

UTVECKLING AV JB-TOTALSONDERING FÖR KONTROLL AV KC-PELARE



Stefan Larson, Gunnar Nilsson och Nenad Jelisic

2018-03-01

FÖRORD

Studien har finansierats av SBUF (<https://www.sbuf.se>) och Trafikverket genom BIG - Branschsamverkan i Grunden (<http://www.big-geo.se>). Arbetet har utförts av KTH, NCC, samt Trafikverket. Rapporten är skriven av Stefan Larsson på KTH, Gunnar Nilsson på MälarGeo AB (tidigare NCC) samt Nenad Jelusic på Trafikverket.

Författarna vill rikta speciellt tack till Mikael Wahlberg som har utfört alla sonderingar som redovisas i rapporten samt Helene Rödbby och Nibben Peterzéns på Svenska dmixab AB som har installerat alla pelare.

Stockholm 2018-03-01

SAMMANFATTNING

Den vanligaste metoden i Sverige för kvalitetskontroll av kalkcementpelare är pelarsondering. För pelare längre än ca 8 meter rekommenderas att en förborrning utförs eftersom pelarsonden lätt går ur pelaren. Förborrning utförs ofta med samma utrusning som med totalsondering. Konceptuellt sätt så torde det finnas en korrelation mellan sonderingskraften för de två metoderna som är av intresse att studera. Om det föreligger en tillräcklig god korrelation, så är det möjligt att använda endast totalsonderingen vilket mer än halverar kostnaden för kontrollen. Om totalsonderingen indikerar dåliga resultat kan pelarsonderingen utföras selektivt.

Syftet med arbetet som redovisas i denna rapport är att verifiera tidigare utförda försök och kvantifiera korrelationen mellan de två metoderna. Försöken utfördes i relativt unga pelare med syftet att studera korrelationen då pelarna inte uppnått full hållfasthet. Försöken utfördes på tre testplatser i samband med de markförstärkningar med KC-pelare som utfördes inom projekt Nynäsbanan Vega - Ny pendeltågsstation. Totalt sonderades 39 pelare.

I rapporten presenteras resultaten och olika typer av utvärderingar med kurvregressioner. Resultaten har stor spridning men är relativt lika på alla tre testplatser. Linjära relationer kan utvärderas för aktuella områden men en något konservativ relation är $\bar{q}_{KPS} = 2.5\bar{q}_{TS}$ där \bar{q}_{TS} är sonderingstrycket för totalsondering (korrigerat med avseende på mantelfriktionen) och \bar{q}_{KPS} är sonderingstrycket för pelarsond. Denna relation ger en något konservativ utvärdering vid lägre hållfastheter ($\bar{q}_{TS} < 1200$ kPa vilket motsvarar en skjuvhållfasthet på 120 kPa)

Resultaten visar att den största osäkerheten vid utvärderingarna är bedömning av stångfriktionen för totalsonderingen. I studien lyftes sonden varannan meter för bedömning av stångfriktionen men utvärderingen var inte entydig, det förekom stora variationer. Detta betyder att man bör bedöma stångfriktionen för varje enskild Jb-totalsondering.

INNEHÅLL

INLEDNING	4
METODER OCH MATERIAL	6
TESTPLATSERNA.....	6
UTFÖRANDE.....	9
UTVÄRDERING AV MANTELFRIKTION.....	11
UTVÄRDERING AV RESULTAT	12
RESULTAT OCH DISKUSSION	12
NÅGRA TYPISKA RESULTAT FRÅN ENSKILDA SONDERINGAR	12
TESTPLATS 1.....	12
TESTPLATS 2.....	15
TESTPLATS 3.....	17
UTVÄRDERING AV GRUPPER MED PELARE.....	19
<i>Testplats 1</i>	19
<i>Testplats 2</i>	21
<i>Testplats 3</i>	22
JÄMFÖRELSE MED EN TIDIGARE STUDIE	22
FÖRSLAG TILL UTFÖRANDE.....	24
SYMBOLER	24
REFERENSER	25

INLEDNING

Pelarsondering utförs idag uteslutande med traditionell vingförsedd sond där kraften mäts strax över vingen (TK Geo 11). Vanlig kombination för pelardiameter 800 mm (kanske skriv om 600 mm pelardiameter som använts mycket mer än 800 mm) är att sondera med vingstorlek 600 mm och om pelarna skulle vara för hårda övergå till en mindre vinge, ofta 250 mm. Även med denna sond mäts neddrivningskraften strax över vingen. Regelmässigt görs en förborring för att få en bättre styrning vid kalkpelarsonderingen och på så sätt minska risken att sonden går ur pelaren. Neddrivningshastigheten är konstant 20 mm/s och spetstryckkraften registreras. Pelarens skjuvhållfasthet (halva tryckhållfastheten) utvärderas sedan genom att spetstrycket delas med sondens area och multipliceras med en konstant som beror på vingens storlek. Förborringen beaktas vid utvärderingen.

I de allra flesta fall är den traditionella pelarsonderingen tillräcklig, men i uppskattningsvis 10-20% av KC-pelarsonderingen har man problem med att penetrera pelarna t.o.m. med den mindre vingsonden, 250 mm. Det kan vara att hela pelarna får en genomgående hög hållfasthet eller ett enskilt lager som blir markant hårdare. Spetstrycksonden har en begränsning i tryckkraft och det är också förkastligt ur arbetarskyddssynpunkt att trycka så hårt att stängerna riskerar att knäckas. I dessa fall måste en mer robustare och flexibel metod användas. Ett sätt är att använda sig av Jb-totalsondering för att utvärdera pelarnas fasthet. I denna rapport görs jämförande försök med Jb-totalsondering samt kalkpelarsondering med vingstorlek 500 mm.

Avsikten är inte att försöka ersätta den traditionella kalkpelarsonderingen utan att få ytterligare ett verktyg i verktygslådan vid provning av hårda kalkcementpelare och kalkcementpelare längre än ca 8 meter där traditionell kalkpelarsondering inte räcker till. Ett annat användningsområde är att först gå över den KC pelarförstärkta ytan med Jb-totalsondering för att ta reda på om och i så fall var det kan finnas tveksamma pelare ur hållfasthetssynpunkt. Därefter kan man på ett mer inriktat vis lägga provningsinsatserna med traditionell pelarsondering där de som mest behövs.

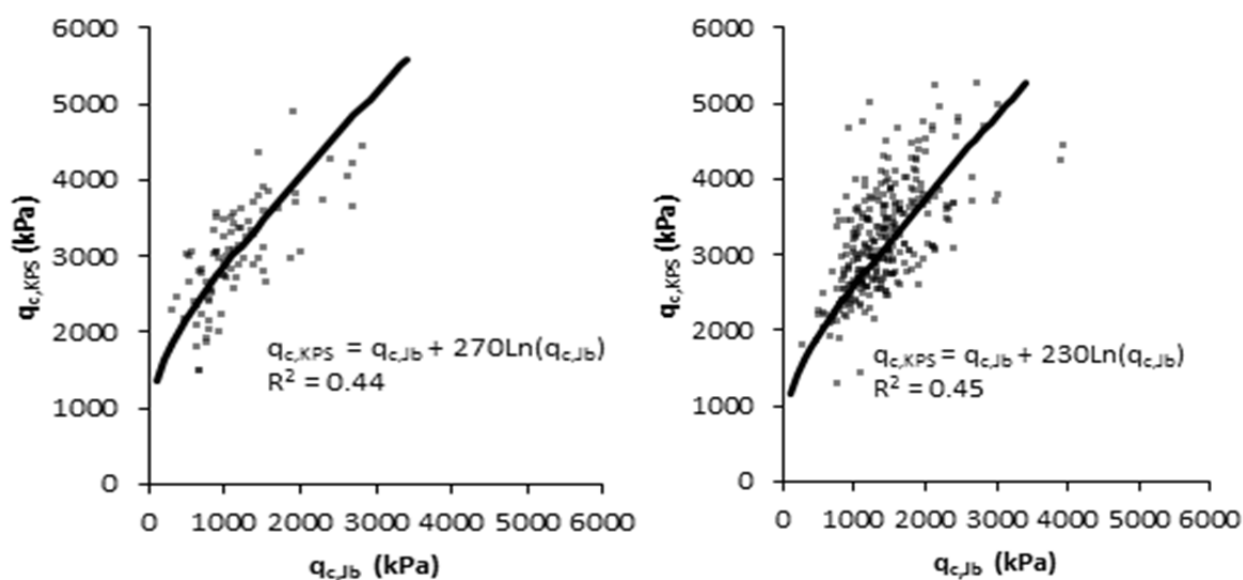
Att sondera med Jb-totalsondering har fördelarna att man slipper ha mothållet med grävmaskin och om pelarna är koordinatsatta vid installation slipper man också framschaktning av pelartopp. Tidpunkten för provningen blir också mer flexibel då man alltid kan penetrera KC-pelarna oavsett hållfasthetstillväxt.

Om man utför förborringen med Jb-totalsondering där sjunk- och rotationshastigheten hålls konstant bör sonderingskraften konceptuellt kunna relateras till pelarens hållfasthet. Vidare bör sonderingskraften kunna korreleras till sonderingskraften för pelarsonden även om brottmekanismerna sannolikt skiljer sig åt. Om överensstämmelsen är tillräckligt bra bör det vara möjligt att kunna använda totalsonderingen, som är betydligt enklare och mindre tidskrävande, som ett komplement till pelarsonderingen för produktionskontrollen.

Matningskraften vid Jb-totalsondering mäts i stångtoppen och den mantelfriktion som erhålls vid sonderingen kan inte urskiljas. Rotation av sondstången tar bort merparten av friktionskrafterna men dock inte allt. Här finns två sätt att hantera detta. Dels försöka minska friktionskrafterna genom att tillsätta vatten eller att anta att friktionskrafterna är ungefär desamma oavsett djup och baka in dessa i utvärderingen. I denna rapport har försök gjorts för att försöka ta reda på friktionskrafterna genom att lyfta sonden vid varje skarvning och mäta motståndet vid ”tomsondering”.

Inom ett doktorandprojekt har denna hypotes testats där överensstämmelsen mellan de två metoderna analyserats [1-3]. I två projekt, E18 Hjulsta och Lidingö, utfördes förborringen med Jb-totalsondering i 30 respektive 8 närliggande pelare. Resultaten från analysen som visas i Figur 1 påvisar en relativt god överensstämmelse och resultaten ansågs lovande. Det föreslogs att korrelationen följs upp med nya försök företrädevis då i pelare med något lägre hållfasthet. Detta beroende på att de utförda försöken gjorts i pelare med relativt hög hållfasthet, högre än den som normalt utnyttjas vid design.

Syftet med projektet var att verifiera tidigare utförda försök och testa huruvida resultat från Jb-totalsondering kan användas som komplement till traditionell pelarsondering för verifiering av hållfasthet. I ett stort pågående trafikverksprojekt har provningen utökats med en utökad omfattning pelarsonderingar som förborrats med Jb-totalsondering. Tre grupper med 10-15 pelare per grupp testades på respektive testplats och överensstämmelsen analyserades med enkel statistik. I det sista skedet utformades ett koncept till vägledning för Jb-totalsondering.



Figur 1 Spetsmotstånden $q_{c,Jb}$ mot $q_{c,KPS}$ med modellanpassning för (a) Lidingö (b) E18 Kista – Hjulsta.

METODER OCH MATERIAL

Försöken utfördes på projekt Nynäsbanan Vega - Ny pendeltågsstation. Anläggningen omfattar en pendeltågsstation med mitt-plattform, fyra stycken byggnadsverk (järnvägsbroar över gator och GC-vägar samt en GC-bro), bullerskydds-skärmar, kontaktledningar med fundament, en stationsbyggnad samt markförstärkningar och grundläggningar. Försöken utfördes i samband med de markförstärkningar med KC-pelare som utfördes.

Terrängen domineras av gräsbevuxen ängsmark. På sidan om spåren förekommer ställvis riklig vegetation med sly och mindre barrträd. Geotekniska undersökningar är utförda av Vectura under åren 2012-2013 och kompletterats av COWI under 2014.

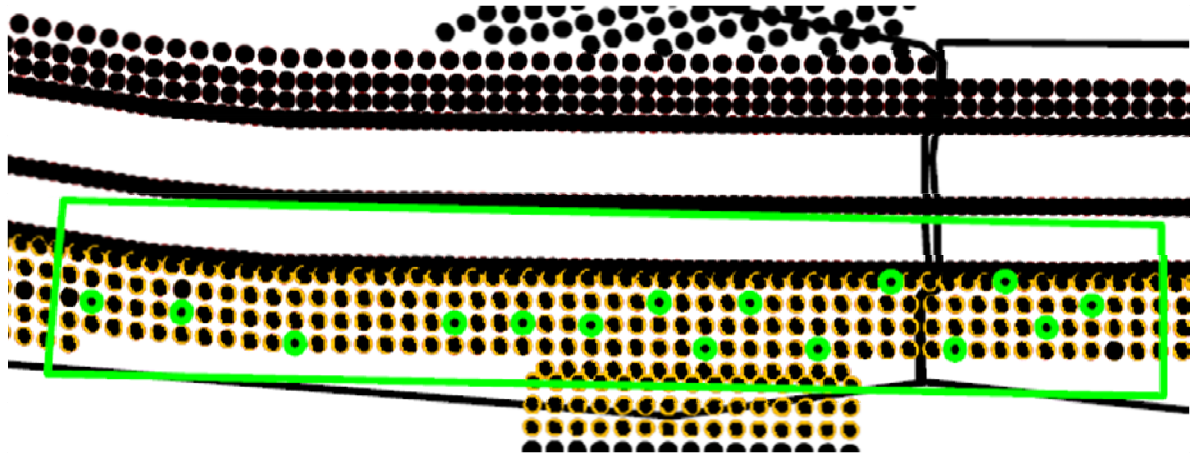
Markförstärkningen med KC-pelare utfördes av Svenska dmix AB. I samband med dessa arbeten har man vid tre platser utfört en utökad omfattning av pelarsonderingar med förborring med Jb-sondering i tre grupper med pelare. 10-15 pelare testades på respektive testplats.

Testplatserna

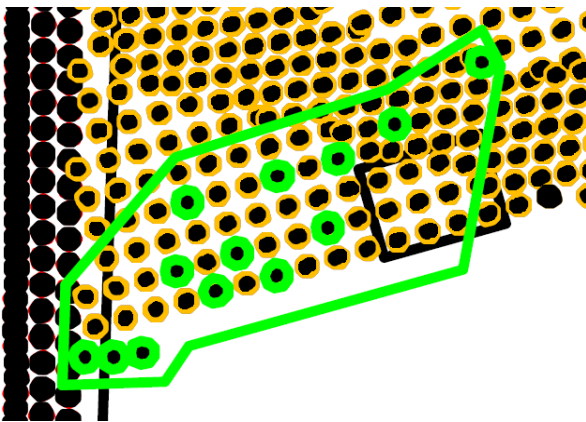
De tre testplatserna fördelades med ett avstånd uppskattningsvis 150-200 meter mellan varandra. Testplats 1 och 2 var pelarna singulära och ca 20 meter långa medan för testplats 3 satt pelarna i block och var ca 8-10 meter långa (Fig. 2). I Tabell 1 redovisas installationsdatum och längd för alla pelare samt ålder vid provningen.

För testplats 1 och 2 utgörs lerjorden i den översta metern av en gyttjig lera och därunder någon meter sulfidhaltig lera. Därefter blir lerjorden varvig mot djupet. Det sulfidhaltiga lerskiktet har en vattenkvot mellan 80-90%. Därunder har leran en vattenkvot 50-60% och minskar ned till 40% i den undre halvan av lerlagret. Leran har en mycket låg skjuvhållfasthet som ökar med djupet från ca 10 till 20 kPa. Leran är mellansensitiv.

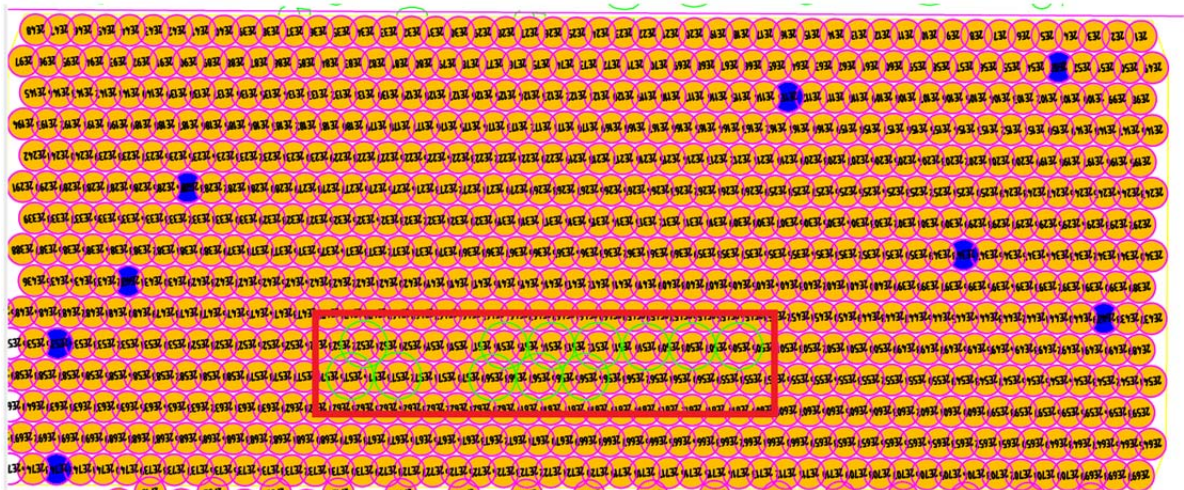
Lerjorden som pelarna installerades i utgjordes för testplats 3 av en varvig lera med siltskikt. I den övre halvan av lerlagret var vattenkvoten mellan 50-60% och den undre halvan ca 40%. Leran har en mycket låg skjuvhållfasthet som lägst ca 10-15 kPa. Leran är mellansensitiv.



Testplats 1



Testplats 2



Testplats 3

Figur 2 Planer över de tre testplatserna.

Tabell 1 Installationsdatum och längd för alla provpelare samt ålder vid provningen

Provyta	Pelare	Datum	Längd (m)	Ålder (dygn)
1	F3585	151102	18.8	9
	F3638	151102	20.8	9
	F3708	151102	20.8	9
	F3803	151102	16.6	9
	F3842	151102	20.8	8
	F3886	151102	20.8	8
	F3927	151103	18.7	7
	F3961	151103	20.8	7
	F3986	151103	20.8	7
	F4034	151103	20.4	7
	F4073	151103	19.0	7
	F4115	151103	17.8	7
	F4137	151103	16.9	6
	F4164	151103	16.8	6
	F4187	151103	15.3	6
2	Q26	151202	20.0	8
	Q42	151202	19.7	8
	Q45	151202	17.1	7
	Q65	151202	20.1	6
	Q77	151202	20.4	7
	Q112	151202	20.0	8
	Q144	151202	17.7	6
	Q168	151202	20.3	7
	Q222	151202	18.6	6
	Q317	151202	20.1	16
	Q422	151202	20.9	6
	Q298	151202	21.2	6
	test 1	151202	18.6	8
	test 2	151202	18.3	8
	test 3	151202	18.2	8
3	B342	160301	12.1	16
	B365	160301	11.8	16
	B388	160301	12.3	16
	B411	160301	11.6	16
	B413	160301	12.9	16
	E425	160225	19.7	19
	E855	160225	16.2	19
	E907	160225	20.7	19
	D384	160303	18.1	14
	D492	160303	18.5	14

Utförande

I projektets inledning sammanställdes en kravspecifikation och arbetsbeskrivning för pelarinstallationen och pelarprovningen enligt följande.

Val av pelare

- Samlad grupp om 10-15 st
- Inte kortare än 8 m
- Pelarålder oväsentlig dock inte för gamla

Utrustning

- Pelarsond, KPS, med spetstrycksondering (enligt Trafikverkets TK Geo 11)
- Utrustning för Jb-totalsondering (enligt SGF metodbeskrivning)

Förberedelse

- Planritning tas fram och provade pelare numreras
- Tidpunkt för provning meddelas arbetsgrupp

Genomförande

- Pelartopp schaktas fram
- Avvägning av pelartopp. Viktigt så att man jämför samma nivå på alla pelare
- Jb-totalsondering utförs i pelarcentrum. Sjunkhastighet 20 mm/s och rotationshastighet 25 rpm
- Stångfriktion provas på 4 st pelare per grupp. Efter varannan stångskarv och efter avslut dras stången upp en meter och därefter görs Jb-totalsondering (med sjunkhastighet 20 mm/s; rotation 25 rpm) i ”tomhål”. Matningskraften registreras.
- KPS med spetstrycksondering görs i samma hål som Jb-totalsondering.

Redovisning

- Planritning med provade pelare markerade och numrerade
- Pelarnas installationsdatum
- Installationsdiagram
- Sonderingsfil (stackfil) med samtliga registrerade parametrar.
- Kalibreringsprotokoll, CPT samt givare borrhandsvagn

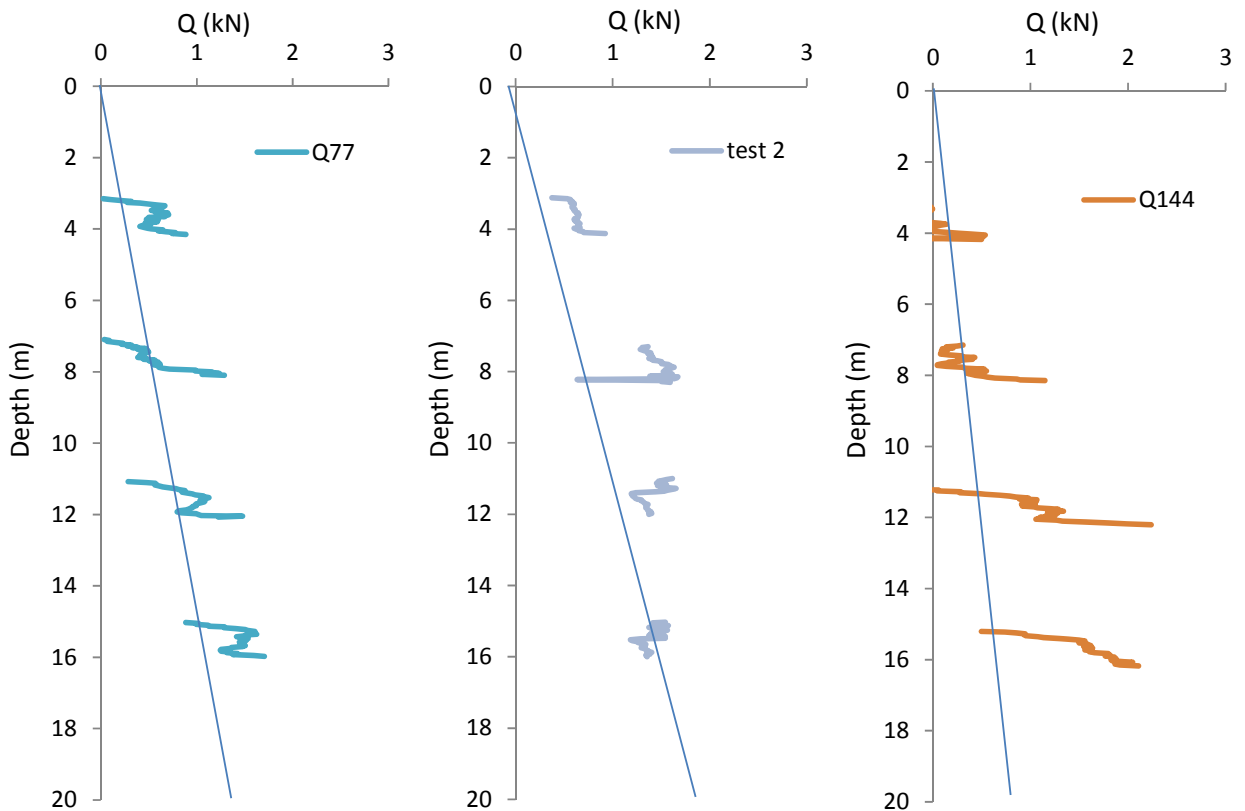


Figur 3. Bilder tagna när pelarna sonderas.

Utvärdering av mantelfriktion

Det uppmätta sonderingsmotståndet från totalsonderingen inkluderar mantelfriktion som måste exkluderas. Mantelfriktionen har i detta projekt uppskattats genom att varannan stångskurv lyfts upp en meter och därefter görs Jb-totalsondering i "tomhålet". Resultaten visade att utvärderingen blev svårare än förväntat. Sonderingskraften Q_{TS} var inte konstant vid sonderingen i "tomhålet" utan steg relativt snabbt. Vi har därför antagit att de första 20 cm av sonderingen i "tomhålet" motsvarar mantelfriktionen. Resultaten är också tolkade med förenklingen att mantelfriktionen ökar linjärt med djupet.

Exempel på resultat redovisas i Figur 4. Från dessa har vi uppskattat mantelfriktionen som linjärt ökande från noll till 1 - 2 kN på 20 m djup vilket motsvarar 0,025 - 0,1 kN/m. En översyn av alla resultat visar att mantelfriktionen kan sättas till 0,05 kN/m men det var väldigt stor spridning. Det finns här ett behov av ett bättre sätt att utvärdera stångfriktionen eller utveckling av metoden så att spetstrycket kan mätas direkt såsom för pelarsonden.



Figur 4 Tre exempel på utvärdering av mantelfriktion.

Utvärdering av resultat

Datahanteringen och utvärderingen utfördes i följande steg:

- 1) Från tillhandahållna filer med resultaten från pelarsonderingarna och förborringarna överfördes data för sonderingskraften Q_{KPS} för pelarsonderingen och sonderingskraften för totalsonderingen Q_{TS} med djupet till en excelfil där data från alla sonderingarna samlades för analys. Data för en pelare behandlades under resp. flik
- 2) För de sonderingar där mantelfriktionen utvärderades justerades diagrammen för förborringen manuellt så att djupangivelsen stämde med verkligt djup. Resultaten från uppmätning av mantelfriktionen samlades i en separat flik.
- 3) Sonderingskraften Q_{TS} justerades med avseende på utvärderad mantelfriktion.
- 4) Sondtrycket för pelarsonderingen q_{KPS} samt totalsonderingen q_{TS} beräknades genom att dividera tryckkraften med sondarean. Sondarean för pelarsonden reducerades med avseende på förborringen.
- 5) Ett löpande medelvärde beräknades för sondtrycken \bar{q}_{KPS} resp. \bar{q}_{TS} över 0.5 m över djupet. För varje 0.5 m intervall avsattes värdena mot varandra för utvärdering av korrelationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} (se Fig. 6 för ett exempel).

För varje Testplats 1-3 har redovisning av sambanden mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} utvärderats med avseende på löpande medelvärden över 0.5 m. Vi har valt att göra jämförelsen med utvärderade sonderingstryck för att slippa dra in en diskussion om bärighetsfaktorer vid utvärdering av hållfastheter. Dels har sambanden för varje pelare redovisats men också för alla data där korrelationsanalyser genomförts. Vi har också gjort en enklare och begränsad studie av utvärdering av grupper av pelare.

Som regel redovisas den odränerade skjuvhållfastheten s_{pel} utifrån relationen

$$s_{pel} = \frac{1}{N} \frac{Q_{KPS}}{A_{KPS}} = \frac{\bar{q}_{KPS}}{N}$$

Där Q_{KPS} är sonderingskraften för pelarsonden, A_{KPS} är pelarsondarean och N är bärighetsfaktorn. För $N=10$ erhålls $s_{pel} = 100$ kPa för $\bar{q}_{KPS} = 1000$ kPa.

RESULTAT OCH DISKUSSION

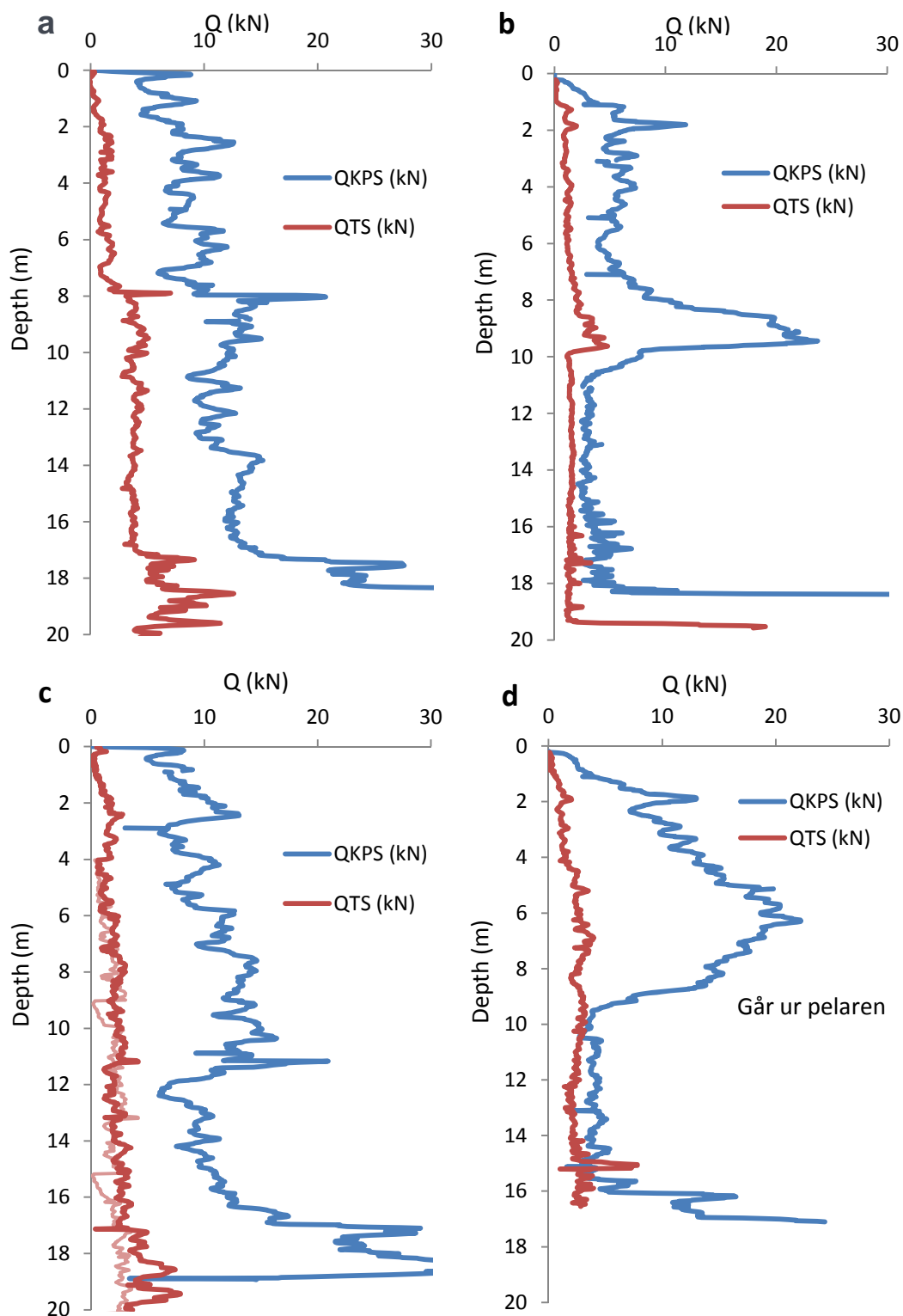
Några typiska resultat från enskilda sonderingar

I Figur 5 visas några exempel på resultat från ett antal utvalda sonderingar. I Figuren redovisas sonderingskrafterna Q_{KPS} resp. Q_{TS} med djupet. Sonderingarna i a) och b) visar exempel på där försonderingen och pelarsonderingsresultaten överensstämmer bra. Både låga och höga värden överensstämmer över hela sonderingsintervallet. Sonderingarna i c) påvisar en sämre korrelation. Det lite lägre värdet för Q_{KPS} på djupet 12 m återses inte för Q_{TS} . I d) redovisas ett resultat där pelarsonden börjar gå ur pelaren redan vid 6 m djup. Vid 10 m är den helt ur. Ungefär vart femte pelarsondering har gått ur pelaren inom sonderingsintervallet 0-20 m.

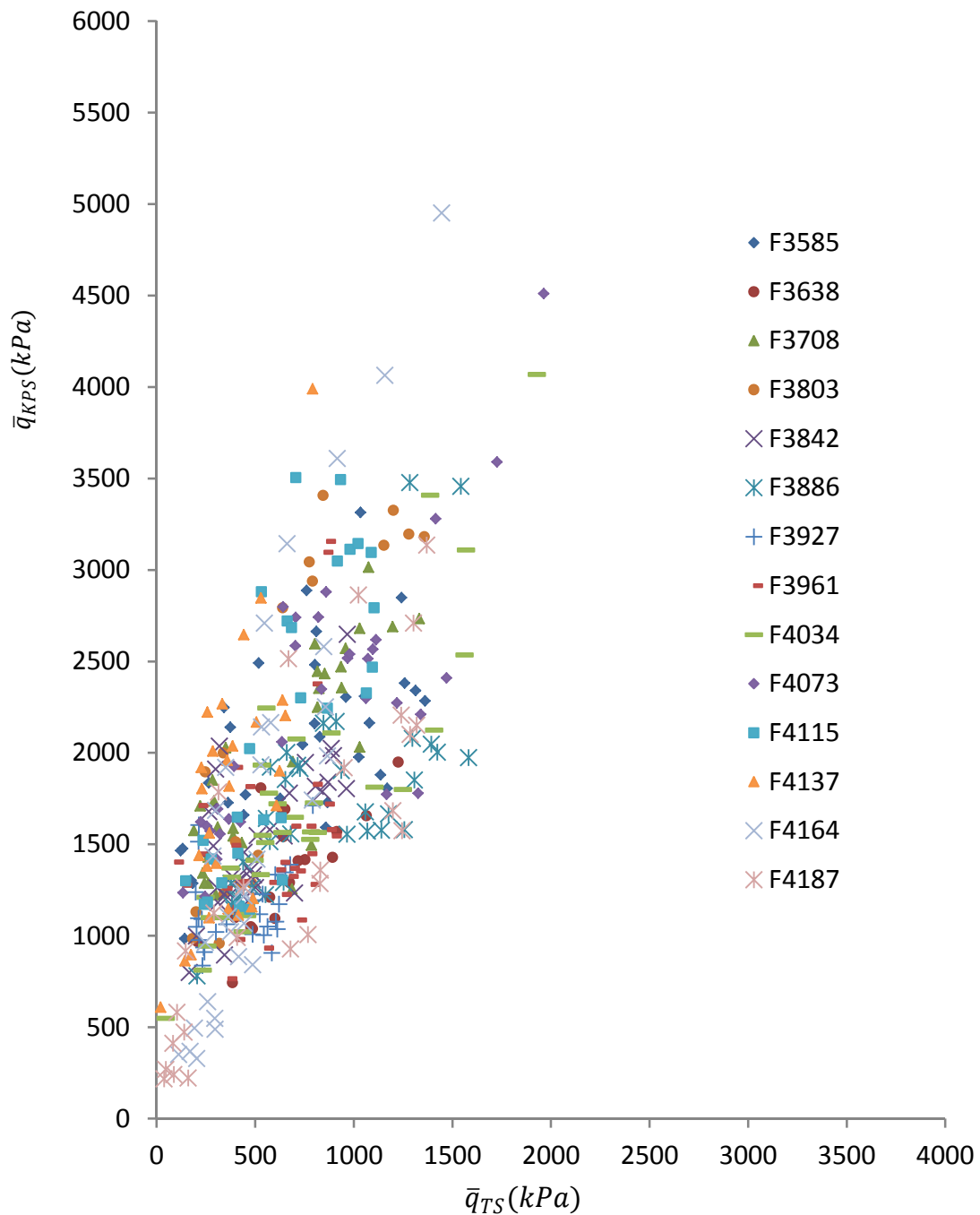
Testplats 1

Figur 6 visar utvärderad \bar{q}_{KPS} som funktion av \bar{q}_{TS} för alla sonderingar i 14 pelare på Testplats 1. Det är runt 400 utvärderade punkter i grafen. Spridningen i resultaten är som väntat stor, men

det föreligger en positiv korrelation, approx. linjär, över hela mätintervallet. Den utvärderade regressionen har därför antagits linjär.

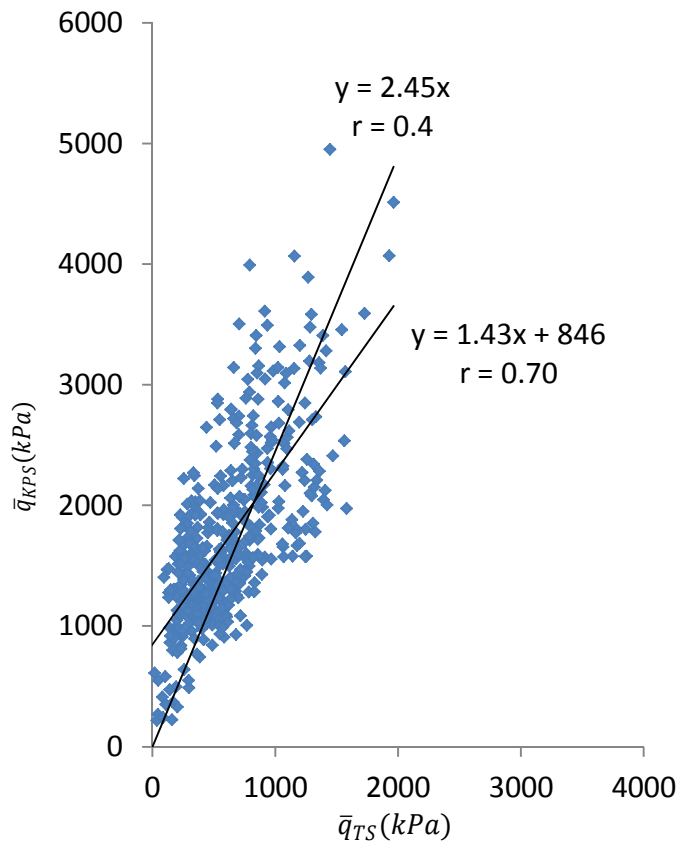


Figur 5. Några typexempel på sonderingsresultat; a) och b) Exempel på där resultaten från försonderingen och pelarsonderingen överensstämmer bra; c) Sämre överensstämmelse; d) Exempel på där pelarsonden börjar gå ur pelaren vid 6 m.



Figur 6. Utvärderad \bar{q}_{KPS} som funktion av \bar{q}_{TS} för alla sonderingar i 14 pelare på Testplats 1.

I Figur 7 redovisas ett par regressions samband utifrån alla utvärderade mätdata på Testplats 1. Den bästa regressionen erhålls med sambandet $\bar{q}_{KPS} = 1.43 \bar{q}_{TS} + 846$ där korrelationskoefficienten $r = 0.70$ vilket måste anses vara bra för en sådan här typ av studie. Kanske mer rimligt är att interceptet är noll och att kurvregressionen går genom origo. I detta fall erhålls då sambandet $\bar{q}_{KPS} = 2.45 \bar{q}_{TS}$ och $r = 0.4$ vilket är en relativt dålig korrelation. Att använda denna korrelation har dock fördelen att låga värden inte överskattas utan ger \bar{q}_{KPS} på säkra sidan. Vid högre värden överskattas istället hållfastheten.

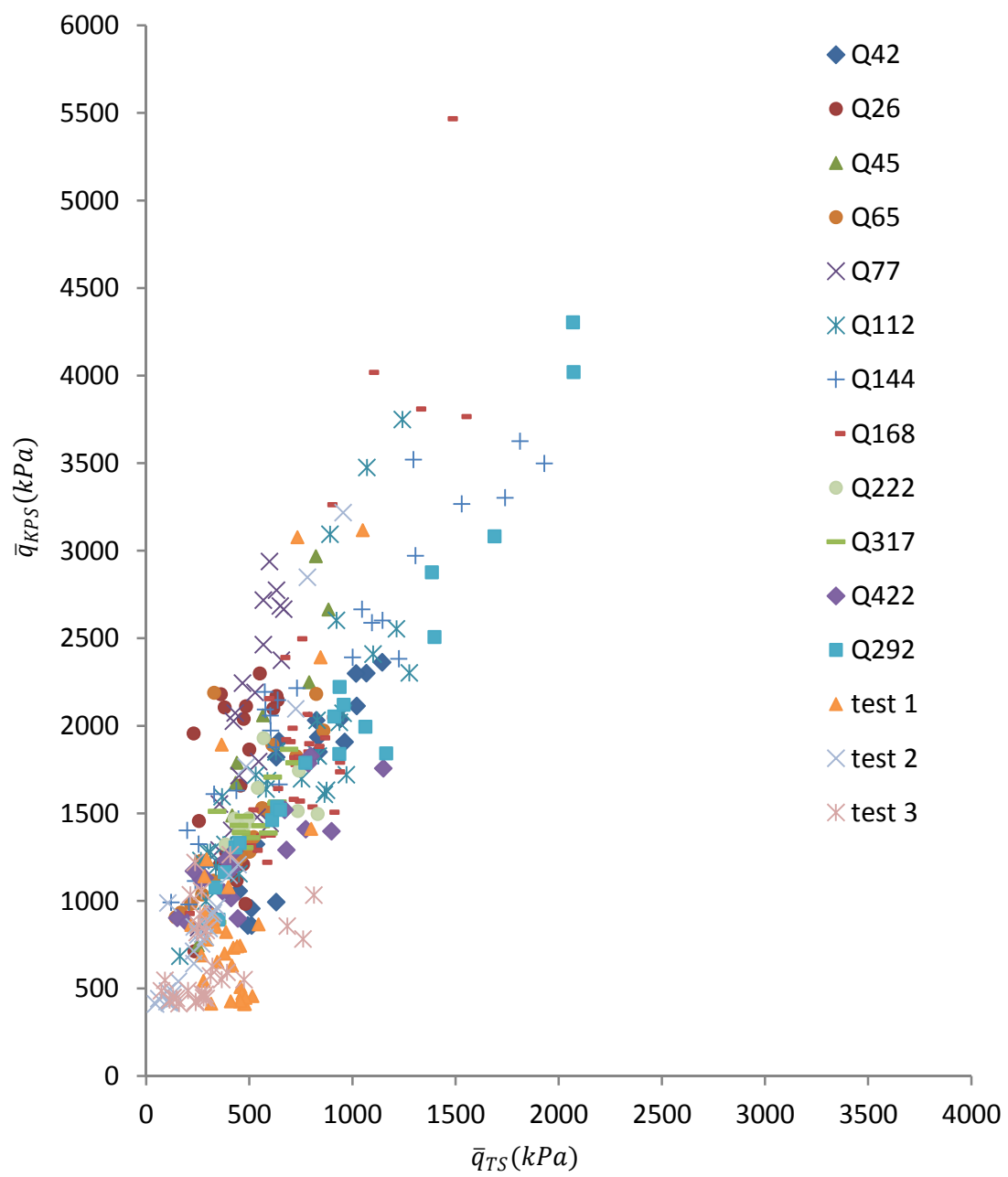


Figur 7. Regressionsanalys med alla mätdata från Testplats 1 (Fig 6).

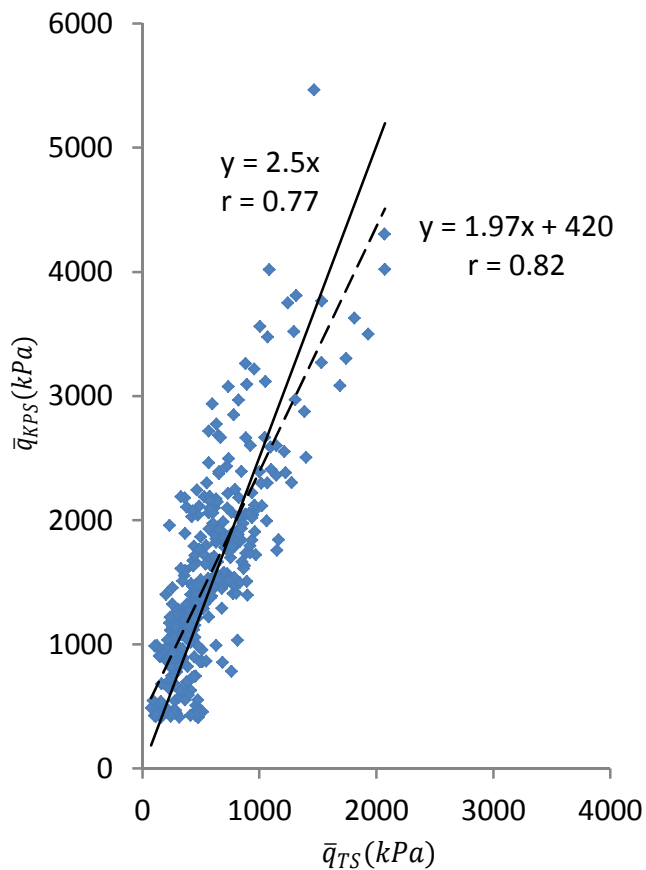
Testplats 2

Figur 8 visar utvärderad \bar{q}_{KPS} som funktion av \bar{q}_{TS} för alla sonderingar i 15 pelare på Testplats 2. Grafen innehåller ungefär 400 utvärderade punkter. Vi ser här att korrelationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} är mycket lika resultaten från Testplats 1 (Fig 7) samt att spridningen är mindre.

I Figur 9 redovisas ett par regressionssamband utifrån alla utvärderade mätdata. Den bästa linjära regressionen erhålls med sambandet $\bar{q}_{KPS} = 1.97 \bar{q}_{TS} + 420$ där korrelationskoefficienten $r = 0.82$ vilket måste anses vara högt för en sådan här typ av studie. Kanske mer rimligt är att interceptet är noll och att kurvregressionen går genom origo. I detta fall erhålls då sambandet $\bar{q}_{KPS} = 2.51 \bar{q}_{TS}$ och $r = 0.77$ vilket också är en bra korrelation. Det är intressant att notera att korrelationen $\bar{q}_{KPS} = 2.45 \bar{q}_{TS}$ erhöles för försöken på Testplats 1, vilket leder till iakttagelsen och slutsatsen att $\bar{q}_{KPS} = 2.50 \bar{q}_{TS}$ kan vara ett rimligt samband.



Figur 8. Utvärderad \bar{q}_{KPS} som funktion av \bar{q}_{TS} för alla sonderingar i 15 pelare på Testplats 2.

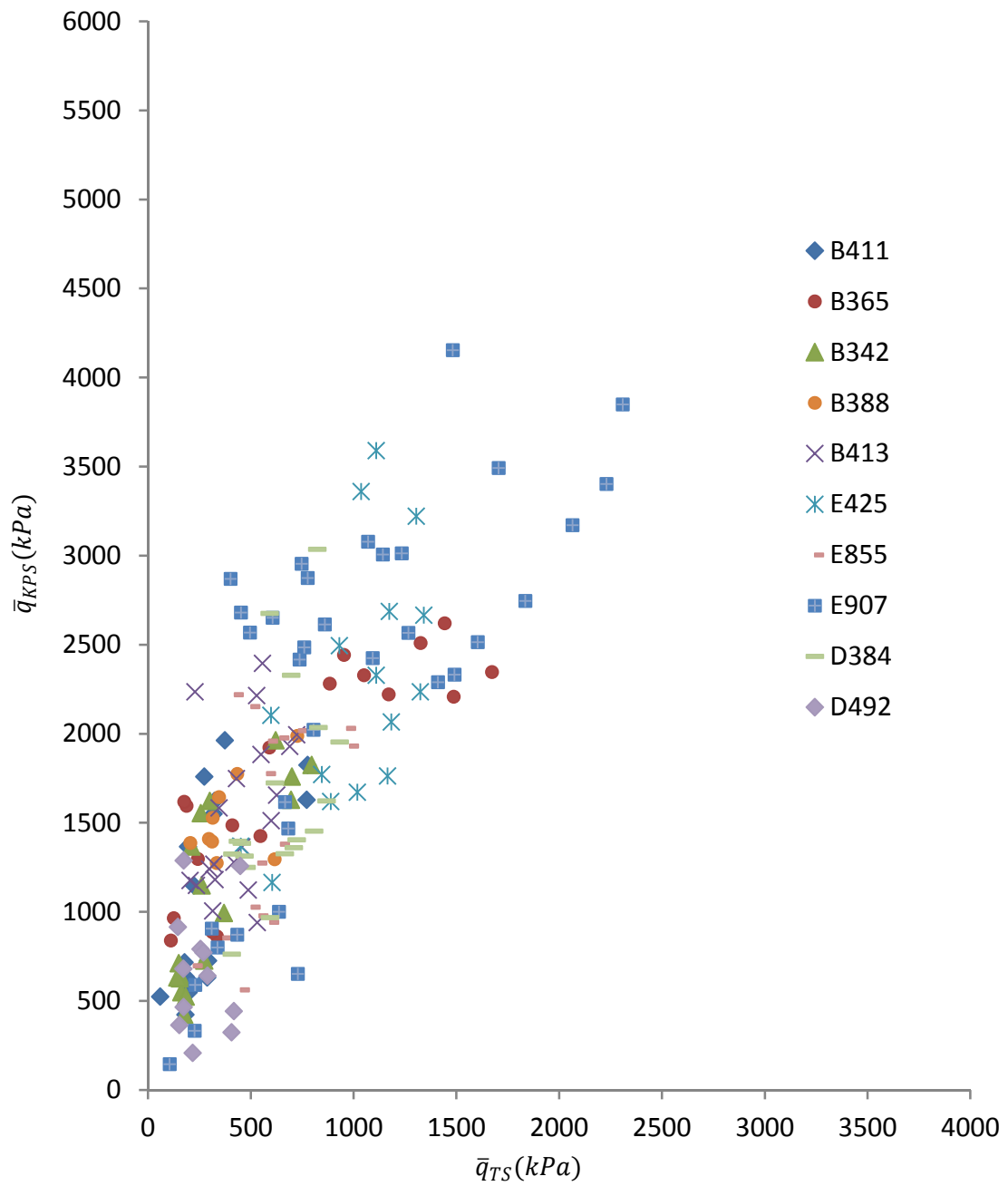


Figur 9 Regressionsanalys med alla mätdata från Testplats 2 (Fig 8).

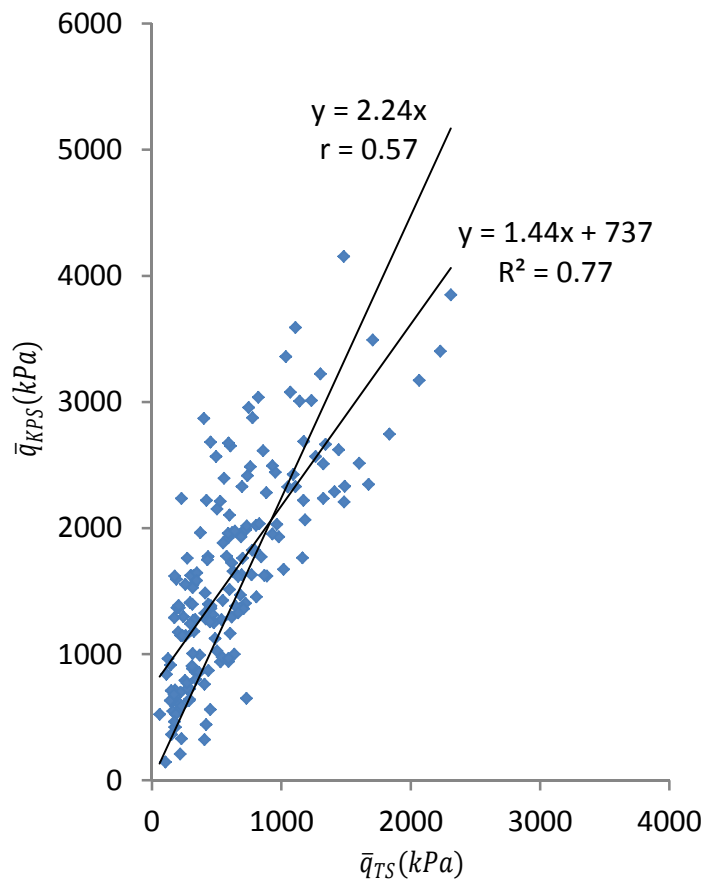
Testplats 3

Figur 10 visar utvärderad \bar{q}_{KPS} som funktion av \bar{q}_{TS} för alla sonderingar i 10 pelare på Testplats 3. Ungefär 200 punkter finns i grafen. Vi ser här att korrelationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} är mycket lika resultaten från Testplats 1 och 2 (Fig 6 och Fig 8).

I Figur 11 redovisas ett par regressions samband utifrån alla utvärderade mätdata från Testplats 3. Den bästa linjära regressionen erhålls med sambandet $\bar{q}_{KPS} = 1.44 \bar{q}_{TS} + 737$ där korrelationskoefficienten $r = 0.77$. Kurvregression genom origo ger sambandet $\bar{q}_{KPS} = 2.24 \bar{q}_{TS}$ och $r = 0.57$ vilket är en måttlig korrelation. Med tanke på den stora spridningen är även $\bar{q}_{KPS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$ ett rimligt samband.



Figur 10. Utvärderad \bar{q}_{KPS} som funktion av \bar{q}_{TS} för alla sonderingar i 10 pelare på Testplats 3.



Figur 11. Regressionsanalys med alla mätdata från Testplats 3 (Fig. X).

Utvärdering av grupper med pelare

Pelarsonderingar utförs som regel i grupper om 5-8 pelare i projekt. Utvärderingen sker av respektive pelarsondering men man sammanställer också alla pelarsonderingar tillsammans för en utvärdering av ett medel för gruppen. Orsaken till detta är att sonderingsresultaten kan variera betydligt och man vill ha en helhetsbild, men en orsak är också att det är praktiskt att sondera några pelare bredvid varandra i stället för att sprida ut sonderingarna.

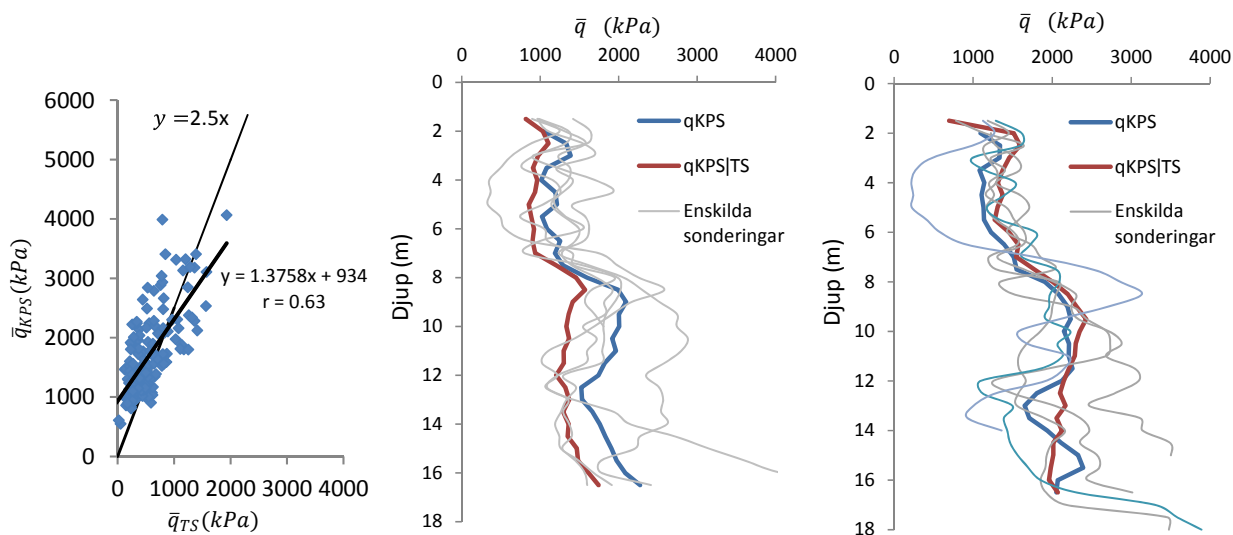
I denna studie har vi sammanställt ett antal test där man först utvärderar korrelationen mellan pelarsondering och totalsonderingen (\bar{q}_{KPS} vs. \bar{q}_{TS}) för ett antal pelare där båda sonderingarna utförts. Sedan väljs ett antal andra pelare ut i gruppen. För dessa pelare beräknas sedan det förväntade värdet för pelarsonderingen $\bar{q}_{KPS|TS}$ baserat på \bar{q}_{TS} och den utvärderade korrelationen för hela gruppen. Sedan kan denna utvärdering jämföras med det verkliga utfallet från pelarsonderingen \bar{q}_{KPS} . Om \bar{q}_{KPS} och $\bar{q}_{KPS|TS}$ är relativt lika så betyder det att den utvärderade korrelationen var bra och relevant.

Testplats 1

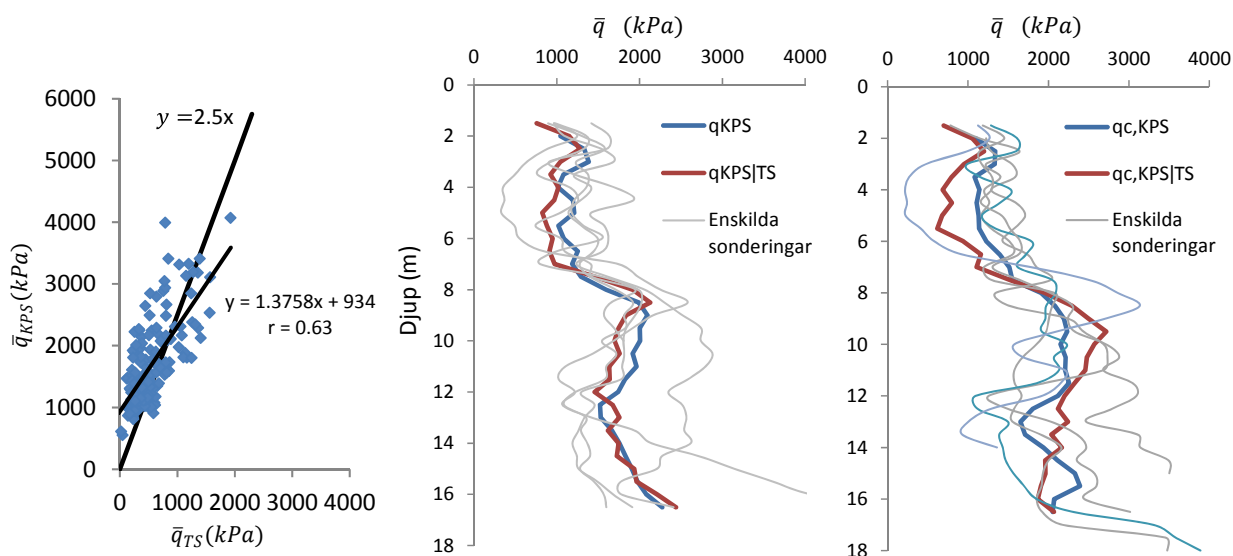
Figur 12 visar i vänstra grafen (12 a) relationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} för 5 slumpmässigt utvalda pelare från Testplats 1 (av de 15 som sonderats med totalsond och pelarsond). Sedan utvärderades ett predikerat sonderingstryck för pelarsond utvärderat från totalsonderingen, givet en etablerad korrelation som i detta fall blev $\bar{q}_{KPS|TS} = 1.38 \bar{q}_{TS} + 934$. Slutligen utvärderades det verkliga utfallet \bar{q}_{KPS} för gruppen. Grafen i mitten (12 b) och den till höger (12 c) redovisar

två sådana jämförelser. Jämförelsen i den högra grafen (12 c) visar på en mycket god jämförelse medan den i mitten (12 b) är sämre. Orsaken till att det kan skilja så pass mycket är att en enskild sondering som skiljer mycket har en relativt stor inverkan på medelvärdesbildningen. Spridningen i de enskilda sonderingarna visas också i grafen.

I Figur 13 visas resultaten från samma data som föregående Figur 12 men här är relationen mellan $\bar{q}_{KPS|TS}$ och \bar{q}_{TS} beräknad som $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$. Denna korrelation resulterar i mycket lika resultat. Den högra grafen i Figur 13 visar dock att $\bar{q}_{KPS|TS}$ blir lite lägre vid lägre hållfastheter och högre vid högre hållfastheter.



Figur 12 a) Relationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} för 5 slumpmässigt utvalda pelare från Testplats 1. b) Utvärderad $\bar{q}_{KPS|TS}$ och \bar{q}_{KPS} för 5 andra slumpmässigt utvalda pelare från testplats 1. Här är $\bar{q}_{KPS|TS}$ en prediktion och \bar{q}_{KPS} det verkliga utfallet. c) Utvärderad $\bar{q}_{KPS|TS}$ och \bar{q}_{KPS} för ytterligare 5 andra pelare.

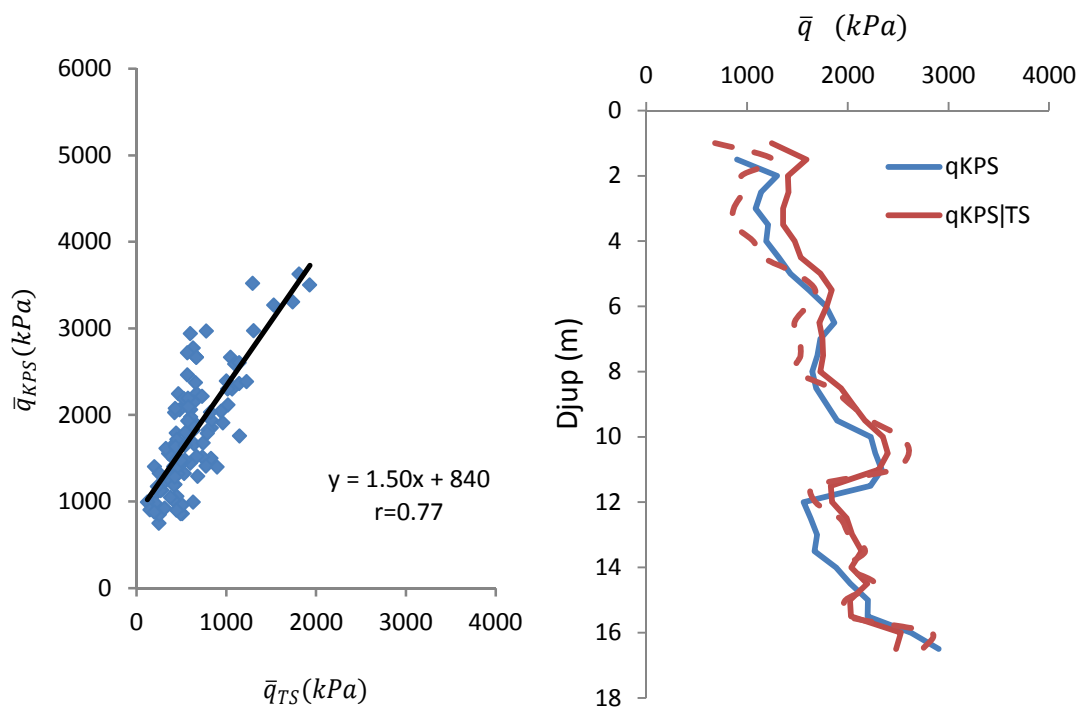


Figur 13 a) Samma data som föregående Figur 12 men här är relationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} beräknad som $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$.

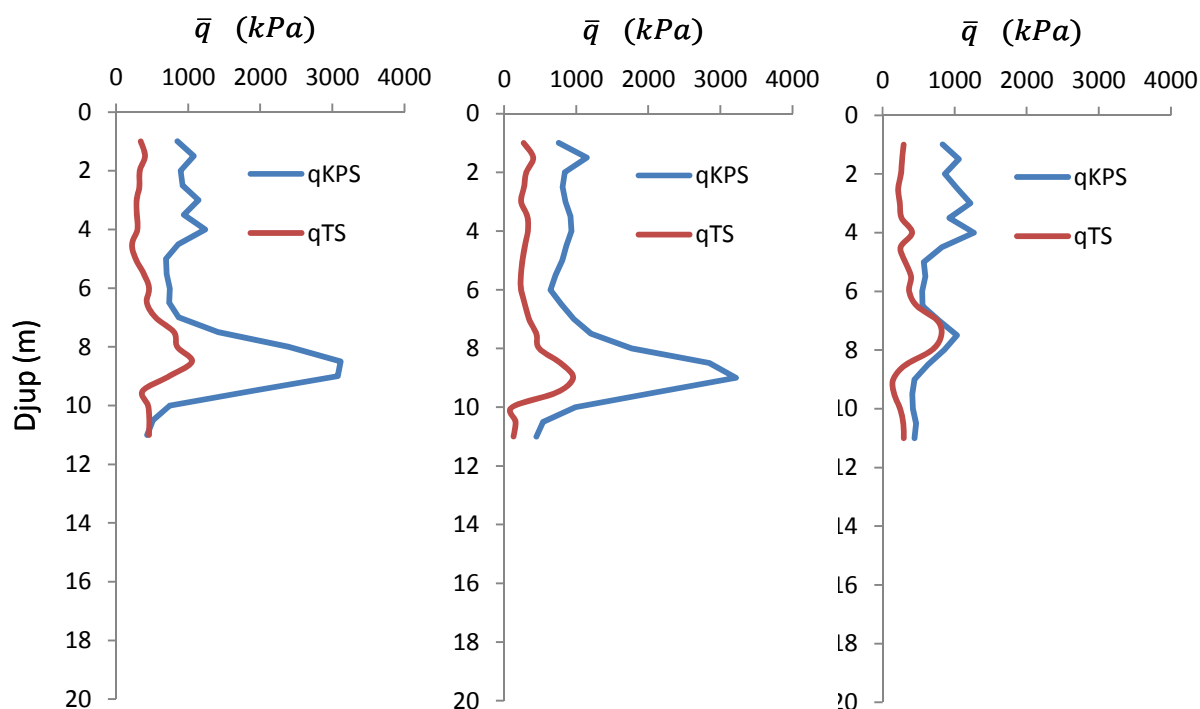
Testplats 2

Den vänstra grafen (a) i Figur 14 visar korrelationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} för 6 slumpmässigt utvalda pelare från Testplats 2. Sedan utvärderades ett predikerat sonderingstryck för pelarsond utvärderat från totalsonderingen, givet en etablerad regression som i detta fall blev $\bar{q}_{KPS} = 1.50 \bar{q}_{TS} + 840$. Slutligen utvärderades det verkliga utfallet \bar{q}_{KPS} för gruppen (6 andra pelare). Grafen till höger redovisar resultatet. Jämförelsen i visar på en mycket god jämförelse. Figur 14 b visar också resultatet med den enklare relationen $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$ (streckad linje). Här syns tydligt att $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$ ger konservativt resultat för lägre $\bar{q}_{KPS|TS}$ (<1500 kPa).

På testplats 2 installerades tre 10 m långa pelare med ett stopp på utmatningen av bindemedel på nivån 4-6 m. Syftet var att studera huruvida sonderingarna skulle detektera en försvagning i pelarna. Resultaten redovisas i Figur 15 och tyvärr föll resultatet inte ut med någon tydlig slutsats. Visst är sonderingsmotstånden lite lägre vid 6 m djup men skillnaden är väldigt liten. Dock kan båda metoderna registrera hårdare pelaren på 7-10 m djup. En orsak kan vara att det kommit ut en del bindemedel fastän tillförseln strypts. En annan orsak kan vara att blandningsverktyget dragit med sig bindemedel.



Figur 14 a) Relationen mellan \bar{q}_{KPS} och $\bar{q}_{c,TS}$ för 6 slumpmässigt utvalda pelare från Testplats 2. b) Utvärderad $\bar{q}_{KPS|TS}$ och \bar{q}_{KPS} för de övriga 6 pelarna från testplats 2. Den streckade linjen representerar den enklare relationen $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{KPS}$.



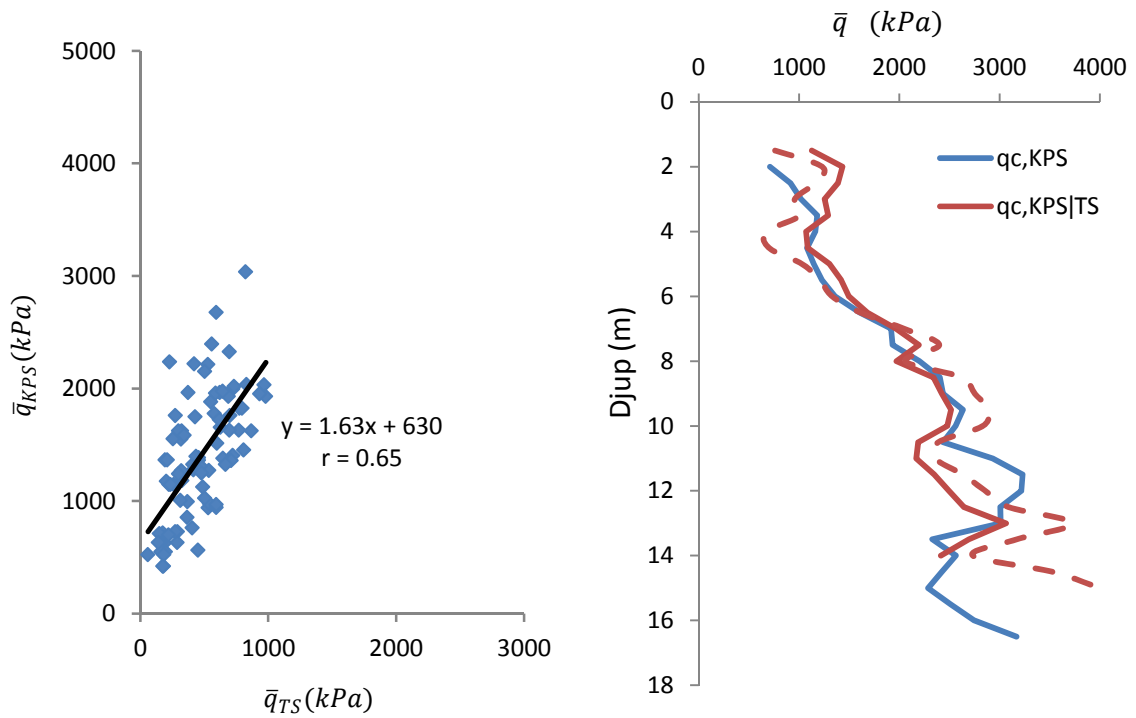
Figur 15 Tre 10 m långa pelare med ett stopp på utmatningen av bindemedel på nivån 4-6 m.

Testplats 3

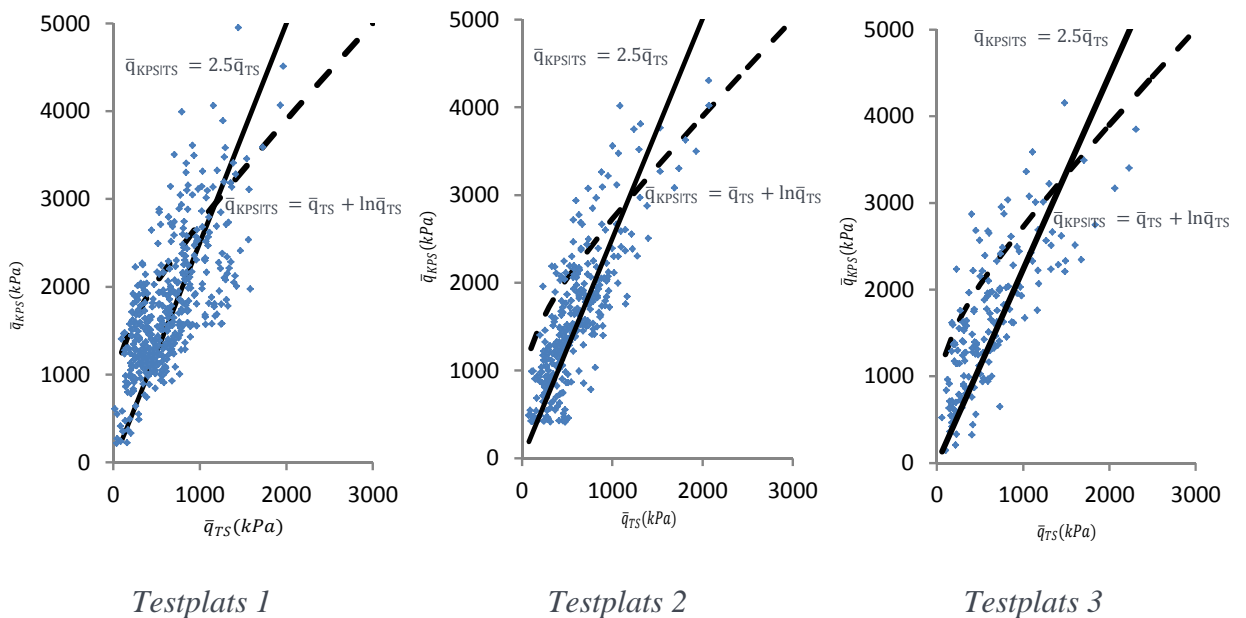
Den vänstra grafen (a) i Figur 16 visar korrelationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} för 5 slumpmässigt utvalda pelare från Testplats 3. Den bästa linjära regressionen blev $\bar{q}_{KPS} = 1.63 \bar{q}_{TS} + 630$ med $r = 0.65$. Med denna relation utvärderades ett predikerat sonderingstryck för pelarsonden, utvärderat från totalsonderingen, såsom $\bar{q}_{KPS|TS} = 1.63 \bar{q}_{TS} + 630$. Slutligen utvärderades det verkliga utfallet \bar{q}_{KPS} för gruppen (5 andra pelare). Grafen till höger redovisar resultatet som visar på en god överensstämmelse. Figur 16 b visar också resultatet med den enklare relationen $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$ (streckad linje). Precis som för Testplats 1 och 2 $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$ ett konservativt resultat för lägre $\bar{q}_{KPS|TS}$ (<1500 kPa).

Jämförelse med en tidigare studie

Ett av huvudsyftena med denna studie var att följa upp resultaten i en tidigare utförd studie [1-3]. Jämförelsen mellan resultaten visas i Fig. 17. Som förväntat är överensstämmelsen relativt dålig vid lägre hållfastheter. Detta förväntade resultat baseras på att den tidigare utförda studien var utförd på relativt hårda pelare och det saknades resultat vid lägre hållfastheter (se Fig. 1). Resultaten som redovisas i Fig 17 visar att relationen $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{TS}$ ger ett bättre resultat än den tidigare föreslagna relationen $\bar{q}_{KPS|TS} = \bar{q}_{TS} + \ln \bar{q}_{TS}$ i [1-3].



Figur 16 a) Relationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} för 5 slumpmässigt utvalda pelare från Testplats 3. b) Utvärderad $\bar{q}_{KPS|TS}$ och \bar{q}_{KPS} för de övriga 5 pelarna från testplats 3. Den streckade linjen representerar den enklare relationen $\bar{q}_{KPS|TS} = 2.5 \bar{q}_{KPS}$.



Figur 17. Relationen mellan \bar{q}_{KPS} och \bar{q}_{TS} där resultaten från denna studie jämförs med den tidigare utförda studien av [1-3].

Förslag till utförande

Utrustning:	Sondering skall utföras med 57 mm stiftborrkrona och Geostänger med ytterdiameter \varnothing 44 mm. Borrstålen kopplas med R-gänga, R32.
Sondering:	Sondstången trycks ned med konstant sjunkhastighet och konstant rotationshastighet enligt nedan: <ul style="list-style-type: none"> - Rotationshastighet: 25 rpm - Sjunkhastighet: 20 mm/s <p>Vid varje sondskarvning tillses att stängerna inte är inspända. I sådant fall justeras maskinen.</p> <p>Skulle extremt fasta skikt uppkomma i pelare kan hammaren slås på utan spolning för att komma igenom.</p>
Max tryckkraft:	30 kN.
Start:	Kontrollera att masten står lodrätt. Första borrstålet skall hänga centrerat i stånglåset. Nollavläsning utförs antingen utan borrstål, eller med kronan ca 10 cm ovan markytan. När nollavläsning är klar och borrkronan står i marknivå starta sondering med konstant sjunkhastighet och rotationshastighet enligt ovan och samtidigt starta registreringen.
Avslut:	Sondering utförs till minst 2 meter under pelarens underkant om inte annat avtalats eller om stopp erhållits innan.
Övrigt:	För normal arbetsbädd görs en hammarborrning ned till uppskattad överkant pelare. Hålet ryms genom att borrkronan förs upp och ned några gånger. Innan sondering i pelare påbörjas tillses att sonden inte är inspänd i fyllnadsjorden.
	Vid djupare fyllning ovan KC pelare eller sondering från flotte installeras foderrör.
	För att kontrollera mantelfriktion mot sondstång kan borrkronan lyftas en meter och därefter görs sondering i tomhålet och utvärderas enligt denna rapport. För att minska mantelfriktionen kan vatten tillföras i sonderingshålet.

SYMBOLER

A_{KPS}	m ²	Pelarsondarean
A_{TS}	m ²	Arean på borrkronan för totalsondering
Q	kN	Sonderingskraften uppmätt på borrbandvagnen
Q_{KPS}	kN	Sonderingskraften för pelarsond
Q_{TS}	kN	Sonderingskraften för totalsondering
q	kPa	Sonderingstrycket
q_{KPS}	kPa	Sonderingstrycket för pelarsond
q_{TS}	kPa	Sonderingstrycket för totalsondering
\bar{q}_{KPS}	kPa	Sonderingstrycket för pelarsond löpande medel över 0,5 m
\bar{q}_{TS}	kPa	Sonderingstrycket för totalsond löpande medel över 0,5 m
\bar{q}_{KPSITS}	kPa	Predikterat sonderingstrycket för pelarsond utvärderat från totalsondering, givet en etablerad korrelation

REFERENSER

1. Niclas Bergman and Stefan Larsson. (2014) Agreement between KPS and Jbt data evaluated from soil improved by lime cement columns. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement 167, Issue GI4, Pages 249–259
2. Niclas Bergman och Stefan Larsson (2013). Alternativ metod for verifiering av hållfasthet hos kalkcementpelare. Bygg & teknik 1/13; 75-79
3. Johan Fransson (2011). A study of the correlation between soil-rock sounding and column penetration test data. MSc thesis 11/04, KTH Royal Institute of Technology.
4. Tk Geo 11. Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner. Publikationsnummer: 2011:047.