium
- eventuell skade på kjerneprøvene pga bruk av vannspyling under opptak og ved oppsaging i laboratorium
- CPT og FOPS undersøker primært trykkfastheten av pælen, og tolkningen av skjærstyrke på dette grunnlag er ikke nødvendigvis representativ som grunnlag for stabilitetsberegninger

Forskjellen i resultat er såvidt stor at det bør gjennomføres supplerende forsøk for om mulig å bestemme bakgrunnen til de forskjellige resultatene.

Et alternativ til tradisjonell kjerneboring kan være å ta opp sylinderprøver fra pælen umiddelbart etter tilvirkning. Ved oppbevaring av prøvene i klimarom kan disse herdes under kontrollerte forhold, men de får ikke herdeforhold tilsvarende som i felt. Prøvene kan etter en bestemt periode testes i laboratorium mht homogenitet og styrkeegenskaper. Denne typen prøvetaking kan trolig gi prøver som er forholdsvis "uforstyrret" og som dermed kan gi et bra bilde på pælens reelle tilstand in situ.

6.4.5 Utgraving

Ved utgraving med maskin kan man få en god visuell observasjon av pælens struktur, og det er mulig å sage ut pæsegmenter for videre testing i laboratorium. Fordelen med metoden er at den visuelle inspeksjonen kan avdekke om innblandingen har gitt en homogen pæl, både i lengderetning og i tverrsnitt. Ulempen med metoden er at den bare kan benyttes ned til ca. 6 m som er praktisk grense for rekkevidden til gravemaskinen. I dag settes ofte pæler ned til 20 m under terreng, og store deler av pælen kan derfor ikke vurderes med utgraving.

Erfaringer fra FoU-prosjektet:

Det er gjennomført utgraving av pæler både i feltforsøkene ved Rygge og ved utgraving av skjæringer for Vestfoldbanen. Utgravingsforsøkene gir et brukbart grunnlag for å vurdere homogeniteten av pælen visuelt. Ved utgraving av skjæringer gjennom kalksement-stabilisert sone gir de også grunnlag for å vurdere plaseringsavvik av pælene.

6.4.6 Opptak av pæl

Ved opptaking av hel pæl kan det brukes et spesiallaget 12 m langt stålrør med indre diameter på 700 mm som brukes for pæler med diameter Ø600 mm. Røret er delt i to i lengderetning, med hengsler og bolter for å holde det sammen. I rørets bunn er det to klaffer som løses ut med wire og kalksementpælens tyngde når opptrekk av pælen starter. Klaffene sørger for at pælen holder seg inne i stålsylinderen ved opptrekk. Røret rammes ned med en pælerigg etter at pælens topp er sjaktet frem med gravemaskin. Opptrekk av pæl foregår gjerne med en kraftig mobilkran. Ved bruk av denne metoden er det viktig å måle inn pæletopp i forhold til terreng både før og etter ramming, for å vurdere om pælen har blitt presset nedover i bakken ved ramming av stålrøret. Stålrøret med kalksementpælen legges på bakken og åpnes for visuell inspeksjon. Pælen bør skrapes forsiktig av med gravemaskin eller annet redskap for å fjerne leire før den visuelle inspeksjonen utføres. Det er en fordel om all testing av pælen (vingebor, lommepenetrometer) og uttak av prøvestykker kan gjøres før pælen rulles ut av sylinderen.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

Fordelen med metoden er at pælen kan undersøkes ned til 10-12 m dybde, og gir en unik anledning til å vurdere innblandingen av bindemiddel i lengde og tverrsnitt av pælen. Ulempen ved metoden er at den er tidkrevende og kostbar, og krever utstyr som normalt ikke brukes ved installasjon av kalksementpæler. I tillegg må disse pælene installeres ekstra, da pæler som er en del av forsterkning ikke kan fjernes uten videre. Ramming og trekking av stålsylinderen, og utrulling av prøven etter opptak er kilder til prøveforstyrrelse.

Erfaringer fra FoU-prosjektet på Rygge viser at pælene ble presset noe ned i bakken, og i et tilfelle skar stålsylinderen seg noe inn i pælen og dro pælen ca 2 m ned i bakken. Klaffer og mothold på stålsylinderen fungerte ikke helt etter forutsetningene og kan ha gitt noe strekk i prøvene ved opptrekk. Visuell inspeksjon av pælene viste at de var inhomogene både i tverrsnitt og i lengderetning, med en stor grad av oppsprekking. Det er noe uklart om dette er helt representativt for pælers tilstand i marken fordi opptak av pælen i seg selv har såvidt stor innvirkning på pælen.

Opptak av pæl er en omfattende operasjon og vil vanligvis ikke være aktuelt som undersøkelsesmetode for et vanlig kalksement-stabiliseringsprosjekt.

6.4.7 Gravekontroll

Ved utgraving/graving i masser stabilisert med kalksementpæler er det viktig at gravemaskinkjøreren lager en rapport om gravbarheten som kan være med i en helhetsvurdering av effekten av kalksement-stabilisering. I tillegg er det mulig å gjøre en visuell inspeksjon av pælemateriale som fjernes ved graving, før dette eventuelt kjøres bort eller deponeres som en del av utbyggingen.

6.4.8 Andre in-situ kontrollmetoder

Vingeboring

Tradisjonell vingeboring har vært brukt for å vurdere udrenert skjærstyrke av kalksementpæler. Ulemper ved metoden er at en begrenset del av pælers tverrsnitt blir undersøkt, og at vingens konstruksjon er i svakeste laget for å teste jord forsterket med kalksement. Sonden har også en tendens til å styre ut av pælen med dybden. I Norge har Vegdirektoratet, vegteknisk avdeling gjort forsøk med et modifisert vingebor med diameter 40/80 mm, og erfaringene viser at metoden virker lovende. Vingen har i likhet med CPT og KPS en tendens til å styre ut av pælen ved 6-7 m dybde.

Pælvingesondering

Denne metoden er hittil hovedsaklig benyttet i Finland, og pælvingesonden består av 4 forsterkede vinger hver med bredde 66 mm og høyde 85 mm. Vingens tykkelse er 6 mm for halvparten av vingebredden regnet fra senter av stangen og tykkelsen er 3 mm for resten av vingen. Vingeforsøk utføres normalt for hver meter av pælen, og et kontinuerlig bilde av skjærfastheten kan fås ved å måle motstanden ved nedpressing mellom de nivåer hvor vingeforsøket utføres. Metoden er noe tidkrevende og kun en begrenset del av tverrsnittet kan undersøkes.

Pressiometer

Pressiometer (type Menard) kan brukes til å vurdere skjærfastheten i kalksementpæler. Menard's pressiometer består av tre celler, som i prinsipp er gummimembraner som omslutter et stålrør. Pressiometeret blir senket ned i et forboret hull i pælen, og målinger utføres for hver meter ved å ekspandere en målecelle fylt med vann ved å tilføre et kjent gasstrykk. I Sverige har metoden vært brukt (Pramborg/Albertsson i Årvinge nær Stockholm, NGM-92) til å vurdere udrenert skjærfasthet i kalksementpæler ved $s_u = p_l / 5.5$, der p_l er grensetrykket i den plastifiserte sonen rundt membranen. Ulempen ved metoden er at den er tidkrevende, og gir ingen kontinuerlig måling med dybde eller over pæls tverrsnitt.

Dynamiske metoder

Dynamiske metoder for å vurdere kalksementpælers udrenerte styrke er fremdeles på forskningstadiet. Fordelen med metoden er at den er ikke-destruktiv, og kan utføres for vilkårlige tidspunkt etter installering av pæler. Endring av pæls egenskaper over tid og forandring ved belastning kan dermed studeres. Ulempen med metoden er at den ikke er utprøvd i tilstrekkelig grad til å få overført de registrerte egenskapene til representative egenskaper ved statisk belastning.

6.4.9 Laboratorieforsøk

Vurdering av kalksementpælers styrke- og deformasjonsegenskaper kan gjøres ved at prøvestykker tatt opp ved kjerneboring, fra opptaking av hel pæl eller ved utgraving testes under kontrollerte forhold i geoteknisk laboratorium.

Enaksiale trykkforsøk

Prøvestykket er enten sylindrisk (fra kjerneboring) eller trimmet som et prisme (fra uttatte deler av hel pæl). Endeflatene må være plane og parallelle. Normalt er forholdet diameter/høyde lik 1:2. Dette kan imidlertid variere noe ut fra de enkelte problemstillinger.

Fordelen med metoden er at når en først har tatt opp prøvemateriale så er enaksiale trykkforsøk en enkel og rask metode for å få et mål på udrenert skjærstyrke. Ulemper med metoden er at fordi det ikke er allsidig trykk rundt prøven (som ved treaks) er metodens nøyaktighet begrenset for bestemmelse av udrenert skjærfasthet. Prøveforstyrrelse, anisotropi, oppsprekking og belastningshastighet er andre faktorer som kan influere på resultatet ved denne metoden.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

Erfaringer fra FoU-prosjektet viser stor forskjell i verdier av udrenert skjærstyrke funnet ved enaksiale trykkforsøk. Prøver fra opptak av hel pæl testet ved NGI viser 5-10 ganger så høy trykkstyrke som prøver fra kjerneboring (SGI). Den største andelen av prøvene har blitt trimmet til 70x70x140 mm, mens noen av prøvene har blitt trimmet til størrelsen 50x50x100 mm. Kjerneprøvene som har blitt testet ved SGI har sannsynligvis vært gjenstand for en viss prøveforstyrrelse både under prøvetaking og under transport. I tillegg har disse et volum (Ø100 mm, H200 mm) som er mer enn 6 ganger volumet av de minste trimmede prøvene fra opptak på hel pæl. Dette kan ha betydning fordi eventuelle sprekkesystem blir mere fremtredende. Ved utvelgelse av prøver tatt opp fra hel pæl ble de beste prøvene testet, og kan ikke sies å være representative hverken for dybde eller tverrsnitt av pælen.

Treaksialforsøk

Prøvestykket som er sylindrisk med parallelle endeflater har som oftest et høyde/diameter-forhold 2:1. Prøvestykkets diameter er ofte lik innvendig diameter på kjerneboret, ellers trimmes prøven ned til en størrelse som kan håndteres i apparaturen.

Fordelen med metoden er at prøven blir utsatt for et realistisk spenningsbilde som simulerer spenningene som virker in-situ, i både radiell og aksiell retning. Treaksialforsøk er den eneste laboratoriemetoden for å vurdere effektivspenningsparametre. Ulempen ved metoden er at den er tidkrevende og kostbar sammenlignet med enaksiale trykkforsøk

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I FoU-prosjektet ble denne metoden brukt på to opptatte prøver fra installerte kalksementpæler, og viste verdier for udrenert skjærstyrke som lå høyere enn tolket s_u fra CPT, og samsvarende med de høyeste verdiene for s_u funnet fra enaksiale trykkforsøk.

Direkte Skjærforsøk

I et direkte skjærforsøk blir et sylindrisk prøvestykke med høyde/diameter-forhold 1:3 (1:5) montert med topp og bunnstykke som har tagger som trykkes inn i prøven. Prøven er omgitt av en forsterket membran og blir konsolidert for en vertikal last, og deretter utsatt for skjær ved at toppstykket skyves horisontalt. Skjærforsøk kan utføres ved drenerte eller udrenerte forhold, og prøven belastes til brudd eller opp til en gitt horisontaldeformasjon.

Fordelen med metoden er at den er enklere å utføre enn treaksialforsøk, og krever mindre prøvemateriale. Ulempen med metoden er at forsøket gjennomføres uten at hovedspenningstilstanden er kjent. I forbindelse med forsøk på kalksementprøver vil dermed plassering av prøven i skjærboksen ha stor betydning for resultatet fordi skjærplanet plassering i forhold til evt lagdeling av prøven vil være avgjørende.

Forsøk utført i Sverige (Åhnberg et al) viser lavere skjærstyrke fra direkte skjærforsøk sammenlignet med treaksialforsøk. Dette er forklart med at lokale brudd oppstår mellom prøven og topp- og bunnstykkene i mosetting til skjær i selve prøvestykket.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I FoU-prosjektet ble denne metoden brukt på to opptatte prøver fra installerte kalksementpæler, og viste verdier for udrenert skjærstyrke som lå høyere enn tolket s_u fra CPT, men noe lavere enn verdier for s_u funnet fra treaksialforsøk.

Forsøk med representative prøvestykker i store skjærboksforsøk kan være en metode som kan brukes for å gi bedre grunnlag for å vurdere skjærkapasiteten for en kalksementpæl.

Ødometerforsøk

Deformasjonsegenskaper til kalksementpæler kan finnes ved å utføre ødometerforsøk. Prøvematerialet trimmes til en sylindrisk prøve med $A=23 \text{ cm}^2$ og høyde 2 cm. Forsøket utføres ved at prøvestykket monteres i en stålring som fastholder prøven mot radiell deformasjon, og prøvestykket belastes aksialt med en- eller toveis drenering mot filter i topp og bunn. Forsøkene utføres enten som IL (inkrementell pålastning), CRS (konstant tøyningshastighet) eller CL (konstant poretrykksforhold). Ødometerforsøk gir informasjon om modulens forløp ved spenningspålastning, i tillegg til at permeabiliteten i materialet kan utregnes.

Fordelen med metoden er at deformasjonsegenskapene kan finnes under kontrollerte forhold, og forsøkene er relativt billig å utføre. Ulempen ved metoden er at kun et lite utsnitt av prøven blir testet, og at tilvirking av prøvestykket kan være vanskelig og føre til dårlig kontakt med stålringen. Dette kan føre til feilaktig måling av modulen.

Det er ikke utført ødometerforsøk i forbindelse med FoU-prosjektet.

Andre laboratorieforsøk

Ved oppgraving av hel pæl eller deler av pæl og ved sylinderprøvetaking skal det gjøres en visuell bedømming av materialet. Det skal foretas bestemmelse av rutineparametre som vanninnhold og densitet. Bestemmelse av skjærstyrke utfra konusforsøk anses å ikke gi en representativ styrkeverdi pga av endring og variasjon i kornstrukturen.

Bestemmelse av kalksement-innhold gir et grunnlag for å bedømme virkelig innblandingsmengde i pælen. En av metodene som brukes for å bestemme mengden kalsiumoksyd (CaO) i materialet kalles potensiometring. Metoden gir informasjon om mengden CaO i tørt materiale, og ved kjennskap til vanninnhold og densitet kan mengden CaO beregnes som g/kg fuktig jord. Dette bør så sammenlignes med en teoretisk beregning av CaO-innholdet utfra diagram over medgått mengde kalksement ved installasjon.

Sveipe-elektronmikroskop (SEM) gir anledning til å undersøke materialets mikrostruktur. Et prøvestykke støpes inn i epoxy, slipes og undersøkes ved bruk av SEM. Mikrostrukturen vil fremkomme som nyanser i gråtone. Ved bruk av denne metoden er det mulig ved hjelp av bildeanalyse å gi en kvantitativ bestemmelse av fordelingen mellom fast stoff (kalksement-stabilisert materiale) og luftinnhold.

Ved bruk av røngtendiffraksjon (XRD) kan den mineralogiske sammensetningen av materialet bestemmes. Et tynnslipt av prøvematerialet bestråles med røngtenstråler, som bøyes av i ulike vinkler avhengig av mineralets krystallstruktur. Mineraler kan dermed kjennes igjen ved sammenligning mot kjente verdier for strålingsintensitet. Med denne metoden kan forbruket av leirmineraler og bindemiddel beskrives, i tillegg til forekomsten av kalsiumhydroksid (Ca(OH)_2) og etringitt ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$).

Erfaringer fra FoU-prosjektet

SGI har målt CaO-innhold i kjerneprøver fra Rygge, og resultatene viser at en variasjon i CaO-innhold i enkeltpæler i området 2.3-20.2% av tørt materiale. I prøver tatt under pælene på opprinnelig jord ble det funnet CaO-innhold i området 1.5-1.9% av tørt materiale. Dette betyr at økningen i CaO-innhold på enkelte nivåer av pælene er meget lav. SEM-analysene for blandeprøver fra Sande og Tømmerås viser betydelig forskjell i mikrostrukturen. Prøvene fra Sande hadde vesentlig mindre finstoffinnhold og en åpnere struktur enn prøvene fra Tømmerås.

7. FORHOLD SOM HAR BETYDNING

7.1 FASTHETSUTVIKLING

7.1.1 Fasthetsutvikling av pæl

Erfaringer fra en rekke laboratorieforsøk på opptatte prøver og blandeprøver, samt in-situ målemetoder viser at styrke og stivhet av kalksementpæler øker over tid. Blandeforholdet mellom kalksement og innblandingmengden har stor betydning.

Det finnes store regionale og lokale forskjeller i stabiliseringseffekt, som skyldes variasjon i jordarter, vanninnhold, leirinnhold og innslag av organiske stoffer.

Stabiliseringseffekten kan defineres som forholdet mellom trykkstyrke av stabilisert jord og trykkstyrke av ustabilisert jord. Nedenfor er det listet opp erfaringer om stabiliseringseffekt fra Sverige og Norge. Effekten vil variere noe avhengig av mengde bindemiddel.

Torv og gyttje

Laboratorieforsøk med innblanding av bindemiddel i torv viser at det er mulig å oppnå en stabiliseringseffekt på 5 dersom bindemiddelet er sement. Effekt av stabilisering med bindemiddel må veies mot gevinsten ved masseutskiftning.

Gyttig leire

Innblanding med kalksement kan gi en stabiliseringseffekt på 10-20. Fasthetsutviklingen er imidlertid langsom, og full belastning kan ikke påregnes før etter 3 måneder. Kontrollert forbelastning kan med fordel anvendes.

Sulfidholdig leire

Det finnes lite informasjon om stabiliseringseffekten i slike jordarter, og effekten må undersøkes med blandeprøver i hvert enkelt tilfelle. På sikt kan stabiliseringseffekten være like høy som leire uten sulfid.

Leire

Leire og siltig leire egner seg utmerket for stabilisering med kalksement. Stabiliseringseffekten avhenger av innblandingmengde, vanninnhold og leirinnhold, og fasthetsøkningen kan bli 10-50 ganger skjærstyrken av ustabilisert jord.

Kvikkleire

Kvikkleire gir meget god fasthetsøkning for både kalk, sement og blandingen kalksement. Stabiliseringseffekten for kalksement kan forventes å ligge rundt 10-50. Årsaken til den gode stabiliseringseffekten kan skyldes den høye sensitiviteten som sørger for homogen innblanding.

7.1.2 Fasthetsutvikling av materiale omkring pæl

Styrke og stivhet av materiale omkring kalksementpæler vil over tid øke. Dette skyldes at kalk med tiden trekker inn i den omkringliggende jorda, og vil føre til reaksjoner med denne. Pælen vil på sin side virke drenerende på de omkringliggende massene og føre til en konsolidering som gir fasthetsøkning på sikt. Denne effekten bør ikke utnyttes i dimensjoneringsammenheng.

7.2 INNFLYTELSE PÅ STABILISERINGSEFFEKT

7.2.1 Silt

Ved lave leirinnhold der jordarten karakteriseres som silt eller leirig silt viser erfaringer fra Norge (Sande) at styrken blir lav, noe som er funnet både fra blandeprøver og ved testing av opptatte prøver.

7.2.2 Humus

Organiske komponenter kan retardere puzzolan- og sementreaksjonene. Dette gjelder oftest syregrupper som reagerer med kalsiumhydroksyd, som danner forbindelser som er tungtløselige. Dette kan også medføre en temporær senking av pH, og retardasjon eller stans av kalkens reaksjoner med jorda. Sement gir ofte en bedre innblanding i materialer med organisk innhold, fordi sement kan lage bindinger uten samvirke med leirpartiklene. Det vil derfor bli en viss styrkeøkning dersom man bruker en blanding av kalk og sement.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

Forsøk utført av studenter ved NTNU (Ånensen og Eknes, 1998) med innblanding av opptil 8% humus av tørrvekt blandet i silt (Vassfjellet) viste ingen negativ effekt på trykkfasthet. Svenske undersøkelser tilsier at økende organisk innhold gir reduksjon i trykkfasthet. Undersøkelsene bygger på erfaringer fra leire med høyt vanninnhold og leirinnhold.

7.2.3 Stein

Innhold av stein og blokk i leirholdig jord kan føre til dårlig innblanding av bindemiddel. Dette vil påvirke trykkfastheten ved at områder i pælen kan ha lommer med mye bindemiddel, mens andre områder av pælen kan ha lite bindemiddel.

7.2.4 Sulfid

Erfaringer fra Sverige viser at sulfidholdige jordarter ofte fører til lavere økning av skjærfastheten enn i jordarter uten sulfid. Dette kan bero på at sulfid finnes i organisk materiale, og at det er det organiske materiale som forårsaker lav skjærfasthet som i f.eks gytte. Det organiske materiale kan dessuten inneholde humussyrer som retarderer reaksjonshastigheten. I leirer med høyt sulfidinnhold (>1-3%) vil det skje en langsom fasthetsøkning med innblanding av kalksement, men det er usikkert om man på sikt kan oppnå samme fasthet som leire uten sulfid.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

I prøvene fra Sande ble det registrert svovellukt som kan stamme fra sulfid eller humus i leira. Dette kan være med å forklare noe av de lave skjærstyrkene målt på prøver fra Sande, men erfaringsgrunnlaget er lite.

7.2.5 Sulfat

Sulfat kan dannes ved at sulfid reagerer med f.eks svovelsyre eller humussyre. Fra betongkjemien vet man at sulfater og nitrater reagerer med aluminatene i sementen. Etter en normal fasthetstilvekst i betongen vil reaksjonsproduktene over tid føre til knusning av betongen. Det er ikke rapportert lignende erfaringer med kalksement-stabilisert leire.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

Forsøk utført av studenter ved NTNU (Ånensen og Eknes, 1998) med innblanding av sulfat i laboratorietilvirkede prøver av silt fra Vassfjellet viser at økende sulfatinnhold gir økende styrke. Det skjer også en økning av fastheten med tid. Testing av prøvene er kun foretatt etter 1, 7 og 14 dager, slik at langtidseffekten av sulfatinnblanding ennå ikke er klarlagt.

7.2.6 Vanninnhold

Vanninnholdet har stor betydning for stabiliseringseffekten. Generelt kan det sies at økende vanninnhold reduserer effekten for en og samme innblandingsmengde. Ved økende vanninnhold må en derfor anta at en økning i innblandingsmengde vil være positivt med tanke på styrkeøkning. Det må her tilføyes at vanninnhold <30% har vist seg gi noe mindre stabiliseringseffekt, som kan skyldes at sedimenter med lavt vanninnhold ofte har større innslag av silt hvor partiklene relativt sett har mye mindre overflateareal som kan etablere bindinger mellom bindemiddel og korn.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

Forsøk utført på opptatte prøver og blandeprøver fra Rygge viser i grove trekk at trykkfastheten avtar med økende vanninnhold.

7.2.7 Kornfordeling

Svenske og norske erfaringer viser at økende leirinnhold fører til redusert styrke. Dette kan skyldes at kun en del av leirmineralene reagerer med bindemiddelet. En økning av innblandingsmengden ved økende leirinnhold er derfor å anbefale.

Erfaringer fra FoU-prosjektet

Forsøk utført på opptatte prøver og blandeprøver fra Rygge viser i grove trekk at trykkfastheten avtar med økende leirinnhold.

7.2.8 Lagdeling

I lagdelte jordarter kan effekten av kalksement-stabilisering være varierende. Styringen av mengden av kalksement kan være faseforskjøvet i forhold til laggrensene, ved at overganger mellom lagene ikke oppfattes med en gang under installasjonen.

7.2.9 Oppsprekking

Bindemiddelet blir tilført jorda under høyt trykk, og i jordarter med lavt vanninnhold kan dette initiere sprekker nær terrengoverflaten. Ved utgraving av skjæringer kan vannfylling av slike sprekker ha innflytelse på stabiliteten.

7.2.10 Telefarlighet

Forsøk har vist at tilsetning av kalk kan øke eller minske problemer med telehiv avhengig av innblandingsmengde (Arabi et al 1989). En innblandingsmengde på 6% eller mer vil redusere telehiv i forhold til opprinnelig jord, og eliminere telehiv ved lang herdetid. Dersom kun 2% kalk

blir tilsatt viser forsøk på siltig leire at telehiv økes med ca 60% (Arabi et al 1989). Ved stabilisering med kalksement vil kornene sementeres og pælematerialet vil over tid få en grovere struktur med høyere permeabilitet enn ubehandlet jord. Sementeringen er en permanent prosess, og pælen vil derfor bli mindre telefarlig enn omgivelsene. Økningen i permeabilitet som følge av sementering kan derimot føre til at jorda omkring pælen vil få øket telehiv.

7.3 DIMENSJONERING

7.3.1 Effektivspenning

Dimensjonering ved bruk av effektivspenning kan ta høyde for eventuelle porovertrykk som settes opp ved installasjonen, eller poreovertrykk som kan oppstå under kraftig nedbør eller poreovertrykk som skyldes vannførende lag som står i kontakt med høyereleggende områder.

Ved stabilisering av materialer med betydelig innslag av silt, vil tilstanden forholdsvis raskt gå over til en drenert tilstand. En drenert tilstand skal vurderes med effektivspenningsanalyse. Erfaring med treaksialforsøk utført i Sverige (SGI nr.48) viser at kalksementpæler kan modelleres som et friksjonsmateriale med effektivspenningsparametre

7.3.2 Totalspenning

I en totalspenningsanalyse regnes det ofte med en midlere skjærfasthet av stabilisert og ustabilisert jord. Ved antakelse om fullt samvirke kan denne finnes som

$$S_{u,middel} = \mu \cdot S_{u,pæl} + (1-\mu) \cdot S_{u,jord}$$

hvor $\mu = A_{pæl} / s^2$
 s = senteravstand mellom pælene

Antakelsen om fullt samvirke kan diskuteres og det bør derfor vurderes om det skal innføres en faktor i uttrykket som tar hensyn til usikkerheten ved denne antakelsen. Dette kan gjøres f.eks ved å innføre en reduksjonsfaktor på det første leddet (effekt av stabilisert jord), basert på anleggets bruksområde og sikkerhet mot brudd for ustabilisert skråning. Det bør også vurderes hva den effektive dekningsgrad av kalksementpæler virkelig er. Ved setting av doble rekker med pæler er det en klar tendens til at pælene søker mot hverandre. Et annet spørsmål er hvor stor andel av skjærstyrken til den mellomliggende leira som beregningsmessig har en stabiliserende funksjon.

Totalspenningsanalyse er i utgangspunktet bare gyldig for udrenert tilstand (korttid) i kohesjonsjordarter.

7.3.3 Samvirke

Tøyninger ved brudd for kalksement-stabilisert leire ligger som oftest i området $\epsilon_f = 1-2\%$, mens bruddtøyning for ustabilisert leire som oftest ligger i området $\epsilon_f = 2-4\%$. Det betyr at ved lik mobilisering av jord og kalksementpæler vil en større andel av styrken utnyttes for kalksementpæler enn hva tilfellet er for ustabilisert jord. Dette innebærer at ved dårlig samvirke mellom pæl og jord i en skråning kan pælen gå til brudd, og det er da restskjærfastheten til pælene og skjærfastheten til den omkringliggende jord som gjenspeiler evnen til å stabilisere skråningen.

Ved utgraving av kalkstabiliserte skjæringer kan pælene bli utsatt skjærdeformasjoner. Dette kan påvirke stabiliseringseffekten ved at det kan bli introdusert svakhetssoner i enkelte av pælene.

7.4 INSTALLERING

Usikkerhetene som er knyttet til installeringen er primært knyttet til to forhold:

- oppnådd omrøring og innblanding i pælen
- plassering av pælen

Erfaringene tilsier at det kan være betydelig variasjon i omrøring og innblanding av kalksementen i jorda. Innblandingen vil i stor grad være avhengig av oppnådd omrøring og dette styres både av grunnforholdene og det utstyret og de prosedyrer som blir benyttet. En tilpasning av utstyr og prosedyrer til de stedlige grunnforhold er viktig for å oppnå et godt resultat.

Avvik av plassering av pælene i dybden har vist seg å være et problem, spesielt ved setting av pæler med overlapp. Det er behov for å utvikle bedre metoder både for å redusere plasseringsavvik og for å kunne kontrollere dette.

7.5 KONTROLLMETODER

Usikkerheter knyttet til kontrollmetoder går i første rekke på:

- gir undersøkelsene en god beskrivelse av pælenes egenskaper
- er den testede pælen representativ for det stabiliserte området

De kontrollmetodene som blir benyttet synes gjennomgående å gi en brukbar beskrivelse av pælenes trykkstyrke. Kontroll av homogenitet av pælene, skjærstyrke og plasseringsavvik er imidlertid med de nåværende metodene begrenset.

Det kan alltid stilles spørsmål ved hvor godt kontroll på enkeltpæler er representativ for et område. Denne problemstillingen er imidlertid av generell karakter og ikke spesielt knyttet til kalksementstabilisering. Gjennomgående bør det etterstrebes å oppnå en bedre kobling mellom oppnådd resultat og de stedlige forhold, spesielt knyttet til grunnforhold.

8. FORSLAG FOR VIDERE ARBEID

Metoden med kalksement-innblanding i jord har sitt utspring i Sverige, og svenskene gjennomfører for tiden et FoU-prosjekt om dypstabilisering med kalksementpæler. Dypstabiliseringsprosjektet skal gjennomføres over en 5-årsperiode med økonomisk ramme ca. 10 millioner SEK pr. år. Svenskene har gjennom bruk av kalksementpæler og årelang forskning på dette feltet vært et foregangsland i Norden med metoden.

Gjennomføringen og resultatene av dette FoU-prosjektet har vist at metoden har en klar nytteverdi både økonomisk og teknologisk, og brukes hovedsaklig for oppnå økning av bæreevne, reduksjon av setninger og som stabilitetsøkende tiltak i skjæringer.

Erfaringer gjennom FoU-prosjektet har bidratt til økte kunnskaper om de forhold som har betydning for å oppnå et best mulig resultat ved bruk av kalksementpæler. Arbeidet viser likefullt at problemstillingen er kompleks og at det er behov for videre arbeid. I det følgende er det listet opp forslag til videreutvikling av metoden.

Installasjon

- evaluere eksisterende og utvikle nye visptyper som gir den beste innblanding med hensyn til homogenitet under de rådende grunnforhold
- utvikle system for registrering av helning på alle nivå av pælen under installasjon
- eliminere pulsing ved utblåsning av bindemiddel
- arbeide videre med installasjonsprosedyrer inklusive mulig større variasjon i stigning og rotasjonshastighet.
- måling av poretrykk under installasjon for kontroll av sikkerhet og som grunnlag for dimensjonering

Kontroll

- videreutvikle eksisterende kontrollmetoder for testing av pæl in-situ med hensyn til dokumentasjon av styrke og kvalitet
- for kontroll av pælens homogenitet og kvalitet bør nye fremgangsmåter som prøvetaking i fersk pæl utvikles videre
- øke andelen av laboratorieforsøk med hensyn på effektivspenningsbasert styrke
- utvikle metoder for ikke-destruktiv kontroll av pæl

Dimensjonering

- dagens praksis benytter i stor grad enkle regnemodeller basert på totalspenninger. For skjæringer bør det arbeides mot å etablere omforente effektivspenningsbaserte dimensjoneringsmetoder
- etablere erfaringsdatabase for vurdering av bindemiddel og installasjonsprosedyrer tilpasset de forskjellige jordartene

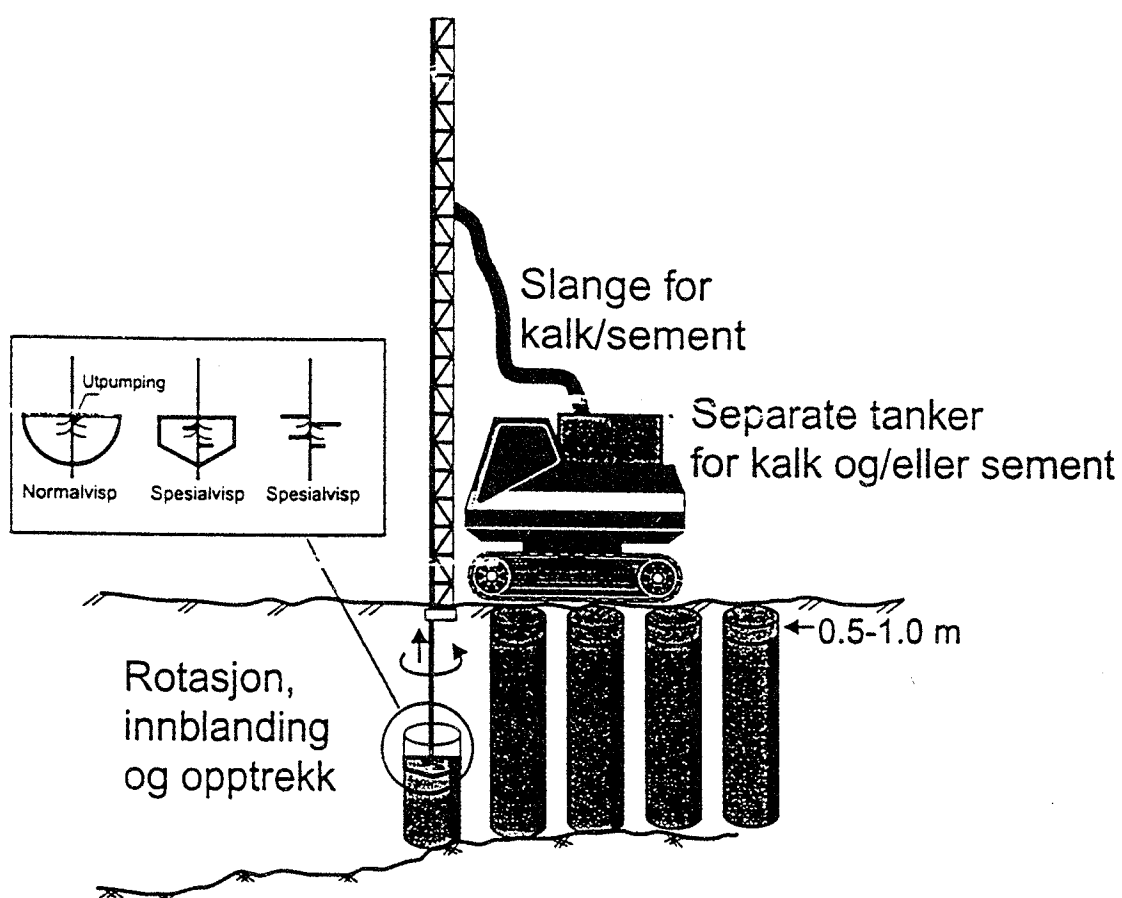
Det må legges vekt på at informasjon om nyvinninger og utvikling av metoden kommer ut til brukerne, slik at en kontinuerlig utvikling av metoden kan gjennomføres. Videre forskning omkring metoden anbefales for å øke den generelle forståelsen ikke minst av samvirke pæl/jord, for derved å kunne optimalisere bruken av kalksement-forsterkning.

9. REFERANSER

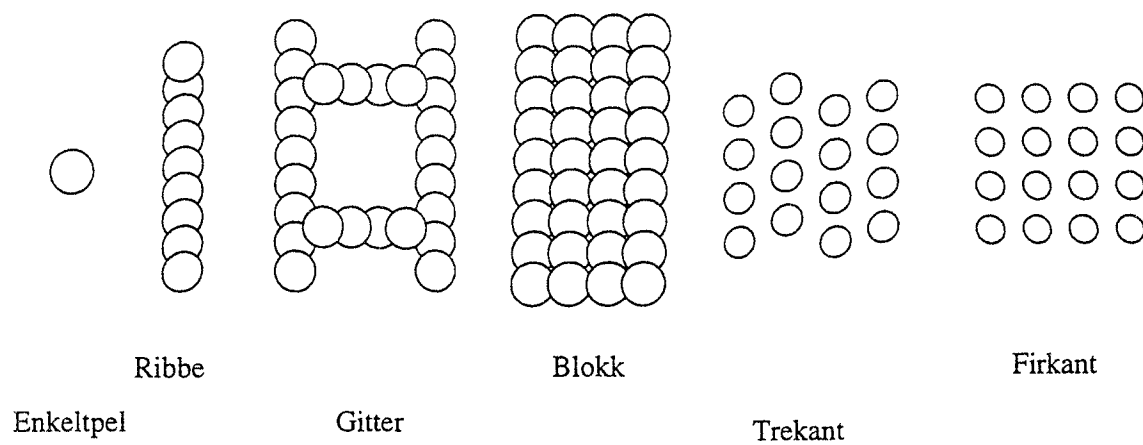
- Adestam, L. (1996): "Kalk-cementpelarförstärkning för stabilisering av schaktslänter". NGM-96, Reykjavik, s.265-271.
- Balasubramaniam, A.S. og Buensuceso jr, B.R. (1989): "On the overconsolidated behaviour of lime treated soft clay". XII ICSMFE, Rio de Janeiro, s.1335-1338
- Carlsten, P. (1995): "Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll". SGF-rapport 4:95
- Eggen A. (1997): "SND-FoU Kalksementpeler. Geotekniske forundersøkelser på forsøksfeltene, Rygge". NGI-rapport 527572-1.
- Eggen A. (1998): "SND-FoU Kalksementpeler. Opptak av hele kalksementpeler på Rygge". NGI-rapport 527572-2, Rev 1.
- Eggen A. (1998): "SND-FoU Kalksementpeler. Trykksonderinger i kalksementpeler på forsøksfelt, Rygge i Østfold". NGI-rapport 527572-3.
- Eggen A. (1998): "SND-FoU Kalksementpeler. Laboratorieresultater av prøver fra kalksementpeler, Rygge". NGI-rapport 527572-4.
- Eggen A. (1998): "SND-FoU Kalksementpeler. Vurdering av laboratorieresultater på prøver fra kalksementpeler". NGI-rapport 527572-5.
- Eggen A. (1998): "SND-FoU Kalksementpeler. Sammenstilling av CPTU-, FOPS- og laboratorieresultater". NGI-rapport 527572-6.
- Grunnforsterking med kalksementpeler. Brosjyre utarbeidet av NGI på oppdrag av Franzefoss Bruk AS og Norcem.
- Halkola, H. (1984): "Kontrollmåtningar av kalkpelare i Helsingfors". NGM-84, Linköping, s.879-886.
- Hermann, S. og Eggen A. (1992): "Kalk-/sementpeler som fundament for anleggsveger på bløt leire". NGM-92, Oslo, s.143-148.
- Holm, G., Tränk, R. og Ekstrøm A. (1987): "Kalkpelare medgips som tilsatsmedel". SGI-rapport No 30.
- Holm, G. og Åhnberg, H. (1987): "Användning av kalk-flygaska vid djupstabilisering av jord". SGI-rapport No 30.
- Holm, G. (1998): "FoU-projekt kalksementementpeler. Kärnprovtagning i provpelare". SGI-rapport Dnr 3-9710-520.

- Johansson, C. og Jons, A-K. (1995): "Kalkcementpelartillverkning – En studie av hur olika produktionsfaktorer påverkar pelarnas homogenitet och hållfasthet". Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för geoteknik. Examensarbete 1995:5
- Kivelö, M. (1996): "Spännings-töjningssamband och skjuvhållfasthet hos kalkcementpelare", NGM-96, Reykjavik, s. 309-314.
- Kujala, K. (1984): "Faktorer som inverkar på djupstabiliserade jordars mekaniske egenskaper". NGM-84, Linköping, s.895-902.
- Liedberg, N.S.D. (1996): "Samverkan mellan kalkcementpeare och lera". NGM-96, Reykjavik, s. 43-48.
- Lund, T. og Kristiansen, T. (1997): "Kalksementpæler som grunnforsterkning. En studie av metode og anvendelse. Status for metoden i dag". Foreløpig utgave.
- Mjølkarli, T. (1998): "Stabilisering av løsmasser ved hjelp av kalksement-peling". Hovedprosjekt i geoteknikk ved HiST.
- NIF, Kursdagene NTNU (1996): "Grunnforsterkning – Økonomi og metoder".
- Pramborg, B. O. og Albertsson, B. (1992): "Undersökning av kalk/cementpelare". MGM-92, Oslo, s.149-156.
- Rystad, V. (1996): "Kalksementpeler". Geoteknikk prosjekt, NTNU
- Statens Vegvesen (1995): "Veiledning til 018. Veg på bløt grunn. Grunnforsterkning". Håndbok nr. 188
- Steensen-Bach, J.O., Bengtsson, P. og Rogbeck, Y. (1996): "Large scale triaxial tests on samples from lime-cement columns". NGM-96, Reykjavik.,s.135-146.
- Watn, A. (1998): "Jernbaneverket, Utbygging. Modernisering av Vestfoldbanen, parsell 4. Deformasjoner i skjæring ved Sande stasjon". SINTEF-rapport STF22 F98603.
- Åhnberg H. og Holm G. (1986): "Kalkpelarmetoden". SGI-rapport No 31.
- Åhnberg, H., Bengtsson, P. og Holm, G. (1989): "Prediction of strength of lime columns". XII ICSMFE, Rio de Janeiro. S. 1327-1330.
- Åhnberg, H. et al (1995): "Cement och kalk för djupstabilisering av jord". SGI-rapport No 48.
- Ånensen, K. og Eknes, A. (1998): "Laboratorieforsøk på materialprøver for kalksementpeler". Geoteknikk prosjekt, NTNU.

FIGURER



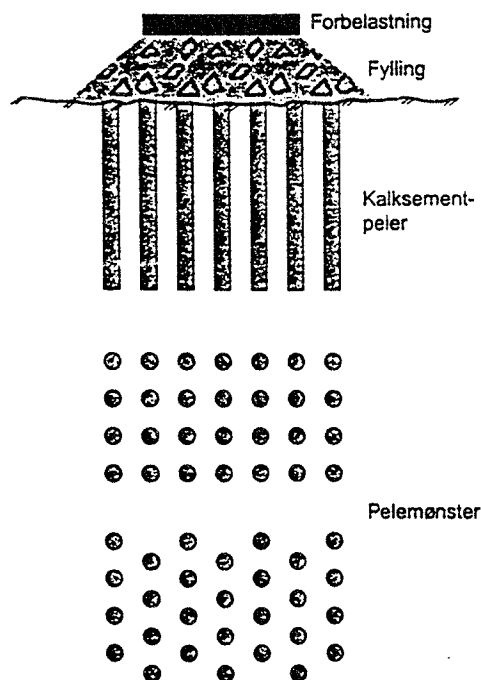
Figur 1. Tilvirkning av pæler. Prinsippskisse. (Fra brosjyre utarbeidet av NGI på oppdrag av Franzefoss og Norcem).



Figur 2

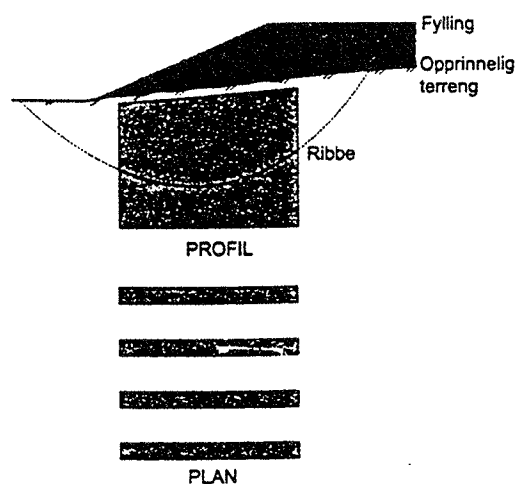
Betegnelser på pælemønster

Setningsreduksjon



Kalksementpeler har både avstivende og drenerende effekt

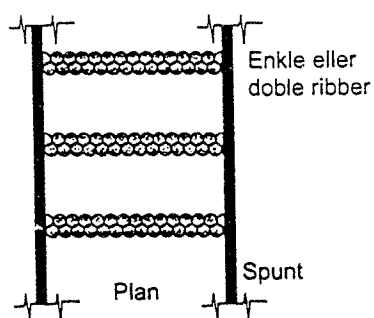
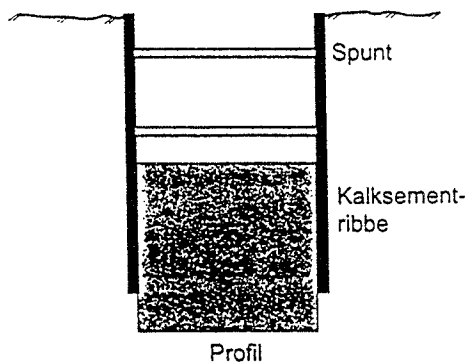
Stabilitetsforbedring



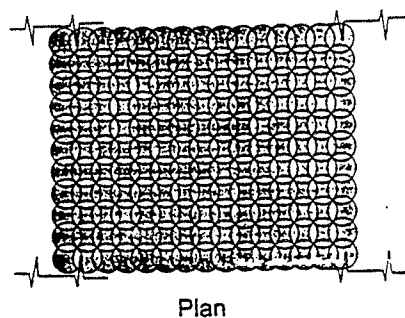
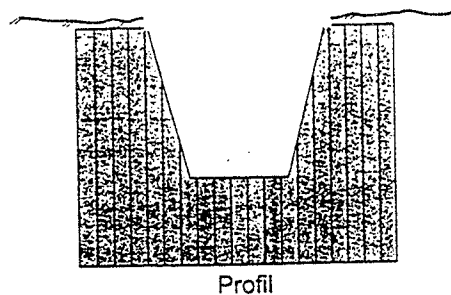
Bedring av stabiliteten ved installasjon av ribber

Figur 3. Anvendelse av kalksementpeler for å oppnå setningsreduksjon og stabilitetsforbedring. Prinsippskisse. (Fra brosjyre utarbeidet av NGI på oppdrag av Franzefoss og Norcem).

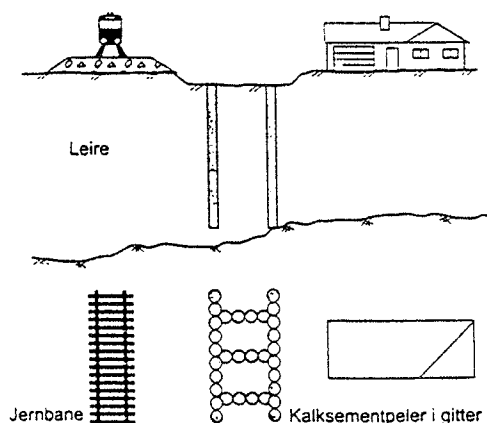
Avstivning mellom spuntvegger og motvirking av bunnoppressing



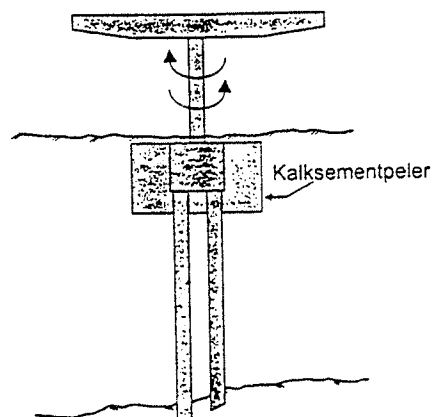
Grøftesikring



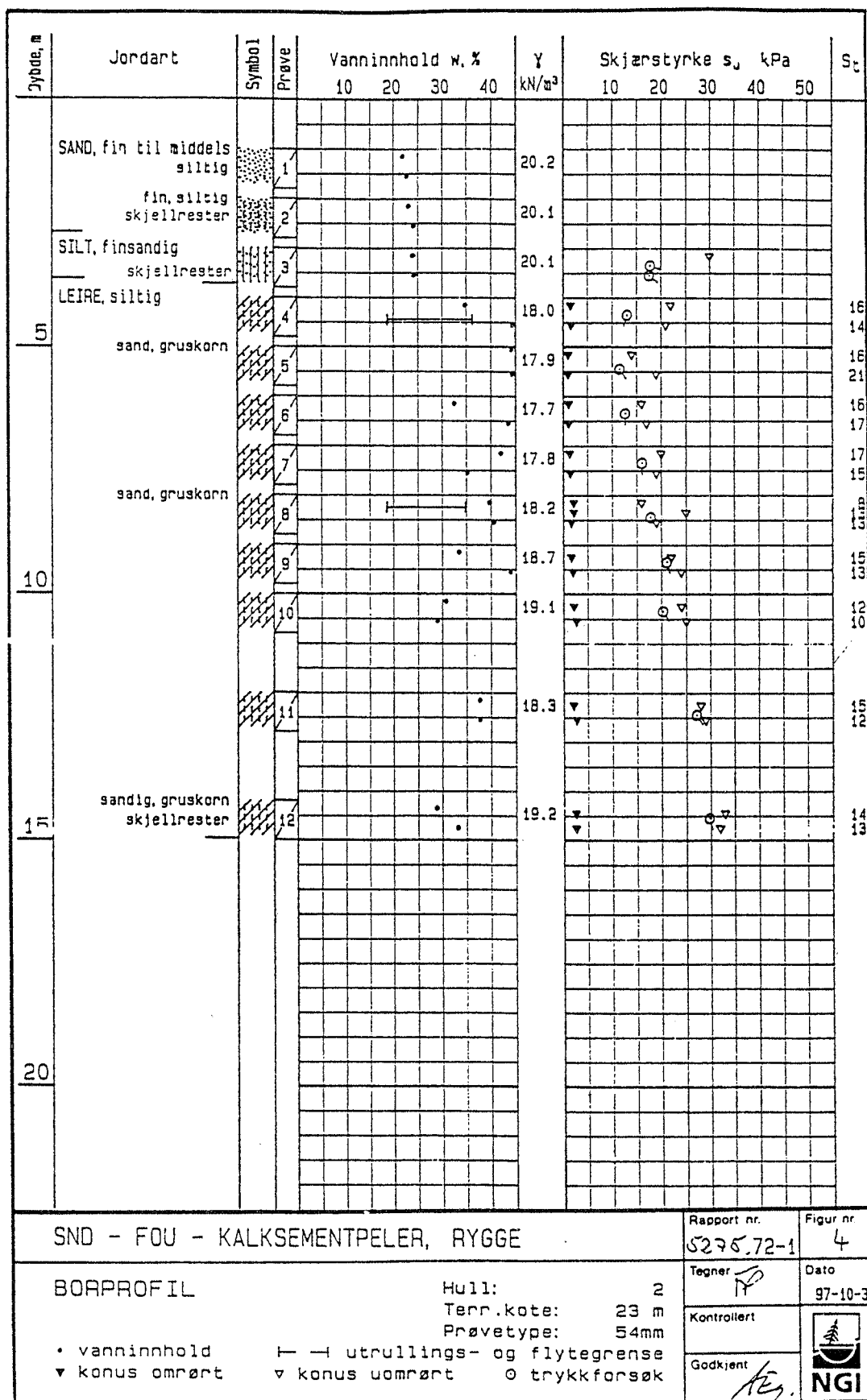
Reduksjon av vibrasjoner



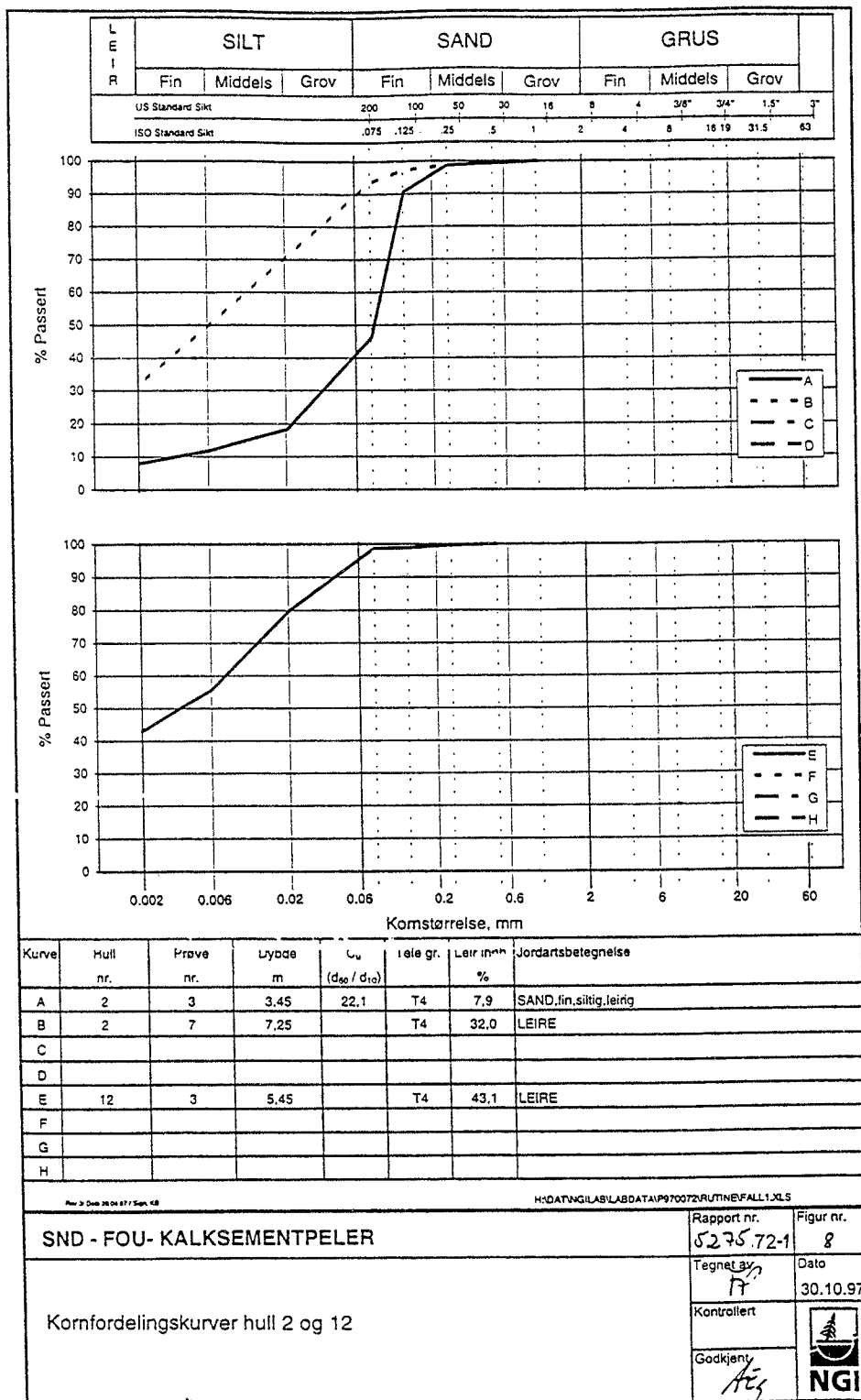
Byggegropsikring og jordavstivning



Figur 4. Anvendelse av kalksementpeler for avstivning, grøftesikring, vibrasjoner, byggegropsikring og jordavstivning. Prinsippskisse. (Fra brosjyre utarbeidet av NGI på oppdrag av Franzefoss og Norcem).

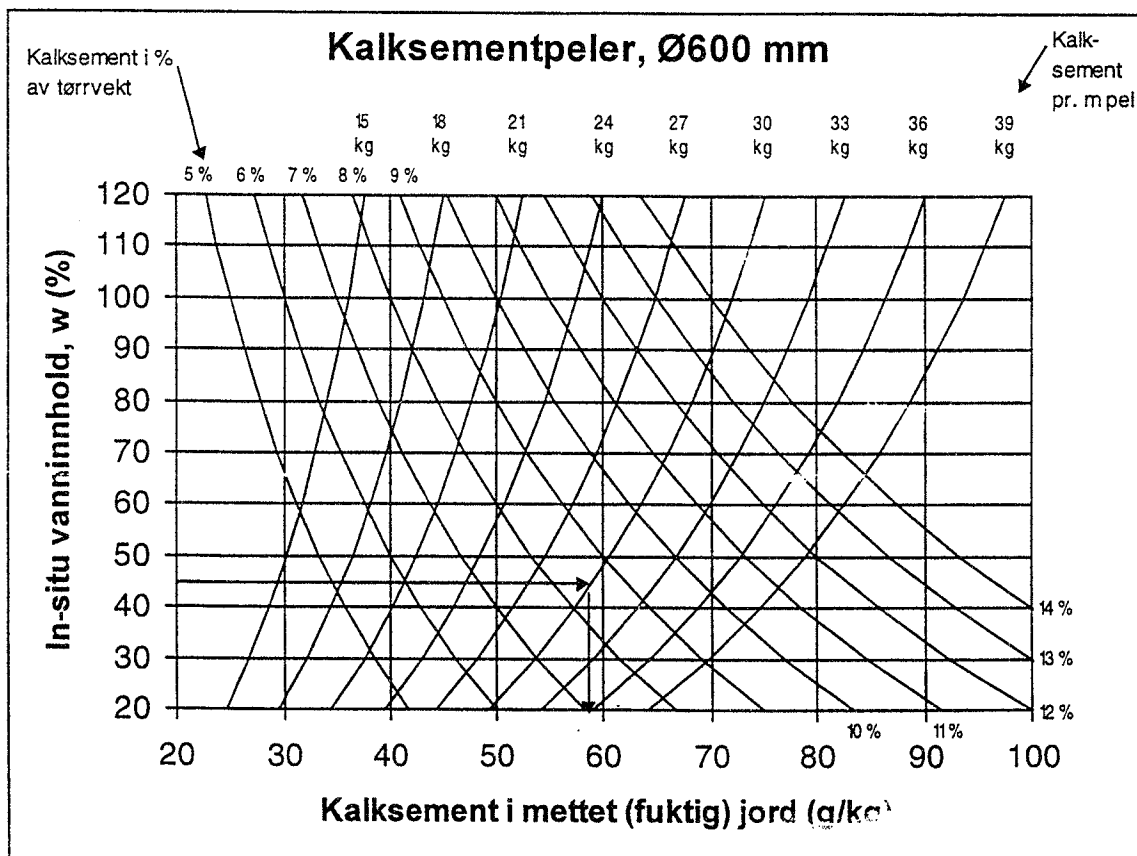


Figur 5. Borprofil m/rutineparametre fra hull 2, Bjølsen. (Fra NGI-rapport nr.527572-1).



Hull	Dybde m	Humusinnhold % av tørrvekt	Nat. saltinnhold g/l	Sulfatinnhold mg/kg ts	Sulfatinnhold mg/kg ts
2	3,5	0,5	8,3	1678	350
2	7,3	1,9	18	6405	18
12	5,5	2,1	18	8783	420

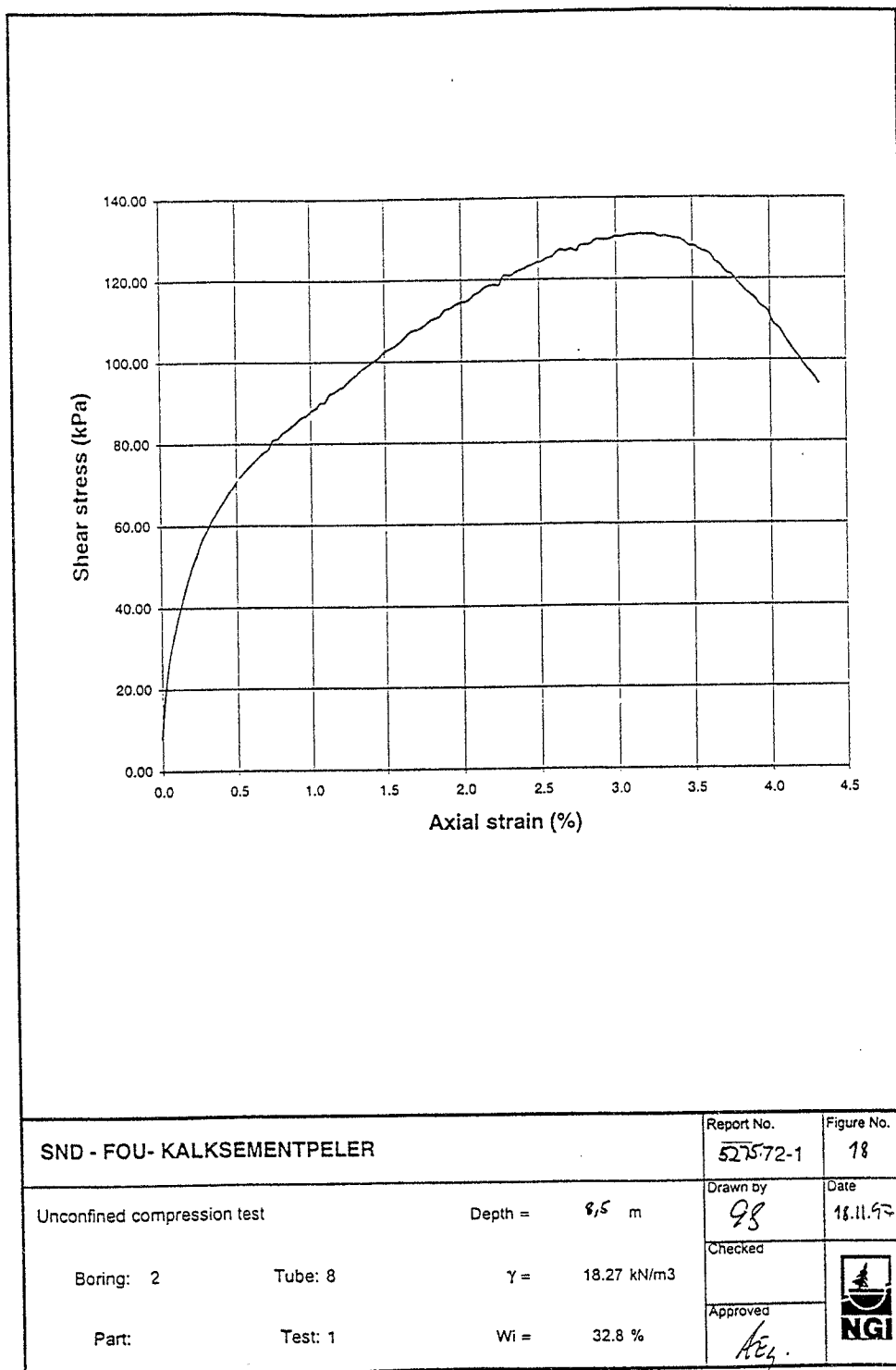
Figur 6. Kornfordelingsresultater og tabell over humus-, salt- og sulfatinnhold fra hull 2 (Bjølsten) og hull 12 (Voll), Rygge i Østfold. (Fra NGI-rapport nr.527572-1).



Diagrammet er laget for leire med spesifikk tyngdetetthet, $\rho_s = 2.8 \text{ t/m}^3$. Eksempelvis vil det for en leire med vanninnhold $w = 45\%$ og for en antatt innblandingmengde 30 kg/m pæl være nødvendig at det blandes inn ca 58 g kalksement per kg mett jord, eller ca 8.4% kalksement i forhold til tørrvekt (84 g kalksement per kg tørt materiale).

Figur 7

Eksempel på diagram for prøveblanding med kalk/sement i laboratorium basert på pæler med diameter Ø600 mm.



Figur 8.

Skjærspenning mot aksialtøyning for enaksialt trykkforsøk fra hull 2, Bjølsen. (Fra NGI-rapport 527572-1). Innblandingsmengde 30 kg/m pæl (Ø600 mm) eller 106 kg/m³. Testet etter 14 døgn

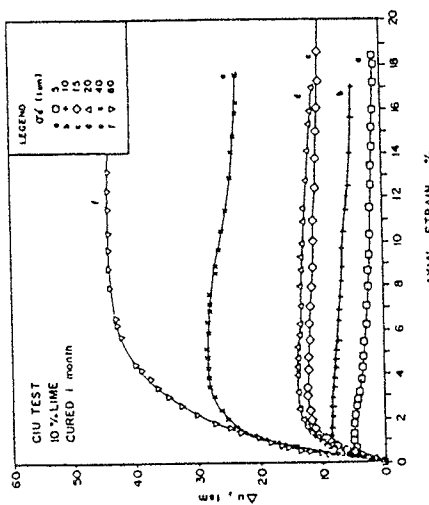


Fig. 7 Pore pressure-axial strain plots (CIU tests, 1 month curing)

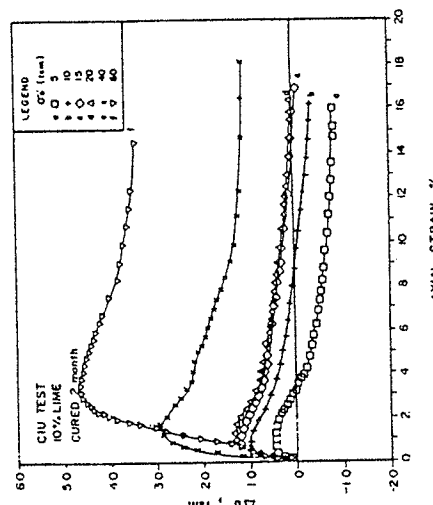


Fig. 8 Pore pressure-axial strain plots (CIU tests, 2 months curing)

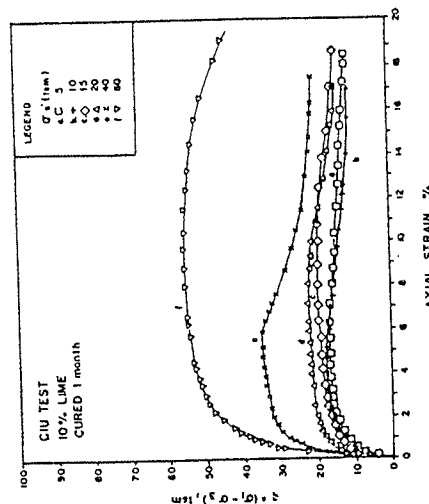


Fig. 5 Deviator stress-axial strain plots (CIU tests, 1 month curing)

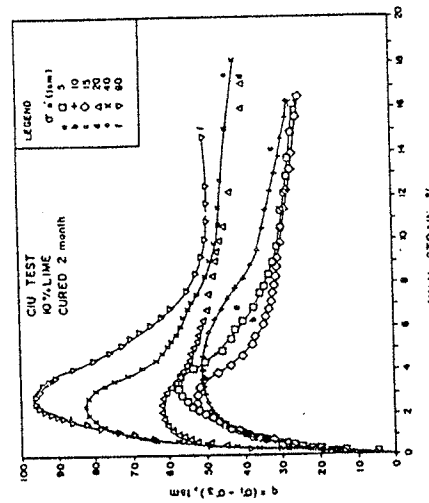


Fig. 6 Deviator stress-axial strain plots (CIU tests, 2 months curing)

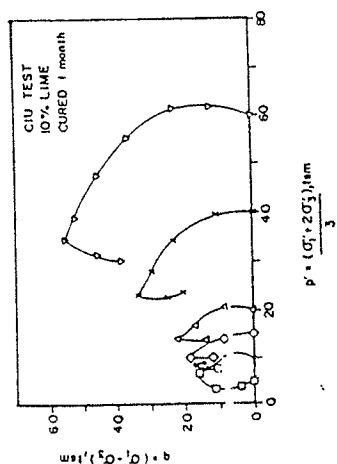


Fig. 3 Undrained stress paths (1 month curing)

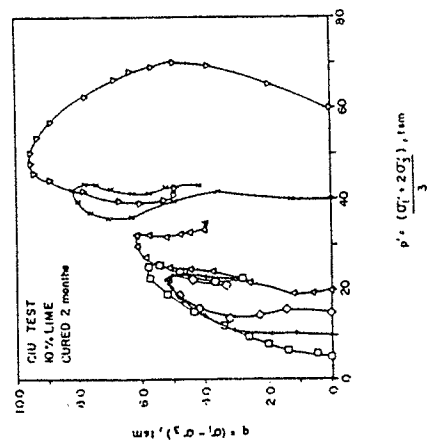
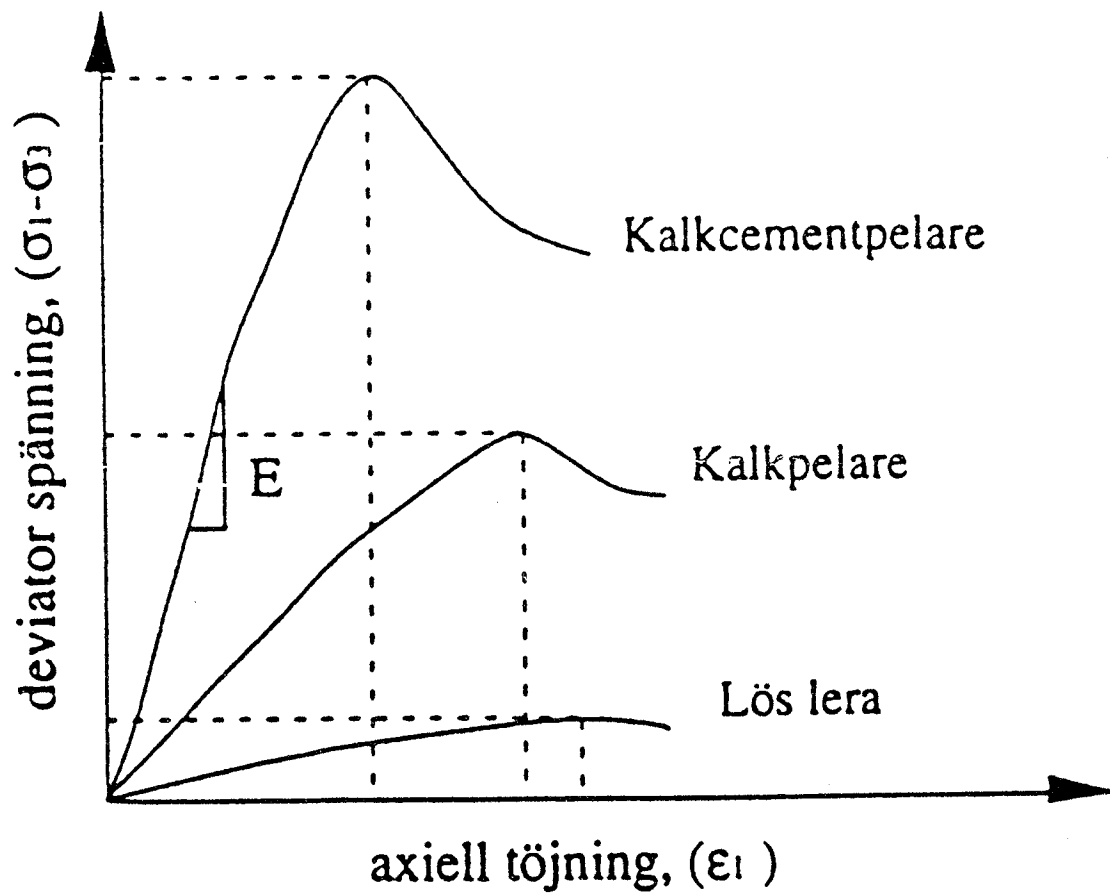


Fig. 4 Undrained stress paths (2 months curing)

Figur 9.

Eksempler på udrenerte treaksialforsøk utført på laboratorieblandede prøver med 10% kalk i Bangkok-leire. Figurene fremstiller vektorplott, og skjærspenning og poretrykk mot tøyning. Opprinnelig skjærstyrke fra enaksiale forsøk er 30 kN/m², og vanninnhold er 75-85%. (Hentet fra Balasubramaniam og Buensuceso jr.).



Figur 10. Illustrasjon av spennings-tøynings-kurver for kalk, kalksementpeler og jord. (Etter Kivelö).

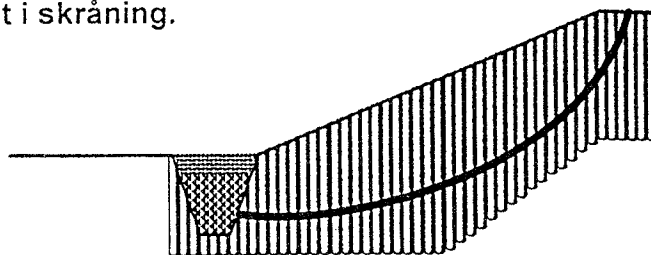
Ribbe som stabiliserende element i skråning.

Grøft med lettklinker under pukkk.

Skjærflaten vil over store deler av ribben ligge nær parallellt med skivestrukturen i K/S-pelen.

Det må tas hensyn til at grøften med lav effektivspenning vil redusere total stabilitet.

Omrøring og overlapping ved setting av pæler er viktig.

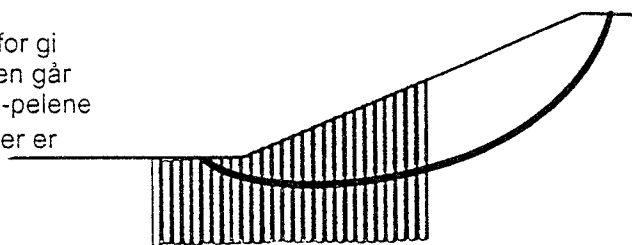


Ribbe som stabiliserende element i deler av skråning.

Samvirke mellom K/S-peler og insitu jord.

Jord og K/S-ribbe vil mobilisere styrke for forskjellig tøyingsnivå, og den stive ribben i nederste del av skråningen vil på grunn av sin større stivhet tiltrekke seg krefter. Et brudd i ribben vil derfor gi sprø bruddoppførsel i skråningen. Skjærflaten går stort sett parallellt med skivestrukturen i K/S-pelene.

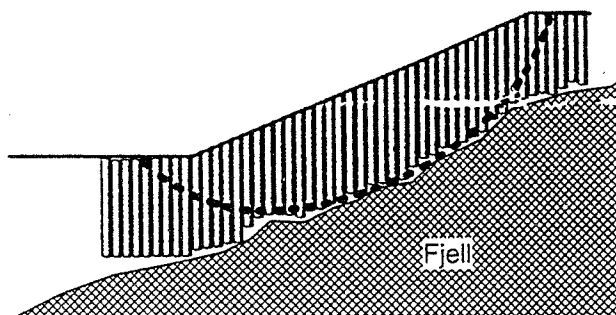
Omrøring og overlapping ved setting av pæler er viktig.



Ribbe som når ned til fjell.

Det vil bli et skikt med omrørt ustabilisert jord nær fjelloverflaten. Ofte er det god tilgang til vann i overgang til fjell, og det er fare for at skjærflaten vil trenge ned og følge dette svake skiktet.

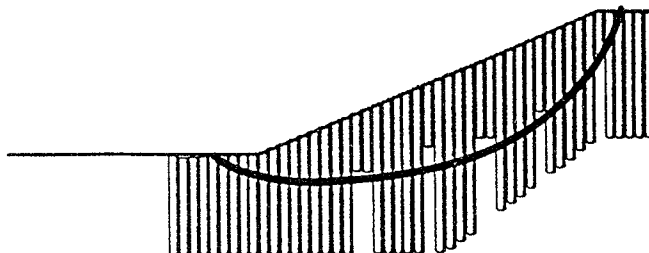
Utførelse med spesiell utførelse mot fjell vil redusere problemet betydelig.



Stein.

K/S-pelerigger har begrenset mulighet for å forsure stein i jorden. Dette vil kunne føre til ukontinuerlige ribber. Dette vil i noen grad endre ribbens egenskap som konstruksjonselement.

Gjennomsnittlig styrke blir lavere, mens ribbens fleksibilitet øker.



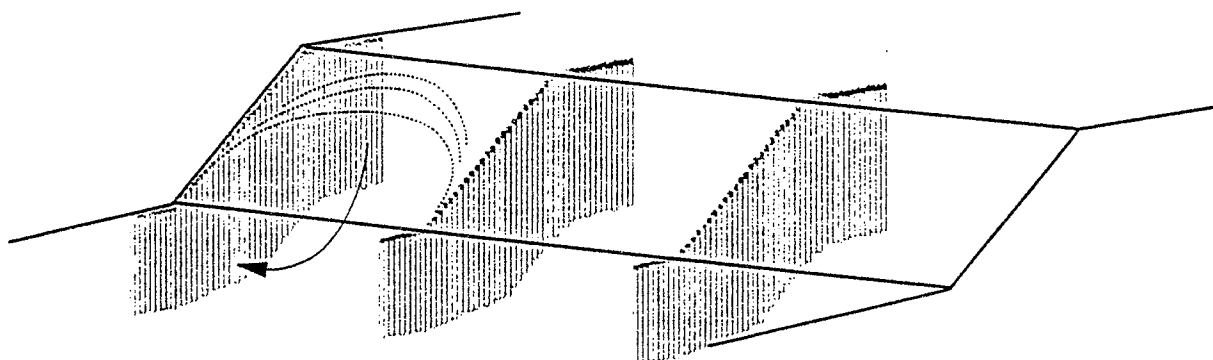
Figur 11. Problemstillinger for spesiell vurdering ved bruk av K/S-ribber som skjæringsstabilisering.

Stabilitet av mellomliggende masser.

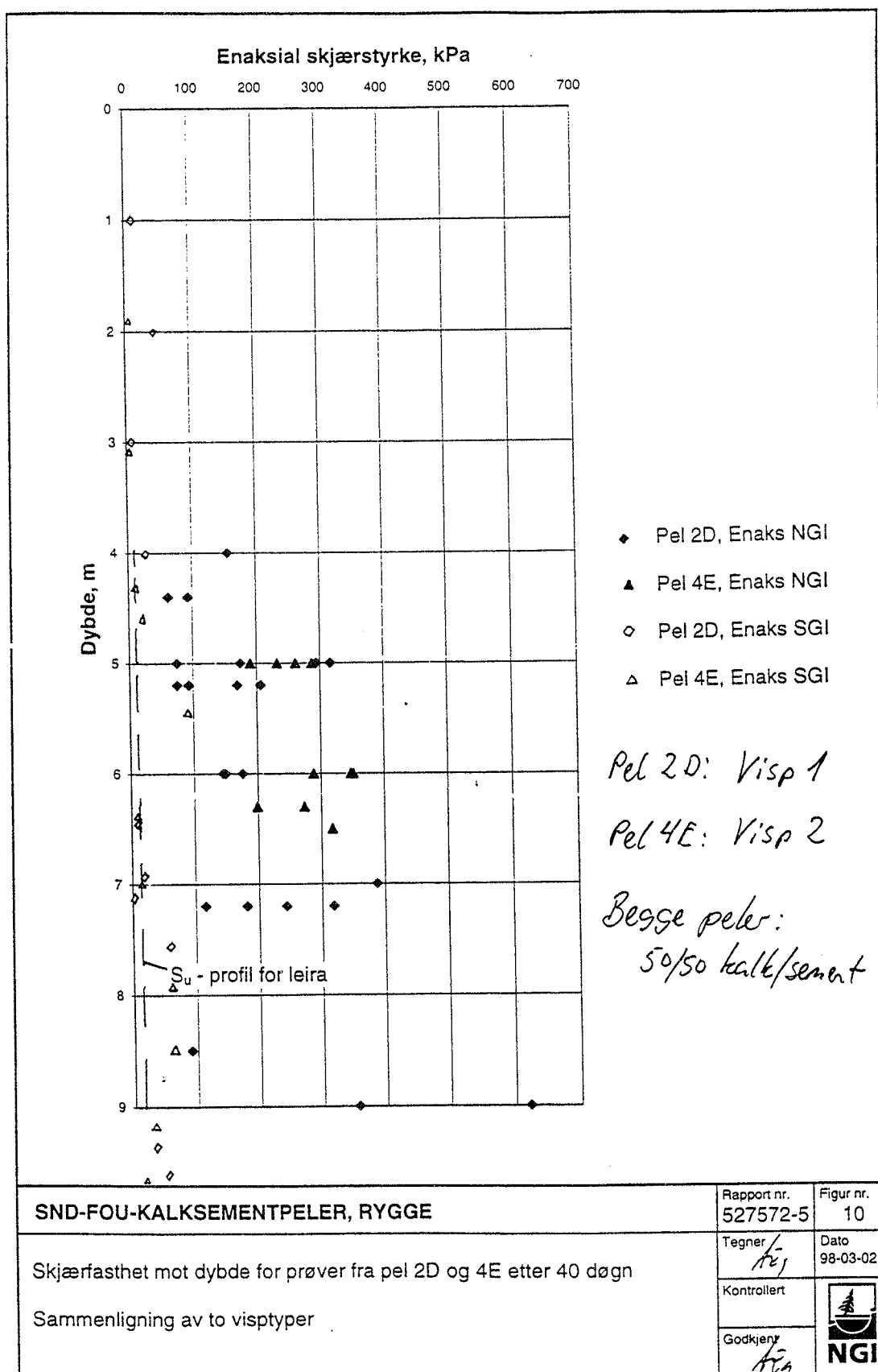
Setting av K/S-ribber medfører trykkpåføring i dypet.

Dette vil kunne føre til at skjærstyrken i massene mellom ribbene reduseres, primært i området nærmest ribbene.

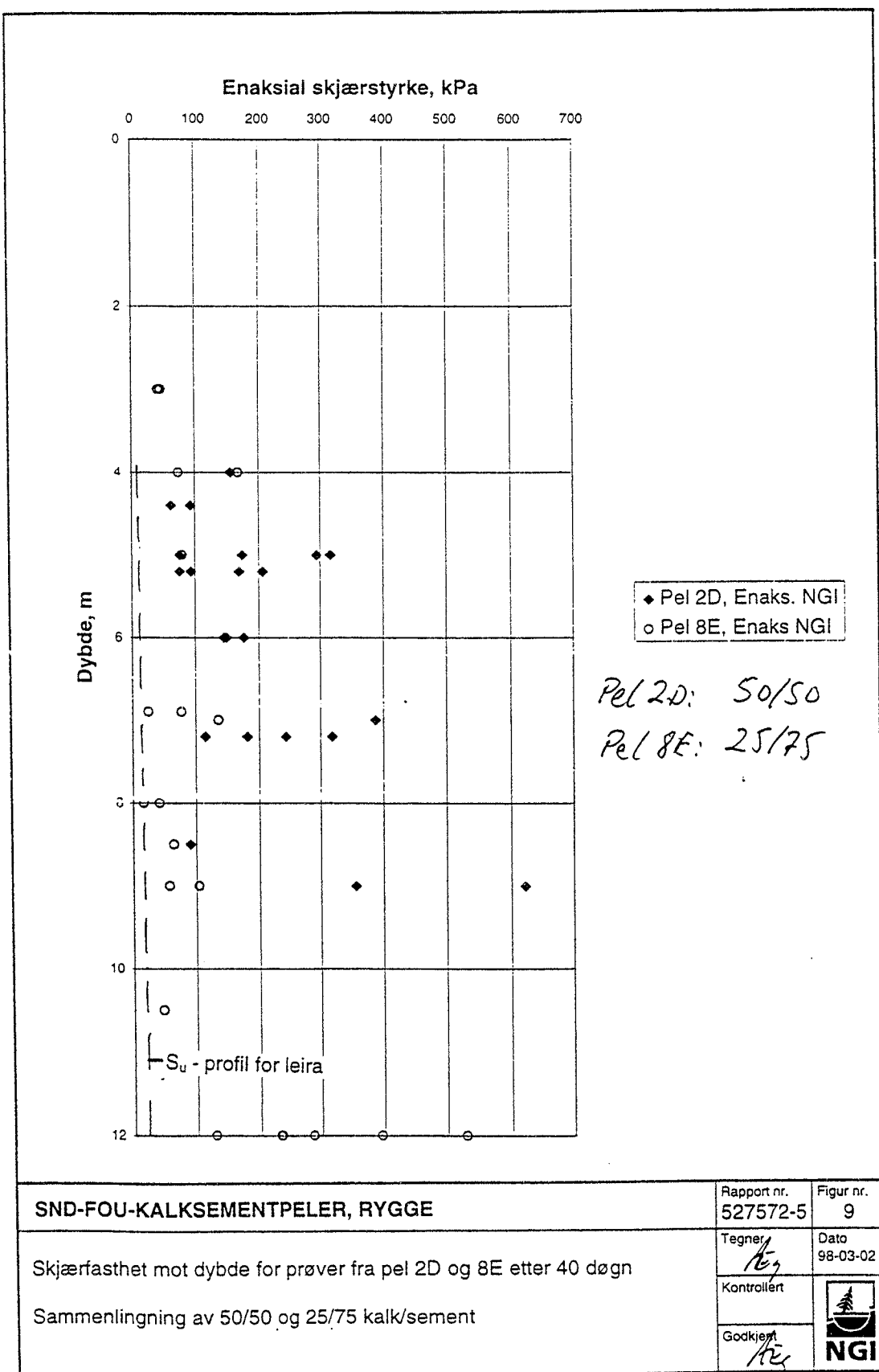
I tillegg vil K/S-injeksjon generelt gi økning av poretrykket i jorden, og som følge av disse effektene kan stabiliteten lokalt bli dårlig, og masser mellom de stive skivene kan gli ut.



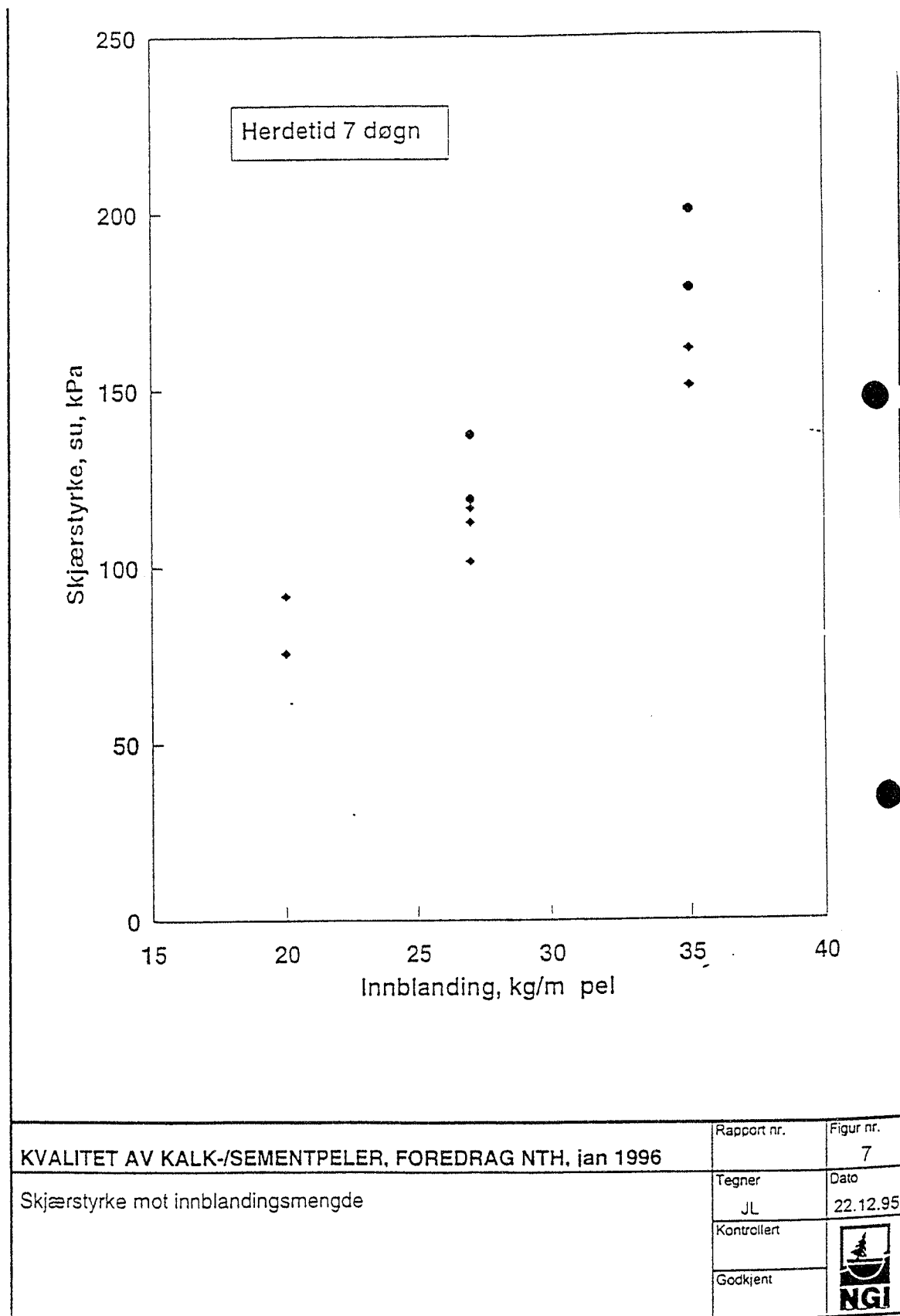
Figur 12. Problemstillinger av stabilitet av mellomliggende masser ved bruk av K/S-ribber som skjæringsstabilisering.



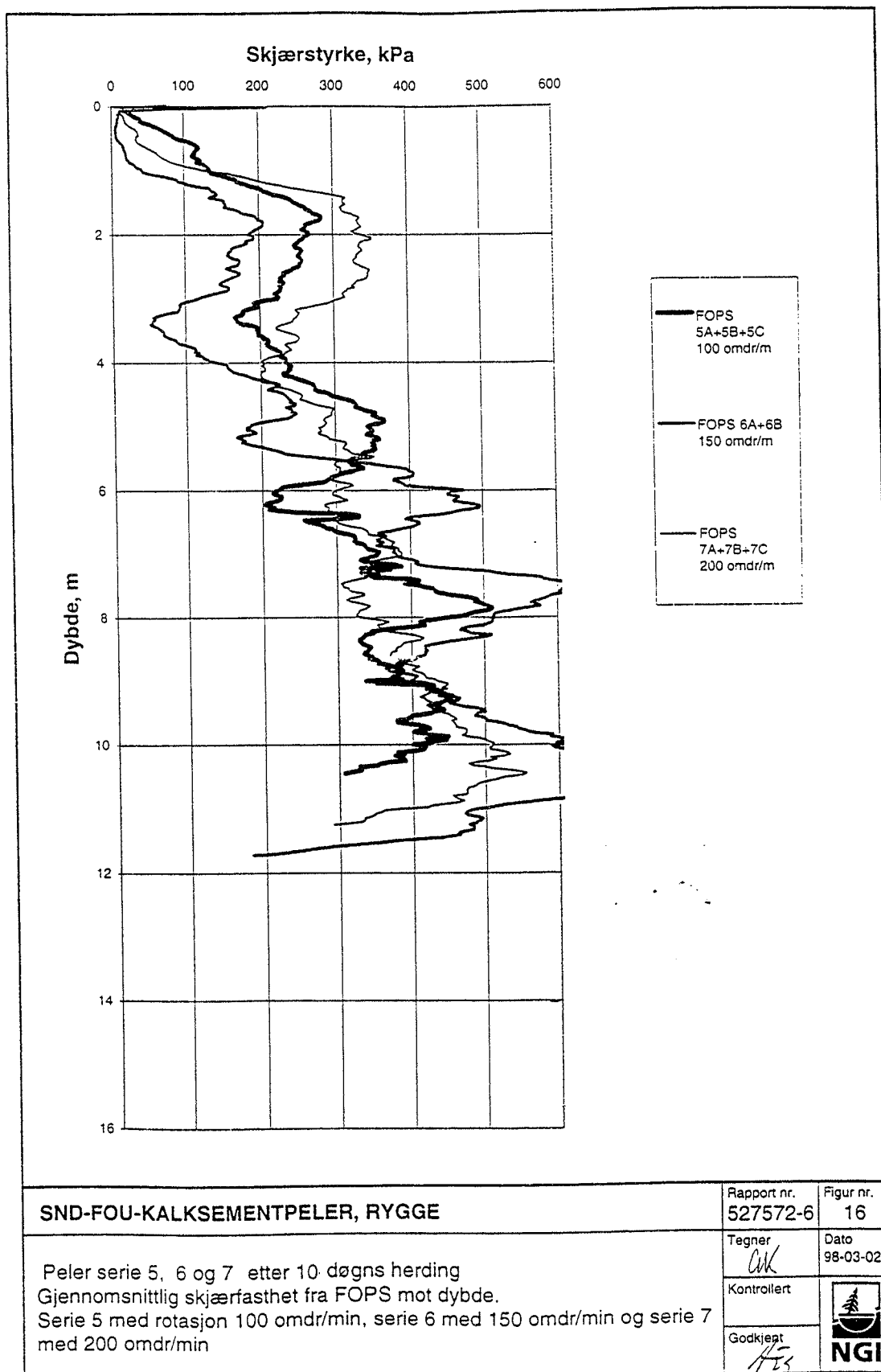
Figur 13. Enaksial trykkstyrke målt på prøver fra hel opptatt pæl. Sammenligning av visptyper. (Fra NGI-rapport nr.527572-5).



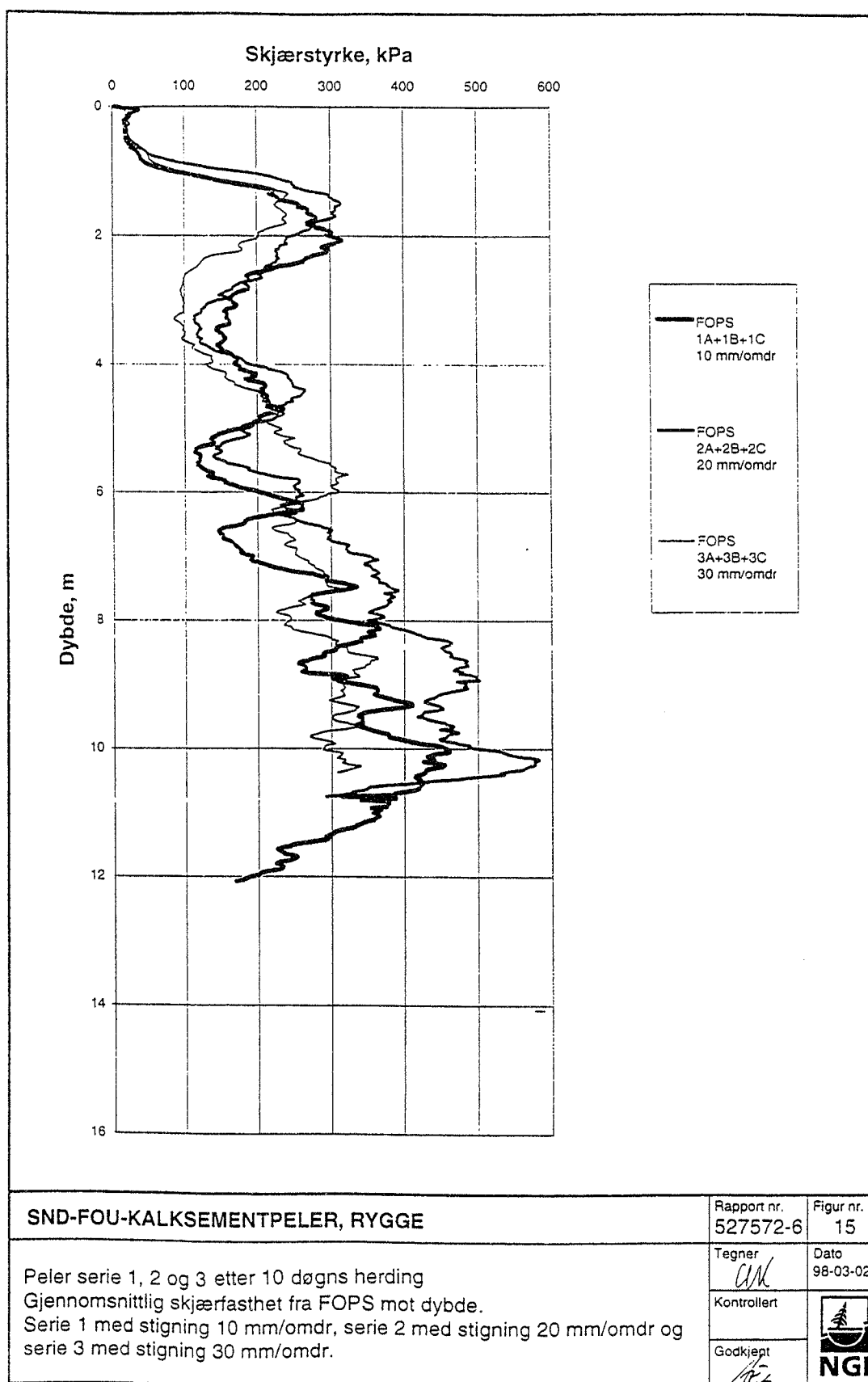
Figur 14. Enaksialprøver trykkstyrke målt på prøver fra hel opptatt pæl. Sammenligning av blandeforhold kalk/semment. (Fra NGI-rapport nr.527572-5).



Figur 15. Skjærstyrke mot innblandingsmengde for Ø500 mm pæler. (Fra NIF Kursdagene 1996, kap.11).



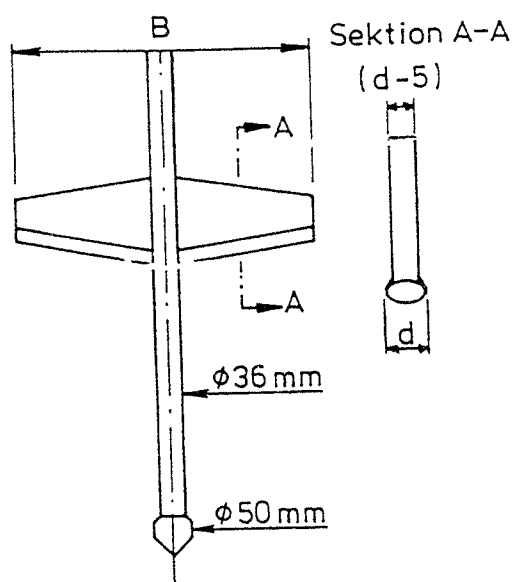
Figur 16. FOPS-målinger for å undersøke variasjon i skjærstyrke for variasjon i rotasjonshastighet. (Fra NGI-rapport nr.527572-6).



Figur 17. FOPS-målinger for å undersøke variasjon i skjærstyrke for variasjon av vispens stighøyde. (fra NGI-rapport nr.527572-6).

Toleranser:

Vingtjocklek	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Vingbredd	$\pm 10 \text{ mm}$
Avstand spets - vinginfästning	$\pm 20 \text{ mm}$
Stångdiameter	$\pm 0,5 \text{ mm}$

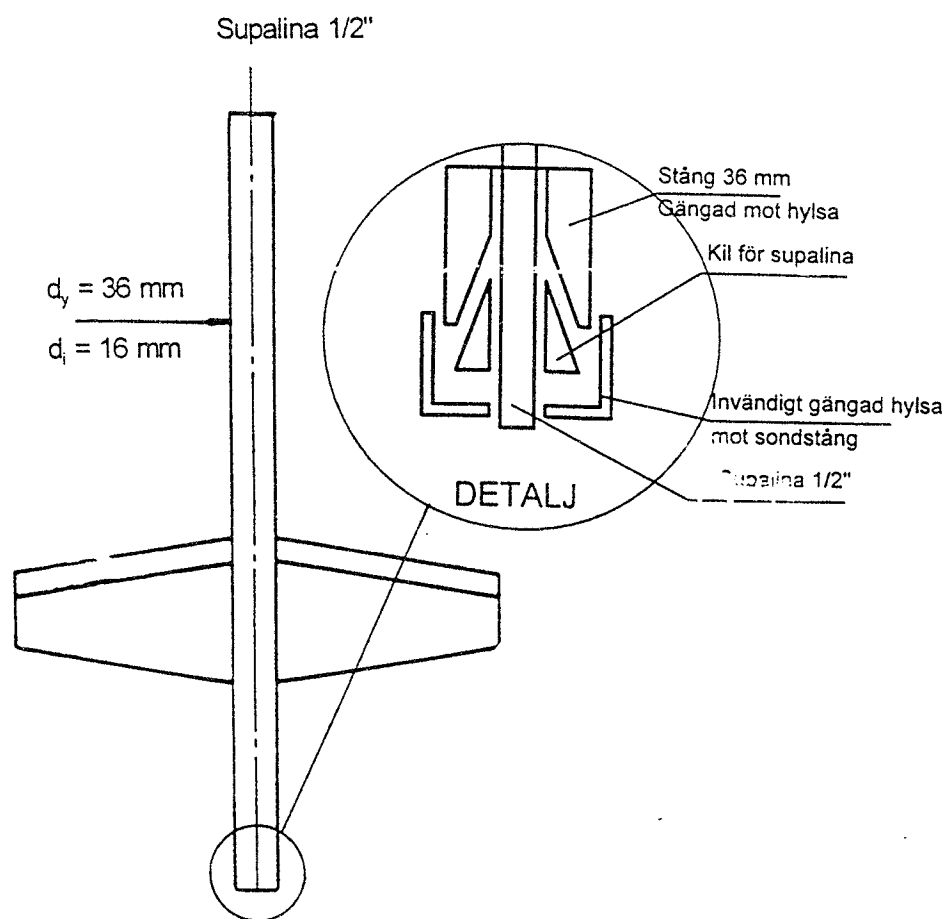


B (mm)	d (mm)
400	20
500	15
600	15

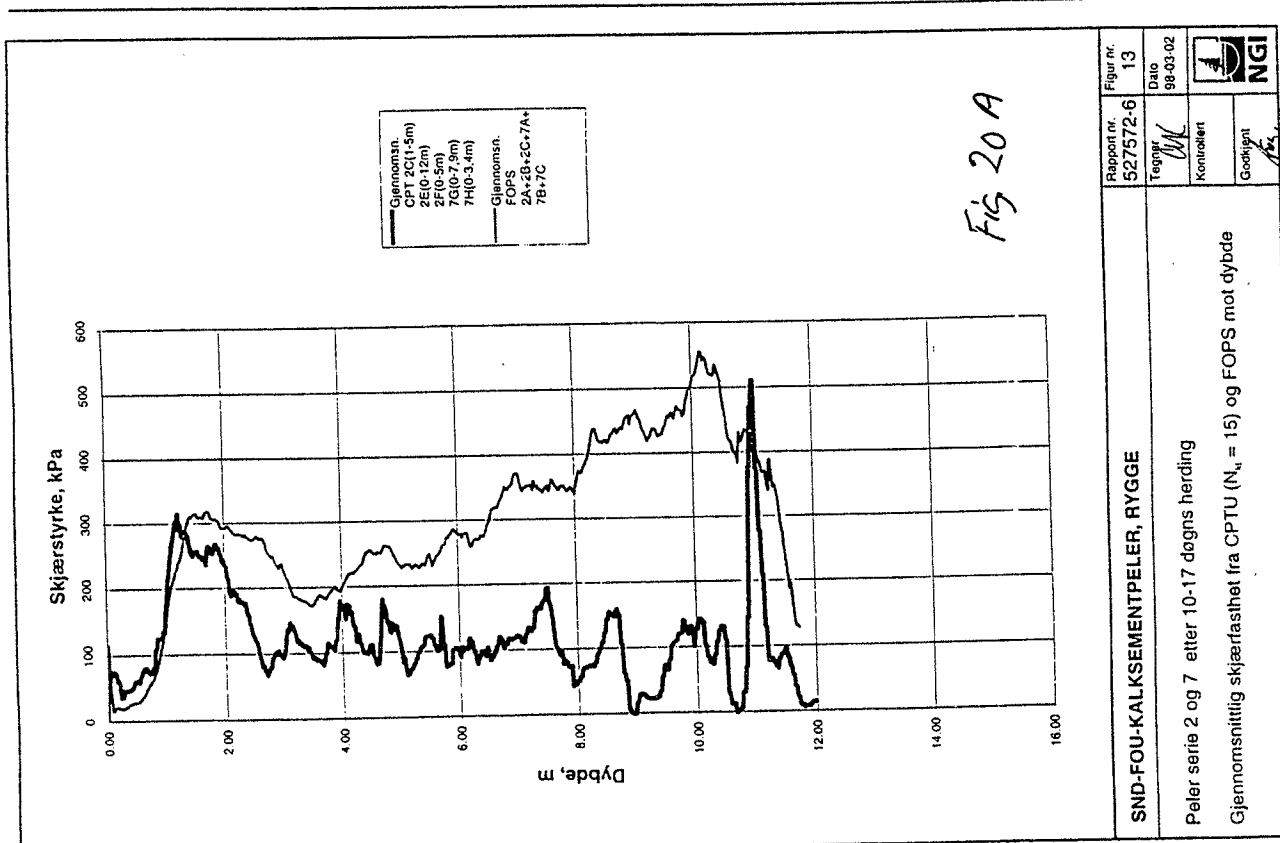
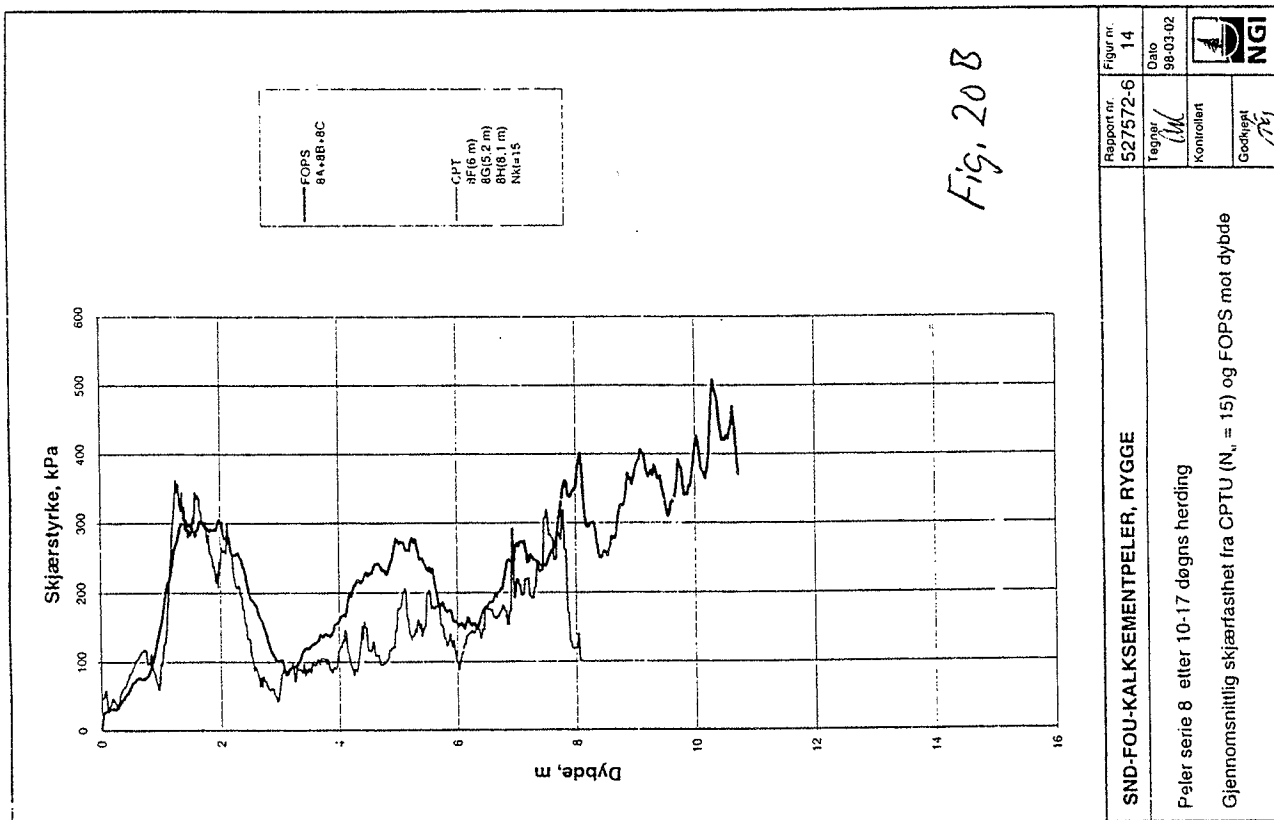
Figur 18. Prinsippskisse av utforming av KPS. (SGF 4:95)

Toleranser:

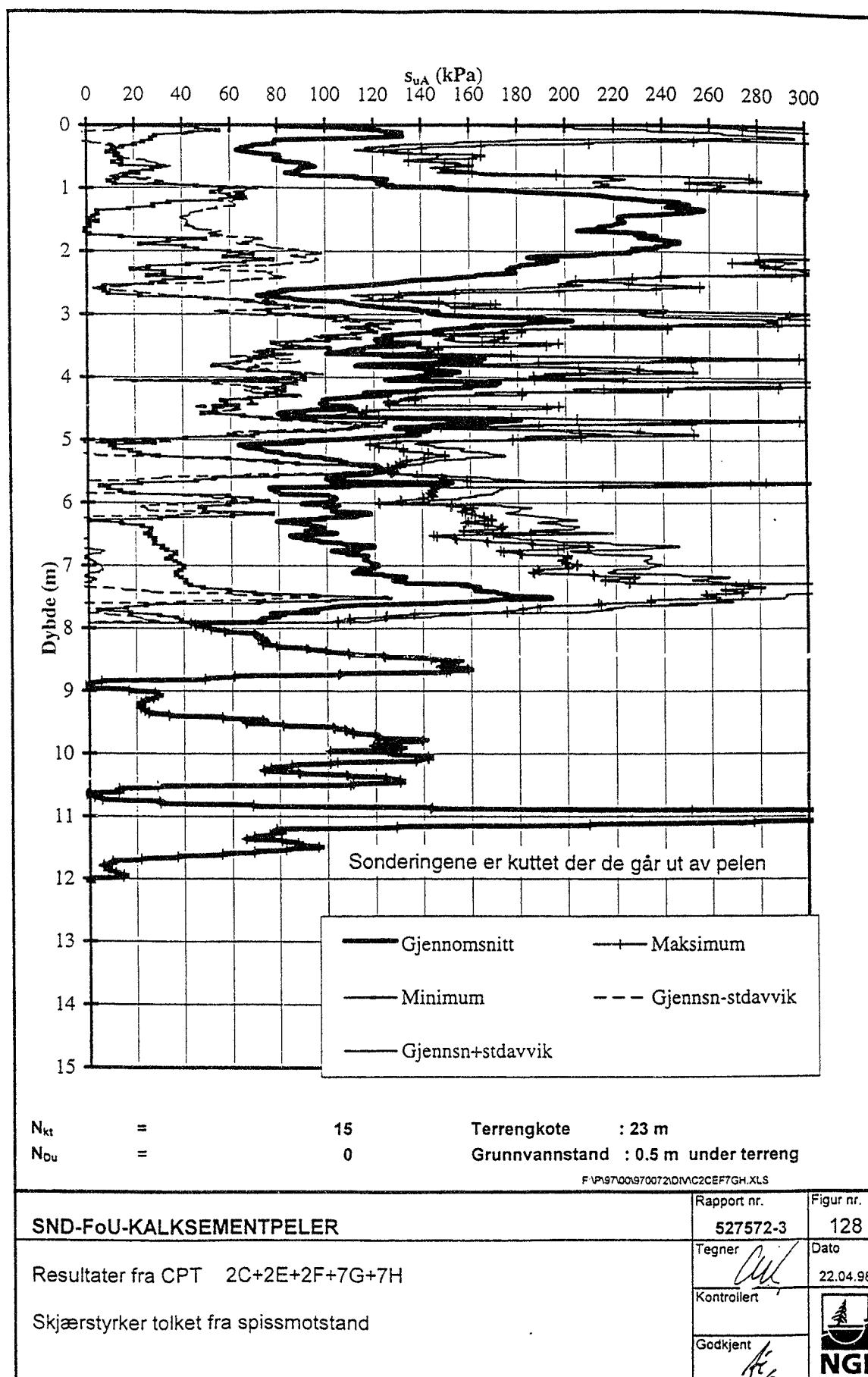
Vingtjocklek	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Vingbredd	$\pm 10 \text{ mm}$
Avstånd spets - vinginfästning	$\pm 20 \text{ mm}$
Stångdiameter	$\pm 0,5 \text{ mm}$



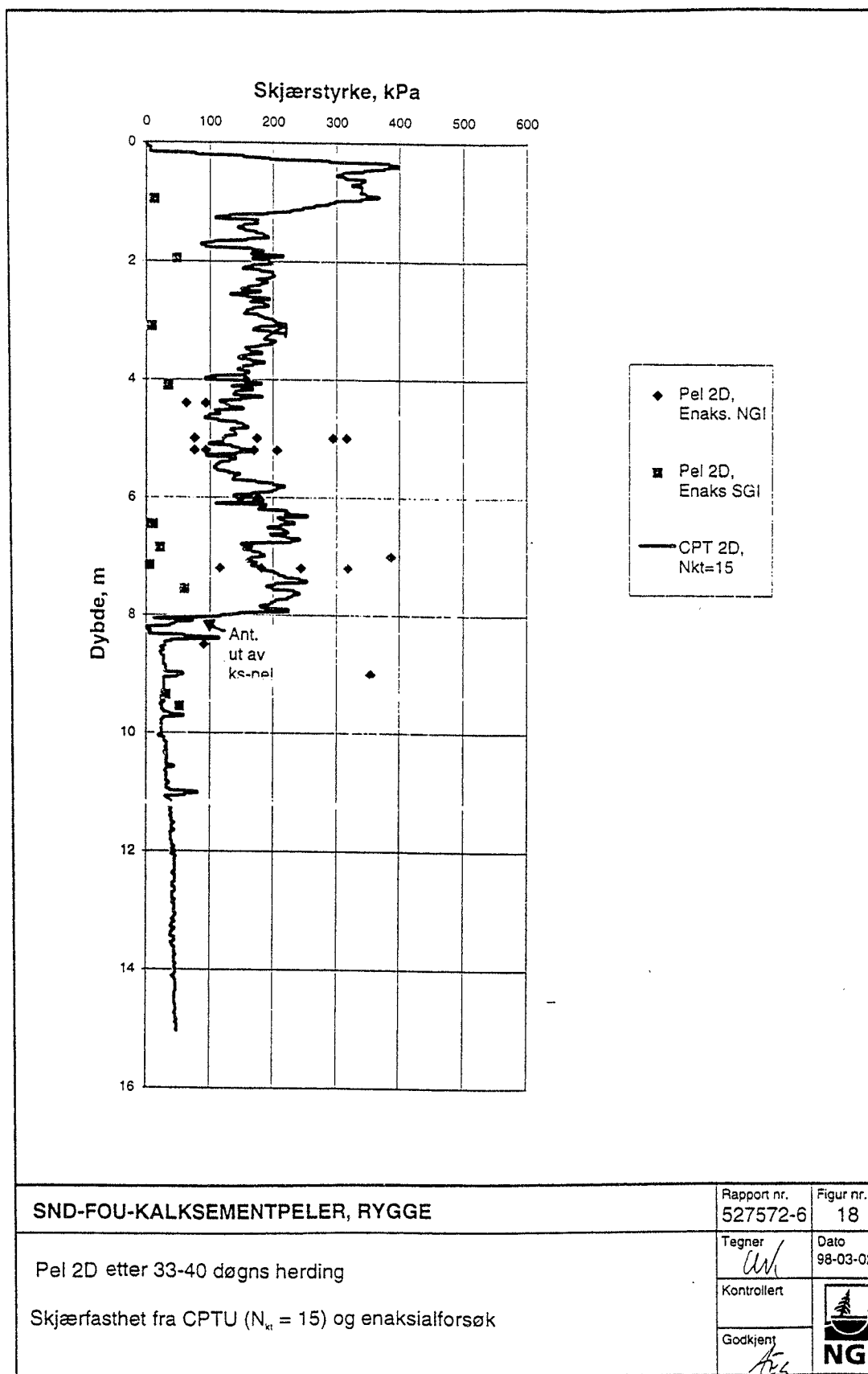
Figur 19. Prinsippskisse av utforming av FOPS. (SGF 4:95)



Figur 20. Sammenligning av skjærstyrkeprofil fra CPT og FOPS. (Fra NGI-rapport nr.527572-6).

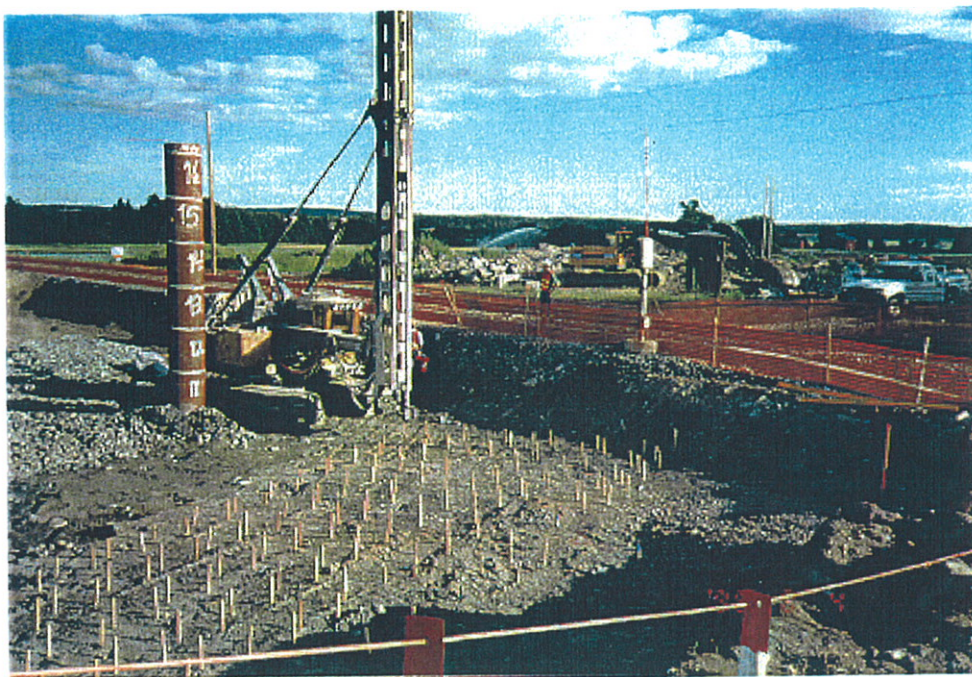


Figur 2f. Tolkede verdier av skjærstyrke basert på CPT fra et utvalg av pæler på Rygge. (Fra NGI-rapport nr.527572-3).



Figur 22.

Sammenligning av skjærfasthet fra enaksiale trykkforsøk på prøver fra hel opptatt pæl (NGI) og prøver tatt opp med kjerneboring (SGI). Skjærfasthet tolket fra CPT er inntegnet. (Fra NGI-rapport nr.527572-6).



DELRAPPORT

«En studie av metode og anvendelse»

Fase 1 i FOU-prosjektet

«GRUNNFORSTERKNING MED KALKSEMENTPÆLER»

en OFU-kontrakt mellom



og



Jernbaneverket
Utbygging

støttet av



SND

FORORD

Jernbaneverket Utbygging og Veidekke ASA har inngått et forpliktende FoU-samarbeid om videreutvikling av kalk/semment-pælmetoden som grunnforsterkning. Prosjektet, som støttes av Statens Nærings- og Distriktsutviklingsfond, er delt i 3 faser. Første fase har vektlagt å skaffe til veie en status over teknologi og metodeanvendelse i Norge i dag. Denne status skal danne grunnlag for en prioritering av problemområder og dernest praktiske prøver og forsøk i tråd med dette.

Rapporten er en statusrapport og avslutning av fase 1 i prosjektet.

Drammen 14.07.98

Torbjørn Lund
Jernbaneverket Utbygging

Thomas Kristiansen
Veidekke ASA
Divisjon Anlegg

Kalk/sementpæler som grunnforsterkning
Status for metoden i Norge mai 1998

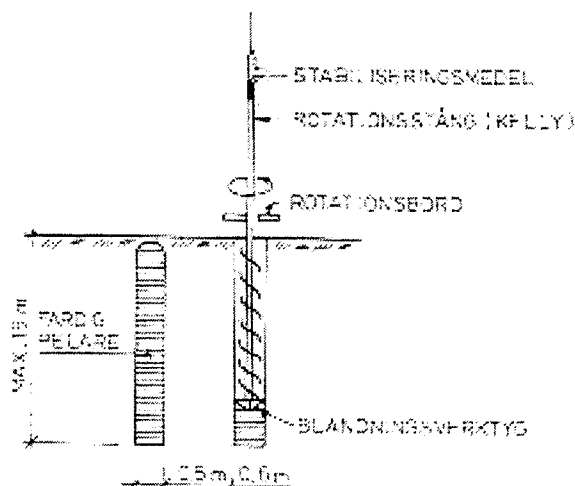
Innholdsfortegnelse	Side nr:
1. Teoretiske prinsipper og problemstillinger	3
1.1 Utvikling av metoden	3
1.2 Jordkjemi	6
1.2.1 Sementens reaksjonsmønster	7
1.2.2 Kalkens reaksjonsmønster	7
1.2.3 Vanninnhold	7
1.3 Eksterne påvirkningsfaktorer	9
1.3.1 Temperatur	9
1.3.2 Organiske stoffer	11
1.3.3 Sulfider	11
1.4 Grunnundersøkelser	11
1.5 Materialanvendelse - karakteristika/spesifikasjoner/behandling	13
1.5.1 Kalk	13
1.5.2 Sement	14
1.5.3 Spørsmål knyttet til materialbruken	14
1.6 Beregningsmodeller / Dimensjonering	16
2. Installasjonsutstyr	18
2.1 Maskinelt utstyr	18
2.2 Installasjonsparametre	21
2.2.1 Innblandingsverktøy	21
2.2.2 Rotasjonshastighet	23
2.2.3 Stigehastighet	23

2.2.4 Innblandingsmengde	24
2.2.5 Innblandingsarbeid/homogenitet	24
2.2.6 Blindboring	24
2.2.7 Loddavvik	24
3. Anvendelsesområder	26
3.1 Setningsreduksjon	27
3.2 Skråningsstabilitet	28
3.3 Midlertidige avstivninger	29
3.4 Andre områder	30
4. Kvalitetskontroll og dokumentasjon	31
4.1 Prøvemeter	31
4.1.1 KPS - kalkpælsonden	31
4.1.2 FOPS - omvendt kalkpælsonde	32
4.1.3 CPT - cone penetration testing	33
4.1.4 Kjerneboring	35
4.1.5 Utgraving	36
4.1.6 Opptaking av komplette pæler	37
4.1.7 Prøvetaking	39
4.2 Dokumentasjon	39
5. FoU	41
5.1 Tidligere forskning	41
5.2 Svensk Djupstabilisering	41
5.3 Eurosoilstab	42
6. Figurliste	43
7. Referanser	44

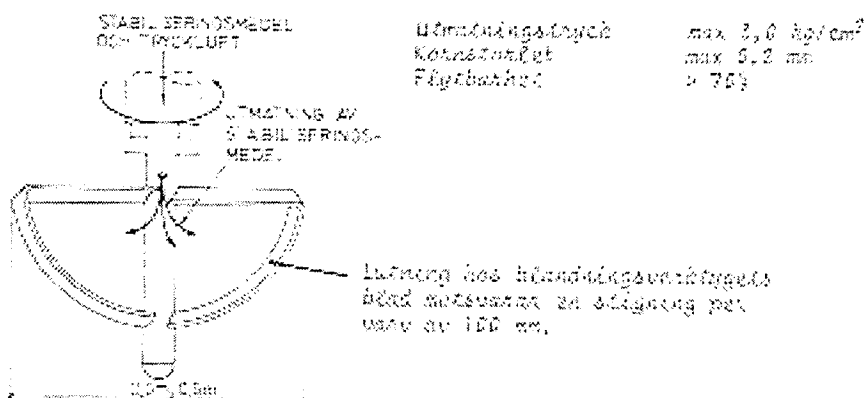
1. Teoretiske prinsipper og problemstillinger

1.1 Utvikling av metoden

Mange leiretyper og leirholdige jordarter kan ha så lav skjærstyrke og bæreevne at de ikke egner seg som fundament for bygg- og anleggstekniske konstruksjoner. Bruk av masseutskifting, lettfylling og prekonsolidering har vært utbredte metoder for å tilrettelegge bygging på leire.



a) Prinsippfigut.

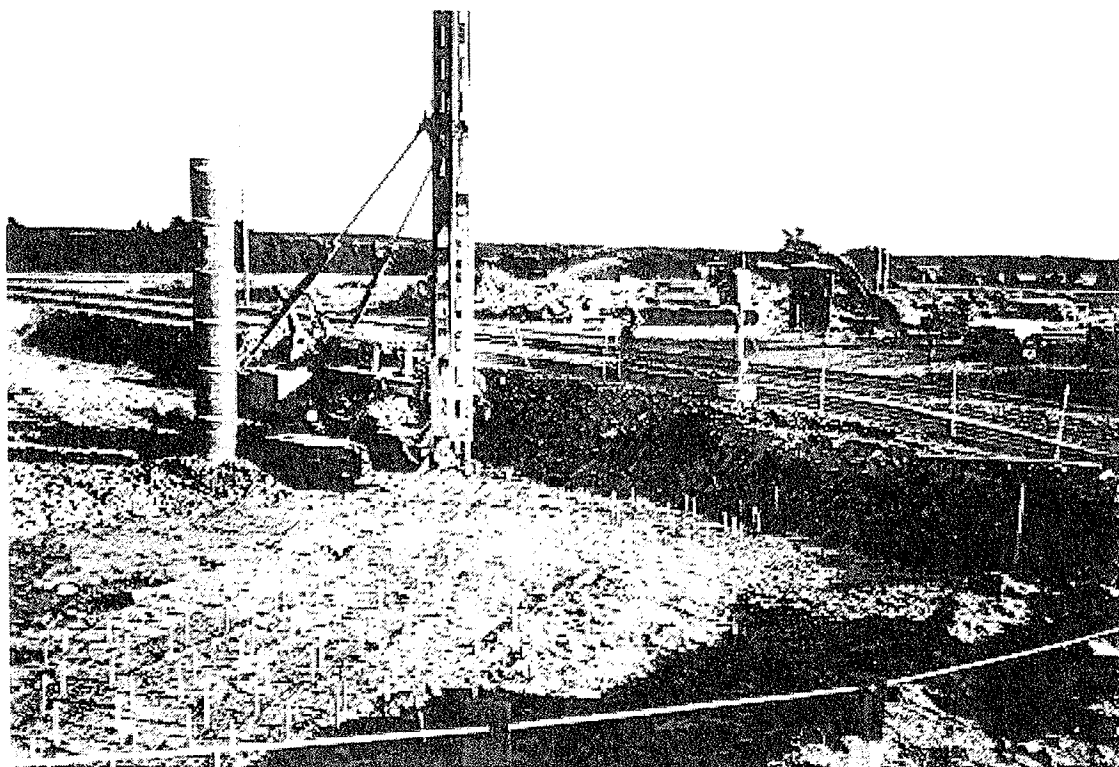


b) Blandingsværet.

Figur 13. Tellerkning av palata.

På slutten av 60-tallet ble det av sivilingeniør Kjeld Paus utviklet en metode for dypstabilisering av bløte jordarter ved bruk av kalk. Gjennom innblanding og omrøring dannes en jordforsterket søyle. I de senere år har man gått gradvis over fra rene kalkpæler til pæler med blanding av kalk og sement. På denne måten ønsker man å kombinere kalkens plastiske egenskaper med sementens evne til å ta trykkbelastning. Erfaring tilsier at styrkeforbedringen etter innblanding av kalksement er omtrent 10 til 50 ganger opprinnelig styrke. For typiske norske forhold vil det si at en kan forvente en styrke på 100 til 400 kPa i pælen etter innblanding og herding.

Dagens aktuelle beregningsmodeller tar ikke høyde for å dimensjonere med høyere skjærstyrke enn 150 kN/m^2 . Svenske forskningsrapporter og håndbøker legger til grunn at maksimal dimensjonerende skjærstyrke i ferdig pæl ikke bør overskride denne begrensningen. Dette har også sammenheng med at man i Sverige i første rekke har benyttet metoden til setningsreduserende tiltak. Man er legger da opp til et samvirke mellom pæl og jord. Økt styrke betyr økt stivhet, og dermed redusert samvirke.



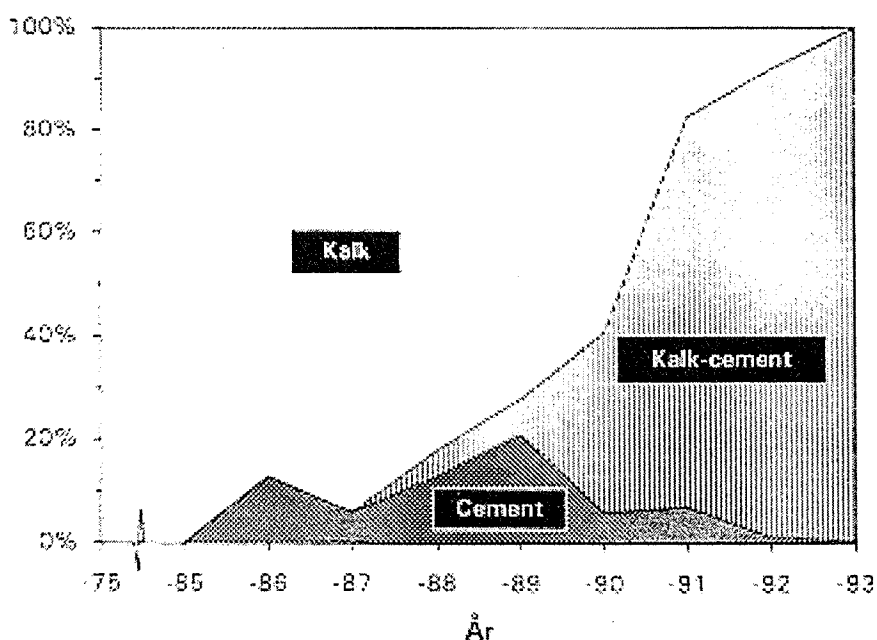
Figur 2 - kalk/sement-pæler i massiv formasjon - foto fra trasé for ny Rv 116 ved Solberghøgda - dobbeltsporparsellen Såstad-Haug

I Norge virker det som om kalk/sement-pælmetoden oppfattes mer som en form for selvstendig konstruksjon framfor det å være en jordforbedrings-prosess. I langt større grad enn i Sverige benyttes metoden her til forbedring av skjærings- og fyllingsstabilitet. Pæler har blitt installert i sammenhengende skive- og blokkformasjoner med høyere dimensjoneringsfasthet enn 150 kPa. Grunnlaget for denne utviklingen synes noe uklart, men det henvises til at norske leirer generelt kan utvikle høyere fastheter enn svenske. Lavt vanninnhold gir høyere fasthet enn høyt vanninnhold, og norske leirer har som regel lavere vanninnhold enn svenske leirer. Sensitive leirer har også høy fasthetsøkning. Slike leirtyper er utbredt i Norge.

Sveriges Geotekniske Institutt hevder på sin side bl.a. at dimensjoneringsmodellene som brukes må utvikles ytterligere når k/s-pæler brukes til forsterkning av høye fyllinger, skjæringer, skråninger samt ved fundamentering av broer og hus. Andre sikkerhetsbetraktninger er nødvendige når pælene brukes til disse formålene. Etter SGIs oppfatning bør det f.eks. stilles strengere krav til avvik fra dimensjonert fasthet. Videre påpeker de et behov for å forbedre de grunnleggende kunnskaper om k/s-pælenes virkelige egenskaper og hvordan pælene fungerer sammen med omkringliggende jord. Statens vegvesens håndbok 188 angir at man ved skråningstabilisering ikke kan anta fullt samvirke mellom pæler og omkringliggende jord. Lastopptaket sikres ved å sette pælene i skiver eller blokker.

Det er en kjensgjerning at samvirket mellom pæl og jord reduseres med økende pælstyrke, fordi en sterkere pæl nødvendigvis er mindre fleksibel. Man vil også oppleve et samvirke med stive pæler, men da med større differanse i deformasjon mellom jord og pæl.

Håndbok 188 "Veg på bløt grunn" utgitt av Vegdirektoratet sier eksplisitt at formelgrunnlaget for beregningene kun gjelder for rene kalkpæler, i det man henviser til usikkerhetene knyttet til samvirke mellom pæler og omkringliggende jord.



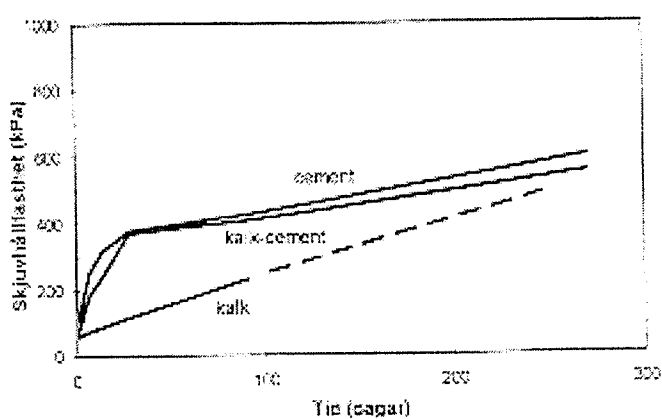
Figur 1.3. Fordelingen av anvendt typ av stabiliseringsmedel 1975-93.

Mange aktuelle spørsmål har sammenheng med overgangen fra halvharde kalkpæler til faste kalk/semment-pæler. Denne overgangen har flere årsaker. Historisk sett ble det i starten utelukkende brukt kalk som stabiliseringsmiddel, men med varierende resultat for forskjellige leiretyper. Etter hvert ble det gjort forsøk med andre tilsetningsmaterialer, så som aluminimhydroksid og kaliumklorid (NGI, 1982). SGI gjorde forsøk med gips og flygeaske tidlig på 80-tallet for å tilpasse metoden til bruk i organiske jorder. SGIs Rapp 30 konkluderer med at begge tilsetningsstoffene kan bidra til å utvide bruksområdene. Disse stoffene har imidlertid ikke blitt tatt i bruk i særlig omfang.

Midt på 80-tallet gjorde man så forsøk med rene sementpæler med både standard og rapid sement ved NGI og SGI. Disse forsøkene viste at en blanding av kalk og sement ofte ga et bra resultat. Man oppnår større fasthetstilvekst pr enhet innblandingsmengde enn ved ren kalk. Dessuten gjør sementen at effekten kan bli betydelig i humusholdig leire, og i leire med sjikt/lommer av silt og sand.

1.2 Jordkjemi

Herdeprosessen som oppstår når kalk og sement tilsettes leire kan til dels sammenliknes med betongherding. Primært er man avhengig av at leiren som skal stabiliseres har et visst vanninnhold, w , som kan reagere med tilsetningsmaterialene. For å sikre fullstendige reaksjoner bør vanninnholdet minst være på 30 %. (Se punkt 1.2.3)



Figur 2. Jämförelse av hållfasthetsutveckling med tiden efter inblandning för kalk-, kalk-cement- och cementstabiliserad jord. Medelutveckling för samtliga provade jordar utom gyttja och torv.

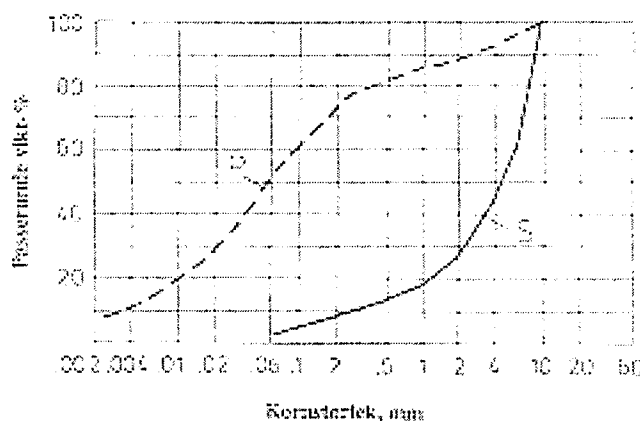
Ulesket kalk og sement blandes i ønsket forhold før materialet tilføres leiren. Her reagerer kalken og sementen med vannet i leira, og kalken leskes. En hydratiseringsprosess begynner og fører til at vannet binder seg til kalk- og sementpartiklene. Dette er en eksoterm prosess, og deler av vanninnholdet fordamper som følge av varmeutviklingen. På denne måten oppstår første trinn i fasthetstilveksten. Leirens skjærfasthet øker ytterligere ved at det foregår et ionebytte i blandingen av leira og kalk/sementen. Dette ionebyttet begunstiges av høy pH-verdi og fører til at leirens konsistensgrenser forsterkes gjennom en indre tørking. Det dannes også vannfaste konglomerat ved at korngraderingen endres. Hele denne delen av herdeprosessen er gjerne avsluttet innen 0.5 - 2 timer etter installering.

De fleste jordarter inneholder mineraler med puzzolane egenskaper. Det innebærer at de kan reagere med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og danne reaksjonsprodukter som gir økt fasthet. Mengden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ påvirker hvor mye reaksjonsprodukter som dannes og således også styrken på pælene som produseres.

1.2.1 Sementens reaksjonsmønster

Til kalk/sement-pæler nyttes normalt standard portland-sement. Den kjemiske sammensetningen varierer, men typisk vil en slik seiment inneholde tri- og dikalsiumsilikater (C_3S, C_2S), trikalsiumaluminat (C_3A), trikalsiumaluminatferrit (C_4AF), natrium- og kalsiumsulfater samt gips. Når sementen kommer i kontakt med vann starter en rekke kjemiske reaksjoner. Det viktigste sluttproduktet av disse reaksjonene er kalsiumsilikathydrat ($C_3S_2 \cdot 3H_2O$). CSH-en dannes på overflaten av sementkornene og fyller ut hulrommene mellom kornene. Porøsiteten minsker, kornene bindes sammen og skjærstyrken øker.

Disse prosessene er eksoterme, og reaksjonshastigheten følger varme-utviklingen. Umiddelbart etter innblanding avgis varme når lettløselige salter løses opp. Det tar imidlertid noen timer før reaksjonene kommer ordentlig i gang, og etter ca. 10 timer oppnås maksimal reaksjonshastighet. Deretter avtar varmeutviklingen raskt. Reaksjonshastigheten påvirkes av sementens finmalningsgrad, vanninnholdet i jorda og jordas temperatur. Normalt vil ca. 50 % av sementen ha reagert innen 3 dager og opp mot 90 % innen 3 måneder.



Figur 4.6. Kornkurva före (P) och efter (S) kalkstabilisering (Capraz 1983).

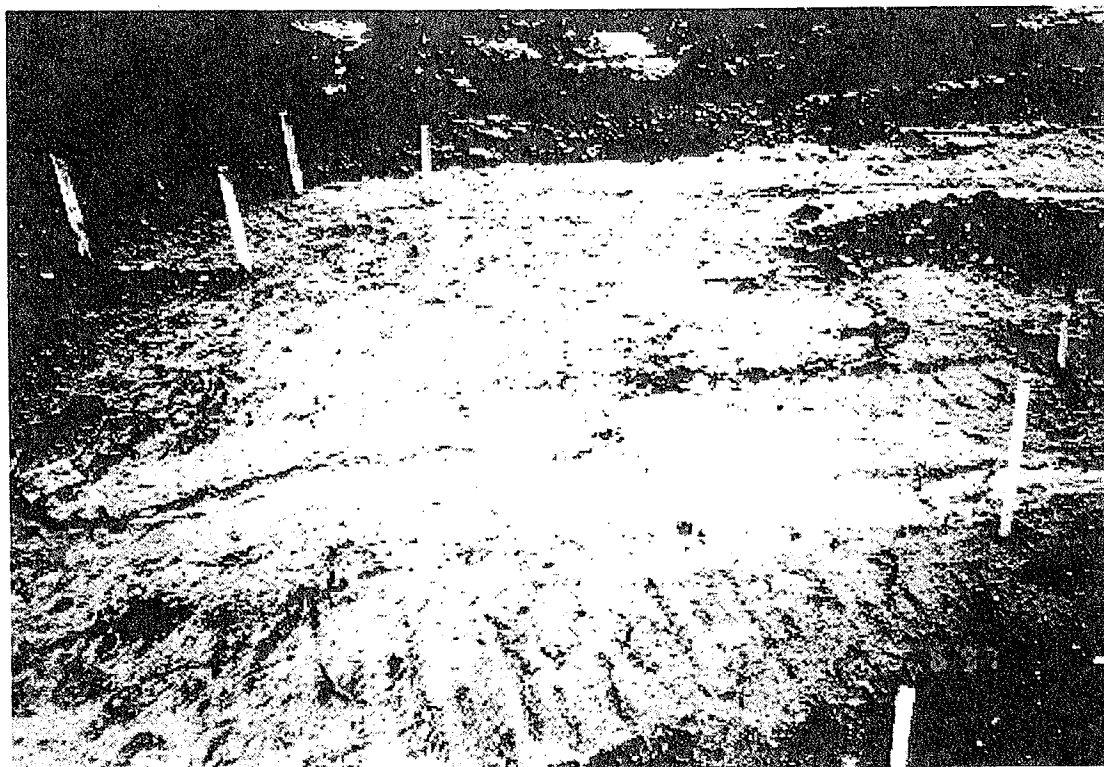
1.2.2 Kalkens reaksjonsmønster

Ulesket kalk produseres ved brenning av kalkstein ved ca. 900 °C og inneholder ca. 95 % CaO . Kalken reagerer med vann under sterk varmeutvikling og danner $Ca(OH)_2$ - ($CaO + H_2O = Ca(OH)_2$). Vannet blir således mettet med kalsiumhydroksid og pH-verdien stiger til ca. 12.5. Reaksjonen er umiddelbar og når sitt maksimum etter ca. 5 minutter. Reaksjonshastigheten påvirkes av kalkens kornstørrelse og brenningen.

1.2.3 Vanninnhold

Både kalken og sementen er avhengig av vann for at de kjemiske reaksjonene som gir styrketilvekst skal kunne foregå. Generelt angis at økende vanninnhold reduserer styrketilveksten. Dette fenomenet kan i stor grad sammenliknes med v/c-forholdet i betong, hvor lavt v/c-tall er nødvendig for å oppnå høy fasthet. Dette underbygges av fagmiljøene som angir at metoden i første rekke kan brukes innen $w = 30 - 80 \%$, og at fasthetsutviklingen er betydelig større ved $w = 30 \%$ enn ved $w = 80 \%$ forutsatt samme innblandingsmengde. Man vil i mange tilfeller oppleve at lagdelingen i jorda gir store variasjoner i w med dybden. Så lenge disse lagene ikke er bredere enn 3 dm vil innblandingsverktøyet langt på veg jevne ut disse forskjellene. Det ligger i dette at disse vannførende lagene kan gi svakhetssoner i pælene, men i hvilken grad dette er tilfelle er ikke dokumentert.

Det er planlagt å gjennomføre stabiliseringsforsøk med slurryblanding (vann/sement) for videre å undersøke betydningen av vanninnhold og vann-tilsetning. Resultatene foreligger enda ikke.

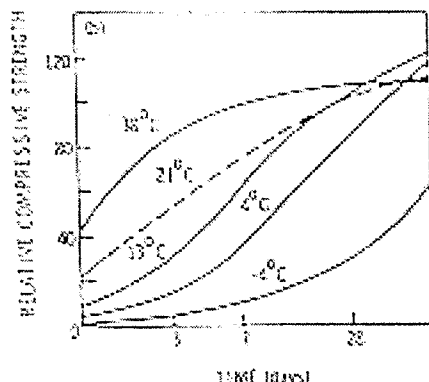


Figur 6 - tilførsel av stabiliseringsmateriale under trykk presser opp vann fra vannførende lag over installasjonsnivå.

1.3 Eksterne påvirkningsfaktorer

1.3.1 Temperatur

Jordtemperaturen ligger i Norge på rundt 8 °C. Ved så lav temperatur reagerer sementen relativt langsomt og kalkens reaksjoner med jordpartiklene er enda langsommere. Lav temperatur gir derfor lav tidligfasthet, men på sikt blir sluttfasthetene like gode som ved installasjon i høyere temperaturer.

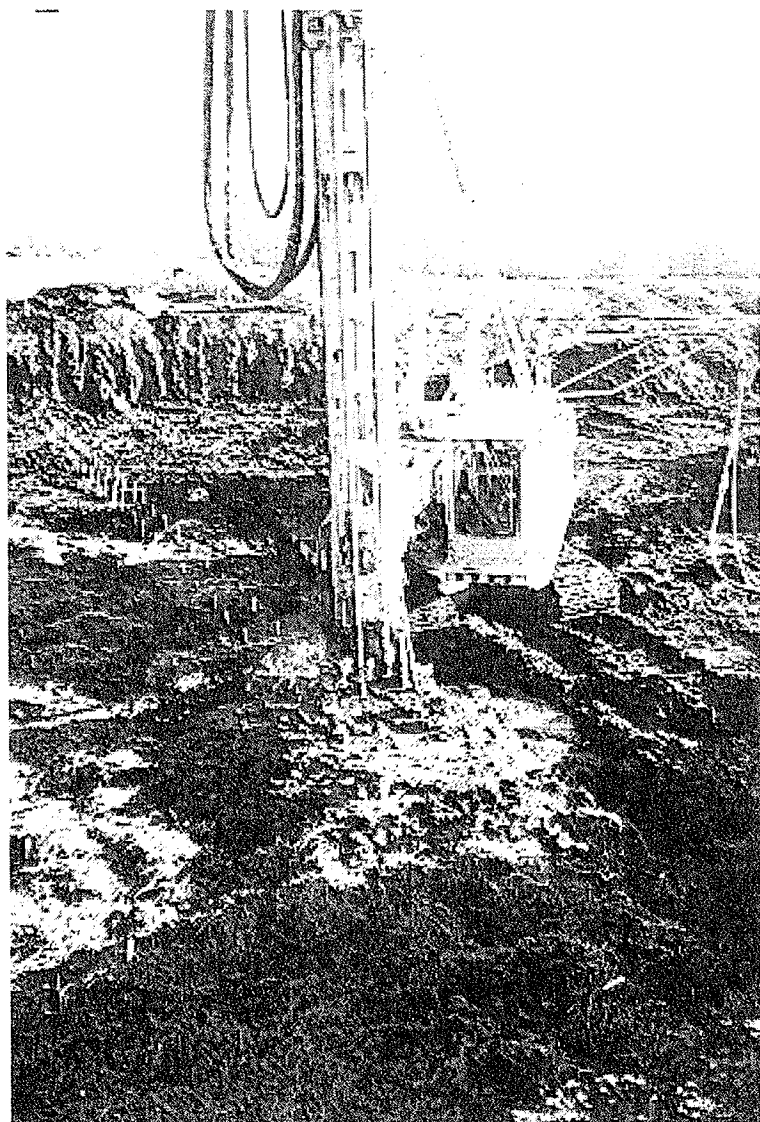


Figur 4.7. Hållfasthetsutveckling för cement vid olika temperatur (Barnes 1963).

Varmeutviklingen som skjer straks etter innblanding fører til at den omkringliggende jordtemperaturen stiger. Sementreaksjonene gir en temperaturøkning på 5 - 10 °C mens varmen som utvikles når kalken leskes kan øke jordtemperaturen med 40 - 50 °C. Dersom kalken er særlig finmalt og reaktiv kan man få temperaturøkninger på opp mot 100 °C.

Den høye temperaturen gjør at vannet i bakken fordamper og vanninnholdet blir redusert. Varmen fra leskeprosessen i kalken akselererer puzzolanreaksjonene i sementen, og så lenge temperaturen holder seg høy danner sementen store mengder reaksjonsprodukter som bidrar til tidlig fasthet.

Forøvrig ansees temperaturforholdene i Norge og Sverige å være relativt like. Temperaturfaktoren i beregningsmodellene krever således ikke særskilt tilpassing til norske forhold.



Figur 8 - isolering med halm ved vinterproduksjon

Målinger av luft- og jordtemperatur inngår ikke i prøveseriene som gjennomføres i forkant av prosjekter. Lav temperatur vil redusere hastigheten på de jordkjemiske prosessene. Men installasjon om vinteren med dertil lave temperaturer fører i Veidekkes erfaring ikke til innføring av spesielle tiltak, annet enn å hindre teledannelse. Dette skyldes at jordtemperaturen under telesonen er stabil året rundt. Blindboringssonen er som regel større enn telesonen, og dermed er temperatursvingninger i jorda ikke noe problem. Tykkere tele enn 20 - 30 cm skaper derimot problemer for installasjonsutstyret. Derfor er det nødvendig med tiltak for å hindre teledannelse dersom man vil produsere om vinteren.

1.3.2 Organiske stoffer

Noen organiske stoffer kan forsinke puzzolan- og sementreaksjonene. Mest vanlig er stoffer med syregrupper, f. eks. humussyrer. Humus reagerer med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og feller ut partikler som er vanskelig løselige. Disse partiklene kan føre til at pH-verdien faller og kalkreaksjonene forsinkes eller stanser opp. Det er ikke fastslått at undersøkelse av humusinnhold er et konsekvent tiltak i forbindelse med k/s-installering.

Sement har bedre reaksjonsegenskaper i jordarter med gytje og torv enn det kalk har. Dette skyldes at kalken trenger leirpartikler som kan reagere med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og danne bindende mineraler. I jord med høy andel av organisk materiale er det lite leirpartikler, og det dannes derfor kun små mengder reaksjonsprodukter. Sementen kan danne bindende mineraler uten samvirke med leirpartiklene, noe som medfører at man kan oppleve fasthetsøkninger også i jorder med organisk materiale. Slik sett er det naturlig å bruke en høyere andel sement i organiske jordarter.

1.3.3 Sulfider

Sulfidholdige jorder vil ofte ha en langsommere fasthetstilvekst enn andre jorder (SGI rapport No 48). Sulfider kan opptre både i uorganiske og organiske sammensetninger, og det er særlig organisk sulfid som har retarderende effekt på sement- og puzzolanreaksjonene. Derfor vil dette påvirke herdetider i forhold til utgraving og bearbeiding. På sikt oppnår man god fasthet også i leirer med sulfid, men tidligfastheten er lav. Undersøkelser av sulfidinnhold gjennomføres ikke konsekvent.

Etter det NGI kjenner til, er det ikke gjennomført tester i Norge for å vurdere eventuelle konsekvenser av sulfider i leiren. I den litteratur som har vært tilgjengelig sies det ingenting om et eventuelt maksimalinnhold av sulfat som kan tolereres i forhold til metoden. Generelt sies dog at et sulfatinnhold på 1 - 3 % ansees som høyt, mens mindre enn 1 % ansees som lavt. (SGI rapport no 48) I forbindelse prøvene som ble innhentet på Såstad-Haug høsten 1997 vil SINTEF/NTNU gjennomføre forsøk med bl.a. sulfidvariasjoner. Resultatene derfra er ventet i løpet av sommeren 1998.

1.4 Grunnundersøkelser

Ved tilfeller hvor resultatet av kalk/sement-stabilisering ikke har oppnådd forventet kvalitet har omfang og utførelse av grunnundersøkelser ofte vært en kilde til debatt. Med henvisning til tidligere kapitler om jordkjemi og kjemisk reaksjonsmønster er det åpenbart at kalk/sement-installasjoner krever omfattende grunnundersøkelser. Aktuelle jordparametre er udrenert skjærstyrke i uforstyrret og omrørt tilstand (sensitivitet), vanninnhold, korngradering (silt/sand/stein), permeabilitet, organisk innhold osv.

Erfaring så langt tilsier at man i mange entrepriser kommer ut for geotekniske forhold som ikke er beskrevet i de geotekniske undersøkelser som foreligger på anbuds- og prosjekteringsstadiet. Dette kan skyldes flere forhold. Grunnundersøkelsene kan være gjennomført uten å være rettet mot K/S-installasjon spesielt. Det må vurderes om dekningsgraden for prøvetakingen er god nok, og også om de undersøkelsesmetodene som brukes i dag er egnet for å beskrive forholdene ved bruk av kalk/sement-installering.

De geotekniske undersøkelsene skal ikke bare kartlegge de ulike sjiktene i leiren og deres egenskaper og tykkelse. Det er også nødvendig å bestemme topplagets sammensetning, mektighet, fasthet og eventuell forekomst av trerøtter og fyllmasse. Konsolideringsforhold samt poretrykks- og grunnvannsforhold må også avklares.

Kartlegging av fysiske hindre over/under bakken så som kabler, rørledninger og luftstrekk må selvfølgelig også gjøres før produksjonsstart. Det er normalt å innføre en sikkerhetssone mot eksisterende ledninger når k/s-pæler skal installeres. Dersom pælene installeres i tett formasjon eller blokker o.l. må man være oppmerksom på at jordtrykket kan øke sterkt. Gamle støpejerns- og betongrør tåler nesten ikke sidetrykk, og dette må reflekteres i sikkerhetssonen, som kanskje må være opp mot 5 m for å være sikker.

Jordforbedring med kalk/sement påvirkes av svingninger i jordkjemien. Disse svingningene kan opptre svært lokalt, slik at herdeforløp og fasthets-tilvekst kan variere i pæler med tilsynelatende kort senteravstand. I en jernbane- eller vegparsell på flere kilometer kan det være svært vanskelig å fange opp alle lokale variasjoner i jordkjemien.

Installasjonsarbeidet bør derfor følges opp med prøvetaking underveis. Omfanget av disse prøvene varierer fra prosjekt til prosjekt, og blir til tider saldert dersom tidlige resultater er lovende. Denne praksisen frarådes, nettopp fordi lokale variasjoner i jordkjemien vil kunne påvirke fasthetstilveksten i betydelig grad. Dette kan bare avdekkes gjennom prøvetaking. Innblandingmengdene er oftest bestemt på grunnlag av laboratorietester og muligens in-situ-forsøk i mindre skala. Full-skala forsøk med prøveproduksjon av pæler gjennomføres sjelden i Norge. I Sverige er det en utvikling mot at full-skala prøvepæler bruker i økende grad. Dette oppfattes som fordelaktig ikke bare av hensyn til å bestemme pælenes in-situ egenskaper, men også av hensyn til å kunne tilpasse/justere installasjonsteknikken til de aktuelle forholdene.

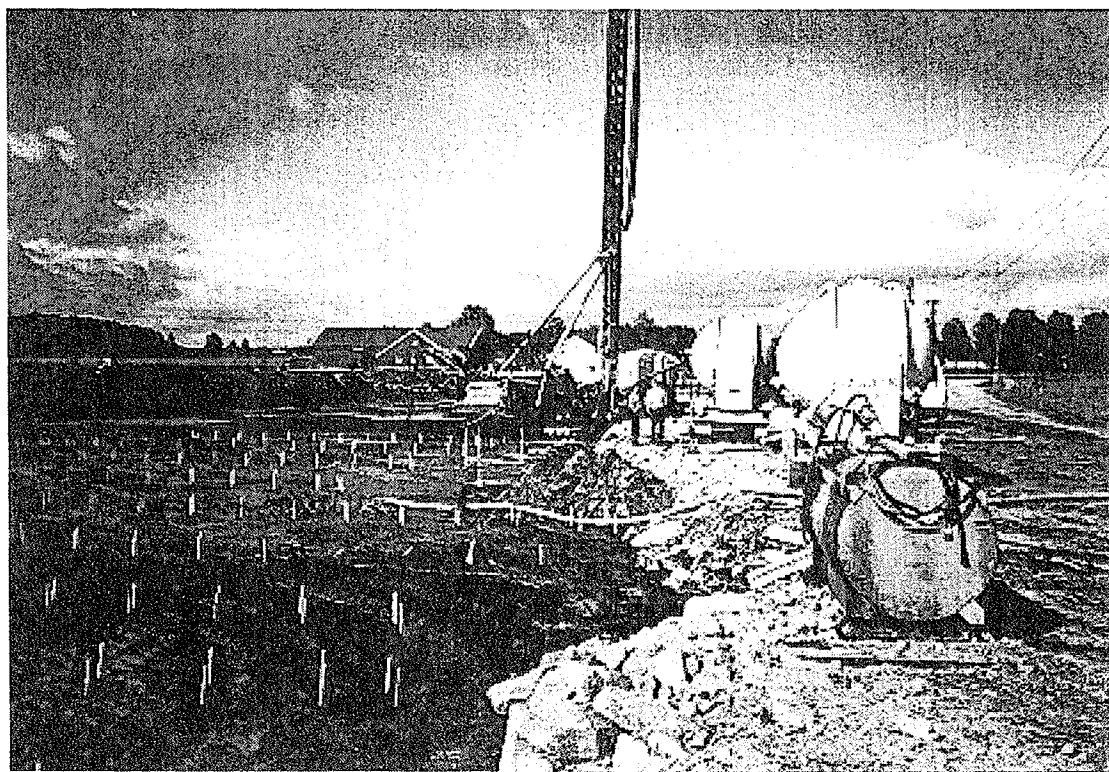
1.5 Materialanvendelse - karakteristika/spesifikasjoner/behandling

1.5.1 Kalk

Kalken som brukes i produksjon av kalk- og kalk/ement-pæler er brent kalk med kornstørrelse på 0-0.2 mm. Det stilles krav til kalkens reaktive evne ved at den må inneholde minimum 80 % aktiv CaO. Det er direkte sammenheng mellom mengde aktiv CaO og mengden av reaksjonsprodukter. Høyt CaO-innhold gir større mengder bindemiddel. Bindemiddelet holder på materialpartiklene, fyller ut hulrom og gir et tettere materiale. Dette gir en sammenheng også mellom CaO-innhold og materialets potensielle fasthet.

Det stilles også krav til kalkens flytbarhet, som er et mål på hvor godt pulveret flyter gjennom rør og munnstykker. Flytbarheten bestemmes ved at man måler hvor stor andel av stabiliseringsmiddelet som passerer en sikt (maskevidde 0.5 mm) etter et bestemt antall rystelser (von Imse, 1972). Flytbarheten påvirker også kalkens evne til å blande seg med sementen. Normalt kreves at kalkens flytbarhet skal være > 70. Til sammenlikning har vann flytbarhet på 100. Den brente kalken er ulesket og dermed sterkt basisk. Det brukes normalt utlufting i vannbad ved tanking. Dette reduserer støvplagen og lesker kalkstøvet som oppstår under losseprosessen, slik at etsefaren reduseres.

Alder er et viktig kvalitetsparameter. Man har eksempler på at gammel kalk (lagret i flere måneder - over vinter etc) ikke har fungert som innblandingsmateriale. Dette kan skyldes kondens og dermed fukt i kalken. Den blir delvis lesket, taper reaktivitet og endrer flytbarhetsegenskaper.



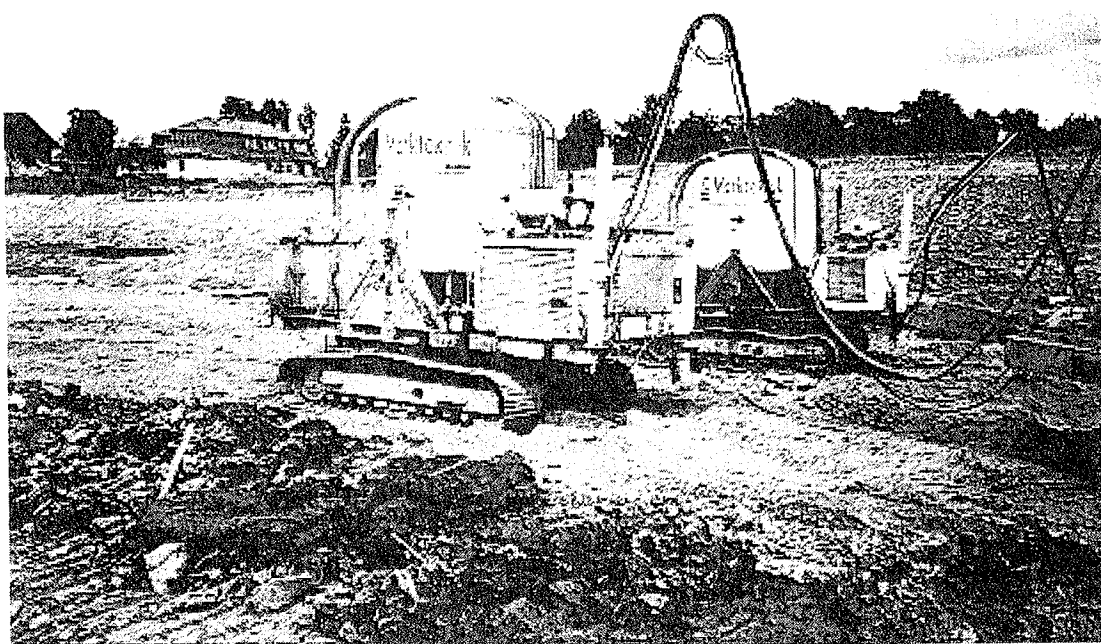
Figur 9 - tanking av stabiliseringsmateriale - ny trasé for Fv 335 Bjølsen - dobbeltsporparsellen Såstad-Haug

1.5.2 Sement

Det har til nå hovedsakelig vært brukt Standard Portland sement til kalk/sement-stabilisering av jord. Noe Rapid Sement har blitt brukt i prøvesammenheng, men har ikke blitt brukt i regulær produksjon. Kornstørrelsen på SP sementen er ca. 0 - 0.2 mm. Sement har generelt lavere flytbarhet enn kalk. Det settes gjerne krav til at sementens flytbarhet skal være minst 40.

1.5.3 Spørsmål knyttet til materialbruken

I de seneste 3-4 år har man nesten utelukkende benyttet importert kalk til produksjon av kalk/sement-pæler. Hovedårsakene til dette har vært at kalkprisen har vært meget lav grunnet konkurranse fra Polen. Svensk kalk har dessuten hatt bedre flytegenskaper og vært lettere tilgjengelig i forhold til transportbetingelser. Den norske kalken som brytes er meget hvit og således meget godt egnet for papirproduksjon. Norsk kalk er eldre enn tilsvarende utenlandsk vare og har som følge av geologiske prosesser en annen krystallstruktur. Enkelte problemepisoder med flytbarheten i norsk kalk har skaffet den norskproduserte kalken et dårlig rykte. Leverandøren har gjennomført prøver av kalken uten å kunne fastslå hva problemene skyldtes. Produsenten mener at kalken skal tilfredsstillе alle krav, også til flytbarhet. Derfor lurar man på om problemene med dårlig flytbarhet er relatert til transport og behandling on-site. Positiv tilbakemelding fra andre brukere (silobrukere, transportører) gjør at Franzefoss mener at de problemene bl.a. Hercules Grundlegging har erfart med bruk av norsk kalk skyldes tilfeldigheter. I Sverige stilles krav til flytbarhet fra byggherre,- dette gjøres nå i økende grad også i Norge. Bakgrunnen for kravet er at flytegenskapene påvirker evnen til å sikre innblanding av materialene.



Figur 10 - materialtank med én tank for kalk og sement - LC Markteknik AB

Levering av norsk kalk til det norske innenlandsmarkedet har nå blitt opp-prioritert av Franzefoss Bruk / Verdalskalk, og Verdalskalk produserer nå brentkalk til K/S-pæl-markedet. Brentkalken blir tilsatt flytemiddel i likhet med den svenske kalken, og Franzefoss opplyser at den norske kalken nå oppfyller alle oppsatte krav til kalkpæl-kalk.

Et annet element har vært at enkelte kalk/sement-pæleentreprenører bruker utstyr hvor kalken og sementen blandes sammen *før* materialet pumpes ned i bakken. Det bidrar til at kalkens egenskaper alene ikke blir like avgjørende for resultatet. De entreprenører som bruker separate materialtanker med ditto separate selvmatere er langt mer sårbare overfor variasjoner i flytbarheten. Ved bruk av separate tanker er operatørene i bedre stand til å styre blandingsforholdet mellom kalk og sement. På grunn av forskjellige flyteegenskaper i kalk og sement er det ugunstig å blande materialene på forhånd. Når materialblandingen skal forflyttes ved hjelp av trykkluft vil forskjellen i flyteegenskaper kunne føre til separasjon. Dette har men ingen kontroll med dersom materialene blandes på forhånd. Det arbeides nå med systemer som gjør at kalken og sementen ikke blandes før ved innblandingsverktøyet nede i bakken, dvs. at materialene føres i separate slanger/rør ned gjennom borstangen. Dette bør gi økt kontroll med blandingsforholdene.

Det stilles identiske kvalitetskrav til maskiner med 1 eller 2 tanker. De nyeste maskinene som er produsert har alle doble tanker og separate selvmatere.



Figur 11 - levering av kalk - ny trasé for Fv 335 Bjølsen - dobbeltsporparsellen Såstad - Haug

Bruk av svensk kalk gir likevel ingen garantier. Ved Såstad-Haug hadde man gjentatte problemer med flyegenskapene. Dette får omfattende konsekvenser for produksjonen, i og med lang transportveg og Just-in-time leveranser. Undersøkelser så langt tyder på at problemene med den svenske kalken skyldes kondens. I sommersesongen er det store temperaturforskjeller mellom natt og dag, noe som kan medføre kondens under transport og påfølgende lagring. Denne kondens påvirker flytbarheten, og skaper dermed store problemer for produksjonen fordi det blir svært vanskelig å styre materialutmatingen.

Hvorvidt man velger å bruke norsk eller svensk kalk er også et logistikk-messig spørsmål. Franzefoss, f.eks., har ingen kalkbrudd i Sør-Norge. Derimot leverer de fra sitt brudd i Hylla i Trøndelag kalk til prosjekter i Nord-Sverige. På den måten fungerer et vekselbruk med utgangspunkt i transportavstander og tilgjengelighet.

Forøvrig er materialleveransene gjenstand for nitide kontroller. Hver uke blir kalken kontrollert av leverandøren, og mengde aktiv CaO og flytbarhet blir målt. Det er verdt å merke seg at kontrollene gjennomført av leverandørene ikke fanget opp problemene on-site på Såstad-Haug i noen av de tilfellene som oppsto. Ytterligere prøver som ble foretatt i etterkant kunne heller ikke identifisere årsaken til problemene.

1.6 Beregningsmodeller / Dimensjonering

Dagens beregningsmodeller for dimensjonering av kalk/ement-pæler er av svensk opprinnelse. Det var i sin tid professor Bengt Broms som utarbeidet beregningsmodeller for rene kalkpæler på oppdrag fra Kjeld Paus. Kalkpæler er smidige, og har således et godt samvirke med den omkringliggende jord. Samvirke betyr at kalk/ement-pælene og leiren omkring får samme kompresjon og skjærdeformasjon ved belastning. Ved innblanding av sement blir pælene stivere, og evnen til samvirke reduseres. I Svenska Geotekniske Foreningens rapport 4:95 (Veiledning for prosjektering, utførelse og kontroll) begrenses maksimal skjærkapasitet i k/s-pælen til 150 kPa. Sveriges geotekniske institutt mener at dagens modeller er mangelfulle i forhold til pæler sterkere enn 150 kPa, og at de ikke fullt ut tar hensyn til sementens effekt på samvirke og smidighet. Professor Broms uttaler at kalk/ement-pælenes primæroppgave bør være setningsreduksjon/-akselerasjon. I en slik funksjon er samvirke og ikke hardhet viktig. Dette gjenspeiler seg i modellene Broms utarbeidet, og han er usikker på i hvilken grad disse kan brukes på harde pæler (+ 150 kPa) hvor man ikke kan påregne fullt samvirke.

Norske fagmiljøer påpeker også et behov for å videreutvikle dagens beregningsmodeller. De sier at med hensyn til dimensjonering av setninger og stabilitet er det tatt utgangspunkt i de svenske beregningsreglene. Men som ellers i geoteknikken gjøres vurderinger/beregninger ut i fra geometri, styrke og samvirke i jordmaterialene. Det innebærer at en også gjør andre vurderinger/ beregninger i tillegg til å bruke regnemodellene. Dette gjøres spesielt der en har høyere pælfasthet enn 150 kPa eller spesielle geometriske forhold. Disse vurderingene gjøres av hvert enkelt fagmiljø i Norge og Sverige i hvert enkelt tilfelle og ikke etter noen felles norm for bransjen. Det er ikke laget noe generelt nytt formelgrunnlag.

Det er i første rekke ved stabilitetsforbedringer, hvor pælene installeres i skiver, rammer og massive blokker, hvor fastheten stiger utover 150 kPa. I denne sammenheng sier man i Norge at med hensyn til stabilitet vil det ut fra geometrihensyn være en vurderingssak om hvor stor dimensjonerende fasthet en kan forutsette i kalksementribbene uten at en opplagt gjør feil. Det

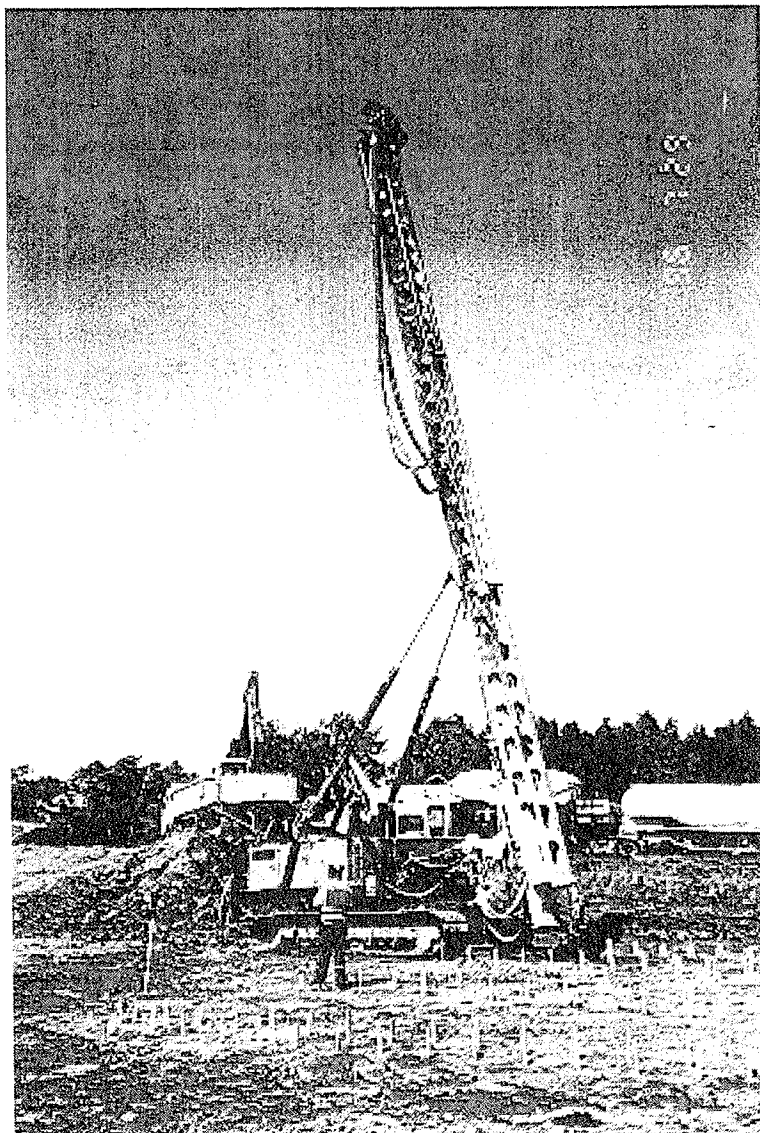
sies videre at det er normalt å regne en gjennomsnittlig skjærstyrke S_u for leire og kalksementribbe. Dette forutsetter at samvirket mellom ribbe og leire er tilstrekkelig. Utover dette bør regnemodellene gjennomgås og det bør lages retningslinjer for hva som bør kontrolleres ved en beregning, samt samles erfaringer slik at man kan kalibrere regnemodellene.

Norske leirer har generelt lavere plastisitet og lavere vanninnhold enn svenske leirer. I praksis innebærer dette det at en lettere oppnår høyere fasthet i norske leirer. Samtidig er det en kulturforskjell mellom Norge og Sverige når det gjelder hvilke metoder som brukes, hvor stor utnyttelsesgrad en har ved bruk av metoden (her k/s-pæler), krav til dokumentasjon o.l. I Norge er det i forbindelse med installasjon av k/s-pæler større krav enn i Sverige til dokumentasjon av at installasjonen er utført som beskrevet. Dette er naturlig i og med at det er det vi pr. i dag har mest kontroll med. Samtidig utnytter man i Norge større fastheter, og da er det særlig viktig at pælen er som forutsatt. I Sverige er de mer konservative med hva de forventer og har andre krav til kontroll og kontrollmetoder. Først og fremst er det forskjeller i forhold til krav til rotasjonshastighet og stigningshastighet. Det er ikke funnet noen direkte årsaker til at norske byggherrer synes å ha strengere krav til utførelse enn svenske byggherrer. En forklaring kan være forståelsen av at bruken av høyere fastheter medfører mindre rom for svingninger i pælkvaliteten.

2. Installasjonsutstyr

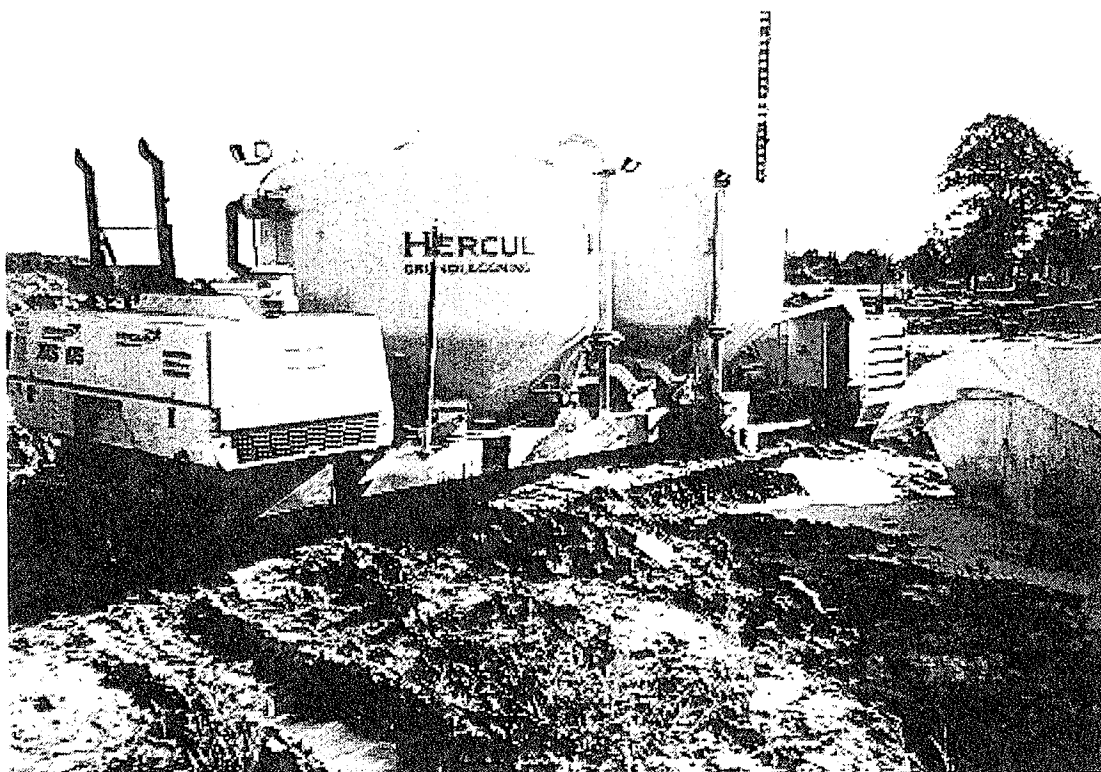
2.1 Maskinelt utstyr

Installasjonsutstyret har to hoveddeler. Med utgangspunkt i en konvensjonell pælmaskin har man konstruert en kalk/sementrigg som ved hjelp av en roterende borstang kan installere k/s-pæler til ned mot 20 m dyp. Borstangen beveger seg langs en avstivet mast, og drives av en dreiemotor. I bunnen av borstangen er det påmontert et innblandingsverktøy som blander kalken og sementen med jorda. Borstangen er hul, og innblandingsmaterialet fraktes gjennom borstangen ved hjelp av trykkluft.

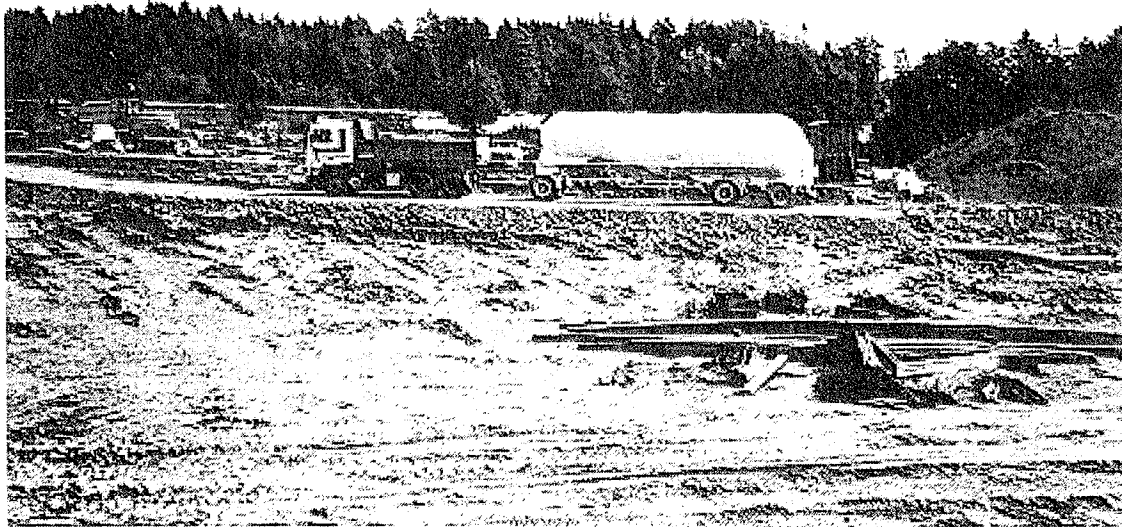


Figur 12 - kalk/sementrigg - Hercules Grundläggning AB

Den andre hoveddelen er materialtanken. Dette er en selvgående materialtank med separate containere for hhv. kalk og sement som er bygget oppå et gravemaskinchassis. I tillegg til et motoraggregat er materialtanken påmontert en kompressor som forsyner trykkluften mater kalk/sementen fram til installasjonsverktøyet. Mateluften må være tørr for å hindre at noen av de kjemiske prosessene starter før materialet føres ut i jorda. Derfor har materialtanken et eget avfuktingssystem for mateluften. Som regel er også to større materialbeholdere med som en del av standardutstyret. Kapasiteten på materialtanken er ikke stor nok til å sikre tilstrekkelig kontinuitet i framdriften. Derfor benyttes større stasjonære tanker med kapasitet på opp mot 50 tonn materiale pr tank som lokale mellomlagre.

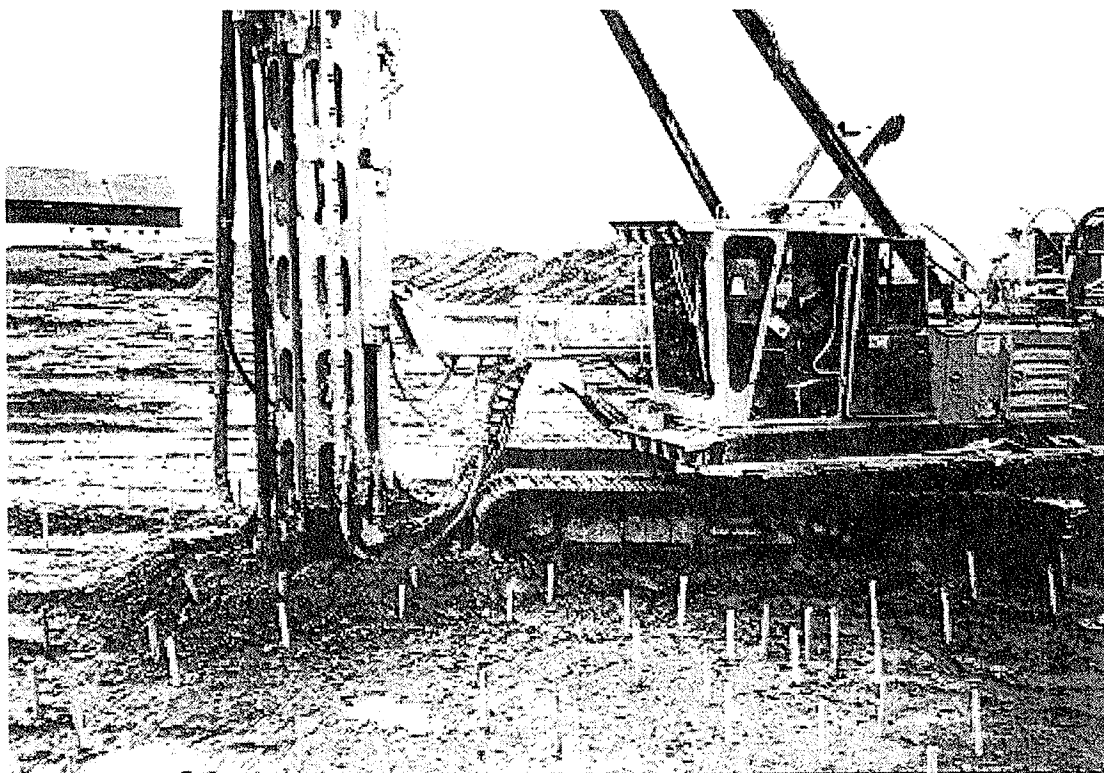


Figur 13 - selvgående materialtank med to separate tanker



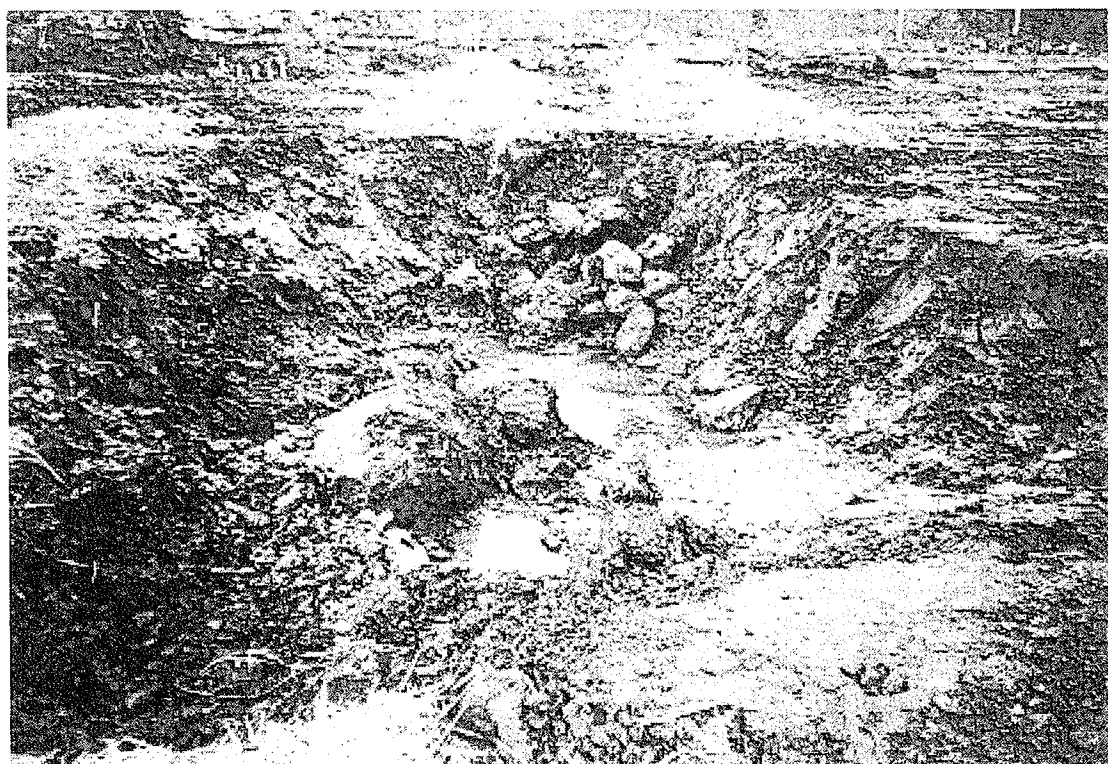
Figur 14 - materialmellomlager med 50 tonns kapasitet

Forøvrig er både pælrigg og materialtank utstyrt med ekstra lange og brede belter slik at marktrykket blir redusert. Dermed kan maskineriet operere også på områder med særlig svak grunn.



Figur 15 - brede belter gir redusert marktrykk

Det er i dag 5-6 kalk/semment-entreprenører på markedet, hvorav Hercules Grundläggning, LC Markteknik og Stabilator er de største. Utstyret som brukes er svært uensartet. Enkelte har separate selvgående materialtanker med en tank til hvert materiale, mens andre kun har en tank til ferdigblandet kalk/semment. Utforming av rigg varierer, og dermed også operatørens mulighet til å justere installasjonen av pælen underveis. Undersøkelser gjort av JBV rundt k/s-arbeidet ved Sande viser at også en og samme entreprenør kan operere med flere rigger som gir variable resultater.



Figur 16 - eksempel på steinholdig leire - ny trasé for Rv 116 Solberghøgda

2.2 Installasjonsparametre

2.2.1 Innblandingsverktøy

Det finnes en rekke varianter av innblandingsverktøyene ute på markedet i dag, hvorav mange er patentsøkt og brukes som middel i konkurransen mellom de forskjellige entreprenørene. Som fellesbenevnelse brukes begrepet "visp". Det er likevel mulig å angi retningslinjer for hvordan vispene bør utformes, med utgangspunkt i hvilke karakteristika de forskjellige leiretypene framviser. Særlige gjelder dette skillet mellom homogene, bløte leirer og hardere leirer med steinforekomster. Generelt må derfor operatørene disponere en visptype for bløte leirer og en visptype for steinholdige leirer. Visputforming vil for disse to leiretypene

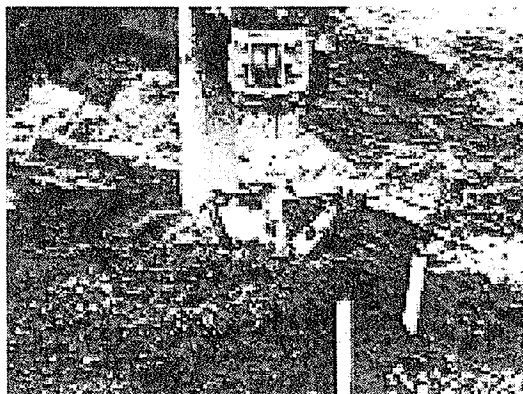
varierte entreprenørene imellom. Forsøk gjennomført bl.a. ved Chalmers tekniske høyskole i Gøteborg viser at visputformingen påvirker pælenes materialinnblanding, homogenitet og kvalitet. Likevel er det ikke dokumentert hvorvidt variasjonen i visptype mellom entreprenørene påvirker deres evne til å imøtekomme de krav som byggherrene i dag foreskriver.



Figur 17 - borstangbrudd p.g.a stein i bakken

Innblandingsverktøyet er montert nederst på borstangen og har som oppgave å bidra til en best mulig blanding av jorda og den kalk/segment som tilføres. En vanlig visp består av to skråstilte blader som er fastsveiset på et stålrør. Lengden mellom bladenes ytterkanter tilsvarer pældiameteren, og er således variabel selv om Ø 600 mm er mest utbredt. Diameteren kan variere mellom 400 mm og 1.000 mm. Over bladene er det hull i stålrøret slik at stabiliseringsmaterialet presses ut. Etter hvert som vispen roterer og stiger blir materialet

blandet med jorda. Slik oppstår den jordforbedrede søylen. Vispen endrer rotasjonsretning når den begynner å stige. Skråstillingen på bladene har da en dobbel effekt ved at de både blander og komprimerer massene på vegen oppover.



Figur 18 - eksempel på visputforming

2.2.2 Rotasjonshastighet

Rotasjonshastigheten på innblandingsverktøyet er et av parametrene som påvirker kvaliteten på kalk/semment-pælen. Holdningen i dag er at økt rotasjonshastighet bidrar til økt innblanding av tilsetningsmaterialene, og dermed til bedre kvalitet på pælen. Det er gjort forsøk med variert rotasjon under ellers like forhold. Resultatene er ikke entydige, men synes å underbygge denne konklusjonen. I Sverige settes normalt krav til at rotasjonshastigheten skal ligge i intervallet 80 - 120 omdr/min. I tillegg ønsker man en viss rotasjon på vispen under nedføring,- normalt ca. 1 omdr pr. 100 mm. Bakgrunnen for dette er at man mener en slik ekstra omrøring av leiren før tilsetning av kalk og semment bidrar til homogen innblanding.

I Norge har kravene til rotasjonshastighet ofte være strengere enn i Sverige. 150 omdr/min er mye brukt som minimum. Omdreiningshastigheten begrenses av kapasiteten på installasjonsutstyret, og slik sett har norske byggherrer vært pådrivere for utvikling av sterkere maskineri som kan tilfredsstille større krav til omdreining.

2.2.3 Stigehastighet

Med stigehastighet betegnes innblandingsverktøyet vertikale bevegelse pr omdreining (mm stign./omdr). Dersom stigehastigheten øker vil produksjonskapasiteten øke tilsvarende. Dette kan gi økonomiske gevinster. Samtidig vil økt stigehastighet isolert sett redusere innblandingsarbeidet i pælen, og på den måten påvirke kvaliteten. Derfor er det gjerne satt krav til maksimal stigehastighet under installasjon, f.eks. 25 mm/omdr. Undersøkelser gjort bl.a. ved Chalmers Tekniske Høgskole i Gøteborg antyder at pælenes homogenitet og fasthet ikke blir påvirket hvis stigehastigheten holdes innenfor intervallet 15 - 30 mm/omdr. (Johansson/Jons, Chalmers, 1995), men dette er ikke entydig dokumentert. Stigningsintervallet på 15 - 30 mm/omdr. brukes av hele bransjen.

Svenske retningslinjer opererer gjerne med en inndeling mellom rene kalkpæler (25 mm/omdr), kalk/semment-pæler (15 - 20 mm/omdr) og rene semmentpæler (15 mm/omdr).

2.2.4 Innblandingsmengde

Utgangspunktet for å fastsette innblandingsmengde er geotekniske undersøkelser. Målinger av blant annet in-situ fasthet, skjærstyrke, sensitivitet og vanninnhold relatert til dimensjonerende verdier gjør at man kan spesifisere en prosentvis innblanding av kalk og semment pr. kubikkmeter jord.

2.2.5 Innblandingsarbeid/homogenitet

Det er viktig at stabiliseringsmiddelet blir homogent innblandet i jorda. På denne måten unngår man svake partier i pælene. Kalk og semment har forskjellige måter å reagere på. Dette påvirker innblandingsbehovet.

Styrketilveksten i et materiale som bearbeides med kalk/semment henger direkte sammen med homogeniteten i innblandingen. Man tilsetter semment i første rekke for å utnytte semmentens evne til å oppnå høy fasthet. Dessuten har semmenten evne til å oppnå fasthet i sandsjikt, i organiske lag og i svært salte leirer. Semmentens egenskaper blir bare utnyttet til fulle dersom innblandingen er god.

2.2.6 Blindboring

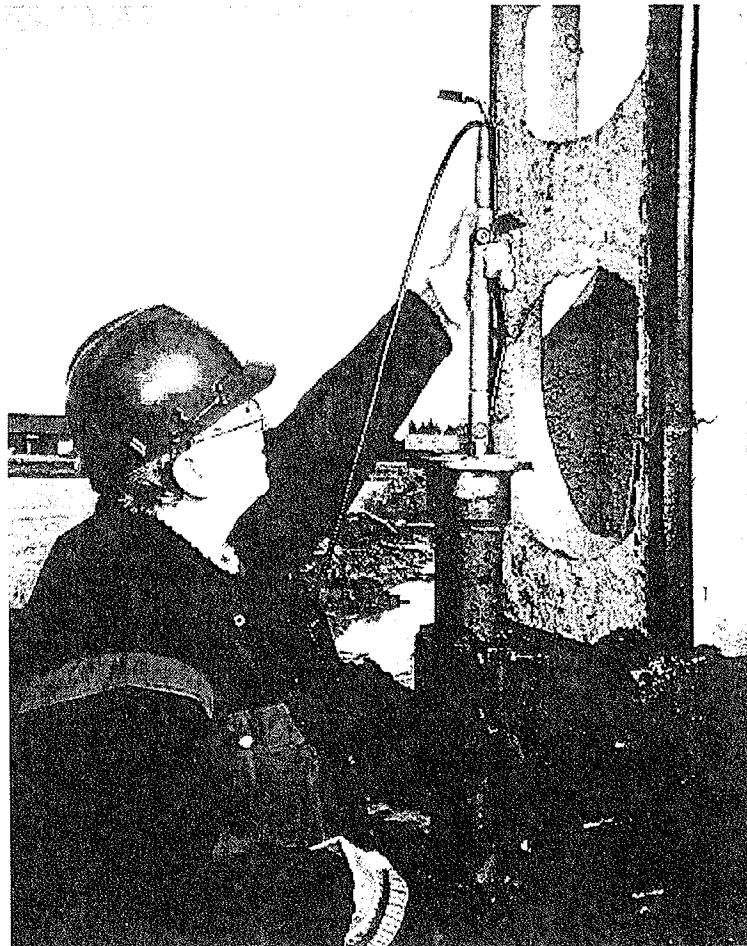
Ved produksjon av en kalk/semment-pæl vil normalt den øvre delen av pælen (øvre 1-2 m) ikke bli tilført innblandingsmateriale. Dette skyldes at kalken og semmenten mates ut med trykkluft (ca. 6 bar). Man er derfor avhengig av et visst mottrykk for å hindre at materialene forsvinner opp langs borstangen og spres ut på overflaten. Det er blindboringssonen som besørger det nødvendige mottrykket.

Under installering spesifiseres varierende mengde blindboring fra installasjonsplanet. Dette har sammenheng med prosjekteringen og varierer fra prosjekt til prosjekt, og også internt i hvert prosjekt. Det er viktig å legge merke til at blindboringen bidrar til omrøring av leiren uten å tilføre stabiliseringsmiddel. Blindboringssonen kan dermed bli svakere enn den uberørte leiren og oppvise midlertidige stabilitetsproblemer før den rekonsolideres.

2.2.7 Loddavvik

Installasjonsutstyret som brukes kan ikke sikre pælene mot loddavvik. De forskjellige entreprenørene har utstyr som kan registrere om boretårnet står i lodd for installasjonen starter, men dette kan ikke forhindre eventuelle avvik fra loddlinjen. Borstangen vil under nedføring følge minste motstands veg, og når pællengden går opp mot 20 m skadet svært lite til for at borstangen kan gå ut av loddlinjen. Det finnes i dag ikke målemetoder som kan

påvise om de installerte pælene står i lodd som prosjektert. Det er heller ikke gjort tilstrekkelig med målinger som kan bekrefte eller avkrefte hvorvidt dette er et reelt problem.

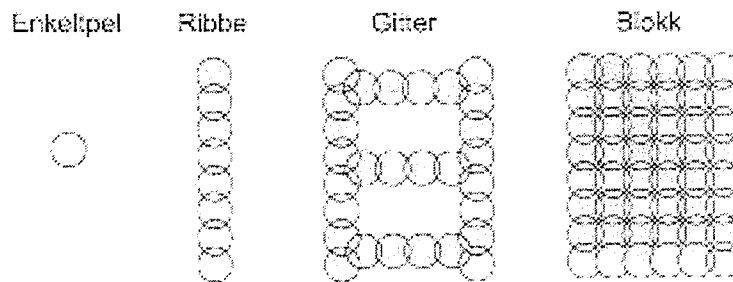


Figur 19 - måling av loddavvik med inklinometer - inklinometeret føres ned gjennom borstangen og evt. avvik registreres i 2 akser.

3. Anvendelsesområder

Utforming av pælmønstre henger nøye sammen med hvilken funksjon pælene er tiltenkt.

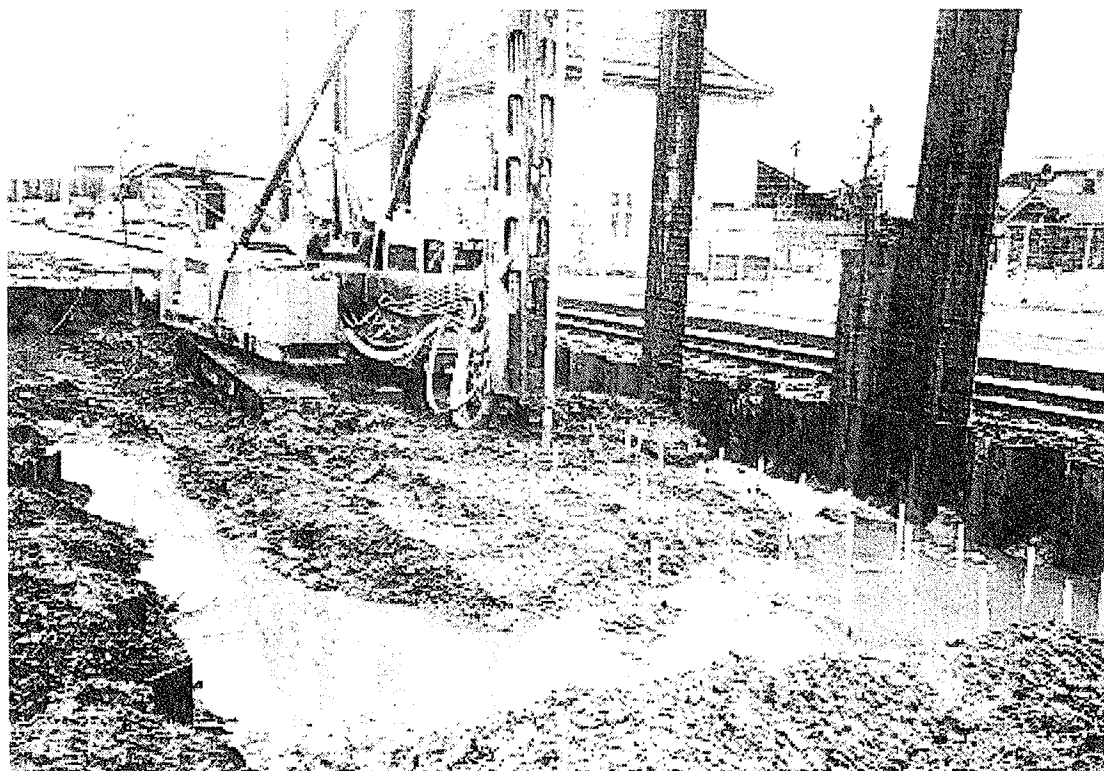
Kalksementpeler kan installeres som enkeltpeler, i ribber, i gitter eller i blokker.



Figur 20 - eksempler på pælmønstre - hentet fra brosjyre om kalk/sement-stabilisering utarbeidet av Franzefoss Bruk, Norcem og Norges Geotekniske Institutt, 1996

Ved installasjon av ribber er det nå sjeldent at man prosjekterer ribber med kun én pælrade. Normalt setter to eller eventuelt 3 rader med 5 til 10 cm overlapping for å sikre kontinuitet, nettopp med tanke på mulighet for loddavvik og sprik i ribben. Ribber brukes gjerne i forbindelse med skråningsstabilitet, og da legges det til grunn at skivene skal være sammenhengende.

3.1 Setningsreduksjon

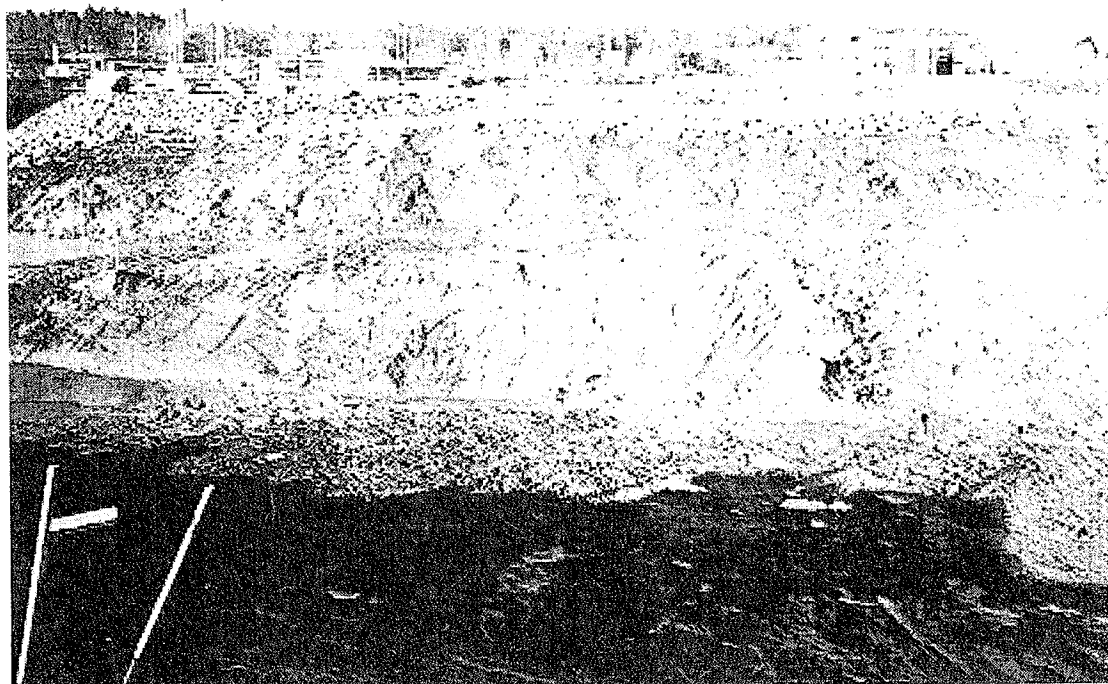


Figur 21 - installering med kombinasjonsformål,- også setningsreduksjon

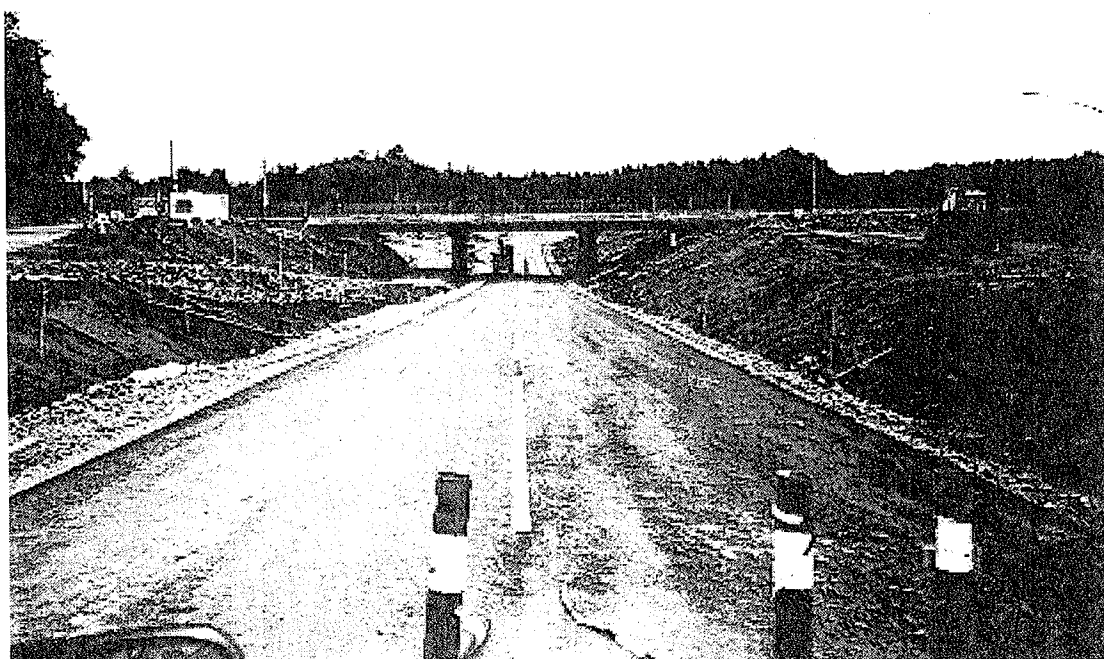
Dette er ingen typisk illustrasjon av kalk/semment-pæler brukt til setningsreduksjon. Dersom setningsreduksjon er primærhensikten settes pælene oftest som enkeltpæler med c/c på 1-3 m. Da fungerer de som vertikaldren, fordi k/s-pælen har langt høyere permeabilitet enn leiren. Ved bruk av forbelastning vil man da kunne ta ut eventuelle setninger før konstruksjonen bygges, og dermed unngå setningsproblemer senere.

Dette vil også skje i området på bildet, men her vil pælene i like stor grad bidra til økt bæreevne fordi de settes sammen til en blokk. På den måten kan pælene ha flere funksjoner.

3.2 Skråningsstabilitet

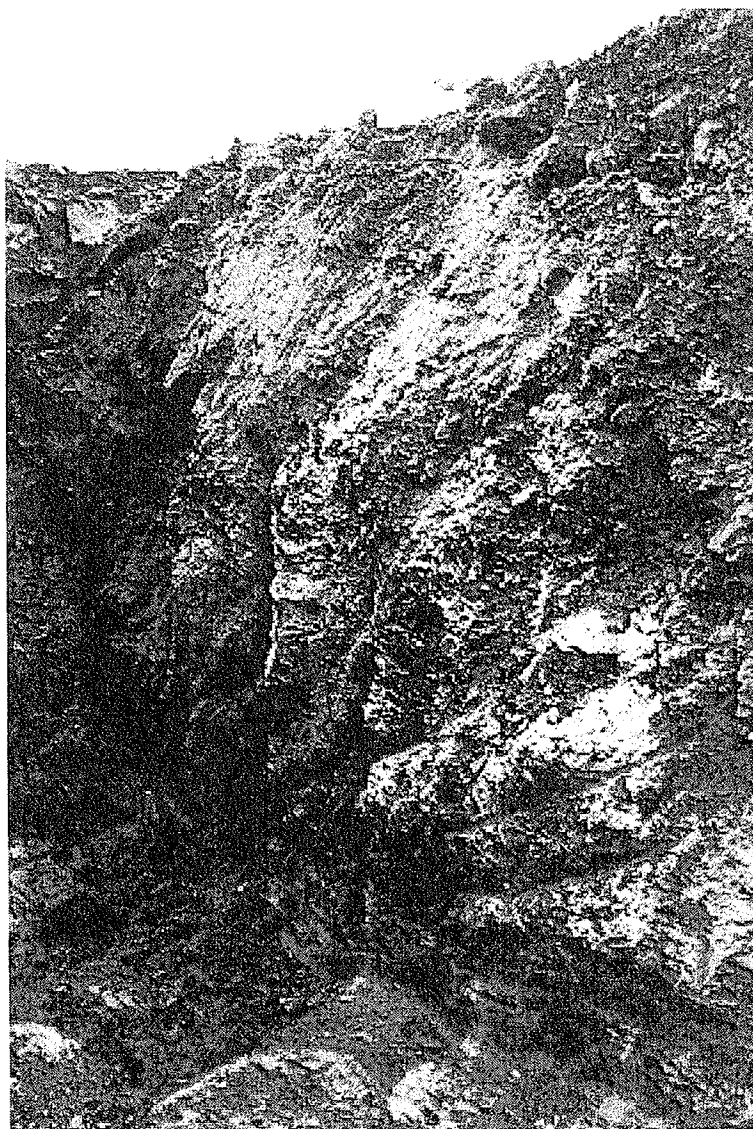


Figur 22 - økt skråningsstabilitet ved installasjon i skiver - Rv 116 Solberghøgda



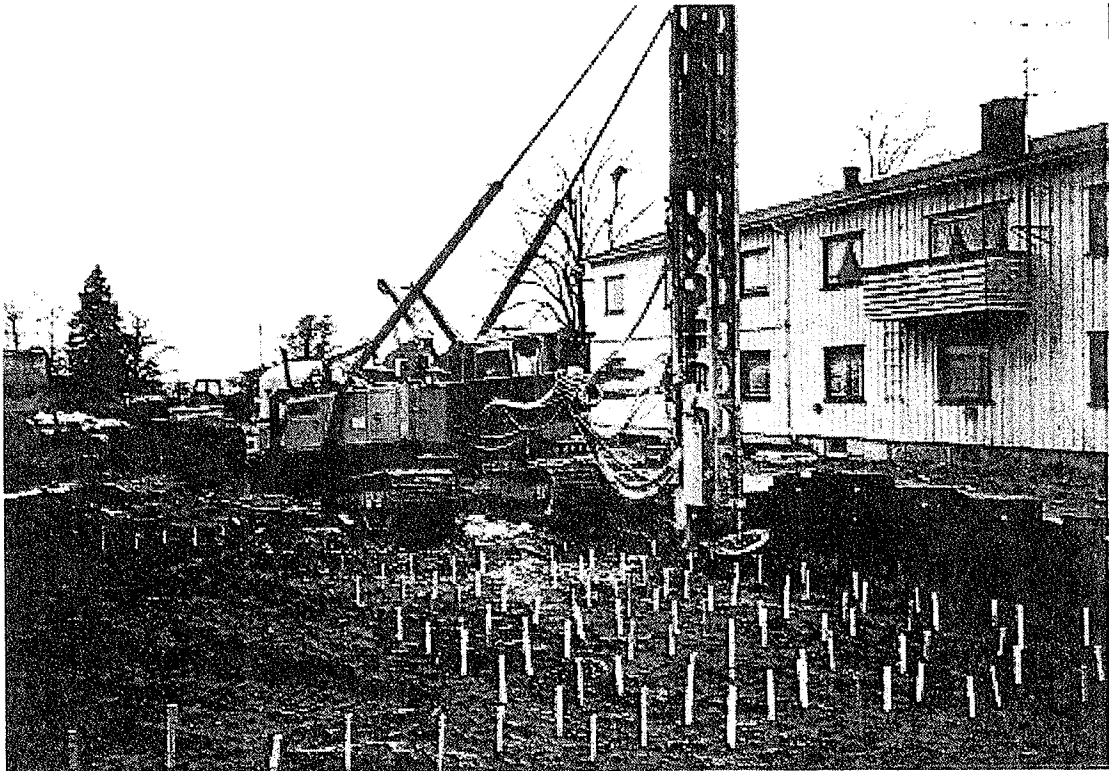
Figur 23 - ferdig veg; skjæringer, vegbane og brukonstruksjon stabilisert

3.3 Midlertidige avstivninger



Figur 24 - k/s-pæler åpner for grøftearbeid uten spunt og avstivning

3.4 Andre områder



Figur 25 - pælkonstruksjonen kan også fungere som støtte for spuntvegger - Rv 336 ved Rygge gamle jernbanestasjon

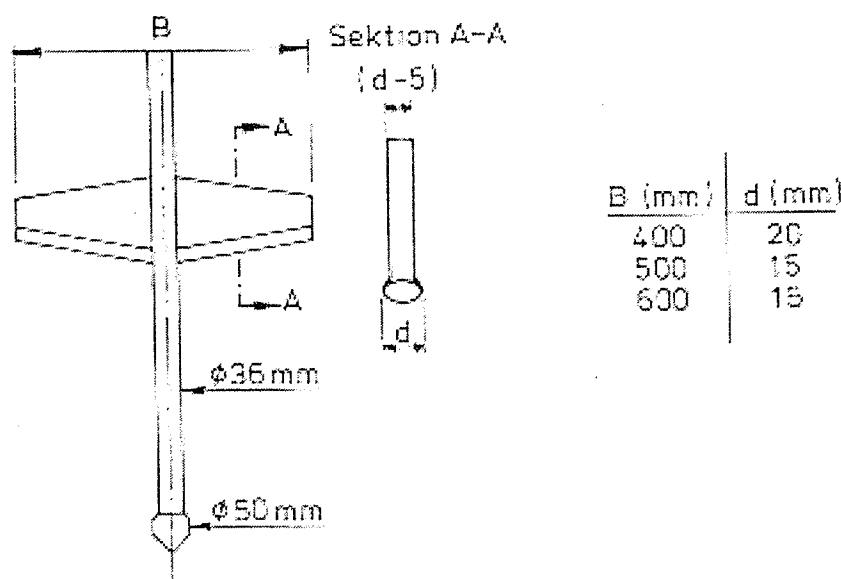
4. Kvalitetskontroll og dokumentasjon

4.1 Prøvemeter

4.1.1 KPS - kalkpælsonden

En av de mest utbredte prøvemeter for å bestemme fasthetstilvekst i kalk- og kalk/semment-pæler har vært "kalkpælsonden" - KPS. Dette er en metode for produksjonskontroll av pælene som gir et bilde av kontinuitet/homogenitet og fasthet.

Sonden består av en vinge med en spiss som trykkes ned i pælen. Skjærfastheten bedømmes ved å måle motstanden sonden møter. Man tar da hensyn til motstanden mot spissen og friksjonen langs stangen etter hvert som sonden trykkes ned i pælen. Et problem ved metoden er å holde sonden inne i pælen, - særlig dersom pælen har høy fasthet. Sonden vil automatisk søke minste motstands veg, og vil kunne gå ut av pælen ved økende dyp. Dette gjør at metoden ikke er særlig egnet for pæler med høy fasthet og/eller stor lengde ($< 8\text{m}$). Brukererfaringer tilsier at metoden fungerer tilfredsstillende i myke og halvfast pæler ($< 150\text{ kPa}$). Et annet positivt element ved metoden er at den er objektiv, dvs at man ikke bestemmer hvilke pæler som skal testes allerede i produksjonsfasen. Metoden er også relativt rimelig i bruk.

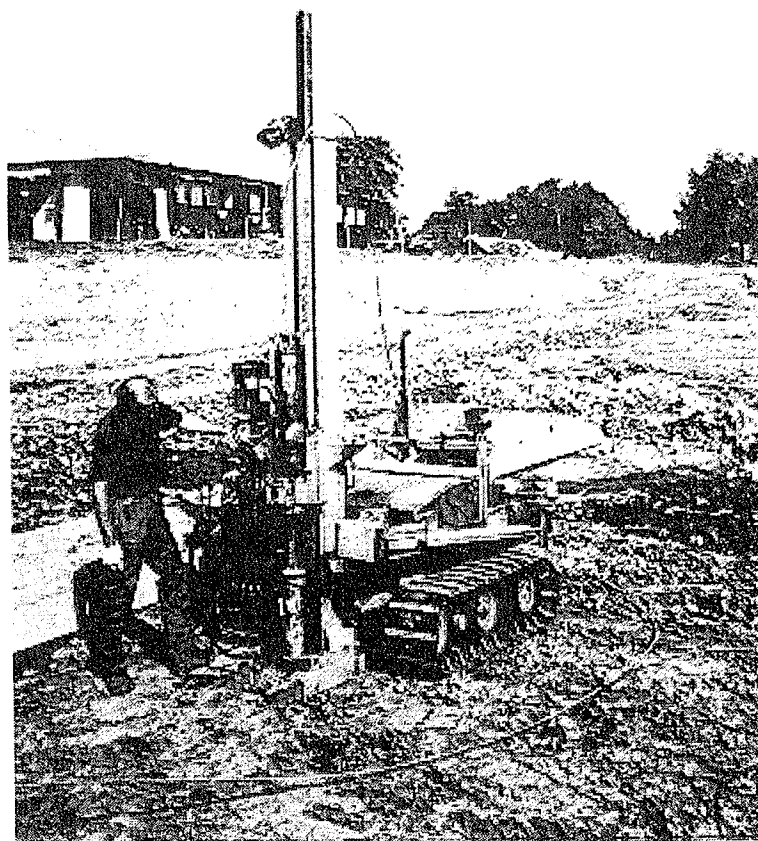


Figur B.1. Pælssonde metod 1.

Figur 26 - detalj av kalkpælsonde

4.1.2 FOPS - omvendt kalkpælsonde

Den “omvendte kalkpælsonden” - FOPS - fungerer i prinsippet på samme måte som kalkpælsonden. Modifikasjonen består i at sonden trekkes opp gjennom hele pælens lengde ved hjelp av en vaier som innstilleres samtidig med pælen. På denne måten er man sikret at sonden ikke går ut av pælen, og gir et kontinuerlig bilde av pælstyrken fra bunn til topp.



Figur 27 - trekking av omvendt pælsonde - Ingemar Forsgren Konsult AB

Dette er en forbedring i forhold til KPS-metoden, men innehar samtidig noen ulemper. Sondens og trekkvaieren må nødvendigvis installeres samtidig som pælen produseres. Det innebærer at entreprenøren vet hvilke pæler som skal testes. Testmetoden er derfor ikke objektiv, og kan skape rom for tvil. Samtidig er testresultatene til dels vanskelige å tyde, og krever bearbeiding. Når FOPS-prøven brukes til å teste harde pæler (+ 150 kPa) viser den for høy fasthet. Dette bygger på erfaringer fra rådgiver- og entreprenørhold både i Norge og Sverige.

Man er p.t. ikke kjent med norske firmaer som forestår FOPS-prøving. Disse tjenestene må hentes inn fra Sverige. Dette er kostnadsdrivende.

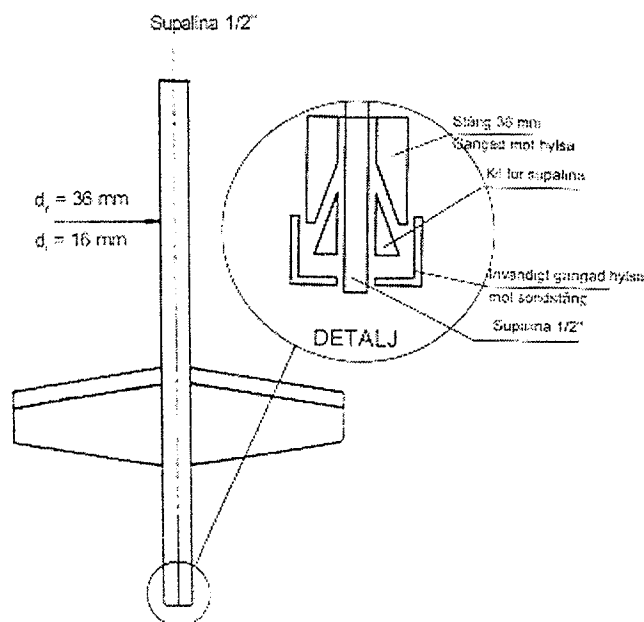


Fig. B.3. Principiell utformning av omvendt kalkpælsonde.

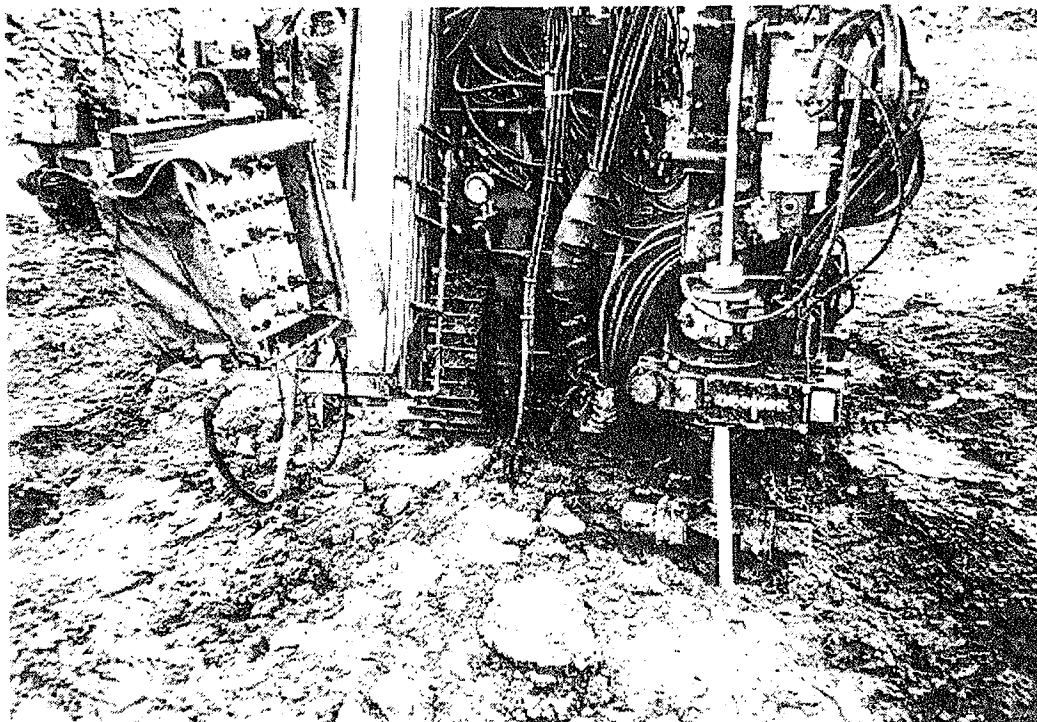
Figur 28 - detalj av omvendt kalkpælsonde (FOPS)

4.1.3 CPT - cone penetration testing

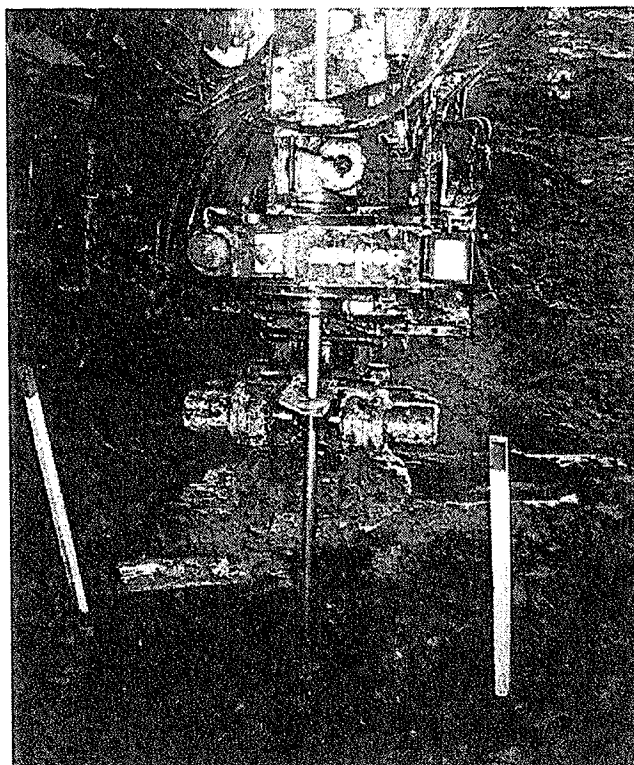
Norges Geotekniske Institutt har lansert CPT-sondering som et nytt prøvekonsept for kvalitetskontroll av k/s-pæler. Deres utgangspunkt for dette er at det pr. i dag ikke er noen metode som er egnet for in situ testing av høyfaste pæler (+ 150 kPa) uavhengig av installeringen. FOPS-sondering har vist seg lite egnet i høyfaste pæler,- det er flere eksempler på at sonde har satt seg fast. Fordeler ved Cone Penetration Testing (CPT) er bl.a. at man kan teste vilkårlige pæler uten at pælene ødelegges og at utvalget av testpæler kan gjøres etter installasjon. Testmetoden er m.a.o. objektiv i forhold til entreprenøren. Testen forutsettes å gi svar på pælkontinuitet og styrke og er relativt enkel og rask å utføre. Hvis testen viser seg velegnet vil testutstyret troligvis kunne monteres på k/s-riggen, og dermed eliminere behovet for en separat geoteknisk rigg. Programmer for resultater forutsettes lagt inn på maskinens data-anlegg.

Foreløpige ulemper er at metoden ennå ikke er tilstrekkelig uttestet og utstyrtstilpasset. Dette gjelder tilpasning til pælrigger, samling av erfaringsmateriale og hvordan hindre at sonden

ikke går ut av pælen under testing. Kostnadene er beregnet til å ligge mellom FOPS-sondering og prøvetaking.



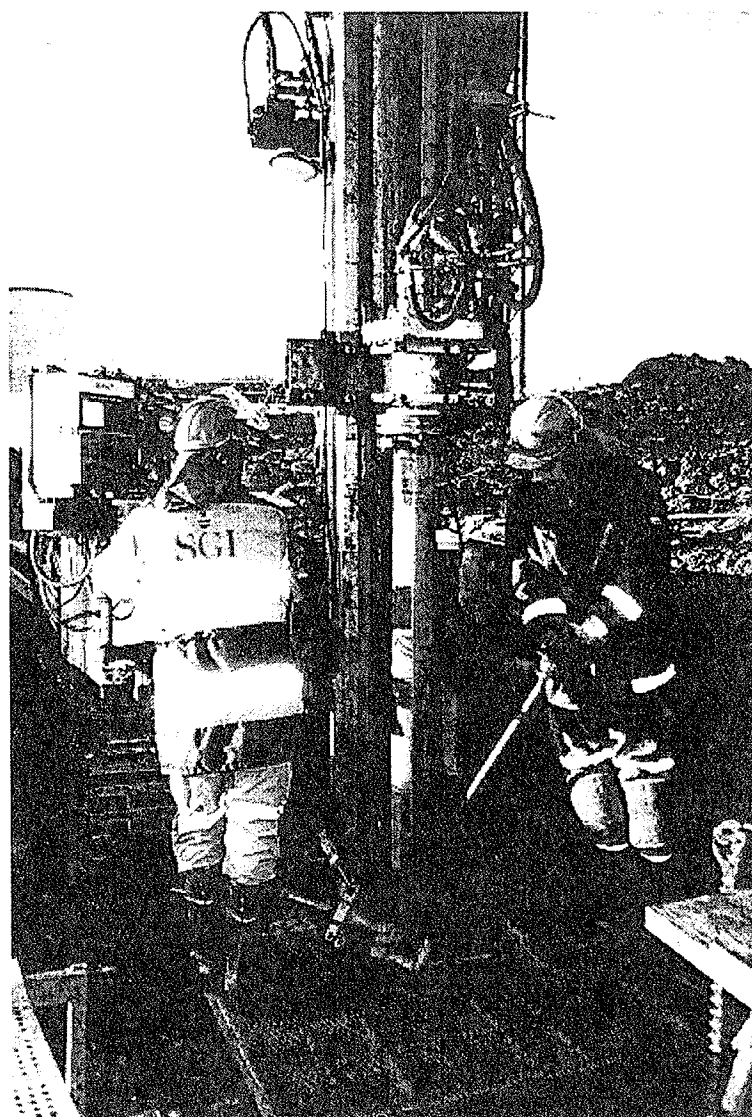
Figur 29 - fasthetsprøving av k/s-pæl med CPT-sonde - utført av NGI



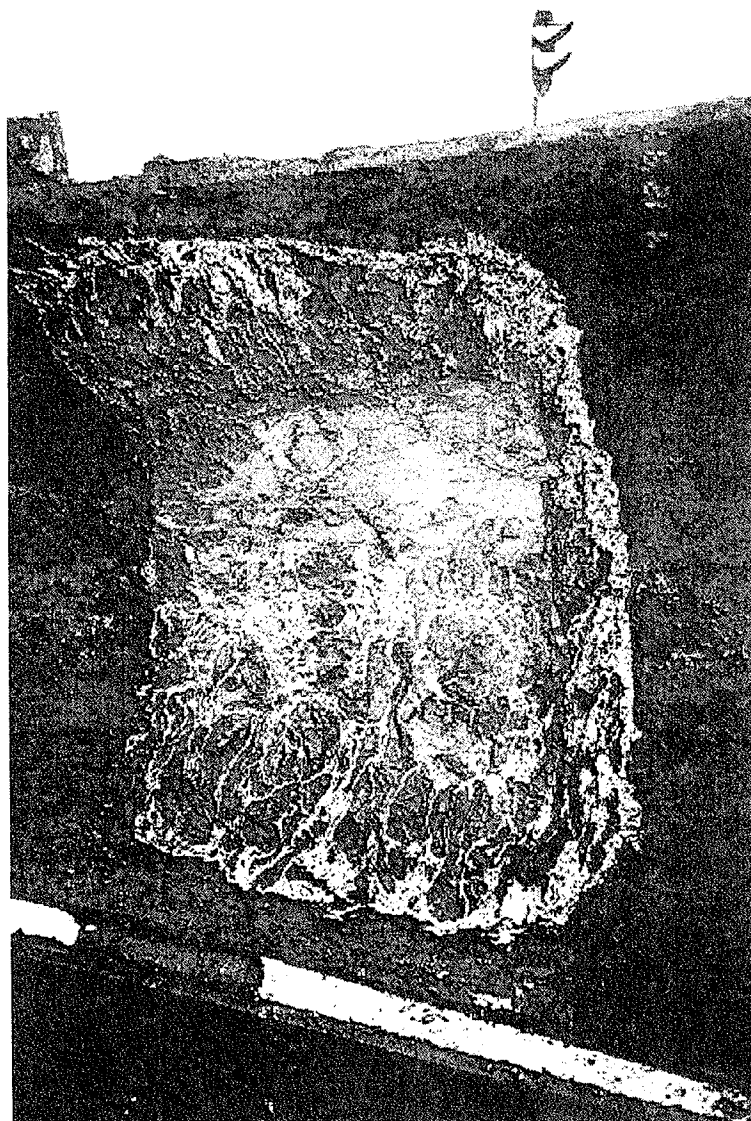
Figur 30 - CPT-sonden drives ned gjennom pælen

4.1.4 Kjerneboring

Ved kjerneboring brukes et rør på 56 mm eller 102 mm som bores ned i pælen for å hente ut uforstyrrede prøver som kan testes i laboratoriet. Testen egner seg best for korte og mellomlange pæler med inntil ca. 8 m lengde, fordi det er vanskelig å kontrollere at man holder seg inne i pælen etter hvert som dybden øker. På den ene side kan pælen avvike fra lodmlinjen samtidig som borstangen som brukes er noe elastisk og vil søke minste motstands veg, dvs. ut av pælen. Man har også hatt problemer med å framskaffe uforstyrrede prøver ved bruk av 56 mm rørdiameter. 80 mm rør har blitt brukt, men 102 mm i ferd med å overta som vanlig prøverørsdiameter.



Figur 31 - kjerneboring med 102 mm triple tube for uttak av prøvestykker - utført av SGI



Figur 32 - ved opptaking av hele pælen kan man tydelig se sporene etter kjerneboringen

4.1.5 Utgraving

Ved en rekke anledninger har man tatt prøver av pæler ved utgraving av pælsegmenter. Disse prøvene gjøres så store at man kan ta ut uforstyrrede prøver som kan testes i laboratorium, f.eks. ved tri-aksial testing. Denne form for prøvetaking er begrenset i forhold til hvor dypt det er praktisk mulig å grave opp prøver, dvs. gjerne ned mot 4 - 5 m. Det er en viss risiko for at prøvene forstyrres under prøvetaking, men dette kan motvirkes ved å ta en rimelig antall prøver. Samtidig er det viktig å sørge for at prøvestykkene er så store at uforstyrrede stykker kan skjæres ut. Disse er gjerne på 7 x 7 x 10 cm. Hver prøve bør kunne gi to prøvestykker. Prøvene som graves opp må merkes med opp/ned-retning for å hindre at de blir trykket på tvers av pæl-retningen. Dette vil kunne gi helt misvisende resultater.

Prøvemethoden er ressurskrevende både i forhold til maskinarbeid og labprøver. Dessuten kan den ikke nyttes til prøvetaking på store dybder, noe som ofte er av mer interesse fordi sjansen for produksjonsavvik antas å øke med dybden. Utgraving av prøvestykker begrenser seg ellers

til deler av pæler som ikke er permanente konstruksjoner, dvs. deler av pæler som skulle vært gravd ut uansett i forbindelse med skjæringer o.l. Dette begrenser muligheten til å teste kvaliteten i pæler som er permanente ved hjelp av denne metoden.



Figur 33 - pælstrukturen kan observeres tydelig ved utgraving - ved landbruksundergangen på Eskelund - dobbeltsporparsellen Såstad-Haug

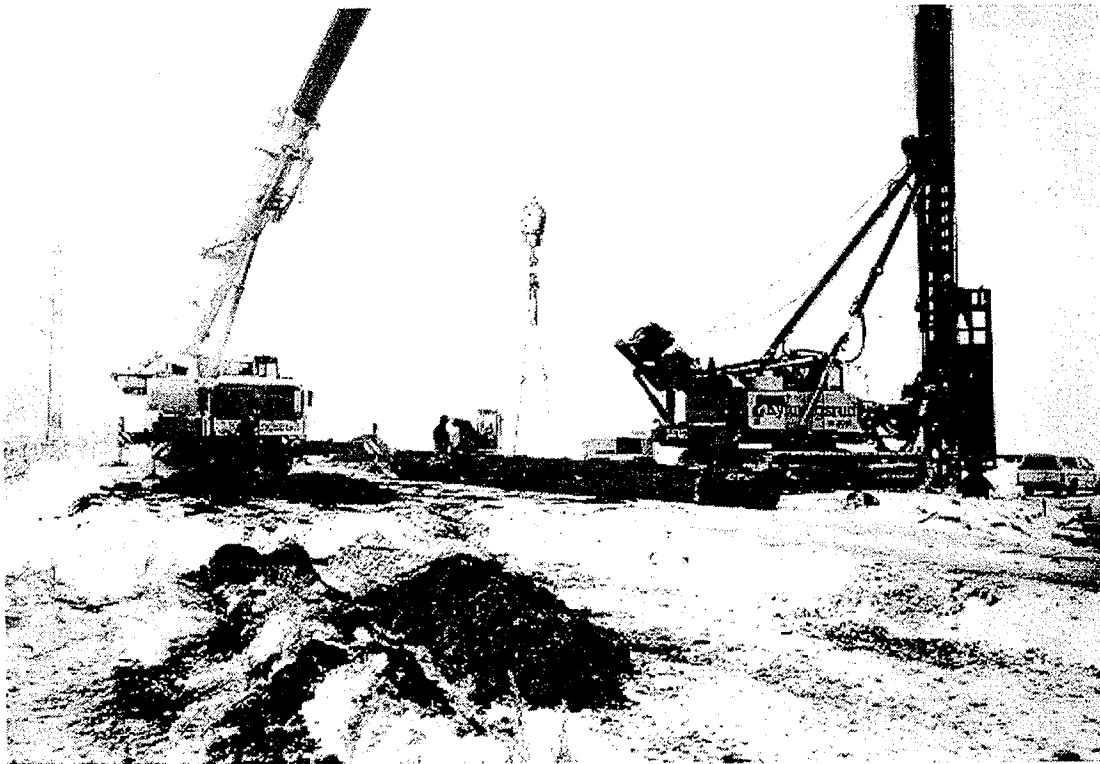
4.1.6 Opptaking av komplette pæler

Minst en av de svenske kalk/semment-entreprenørene disponerer spesial-utstyr som brukes til å ta opp komplette pæler etter installasjon og herding. Til dette brukes en hul stålsylinder med Ø 700 mm. Sylinderen presses ned rundt pælen som man vil teste. I bunnen av røret er montert to klaffer som lukkes når røret dras opp. På denne måten er hele pælens lengde åpen for testing i forskjellige former, - vingeboing, penetrometer-test, prøvestykker for triaksial-tester osv. Dessuten gir denne prøvemethoden en unik mulighet til å studere innblanding av materiale, materialfordeling og homogenitet.

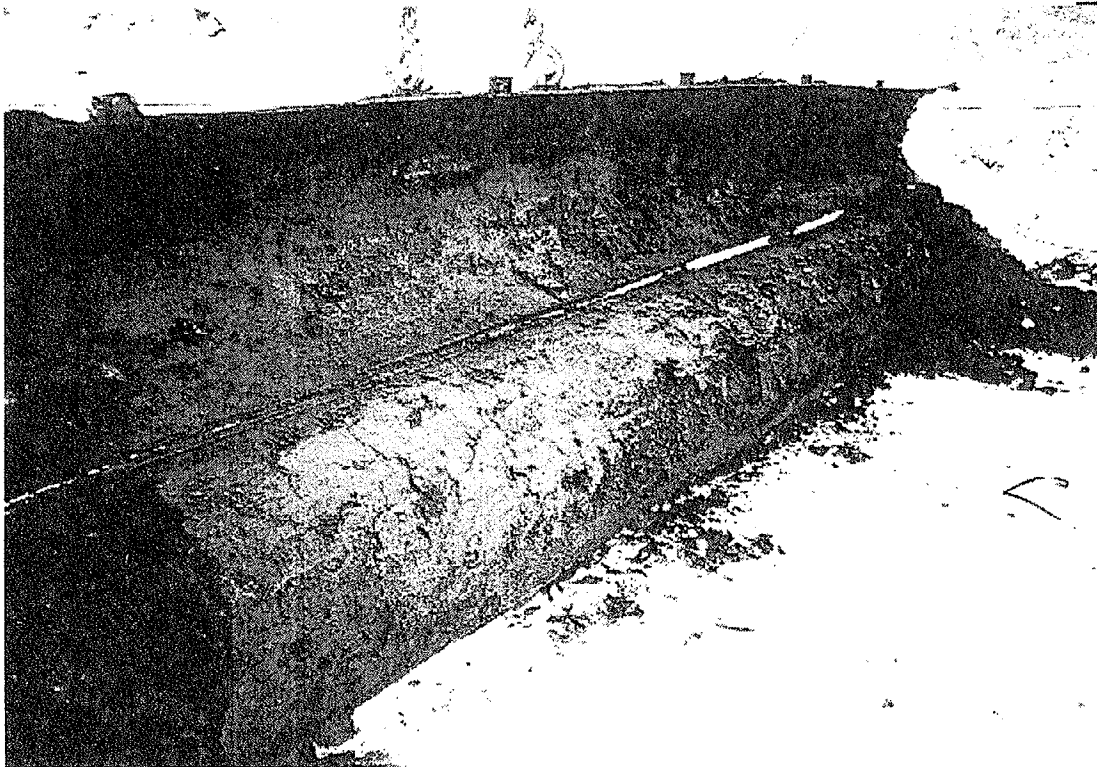
Så langt prosjektet erfarer er opptaking av hele pæler ikke vært nyttet som testmetode under produksjon, men vært begrenset til forundersøkelser og forsknings- og prøveprogrammer.

Ulemper ved dette systemet er knyttet primært til kostnader. Det er innlysende at både installering og heving av prøverøret krever omfattende ressurser. Man bruker normalt en pælmaskin for å ramme røret ned, mens det er behov for en kraftig mobilkran til å heve pælen. Det er eventuelt også behov for å bygge adkomstveger til testområdet dersom terrenget har begrenset bæreevne.

Forøvrig er man også i forhold til denne prøvemethoden avhengig av å installere ekstra pæler som kan brukes til prøveformål. I og med at metoden er destruktiv kan man ikke teste pæler som er del av permanente konstruksjoner på denne måten.



Figur 34 - ved prøvetaking av komplette pæler brukes en pælmaskin til å ramme ned et hult rør rundt den ferdige pælen. Deretter trekkes røret og pælen opp ved hjelp av mobilkran. Bildet viser prøvetaking ved Fv 335 Bjølsen på dobbeltsporsparsellen Såstad-Haug i Østfold i desember 1997.



Figur 35 - når pælen er trukket opp kan røret åpnes og pælen inspiseres. Dette gir anledning til rikelig prøvetaking og dokumentasjon.

4.1.7 Prøvetaking

Det er som regel spesifisert at de pælene hvis kvalitet skal undersøkes må testes til gitte tidspunkter. Dette kan være 14/28 dager installasjon eller 3/8 dager etter installasjon. Disse tidsangivelsene henger til dels sammen med testprosedyrene for betongterninger.

Kravene som stilles til fasthetsutvikling varierer i fagmiljøene. Generelle krav til tidligfasthet i forhold til prosjektert sluttfasthet foreligger ikke. Det angis gjerne graverestriksjoner i de stabiliserte områdene. Disse kan variere fra 1 uke til 4 uker.

4.2 Dokumentasjon

For kun få år siden var all dokumentasjon av installasjon av kalk/semment-pæler knyttet til manuelle observasjoner av operatøren og material-fraktsedler. De enkelte leverandørene har arbeidet med utvikling av databasert dokumentasjon. Dokumentasjonsformatene som foreligger i dag er således uensartet og av varierende kvalitet. Bakgrunnen for denne fokus på dokumentasjon av installasjonsarbeidet er at bestillere ikke er i stand til å stille funksjonskrav. K/S-leverandørene er heller ikke i stand til uten videre kun å forholde seg til funksjonskrav.

Denne manglende kontroll over sluttkvaliteten på produktet har gjort at byggherrer og rådgivende ingeniører inntil videre stiller særskilte krav til utførelse av installasjonsarbeidet. Dette gir seg utslag i at installasjonsprotokoller normalt må inneholde tidspunkter, kote på



arbeidsplan, pælnummer, pældiameter, pællengde, mengde stabiliseringsmiddel pr. løpemeter pæl og totalt, avvik fra forutsetningene, forhold som kan påvirke pælens kapasitet og navn på arbeidsleder og protokollfører.

Dataprogrammene som brukes til å presentere dokumentasjonen av k/s-arbeidet er utviklet av hver enkelt entreprenør. Av konkurransehensyn er disse ikke villige til å gi fra seg programvaren.

5. FoU

5.1 Tidligere forskning

Rundt omkring i de forskjellige fagmiljøene er det gjennom de senere år gjennomført til dels betydelig forskning rundt kalk/ement-metoden. Sveriges geotekniske institutt har utgitt en rekke håndbøker og skrifter som beskriver et bredt spekter av problemstillinger, og det er også laget dimensjoneringshåndbøker som gjelder for myke og halvaste pæler med styrke opp til 150 kPA. Kompetansen i bruk av metoden i Norge er ikke så omfattende. Ofte er den spredt hos enkeltpersoner og i prosjektdokumenter som er "arkivert" på prosjektene. Det er få miljøer i Norge som har helhetlig kompetanse og erfaring i "eget" hus. Dette gjelder i alle ledd,- både på prosjekteringssiden, entreprenørsiden og byggherresiden. Rådgivermiljøene er samstemte i at kunnskapen og kompetansen om metoden er mangelfull og bekrefter at kunnskap og kompetanse sitter spredt og ikke er systematisert eller samlet. Dette vurderes som en ulempe og det er signalisert til dels stor interesse for å samle og systematisere det materiale som eksisterer rundt omkring. Så langt er det ikke funnet rom for dette av økonomiske grunner. I Sverige er forøvrig et slikt arbeid allerede kommet til sluttfasen. Professor Broms har i samarbeid med SGI arbeidet med å samle inn erfaringsmateriale fra svenske og utenlandske prosjekter. Uansett må man ved et slikt arbeid være påpasselig med hva slags informasjon som inkluderes. Utfordringen ligger i at metoden er i en rivende utvikling som gjør at "status"-rapporter fort vil inneholde gårsdagens nyheter.

5.2 Svensk Djupstabilisering

Svensk Djupstabilisering innebærer en langsiktig FoU-satsing på kalk/ement-pælmotoden med deltakere fra alle deler av svensk anleggsbransje samt offentlige myndigheter og oppdragsgivere. I Sverige oppfattes at dagens situasjon og kunnskapsnivå legger begrensninger både på industri og samfunn. Industrien påvirkes negativt av detaljstyring, mangel på relevante kvalitetsmål og normer, og begrensning i anvendelsesområder og utviklingsmuligheter. Samfunnsmessige konsekvenser oppstår som følge av manglende kostnadsoptimering, uklart sikkerhetsnivå som begrenser metodens utbredelse, og manglende styring mot funksjon og kvalitet i og med at arbeidet betales etter kg bindemiddel pr løpemeter.

Mål for prosjektet Svensk Djupstabilisering er definert som følger:

- * Dypstabilisering skal kunne benyttes og prosjekteres ut i fra funksjonskrav for sikkerhet og vedlikehold (deformasjoner) for forsterket jord.

Industrien skal levere system for jordforbedring som oppfyller gitte funksjonskrav. Dette skal skje i ulike funksjonsklasser med tilpassede kontrollmetoder. Utførelsen optimeres utfra egne forutsetninger.

- * Etablere grunnlag for utvidet anvendelsesområde for metoden.

Utvidelsen omfatter flere jordtyper, skjæringer, byggegrop, høye fyllinger uten forbelastning, fundamentering av bygninger og andre konstruksjoner mv. Dette gir økt volum

for industrien og økt konkurranse gjennom bruk av flere metoder, noe som gir samfunnsøkonomiske gevinster.

- * Skape eksportmuligheter for industrien bl.a. gjennom et systematisk tenkesett knyttet til jordforsterkning.

I systemet inngår at produksjonsmetode og bindemiddel velges ved hjelp av modeller ut i fra ønsket funksjon og jordtype. Samtidig utnyttes dokumentasjon fra FoU-resultater og erfaringer/referanseobjekter.

- * Øke mulighetene for differensiering av metodens bruksområder, noe som gir bedre konkurransedyktighet, økt lønnsomhet for bedriftene og kostnadsbesparinger for samfunnet.

- * Skape grunnlag for kortere byggetider og redusere behovet for restriksjoner i byggeprosessen, f.eks. ved forsterkninger mot eksisterende konstruksjoner eller midlertidige byggeproser. Dette oppnås gjennom bedre kunnskap om egenskaper, utførelse, funksjonssett, beregningsmetoder og verifikasjonsmetoder. Resultatet er kostnadsbesparinger og økt konkurransekraft i forhold til andre metoder.

- * Sikre en høy og bred kompetanse samt et velutviklet kontaktnett innen teknikkområdet for alle berørte parter, dvs byggherrer, entreprenører, materialleverandører og forskere.

5.3 Eurosoilstab

EU har også initiert et forskningsprogram rundt kalk/ement-pælmotoden. Et treårig prosjekt med en økonomisk ramme på ca. 30 mill NOK er startet opp med ca. et halvt dusin deltakerland. Gjennom Scancem-konsernet er Norcem indirekte deltaker i dette prosjektet, og de har antydnet muligheten av å formidle erfaringer fra dette prosjektet hit til Norge. Detaljene i prosjektet avventes foreløpig, men mer informasjon er på trappene.

6. Figurliste

Figur 1	prinsipp for produksjon av kalk/ement-pæl
Figur 2	kalk/ement-pæler i massiv formasjon
Figur 3	utviklingen i materialbruk
Figur 4	fasthetsutvikling med tiden
Figur 5	korngradering før og etter stabilisering
Figur 6	tilførsel av stabiliseringsmateriale skaper overtrykk i bakken
Figur 7	sammenheng temperatur/fasthet
Figur 8	isolering med halm
Figur 9	tanking av stabiliseringsmateriale
Figur 10	materialtank med én tank for kalk og sement
Figur 11	levering av kalk
Figur 12	kalk/ement-rigg
Figur 13	selvgående materialtank med to separate tanker
Figur 14	materialmellomlager
Figur 15	brede belter gir redusert marktrykk
Figur 16	eksempel på steinholdig leire
Figur 17	borstangbrudd
Figur 18	eksempel på visputforming
Figur 19	måling av loddavvik med inklinometer
Figur 20	eksempel på pælmønstre
Figur 21	pæling for setningskontroll
Figur 22	pæling for skråningsstabilitet
Figur 23	vegstreking ferdig stabilisert
Figur 24	pæling for grøfter
Figur 25	pæling som støtte for spuntvegg
Figur 26	detalj av kalkpælsonde
Figur 27	testing av pæl med omvendt kalkpælsonde
Figur 28	detalj av omvendt kalkpælsonde (FOPS)
Figur 29	fasthetsprøving med CPT-sonde
Figur 30	CPT-sonden i drift
Figur 31	prøvetaking med 102 mm kjernebor
Figur 32	spor etter kjerneboring i pælen

- Figur 33 pælstruktur synlig ved utgraving
Figur 34 opptaking av hel pæl
Figur 35 prøvetaking fra opptrukket pæl

7. Referanser

Svenske geotekniske foreningen Rapport 4:95; Kalk- och kalksementpelare - Vegledning for projektering, utförande och kontroll, 1995

Sveriges geotekniske institutt Rapport No 30; Kalkpelare med gips som tilsatsmedel, Anvendning av kalk-flygaska vei djupstabilisering av jord, Om inverkan av herdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- og cementstabiliserad jord, 1987

Sveriges geotekniske institutt Rapport No 31; Kalkpelarmetoden,- resultat av 10 års forskning og praktisk anvendning samt framtida utveckling, 1986

Sveriges geotekniske institutt Rapport NO 48; Cement og kalk for djupstabilisering av jord - en kjemisk - fysikalisk studie av stabiliseringseffekter, 1995

Chalmers tekniske høyskole; Testing av kalk/sementpeler - eksamensarbeid 1995, Johansson/Jons

Vegdirektoratet, Håndbok 188 - veg på bløt grunn, s 147 - 172, 1995

Publikationer utgivna av Svensk Djupstabilisering

Arbetsrapport

- 1 Arlandabanan, Norra Böjen. Sättningar hos järnvägsbank på kc-pelare.** 1998
Ulf Stjerngren, Jacobson & Widmark
- 2 KC-förstärkning för schakt inom spont, Filipstad Brygge, Oslo.** 1998
Phung Doc Long, Stabilator AB & Håkan Bredenberg, Stabilator AB
- 3 Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cementpelare.** 1998
oeg cementpelare
Stefan Larsson, Tyréns
- 4 Undersökning av KC-pelare med avseende på dess "homogenitet".** 1998
Roland Tränk, SGI
- 5 Bestämning av egenskaper i cellstabiliserad torv.** 1998
Nenad Jelusic, Vägverket Region Mitt, Torbjörn Edstam, SGI & Yvonne Rogbeck, SGI
- 6 Rörelser och portryck vid kalkpelarinstallation. Redovisning av mätresultat.** 1998
Åke Johansson, SGI
- 7 Masstabilisering av väg 590, Askersund.** 1998
Yvonne Rogbeck, SGI
- 8 KC-pelarförstärkning av instabil slänt. E4, delen Nyland - Ullånger, Västernorrlands län. Åtgärder och mätningar.** 1998
Leiv Viberg, SGI, Bertil Eriksson, Vägverket Produktion Mitt & Stefan Johansson, Vägverket Produktion Mitt

Rapport

- 1 Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare.** 1997
Torbjörn Edstam
- 2 Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet. En förstudie.** 1997
Helen Åhnberg & Håkan Pihl



Svensk Djupstabilisering

c/o SGI, 581 93 Linköping
Tel: 013-20 18 61, Fax: 013- 20 19 13
<http://www.sgi.geotek.se/sd.htm>