



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 18
2001-01

Kalk och kalkcementpelare

– Jämförelse mellan laboriestedabilisering
och pelarinstallation

Erika Haglund
Evelina Nilsson

Svensk Djupstabilisering

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

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

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

Ytterligare upplysningar om verksamheten lämnas av SD:s projektledare Göran Holm, tel: 013-20 18 61, 070-521 09 39, fax: 013-20 19 14, e-post: goran.holm@swedgeo.se, <http://www.swedgeo.se/sd.htm>.

Swedish Deep Stabilization Research Centre

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

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

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

Further information on the Swedish Deep Stabilization Research Centre can be obtained from the Project Manager, Mr G Holm, tel: +46 13 20 18 61, fax: +46 13 20 19 14 or e-mail: goran.holm@swedgeo.se, <http://www.swedgeo.se/sd.htm>.



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 18
2001–01

Kalk och kalkcementpelare
– Jämförelse mellan laboriestabilisering
och pelarinstallation

Erika Haglund

Evelina Nilsson

Denna rapport är
Examensarbete vid Luleå Tekniska Universitet,
Civilingenjörsprogrammet,
Institutionen för Väg- och vattenbyggnad,
Avdelningen för Geoteknik
2000:011 CIV • ISSN: 1402-1617 • ISRN: LTU-EX--00/11--SE

Linköping 2001

Förord

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

Föreliggande arbetsrapport är en delredovisning inom området ”Stabiliserad jords egenskaper – jämförelse laboratorie- och fältförsök”.

Linköping i juni 2001

Göran Holm
Projektledare för SD

Arbetsrapport	Svensk Djupstabilisering c/o Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning (endast för medlemmar av SD)	Tel: 013-20 18 42 Fax: 013-20 19 14 E-post: birgitta.sahlin@swedgeo.se
Upplaga	150 ex
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, juni 2001

Förord

Detta examensarbete har utförts i regi av Statens geotekniska institut (SGI) och är ett samarbete mellan SGI och Luleå tekniska universitets (LTU) avdelningen för geoteknik. Examensarbetet ingår i civilingenjörsutbildningen Väg- och vattenbyggnadsteknik vid LTU. Vi vill tacka våran handledare Peter Carlsten på SGI i Linköping för trevligt samarbete, goda råd samt hjälp med tekniska frågor. Vidare vill vi tacka Bo Westerberg, handledare och examinerator vid LTU, som har sett till att examensarbetet uppfyller de akademiska kraven. Till alla de personer som tagit fram och visat oss material under insamlingen av data vill vi rikta ett tack för deras avsatta tid samt svar på våra funderingar. Vägverket i Stockholm har tillhandahållit lokaler samt datorer vilket vi är tacksamma för. Tack även till de i korridoren på Vägverket som gett vardagen en trevlig touch.

Om intresse föreligger att ta del av det underlag som är framtaget i denna studie, finns en CD- skiva till förfogande vid SGI i Linköping.

Evelina Nilsson och Erika Haglund, Luleå 2001-01-17

Innehåll

Förord	iii
Sammanfattning	vii
Abstract	ix
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Rapportens upplägg	2
2 Beskrivning av kalk- och kalkcementpelarmetoden	3
2.1 Historik	3
2.2 Användningsområden	3
2.3 Metoden	4
2.3.1 Sondering och jordprovsanalys	4
2.3.2 Stabiliseringsmedel.....	4
2.3.3 Laboratorieinblandning	6
2.3.4 Dimensionering	6
2.3.5 Provpelare	7
2.3.6 Pelartillverkning	8
2.3.7 Kontrollmetoder.....	10
2.3.8 Förbelastning på pelarförstärkt område.....	11
2.3.9 Uppföljning.....	11
2.4 Fördelar och nackdelar.....	12
2.4.1 Fördelar.....	12
2.4.2 Nackdelar.....	12
3 Inverkan av skillnader mellan faktorer i laboratorium och fält	13
3.1 Jordens situation och spänningstillstånd.....	13
3.2 Packningsarbete	14
3.3 Vattentillgång.....	15
3.4 Temperatur	15
3.5 Blandningsprocess	16
3.6 Hållfasthetskontroll samt utvärdering av skjuvhållfasthet.....	21
4 Studier av sammanställningar för analyserade projekt	24
4.1 Allmänt	24
4.2 Projektpresentation	24
4.3 Upprättande och förklaring av diagram	25

4.4	Utvärdering och diskussion kring diagramsammanställningar	31
4.4.1	Mälardalen	31
4.4.2	Västkusten	38
4.5	Utvärdering och diskussion kring övriga diagram	40
4.6	Slutsatser	41
5	Förslag till inriktning av undersökningar på laboratorium samt till program för provpelare	44
5.1	Förslag till inriktning av undersökningar på laboratorium	44
5.2	Förslag till program för provpelare	47
5.3	Diskussion	49
6	Diskussion och slutsatser	51
	Referenser	54
	Bilageförteckning	57
	Bilaga Mälardalen	59
	Bilaga Västkusten	101
	Bilaga Övriga diagram	119

Sammanfattning

Grundförstärkning med kalk- och kalkcementpelare är en stabiliseringsmetod där lösa jordar, främst leror, stabiliseras genom tillsats av stabiliseringsmedel. Nittio procent av kalk- och kalkcementpelartillverkningen i Sverige utförs vid förstärkning av väg- och järnvägsbankar. Vid tillverkning drivs ett inblandningsverktyg ned i jorden och under uppstigningen matas stabiliseringsmedel ut och blandas med jordmaterialet. Pelarinstallationen föregås normalt av laboriestabilisering av jord från det aktuella området och provtryckning av densamma. Så kallade provpelare installeras i ett tidigt utförandeskede för att verifiera de skjuvhållfastheter som uppnåts vid laborieprovning. De förstärkta jordpelarna stabiliserar jorden och minskar samt påskyndar sättningarna. Resultatet av stabiliseringen kontrolleras vanligtvis med för metoden anpassade sonder.

Huvudsyftet med detta examensarbete var att genom erfarenhetsåterföring skapa ett underlag baserat på utförda projekt och utifrån detta finna samband mellan egenskaper hos prover tillverkade i laboratorium och egenskaper hos pelare installerade i fält. Ett ytterligare syfte med denna studie var att studera de skillnader som finns mellan tillverkning av provkroppar i laboratorium och pelare i fält. Det har även ingått i detta examensarbete att ta fram ett förslag till program för provpelare samt ett förslag på inriktning av laborieundersökningar.

Studien omfattar således diskussioner huruvida faktorer och processer som påverkar stabiliseringen och dess resultat återfinns vid såväl laborieinblandningar som installation i fält samt vad som skiljer dem åt. I viss mån har även förslag till förändringar diskuterats, och ett uppslag till vidare studier är att undersöka huruvida skillnaden mellan dessa faktorer kan minskas eller elimineras samt vad dessa åtgärder skulle kunna kosta.

Studien omfattas även av utvärderingar av den erfarenhetsåterföring som utförts inom ramen för detta examensarbete och som omfattar 13 projekt, utförda under åren 1994–2000 i Mälardalsregionen och på Västkusten. För varje projekt som ingått i denna studie har ett antal sammanställningar, baserat på insamlat material, tagits fram och presenterats i diagramform. Utifrån detta material har orsaker till skillnader i uppnådd skjuvhållfasthet mellan fält- och laborievärden diskuterats. Med utgångspunkt från den information och data som finns om jorden och dess ursprungliga egenskaper, har diskussioner förts och slutsatser dragits om vad som kan inverka på den uppnådda skjuvhållfastheten i laboratorium respektive fält.

Vid jämförelse av förstärkningsmetodens olika processer och faktorer, i laboratorium respektive fält, kan konstateras att många av dessa skiljer sig åt och bidrar till skillnader i uppnådd skjuvhållfasthet. Skillnader i egenskaper, omgivningspåverkan och spänningstillstånd som uppkommer när det jordprov som skall representera jordmaterialet i fält tas upp, kan minskas med rätt hantering och genom att i laboratorium efterlikna de förhållanden som råder i fält. Packningsarbete är ett moment som återfinns i laboratorium men som knappt nämnvärt existerar i fält, vilket gör det till en faktor som bör uppmärksammas. De i fält rådande temperaturförhållanden efterliknas oftast idag genom att anpassa förvarings-temperaturer i laboratorium. Blandningsprocessen är mycket omdiskuterad i detta arbete och förtjänar sitt utrymme då det är en väsentlig faktor för resultatet av en stabilisering. Skillnader mellan blandningsprocessen i laboratorium och fält återfinns i nedbrytningsarbete, tillsättning av bindemedel, blandningsverktygens utformning och effektivitet samt blandningstid.

Minskade skillnader i förfarande mellan laboriestabilisering och installation av pelare i fält är naturligtvis önskvärt och skall eftersträvas i rimlig utsträckning. Det material som sammanställts i detta examensarbete visar dock på att en minskad spridning i resultat mellan

olika laboratorier samt vid pelarinstallationer i fält bör prioriteras i framtida forsknings- och utvecklingsarbete. Vid jämförelser mellan hållfastheter som uppnåtts i laboriestabiliserade prover och i pelare konstateras att värdena på skjuvhållfastheten i fält oftast är lika stora eller större än laborievärdena vid samma tid efter inblandning. Detta innebär att pelarna oftast uppfyller de krav på skjuvhållfasthet som fastslagits vid dimensionering och att ökade hållfastheter i fält inte är ett primärt mål i framtida utvecklingsarbete, vilket istället borde inriktas på att minska de stora spridningarna i resultat som diagramsammanställningarna i detta arbete visar på. För laboratoriesidan är det spridningen i resultat mellan olika laboratorier som bör minskas, medan det på fältsidan är stora spridningar mellan sonderingar i jordar med samma förutsättningar. Insatserna i utvecklingsarbete bör i första hand fokuseras på vidareutveckling av pelartillverkning, då det är av största vikt att homogena och hållfasta pelare tillverkas för att inte äventyra resultaten i pelarprojekt. För att kunna utvärdera skjuvhållfastheten på ett enhetligt sätt utifrån uppnått sonderingsmotstånd bör sondens verkliga area beaktas eftersom den har stor inverkan på hållfastheten. En minskad resultat-spridning skulle underlätta vid dimensionering och skulle medföra att metoden ökade i tillförlitlighet.

För att skapa homogenare pelare och minska spridningarna i skjuvhållfasthet är minskad stigningshastighet i kombination med ett för ändamålet och materialet anpassat blandnings-verktyg samt en mer kontrollerad utmatning bra delmål. Vidare visar dessa variationer i resultat från fält att det är av stor vikt att noggranna förundersökningar och laboriestabiliseringar utförs samt att provpelare installeras. Ett samspel mellan laborieinblandningar och installation av provpelare skulle på Västkusten kunna bidra till en optimering av metoden, eftersom de pelare som installeras i denna del av Sverige redan kort tid efter tillverkning uppvisar höga hållfastheter. Önskvärt vore, för såväl installation i Mälardalen som på Västkusten, att utmatad mängd bindemedel skulle kunna anpassas för varje jordlagers egenskaper. Skillnaderna i resultat mellan olika laboratorier kan minskas genom att ta fram en detaljerad handledning som rymmer små möjligheter till variationer i utförande.

Jordens egenskaper innan inblandning har betydelse för resultaten av stabiliseringen. Leror med hög sensitivitet kräver en hög blandningsgrad eftersom störda högsensitiva lerpartier som inte får tillgång till bindemedel blir mycket låghållfasta. Jordmaterial med mycket höga vattenkvoter, som till exempel gytta, kan vara svårstabiliserade men kan om bindemedels-mängden ökas, uppnå godtagbara hållfastheter. En stabiliserad sulfidhaltig leras låga skjuvhållfasthet kan även den avhjälpas genom en ökad mängd bindemedel.

Upprättande och kontinuerlig påfyllning av information till en erfarenhetsbank för kalk- och kalkcementpelarprojekt förespråkas.

Abstract

Lime and limecement column stabilization is a ground improvement method where soft soils, like clays, are stabilized by adding stabilizing agents. Ninety percentage of the production of lime and limecement columns in Sweden is performed when reinforcing road and railway embankments. During production a mixing tool is penetrated down through the soil and throughout the ascent of the tool stabilizing agents is added and mixed with the soil. Producing test samples in laboratory environment normally precedes installation of columns. Soil from the area in point is stabilized and then tested through compression tests. At an early stage of the production phase some columns are installed to verify the shear strengths that have been determined in laboratory environment. The reinforced columns stabilize the soil and decrease, as well as speed up the rate of, the settlements. The result of the stabilization is normally inspected with a sound which is adopted to the method.

The main purpose of this master thesis work was to find relations between properties of samples made in laboratory and properties of columns installed in the field, based on collected information and data. Another purpose with this study was to analyze the differences between production of test samples in laboratory environment and production of columns in the field. This master thesis also includes suggestions how to form a program for test columns installed during an early stage of the production phase as well as a program of how to direct investigations in laboratories.

Consequently the study includes discussions whether factors and processes that affect the stabilization and its results are to be found in stabilizations in laboratory environment as well as in installations in the field. Proposals to improve the stabilization procedures are discussed. An idea for future studies is to analyze if the differences between these factors and processes could be decreased or eliminated and what these measures would cost.

Furthermore, the study includes evaluations of the information and data collected during this master thesis work. The information is collected from thirteen projects performed during 1994–2000 in the regions of Mälardalen and Västakusten. A number of compilations are made for each project that contributes with data to this study. The compilations are based on the collected data and are presented in diagrams. On the basis of these diagrams, causes of differences in achieved shear strength between laboratory values and field values are discussed. Based on information and data of the soil and its original properties, discussions have been held and results have been drawn, about how these properties influence the shear strength achieved in laboratory and in the field.

When making comparisons between the processes and factors, in laboratory and in the field, one can establish that many of these distinguish from each other and contributes to the differences in achieved shear strength. Differences in properties, influence of the surroundings and stress state which arise when the soil sample representing the soil material in the field is taken up and transported to the laboratory, can be decreased with the correct treatment and by imitating the conditions in the field in the laboratory. Compaction effort is taking place in laboratory but hardly exists in field. Temperatures that occur when stabilizing in the field are often resembled in laboratory by regulating the storage temperature. The mixing process is a widely discussed subject in this thesis and deserves its space since it is an important factor for the result of stabilization. Differences between the mixing process in laboratory and in the field are found in degradation, adding of stabilization agents, design and efficiency of the mixing tool as well as mixing time.

To decrease the difference in procedures between stabilization of soil in laboratories and installation of columns in the field is of course desirable and should be strived for to a reasonable extent. However, the material that has been compiled in this thesis work shows that a decreased spread of results between different laboratories as well as for installations of columns in the field should be given priority to in future research and development. When comparing strength reached in laboratory and in columns one can state that the values reached in the field often are as high as or higher than the values evaluated in laboratory at the same time after the agents have been added. This means that the columns in most cases fulfill the requirements that have been laid down when designing and that an increase in shear strength is not the primary goal in developing the method. Effort in development should be concentrated on decreasing the large spreads in results, which the diagrams in this paper show. Most important is to increase the spread of results of shear strength in the columns since it is of great importance that homogeneous and strong columns are made, as they are the final product. To be able to evaluate the shear strength in a similar way, on the basis of reached sounding resistance, one should be using the real area of the sound since it highly influence the strength. A decreased spread in results would facilitate the designing and would increase the reliability of the method.

To create homogeneous columns and decrease the spread in shear strength one should combine a low ascent, a mixing tool that is accustomed for its purpose and the material as well as a more controlled process when adding agents to the soil. Further, this spread of results from the sounding show on the importance of carefully made preinvestigations and the importance of installing test columns in an early stage of the production phase. An interplay between stabilizations in laboratory and installation of test columns in the field would contribute to an optimization of the method in the region of Västskusten since the columns installed in this part of the country show high strength shortly after installation. It would be desirably, for installation in Mälardalen as well as at Västskusten, that the adding of stabilizing agents could be adjusted to the properties of each layer of soil. The difference in the result between different laboratories can be decreased if a detailed instruction that holds small possibilities for variations is created.

The properties of the soil before it is mixed with the stabilizing agents are significant for the result of the stabilization. Clays with high sensitivity require extensive mixing since disturbed clay with high sensitivity, which is not supplied with enough stabilizing agents, ends up with parts with very low strength. Soil materials with very high water content, like for example mud, can be difficult to stabilize but if the amount of stabilizing agents is increased, acceptable strengths can be reached. Clay that contains sulphides is also difficult to stabilize but can be relatively well stabilized by increasing the amount of stabilizing agents added.

Establishment of a database with results from projects with lime and limecement columns is advocated and should be updated continuously.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Geoteknik är en vetenskap som behandlar det naturligt skapade materialet jord. Detta gör att man inte, likt vid många andra konstruktionsproblem, kan använda färdiga lösningar och konstruktionsföreskrifter. Kalk- och kalkcementpelare är en grundförstärkningsmetod där lösa jordar stabiliseras genom tillsats av bindemedel. Idag utförs dimensionering utifrån ”Kalk- och kalkcementpelare – Vägledning för projektering, utförande och kontroll”, SGF Rapport 4:95, Carlsten och Ekström (1995). Denna rapport genomgår en revidering som publicerats i december 2000. En av de förändringar som denna revidering medför är att dimensioneringen framöver mer kommer att baseras på egenskaper bestämda i fält. Provpelare skall installeras i ett tidigt utförandeskede och de egenskaper som är möjliga att uppnå i fält blir då kända.

Stabiliseringseffekten som uppnås i fält kan skilja sig från den i laboratoriet. De provinblandningar som utförs i laboratorium ger främst besked om jorden går att stabilisera samt vilken typ och mängd bindemedel som krävs. I dag finns inga korrektionsfaktorer för sambandet mellan laboratorie- och fältbestämd skjuvhållfasthet. Dimensionering av kalk- och kalkcementpelare skall därför baseras på resultat från provpelare eller produktionspelare. Om dokumenterat material från laboratieförsök och fältinstallationer finns för samma typ av geologisk bildning får egenskaper bestämmas genom ett försiktigt val av de laboratoriebestämda värdena på skjuvhållfastheten. En förutsättning är dock att mängden bindemedel och inblandningsutrustningen är densamma.

I vissa fall kan dock laboratieförsöken bli avgörande för dimensioneringen. För projekt med snäva tidplaner eller för projekt av små dimensioner är provpelare och kontroll inte möjliga att utföra på grund av tidsbrist eller då det skulle motsvara en orimligt stor del av den totala kostnaden. Vid jämförelse mellan laboratorieinblandning och pelartillverkning finner man dock att det är många faktorer som påverkar möjligheten att beskriva pelarnas egenskaper i fält mot bakgrund av laboratieförsök. Spänningsförhållande, blandningsprocess och packningsarbete är några exempel på faktorer som skiljer sig vid en jämförelse mellan laboratorieinblandning och fältinstallation, och således påverkar uppnådd skjuvhållfasthet.

1.2 Syfte

Huvudsyftet med detta examensarbete är att finna samband mellan egenskaper hos prover tillverkade i laboratorium och egenskaper hos pelare tillverkade i fält med motsvarande inblandning av bindemedel. Genom arkivarbete har data samlats in från ett antal grundförstärkningsprojekt med kalk- och kalkcementpelare och baserat på detta har resultat presenterats och analyserats. I detta arbete har en erfarenhetsbank skapats som kan underlätta vid framtida projektering av kalk- och kalkcementpelare (kc-pelare). Vidare har inverkan av de skillnader som finns vid tillverkning av provkroppar i laboratoriet och pelare i fält

studerats. Ytterligare ett syfte med detta arbete är att ta fram ett förslag till inriktning av undersökningar på laboratorium samt ett program för provpelare.

1.3 Avgränsningar

Detta arbete baserar sig på data från projekt som är utförda under åren 1994–2000. Geografiskt har datainsamlingen begränsats till att omfatta projekt i Mälardalen och på Västkusten. Valet av regioner grundar sig på att jordarnas geotekniska egenskaper i dessa två delar av landet skiljer sig påtagligt och således är intressanta att studera såväl var och en för sig som att jämföras med varandra. Andra kriterier som ställts på projekten är att de skall vara väldokumenterade, det vill säga att det skall finnas data från samtliga steg från projektering till sondering av färdiga pelare. Eftersom datainsamlingen i detta arbete genomfördes innan utvärderingen påbörjades så är slutresultaten inte selekterande. Materialet är insamlat från många olika källor vilket gör att kvaliteten på materialet är beroende av de olika inblandade företagens egen kvalitetssäkring.

1.4 Rapportens upplägg

Rapporten börjar med en inledning som beskriver studiens bakgrund och syfte samt en redogörelse för vilka avgränsningar som gjorts. I **Kapitel 2** beskrivs metodens historik, användningsområden samt fördelar och nackdelar. Detta kapitel beskriver också kronologiskt processen från förundersökning till uppföljning av färdiga pelarinstallationer. Detta kapitel är av orienterande karaktär och riktar sig främst till dem som inte är insatta i vad kalk- och kalkcementpelarmetoden är och vad den används till. I **kapitel 3** förs diskussioner om hur de faktorer och processer som påverkar utfallet av en stabilisering skiljer sig mellan laboratorie-stabilisering och pelarinstallation i fält. I det första avsnittet behandlas hur jordens situation, utifrån egenskaper och spänningstillstånd, ändras från det att prover tas upp ur marken. Vidare behandlas skillnader i packningsarbete, vattentillgång och temperaturförhållanden mellan laboratorium och fält. Skillnader i blandningsprocessen samt vid kontroll och beräkning av hållfastheten avslutar kapitlet.

I **kapitel 4** behandlas de datasammanställningar som utförts i detta arbete. Först beskrivs tillvägagångssättet vid insamling, sammanställning och utvärdering av material. Kapitlet fortsätter med en kort presentation av de projekt som material hämtats ifrån. Förfarandet vid upprättandet av diagramsammanställningarna samt en förklaring till hur de bör tolkas finns under avsnitt 4.3. Analys av diagramsammanställningar från de inkluderade projekten finns i avsnitt 4.4. Därefter följer exempel på ytterligare analyser som kan utföras utifrån det framtagna materialet. Kapitlet avslutas med en sammanställning av de väsentligaste slutsatserna. **Kapitel 5** består av förslag på hur provpelarprogram respektive laboratorieundersökningar bör inriktas. I det avslutande avsnittet förs en diskussion runt vikten av såväl laboratorieundersökningar som provpelarinstallationer. Rapporten avslutas med diskussioner och slutsatser som kan dras utifrån denna studie samt förslag på inriktning till fortsatta studier inom området.

2 Beskrivning av kalk- och kalkcementpelarmetoden

2.1 Historik

Att lera stabiliseras vid inblandning av kalk är ingen nyvunnen upptäckt. För över 5000 år sedan så uppförde man i Tibet pyramider med hjälp av blandningar mellan lera och kalk, Greaves (1996). Denna vetenskap har tagits tillvara i modern tid. Ytstabilisering med kalk har sedan långt tillbaka varit en vitt utbredd metod för att stabilisera lerig underbyggnad vid vägbyggnationer och den används än idag i stora delar av världen.

En viktig milstolpe i kalkstabiliseringens historia är då man på slutet av 1960-talet kom fram till att lodräta pelare av kalkinblandad jord kunde förstärka instabila och sättningsbenägna jordar så att dessa, genom samverkan med den omkringliggande ostabiliserade leran, kunde bära överliggande konstruktioner. Idén grundades i Sverige 1967 av en man vid namn Kjeld Paus och under 1970-talet utvecklades sedan metoden för att 1975 tillämpas för första gången. Parallellt med den svenska utvecklingen hade metoden även utvecklats i Japan genom laboratorie- och modellförsök, Schaefer et al. (1997).

Under 70-talet var intresset för den nya grundförstärkningsmetoden svalt men i början på 80-talet, när utbyggnaden av Sveriges infrastruktur tog fart och de geotekniska projektörerna insåg metodens potential, så ökade efterfrågan, Bredenberg (1999). Under senare delen av 80-talet introducerades cement som stabiliseringsmedel, oftast i en blandning med kalk.

Under 90-talet har det producerats miljontals meter kc-pelare, tidvis har efterfrågan varit så stor att landets grundförstärkningsentreprenörer har haft svårt att hinna med. Sedan 1998 har dock marknaden gått tillbaka och i dagsläget pågår endast ett fåtal projekt i Sverige. De svenska entreprenörer som tillverkar kalk- och kalkcementpelare, har på senare år utökat sin internationella verksamhet.

2.2 Användningsområden

Knappt nittio procent av de kc-pelare som tillverkats under nittioåret är utförda under väg- och järnvägsbankar, Edstam (1997). Pelarna installeras för att stabilisera jorden, minska sättningarna samt påskynda sättningsförloppet.

När jorden stabiliseras så får den högre permeabilitet vilket gör att pelarna fungerar som dräner. Vid beräkning av sättningars tidsförlopp antas permeabiliteten (k) hos kalkstabiliserad lera vara ca 1000 gånger högre än för ostabiliserad lera och för kalk- och cementstabiliserad lera antas förhållandet k_{pel}/k_{lera} vara ca 400–800. Pelarnas verkliga permeabilitet kan dock vara avsevärt lägre. Dräneringen skyndar på sättningsförloppet efter pålastning.

Vid stabilisering av slänter har kalk- eller kalkcementpelarna som funktion att föra ned skjuvspänningarna till bärkraftigare jordlager samt att öka medelskjuvhållfastheten för

eventuella glidytor. Beroende på vilken brottzon pelarna kommer att installeras i ställs olika krav på konfigurationer och längd. Likaså görs olika antaganden avseende karakteristisk hållfasthet hos pelare beroende på i vilken brottzon pelarna befinner sig.

Metoden kan, genom överlappande pelare i olika konfigurationer, motverka bottenuppträckning vid schaktarbeten samt minska behovet av avsträvade sponter vid rörläggningsarbeten. Bakgrunden till att pelarna placeras i skivor, gitter eller block är för att säkerställa den önskade samverkan mellan pelare och omgivande lera. Stabilisering och solidifiering av förorenad jord är ett annat exempel på tillämpning av metoden, Holm (1999). Kc-pelare kan även användas som grundläggning under lätta brofundament och småhus. Metoden lämpar sig mycket bra för dessa typer av grundläggningar då den skapar en flexibel övergång, med hänsyn till sättningar, mellan mark och hus respektive väg och bro. Det har även visat sig att pelarna har en vibrationsdämpande effekt.

2.3 Metoden

2.3.1 Sondering och jordprovsanalys

Första projekteringssteget vid grundförstärkningsarbeten är att genom sonderingar ta fram en jordprofil över området för att ta reda på vilka jordarter som finns, hur deras lagerföljder varierar i nivå samt få en uppfattning om förstärkningens omfattning. I samband med detta tas jordprover. Genom jordprovsanalys undersöks jordens ursprungliga egenskaper för att tillsammans med sonderingssammanställningarna ligga till underlag för val av grundförstärkningsmetod. Vid jordprovsanalysen tas jordprover in i laboratorium och egenskaper som naturlig vattenkvot, konflytgräns, densitet, skjuvhållfasthet och sensitivitet bestäms. I speciella fall bestäms även permeabilitet och kompressionsmodul.

2.3.2 Stabiliseringsmedel

Osläckt kalk och cement är de vanligaste stabiliseringsmedlen på marknaden, men det förekommer även att pelare förstärks med kalk och/eller cement blandat med gips, flygaska eller andra slaggprodukter. Ett exempel är Lohjamix som består av olika typer av cement samt biprodukter från industrin såsom flygaska och masugnsslagg.

Bra resultat uppnås i de flesta fall om en blandning av kalk och cement används. De två olika stabiliseringsmedlens fördelar kan då kombineras, cement främst för högre hållfasthet och snabbare hållfasthetstillväxt samt kalk för att få hög värmeutveckling och bättre samverkan mellan stabiliserad och omkringliggande ostabiliserad jord.

Om mängden kalk och cement ökar så ökar normalt hållfastheten hos pelaren, vid rena kalkpelare har dock ökning av kalkmängden utöver den som normalt används, inte någon märkbar inverkan på hållfastheten, Eriksson och Carlsten (1995). En alltför stor mängd stabiliseringsmedel gör att den stabiliserade jorden blir mycket spröd, samverkan med

angränsande jord minskar och pelaren blir mindre flexibel. Dessa egenskaper är inte önskvärda, då det vid stabilisering av jord är mycket viktigt att uppnå en väl fungerande samverkan mellan den förstärkta och den oförstärkta jordmassan för att få jämna sättningar.

En kraftig värmeutveckling sker vid inblandande av kalk, vattenkvoten minskar och en grövre struktur bildas i jorden. Puzzolanreaktioner ger en med tiden ökande hållfasthet. Även cement ger upphov till puzzolana reaktioner, men de är inte lika hållfasthetshöjande som kalkens. När cement reagerar med vatten bildas ett hållfasthetshöjande CSH-gel, kalciumsilikathydrat, som fyller ut hålrummen mellan jordpartiklarna. Gemensamt för både kalk och cement är att kalciumhydroxid, Ca(OH)_2 , bildas. Vissa mineraler i jorden reagerar med Ca(OH)_2 och bildar reaktionsprodukter som ökar jordens hållfasthet.

Organiskt material har en hämmande effekt på hållfasthetsutvecklingen eftersom sura humusämnen reagerar med Ca(OH)_2 och det ger reaktionsprodukter som sänker pH-värdet samt minskar antalet Ca-joner. Cement har bättre egenskaper än kalk vid stabilisering av organiska jordar.

I tidigare undersökningar har olika jordarters stabiliseringseffekt (S_{eff}), det vill säga kvoten mellan skjuvhållfastheten för stabiliserad jord och ostabiliserad jord, studerats för olika stabiliseringsmedel. Resultatet av detta presenteras i SGF Rapport 4:95, Carlsten och Ekstöm (1995), och nedan följer en kort sammanfattning.

- Torv Svår att stabilisera, schaktas ofta bort. $S_{\text{eff}} \approx 5$. Vid stabilisering bör cement användas.
- Gyttja Låg stabiliseringseffekt med ren kalk, något bättre vid inblandning av cement. Stora regionala skillnader, bör i vissa fall grävas ut.
- Gyttjig lera $S_{\text{eff}} \approx 5$ med kalk och $S_{\text{eff}} = 10\text{--}20$ med kalkcementinblandning. Relativt långsam hållfasthetstillväxt.
- Sulfidhaltig lera Inga generella erfarenheter, därför är det viktigt att i varje enskilt fall utföra laboratorieförsök.
- Lera Mycket lämplig jordart för stabilisering med kalk och kalk/cement. $S_{\text{eff}} = 10\text{--}20$.
- Lera med siltskikt, siltig lera Även denna jord går bra att stabilisera. Vid ökat siltinnehåll rekommenderas kalk/cement i stället för ren kalk. $S_{\text{eff}} = 10\text{--}20$.
- Silt och sulfidsilt Endast ett fåtal försök. En blandning av kalk och cement rekommenderas för stabilisering.

Eftersom regionala skillnader i stabiliseringseffekt är stora, är det för samtliga jordarter viktigt att ett objektspecifikt inblandningsprov utförs.

2.3.3 Laboratorieinblandning

När man har konstaterat att jorden i det aktuella området är lämplig för kc-pelarförstärkning, bör man utföra ett antal inblandningsförsök i laboratorium. Kalk och cement tillsätts i jordmaterial från området i olika proportioner och mängder. Den absolut vanligaste proportionen mellan kalk och cement är 50/50, det vill säga i vikt mätt lika mycket av varje. Andra förekommande proportioner är till exempel 25/75, 75/25 och 100/0 samt 0/100 för rena kalk- respektive cementinblandningar. Vanliga mängder stabiliseringsmedel ligger mellan 80 och 125 kg per kubikmeter jord.

Efter att jorden tagits upp delas den in i karaktäristiska jordlager och jordprov från var och ett av dessa homogeniseras och blandas med stabiliseringsmedel i till exempel en degblandare. Den stabiliserade jorden packas i provtuber och förvaras i rumstemperatur och/eller i kylrum. Proverna trycks vid olika åldrar till exempel 10, 30, 60 samt 90 dygn, och skjuvhållfastheten bestäms normalt genom enaxiella tryckförsök. Vanligtvis bestäms även vattenkvot och densitet i samband med tryckförsöken. Efter utvärdering av de resultat som uppnåtts i laboratieförsöken, bestäms den mängd och proportion av bindemedel som skall användas i fält.

I SGF Rapport 4:95 finns ett förslag till laboratorieanvisning, med vägledning angående val av blandningsapparat, blandningstid, packningsförfarande etc.

2.3.4 Dimensionering

I SGF Rapport 4:95, "Kalk- och kalkcementpelare – Vägledning för projektering, utförande och kontroll", Carlsten och Ekström (1995), sammanfattas kunskap som finns om kalk- och kalkcementpelare. I december 2000 publicerades en ny reviderad upplaga av denna rapport, Carlsten (2000).

Handboken gäller för pelare med en skjuvhållfasthet på högst 150 kPa och förutsätter att pelarna samverkar med den ostabiliserade jorden. Samverkan är möjlig när pelarnas styvhet inte är mer än 10–100 gånger större än den ostabiliserade leran som omger dem, Kivelö (1994). Det finns fall då man antagit så höga värden som 150 kPa, men vid projektering utförs vanligtvis beräkningarna med värdet 100 kPa som pelarnas karakteristiska hållfasthet. Dimensionering skall utföras för den mest ogynnsamma kombinationen av lasteffekt och bärförmåga som kan tänkas förekomma under utförande och bruksskede, Carlsten och Ekström (1995). Idag används totalsäkerhetsfaktorer istället för partialkoefficienter, förutom vid dimensionering av brostödskonstruktioner.

Rapporten beskriver såväl de beräkningsförutsättningar som krävs, som de beräkningsmodeller som finns för dimensionering av pelare i bruks- respektive brottgränstillstånd. Rekommendationer ges om hur parametrar för de olika materialen bör väljas. Dimensionering utförs genom ett iterationsförfarande för att uppfylla de krav som finns på sättningarnas storlek och tidsutveckling samt krav på tillräcklig stabilitet. De parametrar som varierar är pelarnas diameter, längd och centrumavstånd samt lasten.

De viktigaste parametrarna vid dimensionering med hänsyn till sättning, det vill säga i bruksgränstillståndet, är lerans och pelarens kompressionsmoduler. Kalk- och kalkcementpelare får en väsentligt högre kompressionsmodul än omgivande lera vilket gör att sättningen reduceras. Vid dimensionering i brottgränstillståndet, det vill säga för stabilitet, är det däremot skjuvhållfastheten som är den viktiga parametern.

De största förändringarna som den nya vägledningen medför är att dimensioneringen, i större omfattning än idag, kommer att baseras på egenskaper bestämda i fält genom provpelarinstallering i ett tidigt utförandeskede. Vidare så har beräkningsförfarandet förändrats i ett steg. Stabiliteten för förstärkt bank skall kontrolleras med kombinerad analys längs hela glidytan, istället för den fram till idag rådande odränerade analysen. Detta innebär att man vid glidyteberäkning för varje avsnitt av glidytan väljer det lägsta värdet av följande:

- Karakteristiska odränerade hållfastheten
- Karakteristiska dränerade hållfastheten
- Karakteristiska hållfastheten vid dränerad analys för pelarna och odränerad analys för mellanliggande ostabiliserad jord.

Det har även tagits fram andra dimensioneringsmetoder för kalk- och kalkcementpelare, men ingen av dessa används i någon större omfattning.

I den finska vägledningen för dimensionering av kalkcementpelare, återfinns en relation mellan laboratoriebestämd hållfasthet och i dimensionering använd hållfasthet. Relationen uttrycks i en korrektionsfaktor (k) som utgör kvoten av skjuvhållfasthet definierad i laboratorium och skjuvhållfasthet uppnådd i fält. Denna faktor är framtagen för stabilisering med ett specifikt matningstryck och en viss stigningshastighet. Om stigningshastigheten ökas eller minskas, skall denna faktor justeras. Korrektionsfaktorn beror av inblandningsverktygets antal blandningsnivåer samt lerans odränerade skjuvhållfasthet och presenteras i tabellform. Underlaget till denna tabell är hämtat från ett försöksobjekt i Kyrkslätt i Finland och grundar sig enbart på dessa resultat. I anslutning till tabellen finns en notis om att överföring av resultaten till andra objekt förutsätter tilläggsuppgifter, Svensk Djupstabilisering (1999).

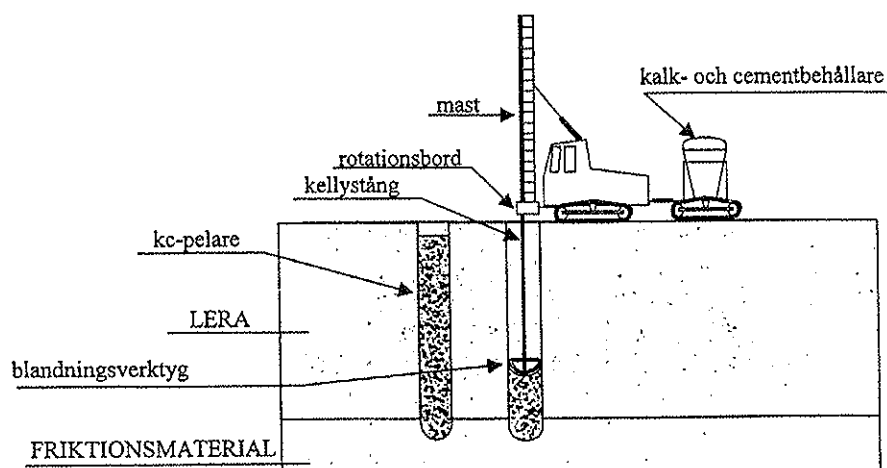
2.3.5 Provpelare

Ett sätt att verifiera resultaten av laboratorieinblandningarna är att tillämpa provpelare. Ett antal pelare, med den eller de från laboratorium bestämda stabiliseringsmängderna och

proportionerna, installeras i det område där pelarförstärkningen så småningom skall ske. Under installeringen kan faktorer som stignings- och rotationshastighet varieras, för att utröna vilka värden som är mest passande i de rådande förhållandena. Det finns också möjlighet för entreprenören att kontrollera om till exempel andra inblandningsverktyg än det föreskrivna ger bättre eller tillräckliga resultat. Efter ett antal dygn provas pelarna genom sondering och om tillfredställande resultat har uppnåtts påbörjas tillverkningen av produktionspelare.

2.3.6 Pelartillverkning

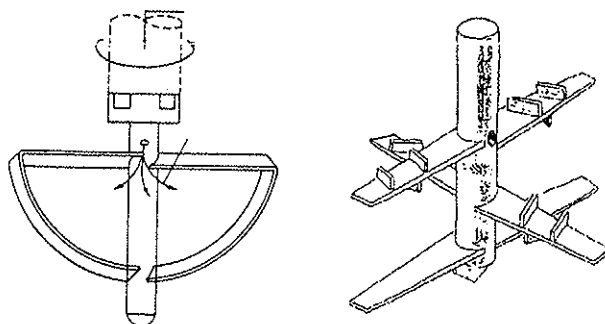
Tillverkningen av kalk- och kalkcementpelare sker genom mekanisk inblandning av stabiliseringsmedel som är anpassat till den aktuella jordtypen. Maskinerna som används är larvdrivna och har en lång nedfällbar mast med gejder och borrhång med blandningsverktyg nedtill, se figur 2.1. Bindemedlet förvaras i en lagringstank som antingen sitter monterad på maskinen eller finns placerad på en efterföljande bärare. Maskiner som skall förflyttas långa sträckor består oftast av endast en enhet eftersom detta underlättar transporten samt minskar transportpriset, dock måste dessa maskiner tankas mycket oftare än de med bärare. Tanken kan vara hel eller delad. Hel tank används då stabiliseringsmedlet endast består av en typ av bindemedel eller när medlen blandas i förväg. Om lagringen sker i delad tank så sker blandningen vid doseringen. Doseringen kontrolleras genom att lagringstankarna vägs med jämna mellanrum. Idag är installationsprocessen datorstyrd och föraren reglerar och kontrollerar arbetet genom en PC i förarhytten. Denna dator har även som uppgift att dokumentera processen, Bredenberg (1999).



Figur 2.1 Tillverkning av kalkcementpelare (Tafvelin, 2000).

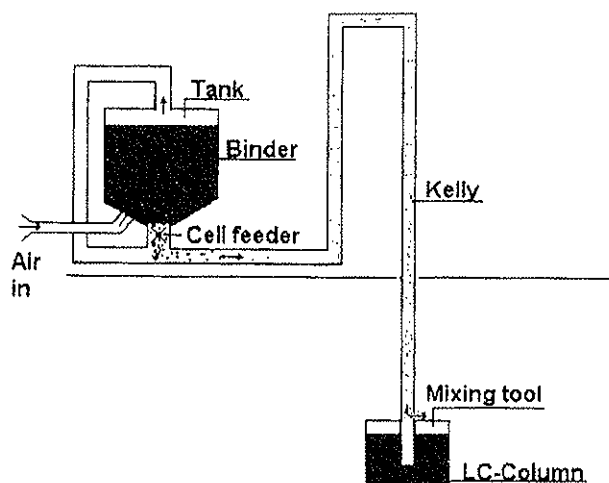
Blandningsverktygets utformning och effektivitet har stor betydelse för resultatet av stabiliseringen då dess uppgift är att deformera och skapa rörelser i materialen samt sprida stabiliseringsmedlet jämnt över tvärsnittet. Ett fåtal olika blandningsverktyg används på den svenska marknaden. Standardverktyget är formad likt en bygel med blad som är något vinklade mot horisontalplanet och rotationsriktningen, se figur 2.2. Ett annat verktyg är

pinnborren som består av en arm med sex paddlar. Ett flertal alternativa verktyg har tagits fram men inget av dem har använts annat än i forskningsprojekt.



Figur 2.2 Bygel respektive pinnbör (Carlsten och Ekström, 1995 respektive Larsson, 2000).

Innan utmatningen av stabiliseringsmedel påbörjas så trycks inblandningsverktyget, under rotation, ner till en nivå något lägre än det önskade pelardjupet. Under neddrivningen rörs leran om och när önskat djup nåtts, så skiftar blandningsredskapet rotationsriktning och påbörjar uppstigningen under utmatning av stabiliseringsmedel. Pelarna avslutas i torrskorpan eller ca 0,5 m under markytan för att stabiliseringsmedel inte skall spridas ovan markytan. Pelare kan utföras ned till fast friktionsjord eller svävande i lera. När tillverkningsprocessen är klar så fortsätter blandningsprocessen genom molekyllär diffusion, det vill säga att bindemedlet sprids genom molekyllära rörelser.



Figur 2.3 Flödet av stabiliseringsmedel (Bredenberg, 1999).

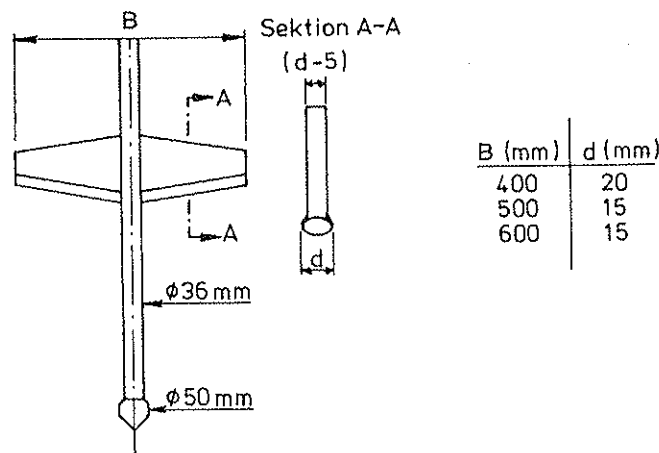
Stabiliseringsmedlet tillsätts leran genom injektering och med luft som transportmedium. Processen, som kan studeras i figur 2.3, börjar med att luft matas in i den nedre delen av tanken för att med tryck underlätta för stabiliseringsmedlet att rinna ut. Luften flödar sedan ut i toppen av tanken och vidare genom ett rör som löper under utloppet för bindemedlet. Efter att bindemedlet passerat matningsmekanismen fångas det upp av den passerande luftströmmen och transporteras fram till inblandningsverktyget genom riggens ihåliga ledstång. I den övre delen av inblandningsverktyget matas bindemedlet ut genom en utblåsningsmekanism och blandas med jorden under blandningsverktygets rotation och uppstigning. Det

luftburna stabiliseringsmedlet matas ut horisontellt i jorden, och luften trycks ut ur pelaren genom sprickor under inblandningsarbetet.

2.3.7 Kontrollmetoder

Pelare sonderas för att kontrollera kontinuiteten och vilken skjuvhållfasthet som uppnåts i jorden efter stabiliseringsprocessen. Förutom provpelarna så kontrolleras även ett antal produktionspelare, för att verifiera att pelarna uppfyller ställda krav. En pelarsondering sker antingen uppifrån, genom traditionell pelarsondering KPS, eller nerifrån botten av pelaren genom omvänd pelarsondering, OKPS, eller förinstallerad omvänd pelarsondering, FOPS.

Vid traditionell sondering förs en sond ner i pelarens mitt och den kraft som krävs för detta registreras. Vid omvänd pelarsondering för man ner en stång i pelaren strax efter den har tillverkats. I stångens nedre ände är en sond fäst och när man når botten av pelaren så vrids stången 90° för att sonden ska gå i en ostörd del av pelaren vid provtillfället. För den förinstallerade omvända sonderingsmetoden installeras provningsutrustningen under tillverkningen av pelare. I stången med inblandningsverktyget löper en kraftig vajer med en sond fäst längst ner. Sondens placeras en bit under pelarens botten. Figur 2.4 visar en sond som används vid traditionell sondering.



Figur 2.4 Traditionell pelarsond (Carlsten och Ekström 1995).

När sonden dras upp ur, respektive trycks ner genom, pelaren så registreras sonderingskraften längs hela pelarens längd. Kraften ritas upp i ett diagram och en skjuvhållfasthet utvärderas efter reducering med hänsyn till friktionsmotstånd.

Ett komplement till sondering är att schakta en provgrop längs en pelarrad. Det är svårt att schakta djupare än ca tre meter. För att få en uppfattning om stabiliseringens utfall och den stabiliserade jordens egenskaper kan hela pelare tas upp genom att använda ett dubbelslitsat stålrör. Båda metoderna ger goda möjligheter till att okulärt besikta till exempel pelares homogenitet och diameter samt ta prover för laborietest.

Fler alternativa metoder till kontroll av pelare är till exempel vingsondering, down-hole mätning, CPT-sondering, geofysiska mätmetoder och kärnprovtagning. Dessa metoder är dock inte så vanliga i produktionen, utan har främst använts i forskningsprojekt.

2.3.8 Förbelastning på pelarförstärkt område

Kalk- och kalkcementpelare bör, där så är möjligt, kombineras med förbelastning och överlast. Syftet med överlast är att konsolidera jorden för en last högre än brukslasten, och genom avlastning på 0,5–1,0 m vid förbelastningens slut minska framtida krypsättningar. Dessutom sker en snabbare hållfasthetstillväxt i pelarna vid pålagd last. Pelarinstallationer kombineras ofta med förbelastning för att en stor del av sättningarna ska utbildas under byggnationstiden, vilket dock kan kräva en relativt lång byggtid. Om material finns att tillgå på arbetsplatsen är även tryckbankar en bra och billig åtgärd som minskar skjuvpåkänningar i ostabiliserade områden, Carlsten och Ekström (1995). Den last som får appliceras bestäms utifrån den ostabiliserade lerans bärförmåga. En noggrann sättningsuppföljning föreskrivs även under förbelastningstiden för att utreda om behov finns för kompletterande åtgärder samt bestämning av tidpunkt för avlastning.

2.3.9 Uppföljning

En grundkontroll skall utföras vid alla typer av grundförstärkningsprojekt. Den är en del av projektets kontrollplan och är ofta utformad som en egenkontroll. De administrativa föreskrifterna (AF) som upprättas för projektet skall innehålla de krav som ställs av beställaren på redovisning och dokumentation av kontroller. Grundkontrollen utförs för att det vid uppföljning av projektet ska vara möjligt att fastställa om arbetet utförts enligt handlingarna, Carlsten och Ekström (1995).

En projektanpassad tilläggskontroll är också vanlig vid kalk- och kalkcementpelarprojekt. Denna kontroll kan innefatta sättningsuppföljning, kontroll av rörelser och portryck samt kontroll av pelares kontinuitet och hållfasthet. Sättningarna kan kontrolleras med hjälp av slangsättningsmätning alternativt med mark- eller krönpegel. Rörelser i marken kan kontrolleras med markpegel eller siktlinjer samt inklinometer. Portrycksmätningar bör göras kontinuerligt om det finns misstanke till förhöjda portryck pga. installationen. Pelarnas kontinuitet och hållfasthet kontrolleras vanligen med pelarsondering, men kan även kontrolleras okulärt vid upptagning av hela pelare och vid provgroppsgrävning samt vid tryckning av kolvprovtagna prover. Temperatur- och permeabilitetsmätningar är andra exempel på kontroller som kan göras under och efter en pelarinstallation.

2.4 Fördelar och nackdelar

2.4.1 Fördelar

En viktig anledning till att metoden vunnit mark bland grundförstärkningsmetoderna är att den är ekonomiskt fördelaktig i jämförelse med bortschaktning och återfyllning. Detta eftersom hela förstärkningsprocessen sker in-situ, vilket leder till låga kostnader för material, hantering och transport. En annan stor fördel med metoden är att man genom anpassning av pelaravstånd, pelardiameter samt pelardjup kan ta fram en förstärkning som ger en skräddarsydd lösning för varje enskilt projekt, Carlsten och Ekström (1995). Att stabilisera jorden in-situ är även att föredra vid objekt där leran är så lös att en schaktning inte skulle kunna utföras utan att rörelser uppkom i omkringliggande jord och utan att jordtrycksituationen skulle förändras väsentligt. Ett exempel på objekt där rörelser i jorden bör undvikas är längs en kajkonstruktion.

En konkurrerande metod är vertikaldränering. Denna grundförstärkningsmetod är billigare än kalk- och kalkcementpelare men kräver bland annat en längre byggtid. Detta leder till att valet mellan dessa två metoder beror av storlek och tidsplan på projektet, vertikaldränar kan användas vid större projekt med generösa tidplaner och kalkcementpelare vid mindre projekt och större projekt med begränsade tidplaner.

2.4.2 Nackdelar

En nackdel med kalkcementpelare är att resultatet av stabiliseringen kan vara mycket varierande och ofta svårt att förutse. Problemet grundar sig i att såväl installations- som kontrollprocessen inte är överskådbar. Hela förstärkningsprocessen sker utan möjlighet till visuell beskådning och resultatet av en stabilisering kan inte kontrolleras okulärt om inte pelaren grävs upp. Inte heller sonderingsutförandet går att bevittna vilket gör att det är svårt att avgöra om sonden går ur pelaren eller om den går igenom en bristfälligt stabiliserad pelare. Det leder även till att metoden är svår att utveckla då teorier/idéer om processer som utmatning och blandning är svåra att bevittna och verifiera.

3 Inverkan av skillnader mellan faktorer i laboratorium och fält

3.1 Jordens situation och spänningstillstånd

Laboratorium

Den jord som används i laboratorium för att bestämma ursprungsegenskaper samt för inblandningstester, hämtas från det aktuella området som skall pelarstabiliseras. Jordprover tas normalt upp med en kolvprovtagare för att erhålla ostörda prover. När provet tas upp ur marken ändras dess spänningssituation.

Fält

Vilka jordarter som finns i området klargörs genom sonderingar och jordprovsanalys. De vanligaste sonderingsmetoderna för att klargöra jordlagerföljd är viktsondering och CPT-sondering. Sonderingarna kompletteras med provtagning med kolvprovtagare eller skruvborr. Utifrån jordartsundersökningar i ett antal punkter dras slutsatser om områdets jordprofil, det vill säga man tar fram en tolkad jordartsprofil för den aktuella sträckan. Den tolkade profilen utgör ett underlag för beslut om i vilka punkter och för vilka nivåer inblandningsförsök skall utföras. I en stor jordvolym utsätts jordmaterialet för olika spänningar; vertikala effektivspänningar som ökar med djupet och horisontalspänningar som normalt är lägre än vertikalspänningarna.

Jämförelse och diskussion

Jorden som används för stabilisering i laboratorium skall vara representativ för den jord som så småningom skall stabiliseras i fält. Vissa egenskaper kan dock ha förändrats under upptagning och transport av proverna. Proverna kan ha blivit störda, vilket till exempel kan leda till missvisande värden på hållfasthet och sensitivitet. Vidare kan exempelvis en temperaturförhöjning leda till avdunstning av porvattnet, det vill säga minskad vattenkvot.

Spänningsförhållandena i ett prov ändras när det tas upp ur marken. Totalspänningarna på det upptagna provet är noll eftersom inget tryck verkar på provet.

Ytterligare en skillnad mellan jordens tillstånd i fält respektive laboratoriemiljö är att jordprovet, när det tagits upp, utsätts för kontakt med luft. Uttorkning av jordmaterialet har redan nämnts men det kan även hända att materialet reagerar med ämnen i luften som påverkar jordens egenskaper. Bland annat kan man vid sulfidhaltig lera se att sulfidfärgningen efter ett tag försvinner då proverna oxiderar. Därför bör prover förvaras vid lämplig temperatur och lufttätt.

Utvärdering av jordarter i fält baseras på de punkter som undersökts och eftersom dessa endast täcker en liten del av området kan bedömningen av jordlagerföljden bli något

förenklad. Ett litet jordprov ska således representera en stor volym. Då jordlagerföljder kan variera i stor utsträckning även över små arealer, så bör sonderingarna utföras med täta mellanrum för att i största möjliga mån undvika att svårstabiliserade jordlager går obemärkt förbi.

3.2 Packningsarbete

Laboratorium

När jorden blandats med bindemedlet fylls kolvprovtagarhylsor med materialet. Materialet fylls på i lager om 30 mm och packas med en packningsapparat i 5-10 sekunder för varje lager. Det statiska packningstryck som normalt används är 100 kPa. Packningen bör vara jämn och likformig. Vidare bör lageruppdelningar förhindras genom uppluckring av ytan på underliggande lager innan nästa appliceras. Hela packningsprocessen skall vara avslutad inom 30 minuter efter att blandningen med stabiliseringsmedlet påbörjats. Det ovan beskrivna förfarandet är hämtat från det förslag till laboratoriehandedning som finns i Rapport 4:95, Carlsten och Ekström (1995). I många svenska laboratorier används variationer av det beskrivna tillvägagångssättet eftersom det endast är ett förslag.

Fält

Vid en pelarinstallation utförs inget packningsarbete förutom det som blandningsverktyget åstadkommer. I vilken omfattning blandningsverktyget packar provet beror av dess utformning. Det är viktigt att blandningsverktyget är utformat så att materialet inte följer med uppåt.

Jämförelse och diskussion

Gränsytearean mellan bindemedels- och jordpartiklarna är ett mått på blandningskvalitén. Således har packningsarbetet inverkan på blandningsprocessen eftersom ökad densitet, vilket är resultatet av packningsarbete, minskar avståndet mellan bindemedlet och jorden.

Blandningsverktygets utformning är av betydelse för packningsarbetet, då det beror av redskapets knådande förmåga. Den energimängd som redskapet tillför jorden bör vara riktad nedåt i blandningen och redskapet får inte lyfta materialet eller vara utformat så att materialet fastnar och följer med uppåt, Larsson (2000).

Packningsarbete är en inverkan som finns i laboratorieförsök men inte nämnbart vid tillverkning av pelare. Eftersom antalet faktorer som påverkar utfallet av en stabilisering är stort och det är mycket svårt att hålla alla utom en konstant, är inte lätt att dra slutsatser om en specifik faktors betydelse för uppnådda resultat. Detta gör att det är svårt att utröna packningsarbetets påverkan på uppnådda resultat.

3.3 Vattentillgång

Laboratorium

När jordprovet tas upp ur marken så förändras dess naturliga tillgång till vatten. Provet har inte längre tillgång till vattnet i omkringliggande jord. Om inte hanteringen avseende frakt, förvaring och inblandning sker varsamt så kan vatteninnehållet minska. Enligt Pradines (1980), minskar vatteninnehållet i lera upp till fyra procent under blandningsarbete i laboratorium. Provkroppen som tillverkats efter tillsättning av bindemedel härdar genom reaktion med det vatten som finns tillgängligt i ursprungsjorden. Vattentillgången påverkas även av jordens struktur. Om strukturen i en jord är helt uppbruten så frigörs vatten som kan väta bindemedelspartiklarna. Ingen vattentillförsel sker i tillverkningsprocessen och ingen extern vattentillgång finns under hela lagringsprocessen, varken före eller efter inblandning av stabiliseringsmedel.

Fält

När bindemedlet distribueras under uppdrivning av blandningsverktyget påbörjas kemiska reaktioner mellan bindemedel, vatten och jord. Under reaktionerna så transporteras vätska från omkringliggande jord till den stabiliserade jordpelaren genom diffusion. Tillgängligt vatten är således vattnet i den stabiliserade pelarvolymen samt vattnet i närliggande jord.

Jämförelse och diskussion

Vattentillgången för ett stabiliserat jordprov i en provtub och den stabiliserade pelaren i fält skiljer sig märkbart. Vid laboratorieförsök finns ingen motsvarighet till den diffusion av vatten från omgivande jord som sker i fält. Dock leder den betydligt mer sönderbrutna strukturen i laboratorium till att mer vatten frigörs från den jord som stabiliseras. Hur dessa två typer av vattentillgångar förhåller sig storleksmässigt har inte återfunnits i studerad litteratur.

3.4 Temperatur

Laboratorium

Innan inblandning förvaras jordproverna i kylrum. Den laboratoriestabiliserade jorden som packats i provtuber förvaras normalt antingen i kylrum som håller ca 7–8 °C och/eller i rumstemperatur. Lagring i rumstemperatur tillämpas bland annat för att efterlikna temperaturer som förekommer vid härdning av pelare i fält.

Fält

I de delar av Sverige där kalk- och kalkcementpelare normalt installeras är marktemperaturen ungefär 8 °C, men vid inblandning av stabiliseringsmedel sker en värmeutveckling i den stabiliserade och närliggande jorden. Det är i första hand vid kalkens, men även cementens, reaktion med vatten som värme avges. Detta gör att marktemperaturen stiger markant efter en pelarinstallation.

Jämförelse och diskussion

Vid inblandning av kalk i jord sker som ovan nämnts en stark värmeutveckling. Höga temperaturer är gynnsamma för en snabbare hållfasthetsutveckling och vid stora jordvolymen bibehålls värmen under längre tid än vid små prover. I fält bevaras således värmen längre, medan den i laboratorium kan jämnas ut och avgå vid öppen inblandning. En tidigare undersökning visar att marktemperaturen stigit till 70 °C ett par timmar efter en kalkpelarinstallation och efter ett år var temperaturen i marken fortfarande högre (10–15 °C) än normalt, Åhnberg och Holm (1987).

Ett sätt att efterlikna temperaturförhållandena från fält i laboratoriemiljö, är att låta de kalkcementstabiliserade proverna stå i rumstemperatur under den första tiden av lagringen och därefter placera proverna i ett kylrum med cirka åtta graders temperatur. Vid rena kalkinblandningar blir temperaturen i marken högre och då kan det vara aktuellt att låta proverna stå i rumstemperatur under en längre tid än vad som är aktuellt för prover stabiliserade med kalkcement. Det finns ett behov av att ytterligare kartlägga temperaturförändringen i fält vid installation av pelare med olika inblandningsmedel, för att kunna förvara laboratorieprover i lämpliga temperaturer.

3.5 Blandningsprocess

Laboratorium

I SGF Rapport 4:95, Carlsten och Ekström (1995), finns ett förslag till laboratorieanvisning som idag används, i varierande utsträckning, av de flesta aktörerna i branschen. Enligt denna anvisning används två olika blandningsmaskiner, vilken som nyttjas beror av provets storlek och konsistens. Om provet väger mer än tre kilo och är fast i konsistensen så används en degblandare. I övriga fall används hushållsassistent. Jordprovet blandas först till en homogen massa. Jordens struktur slås sönder och vatten frigörs. Därefter tillsätts bindemedlet och blandas in i leran genom att låta maskinen arbeta i ytterligare 5–6 minuter.

Fält

Blandningsprocessen i fält börjar vid neddrivningen av blandningsverktyget. Det roterande verktyget penetreras ned i marken till önskat djup, vanligen med en sjunkning av

100 mm/varv. Jorden struktur bryts ned, till vilken grad är oklart. När stigningen påbörjas börjar även utmatningen av bindemedel. Med hjälp av tryck matas det luftburna bindemedlet ut i jorden genom ett hål på den övre delen av blandningsverktyget. Verktygets utformning påverkar hur jordens struktur förändras och hur de energiflöden som skapas är riktade. Stignings- och rotationshastighet kan varieras. I dag är de vanligaste värdena på dessa parametrar 15–25 mm/varv respektive 80–120 varv/min. Dock har högre värden på såväl stigningshastigheter som rotationshastigheter använts vid provpelarinstitutioner och i vissa projekt även vid produktionspelartillverkning.

Jämförelse och diskussion

Första steget i blandningsprocessen är uppbrytning av jorden och dess agglomerat, det vill säga en beståndsdel som uppstått genom sammanhopning av olika delar. Att jorden bryts ned till den nivå som krävs för en tillfredställande molekyllär diffusion är en viktig del av blandningsprocessen. Agglomerat bryts upp genom skjuvning av jorden eller genom att skapa stora tryckkrafter. För att åstadkomma tillräckligt stora skjuv- eller tryckkrafter måste blandningen sättas i rörelse, Larsson (2000).

I laboratorium sätts jorden i rörelse genom att den knådas av gafflar tills dess struktur brutits ned och materialet homogeniserats. Motsvarande nedbrytning finns inte i samma utsträckning vid pelartillverkning då materialet i laboratorium homogeniseras i ungefär fem minuter medan homogeniseringen i fält endast representeras av en neddrivning med ett varv per decimeter.

För att i fält åstadkomma god uppbrytning av agglomerat bör verktyg med paddlar som har relativt stor vinkel mot horisontalplanet, ca 45 grader, användas. Det skapar en knådande rörelse, både i axiell och tangentiell riktning runt paddlarna. De rörelser som dagens normalverktyg, med paddlar med betydligt mindre vinkel, skapar i tangentiell och axiell riktning är begränsade till en mycket liten volym i nära anslutning till bladen. Japanska undersökningar har visat att blandningsverktyg med fler skaft än ett, ger högre hållfasthet och mindre spridning. Detta tros bero på att omgivande skaft roterar i omvänd riktning vilket ger en överlappande zon med en knådande blandningseffekt, Larsson (2000).

I fält transporteras bindemedel från tankar till jorden med hjälp av tryckluft som bärande media. Dock resulterar inblandningen av luft i jorden i svårigheter när jord och bindemedel skall blandas. Såväl vätningen av bindemedelspartiklarna som uppbrytningen av agglomeratsbildning försvåras, Larsson (2000). Att maskinen matar ut luft i marken även vid sjunkning är en nackdel som borde åtgärdas. En slutningsmekanism för utmatningshålet skulle ta bort behovet av att luft trycks ut vid neddrivning av verktyget.

Tryckluften fyller dock den centrala uppgiften att fördela bindemedlet. Att bindemedlet fördelas över hela tvärsnittet i ett tidigt skede av blandningsprocessen är viktigt eftersom leror har en komplex reologi, dvs. deformations- och flytegenskaper. Efter att bindemedlet tillsatts

är det svårt att sprida bindemedlet i jordvolymen och hopklumpningar med höga koncentrationer kan uppstå, Larsson (2000). Ett för högt utblåsningstryck vid utmatningen av kalk och cement kan eventuellt vara orsaken när anhopningar av stabiliseringsmedel uppkommer i ytterkanten av pelare. Placeringen av utmatningshålet bör beaktas då det kan vara av stor betydelse för spridningen av bindemedel. Önskvärt är att utmatningshålet/en är placerat så att bindemedel sprids över tvärsnittet redan vid utsprutningen. Ett modifierat bygelverktyg där bindemedlet sprutas ut genom ett hål i mitten av varje blad, alternativt genom ett antal mindre hål längs hela verktygets bredd, kan vara en bra idé att arbeta vidare med.

Kompressorn, som används för mata bindemedel genom slangar och ner i jorden, bygger upp tryck som resulterar i ojämn utmatning. Trycket byggs upp och medför att en koncentrerad laddning bindemedel matas ut i jorden. Detta är ett problem och en bidragande orsak till den, vanligt förekommande, ojämna fördelning av bindemedel i pelare. Utmatningen är som mest ojämn när en maskin fraktats eller stått oanvänd under en längre tid. Då krävs en viss inställningstid, det vill säga att ett antal inställningspelare tillverkas för att justera in rätt mängd stabiliseringsmedel. Enligt tidigare studier krävs omkring tio pelare efter omprogrammering av installationsfaktorer som utmatningsmängd och stigningshastighet innan installationen sker korrekt, Hansson (2000). Hur många pelare som krävs efter en maskinflytt eller längre uppbrott framgår inte av studerad litteratur.

I laboratoriemiljö mäts mängder kalk, cement och andra stabiliseringsmedel med stor noggrannhet. Under fältförhållanden är detta inte lika lätt. Här ställs maskinen in på bestämda mängder av de olika stabiliseringsmedlen och under utmatningen sker en kontinuerlig vägning av stabiliseringstankarna för att kontrollera att rätt mängd blir utmatad. Vågarna är mycket känsliga, och faktorer som hård vind mot tankarna kan ge missvisande resultat. Eftersom man mäter den mängd stabiliseringsmedel som lämnar tanken så finns ingen direkt vetskap om hur mycket som kommer ut ur munstycket vid en viss tidpunkt. Insprutningsmekanismen är, se underavsnitt 2.3.6, en process med många svaga länkar, se Bredenberg, (1999), och är således en del av blandningsprocessen som behöver studeras ytterligare.

Eftersom kalken har förmågan att diffundera så är dess fördelning över tvärsnittet mindre viktig än för cementen, som förblir där den är då blandningsprocessen avslutas. Under blandningsprocessen däremot, har cementen lättare att sprida sig i leran då dess reaktion, till motsats från kalkens, inte är momentan. Dålig inblandning har således större negativ effekt för cement än för kalk, Walter (1998).

För att öka blandningsarbetet i fält skulle bindemedlet kunna tillsättas redan vid neddrivningen av blandningsverktyget. Problem som kan uppstå vid detta förfarande är att bindemedlet hinner reagera med jorden och gör den svårblandad. För att underlätta blandningsarbetet skulle flytmedel som bromsar upp de kemiska reaktionerna kunna användas, vilket dock inte är prövat i Sverige ännu.

I laboratorium tillsätts ofta allt bindemedel innan maskinen startas för att blanda jorden med bindemedlet i fem till sex minuter. Hur bindemedlet tillsätts jorden är av mindre betydelse i laboratorium än i fält då det viktiga är att bindemedlet, genom blandningsarbete, dispergeras i blandningen. Att blandningsgraden i laboratorium skiljer sig från den i fält är uppenbart då jorden vid laboratorieinblandningar är fullständigt uppbruten och blandad mångdubbelt fler gånger än vad som uppnås under installationen av pelarna i fält. Detta trots att den verkliga blandningstiden i laboratorium normalt bara är en till två minuter. Efter denna tid bildas ofta en jorddeg som följer gaffeln runt under de sista fyra till fem minuterna.

En fullt nedbruten struktur i jorden kan påverka de verksamma blandningsmekanismerna positivt eftersom det då är lättare att skapa rörelser i jorden, vilket är en förutsättning för blandning av materialen. Dock är det viktigt att blandningsgraden med bindemedlet blir god, så att inte skikt av jorden blir nedbruten och sedan inte får tillgång till bindemedel.

Målet med vidareutveckling av blandningsverktyget i fält är att uppnå högre hållfasthet och framför allt homogenera pelare. Detta mål är svårt att uppnå utan ökad energiåtgång och längre blandningstid. Denna utveckling kan dock vara nödvändig för att vidga metodens användningsområden till att omfatta mer tekniskt komplexa konstruktioner och öka dess precision. Utvecklingen av blandningsverktyget försvåras av att jorden lätt följer med verktyget uppåt, samt att pelarna har en relativt liten diameter vilket gör att verktyget begränsas i storlek och godstjocklek. Dessutom kan det vara svårt att finna ett universellt blandningsverktyg som fungerar bra i alla typer av jordar. Eventuellt bör framtagningen av verktyg inriktas mot olika jordtyper. Enligt den finska dimensioneringsvägledningen så har antalet blandningsnivåer, dvs. antalet knivar, stor betydelse för blandningsresultatet. Det vanligast använda verktyget i Finland har två blandningsnivåer, men ett med fyra nivåer är under utveckling, Svensk Djupstabilisering (1999). I Skandinavien används ofta stigningen (mm/varv) som ett mått på blandningstiden. I Japan däremot, används såväl neddrivnings-, uppdragnings- som rotationshastigheten som mått på blandningstiden. Blandningstiden speglas således med en faktor T (rotationer/m), som kombinerar parametrarna enligt ekvation 3.1, Larsson (2000).

$$T = \sum M \times \left\{ \left(\frac{N_d}{V_d} \right) + \left(\frac{N_u}{V_u} \right) \right\} \quad (5.1)$$

där

$\sum M$ = Antalet blad på blandningsverktyget

N_d = Rotationshastighet på blandningsverktyget vid neddrivning (varv/min)

V_d = Neddrivningshastighet (m/min)

N_u = Rotationshastighet på blandningsverktyget vid uppdragning (varv/min)

V_u = Uppdragningshastighet (m/min)

En trolig anledning till att blandningsverktygen knappt har utvecklats sedan metoden introducerades är den entreprenadform som tillämpats vid installation av kalk- och kalkcementpelare, det vill säga att entreprenören endast har leveransansvar. Avviker entreprenörerna från föreskrifterna och kommer med egna lösningar så överläts funktionsansvaret till entreprenören. Ett ökat ansvar mot samma ekonomiska ersättning gör att det idag saknas incitament för utveckling. Utveckling av blandningsverktyg baserat på den kunskap som finns om blandningsprocessen torde vara av stor betydelse för vidareutveckling av metoden.

Att utföra kalk- och kalkcementpelarinstallationer på totalentreprenad råder det delade meningar om. I såväl entreprenör- som beställarledet finns det olika uppfattningar om huruvida entreprenörerna är redo att ta det funktionsansvar som detta innebär. De mycket varierande resultaten och metodens, i dagsläget, oförutsägbara resultat är nog den tyngsta anledningen till skepticism. Vidare så behövs en pålitlig kontrollmetod för att entreprenörer skall vilja ta funktionsansvar. Inför en etablering utomlands måste beredskap finnas hos entreprenören att ta funktionsansvar.

Att pelarens kvalité blir bättre ju lägre stigningshastighet som används vid tillverkningen, eftersom bindemedlet då sprids jämnare över tvärsnittet, är generellt vedertaget. En lägre stigningshastighet resulterar i att tillverkningstiden ökar och därmed även kostnaderna för installationen, detta kan dock vara nödvändigt om önskade resultat skall uppnås. I Japan används stigningshastigheter som är avsevärt lägre än de som tillämpas i Sverige idag och väsentligt högre hållfastheter uppnås, Halkola (1999).

Att bindemedlet genom blandning sprids väl i jordvolymen är den mest betydelsefulla faktorn för att uppnå bra resultat. Hur väl en blandningsprocess lyckas är starkt beroende av den utrustning som används och dess kapacitet att blanda jord och bindemedel så att en godtagbar homogenitet uppnås, Rathmayer (1997).

Tydliga skillnader finns mellan laboratorieinblandning och den inblandningsprocess som sker i fält. Målet bör vara att metoderna som tillämpas i fält respektive i laboratorium skall ge jämförbara resultat. Att få förfarandet att bli detsamma är ett högt satt mål som i sin ytterlighet inte är genomförbart. Att förbättra blandningsförfarandet i fält, ur synvinkeln att spridningen minskas och mer förutsägbara resultat uppnås, är av stor vikt då uppnådd hållfasthet till stor del beror av hur väl de två komponenterna jord och bindemedel blandats med varandra.

Lägre stigningshastighet i kombination med ett för materialblandningen och ändamålet mer anpassat blandningsverktyg samt en mer kontrollerad utmatning av bindemedel är en bra utgångspunkt för en bättre fungerande blandningsprocess.

3.6 Hållfasthetskontroll samt utvärdering av skjuvhållfasthet

Laboratorium

För den laboratoriestabiliserade jorden kontrolleras skjuvhållfastheten främst genom enaxiella tryckförsök, men även konförsök förekommer. Provkropparna testas efter olika antal dygn, till exempel 10, 30, 60 och 90 dygn, för att få en uppfattning om hållfasthetsutvecklingen. I dagsläget är det beställaren som i sin beställning bestämmer när proverna skall tryckas. Skjuvhållfastheten vid enaxiella tryckförsök utvärderas utifrån antagandet om ren kohesionsjord.

Fält

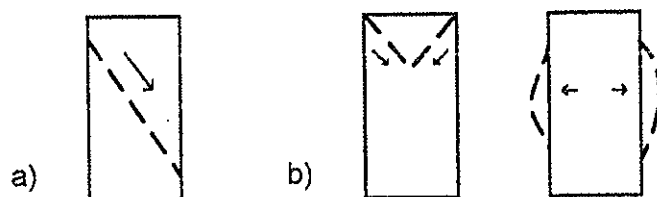
Kalkcementpelares skjuvhållfasthet kontrolleras med hjälp av någon av de metoder som beskrivs i underavsnitt 2.3.7. Vanligast är traditionell pelarsondering och omvänd pelarsondering. Pelare kontrolleras olika antal dagar efter installation. Valet av tidpunkt för kontroll beror på en rad faktorer. En blandning med snabb hållfasthetsutveckling bör till exempel testas i ett tidigt skede, eftersom det är svårt att genomföra en sondering i en alltför stark pelare. Skjuvhållfastheten utvärderas baserat på det uppmätta sonderingsmotståndet.

Jämförelse och diskussion

Av naturliga skäl kan inte samma provningsmetoder användas i laboratorium som de som används i fält och därför är det svårt att jämföra absolutvärdet på skjuvhållfastheten. Av de använda laboratoriemetoderna, enaxiella tryckförsök samt konförsök, bör konförsök undvikas eftersom de generellt ger för höga värden. Detta beror eventuellt på att de för konförsök upprättade utvärderingsdiagrammen, som är framtagna för naturlig lerjord, blir missvisande för stabiliserad lera. En ytterligare anledning till att resultaten skiljer sig kan vara provstorleken.

Det är även osäkert huruvida enaxiella tryckförsök ger ett rättvisande värde på hållfastheten. Utvärderingen av skjuvhållfastheten i ett enaxiellt tryckförsök baseras totalspänningsanalys samt att ett skjuvbrott inträffar längs en glidyta med 45° lutning. Det antas att den odränerade skjuvhållfastheten är lika med halva tryckhållfastheten. Tidigare studier av brottbilder för stabiliserade jordprover visar att de oftast går till tryckbrott i stället för skjuvbrott, Walter (1998). Figur 3.1 visar på olika typer av brott som kan uppkomma. Den främsta orsaken till att brottet inte sker längs den tänkta glidytan är att en lera som stabiliserats med kalk och/eller cement sällan eller aldrig är ett rent kohesionsmaterial. Det kan diskuteras om man bör använda den nämnda utvärderingsmetoden när brottbilden skiljer sig så markant. Dessutom baseras utvärderingen av enaxiella tryckförsök på att proven är vattenmättade, vilket inte är fallet för prover som stabiliserats med kalk och cement. Om hållfastheten för

laboriestedabiliserade prover utvärderas som tryckhållfasthet, bör även utvärderingsmetoden för hållfasthet i pelare anpassas till att göra detsamma.



Figur 3.1 Olika brottbilder. a) Ett skjuvbrott motsvaras i försöken av ett tydligt skjuvplan som bildas diagonalt över provkroppen. b) Med tryckbrott avses ett plötsligt brott som skapat en kilformad kon i provets övre del eller ett bulkbrott där provet spjälkats sönder inifrån och dess sidor långsamt tryckts utåt. (Walter, 1998).

Vid det enaxiella försöket, i motsats till situationen i fält, finns inget stöd från omkringliggande jord. Därmed finns inte heller några sidotryck, motsvarande de horisontella spänningarna i fält. Triaxialförsök skulle ge en mer verklighetstrogen spänningsbild. De högre kostnaderna, för bland annat utrustning och tid, försvårar dock att metoden används vid rutinmässiga jordprovsstabiliseringar i laboratorium. Att i en omfattande studie jämföra triaxialförsök och enaxiella försök kan vara ett steg mot ett mer rättvisande laborativvärde på hållfastheten.

När man i ett massstabiliseringsprojekt utfört inblandningar med torv, förvarades provtuberna under 18 kPa tryck. Trycket på provtuber skulle således kunna efterlikna trycket från ovanliggande jordmassa i fält. Proverna var även försedda med filterstenar i båda ändytorna och hade därmed fri tillgång till vatten både uppfifrån och nerifrån, Jelusic (1999). Detta förfarande utförs för torv men kan vara en idé att implementera även vid stabilisering av lera.

Provstorleken är sannolikt en bidragande orsak till skillnader i hållfasthet mellan fält och laboratorium. De prover som trycks idag är mycket små och representerar således endast en liten del av en stor jordmassa. Ju större prover som kan kontrolleras ju bättre beskrivs verkliga förhållanden.

Vid kontroll av pelare i fält med traditionell pelarsond, är det lätt att sonden styr ut i den ostabiliserade leran, speciellt då pelarna är hårda och långa. För att undvika urspårning samt underlätta sondering av höghållfasta pelare kan pelare förböras, sonden håller sig då i pelarens mitt en längre sträcka. För att få ett rättvisande resultat på pelarens hållfasthet är det viktigt att sonden täcker upp en stor del av pelarens tvärsnitt. I september 2000 presenterades en licentiatuppsats, Axelsson (2000), där det rekommenderas en större sondarea, ett centrumhål för styrning av sondstången samt konstateras att förinstallerad omvänd pelarsondering är den sonderingsmetod som har störst potential, om den förfinas och utvecklas. Ett förslag till förbättring av den omvända sonderingsmetoden är att vajern bör separeras från matningen av bindemedel. Vidare föreslås att spetstrycket under en sondering bör registreras separat, vilket

skulle underlätta utvärdering av sonderingsmotstånd då dagens metoder att bestämma mantelfriktion inte är entydiga.

Det faktum att sonderingsverktygen ofta tillverkas av entreprenören själv genom svetsning är en eventuell felkälla som gör att kontrollmetoden förlorar mycket i precision. En omständlighet som talar mot den förinstallerade sonderingsmetoden är att de som installerar pelarna vet vilka som ska kontrolleras och kan utföra dessa med större noggrannhet än övriga pelare. Ett annat problem är att det har visat sig att stabiliseringsmedel läcker ut efter stången, vilket gör att pelarna blir hårda och spröda i pelarens kärna och sonderingen visar därmed ett för högt värde. Vid utvärdering av sonderingsmotstånd måste hänsyn tas till faktorer som påverkar skjuvhållfastheten, såsom sondarea och förborrning, för att få ett så rättvisande värde på hållfastheten som möjligt.

Det är viktigt att kontrollera att pelares projekterade längd och diameter uppfylls, eftersom dimensioneringen ofta är baserad på dessa parametrar.

Även om metoderna för att bestämma hållfasthet i laboratorium och i fält skiljer sig åt, så är det viktigt att det är samma slags hållfasthet som behandlas för att de skall kunna jämföras mot varandra.

4 Studier av sammanställningar för analyserade projekt

4.1 Allmänt

Denna studie grundar sig på information från projekt som redan är utförda. Inga försök eller projekt har drivits enbart för detta arbete. Motivet till detta är att ta tillvara på den information som redan finns och att genom erfarenhetsåterföring bygga upp ett underlag baserat på fakta.

Data har samlats in från samtliga aktörer i pelarprojektens olika skeden. Ansvariga på de kontor som besökts har tillhandahållit material och ofta har data till ett och samma projekt samlats ihop från ett antal olika personer och kontor. En bedömning har gjorts om materialet som funnits att tillgå innehållit den information som krävs för att kunna ge en helhetsbild av resultat från hela processen, det vill säga från projektering till sondering av färdiga pelare.

Data från de väldokumenterade projekt som samlats in har sedan bearbetats och matas in i ett för arbetet upprättat exceldokument. Utifrån detta underlag har diagram tagits fram och sammanställts. Diagramsammanställningarna har studerats och ligger till grund för den diskussion och de slutsatser som dras i slutet av detta kapitel.

I början av projektet var tanken att detta arbete skulle vara en fortsättning på Svensk Djupstabiliserings rapport "Erfarenhetsbank för kalkcementpelare", Edstam (1997). Anledningen till att detta arbete utförts som ett fristående projekt är att detaljeringsnivån på de två studierna skiljer sig från varandra. Denna studie innehåller analyser av ett mindre antal projekt där variationen i hållfasthet längs hela pelarlängden samt jämförelsen mellan laboratorium och fält har prioriterats. Edstams arbete täcker en stor del av de projekt som utfördes i Sverige fram till 1995, varav ett antal studerades på detaljerad nivå med ett ansevärt antal undersökta parametrar.

4.2 Projektpresentation

Rapporten behandlar data från 13 projekt varav nio är lokaliserade i Mälardalen och fyra på Västkusten. Objekten presenterade i tabell 4.1 bidrar med data till detta arbete.

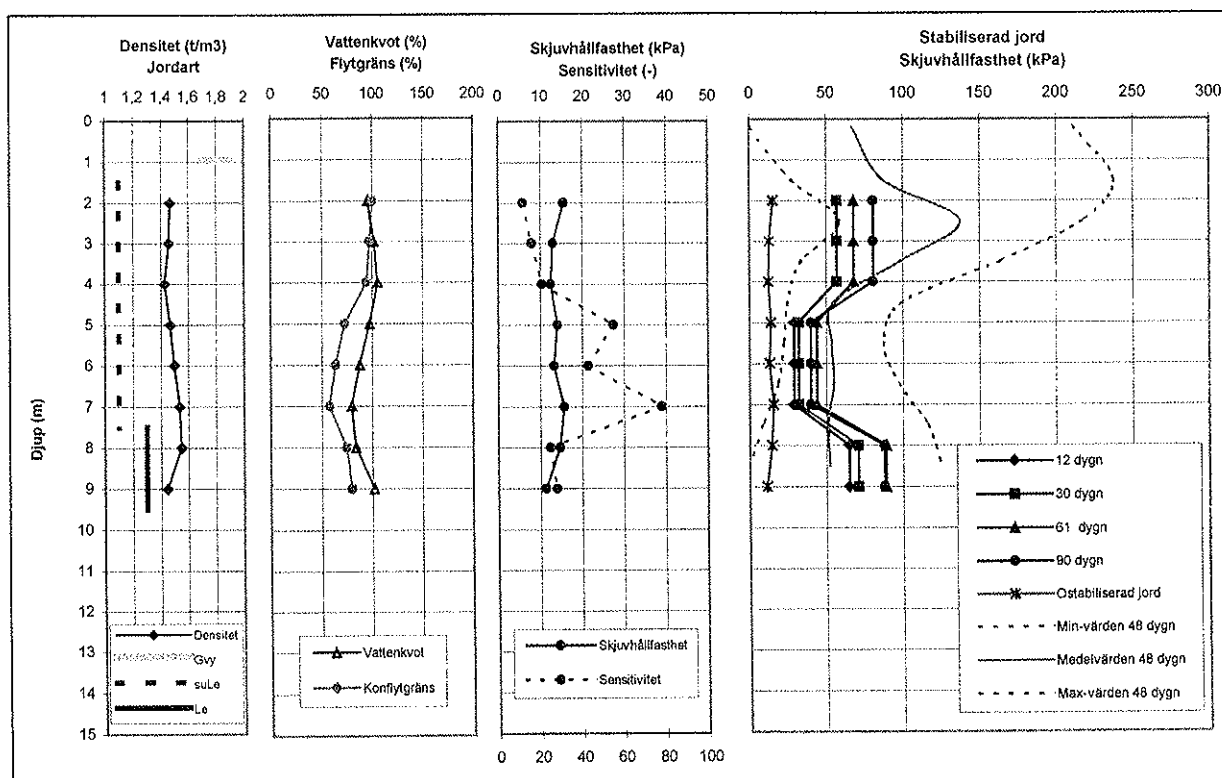
Tabell 4.1 Studerade projekt (projektåret avser det år då pelarna installerats).

Mälardalen	Västkusten
E18/E20, Slyte - Gräsnäs, 1998	Eka Nobel, 1995
E18/E20, Örebro - Slyte, 1998	E6/E20, Åbromotet, 1998
E18, Arboga - Köping, 1994	Västkustbanan, Tångaberg - Varberg, 1997
E20, Eskilstuna - Arphus, 1997	Västkustbanan, Ledsgård, 2000
Svealandssbanan, Grundbro - Härad, 1994	
Västra stambanan, Katrineholms bangård, 1996	
Väg 841, Kallhäll - Kungsängen, 1999	
Mälarbanan, Kungsängen - Tibble, 1996	
Mälarbanan, Grillby - Enköping, 1998	

Samtliga projekt, med undantag av Eka Nobel, är av konstruktionstypen väg- eller järnvägsbank. Eka Nobelprojektet gällde stabilisering av en industritomt vid Göta älv. Projekten är av varierande storlek, beroende på att det främsta kriteriet i denna studie varit väl dokumenterade handlingar. Samtliga pelare som studerats har diametern 600 mm förutom de som upprättats i projekten Katrineholms bangård och Kungsängen - Tibble där pelare med en diameter på 800 mm installerades.

4.3 Upprättande och förklaring av diagram

I bilaga 1 och 2 finns 50 diagramsammanställningar från 13 olika projekt med information om jordens ursprungsegenskaper, resultat från laboriestedabiliseringar av jord samt sonderingsresultat från pelarprovning. För varje lokal som studerats har en sammanställning av dessa data tagits fram i diagramform. Flera sammanställningar har upprättats om olika bindemedel provats, bindemedelsmängden varierats samt om pelarna inom samma område sonderats vid olika tillfällen eller med olika slags sond. I figur 4.1 visas ett exempel på en sådan sammanställning av diagram.



Figur 4.1 Ett exempel på diagramsammanställning.

I bilagornas övre vänstra hörn anges projektets namn samt eventuellt delområde eller delsträcka. Angivet är även de punkter där jordprovsanalysen är utförd, där jord tagits för laboriestedabilisering samt där pelarna är lokaliserade.

I diagrammet längst till vänster visas jordens densitet innan inblandning. Där finns även en illustration över jordarterna längs jordprofilen. Dessa visas med hjälp av vertikala linjer mot

djupet och refererar ej till värdena på x-axeln. Vid utvärdering har jorden klassificerats enligt de jordarter som presenteras i tabell 4.2. I de fall där grundvattenytans djup är känd, finns den inlagd som ett grått horisontellt streck i övre högra hörnet.

Tabell 4.2 Jordartsbeteckningar.

Beteckning	Jordart
Let	torrskorpa
T	torv
Gy	gyttja
gyLe	gyttjig lera
suLe	sulfidhaltig lera
Le	lera
Le (si)	lera med siltskikt
siLe	siltig lera
Si	silt
suSi	sulfidhaltig silt

Jordarter är vid sondering normalt angivna för varje hel meter. Ett exempel på detta är en jordprofil med sulfidhaltig lera på djupen 2, 3, 4, 5, 6 och 7 meter samt lera på 8 och 9 meters djup. Linjerna i diagrammen har då ritats in en halvmeter ovan respektive under de angivna djupen, det vill säga sulfidhaltig lera från 1,5 till 7,5 meters djup och lera mellan 7,5 och 9,5 meters djup, jämför figur 4.1.

Andra diagrammet visar vattenkvot samt konflytgräns, och det tredje diagrammet visar den ostabiliserade jordens reducerade skjuvhållfasthet och sensitivitet. Den reducerade skjuvhållfastheten avläses mot den övre skalan och sensitiviteten avläses mot den nedre skalan. Den ostabiliserade jordens skjuvhållfasthet har korrigerats med hänsyn till konflytgräns. Konflytgränsen, w_L , används ofta som ett mått på den organiska halten och den korrigerade skjuvhållfastheten beräknas genom att multiplicera den, normalt genom konförsök, uppmätta skjuvhållfastheten med en korrektionsfaktor. Denna korrektionsfaktor, μ , beräknas genom ekvation 4.1.

$$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L} \right)^{0,45} \geq 0,5 \quad (4.1)$$

Diagrammet längst till höger visar en sammanställning av skjuvhållfasthet för den ostabiliserade jorden, den laboriestedabiliserade jorden samt pelarna. Den ostabiliserade jorden markeras av en linje med stjärnformade punkter. Värden uppnådda för laboriestedabiliserade prover representeras av raka linjer med punkter i form av rutertecken, fyrkanter, trianglar eller cirklar. Skjuvhållfastheter hos sonderade pelare i fält markeras av kurviga linjer och ofta även med streckade max- och minvärdeskurvor. I laborieförsöken blandas ofta

jord från olika djup samman för att sedan blandas med stabiliseringsmedlet. Detta leder till att samma skjuvhållfasthetsvärde redovisas på flera djup. I figur 4.1 har till exempel jord från 2, 3 och 4 meters djup ingått i samma inblandningsförsök. Likaså har jord från 5, 6 och 7 respektive 8 och 9 meters djup gett två resultat på laboratoriebestämd skjuvhållfasthet.

Normalt är det samma skalor på alla diagramsammanställningar, med vissa undantag då skalorna är ändrade för att inkludera samtliga resultat. Enstaka värden som ligger utanför diagrammen har markerats med värdet i en ruta.

Under diagrammet längst till höger finns en textruta med information om vilken sonderingsmetod som använts, hur många pelargrupper och pelare som är sammanställda i diagrammet och vilken proportion stabiliseringsmedlet har. Mängd stabiliseringsmedel finns för såväl laboratorieinblandningar som den för fält projekterade. Verklig inblandningsmängd i fält finns redovisad i förhållande till den projekterade mängden. *Överensstämmande* innebär att inblandningsmängden avviker från den projekterade med mindre än $\pm 2,5\%$. *Något mindre* och *något mer* innebär att den inblandade mängden stabiliseringsmedel är mellan 10 % och 2,5 % mindre respektive mer än den projekterade mängden. *Mindre* och *mer* innebär således en avvikelse från den projekterade inblandningsmängden med mindre respektive mer än 10 %. Vad detta innebär för olika projekterade inblandningsmängder, i kg/m^3 jord, kan utläsas i tabell 4.3.

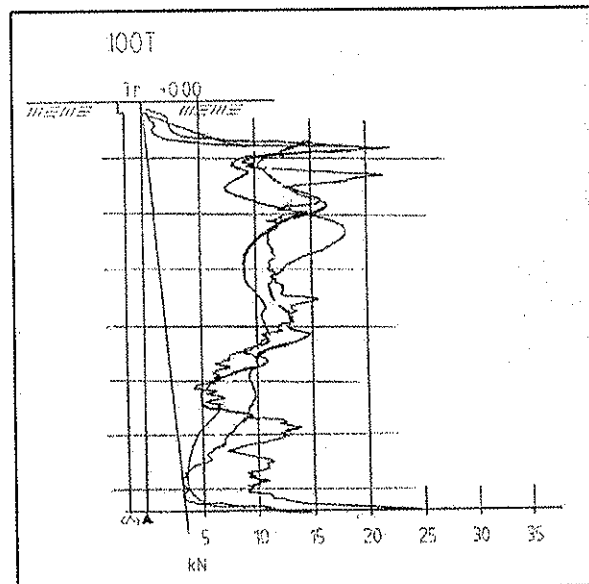
Tabell 4.3 Avvikelser i inblandningsmängder (kg/m^3).

Projekterad inbl. mängd	Mindre <i>max</i>	Något mindre		Överensstäm.		Något mer		Mer <i>min</i>
		<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	
80	72	72	78	78	82	82	88	88
90	81	81	88	88	92	92	99	99
100	90	90	98	98	103	103	110	110
106	95	95	103	103	109	109	117	117
110	99	99	107	107	113	113	121	121
115	104	104	112	112	118	118	127	127
120	108	108	117	117	123	123	132	132
125	113	113	122	122	128	128	138	138
150	135	135	146	146	154	154	165	165

Pelarseronderingar har funnits tillgängliga separat för varje pelare alternativt sammanställt för en grupp pelare. För att få ett underlag som går att använda i en jämförelse mot laboratorie-stabiliserad jord, utvärderades och sammanställdes pelarseronderingarna enligt följande:

- Om pelarna inte var sammanställda i pelargrupper gjordes detta först. Inom samma pelargrupp har alla pelare samma inblandningsmängd, proportioner av stabiliseringsmedel, samt ungefär samma ålder vid provning. De ligger även i närheten av varandra, så jordförhållandena är likartade.

- För alla pelargrupper noterades ett maxvärde och ett minvärde på sonderingsmotståndet för varje djupmeter samt ett medelvärde representativt för hela metern.
- Skjuvhållfastheten utvärderades från sonderingsmotståndet. Den kraft som krävs för att trycka ner alternativt dra upp sonden mäts och registreras. Resultatet redovisas i diagram liknande det som presenteras i figur 4.2. Stången ger ett motstånd mot jorden, en mantelfriktion, som bidrar till den kraft som krävs för sonderingen. Den totala sonderingskraften reduceras med den del som beror på mantelfriktionen och kvar blir nettokraften, vilken motsvarar den stabiliserade jordens motstånd mot sonden. Normalt ritas mantelfriktionen in som en rät linje med ökande värde mot djupet. Linjen ska knytas an till sonderingskurvan för pelarens underkant, det vill säga där sonderingen skett i ostabiliserad lera. Om sonderingen ej visar resultat på sonderingskraften i ostabiliserad lera, kan man använda sig av en tumregel som säger att mantelfriktionen ökar mot djupet med 0,5-1,0 kN per meter, Axelsson och Larsson (1994). Pelarens skjuvhållfasthet beräknas som 0,1 gånger nettokraften dividerat med sondens area. För normalsonderna 400x20, 500x15 och 600x15 mm², förenklas arean till 0,01 m² och därmed blir skjuvhållfastheten 10 ggr nettokraften. Om en normalsond har använts och nettokraften i pelaren är 15 kN, blir alltså skjuvhållfastheten 150 kPa. Om pelaren är förborrad bör man reducera sondens area eftersom sondspetsen ej ger ett tillskott till sonderingsmotståndet.
- Flera pelargrupper, med liknande grundförutsättningar, sammanställdes i samma diagram genom att ta medelvärden av såväl min-, medel- och maxskjuvhållfastheter. Antalet pelargrupper i sammanställningarna varierar mellan 1-6 stycken.



Figur 4.2 Sonderingsdiagram för tre pelarsonderingar.

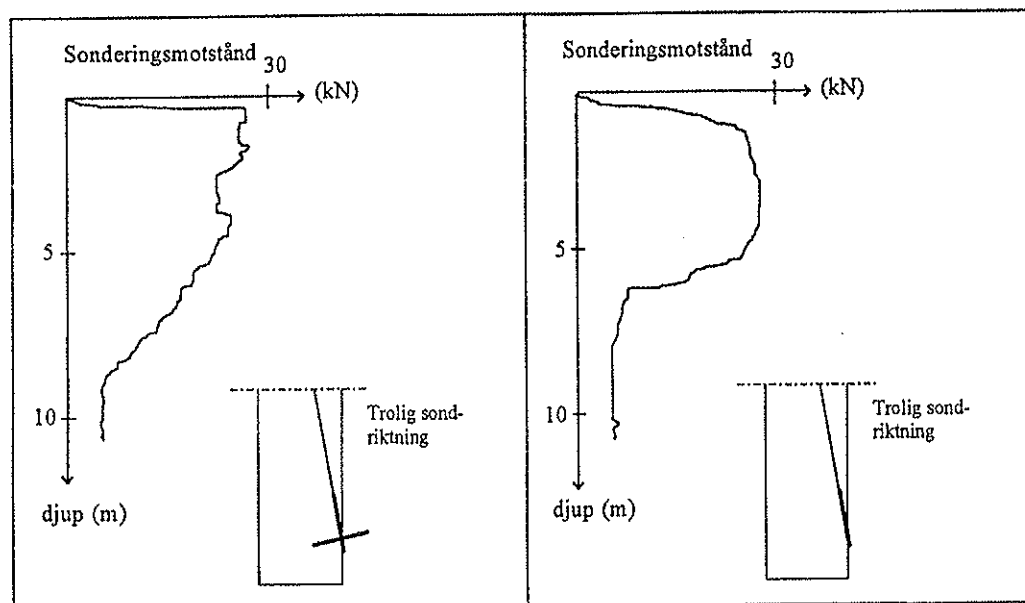
Utvärderingen av skjuvhållfastheten utifrån sonderingsmotståndet har i denna studie utförts på två olika sätt. Dels har en faktor 10, som diskuterats tidigare, använts och dels så har hållfastheten utvärderats utifrån sondens verkliga area. I diagramsammanställningarna som gjorts i detta arbete har skjuvhållfastheten utvärderad med faktorn 10 presenterats. Anledningen till detta val är att sondareorna ej varit kända i samtliga fall samt att materialet skall vara jämförbart. För några projekt där skjuvhållfastheten uppnådd i fält understiger skjuvhållfastheten som erhöles i laboratorium, så har även värden som baserats på den verkliga sondarean redovisats. Detta eftersom de ger ett mer rättvisande resultat på skjuvhållfastheten och för dessa fall ger en bättre överensstämmelse med laboratorievärdena. Ytterligare en anledning till att de redovisats i samma diagram är att visa på skillnaderna mellan de två utvärderingsmetoderna. I tabell 4.4 redovisas sondareor för de två typsonder som använts i studerade projekt. Vid förborring reduceras arean eftersom själva sondspetsen inte trycks genom stabiliserad jord. Den högra kolumnen anger skillnader mellan skjuvhållfastheter utvärderade med verklig sondarean och med faktorn tio. Det märks en tydlig ökning av skjuvhållfastheten om den verkliga arean används, speciellt där pelarna är förborrade.

Tabell 4.4 Den procentuella skillnaden mellan de två olika utvärderingsmetoderna.

Sond	Area (mm ²)	Skillnad från faktorn 10
400x20	8963	+11,6 %
600x15	10213	-2,1 %
400x20, förborrad	7000	+42,8 %
600x15, förborrad	8250	+21,3 %

Vid utvärdering och jämförelse av de olika skjuvhållfastheterna bör man ha i åtanke att djupangivelserna kan vara något missvisande. Till exempel kan det översta lagret i jordprofilen, såsom torv eller fyllnadsmaterial, schaktats bort före installation av pelare. Markytan, och därmed djupangivelserna, utgår då från en nivå vid jordprovsanalys och provtagning för laboratoriestabilisering, och en annan nivå vid installation och sondering av pelare. Alternativt kan en bädd ha lagts ut på lösa jordar vid installation av pelare, vilket leder till att pelarsonderingen påbörjats på en högre nivå än den för jordprovsanalysen angivna. Vidare kan jordlagerföljder variera i nivå mellan plats för pelarinstallation och punkt för upptagning av jordprov.

Att sonderingar, utförda med KPS, ofta ger avklingande skjuvhållfasthetsvärden på större djup, kan bero på att sonden lätt styr ur pelarna. Detta sker oftare i hårda pelare än i pelare med svaghetsanvisningar i centrumpartiet. Förborring underlättar för sonden att styra rätt i pelaren. En sond kan styra ur pelare på olika sätt. Figur 4.3 visar två händelseförlopp, vilka resulterar i två olika sonderingsresultat. Vid sammanställningen av diagrammen har de delar av kurvorna där sonden tydligt sparat ur, likt händelseförloppet till höger i figuren, utesluts.



Figur 4.3 Exempel på sonderingsresultat (Axelsson och Larsson 1994).

Ytterligare en orsak till avklingande värden längre ner i pelarprofiler kan vara för högt utvärderad mantelfriktionen. Denna ökar som bekant med djupet och en felbedömning på 2 kN vid pelarens underkant, gör att dess hållfasthet på den nivå underskattas med ca 20 kPa. Underskattningen minskar dock med minskat pelardjup. Det är viktigt att mantelfriktionen utvärderas på ett korrekt sätt, då det ger ett relativt stort utslag på skjuvhållfastheten.

När pelare med varierande längder sammanställts i samma diagram har oftast hållfasthetsvärdena som representerar de korta pelarnas sista metrar exkluderats. Detta för att utesluta de icke representativa värdena då sonden styrt ur. Anledningen till att det ändå kan uppkomma svängningar i sonderingskurvan där de kortare pelarna slutar, är att medelhållfastheten för olika pelargrupper ofta varierar trots att de ligger inom samma lokal.

Önskvärt är självfallet alltid att ta fram ett material som är statistiskt säkert. När underlaget till en studie är litet och resultaten mycket spridda, kan en missvisande bild av variationen i hållfasthet ges om standardavvikelser används. Då förespråkas i stället användning av ett absolut min- och maxvärde på hållfastheten för att beskriva spridningen i resultat, Halkola (1999). I denna studie har inte de förutsättningar som krävs för en statistisk studie funnits att tillgå, och därför har ovanstående metod vid utvärdering av resultat används.

4.4 Utvärdering och diskussion kring diagramsammanställningar

4.4.1 Mälardalen

E18/E20, Örebro – Slyte

För detta projekt har sex lokaler med provpelare och laboriестabiliserade prover analyserats. I en av dessa lokaler har två olika stabiliseringsmedel använts i både laboratorium och fält. Maximalt avstånd mellan provpelare och plats för upptagning av jord till laboriөprov, samt det längsta avståndet mellan pelargrupper inom samma sammanställning, är 133 meter.

Vid studier av diagrammen i bilaga 1.1 kan konstateras att uppnådda skjuvhållfastheter i provpelare längs sträckan Örebro – Slyte är högre än de hållfastheter som uppmätts i laboratorium, lika lång tid efter inblandning. Dock avviker punkten 8/434, se bilaga 1.1.2, där pelarna inte når upp till skjuvhållfastheten bestämd genom laboriөförsök. Detta kan förklaras av att dessa pelargrupper är de enda där bindemedelsmängden är mindre i fält än i laboratorium. Även i bilaga 1.1.4 är pelarna bitvis sämre stabiliserade än jordproverna på motsvarande djup. Möjligtvis kan de höga laboriөvärdena på 7–8 meters djup bero på hög ursprunglig hållfasthet i jorden. Pelarnas låga hållfasthet på motsvarande djup kan förklaras av att traditionella pelarsonder ofta styr ur.

I samtliga diagram för kalkcementstabiliserade pelare med undantag från de ovan nämnda, diagram 1.1.2 samt 1.1.4, är skjuvhållfastheten uppnådd i fält 50–100 % högre än den som är bestämd på prover stabiliserade i laboratorium.

Att det i bilaga 1.1.7 är en stor skillnad mellan laboriөvärdet och fältvärdet i den översta delen av profilen, kan bero på att laboriөstabiliseringen är utförd på torrskorpelera som förmodligen aldrig stabiliserats i fält.

De flesta diagrammen i detta projekt visar på ett samband mellan jordens ursprungliga korrigerade skjuvhållfasthet och stabiliseringens resultat, speciellt i laboratorium men även i fält. Vidare så märks en tydlig förbättring i pelarnas hållfasthet i den siltskiktade jorden. Dock kan inga slutsatser dras huruvida den sulfidhaltiga leran har en reducerande effekt på stabiliseringen i jämförelse med ren lera, vilket ofta förs fram i litteraturen. Sensitiviteten har inget entydigt samband med hållfastheten, varken i fält eller laboratorium.

I en punkt, se bilagorna 1.1.4 och 1.1.5, har laboriөprover samt provpelare utförts med två olika bindemedel. En kalk- och cementblandning (50/50) samt bindemedlet lohamix har undersökts. I de laboriөstabiliserade proverna uppvisar lohamix en stabiliseringseffekt som är upp till sex gånger större än kalkcementinblandningarna. I fält däremot, är resultatet det motsatta. Pelare med lohamix ger i detta fall inte lika höga hållfastheter som de stabili-

serade med kalk och cement. Observera att skalorna är olika i de två skjuvhållfasthetsdiagrammen.

E18/E20, Slyte – Gräsnäs

Här har provpelare och laboratorieförsök jämförts i tre olika punkter. Pelarna återfinns 0-540 m från den plats där jord tagits för laboratorieinblandningarna och spannet för pelargrupper i samma sammanställning är maximalt 660 m.

Två av de tre sammanställningarna i bilaga 1.2 uppvisar en god överensstämmelse i skjuvhållfasthet mellan laboriestabiliserad jord och pelare i fält. I diagrammet i bilaga 1.2.2 är dock pelarna ca 1,7 gånger starkare än laborieproverna. En eventuell förklaring är att provpelarna ligger nära ett parti av morän som går i dagen och eftersom laborieinblandningen är utförd på jord från sedimentbassängens mitt kan jordarnas egenskaper variera. I motsats till de två andra provpelarområdena har dessa pelare ej placerats i ett för sedimentbassängen representativt läge.

En trend tyder på minskad skjuvhållfasthet i pelarnas nedre delar, vilket i två diagram leder till att fältvärdet understiger laborievärdet. Detta kan, som tidigare diskuterats, bero på att sonden sparat ur pelarna och värdena återspeglar sannolikt inte pelarnas hållfasthetsegenskaper.

Variationen i skjuvhållfasthet med djupet, för såväl laborievärden som fältvärden, är mycket överensstämmande. Detta gäller för samtliga sammanställningar för projektet E18/E20 på sträckan Slyte - Gräsnäs. Genomgående i detta projekt är mängden stabiliseringsmedel högre i laborieinblandningarna än i provpelarna. Trots detta har pelarna generellt sett uppnått en högre hållfasthet än de laboriestabiliserade proverna vid lika lång tid efter inblandning, dock är skillnaderna små.

En högsensitiv lera bör underlätta inblandningsarbetet och ge en homogen stabiliserad jord. Om stabiliseringsmedlet trots allt inte fördelats i hela jordvolymen, har den högsensitiva leran med stor sannolikhet en partivis väldigt låg hållfasthet. Detta kan möjligen vara orsaken till att pelarna i bilaga 1.2.1 och 1.2.3, har en minskad hållfasthet på det djup som den ostabiliserade leran har en hög sensitivitet. Att detta även stämmer för de laboriestabiliserade jordproverna är dock oväntat eftersom jorden i laboratorium är väl homogeniserad och inblandningsarbetet är stort.

E18, Arboga – Köping

I detta projekt utfördes kontrollen på produktionspelare. Pelargruppernas lokalisering är identifierad med en delsträcka och deras inbördes placering är inte känd. Längden på sträckorna varierar mellan 200 och 700 meter och är till antalet tre med tillhörande

laboratorieinblandningar från fyra olika jordprofiler. Pelargrupperna är sonderade under två olika tidsintervall. Det här har resulterat i åtta sammanställningar som presenteras i bilaga 1.3.

Underlaget med laboriestabiliserad jord är något bristfälligt. Det finns oftast endast en inblandning per pelarområde, utförd på jordmaterial från den övre eller mellersta delen i jordprofilen. I en av inblandningarna har jordmaterial från sju meters djup i punkten 2/440 blandats med jord från djupen sex, sju samt tio meter i punkten 11/480. I dessa två punkter har jorden liknande ursprungsegenskaper, så resultatet borde vara representativt för dem båda. De skjuvhållfastheter som uppnåts är mycket höga jämfört med resterande laborievärden. Det är dock svårt att avgöra om detta är den hållfasthet som råder eller om värdet är missvisande på grund av sammanblandningen mellan de två jordarna. Dessa värden är de enda som överstiger de hållfastheter som uppnåts i fält. Vid övriga lokaler är samtliga skjuvhållfastheter uppnådda i fält mellan 1,1–4,2 gånger större än laborievärdena vid samma tid efter inblandning. Vid jämförelse av uppnådda hållfastheter i fält kan noteras att hållfasthetsökningen avtar med tiden. Samtliga sonderingar har skett minst 25 dygn efter tillverkningen och ingen betydande ökning i hållfasthet verkar ha skett efter det.

Som tidigare diskuterats kan en högsensitiv lera orsaka låg skjuvhållfasthet i pelaren om spridningen av bindemedlet i jordvolymen inte är tillräcklig. Även i detta projekt kan denna tendens utläsas. Laborievärdena visar som väntat en svag ökning av hållfastheten vid ökad sensitivitet.

En reflektion som gjorts vid studier av laborieresultatena, är att det vid ett tillfälle blandats jord från totalt sex meters djup i ett och samma prov. Detta prov innehåller såväl lera som sulfidhaltig lera och kan därför inte entydigt spegla någon av jordarternas egenskaper efter stabilisering.

Anmärkningsvärt är även att jordens ursprungliga egenskaper varierar inom en och samma delsträcka. Ett exempel på detta är vattenkvoten och flytgränsen samt sensitiviteten och jordarten för prover tagna i punkterna 2/440 och 2/720, se bilaga 1.3.1 till 1.3.4, som båda skall representera den första delsträckan. Eftersom de kontrollerade pelarna är produktionspelare som endast indelats i delsträckor, så har samma pelarsammanställning på denna delsträcka jämförts med laborieinblandningar på dessa två olika jordar.

Vidare så bör det påpekas att det i punkten 11/480 inte utförts några laborieundersökningar på de översta fem metrarna av jorden, trots att pelare installerats i dessa jordar. Även i punkt 6/400 har lera stabiliserats utan föreliggande laboriestabilisering. En trolig orsak till de bristfälliga laborieundersökningarna kan vara att respektive jordtyp antas ha likvärdiga egenskaper längs hela den nio kilometer långa sträckan som studien omfattar. Utifrån det underlag som bearbetats verkar detta antagande stämma förutom för större djup då det enda laborieförsöket är utfört på en högsensitiv lera som inte speglar övriga lerors sensitivitet. Detta visar på vikten av noggrant utförda förundersökningar med erforderligt

antal sonderingar och jordprovsanalyser för att ge en korrekt bild av de aktuella jordarnas egenskaper.

E20, Eskilstuna – Arphus

Här har produktionspelare och laboratieförsök jämförts i fyra olika punkter. Pelarna återfinns 0-110 m från laboratorieinblandningarna och spannet för pelargrupper i samma pelarsammanställning är maximalt 50 m.

I samtliga fyra lokaler som presenteras i bilaga 1.4, är den uppnådda skjuvhållfastheten i fält någorlunda överensstämmande med den laboratoriebestämda hållfastheten. I slutet av sträckningen, vid punkt 12/060 och 14/920, överensstämmer de uppnådda skjuvhållfastheterna mycket bra med varandra. Pelarnas hållfasthet i punkten 7/520 är ca 1,6 gånger starkare, medan resultatet i punkt 5/380 visar att pelarna inte uppnått den skjuvhållfasthet som bestämts i laboratorium. För den sistnämnda punkten bör det dock påpekas att laborativärdena är något osäkra. På djupet 4–6 meter har hållfastheten sjunkit med nästan 50 kPa mellan provtryckning vid 30 respektive 61 dygn. Om fältvärdet, bestämt efter 30–36 dygn, jämförs med värdet som uppnåddes vid provtryckningen efter 61 dygn så fås betydligt bättre överensstämmelse.

Laboratorieunderlaget är knapphändigt då det endast utförts en laboratorieinblandning i varje punkt, förutom i punkt 5/380. I det underlag som funnits tillgängligt saknas uppgifter om jordens egenskaper före och efter inblandning på stora djup, vilket gör att det är svårt att dra slutsatser om skillnader och/eller överensstämmelser.

Sulfidhaltig lera finns i två av punkterna i de övre delarna av jordprofilerna. Vid studier av laboratorieresultaten kan utläsas att det för dessa prover uppnått sämre resultat än för leran vid samma inblandningsmängd. En av inblandningarna har gjorts med bindemedelsmängden 102 kg/m^3 istället för 81 kg/m^3 vilket har resulterat i ökad hållfasthet. Detta visar på att sulfidhaltig lera kan uppnå samma skjuvhållfastheter som lera genom ökad mängd bindemedel.

I den punkt där inblandningsförsök finns på olika djup kan man se en god överensstämmelse mellan den laboratorie- och fältbestämda skjuvhållfasthetens variation med djupet.

Svealandsbanan

Underlaget som bearbetats i detta projekt har hämtats från en funktionsuppföljning. I projektet har pelare från två lokaler studerats. Anledningen till att åtta diagramsammanställningar har tagits fram är att pelarna sonderats med två olika metoder samt att de är provade vid två olika tidsintervall. Samtliga pelarsonderingar kan jämföras mot laborativärden från samma lokal. I bilagorna 1.5.1 till 1.5.4 redovisas pelare sonderade 30 meter från laboratieförsöket och i

de fyra resterande sammanställningarna, 1.5.5 till 1.5.8, återfinns pelarsonderingar utförda 170 meter från laboratorieprovet.

Genomgående har lägre resultat uppnåtts i fält än för laboratorieprover, dock är hållfastheterna av samma storleksordning. Vid framtagning av ett medelvärde på skjuvhållfastheten längs hela jordprofilen har vid KPS erhållits ett hållfasthetsvärde i pelarna som är ungefär hälften så stort som den laboratoriebestämda. Vid samma förfarande för FOPS fås förhållandet ett. Dock kan inte detta ses som tillfredsställande eftersom dåliga resultat i vissa lager uppvägs av bra resultat i andra. Pelarna visar generellt en ökad hållfasthet med tiden.

Laboratorieresultatet visar att den sulfidhaltiga lera har klart lägst stabiliseringseffekt. Ovanliggande gyttja och underliggande lera uppnår båda en högre hållfasthet efter stabilisering. Den minskade hållfastheten i sulfidlagret återspeglas ej i pelarna.

Jordprovsanalysen och laboratorieinblandningen i bilaga 1.5.5 till 1.5.8, är utförda på jordar tagna 200 meter ifrån varandra. Jordprofilen i sektion 46/380 saknar den sulfidhaltig lera som finns i inblandningsprovet, och därför ges en missvisande bild vid jämförelser mellan fält- och laboratoriebestämd hållfasthet på djupet 6–7 meter.

Vid jämförelse mellan sonderingsresultat från KPS respektive FOPS, märks en högre erhållen skjuvhållfasthet hos pelare sonderade med FOPS. Förhållandet FOPS/KPS som bestämts i denna undersökning är 2,1. I tidigare studier av Svealandsbanan har konstaterats att samma förhållande är 1,7 respektive 2,0, Axelsson och Larsson (1994) respektive Rogbeck (1999). Det troliga skälet till skillnaden mellan metoderna är att det vid FOPS läcker ut bindemedel längs vajern och det bildas en hård pelarkärna.

Pelarna i detta projekt är inom en och samma grupp 5, 10 respektive 15 meter långa. I några sammanställningar har skillnaden i längd gett upphov till svängningar i hållfasthet på dessa djup, vilket har diskuterats i avsnitt 4.3.

Västra Stambanan, Katrineholms bangård

I detta projekt, som återfinns i bilaga 1.6, har en lokal studerats. Pelarna i lokalen har sonderats vid tre olika tillfällen och är belägna längs en sträcka på 53 meter. De pelare som är längst bort från den plats där prover stabiliserats i laboratorium ligger på 63 meters avstånd. Pelarna i detta projekt har diametern 800 mm.

I toppen av denna jordprofil finns torv som det inte gjorts några laboratorieinblandningar på. Om denna torv sedan stabiliserats eller om den bytts ut mot ett annat material är svårt att avgöra. Har den stabiliserats i fält är det anmärkningsbart att den inte provstabiliserats i laboratorium då kalk och cement, enligt forskningsresultat, inte är den bästa bindemedelskombinationen för torv. I lagren med lera och siltskiktad lera har en laboratorieinblandning utförts. Denna resulterade i en skjuvhållfasthet som var ca 1,7 gånger större än den som sedan

uppnåddes i fält vid samma tid efter inblandning. Pelarsonderingen avslutades när den nått sandskiktet på 6,5–8,5 meters djup. Sand är tillräckligt hållfast i sig och behöver inte stabiliseras, vilket leder till att laboratorievärden på detta djup inte studerats ytterligare.

Variationen i skjuvhållfasthet genom jordprofilen för fält respektive laboratorieframtagna värden är mycket överensstämmande.

Det dåliga resultatet på skjuvhållfasthet som uppnåddes i fält ledde till att en bredare sond med större area provades. Sonderingarna skedde efter 55 respektive 75 dygn och gav ett klart bättre resultat. Denna ytterligare sondering hade dock inte varit nödvändig att utföra om skjuvhållfastheten efter 34 dygn utvärderats med sondens verkliga area istället för faktorn 10. När den verkliga arean används uppnås de antagna dimensionerade hållfastheterna på 70 kPa ned till 3 meters djup och för större djup 100 kPa, även för pelare sonderade efter 34 dygn. Se kurva för verklig sondarea i bilaga 1.6.

Väg 841, Kallhäll – Kungsängen

Studien av detta projekt innefattar en lokal, se bilaga 1.7. Två sammanställningar har upprättats då pelarna i området är sonderade vid två olika tillfällen. Pelarna ligger som längst 105 meter ifrån den plats där prover tagits för jordprovsanalys och inblandningsförsök. Pelarområdets utsträckning är 105 meter.

Pelarna är korta och laboratorieunderlaget är mycket begränsat. De resultat som uppnåtts i fält respektive laboratorium har en god överensstämmelse vid samma tid efter inblandning. Efter 10–14 dygn uppmättes i pelarna en skjuvhållfasthet som var 1,5 gånger större än laborativärdet och efter 41 dygn överensstämmer värdena mycket bra. Skjuvhållfasthetens variation med djupet i fält går inte att jämföra med laboratorieresultat på grund av bristande underlag från laboratorium.

Samtliga pelarsonderingar som studerats avslutas vid ett djup av fem till sex meter vilket gör att försämringen av skjuvhållfastheten vid 3,5 meter måste bero på något annat än olika pelarlängder som nämnts tidigare. Eftersom det för underliggande lager inte utförts laboratorieinblandningar, kan en förändring av jordtyp ha passerat obemärkt förbi.

Mälarbanan, Kungsängen – Tibble

I detta projekt har ett litet område med fem pelargrupper och närbelägna laboratieförsök studerats. Uppdelningen i de två diagramsammanställningarna i bilaga 1.8 baseras på mängden bindemedel i både pelare och laboratieprover.

Pelarna med 100 kg/m³, bilaga 1.8.1, är provade vid tre olika åldrar och inte i något av fallen uppnås lika hög hållfasthet i fält som det görs i laboriestabiliserade prover. Underlaget för

pelarsonderingarna är något tunt, vilket kan vara orsaken till det tvivelaktiga resultatet att pelare vid åldern 70 dygn uppvisar en lägre hållfasthet än de provade efter 35 dygn.

Vid den större inblandningsmängden stabiliseringsmedel har pelare efter 21 dygn uppnått en hållfasthet motsvarande den i laboratorium vid samma tid efter inblandning, men variationen med djupet är stor. Den senare sonderingen, efter 70 dygn, tyder på att hållfasthetsutvecklingen i fält är långsammare än den i laboratorium, eftersom dessa pelare ej uppnått lika hög skjuvhållfasthet som de laboratoriestabiliserade proverna.

En jämförelse mellan de båda diagramsammanställningarna visar att ökad mängd stabiliseringsmedel i pelare ger högre hållfasthet. Gemensamt för pelarna i båda sammanställningarna är att samtliga sonderingskurvor uppvisar liknande mönster, där pelarna har en svaghetszon ca 3–5 meter under markytan. Jorden i detta parti har en högre sensitivitet samt en lägre vattenkvot och konflytgräns än ovan- och underliggande jord. Den gytjiga leran ovanför ger följaktligen hållfastare pelare.

Pelarna är av dimensionen 800 mm och vid sondering efter 21 dygn har en sond med vingstorleken $400 \times 20 \text{ mm}^2$ använts. Med denna sond blir endast en liten del av pelaren kontrollerad och resultatet oftast inte ett representativt värde för hela pelartvärsnittet. Vid de övriga sonderingstillfällena har sonddimensionen $600 \times 15 \text{ mm}^2$ använts, vilket rekommenderas i SGF Rapport 4:95, Carlsten och Ekström (1995), för pelare av denna storlek. Även om skjuvhållfastheten för pelare med den lägre inblandningsmängden beräknas med hjälp av sondens verkliga area så når den aldrig den hållfasthet som uppnåtts i laboratorium, se bilaga 1.8.1.

Mälarbanan, Grillby – Enköping

I bilaga 1.9 redovisas en sammanställning med laboratorieinblandningar och tre pelargrupper från Mälarbanan, delsträckan Grillby - Enköping. Pelarna är belägna längs en sträcka på ca 70 meter i vardera riktning från laboratorieinblandningen.

Laboratorieinblandningarna är väl samlade mellan 55–65 kPa på 2,5–4,5 meters djup och kring 60–80 kPa på 5,5–8,5 meters djup. Den låga spridningen visar på en långsam hållfasthetsutveckling. Pelarna har 2-3 gånger högre skjuvhållfasthet än laborativärdet, men har i motsats till laborativärderna, lägre hållfasthet på det djupare intervallet. På större djup, där det ej finns några laboratorieinblandningar, ökar åter pelarnas hållfasthet. På samma djup som pelarna har det svaga partiet kan man se en högre sensitivitet i den ostabiliserade leran.

4.4.2 Västkusten

Eka Nobel

I detta projekt, som presenteras i bilaga 2.1, finns tre provytor. I två av provytorna finns rena kalkpelare med två olika inblandningsmängder och på den sista provytan finns kalkcementpelare, även dessa med olika inblandningsmängder. Två av provytorna, en med kalkpelare samt den med kalkcementpelare, har kontrollerats vid två olika tillfällen.

Ner till 11 meters djup överensstämmer skjuvhållfastheten i laboratorium med den som uppmätts i fält ofta mycket bra, men i några fall är pelarna upp till 1,7 gånger starkare. På större djup har, för provyta 2 och 3, mycket höga laborativärden på skjuvhållfastheten uppnåtts. Pelarnas hållfasthet i dessa två provytor ökar normalt med djupet, trots det får aldrig pelarna lika hög hållfasthet som laborativproverna. Eftersom man enligt SGF Rapport 4:95, Carlsten och Ekström (1995), endast får tillgodoräkna sig skjuvhållfastheter på maximalt 150 kPa per pelare, så har samtliga pelare i detta projekt uppnått en tillfredsställande hållfasthet, efter ca 100 dygn.

Både skjuvhållfasthetskurvor från fält och laboratorium varierar på liknande sätt med djupet. Hållfastheten ökar som bekant med tiden och denna hållfasthetsökning är ungefär lika stor i fält som i laboratorium. I vissa fall har pelarnas hållfasthet utvecklats i en snabbare takt, vilket kan bero på att temperaturökningen kvarstår under längre tid i fält och den höga temperaturen främjar kalkens puzzolaneffekter. Det bör nämnas att tidpunkterna för pelarsonderingar i detta projekt är något osäkra, men att de skett i två omgångar och att de inte är sonderade senare än angivet antal dygn är säkert. Vid en jämförelse av mängden stabiliseringsmedel, kan endast små förbättringar vid ökade mängder noteras vid rena kalkpelare. Kalkcementpelarna uppvisar däremot en markant ökning i hållfasthet vid ökade mängder stabiliseringsmedel.

Kalkcementblandningen gav generellt högre skjuvhållfasthet i både fält och laboratorium. Att kalk sedan användes som stabiliseringsmedel vid installering av produktionspelarna berodde på att den ger bättre vidhäftning och därmed bättre samverkan med den ostabiliserade leran och laborativstabiliseringarna och provpelarna visade på en tillräcklig hållfasthet.

E6/E20, Åbromotet

I bilaga 2.2 återfinns de två delprojekt av Åbromotet som ingår i denna studie. Totalt har tre lokaler studerats. För varje lokal har resultat från laborativinblandningar jämförts med ett antal produktionspelare. Jord till jordprovsanalys och inblandningsförsök är tagna i samma punkt.

Pelarna är mycket starkare än de stabiliserade jordprover som tryckts i laboratorium, vilket är vanligt i västsvenska leror. Genomgående för detta projekt verkar gyllig lera med sina höga vattenkvoter ge högre skjuvhållfastheter än leran i området. Pelarna som kontrollerats i del 7,

se bilaga 2.2.3, har inte uppnått lika höga hållfastheter i fält trots att bindemedelsmängden är högre än för de två andra lokalerna. Detta beror mycket sannolikt på att dessa pelare, till skillnad från de andra, sonderats med KPS och som tidigare diskuterats ger dessa ett betydligt lägre resultat på skjuvhållfastheten än FOPS. Om alla pelare i projektet hade sonderats med FOPS så hade skjuvhållfastheten genom samtliga pelarlängder troligen överstigit värdet 150 kPa. Vilket av dessa två värden som ligger närmast den verkliga skjuvhållfastheten för den stabiliserade jorden råder det tveksamheter om.

De flesta pelare som sammanställts är sonderade 8–10 dygn efter tillverkning. I bilaga 2.2.1 finns även pelare sonderade efter 28 dagar redovisade, och ur denna sammanställning kan utläsas att hållfasthetstillväxten efter åtta dygn är liten.

Västkustbanan, Tångaberg – Varberg

Det studerade materialet omfattar 3 stycken provpunkter. Pelarna har kontrollerats med såväl OKPS som KPS. Längsta avståndet mellan laboriestedstabiliserat prov och pelare är 220 meter och det längsta avståndet inom en och samma pelarsammanställning är 130 meter.

Gemensamt för samtliga resultat är att skjuvhållfastheten är högre i fält än i laboratorium. Detta gäller för pelare sonderade med såväl KPS som OKPS, dock ger OKPS högre värden på hållfastheten. Anmärkningsvärt är även att de höga hållfastheterna uppnåtts efter så kort tid som en vecka.

En trolig anledning till att KPS-kurvan i bilaga 2.3.1 är förskjuten i jämförelse med OKPS-kurvan är att markytans höjd varierar inom området och eftersom sammanställningarna i denna rapport baseras på djupangivelser så kan nivåerna variera. OKPS-kurvan, i bilaga 2.3.3 följer laboriestedvärdenas variation med djupet väl medan KPS för samma punkt, se bilaga 2.3.4, förmodligen har gått ur pelaren. Eftersom de tre provpunkterna ligger i olika sedimentbassänger med mycket varierande jordprofiler, görs ingen jämförelse baserad på jordtyper.

Västkustbanan, Ledsgård

Det material som denna sammanställning baserats på är mycket begränsat. Endast en lokal har studerats där jordprov och inblandningsförsök är utförda på jordar från samma punkt och pelarna är installerade endast ca 10 meter därifrån. Bindemedelsmängden är 150 kg/m³.

Detta projekt skiljer sig väsentligt från resterande projekt i denna studie som utförts på Västkusten, eftersom stabiliseringen utförts i en gyttja med en vattenkvot på 180–200 % samt att konflytgränsen är högre än vattenkvoten längs hela jordprofilen. Skjuvhållfastheten, som uppmätts med KPS, når aldrig upp till laboriestedvärdena vid samma tid efter inblandning. De värden på skjuvhållfastheten som uppnåtts när en pelare kontrollerats med FOPS uppnår, och överstiger i viss mån, de värden som erhöletts vid laboriestedkontroll. En anledning till att

pelarna aldrig uppnår de skjuvhållfastheter som erhållits vid laboratorieinblandning kan vara att det i gytta krävs ett omsorgsfullt blandningsarbete för att nå goda resultat vid stabilisering. Vidare kan det vara så att bygelverktygets utformning inte lämpar sig för att blanda gytta och bindemedel. Oberoende av vilken sonderingsmetod som använts har pelarna trots allt uppnått hållfastheter på över 150 kPa endast 5–14 dagar efter tillverkning.

4.5 Utvärdering och diskussion kring övriga diagram

Underlaget som är framtaget i detta arbete går att utnyttja på många olika sätt. I bilaga 3 visas prov på ett antal diagram som kan framställas med hjälp av detta underlag. Nedan följer en kort diskussion kring dessa.

Konförsök och enaxiella tryckförsök

I ett antal projekt har skjuvhållfastheten för laboriestabiliserade prover kontrollerats med både konförsök och enaxiella tryckförsök. I diagrammet i bilaga 3.1 redovisas resultaten från de två olika provningsmetoderna. Vid studie av resultaten i diagrammet kan konstateras att konförsök i samtliga fall ger högre värden än enaxiella tryckförsök. Trendlinjerna tyder på att ökad ålder, och därmed ökad hållfasthet, ökar avvikelsen mellan resultaten från konförsöken och de enaxiella tryckförsöken. Sammanfattningsvis kan konstateras att konförsöken ger drygt två gånger så höga skjuvhållfasthetsvärden. Som diskuterats i avsnitt 3.6 kan avvikelsen bero på tvivelaktigt använda utvärderingsprinciper eller så kan avvikelsen bero av provstorleken.

Vattenkvot och densitet före och efter inblandning av stabiliseringsmedel

Förändringen i vattenkvot och densitet efter inblandning av stabiliseringsmedel i laboratorium visas i bilaga 3.2. Såväl vattenkvotsdiagrammen som densitetsdiagrammen är indelade efter inblandningsmängd. Efter inblandning minskar som väntat vattenkvoten och densiteten ökar. Man kan även utläsa att en högre initial vattenkvot ger en procentuellt större minskning av vattenkvoten efter stabilisering. Densiteten ökar endast marginellt efter inblandning av stabiliseringsmedel och behöver ej beaktas i någon större utsträckning.

Vattenkvotens minskning med tiden

Vid tillsättning av stabiliseringsmedel i lera minskar vattenkvoten. Vattenkvotens minskning med tiden för kalkcementstabiliserade prover presenteras i bilaga 3.3. Där kan man se att den största reduceringen av vattenkvoten sker momentant efter inblandningen, det vill säga innan det första provtillfället. Därefter stagnerar minskningen och vattenkvoten förblir i princip konstant. Underlaget har delats upp utifrån olika stabiliseringsmängder, prover med 80–104 respektive 105–125 kg/m³. Det finns en viss antydning till att vattenkvoten minskar i större omfattning i gruppen med högre inblandningsmängd. I enstaka fall ökar vattenkvoten med

tiden vid de sista provtillfällena, detta beror troligtvis på mätnoggrannheten, eftersom inget vatten tillsätts under reaktionsprocessen.

Stabiliseringseffekt

Stabiliseringseffekt innebär att den stabiliserade jordens skjuvhållfasthet divideras med den ostabiliserade jordens korrigerade skjuvhållfasthet. I bilaga 3.4 är stabiliseringseffekten för olika jordarter, proportioner stabiliseringsmängder samt geografiska lägen plottade mot tiden. Punkterna på linjerna i diagrammen har olika symboler beroende på jordens ursprungliga vattenkvot. När diagrammen studeras kan man konstatera att stabiliseringseffekten för lera är högre än för sulfidhaltig lera. För resterande jordarter är det svårt att dra slutsatser om skillnader i stabiliseringseffekt då underlaget är alltför knapphändigt. Man kan även utläsa att stabiliseringseffekten ökar med tiden, och att den största ökningen i hållfasthet sker före första provtillfället i laboratorium. Om resultaten från Västkusten jämförs med de resultat som framkommit i Mälardalen så märks ingen större skillnad i stabiliseringseffekt. Detta oväntade resultat beror dock troligen på att det i de västkustprojekt som har nog stort resultatunderlag för att jämföras, endast stabiliserats med kalk. Fler diagram av samma karaktär återfinns i SGI Rapport no 48, Åhnberg et al. (1995).

Rotations- och stigningshastighet

I ett antal av de studerade projekten har stigningshastigheten och/eller rotationshastigheten varierats. I bilaga 3.5 finns några exempel på resultat som uppnåtts. Två sammanställningar av pelare utförda i Mälardalen redovisas, en för lera och en för sulfidhaltig lera och resterande förutsättningar är de samma. Båda dessa sammanställningar visar på att en lägre stignings- och rotationshastighet ger något högre hållfastheter. De enskilda faktorernas inverkan på resultatet är svårtolkat på grund av kombinationsvalet.

Sammanställningarna som tagits fram utifrån västkustprojekt visar de enskilda faktorernas inverkan något tydligare än de i Mälardalen. Det ena visar att skjuvhållfastheten ökar med minskad stigningshastighet. Detta diagram visar även att hållfastheten ökar med minskad rotationshastighet vid låg stigningshastighet. Vid hög stigningshastighet verkar däremot inte ändring i rotationshastighet ge någon märkbar skillnad på resultatet. Det andra diagrammet visar däremot att skillnaden i rotationshastighet inte har någon betydande inverkan. Detta kan dock vara en indikation på att rotationshastighetens betydelse varierar mellan olika jordarter.

4.6 Slutsatser

Att en lera har hög sensitivitet bör underlätta inblandningsarbetet och bidra till att den stabiliserade pelarkroppen får en mer homogen struktur. I flera projekt har dock en minskad hållfasthet observerats i partier med högsensitiv lera. Detta kan vara ett tecken på en för låg blandningsgrad vid pelartillverkningen. I leror med hög sensitivitet är det av största vikt att

stabiliseringsmedlet blir väl fördelat i pelarvolymen, eftersom en högsensitiv lera som störts har mycket låg hållfasthet i ostabiliserat tillstånd.

Samband finns mellan den ursprungliga jordens skjuvhållfasthet och den hållfasthet som uppnås efter pelarstabilisering. Ett exempel på detta är resultaten från projektet Eskilstuna - Arphus, där ett samband mellan pelarnas och jordens ursprungliga skjuvhållfasthet kan iakttas. I viss mån kan detta samband även speglas i resultaten från de laboratorieinblandade proverna.

Tillgång till vatten är en förutsättning för att kalk och cement skall kunna härda och bilda ett hållfast material tillsammans med jorden. En för låg vattenkvot kan leda till att bindemedlet inte har möjlighet att verka i önskad grad. Normalt så är de jordar som har låga vattenkvoter så pass hållfasta i sig att de inte behöver stabiliseras med kalkcementpelare. Alltför höga vattenkvoter innebär att jordmaterialen är väldigt lösa och svårstabiliserade, likt de rådande förhållandena i Ledsgårdsprojektet. I Ledsgård har gyttnings vattenkvoter på 180–200 %, men kan även den stabiliseras om tillräckligt stora mängder bindemedel tillsätts. I resterande av de studerade projekten återfinns ingen jord där vattenkvoten överstigit 120 %. Upp till denna vattenkvot finns inga tecken på att hög vattenkvot skulle innebära sämre stabiliserad pelare.

Olika jordarters egenskaper har stor effekt på stabiliseringsresultatet. Till exempel anses sulfidlera som en svårstabiliserad jordart. I denna studie har sulfidhaltig lera funnits i ett flertal projekt. I vissa projekt kan utläsas att laboratorieprover med sulfidhaltig lera uppnått sämre resultat vid stabilisering än lera vid samma inblandningsmängd. Denna skillnad kan utjämnas om mängden bindemedel ökas i prover med sulfidhaltig lera, se projekt E20. En annan observation som gjorts vid studier av sulfidhaltiga skikt är att man i laboratorium inte uppnått lika hög stabiliseringseffekt som i fält. Silt anses ge höga hållfastheter vid stabilisering, detta märks vid pelare installerade i lera med siltskikt, se projektet E18/E20 delen Örebro – Slyte. På Västkusten har gyttnings lera med sina höga vattenkvoter gett ungefär lika hög pelarhållfasthet som leror i samma område. I ren gyttnings däremot, har lägre hållfastheter uppnåtts i fält än i laboratorium. Detta kan bero på att materialet är starkt beroende av ett gediget blandningsarbete och eventuellt även på att bygglverktygets utformning inte lämpar sig för gyttnings jordar.

Likt tidigare undersökningar av bindemedelsmängdens betydelse för den uppnådda skjuvhållfastheten, kan även i denna studie observeras att ren kalk inte ger en märkbart ökad hållfasthet om bindemedelsmängden ökas. I projektet vid Eka Nobel har rena kalkpelare installerats och någon tydlig ökning av hållfastheten med ökad mängd stabiliseringsmedel märks varken i fält eller i laboratorium. Däremot observeras en tydlig ökning av hållfastheten vid ökad bindemedelshalt i de prover och pelare som stabiliserats med en blandning av kalk och cement.

För de projekt där verklig utmatad mängd bindemedel finns registrerad, kan konstateras att mälardalsprojekten mycket sällan avvikit anmärkningsvärt från projekterad mängd. På Västkusten är däremot den utmatade mängden oftast större än föreskriven mängd. Vidare så kan en svag tendens på mindre spridningar mellan sonderingsresultaten utläsas på Västkusten.

I flera fall har laboriestedabiliserade prover som kontrollerats vid en senare tidpunkt uppvisat en lägre hållfasthet än prover som kontrollerats vid en tidigare tidpunkt efter inblandning av stabiliseringsmedel. Detta kan bero på att proverna kan ha varierande struktur, trots att de kommer från samma stabiliseringsförsök. Till exempel kan sprickanvisningar i provet leda till att det går till brott i ett tidigt stadium.

För jordarna från Västkusten uppnås, för såväl kalk- som kalkcementinblandning, redan kort tid efter inblandning höga hållfastheter och utförda stabiliseringar ger nästan undantagslöst mycket tillfredställande resultat. I denna del av Sverige finns stora möjligheter att optimera metoden genom minskad mängd bindemedel och eventuell minskning i antal pelare. Optimering kan utföras genom interaktion mellan laborieundersökningar och verifiering i fält.

Det är av särskild vikt att noggranna förundersökningar och installation av provpelare utförs då nya typer av bindemedel skall användas. I bilaga 1.1 presenteras laborie- samt fältresultat i en lokal där både kalkcement och lohamix använts som stabiliseringsmedel och resultaten i laboratorium och fält blev det motsatta.

När sondarean minskas blir sonderingsmotståndet självfallet mindre. Då skjuvhållfastheten utvärderas som 10 gånger sonderingskraften, tas ingen hänsyn till den verkliga arean och samtliga uppnådda sonderingsmotstånd, oberoende av arean, utvärderas med samma faktor, baserad på arean $0,01 \text{ m}^2$. Om två likvärdiga pelare med samma antagna hållfasthet sonderas med två olika sonder, den ena med sondarean $0,008 \text{ m}^2$ och den andra med sondarean $0,01 \text{ m}^2$, uppnås ett sonderingsmotstånd på 12 respektive 15 kN. Vid utvärdering med faktorn 10 blir skjuvhållfastheterna 120 respektive 150 kPa. Om det istället tas hänsyn till sondens verkliga area blir resultatet likvärdigt i båda pelarna, det vill säga 150 kPa.

Sonderingskurvorna, som beskriver skjuvhållfastheten som en funktion av djupet, vid traditionell pelarsondering får ofta ett parabelliknande utseende, där hållfasthetsvärdena avtar med ökande djup efter att maxvärdet uppnåtts. Detta beror sannolikt på att sonden styrt ut ur pelarna. Anledningen till det med djupet långsamt minskande sonderingsmotståndet, är troligen att sonden gått ur pelaren med det ena vingbladet före det andra. Om så är fallet, speglar inte de låga värdena pelarens verkliga hållfasthet.

Tydliga skillnader mellan olika sonderingsmetoder har konstaterats. För projektet Svealandsbanan har i denna studie förhållandet i skjuvhållfasthet mellan FOPS och KPS bedömts till 2,1. Att resultaten mellan de två kontrollmetoderna skiljer markant, styrks ytterligare av de sammanställningar som tagits fram för Åbromotet.

5 Förslag till inriktning av undersökningar på laboratorium samt till program för provpelare

5.1 Förslag till inriktning av undersökningar på laboratorium

I tidigare utförda studier har resultat från laboriestedabilisering, på jord från samma område, jämförts mellan två olika laboratorier, Almqvist och Erikstats (1994). Resultatet var mycket varierande, den uppmätta hållfastheten var nästan fyra gånger större i det ena laboratoriet än i det andra. Skillnaderna i resultat mellan laboratorierna tros bero på olika förfaranden vid inblandning och provning. Det är givetvis önskvärt att olika laboratorier ska ge samma resultat vid inblandningsförsök på samma jordmaterial. För att uppnå detta kan en utförlig vägledning som alla skall följa vara nödvändig. Genom en standardisering av vägledningen på basis av den samlade kunskap som finns idag, kan målet att ge så jämna resultat som möjligt uppnås. En sådan standardisering borde inte hämma utarbetande av alternativa laboriestedoder då forskning, efter att vägledningen är upprättad, kan inriktas mot utveckling och förbättring.

Det har inte ingått i detta examensarbete att ta fram en mer omfattande vägledning för laboriestedabilisering av jord, än den som finns i SGF Rapport 4:95. För att göra det krävs det omfattande laboriestedförsök och en gedigen erfarenhet av laboriestedinblandning. Det som presenteras nedan är ett förslag på parametrar som bör föreskrivas och vad man kan tänka på vid framtagning av en standardisering.

- *Transport och förvaring av jordmaterial*

Jordmaterialet, som tas upp från det aktuella området, bör transporteras och förvaras så att dess egenskaper, som till exempel vattenkvot, inte förändras nämnvärt. Materialet bör transporteras och förvaras i slutna behållare som skyddar jorden från vattenavgång samt från att reagera med syre.

- *Uppdelning av jord för inblandning*

Jord från olika djup i profilen kan blandas i samma inblandningsförsök, men det är viktigt att de olika jordarna har samma egenskaper så att provet inte blir missvisande för jordprofilen. Sammanslagning och indelning av jord från profilen bör således baseras på jordlagrens egenskaper som vattenkvot, skjuvhållfasthet, jordart, innehåll av växtdelar etc. Vidare är det viktigt att jord till laboriestedabiliseringen tas upp från representativa punkter i området. Detta för att erhålla resultat från laboriestedabiliseringar på alla olika jordtyper som finns representerade. Viktigt är att finna den aktuella profilens svagaste lager som kräver störst stabiliseringseffekt.

- *Homogenisering*

Jordens struktur bryts ner genom homogenisering. Tiden för detta ska vara densamma på alla laboratorier. Det bör föreskrivas exakt tid för homogenisering samt vilken maskin

som skall användas. Vilken tid och maskin som ska nyttjas varierar med olika jordarter och volymer jord och skulle med fördel kunna presenteras i tabellform.

- *Stabiliseringsmedel*

Påverkande faktorer vid tillsättning av stabiliseringsmedel är bland annat noggrannheten vid uppvägning och hur medlet blandas i jorden. Båda dessa faktorer bör föreskrivas. Det vill säga att beslut borde tas om huruvida olika bindemedel ska blandas ihop innan tillsättning i jord eller inte. Vidare bör bestämmas om bindemedel ska blandas ner i jorden under omrörning eller om det ska tillsättas innan omblandningen startar. Förfarandet vid inblandning kan eventuellt varieras beroende på typ och mängd av stabiliseringsmedel. Vid inblandningsförsök skall ett antal olika kombinationer av mängder och proportioner bindemedel undersökas. Regler bör även upprättas för hur bindemedel ska förvaras.

- *Maskintyper*

Klara regler bör sättas upp för vilka maskiner och blandningsverktyg som ska användas vid olika kriterier, som till exempel jordart och volym jord. Valet av maskin finns redan idag relativt väl beskrivet i SGF Rapport 4:95. Även maskinens rotationshastighet bör föreskrivas.

- *Tid*

Hur lång tid provet bearbetas efter inblandning av stabiliseringsmedel påverkar blandningsgraden, det vill säga hur väl bindemedlet är fördelat i jordmaterialet. Enligt SGF Rapport 4:95 skall bindemedlet blandas med jorden under 5–6 minuter till en homogen blandning.

- *Packningsarbete*

Efter att jorden stabiliserats packas den i provtuber. Viktigast för även denna parameter är att förfarandet är detsamma för samtliga laboratorium. Hur packningsarbetet utförs har stor inverkan på densiteten, ju mer jorden packas desto högre densitet uppnås och troligen även högre hållfasthet. Den stabiliserade jorden packas normalt i fem lager i en provtub och packningen sker för hand alternativt med hjälp av ett statiskt tryck på 100 kPa. Ett och samma packningsförfarande passar inte alla typer av jordar, vilket gör att packningsförfarandet kan variera med jordart.

- *Förvaring*

Provtuberna lagras innan de uppnår avsedd ålder för provning. Förhållandena under förvaringen bör efterlikna de i fält, till exempel temperaturen. Vid rena kalkpelare blir marktemperaturen förhållandevis mycket högre än vid cement- samt kalkcementpelare. Därav följer att kalkstabiliserade prover i laboratorium, bör förvaras i högre temperatur än prover stabiliserade med cement eller kalkcement. Temperaturen i fält avtar med tiden efter inblandning och denna temperaturminskning skall även efterliknas i laboratorium. Ytterligare en faktor som under förvaringen skiljer sig från fält, är spänningsför-

hållandena. Den stabiliserade jorden i pelare utsätts för ett vertikalt tryck från ovanliggande stabiliserad jordmassa. Detta kan efterliknas i laboratorium genom att förvara provtuberna under en belastning, motsvarande den tyngd som provet utsatts för om det hade befunnit sig på samma djup som jordprovet tagits från.

- *Förberedelser innan provning*

Innan jordproverna trycks måste provhylsorna avlägsnas och provet skäras till rätt storlek. Det bör göras på ett sätt som inte skadar provet genom till exempel hopprensning och sprickbildningar.

- *Skjuvhållfasthetskontroll samt tolkning av brottyper*

Stabiliserade provers skjuvhållfasthet bestäms idag med enaxiella tryckförsök eller konförsök. Som diskuterats i avsnitt 3.6 är det enaxiella tryckförsöket att föredra. I samma avsnitt diskuteras även olika brottyperns utseende. Det är inte alltid det sker ett rent skjuvbrott i provet och då kan tidpunkten för brott i många fall bli en bedömningsfråga. Det borde därför finnas en handledning för bedömning av olika brottbilder, så att variationen mellan olika bedömningar minskas.

- *Ålder vid provning*

De stabiliserade jordprovernas skjuvhållfasthet kontrolleras vid olika åldrar. Normalt utförs tester vid två till fyra olika tidpunkter efter inblandning för att klargöra hållfasthetsutvecklingen. Hållfastheten som uppmäts i laboratorium används idag vid dimensionering av pelare och jämförs även mot den uppnådda hållfastheten i provpelare. För att laboratorieprovets hållfasthet skall vara jämförbart mot pelares hållfasthet, bör både laboratorietest och pelarsondering ske inom samma tidsförlopp efter inblandning av stabiliseringsmedlet. Vill man också ha möjlighet att jämföra uppnådda skjuvhållfastheter i olika jordar alternativt med olika bindemedel, bör det finnas en standard på vid vilken tid efter inblandning som provernas skjuvhållfasthet skall kontrolleras, till exempel 10, 30, 60 och 90 dygn efter inblandning.

- *Antal prover*

Eftersom den stabiliserade jorden ska provas vid olika åldrar måste flera prover tillverkas. Det kan även vara bra att ha ett antal extra prover om brottet vid det enaxiella tryckförsöket är svårtolkat. Alternativt kan ett större antal försök utföras vid varje provtillfälle och ett medelvärde beräknas för att få ett pålitligt värde på skjuvhållfastheten.

Olika jordarter uppträder på skilda sätt vid olika bearbetningar. Därför kan det vara viktigt att anvisningarna för många av ovan nämnda faktorer varierar utifrån jordarten. Till exempel tid för homogenisering och inblandning samt packningsarbete.

5.2 Förslag till program för provpelare

Som komplettering till de provinblandningar som utförts i laboratorium har, i en del större projekt, verifiering av dessa resultat utförts i fält genom så kallad förprovning. Dimensioneringen granskas således i verkliga användningsförhållanden och utifrån provpelarresultaten kan man ändra till exempel bindemedelshalt eller pelaravstånd. I den nya Vägledningen för kalk- och kalkcementpelare, som utkommit i december 2000, föreskrivs att förprovning bör användas i större omfattning, Carlsten (2000). I framtiden kommer de egenskaper som bestämts i fält genom förprovning i ett tidigt utförandeskede, att ligga till grund för dimensioneringen. Följande förslag till program för provpelare bygger på att förundersökningarna ger en rättvisande bild om hur områdets sedimentbassänger breder ut sig och hur jordlagerföljder varierar. Detta för att kunna genomföra en provpelarinstallation, som ger den utdelning som önskas av en sådan satsning i tid och pengar.

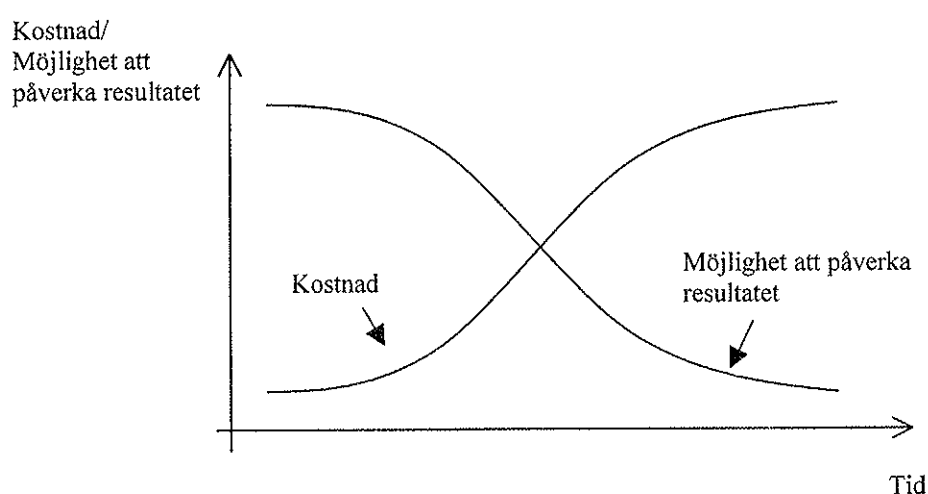
- Det är av stor vikt att de provpelare som installeras placeras så att man vid utvärdering av resultaten får ett representativt underlag att basera en produktionsbeskrivning på.
- Vid planering av provpelarinstallering är det viktigt att samtliga sedimentbassänger i det aktuella området förprovas. Minst 10 stycken provpelare bör installeras i varje bassäng för att det skall finnas möjlighet till sondering vid två olika tidpunkter. Önskvärt är att provpelarna placeras i grupp. Om stora jordartsvariationer finns inom samma bassäng bör det beaktas genom att ytterligare pelargrupper installeras för att samtliga jordarter skall täckas av förprovningen. Vid beslut att kontrollera fler än en kombination av bindemedelsmängd, proportioner, stignings- och rotationshastighet eller utförandesätt så skall samtliga av dessa kontrolleras med minst 10 provpelare var.
- Pelare, utförda med samma förutsättningar och förväntade egenskaper, skall tillverkas i en sådan omfattning att de kan kontrolleras vid två olika tidpunkter efter installation beroende på om utfallet vid det första testtillfället inte är tillfredställande. Lämpligen provas hälften av pelarna vid första tillfället. Val av tid för provtagning baseras på de resultat som uppnåtts vid laborietryckningen.
- Inom varje sedimentbassäng eftersträvas, i den mån det är genomförbart, att installationen av provpelare sker i nära anslutning till punkten där jord tagits för laboriестabilisering. Detta för att det skall finnas möjlighet till erfarenhetsåterföring. Det är dock viktigast att det finns laboriестinblandningar utförda för samtliga bassänger som stabiliseringen avser.
- Vid provpelarinstallation skall den/de mängder och proportioner bindemedel som representerar den/de mest lyckade stabiliseringarna i laboratorium kontrolleras i fält. Att installera två eller tre av de från laboratorium bästa kombinationerna förespråkas. Utöver detta är det möjligt för entreprenören att installera pelare med andra mängder och proportioner som man tror skulle kunna ge goda resultat. Om andra bindemedel än kalk

och cement används bör utfallet av stabiliseringen kontrolleras mycket utförligt i såväl laboratorium som fält.

- Provpelarinstitution är även tänkt att vara ett tillfälle för entreprenörerna att visa prov på alternativa utföranden, som skiljer sig från det som beskrivits i förfrågningsunderlaget, och resultaten av dessa. Som situationen är idag så finns dock risken att sidoförslag aldrig upprättas eftersom avvikande från förfrågningsunderlaget innebär att entreprenören måste överta funktionsansvaret, till samma ersättning. Detta behöver dock inte vara ett hinder om beställaren ger sitt godkännande till ett visst föreslaget utförande.
- Att samma maskin och inblandningsverktyg används vid såväl provpelarinstitution som senare i produktionen är ett måste då dessa faktorer, i dagens läge, ger ett stort utslag på resultatet av stabiliseringen. Resultaten från provpelartesterna är således maskin- och produktionsberoende. Det är viktigt att man tar fram en utförandebeskrivning för den valda metoden så att man senare för produktionspelarna verkligen använder samma metod.
- Att under provpelarinstitution variera stigning och rotation för att finna de, för den aktuella jorden, bästa värdena på dessa faktorer rekommenderas. Dock skall detta endast utföras om projektbudgeten tillåter att ett så stort antal pelare installeras att det är möjligt att dra slutsatser om vad som sedan skall rekommenderas.
- Eftersom utförandebeskrivningen för produktionspelarna inte kan färdigställas förrän resultatet från provpelarinstitutionen utvärderats, så skall det i handlingarna finnas klargjort till vilka, och när, resultat skall sändas. Vidare skall det framgå när materialet skall finnas som ett färdigt sammanställt underlag.
- Det som avgör om en provpelarinstitution kan exkluderas beror av det specifika fallet och måste avgöras med hjälp av en så kallad ingenjörsmässig bedömning. Ett sådant fall är om en begränsad installation skall uppföras intill ett sedan tidigare, med kalkcementpelare, stabiliserat område med lika jordartsförhållanden. Vid projekt av begränsad storlek i områden med okänd stabiliseringsförmåga, där en provpelarinstitution skulle uppta en orimligt stor del av den totala kostnaden, kan man basera dimensioneringen utifrån laboratorieresultat. Dock bör ett antal extra pelare föreskrivas för att kompensera frånvaron av verifiering i fält. Vid komplexa konstruktioner, med ett litet antal pelare, bör man överväga att utföra samtliga pelare samtidigt och kontrollera ett antal av dem som provpelare.
- Det är viktigt att ha i åtanke att maskinerna kräver en viss inställningstid innan installering påbörjas. När en maskin fraktats eller stått oanvänd en tid så blir utmatningen till en början ofta okontrollerad och ojämn. Detta kan avhjälpas genom att tillverka ett antal pelare som varken används som provpelare eller tillgodoräknas som fullgoda pelare i en slutprodukt. Hur lång inställningstid som krävs för att uppnå godtagbar jämnhet i utmatningen bör tas fram för varje enskild maskin.

5.3 Diskussion

För att lyckas genomföra ett projekt så ekonomiskt fördelaktigt som möjligt samt uppnå ett tillfredställande resultat ur kvalitetsmässig synpunkt så är det av största vikt att det finns ett väl genomarbetat underlag att arbeta utifrån. Detta gäller alla typer av projekt, geotekniska såväl som andra. Det är under projekteringsfasen som största chansen finns att påverka såväl kostnaden som resultatet för projektet. Kostnaden för en väl utförd planering och projektering tjänas snabbt in under byggskede samt drifts- och underhållsskede för det aktuella objektet, jämför skiss i figur 5.1. Utifrån detta resonemang stöds teorin att satsa på utförliga laboratorieundersökningar och provpelarinstallationer. En satsning på provpelare gör att eventuella problem under produktionsfasen minskar.



Figur 5.1 Samband mellan kostnader och möjligheter att påverka resultatet i ett projekt.

Målet med en provpelarinstallation är att verifiera att de egenskaper som uppnås i fält motsvarar de krav som ställs på geometri, hållfasthet och homogenitet samt att om de inte uppfylls, kunna ändra förutsättningarna i tid. Förprovning är ett tillskott i utvecklingen av kalk- och kalkcementpelarmetoden, då granskning av resultat i verkligt rådande förhållanden leder till en högre tillförlitlighet.

Provpelare, eller förprovning som det även kallas, bör användas för att optimera mängder respektive verifiera resultatet av laboriestabiliseringen. I större projekt är kostnaden för detta mycket liten i förhållande till projektets totalkostnad. Att upprätta provpelare i projekt på Västkusten torde inte innebära något märkbart kostnadstillskott då pelarna, på grund av deras höga hållfasthetstillväxt, kan kontrolleras så snart efter installation att maskinerna aldrig behöver lämna platsen. Dessutom äts kostnaden för förprovningen snabbt upp vid eventuell minskning av såväl bindemedelskostnader och pelarantal. I regionen kring Mälaren blir dock pelare ofta inte lika höghållfasta och en provpelarinstallation kan vara nödvändig för att verifiera resultatet från laboriestabiliseringen. Eftersom så många faktorer påverkar stabiliseringsresultatet, och många av dessa varierar i fält och skiljer sig från laboratorium, är det svårt att utifrån laborieförsök bestämma pelares egenskaper. Undersökningar i

laboratorium är dock viktiga för att kunna föreskriva provpelare, de ger svar på om jorden kan stabiliseras samt vilka bindemedel och proportioner som ger de bästa resultaten.

Laboratorieundersökningar står för en liten kostnad i förhållande till projekts totala budget och skulle kunna användas i större utsträckning, det vill säga att fler prover behandlas för framställning av ett mer gediget underlag. I laboratorium är processer mer överskådbara och det är en varm och praktisk miljö att arbeta i. Vidare kan denna fördelaktiga miljö användas för att möjliggöra en optimering av blandningsprocessen, både med avseende på inblandningsarbete och typ av stabiliseringsmedel med hjälp av idealiserade blandningsförsök, Walter (1998).

På SGI har en alternativ metod för laboratoriestabilisering tagits fram för att minska spridningen i resultat från olika laboratorium och öka möjligheterna till jämförelser mellan olika laboratorieresultat. Prototypmodellen måste dock vidareutvecklas för att öka rationaliteten. Detta utvecklingsarbete pågår i dagsläget på SGI, Edstam och Carlsten (1999).

En nackdel med provpelare är att de maskiner som utför pelarinstallationer har en viss inkörstid. Detta drabbar provpelare extra hårt då denna osäkerhet i utmatad mängd bindemedel ofta uppkommer efter att maskinen fraktats eller efter inställningsändringar. Detta kan leda till att dimensioneringen baseras på felaktiga slutsatser. Inställningspelare bör därför tillverkas för att kunna dra nytta av de resultat som förprovningen ger. Det faktum att entreprenören måste ut med sina maskiner för att sätta ett fåtal pelare och sedan ha maskinerna stående till dess att projektet startar, går inte att komma ifrån. Dock går det att minska tiden genom en effektiv utvärderingsprocess, åtminstone på Västkusten där hållfasthetstillväxten vanligtvis är mycket hög.

Det har hänt att kalk- och kalkcementpelarinstallationer har misslyckats i Sverige. Vid analys av dessa händelser har ofta vikten av att göra noggranna bestämningar av egenskaper i såväl laboratorium som i fält betonats. Det är även viktigt att man vid applikationer av nya bindemedel utför omfattande provblandningar i såväl laboratorium som fält.

Provpelare kan även leda till att pelarna anpassas bättre till de jordarter som finns i en specifik del av projektet, att mängden stabiliseringsmedel varierar mellan olika sedimentbassänger samt att blandningsarbetets omfattning anpassas till den aktuella jorden. Eftersom det i dagsläget är så många faktorer som påverkar resultatet av en stabilisering i fält så kan inte paralleller dras mellan en lera och en annan, vilket talar för användandet av provpelare.

6 Diskussion och slutsatser

Jordens egenskaper, spänningssituation och omgivningsförutsättningar förändras från det att jordprov tas upp ur marken. Detta kan dock till stora delar motverkas med rätt hantering och genom att efterlikna spänningstillstånd, vattentillgång och temperaturförhållanden i laboratorium. Packningsarbete finns representerad i laboratorium men existerar knappt vid pelartillverkning, vilket innebär att denna faktor bör prioriteras i studier med syfte att minska skillnader mellan stabilisering i laboratorium och fält.

Som situationen är idag finns skillnader mellan blandningsprocesser i laboratorium respektive fält. Skillnaderna återfinns framför allt vad gäller nedbrytningsarbete, tillsättning av bindemedel, blandningstid samt blandningsverktygens utformning och effektivitet.

Lera stabiliserad med kalk och/eller cement kan inte längre räknas som ett rent kohesionsmaterial då det även har en friktionsvinkel. Den metod som används för att utvärdera resultaten från enaxiella tryckförsök baseras på att den stabiliserade lera går till skjuvbrott och redovisas således i form av skjuvhållfasthet. Eftersom brottbilden ofta visar på tryckbrott borde tryckhållfasthet vara ett bättre mått på uppnådd hållfasthet. Metoder som används för att utvärdera en stabiliserad jords hållfasthet skiljer sig mellan laboratorium och fält. Det väsentliga är dock att det är samma slags hållfasthet som diskuteras och jämförs.

Den del av detta arbete, som behandlar jämförelser av olika faktorer som påverkar vid laboriestedabilisering och pelarinstallation, har begränsats till en diskussion huruvida faktorerna och processerna finns vid laboratorie- och pelartillverkning och vad som skiljer dem åt. I viss mån har även förslag till förändringar diskuterats och ett uppslag till vidare studier är att undersöka huruvida skillnaden mellan dessa faktorer kan minskas eller elimineras samt vad dessa åtgärder skulle kunna kosta.

Vid utvärderingen av diagramsammanställningarna som tagits fram i denna studie kan utläsas att jordens ursprungliga egenskaper har betydelse för resultatet av stabiliseringen. Lera med höga sensitiviteter kräver en hög blandningsgrad, eftersom störd högsensitiv lera, vid otillräcklig spridning av bindemedel, kan leda till partier med mycket låg hållfasthet. Vidare finns samband mellan jordens ursprungliga hållfasthet och den hållfasthet som uppnåtts efter stabilisering. Jordar med mycket hög vattenkvot, som till exempel gytta, kan fastän de är svårstabiliserade uppnå godtagbara hållfastheter om bindemedelsmängden ökas. Prover med sulfidhaltig lera har vid laboriestedabilisering uppnått sämre resultat än lera, även detta kan avhjälpas med ökad mängd bindemedel. Silthaltiga lera ger en god stabilisering medan gytta visat sig vara svårstabiliserad. När bindemedelsmängden ökas erhålls endast vid cementinnehåll en ökad hållfasthet.

Det underlag som tagits fram i denna studie kan användas för att studera sambandet mellan en rad faktorer. Några exempel på sådana analyser har gjorts och de bekräftar bland annat den

redan kända vetenskapen att konförsök ger högre värden på hållfastheten än vad enaxiella tryckförsök ger. Vidare visar dessa diagram på att lägre stigningshastighet ger något högre hållfastheter. Rotationshastighetens betydelse är däremot svårtolkad.

Samtliga pelarsammanställningar för Västkusten, förutom Ledsgård med sin vattenrika gytta, visar på att pelarna uppnår och överstiger de skjuvhållfastheter som bestämts i laboratorium. Värdena i fält är 1,0–2,6 gånger större än de laboratorieframtagna skjuvhållfastheterna för samma jord vid samma tidpunkt efter inblandning. Undantag finns dock där pelarna har uppnått hållfastheter som är sex gånger större än de som erhållits vid laboratorieförsök. Projekten utförda i Mälardalen visar dock på mycket spridda resultat, från hälften så stora till fyrfaldigt större värden. De slutsatser som kan dras utifrån detta är att det finns möjligheter till optimering av metoden vid västkustprojekt samt att dimensionering av kalkcementpelare i Mälardalen bör utföras med försiktighet. Provpelare är således ett bra redskap i båda fallen då de kan vara ett hjälpmedel i optimeringsprocessen och ett verifieringsredskap vid pelarinstallering i de komplexa jordförhållanden som råder i Mälardalen. Då nya bindemedel provas är det av stor vikt att omfattande undersökningar i såväl laboratorium som fält utförs.

I denna studie visar övervägande antalet sammanställningar på att lika stora eller högre skjuvhållfastheter uppnås i fält jämfört med laboratorium vid lika lång tid efter inblandning. Samtliga projekt på Västkusten förutom Ledsgård, samt övervägande delen av mälardalsprojekten, visar på detta. Utifrån studerat material förordas att det primära målet för fortsatt forskning och utveckling inte skall vara en strävan efter högre hållfastheter i fält. Det som bör prioriteras idag är utveckling mot jämnare och mer förutsägbara resultat vid fältstabiliseringar. För att nå detta mål bör utvecklingen inriktas på förbättring av blandningsverktyget, jämnare och mer kontrollerad utmatning samt förbättrade kontrollmetoder. Att under detta arbete, till viss del, använda sig av laboratoriemiljö som är mer överskådlig och bekväm, förespråkas.

Förfarandet vid laboriestedabilisering är även det i behov av utveckling, men bör i dagsläget vara av lägre prioritet än fältsidan. Det som måste prioriteras på laboratoriesidan idag, är att de undersökningar som utförs skall resultera i jämförbara resultat oberoende av vilket laboratorium som utfört stabiliseringen. Om detta ska vara realiserbart krävs en mycket detaljerad handledning som rymmer små möjligheter till variationer i utförande. I avsnitt 5.1 har ett förslag till inriktning av undersökningar på laboratorium tagits fram, där idéer om vad som bör ses över och standardiseras finns redovisade. En laboratoriehandledning kan tas fram med hjälp av den kunskap som finns om laboriestedabilisering idag, det vill säga att de principer som redan tillämpas bör föreskrivas. När en sådan vägledning är upprättad bör forskningen inom laboriestedabilisering inte stagnera utan inriktas mot utveckling och förbättring.

Sondens verkliga area bör beaktas eftersom förenklade beräkningssamband ger stort utslag på hållfastheten. Vid beräkning av uppnådd skjuvhållfasthet i fält utifrån sonderingsmotståndet

multiplieras ofta nettotrycket med en faktor 0,1, vilket diskuterats tidigare. Denna faktor har blivit ifrågasatt av till exempel Axelsson (2000), som föreslår en indirekt minskning av denna faktor med en tredjedel. Enligt diagramsammanställningarna i detta arbete, skulle detta ge en ökad överensstämmelse mellan laboratorie- och fältbestämda skjuvhållfastheter.

I detta arbete har ingen allmängiltig korrektionsfaktor mellan skjuvhållfastheter uppnådda i laboratorium respektive fält tagits fram. Den finska korrektionsfaktorn, som nämnts i kapitel 4, är ett bra exempel på varför. En faktor kan aldrig täcka in alla jordtyper då beteendet vid stabilisering varierar med jordart, vattenkvot, organiskt innehåll etc. Skillnaden mellan olika jordar, såväl som skillnaden mellan laboratoriebestämda och fältbestämda egenskaper, är för komplex och varierande för att beskrivas av en universell korrektionsfaktor.

I dagens beräkningsmodeller förutsätts i princip att pelare och lera skall förskjutas lika mycket för att full samverkan skall erhållas. Idag används en begränsning i hållfasthet, ca 150 kPa, för att inte riskera att samverkan mellan pelare och lera skall äventyras. Hur en pelares styvhet påverkar samverkan och vilka begränsningar som finns för dagens beräkningsmodeller är idag osäkert och med tanke på de mycket höghållfasta pelarna på Västkusten borde det vara av intresse att utreda detta. Inom detta område har, Kivelö (1998), tagit fram en ny beräkningsmodell för dimensionering av kalk- och kalkcementpelare.

Eftersom jordens kemiska och fysikaliska egenskaper växlar inom ett och samma område, skulle pelare få en homogenare struktur och jämnare kvalitet om utmatad mängd bindemedel anpassas för varje jordlayers egenskaper. För att åstadkomma detta kan doseringen av bindemedel varieras i de olika skikten. Alternativt kan stigningshastigheten minskas för att uppnå en ökad utmatad mängd bindemedel i skikt som kräver mer stabiliseringsmedel, Svensk Djupstabilisering (1999).

Upprättande av en användarvänlig erfarenhetsbank för kalkcementpelarprojekt, med kontinuerlig komplettering, rekommenderas. Det är av stor vikt att resultat införs i en databas inom projektets tidsram, då det i efterhand är svårt att finna komplett och detaljerad data för samtliga steg i projektet. Som exempel på hur bristfälliga underlag kan begränsa kvalitén på studier, har sammanställningarna i denna studie baserats på djup istället för på mer rättvisande nivåangivelser. Vidare behövs gedigen information för att erfarenhetsbanken skall vara ett statistiskt försvarbart underlag. En databas för erfarenhetsåterföring bör utföras med en sådan detaljeringsgrad att det är möjligt att urskilja resultaten för varje enskilt jordlager och jordart. Jordars ursprungliga egenskaper bör registreras, så att orsaker till uppnådda hållfastheter eller eventuella avvikelser skall kunna förklaras. En erfarenhetsbank är ett viktigt verktyg för att kunna verifiera idéer, spåra anledningar till dåliga resultat samt utveckla kalk- och kalkcementpelarmetoden.

Referenser

Almquist, L. och Erikmat, K. (1994). *Djupstabilisering med kalkcementpelare, En fält- och laboratoriestudie av inverkande faktorer*. Examensarbete 1994:6, Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Axelsson, A. och Larsson, S. (1994). *Provningsmetoder på kalkcementpelare, Svealandsbanan*. Examensarbete 94/10, Avdelningen för jord- och bergmekanik, Institutionen för anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Axelsson, M. (2000). *Djupstabilisering med kalkcementpelare – Metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält* (muntlig information).

Bredenberg, H. (1999). *Keynote lecture: Equipment for deep soil mixing with the dry jet mix method*. Proc. Of the international conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilisation, Stockholm, Sweden, 13-15 October 1999, (Ed.: Bredenberg, H., Holm, G. and Broms, B.B.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 323-331 (ISBN 90-5809-108-2).

Carlsten, P. och Ekström, J. (1995). *Kalk- och kalkcementpelare, Vägledning för projektering, utförande och kontroll*. Rapport 4:95, Svenska Geotekniska Föreningen, Linköping.

Carlsten, P. (2000). *Kalk- och kalkcementpelare, Vägledning för projektering, utförande och kontroll*. Rapport 2:2000, Svenska Geotekniska Föreningen, Linköping.

Edstam, T. (1997). *Erfarenhetsbank för kalkcementpelare*. Rapport 1, Svensk Djupstabilisering, Linköping.

Edstam, T. and Carlsten, P. (1999). *A new method for laboratory preparation of stabilised clay*. Proc. Of the international conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilisation, Stockholm, Sweden, 13-15 October 1999, (Ed.: Bredenberg, H., Holm, G. and Broms, B.B.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 315-319 (ISBN 90-5809-108-2).

Eriksson, M. och Carlsten, P. (1995). *Tryckförsök på kemiskt stabiliserad jord*. Varia 435, Statens geotekniska institut, Linköping.

Greaves, H.M. (1996). *An Introduction to Lime Stabilisation*. Proc. Lime Stabilisation, Loughborough University Civil & Building Engineering Department, 25 September 1996, (Ed.:Rodgers, C.D.F., Glendinning, S. and Dixon, N.), Thomas Telford Publishing, London, 5-10.

Hakola, H. (1999). *Keynote lecture: Quality control for dry mix methods*. Proc. Of the international conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilisation, Stockholm, Sweden, 13-15 October 1999, (Ed.: Bredenberg, H., Holm, G. and Broms, B.B.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 285-294 (ISBN 90-5809-108-2).

Hansson, T. (2000). *Undersökning i fält av stabiliseringseffekt i organisk jord och lera*. Examensarbete 2000:1, Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska högskola, Göteborg.

Holm, G. (1999). *Keynote lecture: Applications of Dry Mix Methods for deep soil stabilizations*. Proc. Of the international conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilisation, Stockholm, Sweden, 13-15 October 1999, (Ed.: Bredenberg, H., Holm, G. and Broms, B.B.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 3-13 (ISBN 90-5809-108-2).

- Jelusic, N. (1999). *Masstabilisering*. Licentiatavhandling, Avdelningen för geoteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund (ISBN 91-630-8364-7).
- Kivelö, M. (1994). *Odränerade provbelastningar av kalkcementpelare i fält*. Trita-ami Rapport 3002, Institutionen för anläggning och miljö, Avdelningen för jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Kivelö, M. (1998). *Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns*. Doctoral thesis 1023, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm (ISSN 1400-1284).
- Larsson, S. (2000). *Blandningsmekanismer och blandningsprocesser - med tillämpning på pelarstabilisering*. Rapport 6, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Pradines, C. (1980). *Laboratory tests on clay-lime mixtures*. Rapport no.14, Institutionen för Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Rathmeyer, H. (1997). *Deep mixing methods for soft subsoil improvement in the Nordic Countries*. Proc. of the international conference on Grouting and Deep Mixing, (Eds. Yonekura, Terashi and Shibasaki), AA Balkema, Rotterdam, Netherlands, 869-877(ISBN 90-5410-805-3).
- Rogbeck, Y. (1999) *Svealandsbanan, funktionsuppföljning av kalkcementpelarförstärkning*, Varia 472, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Schaefer, V.R., Abramson, L.W., Drumheller, J.C., and Sharp, K.D. (1997). *Ground Improvement, Ground reinforcement and Ground Treatment: Developments 1987-1997*. ASCE, Geotechnical Special Publication 69, New York, 616.
- Svensk Djupstabilisering (1999). *Dimensioneringsvägledning för djupstabilisering*. Översättning av Finska Vägverkets klarlägganden 18/1997. Arbetsrapport 10, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Tafvelin, A. (2000). *Permeabilitetsberäkning hos kalkcementpelare i fält*. Examensarbete 00/2, Avdelningen för jord- och bergmekanik, Institutionen för anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Walter, M. (1998). *Kemisk stabilisering av jord – en studie av inblandningsprocessen*. Examensarbete 98/9, Avdelningen för jord- och bergmekanik, Institutionen för anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Åhnberg, H. och Holm, G. (1987). *Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord*. Rapport No 30, Statens geotekniska institut, Linköping.
- 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 No 48, Statens geotekniska institut, Linköping.

Bilageförteckning

Mälardalen

- Bilaga 1.1 E18/E20, Örebro – Slyte
- Bilaga 1.2 E18/E20, Slyte – Gräsnäs
- Bilaga 1.3 E18, Arboga – Köping
- Bilaga 1.4 E20, Eskilstuna – Arphus
- Bilaga 1.5 Svealandsbanan
- Bilaga 1.6 Västra Stambanan, Katrineholms bangård
- Bilaga 1.7 Väg 841, Kallhäll – Kungsängen
- Bilaga 1.8 Mälarbanan, Kungsängen – Tibble
- Bilaga 1.9 Mälarbanan, Grillby – Enköping

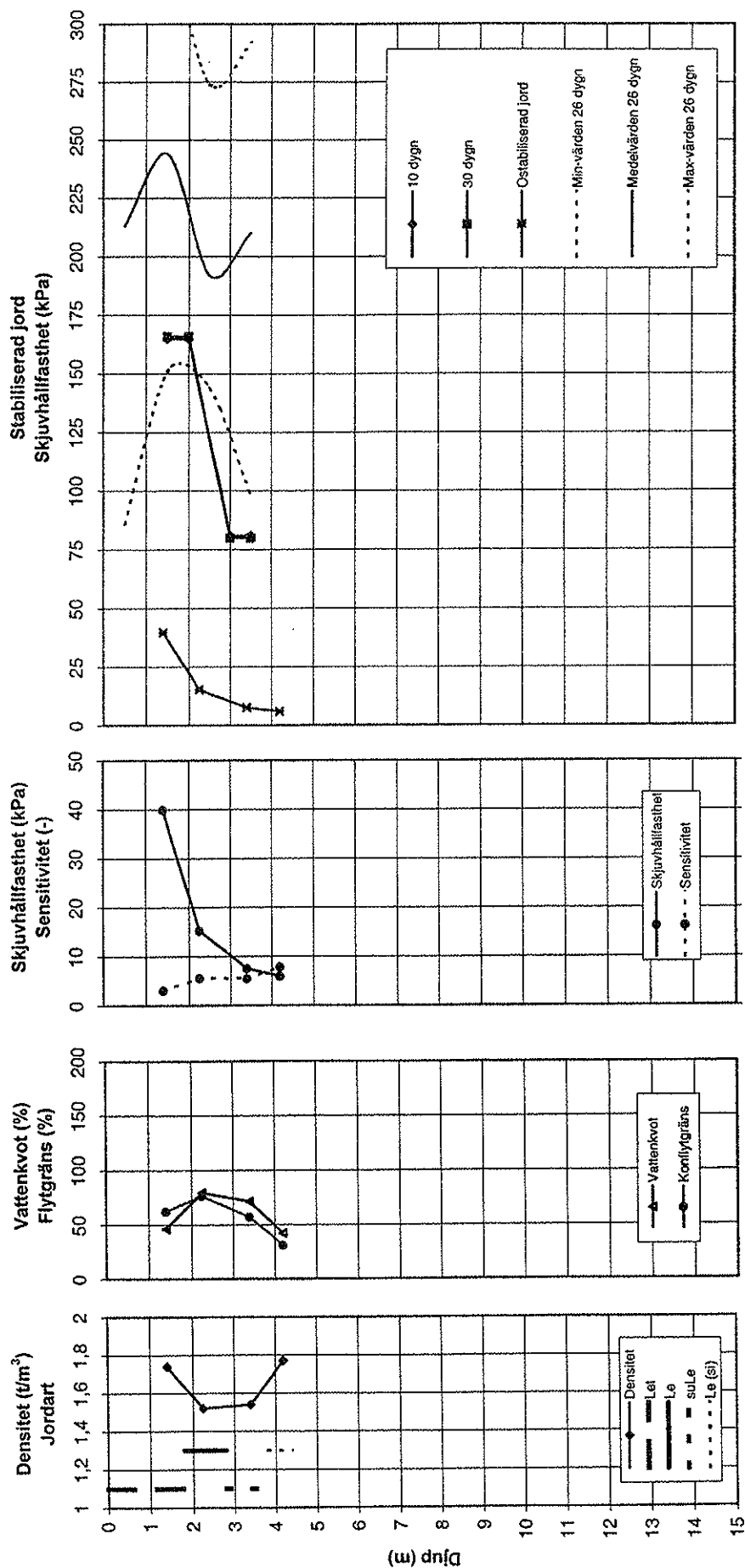
Västkusten

- Bilaga 2.1 Eka Nobel
- Bilaga 2.2 E6/E20, Åbromotet
- Bilaga 2.3 Västkustbanan, Tångaberg – Varberg
- Bilaga 2.4 Västkustbanan, Ledsgård

Övriga diagram

- Bilaga 3.1 Konförsök och enaxiella tryckförsök
- Bilaga 3.2 Vattenkvot och densitet före och efter inblandning av stabiliseringsmedel
- Bilaga 3.3 Vattenkvotens minskning med tiden
- Bilaga 3.4 Stabiliseringseffekt
- Bilaga 3.5 Rotations- och stigningshastighet

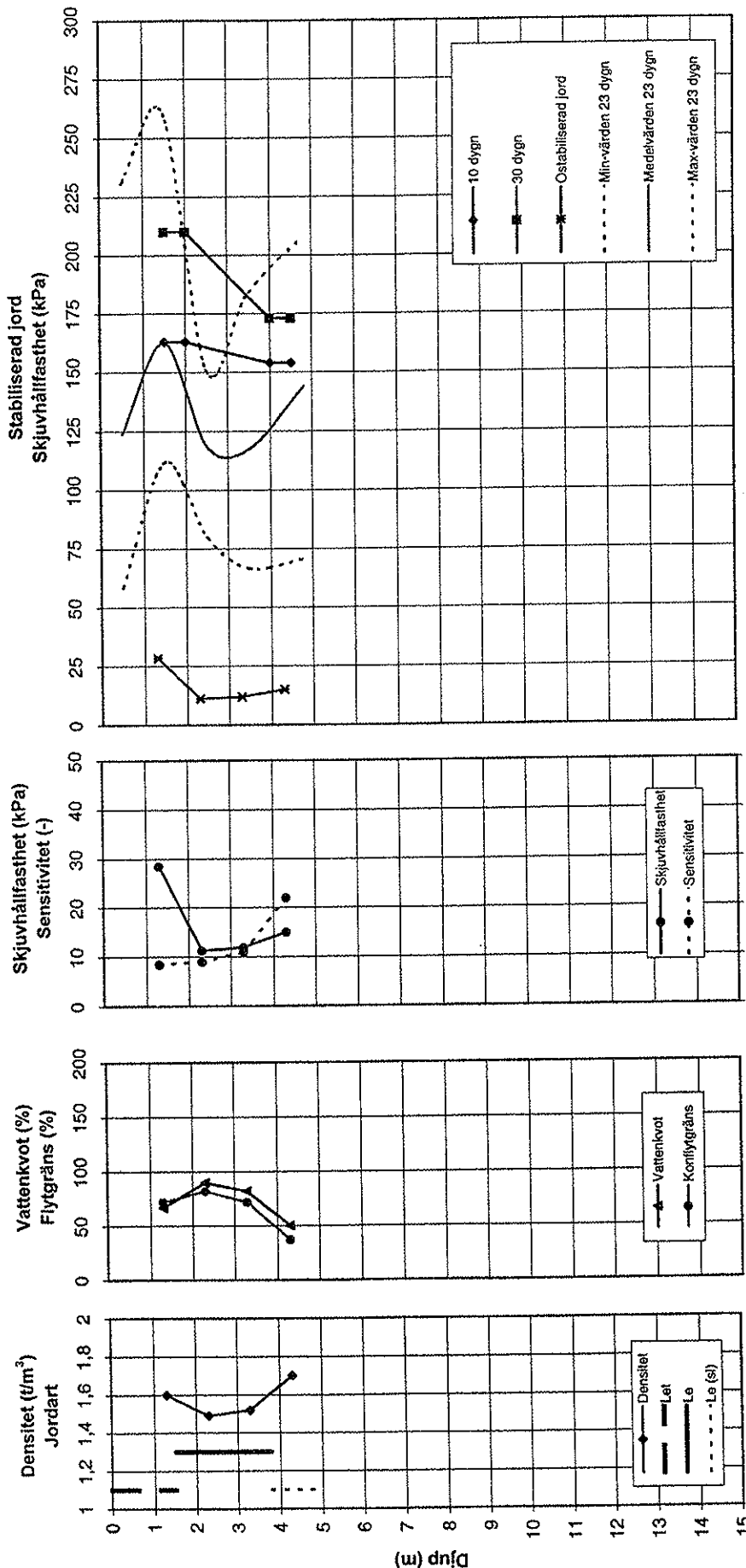
Mälardalen



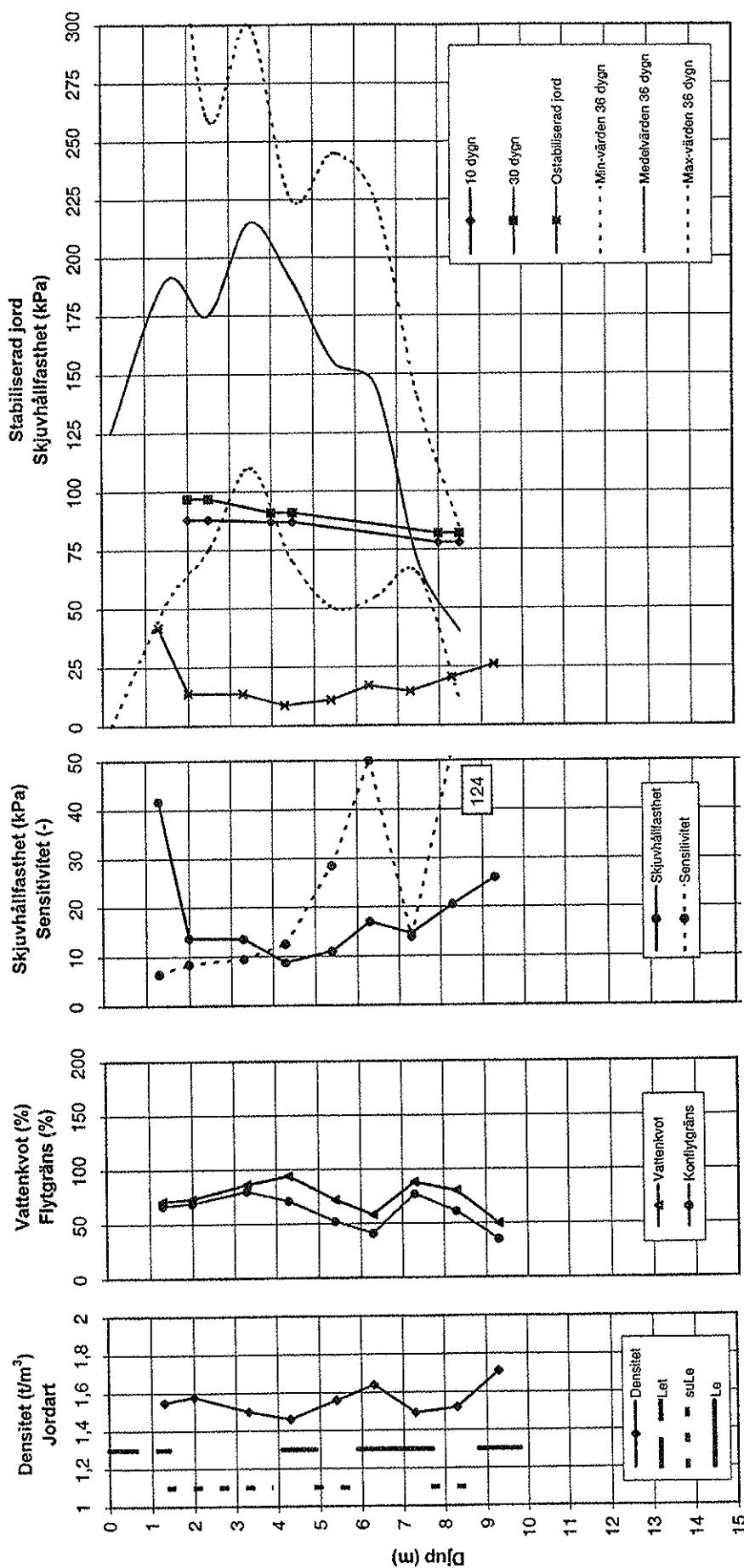
Prov. metod: KPS
 Antal pelagr./pelare: 2/10 st
 Bindem. mängd labb: 125 kg/m³
 Bindem. mängd fält: 125 kg/m³
 Stab. medel och prop: K/C 50/50
 Verklig inbl. fält: något mer
 Kommentär:

Bilaga 1.1.2

E18/E20
 Örebro - Siyte
 Jordprov 8/434, Inbl. 8/434, Pelare i 8/420



Prov. metod: KPS	Antal pelagr./pelare: 3/11 st
Bindem. mängd labb: 125 kg/m³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 100 kg/m³	Verklig inbl. fält: överensstämmande
Kommentar:	

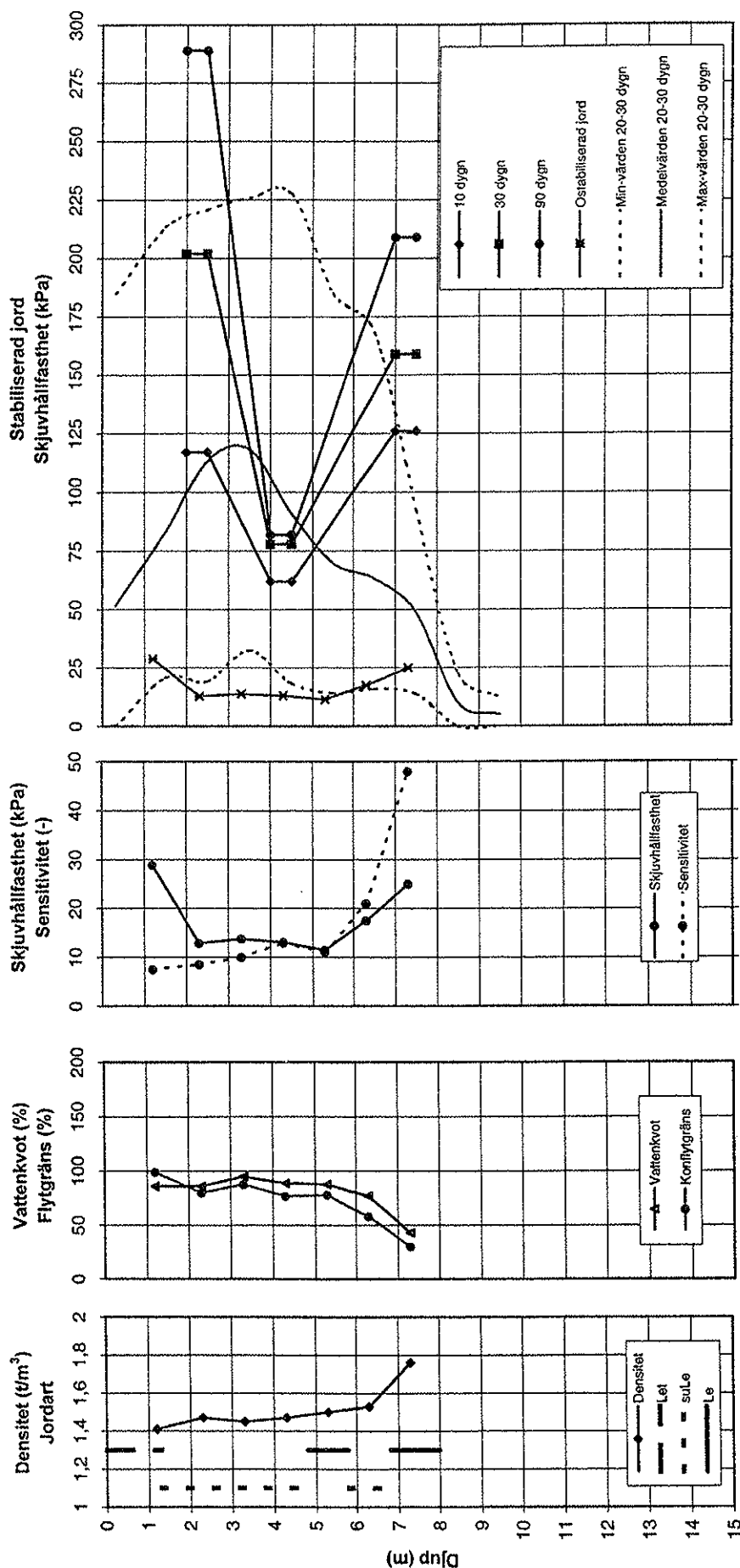


Prov. metod: KPS Antal pelargr./pelare: 2/8 st
 Bindem. mängd labb: 125 kg/m³ Stab. medel och prop: K/C 50/50
 Bindem. mängd fält: 125 kg/m³ Verkl. inbl. fält: överensstämmande
 Kommentar:

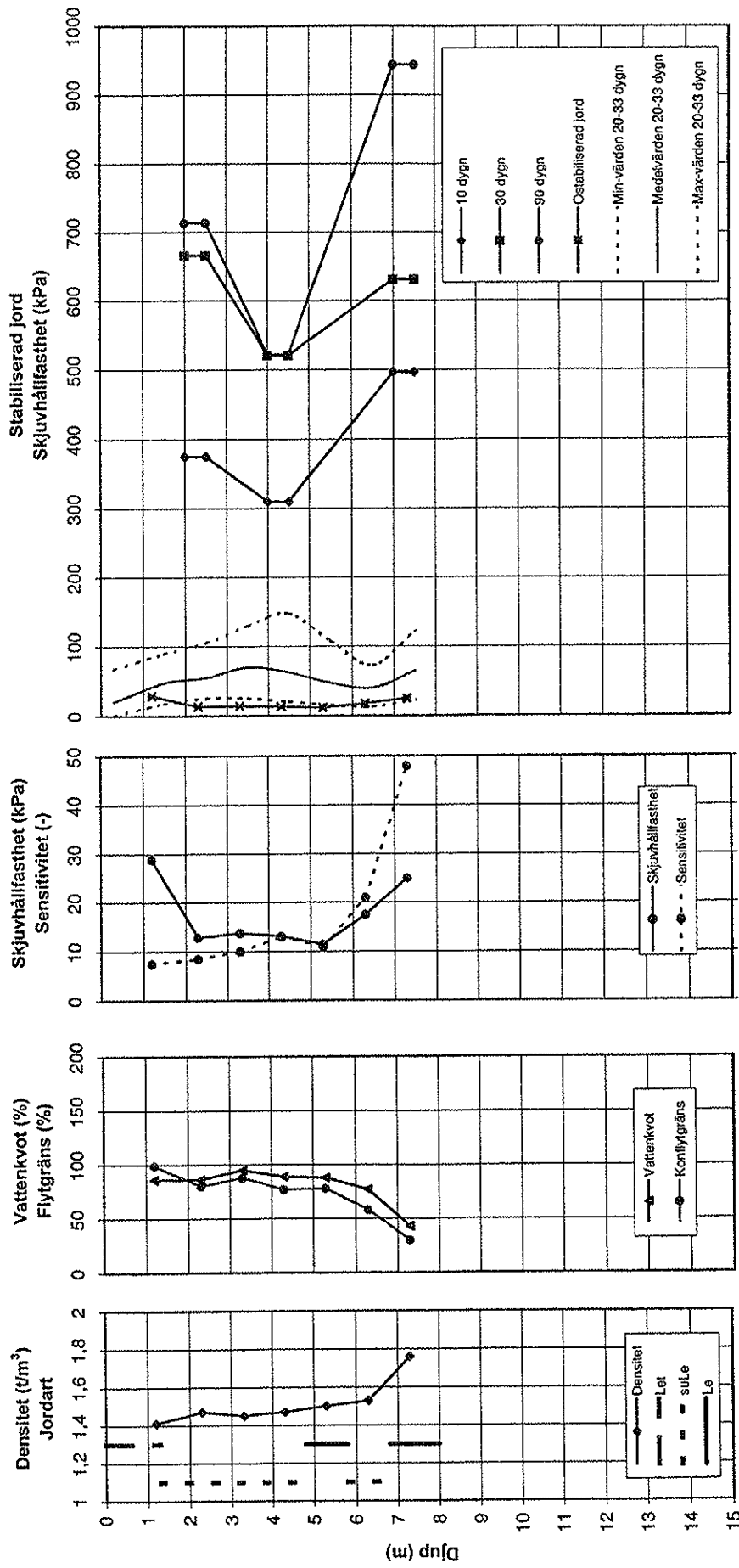
E18/E20

Örebro - Slyte

Jordprov 10/940, Inbl. 10/880, Pelare i 10/940, Pelare i 10/880, 10/940 och 11/015

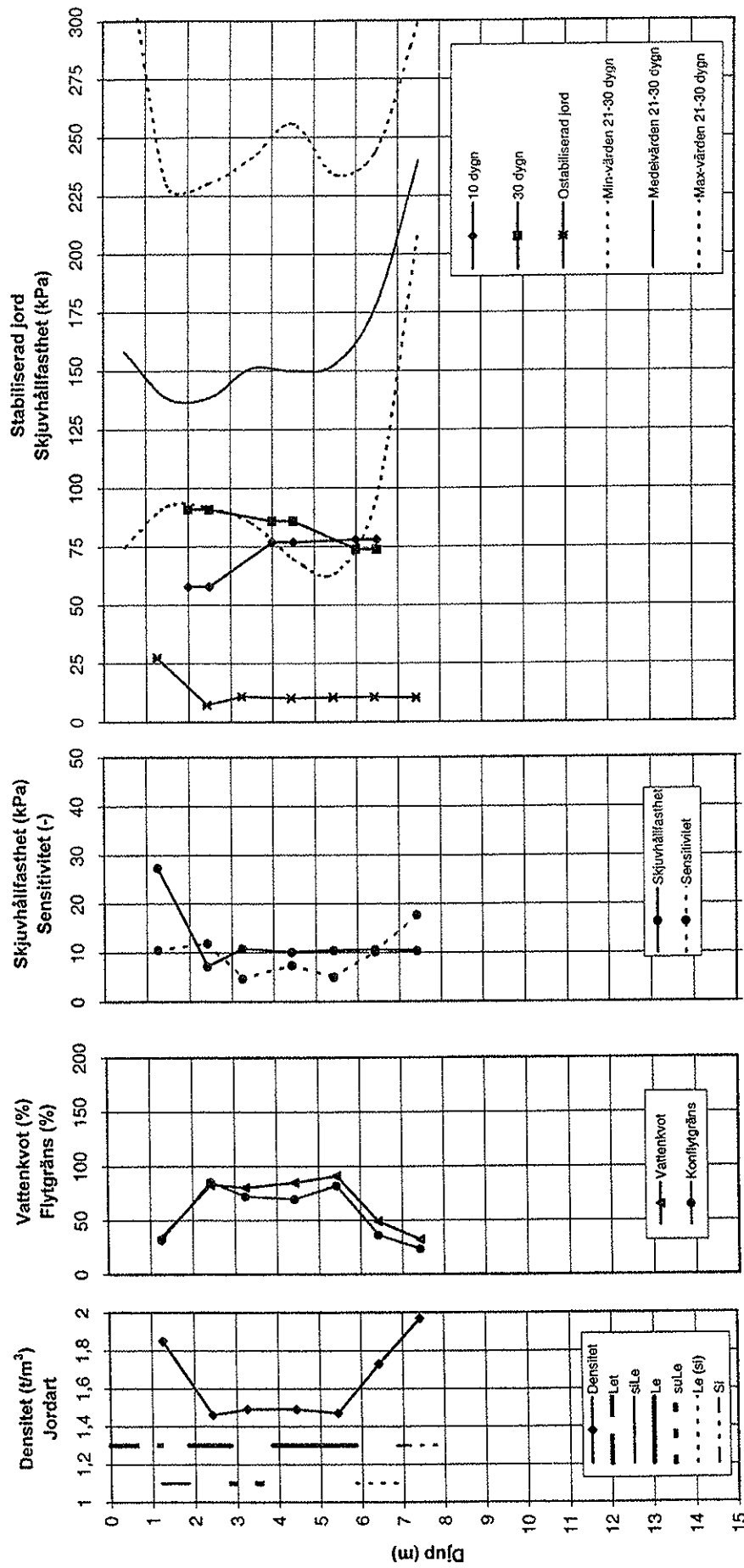


Prov. metod: KPS	Antal pelargr./pelare: 6/30 st
Bindem. mängd labb: 125 kg/m ³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 125 kg/m ³	Verklig inbl. fält: överensstämmande
Kommentar:	

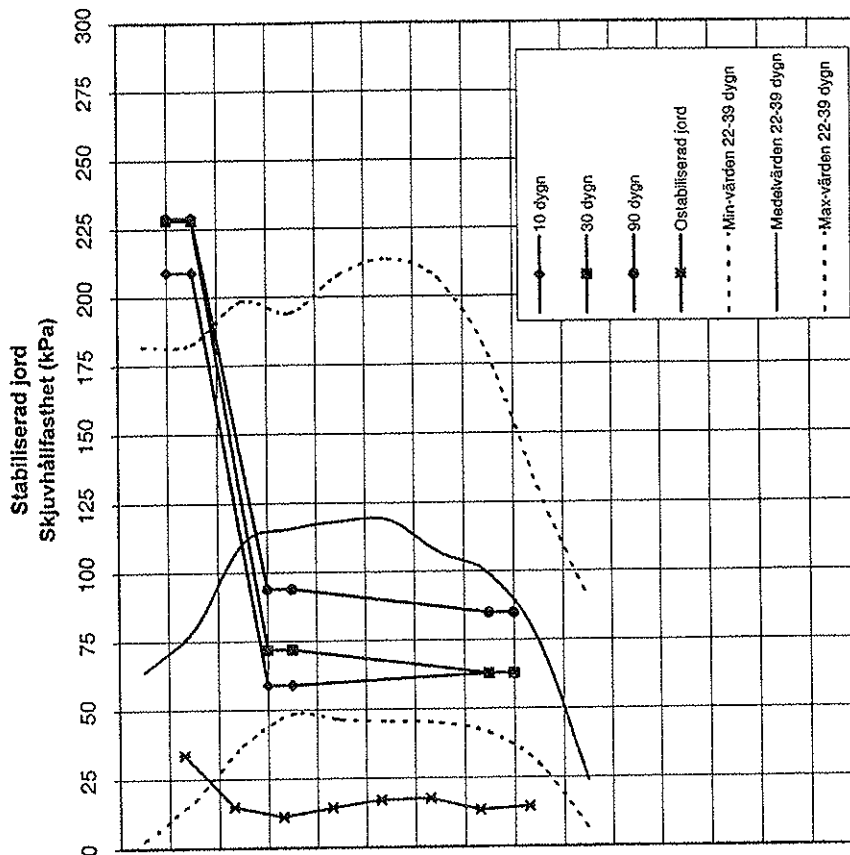
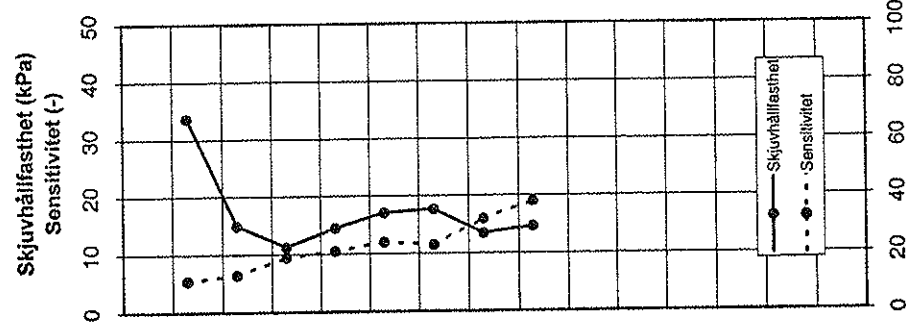
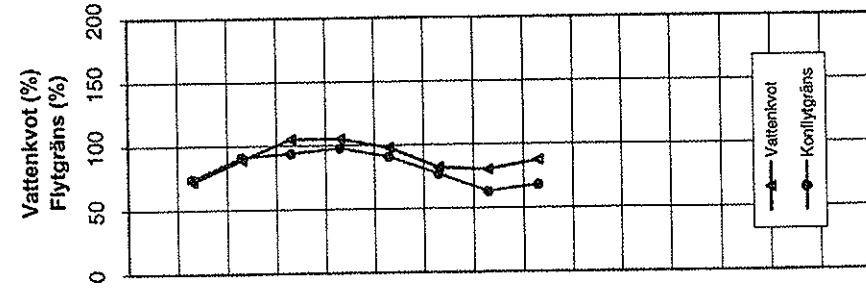
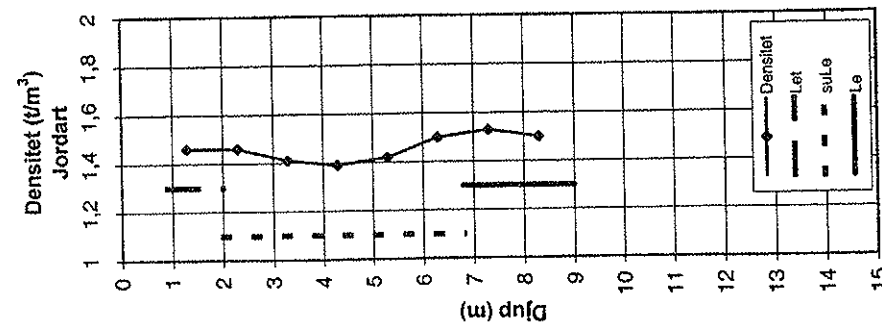


Prov. metod: KPS Antal pelargr./pelare: 2/10 st
 Bindem. mängd labb: 100 kg/m³ Stab. medel och prop: Lohjani17
 Bindem. mängd fält: 125 kg/m³ Verklig inbl. fält: överensstämmande
 Kommentar:

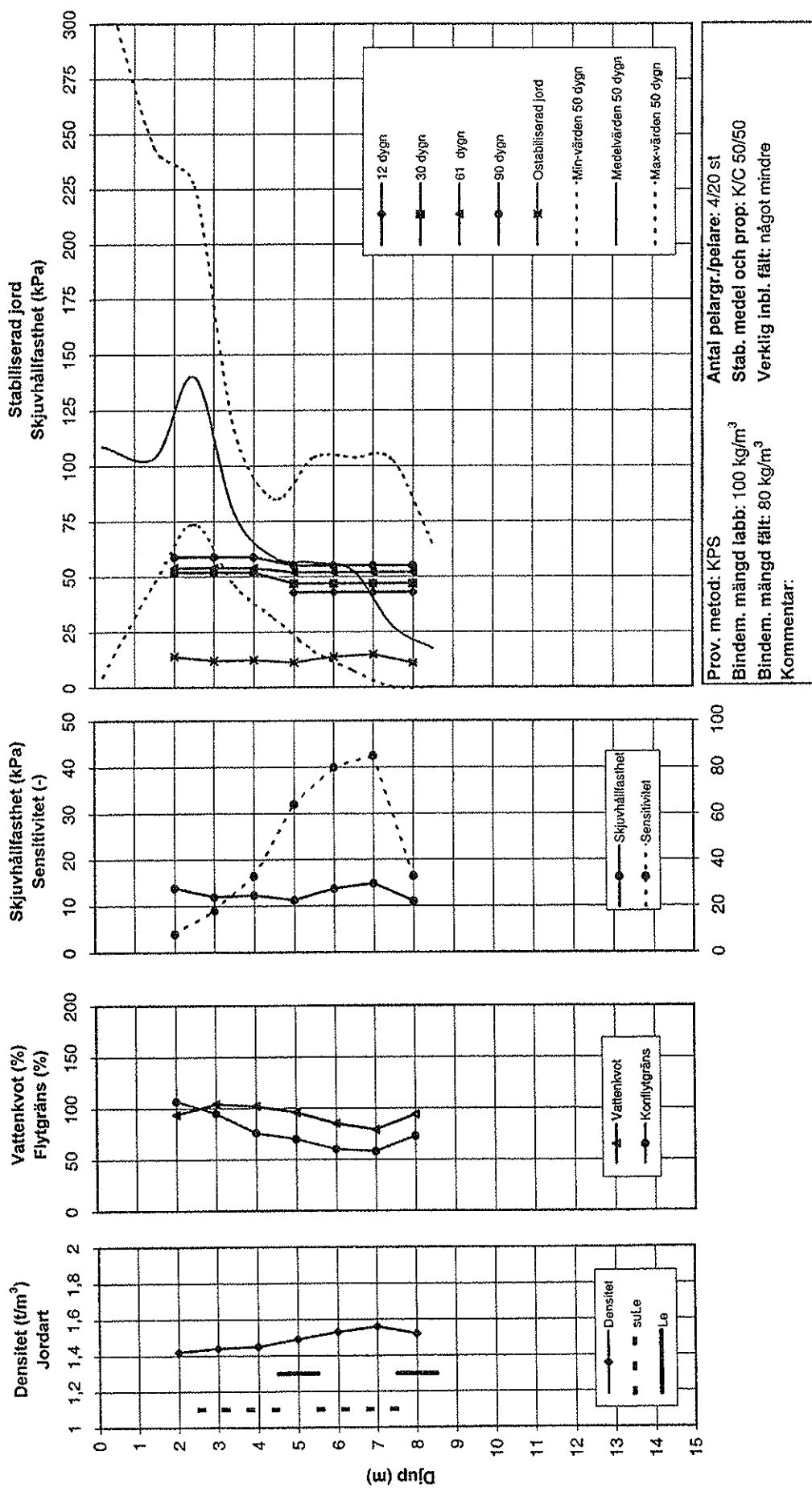
E18/E20
Örebro - Slyte
Jordprov 11/533, Inbl. 11/533, Pelare i 11/400 och 11/520



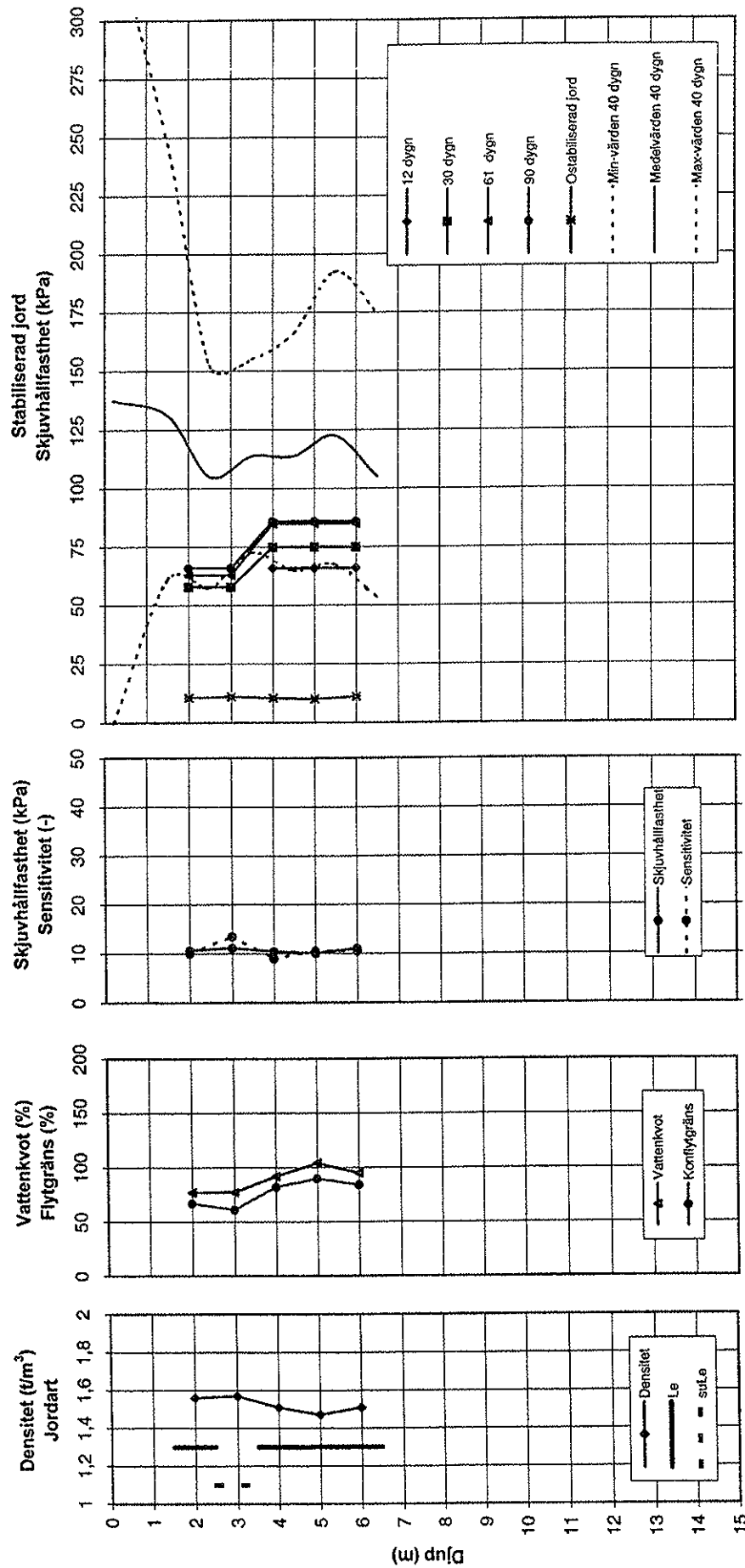
Prov. metod: KPS	Antal pelargr./pelare: 4/19 st
Bindem. mängd labb: 125 kg/m ³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 125 kg/m ³	Verklig inbl. fält: överensstämmande
Kommentar:	



Prov. metod: KPS	Antal pelargr./pelare: 6/30 st
Bindem. mängd labb: 125 kg/m³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 125 kg/m³	Verklig inbl. fält: överensstämmande
Kommentar:	



E18/E20
Slyte - Gräsnäs
Jordprov 38/720, Inbl. 38/720, Pelare i 38/820

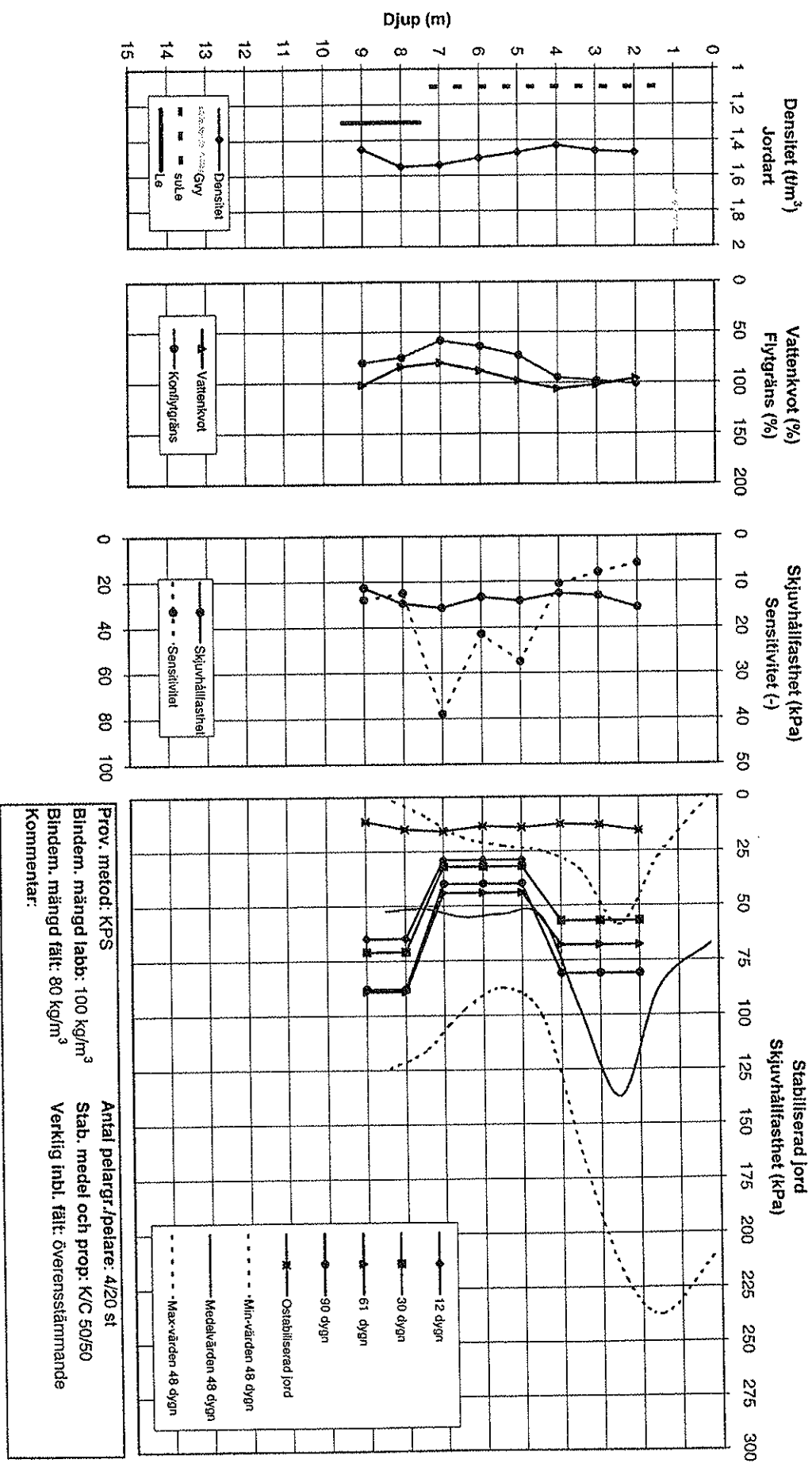


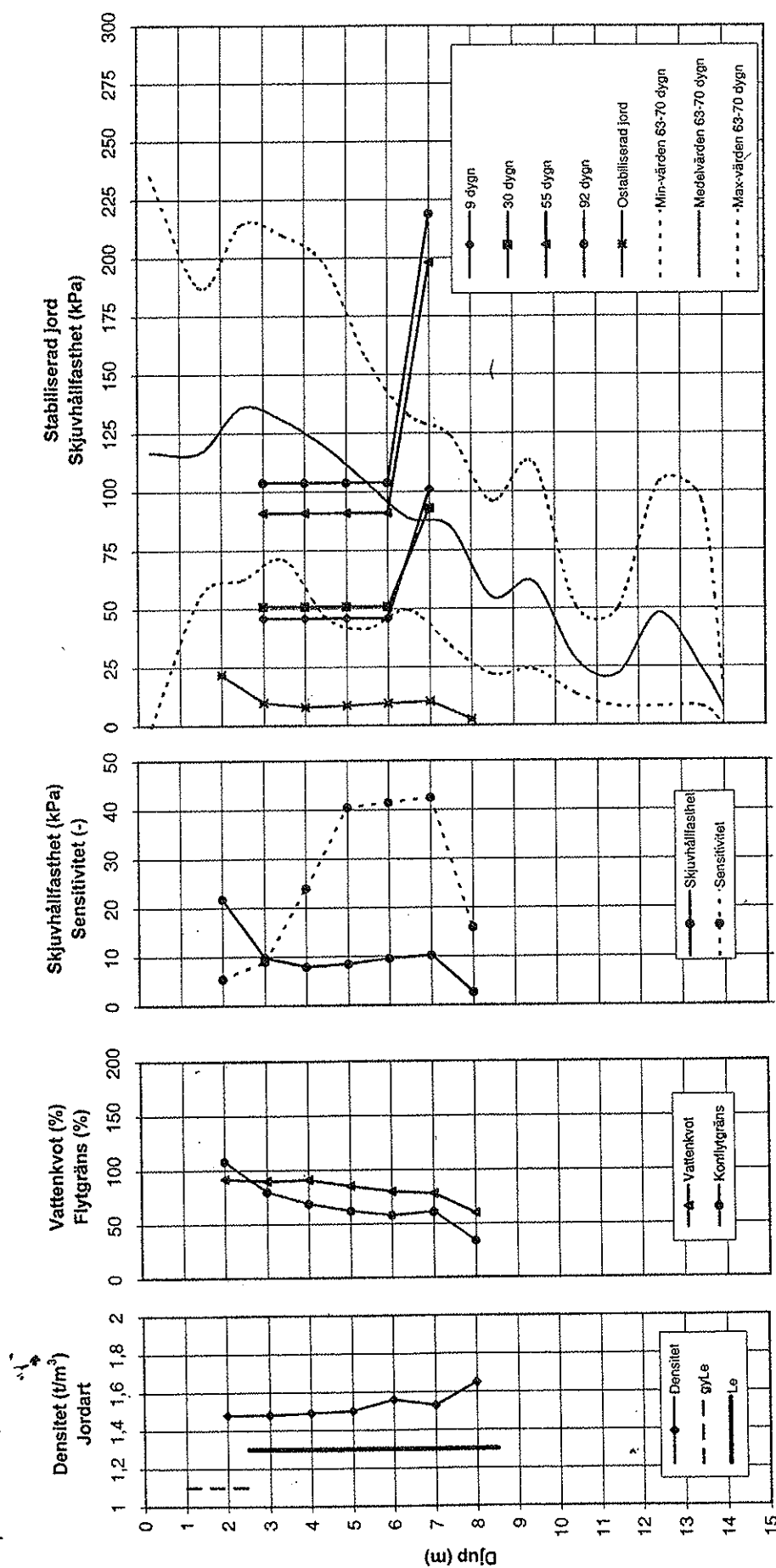
Prov. metod: KPS	Antal pelargr./pelare: 4/20 st
Bindem. mängd labb: 100 kg/m ³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 80 kg/m ³	Verklig inbl. fält: överensstämmande
Kommentar:	

E18/E20

Slyte - Gräsås

Jordprov 40/280, Inbl. 40/280, Pelare i 39/740 och 40/400



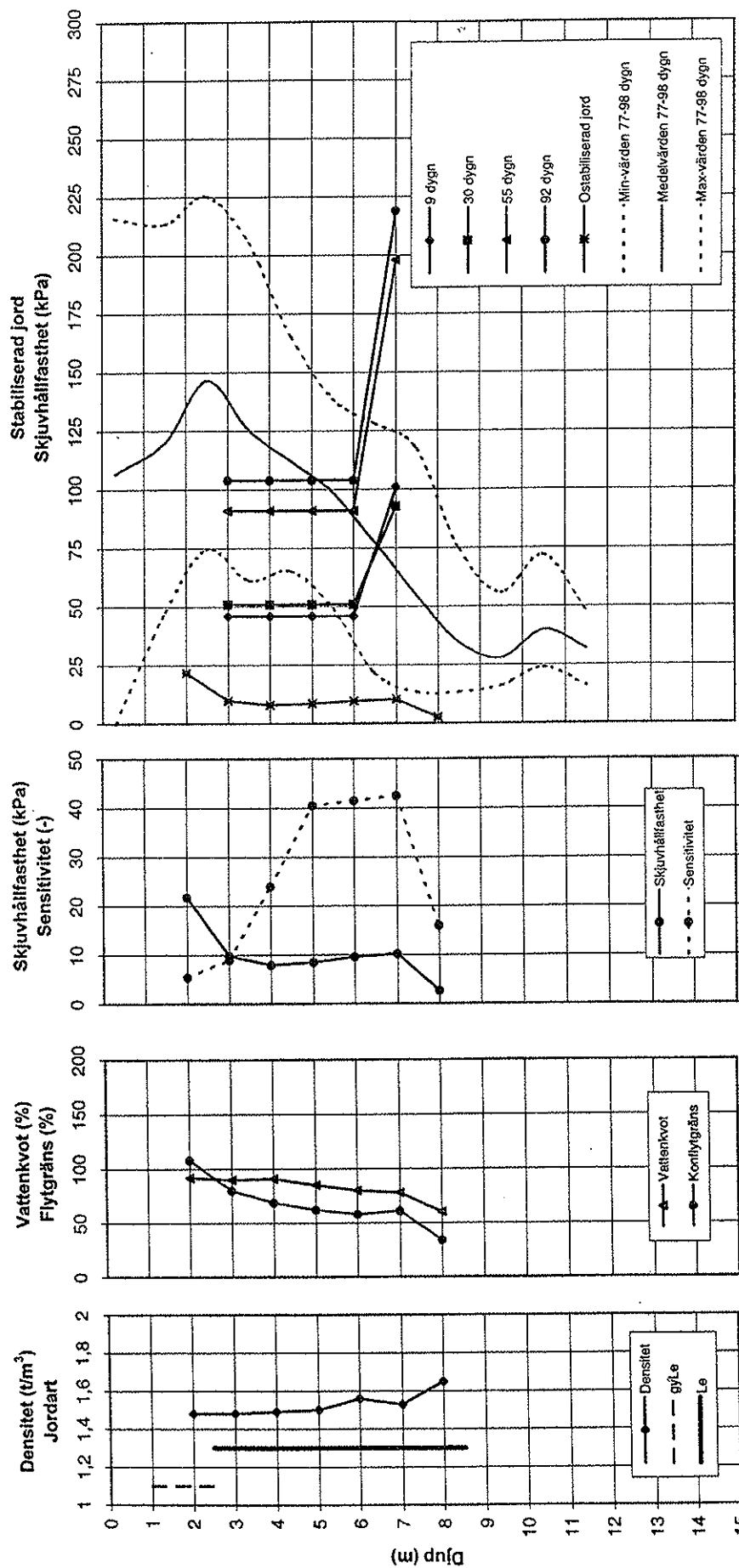


Prov. metod: KPS	Antal pelargr./pelare: 5/19 st
Bindem. mängd labb: 80 kg/m ³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 80 kg/m ³	Verklig inbl. fält: uppgift saknas
Kommentar:	

E18

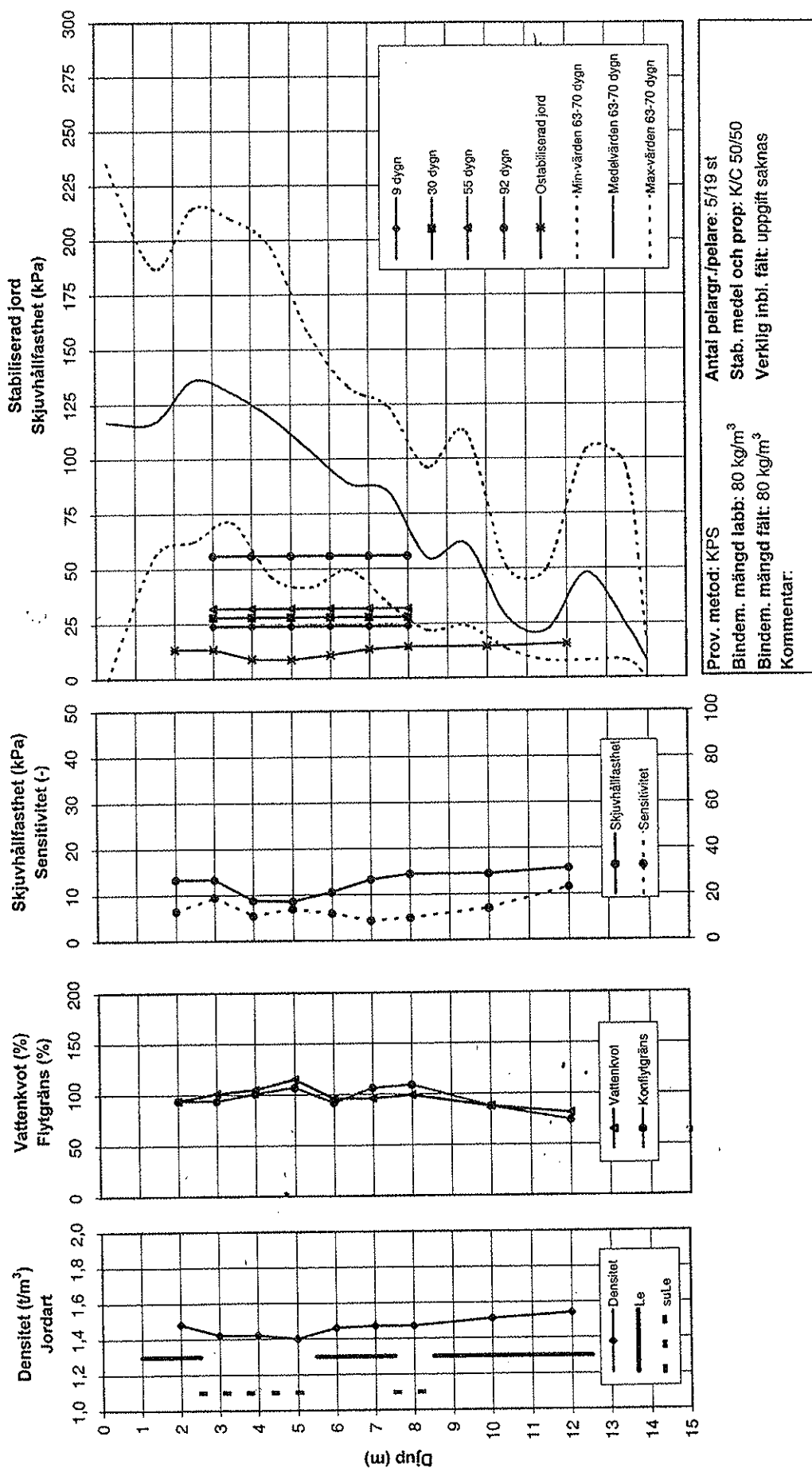
Arboga - Köping

Jordprov 2/440, Inbl. 2/440, Pelare på sträckan 2/300 - 3/000



0 20 40 60 80 100

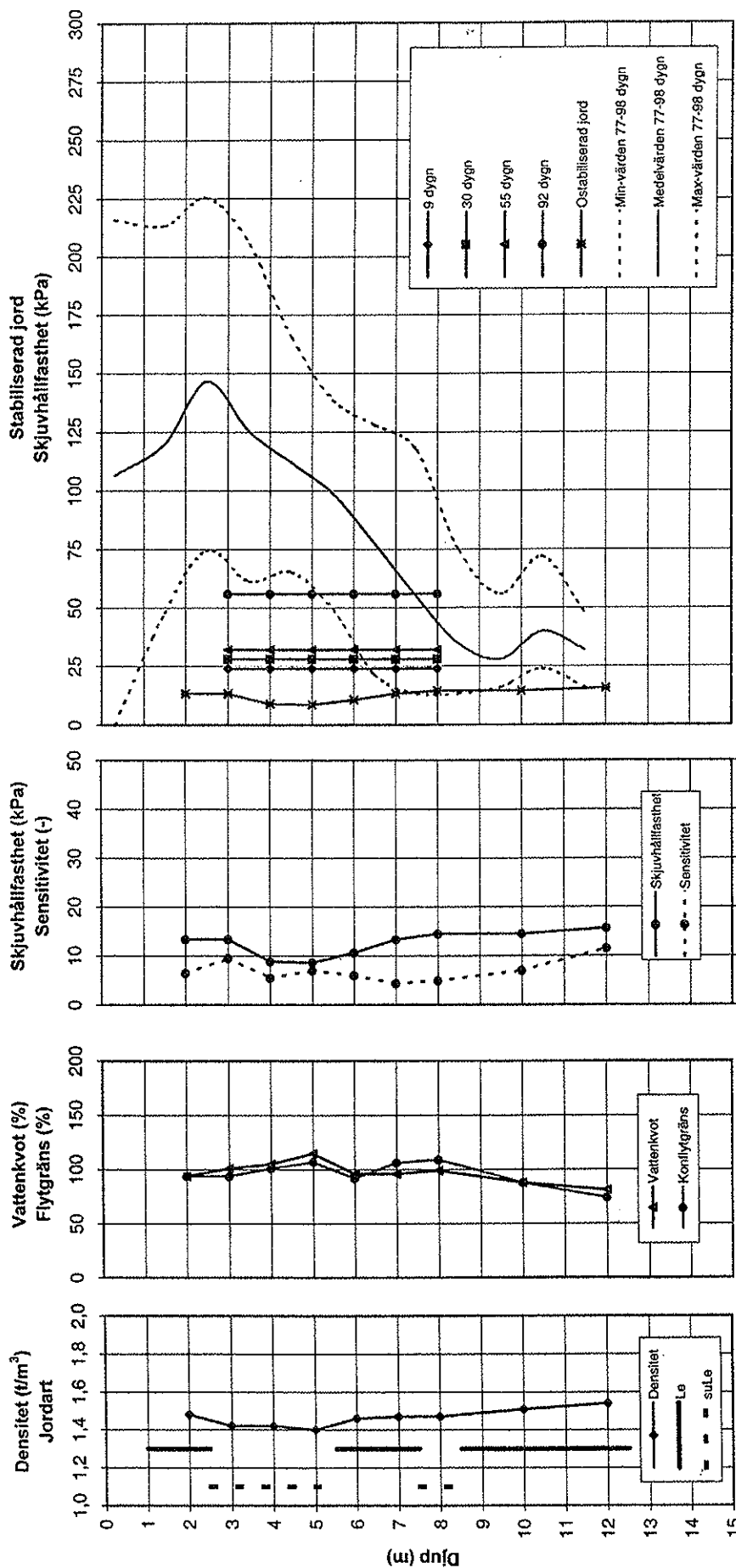
Prov. metod: KPS Antal pelagr./pelare: 3/12 st
 Bindem. mängd labb: 80 kg/m³ Stab. medel och prop: K/C 50/50
 Bindem. mängd fält: 80 kg/m³ Verklig inbl. fält: uppgift saknas
 Kommentar:



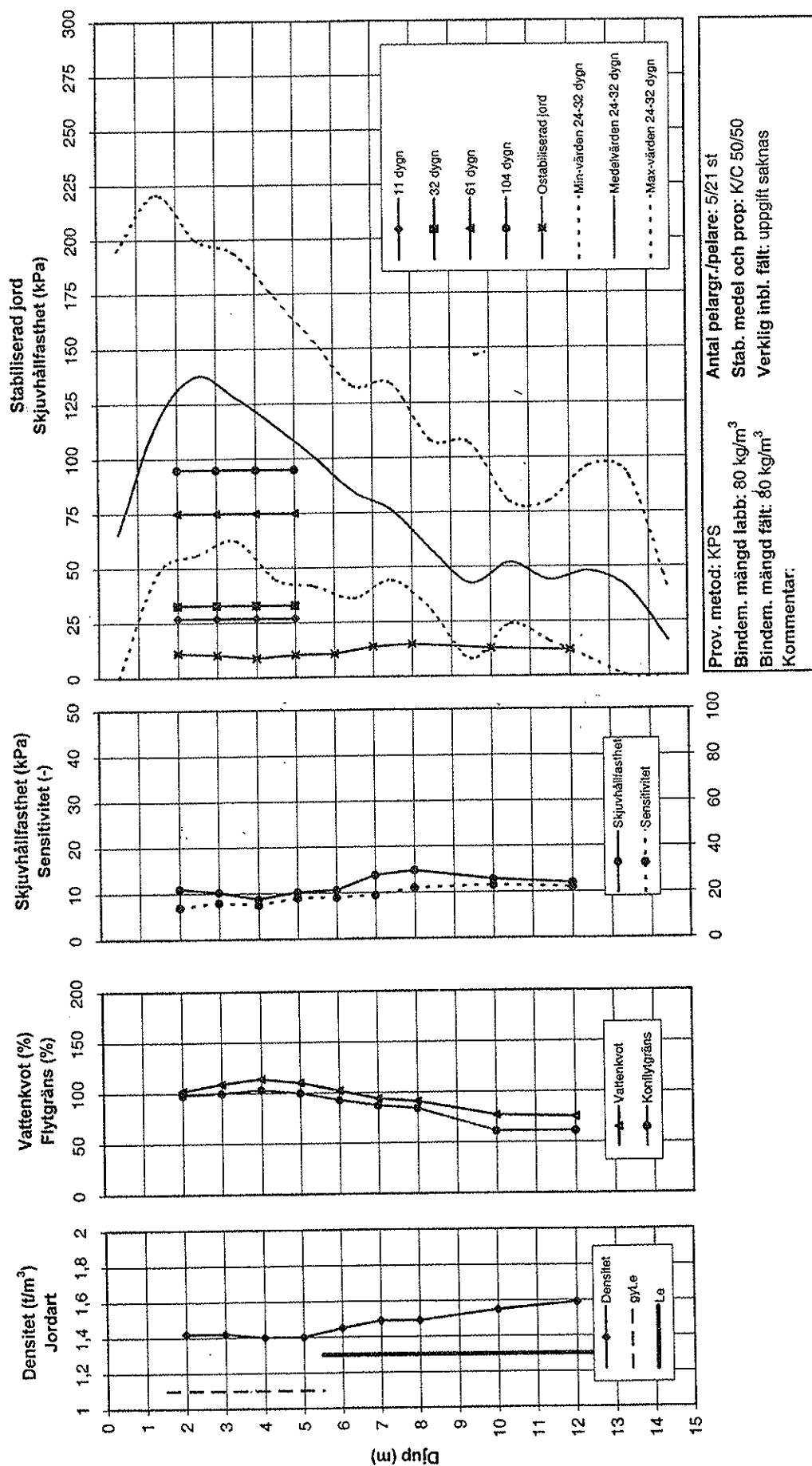
E18

Arboga - Köping

Jordprov 2/720, Inbl. 2/720, Pelare på sträckan 2/300 - 3/000



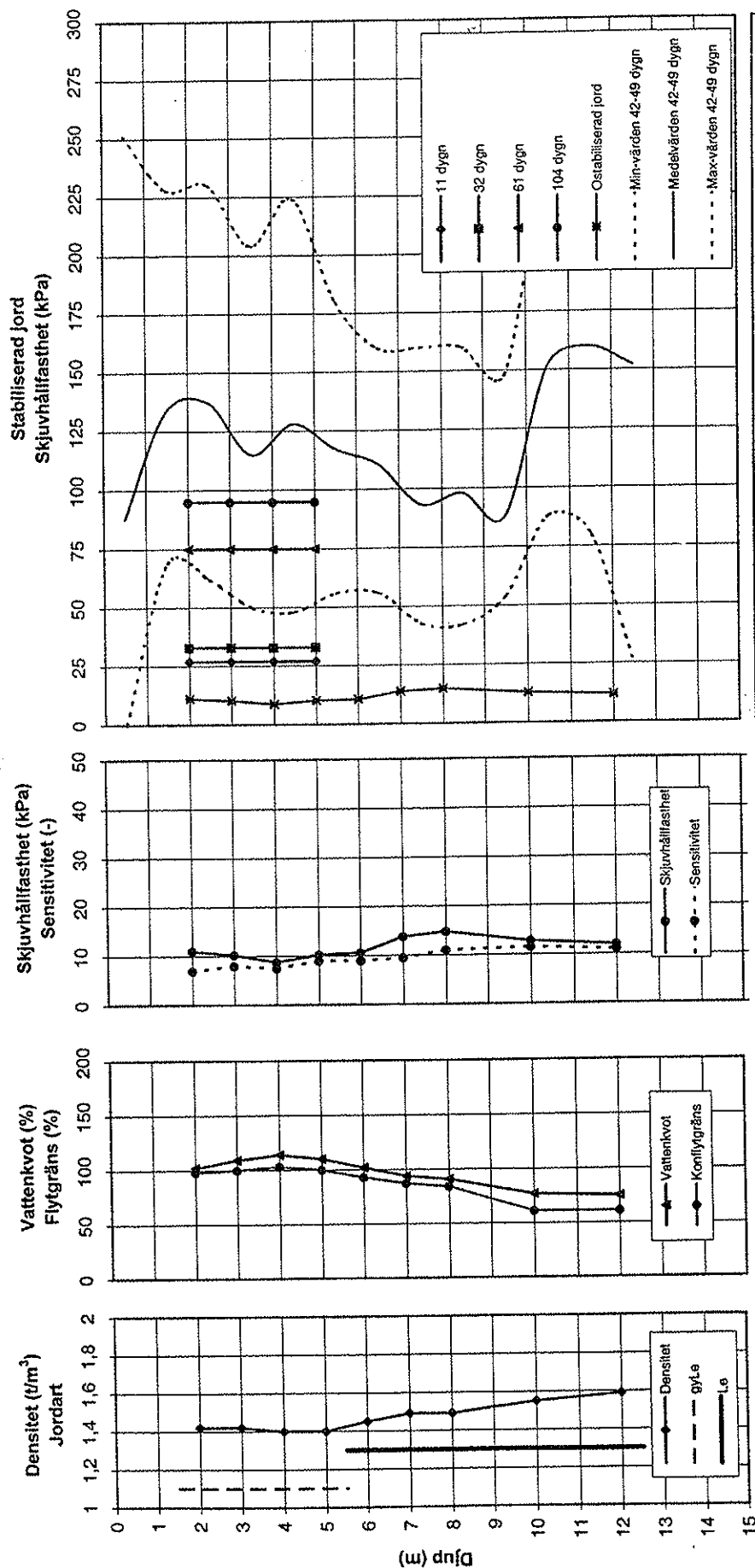
Prov. metod: KPS	Antal pelagr./pelare: 3/12 st
Bindem. mängd labb: 80 kg/m ³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 80 kg/m ³	Verklig inbl. fält: uppgift saknas
Kommentar:	



E18

Arboga - Köping

Jordprov 6/400, Inbl. 6/400, Pelare på sträckan 6/300 - 6/520

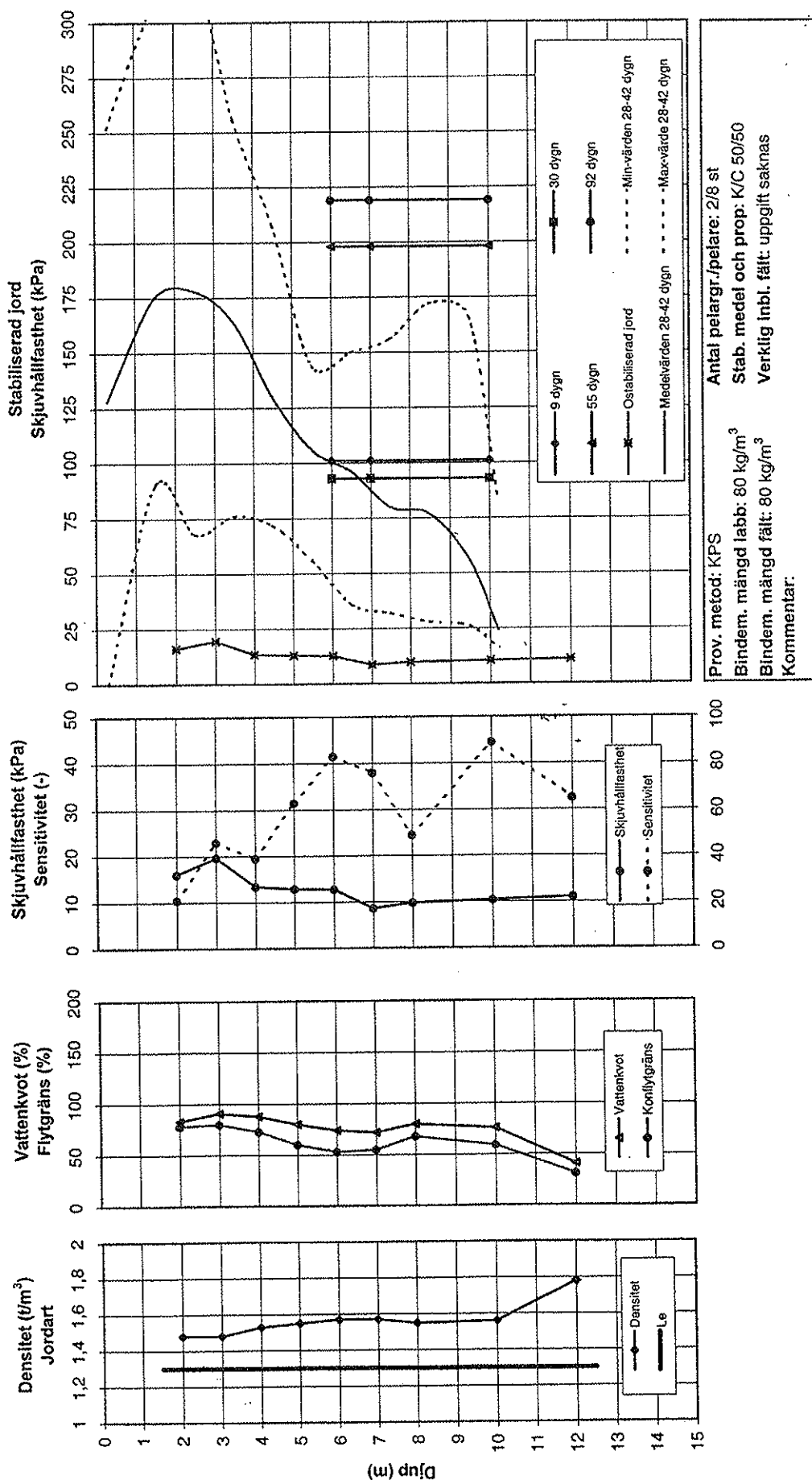


Prov. metod: KPS Antal pelagr./pelare: 4/12 st

Bindem. mängd labb: 80 kg/m³ Stab. medel och prop: K/C 50/50

Bindem. mängd fält: 80 kg/m³ Verklig inbl. fält: uppgift saknas

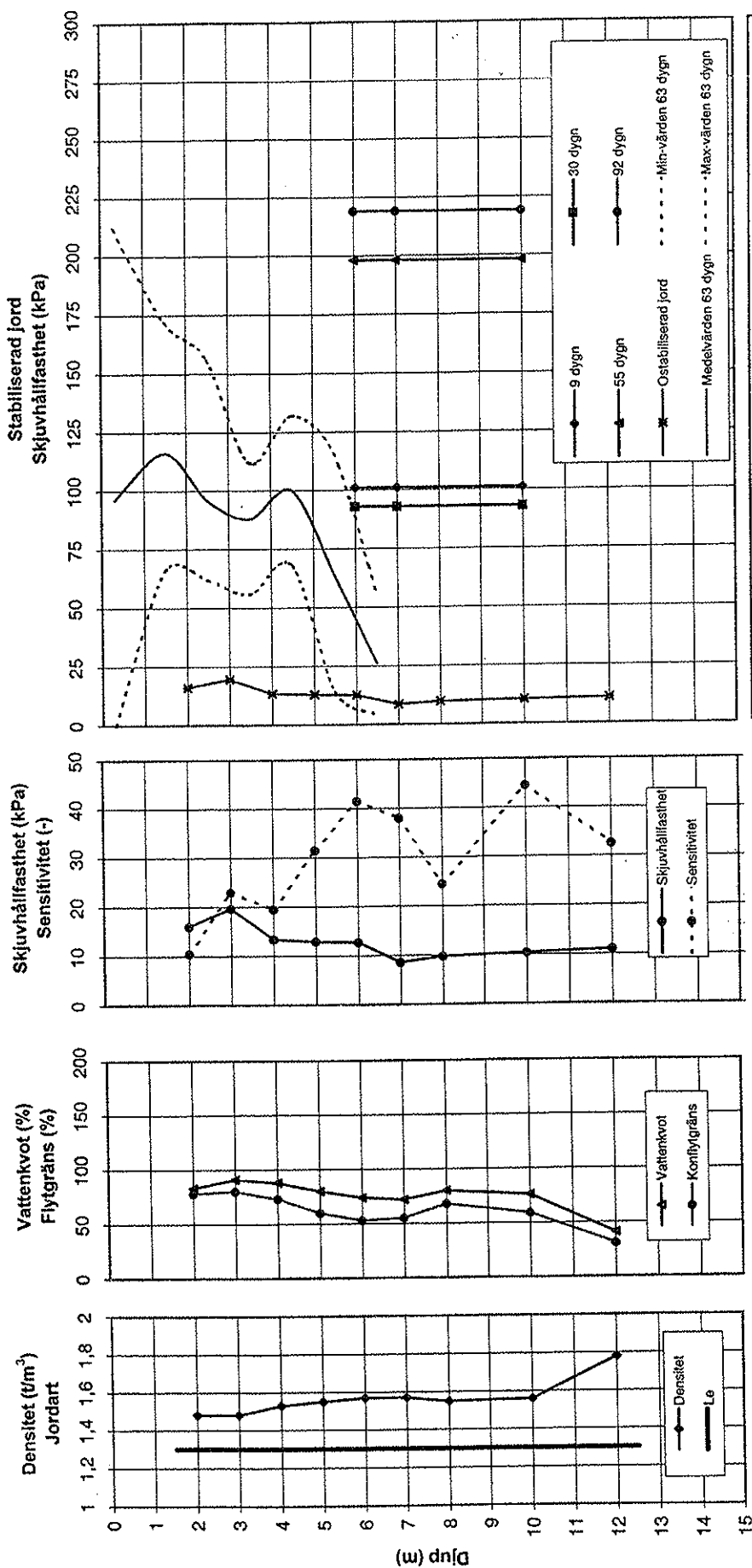
Kommentar:



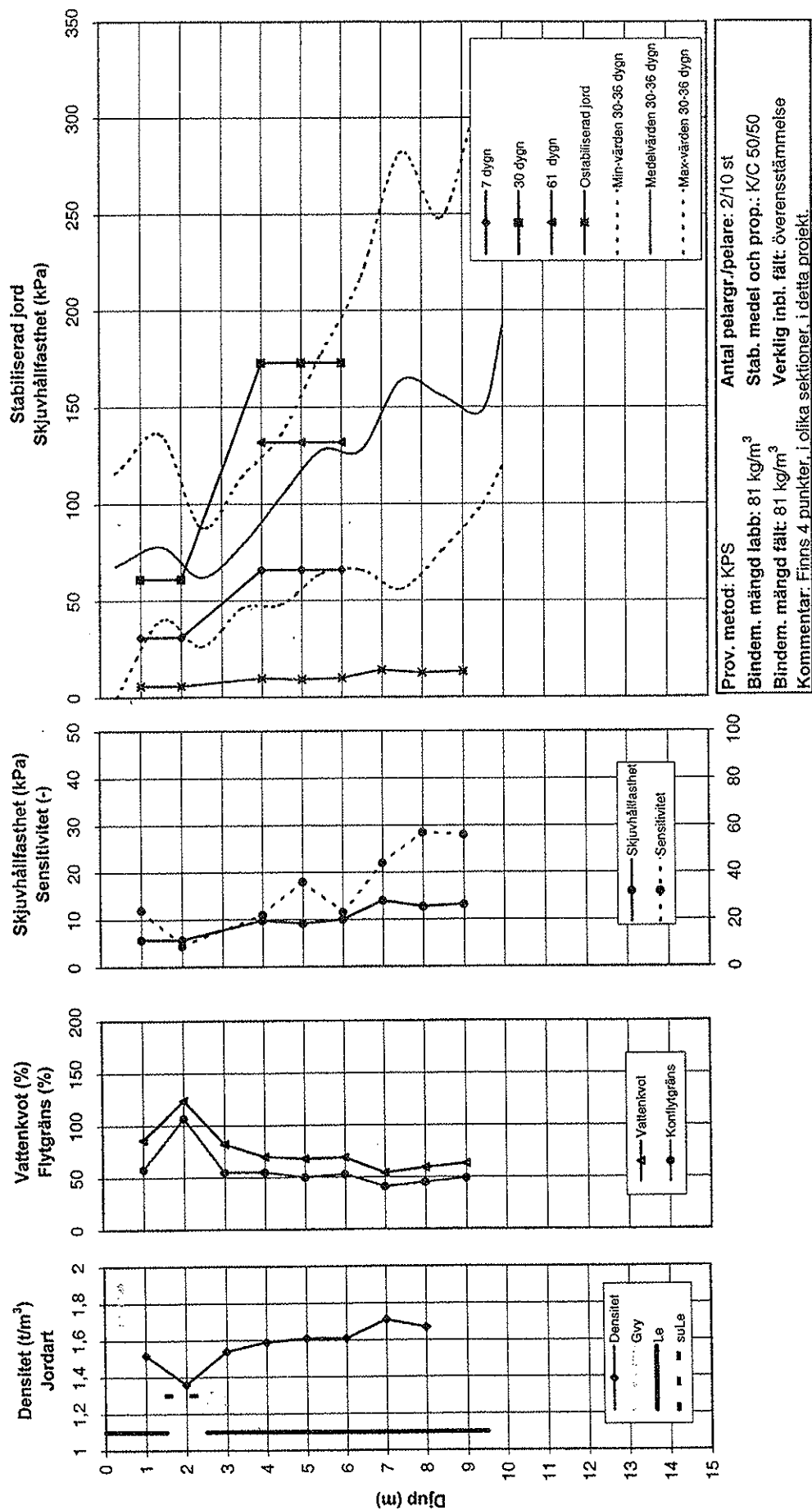
E18

Arboga - Köping

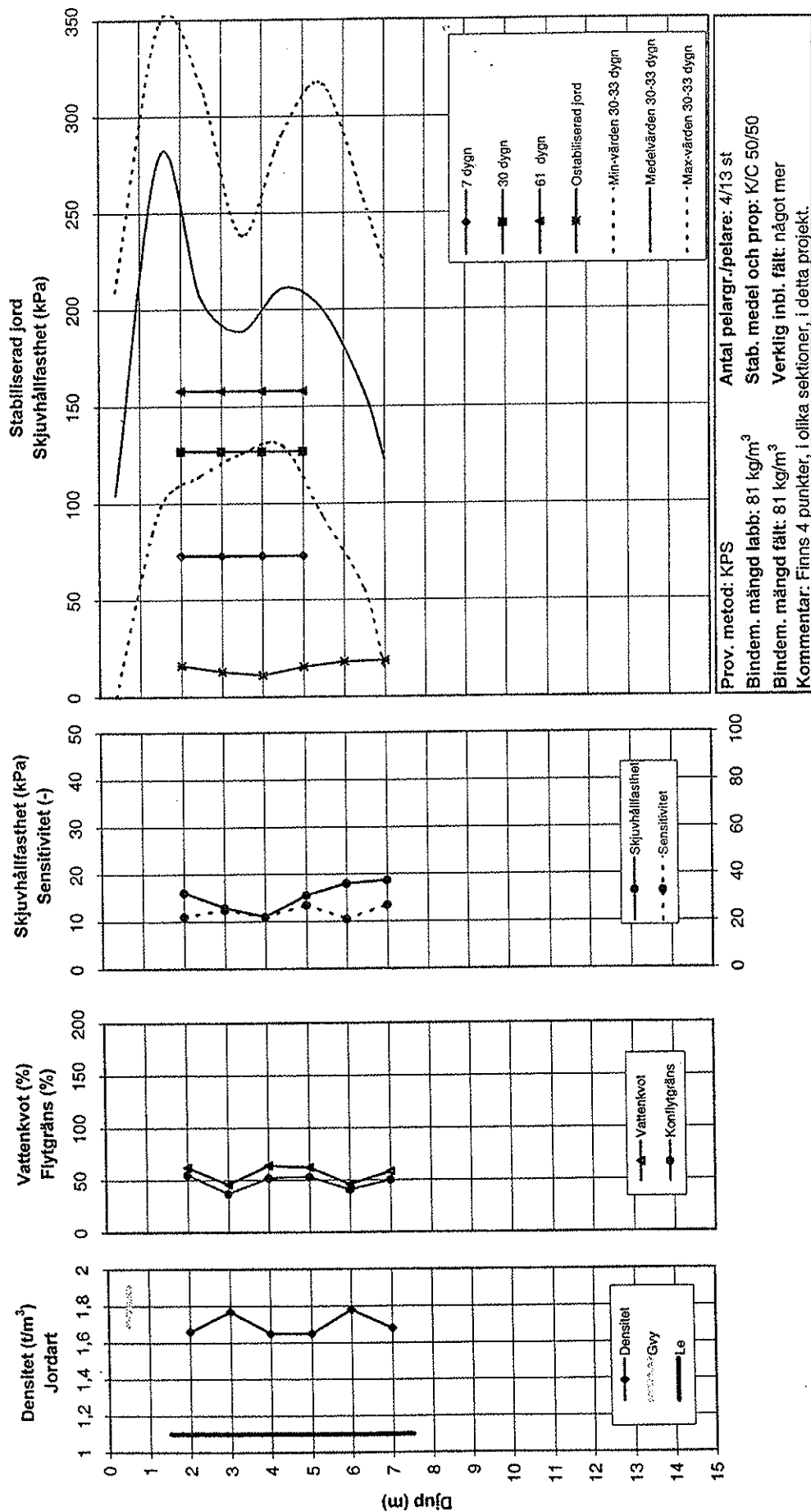
Jordprov 11/480, Inbl. 11/480, Pelare på sträckan 11/330-11/530

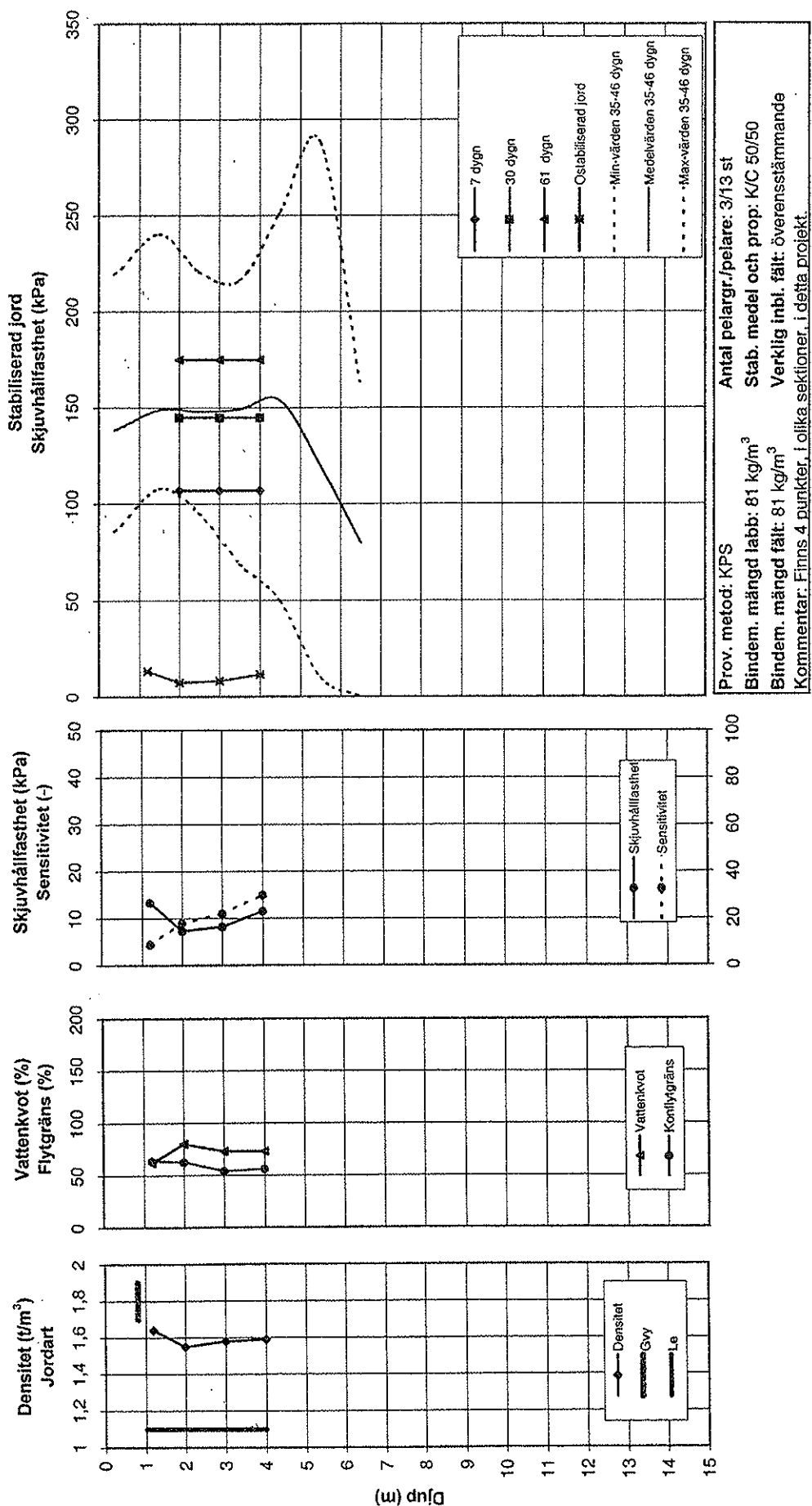


Prov. metod: KPS	Antal pelargr./pelare: 2/8 st
Bindem. mängd labb: 80 kg/m ³	Stab. medel och prop: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 80 kg/m ³	Verklig inbl. fält: något mer
Kommentar:	



E20
Eskilstuna- Arphus
Jordprov 7/520, Inbl. 7/520, Pelare ~7/520

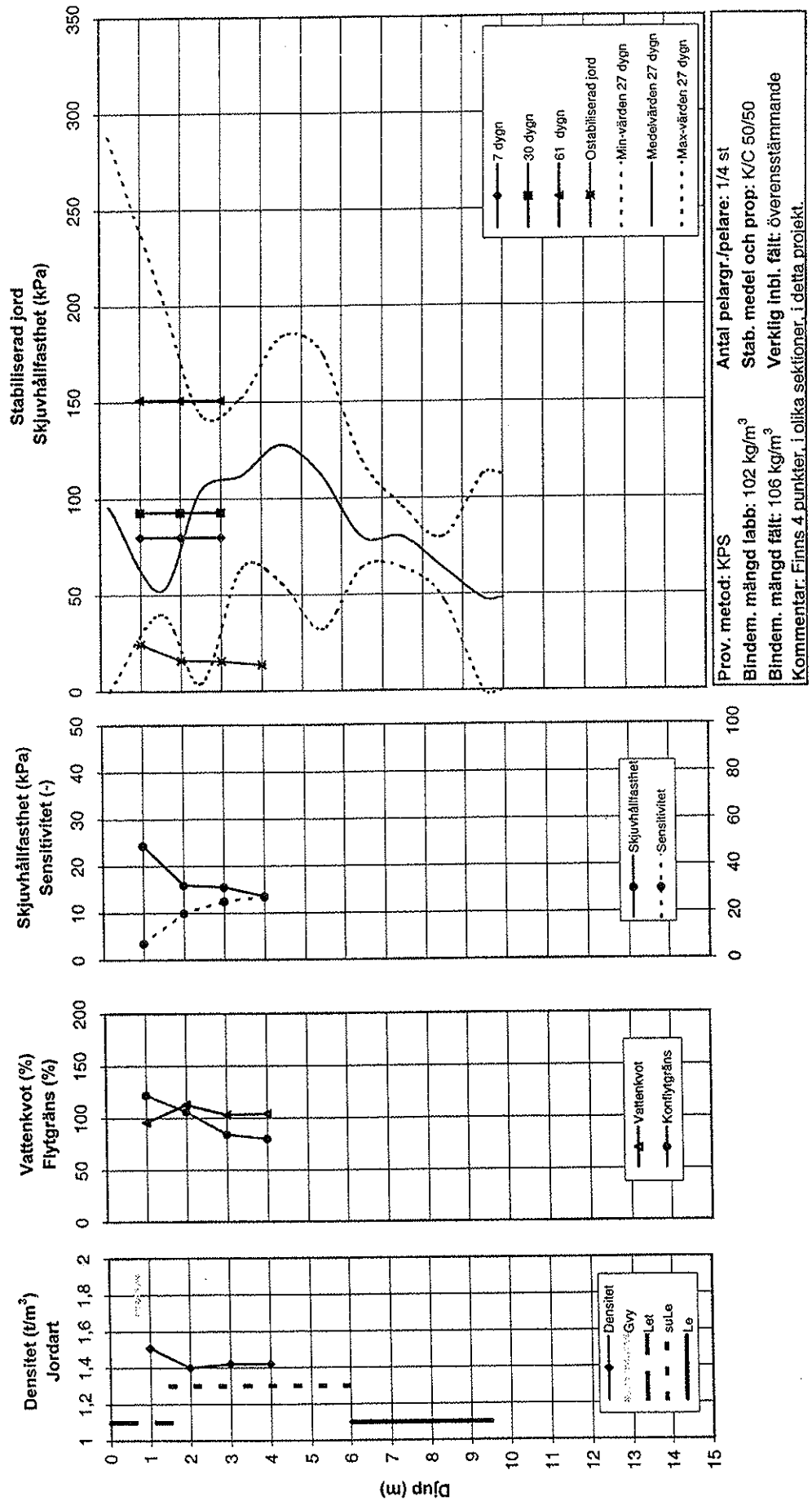


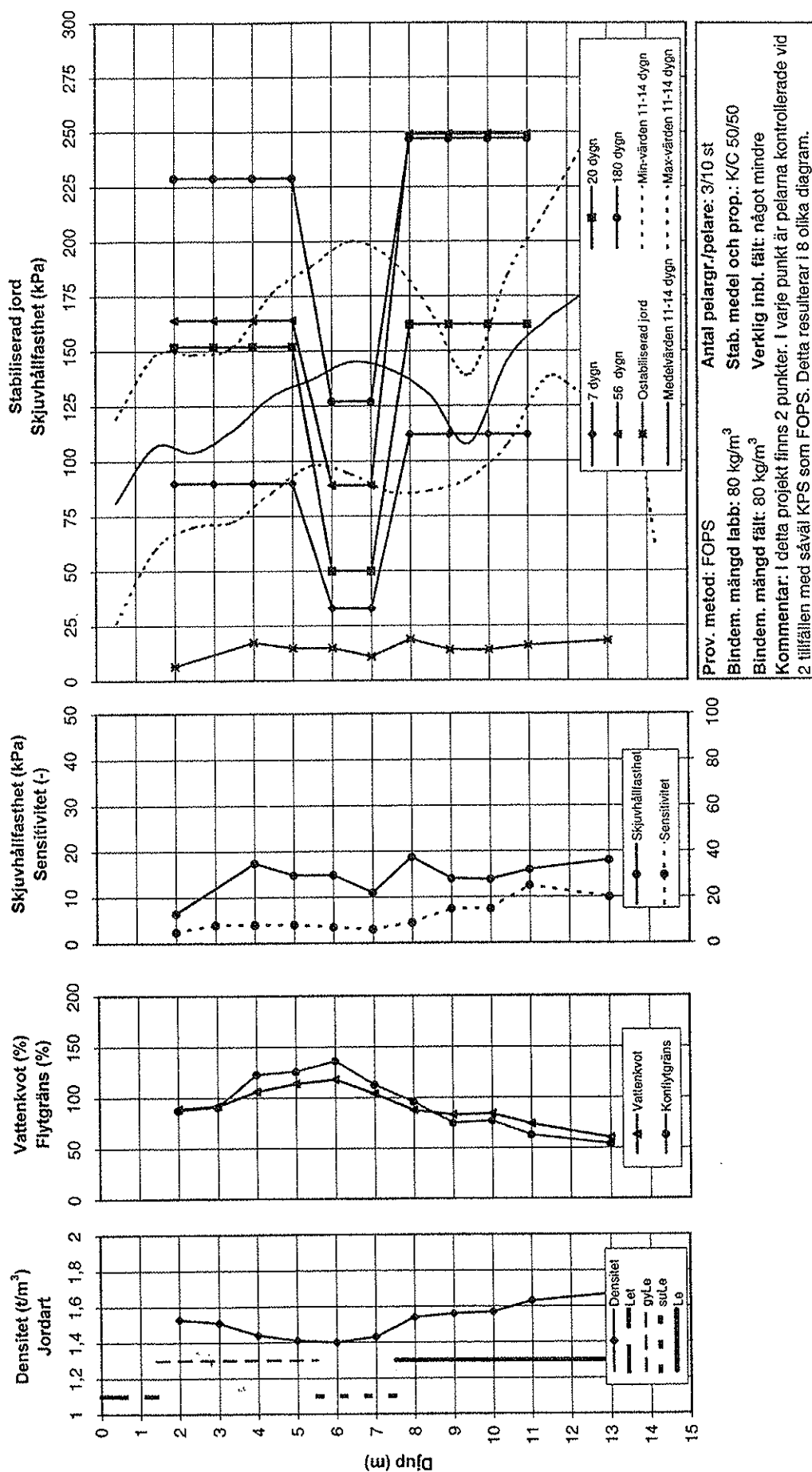


E20

Eskilstuna- Arphus

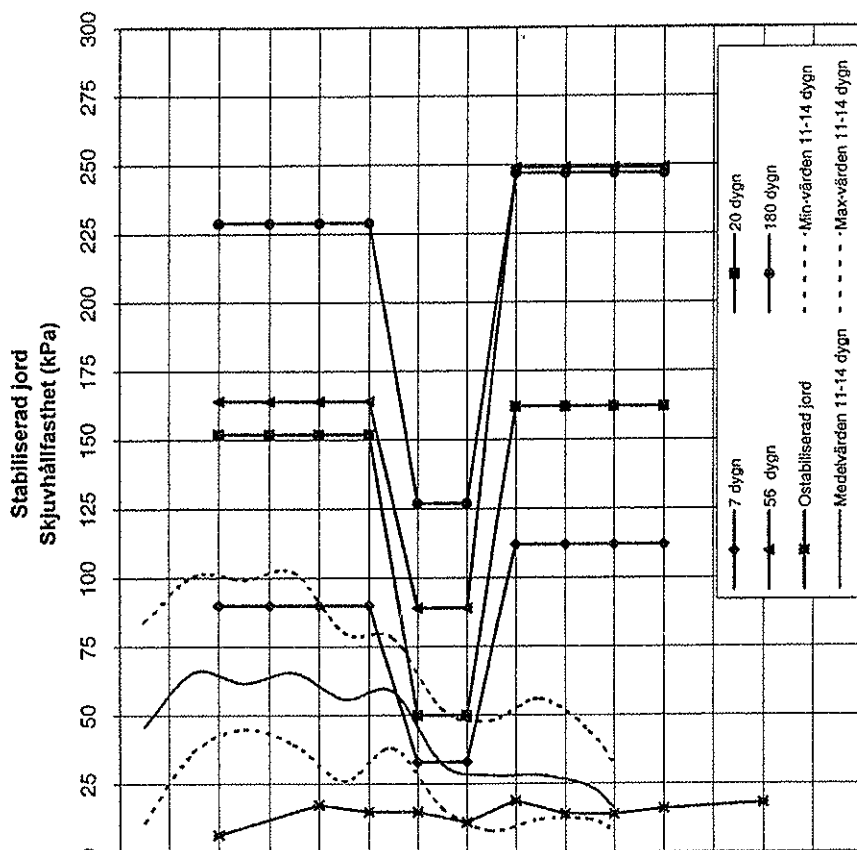
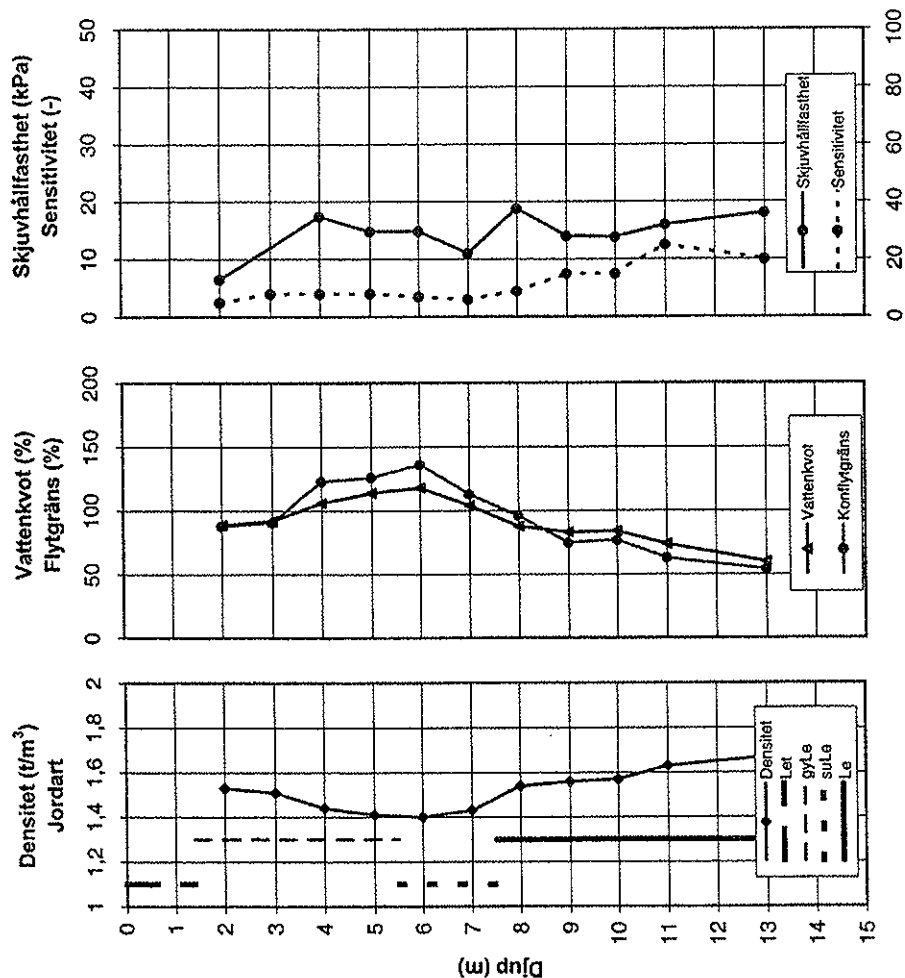
Jordprov 14/920, Inbl. 14/920, Pelare ~14/870



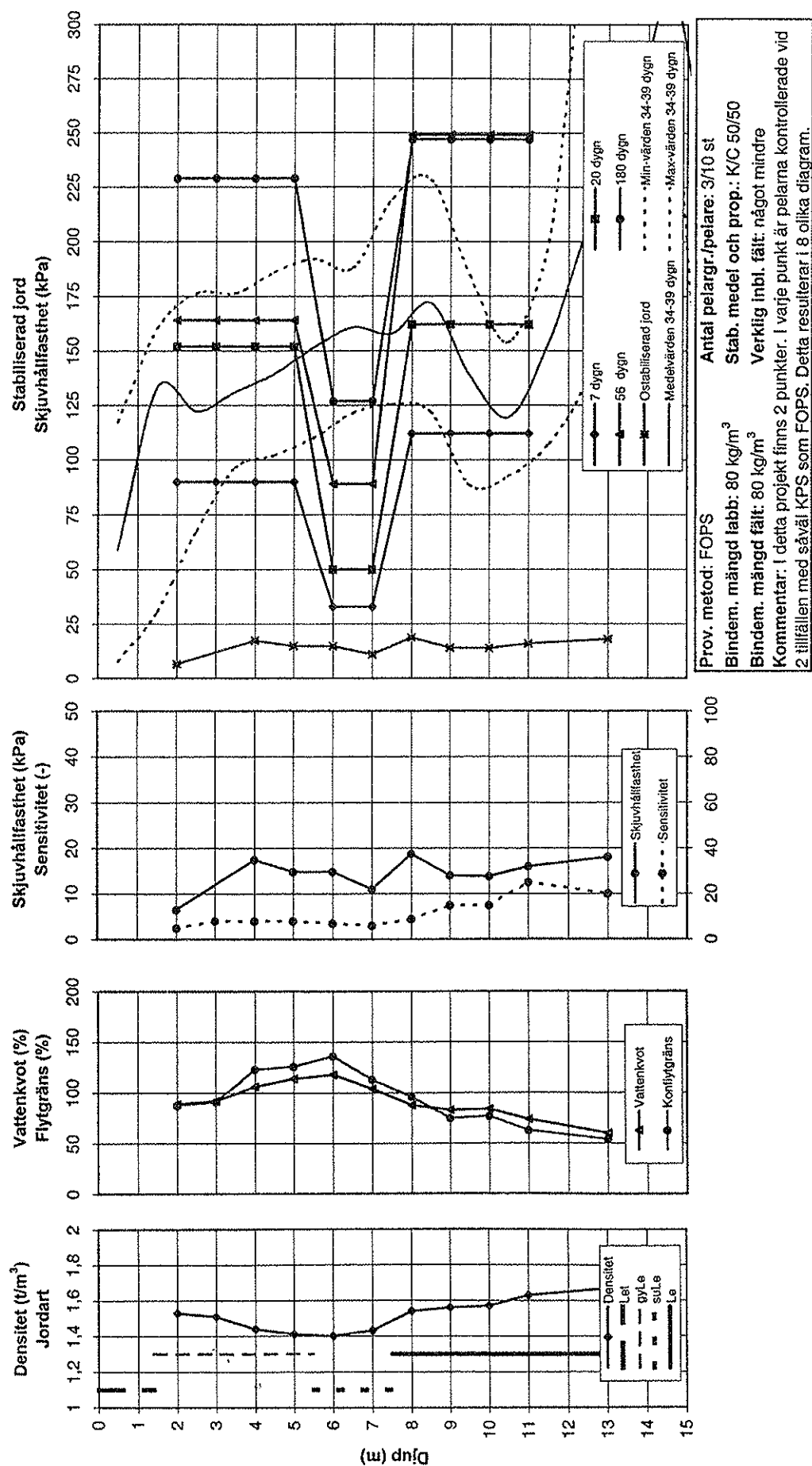


Svealandssbanan

Jordprov 46/180, Inbl. 46/180, Pelare i 46/150

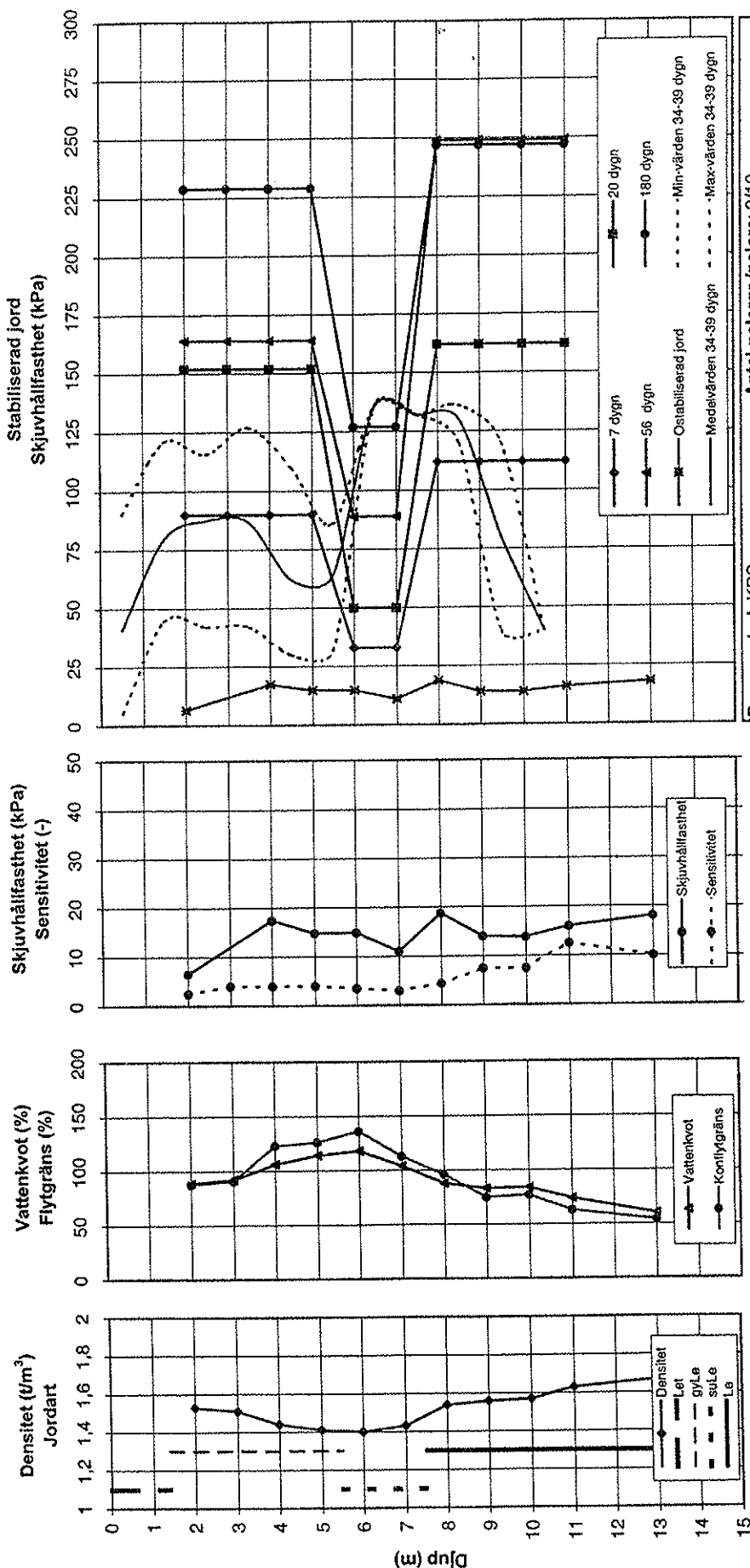


Prov. metod: KPS
 Antal pelargr./pelare: 3/9 st
 Bindem. mängd labb: 80 kg/m³
 Stab. medel och prop.: K/C 50/50
 Bindem. mängd fält: 80 kg/m³
 Verklig inbl. fält: ingen uppgift
 Kommentar: I detta projekt finns 2 punkter. I varje punkt är pelarna kontrollerade vid 2 tillfällen med såväl KPS som FOPS. Detta resulterar i 8 olika diagram.



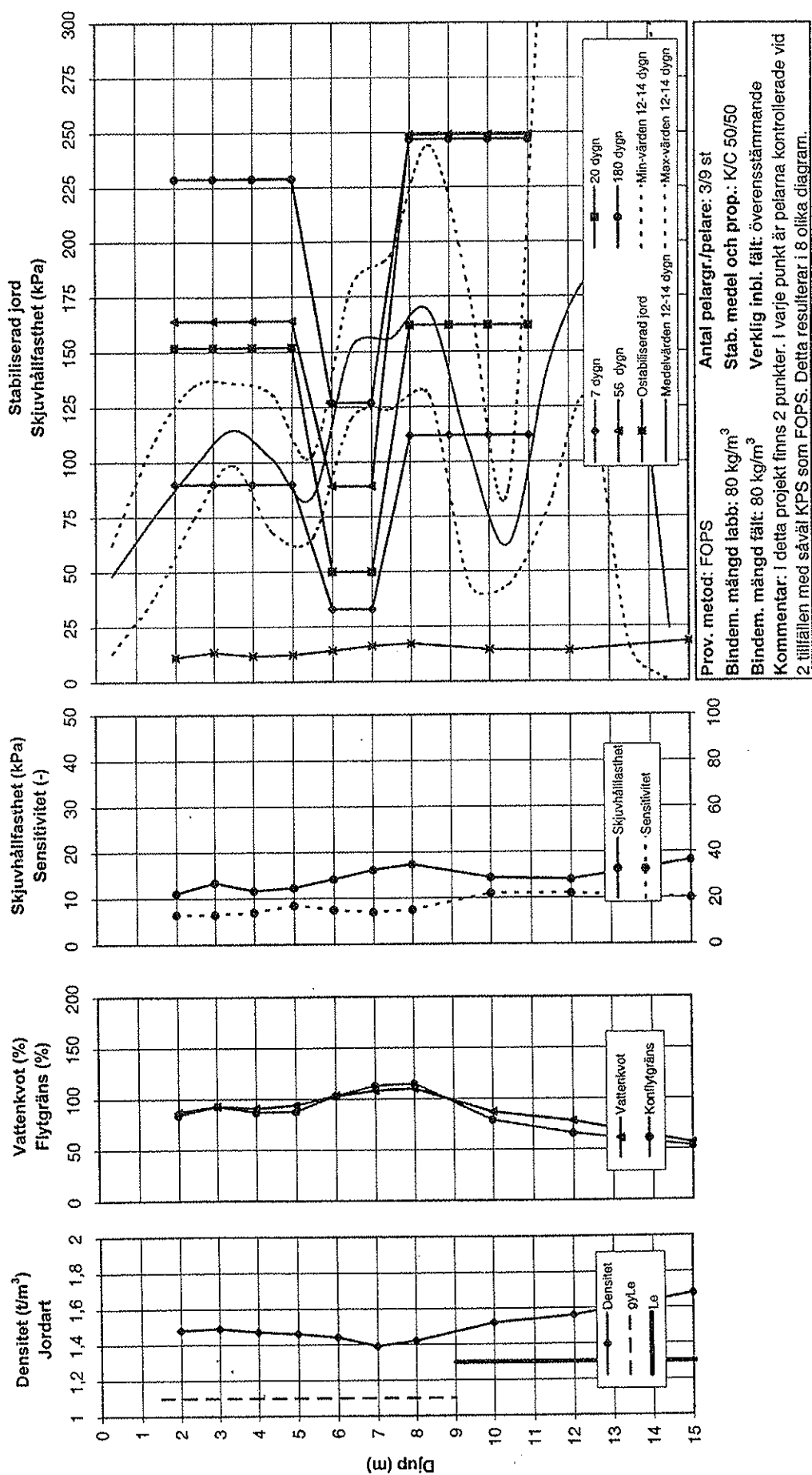
Svealandssbanan

Jordprov 46/180, Inbl. 46/180, Pelare i 46/150



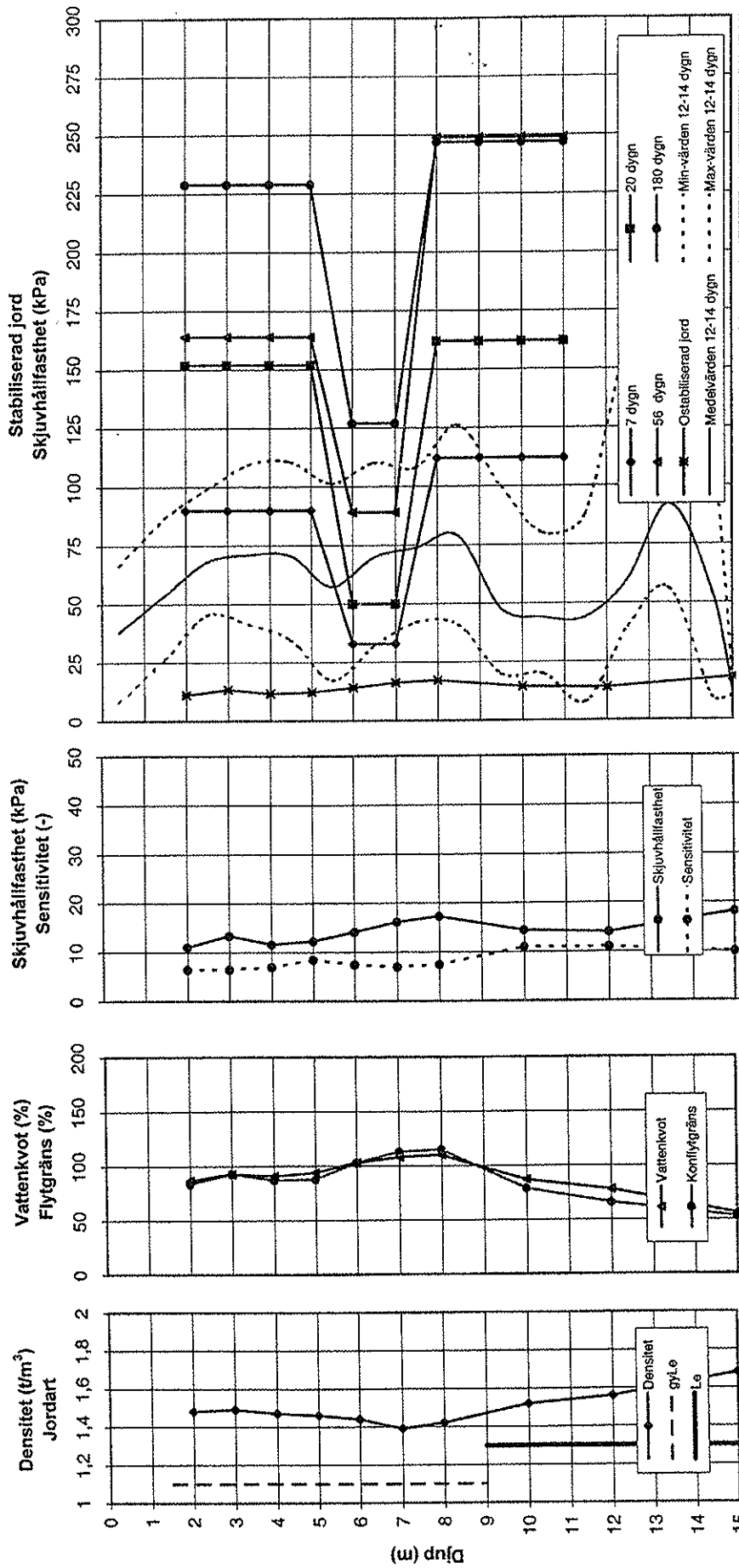
Prov. metod: KPS
 Bindem. mängd labb: 80 kg/m³
 Bindem. mängd fält: 80 kg/m³
 Kommentar: I detta projekt finns 2 punkter. I varje punkt är pelarna kontrollerade vid 2 tillfällen med såväl KPS som FOPS. Detta resulterar i 8 olika diagram.

Antal pelargr./pelare: 3/10
 Stab. medel och prop.: K/C 50/50
 Verklig inbl. fält: ingen uppgift

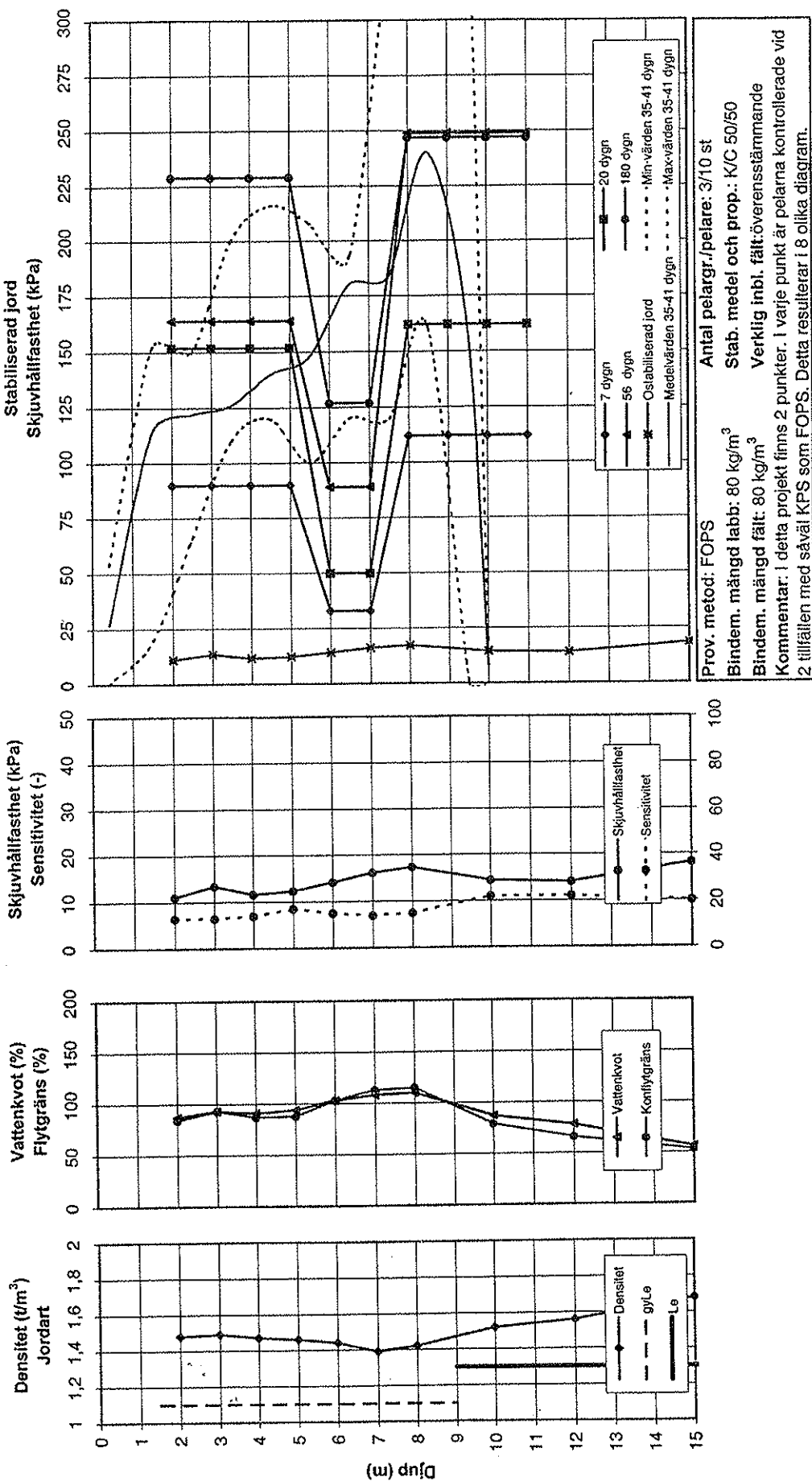


Svealandssbanan

Jordprov 46/380, Inbl. 46/180, Pelare 46/350

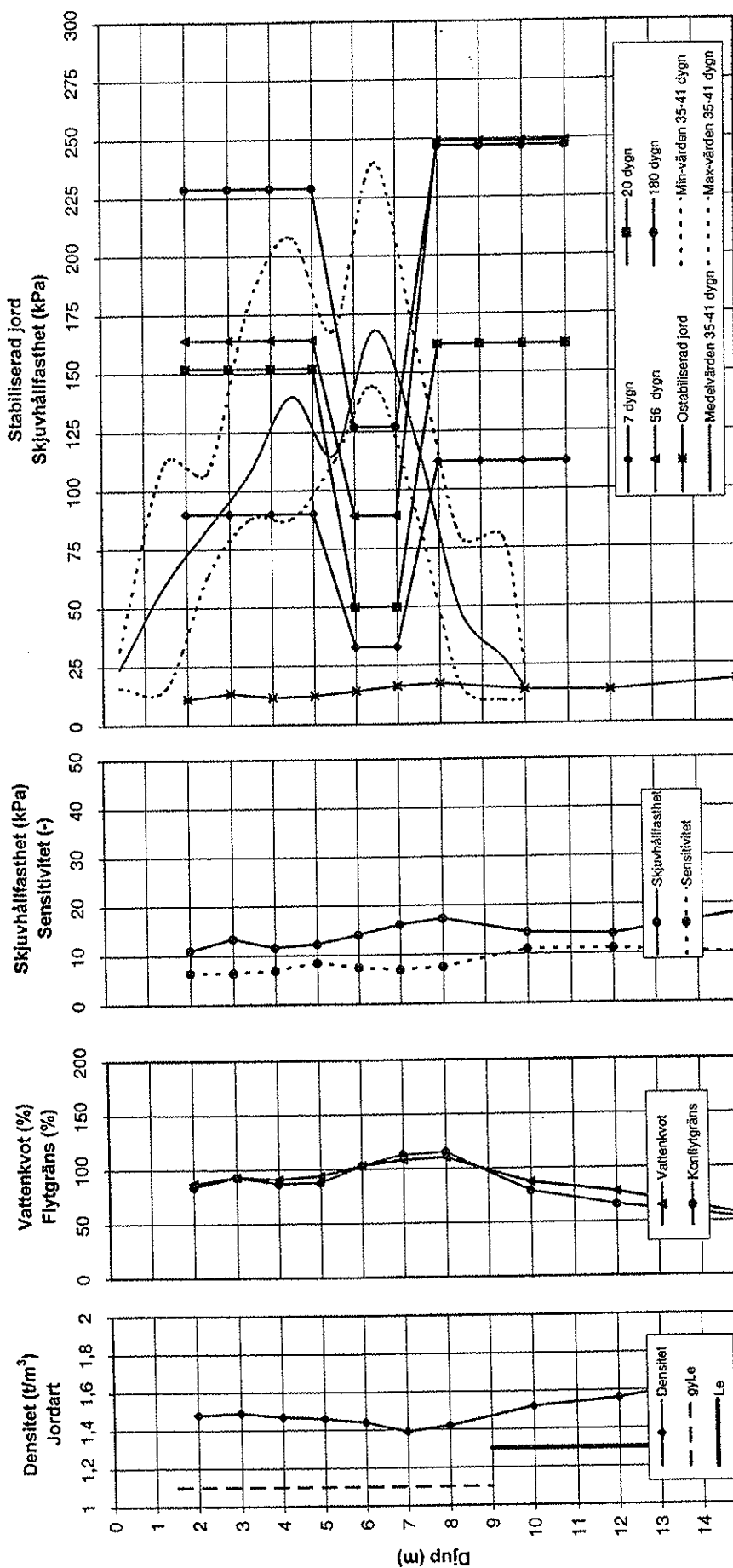


Prov. metod: KPS Antal pelargr./pelare: 3/10 st
Bindem. mängd labb: 80 kg/m³ Stab. medel och prop.: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 80 kg/m³ Verklig inbl. fält: ingen uppgift
Kommentar: I detta projekt finns 2 punkter. I varje punkt är pelarna kontrollerade vid 2 tillfällen med såväl KPS som FOPS. Detta resulterar i 8 olika diagram.



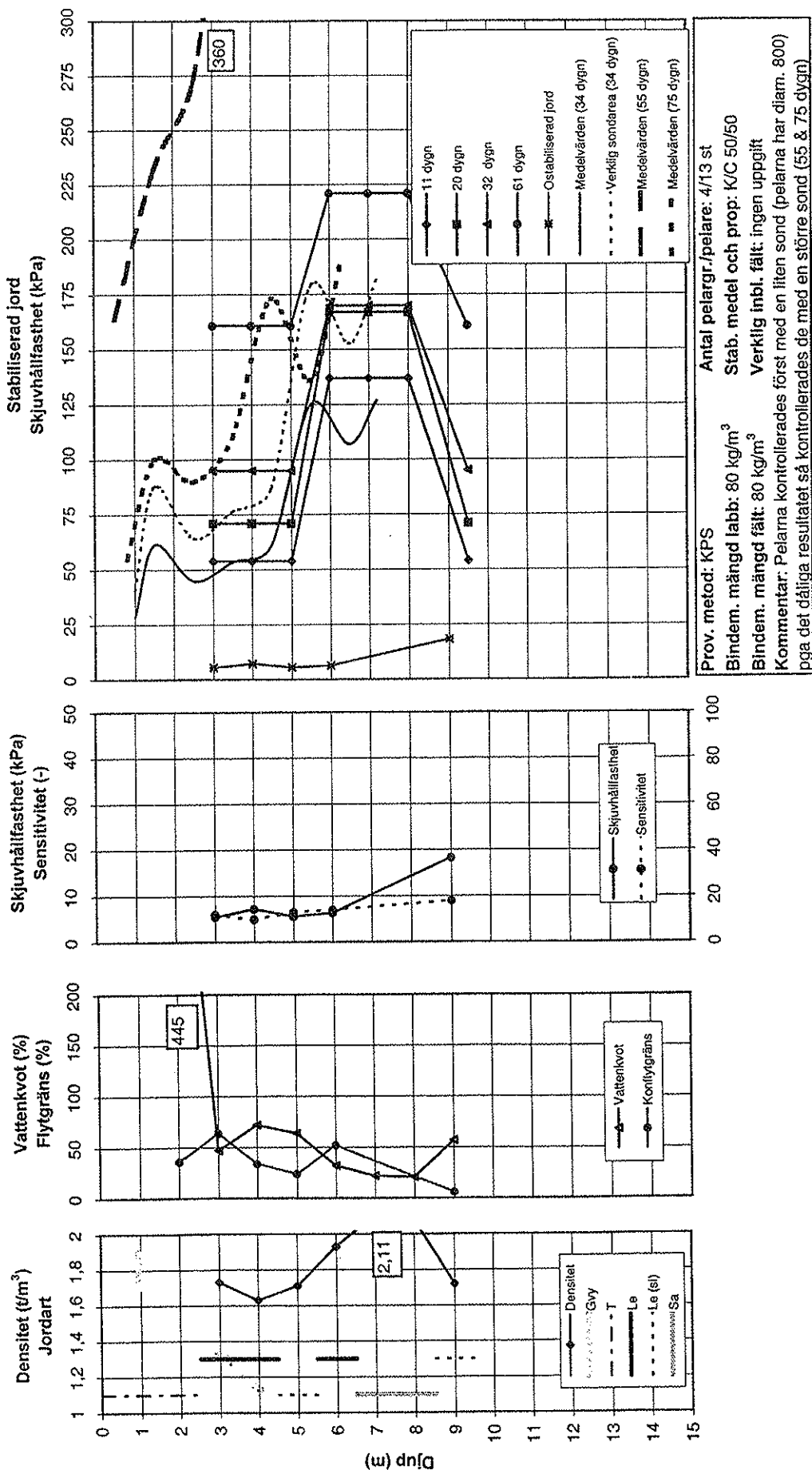
Svealandssbanan

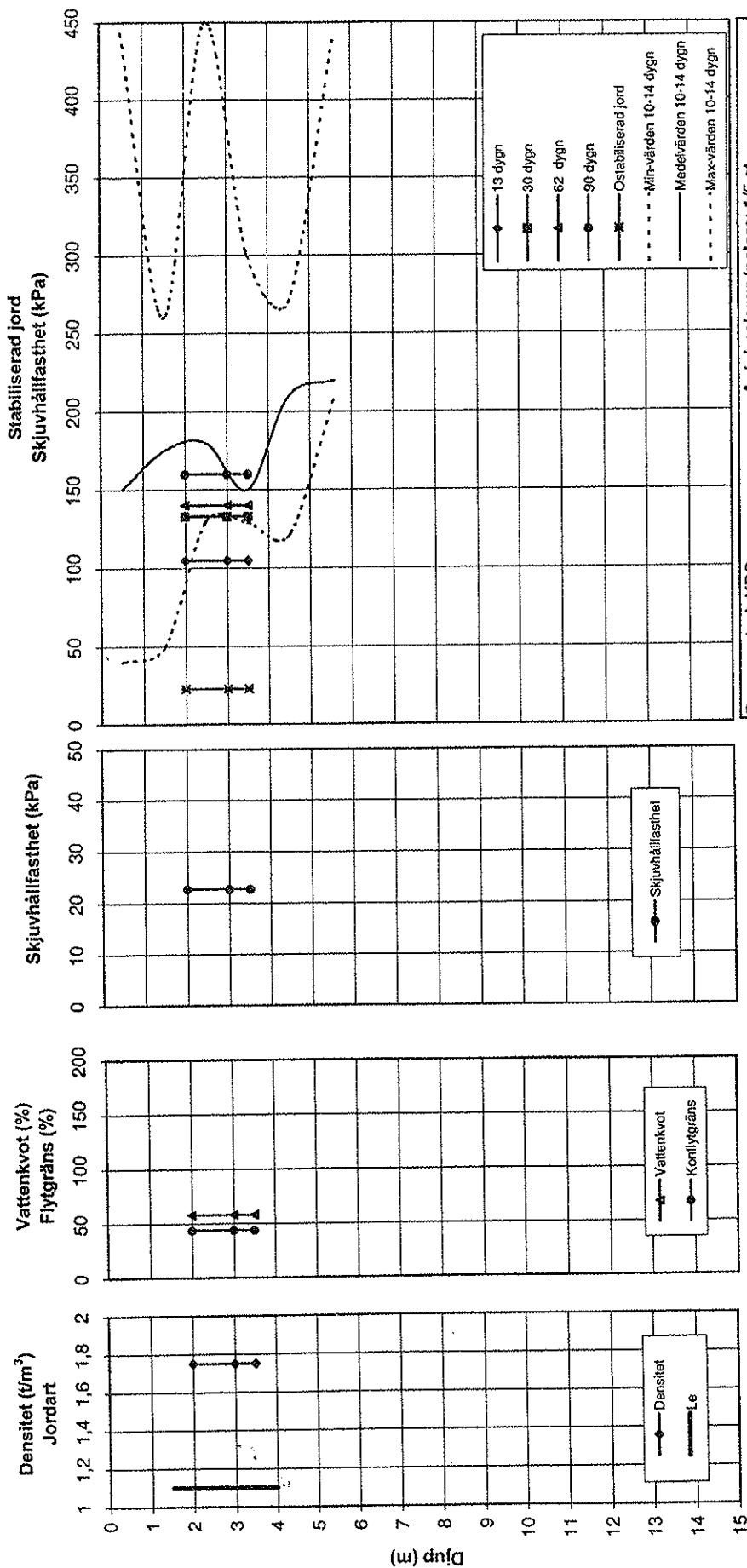
Jordprov 46/380, Inbl. 46/180, Pelare 46/350



Prov. metod: KPS
 Bindem. mängd labb: 80 kg/m³
 Bindem. mängd fält: 80 kg/m³
 Kommentar: I detta projekt finns 2 punkter. I varje punkt är pelarna kontrollerade vid 2 tillfällen med såväl KPS som FOPS. Detta resulterar i 8 olika diagram.

Antal pelargr./pelare: 3/10 st
 Stab. medel och prop.: K/C 50/50
 Verklig inbl. fält: ingen uppgift





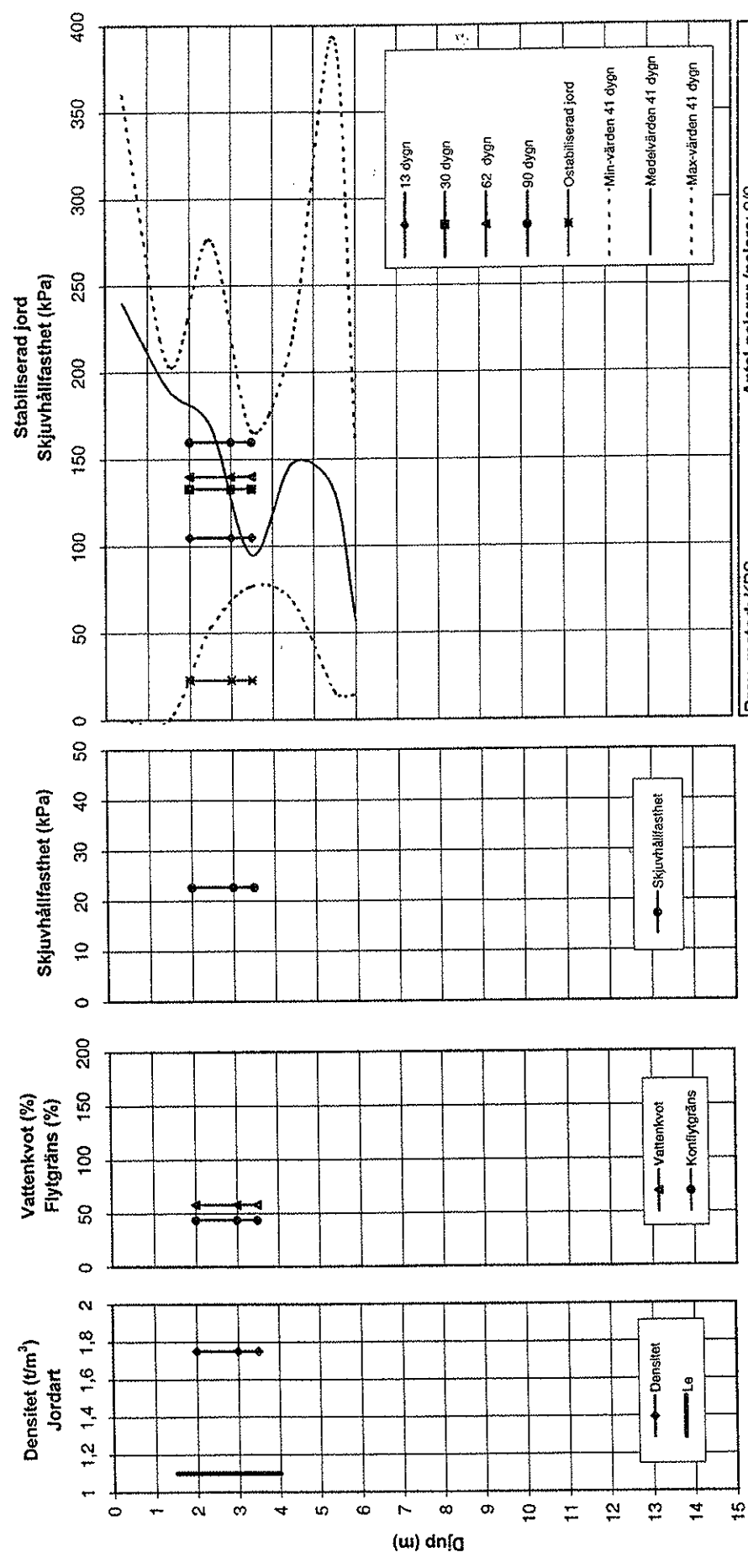
Prov. metod: KPS Antal pelargr./pelare: 1/5 st

Bindem. mängd labb: 80 kg/m^3 Stab. medel och prop.: K/C 50/50

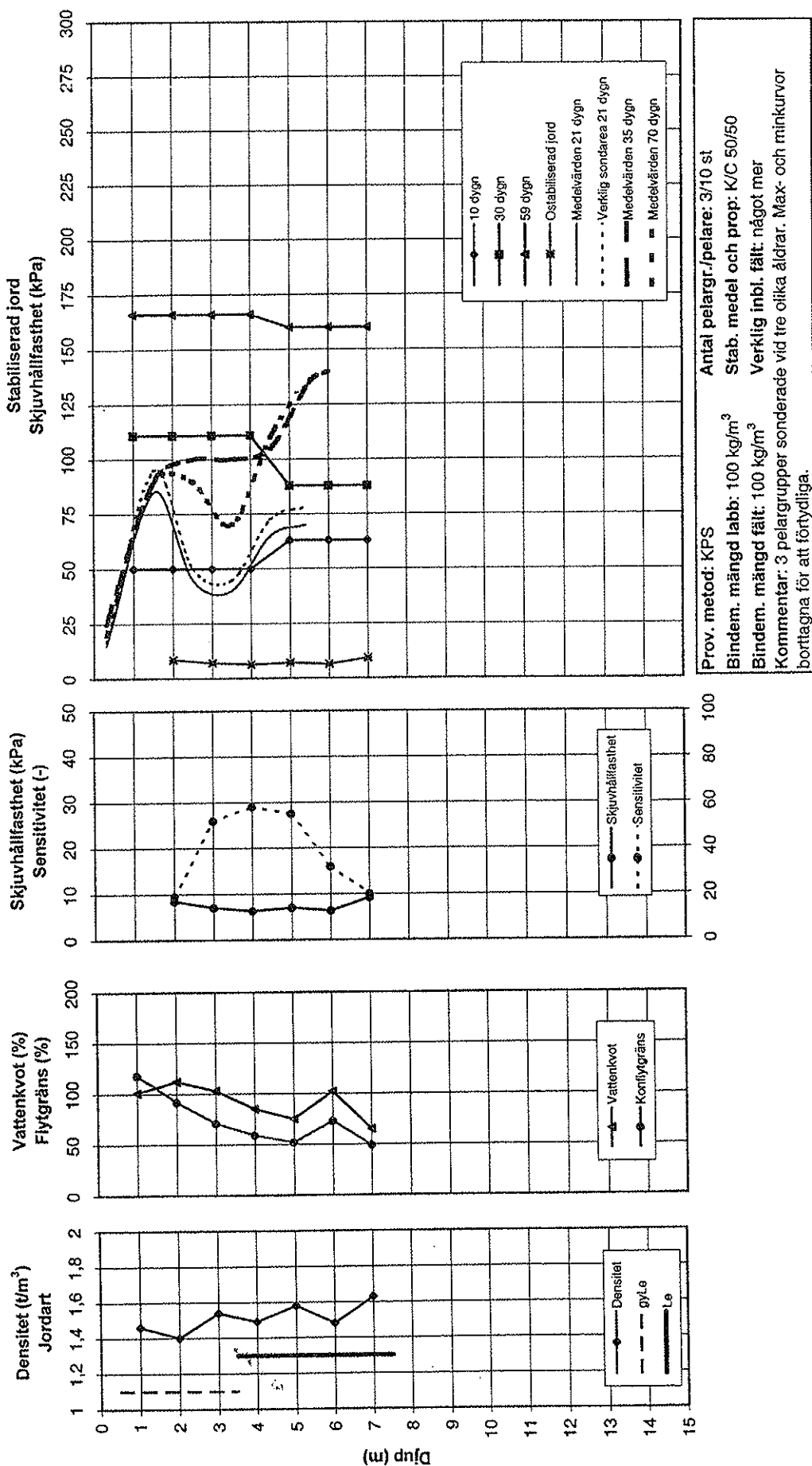
Bindem. mängd fält: 88 kg/m^3 Verklig inbl. fält: något mindre

Kommentar: Finns även diagram för pelare i samma område som kontrollerats efter 41 dygn.

Väg 841
Kallhäll- Kungsängen
Jordprov 0/240, Inbl. 0/240, Pelare 0/310

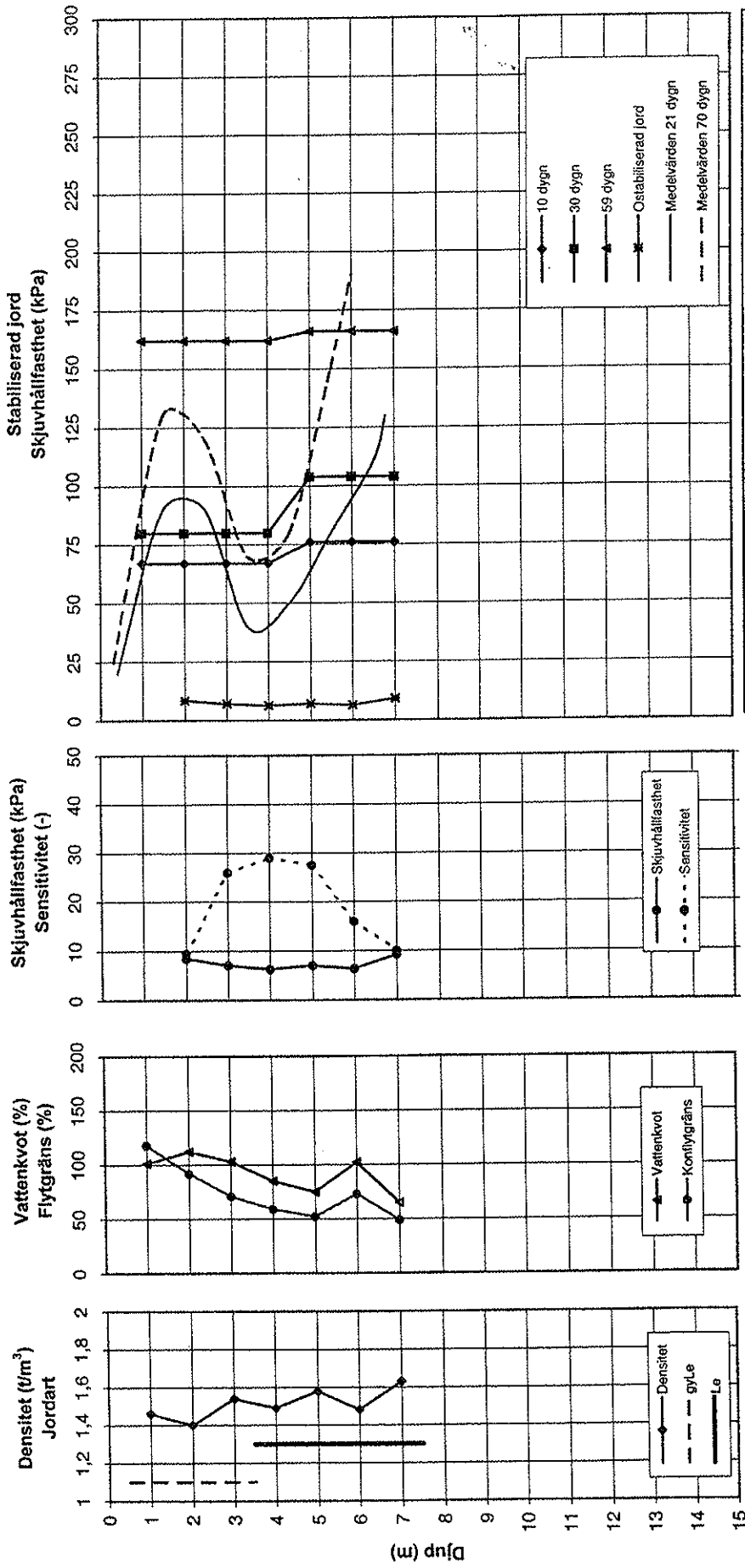


Prov. metod: KPS Antal pelargr./pelare: 2/9
Bindem. mängd labb: 80 kg/m³ Stab. medel och prop.: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 88 kg/m³ Verklig inbl. fält: ingen uppgift
Kommentar: Finns även diagram för pelare i samma område som kontrollerats efter 10-14 dygn.

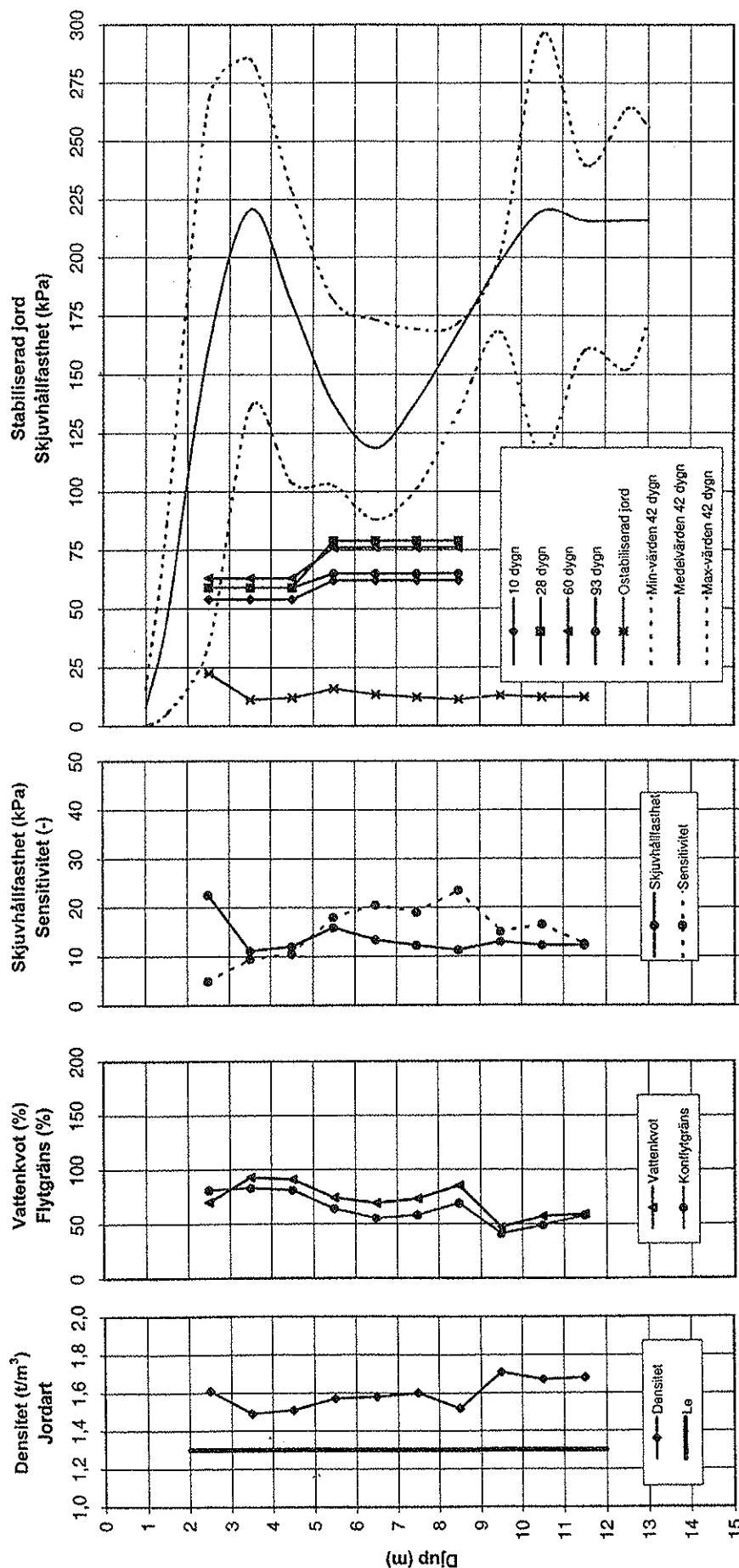


Prov. metod: KPS
 Bindem. mängd labb: 100 kg/m³
 Bindem. mängd fält: 100 kg/m³
 Kommentar: 3 pelargrupper sonderade vid tre olika åldrar. Max- och minkurvor borttagna för att förtydliga.

Mälarbanan
Kungsängen - Tibble
Jordprov 27/310, Inbl. 27/310, Pelare i 27/320



Prov. metod: KPS Antal pelargr./pelare: 2/7 st
 Bindem. mängd labb: 120 kg/m³ Stab. medel och prop: K/C 50/50
 Bindem. mängd fält: 120 kg/m³ Verklig inbl. fält: överensstämmande
 Komment: Verklig inblandningsmängd i fält är något mer än projekterad för pelargruppen sonderad efter 70 dygn.



Prov. metod: KPS

Bindem. mängd labb: $120 kg/m^3$

Bindem. mängd fält: $120 kg/m^3$

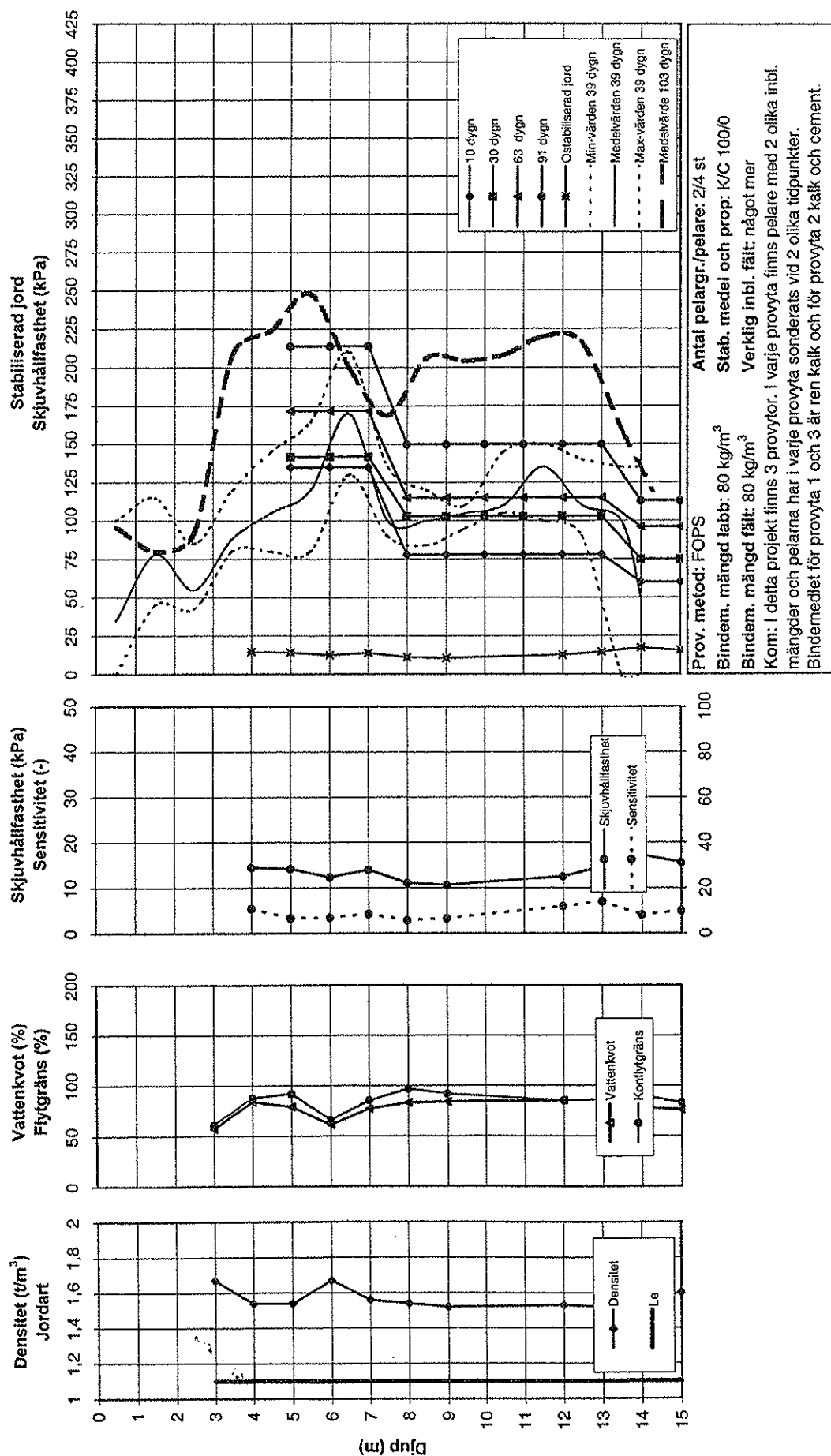
Kommentar:

Antal pelargr./pelare: 3/10 st

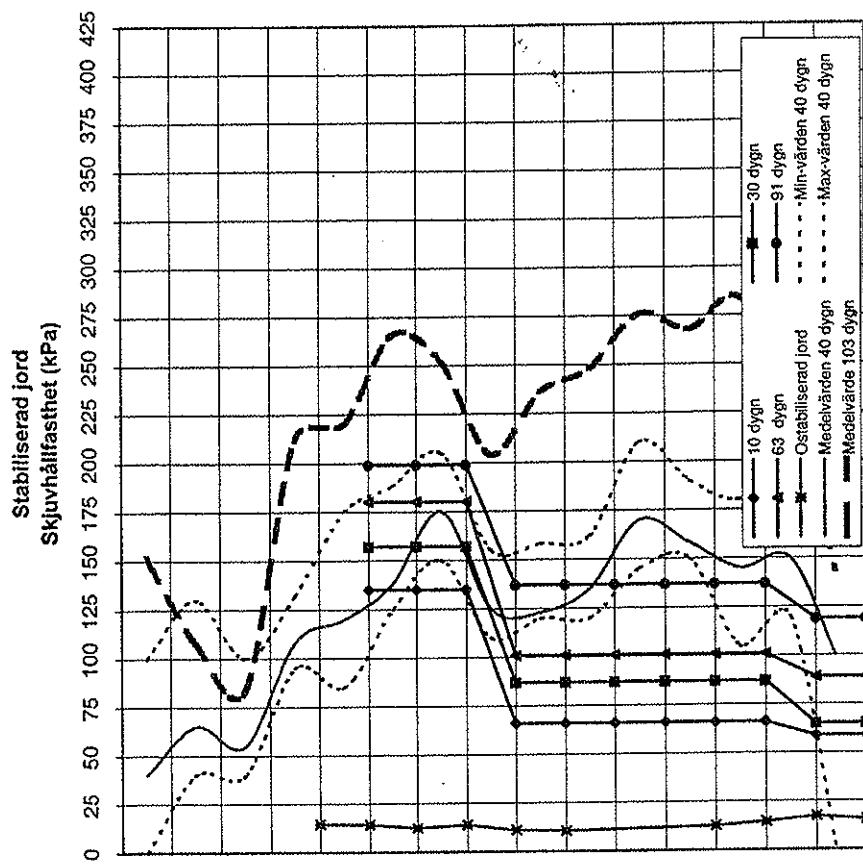
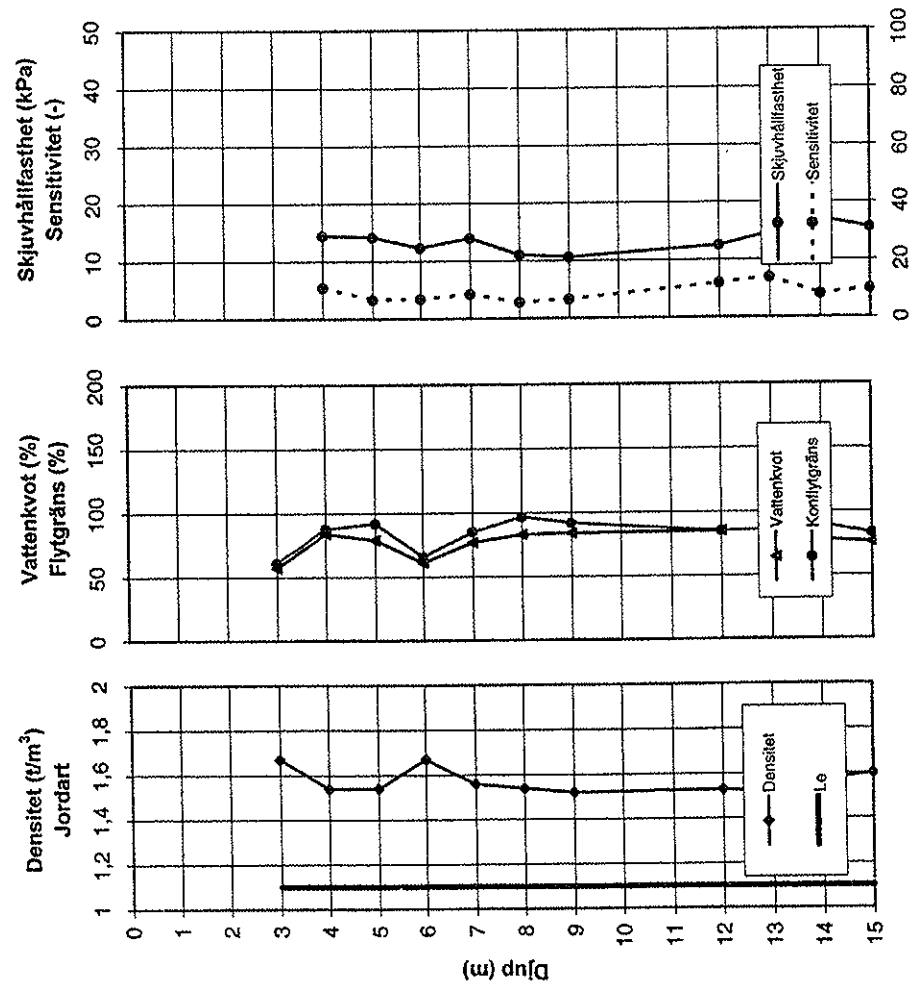
Stab. medel och prop: K/C 50/50

Verklig inbl. fält: något mer

Västkusten

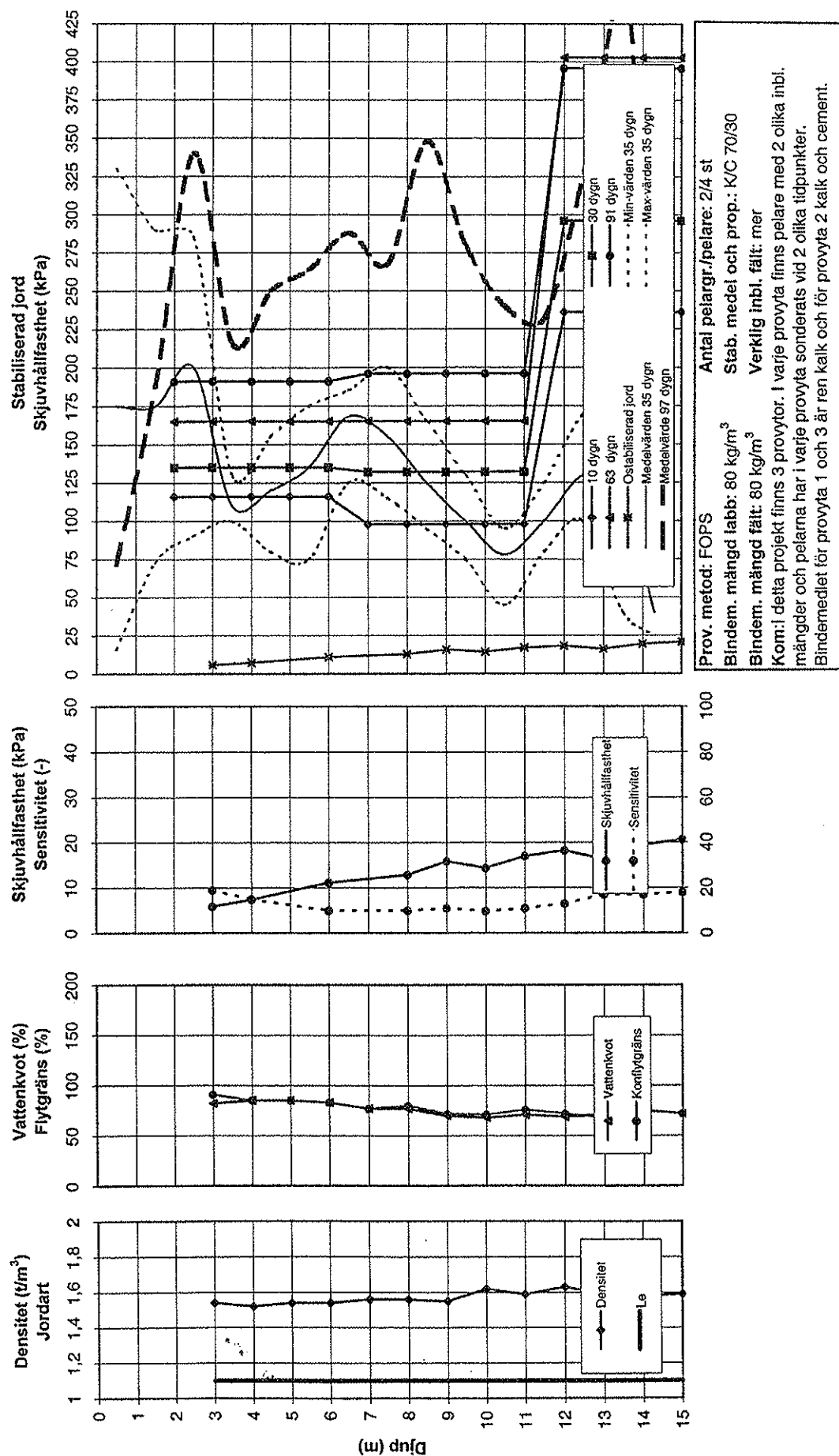


Eka Nobel
Provyta 1
Jordprov, inbl. och Pelare i Provyta 1



Prov. metod: FOPS
Bindem. mängd labb: 106 kg/m³
Bindem. mängd fält: 106 kg/m³
Kom: I detta projekt finns 3 provtytor. I varje provtyta finns pelare med 2 olika inbl. mängder och pelarna har i varje provtyta sonderats vid 2 olika tidpunkter.
Bindemedlet för provtyta 1 och 3 är ren kalk och för provtyta 2 kalk och cement.

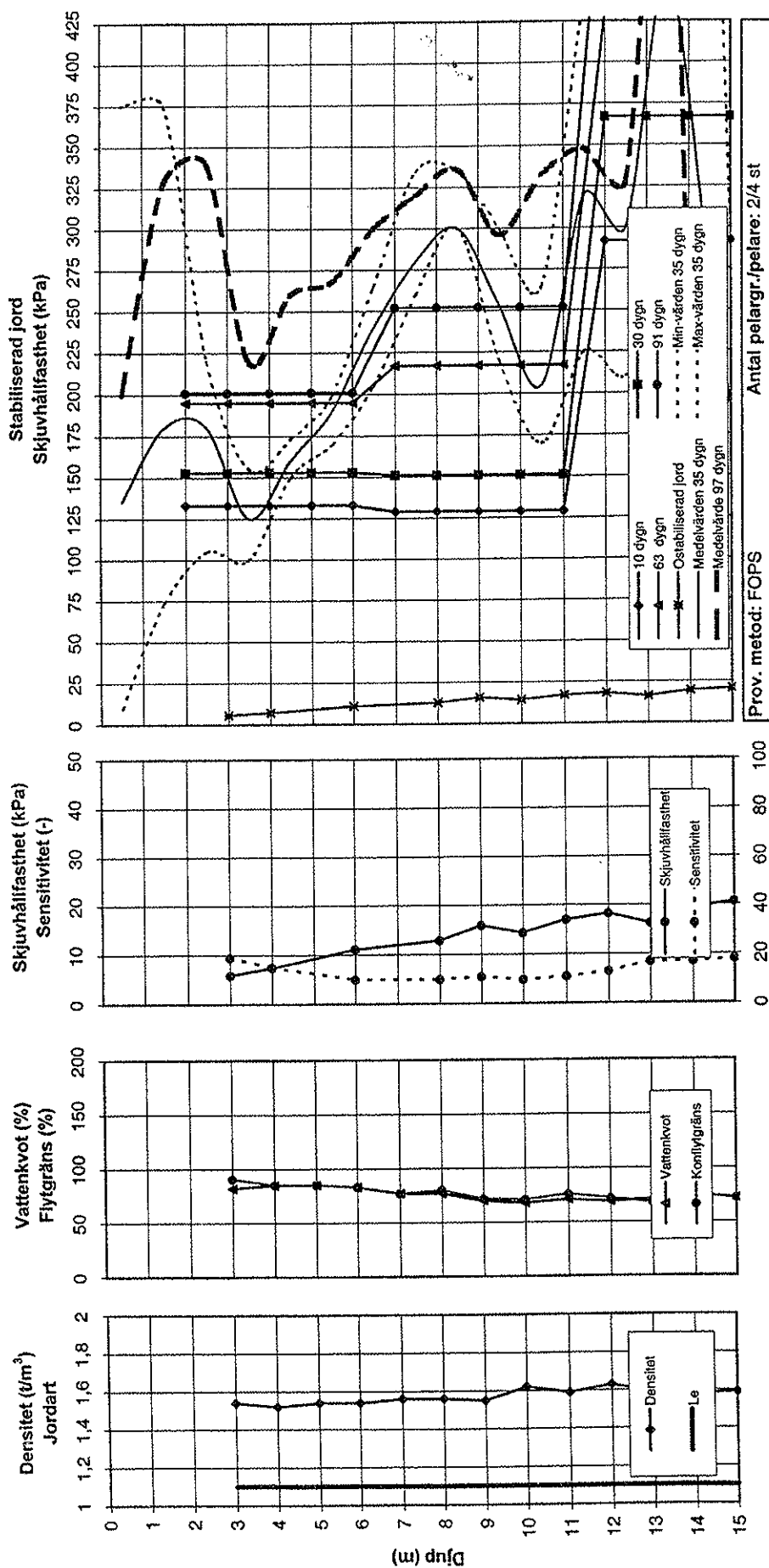
Antal pelargr./pelare: 2/4 st
Stab. medel och prop.: K/C 100/0
Verklig inbl. fält: något mer



Eka Nobel

Provyta 2

Jordprov, Inbl. och Pelare i Provyta 2



Prov. metod: FOPS

Bindem. mängd labb: 106 kg/m^3

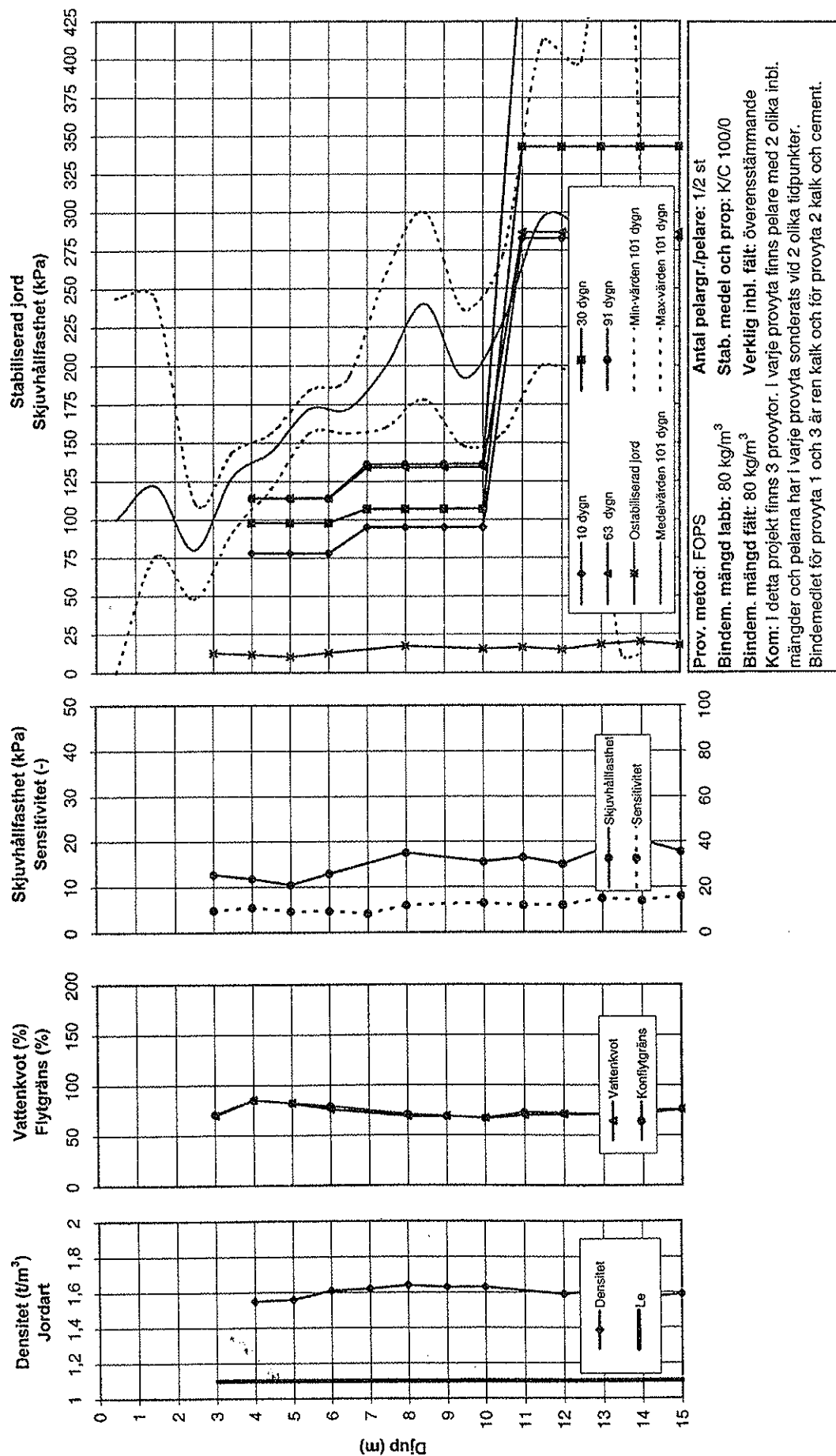
Bindem. mängd fält: 106 kg/m^3

Kom: I detta projekt finns 3 provtytor. I varje provtyta finns pelare med 2 olika inbl. mängder och pelarna har i varje provtyta sonderats vid 2 olika tidpunkter. Bindemedlet för provtyta 1 och 3 är ren kalk och för provtyta 2 kalk och cement.

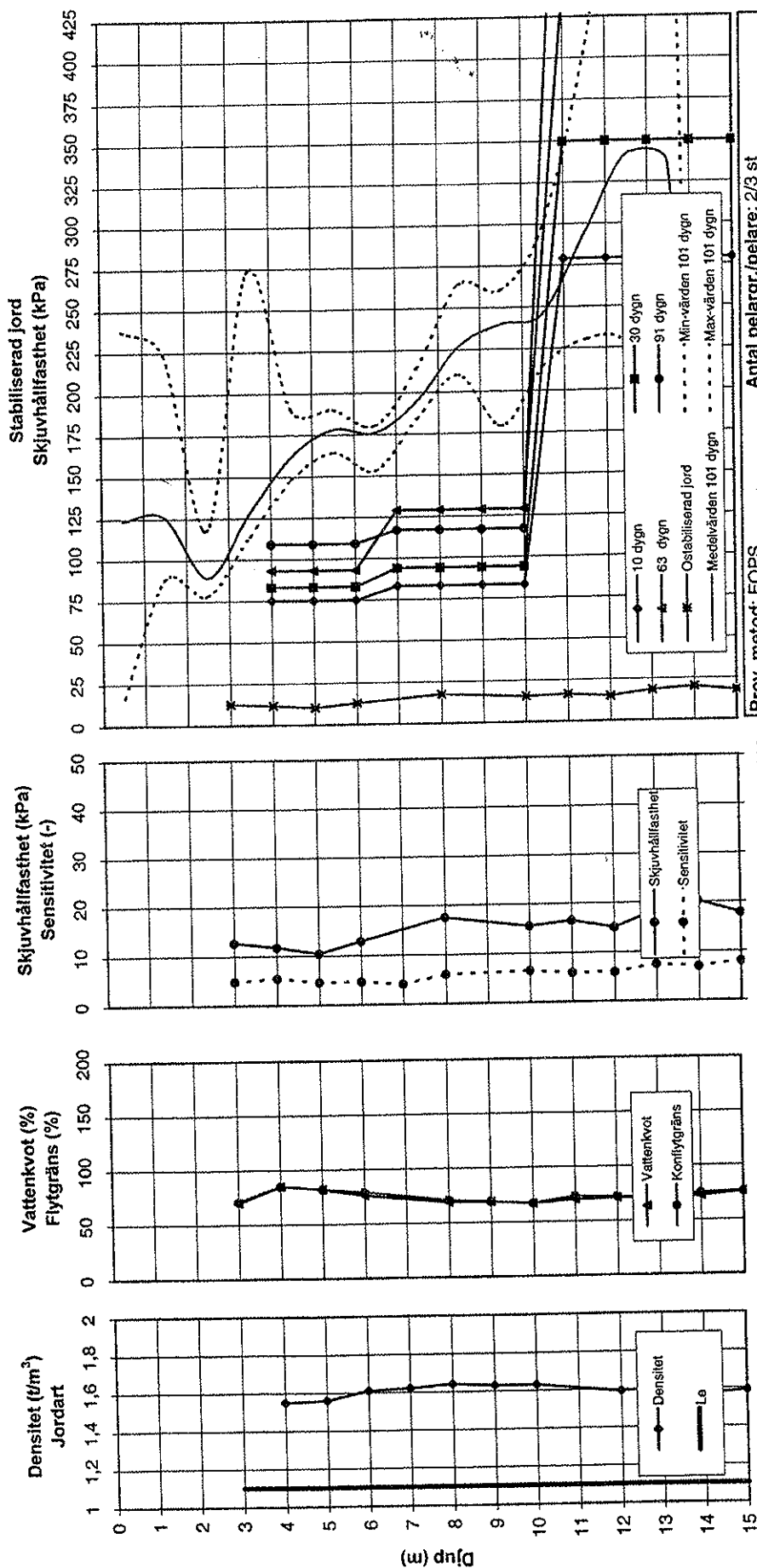
Antal pelargr./pelare: 2/4 st

Stab. medel och prop.: K/C 70/30

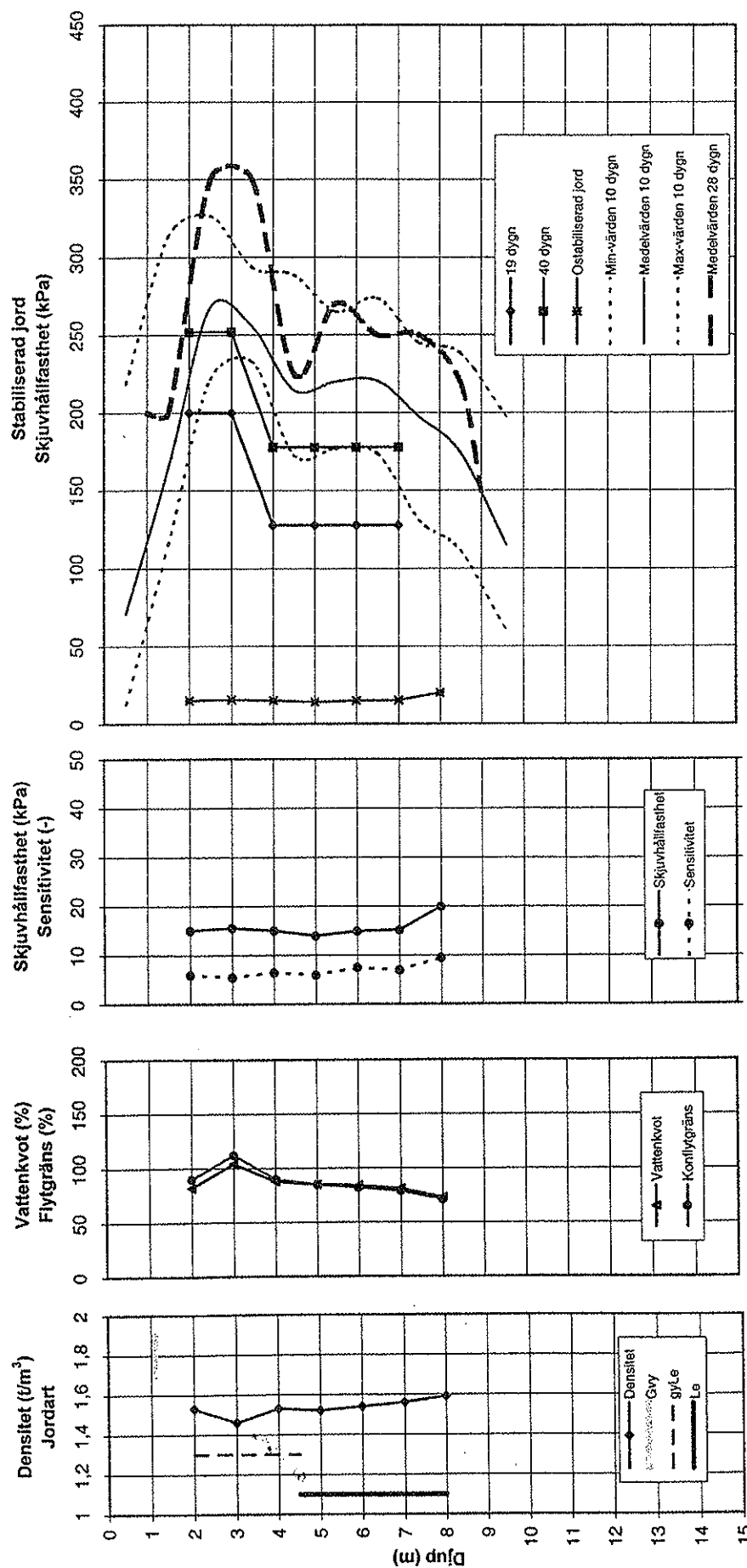
Verklig inbl. fält: överensstämmande



Eka Nobel
Provyta 3
Jordprov, inbl. och Pelare i Provyta 3

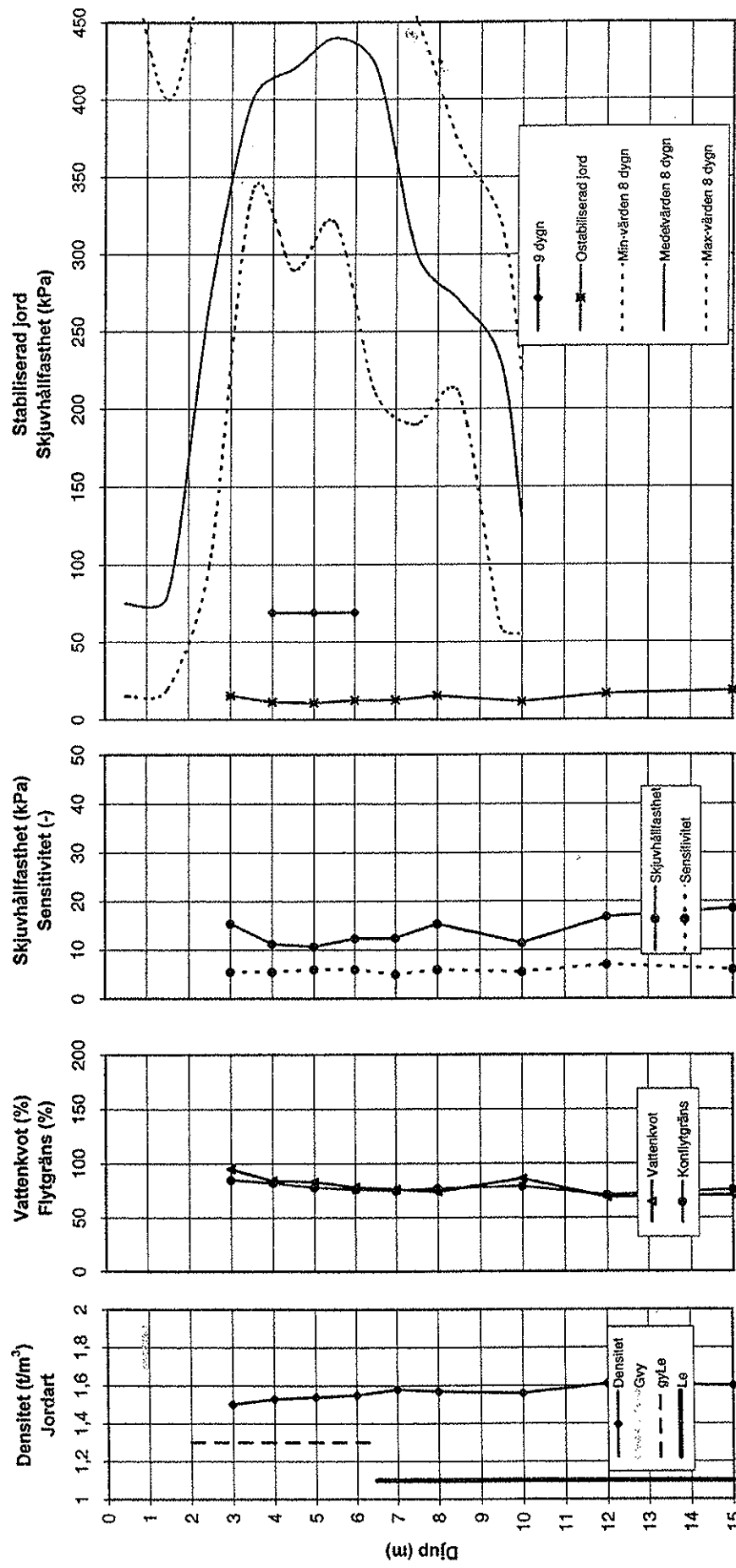


Prov. metod: FOPS Antal pelargr./pelare: 2/3 st
 Bindem. mängd labb: 106 kg/m³ Stab. medel och prop: K/C 100/0
 Bindem. mängd fält: 106 kg/m³ Verklig inbl. fält: överensstämmelse
 Kom: I detta projekt finns 3 provtyper. I varje provtyta finns pelare med 2 olika inbl. mängder och pelarna har i varje provtyta sonderats vid 2 olika tidpunkter.
 Bindemedlet för provtyta 1 och 3 är ren kalk och för provtyta 2 kalk och cement.

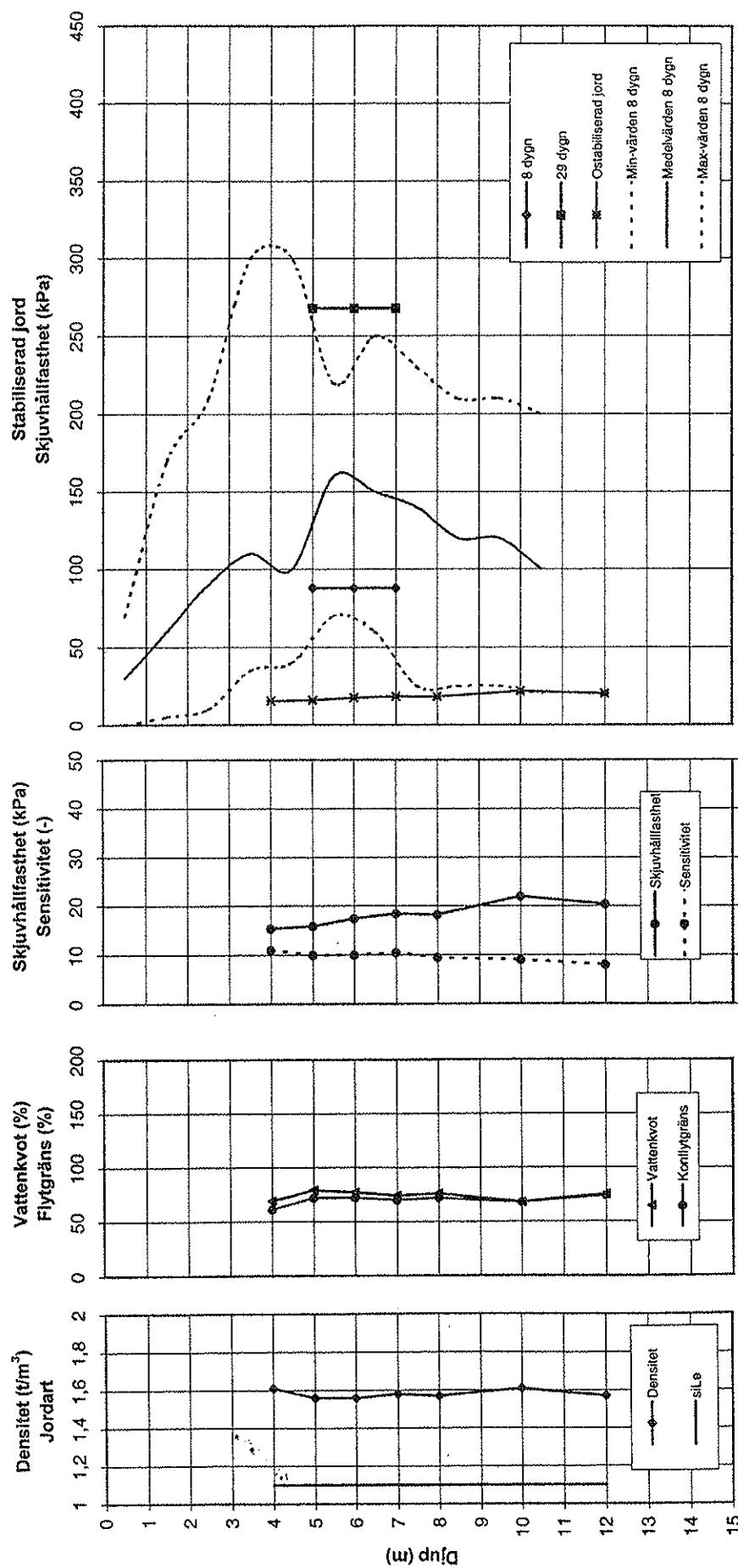


Prov. metod: FOPS Antal pelagr./pelare: 3/10 st
 Bindem. mängd labb: 112 kg/m³ Stab. medel och prop.: K/C 50/50
 Bindem. mängd fält: 106 kg/m³ Verklig inbl. fält: mer
 Kommentar: I detta projekt finns det 3 st provpunkter. Två stycken på del 3+6 och en på del 7.

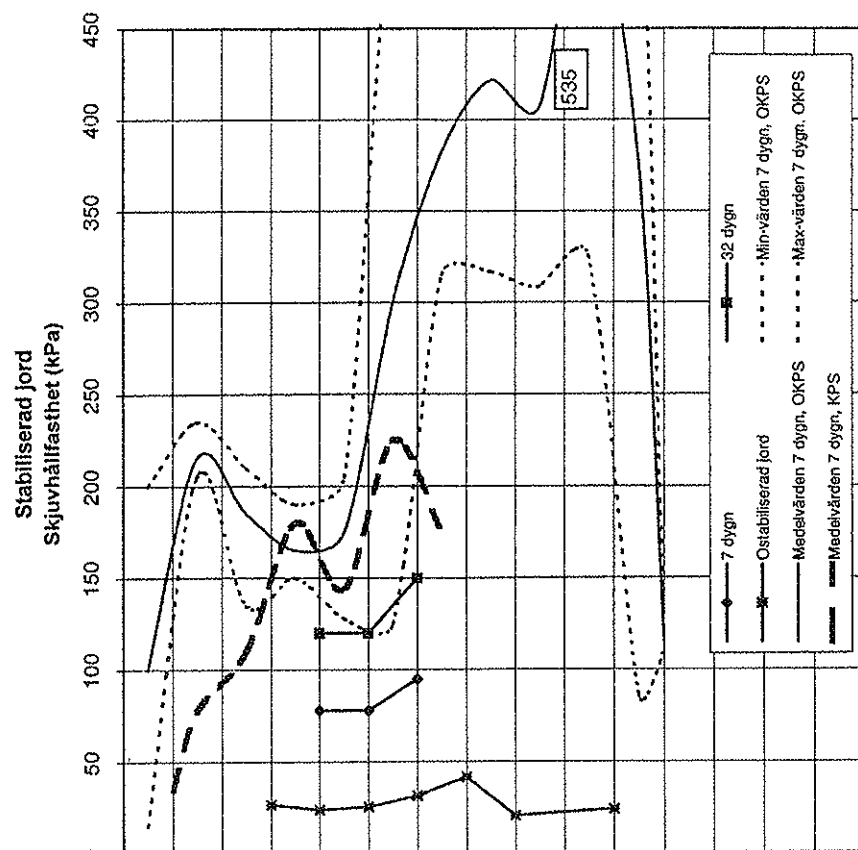
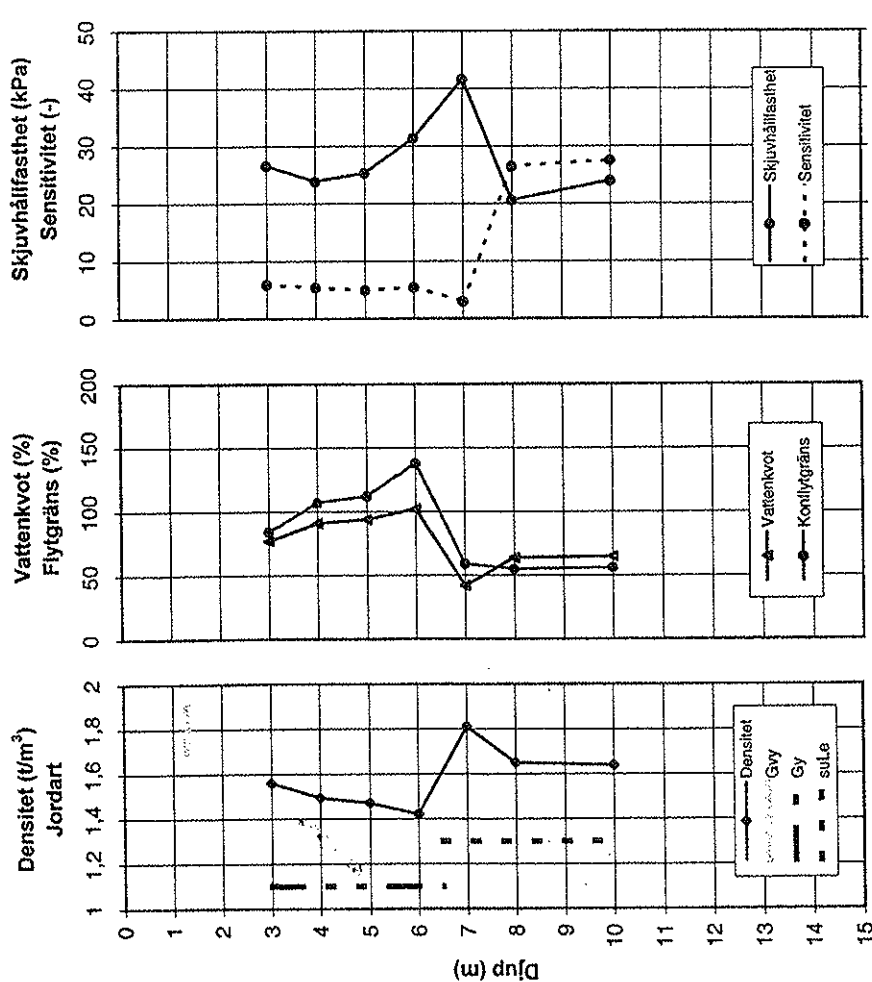
E6/E20
Åbromotet, del 3+6
Jordprov bh 4519, Inbl. bh 4519, Pelare omr.11



Prov. metod: FOPS Antal pelargr./ pelare: 1/6 st
Bindem. mängd labb: 112 kg/m^3 Stab. medel och prop.: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 106 kg/m^3 Verklig inbl. fält: mer
Kommentar: I detta projekt finns det 3 st provpunkter. Två stycken på del 3+6 och en på del 7.

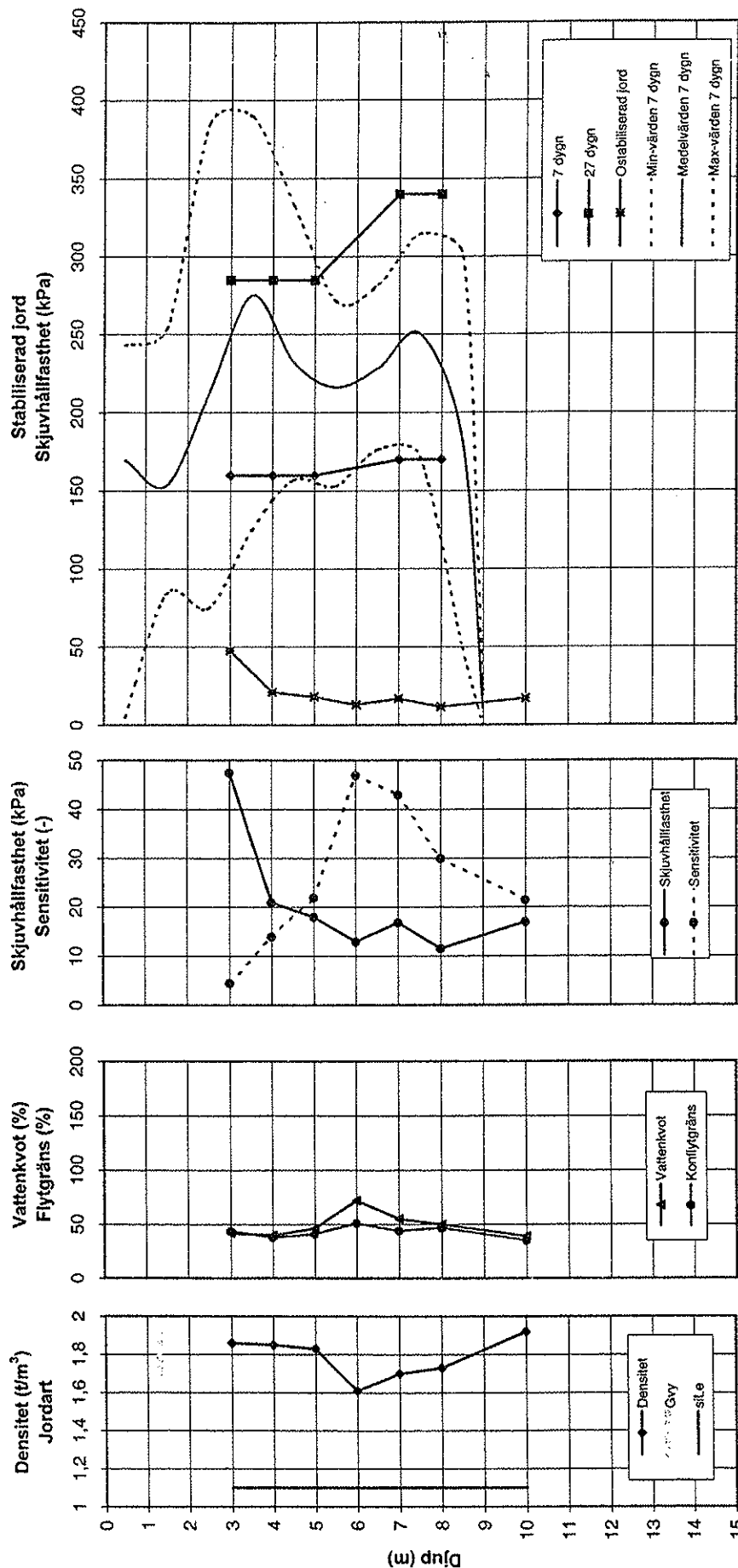


Prov. metod: KPS Antal pelargr./pelare: 1/4 st
 Bindem. mängd labb: 112 kg/m³ Stab. medel och prop.: K/C 50/50
 Bindem. mängd fält: 120 kg/m³ Verklig inbl. fält: något mer
 Kommentar: I detta projekt finns det 3 st provpunkter. Två stycken på del 3+6 och en på del 7.

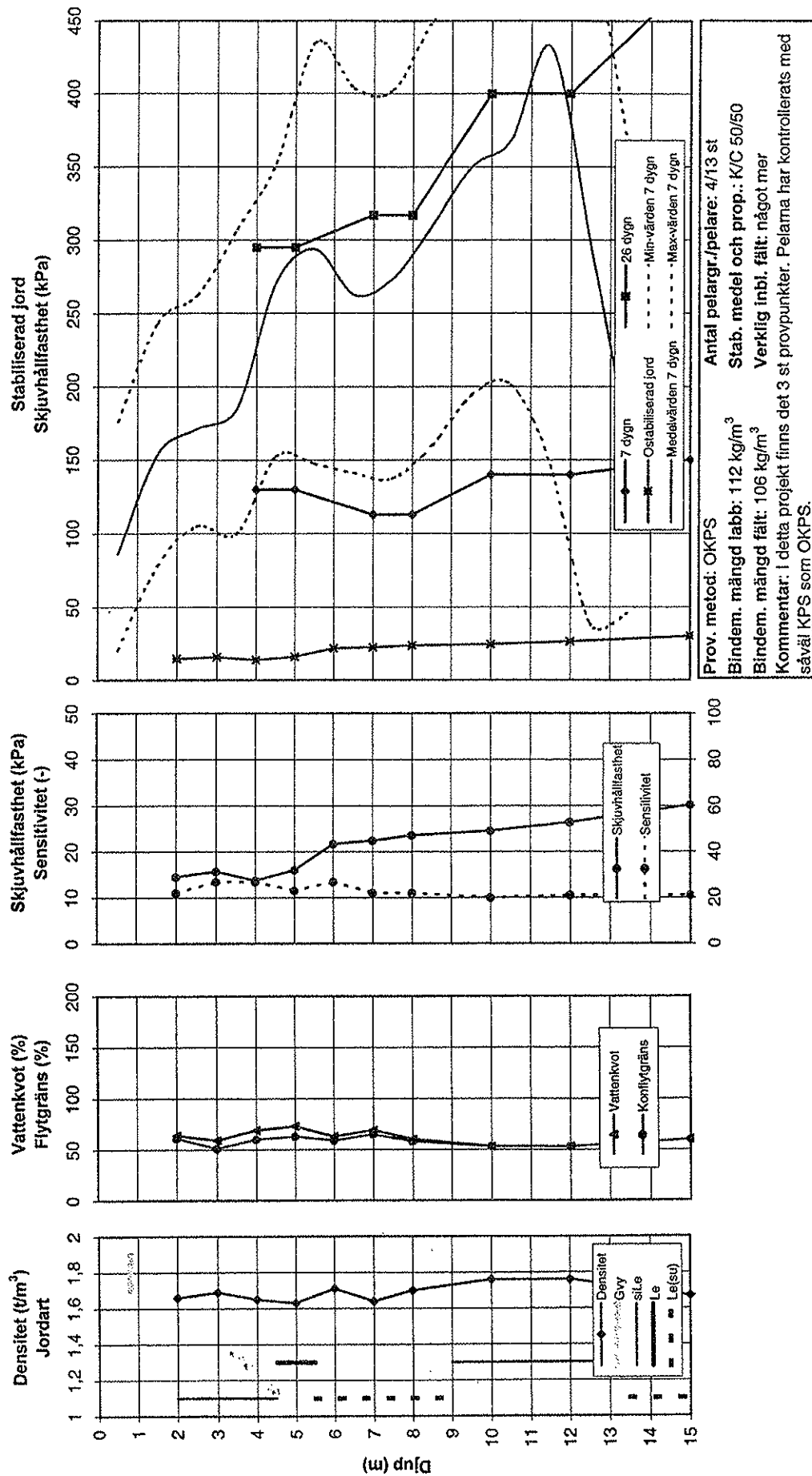


Prov. metod: KPS & OKPS Antal pelargr./pelare: 5/10 st
 Bindem. mängd labb: 122 kg/m³ Stab. medel och prop.: K/C 50/50
 Bindem. mängd fält: 122 kg/m³ Verklig Inbl. fält: något mindre(KPS), något mer(OKPS)
 Kommentar: I detta projekt finns det 3 st provpunkter. Pelarna har kontrollerats med såväl KPS som OKPS.

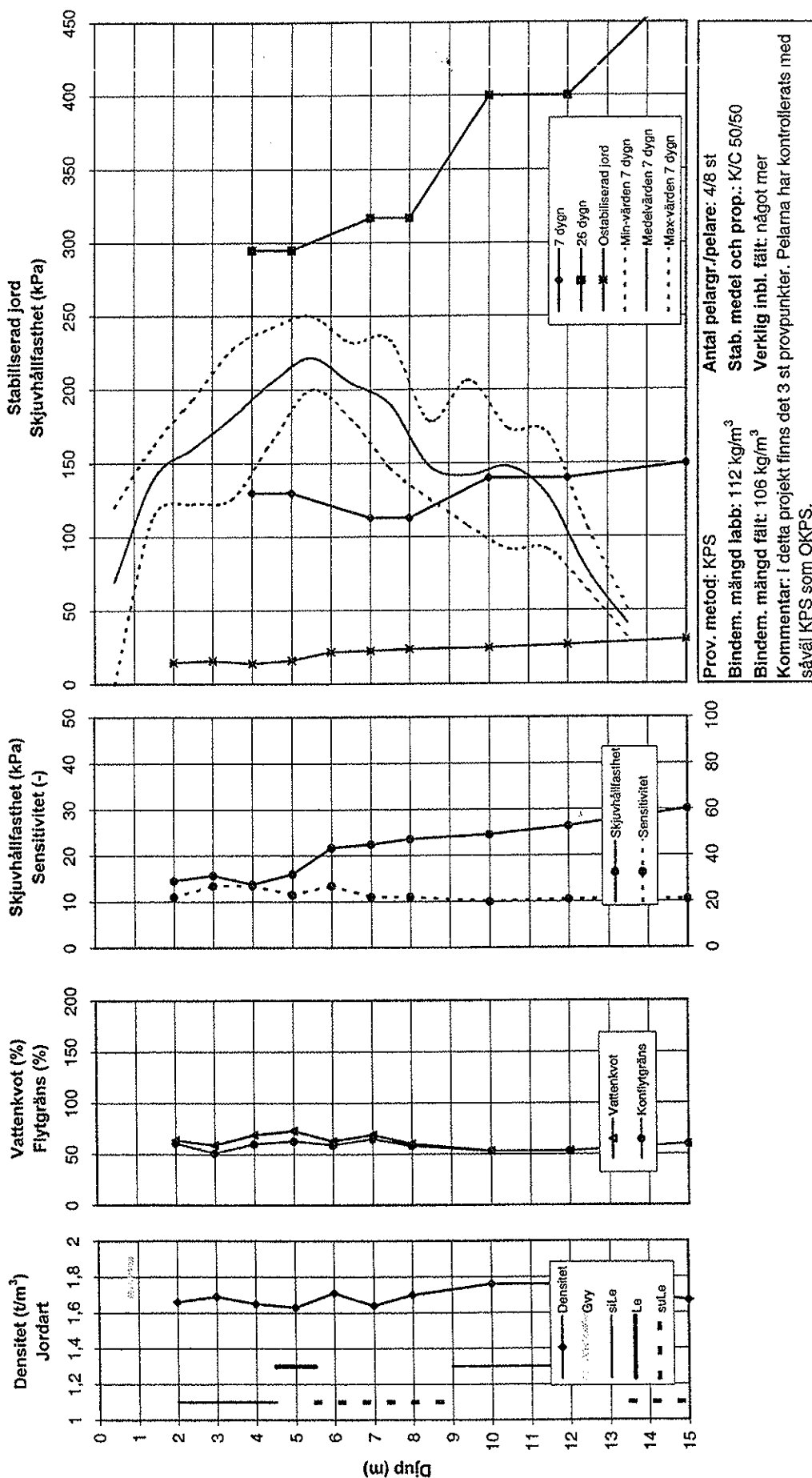
Västkustbanan
Tångaberg-Varberg
Jordprov 71/760, Inbl. 71/760, Pelare 71/800

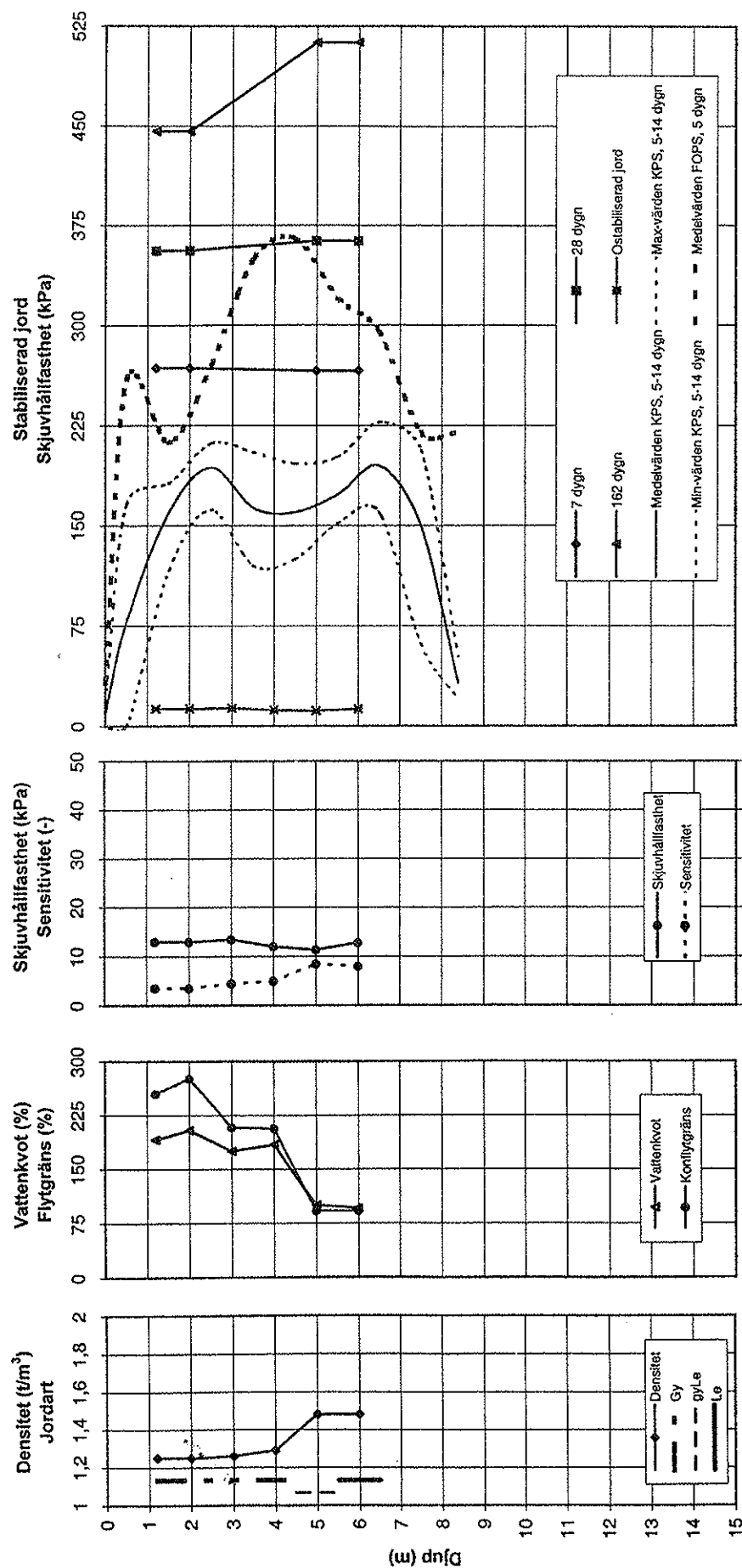


Prov. metod: OKPS Antal pelagr./pelare: 1/9 st
Bindem. mängd labb: 112 kg/m³ Stab. medel och prop.: K/C 50/50
Bindem. mängd fält: 92 kg/m³ Verklig inbl. fält: något mer
Kommentar: i detta projekt finns det 3 st provpunkter. Pelarna har kontrollerats med såväl KPS som OKPS.



Västkustbanan
Tångaberg-Varberg
Jordprov 73/132, Inbl. 73/132, Pelare 73/231-73/287

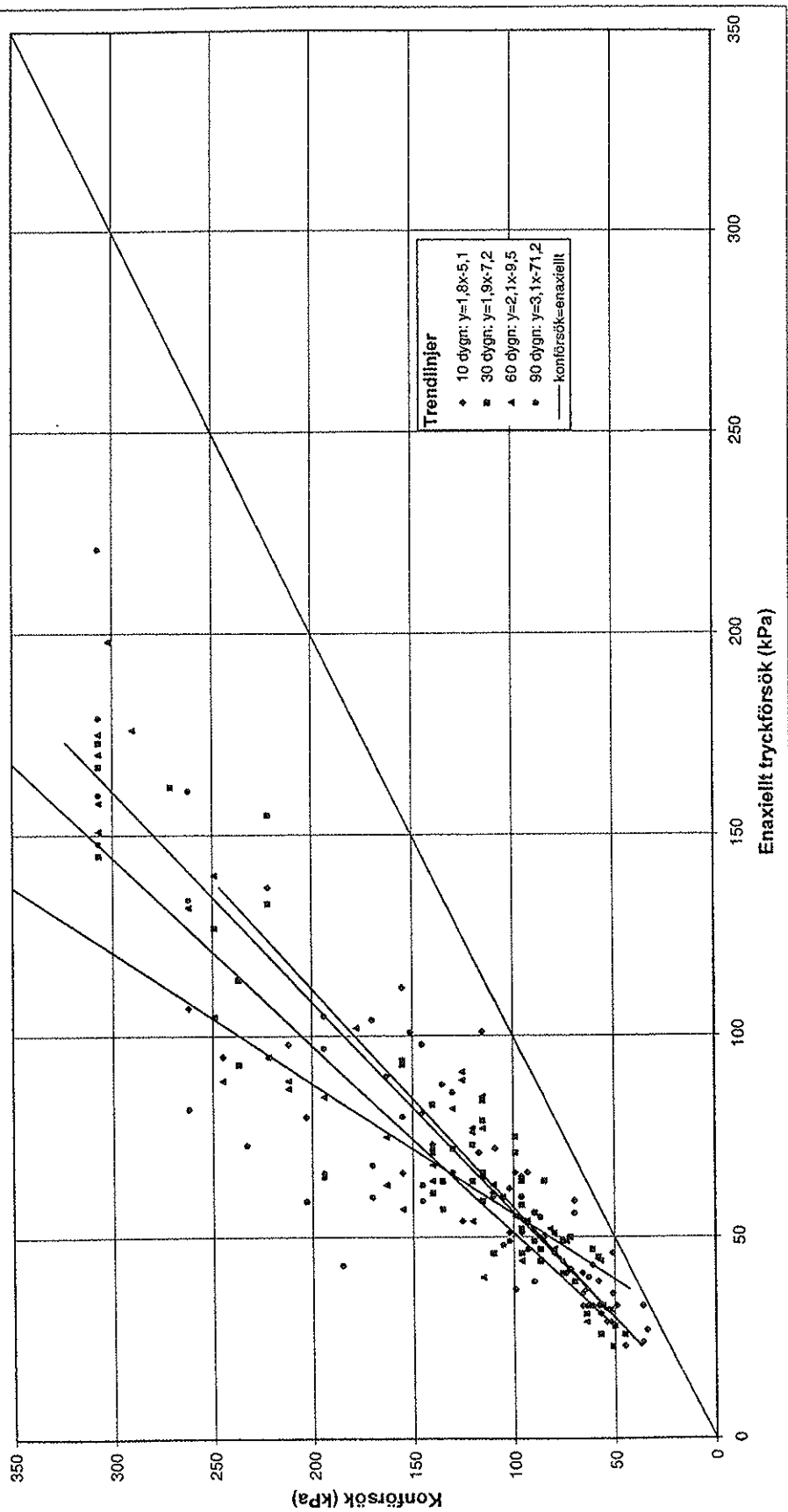


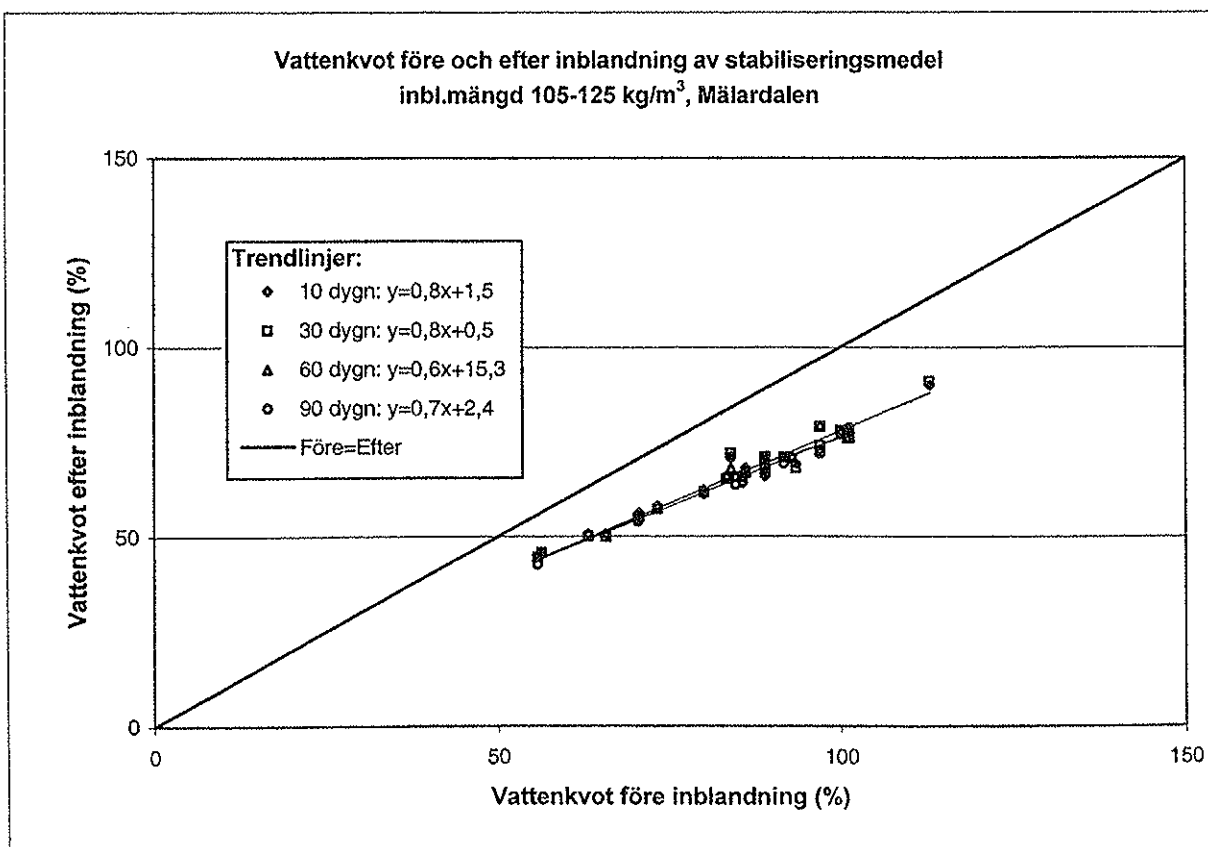
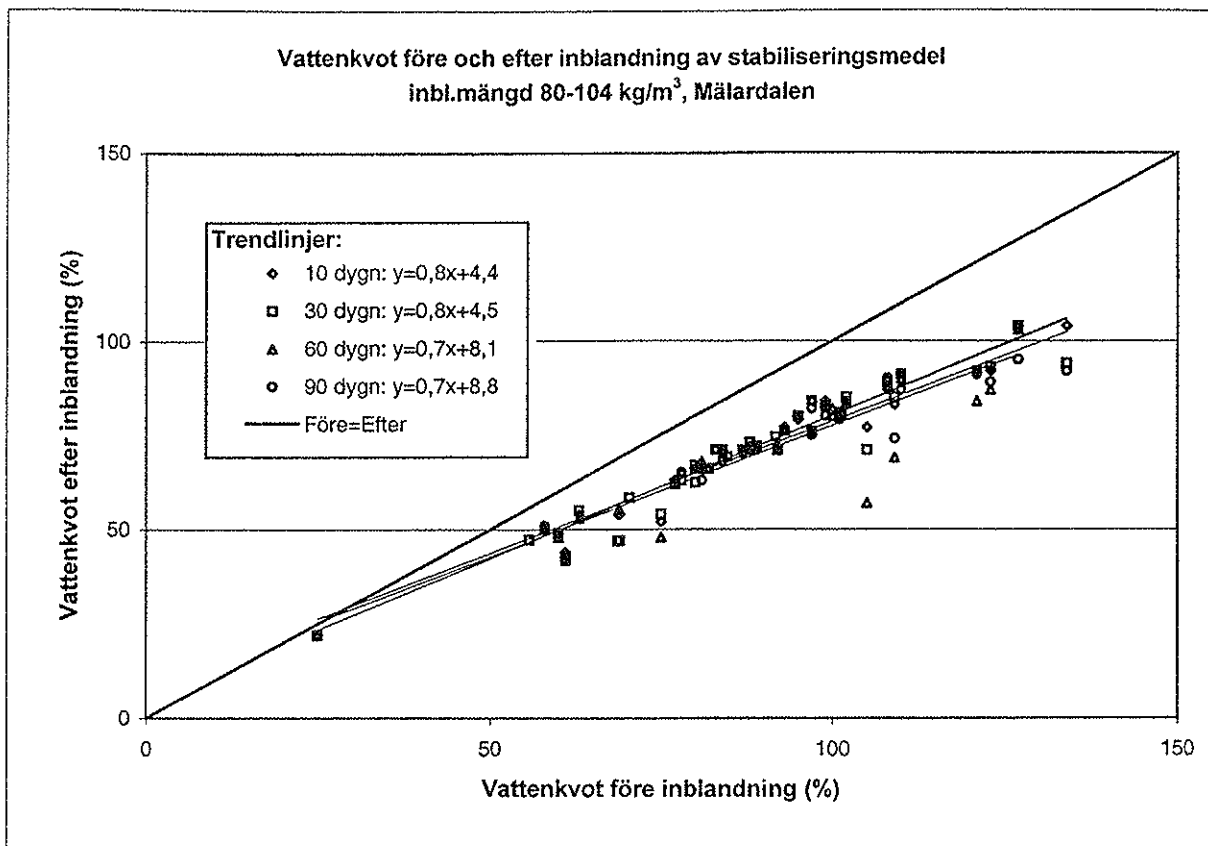


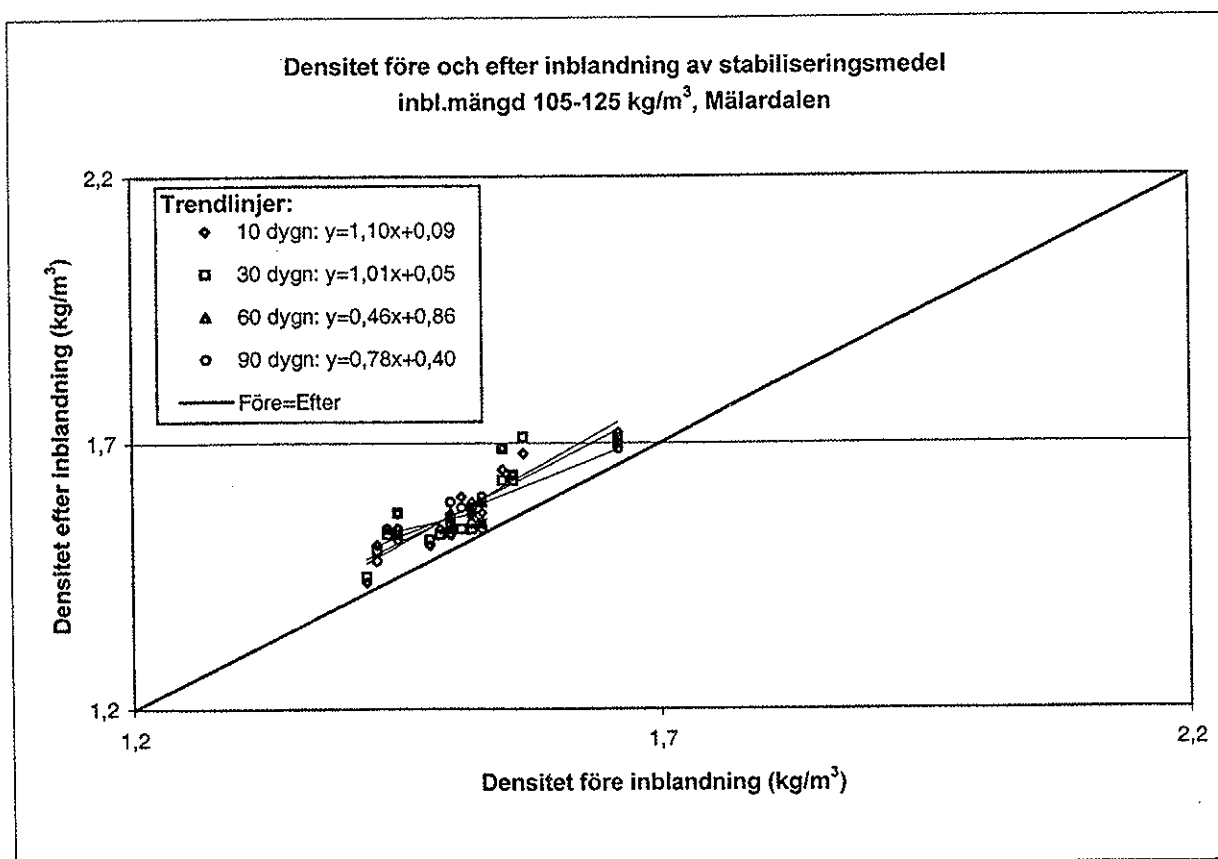
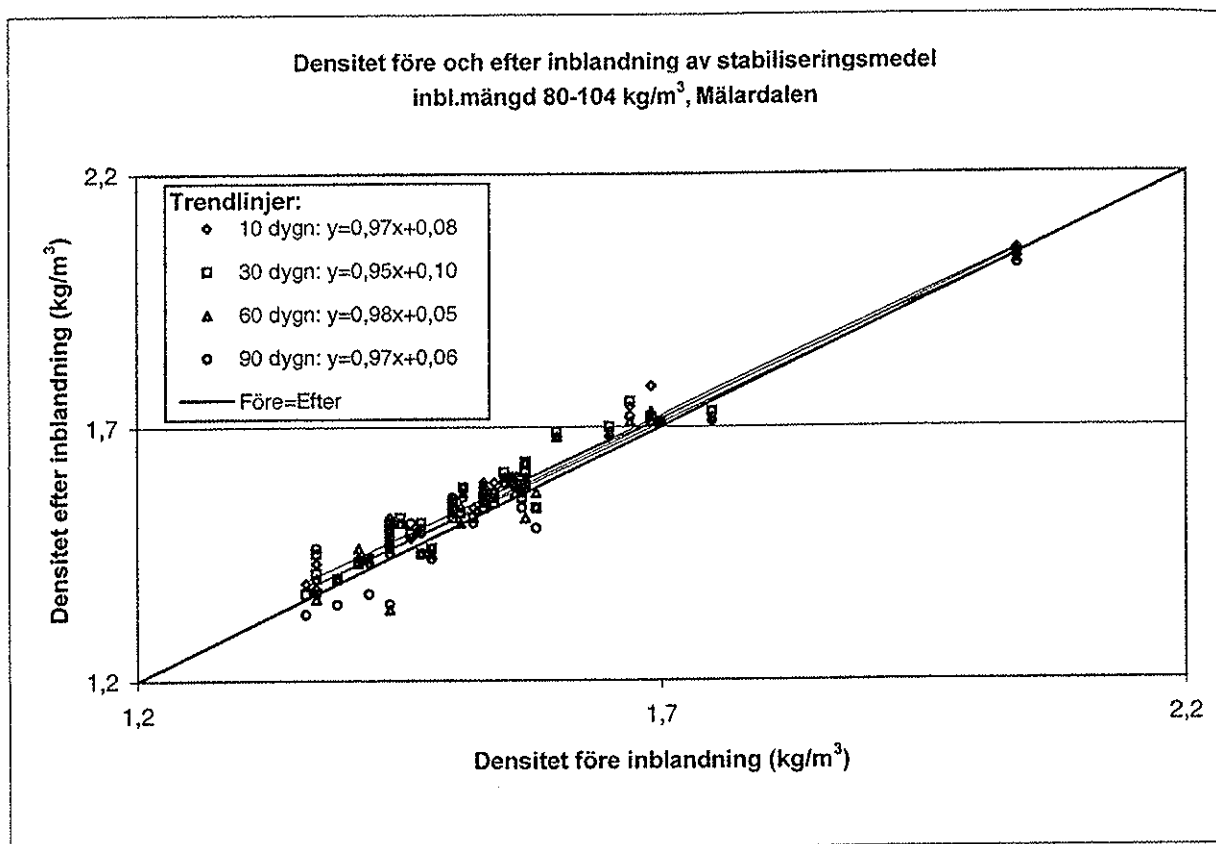
Prov. metod: KPS/FOPS Antal pelargr./pelare: 1/4 st
 Bindem. mängd labb: 150 kg/m³ Stab. medel och prop: K/C 25/75
 Bindem. mängd fält: 150 kg/m³ Verklig inbl. fält: överensstämmande
 Kommentar: KPS: 2 pelare provade efter 14 dygn och 1 pelare provad efter 5 dygn.
 FOPS provad efter 5 dygn.

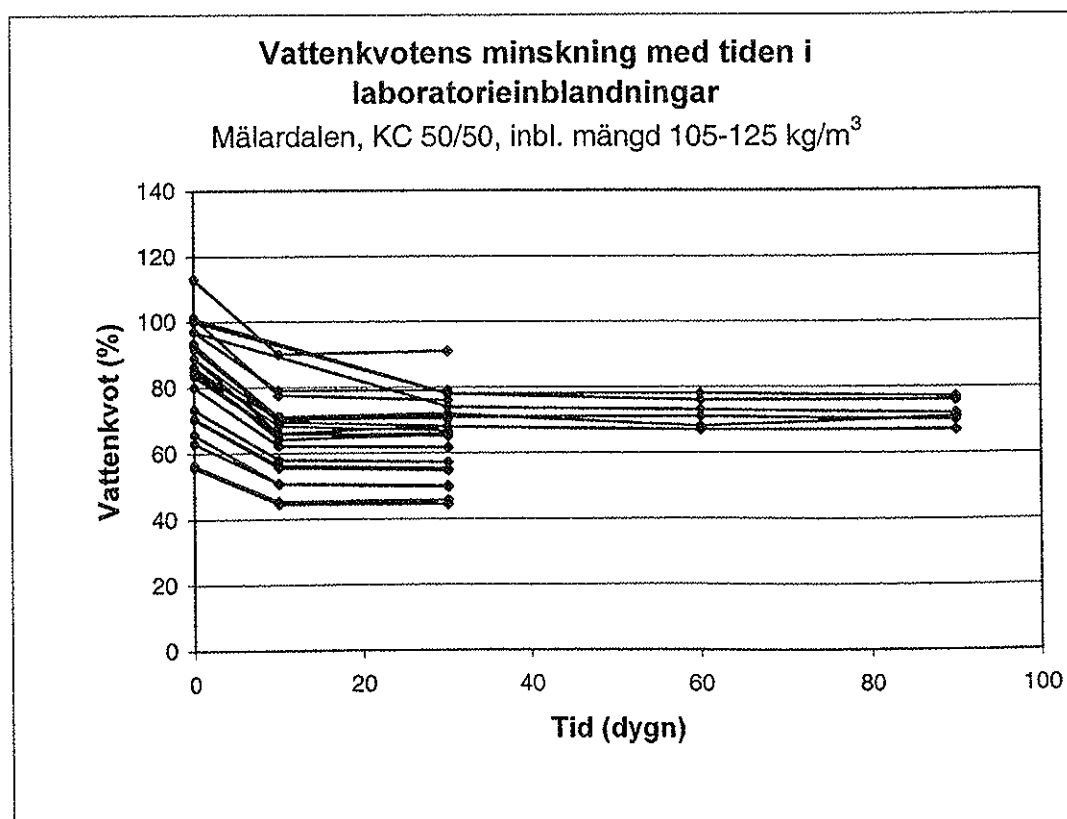
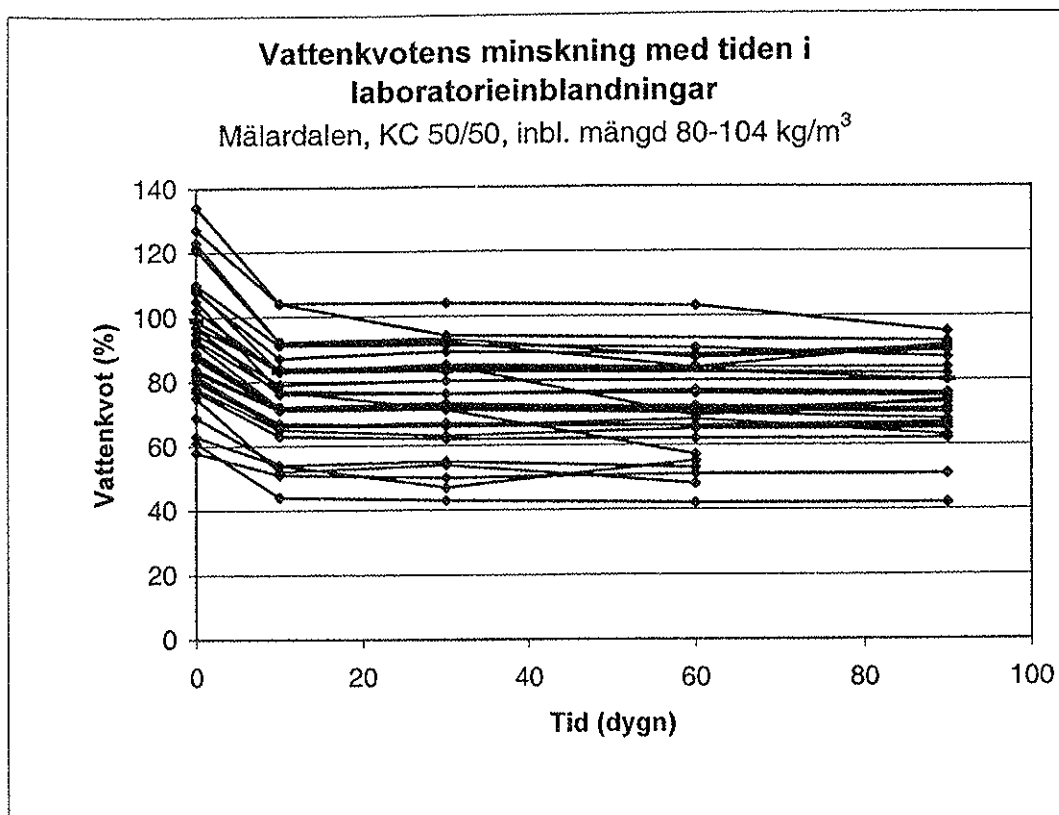
Övriga diagram

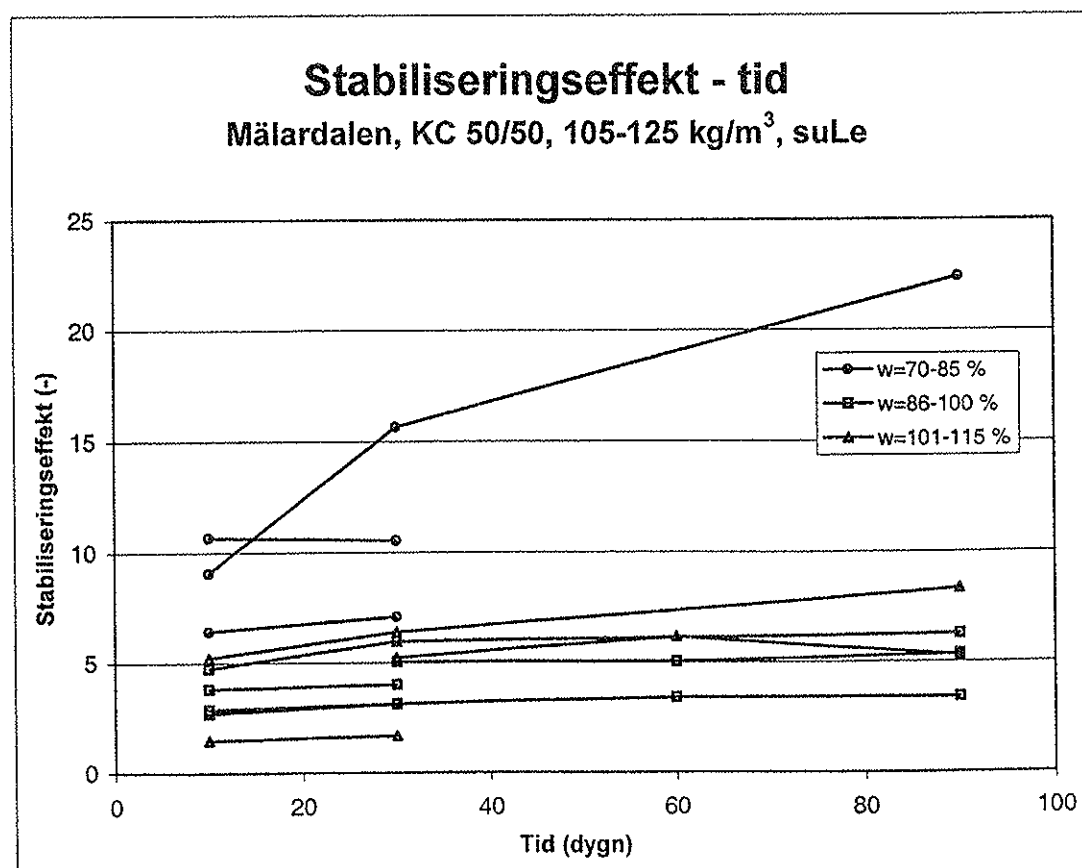
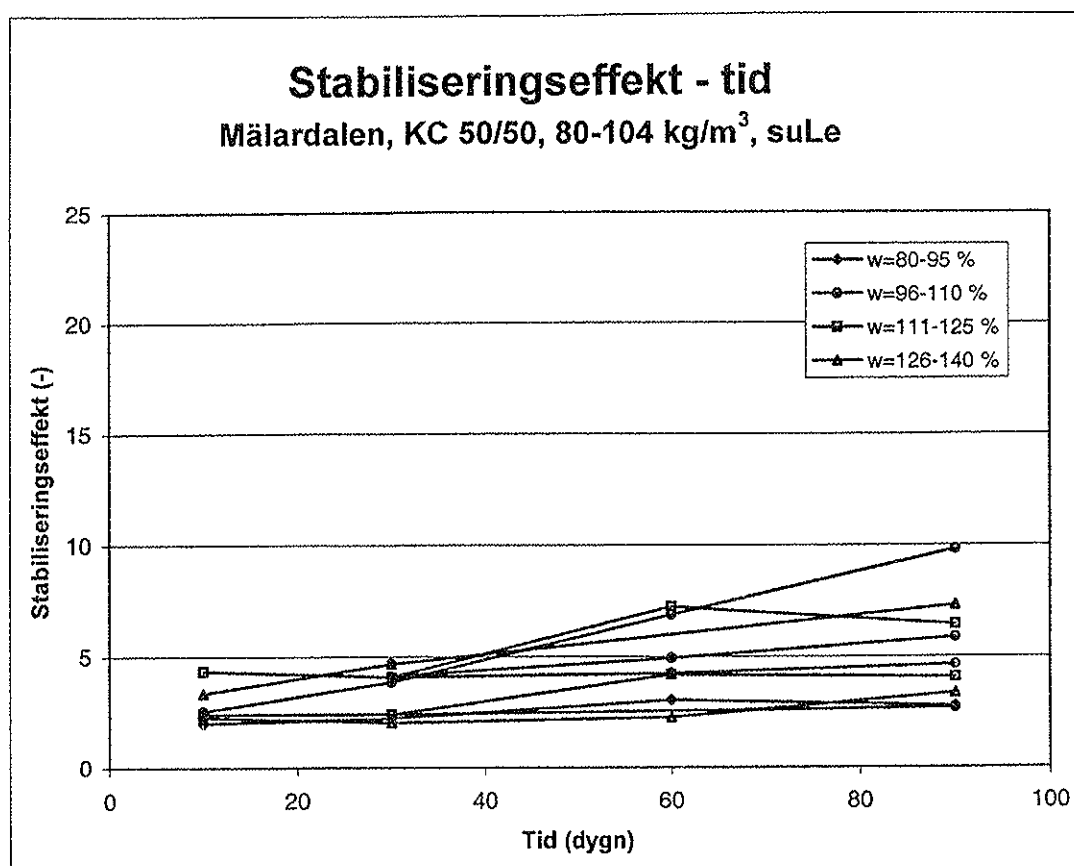
Jämförelse mellan enaxiella tryckförsök och konförsök



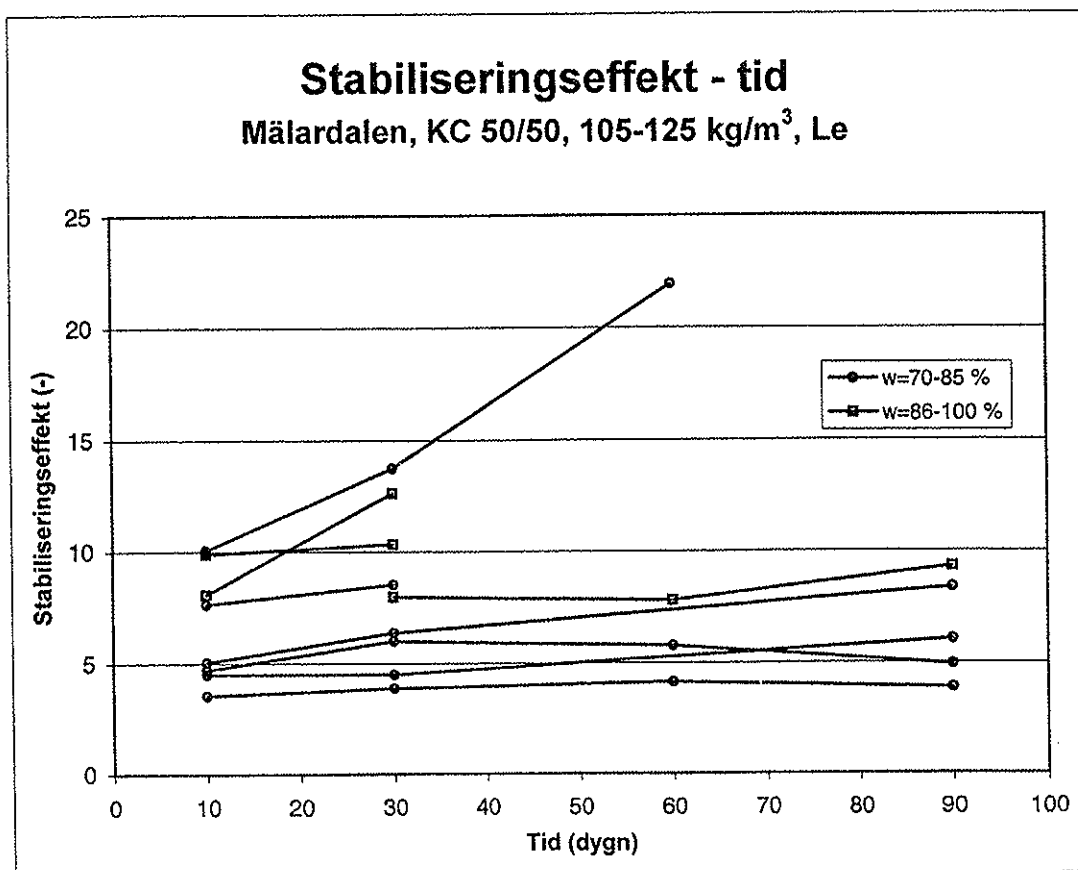
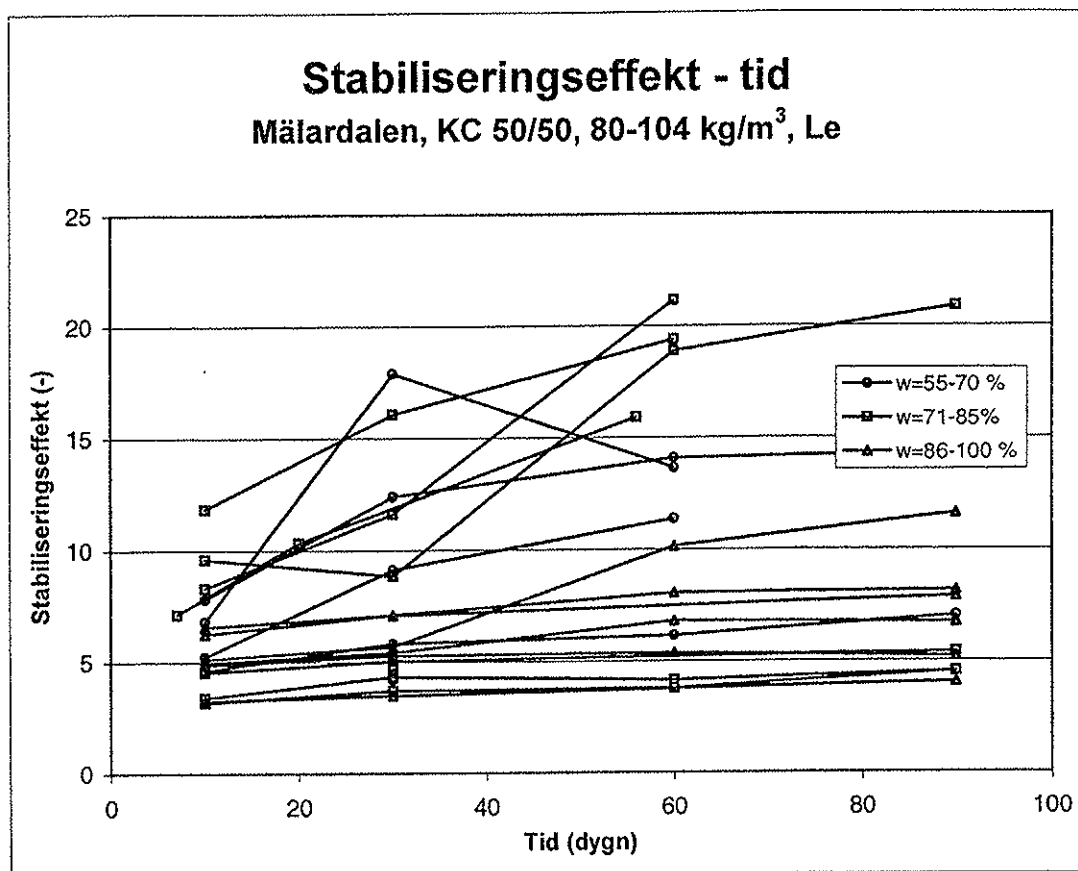


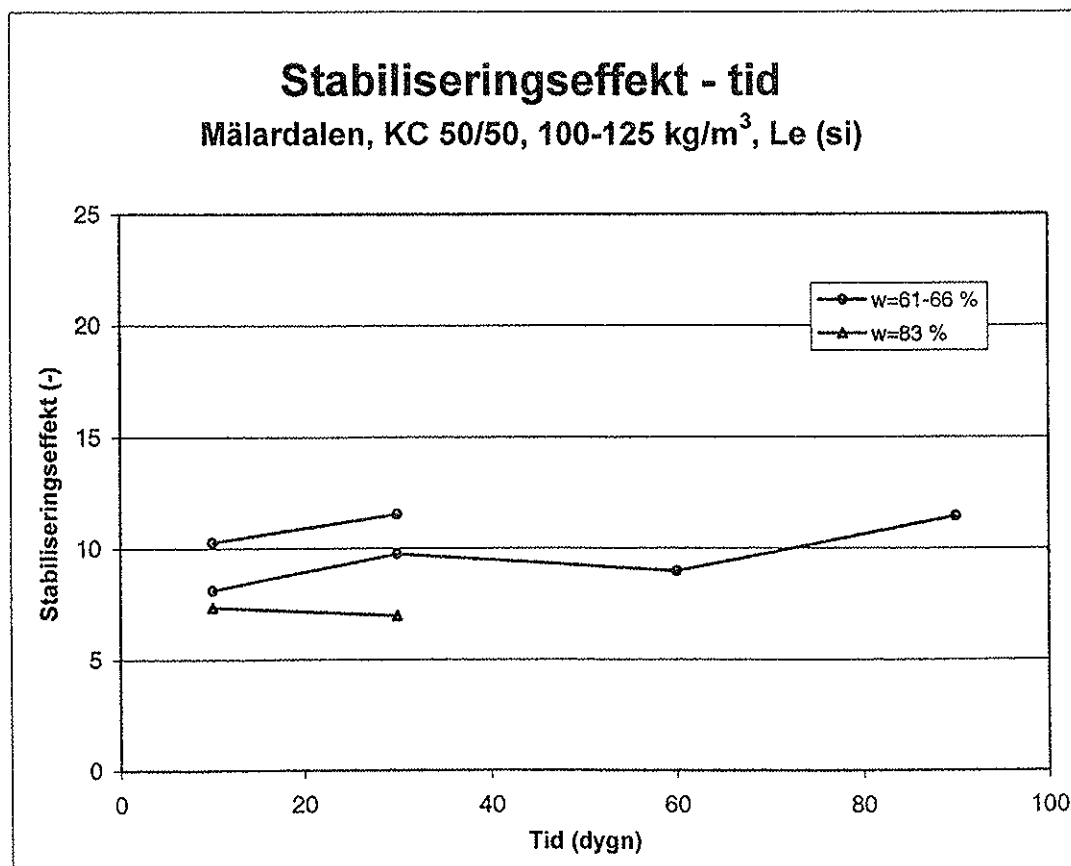
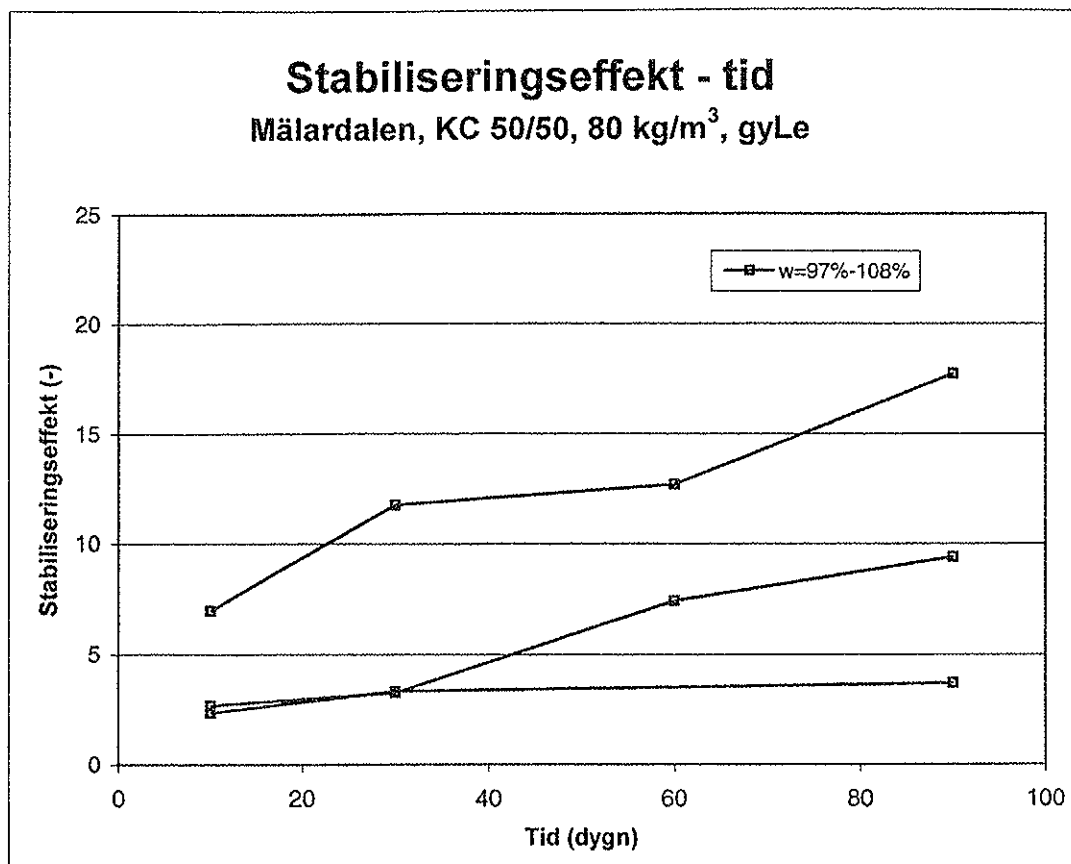


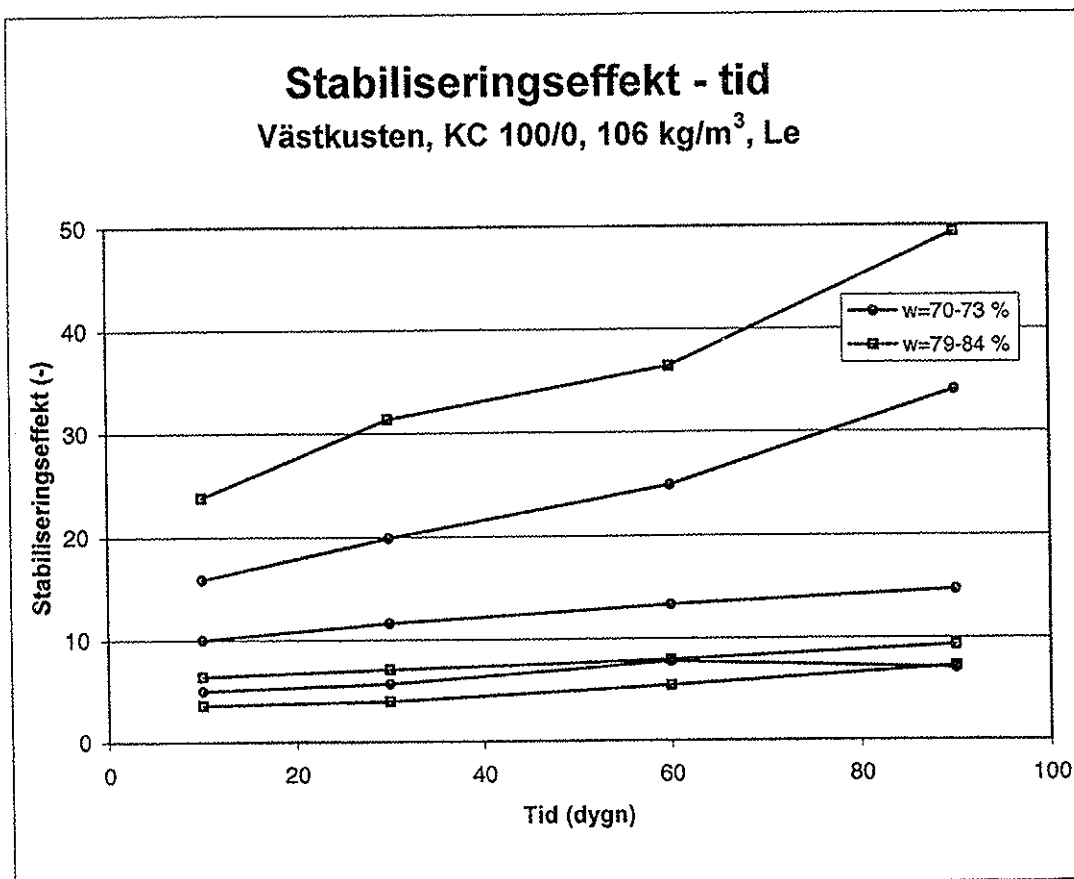
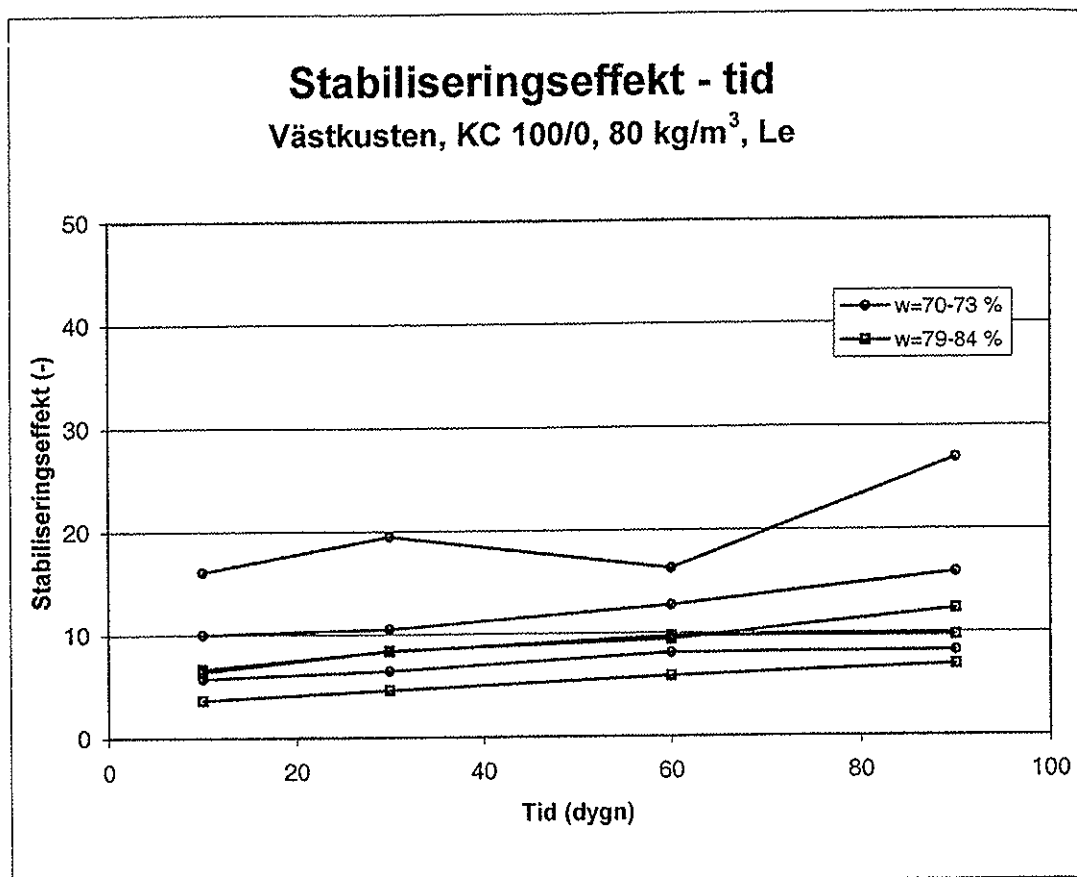


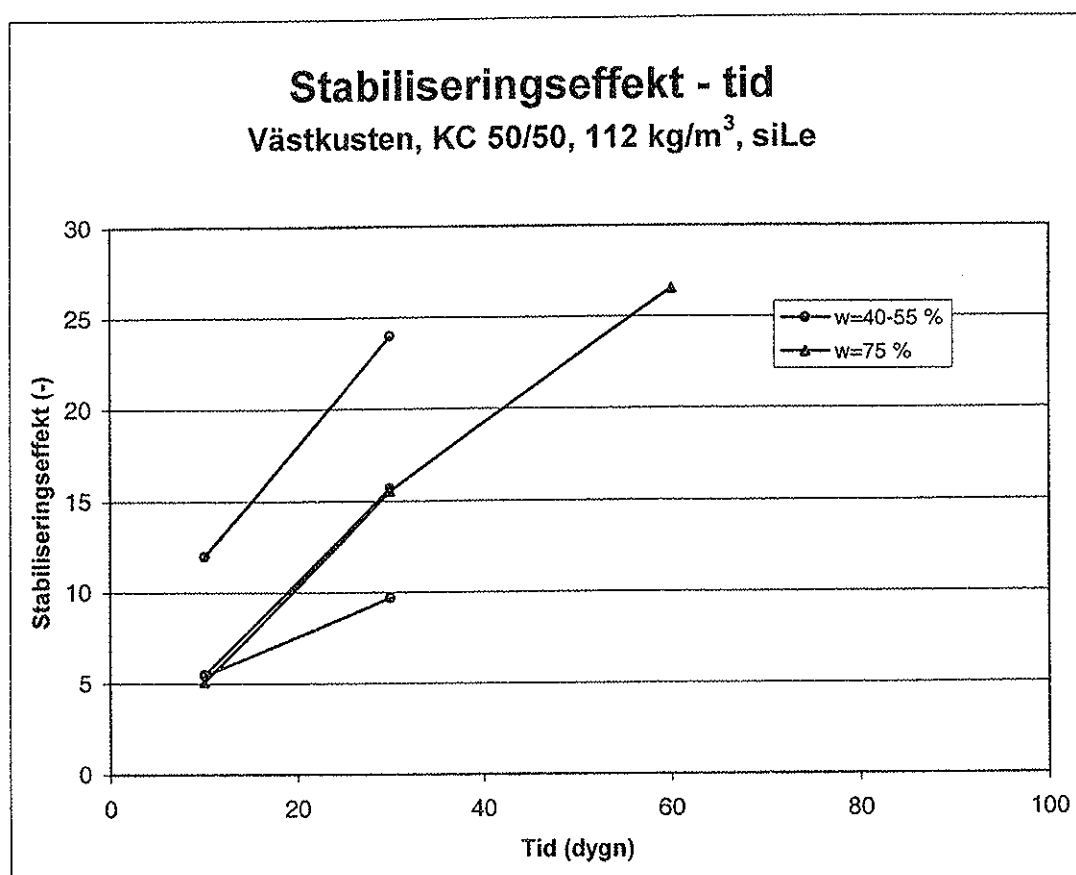


Bilaga 3.4

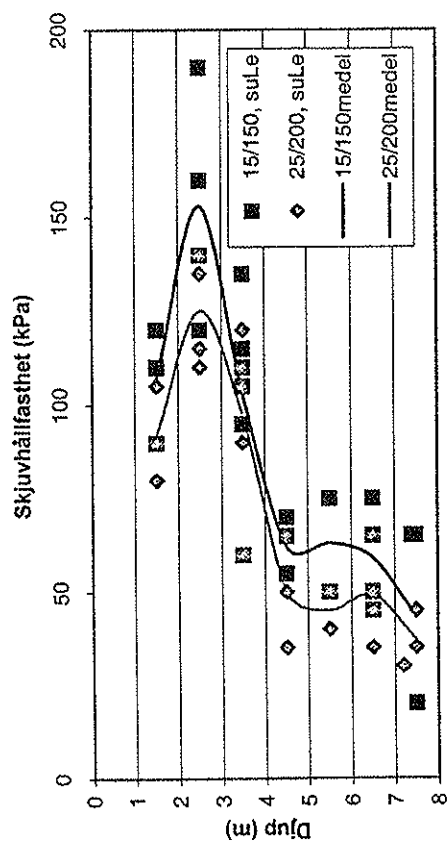




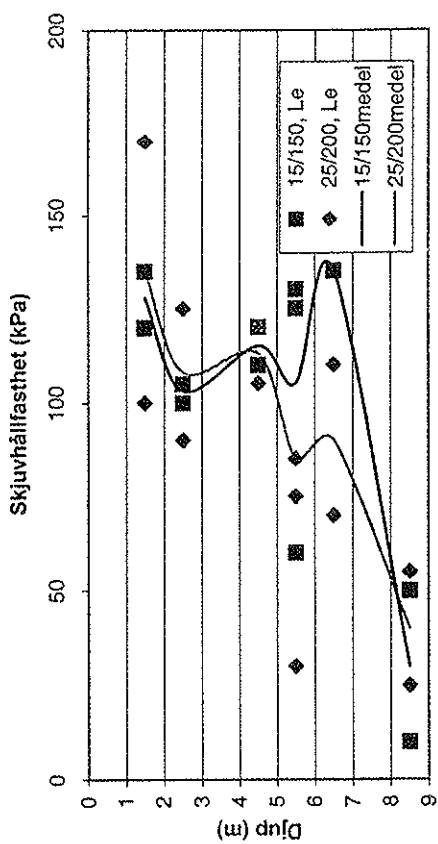




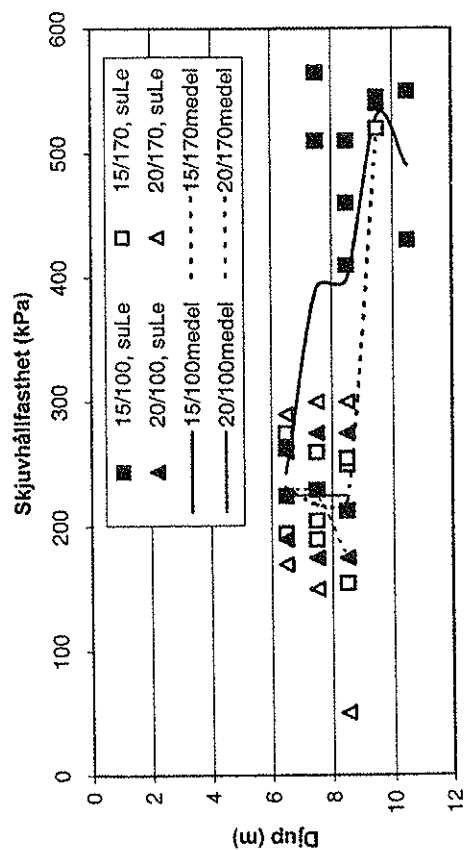
Skjuvhållfasthet/ Rot.hast.-stign.hast
Mälardalen, K/C 50/50, 80 kg/m³, suLe



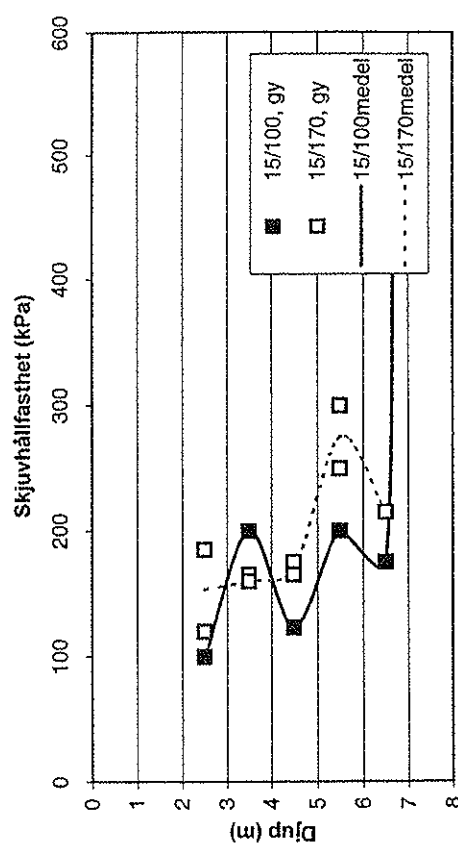
Skjuvhållfasthet/ Rot.hast.-stign.hast
Mälardalen, K/C 50/50, 80 kg/m³, Le



Skjuvhållfasthet/ Rot.hast.-stign.hast
Västakusten, K/C 50/50, 80 kg/m³, suLe



Skjuvhållfasthet/ Rot.hast.-stign.hast
Västakusten, K/C 50/50, 80 kg/m³, gy



Publikationer utgivna av Svensk Djupstabilisering

Arbetsrapport

- 1. Arlandabanan, Norra Böjen. Sättningar hos järnvägsbank på kc-pelare (1998)**
Ulf Stjerngren, Jacobson & Widmark
- 2. KC-förstärkning för schakt inom spont, Filipstad Brygge, Oslo (1998)**
Phung Doc Long, Stabilator AB
Håkan Bredenberg, Stabilator AB
- 3. Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cementpelare och cementpelare (1998)**
Stefan Larsson, Tyréns
- 4. Undersökning av KC-pelare med avseende på dess "homogenitet". (1998)**
Roland Tränk, SGI
- 5. Bestämning av egenskaper i cellstabiliserad torv (1998)**
Nenad Jelusic, Vägverket Region Mitt,
Torbjörn Edstam, SGI & Yvonne Rogbeck, SGI
- 6. Rörelser och portryck vid kalkpelarinstallation Redovisning av mätresultat. (1998)**
Åke Johansson, SGI
- 7. Masstabilisering av väg 590, Askersund (1998)**
Yvonne Rogbeck, SGI
- 8. KC-pelarförstärkning av instabil slänt. E4, delen Nyland - Ullånger, Västernorrlands län. Åtgärder och mätningar (1998)**
Leiv Viberg, SGI, Bertil Eriksson, Vägverket Produktion Mitt & Stefan Johansson, Vägverket Produktion Mitt
- 9. Grunnförsterkning med kalksementpælar (1999)**
Stein Christensen, Arnstein Watn, Steinar Nordal, Arnfinn Emdal, Torbjørn 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, Scandiaconsult
- 12. Undersökning i fält av stabiliseringseffekt i organisk jord och lera (2000)**
Tobias Hansson, Hercules Grundläggning AB, Yvonne Rogbeck, SGI, & Leif Säfström, Vägverket Region Mälardalen
- 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, LTU
- 15. Djupstabilisering med kalk-cementpelare – Provfält (2000)**
Lars O Johansson, SGI
- 16. Laboratorieinblandning för stabilisering av lera – Referensmetod (2000)**
Torbjörn Edstam, SGI
- 17. Kalkcementpelarförstärkning för bro – Funktionsuppföljning. Väst kustbanan, delen Sättinge – Lekarekulle. Bro över väg N359U (km 35/603) (2000)**
Marius Tremblay

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. Provbank på kalk/cementpelarförstärkt gytta 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



Svensk Djupstabilisering

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