

Rapport

P-21-08

December 2021



Provning av hållfasthet med punktlasttest längs borrkärna KFM24

Metodutvärdering och jämförande laboratieprovning

Eva Hakami
Sofia Winell

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

Provning av hållfasthet med punktlasttest längs borrhärna KFM24

Metodutvärdering och jämförande laboratorieprovning

Eva Hakami, Sofia Winell

Geosigma AB

Nyckelord: Punktlasttest, Point Load Test, KFM24, Draghållfasthet, Intakt berg.

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

Data i SKB:s databas kan ändras av olika skäl. Mindre ändringar i SKB:s databas kommer nödvändigtvis inte att resultera i en reviderad rapport. Revideringar av data kan också presenteras som supplement, tillgängliga på www.skb.se.

Denna rapport är publicerad på www.skb.se

© 2021 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

Längs borrhål KFM24 i Forsmark har hållfasthetsprovning med punktlasttestare (Point Load Test, PLT) utförts, med ett prov var femte meter. Syftet med provningen har varit att utvärdera om denna snabba mätmetod är användbar i det fortsatta arbetet med platsbeskrivningen. Resultatet visade på relativt stor spridning mellan de enskilda proverna men även på en variation i hållfasthet längs borrhålets längd. Resultatet från PLT jämfördes med resultat från laboratorieprovning av draghållfasthet. Jämförelsen indikerade att det går att korrelera PLT-resultat med draghållfastheten uppmätt i laboratorium (Indirect Tensile Strength, ITS, "Brazilian test"), vilket innebär att punktlasttestare kan användas för uppskattning av draghållfasthet, om man inte gör enstaka prov utan flera.

Nästan samtliga provningar i KFM24 gjordes i samma bergart, granit till granodiorit (101057). Resultaten från såväl laboratorieprovningen som PLT visar att hållfastheten varierar något längs hålet. Orsaken till detta tros framför allt vara variation i textur och mineralogi, orsakat av omvandling (albitisering) inom samma bergart. Variationen gör att resultaten är svåra att använda för att göra en bedömning av en eventuell inverkan från spänningsinducerad mikrouppsprickning av borrhärnan, vilket var ett av studiens ursprungliga syften.

För att ytterligare värdera punktlasttestarens repeterbarhet utfördes en mätserie på homogen gatsten. Serien visade på likartad spridning i resultaten som för testerna på borrhärnor från KFM24. I serien på gatsten varierades belastningshastigheten för att undersöka betydelsen av belastningshastighet i metoden, och slutsatsen var att belastningen med PLT ska göras långsamt för att ge ett mera stabilt resultat.

Abstract

Along borehole KFM24 in Forsmark, a strength testing with a Point Load Tester (PLT) has been performed on samples taken approximately at every five meters. The aim with this testing has been to evaluate whether this fast measurement method is useful in the continued site description efforts. The results showed a relatively large spread between single PLT tests but also indicated a variation in strength along the length of the borehole. The results from PLT were compared with results from laboratory testing of the tensile strength. The comparison indicated that it is possible to correlate PLT-results with tensile strength measured in laboratory (Indirect Tensile Strength, ITS, i.e., “Brazilian test”), which means that PLT may be used for the estimation of tensile strength, if several samples are tested and not only single samples.

Almost all tests in KFM24 were conducted on the same rock type, granite to granodiorite (101057). The results from both the laboratory testing and the PLT showed that the strength varies to some extent along the drill core. The reason to this behaviour is believed to be due to the variation in texture and mineralogy, caused by alteration (albitization) within this same rock type. The variation makes the results difficult to use for making any judgement regarding a potential influence from stress induced microcracking of the drill core, which was one of the original objectives.

To further evaluate the repeatability of PLT, a series of measurements were performed on homogeneous granite paving stones. The series showed a similar spread of the results as for the tests on rock cores from KFM24. In the series on paving stone, different loading rates were applied to investigate the influence of the loading rate in the method. The conclusion was that the loading with the PLT equipment should be made slowly to give a more stable result.

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Syfte	7
1.1.1	Utvärdering av mätmetod	7
1.1.2	Bedömning av spänningspåverkan på borrhårens kärna	7
1.2	Borrhål KFM24	7
2	Metod	9
2.1	Punktlasttest	9
2.2	Provtagning för punktlasttest och laboratorieprovning	10
2.3	Utrustning och provningsförfarande	10
2.3.1	Beräkningar	11
2.3.2	Belastningshastighet vid punktlasttest	12
2.4	Punktlasttest av granitkuber – repeterbarhet och pumphastighet	12
2.5	Draghållfasthetsprovning i laboratorium – ITS	13
3	Resultat	15
3.1	Punktlasttest längs KFM24	15
3.2	Jämförelser mot laboratorieprovning	16
4	Diskussion	19
4.1	Fortsatt användning av punktlasttester	19
4.2	Minskad hållfasthet mot djupet	19
4.3	Bergartsvariation mellan prover	20
5	Slutsatser och rekommendationer	23
	Referenser	25

1 Introduktion

1.1 Syfte

Det övergripande målet för den bergmekaniska platsmodelleringen är att stödja arbetet med säkerhetsanalys så att rätt indata för dessa analyser finns tillgängliga. Specifikt vad gäller det intakta berget så är målet att beskriva dess hållfasthetsegenskaper så väl att tillförlitliga prediktioner kan göras vad gäller det mekaniska beteende i slutförvaret. Bergets hållfasthet styr hur stabila borrhål, tunnlar och deponeringshål är för en given belastningssituation. Den här rapporterade studien är en liten del i detta arbete och har följande två syften.

1.1.1 Utvärdering av mätmetod

Punktlasttestare, fortsättningsvis betecknat PLT (Point Load Test), är en mätmetod som funnits länge men som inte tidigare har använts inom SKB för platsmodelleringen i Forsmark. Metoden är enkel, den kräver ingen specifik provpreparering, och tar därför inte mycket tid att utföra. Det bedömdes som önskvärt att ha tillgång till en metod som kan användas direkt i samband med kartering av borrhåra eller vid tunnelkartering, speciellt i byggskedet. Syftet med studien var därför att utvärdera om kvaliteten på data kunde anses tillräcklig för att metoden skulle användas. Ett syfte var även att ta fram den multiplikator, specifikt för Forsmarks berg, som skulle gälla för att uppskatta hållfasthetsparametrar från PLT-resultat.

1.1.2 Bedömning av spänningspåverkan på borrhåra

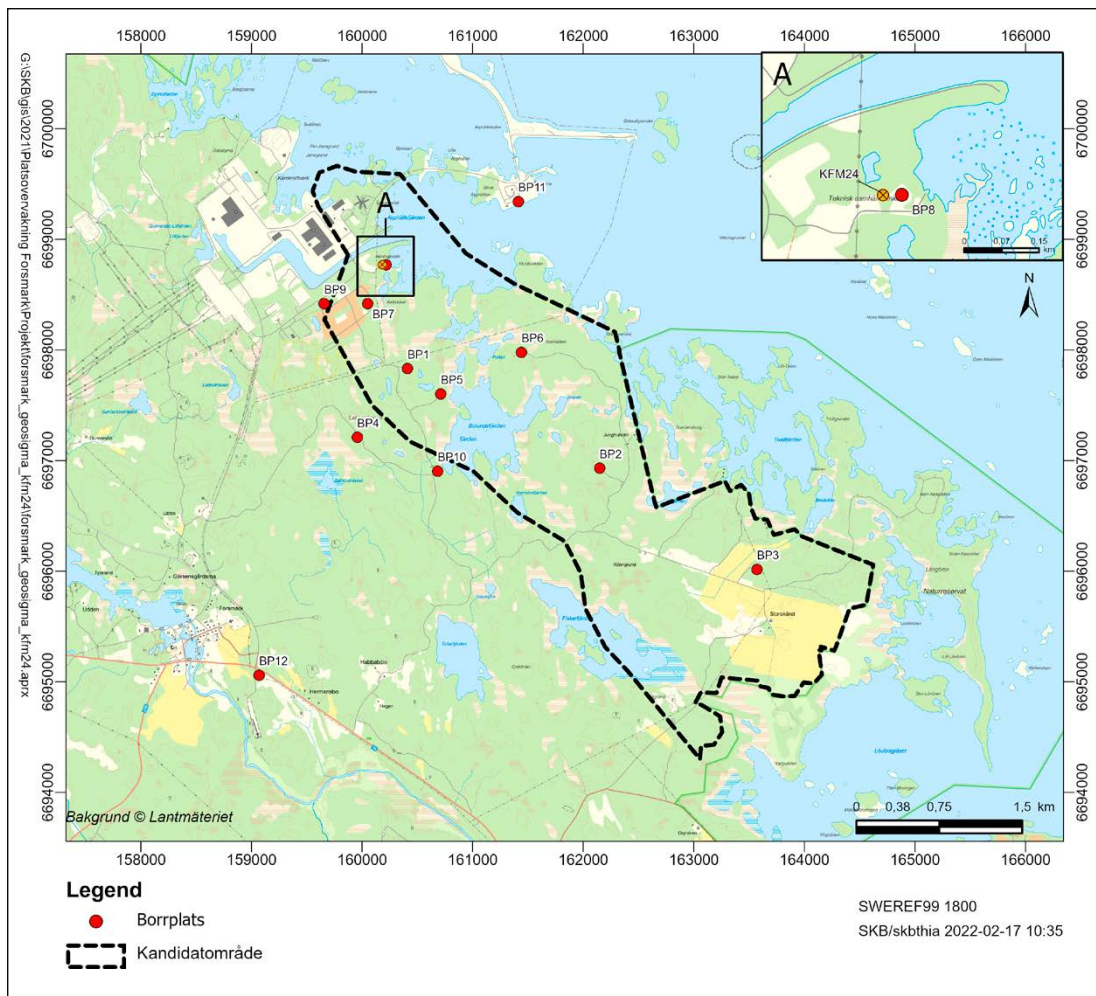
Tidigare draghållfasthetsprovning som utförts på prover från borrhål inom platsundersökningarna (Glamheden et al. 2007) har visat på en något minskande trend vad gäller draghållfasthet. En tänkbar förklaring till denna trend anges vara att den ökade bergspänningen mot djupet innebär en ökad mikro-uppsprickning i borrhåran i samband med den belastning som den utsätts för vid urborrningen. Om så är fallet skulle en uppmätt hållfasthetsminskning kunna användas som indikation på ökande spänningsnivåer. Alla tänkbara, även indirekta, data avseende in situ bergspänningar är av stort intresse eftersom modellen för bergspänningar för närvarande är osäker. En draghållfasthetsprovning i laboratorium liknar belastningsmässigt mycket den provning som görs med PLT. Ett sekundärt syfte med denna PLT-studien var således att undersöka om PLT-resultat, för en och samma bergart, längs ett nära vertikalt borrhål visade på någon djuptrend hos hållfastheten.

1.2 Borrhål KFM24

Ett flertal faktorer talade för att välja borrhål KFM24 till den här studien:

- *Läget.* Borrhålet ligger centralt beläget i blivande förvarsområdet, borrat vid det planerade schaktläget. Kärnborrad längd är 35,7–550,17 m. Slutförvaret planeras att ligga på ca 470 m djup vilket innebär att botten på KFM24 är under förvarsdjup.
- *Lutningen.* Orienteringen på KFM24 är fördelaktig (311° bäring och 83° inkliniation), dvs borrhålet har mycket brant inkliniation vilket krävs för att kunna studera en eventuell inverkan på hållfasthet pga. ökande spänningar med djupet (största huvudspänning ligger horisontellt).
- *Geologi.* KFM24 består till 93 % av sprickfattig granit till granodiorit (bergartskod 101057) som är huvudbergarten i förvarsområdet, vilket var önskvärt så att provningen kunde göras i samma bergart. Enligt karteringen (SICADA-data) var dessutom endast 3,5 % av borrhåran påverkad av kraftigt albitisering associerad med mindre amfibolitförekomster.

Figur 1-1 visar läget på KFM24 i förhållande till de övriga borrhålplatserna inom Forsmarks undersökningsområde.



Figur 1-1. Läget för KFM24 (se detalj) och borrsplatserna 1 till 12 inom kandidatområdet för platsundersökningarna (streckad linje).

2 Metod

2.1 Punklasttest

Punklasttest (Point Load Test, PLT) är ett indextest för hållfastheten hos bergmaterial och kan även användas för uppskattning av parametrarna enaxiell tryckhållfasthet (uniaxial compressive strength, UCS), enaxiell draghållfasthet (uniaxial tensile strength, UTS) och indirekt draghållfasthet (indirect tensile strength, ITS), även kallad "Brazilian test".

Fördelen med punklasttest är att metoden är kostnadseffektiv då apparaten är enkel och testerna går snabbt att utföra. Punklasttest kan utföras på både borrhärna och oregelbundna bergartsprover. Figur 2-1 visar en bit borrhärna monterad i punklastapparaten för provning. Lasten mellan spetsarna över provet ökas gradvis tills brott uppstår och borrhärnan går itu.

Punklasten uttrycks som relationen mellan belastningen och avståndet mellan tryckpunkterna i kvadrat. En korrigering görs för variation av storleken hos olika typer av prov.

Provningen i denna rapport är gjord enligt metodbeskrivningen *Method description for point load testing of rock* (MD 190.008e).



Figur 2-1. Borrhärna monterad för provning med punklasttestare (PLT).

2.2 Provtagning för punklasttest och laborieprovning

KFM24 är kärnbörat mellan 35,7 och 550,17 m. Inför punklastprovtagningen lades ca 150 m kärna åt gången upp på rullbanorna för kärnkartering i Llentabhallen i Forsmark. Lämpliga provtagningsställen med avseende på bergart och befintliga sprickor markerades i kärnlådorna. Kärnorna sågades sedan upp i ca 15 och 20 cm långa bitar för punklasttest, respektive draghållfasthetsprovning (ITS). Provtagningen utfördes i enlighet med *Instruktion för hantering och provtagning av borrhärna* (MI143.007).

Totalt har 152 kärnprover för punklasttest tagits längs KFM24. Samtliga prover utom två är tagna av bergarten granit till granodiorit (bergartskod 101057). Totalt sex av punklasttesterna klassas som misslyckade på grund av att kärnan spruckit upp längs en läkt spricka som inte noterats vid provtagningen, eller på grund av en icke godkänd brottyta. Generellt togs proverna med ca 5 m avstånd men därutöver togs även ett flertal av proverna direkt intill varandra för att bättre kunna bedöma metodens spridning i likartad litologi.

Provtagning för ITS har gjorts på sju ställen spridda längs kärnan. För varje ITS-provpunkt har på var sida intilliggande prover tagits för jämförande punklasttest. Proverna för ITS skickades till laboratorium (RISE) för testning.

2.3 Utrustning och provningsförfarande

Punktlastapparaten som använts i denna studie är av märket Matest och har en elektrisk lastcell med digital display, (Figur 2-2), och mäter laster i intervallet 0–56 kN. En kalibrering av apparaten gjordes strax innan denna studie startades.

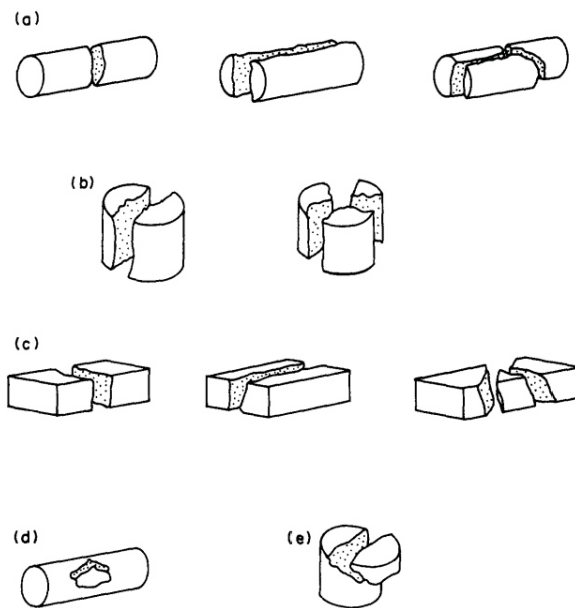
Borrhärnan, som ska ha en längd/diameter-kvot större än 1, placeras mellan spetsarna i apparaten. Lasten ökas sedan för hand med en hydraulpump tills kärnan går sönder och den maximala lasten läses av på displayen med två decimalers noggrannhet.

Den testade bergarten granit till granodiorit (bergartskod 101057) är i huvudsak medelstarkt folierad längs hela kärnan och samtliga test har gjorts i vinkel mot foliationen.

Proverna fotograferades både före och efter testning och eventuella avvikelser eller observationer noterades. För bedömning av godkända brott har kriterierna i Figur 2-3, som är från ISRM-standarden använts.



Figur 2-2. Punktlastapparat av typen som använts i denna studie.



Figur 2-3. a) Godkända diametraltester b) godkända axialtester c) godkända blocktester d) icke godkänt diametraltest e) icke godkänt axialtest

2.3.1 Beräkningar

Eftersom borrkärnor som provas kan ha olika diametrar så storlekskorrigeras punktlasten för att bli jämförbar (ISRM 1985). I den här studien är den ena av ISRM rekommenderade korrigeringar, ekvation 2-2, vald. Punktlasttesterna resulterar i ett värde på den maximala lasten, P , som genom ekvation 2-1 och ekvation 2-2 nedan ger ett beräknat värde för den korrigerade punktlasten motsvarande en kärndiameter på 50 mm, och detta värde betecknas I_{s50} .

$$I_s = P/D^2 \quad (\text{Ekvation 2-1})$$

$$I_{s50} = I_s \cdot \sqrt{(D/50)} \quad (\text{Ekvation 2-2})$$

I_s = ej korrigerad punktlast (MPa)

P = last vid brott (N)

D = diameter på kärnprov (i vårt fall 45 mm)

I_{s50} = korrigerad punktlast för att motsvara en kärndiameter på 50 mm (MPa)

Genom ekvation 2-3 och 2-4 nedan kan värdet för den *enaxiella tryckhållfastheten* (UCS) respektive *enaxiella draghållfastheten* (UTS) och indirekt draghållfasthet (ITS) uppskattas.

$$UCS = I_{s50} \cdot k \quad (\text{Ekvation 2-3})$$

$$UTS/ITS = I_{s50} \cdot 1,25 \quad (\text{Ekvation 2-4})$$

UCS = enaxiell tryckhållfasthet (MPa)

k = ett empiriskt värde för korrelationsfaktorn k , baserat på tidigare mätningar av UCS för liknande bergarter, och är ca 20–25 gånger högre än I_{s50}

UTS/ITS = enaxiell draghållfasthet/indirekt draghållfasthet (MPa)

Multiplikatorn 1,25 är det som standardmässigt används för uppskattning av draghållfasthet och rekommenderas av ISRM (1985). Denna föreliggande studie, där även draghållfastheten uppmäts i laboratorium (ITS), ska ge svar på vilket värde på multiplikatorn (korrelationsfaktorn) som ska användas för att uppskatta ITS (som är en *indirekt* draghållfasthet till skillnad från UTS) för den specifika platsen i Forsmark. En sådan uppskattning av ITS, baserat på punktlasttesterna, är av speciellt intresse för att komplettera och jämföras med redan tillgängliga laboratoriedata på ITS från Forsmark.

2.3.2 Belastningshastighet vid punktlasttest

Enligt ISRM-standarden (ISRM 1985) ska lasten ökas stadigt på sådant sätt att brott uppstår inom 10–60 sekunder i total belastningstid. Eftersom lasten ökas genom att pumpa för hand går det utföra testen med olika hastighet och någon högsta hastighet ges inte av ISRM:s standard.

Punktlaststudien av KFM24 innefattar ca tre dagar av provning. Första dagens provning utfördes av en annan person än de två efterföljande dagarna. Det noterades då att *person 1* hade en snabbare pumphastighet jämfört med *person 2*. Resultatet visade även på en skillnad i hållfasthet där en snabbare pumphastighet resulterar i lägre hållfasthetsvärden.

För att undersöka huruvida pumphastigheten (belastningshastigheten) faktiskt var orsaken till skillnaden i hållfasthetsresultaten gjordes en separat studie som beskrivs i avsnitt 2.4.

2.4 Punktlasttest av granitkuber – repeterbarhet och pumphastighet

För att utreda hur pumphastigheten vid punktlasttestning påverkar resultatet som fås med den aktuella utrustningen gjordes en separat studie där granitkuber belastades med olika hastighet.

Storleken på granitkuberna var ca $5 \times 5 \times 5$ cm och bestod av svart-vit, fin- till medelkornig, massformig granit, Figur 2-4.

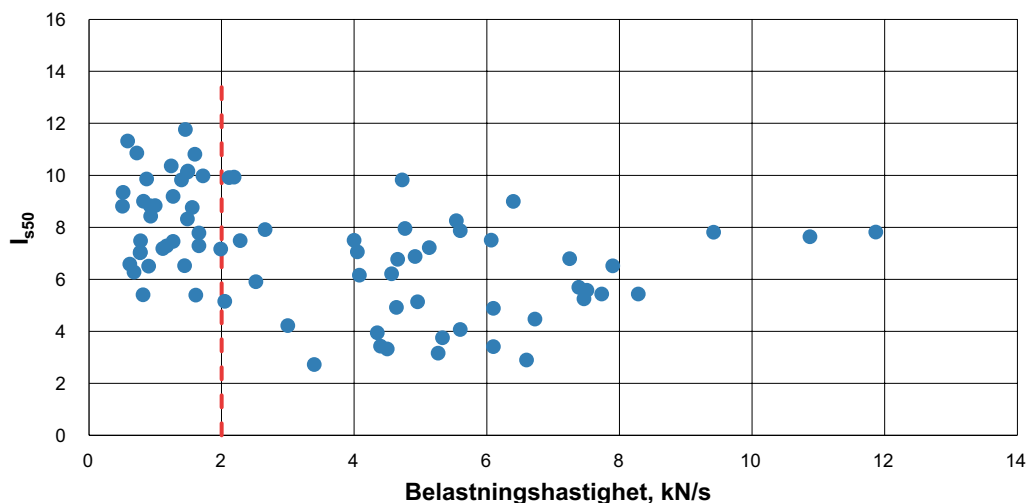
Punktlasttester gjordes på granitkuberna där belastningshastigheten, kN/s, varierades och resultatet av dessa tester visas i Figur 2-5. Man ser att det finns en viss nedåtgående trend i uppmätta resultat för högre belastningshastigheter, även om spridningen är ganska stor. Detta stämmer överens med erfarenheten från testerna på borrhärdor (se avsnitt 2.3.2). För tester med hastigheter under 2 kN/s (se diagrammet i Figur 2-5) är spridningen och medelvärdet stabilt.

Enligt ISRM-standardens ska provning göras så att brottet sker inom tidsspannet 10–60 sekunder. I Figur 2-6 plottas mätserien därför i stället med tiden upp till brottet mot den maximala belastningen vid brottet. Linjen i diagrammet motsvarar 2 kN/s. Man ser att det kravet som ISRM ställer på lämplig minsta tid för belastning till brottet stämmer väl med att dessa resultat, punkterna till höger om gröna linjen, har en mindre spridning. Det är även nästan samma delmängd punkter som om man fängar med kravet att ha en belastningshastighet om högst 2 kN/s (att ligga till höger om den röda linjen).

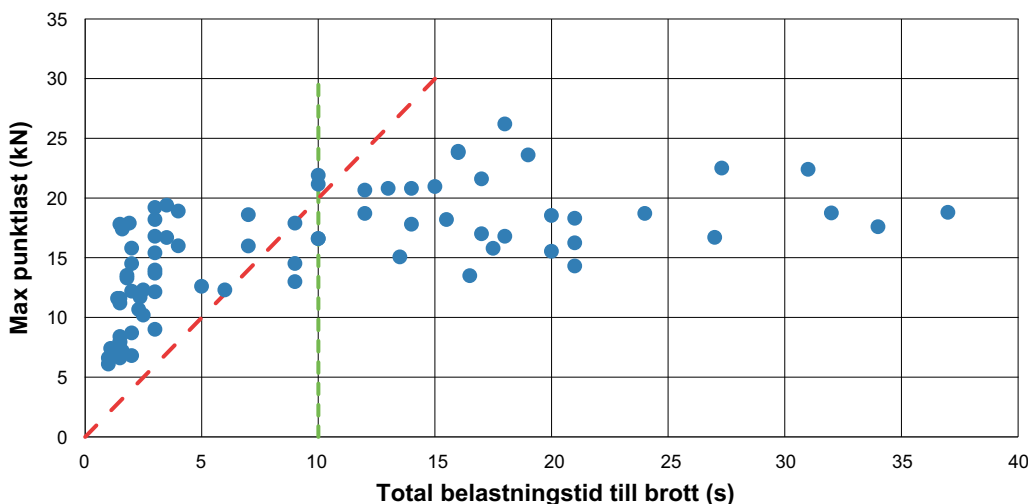
Lasten från utrustningen kan avläsas kontinuerligt på en digital display under provningen. Eftersom däremot start- och stopp-tiden inte registreras automatiskt med utrustningen så är det enklare att ha som krav att belastningen (den manuella pumpningen) ska göras mjukt, dvs med en jämn nedåtrörelse, och med en högsta hastighet av 2 kN/s. Därför valdes att införa det kravet på högsta lämpliga belastningshastigheten i metodbeskrivningen för PLT.



Figur 2-4. Granitkub som användes i belastningshastighetsstudien.



Figur 2-5. Resultat från provning av granitkuber med punktlasttestare. Maxbelastningen I_{50} visas som funktion av belastningshastigheten. Den röda streckade linjen visar den hastighet som valts till instruktion som den högsta belastningshastigheten.



Figur 2-6. Resultatet från provning av granitkuber med punktlasttestare. Maxbelastningen I_{50} visas som funktion av den tid som provningen tog från start till brott.

2.5 Draghållfasthetsprovning i laboratorium – ITS

Provning av draghållfastheten på laboratoriet hos RISE har utförts med ett indirekt draghållfasthetsprov som ger parametern ITS (Indirect Tensile Strength). Metoden benämns även ofta "Brazilian test". Syftet med denna laboratorieprovning var att få mera väldefinierade bestämningar av hållfastheten att jämföra med de PLT-resultat som erhöles från mycket näraliggande punkter, för att på det sättet kunna bedöma om PLT var en användbar metod.

Laboriemetoden för draghållfasthet för bestämning av ITS liknar ett punktlasttest (PLT) i det att man belastar provet på en relativt liten yta och att provet bryts sönder på grund av den dragspänning som bildas i riktning vinkelrätt belastningsriktningen. En skillnad mellan PLT och ITS är att belastning i det sistnämnda sker på en kort linje i stället för en punkt, och att själva lasten och provgeometrin kontrolleras mer noggrant. Figur 2-7 visar en uppställning av en laboratorieprovning för ITS. Man ser att belastningen sker tvärs kärnan på liknande sätt som belastningen gjorts vid punktlasttest (Figur 2-1). Diametern på proven är i detta fall också densamma som vid PLT, eftersom samma borrhärna använts i båda fallen.

På sju nivåer i borrhål KFM24 provtogs ett avsnitt av borkärnan för ITS-laborieprovning och ett punktlasttest utfördes på borkärnan strax ovanför respektive nedanför det avsnittet. Varje sådant kärnprov kapas i laboriet ned till tre prover för ITS, där ett prov är en ca 2 cm tjock skiva. Det betyder att 21 draghållfasthetsprover med ITS utfördes totalt från KFM24. Samtliga prover var från bergarten granit till granodiorit (bergartskod 101057). Laborieprovningen rapporteras i detalj i Lägermo et al. (2021).



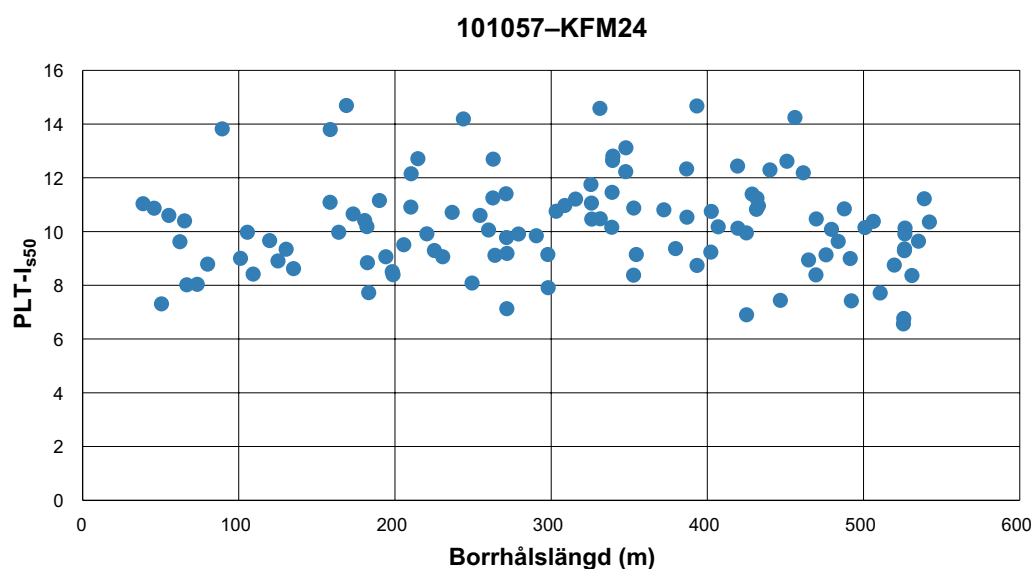
Figur 2-7. Uppställning för indirekt draghållfasthetsförsök (ITS). Från Lägermo et al. (2021).

3 Resultat

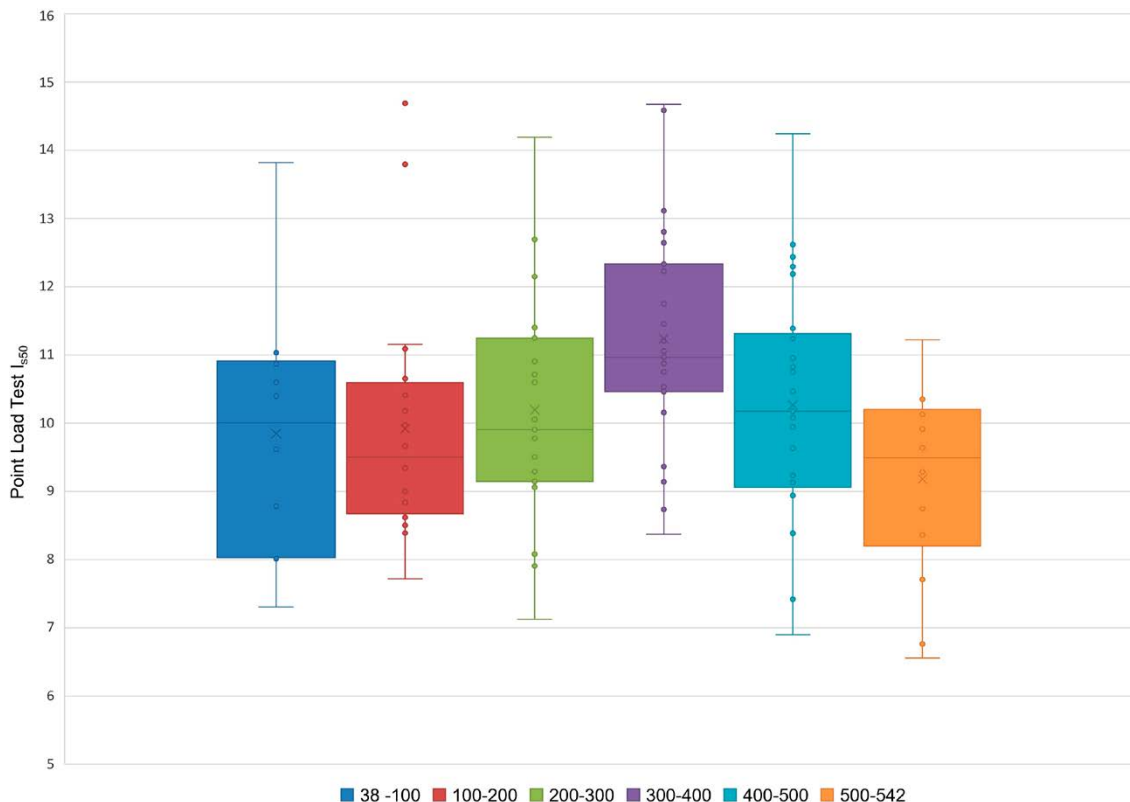
3.1 Punktlasttest längs KFM24

Resultatet från provning längs borrkärna KFM24 med punktlasttestare visas i Figur 3-1. Resultatet visas som värdet I_{s50} (maxbelastningen justerad för att motsvara en diameter om 50 mm) mot det djup längs kärnan som provet är taget. Borrhålet är i det närmaste vertikalt (85°) vilket gör att borrhålsdjupet är approximativt djupet under markytan. Samtliga dessa prover i diagrammet kommer från samma bergart, granit till granodiorit (bergartskod 101057). Det betyder dock inte att bergarten är identisk i alla prover, utan det kan finnas variationer inom ramen för den beteckningen, till exempel avseende omvandlingsgrad, kornstorlek och grad av foliation.

För att sammanfatta resultatet av PLT-provningen längs kärnan visas i Figur 3-2 ett låddiagram (box plot) för samma data som i Figur 3-1. I ett sådant diagram ligger 50 % av resultatet inom lådan och både medel och medianvärde (x) markeras. Min- och maxvärden avslutar linjerna utanför boxen, men baserat på boxens storlek så räknas vissa resultat som utliggare. I detta fall har även alla mellanliggande provresultat markerats (cirklarna) i diagrammet. Man ser att det finns vissa skillnader mellan resultaten från de olika djupintervallen, och tydligast syns att prover från intervallet 300–400 m djup har större draghållfasthet än övriga intervall.



Figur 3-1. Resultat från punktlasttester längs borrhål KFM24. Maxbelastning I_{s50} mot borrhålsdjupet (borrhålsdjup).

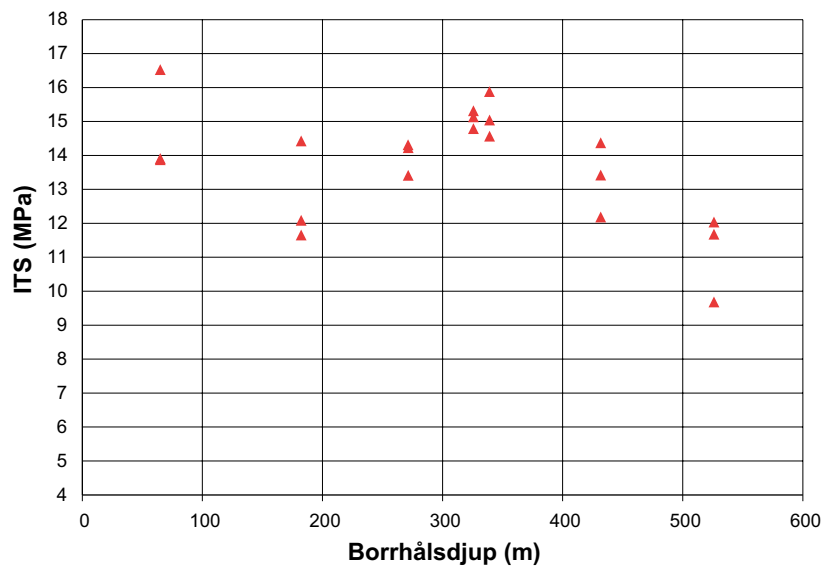


Figur 3-2. Sammanställning över resultat från PLT med lådagram (box plot) för olika djupintervall längs KFM24.

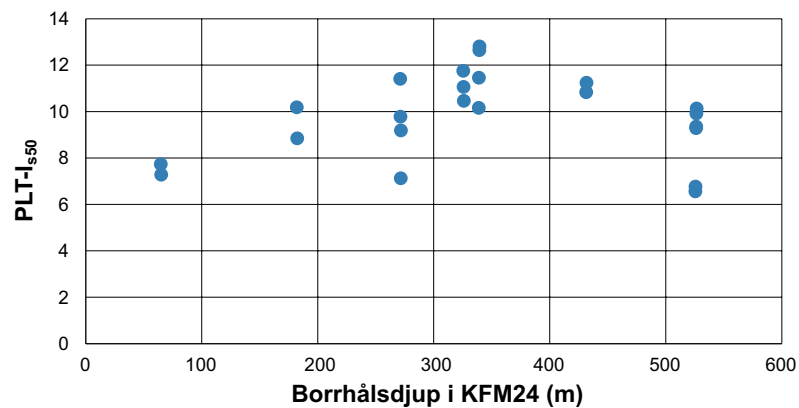
3.2 Jämförelser mot laboratorieprovning

Resultaten från provning i laboratoriet hos RISE visas i Figur 3-3. Man ser att proverna har en ganska stor spridning om man ser till hela serien, men att prover som ligger intill varandra sprider mindre. Variationen med djupet kan jämföras med resultatet för PLT i Figur 3-4, där man ser en liknande variation med djupet.

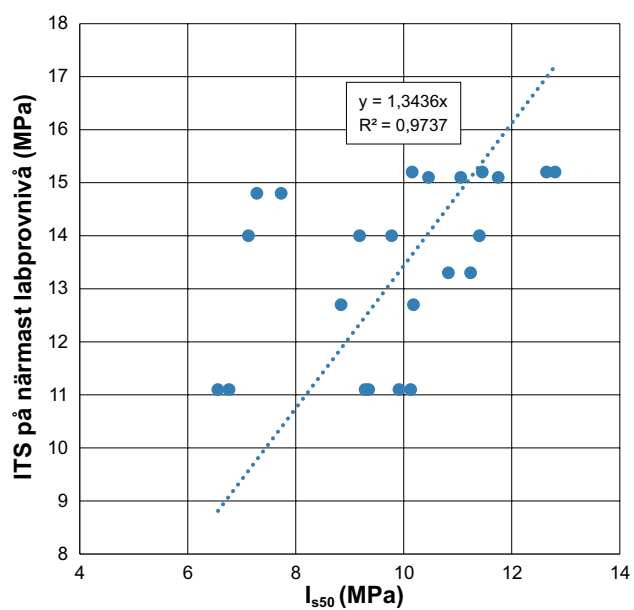
För att närmare studera korrelationen mellan resultat från PLT och ITS har resultatet från varje PLT plottats mot medelvärde på de tre ITS som kommer från samma avsnitt intill PLT-proverna. Här måste man hålla i minnet att alla provningar är gjorda på separata prov eftersom proverna bryts sönder vid provningen. Det är alltså inte möjligt att prova med identiska förhållanden i provet och en viss variation i hållfasthet måste förväntas. Resultatet i Figur 3-5 indikerar en korrelation men spridningen är också rätt stor. En bästa linjär funktion har anpassats till dessa data som ger faktorn 1,34. För att välja en modell för uppskattning av ITS från I_{s50} valdes dock att använda endast de värden som kom från djupet 330–340 m djup, eftersom antalet provningar var fler i laboratoriet och dessa värden låg samlade och indikerade homogena förhållanden i det avsnittet. Samma diagram med endast den nivåns prover visas i Figur 3-6. Med dessa datapunkter blir den bästa funktionen som korrelerar I_{s50} med draghållfasthet 1,31. Det är ett värde som ligger nära faktorn 1,25 som brukar användas som en generell omvandlingsfaktor vid uppskattning av draghållfasthet från punktlasttester på berg. Det stödjer att PLT-utrustningen har fungerat på ett förväntat sätt.



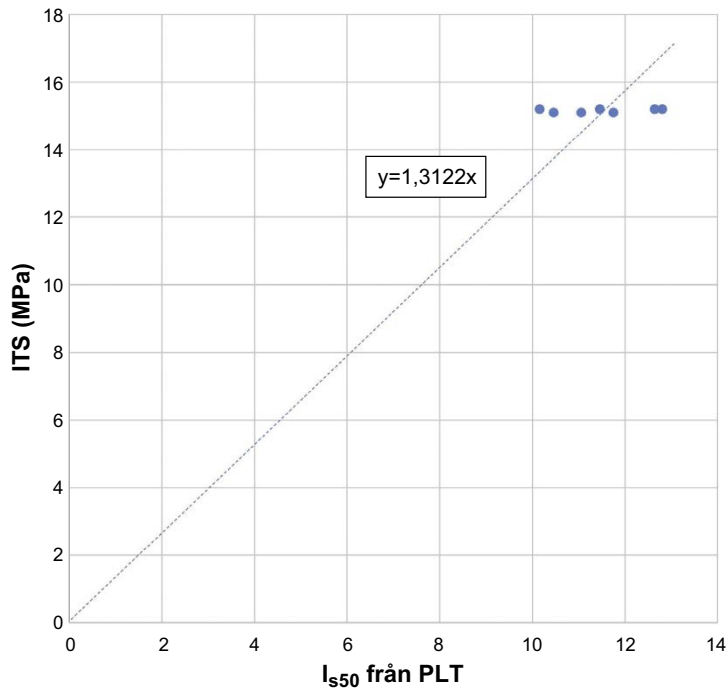
Figur 3-3. Resultat från laboratorieprovning av draghållfasthet. Indirekt draghållfasthet, ITS, mot borrhålsdjupet i KFM24. Data från Lägermo et al. (2021).



Figur 3-4. PLT-resultat enbart från proverna på nivåer där laboratorieprovning (ITS) har utförts.

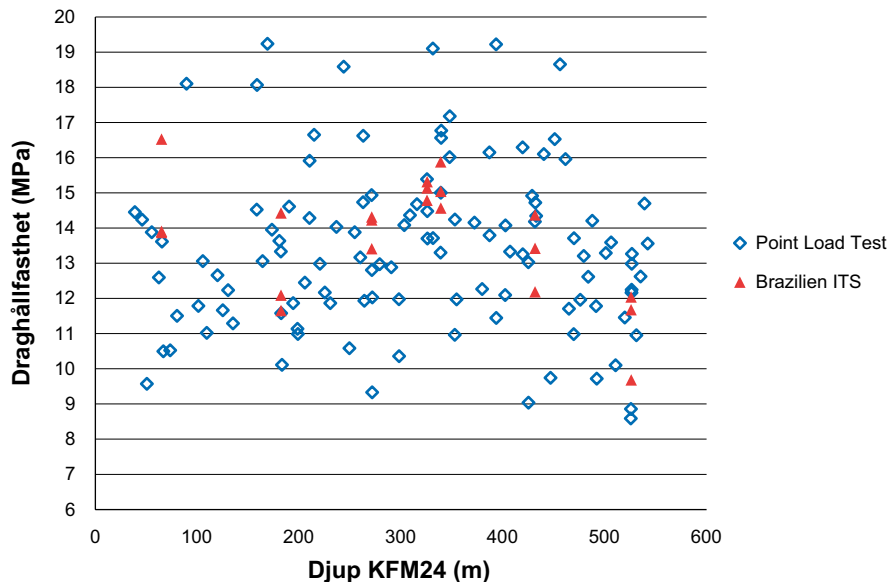


Figur 3-5. Resultat från laborietestet (medelvärde för ITS på djupnivån) visas mot I₅₀ från varje PLT på samma nivå.



Figur 3-6. Underlag till korrelationsfaktorn för ITS. Maxlast med PLT (I_{s50}) versus medel draghållfasthet från laborierprov med ett mycket näraliggande djup, ca 330 m.

För att ytterligare redovisa och göra en jämförelse mellan resultaten från de två metoderna har varje PLT- I_{s50} -värde multiplicerats med faktorn 1,31, som en beräkning av motsvarande ITS, och sedan plottats tillsammans med resultaten från laboriet (Figur 3-7). Man ser att resultaten från enskilda prov sprider mycket men sammanfaller rätt väl mellan metoderna. Trenden är att hållfastheten ökar från 200 m djup till ca 350 m djup och sedan minskar igen ned till botten på borrhålet.



Figur 3-7. Resultat från beräknade draghållfasthet från PLT (blå) tillsammans med uppmätt draghållfasthet med ITS (röda) för bergarten granit till granodiorit (101057) i borrhål KFM24 i Forsmark.

4 Diskussion

4.1 Fortsatt användning av punktlasttester

En fördel med PLT är att det är en enkel och snabb metod. Den sammanlagda erforderliga tiden, inklusive att kapa ut ett prov från kärnan då det är nödvändigt, samt registrera provtagningen i Boremap (karteringsprogrammet) är ca 10–15 minuter per prov. Utrustningen är liten, portabel och kan placeras i lokal för kärnkartering.

Som redovisats i avsnitt 2.3.2 har handhavandet av utrustningen viss betydelse för resultatet, och SKB har tagit fram en metodbeskrivning för punktlasttest som ger instruktioner, *Method description for point load testing of rock* (MD 190.008e), vilken i sin tur bygger på ISRM (1985).

Under utbyggnad av slutförvaret kommer ett flertal kärnborrhål för undersökningar att borrar. I samband med detta kan PLT tänkas vara en bra metod att använda för att snabbt kunna bedöma eventuella förändringar i bergarternas egenskaper och för att kunna bedöma behov av ytterligare undersökningar när sådan bergartsvariation uppstår.

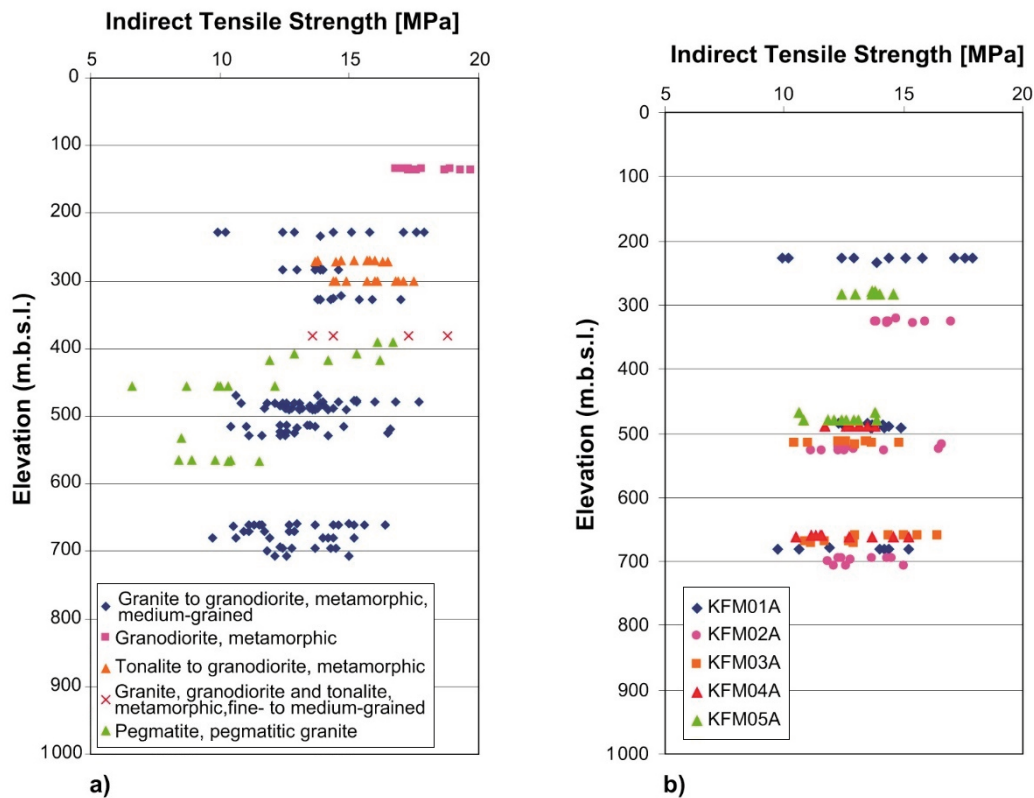
Denna studie har inneburit provning av endast en bergart, granit till granodiorit (bergartskod 101057), med få undantag som inte redovisas här, och i ett och samma borrhål. För framtida användning av PLT i andra förekommande bergarter är det lämpligt att återigen göra jämförelser med laboratorieprovning som finns för dessa bergarter. Då kan man undersöka om korrelationsfaktorn som observerats för granit till granodiorit är acceptabel även för dessa bergarter.

Det är intressant att notera att spridningen i resultat är rätt stor i såväl PLT som med ITS (Brazilian test). Det ska inte tolkas som att mätutrustningarna i sig nödvändigtvis är mycket oprecisa, utan det är själva belastningssituationen med det granulära material som en bergart utgör som innebär att draghållfastheten med nödvändighet kommer att variera från ett prov till ett annat. Belastningssituationen blir beroende på hur enskilda mineralkorn, och kontaktorna dem emellan, ser ut mineralogiskt och geometriskt precis vid belastningspunkterna och hur de slumpmässigt är orienterade i förhållande till belastningsriktningen i det begränsade dragbelastade området. Laboratorieprovningen är mättekniskt givetvis mycket mera kontrollerad jämfört med PLT, men även dessa laboratorieresultat får alltså en betydande spridning när draghållfasthet provas på olika prov från samma bergart.

4.2 Minskad hållfasthet mot djupet

Ett syfte med att göra mätning mot djupet var att undersöka om man ser någon variation eller trender i variationen längs borrhålet. Resultatet indikerar en viss variation såväl i PLT som i laboratorie-testerna. När det gäller minskningen av hållfastheten mot djupet, från ca 350 m djup och nedåt (Figur 3-2), kan orsaken vara en ökad sprickbildning, men det är i så fall en sådan småskalig mikrosprickbildning att man inte kan observera den med blotta ögat.

I de tidigare studierna under platsundersökningarna i Forsmark har man studerat draghållfasthet från flera djupa borrhål och man har observerat en sjunkande hållfasthetstrend med djupet (Figur 4-1). Detta resultat pekar emot att det finns en inverkan från ökande mikrosprickbildning på borrhålen. Borrhålen blir belastade med dragspänning i samband med urborringen och den belastningen blir större med ökande in-situ-spänningar. För proverna i KFM24 i denna studie är det dock inte möjligt att avgöra hur mycket mikrouppsprickning eventuellt har inverkat på resultatet eftersom det dessutom finns en variation i själva bergarten längs borrhålet. Den variationen diskuteras närmare i nästa avsnitt.



Figur 4-1. Sammanställning av tidigare resultat från draghållfasthetsprovning från platsundersökningen i Forsmark. a) För alla bergarter. b) För enbart prover i huvudbergarten 101057 från olika borrhål. Resultaten indikerar en något minskande hållfasthet mot djupet (Glamheden et al. 2007).

4.3 Bergartsvariation mellan prover

Den bergart som karteras som granit till granodiorit (bergartskod 101057) har något olika uppträdande. Det kan till exempel gälla mineralsammansättning, omvandlingsgrad, kornstorlek, struktur och textur. Bedömningen som gjordes vid provtagningen är att borrhållarna har en mer omfattande albitisering än vad som är karterat i nuläget (det som ligger i SICADA), vilket enbart är kortare intervall av intensiv albitisering i kontakt med amfibolitförekomster. Figur 4-2 visar foton av ITS-prover (Lägermo et al. 2021) efter provning där bergartens varierande utseende framkommer. De till utseendet mest avvikande proverna finns vid 326 m borrhållsdjup. Bergarten här saknar helt rödfärgade fältspater vilket är typiskt vid albitisering, samt har en mer intensiv foliation och kornstorleksförminskning. Generellt sett är bergarten mer röd-färgad i övre delen av hålet (de tre översta bildraderna i Figur 4-2) och får mot djupet en mer grå-vit färg (de fyra nedersta bildraderna i Figur 4-2) vilket bedöms vara ett resultat av albitisering.

01–03: ca 65 m djup



04–06: ca 182 m djup



07–09: ca 271 m djup



10–12: ca 326 m djup



Figur 4-2. Foton av de 21 stycken ITS-prover som gjorts i denna studie. Bergarten är granit till granodiorit (bergartskod 101057) och fotografierna är tagna efter draghållfasthetsprovningen som skapat sprickan (se även brödtexten för kommentarer). Foton är från Lägermo et al. (2021).

13–15: ca 339 m djup



16–18: ca 432 m djup



19–21: ca 526 m djup



Figur 4-2. Forts.

5 Slutsatser och rekommendationer

Slutsatserna som har dragits från denna studie är följande:

- Det finns en korrelation mellan resultat från punktlasttest, PLT, och resultat från laboratorieprovning av indirekt draghållfasthet, ITS. För bergarten granit till granodiorit (bergartskod 101057) i Forsmark rekommenderas att sambandet $ITS = 1,31 \times I_{s50}$, används för att uppskatta ITS från punktlasttest med den aktuella utrustningen.
- PLT ska utföras med en belastning som är långsam, maximalt 2 kN/s.
- Båda metoderna PLT och ITS ger ganska stor spridning i resultat inom bergarten granit till granodiorit (bergartskod 101057). Standardavvikelsen är 1,6 MPa för hela borrhålet KFM24.
- Draghållfastheten är högre i proverna med en viss grad av albitisering jämfört med de prov där man inte kan observera någon albitisering med blotta ögat. Bergarten för samtliga prover är karterad som granit till granodiorit (bergartskod 101057).
- Det finns en något sjunkande trend i hållfastheten från ca 400 m djup och nedåt. Orsaken till denna är inte undersökt närmare. Trenden kan förklaras av bergartsvariationen alternativt av ökande inducerade mikrosprickor orsakade av bergspänningarna vid urborringen.

Baserat på ovanstående slutsatser ges följande rekommendationer för framtida arbete:

- PLT rekommenderas som en lämplig metod för uppskattning av draghållfasthet. Metoden är speciellt lämplig när man vill göra många mätningar på kort tid och med låga kostnader. Metoden är enkel och kan användas i samband med kärnkartering.
- Vid mätning med PLT, liksom med ITS, rekommenderas att ett större antal provningar görs för att få ett säkrare medelvärde eftersom spridningen är stor.
- Mätningar med PLT på borrhåll från ytterligare djupa subvertikala borrhål rekommenderas, för att undersöka om sjunkande hållfasthet mot djupet på grund av inducerade mikrosprickor i kärnorna är ett generellt förhållande i Forsmark.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

Glamheden R, Fredriksson A, Röshoff K, Kalsson J, Hakami H, Christiansson R, 2007.

Rock Mechanics Forsmark Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.

ISRM, 1985. Suggested methods for determining point load strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 22, 51–60.

Lägermo C, Jacobsson L, Sjöström J, Sokoti H, Lindström C, 2021. Laboratory tests in borehole KFM24. Thermal properties by TPS method and indirect tensile strength tests with strain measurements of intact rock. SKB P-21-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

skb.se