



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 29
2003-08

Hållfasthetsfördelning i kalkcementpelare – Fältförsök i Strängnäs

Per Hedman
Mari Kuokkanen

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 – 2004. Medlemmar är myndigheter, kalk- och cementleverantörer, entreprenörer, konsulter, forskningsinstitut och högskolor.

Verksamheten finansieras av medlemmarna samt genom anslag från Byggforskningsrådet/Formas, 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 14, e-post: goran.holm@swedgeo.se, internet: www.swedgeo.se/sd.

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 – 2004. Members of the Centre include authorities, lime and cement manufacturers, 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, +46 70 521 09 39, fax: +46 13 20 19 14 or e-mail: goran.holm@swedgeo.se, internet: www.swedgeo.se/sd.



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 29
2003–08

**Hållfasthetsfördelning i kalkcementpelare
– Fältförsök i Strängnäs**

Per Hedman
Mari Kuokkanen

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 ej av SD utan redovisade resultat och framförda åsikter är författarens. Redovisningarna är arbetsrapporter inom SD.

Även redovisningar av vissa FoU-projekt inom SD sker i SD:s arbetsrapportserie. Rapporter i SD:s arbetsrapportserie skall endast användas internt inom SD och ej spridas utanför SD.

I föreliggande SD arbetsrapport redovisas resultat av forskning inom området utförande av djupstabilisering. Det här redovisade projektet omfattar en studie av hållfasthetens variation över pelartvärnsnitten respektive pelarlängden och ingår i det större FoU-projektet ”Vidareutvecklad inblandningsteknik”.

Linköping i augusti 2003

Göran Holm
Projektledare för SD

Arbetsrapport

Beställning
(endast för
medlemmar av SD)

Svensk Djupstabilisering
c/o Statens geotekniska institut
581 93 Linköping

Tel: 013-20 18 42
Fax: 013-20 19 14
E-post: birgitta.sahlin@swedgeo.se

Förord

Föreliggande rapport är en delrapportering av projektet ”Vidareutvecklad inblandningsteknik” inom Svensk Djupstabilisering. Projektet har utförts av LCM och Tyréns AB i samband med byggandet av förbifart av motorväg E20 i Strängnäs, trafikplats Lunda. Initiativtagare till arbetet är Marcus Dahlström och Bengt Nilsson, LCM, i samarbete med Stefan Larsson, Tyréns AB. Pelarinstallationen är utförd av Leif Sämsgård och Bengt Nilsson, båda LCM. Fältprovning, utvärdering och analyser är utförda av författarna. Pelarinstallationen och provningen är utförd vecka 44 och 45, år 2002.

Parallellt med föreliggande arbete i Strängnäs utfördes en studie avseende inverkan av faktorer i installationsprocessen vid djupstabilisering med kalkcementpelare. Resultaten från denna studie är rapporterade i SD-Arbetsrapport 27 (Larsson et al. 2003).

Uppsatsen är också ett examensarbete för civilingenjörsexamen inom ämnesområdet geoteknik vid avdelningen för Jord- och bergmekanik, Institutionen för byggvetenskap, Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Examensarbetet har handletts av Stefan Larsson, Tyréns AB.

Vi vill tacka Stefan Larsson för all tid och allt arbete med handledning av detta examensarbete. Vi vill också tacka Thomas Dalmalm, KTH/NCC, för all hjälp med teori avseende kringning samt råd kring databearbetning. Vidare vill vi tacka Marcus Dahlström och Bengt Nilsson på LCM, Elis Svensson, KTH, Lars Olsson, Geostatistik AB och Staffan Hintze, KTH/Skanska, som varit examinator samt personalen på avdelningen för Jord och Bergmekanik på KTH.

Slutligen vill vi även tacka Magnus Karlsson, Minna Kuokkanen, Stina Myhrman, Helen Åhnberg och Göran Holm för värdefulla kommentarer på rapportens struktur och innehåll.

Stockholm, juli 2003

Per Hedman Mari Kuokkanen

Sammanfattning

Hållfasthets- och deformationsegenskaperna i stabiliserad jord har en naturlig spridning och egenskaperna är relaterade till en skala, de varierar från punkt till punkt. För att kunna bedöma blandningskvalitet baserat på statistiska parametrar såsom t.ex. variationskoefficienten måste fördelningen hos den studerade egenskapen vara känd. Vidare är fördelningsfunktionen viktig i samband med kvalitetskontroll med avseende på hållfasthets- och deformationsegenskaper eftersom den avgör kontrollens omfattning. Influensavståndet, det avstånd där punkter är statistiskt beroende, avgör i vilken skala kontrollen skall utföras för att representativa mätvärden för stabiliseringen skall erhållas. Influensavståndet utgör således ett värdefullt verktyg för val av erforderlig storlek på sonder och provtagningar. Fördelningsfunktionen och influensavståndet är även av betydelse i samband med säkerhetsbegreppet vid design och vid val av partialkoefficienter. Då egenskaper varierar i en stabiliserad jord kan det vara lämpligt att behandla konstruktioner med en sannolikhetsbaserad design. Detta är dock inte väl etablerat idag och en orsak kan just vara att det är mycket svårt att prediktera, utvärdera och förstå hållfasthets- och deformationsegenskaper.

Detta examensarbete ingår som en del av projektet "Vidareutvecklad blandningsteknik" som är en del av forskning och utveckling inom det branschgemensamma forskningsprogrammet Svensk Djupstabilisering. Den naturliga variationen i hållfasthet över pelartvärnsnitt har studerats. Examensarbetet redovisar resultat från ett fältförsök där ett stort antal penetrometerförsök utfördes på framschaktade pelartvärnsnitt på olika nivåer. Syftet med examensarbetet har varit att studera den naturliga variationen i hållfasthet över pelartvärnsnitt för att kunna bestämma vilken fördelning hållfastheten kan antas tillhöra. Syftet har även varit att uppskatta influensavståndet i både horisontal- och vertikalled, samt att ta reda på antalet erforderliga försök som krävs för att resultaten ska vara statistiskt säkerställda.

Fältförsöket utfördes i Strängnäs i samband med byggandet av förbifart av motorväg E20. Studien utfördes på sex kalkcementpelare där endast stigningen varierats medan övriga installationsparametrar samt andra inverkanse faktorer antas vara konstanta. Kalkcementpelarna testades med en fältpenetrometer med vilken 42 tvärsnitt på nio olika nivåer provades. Pelarna schaktades ner till varje provtagningsdjup med grävmaskin. Provtagning skedde på följande nivåer: 1,3 m, 1,7 m, 1,95 m, 2,2 m, 2,55 m, 2,85 m, 3,25 m, 3,45 m och 3,85 m. Med 48 försök på varje tvärsnitt innebar detta totalt ca 2000 penetrometerförsök. Dessutom utfördes ett antal provtryckningar i omgivande ostabiliserad jord. Fjäderdeformationen har använts som ett relativt mått på hållfastheten i pelaren. Penetrometerförsöken är jämnt fördelade över hela tvärsnittet för att ge en bild av hållfasthetsfördelningen. Som en komplettering till penetrometerförsöken utfördes även en okulär besiktning.

Fältdata har bearbetats med statistiska metoder, främst autokorrelation och kriging. Standardavvikelsen, variationskoefficienten, antal erforderliga försök, hållfasthetsfördelningen och influensavståndet har beräknats.

Resultaten från studien kan sammanfattas i följande punkter:

- Hållfastheten kan antas vara normalfördelad över pelartvårsnittet. Influensområdet är i storleksordningen 0,07-0,33 m.
- Hållfastheten för hälften av pelarna visade sig vara radiellt korrelerad, vilket innebär att bindemedelsspridningen beror på installationsförfarandet.
- Variationskoefficienten är liten när hållfastheten är stor och vice versa.
- Antal försök som krävs för att resultatet skall vara statistiskt säkerställt ökar med ökande variationskoefficient.
- Hållfastheten kan variera avsevärt i pelare som installerats på samma sätt vilket innebär att fåtalsprovning kan leda till missvisande resultat.
- Antalet försök som erfordras vid testning av hållfasthetsfördelningen över pelartvårsnitt kan inte bestämmas innan några försök utförts. Antal erforderliga försök kan bestämmas utifrån en uppskattad storleksordning på medelvärdets noggrannhet och variationskoefficient. Den okulära besiktningen är ett bra komplement till provningen med fältpenetrometern.
- I vertikalled ligger influensavståndet i intervallet 0,38-1,12 m. Resultaten är utvärderade från fjäderdeformationens medelvärde för varje tvårsnitt.
- Det visade sig att kriging är en bra metod för att åskådliggöra hållfasthetens spridning över tvärsnittsytan. Denna metod har ett stort användningsområde även inom andra tillämpningar.

Summary

The strength and deformation characteristics for stabilised soils have a natural dispersion and they are related to a scale, they vary from point to point. To be able to determine the mixing quality based on statistical parameters such as the coefficient of variation the distribution for the studied property must be known. Further the distribution function is essential in connection with quality control in reference to the strength and deformation characteristics because it decides the extent of the control. The distance of correlation, the distance where points are statistically dependent, i.e. the points have the same characteristics, decides in which scale the control will be performed to be able to receive representative measures for the stabilisation. The distance of correlation makes thus a valuable tool for choosing the required size for probes and samples. The distribution function and the distance of correlation are also essential in connection with the term of safety in design and in choosing coefficients. Due to the fact that the properties in a stabilised soil vary it can be appropriate to handle constructions with a probabilistic design. Nevertheless this is not well established today and a reason can be that it is rather difficult to predict, evaluate and understand strength and deformation characteristics.

This thesis presents the results from a field test as a part of a research project for the Swedish Deep Stabilization Research Centre (SD) concerning development of the installation process for lime-cement columns by deep mixing. The natural variation for the strength distribution over the cross section has been studied. This thesis presents results from a field test where a large number of penetrometer tests were performed on excavated column cross sections on different levels. The main purpose of this thesis was to study the strength distribution in order to assigning probability distribution and the distance of correlation in both horizontal and vertical direction. The purpose has also been to establish the required number of tests that is needed to be able to defend the results statistically.

The field test was carried out in Strängnäs in connection with the construction site of Europe road, E20, 70 km west of Stockholm. The study was carried out for six lime-cement columns, for which only the retrieval rate was varied, all other parameters were held constant. The tests were carried out a week after installation. The test columns were excavated down to nine different levels in open test pits, where tests were carried out with a hand-operated penetrometer. The tests were carried out for the following levels: 1.3 m, 1.7 m, 1.95 m, 2.2 m, 2.55 m, 2.85 m, 3.25 m, 3.45 m and 3.85 m. Each column was tested with 48 hand-operated penetrometer tests, which leads to a total of 2000 tests. In addition to the tests on the columns, hand-operated penetrometer tests were also carried out for the unstabilised soil. The spring deformation, i.e. the result from the hand-operated penetrometer, has been used as a relative measure for the strength in the column. The tests have been evenly distributed over the whole cross section, to be able to give as correct picture as possible of the strength distribution. A visual examination of each cross section has also been carried out in order to complement the penetrometer tests.

In order to examine the properties of the unstabilised soil, undisturbed samples were taken at the test site and they were evaluated with e.g. fall-cone tests.

The results from the field test have been evaluated with statistical methods, mainly autocorrelation and kriging. This in order to be able to determine the following parameters: the standard deviation, the coefficient of variation, minimum required number of tests, the strength distribution and the distance of correlation.

The concluding remarks drawn from this study are summarized in the following points:

- The distribution for the strength can be assumed to follow normal distribution for the columns. The distance of correlation in horizontal direction is in the interval 0.07-0.33 m.
- For half of the columns the strength appeared to be correlated radially, i.e. points at equal distance from the centre are correlated with each other instead of points close to one another. This implies that the binder dispersion depends on the installation procedure.
- The coefficient of variation is low when the strength is high and vice versa.
- The number of required tests that is needed to be able to defend the results statistically increases with increasing coefficient of variation.
- Testing only a small number of columns can lead to misleading results under the current conditions, due to the fact that the strength varied considerably at the test site.
- The number of tests that is required in order to determine the strength distribution can not be determined before the tests has been performed. The number of required tests can be evaluated from an imputed magnitude for the mean spring deformation and the coefficient of variation. The visual examination is a good complement when testing with the penetrometer.
- The distance of correlation in vertical direction is in the interval 0.38-1.12 m. The results are evaluated for the mean spring deformation for each cross section.
- Kriging proved to be a good method in order to visualize the strength distribution over the cross section. This method has a large application even in other areas.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	5
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Syfte	10
1.3 Genomförande	10
2 Kalkcementpelarmetoden	11
2.1 Historik och tillämpning	11
2.2 Blandningsprocess	12
2.3 Bindemedel	12
2.4 Kvalitetskontroll	14
3 Provfältet	17
4 Testpelare	19
5 Försöksprocedur	21
5.1 Allmänt	21
5.2 Fältpenetrometer	22
5.3 Okulär besiktning	22
5.4 Bearbetning av fältdata	23
6 Statistiska analyser	25
6.1 Hållfasthetsfördelning	25
6.2 Konfidensintervall	26
6.3 Kriging	27
7 Felkällor	31
8 Resultat och diskussion	33
8.1 Fjäderdeformation	33
8.2 Hållfasthetsfördelning	35
8.3 Antal försök	37
8.4 Kriging	38
8.5 Fortsatta studier	41
9 Slutsatser	43
Referenser	45

Bilaga A	Tabeller
Bilaga B	Sammanställning av provningen i horisontalled
Bilaga C	Sammanställning av provningen i vertikalled
Bilaga D	Installationsdata
Bilaga E	Pelarsondering
Bilaga F	Variogram för pelarsonderingarna

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Djupstabilisering med kalkcementpelare introducerades på 1970-talet i Sverige, men utvecklingen satte fart först i slutet av 1980-talet, i samband med en större infrastruktur-satsning. Utvecklingen har främst inriktats på nya bindemedel och kombinationer av bindemedel samt större och kraftigare maskiner som gett möjlighet till vidgade tillämpningsområden. Metoden är idag den mest använda jordförstärkningsmetoden för att reducera sättningar och förbättra stabiliteten för främst väg- och järnvägsbankar.

Liksom för naturliga jordar är hållfasthets- och deformationsegenskaperna i stabiliserad jord stokastiskt fördelade. Detta innebär att egenskaperna har en naturlig spridning men också att egenskaperna är relaterade till en skala, de varierar från punkt till punkt. Detta diskuteras i följande tre punkter:

- För att kunna bedöma blandningskvalitet baserat på statistiska parametrar såsom t.ex. variationskoefficienten måste fördelningen hos den studerade egenskapen vara känd, för att det skall vara möjligt att jämföra t.ex. olika installations-förfaranden och blandningsverktyg.
- Fördelningsfunktionen är viktig i samband med kvalitetskontroll med avseende på hållfasthets- och deformationsegenskaper eftersom den avgör kontrollens omfattning. Influensavståndet, det avstånd där punkter är statistiskt beroende, avgör i vilken skala kontrollen skall utföras för att representativa mätvärden för stabiliseringen skall erhållas. Influensavståndet utgör således ett värdefullt verktyg för val av erforderlig storlek på sonder och provtagningar.
- Vidare är fördelningsfunktionen och influensavståndet av betydelse i samband med säkerhetsbegreppet vid design och vid val av partialkoefficienter. Då egenskaper varierar i en stabiliserad jord kan det vara lämpligt att behandla konstruktioner med en sannolikhetsbaserad design. Detta är dock inte väl etablerat idag och en orsak kan just vara att det är mycket svårt att prediktera, utvärdera och förstå hållfasthets- och deformationsegenskaper.

Larsson m.fl. (2002, 2003) har i projektet "Vidareutvecklad blandningsteknik", som är en del av forskning och utveckling inom det branschgemensamma forsknings-programmet Svensk Djupstabilisering, studerat olika faktorerers inverkan på hållfasthets-fördelningen. Studien har omfattat en analys av inverkan av blandningsverktygets utformning, stigningen, rotationshastigheten, munstyckets diameter och tanktrycket. Resultaten visar att stigningen och antalet vingpar hade en signifikant inverkan på både magnituden och spridningen hos hållfastheten samt att det övre vingparet hade en signifikant inverkan på bindemedelsspridningen. Resultaten visar även att varken rotationshastigheten, tanktrycket eller munstyckets storlek hade någon signifikant inverkan.

I projektet har provning endast utförts på två närliggande grunda nivåer, 2 respektive 2,3 m djup, där 20 tryckningar per nivå har utförts med en fältpenetrometer. Provningsen har utförts vid två skilda platser, en i Håby 2001 och den andra i Strängnäs 2002. Detta sätt att prova pelarna medför vissa begränsningar då endast två grunda nivåer är testade. Antalet försök är för litet för att studera vilken typ av fördelning som hållfastheten har.

1.2 Syfte

Som en del av projektet "Vidareutvecklad blandningsteknik" har en fördjupad studie på kalkcementpelare utförts avseende:

- Undersökning av den naturliga variationen i hållfasthet över pelartvårsnitt. Studera vilken typ av fördelningsfunktion som bäst kan anpassas.
- Undersökning av hållfasthetens fördelning över pelarlängden.
- Undersökning av hur hållfastheten varierar. Uppskattning av influensavstånd i horisontal- respektive vertikalled, d.v.s. det största avstånd inom vilket ett provresultat har något inflytande.
- Hur stort antal erforderliga försök som krävs för att provningen skall ge resultat som är statistiskt säkerställda.

1.3 Genomförande

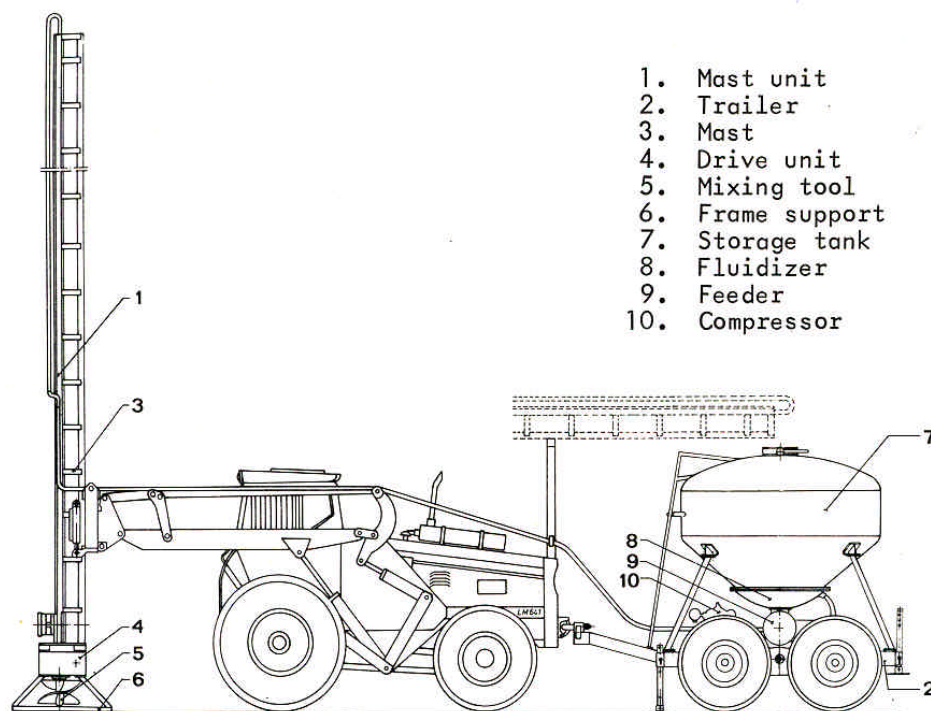
Detta examensarbete inleddes med en litteraturstudie, som främst inriktades på kalkcementpelare med dess tillämpningar och statistiska metoder för att behandla data. Vecka 45, 2002 utfördes ett fältförsök i Strängnäs, där sex pelare installerats för detta examensarbete, (figur 6). Pelartvårsnittet har schaktats fram och provats med en fältpenetrometer på nio olika djup. 42 olika tvärsnitt med 48 prover på varje tvärsnitt har undersökts för att studera hållfasthetens variation. Totalt har ca 2000 penetrometerförsök utförts. Den lilla provstorleken är vald för att möjliggöra en analys av influensavståndet. För att undersöka jordens hållfasthetsegenskaper har laboratorieförsök utförts på kolvprover tagna vid fältförsöket. Statistiska analyser har utförts på prover från pelarna för att undersöka hållfasthetsfördelningen. I huvudsak har resultaten behandlats med autokorrelation och kriging. Resultaten redovisas och diskuteras samt förslag till fortsatt forskning ges. Den beskrivna testmetodiken är inte framtagen för produktionsmässig kontroll av kalkcementpelare. Avsikten är inte att använda resultaten från denna studie för design och studien relaterar inte heller till stabiliseringens funktion.

2 Kalkcementpelarmetoden

2.1 Historik och tillämpning

Att stabilisera lera med hjälp av kalk är ingen nyvunnen upptäckt. För över 5000 år sedan uppfördes i Tibet pyramider med hjälp av en blandning av lera och kalk. Denna vetenskap har tagits tillvara i modern tid. Ytstabilisering med kalk har sedan länge varit en vitt utbredd metod för att stabilisera lerig underbyggnad vid vägbyggnationer och den används idag i stora delar av världen, t.ex. Finland, Japan, Storbritannien, Sverige, Thailand och USA (Bruce et al. 1999).

En viktig milstolpe i kalkstabiliseringens historia skedde i slutet av 1960-talet då det uppdagades att lodräta pelare av kalkinblandad jord kunde förstärka instabila och sättningsbenägna jordar. Pelarna kunde bära överliggande konstruktioner genom samverkan med den omkringliggande ostabiliserade leran. Kjeld Paus metod gick ut på att in-situ blanda in osläckt kalk i jorden och på så sätt få en pelare av hårdnande kohesionsmaterial (Larsson 2000). Laboratorieförsök utfördes av SGI för att studera bindemedel och fastställa ett lämpligt installationsförfarande. Till en konferens 1975 var två artiklar som behandlar pelarstabilisering inskickade. Den första kom från Sverige och den andra kom från Japan (Bruce et al. 1999). Tekniken för stabilisering av lerjordar hade utvecklats parallellt i de två länderna. 1977 presenterades den första handboken (Broms&Boman 1975), utgiven av Statens geotekniska institut (SGI). Den behandlade dock enbart förstärkning med osläckt kalk.



Figur 1. Installationsmaskin Volvo BM 641 (Assarson 1977).

I början av 1970-talet var det svenska byggandet mycket intensivt och många byggföretag sökte efter områden att expandera inom. Linden-Alimak (Bruce et al. 1999) använde sig av forskningsresultat från SGI och KTH för att ta fram en prototyp av en installationsmaskin, (figur 1). Marknaden för kalkpelare var dock liten fram till slutet av 1980-talet då utvecklingen tog fart på allvar. Parallellt utfördes forskning och utveckling av kalkpelarmetoden i Japan (Schaefer et al. 1997). Syftet med deras arbete var främst att finna en metod för att stabilisera marina leror under havsbotten. Det första projektet utfördes 1974 i Japan då kalkpelare installerades.

I Japan utvecklades även den ”våta metoden” som innebär att bindemedlet, oftast cement, förblandas med vatten och blandas i jorden i vätskeform. 1976 startade utveckling och forskning på djupstabilisering där torrt cementpulver används som bindemedel. 1980 utvecklades tekniken med osläckt kalk i pulverform av ”Ministry of construction”, en metod som var mycket lik den svenska (Bruce et al. 1999).

Stabilisering med kalk i jordar med stort organiskt innehåll t.ex. torv, fungerar inte bra. (t.ex. The Finnish Road Administration 2001, Åhnberg m.fl. 1995). Erfarenheter från Vietnam visade att om kalk och cement blandades fungerade metoden även i dessa jordar. Användning av 50/50 osläckt kalk och standard portland cement blev därför snabbt en standardblandning (Bredenberg 1999).

Kalkcementpelaremetoden används mest för stabilisering av järnvägs- och vägbankar. Andra tillämpningar är t.ex. att förbättra stabiliteten vid schaktning, att minska sättningar och vibrationer samt vid grundläggning av hus (LCM 2003). De senaste fyra-fem åren har användningen av kalkcementpelare ökat kraftigt. Idag utförs ungefär tre-fyra miljoner meter djupstabilisering med kalkcementpelare årligen i Sverige (Svensk djupstabilisering 2003).

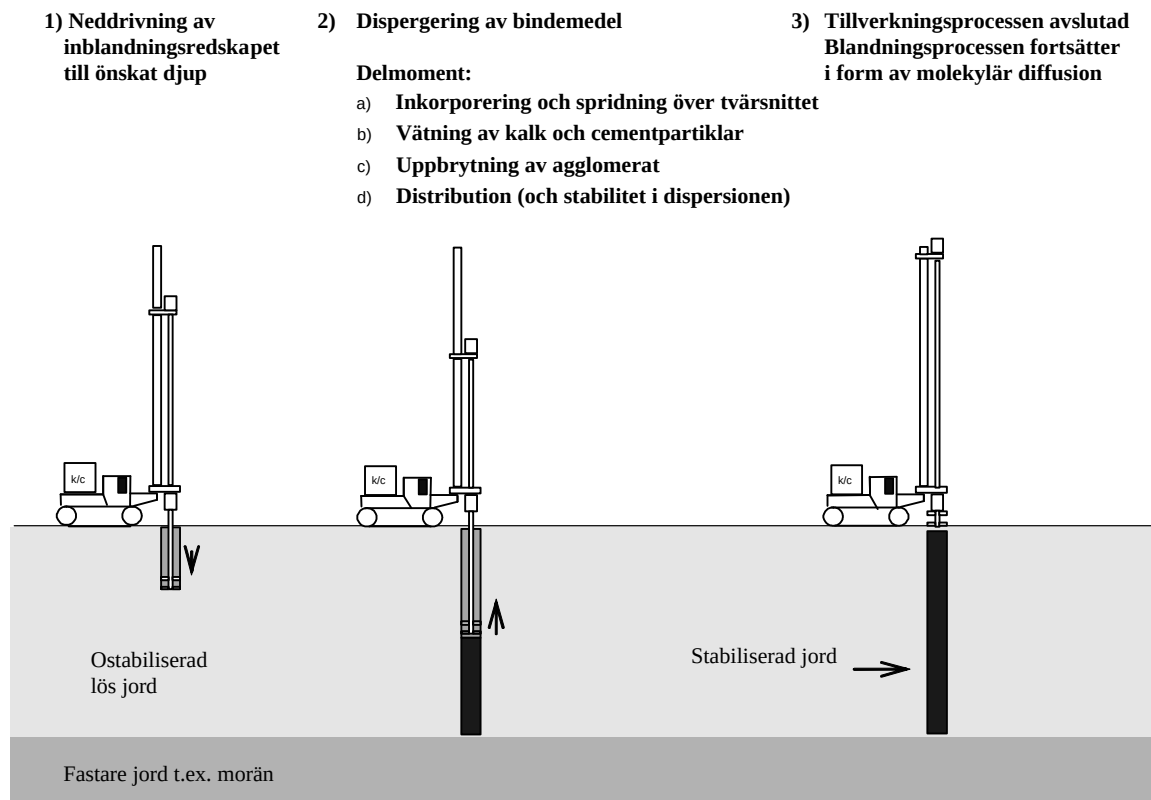
2.2 Blandningsprocess

Kalkcementpelare kan utföras både med torr och med våt metod. I Sverige är torrmetoden vanligast, (figur 2). Vid utförande av kalkcementpelare trycks och roteras blandningsverktyget först ner till avsett pelardjup. Där byts rotationsriktning och verktyget dras upp igen. När verktyget dras uppåt injekteras en torr kalkcementblandning ut i jorden med hjälp av tryckluft. Blandningen reagerar med det vatten som naturligt finns i jorden och bildar en pelare med samma diameter som blandningsverktyget. De mest använda pelardiametrarna är 600-800 mm. Vid större diametrar kan det vara svårt att fördela bindemedlet jämnt över hela tvärsnittet. Det är viktigt att vid matningen av bindemedlet använda sig av minsta möjliga mängd tryckluft för att inte störa jorden alltför mycket. För mycket luft kan försämma såväl pelarens hållfasthetsegenskaper som homogeniteten (The Finnish Road Administration 2001).

2.3 Bindemedel

Osläckt kalk var under 1980-talet det överlägset vanligaste bindemedlet. Fördelarna med kalk är dess diffusionsförmåga, vilken i viss mån kan kompensera för ett inhomogent blandningsarbete, samt pelarnas seghet och gynnsamma hållfasthetstillväxt under lång tid (The Finnish Road Administration 2001, Åhnberg m.fl. 1995).

Nackdelarna med kalk är relativt låga hållfastheter och att den inte lämpar sig för organiska jordar. I laboratoriet går det att erhålla mycket höga hållfastheter med cement men i fält är det svårt att uppnå samma höga nivåer p.g.a. inhomogen blandning. Cementpelarna är ofta spröda vilket kan ha en negativ inverkan vid ett progressivt brottförlopp. Det vanligaste bindemedlet sedan 1990-talets början är en kalkcementblandning. Med denna nås oftast en högre hållfasthet än med enbart kalk och dessutom erhålls en bra härdnad i lerskikt med humus, i alla fall med tillräckliga mängder bindemedel. Det vanligaste förhållandet är 1:1, men även andra förhållanden är möjliga rent utförandemässigt. Även andra bindemedel har använts såsom masugnsslagg, flygaska och andra slaggprodukter från industrin (The Finnish Road Administration 2001, LCM 2003).



Figur 2. Blandningsprocessen vid pelarstabilisering¹ (Larsson 2000).

¹Agglomerat: En samling av primära partiklar och aggregat som är sammansatta vid ändar och hörnor kallas agglomerat. Den specifika ytan är inte mycket mindre än summan av beståndsdelarnas area.

Aggregat: Aggregat är grupper av primära partiklar sammanfogade i deras ytor och har en specifik yta mindre än summan av de ingående partiklarna.

Diffusion: Spontan materialtransport eller utbredning av ett ämne, orsakad av slumpvisa förändringar i egenrörelserna hos ämnets atomer eller molekyler.

Dispergering: Fördela (sig) i form av småpartiklar i ett medium vanligen en vätska.

2.4 Kvalitetskontroll

Metoder för kvalitetskontroll utvecklades från geotekniska standardmetoder till specifika penetrationsmetoder för kalkpelare. Till dessa standardmetoder hörde tryck- och viktsondering. Det visade sig att jord förstärkt med kalk var heterogen med ett svagt och poröst håll i mitten av pelaren som uppkom vid installationen. Variationen i resultaten från trycksonderingen var betydande och det visade sig att sonden hade en tendens att följa den svaga zonen i pelarens centrum. Denna metod ansågs därför tidigt som opassande eftersom endast en liten pelarvolym blev testad samt svårigheten med att veta sondens exakta position. I slutet av 1970-talet utvecklades den traditionella pelarsonderingen där den svaga delen i pelarens centrum användes för att styra sonden och säkerställa dess placering. I början av 1990-talet presenterades den omvända pelarsonderingen. Metoden utfördes enligt samma principer som den traditionella pelarsonderingen med skillnad att sonderingen utförs nerifrån och upp genom pelaren (Axelsson & Larsson 2003).

Kontroll utförs för att säkerställa att pelarna uppfyller uppställda krav och för att verifiera dimensioneringsförutsättningar (Axelsson 2001).

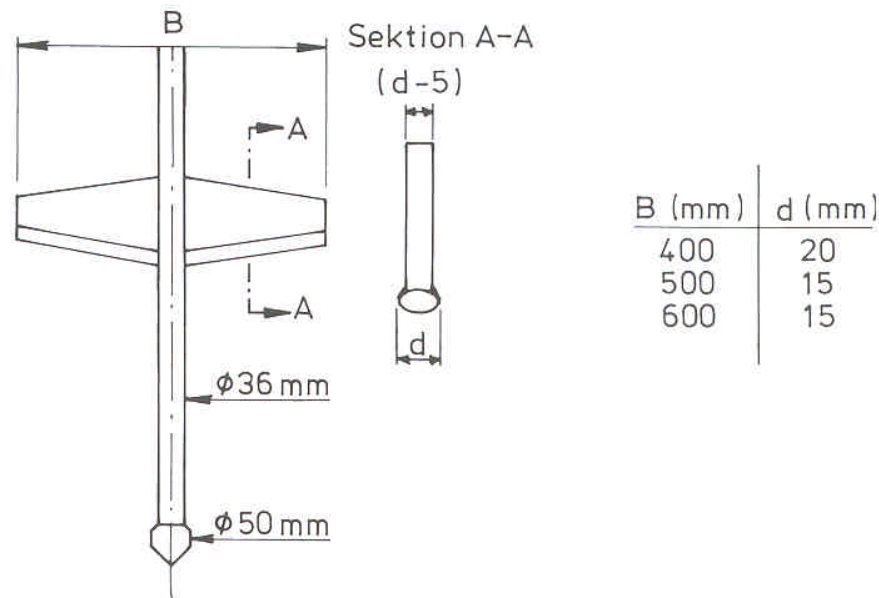
Idag används följande metoder för att kontrollera homogenitet och hållfasthet i kalkcementpelare i Sverige (SGF 2000):

- Tryckt pelarsondering, även kallad kalkpelarsondering.
- Förborrad pelarsondering.
- Omvänd pelarsondering.
- Vingsondering.

Eftersom kalkpelarsondering utförts på produktionspelare i samband med byggandet av förbifart av motorväg E20 i Strängnäs, trafikplats Lunda behandlas endast denna metod närmare i detta examensarbete. Försöken utfördes på provpelare som installerats med samma tanktryck, munstycke, bindemedelsmängd, stigning och rotationshastighet för att kunna utvärdera och jämföra resultaten.

Kalkpelarsonderingen utförs med en sond försedd med vingar som trycks ned i pelaren med sondspetsen i pelarcentrum, (figur 3). Neddrivning av sonden skall ske med en konstant hastighet på 20 mm/s med kontinuerlig registrering av neddrivningskraften. Utan förborring kan 8-10 m långa pelare med en skjuvhållfasthet på 300 kPa provas. Enligt Ekström (1994) kan en förborrad pelare med längden 12-15 m och med en skjuvhållfasthet upp till 600-700 kPa provas.

Vid sondering registreras det totala sonderingsmotståndet som en kraft (kN). Nettokraften beräknas genom att reducera total neddrivningskraft med den andel som beror på mantelfriktion. Nettotrycket beräknas som nettokraften dividerad med tvärsnittsarean på sondens vingar och spets. Utifrån nettotrycket och en bärighetsfaktor kan sedan ett värde på den odränerade skjuvhållfastheten beräknas utifrån en enkel bärighetsekvation (SGF 2000). Mantelfriktionens andel av det totala sonderingsmotståndet uppskattas genom att jämföra sonderingsmotståndet i pelaren med sonderingsmotståndet i ostabiliserad lera.



Figur 3. Pelarsond (SGF 2000).

Det finns begränsningar vid kontroll med kalkpelarsond. Resultaten kan vara något missvisande eftersom den inre delen av pelaren blir överrepresenterad vid kontrollen. Det finns även risk för att sonden kan styra ur pelaren. Det senare går att undvika med ett förborrat hål i pelaren och genom att använda en inklinometer. Den största fördelen med metoden är att den är enkel och att det går att kontrollera stora volymer, d.v.s. stort antal pelare. En annan fördel jämfört med den förinstallerade omvända pelarsonderingen är att testpelarna ej behöver bestämmas i förväg.

Vid användning av den omvända pelarsonderingen föreslås installationen av sonden ske efter pelarinstallationen av följande anledning: Då den förinstallerade omvända pelarsonderingen utförs, installeras sond och pelare samtidigt genom att sonden monteras under verktyget och vajern löper genom kelly-stången. Detta får till följd att luftströmmen genom kelly-stången störs och även bindemedelsflödet. När bindemedlet lämnar verktyget är lufttrycket så lågt att bindemedlet vanligtvis inte når ut till pelarens periferi (Axelsson & Larsson 2003).

Det finns även andra metoder för kontroll av pelarna, t.ex. CPT (Cone Penetration Test). Den har dock inte etablerats i Sverige för detta ändamål p.g.a. svårigheter med att bibehålla vertikaliteten och den begränsade provvolymen som testas, d.v.s. sonden anses vara för liten (Axelsson & Larsson 2003).

Enligt Axelsson (2001) finns idag i Sverige inga kriterier för acceptans utöver utmatad bindemedelsmängd per meter pelare. Det är istället i samråd med beställaren som det avgörs om pelarnas uppnådda hållfasthet kan godtas eller om komplettering måste utföras.

3 Provfältet

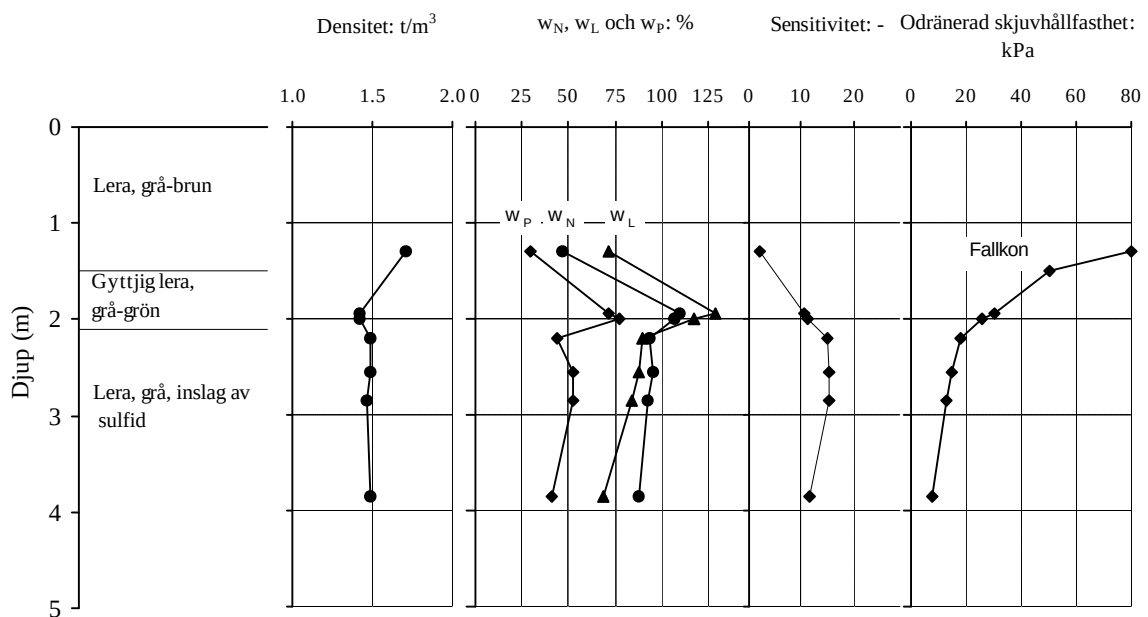
Fältförsöken utfördes vid Lunda, strax utanför Strängnäs ca 70 kilometer väster om Stockholm, intill byggandet av förbifart av motorvägen på E20. Provytan var 4x8 m.

Ett antal kolvprover togs från provytan för att undersöka jordens egenskaper. Prover togs på ett antal nivåer som först schaktats fram med grävmaskin, efter vilket en orörd yta framschaktats med skyffel.

Följande egenskaper utvärderades:

- Skrymdensitet enl. SS 02 71 14 – Skrymdensitet
- Vattenkvot enl. SS 02 71 16 – Vattenkvot och vattenmättnadsgrad
- Flytgräns enl. SS 02 71 20 – Konflytgräns
- Plasticitetsgräns enl. SS 02 71 21 – Plasticitetsgräns
- Odränerad skjuvhållfasthet enl. SS 02 71 25 E – Fallkonförsök
- Rapiditet enl. Söderblom (1974)
- Sensitiviteten är beräknad som kvoten mellan den ostörda jordens- och den störda jordens skjuvhållfasthet.

Resultaten från laborationsförsöken redovisas i figur 4 och bilaga A.



Figur 4. Sammanställning av laboratorieförsök på ostörda jordprover.

4 Testpelare

Pelarinstallationen genomfördes på onsdag vecka 44, 2002 och fältförsöken utfördes på tisdag samt onsdag vecka 45, d.v.s. sex respektive sju dagar efter installationen. Pelarmaskinen samt verktyget som användes vid installationen kan ses i figur 5.

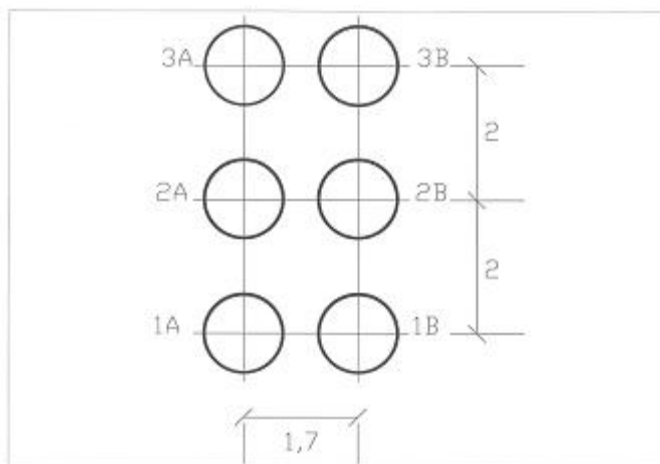
Studien utfördes på sex pelare med två olika inställningar vid pelarinstallationen. Pelarna installerades i två rader, A och B, (figur 6). Tabell 1 visar installationsdata för provpelarna.



Figur 5. a) Pelarmaskin.



b) Verktyg med sex blad (pinborr med tre nivåer).



Figur 6. Pelarplan (Måtten anges i meter).

Tabell 1. Installationsparametrar.

Pelarrad	A	B
Stigning [mm/varv]	15	30
Rotationshastighet [varv/min]	160	
Munstycke [mm]	37	
Tanktryck [bar]	5.5	
Antal vingpar	3	
Pelardiameter [mm]	600	
Pelarlängd [m]	5.5-5.6	
Mängd bindemedel [kg/m pelare]	25	
Bindemedelssammansättning	kalk/cement 50/50 %	
Bindemedelstyp	CL90-O / CEM II / A-LL	

5 Försöksprocedur

5.1 Allmänt

Larsson m.fl. (2002) har visat att fältpenetrometern är en enkel och kostnadseffektiv testmetod för studie av inverkan av faktorer i blandningsprocessen. Vidare har de visat att en okulär besiktning är ett bra komplement till provning med fältpenetrometern.

Första försöket utfördes på 1,3 meters djup varefter försök utfördes på följande djup: 1,70 m, 1,95 m, 2,20 m, 2,55 m, 2,85 m, 3,25 m, 3,45 m och 3,85 m. Tvärsnitten schaktades fram på 4,1 meters djup, men med tanke på säkerheten och den stora risken avbröts försöken. Vid varje provtagningsdjup och pelare utfördes 48 försök med fältpenetrometern, vilket ledde till ca 2000 penetrometerförsök, (figur 7). Dessutom utfördes ett antal försök på omgivande ostabiliserad jord.

Samtliga pelare schaktades fram till 2,85 meters djup, varefter försöken koncentrerades till att gälla endast två pelare med skilda inställningar, pelare 2A och 2B enligt figur 6. Schaktningen utfördes med grävmaskin utrustad med planskopa. Före varje försök planades pelartvärsnitten av för hand med skyffel.



Figur 7. Pelarprovning.

Två mallar av plywood tillverkades för att kunna utföra försöken. Mallarna som hade en diameter på 600 mm, delades in i kvadrater med en sida på 70 mm, vilket leder till 96 hela kvadrater. Hål borrades i varannan ruta för att brottet vid försöken i pelarna ej skulle påverka resultaten för de övriga försöken. Försök utfördes inte allra längst ut på pelarna p.g.a. risken för missvisande resultat. Eftersom mothållet i den kringliggande jorden är mindre än den i pelaren kan en oönskad brottmekanism uppstå, t.ex. att materialet spjälkas upp (Axelsson 2001).

Försöken med penetrometern som var lånad från Chalmers, utfördes av en och samma person för att minimera fel i resultaten.

5.2 Fältpenetrometer

Fältpenetrometern (figur 8) består av en fjäderbelastad cylinder som med handkraft pressas in i pelarmaterialet. När penetrometern belastas trycks fjädern ihop och en släpring trycks upp. Vid avlastning återtar fjädern sitt ursprungliga läge. Släpringen stannar dock kvar i sitt läge och det går enkelt att avläsa fjäderdeformationen på en graderad skala. Fjäderdeformationen har använts som ett relativt mått på hållfastheten i pelaren. Cylindern som användes i detta examensarbete hade diametern 6 mm och den pressades in ca 30 mm i pelarmaterialet. Det är inte lämpligt att använda sig av fältpenetrometern om pelarna hunnit härda för länge p.g.a. osäkra brottmekanismer. Materialet är då sprött och kan lätt spricka upp vid provning.

5.3 Okulär besiktning

För varje pelartvärsnitt utfördes en okulär besiktning innan penetrometerförsöken utfördes. Denna dokumenterades genom fotografering samt några kommentarer om utseendet, t.ex. om det gick att se bindemedel eller om det såg ut att vara homogent blandat samt uppmätning av diametern m.m. Foton och kommentarer kan ses i bilaga B.



Figur 8. Penetrometer.

5.4 Bearbetning av fältdata

Med hjälp av nedanstående ekvationer har fältdata bearbetats. Resultaten redovisas i bilaga A.

Medelvärde för fjäderdeformationen $\bar{d}$, har utvärderats som

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (5.1)$$

där n är antalet försök på ett tvärsnitt och d_i är mätvärdet från respektive penetrometerförsök.

Standardavvikelsen s och variationskoefficienten V har utvärderats som

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (5.2)$$

$$V = \frac{s}{\bar{d}} \quad (5.3)$$

Förstärkningseffekten S_{eff} ger ett mått på hur mycket hållfastheten har ökat i den förstärkta jorden jämfört med den orörda jorden (Larsson m.fl. 2002). Förstärkningseffekten har utvärderats som

$$S_{eff} = \frac{\bar{d}_{pelare}}{\bar{d}_{jord}} \quad (5.4)$$

Ett indirekt mått på blandningsarbetet beskrivs som antalet rotationer per meter pelare T och har utvärderats som

$$T = \sum M \times \frac{1}{s} \quad (5.5)$$

där s är stigningshastigheten hos blandningsverktyget och $\sum M$ är antalet blad på verktyget (Larsson m.fl. 2002).

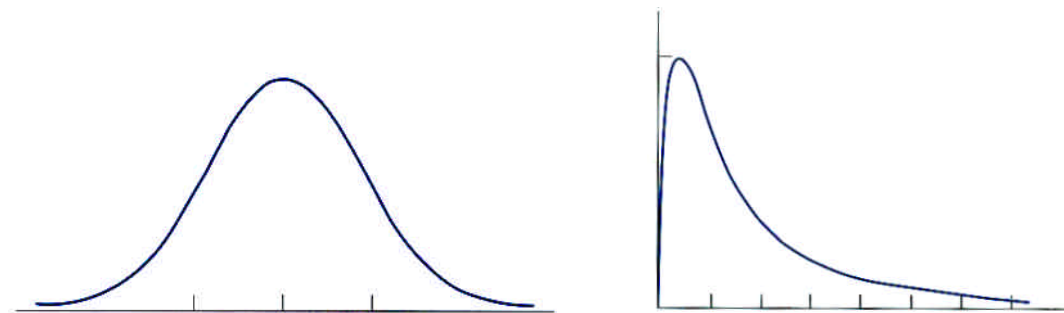
6 Statistiska analyser

6.1 Hållfasthetsfördelning

Allmänt

Det är få författare som har nämnt hur stort antal prover som bör tas för att kunna fastställa vilken fördelning proverna kan tänkas tillhöra (Poux et al. 1991). Enligt Harnby som utförde tester på pulver krävs det 35 prover för att kunna utföra ett normalfördelningstest. Om det inte går att bestämma att även nästa parti av pulver kommer att följa liknande fördelningsmönster är 35 det minsta antal prover som måste tas. Skulle det visa sig att proverna inte är normalfördelade kan den centrala gränsvärdessatsen användas, vilket kräver minst 30 prover (Harnby 1972).

Det saknas studier av hållfasthetsfördelningen över pelartvärnsnitt i Norden, dock har en del studier utanför Norden utförts där hållfasthetsfördelningen har försökt fastställas. Enligt Honjo (1982) visade det sig att normalfördelning råde på de flesta serier i hans studie. I en annan studie utförd av Omine & Ochiai (2001) antar den odränerade skjuvhållfastheten Weibullfördelning. Att normalfördelning råder kan vara ett kvalificerat antagande då den ofta förekommer i "naturliga processer" (Mishra 2002).



Figur 9. a) Normalfördelning.

b) Log-normalfördelning (Johnsson 2000).

Figur 9 visar hur hållfasthetsfördelningen ser ut när den dels är normalfördelad dels log-normalfördelad. Mätvärdet är längs x-axeln, i detta fall fjäderdeformationen, δ [mm]. På y-axeln visas tätheten, $f(\delta)$ [antal].

För att uppskatta hållfasthetsfördelningen användes i denna studie normal- respektive log-normalfördelningstest. Ett normalfördelningstest genomfördes genom att data plottades mot lämpliga skattningar av fördelningsfunktionen i en graf. Om dessa bildar en rät linje tyder det på att datan kommer från den antagna fördelningen.

För att uppskatta lämplig hållfasthetsfördelning skall det i :te minsta värdet $\delta_{(i)}$ plottas mot fördelningsfunktionens värde $F(\delta_{(i)})$ sannolikheten att få en observation mindre eller lika med $\delta_{(i)}$. F är okänd varför den måste plottas mot en lämplig skattning. En sådan skulle kunna vara i/n som är den empiriska fördelningsfunktionens värde i observationen. $\delta_{(i)}$ plottas då mot det relativa antalet observationer som är mindre eller lika med $\delta_{(i)}$. Detta förfarande kan dock medföra vissa anomalier då den största observationen $\delta_{(n)}$ skall plottas mot 1, som kommer att ligga oändligt högt upp på y-axeln. Det är därför mer lämpligt att plotta $\delta_{(i)}$ mot medianrangen (Klefsjö 1978).

För att undersöka fördelningsfunktionen, F , för en stokastisk variabel kan $\delta_{(1)}, \delta_{(2)}, \dots, \delta_{(n)}$ antas vara ett ordnat stickprov. Dessa observationer skall plottas mot fördelningsfunktionens värde i denna punkt, d.v.s. mot $F(\delta_{(i)})$. Men F är okänd och den måste skattas på lämpligt sätt. Ett sätt att skatta $F(\delta_{(i)})$ är med medianen i fördelningen d.v.s. med det värde $u_i^{(n)}$ som är lösningen till $G(u_i^{(n)}) = 0,5$ d.v.s.

$$\int_0^{u_i^{(n)}} \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} y^{i-1} (1-y)^{n-i} dy = 0,5 \quad (6.1)$$

där $y = F(\delta)$ och u är medianrangen. Medianrangen kan approximeras med

$q = \frac{i-0,3}{n+0,4}$ (Bernards formel). Det absoluta felet är i detta fall mindre än 0,00125, varför denna approximation antas vara tillräcklig för praktiska bruk (Klefsjö 1978).

Fördelningstesten har utförts med hjälp av datorprogrammet MINITAB, som ger en graf med data plottad mot medianrangen. Programmet ger också ett mått på hur väl de plottade värdena anpassas mot en rät linje (P-värde). P anger sannolikheten att de plottade värdena antar fördelningen. För att genomföra log-normalfördelningstestet, logaritmerades data och plottades på samma sätt som i normalfördelningstestet.

6.2 Konfidensintervall

Allmänt

Enligt Poux et al. räcker det i allmänhet med 20-40 prover för att kunna ge information om homogeniteten i en blandning. Provtagningsställena måste dessutom vara spridda över hela volymen för att kunna ge en global överblick över blandningstekniken. Detta leder till att slumpning av provtagningsställena måste förekomma. I denna studie har så många prover som möjligt utförts för att återspegla spridningen över ett pelartvärnsnitt. Syftet med detta har varit att erhålla underlag för att bedöma antalet prover som krävs. Eftersom proverna i denna studie täcker hela ytan krävs inte slumpning.

Konfidensintervall används för att bestämma hur många mätningar som behöver utföras på varje tvärsnitt för att resultaten skall vara statistiskt säkerställda.

$$I_{\bar{d}} = \bar{d} \pm l_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.2)$$

där $I_{\bar{d}}$ är konfidensintervallet, $\bar{d}$ är medelvärde av fjäderdeformationen, $l_{\alpha/2}$ är en faktor som antar värdet 1,96 för 95%-igt konfidensintervall, s är standardavvikelsen och n är antalet försök (Blom 1989). Med ett 95 %-igt konfidensintervall menas att 95 % av alla prov faller inom intervallet.

I detta fall är standardavvikelsen s inte känd utan måste skattas. Normalt när standardavvikelsen är okänd används t-fördelning, men i detta fall är antalet prover stort

($n > 30$) och då är l – fördelningen en bra approximation. Standardavvikelsen s skattas som standardavvikelsen, s för de 48 tagna proverna (Blom 1989).

Konfidensintervallets längd, L , är:

$$L = 2 * l_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.3)$$

vilket leder till att antalet försök, n , ges av:

$$n = \left(\frac{2 * l_{\alpha/2} * s}{L} \right)^2 \quad (6.4)$$

Om L är känd ger ekvation 6.4 antalet erforderliga antal försök. L antas vara en procentandel av medelfjäderdeformationen.

6.3 Kriging

Allmänt

Kriging är en interpolationsmetod som är uppkallad efter den sydafrikanska gruv-ingenjören D.G. Krige som utvecklade en teknik för att kunna kartlägga malmfält.

Kriging används inom geostatistik för att beskriva ytor utifrån uppmätta punkter. Kriging och autokorrelation har tidigare använts i geotekniska undersökningar, t.ex. har Porbaha et al. (1999) studerat hur cementstabiliserad jord varierar på djupet med avseende på resultaten från CPT-sonderingarna. Även Tremblay (2000) har bearbetat data från skjuvhållfasthetsprover utförda med penetrometer- och vingförsök med hjälp av kriging. Dock saknas en redovisning av hur detta gjorts samt ett resonemang om antalet prover. Dessutom har endast ett fåtal punkter använts som indata till kriging.

För att få en uppfattning om hur hållfastheten varierar mellan försökspunkterna på tvärsnitten med uppmätt hållfasthet har kriging använts i denna studie. Kriging är baserad på antagandet att parametrar som skall bli interpolerade kan beskrivas som rumsliga variabler. En rumslig variabel är ett mellanting mellan en slumpmässig och en deterministisk variabel i det att den varierar på ett kontinuerligt sätt från en plats till en annan. För att utföra kriging måste vissa parametrar vara kända. Dessa ges av ett variogram där mätpunkterna har bildat nya punkter genom att de har parats ihop inom bestämda steglängder. Genom att plotta punkternas varians mot avståndet mellan punkterna i variogrammet, kan influensavståndet bestämmas. Influensavståndet är det avstånd inom vilket punkterna antas vara korrelerade. För att kunna utföra kriging måste en känd kurva som ger de nödvändiga parametrarna anpassas till punkterna i vario-grammet. Med hjälp av dessa parametrar kan kriging utföras genom att vikta de omgivande punkternas värden. Resultatet blir en figur som visar värden även mellan de uppmätta punkterna. Utifrån dessa figurer kan en visuell bedömning ske om variation över tvärsnittet (Kriging).

Teori

En egenskap hos jorden i en punkt (x) kan beskrivas som $\delta(x)$ och samma egenskap i en annan punkt på avståndet (h) kan beskrivas som $\delta(x+h)$. För små (h) kommer punkterna att vara beroende av varandra, medan för stora h kommer punkterna att vara statistiskt oberoende. Vid något (h) kommer värdet $\delta(x)$ bli oberoende av $\delta(x+h)$. Detta värde definierar influensavståndet (Porbaha et al. 1999).

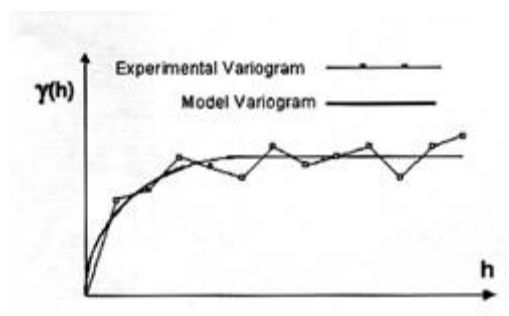
Det första steget i kriging är att göra ett variogram utifrån paren av punkter som skall interpoleras. Ett variogram består av två delar: en kurva som baseras på de mätvärden som används och en modellkurva. Antag att värdena som skall interpoleras benämns δ . Försökskurvan tas fram genom att beräkna variansen (γ) i varje enskild punkt i området med hänsyn till samtliga omgivande punkter och sedan plotta variansen mot avståndet (h) mellan punkterna.

För att bestämma en stokastisk modell över egenskapernas variation mellan två punkter som är separerade med avståndet (h) har variogram använts. Variogrammet som betecknas $2\gamma(h)$ ger variationen i parametern δ mellan två punkter:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [d(x_i) - d(x_i + h)]^2 \quad (6.5)$$

där n är antalet mätningar som utförts med separationsavståndet h och x_i är placeringen av en punkt i förhållande till en referenspunkt. Division med 2 ger semivariogrammet $\gamma(h)$ (Porbaha et al. 1999, Berthouex & Brown 1994, Wackernagel 1998).

När försökskurvan är bestämd är det dags för nästa steg som är att definiera ett modellvariogram. Det är en enkel matematisk funktion som beskriver den verkliga kurvan, vilket kan ses i figur 10. Formen på modellvariogrammet visar att vid små separationsavstånd är variansen till δ liten, d.v.s. punkter som ligger nära varandra har liknande δ -värden. Efter en viss grad av separation, kommer variansen i δ -värdena att uppträda slumpmässigt och modellkurvan planar ut mot ett värde som motsvarar den genom-



Figur 10. Semivariogram (Kriging).

snittliga variansen. De vanligast förekommande modellerna är sfärisk, exponentiell eller gaussisk. När modellvariogrammet är klart, kan de omgivande punkternas influens (vikt) beräknas, för att användas vid kriging. Grundekvationen som används för ordinär kriging är (Isaacs & Srivastava 1989):

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i d_i \quad (6.6)$$

där n är antalet punkter i gruppen, δ_i är punktens värde och w_i är den korrelerade punktens vikt.

För att t.ex. interpolera en punkt P baserad på de omgivande punkterna P_1 , P_2 och P_3 , måste vikterna w_1 , w_2 och w_3 bestämmas. Dessa kan bestämmas med hjälp av följande ekvationer (Kriging):

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + w_3 S(d_{13}) &= S(d_{1p}) \\ w_1 S(d_{12}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) &= S(d_{2p}) \\ w_1 S(d_{13}) + w_2 S(d_{23}) + w_3 S(d_{33}) &= S(d_{3p}) \end{aligned} \quad (6.7)$$

där $S(d_{ij})$ är modellvariogrammet bestämd på ett avstånd lika med det som mellan punkterna i och j . $S(d_{1p})$ är t.ex. modellvariogrammet som baserats på avståndet mellan P_1 och P , d är avståndet. Därefter är det enkelt att kontrollera att viktsumman är riktig genom att beräkna (Kriging):

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1,0 \quad (6.8)$$

Detta leder till att vi har 4 ekvationer och 3 obekanta samt en mjuk parameter λ som adderas till ekvationerna, vilket ger följande:

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + w_3 S(d_{13}) + l &= S(d_{1p}) \\ w_1 S(d_{12}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) + l &= S(d_{2p}) \\ w_1 S(d_{13}) + w_2 S(d_{23}) + w_3 S(d_{33}) + l &= S(d_{3p}) \end{aligned} \quad (6.9)$$

Dessa ekvationer beräknades i studien för vikterna w_1 , w_2 och w_3 . δ -värdet i den sökta punkten kan beräknas som (Kriging):

$$d_p = w_1 d_1 + w_2 d_2 + w_3 d_3 \quad (6.10)$$

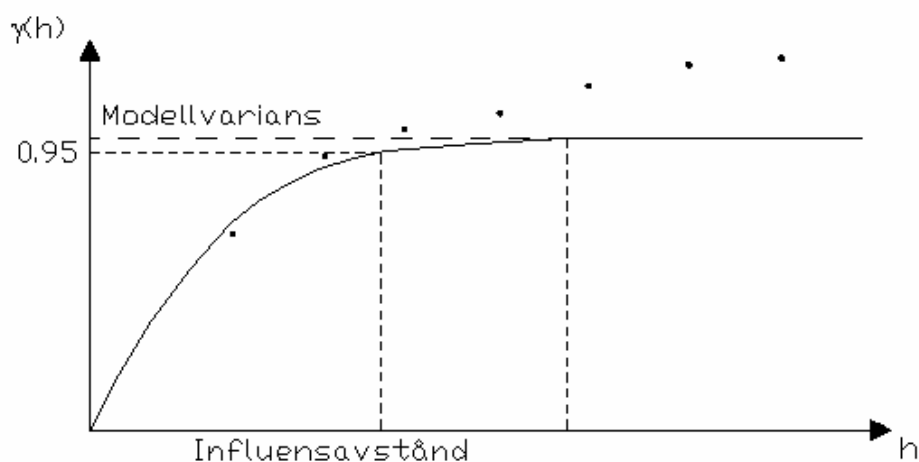
Genom att använda variogram på detta sätt för att beräkna vikterna, kommer det väntade beräkningsfelet att minimeras enligt minsta kvadratmetoden. Därför sägs det att kriging ger "Best Linear Unbiased Estimate" (BLUE). En viktig del av kriging är att variogrammet kan användas för att beräkna det väntade beräkningsfelet för varje interpolationspunkt eftersom

beräkningsfelet är en funktion av avståndet till omgivande punkter. Beräkningsfelet kan bestämmas som (Kriging):

$$s_z^2 = w_1 S(d_{1p}) + w_2 S(d_{2p}) + w_3 S(d_{3p}) + l \quad (6.11)$$

För att utföra krigingberäkningarna har ett antal datorprogram använts, nämnda i ordningsföljd; Prevar2D – för att bestämma hur många par av punkter som är möjliga att interpolera mellan; Vario2D with PCF- för att bestämma antalet steg och steglängd som skall ingå i kriging; Model - för att anpassa en modellkurva i ett semivariogram och bestämma influensavståndet. Dessa tre program ingår i en programvara som heter VARIOWIN 2.2. Dessa tre program genererar indata till krigingberäkningsprogrammet SADA, version 3, i vilket krigingberäkningen i denna studie utförts (Dalmalm 2003).

Till en början var det en del problemlösning innan programmen fungerade (behandlas i Dalmalm 2003). Många parametrar kan varieras innan den färdiga figuren (från Sada), som kan ses i bilaga B och C, är framställd. Antalet steg och steglängder skall bestämmas. Sju steg valdes då det var det största antalet uppmätta punkter som tvärsnitten hade i en följd. Steglängden valdes till 76 mm. Toleransen skulle motsvara halva längden. Sökområdet kring varje pixel som programmet beräknar värdet på sattes till 90 grader och dess tolerans till densamma. Följden av detta blir att programmet interpolerar lika mycket från alla kringvarande punkter och inte beroende på riktning. Ett sökavstånd skall bestämmas. Det valdes till influensavståndet som avläses på x-axeln i semivariogrammet, där den anpassade kurvan tangerar modellvariansen, för den sfäriska modellen, (figur 11). Influensavståndet för den gaussiska och exponentiella modellen avläses på x-axeln där värdet 0,95 gånger modellvariansen nås. För dessa två modeller är variogrammet asymptotiskt med modellvariansen, s^2 . Punkter ovanför modellvariansen antas inte ha någon inverkan, d.v.s. de är oberoende av varandra (Elkateb et al. 2003).



Figur 11. Anpassad modellkurva.

7 Felkällor

Att flera av parametrarna i tabell 1 samt att bl.a. temperaturen, packningsgraden och oberoende parametrar är konstanta är ett mycket grovt antagande. Det har dock som tidigare nämnts visat sig att en del av dessa parametrar har liten eller ingen signifikant inverkan på hållfastheten samt bindemedelsspridningen (Larsson m.fl. 2002, Larsson et al. 2003). Eftersom provområdet är relativt litet ligger pelarna tillräckligt nära varandra för att jordens reologiska egenskaper kan antas vara likartade.

Det kan finnas felkällor vid beräkningarna och antagandena i detta examensarbete, dock kan många av dessa bortses från som tidigare nämnts. Det visade sig dessutom att den utmatade bindemedelshalten varierade upp till 30 % av det nominella värdet på pelarlängden. Eftersom denna antas vara konstant försvåras utvärderingen.

Det finns brister vid provtagning med fältpenetrometern. Dessa har behandlats under kapitel 5.

Det finns en begränsning med utvärderingen av förstärkningseffekten och variationskoefficienten som mått på blandningskvalitén, d.v.s. antagandet om att hållfastheten är direkt proportionell mot bindemedelshalten. Starka samband mellan hållfastheten och bindemedelshalten har påvisats i laboratorieförsök t.ex. Åhnberg et al. 1995. Under fältförhållanden beror hållfastheten även av andra faktorer (Larsson m.fl. 2002).

8 Resultat och diskussion

Diskussionen och resultaten i detta examensarbete gäller för de förutsättningar som rådde vid fältförsöket.

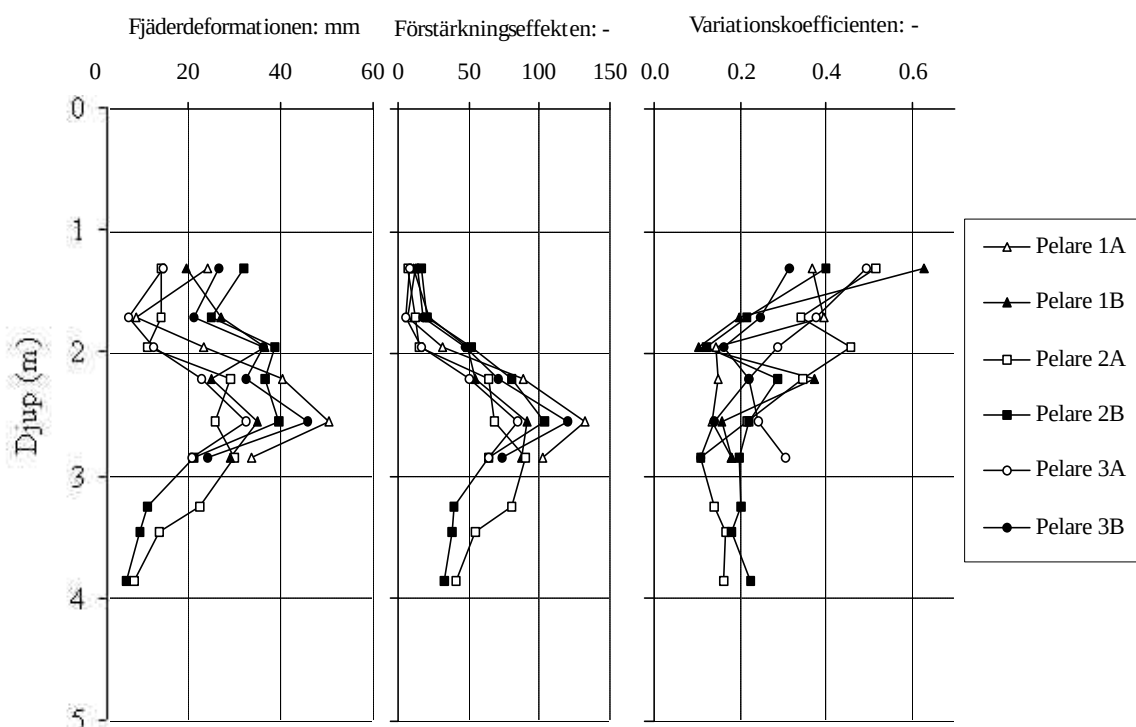
Under detta kapitel presenteras resultaten från fältförsöket. Varje avsnitt börjar med ett resultat varefter en diskussion följer. En del resultat presenteras som figurer.

I bilaga A presenteras resultat på prover tagna med fältpenetrometern samt kolvprover. I bilaga B kan hållfasthetsfördelningen, influensavståndet samt den okulära besiktningen i horisontalled ses. Bilaga C innehåller en sammanställning av provningsresultat i vertikalled. I Bilaga D presenteras installationsdata. Resultat från pelarsondering samt influensavstånd presenteras i bilaga E respektive bilaga F.

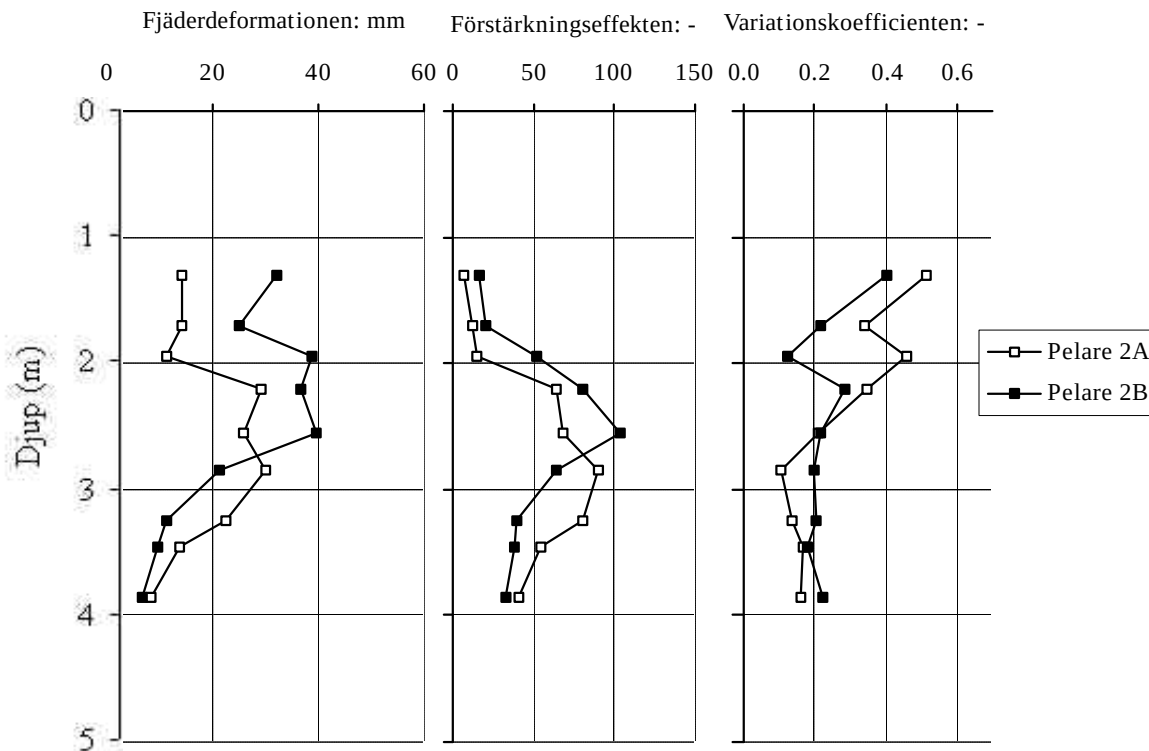
8.1 Fjäderdeformation

- Variationskoefficienten är liten när hållfastheten är stor och vice versa, (figur 12 och 13).
- Under rådande förhållanden kan fåtalsprovning ge missvisande resultat.

Variationskoefficienten minskar med djupet, vilket kan ses i figur 12. Vidare går det att se att när fjäderdeformationen är hög är variationskoefficienten låg och vice versa. Med hjälp av den okulära besiktningen går det att se när variationskoefficienten är stor, vilket



Figur 12. Fjäderdeformationen, förstärkningseffekten samt variationskoefficienten.



Figur 13. Fjäderdeformationen, förstärkningseffekten samt variationskoefficienten i pelare 2A och B.

kan ses i bilaga B. När bindemedel kan ses på tvärsnittet är variationskoefficienten ofta hög. När däremot färgen på pelaren och omgivande jord är likartad är variationskoefficienten ofta låg, $V < 0,25$.

I figur 13 går det att se att pelare 2A till en början har lägre fjäderdeformation än pelare 2B men efter djupet 2,55 m ändras detta och pelare 2A har nu högre fjäderdeformation än pelare 2B. Detta kan möjligen förklaras genom att jämföra med resultaten från pelarsonderingen i bilaga E. Där går det att se en sammanställning av hållfastheten för fyra pelare på två olika platser med samma installationsparametrar. Hållfastheten för en av dessa fyra pelare skiljer sig avsevärt från de övriga tre. Det kan vara så att antingen pelare 2A eller pelare 2B är den avvikande pelaren och därför har inte den ena pelaren konstant högre fjäderdeformation än den andra. Andra förklaringar kan vara olika bindemedelsmängd, naturliga variationer i sonderingsresultat, etc. Detta resultat visar att fåtalsprovning kan leda till missvisande resultat. Jämförelsen mellan dessa metoder är gjord för att pelarsondering har utförts på närliggande produktionspelare samt att det är den vanligaste kontrollmetoden.

Pelarrad A med större blandningsarbete har sämre hållfasthet än pelarrad B i det övre skiktet. En förklaring till detta kan vara att skiktet är hårt och torrt och när det blandas om blir inte jorden finfördelad som i de nedre skikten där det finns större vattentillgång, utan det bildas klumpar. När bindemedlet fördelas ut i detta skikt fördelas den därför inte jämnt över tvärsnittsytan utan det bildas ansamlingar. Normalt torde ett ökat

blandningsarbete ge en bättre blandningskvalitet med avseende på bindemedelsfördelningen och därmed högre hållfasthet, men om inte pelarmaterialet är tillräckligt packat kan ett ökat blandningsarbete medföra en större uppluckring och därmed en större mängd innesluten luft. Enligt detta resonemang måste pelarmaterialet packas i samband med pelarinstallationen eller strax efter för att pelarna skall få en tillfredställande hållfasthet i det översta skiktet. Längre ner i jordlagren blir hållfastheten högre med större blandningsarbete.

Vid provning i den ostörda jorden gav fältpenetrometern mycket små utslag. De uppmätta värdena är därför missvisande eftersom det är svårt att mäta deformationer på bara en millimeter med fältpenetrometern, vilket leder till stor felmarginal. Därför har fjäderdeformationen istället utvärderats med hjälp av en bärighetsekvation, enl. Skemptions graf (Smith 1990).

8.2 Hållfasthetsfördelning

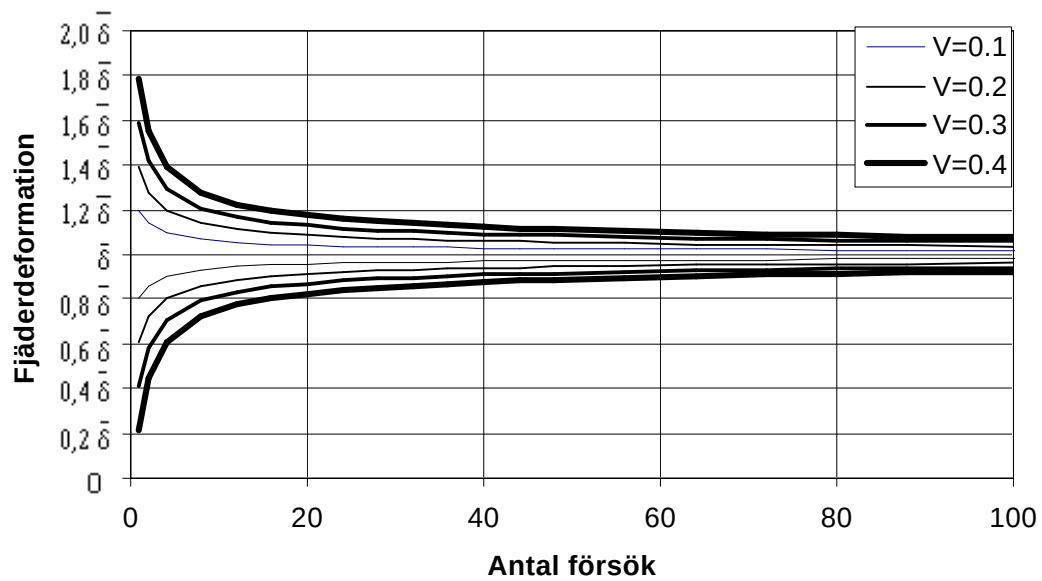
- För 88 % av pelartvårsnitten är hållfastheten normalfördelad på 5 % signifikansnivå.

Figur a i bilaga B är ett normalfördelningstest utfört i programmet MINITAB. Den visar huruvida fördelningen av fjäderdeformationen kan antas vara normalfördelad. Figur c är ett histogram som beskriver fördelningen av fjäderdeformationen i givna intervall. Fjäderdeformationen har använts som ett relativt mått på hållfastheten i pelaren.

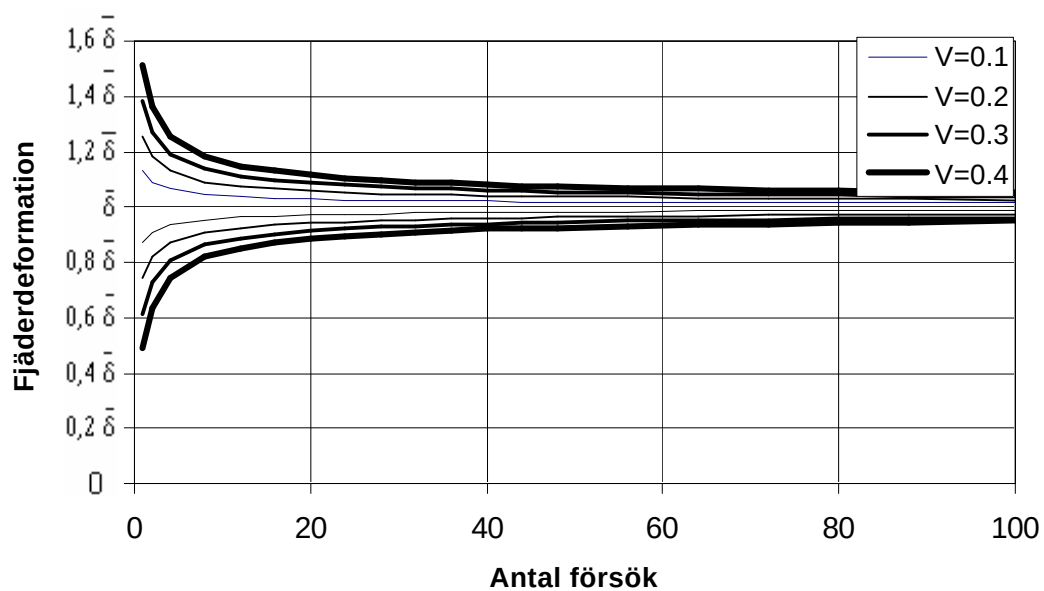
För endast fem av de 42 tvärsnitten kan hypotesen om att tvärsnittets hållfasthet är normalfördelad på 5 % signifikansnivå förkastas. Hållfasthetsfördelningen över de övriga tvärsnitten anpassar sig till normalfördelningskurvan och kan därför antas vara normalfördelade. En förklaring till att 12% av tvärsnitten inte är normalfördelade kan vara att alla tvärsnitt helt enkelt inte är det. Två av de resterande tvärsnitten anpassar sig till log-normalfördelning.

”Normalfördelningen används ofta för beskrivning av variationen hos olika företeelser. Stora delar av statistikteorin bygger på denna fördelning. Man bör dock inte tro att normalfördelningen är allenarådande och att en avvikelse från denna behöver innebära något ’onormalt’. Det finns obegränsade möjligheter att finna på teoretiska täthetsfunktioner vilka kan förete god överensstämmelse med insamlade data. Orsaken till att man gärna använder normalfördelningen, där så är möjligt, är att den har flera goda matematiska egenskaper, som gör den enkel att hantera.” Detta enligt Blom (1989).

Hållfasthetsfördelningen kan antas vara normalfördelad, vilket majoriteten av tvärsnitten i denna studie är. T.ex. är tvärsnitt 1A-1.95 och 1B-2.55 normalfördelade vilket kan ses i bilaga B, figur a. Egenskaperna för de resterande tvärsnitten som inte är normalfördelade avviker dock inte markant från de som är normalfördelade.



Figur 14a. Graf där antalet försök kan utvärderas vid känd variationskoefficient, 95 %-igt konfidensintervall.



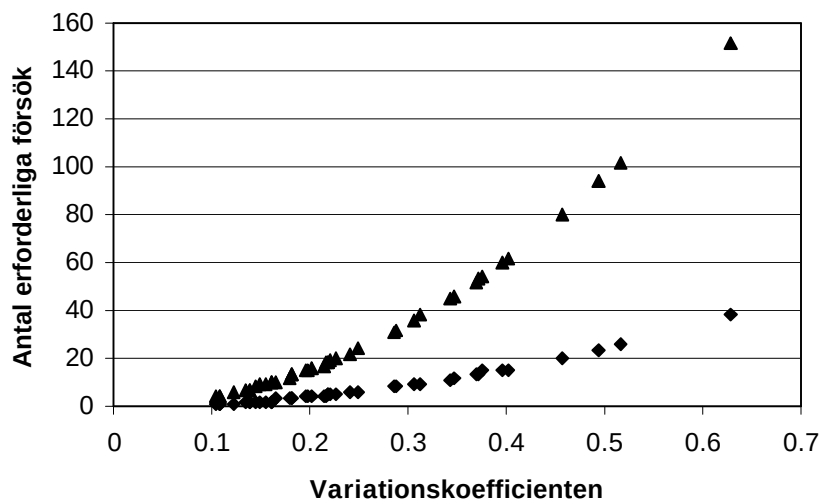
Figur 14b. Graf där antalet försök kan utvärderas vid känd variationskoefficient, 80 %-igt konfidensintervall.

8.3 Antal försök

Antal erforderliga försök som krävs för att resultatet skall vara statistiskt säkerställda ökar med ökande variationskoefficient. Utifrån en uppskattad storleksordning på medelvärdeets noggrannhet samt variationskoefficienten kan erforderliga antal försök bestämmas ur figurerna 14 a och b.

Figur 14 ger antalet erforderliga försök vid känd variationskoefficient. Med ett antaget medelvärde, ex. $\bar{d}$ går det med hjälp av att veta hur stor spridning som kan tolereras, t.ex. 20 % av medelvärdet, ta reda på antal erforderliga försök. Medelvärdet varierar då mellan $0,8\bar{d}$ och $1,2\bar{d}$. Antal försök kan då bestämmas genom att gå in på y-axeln vid $0,8\bar{d}$ och följa den tills kurvan med den kända variationskoefficient nås, varefter antalet försök kan avläsas på x-axeln. Om t.ex. tio försök utförs på vilka medelvärdet och variationskoefficienten beräknas går det att i figur 14 kontrollera om antalet försök är tillräckliga. Om medelvärdet samt variationskoefficienten är okända går det däremot inte att bekräfta antalet försök som krävs med hjälp av denna graf.

Figur 15 visar tydligt att antalet erforderliga försök ökar med ökande variationskoefficient. I figuren redovisas antal erforderliga försök för respektive tvärsnitt med känd variationskoefficient. Antal erforderliga försök är utvärderade från ekvation 6.4 där konfidensintervallets längd antas vara 10 respektive 20 % av medelfjäderdeformationen för ett 95 %-igt konfidensintervall.



Figur 15. Resultaten i grafen är utvärderade ur figur 14a, enligt ekvation 6.4 för alla tvärsnitt.

8.4 Kriging

- Hållfasthetsfördelningen för hälften av tvärsnitten är radiellt korrelerade.

Figur b i bilaga B är ett variogram, som dels beskriver på vilket avstånd punkterna i ett tvärsnitt är korrelerade dels ger nödvändig indata för att kunna utföra kriging. Figur d i bilaga B är en utskrift från programmet SADA som visar fördelningen av fjäderdeformationen i horisontalled. Axlarna samt fjäderdeformationen anges i mm. Figur e är en okulär besiktning av pelarna.

Influensavståndet i horisontalled ligger i intervallet 0,07-0,33 m. Dessa värden är utvärderade från provtryckningar över hela tvärsnittet och redovisas i bilaga B.

Influensavståndet i vertikalled ligger i intervallet 0,38-1,12 m. Resultaten är utvärderade från medelvärdet av fjäderdeformationen för varje tvärsnitt och de redovisas i bilaga C.

Pelarsonderingen ger influensavståndet 0,80-2,25 m (i vertikalled), vilket redovisas i bilaga F.

Varför det blir skillnad i influensavståndet i vertikalled mellan penetrometerförsöken och sonderingen kan bero på att dessa data är utvärderade med olika metoder. Kalkpelarsonden har en yta på 0,01 m² där framförallt pelarens inre delar testas. Vid provtryckning över hela tvärsnittet tas däremot hänsyn till variationer över tvärsnittet i större omfattning. Om det finns en defekt som beror på pelarinstallationen uppfattas kanske inte denna med pelarsonderingen. Cylindern på penetrometern har en area på 28 mm². Med 48 test blir den totala cylinderarean 0,0014 m². En orsak till att influensavståndet blir större med kalkpelarsonden kan således vara att brottytan är större. Det blir då en medelvärdesbildning över en större yta och en sådan har ett större fluktuationsavstånd än medelvärdet över en mindre yta. Ytterligare en orsak till att det blir skillnad mellan dessa två metoder kan vara jordens reologi. Avståndet mellan provfältet där penetrometerförsöken utfördes och sonderingen på produktionspelarna var 20 till 40 m.

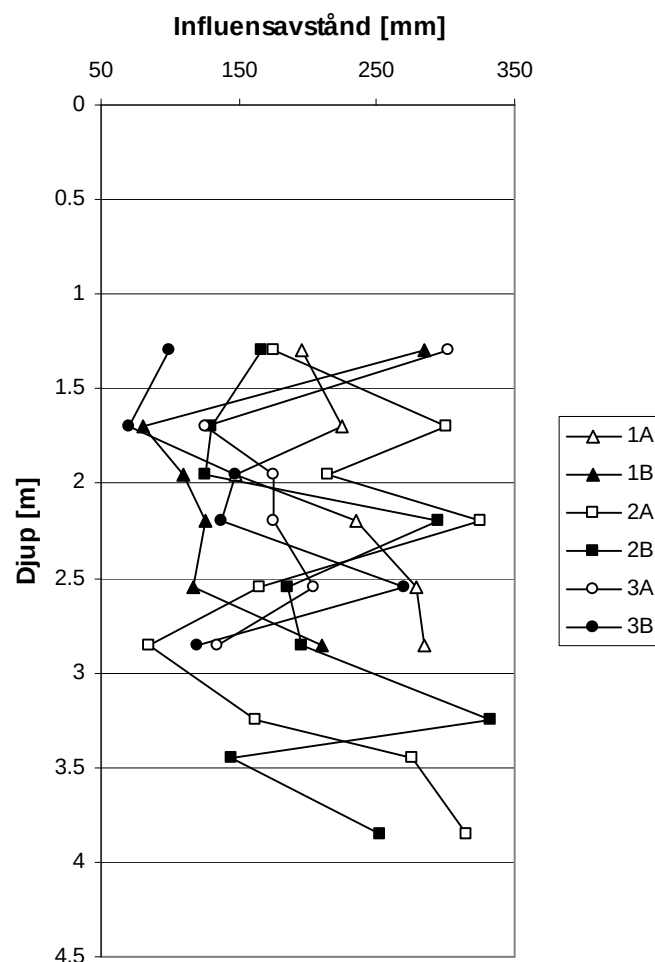
I bilaga B redovisas resultat från provningen i horisontalled, figur b visar ett variogram för respektive pelartvärsnitt. I ungefär hälften av variogrammen går kurvan upp över modellvariansen och sedan ner igen. Detta betyder att de närliggande punkterna är korrelerade med varandra. Men det finns även en korrelation med punkter som ligger längre bort. Detta ses tydligt på krigingberäkningen för samma pelare som visar att punkter som ligger lika långt från centrum på pelaren är korrelerade med varandra, alltså finns det en radiell korrelation. Detta kan ha sin förklaring i utförandet vid pelarinstallationen. Bindemedlet tillsätts i pelaren från centrum på verktyget och fördelas ut mot pelarens periferi med hjälp av tryckluft och verktygets blad.

För att testa antagandet om radiell korrelation i pelarna utfördes kriging på mindre ytor över tvärsnitten. Dessa delades in i fyra kvadranter med centrum i mitten på pelaren för att undersöka om hållfasthetsspridningen är direkt proportionellt mot avståndet från centrum. Det visade sig att bara närliggande punkter var korrelerade, d.v.s. punkter längst ut på pelaren är inte korrelerade med de längst in fastän avståndet är litet. Detta

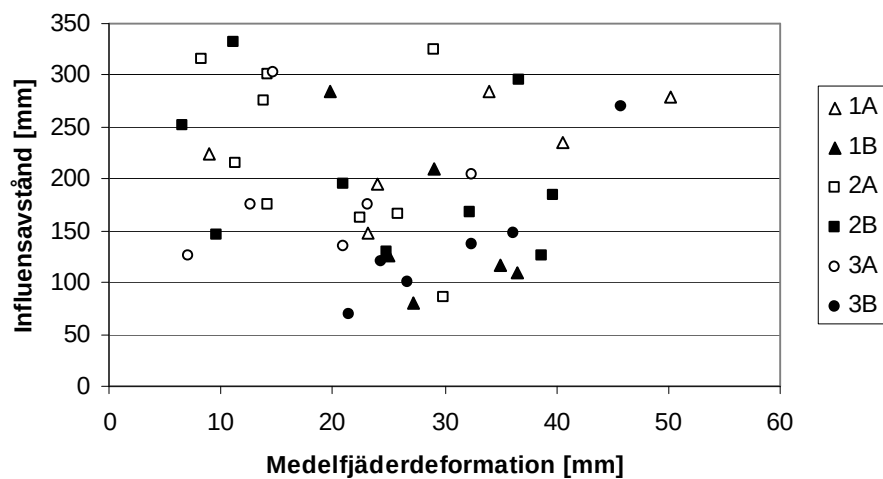
resulterar i att antagandet om en radiell korrelation är rimligt. Liknande resultat har rapporterats av Larsson (2001) som med bindemedelsprover i ett antal kalkcementpelare visade på en radiell korrelation. De tvärsnitt som är tydligt radiellt korrelerade har i de flesta fall kortare influensavstånd än de som inte är radiellt korrelerade.

Om influensavståndet är litet ger försök eller provtagning i liten skala inte information om hela tvärsnittet. Detta beror på att det kan finnas en lokal svaghetszon i tvärsnittet och med provning i liten skala förblir kanske denna svaghetszon upptäckt. Det kan även hända att svaghetszonen blir utsatt för provtagning. I båda ovannämnda fall kan provtagningen leda till missvisande resultat. Eftersom egenskaperna kan vara radiellt korrelerade kan försök eller provtagning med följande metoder ge mycket missvisande resultat: Skruvprovtagning, vingsondering och CPT (Cone Penetration Test).

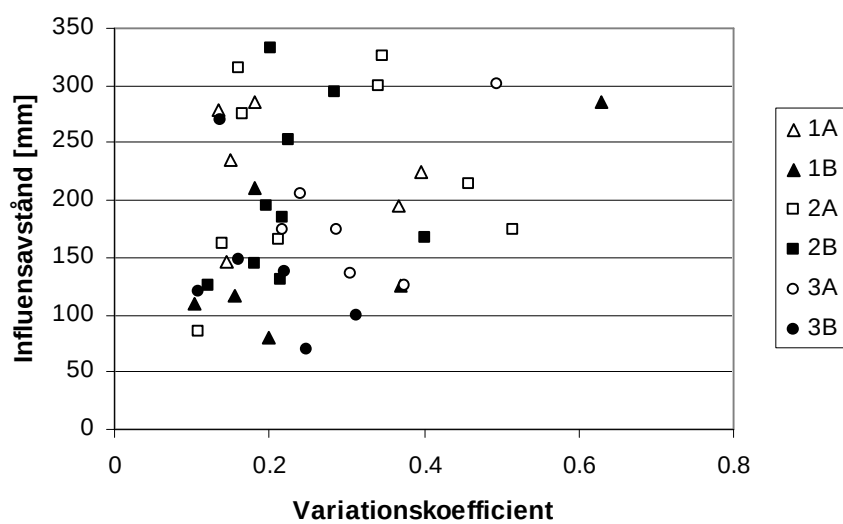
Det har i denna studie inte gått att finna ett tydligt samband mellan influensavståndet och djupet, fjäderdeformationen, variationskoefficienten eller stigningen, (figurerna 16 till 19). Att det inte gått att fastställa ett samband mellan influensavståndet och de ovannämnda parametrarna tyder på att influensavståndet beror på jordens reologiska egenskaper, bindemedelsinnehållet samt förhållanden vid installationen och under härdningstiden (Honjo 1982).



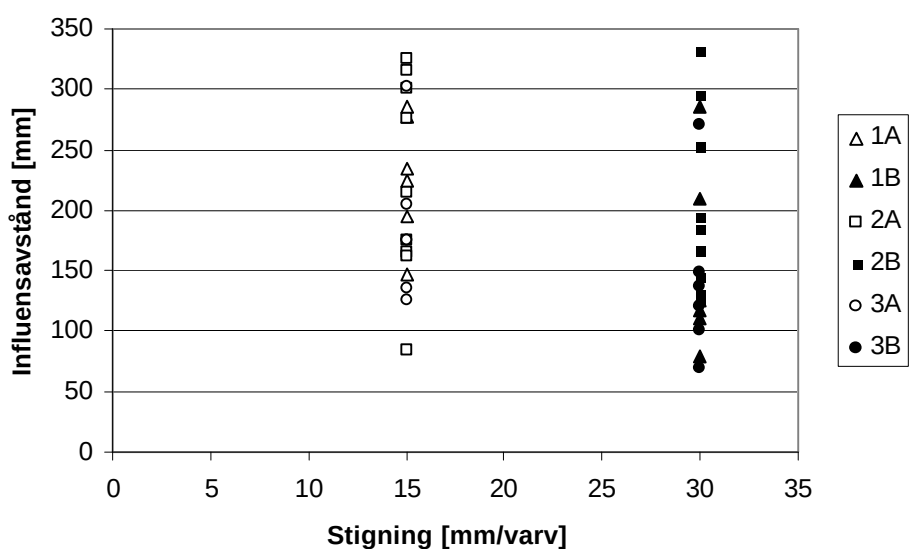
Figur 16. Influensavståndet som funktion av djupet.



Figur 17. Medelfjäderdeformationen som funktion av influensavståndet.



Figur 18. Variationskoefficienten som funktion av influensavståndet.



Figur 19. Stigningen som funktion av influensavståndet.

Mönster som kan avläsas på bilderna från krigingberäkningarna återfinns delvis på fotona från samma tvärsnitt, vilka kan ses i bilaga B. Detta innebär att det är möjligt att uttala sig om hållfastheten med hjälp av en okulär besiktning. Denna kan dock i vissa fall vara missvisande och metoden ger dessutom en subjektiv bedömning av pelaren. En okulär besiktning kan styrka de resultat som fås med kriging men det går dock inte enbart att förlita sig på den.

Fördelen med kriging är att figurerna åskådliggör hållfasthetens spridning på ett enkelt sätt som är lätt att ta till sig även för en lekman på området. Nackdelen är att kriging är mer tidskrävande samt kräver mer matematisk förståelse än liknande metoder, t.ex. isolinjer.

8.5 Fortsatta studier

Nedan följer några förslag för vidare studier på kalkcementpelare:

- Uppföljning av förstärkningseffekten och hållfasthetsfördelningen över pelar-tvärsnitt under en längre period för att se huruvida fördelningsfunktionen och influensområdet varierar med tiden.
- Utföra en liknande studie på dubbel eller trippelpelare ner till större djup för att reducera osäkerheten vid fåtalsprovning.
- Inverkan av jordens reologiska egenskaper på hållfastheten i horisontalld i syfte att studera blandningskvalitén.
- Studera korrelationen radiellt. Finns det något program som interpolerar data radiellt?
- Studera fördelningsfunktionen avseende spridningen i hållfasthet mellan olika pelare, lämpligen med ett större antal kalkpelarsonderingar.
- Fördjupad studie av hur hållfastheten varierar mellan olika pelare. Uppskattning av influensavstånd i horisontalld med avseende på pelarsonderingar. Studera det största avstånd inom vilket en pelarsondering har något inflytande.

9 Slutsatser

Den naturliga variationen i hållfasthet över pelartvärnsnitt har studerats med avseende på resultat från ett stort antal penetrometerförsök. Baserat på resultat och statistiska analyser som presenterats i uppsatsen kan följande slutsatser dras:

- Hållfastheten kan antas vara normalfördelad över pelartvärnsnitten. Influensområdet är i storleksordningen 0,07-0,33 m.
- Hållfastheten för hälften av pelarna visade sig vara radiellt korrelerad, vilket innebär att bindemedelsspridningen beror på installationsförfarandet.
- Variationskoefficienten är liten när hållfastheten är stor och vice versa.
- Antal försök som krävs för att resultatet skall vara statistiskt säkerställt ökar med ökande variationskoefficient.
- Hållfastheten kan variera avsevärt i pelare som installerats på samma sätt vilket innebär att fåtalsprovning kan leda till missvisande resultat.
- Antalet försök som erfordras vid testning av hållfasthetsfördelningen över pelartvärnsnitt kan inte bestämmas innan några försök utförts. Antal erforderliga försök kan bestämmas utifrån en uppskattad storleksordning på medelvärdets noggrannhet och variationskoefficient. Den okulära besiktningen är ett bra komplement till provningen med fältpenetrometern.
- I vertikalled ligger influensavståndet i intervallet 0,38-1,12 m. Resultaten är utvärderade från fjäderdeformationens medelvärde för varje tvärsnitt.
- Det visade sig att kriging är en bra metod för att åskådliggöra hållfasthetens spridning över tvärsnittsytan. Denna metod har ett stort användningsområde även inom andra tillämpningar.

Referenser

- Assarson, K.G., Broms, B.B., Granholm, S. och Paus, K. (1977). Deep stabilization of soft cohesive soils. Linden Alimak, Skellefteå. 49 pp.
- Axelsson, M. (2001). Djupstabilisering med kalkcementpelare – Metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält. Licentiate Thesis 2069, Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm. 196 pp.
- Axelsson, M och Larsson, S. (2003). Column penetration tests for lime-cement columns in deep soil mixing - experiences in Sweden. ASCF, Geotechnical Special Publication No. 120, pp. 681-694.
- Berthouex, P.M och Brown, L.C. (1994). Statistics for Environmental Engineers. Lewis Publishers, Boca Raton. 335 pp.
- Blom, G. (1989). Sannolikhets teori och statistik teori med tillämpningar. Fjärde upplagan. Studentlitteratur, Lund. 357 sidor.
- Bredenberg, H. (1999). Keynote lecture: Equipment for deep soil mixing with the dry jet mix method. Proc. of the Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Stockholm. pp. 323-331.
- Bruce, D.A., Bruce, M.E.C. and Dimillio A.F. (1999). Dry Mix Methods: A brief overview of international practice. Proc. of the Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Stockholm. pp. 15-25.
- Dalmalm, T. (I tryck/ 2003). Grouting prediction system for hard rock. Doctoral Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Ekström, J. (1994). Quality control of limecement columns – Final report of field test at Ljungskile. Report B 1994:3, Chalmers Technical University, Gothenburg. (In Swedish)
- Elkateb, E., Chalaturnyk, R och Robertsson P.K. (2003). An overview of soil heterogeneity: quantification and implications on geotechnical field problems. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, No 1. pp. 1-15.
- Harnby, N. (1972). The statistical analysis of particulate mixtures. Part 1. The sampling of mixtures and the resultant precision of estimates based on the sample. Powder Technology, Vol 5, No. 2, pp. 81-86.
- Honjo, Y. (1982). A probabilistic approach to evaluate shear strength of heterogeneous stabilized ground by deep mixing method. Soils and Foundations, Vol. 22, No 1, pp. 23-38.

Isaacs, E.H and Srivastava, R.M. (1989). Applied Geostatics. Oxford University Press, New York. 561 pp.

Johansson, C och Jons, A.K. (1995). Kalkcementpelartillverkning – En studie av hur olika produktionsfaktorer påverkar pelarnas homogenitet och hållfasthet. Examensarbete 1995:5, Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg. 163 sidor.

Johnsson, R.A. (2000). Miller & Freund's probability and statistics for engineers. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River. 622 pp.

Klefsjö, B. (1978). Tillförlitlighet. Högskolan i Luleå, Luleå. 220 sidor.

Larsson, S. (2000). Blandningsmekanismer och blandningsprocesser – med tillämpning på pelarstabilisering. Licentiate Thesis 2052, Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm. 200 pp.

Larsson, S. 2001. Binder distribution in lime-cement columns. Ground Improvement, Vol. 5, No. 3, pp. 111-122.

Larsson, S, Dahlström, M och Nilsson, B. (2002). Studie av inverkan av faktorer i blandningsprocessen vid djupstabilisering med kalkcementpelare – Fältförsök i Håby. Arbetsrapport 23, Svensk Djupstabilisering, Linköping. 84 sidor.

Larsson, S, Dahlström, M och Nilsson, B. (2003). A complementary field study of the uniformity of lime-cement columns – Field tests at Strängnäs. Arbetsrapport 27. Svensk Djupstabilisering, Linköping. 28 pp.

Mishra, S. (2002). Assigning probability distributions to input parameters of performance assessment models. Technical Report, TR-02-11. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm. 49 pp.

Omine, K. and Ochiai, H. (2001). Prediction of strength of cement-treated soil column based on size effect. Proc. 15th ICSMGE, Istanbul, Vol. 2, pp.1537-1540.

Porbaha, A., Tsuchida, T and Kishida, T. (1999). Technology of air-transported stabilized dredged fill. Part 2: quality assessment. Ground Improvement, Vol 3. pp. 59-66.

Poux, M., Fayolle, P., Bertrand, J., Bridoux, D. and Bousquet, J. (1991). Powder mixing, some practical rules applied to agitated systems. Powder Technology, Vol 68. pp. 213-234.

Schaefer, V.R., Abramson, L.W. Drumheller, J.C. and Sharp, K.D. (1997). Ground Improvement, Ground Reinforcement and Ground Treatment: Developments 1987-1997. 616 pp.

SGF (2000). Kalk- och kalkcementpelare – Vägledning för projektering, utförande och kontroll. Rapport 2:2000. Svenska Geotekniska Föreningen, Linköping. 111 sidor.

Smith, G.N. (1990). Elements of Soil Mechanics. BSP Professional Books, Chatham. 509 pp.

Svensk Standard SS 02 71 14. Geotekniska provningsmetoder – Skrymdensitet. SIS, Stockholm, 1989-04-26, utg 2. 3 sidor.

Svensk Standard SS 02 71 16. Geotekniska provningsmetoder – Vattenkvot och vattenmättnadsgrad. SIS, Stockholm, 1989-09-13, utg 3. 3 sidor.

Svensk Standard SS 02 71 20. Geotekniska provningsmetoder – Konflytgräns. SIS, Stockholm, 1990, utg 2. 5 sidor.

Svensk Standard SS 02 71 21. Geotekniska provningsmetoder – Plasticitetsgräns. SIS, Stockholm, 1990-09-12, utg 2. 2 sidor.

Svensk Standard SS 02 71 25. Geotekniska provningsmetoder – Skjuvhållfasthet – Fallkonförsök - Kohesionsjord. SIS, Stockholm, 1991-09-1, utg 1. 11 sidor.

Söderblom, R. 1974. A new approach to the classification of quick clay research. Reprints and Preliminary Reports, No. 55. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, pp. 13-17.

The Finnish Road Administration. (2001). Planning Manual for Deep Mixing. Helsinki. 46 pp. (In Finnish).

Tremblay, M. (2000). Kalkcementpelarförstärkning för bro, Funktionsuppföljning. Arbetsrapport 17, Svensk djupstabilisering, Linköping. 103 sidor.

Wackernagel, H. (1998). Multivariate Geostatistics. Second edition. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. 291 pp.

Åhnberg, H., Johansson, S-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. och Holm, G. (1995). Cement och kalk för djupstabilisering av jord, En kemisk – fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Rapport 48, Statens geotekniska institut, Linköping. 213 sidor.

Kriging, statistik. http://www.ems-i.com/gmshelp/Interpolation/Interpolation_Schemes/Kriging/Ordinary_Kriging.htm (2002-11-13).

LCM: Tillämpningar av kalkcementpelare. <http://www.limecolumnmethod.se/tillampn.htm> (2003-05-12).

Svensk djupstabilisering. <http://www.swedgeo.se/Sd/deep.asp> (2003-05-05).

Bilaga A

Tabeller

Utvärderade resultat från penetrometerförsök.

Pelare	Djup	Stigning	T	$\bar{\delta}_{jord}^1$	$\bar{\delta}_{pelare}$	V	S _{eff}
	[m]	[mm/varv]	[rot/m]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
1A	1.30	15	400	1.92	24.0	0.37	12.5
1A	1.70	15	400	1.22	8.9	0.40	7.3
1A	1.95	15	400	0.75	23.2	0.15	30.9
1A	2.20	15	400	0.46	40.6	0.15	89.1
1A	2.55	15	400	0.38	50.3	0.14	131.6
1A	2.85	15	400	0.33	33.9	0.18	102.5
1B	1.30	30	200	1.92	19.7	0.63	10.2
1B	1.70	30	200	1.22	27.3	0.20	22.4
1B	1.95	30	200	0.75	36.5	0.10	48.7
1B	2.20	30	200	0.46	25.0	0.37	54.9
1B	2.55	30	200	0.38	35.0	0.16	91.7
1B	2.85	30	200	0.33	29.0	0.18	87.7
2A	1.30	15	400	1.92	14.2	0.52	7.4
2A	1.70	15	400	1.22	14.2	0.34	11.6
2A	1.95	15	400	0.75	11.3	0.46	15.1
2A	2.20	15	400	0.46	29.0	0.35	63.7
2A	2.55	15	400	0.38	25.8	0.21	67.7
2A	2.85	15	400	0.33	30.0	0.11	90.6
2A	3.25	15	400	0.28	22.5	0.14	80.2
2A	3.45	15	400	0.25	13.8	0.16	54.4
2A	3.85	15	400	0.20	8.2	0.16	40.4
2B	1.30	30	200	1.92	32.2	0.40	16.8
2B	1.70	30	200	1.22	24.9	0.22	20.4
2B	1.95	30	200	0.75	38.6	0.12	51.5
2B	2.20	30	200	0.46	36.7	0.29	80.5
2B	2.55	30	200	0.38	39.8	0.22	104.2
2B	2.85	30	200	0.33	21.0	0.20	63.6
2B	3.25	30	200	0.28	11.1	0.20	39.6
2B	3.45	30	200	0.25	9.6	0.18	37.7
2B	3.85	30	200	0.20	6.7	0.23	32.7
3A	1.30	15	400	1.92	14.7	0.49	7.7
3A	1.70	15	400	1.22	7.1	0.38	5.8
3A	1.95	15	400	0.75	12.7	0.29	16.9
3A	2.20	15	400	0.46	23.1	0.22	50.7
3A	2.55	15	400	0.38	32.4	0.24	84.9
3A	2.85	15	400	0.33	21.0	0.31	63.5
3B	1.30	30	200	1.92	26.8	0.31	13.9
3B	1.70	30	200	1.22	21.4	0.25	17.5
3B	1.95	30	200	0.75	36.2	0.16	48.3
3B	2.20	30	200	0.46	32.5	0.22	71.4
3B	2.55	30	200	0.38	45.9	0.14	120.2
3B	2.85	30	200	0.33	24.3	0.11	73.4

¹ Beräknad enligt ekvation A.1

Utvärderade resultat från jordprover.

Djup	c	q_{jord}	N_{jord}	Rapiditet
[m]	[kPa]	[kPa]	[-]	[-]
1.3	80	720	9	2
1.7	49	441	9	-
1.95	30	270	9	3.5
2.2	18	162	9	-
2.55	15	135	9	3.5
2.85	13	117	9	5
3.25	11	99	9	-
3.45	10	90	9	-
3.85	8	72	9	6

Tabellen ovan är framtagen enligt bärighetsekvationen.

$$\text{Tryckhållfastheten, } c = \frac{1}{N} * \frac{k * \bar{\delta}}{A} \quad (\text{A.1})$$

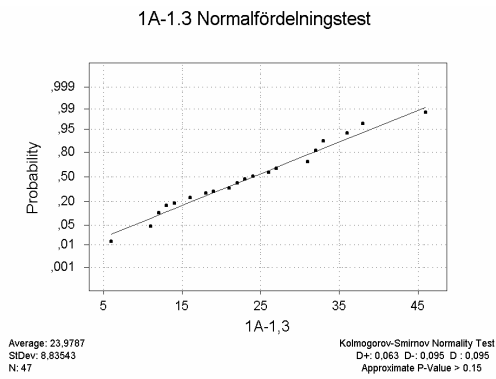
där N är en bärighetsfaktor, enl. Skempton (1951), (Smith 1990).

k är fjäderkonstanten som antagits vara 10 för den använda penetrometern, (Johansson & Jons 1995).

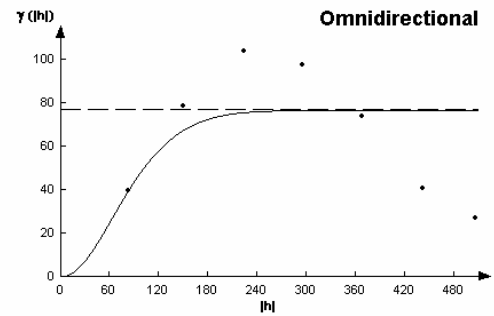
A är cylinderarean och c är den från laboratoriet utvärderade odränerade skjuvhållfastheten.

Bilaga B

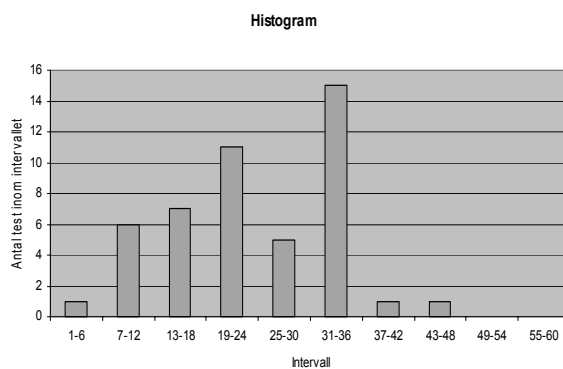
Sammanställning av provningsresultat i horisontalled



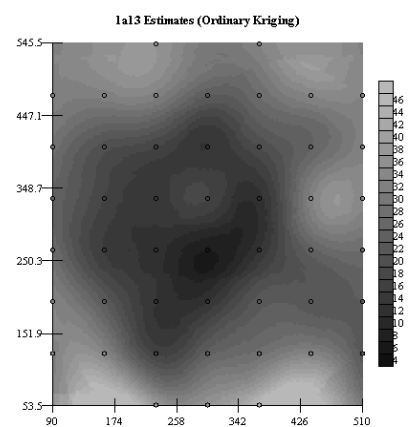
Figur 1A-1.3a



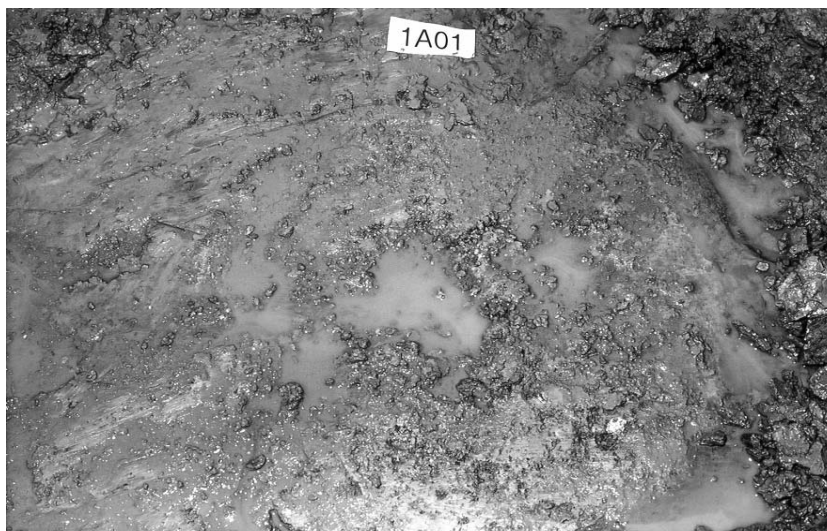
Figur 1A-1.3b



Figur 1A-1.3c

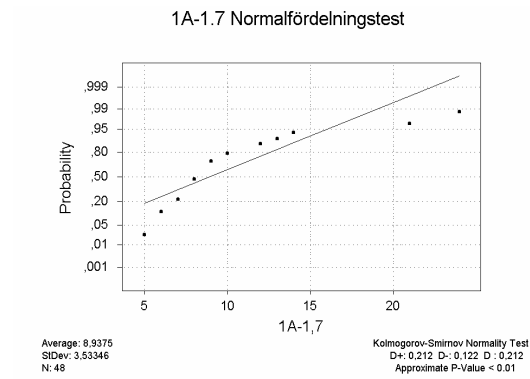


Figur 1A-1.3d

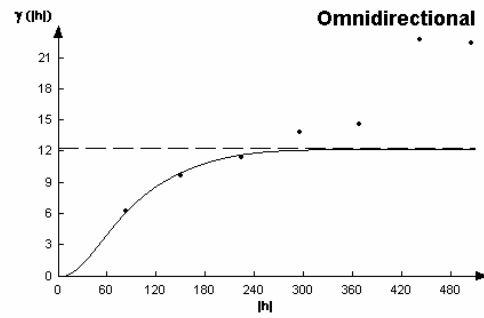


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.
Vattenfyllt hål i mitten,
något grynig.

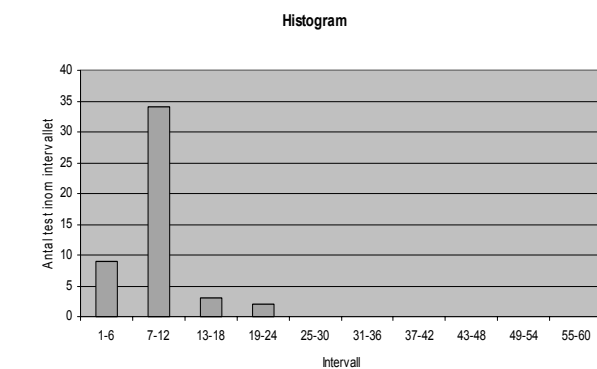
Figur 1A-1.3e



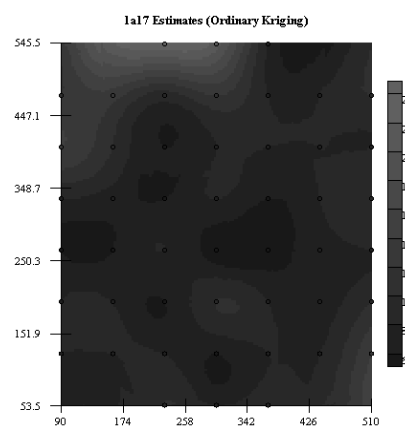
Figur 1A-1.7a



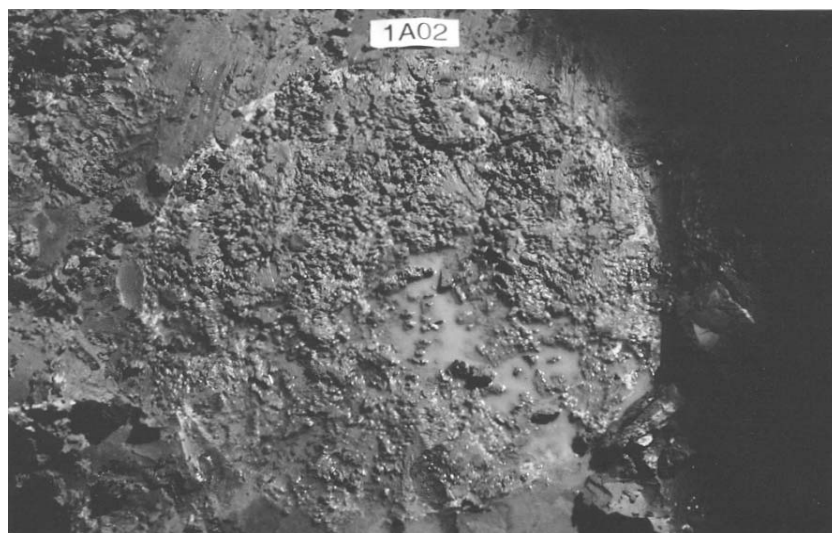
Figur 1A-1.7b



Figur 1A-1.7c

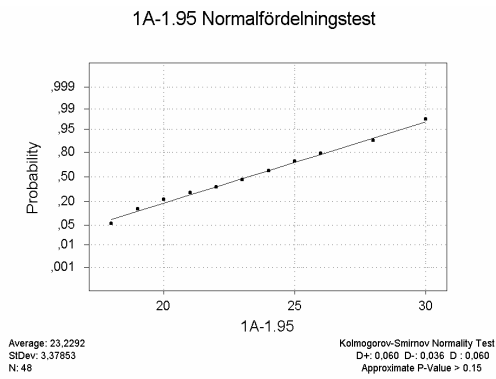


Figur 1A-1.7d

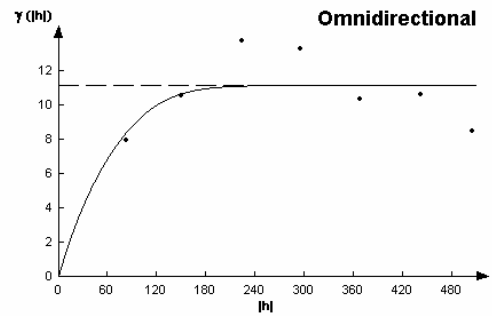


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.
Vattenfyllt hål i mitten,
porös och
vattenförande.

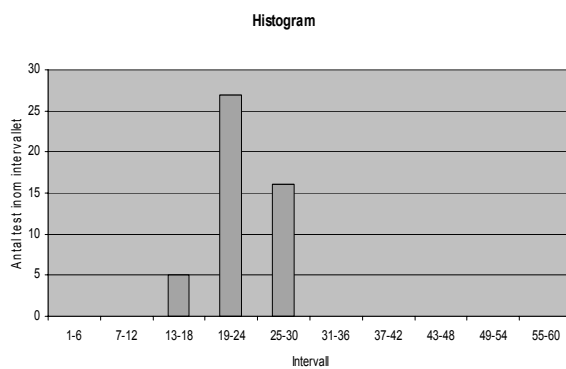
Figur 1A-1.7e



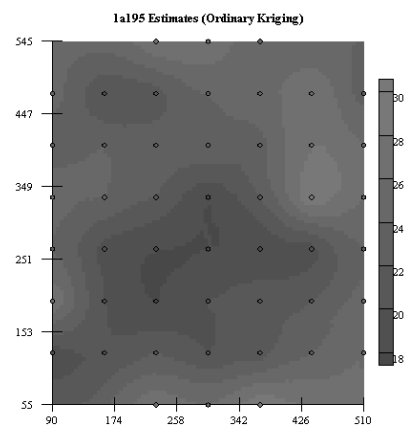
Figur 1A-1.95a



Figur 1A-1.95b



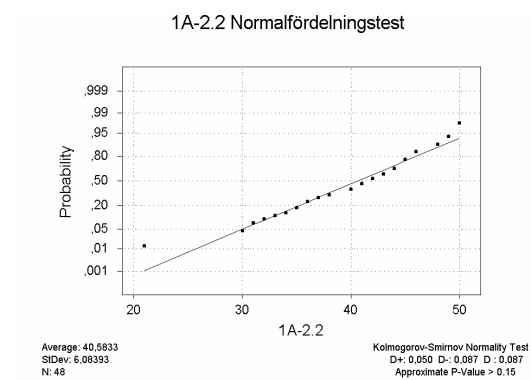
Figur 1A-1.95c



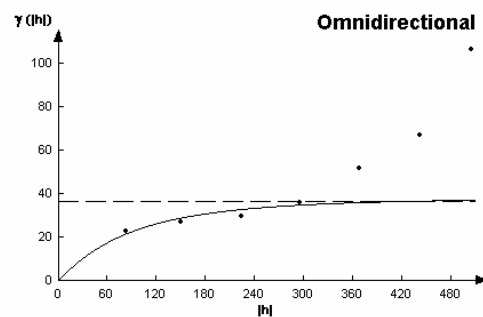
Figur 1A-1.95d

Bild saknas

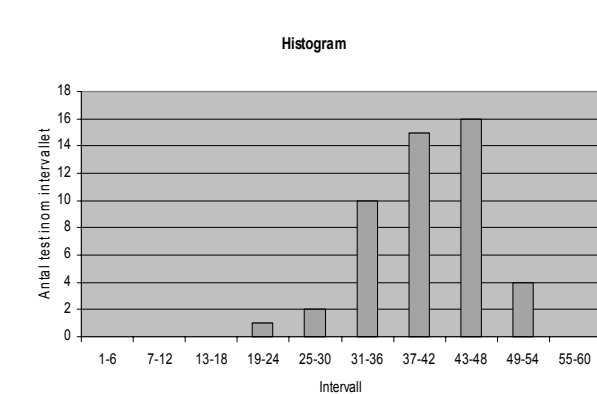
Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel, något
kornig.



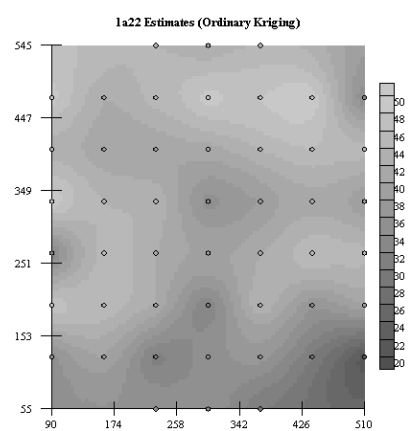
Figur 1A-2.2a



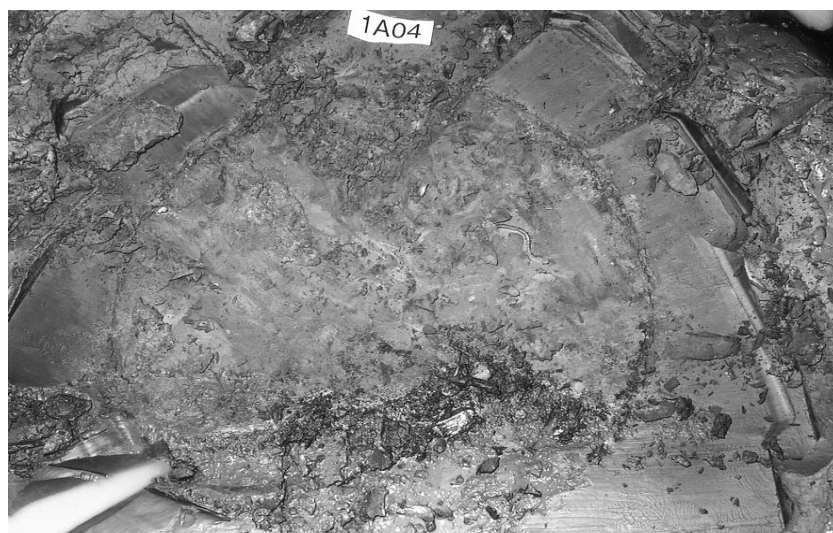
Figur 1A-2.2b



Figur 1A-2.2c

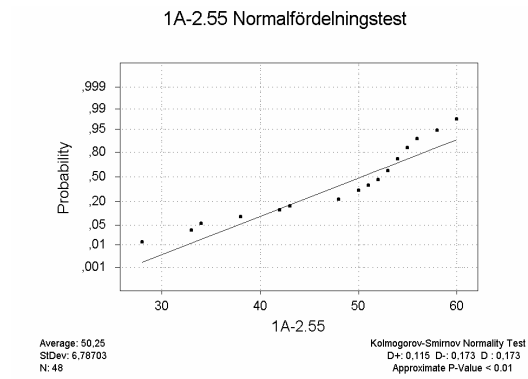


Figur 1A-2.2d

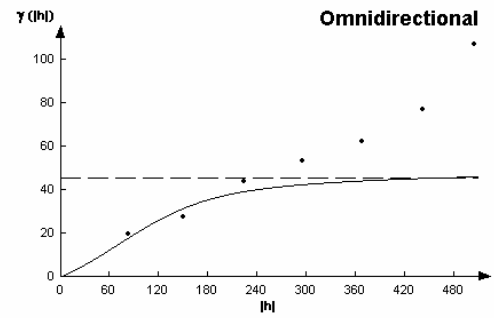


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

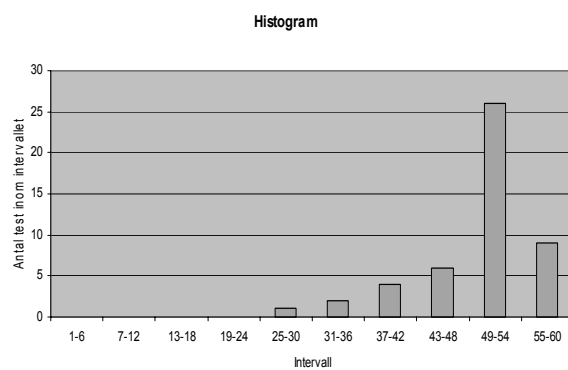
Figur 1A-2.2e



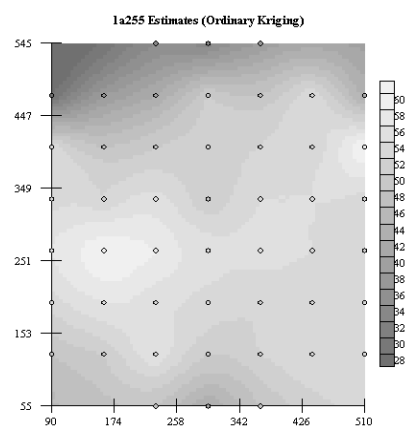
Figur 1A-2.55a



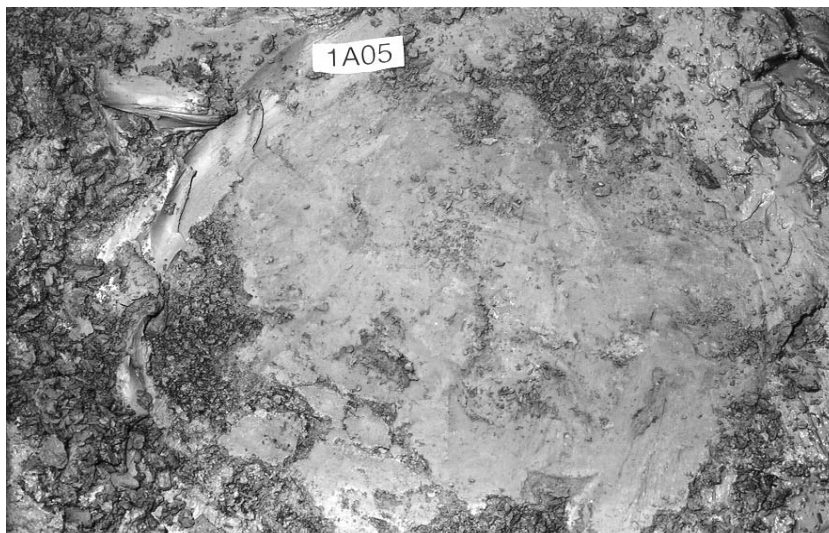
Figur 1A-2.55b



Figur 1A-2.55c

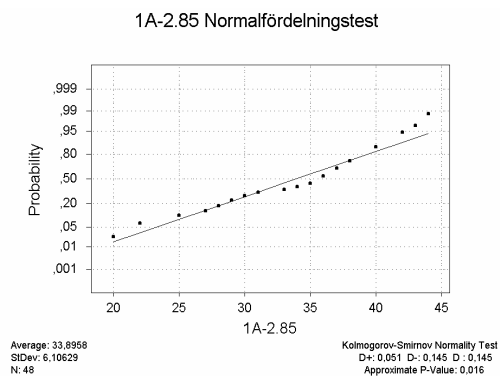


Figur 1A-2.55d

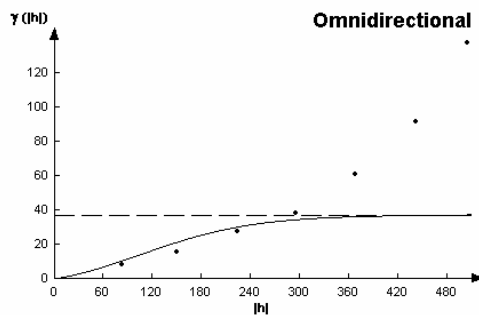


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel, bitvis
spröd.

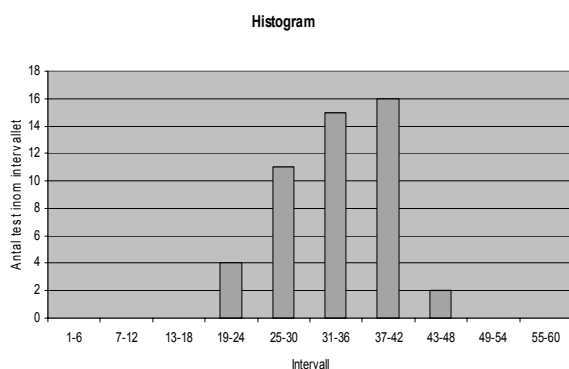
Figur 1A-2.55e



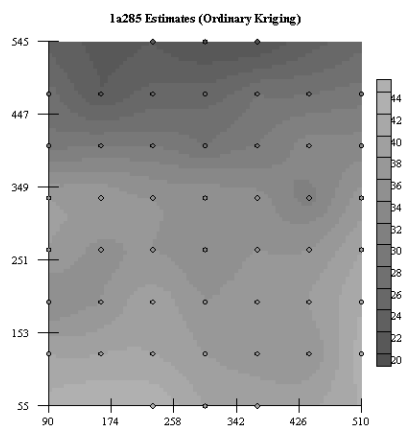
Figur 1A-2.85a



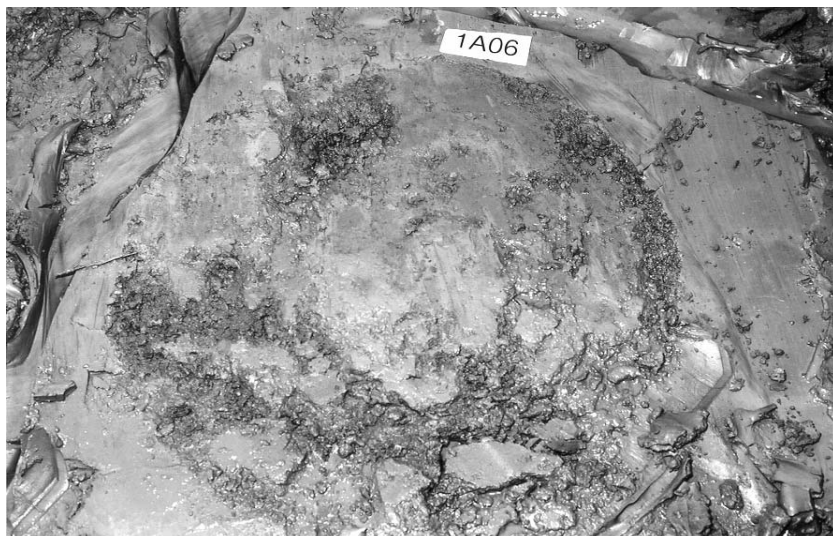
Figur 1A-2.85b



Figur 1A-2.85c

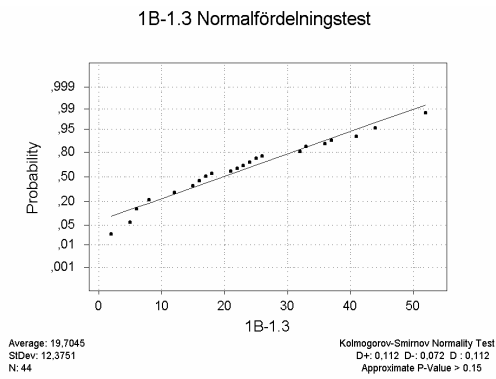


Figur 1A-2.85d

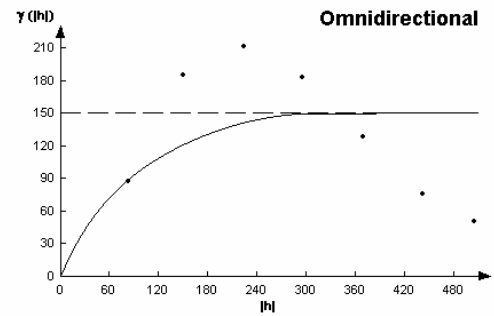


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 62 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel, något
kornig.

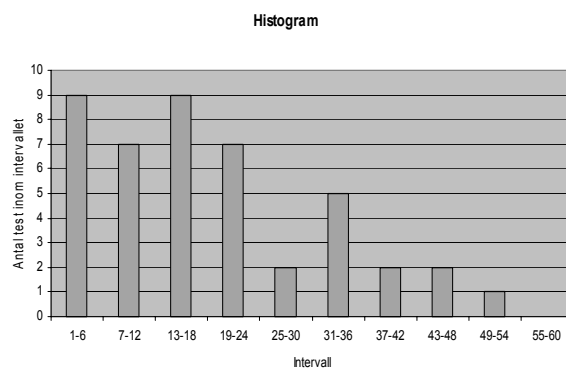
Figur 1A-2.85e



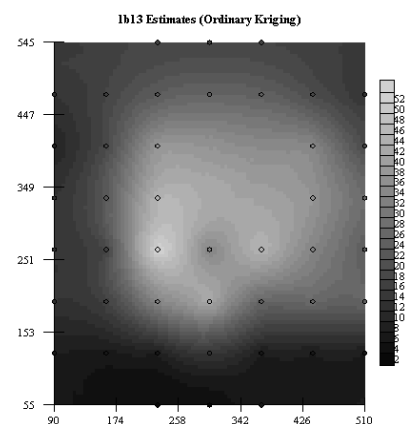
Figur 1B-1.3a



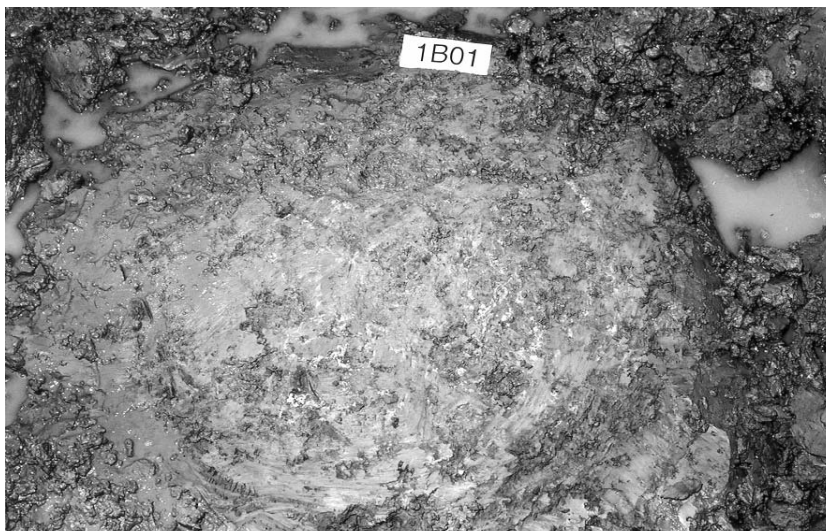
Figur 1B-1.3b



Figur 1B-1.3c

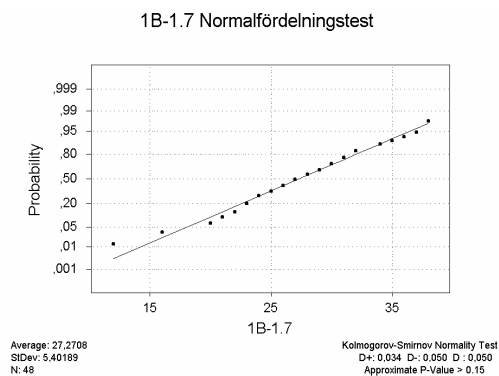


Figur 1B-1.3d

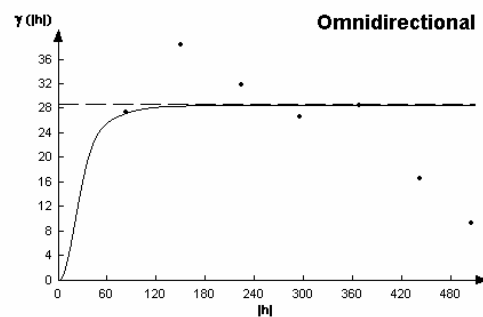


Figur 1B-1.3e

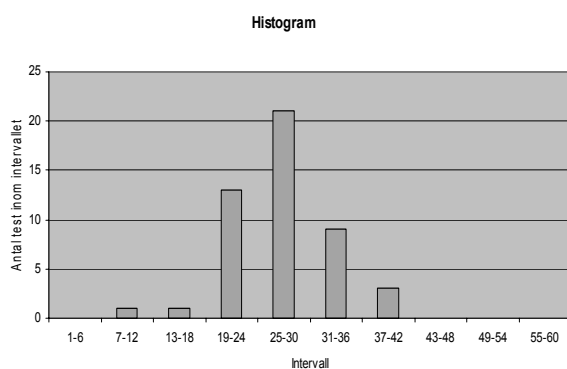
Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.



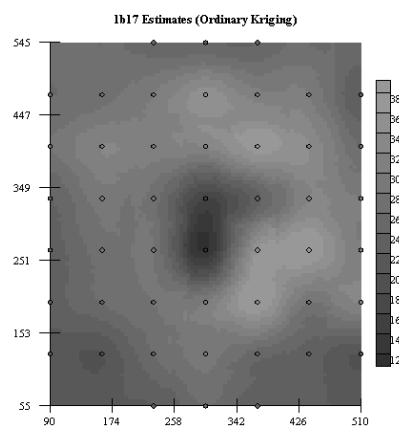
Figur 1B-1.7a



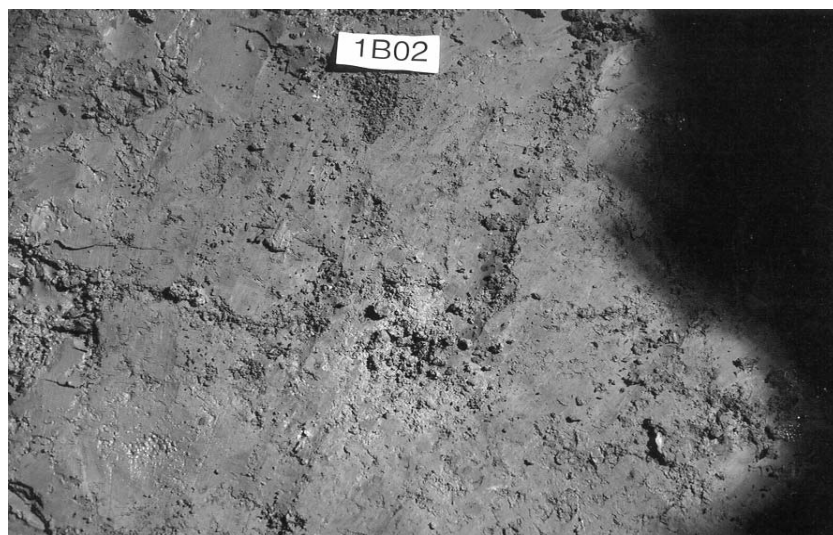
Figur 1B-1.7b



Figur 1B-1.7c

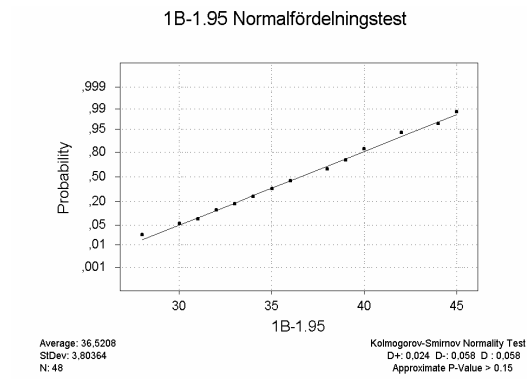


Figur 1B-1.7d

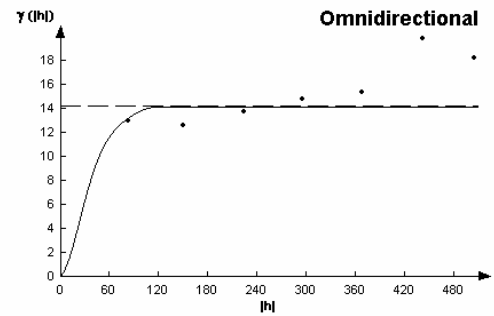


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel. Hård i
mitten.

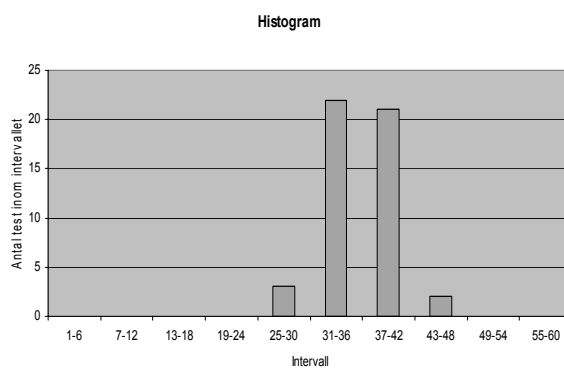
Figur 1B-1.7e



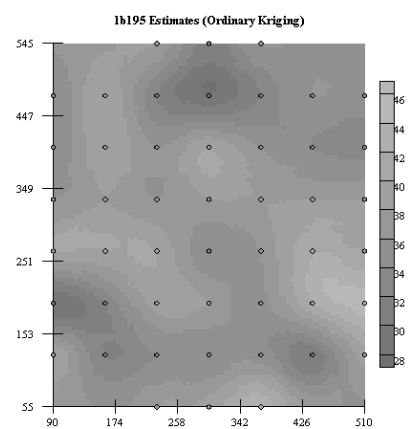
Figur 1B-1.95a



Figur 1B-1.95b



Figur 1B-1.95c

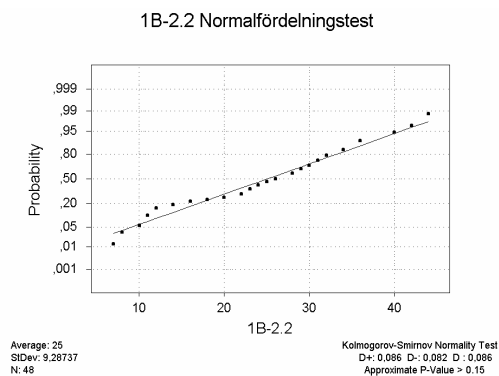


Figur 1B-1.95d

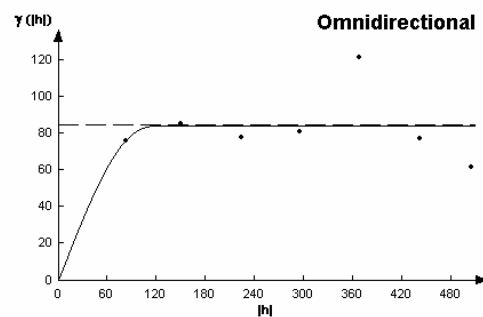


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

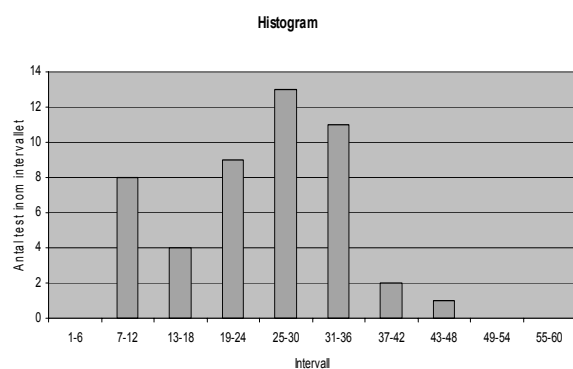
Figur 1B-1.95e



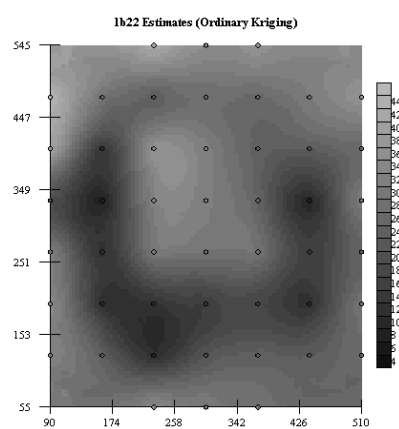
Figur 1B-2.2a



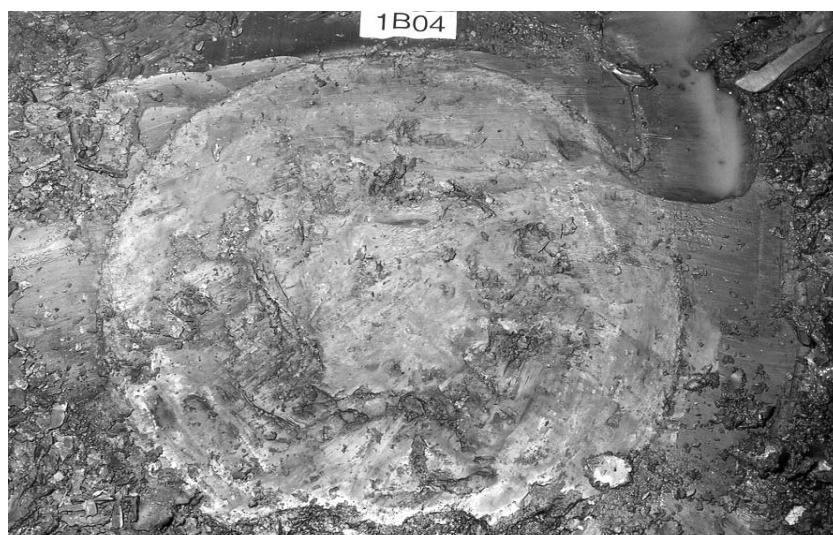
Figur 1B-2.2b



Figur 1B-2.2c

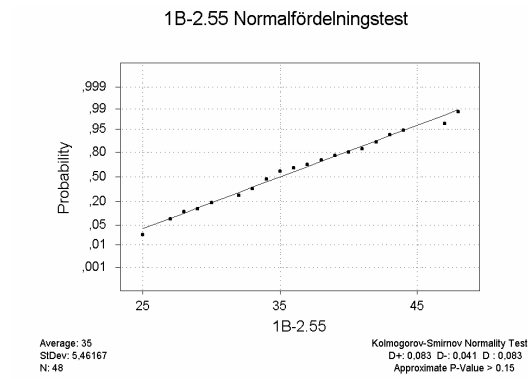


Figur 1B-2.2d

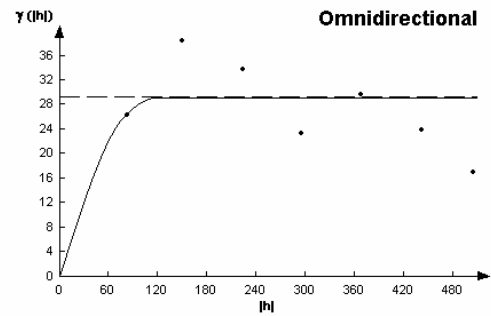


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

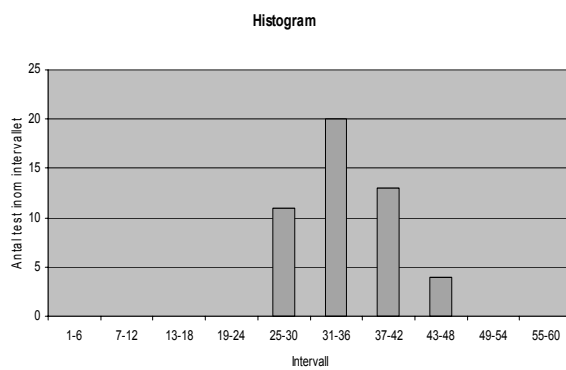
Figur 1B-2.2e



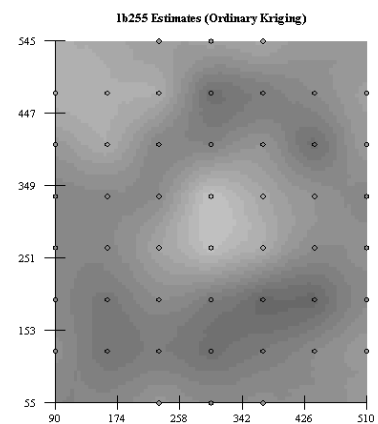
Figur 1B-2.55a



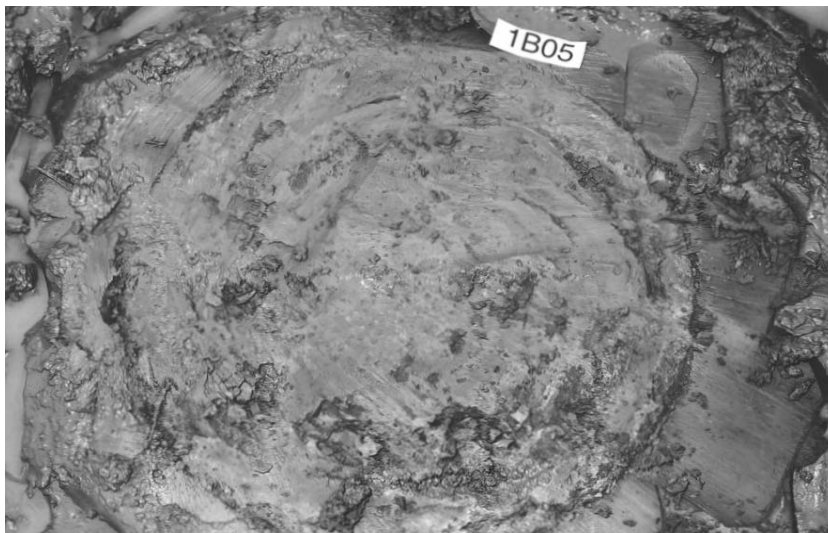
Figur 1B-2.55b



Figur 1B-2.55c

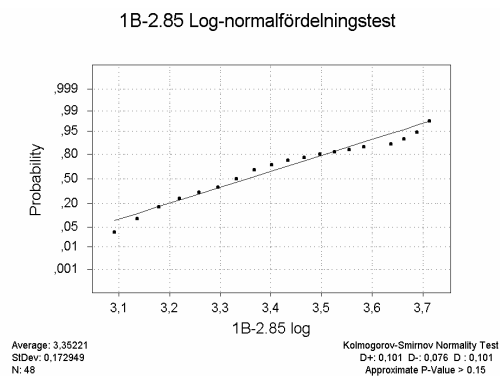


Figur 1B-2.55d

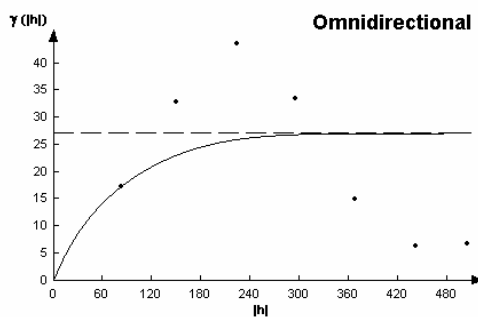


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

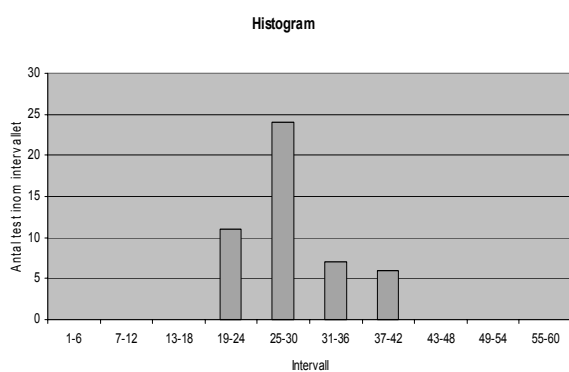
Figur 1B-2.55e



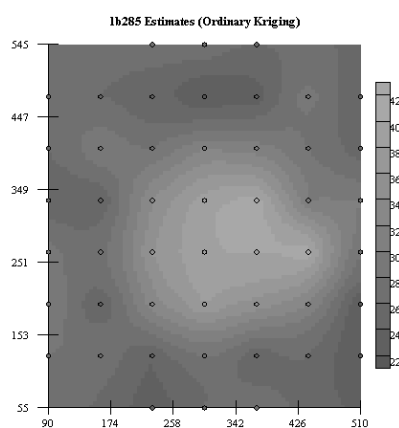
Figur 1B-2.85a



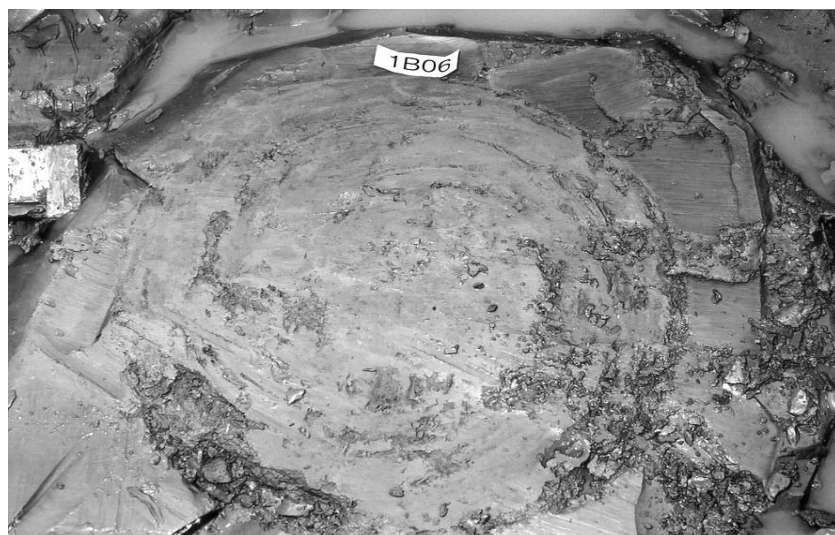
Figur 1B-2.85b



Figur 1B-2.85c

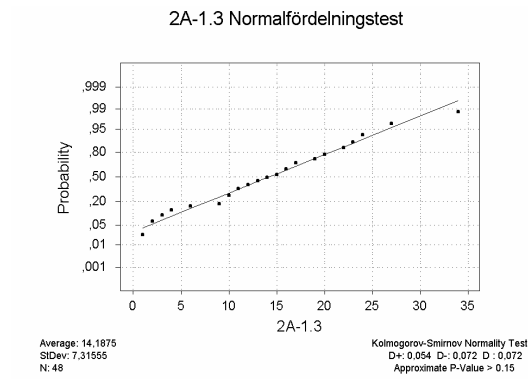


Figur 1B-2.85d

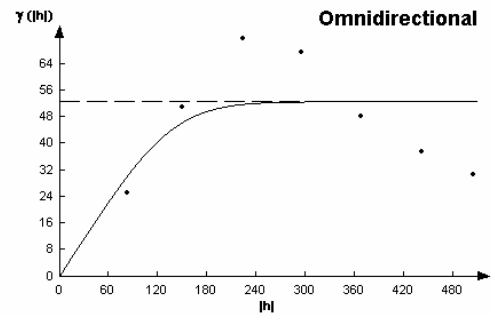


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

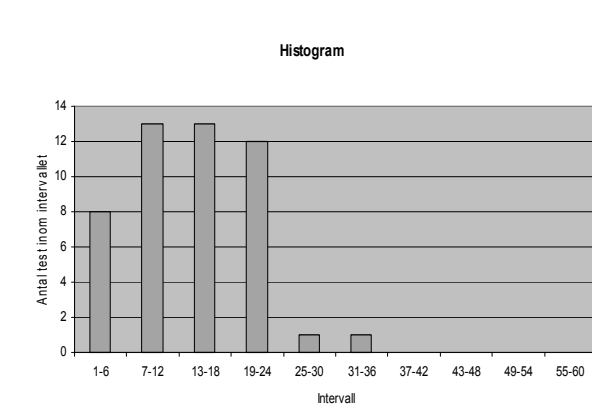
Figur 1B-2.85e



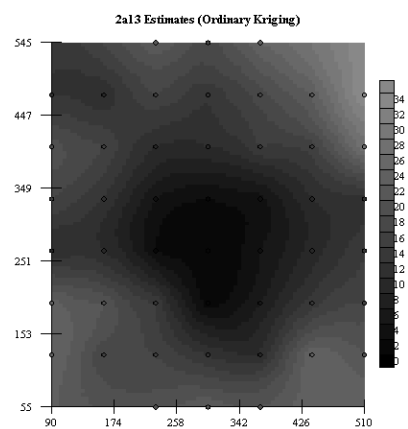
Figur 2A-1.3a



Figur 2A-1.3b



Figur 2A-1.3c

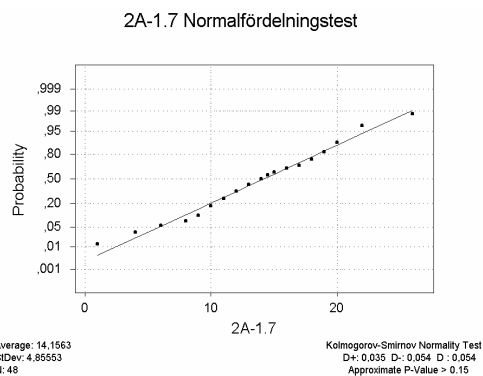


Figur 2A-1.3d

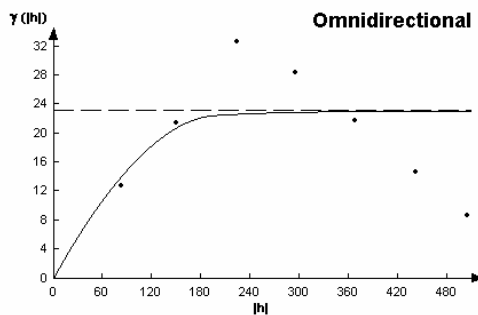


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.
Pneumatisk
spräckning.

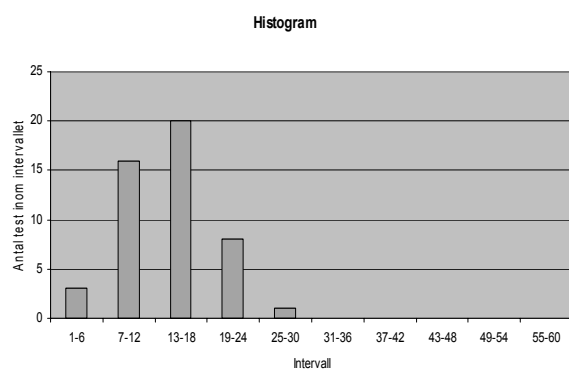
Figur 2A-1.3e



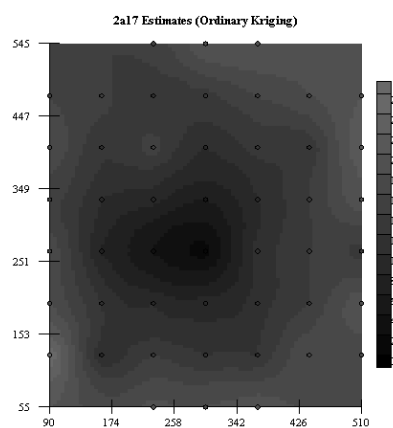
Figur 2A-1.7a



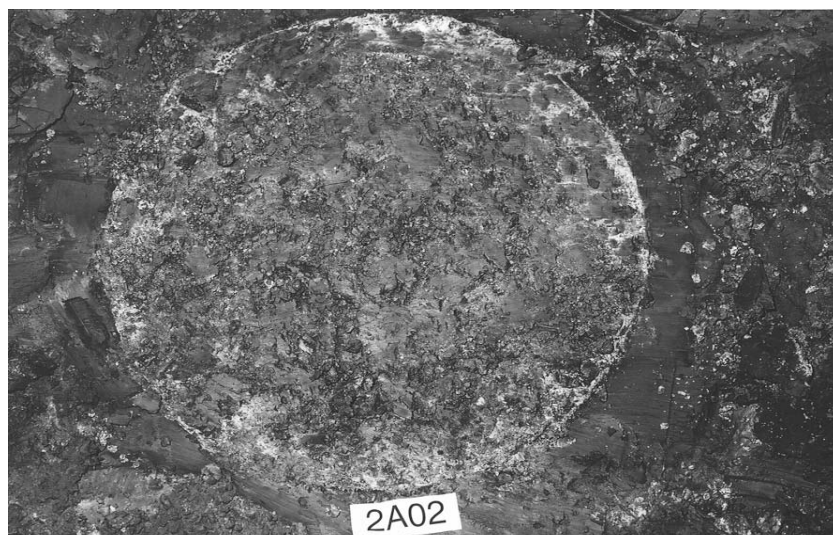
Figur 2A-1.7b



Figur 2A-1.7c

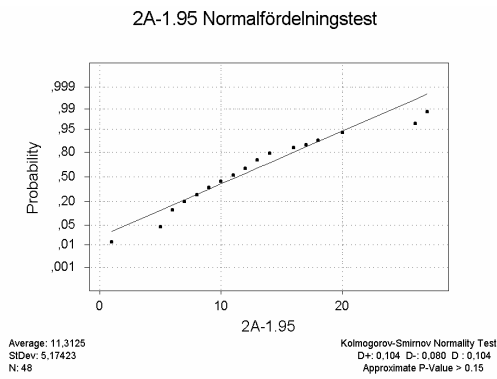


Figur 2A-1.7d

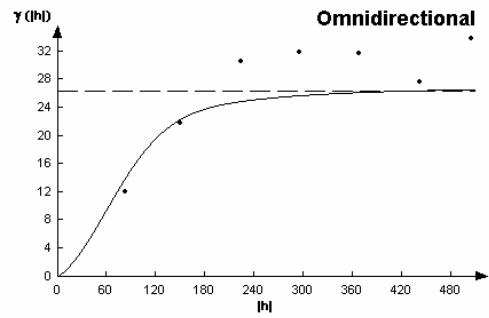


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel. Porös och
vattenförande.

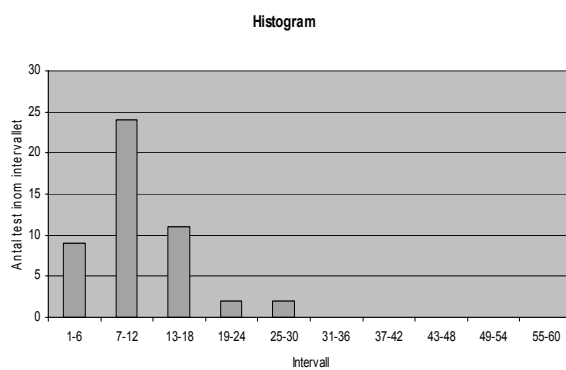
Figur 2A-1.7e



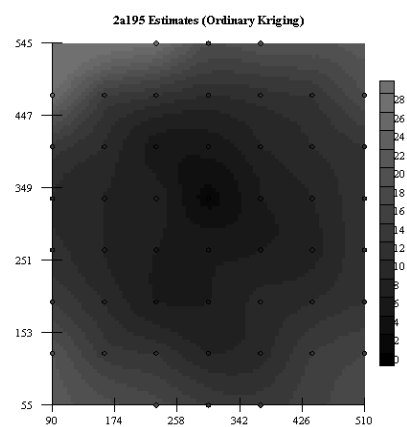
Figur 2A-1.95a



Figur 2A-1.95b



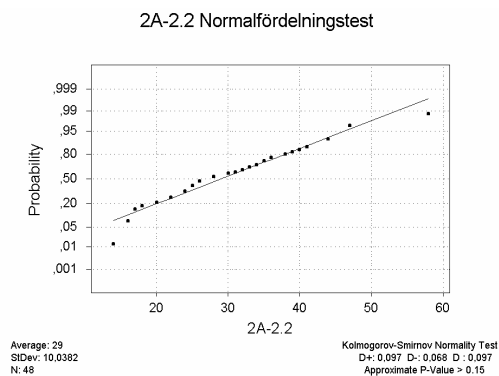
Figur 2A-1.95c



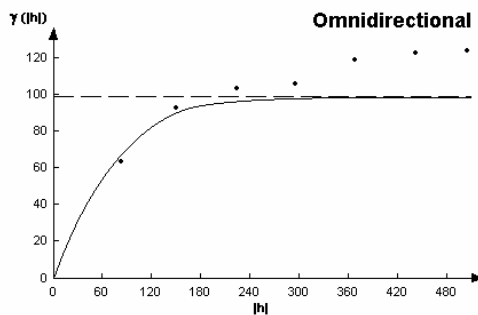
Figur 2A-1.95d

Bild saknas

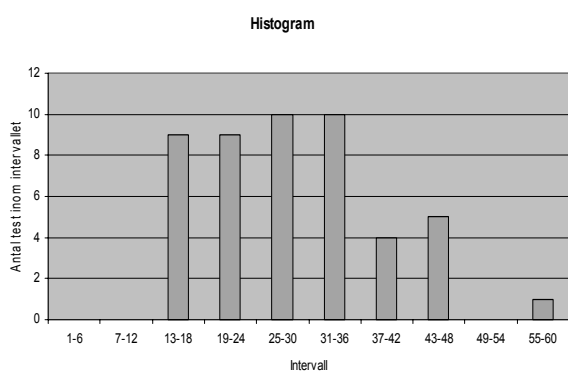
Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel, blöt och
något kornig.



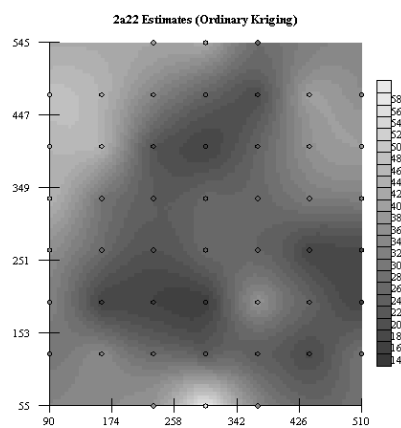
Figur 2A-2.2a



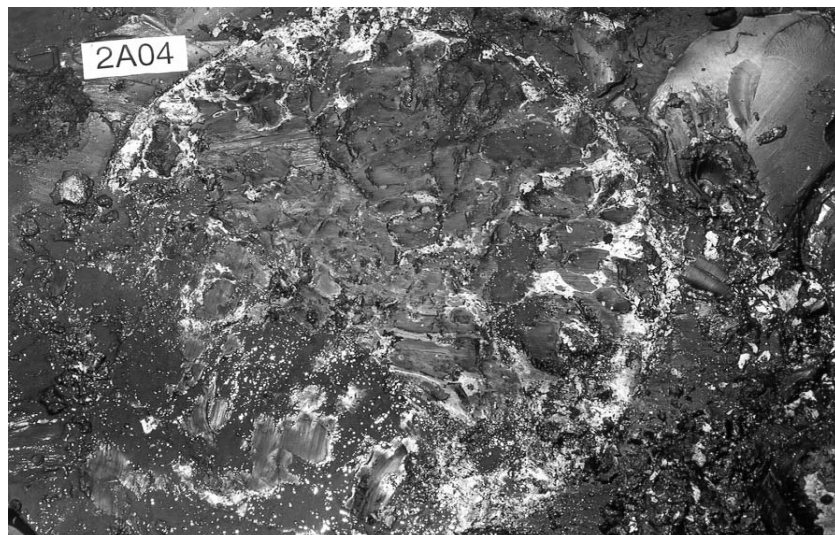
Figur 2A-2.2b



Figur 2A-2.2c

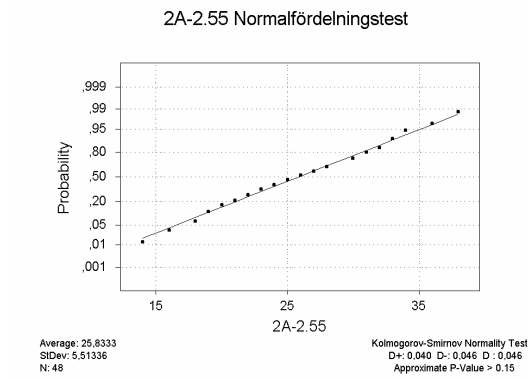


Figur 2A-2.2d

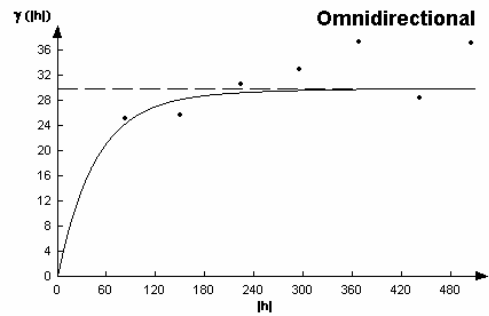


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Samlingar av
bindemedel, mest vid
kanterna.

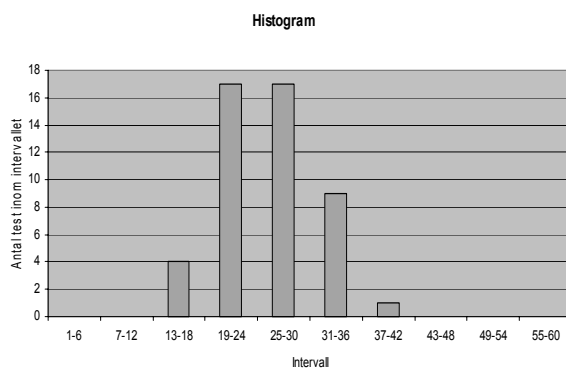
Figur 2A-2.2e



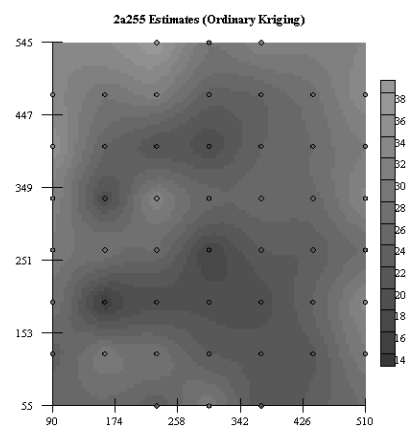
Figur 2A-2.55a



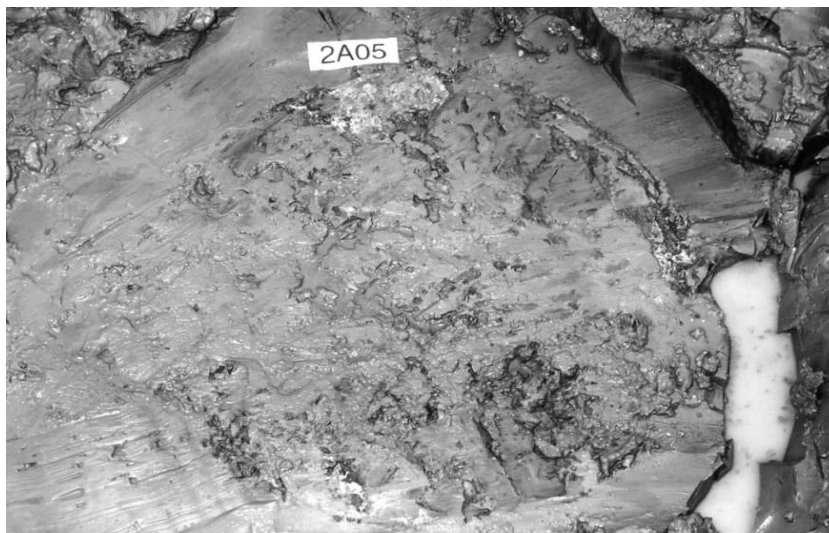
Figur 2A-2.55b



Figur 2A-2.55c

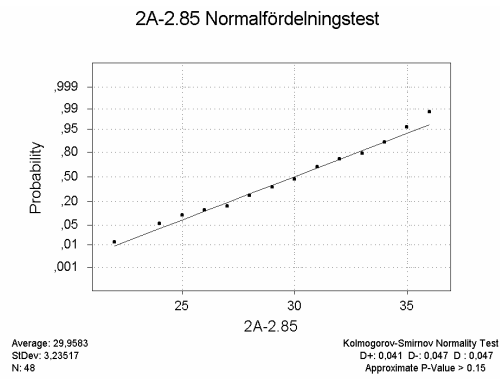


Figur 2A-2.55d

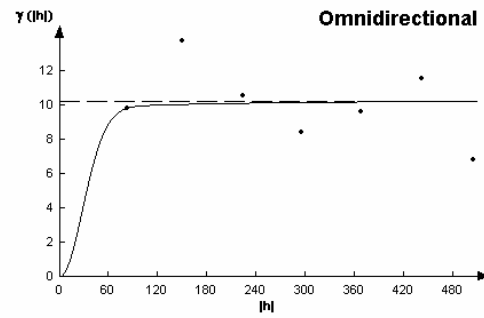


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.
Bindemedel bitvis runt
kanterna.

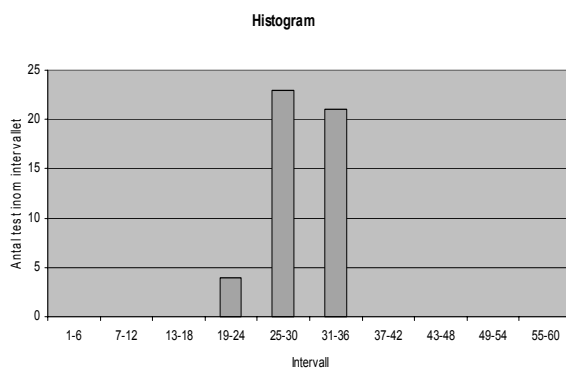
Figur 2A-2.55e



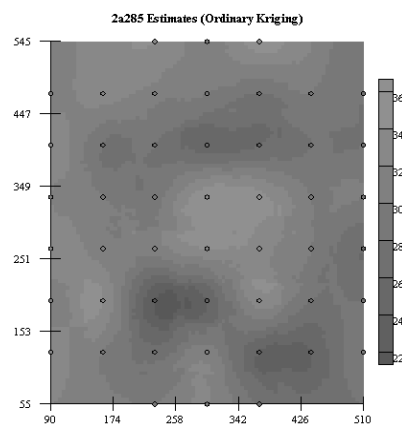
Figur 2A-2.85a



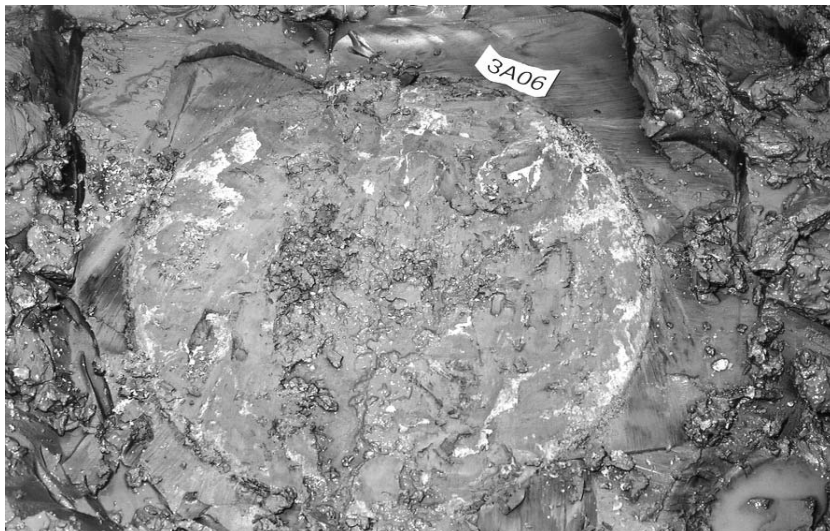
Figur 2A-2.85b



Figur 2A-2.85c

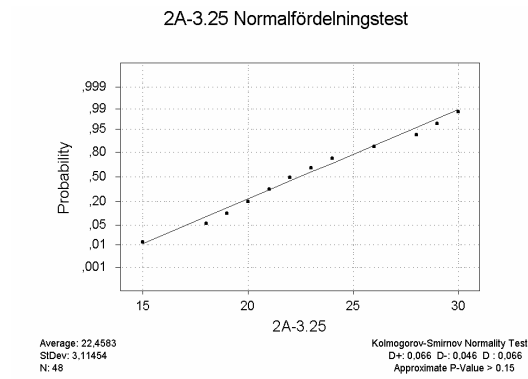


Figur 2A-2.85d

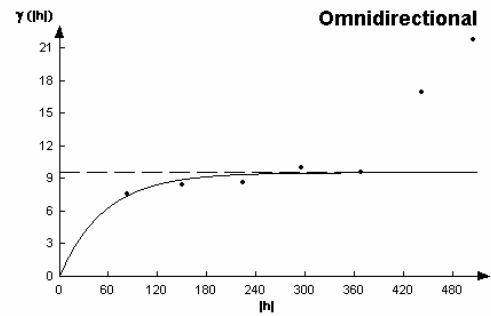


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 62-63 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.

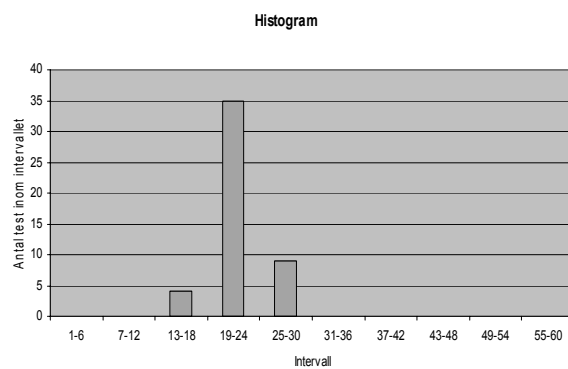
Figur 2A-2.85e



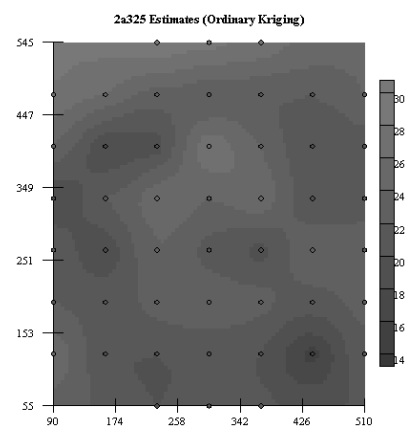
Figur 2A-3.25a



Figur 2A-3.25b



Figur 2A-3.25c

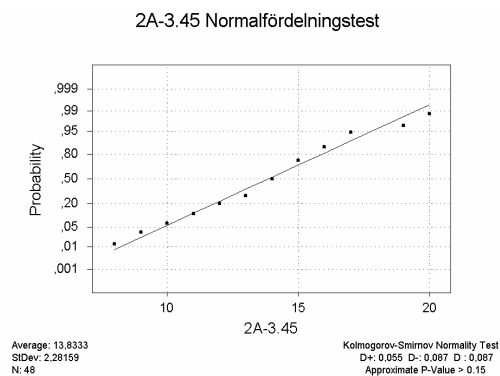


Figur 2A-3.25d

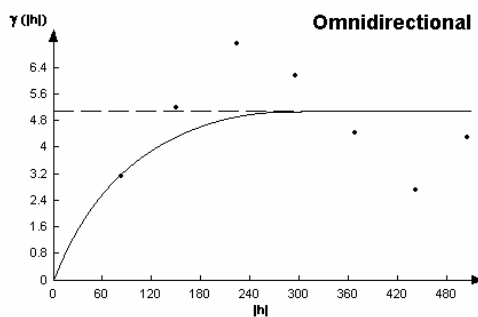


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 64 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.

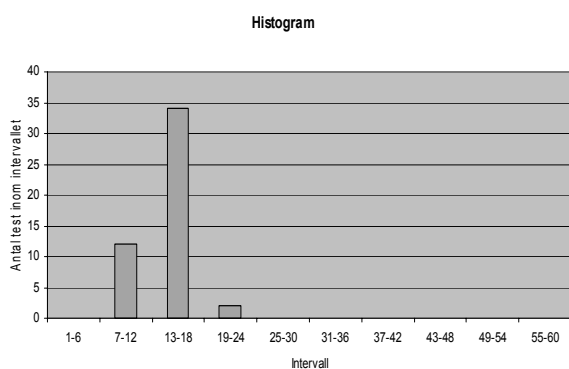
Figur 2A-3.25e



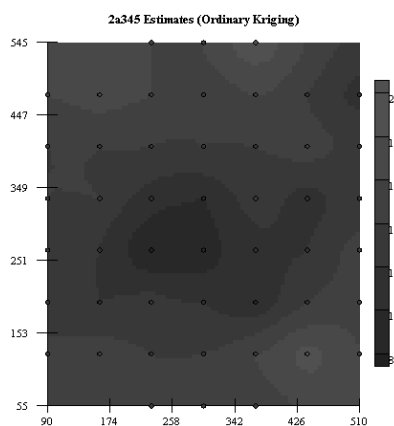
Figur 2A-3.45a



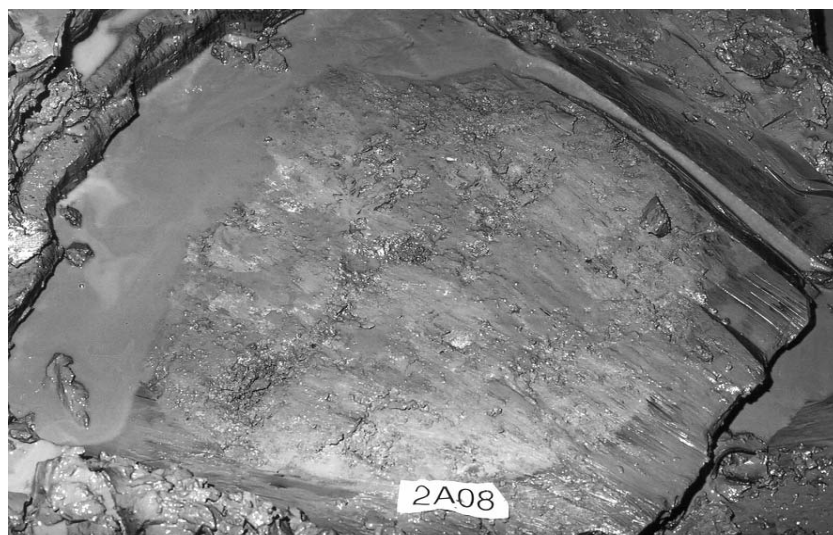
Figur 2A-3.45b



Figur 2A-3.45c

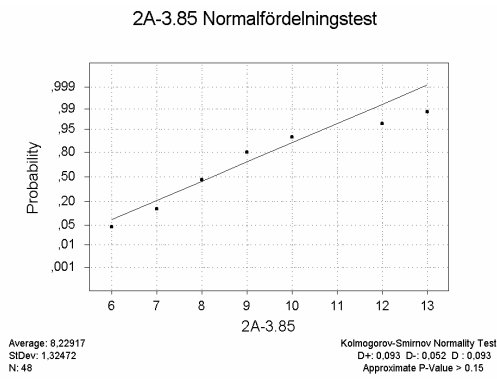


Figur 2A-3.45d

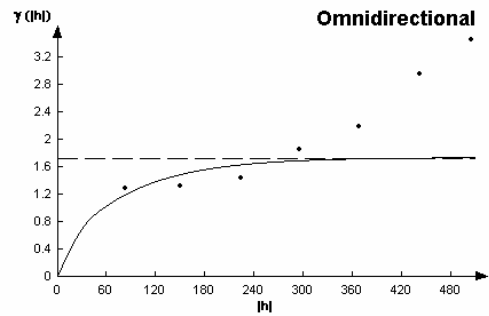


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

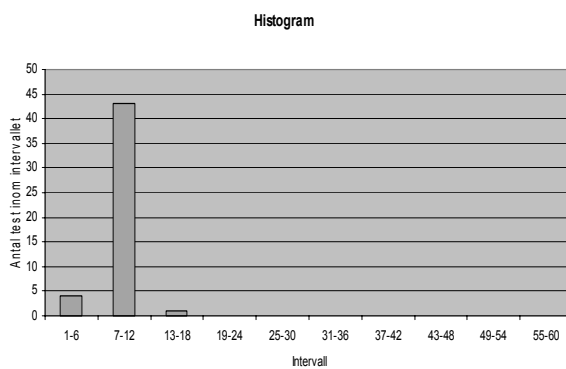
Figur 2A-3.45e



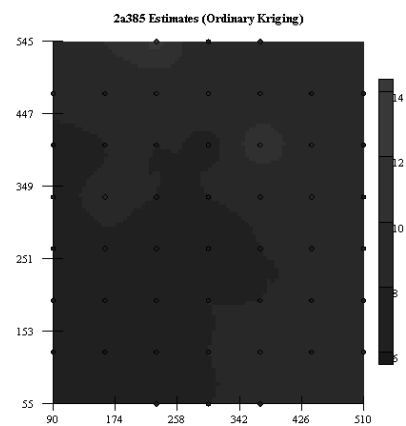
Figur 2A-3.85a



Figur 2A-3.85b



Figur 2A-3.85c

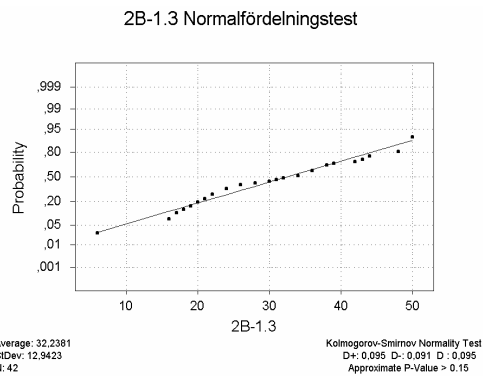


Figur 2A-3.85d

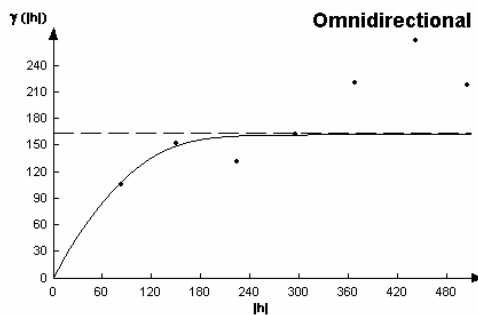


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 64 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

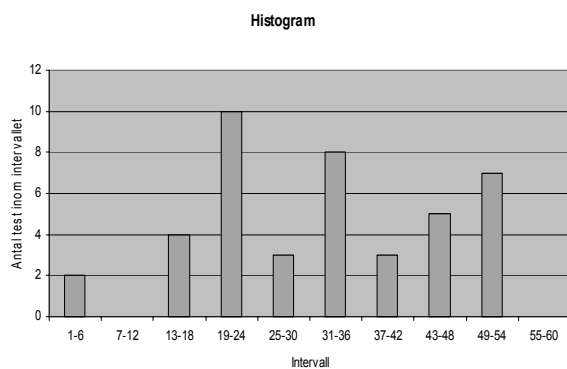
Figur 2A-3.85e



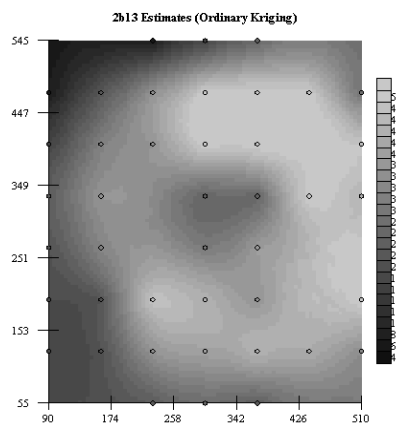
Figur 2B-1.3a



Figur 2B-1.3b



Figur 2B-1.3c

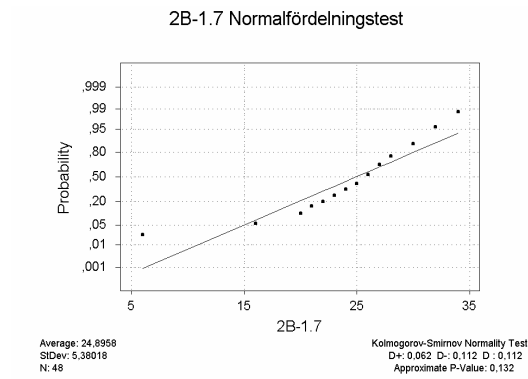


Figur 2B-1.3d

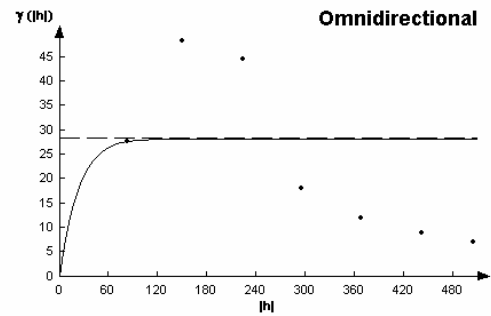


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.

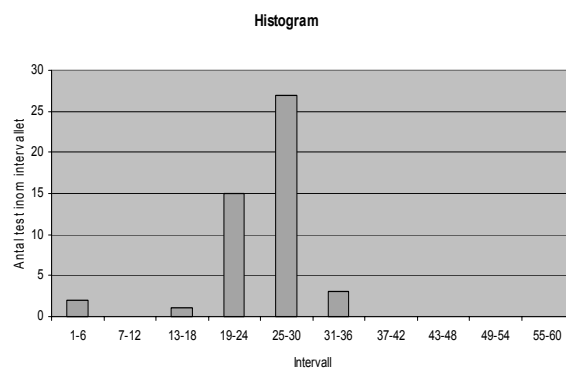
Figur 2B-1.3e



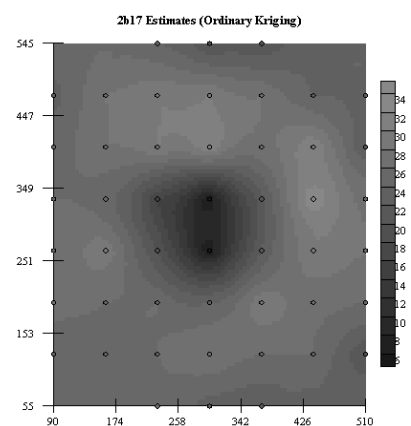
Figur 2B-1.7a



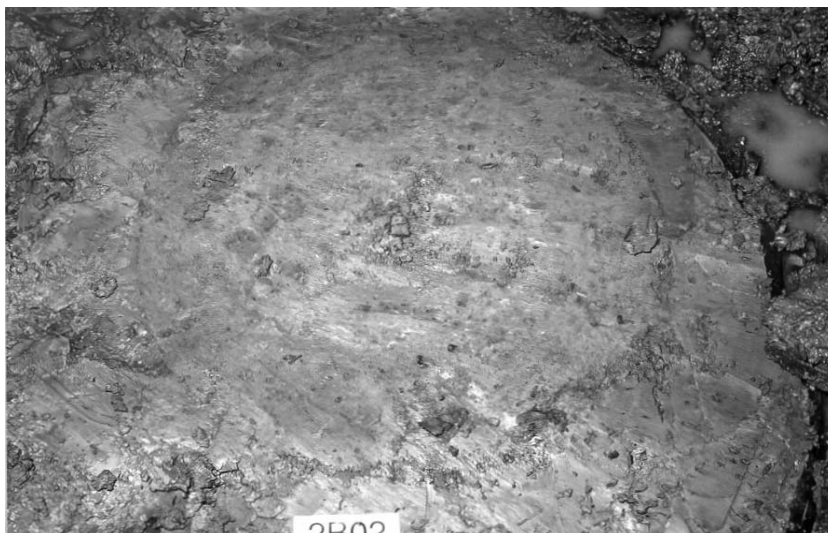
Figur 2B-1.7b



Figur 2B-1.7c

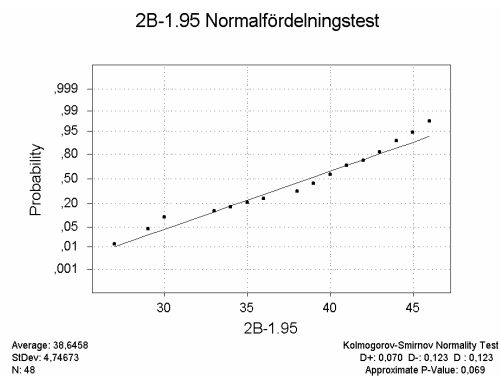


Figur 2B-1.7d

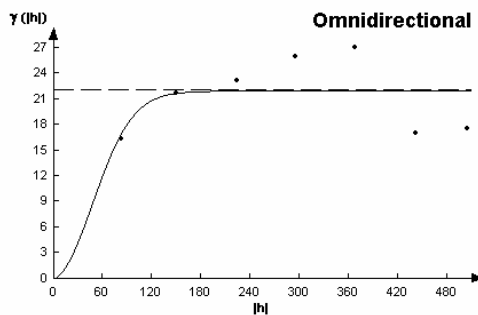


Figur 2B-1.7e

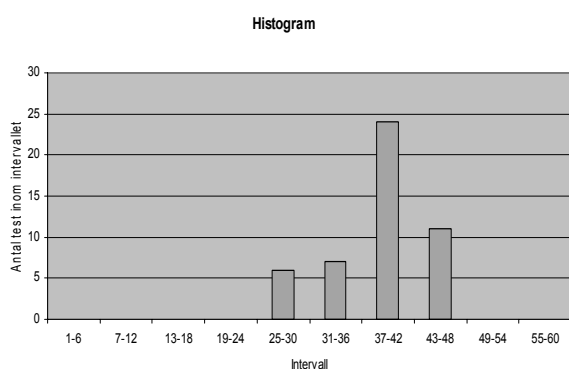
Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel. Mjuk i
mitten.



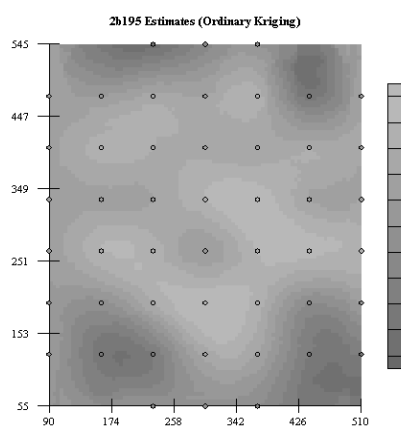
Figur 2B-1.95a



Figur 2B-1.95b



Figur 2B-1.95c

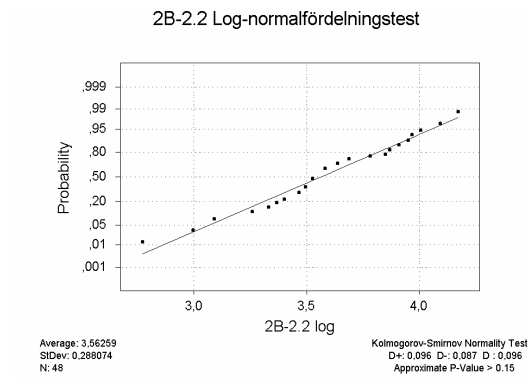


Figur 2B-1.95d

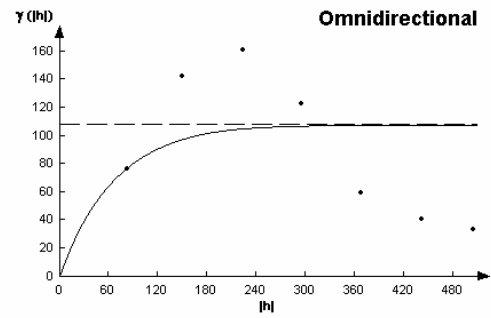


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel, torr.

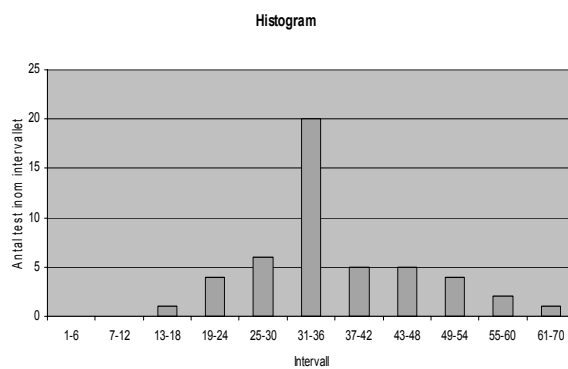
Figur 2B-1.95e



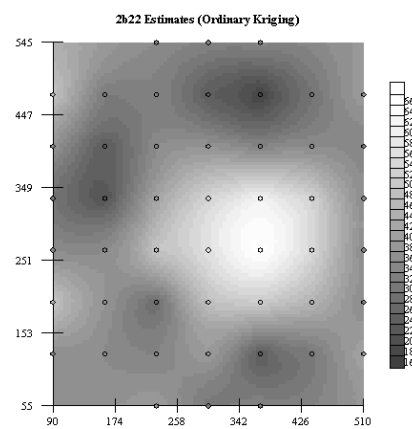
Figur 2B-2.2a



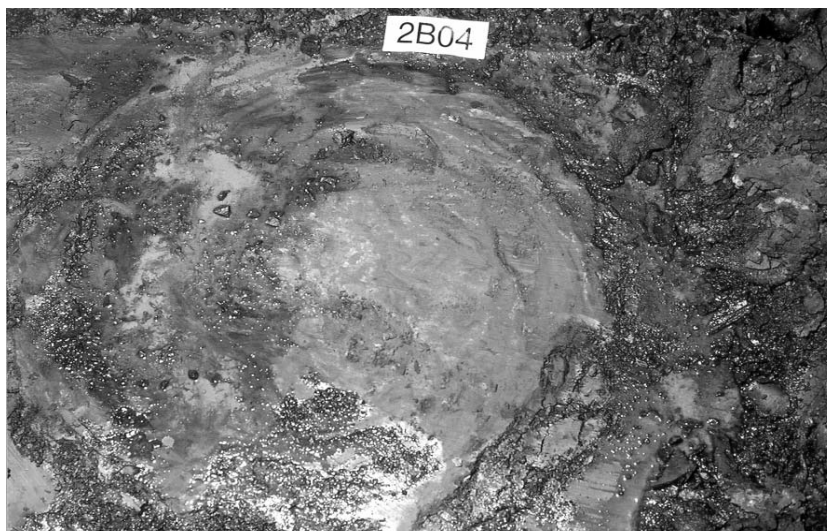
Figur 2B-2.2b



Figur 2B-2.2c

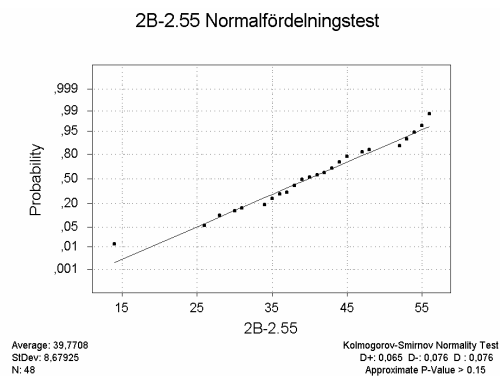


Figur 2B-2.2d

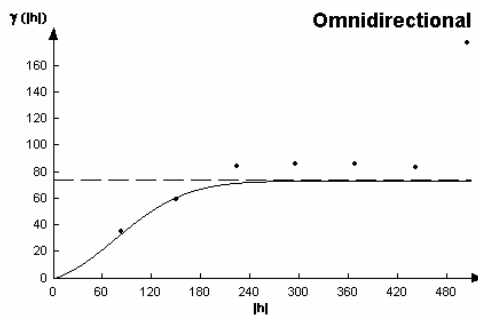


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

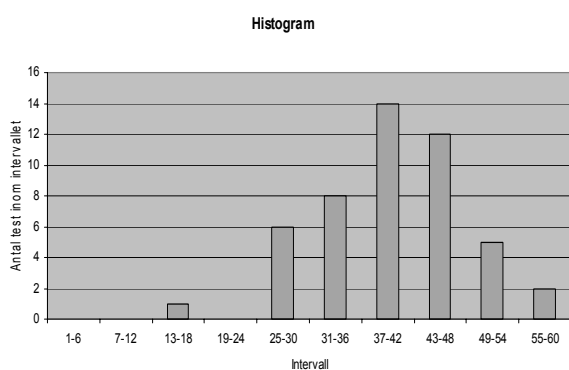
Figur 2B-2.2e



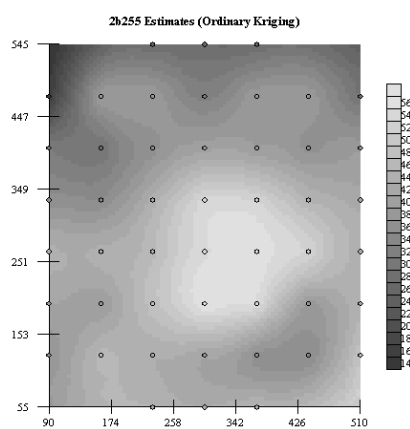
Figur 2B-2.55a



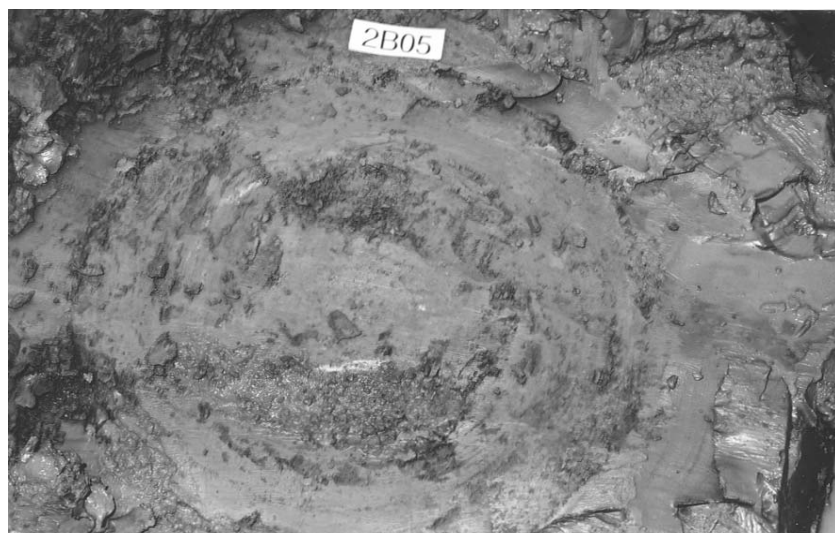
Figur 2B-2.55b



Figur 2B-2.55c

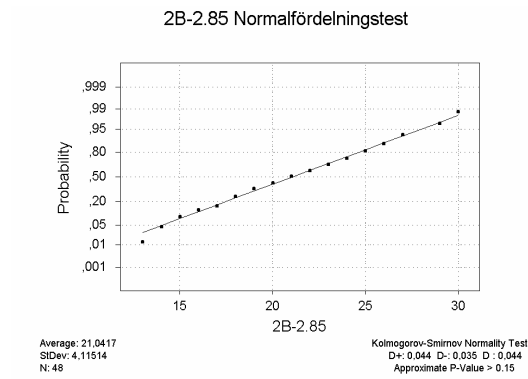


Figur 2B-2.55d

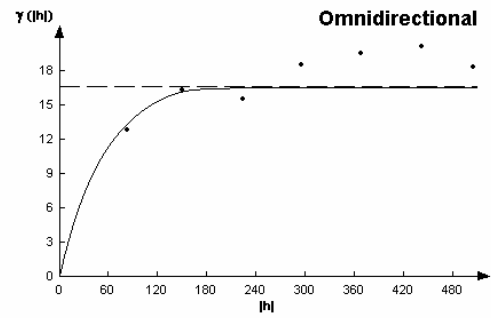


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60-62 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.

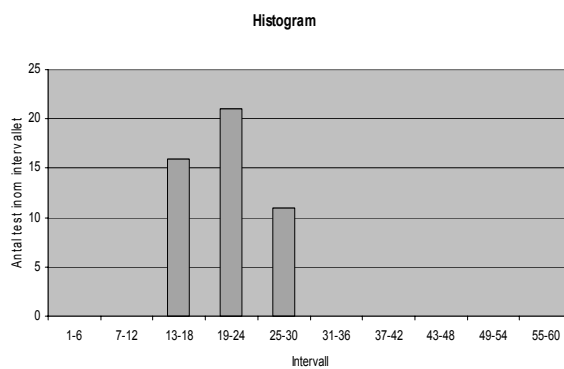
Figur 2B-2.55e



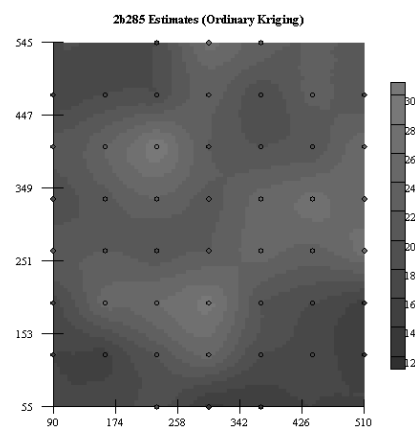
Figur 2B-2.85a



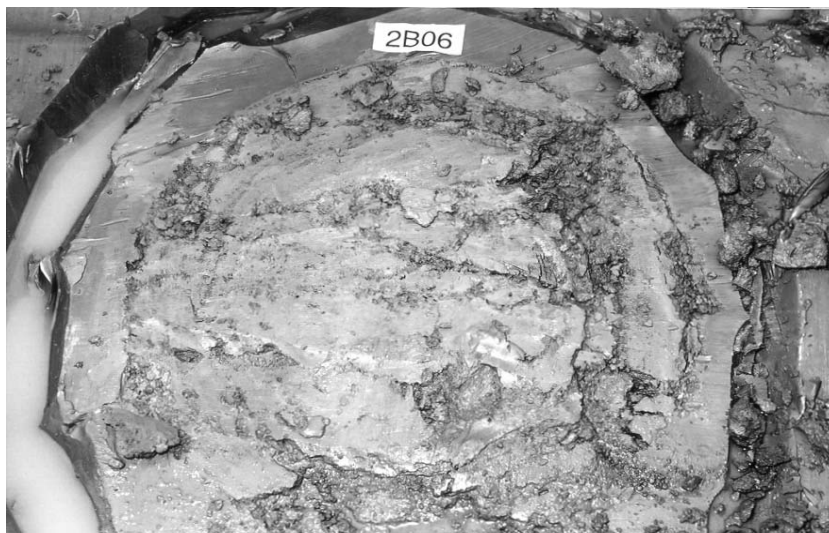
Figur 2B-2.85b



Figur 2B-2.85c

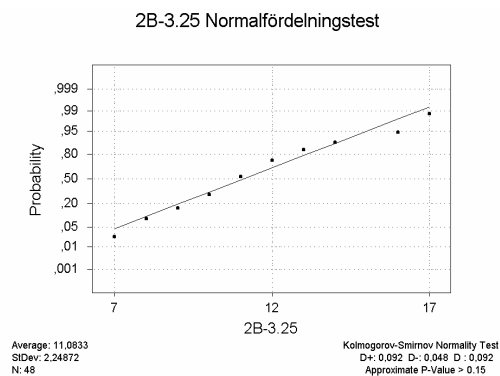


Figur 2B-2.85d

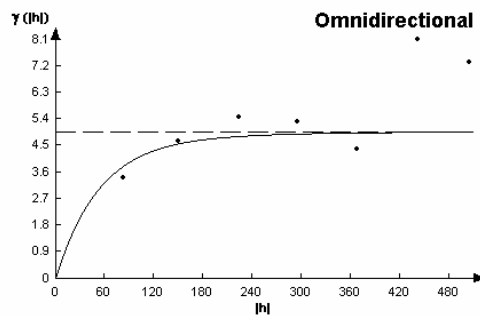


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60-61 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel. Delvis
spröd.

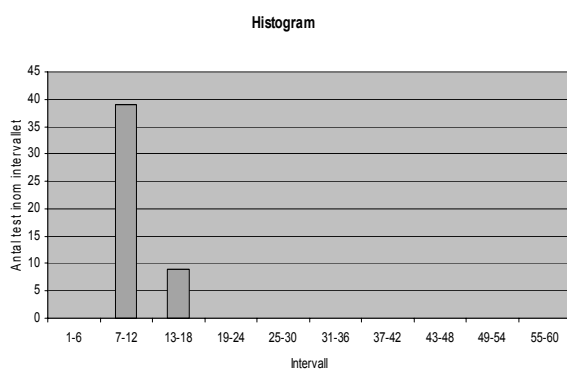
Figur 2B-2.85e



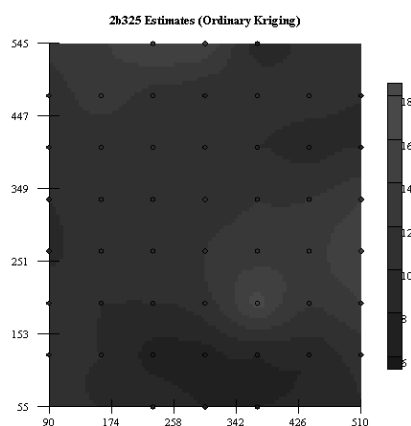
Figur 2B-3.25a



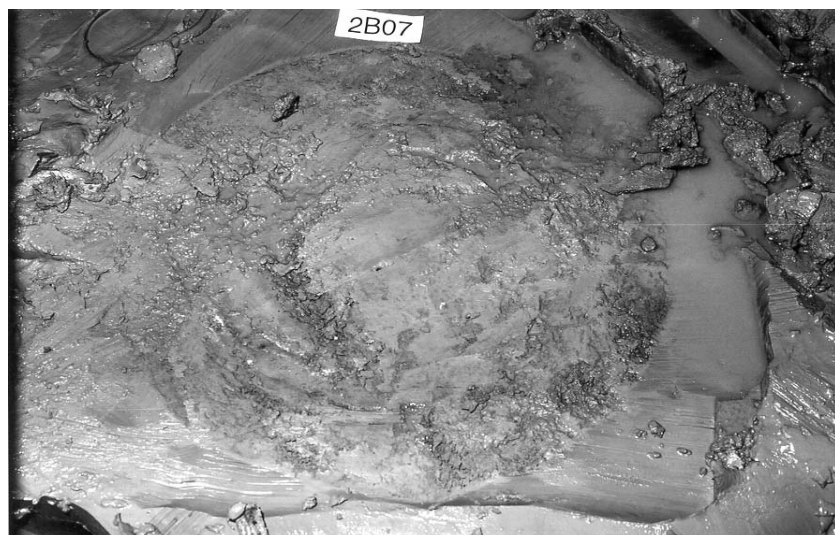
Figur 2B-3.25b



Figur 2B-3.25c

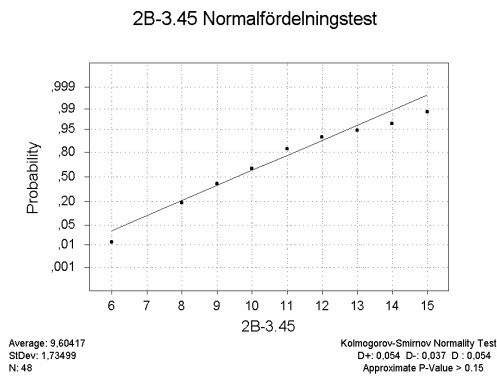


Figur 2B-3.25d

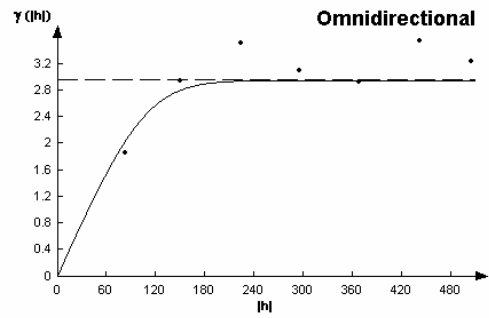


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 62 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

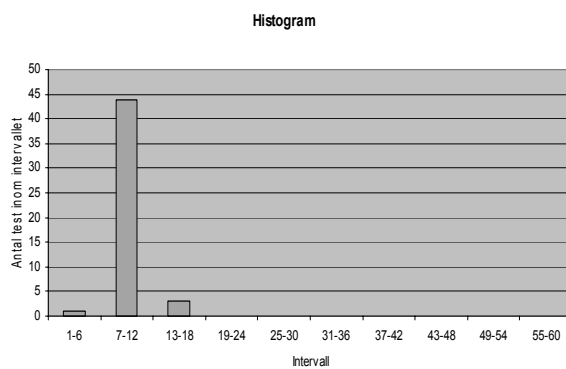
Figur 2B-3.25e



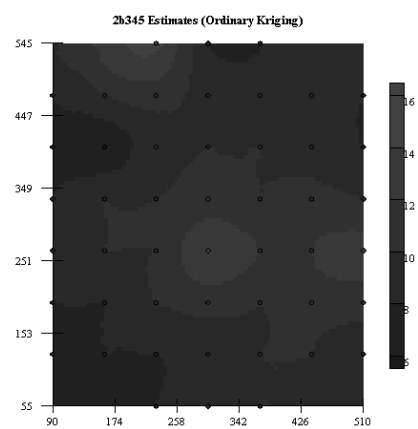
Figur 2B-3.45a



Figur 2B-3.45b



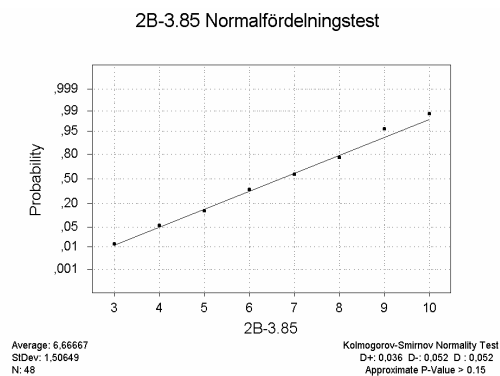
Figur 2B-3.45c



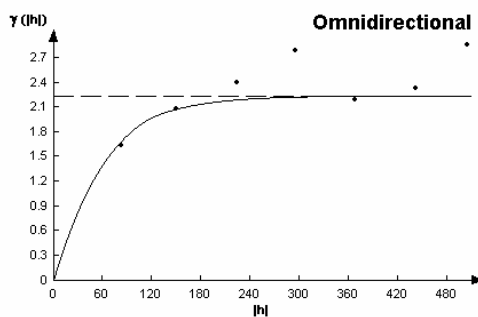
Figur 2B-3.45d

Bild saknas

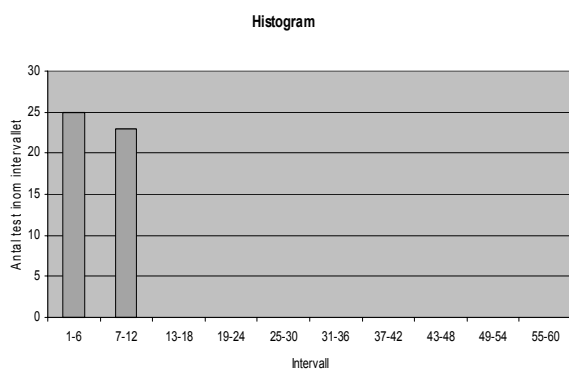
Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 63-66 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.
Bindemedel vid kanten
på en sträcka på 10 cm.



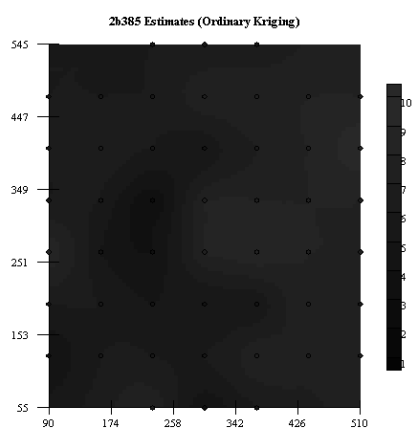
Figur 2B-3.85a



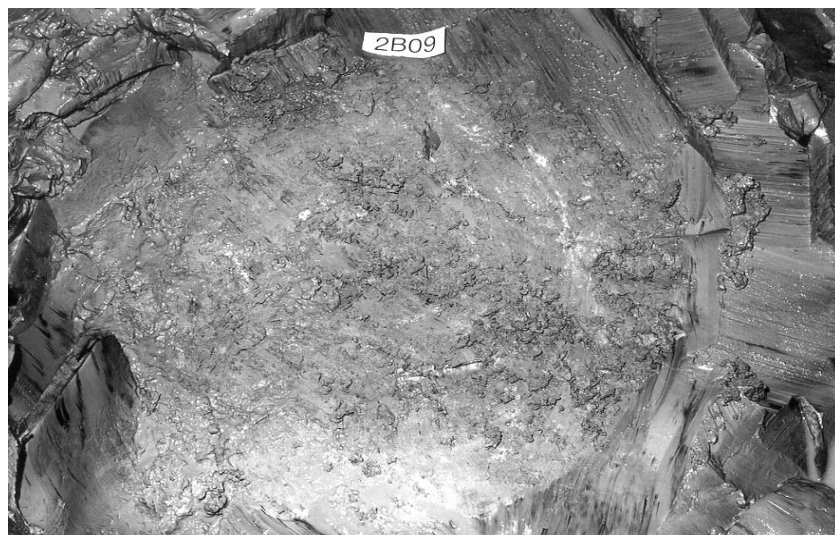
Figur 2B-3.85b



Figur 2B-3.85c

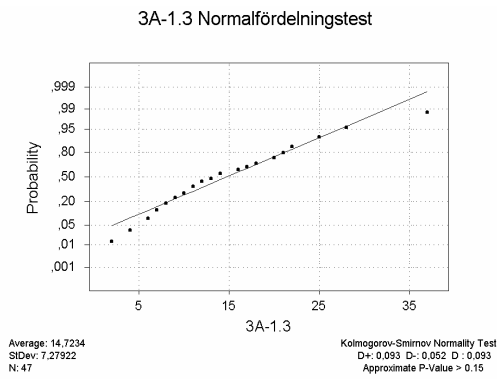


Figur 2B-3.85d

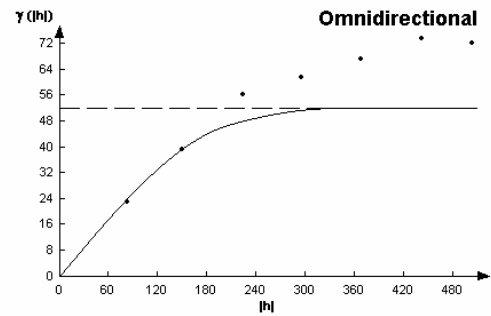


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 63 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

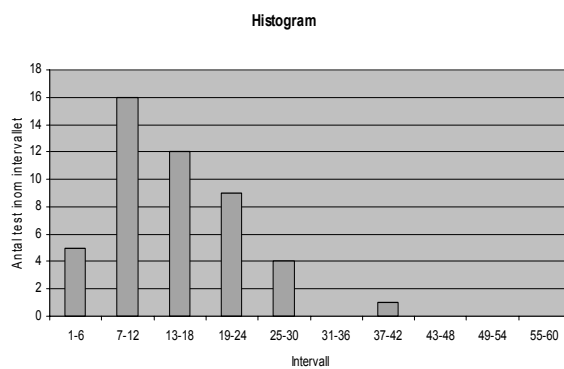
Figur 2B-3.85e



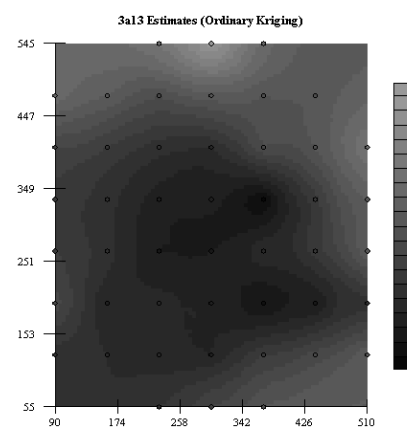
Figur 3A-1.3a



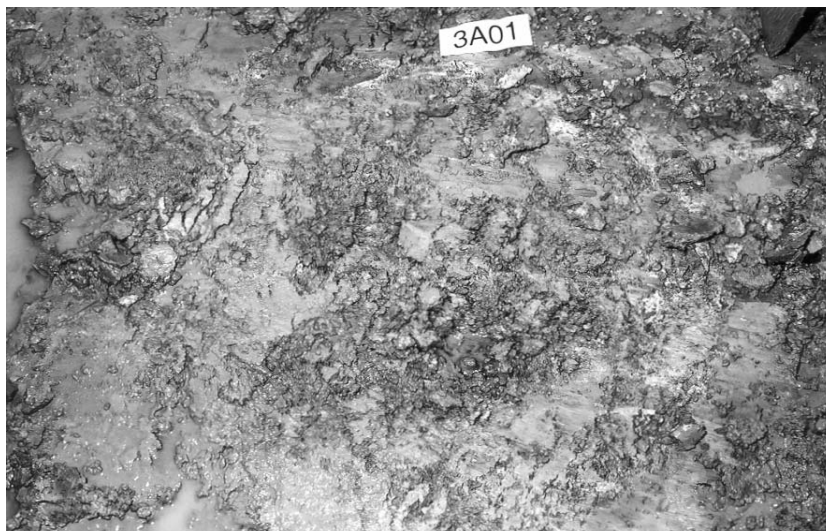
Figur 3A-1.3b



Figur 3A-1.3c

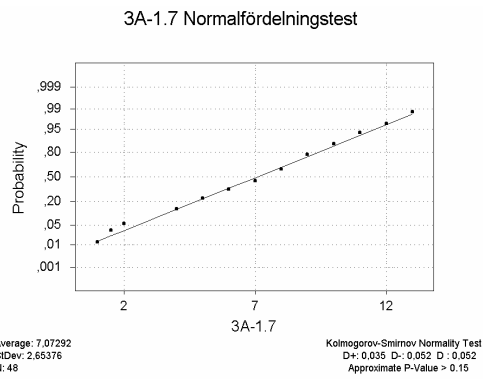


Figur 3A-1.3d

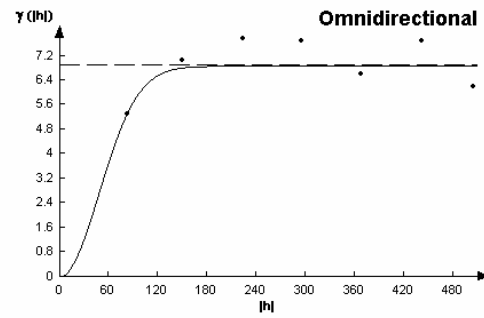


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel. Vattenfyllt
hål i mitten.
Bindemedel längs
kanten på halva
pelaren.

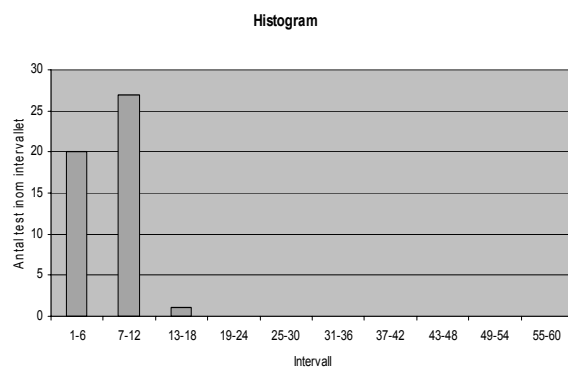
Figur 3A-1.3e



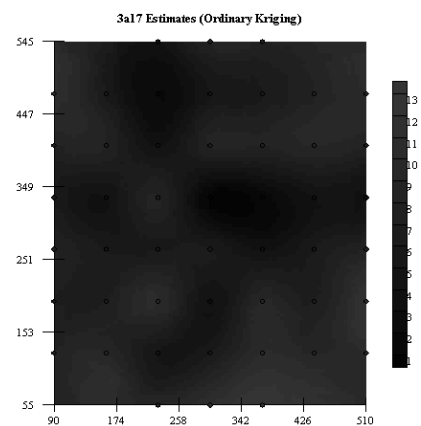
Figur 3A-1.7a



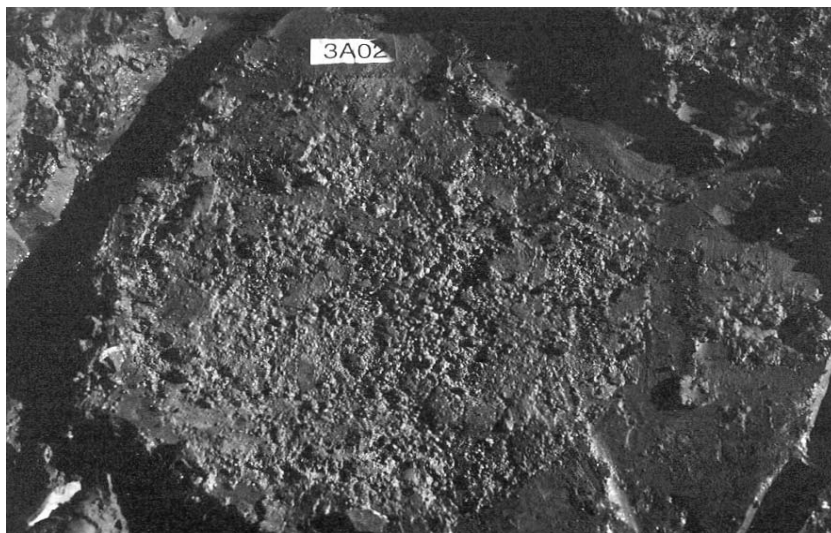
Figur 3A-1.7b



Figur 3A-1.7c

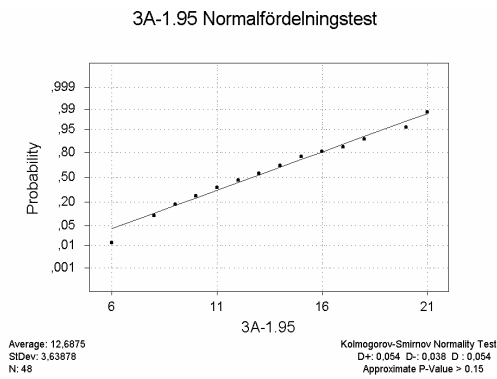


Figur 3A-1.7d

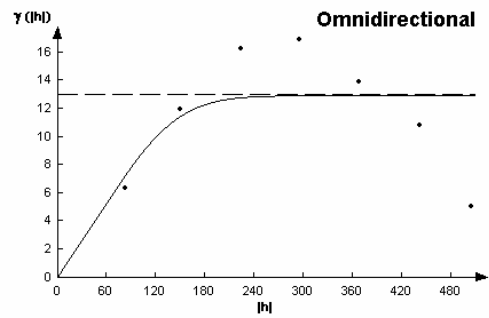


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel, grynig.

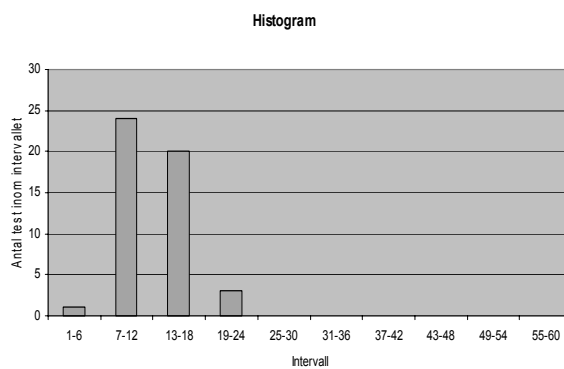
Figur 3A-1.7e



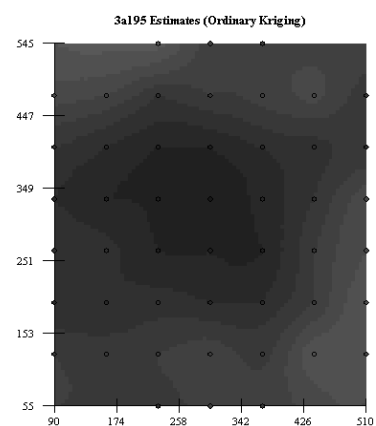
Figur 3A-1.95a



Figur 3A-1.95b



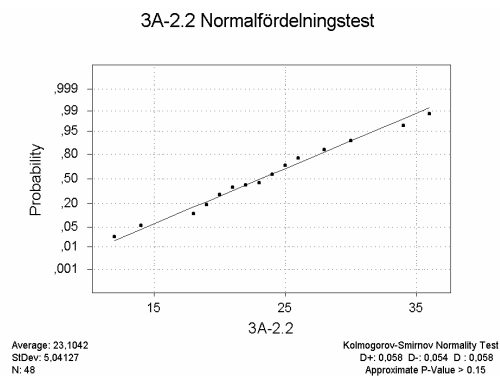
Figur 3A-1.95c



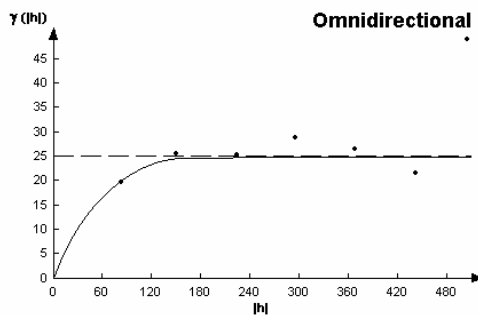
Figur 3A-1.95d

Bild saknas

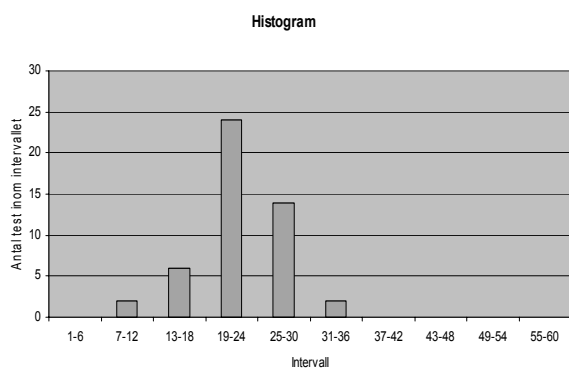
Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel, kornig,
blöt.



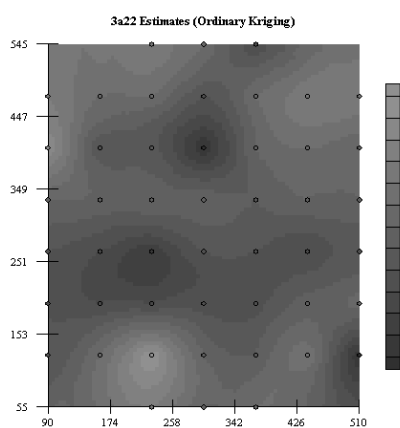
Figur 3A-2.2a



Figur 3A-2.2b



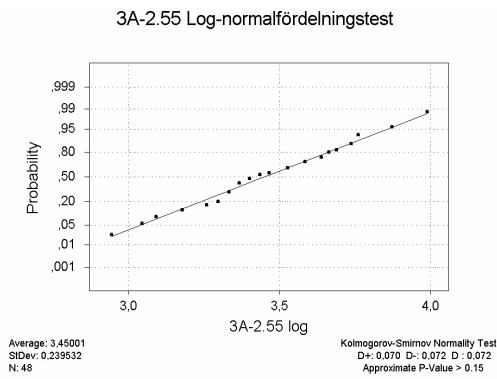
Figur 3A-2.2c



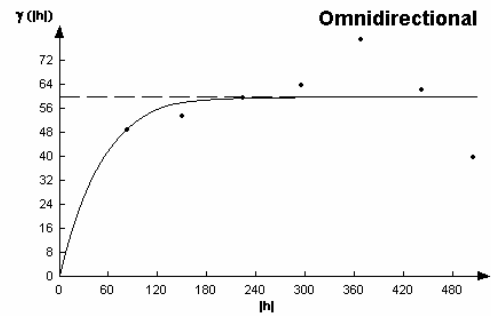
Figur 3A-2.2d

Bild saknas

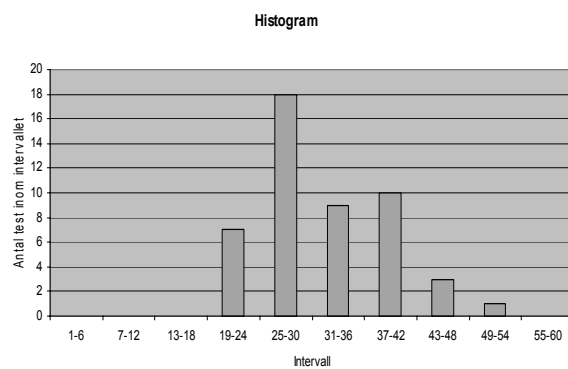
Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.



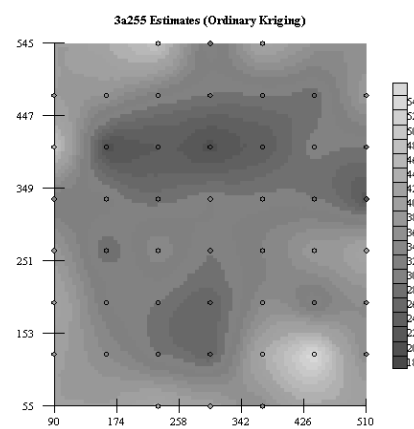
Figur 3A-2.55a



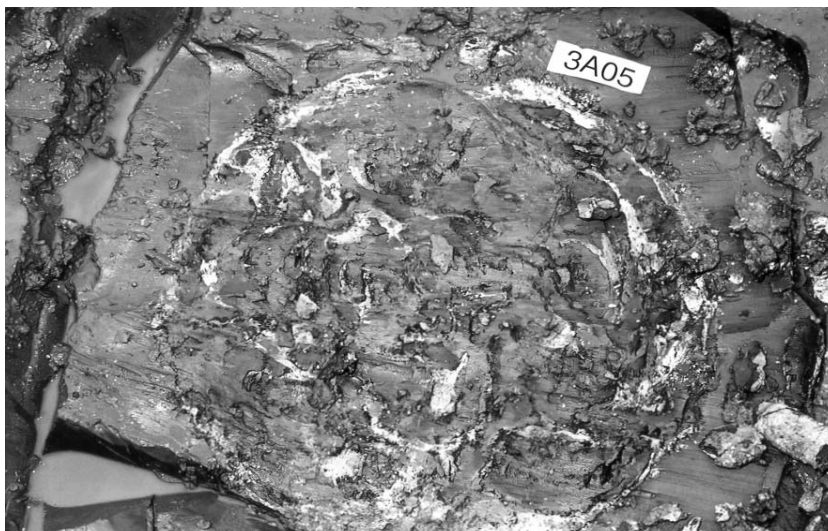
Figur 3A-2.55b



Figur 3A-2.55c

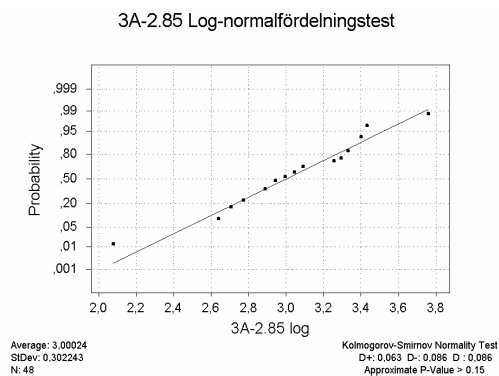


Figur 3A-2.55d

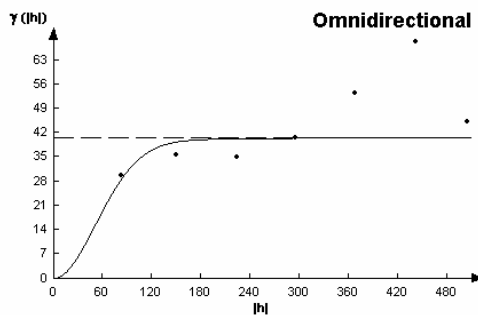


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Samlingar av
bindemedel, mest vid
kanterna.

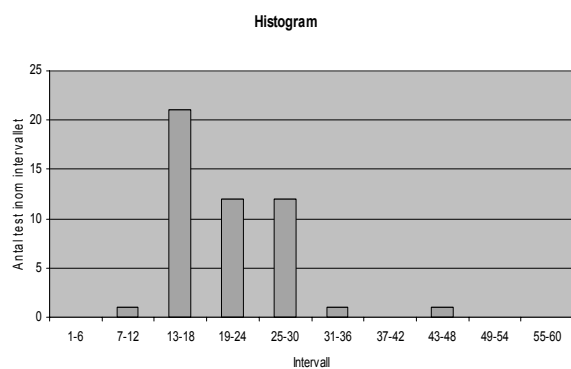
Figur 3A-2.55e



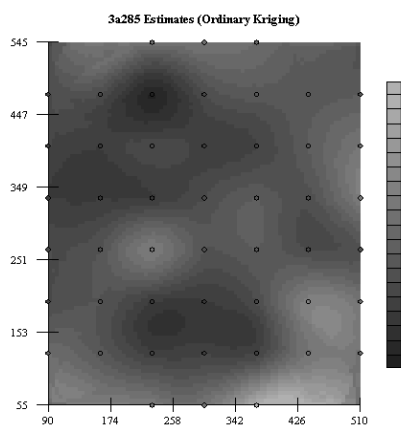
Figur 3A-2.85a



Figur 3A-2.85b



Figur 3A-2.85c

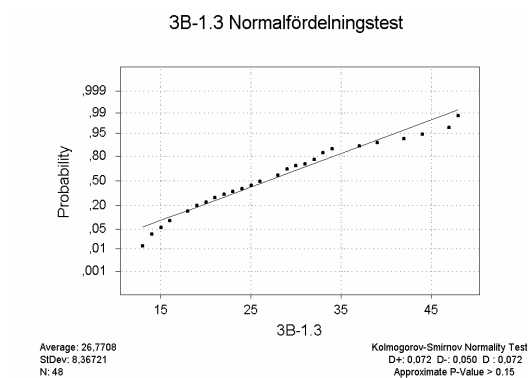


Figur 3A-2.85d

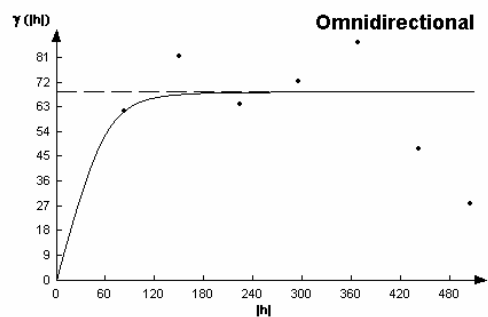


Stigning: 15 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Samlingar av
bindemedel, mest vid
kanterna.

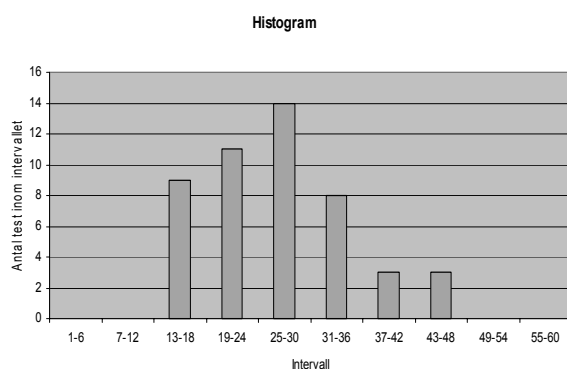
Figur 3A-2.85e



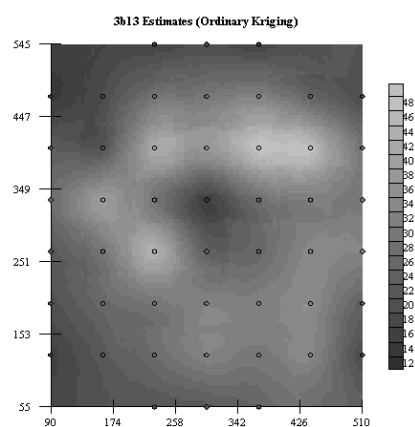
Figur 3B-1.3a



Figur 3B-1.3b



Figur 3B-1.3c

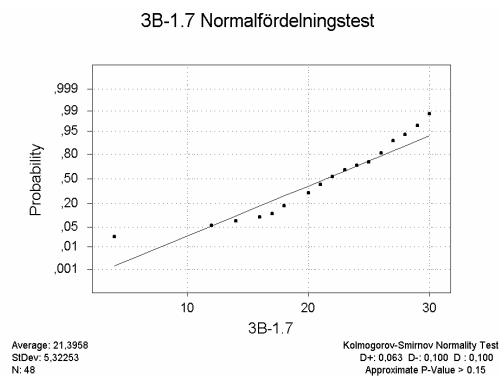


Figur 3B-1.3d

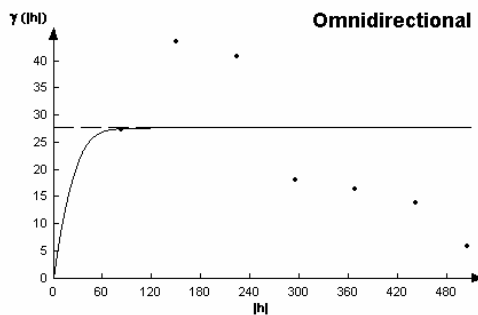


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Relativt jämn
fördelning av
bindemedel.

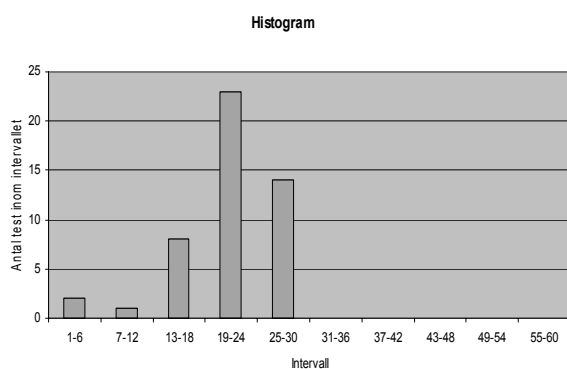
Figur 3B-1.3e



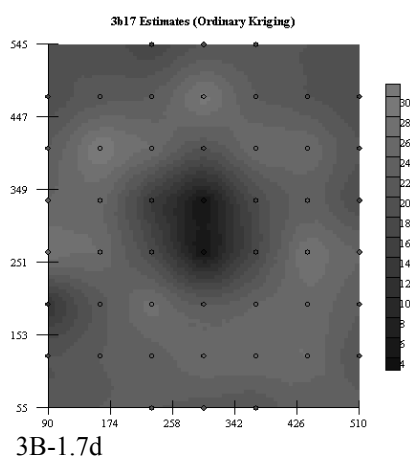
Figur 3B-1.7a



Figur 3B-1.7b



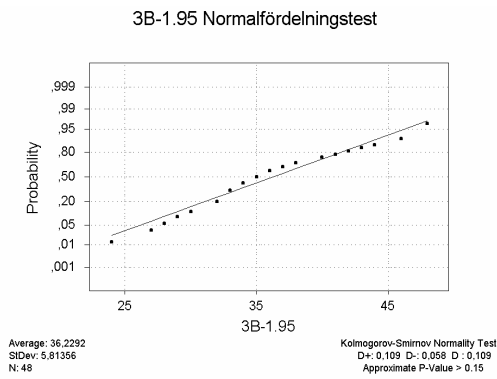
Figur 3B-1.7c



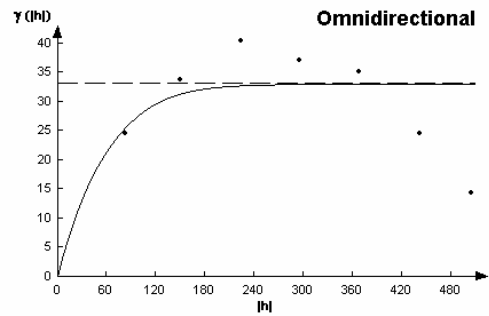
3B-1.7d

Bild saknas

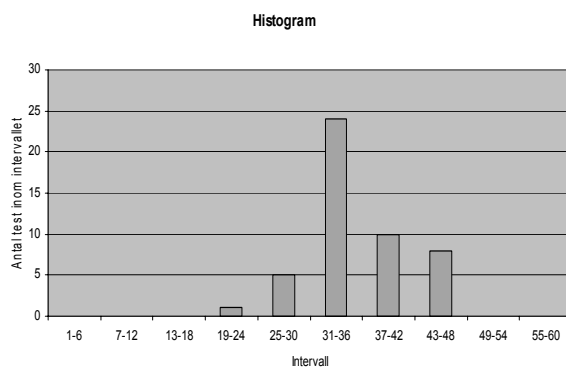
Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.



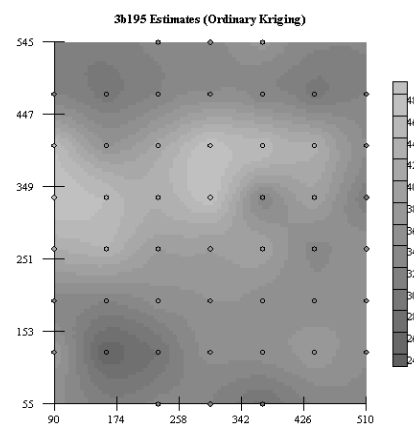
Figur 3B-1.95a



Figur 3B-1.95b



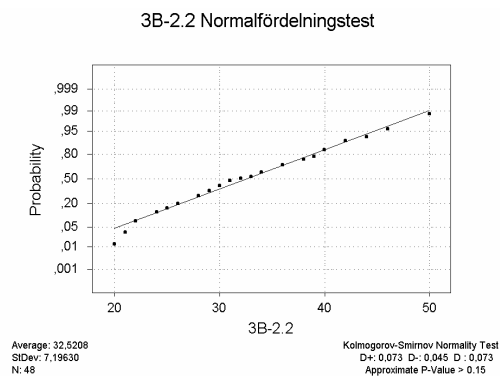
Figur 3B-1.95c



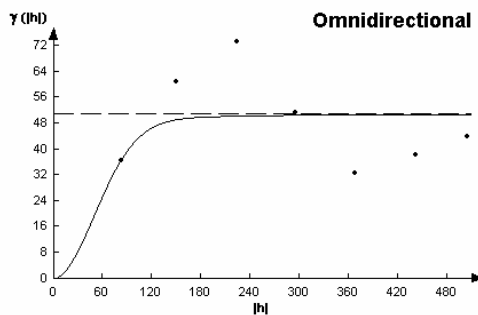
Figur 3B-1.95d

Bild saknas

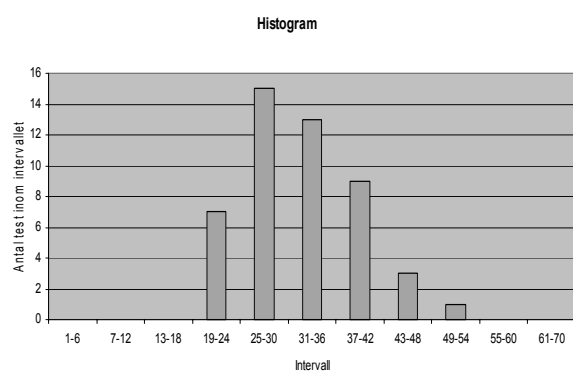
Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.



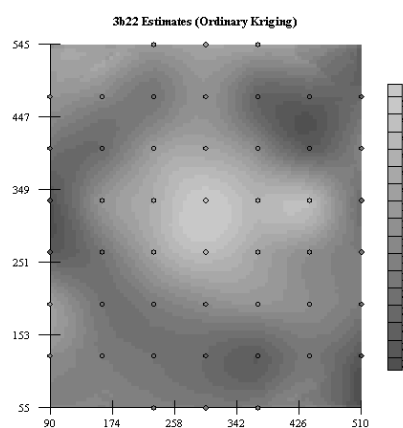
Figur 3B-2.2a



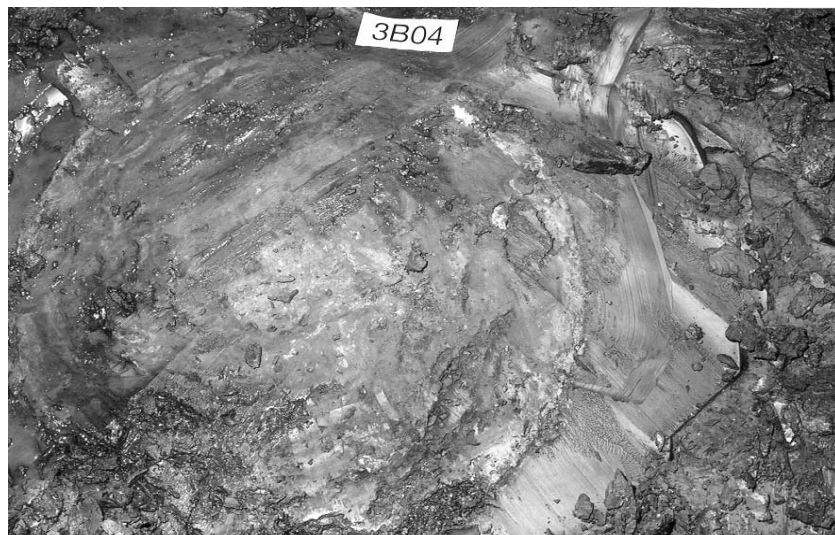
Figur 3B-2.2b



Figur 3B-2.2c

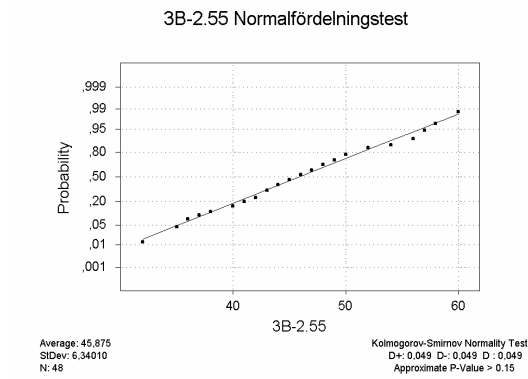


Figur 3B-2.2d

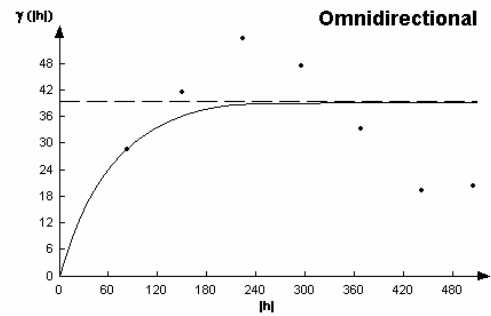


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel. Hård,
delvis spröd.

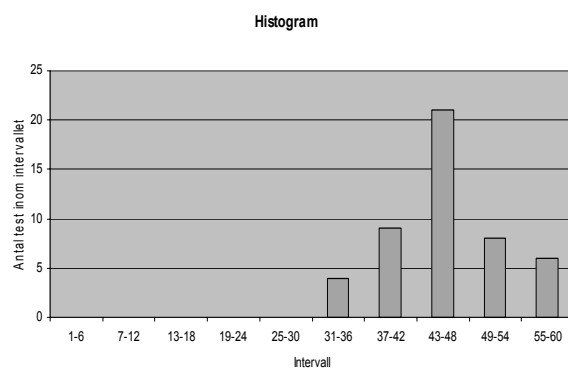
Figur 3B-2.2e



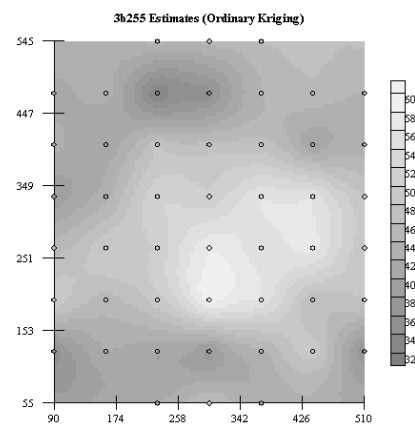
Figur 3B-2.55a



Figur 3B-2.55b



Figur 3B-2.55c

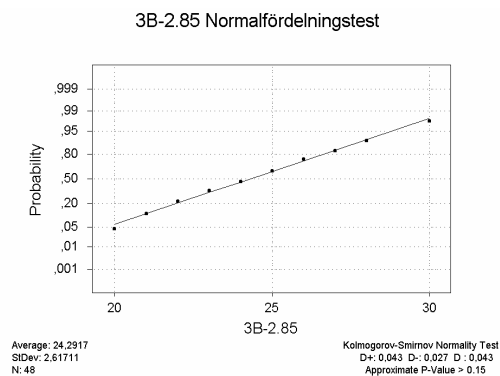


Figur 3B-2.55d

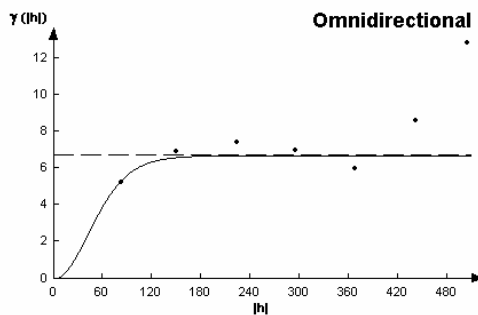


Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

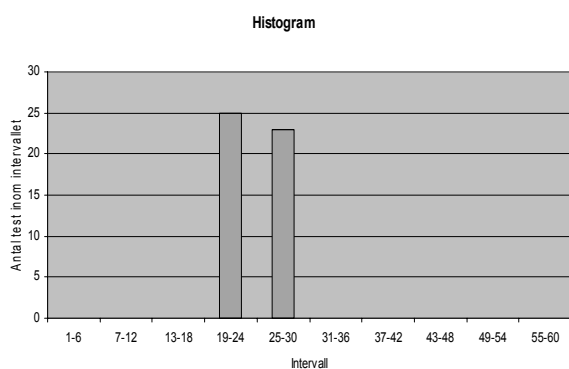
Figur 3B-2.55e



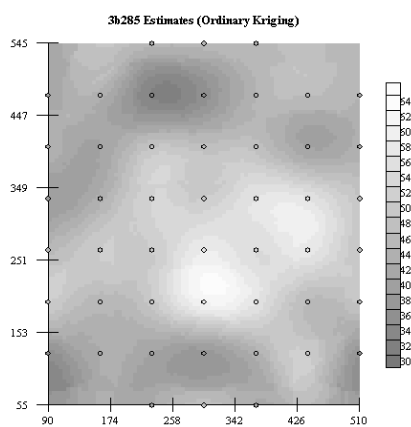
Figur 3B-2.85a



Figur 3B-2.85b



Figur 3B-2.85c



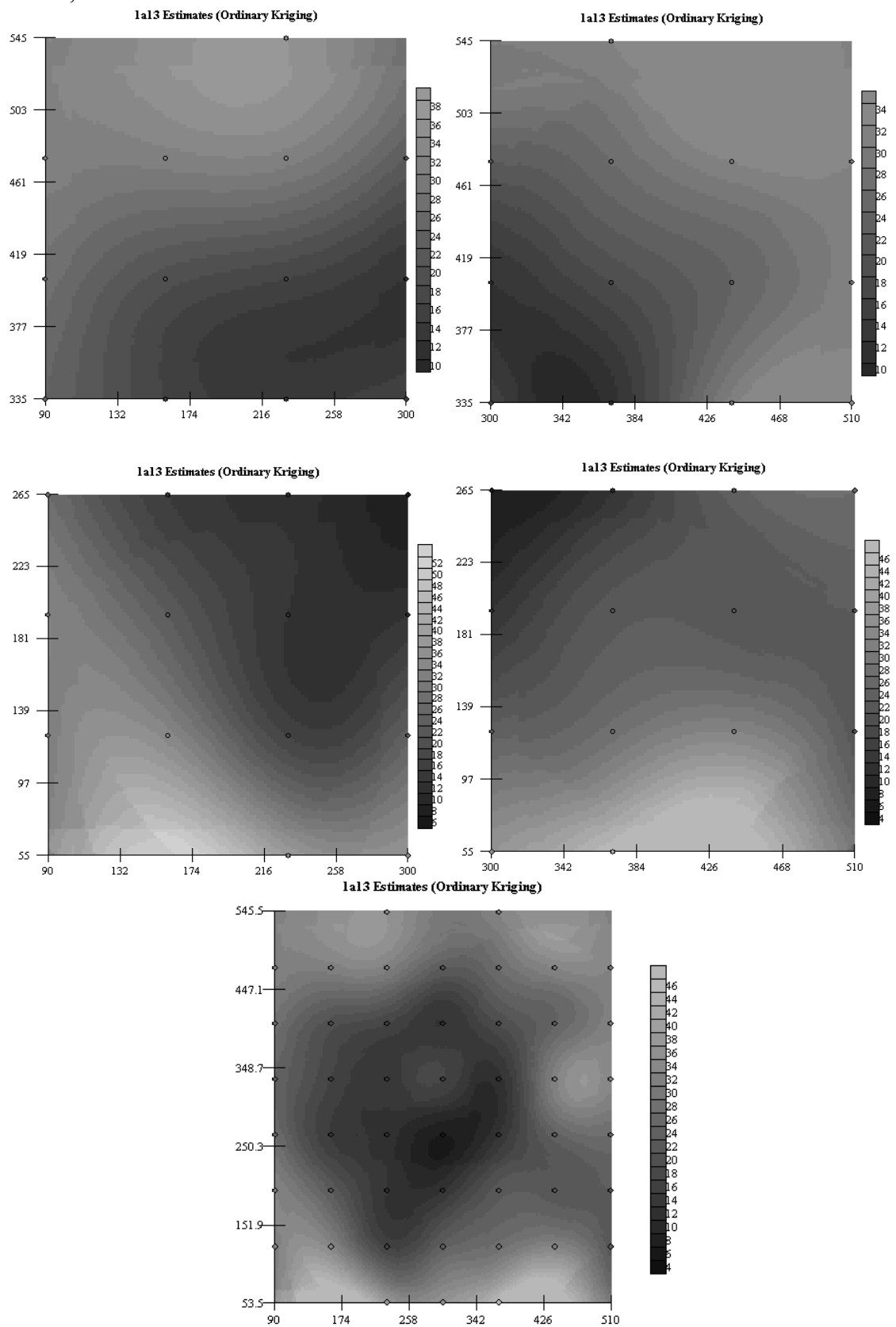
Figur 3B-2.85d



Stigning: 30 mm/varv
Diameter: 60 cm
Okulär besiktning:
Jämn fördelning av
bindemedel.

Figur 3B-2.85e

Nedan redovisas tvärsnitt 1A-1.3 dels uppdelad i fyra kvadranter på vilka kriging utförts, dels hela tvärsnittet.



Bilaga C

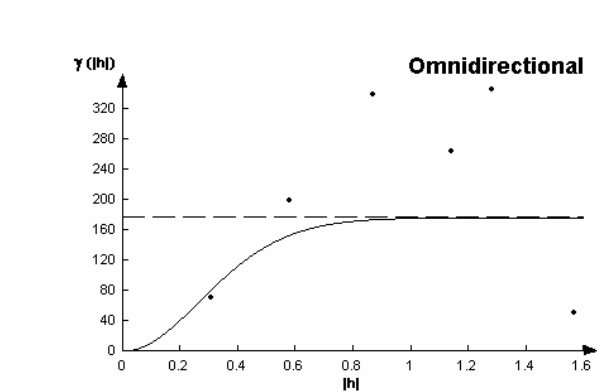
Sammanställning av provningsresultat i vertikalled

Vertikal profilerna är utvärderade med hjälp av medelvärdet för respektive tvärsnitt.

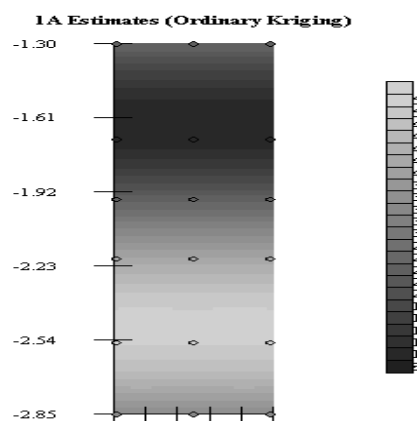
Figur a är ett variogram, som dels beskriver på vilket avstånd punkterna i ett tvärsnitt är korrelerade samt ger nödvändig indata för att kunna utföra kriging.

Figur b är en utskrift från programmet SADA, som visar fördelningen av fjäderdeformationen i vertikalled. Axlarna anges i m, fjäderdeformationen i mm.

Pelare 1Az

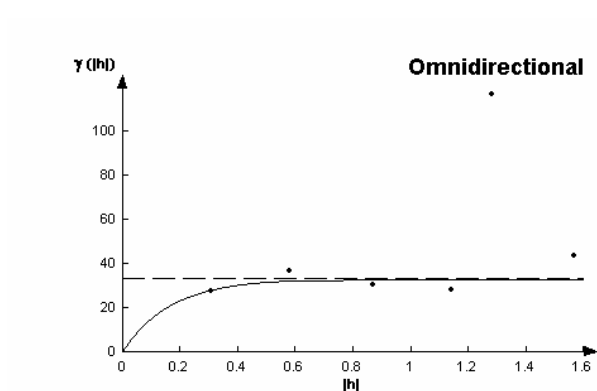


Figur 1Aza

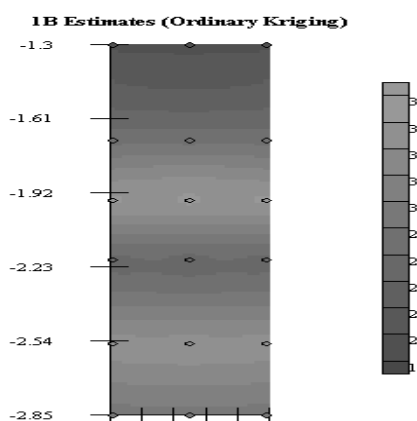


Figur 1Azb

Pelare 1Bz

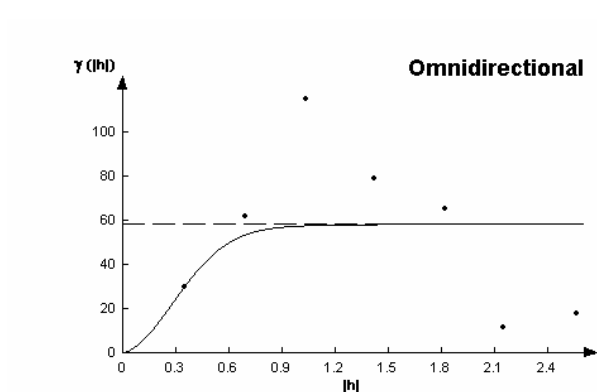


Figur 1Bza

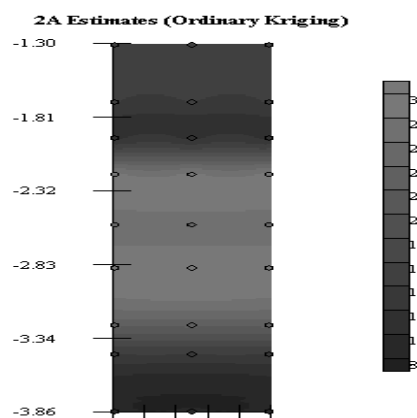


Figur 1Bzb

Pelare 2Az

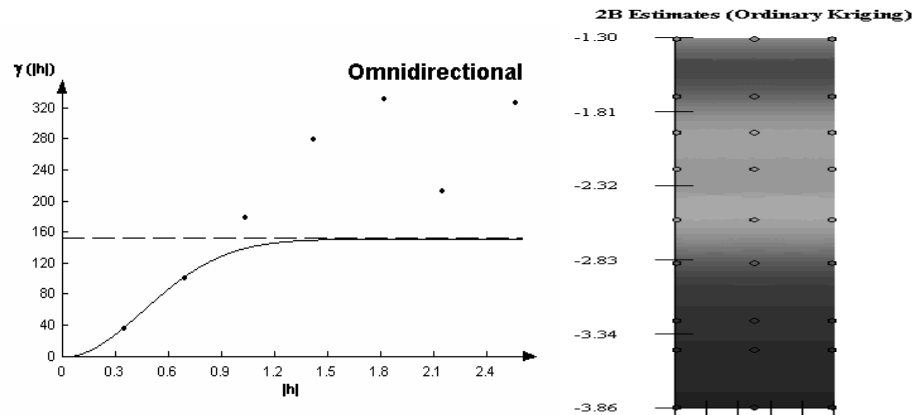


Figur 2Aza



Figur 2Azb

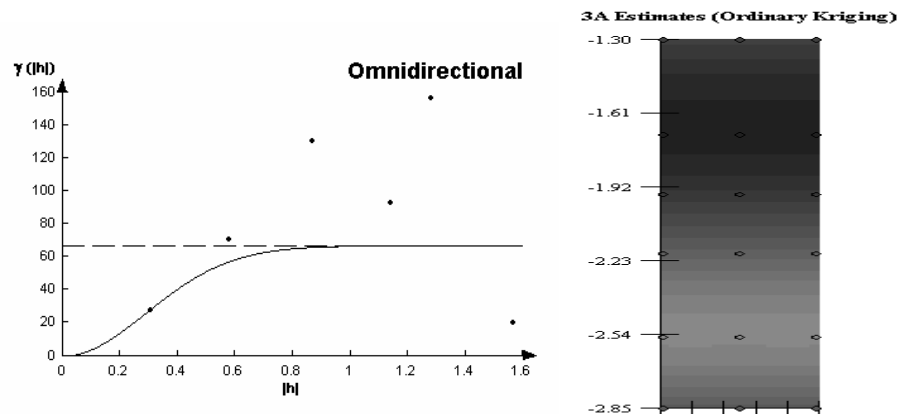
Pelare 2Bz



Figur 2Bza

Figur 2Bzb

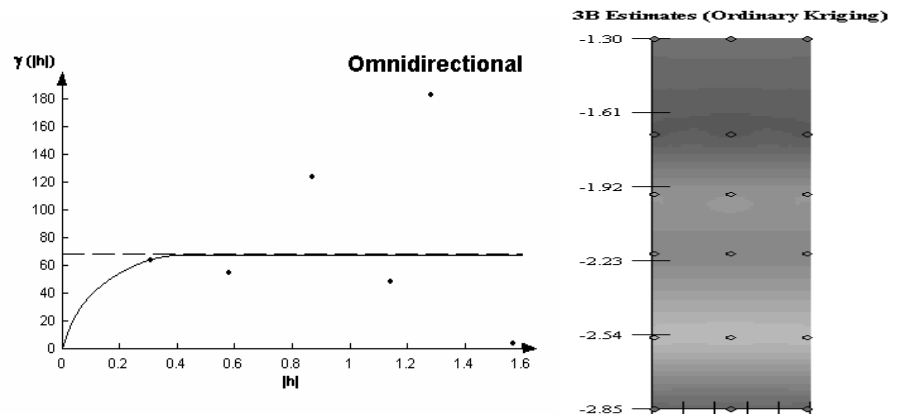
Pelare 3Az



Figur 3Aza

Figur 3Azb

Pelare 3Bz



Figur 3Bza

Figur 3Bzb

Bilaga D

Installationsdata



Object: 923 INBLANDNINGSTEKNIK 2003.02.10 11:29

Customer: SD

Column name: 1A

Machine: 814
Driver: KARL JIM RIKARD KENT
Column type: 600KC25 50/50
Drill: P1 37

Date: 2002.10.30

Time: 08:39

Depth (m): 6.0

Stabilized (m): 5.5

Nom. (kg/m): 25.0

Tol. (kg/m): 2.5

Avg. (kg/m): 28.1

Total (kg): 154.0

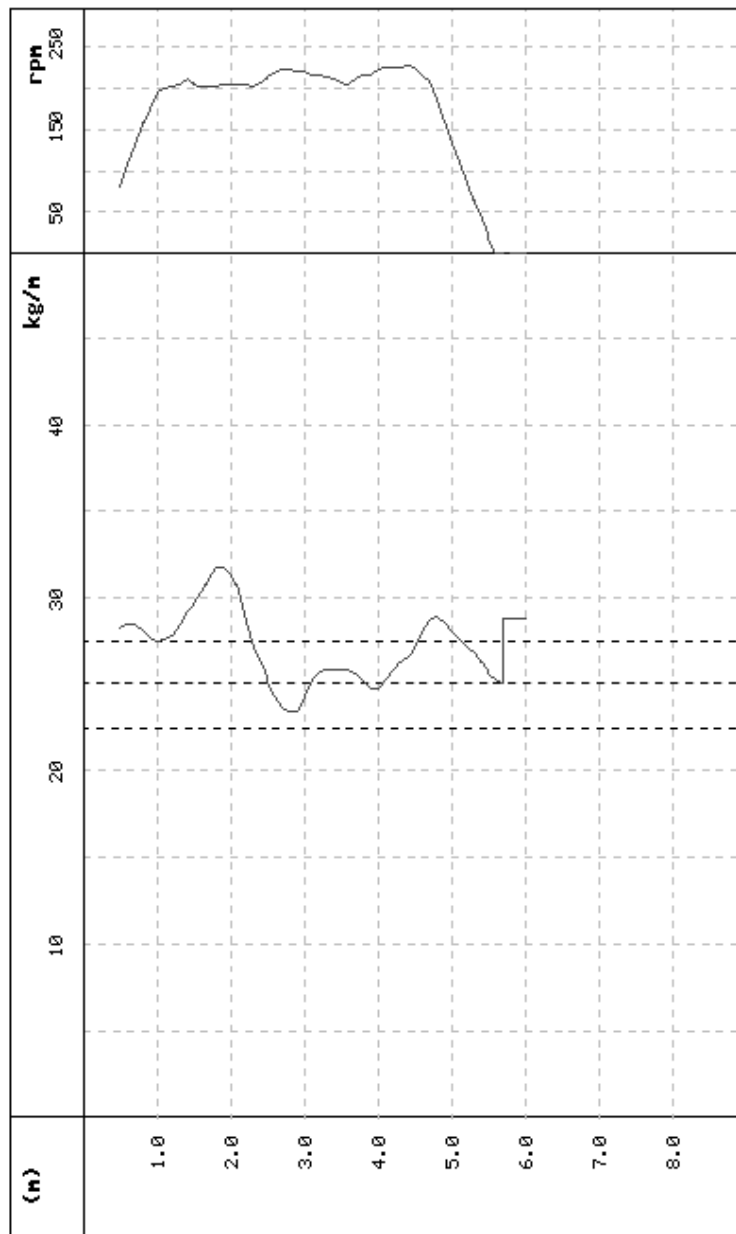
KGB (kg): 11.5

M+: 1.4

M-: 0.0

KG+: 2.5

KG-: 0.0





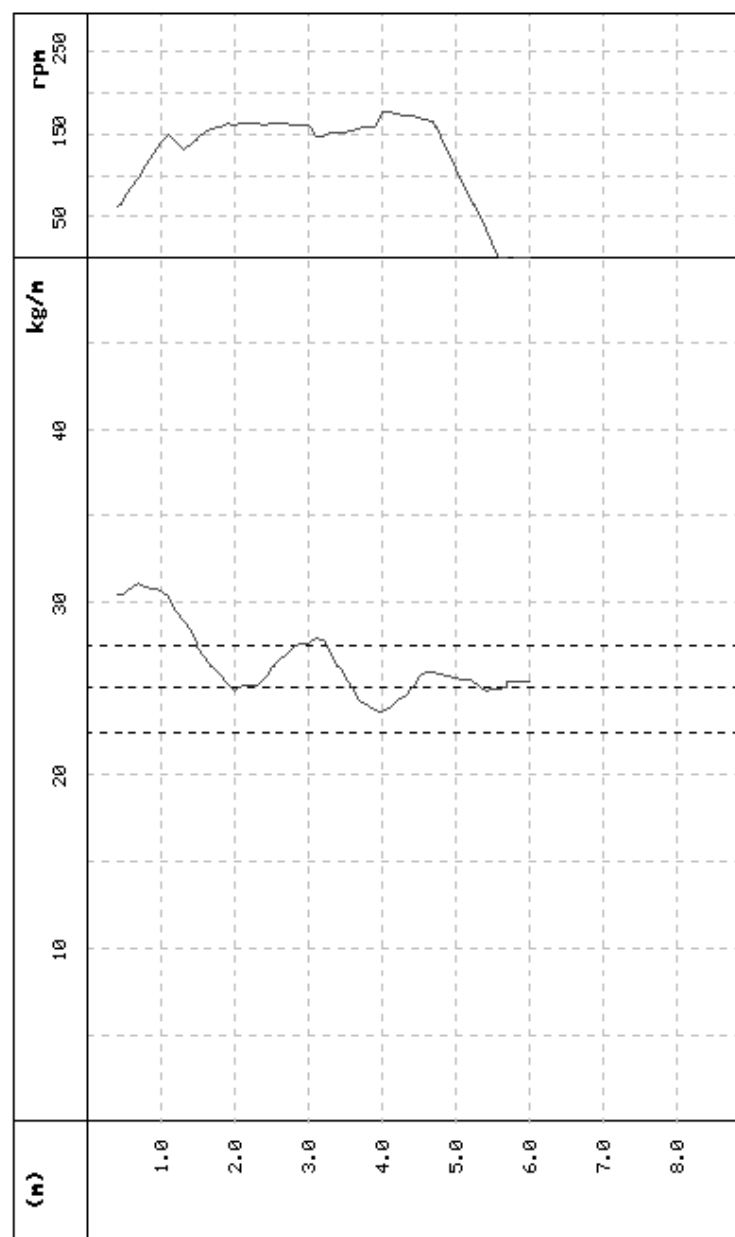
Object: 923 INBLANDNINGSTEKNIK 2003.02.10 11:37 

Customer: SD

Column name: 1B

Machine: 814
Driver: KARL JIM RIKARD KENT
Column type: 600KC25 50/50
Drill: P1 37

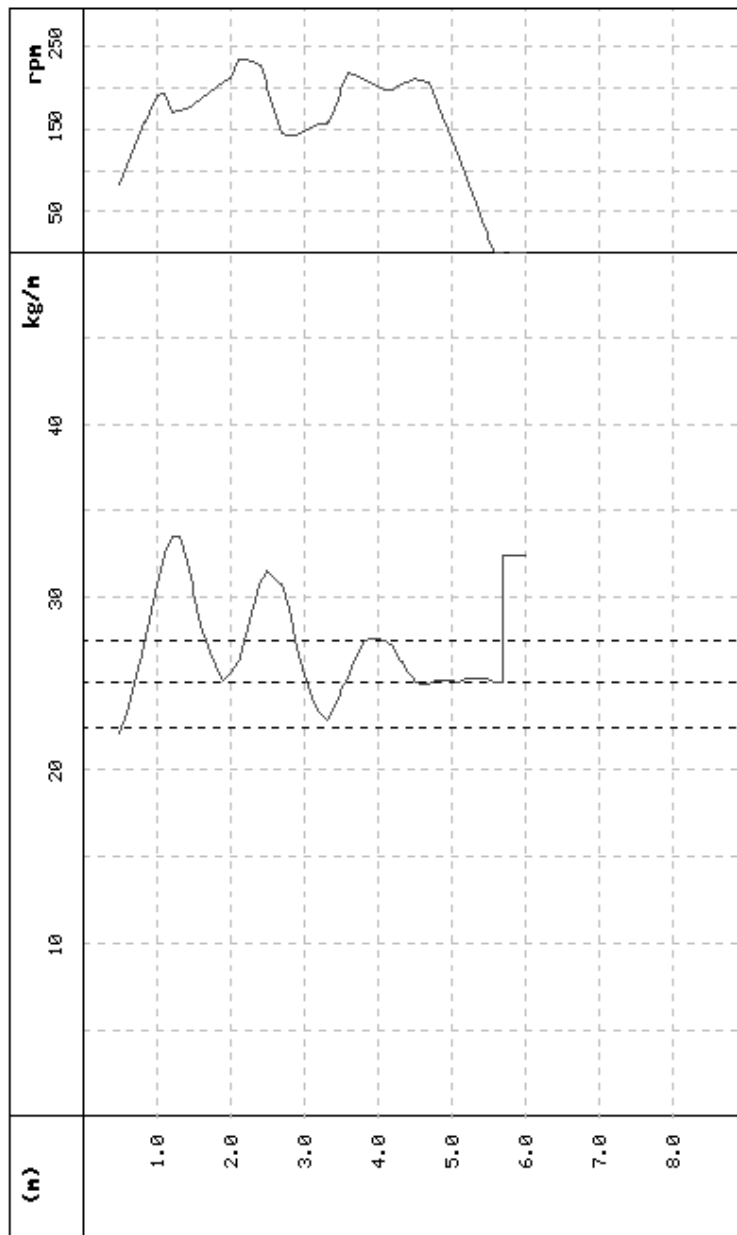
Date:	2002.10.30
Time:	20:58
Depth (m):	6.0
Stabilized (m):	5.6
Norm. (kg/m):	25.0
Tol. (kg/m):	2.5
Avg. (kg/m):	27.0
Total (kg):	151.0
KGB (kg):	10.2
M+:	0.6
M-:	0.0
KG+:	1.2
KG-:	0.0





Object: 923 INBLANDNINGSTEKNIK 2003.02.10 11:31
 Customer: SD
 Column name: 2A

Machine: 814
 Driver: KARL JIM RIKARD KENT
 Column type: 600KC25 50/50
 Drill: P1 37



Date: 2002.10.30
 Time: 08:42
 Depth (m): 6.0
 Stabilized (m): 5.5

Norm. (kg/m): 25.0
 Tol. (kg/m): 2.5
 Avg. (kg/m): 27.5
 Total (kg): 152.0
 KGB (kg): 13.0
 M+: 2.0
 M-: 0.0
 KG+: 2.9
 KG-: 0.0



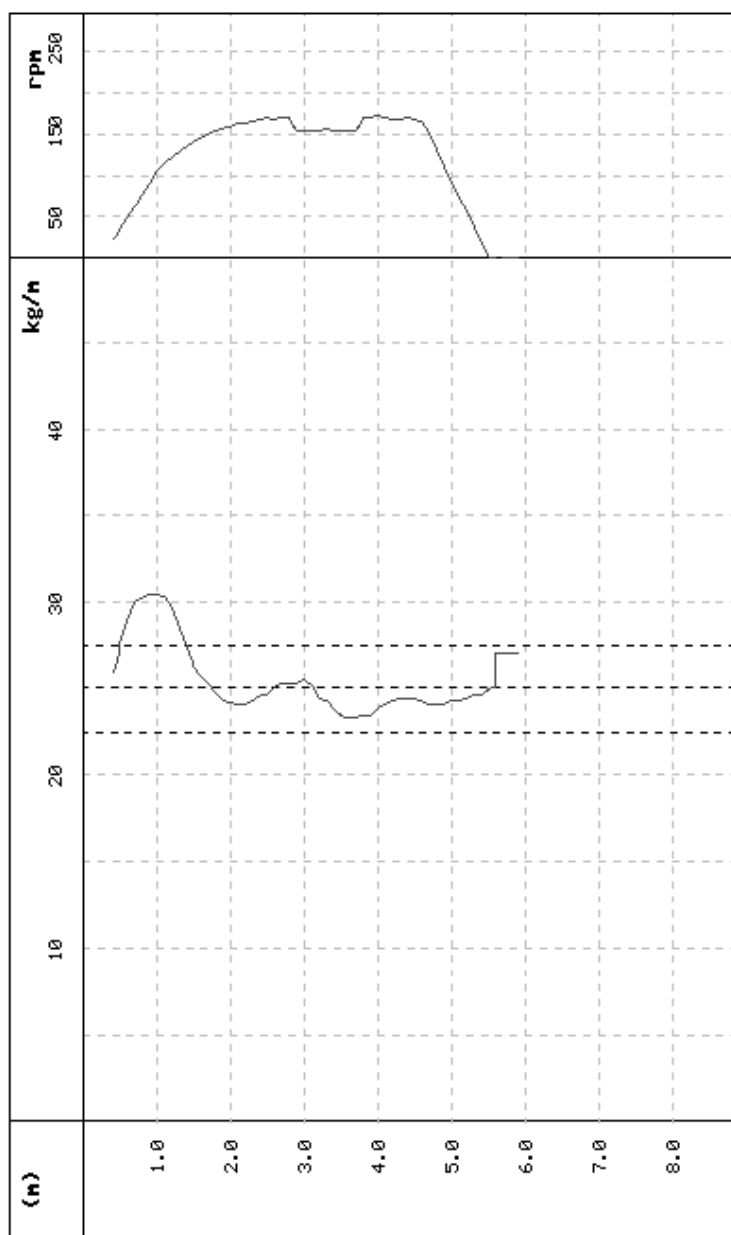
Object: 923 INBLANDNINGSTEKNIK 2003.02.10 11:38 

Customer: SD

Column name: 2B

Machine: 814
 Driver: KARL JIM RIKARD KENT
 Column type: 600KC25 50/50
 Drill: P1 37

Date:	2002.10.30
Time:	20:59
Depth (m):	5.9
Stabilized (m):	5.5
Norm. (kg/m):	25.0
Tol. (kg/m):	2.5
Avg. (kg/m):	25.5
Total (kg):	138.0
KGB (kg):	10.8
M+:	0.6
M-:	0.0
KG+:	0.7
KG-:	0.0





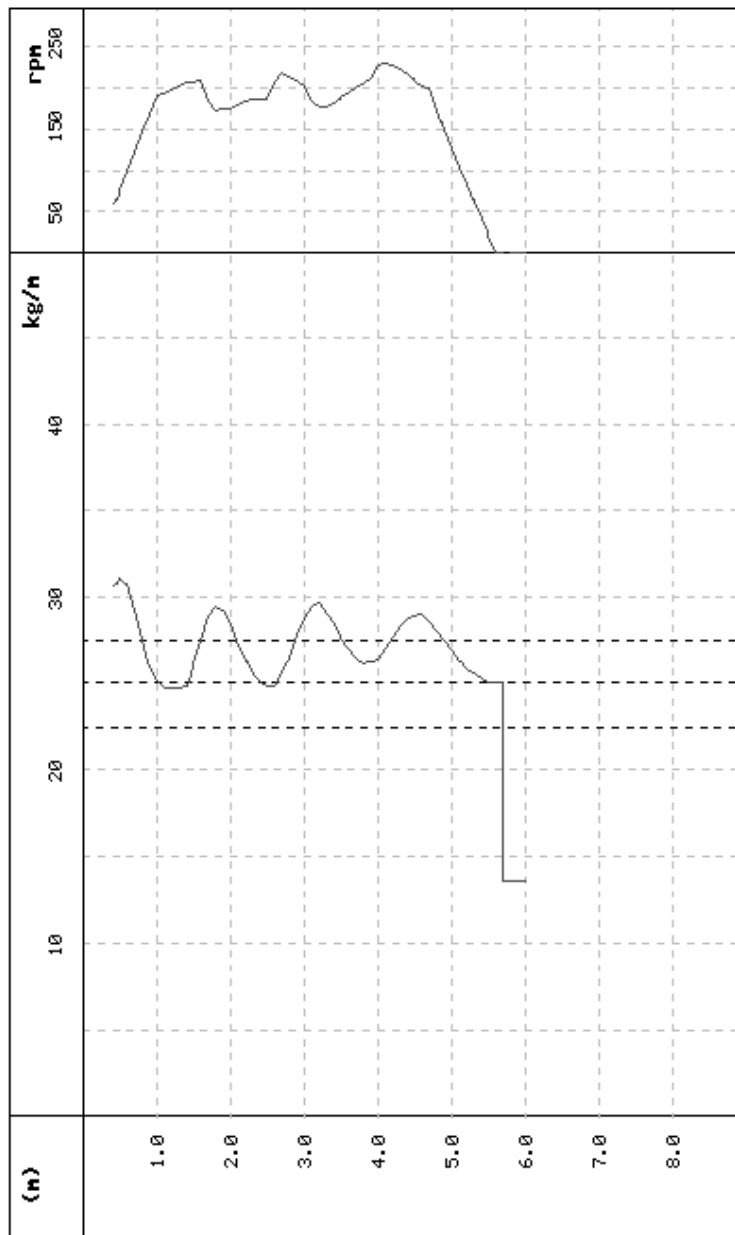
Object: 923 INBLANDNINGSTEKNIK 2003.02.10 11:36

Customer: SD

Column name: 3A

Machine: 814
 Driver: KARL JIM RIKARD KENT
 Column type: 600KC25 50/50
 Drill: P1 37

Date:	2002.10.30
Time:	08:45
Depth (m):	6.0
Stabilized (m):	5.6
Norm. (kg/m):	25.0
Tol. (kg/m):	2.5
Avg. (kg/m):	26.9
Total (kg):	149.0
KGB (kg):	5.5
M+:	1.2
M-:	0.0
KG+:	0.4
KG-:	0.0





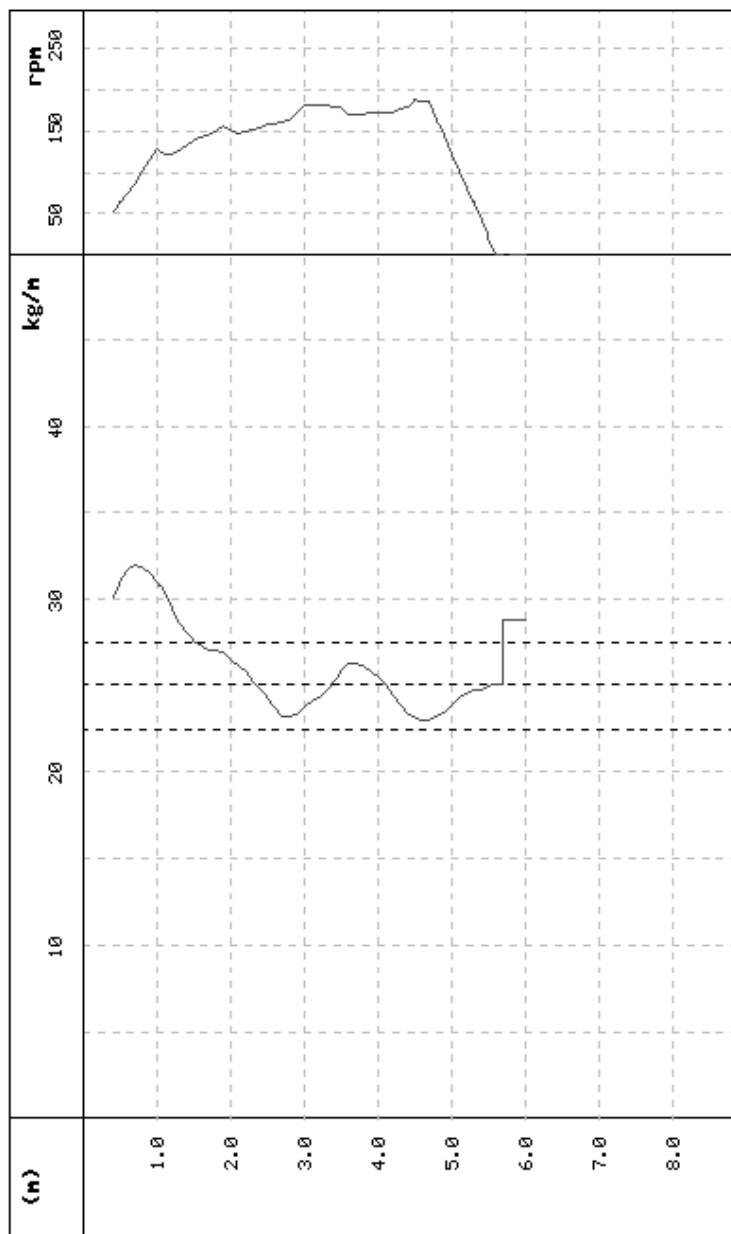
Object: 923 INBLANDNINGSTEKNIK 2003.02.10 11:38

Customer: SD

Column name: 3B

Machine: 814
 Driver: KARL JIM RIKARD KENT
 Column type: 600KC25 50/50
 Drill: P1 37

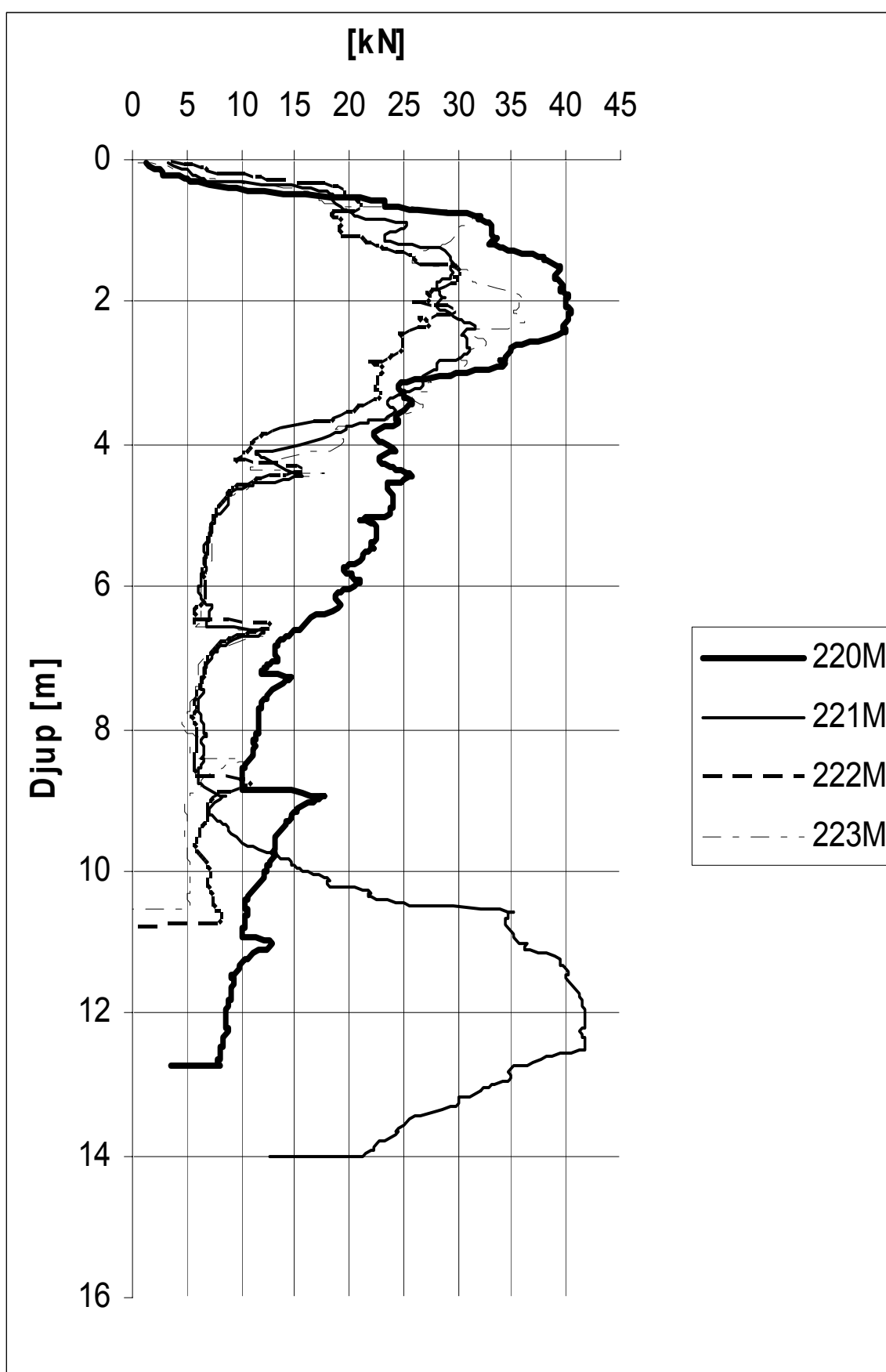
Date:	2002.10.30
Time:	21:03
Depth (m):	6.0
Stabilized (m):	5.6
Norm. (kg/m):	25.0
Tol. (kg/m):	2.5
Avg. (kg/m):	26.7
Total (kg):	148.0
KGB (kg):	11.5
M+:	0.8
M-:	0.0
KG+:	1.5
KG-:	0.0

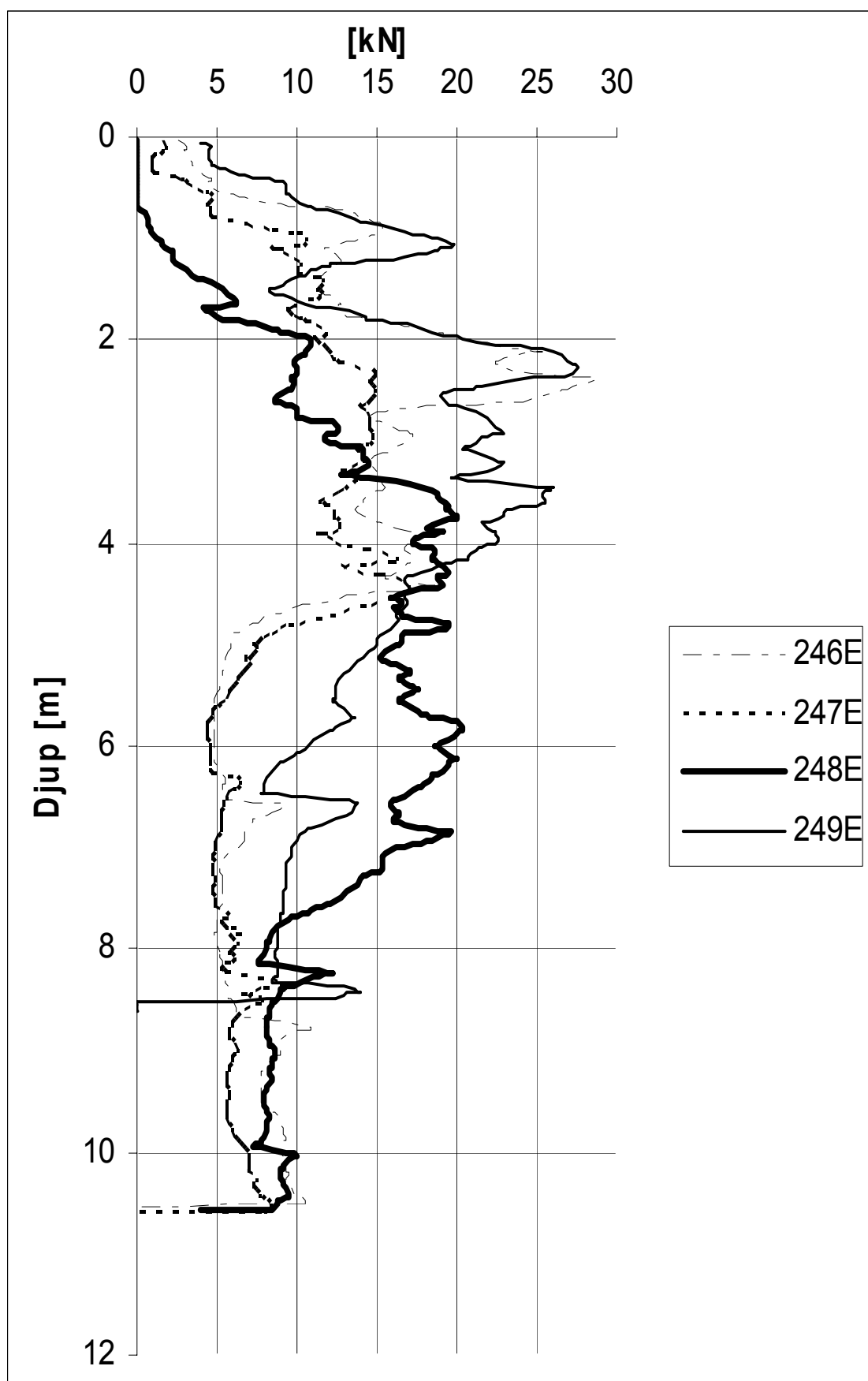


Bilaga E

Resultat från pelarsonderingen.

Pelarsonderingen är utförd av Bjerking AB för LCM. Sonderingen är utförd på produktionspelare i väglinjen, ca 20-40 m från vår provyta.

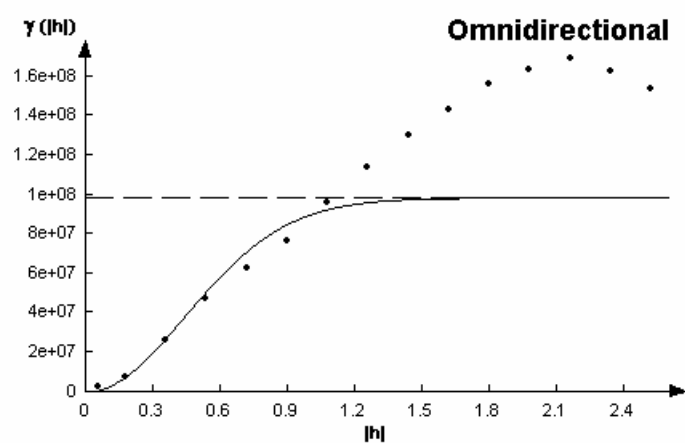




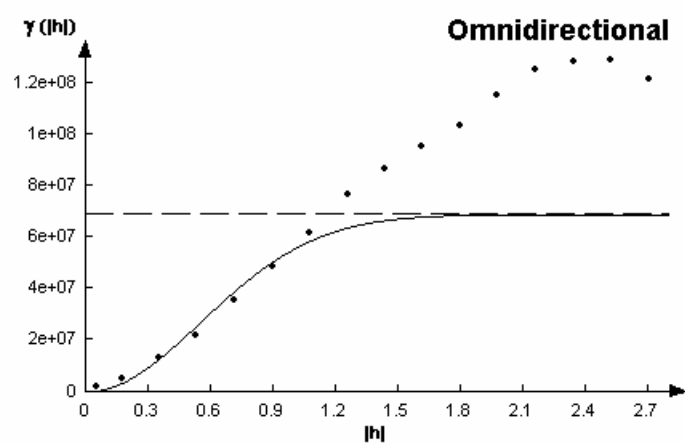
Bilaga F

Variogram för pelarsonderingarna

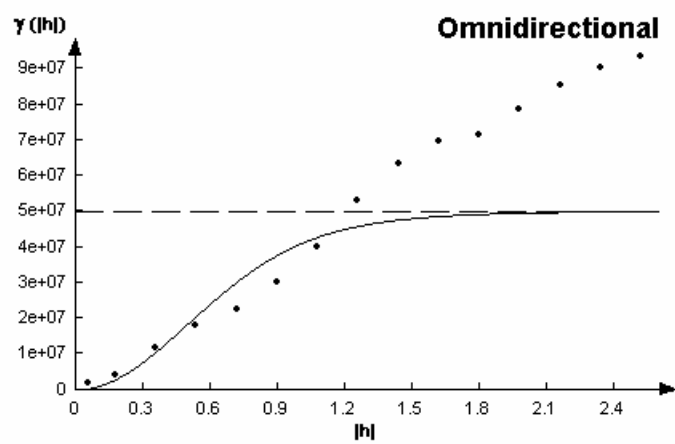
220M



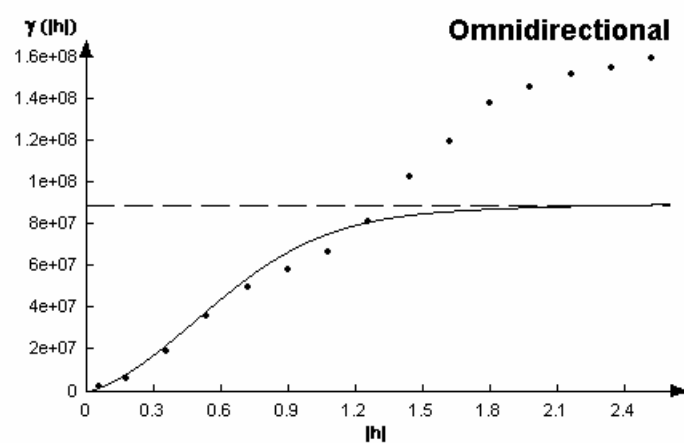
221M



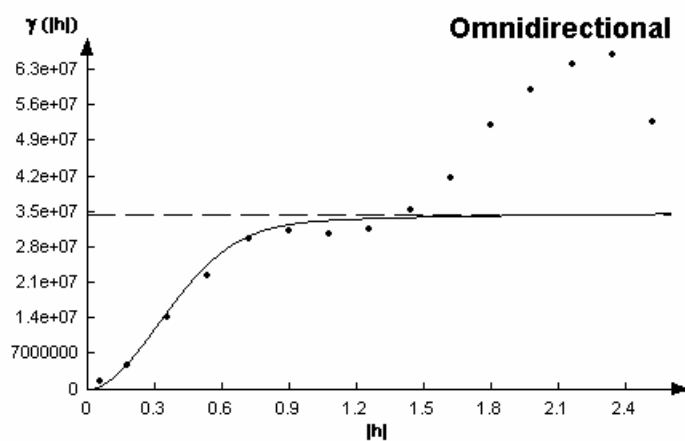
222M



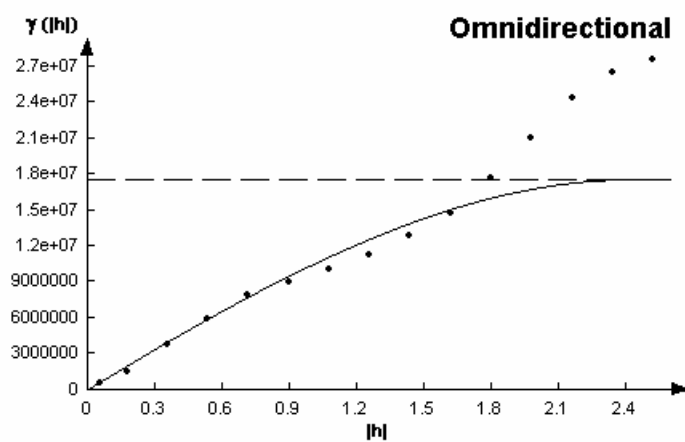
223M



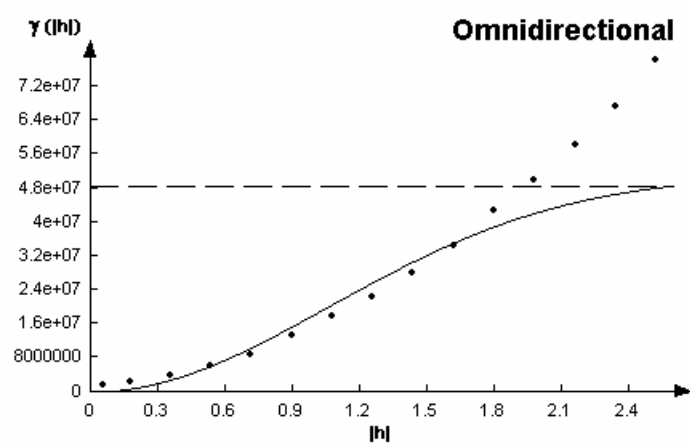
246E



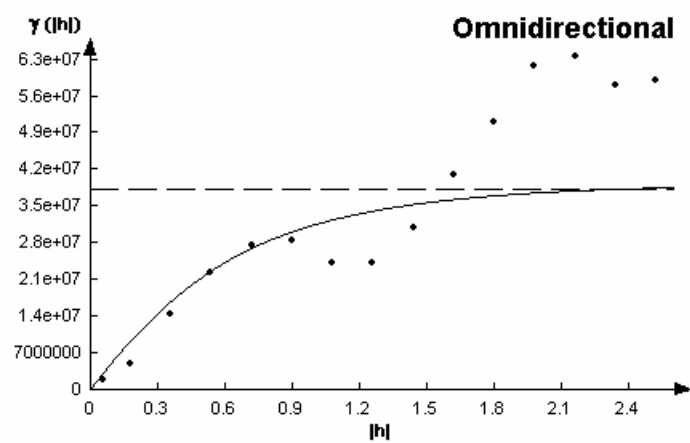
247E



248E



249E



Publikationer utgivna av Svensk Djupstabilisering

Arbetsrapport

1. **Arlandabanan, Norra Böjen. Sättningar hos järnvägsbank på kc-pelare (1998)**
Ulf Stjerngren
2. **KC-förstärkning för schakt inom spont, Filipstad Brygge, Oslo (1998)**
Phung Doc Long & Håkan Bredenberg
3. **Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cementpelare och cementpelare (1998)**
Stefan Larsson
4. **Undersökning av KC-pelare med avseende på dess "homogenitet" (1998)**
Roland Tränk
5. **Bestämning av egenskaper i cellstabiliserad torv (1998)**
Nenad Jelusic, Torbjörn Edstam & Yvonne Rogbeck
6. **Rörelser och portryck vid kalkpelarinstallation Redovisning av mätresultat (1998)**
Åke Johansson
7. **Masstabilisering av väg 590, Askersund (1998)**
Yvonne Rogbeck
8. **KC-pelarförstärkning av instabil slänt. E4, delen Nyland – Ullånger, Västernorrlands län. Åtgärder och mätningar (1998)**
Leiv Viberg, Bertil Eriksson & Stefan Johansson
9. **Grunnforsterkning med kalksementpælar (1999)**
Stein Christensen, Arnstein Watn, Steinar Nordal, Arnfinn Emdal, Torbjörn Lund & Thomas Kristiansen
10. **Dimensioneringsvägledning för djupstabilisering (1999)**
Översättning av Finska Vägverkets klarlägganden 18/1997
11. **Historik och svenska erfarenheter av kalkstabilisering av vägterrasser (1999)**
Stefan Gustafsson
12. **Undersökning i fält av stabiliseringseffekt i organisk jord och lera (2000)**
Tobias Hansson, Yvonne Rogbeck & Leif Säfström
13. **Utvärdering av verksamheten inom Svensk Djupstabilisering. Vetenskaplig uppläggning. Måluppfyllelse av FoU-plan (2000)**
14. **Stabilisering av torv i laboratoriemiljö – utveckling av referensmetod (2000)**
Fredrik Larsson & Stefan Mårtensson
15. **Djupstabilisering med kalk-cementpelare – Provfält (2000)**
Lars O Johansson
16. **Laboratorieinblandning för stabilisering av lera – Referensmetod (2000)**
Torbjörn Edstam
17. **Kalkcementpelarförstärkning för bro – Funktionsuppföljning. Västkustbanan, delen Sättinge – Lekarekulle. Bro över väg N359U (km 35/603) (2000)**
Marius Tremblay
18. **Kalk- och kalkcementpelare – Jämförelse mellan laboriestabilisering och pelarinstallation (2001)**
Erika Haglund & Evelina Nilsson
19. **Kalkcementpelare i skivor – Modellförsök (2001)**
Jan Honkanen & Johan Olofsson
20. **Stabilisering av torv. Referensmetod för laboratorieinblandning. Steg 1 – Insamling av erfarenheter (2001)**
Ronny Andersson, Arvid Jacobsson & Karin Axelsson

21. **Erfarenhetsbank – Etapp 2: Erfarenhetsåterföring (2002)**
Magnus Karlsson, Göran Holm & Leif Säfström
22. **International Workshop on Deep Mixing Technology for Infrastructure Development – Current Practice & Research Needs (2002)**
Göran Holm
23. **Studie av inverkan av faktorer i blandningsprocessen vid djupstabilisering med kalkcementpelare – Fältförsök i Håby (2002)**
Stefan Larsson, Marcus Dahlström & Bengt Nilsson
24. **Peptisering vid djupstabilisering (2002)**
Matilda Hoffstedt & Sven-Erik Johansson
25. **Stabilisering/solidifiering av förorenad jord – en förstudie (2003)**
Göran Holm
26. **Gränszon (2003)**
Sven-Erik Johansson
27. **A complementary field study on the uniformity of lime-cement columns – Field tests at Strängnäs (2003)**
Stefan Larsson, Marcus Dahlström & Bengt Nilsson
28. **Stabilisering av torv – ringtest av referensmetod för tillverkning av laboratorieprov (2003)**
Kerstin Pousette

Rapport

1. **Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare (1997)**
Torbjörn Edstam
2. **Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet. En förstudie (1997)**
Helen Åhnberg & Håkan Pihl
3. **Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner (2000)**
Karin Axelsson, Sven-Erik Johansson & Ronny Andersson
4. **Provbanks på kalk/cementpelarförstärkt gyttja och sulfidhaltig lera i Norrala (1999)**
Rolf Larsson
5. **Masstabilisering (2000)**
Nenad Jelusic
6. **Blandningsmekanismer och blandningsprocesser – med tillämpning på pelarstabilisering (2000)**
Stefan Larsson
7. **Deformation Behaviour of Lime/Cement Column Stabilized Clay (2000)**
Sadek Baker
8. **Djupstabilisering med kalkcementpelare – metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält (2001)**
Morgan Axelsson
9. **Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering (2001)**
Mårten Janz & Sven-Erik Johansson
10. **Mitigation of track and ground vibrations by high speed trains at Ledsgård, Sweden (2002)**
Göran Holm, Bo Andréasson, Per-Evert Bengtsson, Anders Bodare & Håkan Eriksson
11. **Miljöeffektbedömning (LCA) för markstabilisering (2003)**
Tomas Rydberg & Ronny Andersson



Svensk Djupstabilisering

**c/o SGI, 581 93 Linköping
Tel: 013-20 18 61, Fax: 013- 20 19 14
<http://www.swedgeo.se/sd>**