

UTVECKLINGSPROJEKT 11357
SEISMISK KONTROLLMETOD FÖR KC-PELARE

SLUTRAPPORT 2005-05-31

Niklas Dannewitz, Hercules Grundläggning AB
Håkan Eriksson, Hercules Grundläggning AB
Håkan Mattsson, GeoVista
Rolf Larsson, Statens Geotekniska Institut
Göran Holm, Statens Geotekniska Institut

Innehållsförteckning

	Sida
1 Inledning	5
1.1 Bakgrund	5
1.2 Syfte	5
1.3 Utförande	6
1.4 Geotekniska förhållanden	
2 Laboratoriearbeten	7
2.1 Inledning	7
2.2 Bender element test – kortfattad metodbeskrivning	7
2.3 Utvärderade samband mellan c_u och V_s (och G_0)	9
3 Fältmätningar	11
3.1 Inledning	11
3.2 Installation av pelare och mätrör	11
3.3 Mätprogram	13
3.4 Down hole mätningar – kortfattad metodbeskrivning	14
3.5 Ultrasonic mätningar – kortfattad metodbeskrivning	15
3.6 Resultat och tolkning av seismiska resultat	16
3.6.1 DH-mätningar i pelare och ostabiliserad jord	17
3.6.2 DH-mätningar med mekanisk borrhålskälla	21
3.6.3 DH-mätningar i pelare med avbrott, med olika positioner på källan samt med geofoner i plastslang utanför pelaren	22
3.6.4 Ultrasonic	24
3.7 Traditionell pelarsondering	24
4 Jämförelse mellan seismiska mätningar och traditionell pelarsondering	25
4.1 Mätningar i ostabiliserad jord	25
4.2 Mätningar i pelare	25
5 Diskussion och fortsatt utvecklingsarbete	27
6 Slutsatser	28
Referenser	30
Bilaga 1 Mätprogram (1 sida)	
Bilaga 2 Laboratorieförsök på ostabiliserad jord (1 sida)	
Bilaga 3 Rutinundersökning på stabiliserad jord (2 sidor)	
Bilaga 4 Resultat Bender element, grafer (3 sidor)	
Bilaga 5 Resultat från KPS och DH-mätningar i enskilda pelare (26 sidor)	
Bilaga 6 Ritning borrhsko (2 sidor)	

1 Inledning

1.1 Bakgrund

KC-pelare används i stor omfattning för att minska sättningar samt för att öka stabiliteten av vägbankar på, eller schakter och slänter i, lös kohesionsjord. Funktionen och ekonomin av en jordförstärkning med KC-pelare förutsätter att vid dimensioneringen antagna materialegenskaper kan uppnås i fält genom inblandning av avsedd mängd bindemedel och tillförsel av rätt mängd blandningsenergi. Därför tillverkas i allmänhet KC-pelare med utrustning, där inblandningen kan styras och dokumenteras genom elektroniska övervakningssystem. På så sätt säkerställs också en jämn pelarkvalitet.

En svårighet, och därmed begränsning av KC-pelarmetoden, är att kontrollera pelarnas hållfasthets- och deformationsegenskaper i fält. Olika metoder används för att kunna bestämma KC-pelares hållfasthet, t ex genom konventionell trycksondering eller KC-pelarsondering. Som resultat erhålls ett motståndsvärde, som på empirisk väg måste relateras till pelarmaterialets skjuvhållfasthet. I ett nästa steg omvandlas sedan hållfasthetsparametrarna till modulvärden. Detta förfarande är dock mycket osäkert.

Seismiska metoder kan användas för att i fält bestämma skjuvvågshastigheten i olika jordlager. Med ledning av skjuvvågshastigheten kan sedan skjuvmodulen beräknas. Seismiska undersökningar utvecklades ursprungligen inom jordbävningsområdet för att kunna beräkna jordlagers dynamiska egenskaper (främst skjuvvågshastighet), för analys av vibrationsutbredning och vibrationsförstärkning. Seismiska mätningar är vanliga i geologiska tillämpningar för bestämning av bla jorddjup och läge på deformationszoner i berg. Under de senaste åren har seismiska undersökningar också börjat användas vid lösning av konventionella geotekniska problem, bland annat för att bestämma jordars deformationsegenskaper vid statisk belastning (Massarsch 2000).

En av de vanligaste seismiska undersökningsmetoderna inom geotekniken idag är down-hole mätningen. En eller fler seismiska givare (accelerometer eller geofon) installeras under markytan. Därefter alstras en polariserad skjuvvåg vid markytan med hjälp av en ytlig borrhålskälla eller genom ett hammarslag på en slagplatta. Ankomsttiden av skjuvvågen hos respektive givare registreras. Då avståndet mellan källan och givarna är känt, kan vågens utbredningshastighet beräknas med stor precision. Eftersom försöket inte påverkar den undersökta jordvolymen (eller KC-pelare) kan mätningarna upprepas ett godtyckligt antal gånger vid olika tidpunkter.

1.2 Syfte

Idag finns kommersiellt tillverkad seismisk mätutrustning, samt tillhörande datainsamlings- och analysmetoder på marknaden. Målsättningen med föreliggande projekt har varit att dra nytta av denna kunskap och utveckla en tillförlitlig och praktiskt användbar fältmetod för kontroll av stabiliserad jords hållfasthets- och deformationsegenskaper.

1.3 Utförande

Projektet har innefattat både laboratorieundersökningar och fältmätningar och har utförts i följande etapper.

- Utveckling av fältutrustning
- Laboratorieundersökningar
- Fältmätningar
- Analys och utvärdering

Inledningsvis utvecklades en metod för installation av plaströr och –slangar som erfordras för seismiska mätningar i pelare, se kapitel 3.2. Utrustning och installationsförfarande provades vid en inledande fältmätning i Uppsala i december 2003. Även den seismiska mätutrustningen (geofoner, exciteringskälla mm) som i detta projekt hyrdes huvudsakligen från det tyska företaget Geotomographie, provades för att säkerställa att den utvalda utrustningen fungerade rent mättekniskt.

Därefter utfördes laboratorieundersökningar för att upprätta samband mellan skjuvvågshastighet (V_s) och skjuvmodul/skjuvhållfasthet för olika kombinationer av jord/bindemedelstyp/bindemedelsmängd (kapitel 2).

Upprättade samband från laboratorieundersökningarna nyttjades sedan vid utvärdering av seismiska mätningar i pelare i fält (kapitel 3). Utvärderad skjuvhållfasthet jämfördes med resultat från traditionella pelarsonderingar (kapitel 4).

Föreliggande rapport sammanfattar mätresultaten och rekommenderar utformningen av en seismisk metod för kontroll av KC-pelare. Resultaten har även redovisats i en artikel till konferensen Deep Mixing -05 i Stockholm.

1.4 Geotekniska förhållanden

Provområdet ligger utanför Uppsala i anslutning till E4:ans nya sträckning. I samband med fältförsöken togs ostörda prover av leran med efterföljande rutinanalys på laboratorium. Marken består av ca 15 m lös normalkonsoliderad lera varav den övre metern är torrskorpa. Leran underlagras av morän på berg. På 1-6 m djup under markytan är lerans densitet 1,5-1,6 t/m³, vattenkvoten 65-85% och den odränerade skjuvhållfastheten är ca 12 kPa. Under 6 m djup är densiteten ca 1,7 t/m³, vattenkvoten 50-60% och den odränerade skjuvhållfastheten ökar från ca 10 kPa på 6 m djup till ca 20 kPa i botten av lerlagret. Plasticitets- och flytindex utvärderades till 34 respektive 1,12 på homogeniserad lera mellan 2 och 11 m djup. Portrycksnivån i leran motsvarar en grundvattenyta ca 1 m under markytan.

2 Laboratoriearbeten

2.1 Inledning

I ostabiliserad jord finns ett samband mellan initiell skjuvmodul vid små töjningar och aktuell effektivspänning, konsolideringsgrad och portal (Hardin 1978). Även den odränerade skjuvhållfastheten är en funktion av aktuell effektivspänning och konsolideringsgrad. Portalet i vattenmättad jord beror av vattenkvoten och portalet vid en given effektivspänning och konsolideringsgrad kan normalt relateras till jordens flytindex. I normalkonsoliderad lera finns alltså ett samband mellan initiell skjuvmodul vid små töjningar och odränerad skjuvhållfasthet, vattenkvot och flytindex (Larsson och Mulabdic 1990).

I stabiliserad jord utgörs skjuvhållfastheten till stor del av cementation mellan kornen. Vilka faktorer som påverkar den initiella skjuvmodulen har inte undersökts, men det antas huvudsakligen vara samma faktorer som påverkar hållfastheten. Det bör därför finnas ett användbart samband mellan initiell skjuvmodul och hållfasthet även i denna typ av material. Samband mellan initiell skjuvmodul och skjuvhållfasthet skall därför försöka upprättas.

Under ideala förhållanden borde dessa samband upprättas genom fältmätningar eller genom triaxialförsök under samma spänningsförhållanden som i fält. Dock är de horisontella och vertikala effektivspänningarna i jorden relativt låga innan någon yttre last påförs den stabiliserade jorden, vilket innebär att enaxiella tryckförsök och triaxialförsök ger relativt lika resultat. Enaxiella tryckförsök är dessutom en vanlig metod för utvärdering av hållfastheten både på provkroppar tillverkade i laboratorium och provkroppar tagna i fält.

Laboratoriearbetena utfördes i följande etapper:

1. Tillverkning av provkroppar av stabiliserad lera. Som bindemedel användes kalk- och cement i proportionerna 50/50%. Bindemedelsmängden var 80 alternativt 120 kg/m³ stabiliserad jord.
2. Mätning av skjuvvågshastighet (V_s) genom försök med böjelement – ”bender element tests” - på stabiliserade jordprover.
3. Utvärdering av skjuvmodulen vid små töjningar, G_0 , utifrån uppmätt skjuvvågshastighet och materialtes densitet.
4. Enaxiella tryckförsök för bestämning av den stabiliserade jordens odränerade skjuvhållfasthet.
5. Upprättande av samband mellan skjuvvågshastighet och skjuvmodul/skjuvhållfasthet för aktuell kombination av jord/bindemedelsmängd/blandningsenergi.

2.2 Bender element test – kortfattad metodbeskrivning

Skjuvmodulen vid små töjningar kan mätas i laboratorium genom försök med böjelement – ”bender element tests” (Dyvik och Madshus 1985). Böjelementen är små tunna plattor som fästs i den övre och undre tryckplattan på tryckmaskinen, se *Figur 1*.



Figur 1. Böjelementen fästs i undre och övre tryckplattan på tryckmaskinen.

Det oförstörande försöket med böjelement kan utföras inför eller när som helst under ett pågående tryckförsök. I en provkropp av lös lera trycks plattorna försiktigt in i provkroppens ändtyr. I en styvare provkropp av stabiliserad jord, görs inledningsvis en smal skåra i provkroppens ändtyr som fylls med gips. Plattorna trycks omedelbart in i det färska gipset, som får härda innan försöket kan utföras, se *Figur 2 och 3*.



Figur 2. Gipsfylld skåra i provkropp.



Figur 3. Provkropp placerad i tryckmaskinen.

Skjuvvågshastigheten mäts genom att en elektrisk puls påförs en av plattorna. Den elektriska pulsen får plattan att böja ut vilket alstrar en skjuvvåg som transporteras genom provkroppen. När skjuvvågen når den motstående plattan, böjs denna och en ny elektrisk puls bildas. Skjuvvågshastigheten beräknas utifrån den uppmätta gångtiden för skjuvvågen och avståndet mellan de båda plattorna. Skjuvmodulen beräknas enligt

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (\text{Ekv. 1})$$

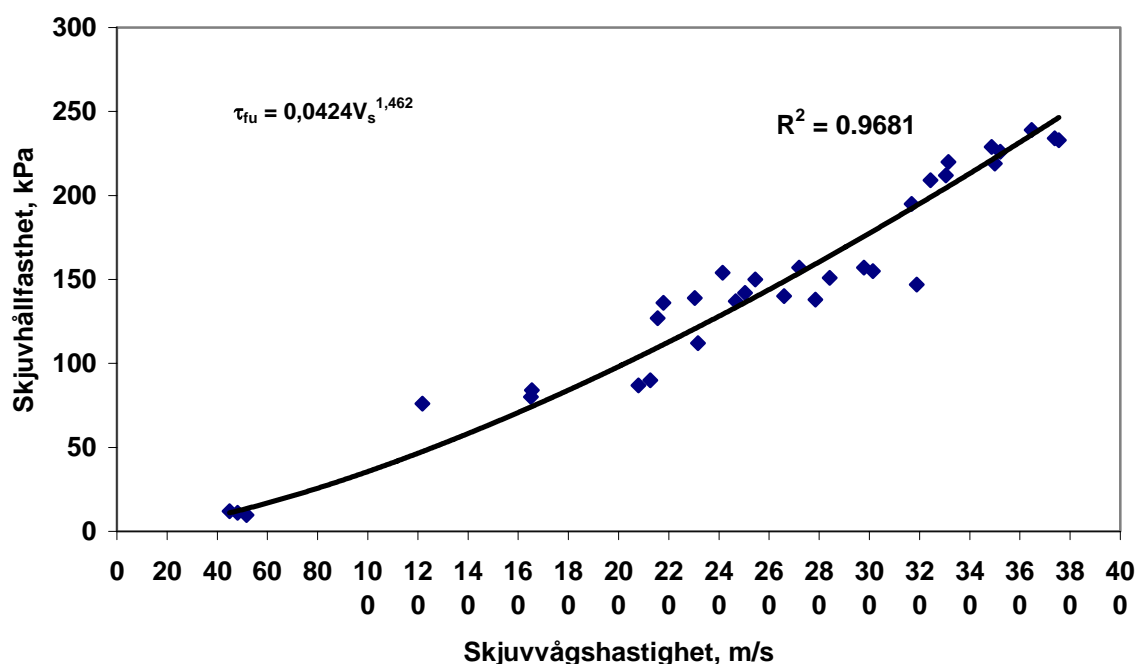
där

G_0 = initial skjuvmodul (kPa)
 ρ = provkroppens densitet (t/m^3)
 V_s = skjuvvågshastighet (m/s)

2.3 Utvärderade samband mellan c_u och V_s (och G_0)

Omfattande försök med böjelement på stabiliserad jord utförda av Hird (2005) visar ett tydligt samband mellan odränerad skjuvhållfasthet och skjuvvågshastighet (och initiell skjuvmodul). För utvärdering av en pelares hållfasthet i fält är det bättre att direkt använda den uppmätta skjuvvågshastigheten V_s .

I detta projekt utfördes försök med böjelement såväl på ostabiliserad jord som på provkroppar av stabiliserad jord som tillverkats i laboratorium. Bindemedlet var kalk och cement i proportionerna 50/50%. Två olika inblandningsmängder användes, 80 respektive 120 kg/m^3 , och försöken utfördes vid två olika tidpunkter för att erhålla olika hållfasthet på provkropparna. Resultaten visar ett relativt tydligt samband mellan odränerad skjuvhållfasthet och skjuvvågshastighet, se *Figur 4*.



Figur 4. Utvärderat samband mellan odränerad skjuvhållfasthet, c_u , och skjuvvågshastighet, V_s .

Spridningen av mätdata är likartad som vid provningar utförda av Hird (2005), men ”best fit equation” är annorlunda. Detta visar att olika samband mellan skjuvvågshastighet och skjuvhållfasthet kan finnas i olika typer av jordar och för olika bindemedel. För Uppsalalera stabiliserad med kalk och cement i proportionerna 50/50% är det bedömda sambandet

$$c_u = 0.0424 \cdot V_s^{1.462} \quad (\text{Ekv. 2})$$

där

c_u = odränerad skjuvhållfasthet (kPa).

Då samma bindemedel och inblandningsmängder använts vid fältmätningarna har ovanstående samband använts vid utvärdering av skjuvhållfasthet utifrån Down holemätningar i pelare.

3 Fältmätningar

3.1 Inledning

Fältmätningarna genomfördes i följande etapper:

1. Installation av pelare med tillhörande plaströr och -slangar för geofoner och exciteringskälla.
2. Down hole-mätning i enskilda pelare; mätning av skjuvvågshastighet (V_s) i centriskt placerad plastslang i enstaka pelare. Excitering av polariserad skjuvvåg med hjälp av piezoelektrisk eller mekanisk borrhålskälla i separat ytligt plaströr i pelartoppen.
3. Ultrasonic-loggning i enskilda pelare för bestämning av pelarens homogenitet (används bl a för kontroll av betong).
4. Traditionella pelarsonderingar (förborrad KPS) för bedömning av pelarnas skjuvhållfasthet och homogenitet.
5. Upprättade samband från laboratorieförsöken $-V_s \Leftrightarrow G_0$, $V_s \Leftrightarrow \tau_{fu}$ – nyttjas för utvärdering av de seismiska fältmätningarna och jämförs med resultat från traditionella KPS-sonderingar. Samma kombinationer av jordtyp/bindemedelsmängd/blandningsenergi som provats i laboratorium har även provats i fält.

3.2 Installation av pelare och mätrör

Totalt 30 st KC-pelare installerades i detta projekt. Pelarna delades in i 4 olika grupper med olika installationsparametrar enligt *Tabell 1* nedan:

Pelartyp	Bindemedelsmängd (kg/m ³)	Stigningshastighet (mm/varav)
A	80	15
B	80	30
C	120	15
D	120	30

Tabell 1. Pelartyper.

Bindemedlet var samma som användes vid laboratorieförsöken, dvs en blandning av kalk och cement i proportionerna 50/50%.

För att möjliggöra Down-hole mätningar i pelarna utvecklades en metod att installera plaströr och -slangar för geofoner och borrhålskälla. Direkt efter att pelaren är installerad demonteras inblandningsverktyget och ersätts med en bottenplugg. Plastslangen för geofonerna förses med en sko som hakas fast i borrhållens bottenplugg, se *Figur 5*. Se även *Bilaga 6*.



Figur 5. Plastslang försedd med sko.

Borrstängan trycks därefter ned i centrum av pelaren och drar med sig plastslangen ned nära centrum av pelaren. När borrstängan dras tillbaka lossnar plastslangen och blir kvar i pelaren. Det kortare plaströret för den ytliga borrhålskällan trycktes på plats med hjälp av stödfoten på KC-pelarmaskinen. På samma sätt installerades ett antal plastslangar och –rör i ostabiliserad jord. För att effektivisera installationen utfördes ca 5 st pelare i följd innan inblandningsverktget demonterades och plastslangar och rör installerades i pelarna.



Figur 6. Installation av pelare med plastslangar och –rör för geofoner och exciteringskälla.

För ultrasonic mätningarna installerades 3 st 2” stålrör längs ytterkanten i 6 olika pelare. Stålrörens längd var 12 m och bestod av två segment som skarvades med gängskarv. Rören lyftes på plats och trycktes ned av pelarmaskinen.

3.3 Mätprogram

Hela mätprogrammet framgår av *Bilaga 1*. I fyra pelare (A6, B5, C2 och D2) samt i ostabiliserad jord (B8) utfördes kompletterande mätningar med en mekanisk borrhålshammare som är enklare och billigare än den piezoelektriska källan.

På grund av brott eller skada på plastslangarna kunde Down holemätningar inte utföras i 4 av pelarna (A1, A2, C7, D7) samt punkt C8 i ostabiliserad jord. Således utfördes Down holemätningar i 26 av de 30 pelare som installerats.

I samband med installation av pelare A8 och A9 avbröts utblåsning av bindemedel på två nivåer i respektive pelare för att undersöka om det går att lokalisera en svaghetszon och hur denna påverkar mätresultaten.

I pelare A4 och A8 installerades 3 st ytliga plaströr för exciteringskällan i syfte att undersöka om källans position påverkade mätresultaten.

För att undersöka om det är möjligt att detektera skjuvvågor i utkanten av en pelare, vilket i så fall innebär att man inte i förväg måste bestämma vilka pelare som skall kontrolleras, installerades slangar och rör precis utanför pelare A5 och A7.

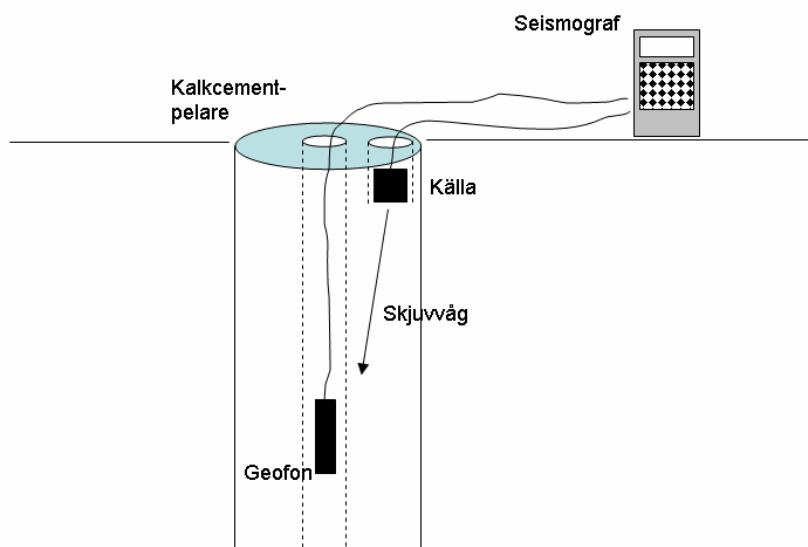


Figur 7. Pelare A8 försedd med mätrör; 1 st plastslang för geofoner, 3 st ytliga plaströr för exciteringskälla samt 3 st stålrör för ultrasonic.

3.4 DH-mätningar - kortfattad metodbeskrivning

Seismiska Down hole-mätningar med skjuvvågor innebär att seismiska skjuvvågor alstras med en källa i toppen på pelaren. Vågorna detekteras på olika djup i pelaren med geofoner nedsänkta i en plastslang i pelarens centrum (Figur 8). 1,0 meters geofonavstånd användes vid denna undersökning. Tiden för första ankommande skjuvvåg plockas efter dataprocessering ur erhållna seismogram. Då källans och geofonens positioner är kända kan skjuvvågshastigheten beräknas.

Ett problem vid denna typ av seismiska mätningar är att det inte går att enbart generera skjuvvågor (S-vågor). Då källan avger sin energi till marken skapas även kompressionsvågor (P-vågor) och ytvågor, samt reflexer av dessa. I borrhål fås även en sk tub-våg som är en form av ytvåg som färdas längs borrhålsväggen i gränsskiktet mellan borrhålet och omgivande material. Den direkta P-vågen kan oftast lätt identifieras eftersom den är snabbast (anländer först till geofonen) samt har en hög frekvens. Övriga vågor kan vara svårare att särskilja. Genom att vid varje exciteringstillfälle även göra en mätning med källan vriden 180° skapas en våg som (teoretiskt) är identisk med det första vågpaketet, men som för skjuvvågor är fasvänd. Tub-vågor har generellt lägre hastighet än S-vågor, men kan ändå vara svåra att skilja från S-vågor eftersom även dessa fasvänder. Inom detta projekt bedöms risken för att ha blandat ihop tub- och skjuvvågor som mycket liten eftersom borrhålen varit luftfyllda.



Figur 8. Schematisk skiss över instrumentuppställning vid VSP- (down hole) mätning.

Skjuvvågorna alstrades med hjälp av en piezoelektrisk borrhålskälla nedsänkt ca 1,0 m i ett plaströr i kanten på varje pelare. Energin till den 1000 J impulsgenerator som driver källan alstras med en bensindriven generator. Källan ”triggas” (utlöses) med en fjärrkontroll. Skjuvvågorna detekteras med 3 st. borrhålsgeofoner, separerade 1,0 m, som var och en känner av 5 st. olika komponenter av seismiska vågor (varav dock bara 4 st. kunde registreras på grund av tekniska begränsningar). Data registrerades med en PC-styrd seismograf (ABEM Terraloc MK6). Alla rådata sparades digitalt på olika medier. En mekanisk borrhålshammare användes även som källa i fyra pelare och i ostörd jord.



Figur 9. Piezoelektrisk borrhålskälla.



Figur 10. Geofoner



Figur 11. Impulsgenerator



Figur 12. Seismograf ABEM TerralocMK6

3.5 Ultrasonic - kortfattad metodbeskrivning

Ultrasonic (eller ultraljud) är en seismisk metod där högfrekventa tryckvågor alstras med en källa och tas emot med en mottagare varvid tryckvågens hastighet kan beräknas. Metoden är mycket vanlig vid undersökningar av betongkonstruktioner. Vågornas höga frekvens gör att det är möjligt att detektera små sprickor, kaviteter och partier där betongen har sämre kvalitetsegenskaper. Så kallad "ultrasonic logging" är en relativt vanlig metod för kontroll av betongkonstruktioner. Två eller fler borrhål borrar i den volym som skall undersökas. En ultraljudskälla dras från botten till toppen i ett av hålen samtidigt som den kontinuerligt alstrar vågor. En eller flera mottagare registrerar vågorna från källan i täta intervall i de övriga borrhålen. Mätdata bearbetas med en datorbaserad programvara som gör det möjligt att beräkna en två- eller tredimensionell hastighetsmodell (tomogram) över den uppmätta volymen. Modellen visualiseras som en färglagd konturkarta som relativt enkelt gör det möjligt att identifiera hastighetsvariationer som kan kopplas till exempelvis sprickor eller

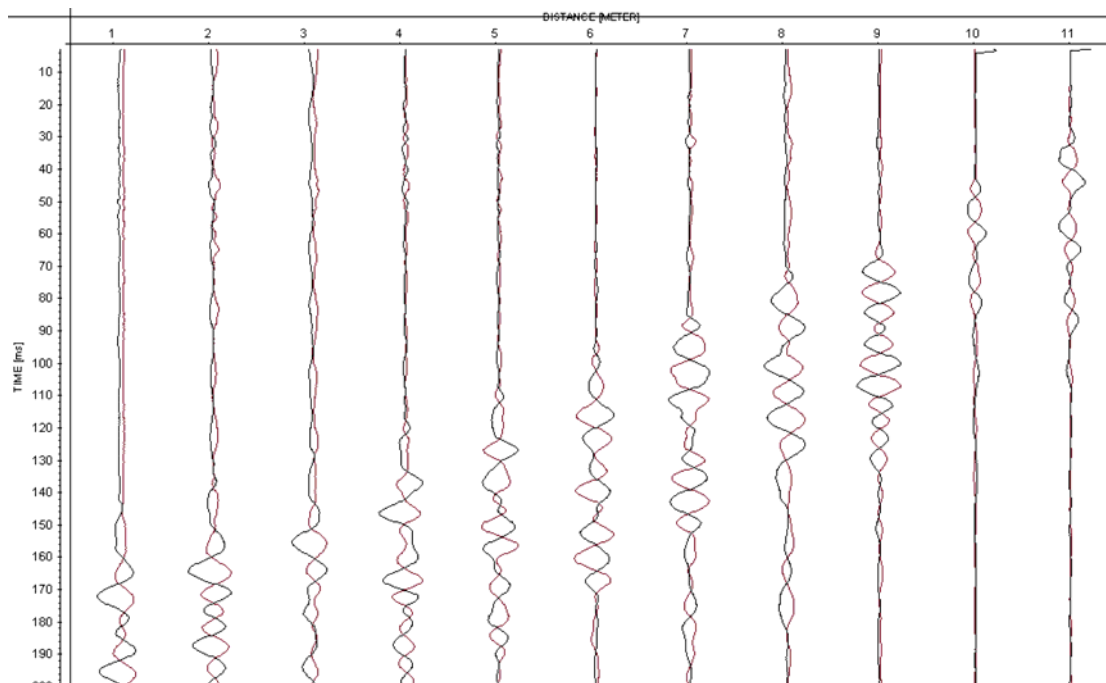
kaviteter. Metoden har, så vitt författarna känner till, aldrig tidigare provats på kalkcementpelare.



Figur 13 a-b. Ultrasonicmätning i pelare A8.

3.6 Resultat och tolkning av seismiska mätresultat

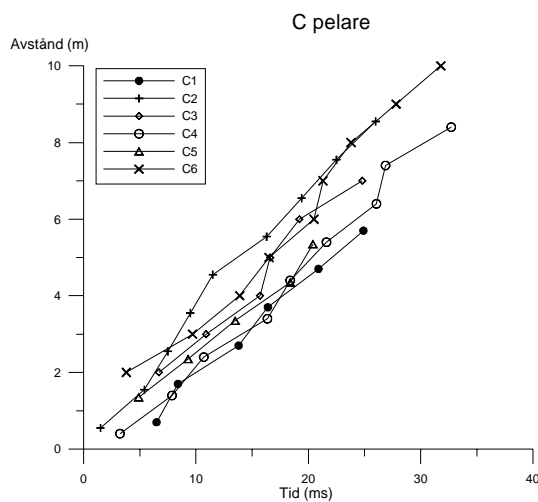
Vid DH-mätningarna utfördes i varje mätpunkt 2 st exciteringar av skjuvvågor i vardera fasriktning. Eftersom 4 st olika komponenter registrerades per geofon, erhöles 8 seismogram i varje mätpunkt. Varje komponent delades upp för sig och plottades sektionsvis med avseende på avståndet mellan geofon och källa, men med båda faserna plottade på varandra. Seismogramfigurena består således av en nedåtriktad tidsaxel (millisekunder) och en x-axel (meter) med varje seismogrampar numrerade från 1 och uppåt, där den djupast sittande geofonen har nummer 1 och sedan stegvis uppåt med 1,0 m avstånd, se *Figur 14*.



Figur 14. Exempel på seismogram från mätning i ostörd jord.

Hastigheten på skjuvvågen beräknas enkelt med formeln $s = v \cdot t$, där s är den förmodade sträckan vågen färdats (dvs den räta linjen mellan källpunkten och geofonpunkten), v = skjuvvågshastigheten och t = 1:a ankomsttiden på skjuvvågen. Hastighetsvariationer i pelarna beräknas genom att plotta data i sk sträcka – tid diagram, dvs avståndet källa-geofon mot 1:a ankomsttid. Genom att studera diagrammen kan man identifiera linjära segment, vilket innebär avsnitt med konstant skjuvvågshastighet. Med regressionsanalys görs en linjär anpassning till utvald sektion och lutningen på kurvan svarar då mot skjuvvågshastigheten längs vald sektion. Man får också automatiskt statistik på hur bra anpassningen är till data.

I *Figur 15* presenteras exempel på sträcka-tid-diagram för pelare C1-C6.



Figur 15. Sträcka-tid-diagram för pelare C1-C6.

Ett annat sätt att utvärdera skjuvvågshastigheten är så kallad punktvis bestämning. Detta innebär att man för en viss nivå dividerar avståndet mellan närmaste geofon belägna över respektive under den aktuella nivån med skillnaden i ankomsttid mellan samma geofoner. Bestämning av skjuvvågshastighet med denna metod är mycket känslig för mindre osäkerheter i bestämning av första ankomsttiden, vilket innebär större spridning jämfört med utvärdering med linjär regression.

För vidare utvärdering av pelarnas odränerade skjuvhållfasthet används sambandet enligt *Ekv 2* som upprättats utifrån laborieförsöken.

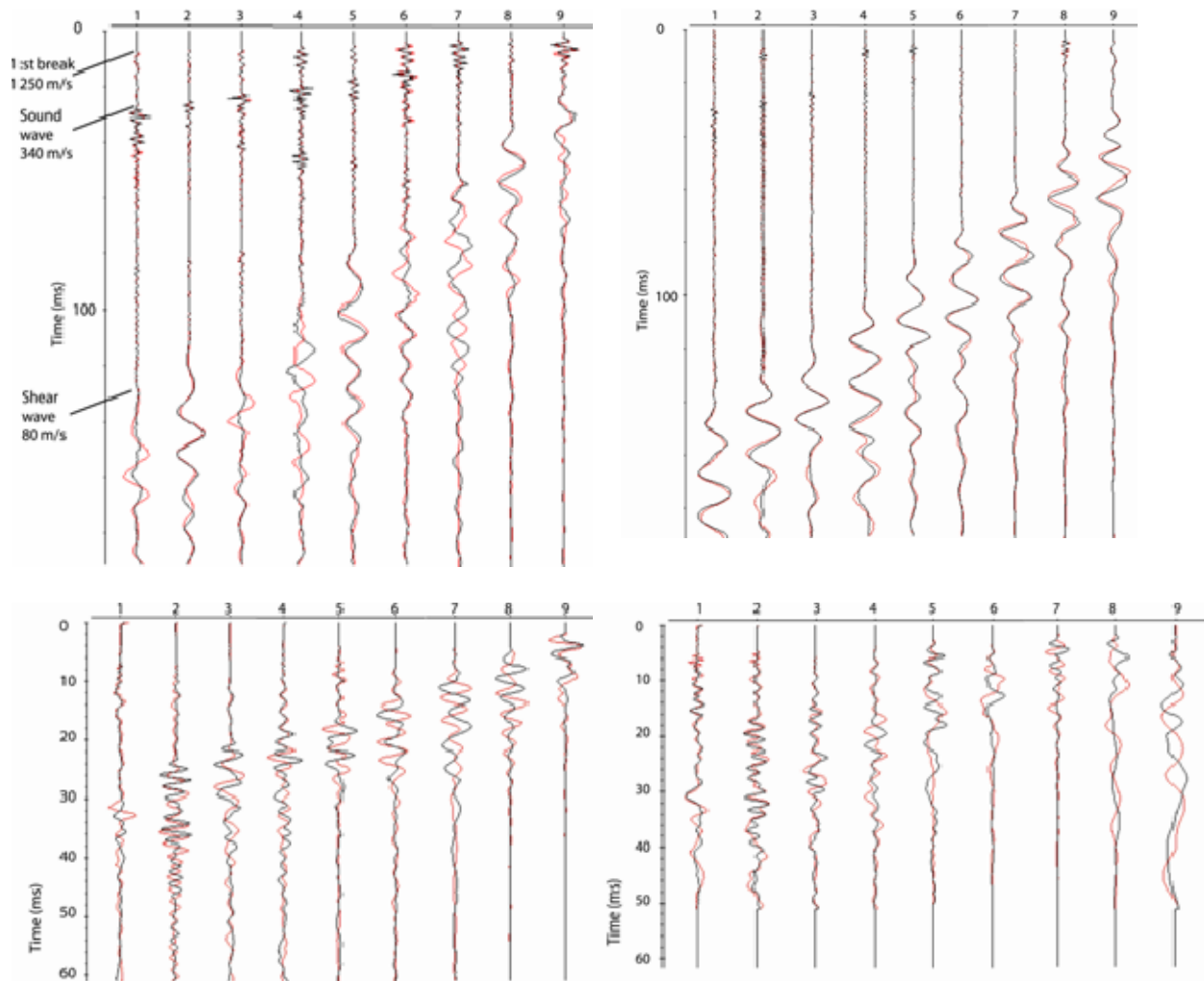
3.6.1 Down hole mätningar i pelare och ostabiliserad jord

Datakvaliteten från mätningar i ostabiliserad jord är mycket hög och man kan tydligt urskilja den först ankommande tryckvågen ($v=1250$ m/s), liksom ljudvågen ($v=340$ m/s) och skjuvvågen, se *Figur 16* (övre vänster).

Utifrån linjär regressionsanalys är den genomsnittliga skjuvvågshastigheten i ostabiliserad lera mellan 2 och 10 m djup $V_s=74$ m/s, och mellan 10 och 13 m djup är $V_s=165$ m/s.

Mätdata från pelarna är mer komplexa och datakvaliteten varierar inom pelare och mellan olika pelartyper. Ett exempel på bra datakvalité med låg brusnivå, en tydlig signal och ett entydigt fasskifte är mätdata från pelare C4, se *Figur 16* (nedre vänster). Den tolkade skjuvvågshastigheten är relativt konstant längs hela pelarens längd med ett medelvärde av $V_s=280$ m/s. För några andra pelare är seismogrammen mer komplexa; signalen innehåller

flera överlagrade frekvenser, det är en hög brusnivå och fasskifte saknas (*Figur 16, nedre höger*). Detta medför att det är svårt att bestämma den första skjuvvågens ankomsttid. Mätdata med hög kvalitet har ett frekvensinnehåll 150-250 Hz och en genomsnittlig skjuvvågshastighet på 250-300 m/s, vilket medför våglängder mellan 1,0 och 2,3 m. Vid bestämning av första ankomsttid var kriteriet att frekvensen skulle ligga inom ovan angivna intervall samt att det skulle vara ett tydligt fasskifte på huvuddelen av seismogrammen, annars förkastades mätresultaten. Detta resulterade i att det generellt inte gick att fastställa den första ankomsttiden längs de övre 1-3 m av pelaren, och i B-pelarna identifierades mycket få ankomsttider över 6 m djup.



Figur 16. Seismogram. Övre vä; ostabiliserad jord med piezoelektrisk källa. Övre hö; ostab. jord med mekanisk källa; Nedre vä; Pelare C4, hög kvalitet på mätdata. Nedre hö; Pelare B4, låg kvalitet på mätdata.

De beräknade hastigheterna i pelarna varierar bitvis mycket, men där finns en generell samstämmighet i skjuvvågshastighet både mellan pelare av samma typ och mellan olika pelartyper. Resultaten indikerar att skjuvvågshastigheten i de övre ca 5 m i A-pelarna är ca 250 m/s och under 5 m djup är hastigheten över 300 m/s. Datakvaliteten från de övre delarna av B-pelarna är låg och den höga hastigheten i pelare B5 utvärderad med den mekaniska borrhålskällan är inte realistisk. De nedre 5-10 m av B-pelarna uppvisar en genomsnittlig skjuvvågshastighet av ca 300 m/s som ökar något mot djupet. Mätdata med högst kvalitet erhöles från mätningarna i C-pelarna. Längs de övre 1-5 m var skjuvvågshastigheten 250 m/s

(förutom pelare C2) och mellan 5 och 11 m djup var skjuvvågshastigheten 300 m/s. Mätdata från de översta 5 m av D-pelarna indikerar en genomsnittlig skjuvvågshastighet på ca 300 m/s. Mätningarna i ostabiliserad jord visar mycket god överensstämmelse sinsemellan med svag skjuvvågshastighetsökning mot djupet.

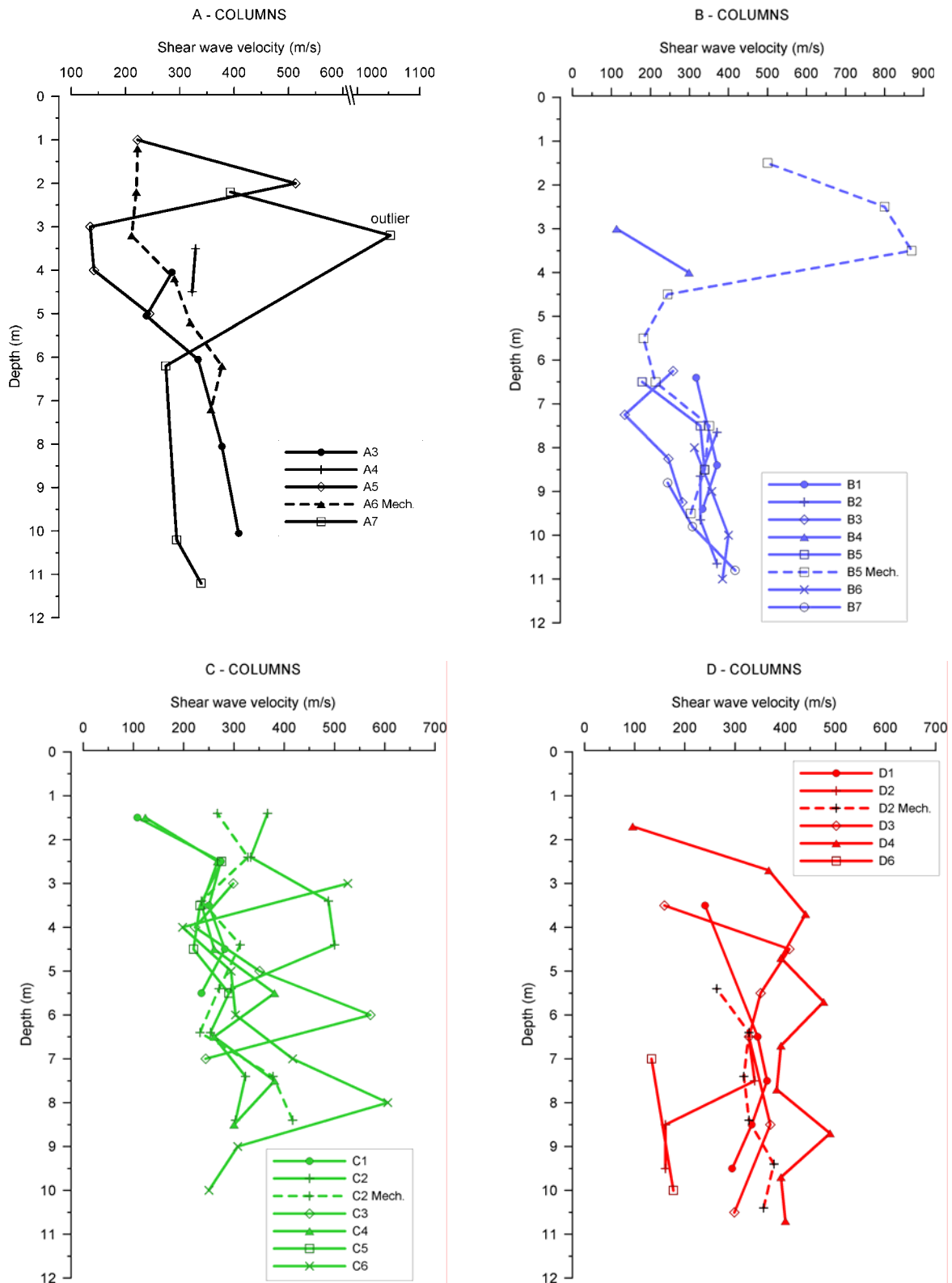
Eftersom kvalitén på mätdata från mätningar i ostabiliserad jord är mycket hög har dessa använts som referens vid utvärderingen av mätresultaten i pelarna. Skjuvvågshastigheten i pelarna är generellt 2-6 gånger högre än i ostabiliserad jord. Noggrannheten vid punktvis bestämning av skjuvvågshastigheten bedöms vara i intervallet ± 30 -50 m/s, och vid linjär regression generellt något bättre.

I *Tabell 2* redovisas genomsnittliga skjuvvågshastigheter för samtliga pelare beräknade genom linjär regression.

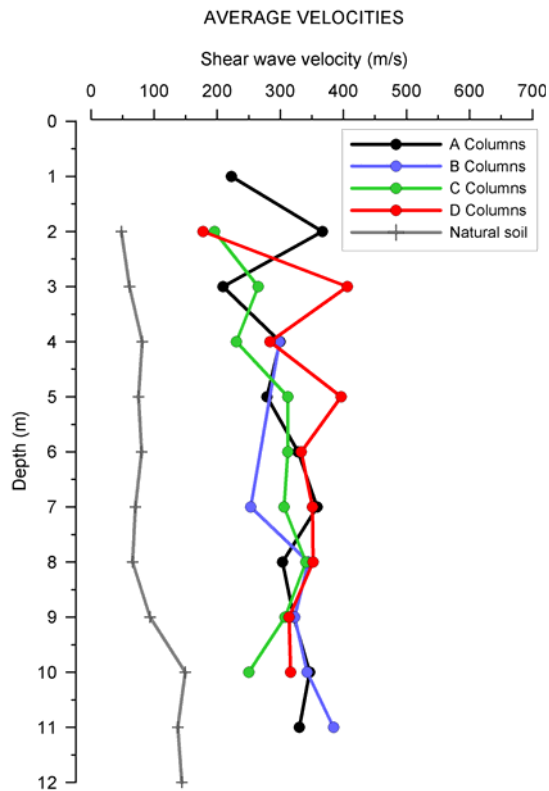
Pelare	V _s (övre delen av pelaren)	V _s (nedre delen av pelaren)	Anmärkning
A3		371 m/s (5.1-11.1 m)	
A4	416 m/s (3.5-5.5 m)		
A5	141 m/s (3.0-5.0 m)		
A6M	196 m/s (1.2-3.2 m)	326 (3.2-7.2 m)	Mekanisk exciteringskälla
A7	228 m/s (2.2-7.2 m)	310 m/s (9.2-12.2)	
B1		332 m/s (5.4-10.4 m)	
B2		335 m/s (7.7-10.7)	Dålig datakvalitet
B3		179 (6.3-10.3 m)	Dålig datakvalitet
B4	295 m/s (3.0-5.0 m)		
B5		335 m/s (6.5-9.5 m)	
B5M	802 m/s (1.5-4.5 m)	337 m/s (6.5-9.5 m)	Mekanisk exciteringskälla
B6		369 m/s (8.0-11.0 m)	
B7		316 m/s (5.8-10.8 m)	Dålig datakvalitet
C1	262 m/s (1.5-6.5 m)		
C2	493 m/s (2.4-5.4 m)	310 m/s (6.4-9.4 m)	
C2M	270 m/s (1.4-4.4 m)	376 m/s (6.4-8.4)	Mekanisk exciteringskälla
C3	222 m/s (3.0-5.0 m)	297 m/s (5.0-8.0 m)	
C4	233 m/s (1.5-4.5 m)	304 m/s (4.5-9.5 m)	
C5	223 m/s (2.5-5.5 m)		
C6	284 m/s (4.0-7.0 m)	279 m/s (8.0-11.0 m)	
D1		340 m/s (6.5-9.5 m)	Delvis dålig datakvalitet
D2	339 m/s (6.5-8.5 m)	147 m/s (8.5-10.5 m)	
D2M		333 m/s (5.4-10.4)	Mekanisk exciteringskälla
D3	352 m/s (3.5-11.5 m)		
D4	388 m/s (1.7-5.7 m)	391 m/s (8.7-11.7 m)	
D6		239 m/s (6.0-11.0 m)	
Nat. Soil	80 m/s (2.5-8.5 m)	180 m/s (8.5-10.5 m)	Mätning maj 2004 piez. källa
Nat. Soil	67 m/s (3.0-9.0 m)	174 m/s (9.0-11.0)	Mätning dec 2003 piez. källa
Nat. Soil M	74 m/s (2.0-10.0 m)	142 m/s (10.0-13.0 m)	Mätning maj 2004 mek. källa

Tabell 2. Genomsnittliga skjuvvågshastigheter i pelare och ostabiliserad jord utifrån linjär regressionsanalys.

I *Figur 17* presenteras skjuvvågshastigheter utvärderade genom punktvis bestämning (medelhastighet längs 2 m av pelarens längd) som funktion av djupet för individuella pelare och i *Figur 18* redovisas genomsnittliga värden för respektive pelartyp tillsammans med data från ostabiliserad jord.



Figur 17. Utvärderad skjuvvågshastighet som funktion av djupet för samtliga pelare. Streckad linje betyder att skjuvvågen exciterats med hjälp av den mekaniska borrhålskällan.



Figur 18. Utvärderad genomsnittlig skjuvvågshastighet som funktion av djupet för pelartyp A, B, C, och D samt för ostabiliserad jord.

3.6.2 Down hole mätningar med mekanisk borrhålskälla

För fyra pelare, A6, B5, C2 och D2, användes även en enklare och billigare mekanisk borrhålshammare som exciteringskälla, se Figur 19.

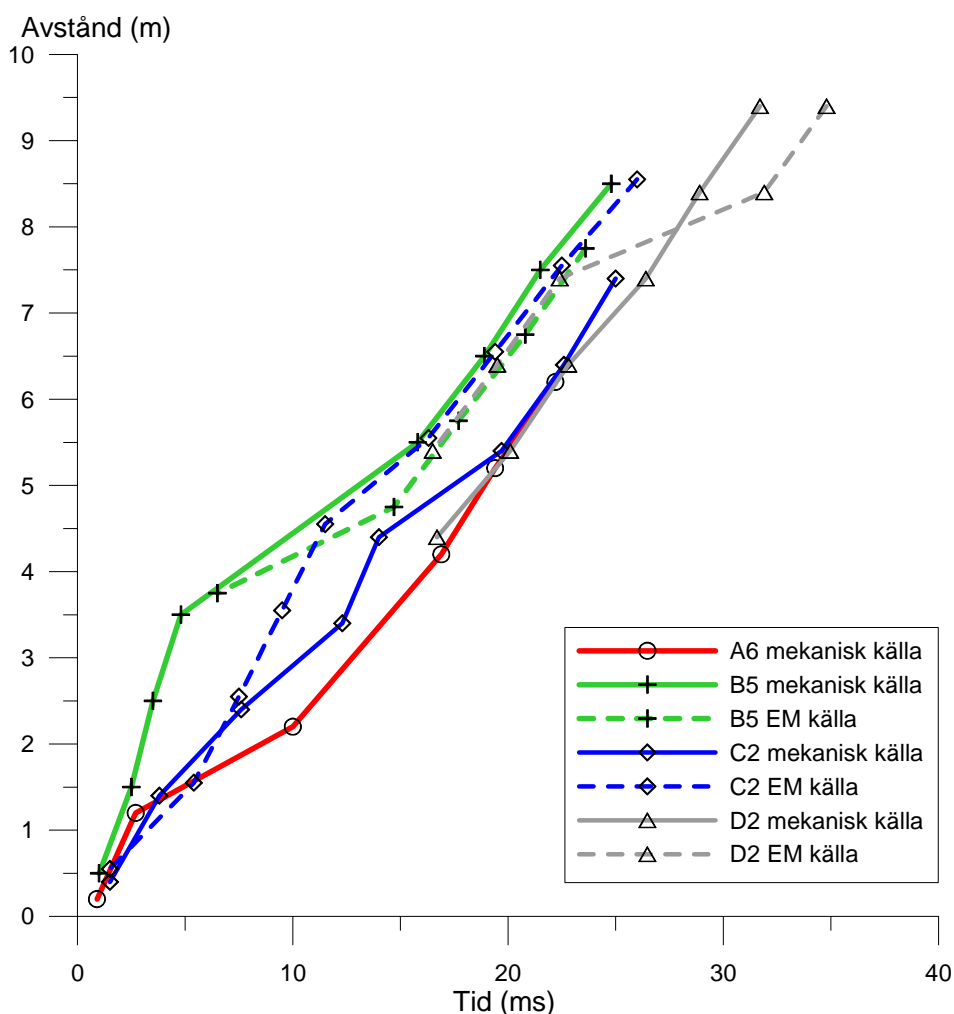


Figur 19. Mekanisk borrhålshammare

I Figur 20 nedan visas en jämförelse mellan dessa mätningar och motsvarande mätningar gjorda med den piezoelektriska källan. Notera att för pelare A6 finns inga data från den piezoelektriska källan.

En grafisk jämförelse mellan den mekaniska källan och den piezoelektriska källan indikerar att mätdata generellt visar god överensstämmelse. De två graferna för pelare B5 ligger mycket nära varandra, medan vissa avvikelser ses för pelare C2 och D2. En jämförelse mellan beräknade hastigheter visar också på en relativt god överensstämmelse mellan de två källorna.

Det bör påpekas att de vågor från den mekaniska källan som här tolkats som skjuvvågor är betydligt mer högfrekventa än de från den piezoelektriska källan. Dessutom uppvisar den mekaniska källan inget fasskifte trots att mätningar gjordes med hammaren vriden i olika riktningar, vilket kan indikera att de vågor som tolkats som skjuvvågor skulle kunna vara av en annan typ, men troligen beror det på hammarens konstruktion och verknings sätt.



Figur 20. Sträcka – tid diagram för mätningar i pelare med mekanisk och piezoelektrisk källa.

3.6.3 Down hole-mätningar i pelare med avbrott, med olika positioner på källan samt med geofoner i plastslang utanför pelaren

I samband med installation av pelare A8 och A9, avbröts utmatning av bindemedel på två olika nivåer i respektive pelare för att undersöka om större svaghetszoner kan lokaliseras med seismiska mätningar, se även mätprogram *Bilaga 1*:

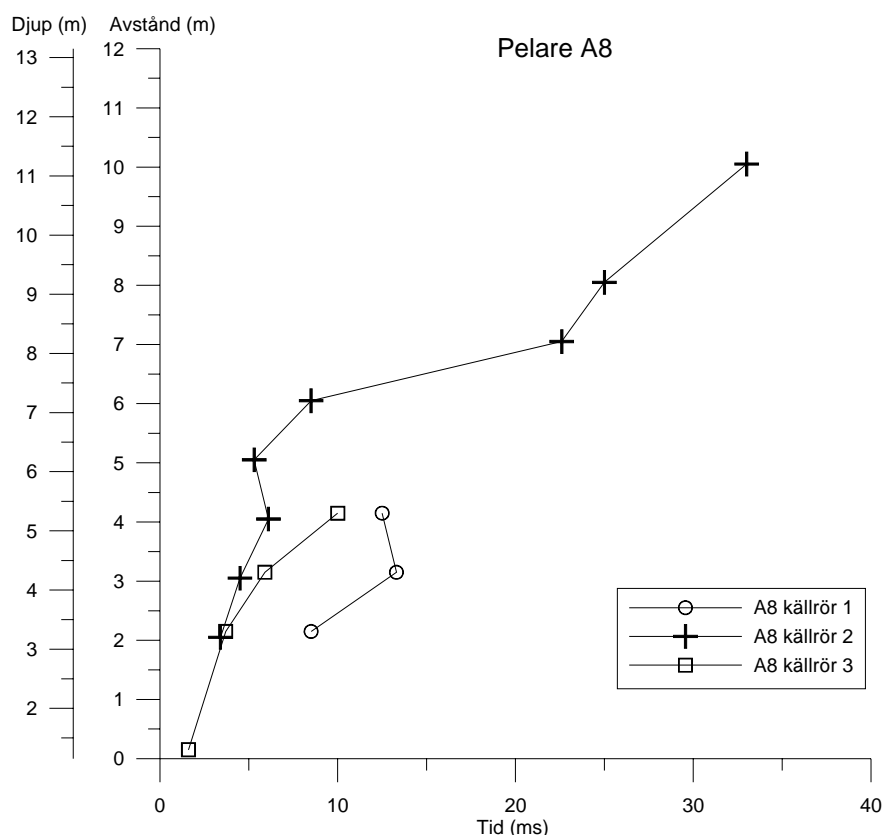
- pelare A8: 4,0-5,0 m samt 8,5-9,0 m under markytan
- pelare A9: 4,5-5,0 m samt 8,0-9,0 m under markytan

I pelare A8 och A4 utfördes mätningar med exciteringskällan placerad i 3 st olika positioner (Figur 7).

I pelare A8 gjorde 3 mätningar med källan i 3 olika positioner i pelaren. I rådata från mätningen med källan i position 1 och 3 syns en tydlig förändring i signalen mellan djupen 5,3 och 6,3 meter. Ovanför 5,3 m djup finns väl identifierbara skjuvvågor, medan seismogrammet från 6,3 m djup är stört och svårtolkat. De vågor som detekteras djupare än 6,3 m är högfrekventa och saknar fasskifte, vilket indikerar att dessa kanske inte är skjuvvågor. Därför finns endast 3 mätpunkter presenterade för dessa positioner i figur 8. En mätning (position 2) resulterade i relativt bra data längs en större del av pelaren, och resultaten indikerar låg skjuvvågshastighet längs djupintervallet ca. 7-8 meter (figur 8). Osäkerheten i resultaten bedöms dock vara stor.

I rådata från mätningen med källan i position 2 syns även här en tydlig förändring i signalen mellan djupen 5,3 och 6,3 meter. Precis som för källpositionerna 1 och 3 finns ovan 5,3 m djup väl identifierbara skjuvvågor, medan seismogrammet från 6,3 m djup är stört och svårtolkat. Den karakteristiska skjuvvågssignalen tros kunna identifieras i vissa seismogram från djup större än 6,3 m, men är ofta upplandad med vågor som är mer högfrekventa och saknar fasskifte.

I Figur 21 nedan visas ett sträcka-tid diagram baserat på data från de tre olika mätningarna. Det som möjligen kan vara skjuvvågor från mätningen med källan i position 2 indikerar en större låghastighetszon i pelaren mellan ca. 7,3 m och 8,3 m djup. Osäkerheten i denna tolkning är dock hög.



Figur 21. Sträcka – tid diagram över mätningar i pelare A8 (i vilken avbrott i utmatning av bindemedel gjorts) där den seismiska källan placerats i tre olika positioner.

Även i pelare A4 gjordes mätningar med källan placerade i tre olika positioner. Borrålet för geofonerna var dock så grunt att endast tre mätpunkter nära markytan erhöles. För två av mätningarna blev datakvaliteten god och de beräknade skjuvvågshastigheterna är 322 m/s respektive 510 m/s, vilket måste anses vara mycket stor variation i hastighet. Men, eftersom mätningarna är gjorda nära markytan och dessutom endast tre mätpunkter kunde användas för regressionsanalysen, är osäkerheten i de båda hastighetsbestämningarna så stor att resultaten inte kan användas för en vidare analys.

Mätdata från pelare A9 anses inte vara trovärdiga, troligen är de påverkade av någon typ av mättekniskt problem.

De två mätningar som utfördes med geofonerna placerade i ett borrhål strax utanför pelarna A5 och A7 gav inte några tolkningsbara resultat.

3.6.4 Ultrasonic

Ultrasonicmätningar utfördes av den brittiska firman PMC Ltd. på uppdrag av GeoVista AB. Mätningar gjordes på tre av de kalkcementpelare där speciella rör hade installerats för detta avseende. Det framgick ganska snabbt under mätningarnas gång att det inte var möjligt att registrera någon signal från ultrasonickällan. Upprepade försök visade att instrumentet fungerade som det skulle. Slutsatsen av denna provning är att den blandning av kalk, cement och lera som utgjorde pelarnas huvudbeståndsdelar dämpade de högfrekventa ultrasonicvågorna så kraftigt att de inte kunde registreras av mottagarna. Inga resultat finns därför att presentera från dessa mätningar.

3.7 Traditionell pelarsondering

Förutom de seismiska mätningarna utfördes traditionella pelarsonderingar, KPS, i pelare och ostabiliserad jord. Pelarsonderingarna utfördes med en vinge 400*20mm efter att förborring utförts med 32 mm borrhänger. Vingen var försedd med en glappkoppling så att mantelmotståndet längs borrhängerna grovt kunde utvärderas i slutet av respektive sondering.

Vid sonderingarna registerades det totala sonderingmotståndet som en kraft (kN).

Nettokraften beräknas genom att reducera total neddrivningskraft med den andel som beror på mantelfriktion. Nettotrycket beräknas som nettokraften dividerad med tvärsnittsarean på sondens vingar och spets. Vid utvärderingen togs hänsyn till utförd förborring, dvs den minskade tvärsnittsytan som förborringen innebär. Utvärdering av pelarnas (och den ostabiliserade jordens) skjuvhållfasthet utfördes enligt

$$\tau_{pel} = \frac{\sigma_n}{N} = \frac{F}{N \cdot A} = \frac{F}{10 \cdot A} \quad (Ekv. 3)$$

Utförande och utvärdering av traditionell pelarsondering beskrivs utförligt i SGF 2:2000 och i SD Rapport 8 Djupstabilisering med kalkcementpelare – metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält (Axelsson 2001).

4 Jämförelse mellan seismiska mätningar och traditionell pelarsondering

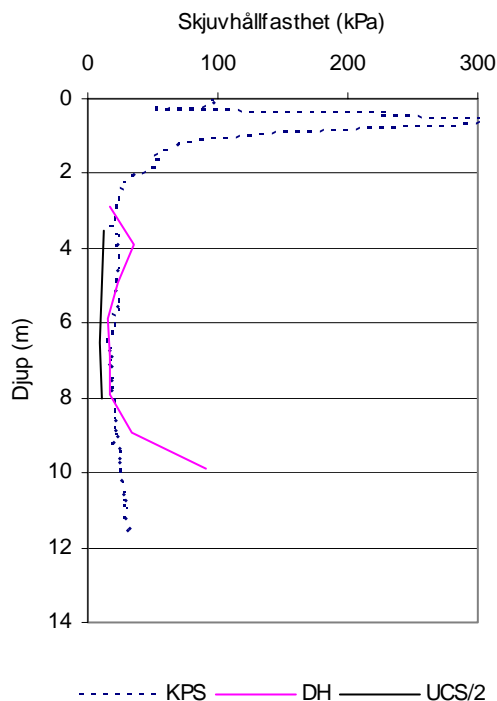
I *Bilaga 4* redovisas resultat från utförda KPS- och Down holemätningar för enskilda pelare. I respektive diagram redovisas skjuvvågshastigheten som funktion av djupet utvärderad genom punktvis bestämning, se kapitel 3.6. Vidare utvärdering av pelarhållfastheten har utförts utifrån sambandet mellan skjuvhållfasthet och skjuvvågshastighet som upprättats på laboratorium, då samma bindemedelstyp och inblandningsmängder använts i fält.

$$c_u = 0.0424 \cdot V_s^{1.462}$$

I diagrammen anges även skjuvvågshastigheten på olika djupintervall utvärderad genom linjär regressionsanalys.

4.1 Mätningar i ostabiliserad jord

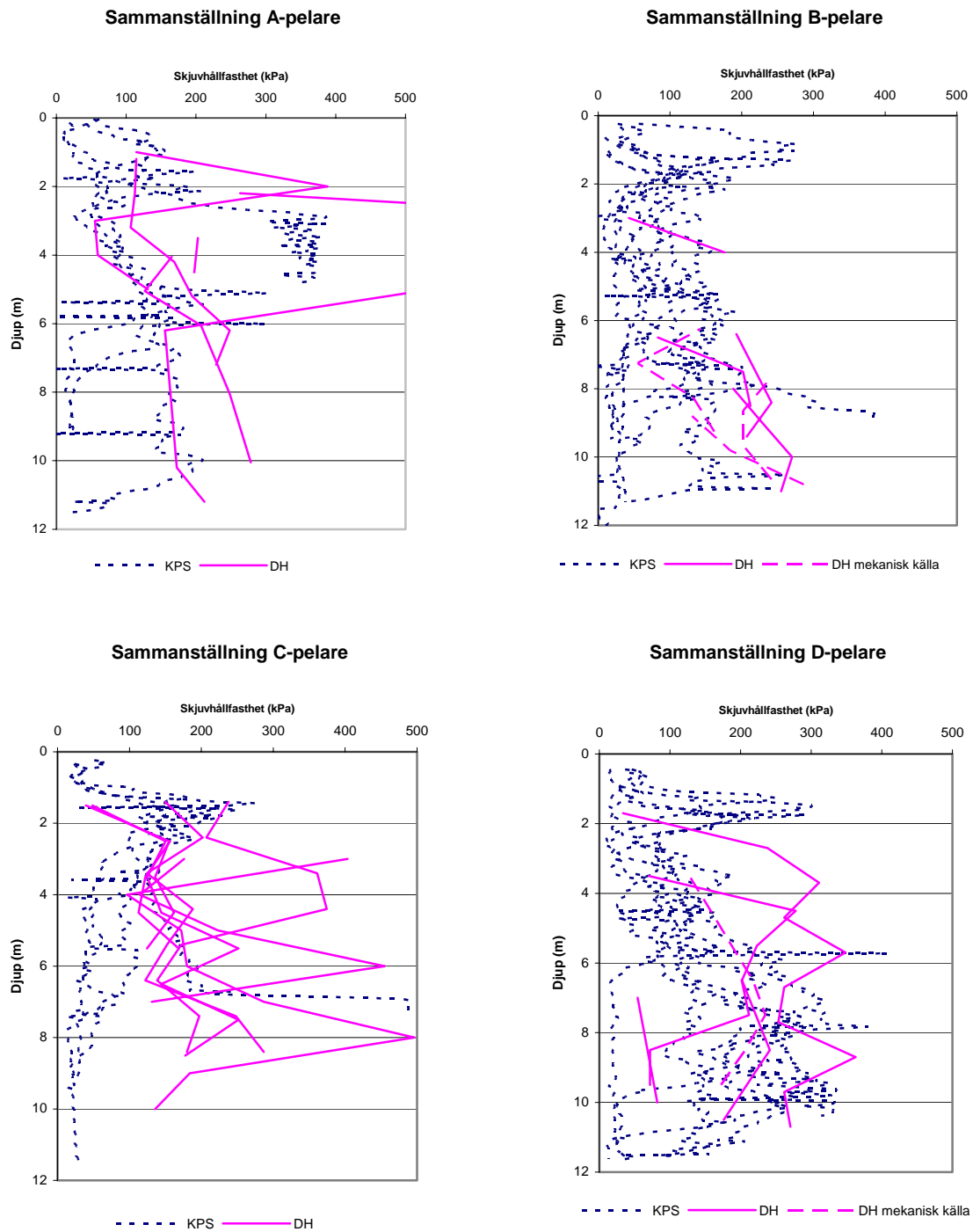
I ostabiliserad jord visar de seismiska down hole mätningarna god överensstämmelse med de traditionella pelarsonderingarna beträffande utvärderad skjuvhållfasthet. I *Figur 22* redovisas skjuvhållfastheten i ostabiliserad jord som funktion av djupet utvärderad från DH-mätningar, traditionella pelarsonderingar samt från enaxiella tryckförsök i laboratorium.



Figur 22. Odränerad skjuvhållfasthet i ostabiliserad jord utvärderad från KPS- och DH-mätningar samt enaxiella tryckförsök i laboratorium.

4.2 Mätningar i pelare

I *Figur 23 a-d* redovisas utvärderad skjuvhållfasthet från samtliga DH-mätningar och pelarsonderingar uppdelade på respektive pelartyp. Bortsett från extremvärdena visar DH-mätningarna relativt god överensstämmelse med pelarsonderingarna. Mot djupet tenderar många av pelarsonderingarna att styra ut från pelaren trots utförd förborring. DH-mätningarna visar bättre möjligheter att bestämma skjuvhållfastheten på större djup.



Figur 23 a-d. Odränerad skjuvhållfasthet utvärderad från KPS- och DH-mätningar för respektive pelartyp.

Varken DH-mätningarna eller pelarsonderingarna visar någon större skillnad mellan de olika pelartyperna beträffande hållfasthet. Sannolikt var inbördes skillnader i bindemedelsmängd och blandningsenergi inte tillräckligt stora utan pelarna har i stort sett samma hållfasthetsegenskaper.

5 Diskussion och fortsatt utvecklingsarbete

En fördel med att använda skjuvvågshastigheten för att bedöma kvaliteten på KC-pelare är att det finns ett direkt samband mellan uppmätt skjuvvågshastighet, V_s , och en av pelarens mekaniska egenskaper, den initiella skjuvmodulen G_0 . Vidare forskning om skjuvmodulens variation med töjningsgraden i denna typ av material kommer förhoppningsvis att medföra bättre bedömningsmöjligheter för pelarens deformationsegenskaper i bruksstadiet. Sambandet mellan skjuvvågshastighet och skjuvhållfasthet är rent empiriskt men hittills vunna erfarenheter tyder på att ett relativt gott sådant samband finns. Detta skall jämföras med traditionell pelarsondering, där ett motståndsvärde erhålls, som på empirisk väg omvandlas till pelarmaterialets hållfasthet (*Ekv. 3*). I nästa steg omvandlas hållfasthetsparametern till modulvärden genom empiriska samband, tex $E=150 \cdot \tau_u$, med ytterligare osäkerheter som följd.

Samtliga pelare uppvisar större skjuvvågshastigheter än den ostabiliserade jorden, i snitt 2-3 ggr, vilket indikerar att skjuvmodulen i pelarna i genomsnitt är 4-9 ggr högre än i den ostabiliserade leran. När kvalitén på mätdata är hög kan man bestämma skjuvvågshastigheten med hjälp av linjär regressions analys med en noggrannhet av ca ± 15 m/s.

Viktiga erfarenheter från de seismiska mätningarna är att kvalitén på mätdata ibland var så låg att det inte var möjligt att bestämma skjuvvågens första ankomsttid till aktuell nivå. I några fall berodde den låga datakvalitén på triggningsproblem under den första mätdagen medan ett antal mätningar sannolikt påverkades av att en grävare ibland arbetade mycket nära provområdet. Sannolikt beror kvalitén på mätdata i stor utsträckning även på pelarnas kvalitet och egenskaper. Detta är tydligt i pelare A8 och A9, där svaghetszoner åstadkommit genom att stoppa tillförseln av bindemedel på två nivåer i vardera pelare. Mätningar i dessa pelare indikerar att det kan gå att påvisa var ett avbrott i en pelare har sin övre gräns. Det verkar dock som om skjuvvågorna inte tar sig igenom avbrottet och således inte fortsätter längre ned i pelaren. Alternativt fortsätter de ner i pelaren, men med så låg energi och dessutom uppblandade med andra vågor, att de är svåra att detektera. Att dra några slutsatser från dessa få mätningar är svårt. Ett bättre underlag vore önskvärt.

I pelarna uppskattas skjuvvågornas våglängd till 0,5-2,0 m. Detta indikerar att borrhålskällans läge i pelartoppen sannolikt saknar betydelse.

Generellt gick det inte att fastställa den första ankomsttiden längs de övre 1-3 m av pelarna, se även 3.6.1. Pelarkvalitén är ofta mycket låg i den översta ca 0,5 m av pelaren, vilket var en av anledningarna till att en borrhålskälla användes för excitering av skjuvvågor i stället för en slagplatta och slägga som först planerades att användas. För att säkerställa att borrhålskällan hade god kontakt med pelare av god kvalitet placerades denna på mellan 0,5 – 1,5 m djup. Vidare är det mycket svårt att erhålla bra mätdata i direkt anslutning (ca 1-2 m) till borrhålskällan. Detta innebär att det med aktuell uppställning inte går att detektera skjuvvågens ankomsttid i de övre 2-3 m av pelarna. Detta bör dock lätt kunna åtgärdas genom att placera borrhålskällan på en lägre nivå i den långa plastslangen som annars används för geofonerna, och använda det kortare ”källröret” som mottagarrör för geofonerna.

Provningarna med den mekaniska borrhålskällan indikerar att den i ostabiliserad jord ger en signal som är fullt jämförbar (nästan bättre) än den piezoelektriska källan. Datakvaliteten är något sämre i kalkcementpelarna, men resultaten och tolkningarna av data från de mekaniska hammarmätningarna är dock fullt jämförbara med motsvarande baserade på den

piezoelektriska källan. Viss osäkerhet råder dock om varför den mekaniska källa inte ger upphov till fasskiftade skjuvvågor. Vidare utredning rekommenderas.

Mätningarna som utfördes med geofonerna placerade just utanför pelaren resulterade inte i några tolkningsbara mätdata. Sannolikt beror detta på att endast en mycket liten del av den alstrade energin från borrhålskällan i pelartoppen når geofonerna utanför pelaren. Den största delen av energin transporteras i stället ner genom den relativt styva pelaren.

En kvarstående fråga är hur homogeniteten i pelarna inverkar på uppmätt skjuvvågshastighet. Detta var tänkt att studeras med hjälp av ultrasonicmätningar, men dessa gav inga resultat. En annan metod som möjligen skulle kunna användas för att identifiera inhomogeniteter i pelare är borrhålsradar. Tidigare erfarenheter har visat att metoden ej fungerar i lera, men kan mycket väl fungera i kalkcementpelare.

Våglängden på skjuvvågorna är ca 0,5-2 meter, vilket ska jämföras med pelarens dimensioner; diameter = 600 mm och längd ca 10 m. Detta gör att man kan anta att skjuvvågen färdas inom hela pelarvolymen och hastigheten således avspeglar pelarens genomsnittliga egenskaper och inte påverkas av mindre inhomogeniteter. Det är svårt att sätta en gräns för hur stor en inhomogenitet skall vara innan den kan antas ha en påverkan på skjuvvågens hastighet eller amplitud, men troligen bör dess yta vara större än 25-50% av pelarens tvärsnittsytan och dessutom ha en viss utsträckning i djupled. Detta borde dock provas under kontrollerade förhållanden.

6 Slutsatser

En ny praktiskt användbar kontrollmetod för bedömning av KC-pelares mekaniska egenskaper med hjälp av seismiska mätningar har utvecklats och provats. I ett första steg upprättas ett samband mellan skjuvvågshastighet och skjuvhållfasthet genom försök med böjelement och enaxiella tryckförsök på bindemedelsinblandade prover i laboratoriet. Sambandet, som kan antas vara giltigt för aktuell typ av jord, bindemedel och inblandningsmängd, kan i nästa steg användas för att utvärdera KC-pelarnas egenskaper in situ utifrån seismiska down hole mätningar. Några slutsatser och kommentarer från detta projekt är:

- Utförda laboratorieförsök visar god överensstämmelse mellan odränerad skjuvhållfasthet och skjuvvågshastighet. För leran i Uppsala som stabiliserats med kalk och cement i proportionerna 50/50% är förhållandet:

$$c_u = 0.0424 \cdot V_s^{1.462}$$

- Vid Down hole mätningar i ostabiliserad jord erhålls mätdata med hög kvalitet. Tolkade skjuvvågshastigheter överensstämmer bra mellan enskilda mätningar. Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet enligt ovanstående samband visar god överensstämmelse med resultaten från pelarsonderingar i ostabiliserad jord.
- Mätdata från DH-mätningar i KC-pelare är mer komplexa med varierande kvalitet inom och mellan pelare. Bortsett från enstaka extremvärden visar utvärderad skjuvhållfasthet relativt god överensstämmelse med resultaten från pelarsonderingarna.
- En fördel med att använda skjuvvågshastigheten för att bedöma kvaliteten på KC-pelare är att det finns ett direkt samband mellan uppmätt skjuvvågshastighet, V_s , och en av pelarens

mekaniska egenskaper, den initiella skjuvmodulen G_0 . Vidare forskning om skjuvmodulens variation med töjningsgraden i denna typ av material kommer förhoppningsvis att medföra bättre bedömningsmöjligheter för pelarens deformationsegenskaper i bruksstadiet. Sambandet mellan skjuvvågshastighet och skjuvhållfasthet är rent empiriskt men hittills vunna erfarenheter tyder på att ett relativt gott sådant samband finns. Detta skall jämföras med traditionell pelarsondering, där utvärderingen baseras på ett antaget skjuvbrott och en empirisk bärighetsfaktor.

- En annan viktig aspekt är den förbättrade möjligheten att kontrollera pelare på större djup jämfört med traditionella pelarsonderingar som ofta styr ur pelarna. Detta kan man tydligt se i *Figur 23 a-d* där utvärderad skjuvhållfasthet från samtliga mätningar redovisas som funktion av djupet. Ytterligare en fördel med den seismiska kontrollmetoden är att den är en icke-förstörande provningsmetod. Samma pelare kan kontrolleras vid olika tidpunkter, vilket medför hållfasthetsökningen som funktion av tiden kan studeras.
- Svårigheterna att detektera skjuvvågor i pelare med avbruten inblandning av bindemedel indikerar att det kan vara problem att erhålla användbara mätdata under en omfattande svaghetszon.
- Avsaknaden av mätdata från de övre 2-3 m av pelarna kan åtgärdas genom att byta plats på borrhålskälla och geofoner, dvs placera borrhålskällan på större djup i den längre plastslangen och använda det kortare ytliga plaströret för geofonerna.
- Ultrasonicmätningarna gav inte några användbara resultat. Detta beror mest troligt på att pelarnas sammansättning är sådan att de högfrekventa ultraljudsvågorna dämpas ut mycket snabbt.
- För att möjliggöra seismiska mätningar på ett rationellt sett har en metod för installation av plastslangar/rör i KC-pelare utvecklats. Metoden kan användas på alla idag verksamma typer av pelarmaskiner.

Referenser

- Axelsson, M., 2001, "Deep Mixing with lime-cement columns, methods for quality control (In Swedish)", Lic. Thesis, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics
- Dyvik, R., Madshus, C., 1985, "Lab measurements of Gmax using bender elements", Advances in the art of testing soils under cyclic conditions, Detroit, MI, Oct., 1985. Proceedings
- Hardin, B.O., 1978, "The nature of Stress Strain Behaviour of Soils", Proceedings, ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, Vol. 1, pp. 3 – 90
- Hird, C.C., Chan, C.M., 2005, "Correlation of shear wave velocity with unconfined compressive strength of cement-stabilised clay", International Conference on Deep Mixing, Best Practice and Recent Advances
- Larsson R., Mulabdic, 1991, "Shear moduli in Scandinavian clays. Measurement of initial shear modulus with seismic cones. Empirical correlations for the initial shear modulus in clay", Swedish Geotechnical Institute, Report no 40
- Massarsch, K. R., 2000. "Application of Geophysical Methods for Geotechnical-, Geo Environmental and Geodynamic Applications - An Overview". Proceedings, 3rd International Workshop on the Application of Geophysics to Rock and Soil Engineering, 18. November, 2000, Melbourne, Proceedings pp. 1 - 5.

ANVISNINGAR

KC-PELARE

- DIMENSION: d=600mm
- BINDEMEDEL: kalk/cement 50%/50%
- MÄNGD:
 - A1-A9, B1-B7: 80 kg/m³
 - C1-C7, D1-D7: 120 kg/m³
 - A1-A9, C1-C7: 15 mm/varv
 - B1-B7, D1-D7: 30 mm/varv
- STIGNING:

I pelare A8-A9 görs avbrott av utmätning av bindemedel på två olika nivåer:

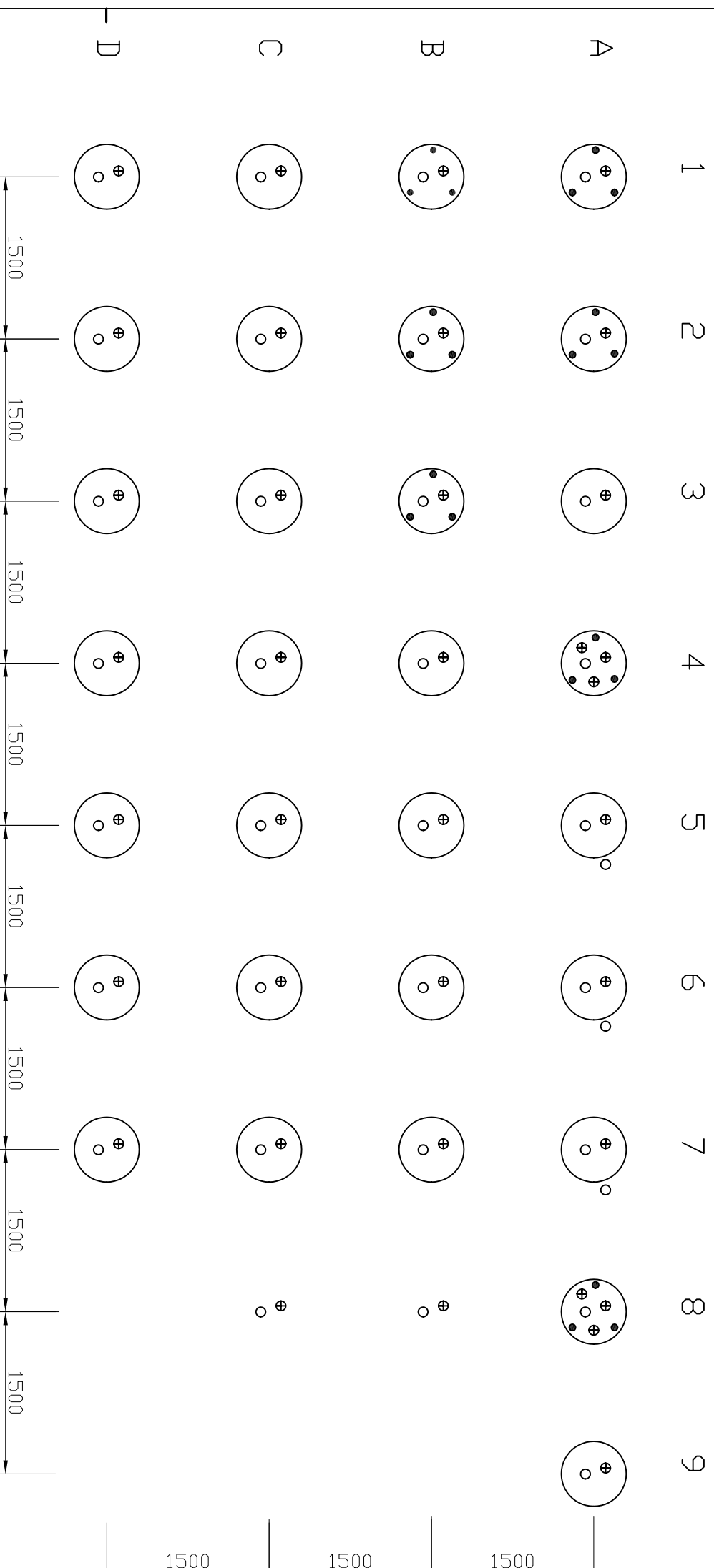
- pelare A8: 4,0-5,0m, 8,5-9,0m
- pelare A9: 4,5-5,0m, 8,0-9,0m

MÄTRÖR

- PEM slang 90*5,4, totalt 36 st (varav 6 st i ostab jord)
- PEM rör 90*8,2, l=2-3 m, totalt 36 st (varav 2 st i ostab jord)
- Stålrör 60,3*3,25, l=12m, totalt 3*7 st

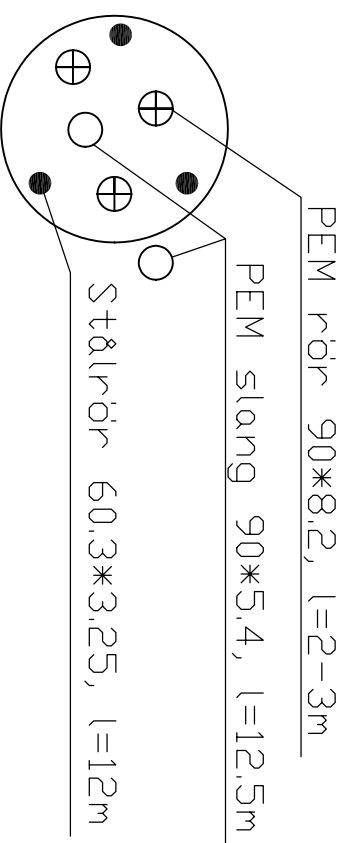
AVVIKELSER VID INSTALLATION

- plastslang utanför pelare A6: l= ca 3,5m
- plastslang i pelare C3: l= ca 8,5 m
- plastslang i pelare C5: l= ca 8,5 m
- plastslang i pelare C6: l= ca 6,5 m
- plastslang i ostab jord C8: l= ca 9,0 m
- stålrör i pelare B1 är ej installerade



Installation av pelare

PLAN 1:50



Mätrör

1:20

A	X	RELATIONSRITNING	NDA	2004-12-11
REV	ANT	ÄNDRING AVSEER	GRÄND	DATUM
ENTREPRENÖR		HERCULES	RINNSSTATUS	
			ARBETSHANDLING	
 <small>GRUPP ÅRSBOK</small> <small>88 SÖLVA, tel.: 08-750 33 00</small> <small>ÖSTERBERG, tel.: 031-53 01 10</small> <small>□ LPH, ÅRSBOK VÄSTV, tel.: 08-590 783 30</small>		 <small>SEISMISK KONTROLLMETOD</small> <small>UTVECKLINGSPROJEKT</small>	<small>FÄLTEST UPPSALA</small> <small>INSTALLATION AV PELARE OCH MÄTRÖR</small>	
DATUM	04-05-12	UPPDRAGSNUMMER	RITNINGSTITEL AV	SKALA
GRÄNSKÄDE	NDA			150 t A3
ANSVARIG	NDA			040512NDA-01
ANSVARIGSINNE	NDA			BEF
ANSVARIGSINNE	NDA			A

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Beställare: Göran Holm SGI							
E4 - Uppsala						Tabell	1(3)
						Dnr	1-0402-112
Ankomstdatum	Provtagningsredskap	Laboratorieundersökning Datum	Utförd av		Datum	041028	
040622	Kv St I	040618-041027	O.A		Teknisk ledare	Inga-Maj Kallne	
Sektion/ Borrhål/ Djup	Benämning enligt "Jordarternas indelning och benämning", Geotekniska laboratorianvisningar del 2. 1981 års system ¹⁾	2) Densitet ρ t/m ³	3) Vattenkvot w %	4) Konflytgräns w _L %	5) Plasticitetsgräns wp %	6) Skjuvhållfasthet Enaxliga tryckförsök τ_{fu} kPa	Jordartsbenämning (Anmärkning)
Bh 2 3,5m	LERA	1,59	67			12	Le
6,5m	LERA	1,71	56			9,8	Le
8m	LERA	1,71	50			11	Le
Bh 1 och 2 2-11m	HOMOGENISERAD LERA		60	56	22		Le

1) Baserad på okulär jordartsklassificering. Hänsyn har tagits till förekommande mätdata.

R 1 2004-03-09

2) Skrymdensitet SS 027114, Utgåva 2

3) Vattenkvot SS 027116, Utgåva 3

4) Konflytgräns SS 027120, Utgåva 2

5) Plasticitetsgräns SS 02 71 21, Utgåva 2

6) Enaxliga tryckförsök, SS 027128, utgåva 1. Mätosäkerhet och mätområde för våra metoder redovisas på vår hemsida, www.swedgeo.se

Ackrediterat laboratorium utses av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt lag. Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorierna uppfyller kraven enligt SS-EN 17025. Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten gäller enbart för de provade materialen.

Statens geotekniska institut

581 93 Linköping, telefon 013-20 18 00, telefax 013-20 19 14

KEMISKT STABILISERAD JORD

Referens: SGI, egna anvisningar. Dokument nr 29

Beställare: Göran Holm SGI											
E4 – Uppsala								Tabell		2(3)	
								Dnr		1-0402-112	
Datum för inblandning		Provdiameter (mm)		Laboratorieundersökning			Datum		Utförd av		
040622		50		040624-040720			O.A		040909		
Teknisk ledare <i>Inger-Kaj Kähler</i>											
Blandning	Tillsatsmedel				Tid efter inblandning dygn	Lagringstemperatur °C	Densitet ρ t/m ³	Vattenkvot w %	Konflytgräns w _L %	Skjuvhållfasthet Enaxliga tryckförsök τ _{fu} kPa	Anmärkning
	Mängd stab-medel kg/m ³	Proportioner									
		Kalk	Cement								
		%	%								
BL1											
Prov 1	80	50	50	2	*	1,70	60 ¹ 51		90		
Prov 2	80	50	50	2	*	1,69	51		76		
Prov 3	80	50	50	2	*	1,70	51		80		
Prov 4	80	50	50	2	*	1,68	52		84		
Prov 5	80	50	50	2	*	1,69	51		87		
Prov 6	80	50	50	10	*	1,70	51		139		
Prov 7	80	50	50	10	*	1,69	51		142		
Prov 8	80	50	50	10	*	1,75	51		140		
Prov 9	80	50	50	10	*	1,70	52		157		
Prov 10	80	50	50	10	*	1,69	51		137		
Prov 11	80	50	50	28	*	1,70	51		155		
Prov 12	80	50	50	28	*	1,64	51		151		
Prov 13	80	50	50	28	*	1,69	52		154		
Prov 14	80	50	50	28	*	1,69	52		157		
Prov 15	80	50	50	28	*	1,66	51		142		
1) Blandningens vattenkvot före inblandning av stabiliseringsmedel. * 7 dygn i rumstemperatur därefter i fuktrum ca+7 °C						2) Skrymdensitet, SS 027114, utgåva 2 3) Vattenkvot, SS 027116, utgåva 3 4) Konflytgräns, SS 027120, utgåva 2 5) Enaxliga tryckförsök, SS 027128, utgåva 1 Mätosäkerhet och mätområde för våra metoder redovisas på vår hemsida, www.swedgeo.se					
Blandning: 1						Bh 1+2 Djup 2-11m					

R7 2004-04-22

Ackrediterat laboratorium utses av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt lag. Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorierna uppfyller kraven enligt SS-EN 17025. Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkännt annat. Resultaten gäller enbart för de provade materialen.

Statens geotekniska institut

581 93 Linköping, telefon 013-20 18 00, telefax 013-20 19 14

KEMISKT STABILISERAD JORD

Referens: SGI, egna anvisningar. Dokument nr 29

Beställare: Göran Holm SGI											
E4 - Uppsala								Tabell		3(3)	
								Dnr		1-0402-112	
Datum för inblandning		Provdiameter (mm)		Laboratorieundersökning Datum		Utförd av		Datum			
040622		50		040624-040720		O.A		040909			
								Teknisk ledare		<i>Inger-Kaj Kaller</i>	
Blandning	Tillsatsmedel				Tid efter inblandning dygn	Lagringstemperatur °C	Densitet ρ t/m ³	Vattenkvot w %	Konflytgräns w _L %	Skjuvhållfasthet Enaxliga tryckförsök τ _{fu} kPa	Anmärkning
	Mängd stab.-medel kg/m ³	Proportioner									
		Kalk %	Cement %								
BL 2							60 ¹				
Prov 16	120	50	50	2	*	1,69	49			139	
Prov 17	120	50	50	2	*	1,69	49			138	
Prov 18	120	50	50	2	*	1,69	49			112	
Prov 19	120	50	50	2	*	1,69	49			131	
Prov 20	120	50	50	2	*	1,69	48			150	
Prov 21	120	50	50	10	*	1,69	48			239	
Prov 22	120	50	50	10	*	1,68	49			219	
Prov 23	120	50	50	10	*	1,68	48			212	
Prov 24	120	50	50	10	*	1,67	49			195	
Prov 25	120	50	50	10	*	1,68	48			234	
Prov 26	120	50	50	28	*	1,69	48			226	
Prov 27	120	50	50	28	*	1,67	48			229	
Prov 28	120	50	50	28	*	1,68	48			233	
Prov 29	120	50	50	28	*	1,68	48			209	
Prov 30	120	50	50	28	*	1,70	48			220	
1) Blandningens vattenkvot före inblandning av stabiliseringsmedel. * 7 dygn i rumstemperatur därefter i fuktrum ca+7 °C						2) Skrymdensitet, SS 027114, utgåva 2 3) Vattenkvot, SS 027116, utgåva 3 4) Konflytgräns, SS 027120, utgåva 2 5) Enaxliga tryckförsök, SS 027128, utgåva 1 Matosäkerhet och mätområde för våra metoder redovisas på vår hemsida, www.swedgeo.se					
Blandning: 2						Bh 1+2 Djup 2-11m					

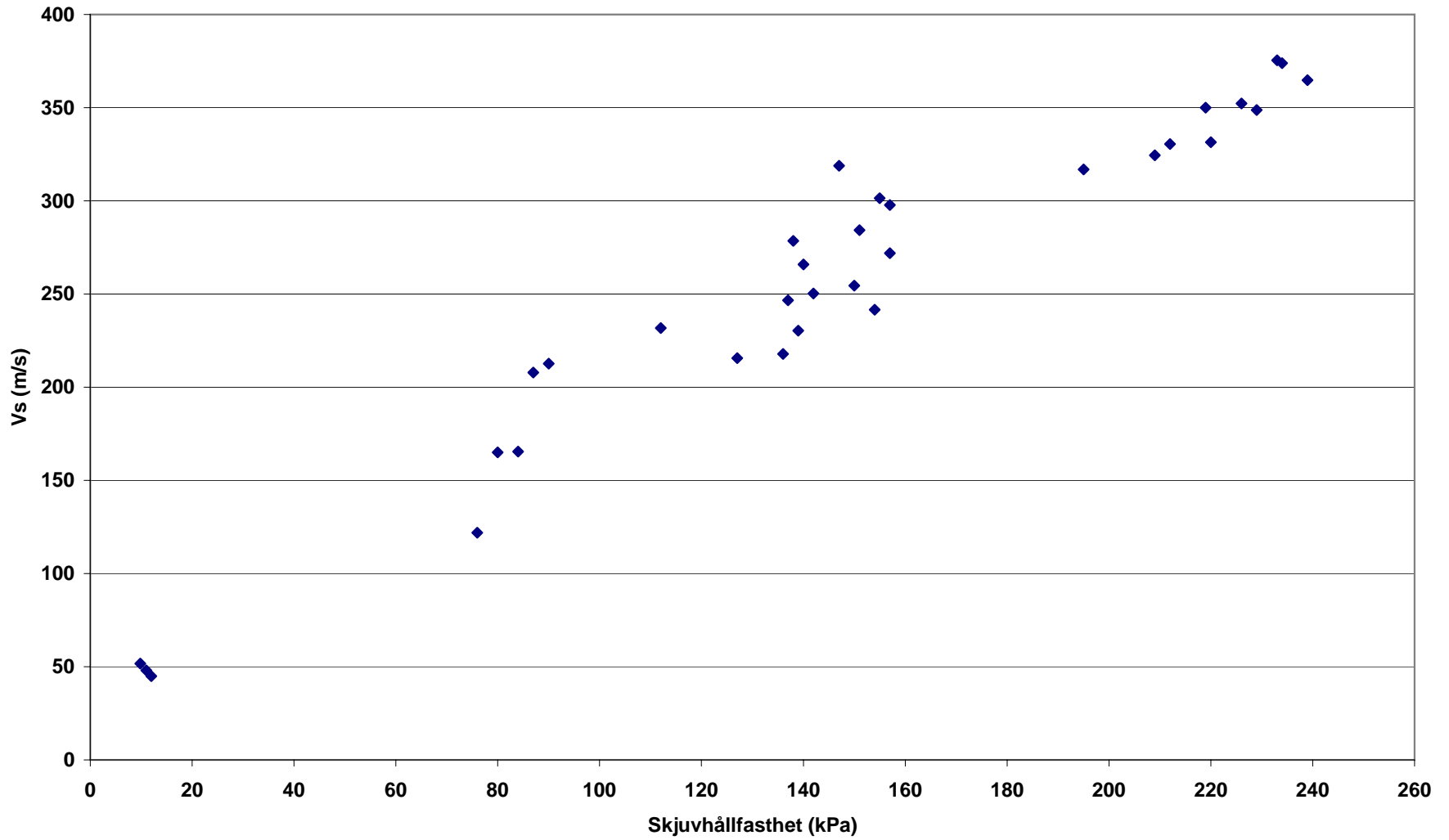
R7 2004-08-26

Ackrediterat laboratorium utses av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt lag. Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorierna uppfyller kraven enligt SS-EN 17025. Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten gäller enbart för de provade materialen.

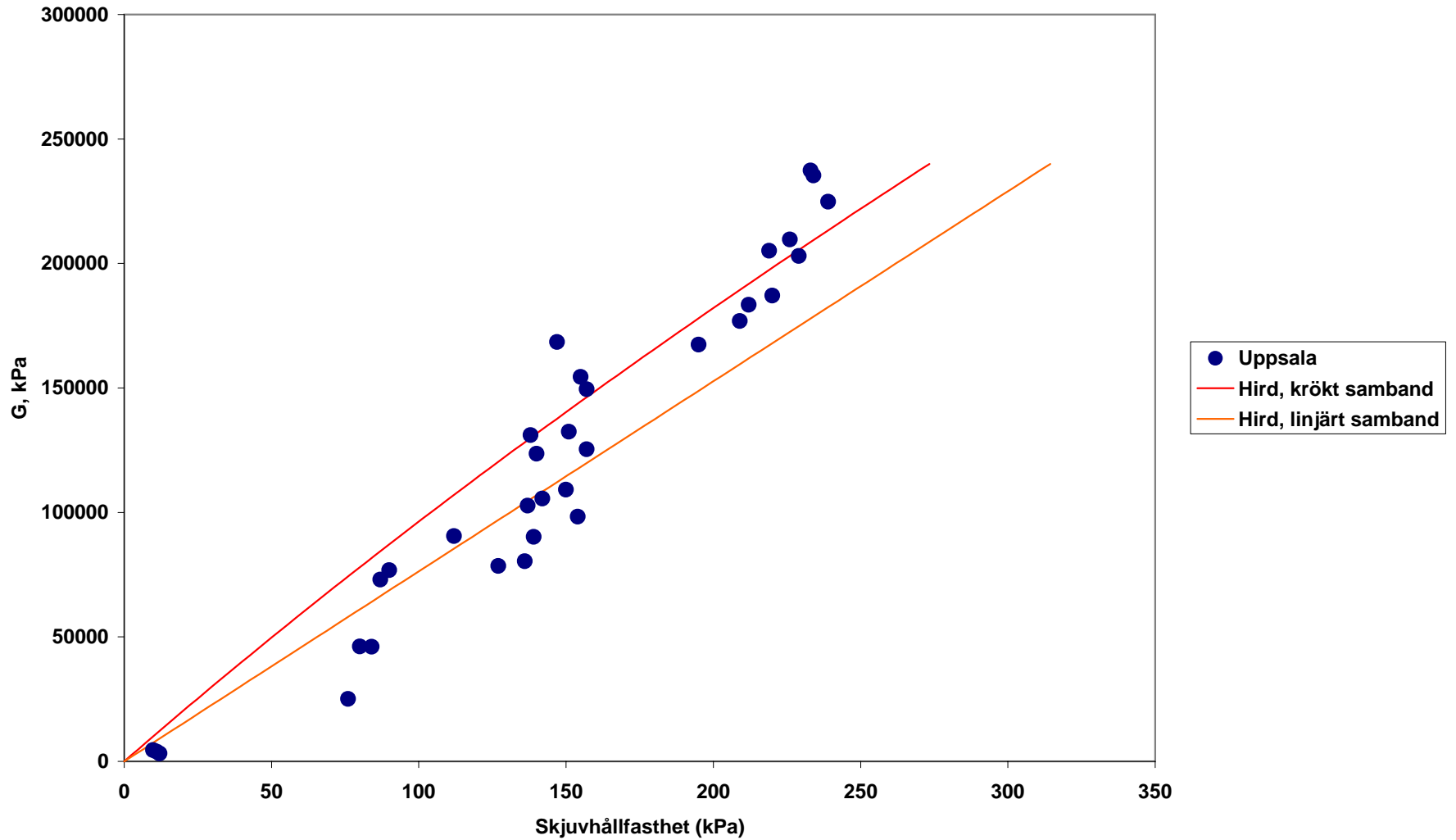
Statens geotekniska institut

581 93 Linköping, telefon 013-20 18 00, telefax 013-20 19 14

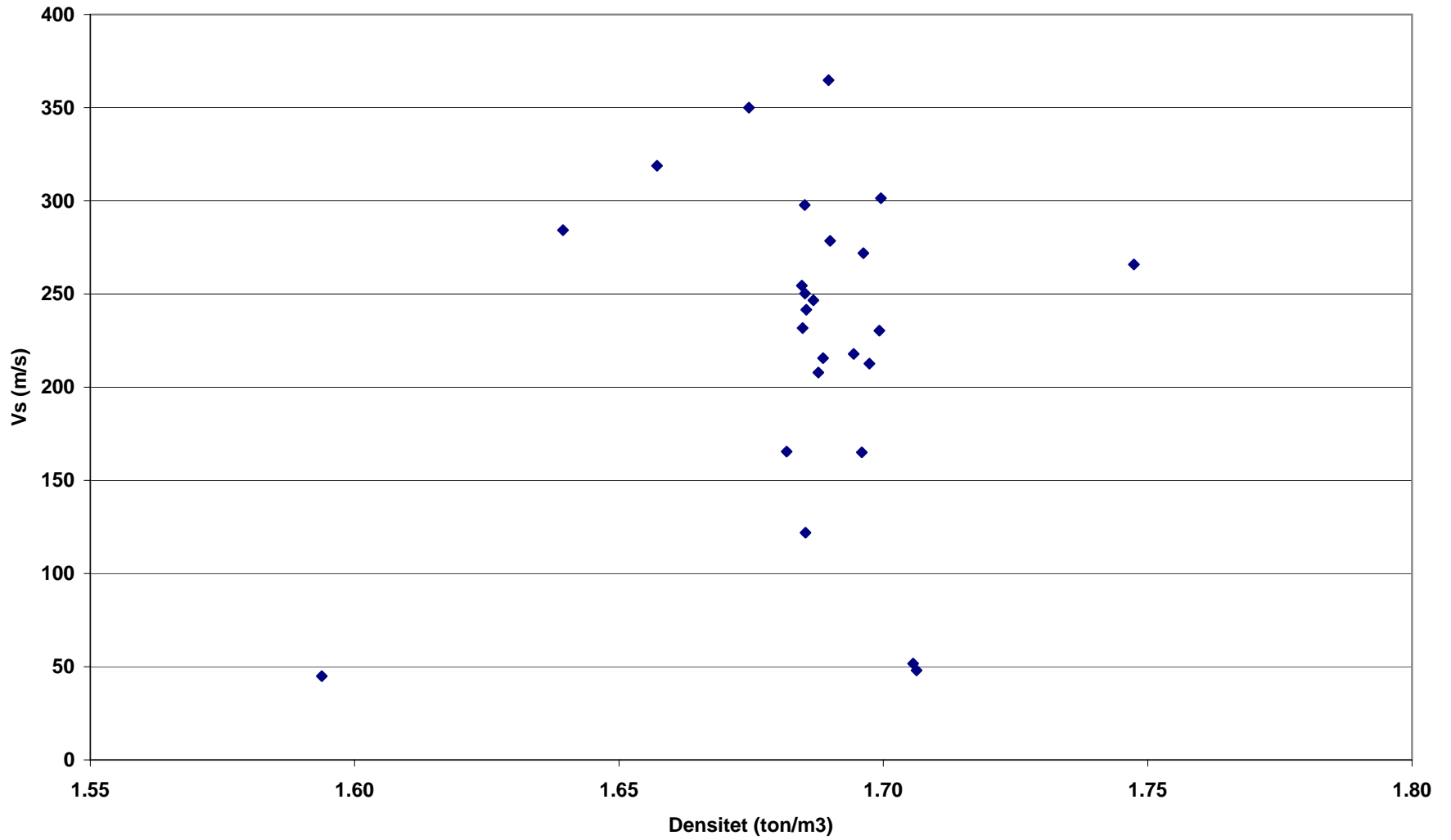
Skjuvvågshastighet Vs versus Skjuvhållfasthet Cu



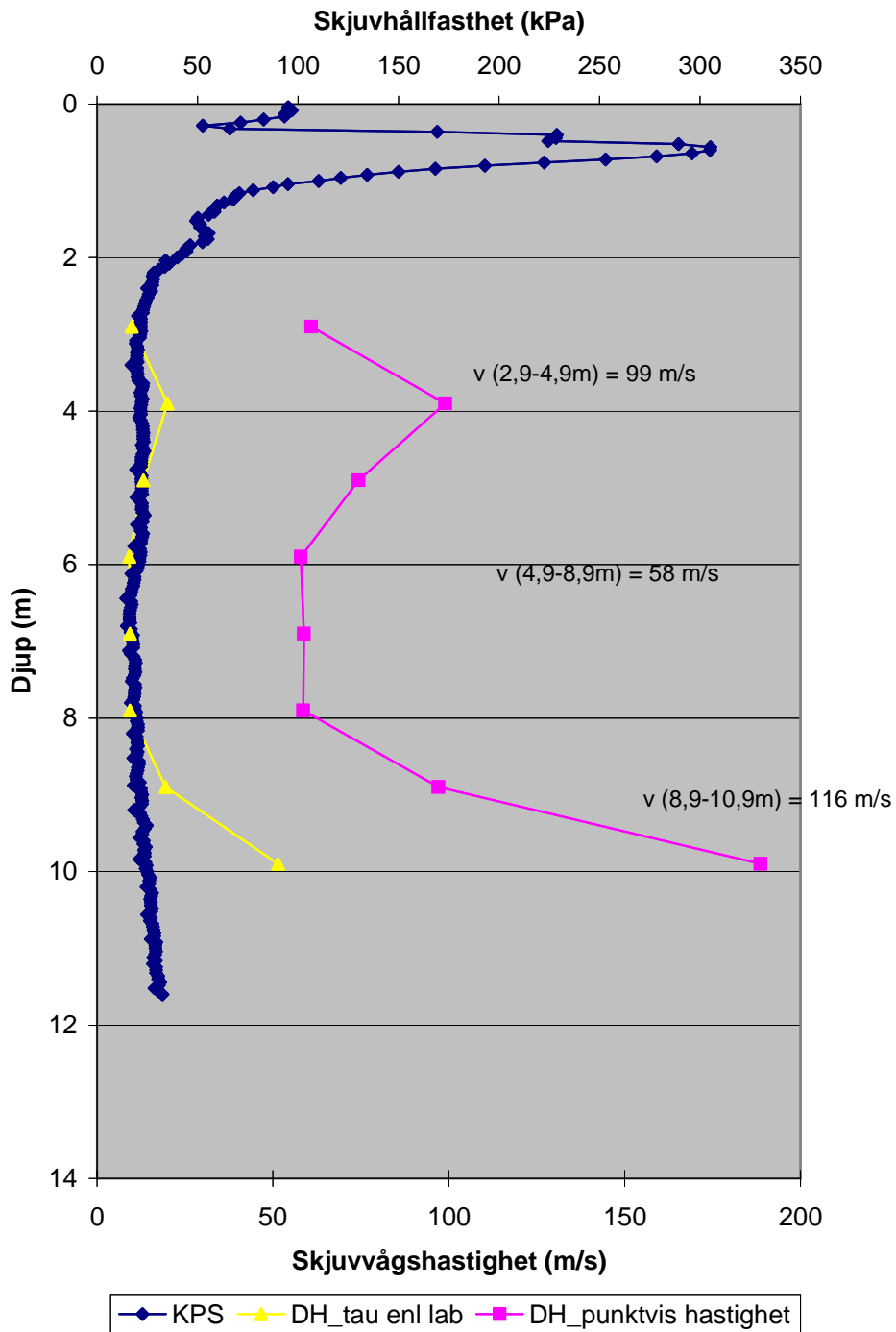
Skjuvmodul versus Skjuvhållfasthet Cu



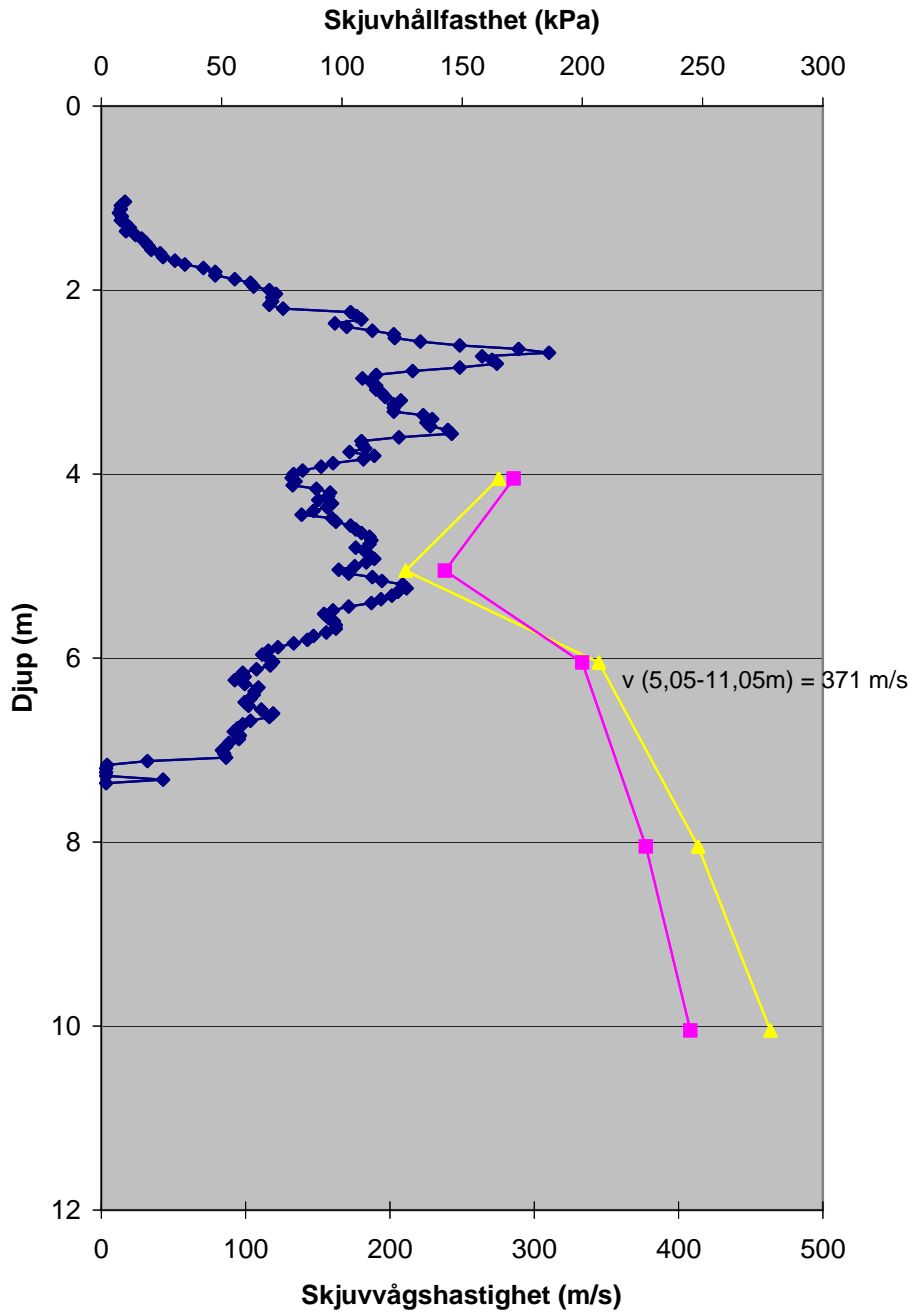
Densitet/Vs



Ostabiliserad lera

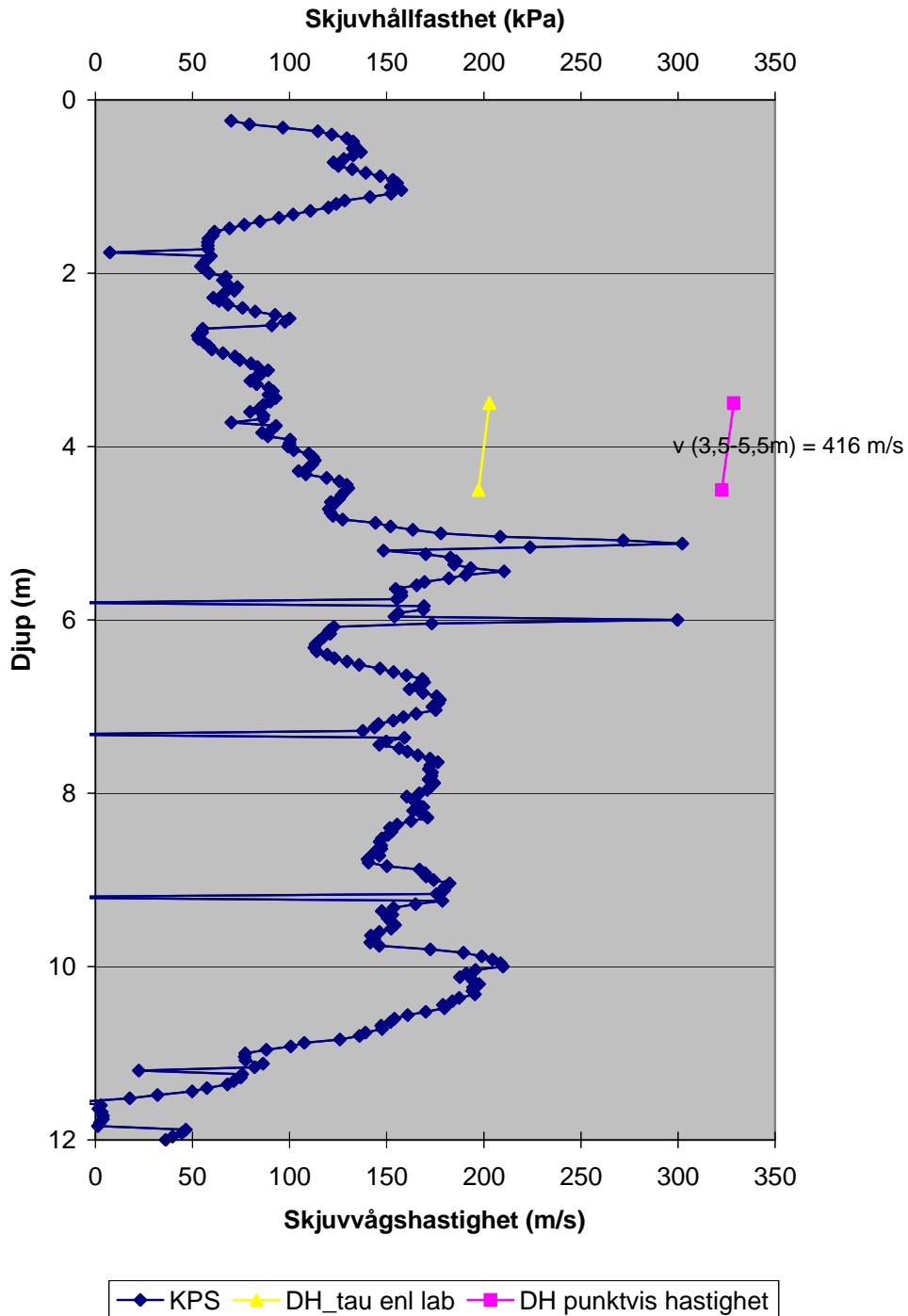


Pelare A3

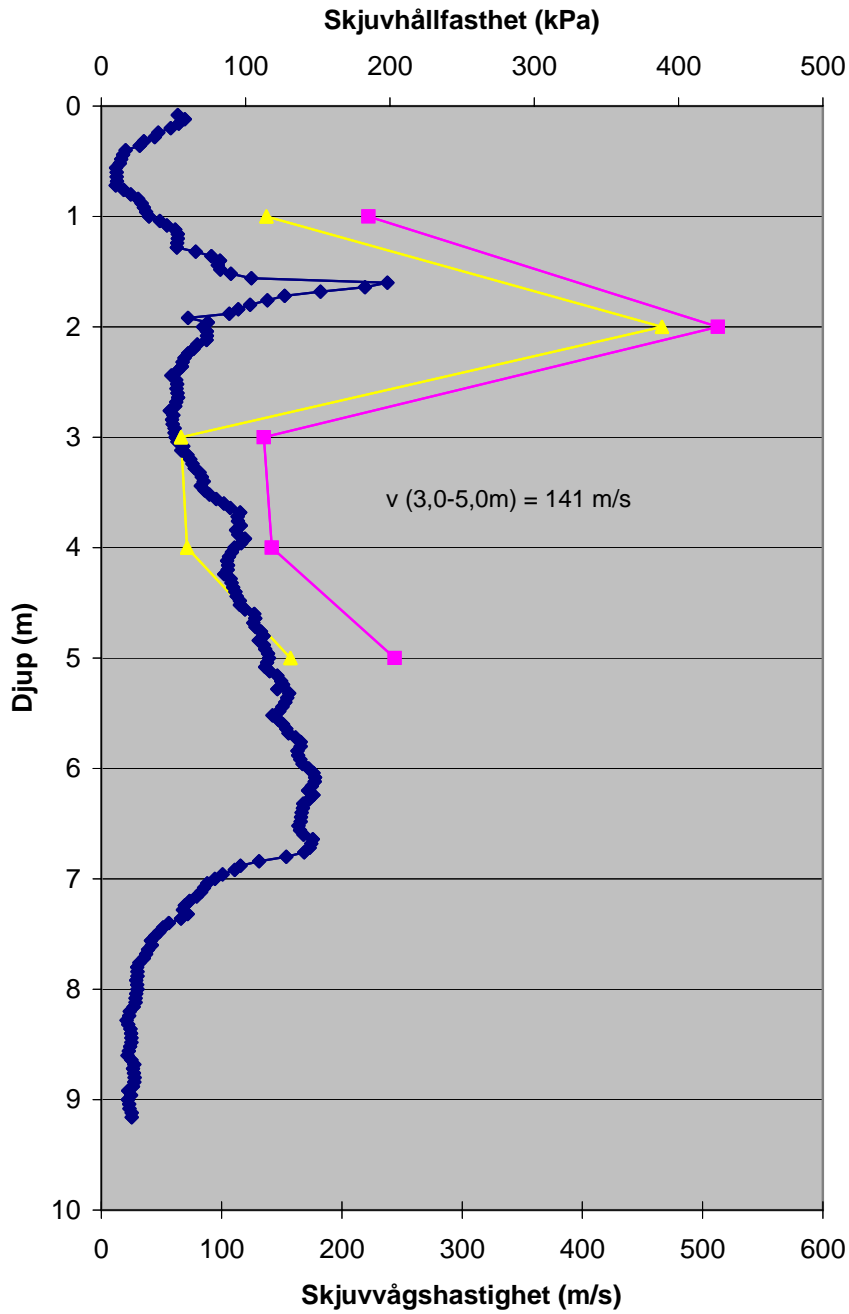


◆ KPS ▲ DH_tau enl lab ■ DH punktvis hastighet

Pelare A4

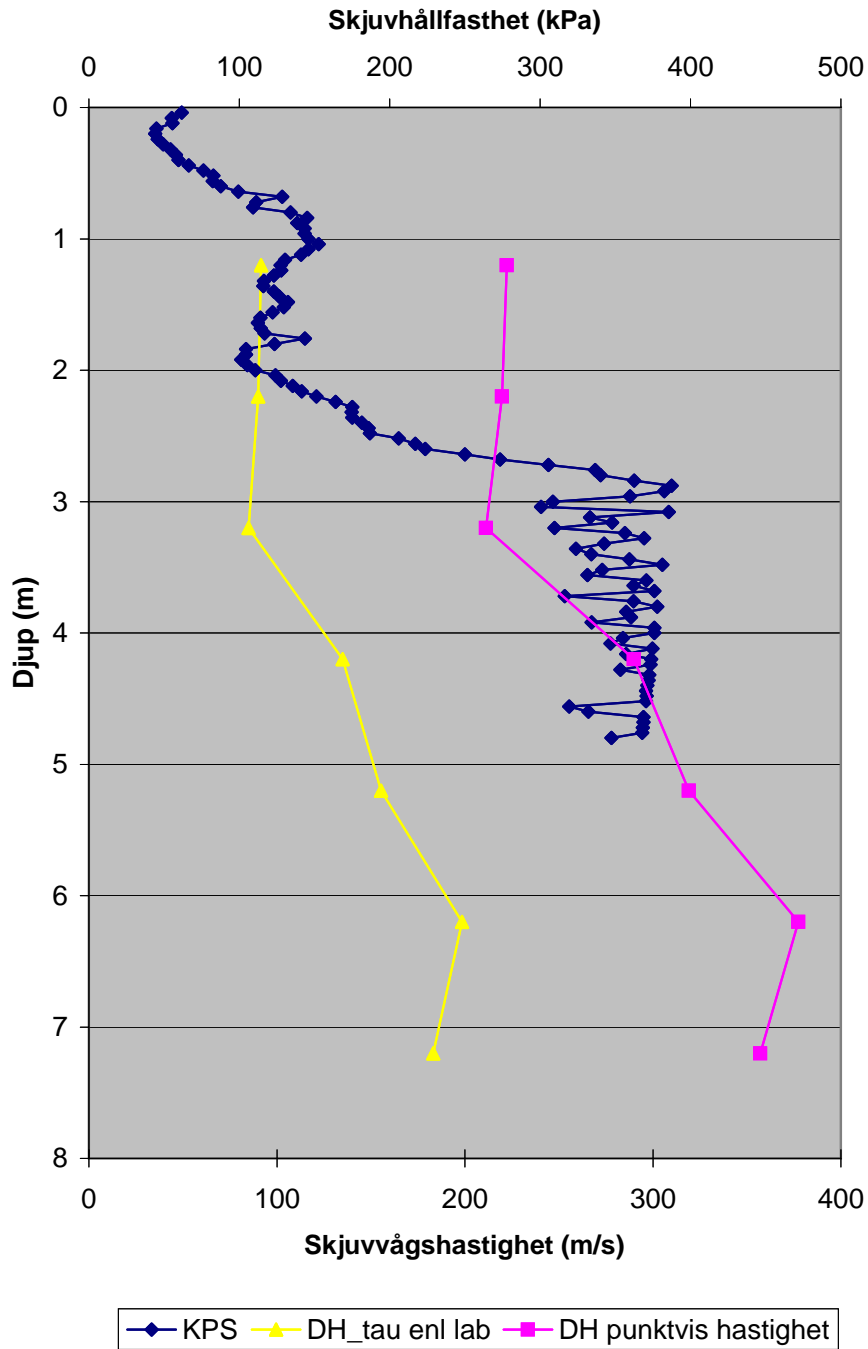


Pelare A5



—◆— KPS —▲— DH_tau enl lab —■— DH punktvis hastighet

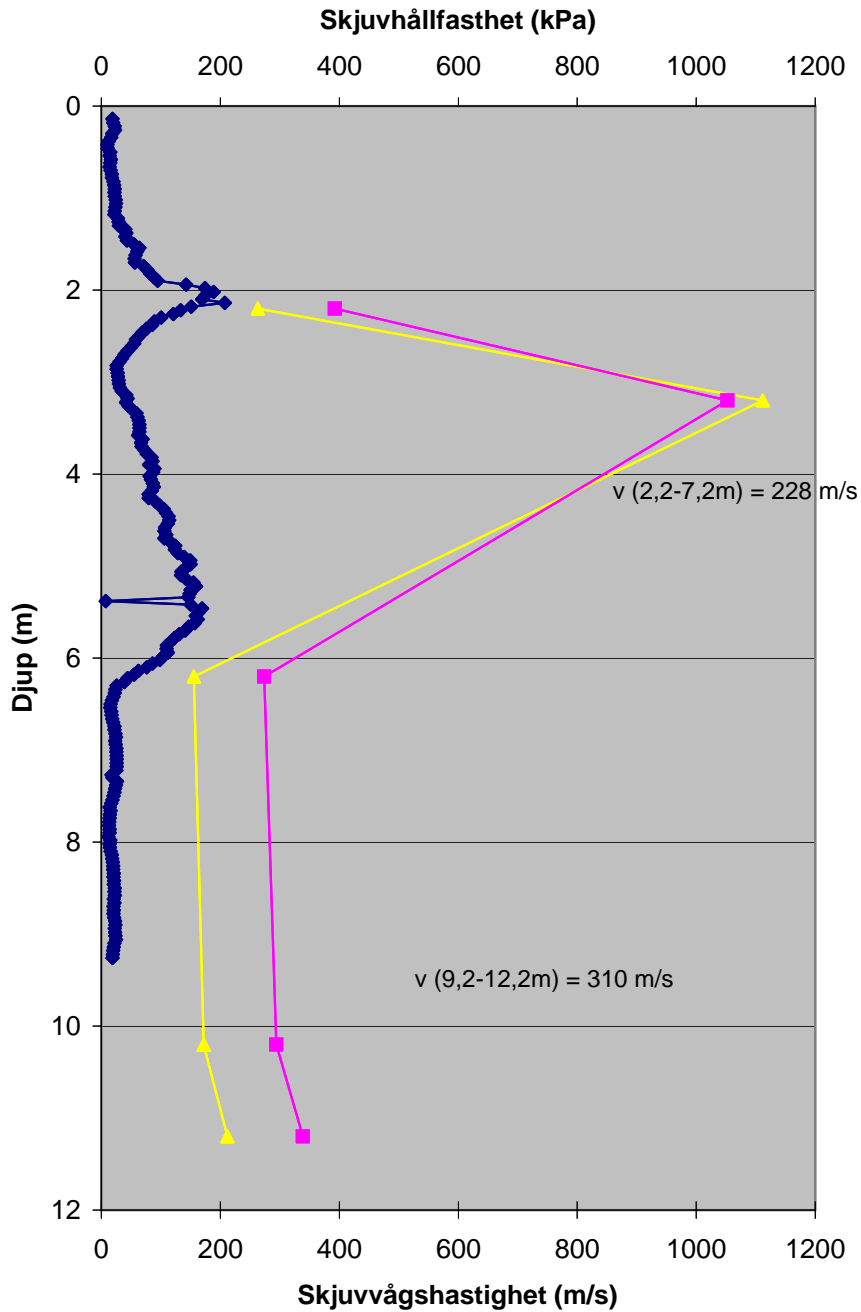
Pelare A6



Anm 1: Mantelmotstånd uppskattat till 5 kN

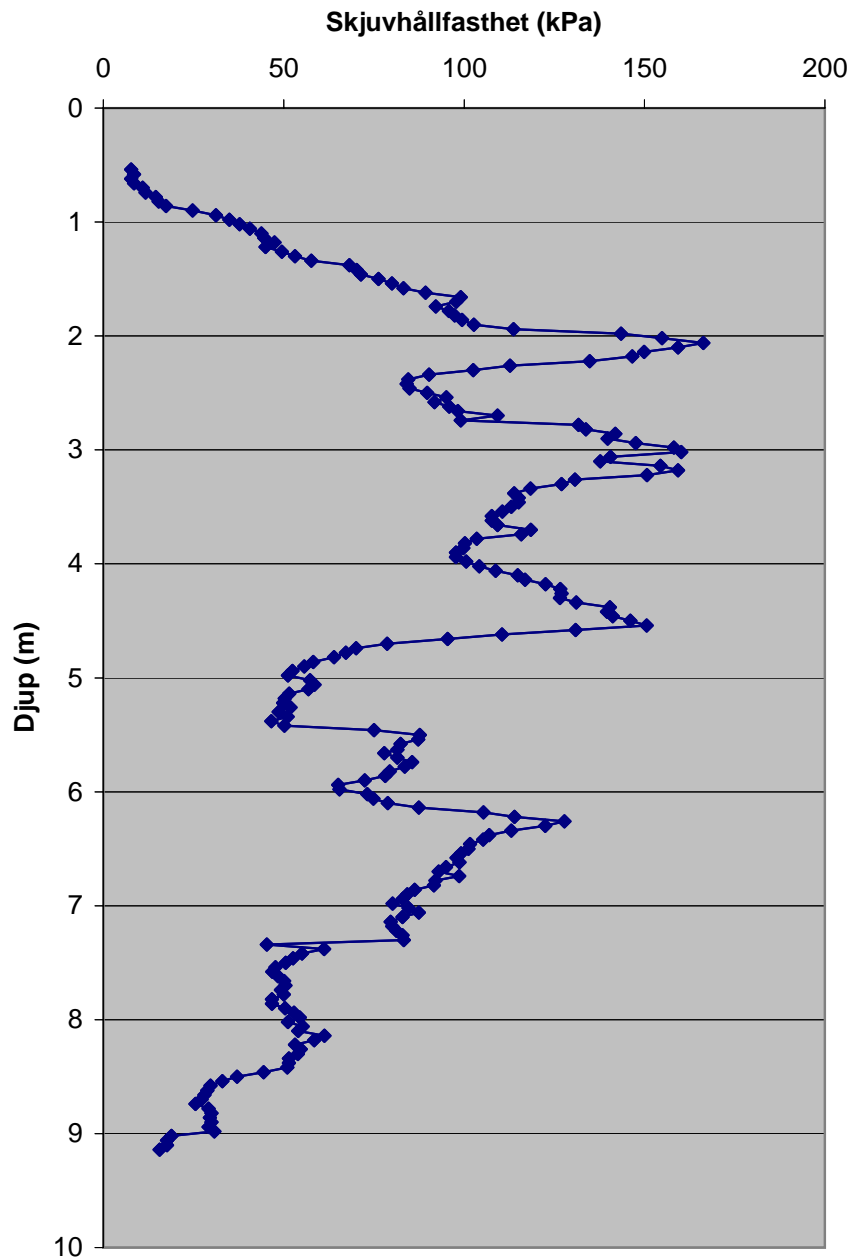
Anm 2: DH-mätningar utfördes med mekanisk källa

Pelare A7



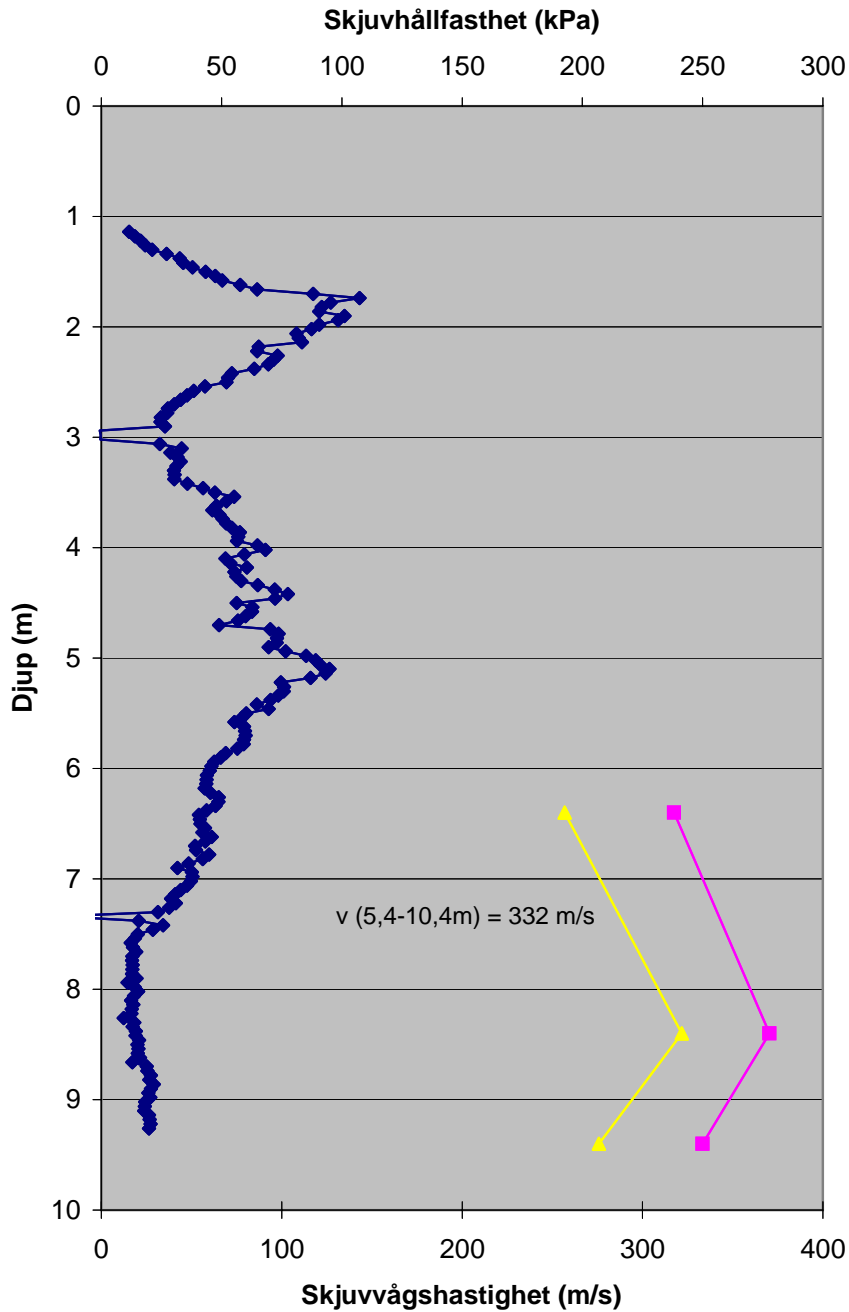
—◆— KPS —▲— DH_tau enl lab —■— DH punktvis hastighet

Pelare A8



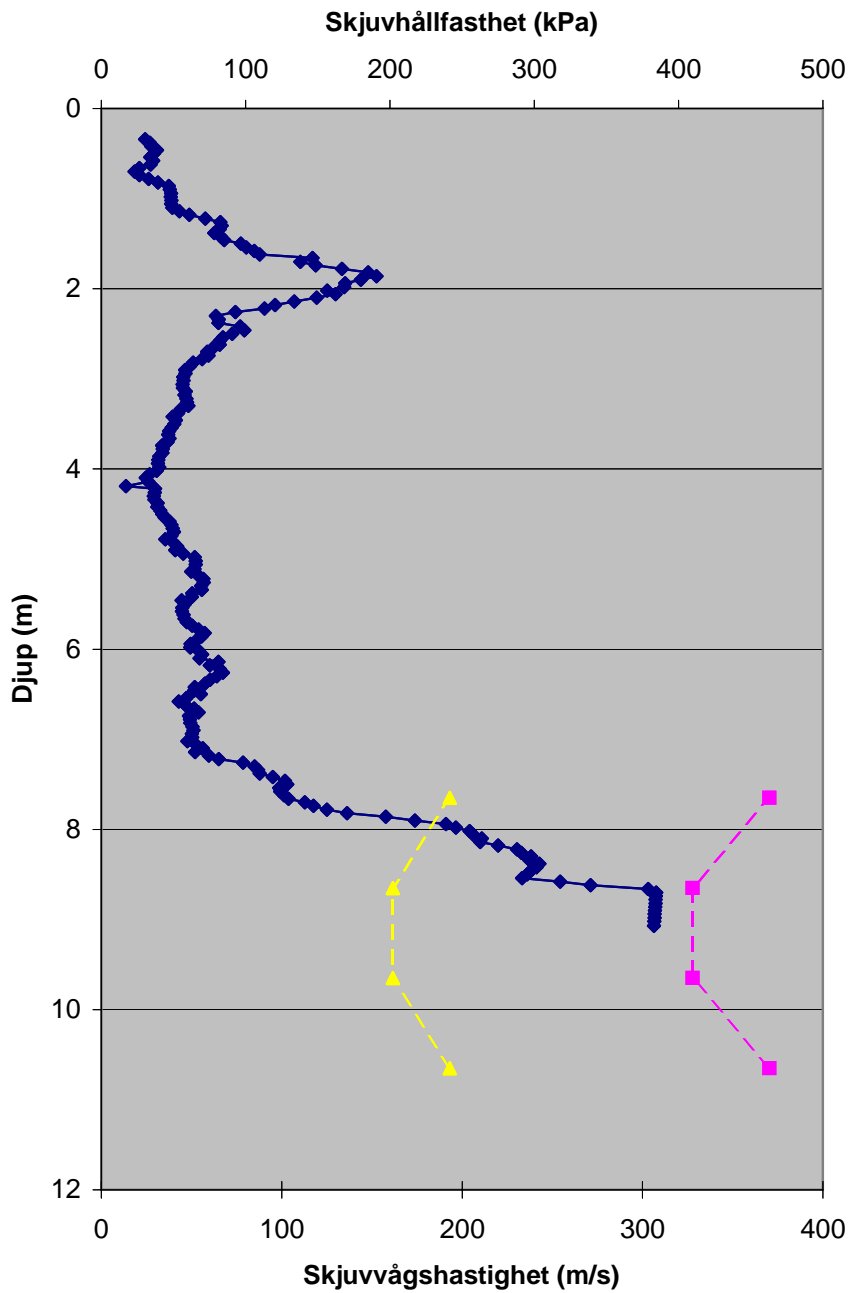
—◆— KPS

Pelare B1



◆ KPS ▲ DH_tau enl lab ■ DH punktvis hastighet

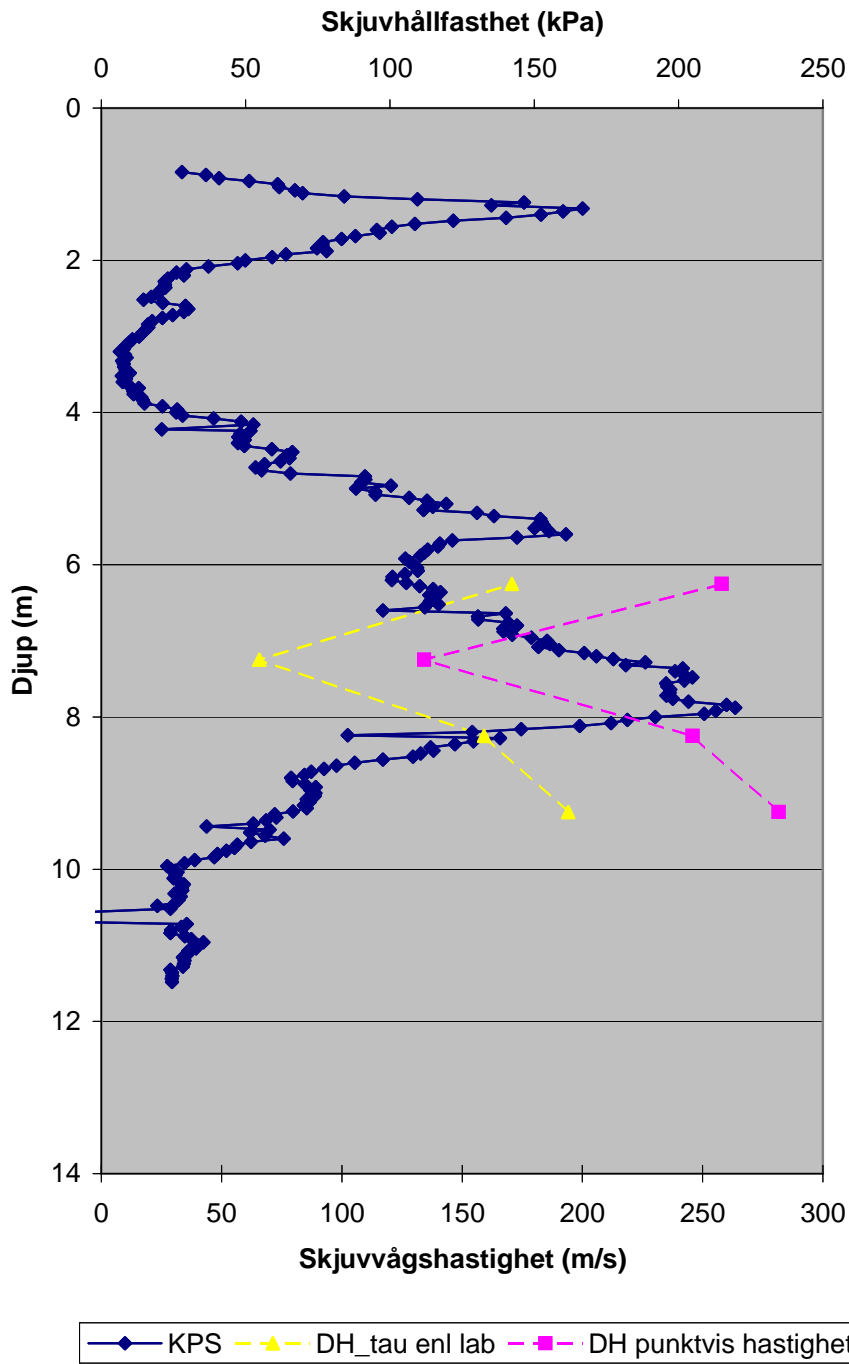
Pelare B2



—◆— KPS —▲— DH_tau enl lab —■— DH punktvis hastighet

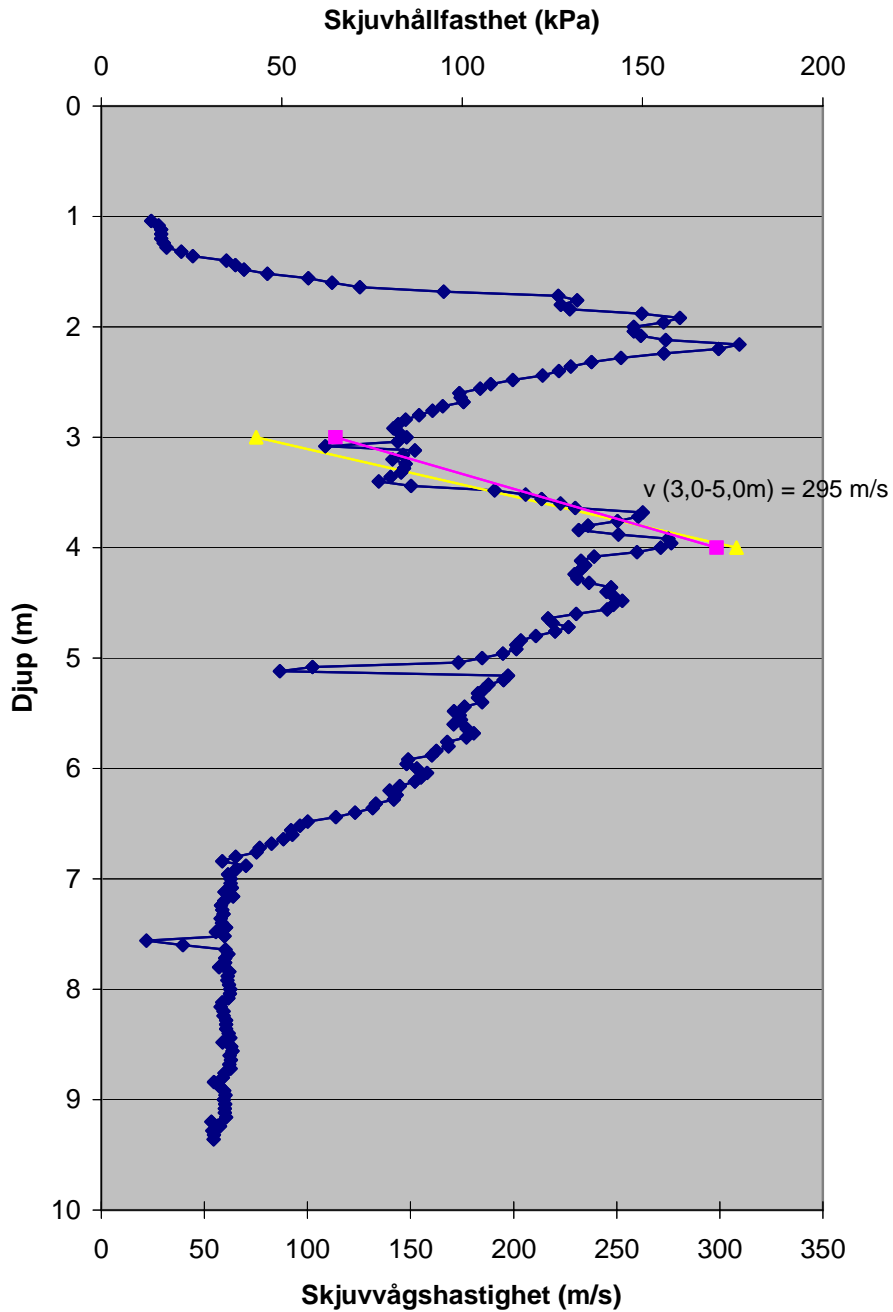
Anm: Tveksam datakvalite från DH-mätningar

Pelare B3



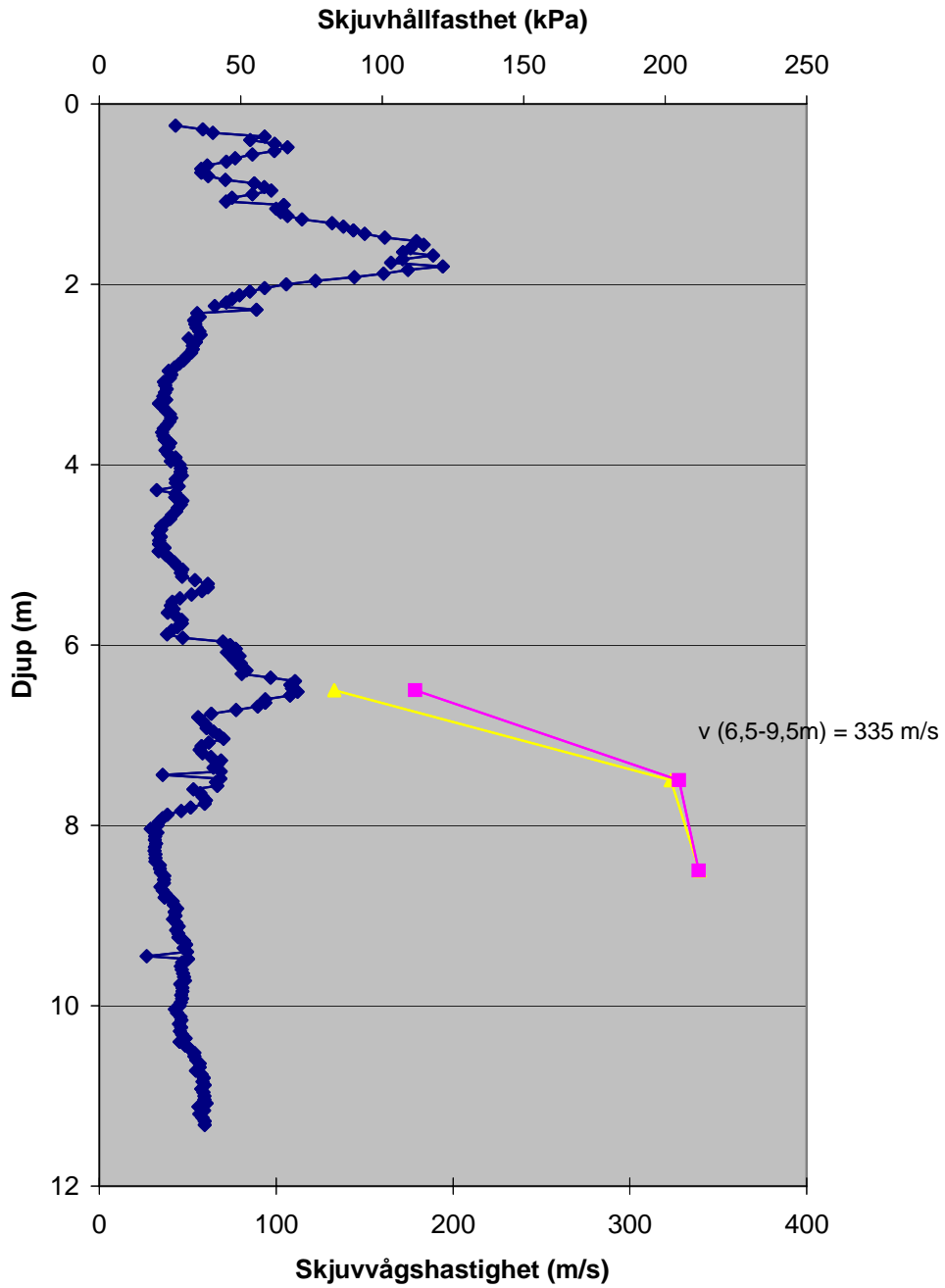
Anm: Tveksam datakvalite från DH-mätningar

Pelare B4



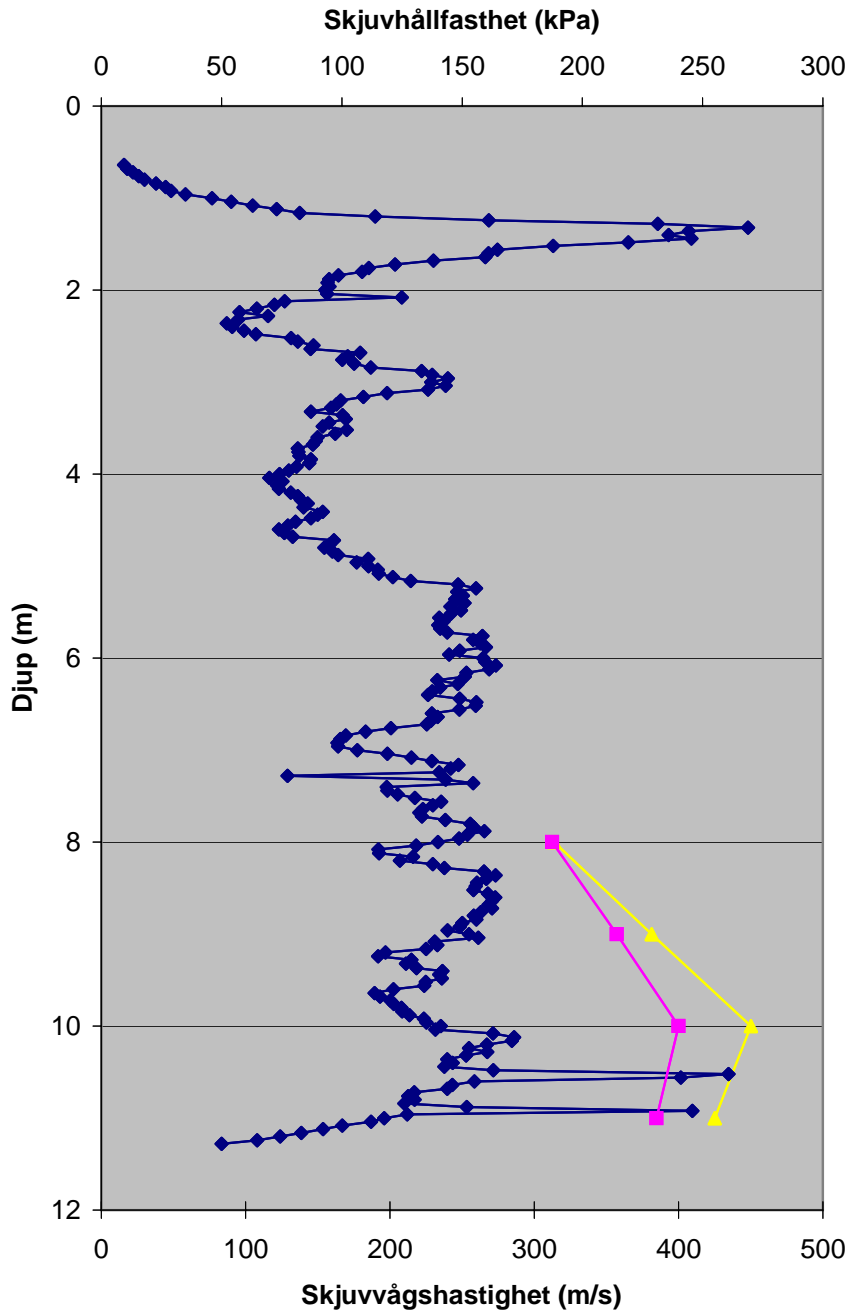
—◆— KPS —▲— DH_tau enl lab —■— DH punktvis hastighet

Pelare B5



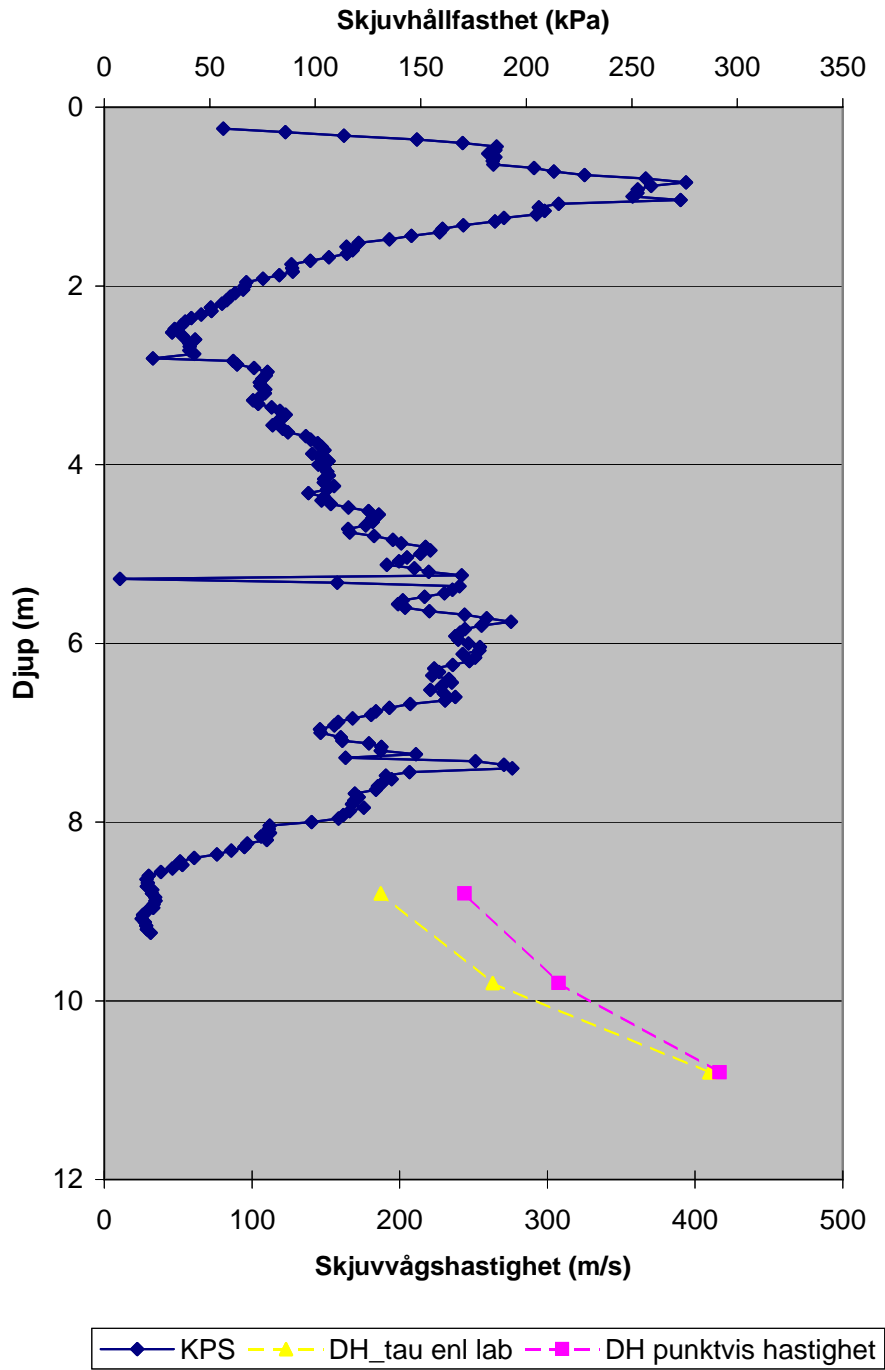
◆ KPS ▲ DH_tau enl lab ■ DH punktvis hastighet

Pelare B6



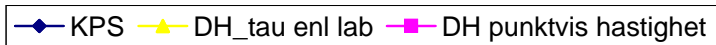
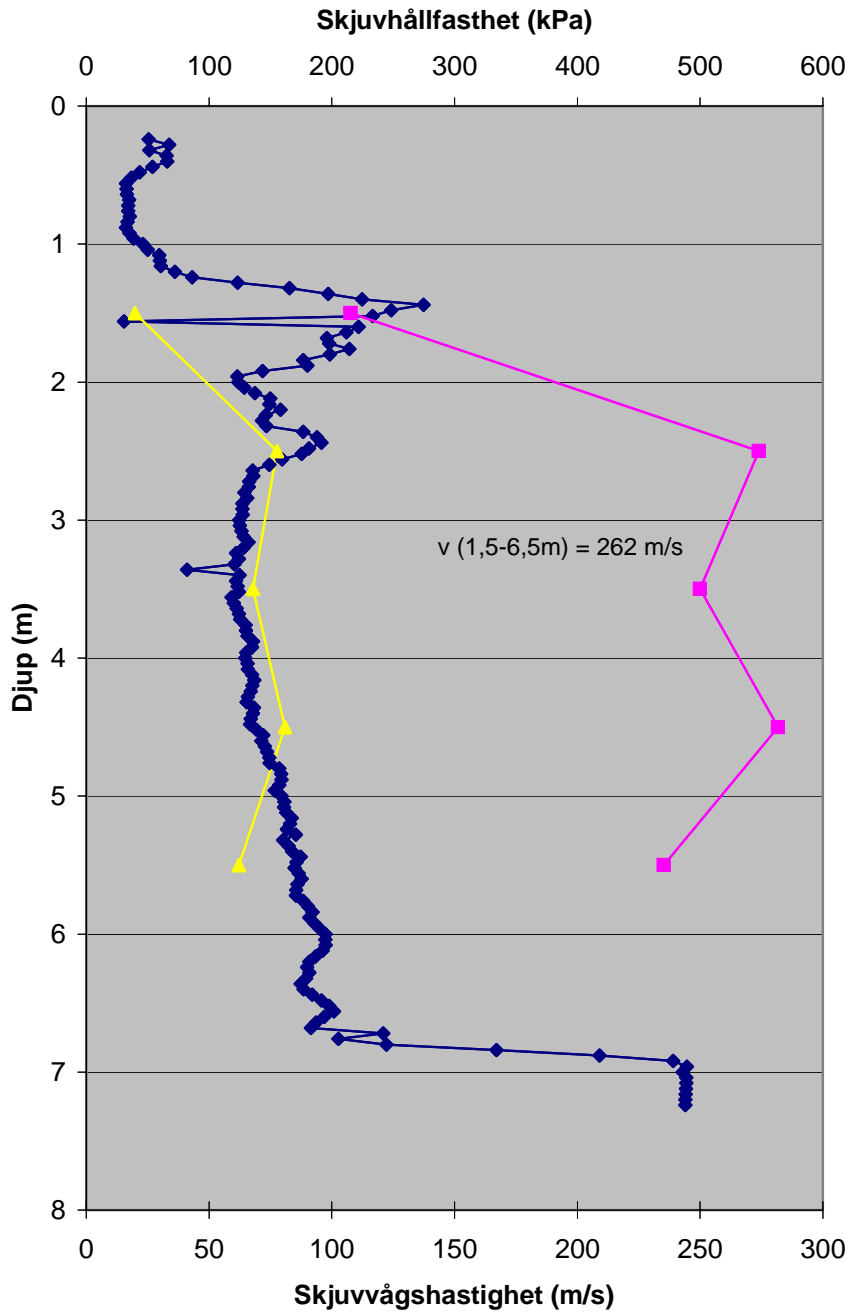
—◆— KPS —▲— DH_tau enl lab —■— DH punktvis hastighet

Pelare B7

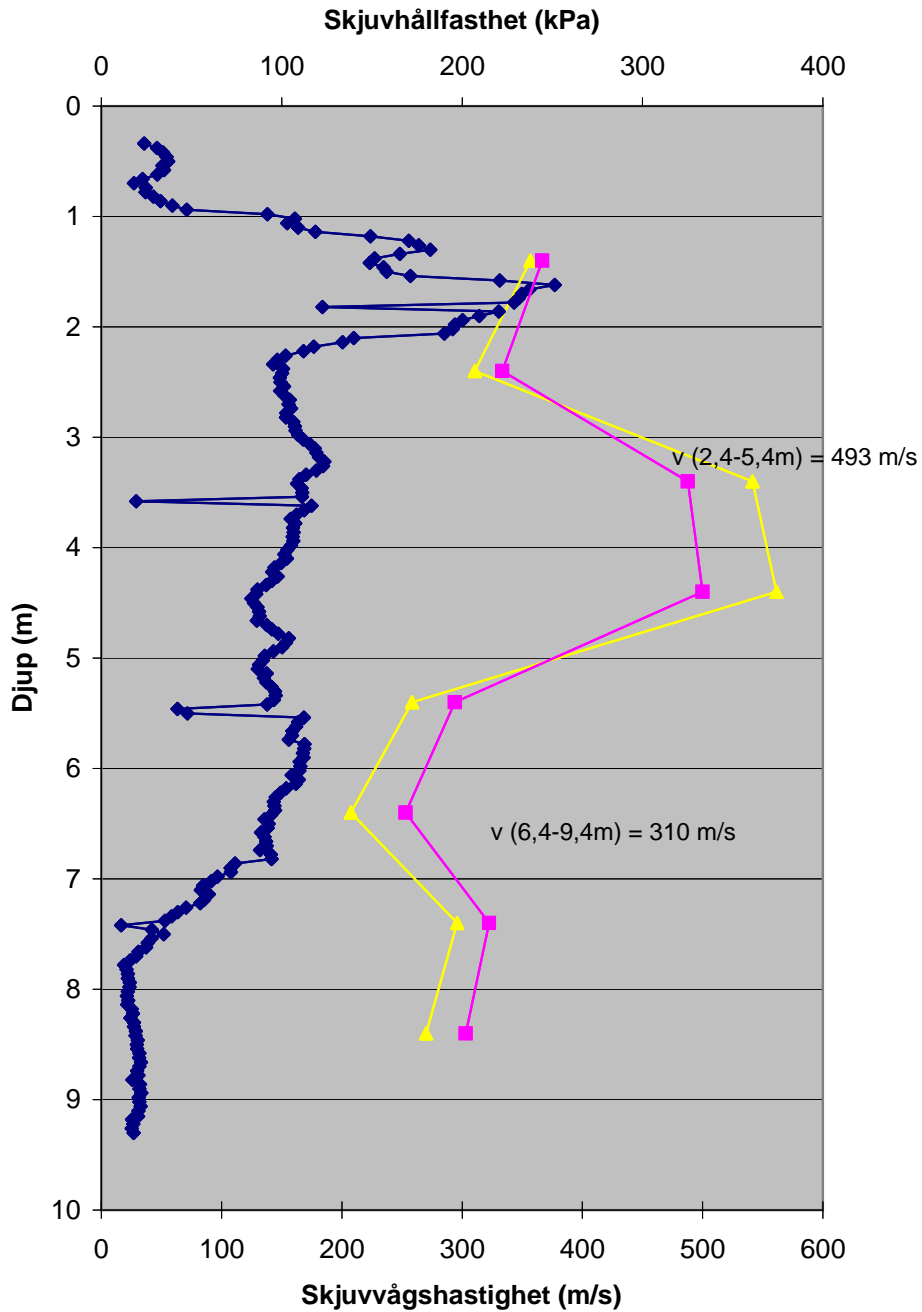


Anm: Tveksam datakvalite från DH-mätningar

Pelare C1

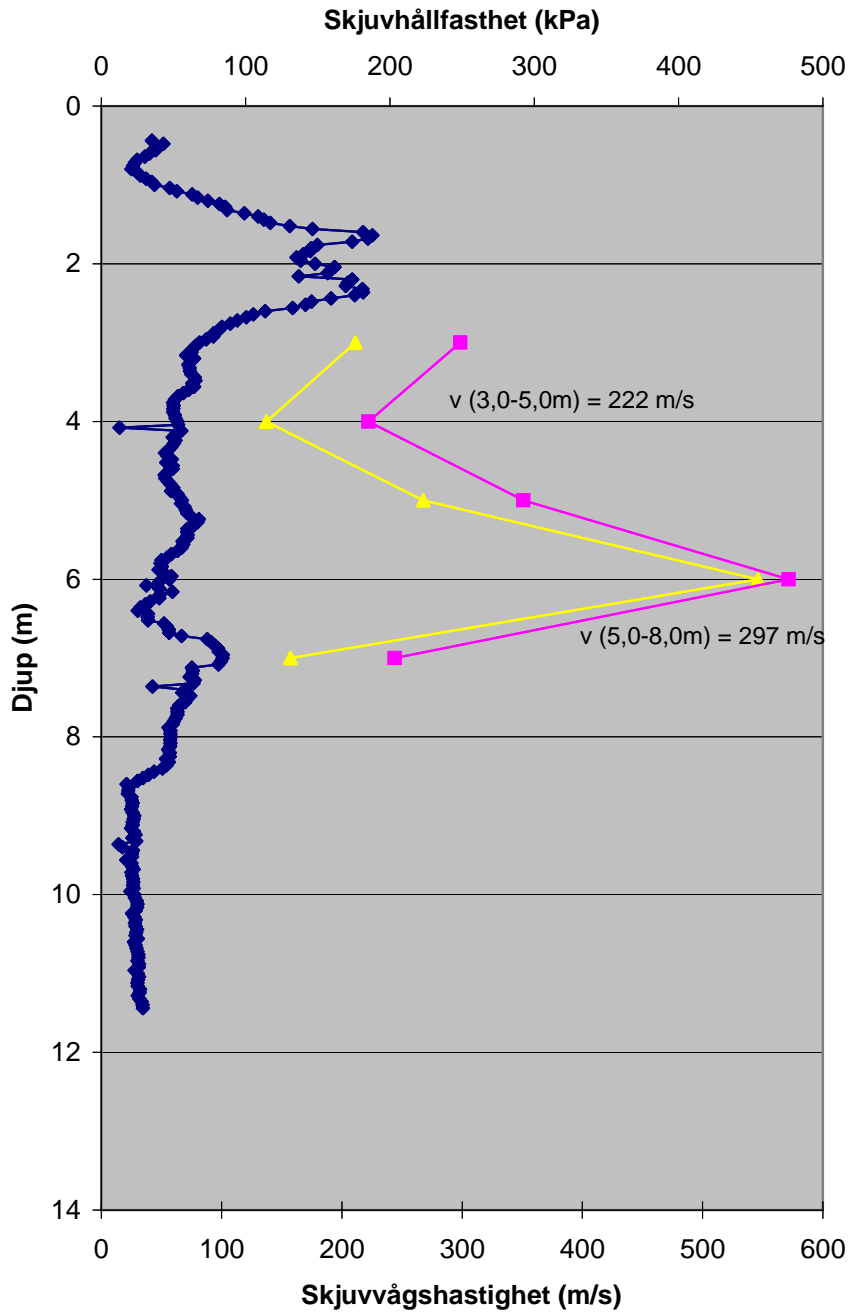


Pelare C2



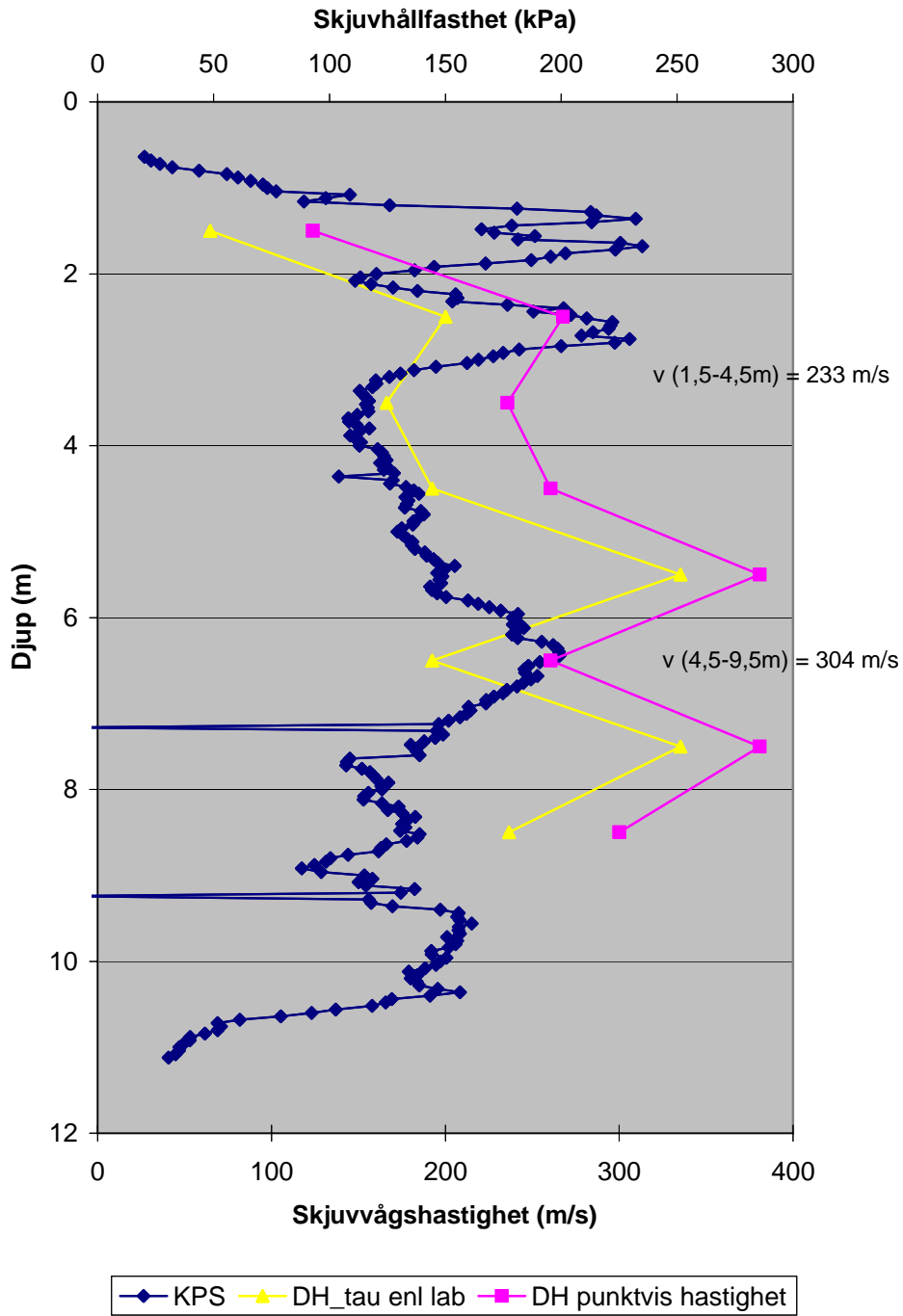
◆ KPS ▲ DH_tau enl lab ■ DH punktvis hastighet

Pelare C3



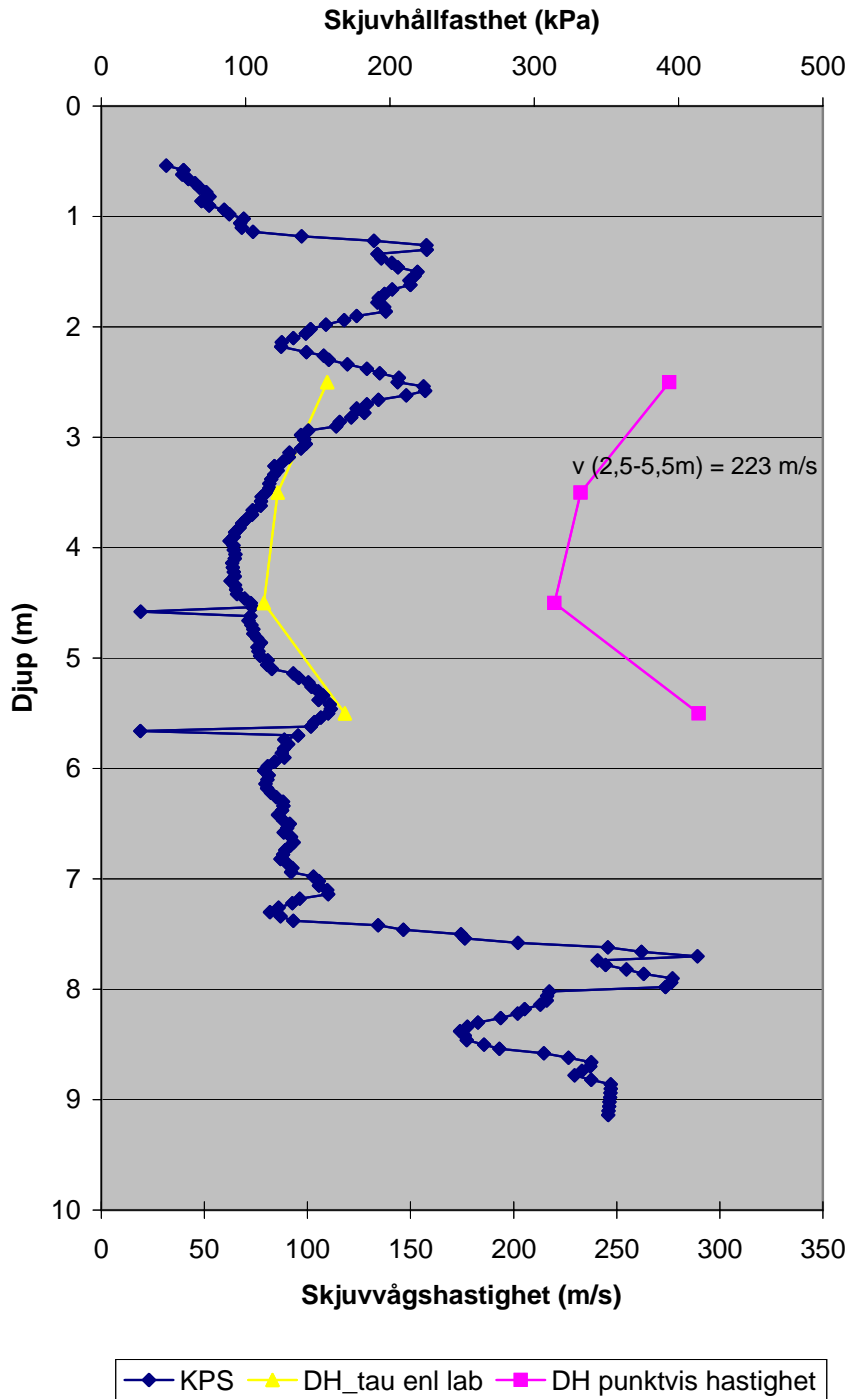
◆ KPS ▲ DH_tau enl lab ■ DH punktvis hastighet

Pelare C4

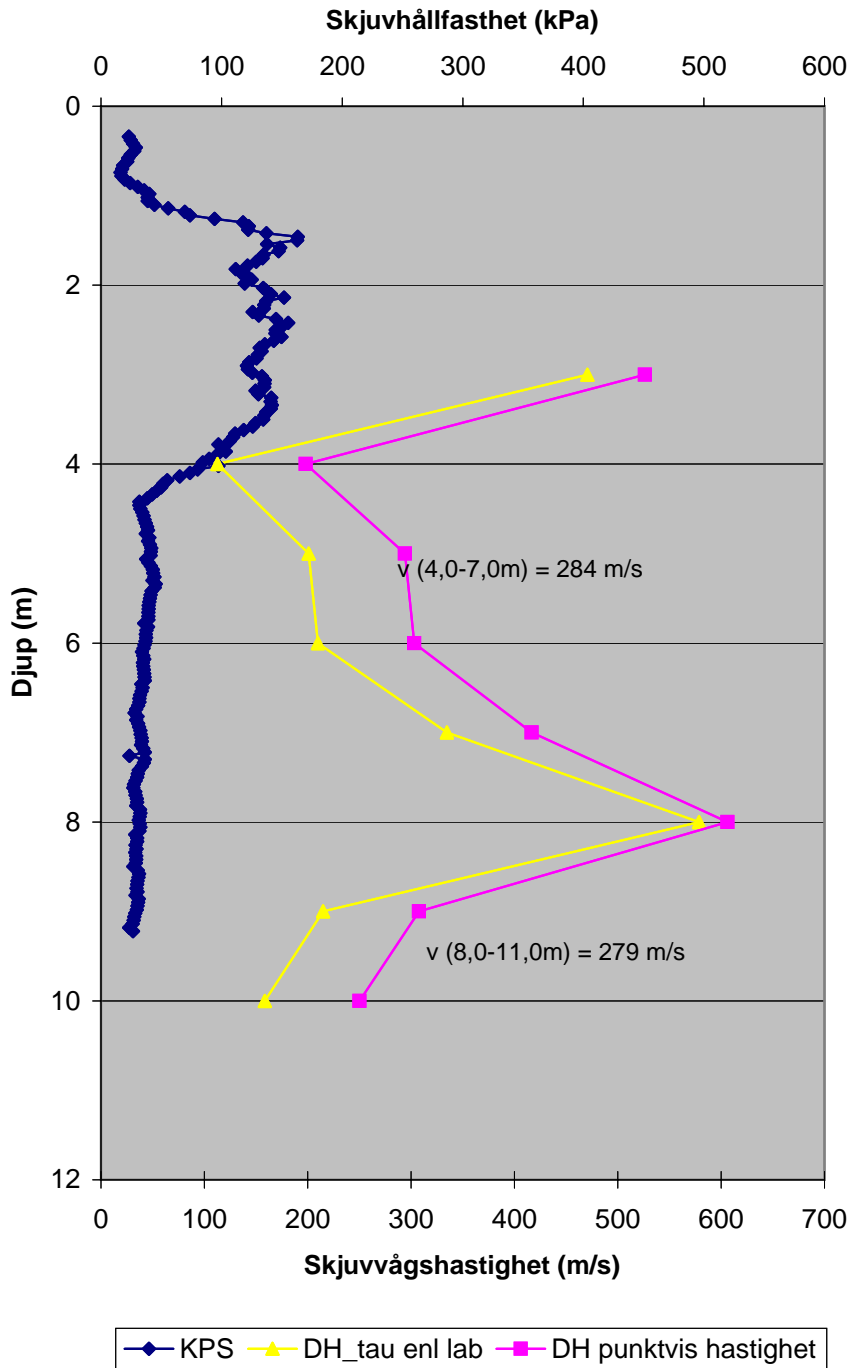


Anm: Mantelmotstånd uppskattat till 5 kN

Pelare C5

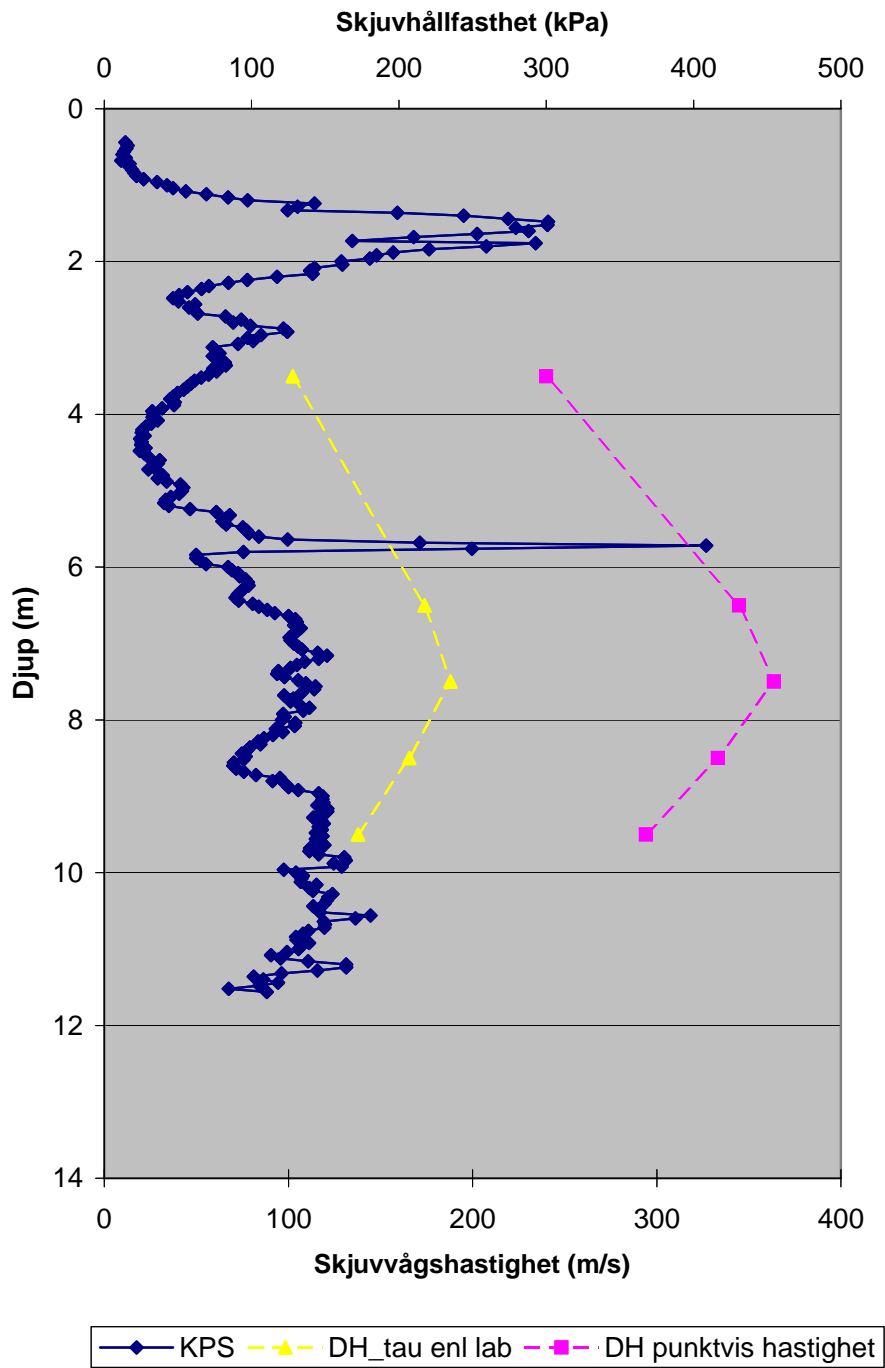


Pelare C6



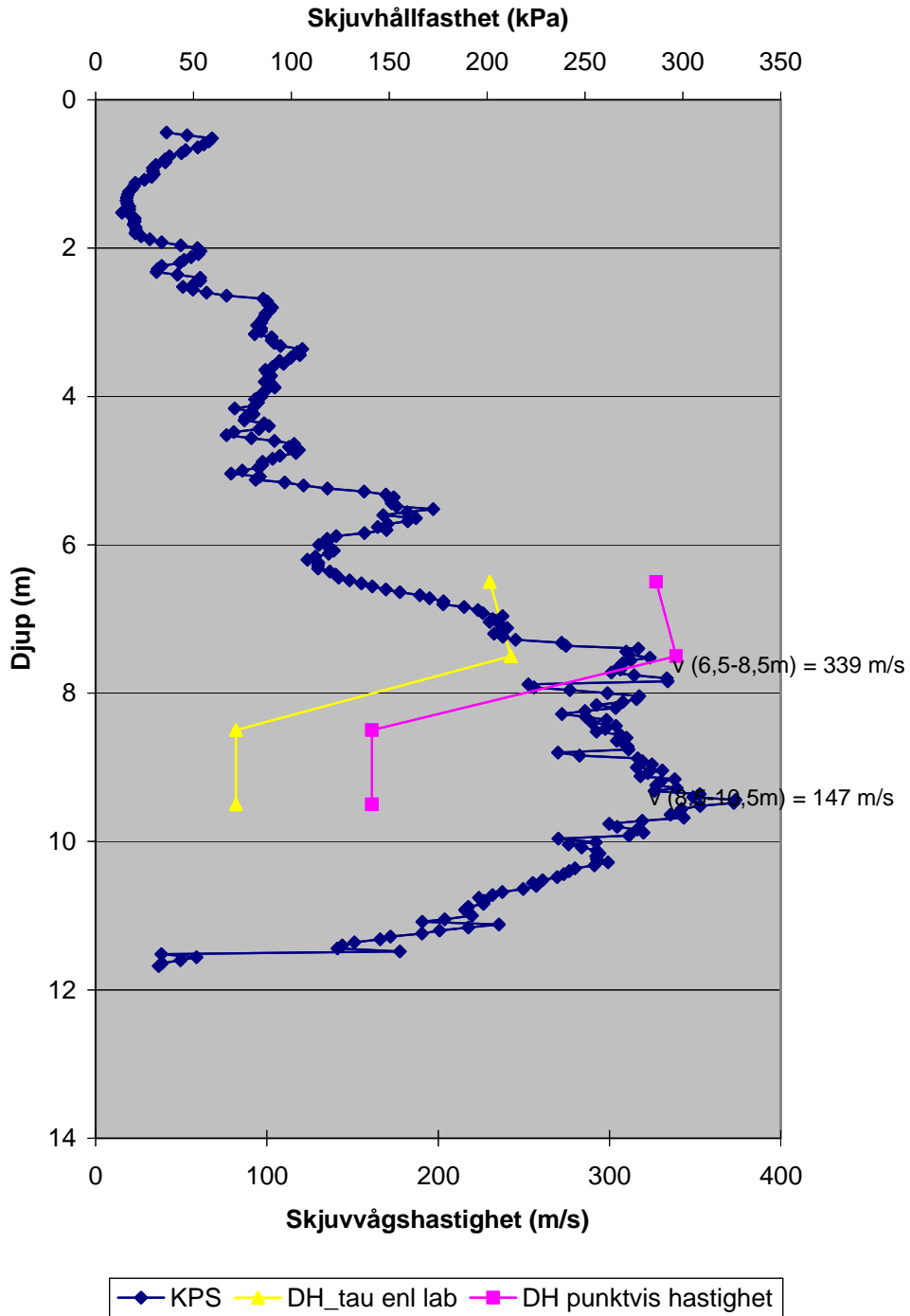
Anm: Mantelmotstånd uppskattat till 3 kN

Pelare D1

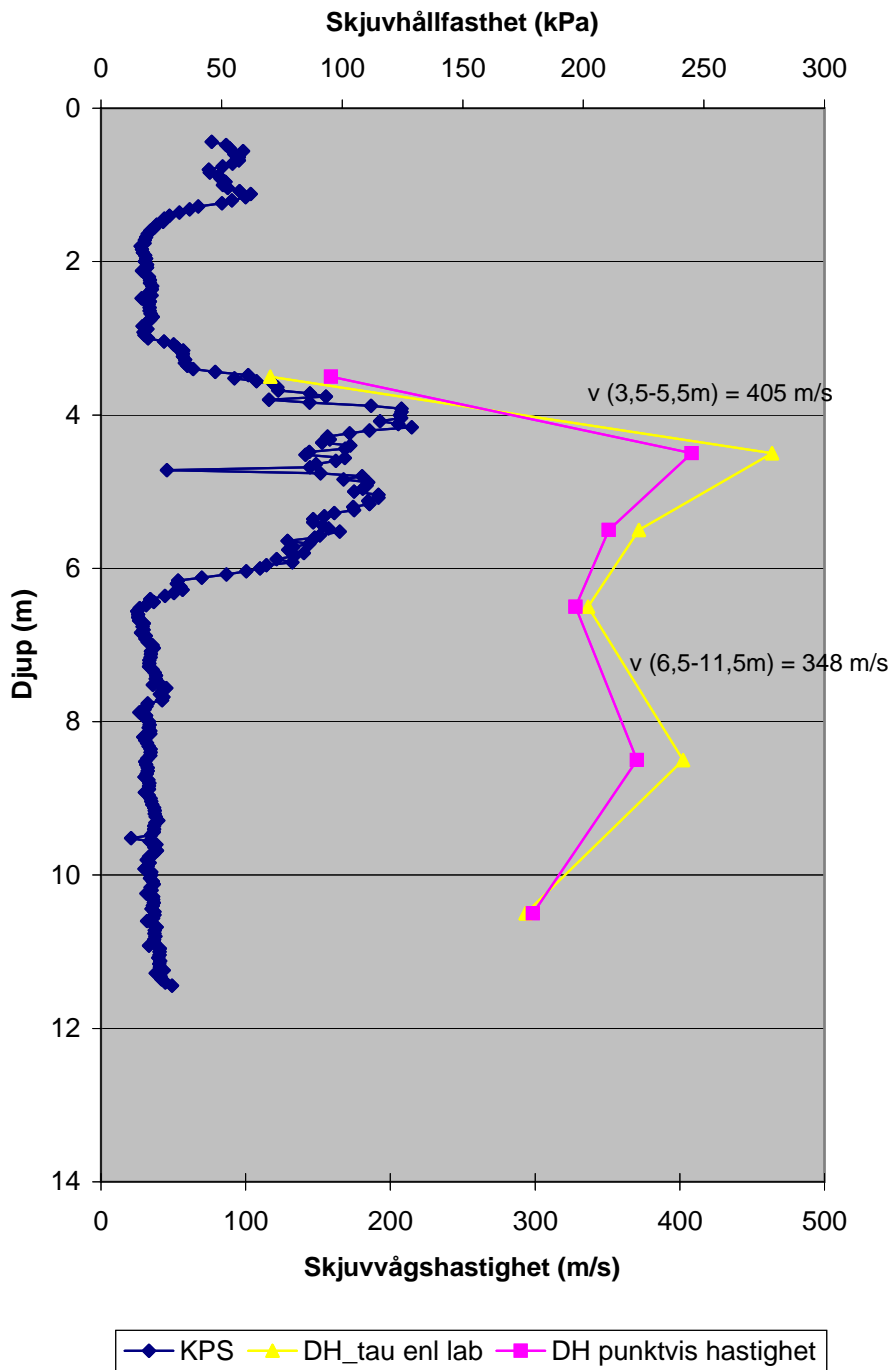


Anm: Tveksam datakvalite från DH-mätningar

Pelare D2

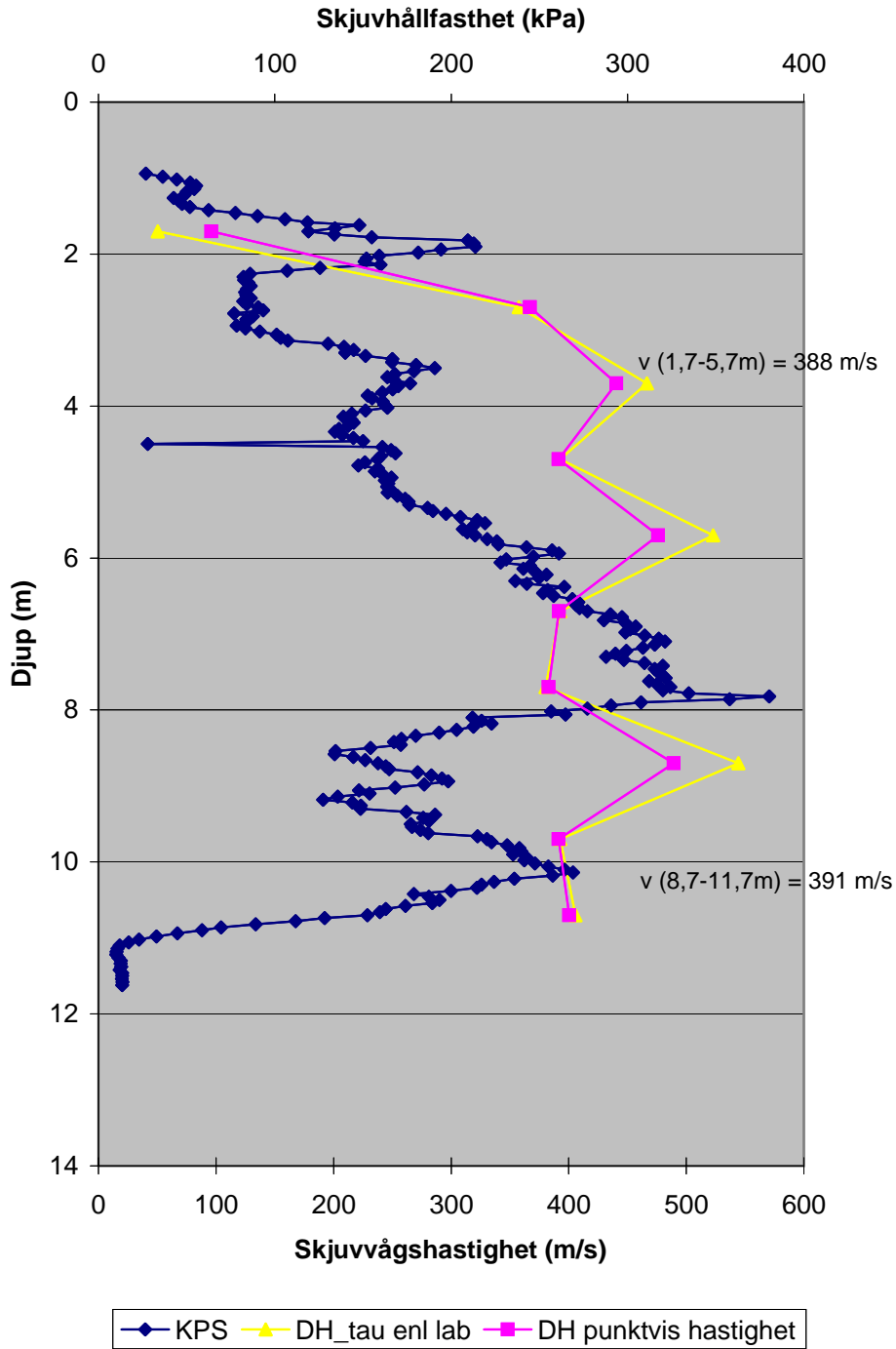


Pelare D3

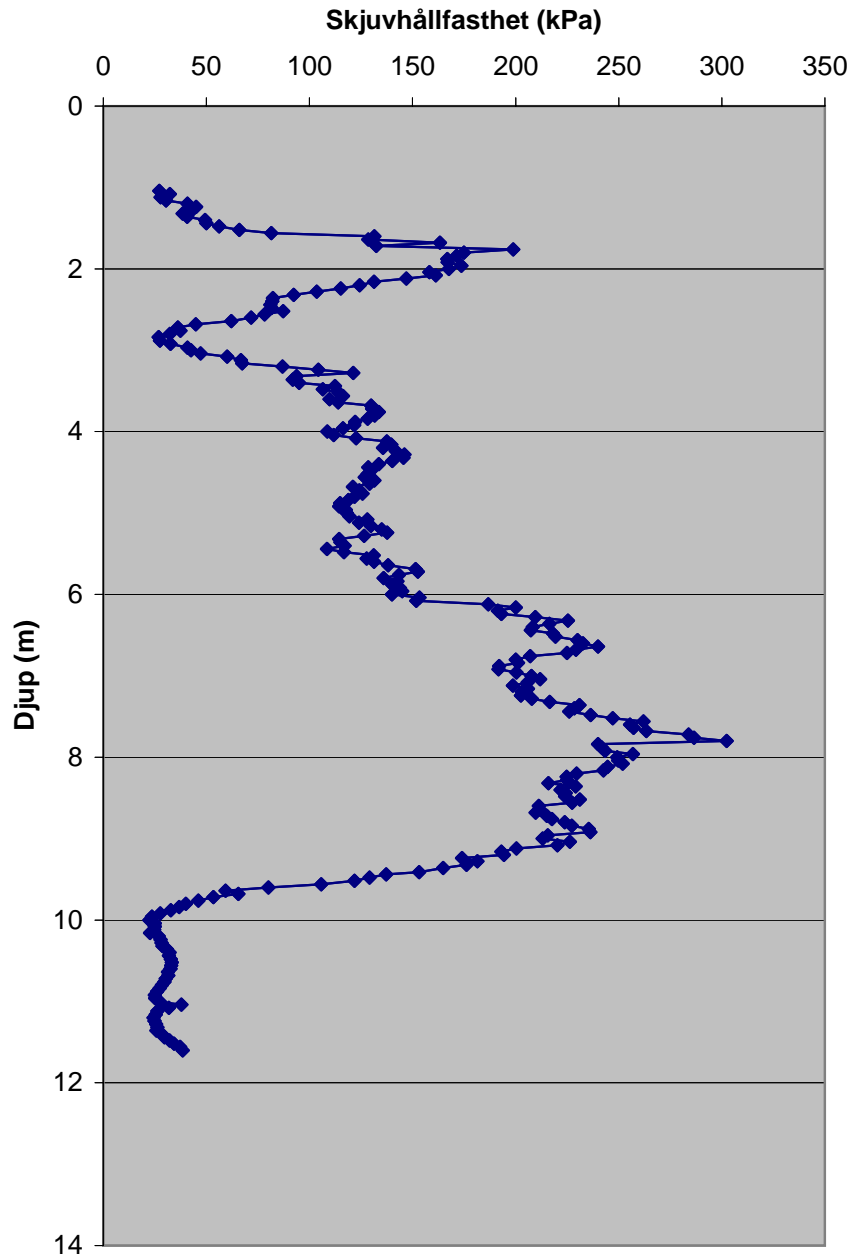


Anm: Mantelmotstånd uppskattat till 1,5 kN

Pelare D4



Pelare D5



—◆— KPS

Pelare D6

