

Teksturno-strukturne lastnosti glinastega skrilavca in njegov odziv na točkovni obremenitveni test

Structural and textural characteristics of slate and its response to the point load test

Mirka TRAJANOVA¹ & Ana MLADENOVIC²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana

e-mail: mirka.trajanova@geo-zs.si

²Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana

e-mail: ana.mladenovic@zag.si

Ključne besede: glinasti skrilavec, tekstura, struktura, mineralna sestava, točkovni obremenitveni test, karbon

Key words: slate, texture, structure, mineral composition, point load test, Carboniferous

Povzetek

Glinasti skrilavci veljajo z geomehanskega vidika za enega od težavnejših kamninskih razlikov. Rezultati raziskav jasno kažejo na tesno povezavo med teksturnimi, strukturnimi in mineraloškiimi značilnostmi kamnine na eni ter med trdnostjo in odpornostjo na točkovni obremenitveni test na drugi strani. Oslabljenost v njem so posledica anizotropij. Nastale so v prvi vrsti zaradi dinamometamorfoze primarne muljaste sedimentne kamnine, pri čemer se je oblikovala sekundarna skrilavost z izrazito prednostno orientacijo filosilikatov. Vzrok nizke trdnosti je šibka Van der Waals-ova kemijska vez med paketi notranje kristalne strukture listastih mineralov, predvsem sericita. Pomembne, vendar manj problematične anizotropije predstavljajo plastovitost in mikrogube s plisirano teksturo, prav tako z delno usmerjenimi listastimi minerali ter smeri oslABLJENE s sigmoidalno oblikovanimi strižnimi deformacijami, kot predhodniki mikroprelomov. Kljub navidezno masivnim plastem peščenega metameljevca v glinastem skrilavcu, predstavljajo tanke lepidoblastične lamine v njih diskontinuiteto, ki odločilno vpliva na znižanje njihove trdnosti.

Abstract

From the geomechanical point of view slate is considered to be one of more trying rock varieties. The results of research have shown close relationship between structural, textural and mineralogical characteristics on the one hand, and its strength and resistance to point loads on the other hand. Its weakened zones are the result of anisotropy. They develop mainly due to dynamo-metamorphosis of the primary mudstone, resulting in the formation of the secondary slaty cleavage, with a pronounced preferred orientation of the phyllosilicates. Low strength is the consequence of the weak Van der Waals chemical bond between individual packets of the internal crystal structure of the sheet minerals, particularly sericite. Bedding and microfolds with a crenulated structure and partial preferred orientation of sheet minerals, as well as directions that are weakened with sigmoidal shear deformations as the predecessors of microfaults, also result in significant but less problematic anisotropy. Thin lepidoblastic lamina, in apparently massive sandy metasiltstone beds in the slate represent discontinuities, which have a decisive influence on the reduction of their strength.

Uvod

Raziskave, ki povezujejo teksturno-strukturne in mineraloške lastnosti kamnine z njenim geomehanskim obnašanjem, v zadnjem času tudi pri nas dobivajo vse večji pomen, čeprav jih pri praktični uporabi še vedno premalo upoštevamo. Obravnavanje inženirsko-geološke problematike, posebno plazov ali zrušitev pri odprtih ali jamskih odkopih, navadno upošteva predvsem geomehanske dejavnike, zanemarjene pa so osnovne, teksturno-strukturne in mineraloške lastnosti kamnin ali zemljin, ki se bodo, glede na različne zunanje vplive, v istem okolju povsem različno obnašale.

Zanimivo je, da je specifična literatura, ki obravnava obnašanje glinastega skrilavca in nespremenjenega skrilavega glinavca, kljub njuni znani geomehanski problematičnosti, relativno skop.

Kompozicijska in geomehanska soodvisnost različnih kamnin in drugih materialov je bila prikazana v številnih objavljenih in neobjavljenih delih, od katerih naj naštejemo najprej nekatera iz slovenskega raziskovalnega območja (Trajanova & Mladenovič, 1996; Trajanova 2001, Trajanova & Mladenovič, 2001). Lastnosti, ki jih bo imela kamnina v svoji končni obliki, so v marsičem odvisne že od njene primarne sestave, na primer od sestave sedimenta in zemljine, kot je vidno v delih Dolinar (2002, 2004), Dolinar & Trauner (2003), Trauner et al. (2005).

Bratli (1992) opozarja na pomen geoloških faktorjev na mehanske lastnosti kamnine in na dejstvo, da temu ni posvečena ustrezna pozornost v primerjavi z inženirskim vidikom.

Zlasti struktura kamnine, kot produkt njene geneze in kasnejše tektonske zgodovine, ima odločilen vpliv na mehaniko kamnine (Ersoy & Waller, 1997). Tako so zelo pomembni parametri velikost zrn, specifična površina, oblika in vrsta mineralnih zrn, njihova porazdelitev in količina drobnozrnatega matriksa (Lundquist & Goransson, 2001). Poleg tega so pomembni tudi stiki med posameznimi minerali. Stik med raznovrstnimi minerali pomeni stik med materiali z različno kristalno rešetko, tipom vezi, trdnostjo in modulom elastičnosti, kar rezultira v nastanek drugačnih mikrorazpok kot med istovrstnimi minerali (Moore & Lockner, 1995). Åkesson et al. (2003) pa s svojimi analizami dokazuje, da je po-

memben parameter, ki vpliva na mehanske lastnosti, predvsem na lom, oziroma drobljenje, tudi foliacija. Ko prihaja do nastanka foliacije, se struktura spremeni zaradi prednostne orientacije in usmerjene rasti, migracije medzrnskih stikov (avtigene rasti in progresivne rekristalizacije) in v nekaterih primerih tudi zaradi nastajanja podzrn (degradacijske rekristalizacije). Foliacijska ravnina je površina z velikim številom faznih mej s podobno orientacijo, ki v kamni deluje kot pomembna napaka. Mehanske lastnosti kamnine bodo zato v veliki meri odvisne od stopnje kontinuitete, lege v prostoru in orientacije teh foliacijskih ravnin. Odvisnost mehanskih lastnosti od foliacije so v kvantitativnem smislu raziskovali različni avtorji (Schön, 1996, Brosch et al., 2000, Åkesson et al. 2003) in ugotovljena je bila jasna korelacija med foliacijo in mehanskimi lastnostmi. Še posebej je bil kot pomemben negativni parameter izpostavljen vpliv sljede.

Poudarek prispevka je na teksturah in strukturah šibko metamorfoziranih muljevcev (glinastih skrilavcev) s prehodi v peščenjake v povezavi z njihovo mineralno sestavo. Omenjene kamnine so nastale pod vplivom povišanega pritiska, ki je najpogostejše posledica usmerjenih napetosti. Pri pogojih dinamometamorfni sprememb v polju lomnih deformacij je bil vpliv temperature lokalnega in podrejenega pomena.

Izrazoslovje v primeru obravnavanih kamnin je še vedno nerešeno. Spremembe v območju anhidrone dajejo enakovredne argumente tako za poimenovanje s sedimentološkimi, kot z metamorfnimi termini. Uporabljena so imena za metamorfne kamnine s poudarkom njihovega sedimentnega porekla. Izrazi »glinaste, muljaste, meljaste in peščene« plasti ali lamine se nanašajo na zrnavost primarne sedimentne kamnine, s katerimi poudarjamo litološke razlike znotraj obravnavanih vzorcev.

Za določanje trdnosti je s posebnim namenom izbrana točkovna obremenitev. Določa le eno preferenčno smer porušitve v smeri obremenitve. Omogoča prosto porušitev vzorca in je zato najbližje stanju, ki nastane pri razbremenitvah zaradi odkopavanja kamnine. Tako na enostaven način dobimo medsebojno primerljive in zgovorne rezultate.

Kratek pregled geoloških razmer na osrednjem območju pojavljanja karbonskih kamnin v Sloveniji

Preiskovane kamnine predstavljajo lito-loško šibko metamorfozirane drobnostne sedimentne kamnine muljaste do peščene, redkeje konglomeratne zrnivosti. Podrobno razčlenitev in opredelitev karbonskih klastičnih kamnin najdemo v številnih delih Mlakarja (1959, 1967, 1969, 1994, 1996 a, b, 2003) ter Mlakarja s soavtorji (1992). Mlakarja (1987) navaja, da se količina glinavca (glinastega skrilavca) v podenoti b_2 iz območja Posavskih gub proti zahodu manjša in da bi lahko zaradi svojih posebnosti predstavljal repni korelacijski horizont. Karbonske kamnine, katerih starost sta na osnovi konodontne favne in rastlinskih združb določila Kolar-Jurkovšek & Jurkovšek (1985, 1986, 2002), so na površini najbolj razprostranjene med Južnimi Alpami in Zunanji Dinaridi v osrednjih tektonskih conah krovne strukture smeri W-E. Na zahodu se začne na območju Ljubljanske kotline in razprostira vse do Trojanskih nizov, oz. do Laškega (Premru, 1982, 2005). Pripadajo izostatično in izrивно dvignjenemu območju Zunanjih Dinaridov (Placer, 1999). Posledica njihovega geotektonskega položaja je močna tektonska porušenost od makro do mikro dimenzij že na primarnem mestu. Glavni vzrok porušitev so narivne in prelomne strukture, zaradi katerih so se primarne sedimentne kamnine asimetrično gubale, trgale in postale intenzivno skrilave ter zdrobljene. Spremembe so potekale pretežno v plitvem delu skorje, zaradi česar je glavni del deformacij nastajal v lomnem območju. Kovne deformacije, ki so značilne za večje globine, niso potrjene.

V tem strukturno kompleksnem področju poteka velik del avtocestne povezave med Ljubljano in Celjem in je gradbenikom predstavljal neštete težave. Kljub številnim opozorilom, se enaka zgodba ponavlja dandanes pri konstrukciji predora pod Šentviškim hribom kar pomeni, da gradbeni posegi niso projektirani v skladu z lastnostmi kamnine.

Vzorci in metode

Vzorci so bili odvzeti na trasah predorov Golovec in Šentviški hrib ter iz širšega območja zemeljskih del za objekte trojanskega odseka avtoceste Ljubljana-Maribor.

Pridobljeni so bili iz predhodnih raziskovalnih vrtin ter pri samem odkopavanju hribinske mase za gradnjo objektov. Izbrali smo kamninske različke za katere smo predvidevali, da imajo najslabše geomehanske lastnosti. To so glinasti skrilavci, pretežno ali v celoti meljasto muljaste primarne zrnivosti, s prepoznavno plastovitostjo.

Mikroskopske preiskave so izdelane na petrografskih preparatih, s preseki pravokotno na vpad plastovitosti, oziroma druge na oko vidne usmerjene teksture. Za geomehanske preiskave pa so bili izrezani preizkušanci ustreznih orientacij in dimenzij.

Preparati so bili analizirani pod optičnim mikroskopom pri presevani polarizirani svetlobi in pri 10 do 130-kratnih povečavah. Za določanje mikrokristalnih faz ter strukturnih posebnosti smo se deloma poslužili tudi vrstičnega elektronskega mikroskopa z elektronsko disperzijsko spektroskopijo.

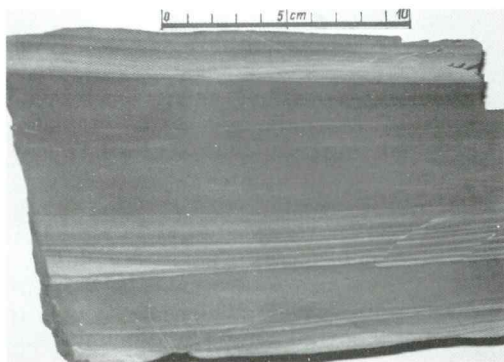
Tlačna trdnost je bila določena s »točkovnim obremenitvenim testom« (point load test). Preizkušance smo obremenili v dveh smereh: vzdolž plastovitosti, ki je ponekod sovpadala s sekundarno skrilavostjo (kar pomeni tudi vzdolž skrilavosti) in prečno na plastovitost oz. skrilavost.

Rezultati

Skupno je bilo obravnavanih šest vzorcev. Poglejmo si najprej njihove makroskopske lastnosti. Preiskane kamnine so vodoneprepustne, vendar kažejo zelo spremenljivo higroskopičnost, ki niha glede na stopnjo porušenosti. Zdrobljena kamnina ima, zaradi velike specifične površine luskastih delcev, veliko sposobnost adsorpcije vode. Mikro-raspokani vzorci so le kapilarno higroskopični, medtem ko neporušeni vzorci ne vpijajo vlage.

Vzorca 1 in 4 pripadata temno sivemu glinastemu skrilavcu. Plastovitost je izražena s prehodi v svetlejše, tanke plasti srednje sivega metameljevca, ki imajo nejasno postopno zrnavost. Peščena plast začenja na muljasti ostro, navzgor pa prehaja vanjo postopno kar je skupaj z navzkrižno plastovitostjo, značilno za ritmično usodanje drobnih turbiditnih frakcij (sl. 1). Vzorec 1 je videti dinamično manj spremenjen, odnosno s homogeno vtisnjenimi spremembami. Oba vzorca sta odvzeta na mestu, kjer sovpadata plastovitost in skrilavost. Prevladujoči glinasti skrilavec ima kontinui-

ran klivaž, v meljevcu pa je vzdolž glinastih mikrolamin razvit prostorski klivaž. Vzdolž foliacije se luščita v drobne luske s svilnato sijočo površino, ki je skoraj kontinuirano prekrita s sericitom. Kot posledica mikrogubanja imajo posamezne površine lineacijo. Na prečnem prerezu je še ohranjena navzkrižna plastovitost. Sekundarne lomne porušitve nakazujejo reverzni značaj premikanja (sl. 1).



Sl. 1. Laminirano do tanko plastovito menjavanje glinastega skrilavca in peščenega meta-meljevca z rahlim reverznim zamikom desno spodaj. Šentviški hrib, stacionaža 1404.

Fig.1. Laminated to thinly bedded alternation of slate and sandy metasilstone, with slight reverse shift at the bottom right. Šentvid Hill.

Vzorec 2 pripada plàsti nekoliko peščenega metameljevca s tankimi, trakastimi koncentracijami filosilikatov, ki nakazujejo lamine navzkrižne plastovitosti in sekundarne skrilavosti. Na straneh prehaja v čistejši glinasti skrilavec. Filosilikatni trakovi so drobno nagubani, po temenih gubic pa je prečno na plastovitost razvita sekundarna skrilavost (sl. 2).

Vzorca 3 in 6 sta identična, peščena metameljevca s tankimi laminami glinastega skrilavca, podobno kot vzorec 2. Primarna tanka plastovitost je porušena s sekundarnimi reverznimi premiki, zato je tekstura na prečnem preseku drobno lečasta. Prostorski klivaž je nastal v lepidoblastičnih laminah prečno na plastovitost, po temenih drobnih gub in mikrogub. V meljevcu so učinki gubanja prikriti z medzrnskimi premiki. Strižne napetosti so deformirale tudi foliacijo. Ob zamikih s sigmoidalnim strukturami foliacije so na razdalji okrog 1 cm nastale oslabiljene smeri in mikrorazpoke. Nekoliko starejši sistem nepravilnih razpok je že zapolnjen s kremenom in dolomitom.



Sl. 2. Menjavanje tankih plasti glinastega skrilavca in peščenega metameljevca z navzkrižno plastovitostjo in s prečno (horizontalno) potekajočo s₁. Šentviški hrib, stacionaža 1409.

Fig. 2. Alternation of thin beds of slate and sandy metasilstone with cross-bedding and with a transverse (horizontal) s₁. Šentvid Hill.

Vzorec 5 je sestavljen iz dveh delov, glinastega skrilavca in skrilavega meljevca s filosilikatnimi laminami. Odvzet je v nadaljevanju vzorca 2. Lamine so močno porušene, presekane in zamaknjene vzdolž foliacije (sl. 2). Zaradi diferencialnih strižnih zamikov ob domenah klivaža, je iz primarne smeri zarotirana tudi debelejša plast peščenjaka in je zato videti nagubana.

S petrografskimi analizami vzorcev smo z vizualno oceno določili naslednjo mineralno sestavo povprečnega, spremenjenega muljevca do meljevca, navedeno po padajoči vsebnosti:

- Kremen
- Illit/sericit,
- Bela sljudi (muskovit ali paragonit)
- Glinenci (predvsem albit)
- Klorit
- Dolomit in siderit
- Neprosojni minerali (pretežno grafitizirana organska materija in pirit)
- Sledovi turmalina, cirkona, rutila, titanita in granata

Mineralna sestava se količinsko spreminja glede na zrnastostno strukturo kamnine. V čistih muljevcih v sestavi navadno prevladujejo filosilikati illitno-sericitne in kloritne vrste, sledi pa jim kremen. Tudi količina klorita je spremenljiva, vendar je optično pogosto prikrita v intimnih zraščicah s sericitom. Večji listki bele sljude ter Fe in Mg različki filosilikatov so večinoma detritičnega izvora. Preraščanje klorita s sericitom oblikuje sericitno-kloritne agregate,

ki pri spreminjanju sedimentne kamnine najdlje zadržijo svojo primarno orientacijo in v šibko metamorfoziranih kamninah nakazujejo smer plastovitosti v primerih, ko je le-ta rotirana in prekrita s sekundarnimi teksturami (sl. 3). Pojavljajo se v delih kamnine, kjer so v primarni sestavi prevladovali minerali glin, oz. filosilikati.



Sl. 3. Stopničasto deformiran sericitno-kloritni agregat nakazuje plastovitost prečno na foliacijo, ki poteka diagonalno od leve zgoraj, proti desni spodaj. Viden je mehansko rotiran listek muskovita in nova rast sericita v smeri s_1 + N, povečava 130 $\times$.

Fig. 3. Kinked sericite-chlorite aggregate, showing bedding transverse to foliation, passing diagonally from the top left to the bottom right. Mechanically rotated muscovite flake and newly grown sericite can be seen in the direction of the s_1 + N, magnification 130 $\times$.

Po vizualni oceni pod mikroskopom predstavlja sericit okoli 40 do 50 %. Z njim, ponekod preraščen v obliki agregatov, nastopa klorit (količinsko do 15 %). V znatni količini najdemo kremen (ocenjen z okrog 25 %). Alkalne glinence predstavljata plagioklaz in verjetno K-glinenec, skupno do okoli 10 %. Količina neprosojnih mineralov variira in se giblje nekje med 1 in 10 %, v povprečju pod 5 %. V sledovih najdemo akcesorne minerale (turmalin in cirkon). V kremenovi žili, ki so jo našli pri odkopavanju raziskovalnega rova pod Šentviškim hribom, je nastopal galenit v obliki 2-3 mm velikih kristalčkov.

Bolj peščeni različki (metameljevci do metapeščenjaki) vsebujejo največ kremen (ca 50 %), sledijo alkalni glinenci (ca 20 %) in listasti minerali, med katerimi je največ sericita (ca 15 %). Del listastih mineralov je izrazito lističasta bela sljuda (muskovit/paragonit), pogost pa je tudi klorit (do okoli 8 %). Neprosojnih mineralov je okrog 2 do 3 %. Drugi akcesorni minerali so še cirkon, granat, rutil in turmalin, lokalno tudi malo

titanita. Poleg mineralnih detritičnih zrn sestavljajo peščenjake tudi odlomki kamnin, pretežno metamorfne izvora.

Preiskani vzorci nakazujejo najmanj tri faze tektonskih procesov. Prvo fazo označuje kompresija, zaradi katere se je kamnina gubala od makro do mikro dimenzij. V drugi fazi prevladujejo reverzni (naravno vezani) premiki, tretja faza pa se odraža v krhkih, prelomnih deformacijah, ki so kamnino lokalno brežizirale.

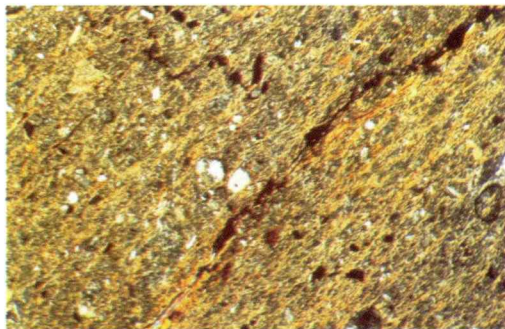
Dinamometamorfne spremembe se v teksturnem pogledu manifestirajo z nastankom gub, plisirane teksture, močne sekundarne skrilavosti s_1 , stilolitnih stikov med deli kamnine z več kremen, diferencialnega klivaža in razpoklinske porušenosti. Na mikro nivoju so vidne kot rekristalizacija (pretežno degradacijska), nova rast, sence pritiskov, mehanska reorientacija mineralnih komponent s pasivno koncentracijo filosilikatov in neprosojne grafitizirane materije ter stopničasto deformirani listasti minerali. Največje spremembe so izražene na mineralih glin. Sledi jim kremen, nemigrativni minerali pa imajo poseben pomen prav zaradi večje kemične obstojnosti.

Menjavanje plasti in lamin muljevca in peščenega meljevca, je v dinamičnih pogojih izoblikovalo značilne zloge kamnine, ki so predvsem posledica razlik v granulometrijski in mineralni sestavi primarnega sedimenta, kar pomeni količine listastih in izometričnih klastov (lepidoblastičnih in granoblastičnih zrn) ter intenzitete in položaja »in situ« v času dinamometamorfne spremembe. Te se močno odražajo v muljastih (nekompetentnih) plasteh in laminah, medtem ko so v meljevcih in peščenjakih (kompetentni deli) pogosto komaj vidne.

Prednostna orientacija filosilikatov je ena od najizrazitejših struktur, nastala kot posledica dveh mehanizmov: diagenze in primarne obremenitve sedimenta zaradi zakopavanja (smer plastovitosti in primarna skrilavost s_0) ter sekundarnih dinamičnih tektonskih procesov. Pri slednjih so spremembe najbolj vidne na mineralih glin. Ilit je prekristaliziral v sericit ali paragonitno belo sljudo (sl. 4). Že pri sedimentaciji in diagenzi se filosilikati dokaj enotno orientirajo s ploskvami (001) vzdolž plastovitosti. S prehodom diagenze v polje metamorfoze se je njihova prednostna orientacija močno poudarila v primeru, ko je bila maksimalna napetost ($\sigma_{\max}$) pravokotna na plastovitost (s_0) ali je potekala nanjo pod koti, ki so pov-

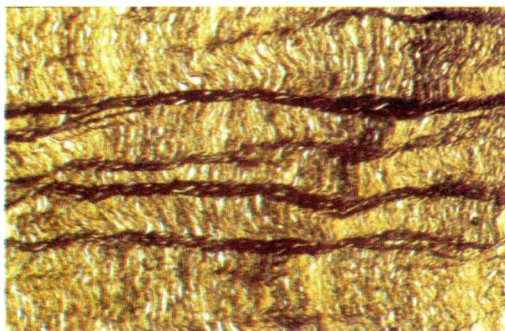
zročili dinamične spremembe vzdolž plastovitosti (sl. 5). Če je bila visoka tudi srednja napetost (σ_{sr}), je izražena mineralna lineacija ali pa je nastala plisirana tekstura (sl. 6), katere temena mikrogub ustvarjajo lineacijo. Razlika med σ_{max} (in σ_{sr}) ter σ_{min} (minimalno napetostjo) je v tem primeru velika.

Pri razvoju sekundarne skrilavosti so iz zrnatih delov nastali mikrolitazi, sestavljeni pretežno iz kremenca, glinencev in dolomita, iz glinastih pa domene klivaža, ki imajo na prelomu mastne, črno svetlikajoče se povr-



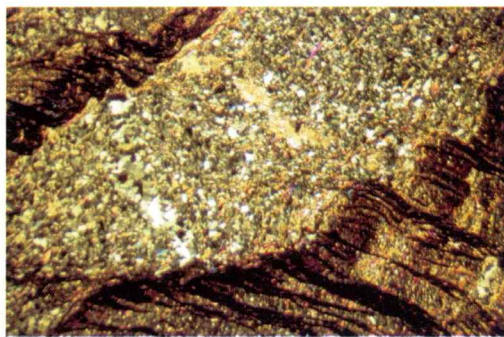
Sl. 4. Minerali glin (illit) so delno rekrystalizirali v sericit ali paragonitno belo sljudo in so prednostno orientirani vzdolž sekundarne skrilavosti s_1 . + N, povečava 20 $\times$.

Fig. 4. Clay minerals (illite), partly recrystallized into sericite or paragonitic white mica, with a preferred orientation along the secondary s_1 . + N, magnification 20 $\times$.



Sl. 5. Ko deluje σ_{max} vzdolž plastovitosti, nastane (prostorski) skrilav klivaž, oz. sekundarna skrilavost (s_1) prečno na s_0 . Če je visoka tudi srednja napetost (σ_{sr}), lahko nastane plisirana tekstura, katere temena mikrogub ustvarjajo lineacijo. ||N, povečava 30 $\times$.

Fig. 5. Slaty cleavage (spaced) or secondary foliation (s_1) develops transverse to s_0 when σ_{max} acts along the bedding. If the mean compressive stress (σ_{sr}) is high, crenulation cleavage may occur, whose hinge lines form a lineation. + N, magnification 30 $\times$.



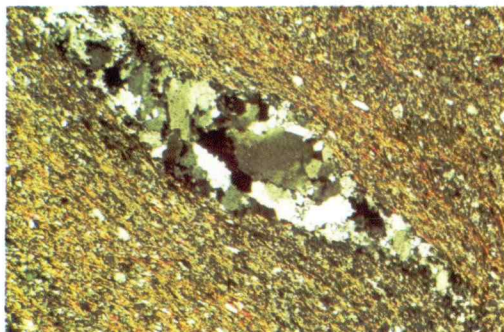
Sl. 6. V glinastih laminah se je razvil plisirani klivaž s koncentracijo grafitizirane organske materije vzdolž sekundarne skrilavosti. Poteka prečno na peščeno meljasto plast, v kateri se deformacija odraža kot ekstenzijske mikrožilice. + N, povečava 15 $\times$.

Fig. 6. Crenulation cleavage with concentrations of graphitized organic matter along the hinge lines (s_1) developed in the clayey lamina. In the silty layer the deformation reflects with development of extensional micro-veins. + N, magnification 15 $\times$.

šine in so sestavljene v glavnem iz sericita, klorita in neprosojnih mineralov. Pri tem je imela veliko vlogo pasivna koncentracija filosilikatov in netopnih, težko migrativnih komponent (organske snovi). V conah intenzivnih premikov se je v filosilikatnih delih izoblikoval kontinuiran (sl. 8), v nekoliko izraziteje zrnatih pa prostorski klivaž (sl. 5). Poteka tako vzdolž plastovitosti, kot tudi prečno nanjo in oblikuje sekundarno skrilavost s_1 , vzdolž katere se kamnina preferenčno kroji. Glede na odnos med plastovitostjo in klivažem, kot ga vidimo na slikah 5 in 6, lahko sklepamo, da izhaja del vzorcev iz območij večjih gub.

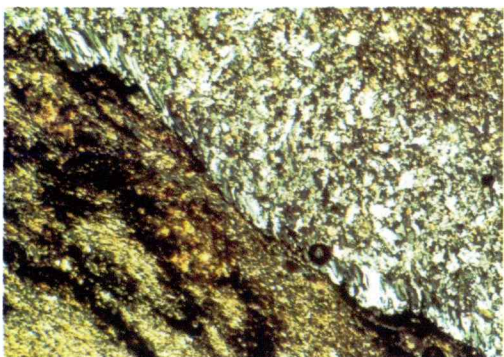
Stiskanje kamnine in reverzno drsenje sta poleg fizičnih premikov povzročila tudi raztapljanje pod pritiskom, zaradi katerega so lamine prekinjene v delih, ki fizično niso prestriženi. Vzdolž temen mikrogub se je razvila sekundarna skrilavost. Primarne glinaste lamine so zavlečene ob slednicah s_1 in povijajo okrog kompetentnejših peščeno meljastih odlomkov. V lečastih razpokah in v sencah pritiskov je sintektonsko kristalizirala migrativna kremenica (sl. 7). Ponekod jo spremlja dolomit. V dinamičnih pogojih je kremen rasel v obliki usmerjenih vlaken, ki lokalno nakazujejo smer premikanja (sl. 8). Raztapljanje pod pritiskom je povzročilo tudi pasivno koncentracijo ter delno rotacijo filosilikatov in njihovo poenoteno prednostno orientacijo. Listasti minerali so zato

orientirani tako po primarni plastovitosti s_0 , kot tudi po sekundarnih, dinamometamorfnih strukturah (sl. 3 in 5).



Sl. 7. Lečaste vrzeli pri levem strigu je zapolnil kremen. + N, povečava 17 $\times$.

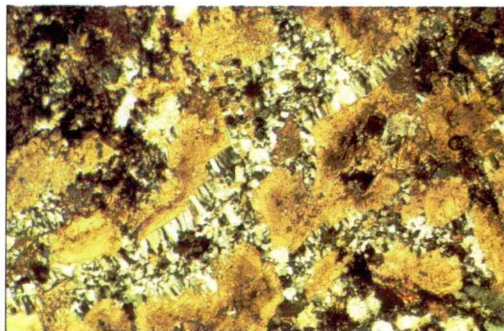
Fig. 7. The lenticular gaps caused by left shear sense are filled with quartz. + N, magnification 17 $\times$.



Sl. 8. V ekstenzijskem okolju se je v odprte mikrorazpoke odlagala predvsem migrativna kremenica. Vlakna kremenca nakazujejo smer razpiranja. + N, povečava 20 $\times$.

Fig. 8: The opened microcracks of an extensional environment are filled mostly by migrative silica. The fibres point in the direction of the extension. + N, magnification 20 $\times$.

V odprte, strižne mikrorazpoke, nastale kot posledica istih mehanizmov kot sence pritiskov, so se izločale žilice kremenca in karbonatov, redko s sericitom in kloritom ter ponekod s sulfidi, predvsem piritom. Tudi v njih se odražajo strukture kristalizacije v dinamičnih pogojih. Take so na primer vlaknate kremenove ali dezintegrirane dolomitne žilice, obrasle z vlaknatim kremenom (sl. 9). Vlaknate kremenove obrobe se nahajajo tudi na večjih zrnih pirita. Zaradi sekundarnih lomnih deformacij so žilice pogosto deformirane in zdrobljene.



Sl. 9. Žilice so redko sestavljene iz dolomita, sericita in klorita. Pri reaktiviranju razpiranja je na zrnih dolomita rasel vlaknat kremen. + N, povečava 25 $\times$.

Fig. 9. The veins are rarely composed of dolomite, sericite and chlorite. In the case of reactivated opening of the veins, fibrous quartz grew on the grains of dolomite. + N, magnification 25 $\times$.

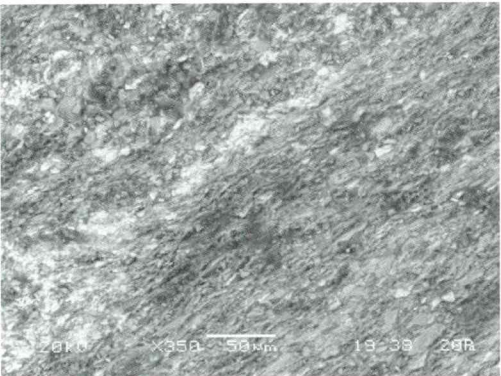
Sodobne metode preiskav nam omogočajo vpogled v vse manjše elemente kamnine in nam s tem pomagajo razumeti njeno obnašanje. Pod vrstičnim elektronskim mikroskopom smo preiskali površine foliacije in nanjo prečne prelomne površine. V prvem primeru so površine gladke, sijoče, prekrte z drobnimi listki sericita in z ostanki grafitizirane organske materije. Asimetrične mikrogube nakazujejo začetne strižne deformacije (sl. 10). V drugem primeru so vidni izraziti



Sl. 10. Gladke površine foliacije prekrte z drobnimi listki sericita in z ostanki grafitizirane organske materije (črna). Asimetrične mikrogube nakazujejo začetne strižne deformacije. SEM BSE posnetek.

Fig. 10. The smooth surfaces of the foliation planes are covered with fine flakes of sericite and the remains of graphitized organic matter (black). Asymmetric microfolds indicate the initial shear deformations. SEM BSE image.

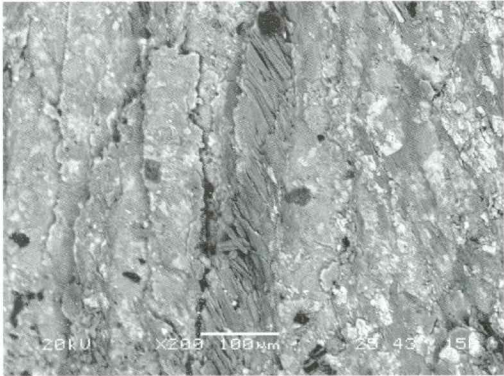
prednostna orientacija listastih sericita in klorita v delu, ki ni lomno poškodovan ter skupki zrn v nekoliko porušenem delu (sl. 11). Pri večji povečavi je opaziti redke sericitno-kloritne agregate, orientirane preč-



Sl. 11. Prednostna orientacija listastih sericita in klorita v delu, ki ni lomno poškodovan ter skupki zrn (pretežno dolomit in siderit) v lomno porušenem delu. SEM BSE posnetek.

Fig. 11. Preferred orientation of the sericite and chlorite flakes in an undeformed rock, and a concentration of (mostly dolomite and siderite) grains in the brittly deformed part. SEM BSE image.

no na foliacijo. V dinamičnih pogojih so se pri povišanih usmerjenih pritiskih vzdolž drsnih ravnin koncentrirali lepidoblasti sericita, ki oblikujejo lineacijo (sl. 12). V mikrorazpokah zadnjih lomnih deformacij,



Sl. 12. Pri povišanih usmerjenih pritiskih so se vzdolž drsnih ravnin koncentrirali lepidoblasti sericita (vertikalni trak v sredini slike). Oblikujejo lineacijo prečno na smer traku. SEM BSE posnetek.

Fig. 12. In the case of increased orientated stress the sericite lepidoblasts are concentrated along the shifting planes (the vertical strip in the middle of the image), and form a lineation in the transverse direction. SEM BSE image.

Tabela 1. Trdnost vzorcev glinastega skrilavca s prehodi v spremenjen peščeni meljevec pri točkovnem obremenitvenem testu

Zap. št.	Oznaka vz.	Vrsta vzorca	Smer obremenitve	Točkovna trdnost (Mpa)
1	3/1	metameljevec s tankimi laminami glinastega skrilavca	s ₁	16,9
2	4	glinast skrilavec s tankimi plastmi metameljevca	s ₀ in s ₁	4,9
3	5	glinast skrilavec in peščeni metameljevec	s ₁	29,7
4	6	peščeni metameljevec s tankimi laminami glinastega skrilavca	s ₁ ter sekundarnemu klivažu	15,8
5	1	glinasti skrilavec	⊥ na s ₀ + s ₁	67,6
6	2	peščeni metameljevec, plastovit do laminiran	⊥ na s ₁	103,9
7	3	metameljevec s tankimi laminami glinastega skrilavca	⊥ na s ₁	27,9
8	4/1	glinast skrilavec s tankimi plastmi metameljevca	⊥ na s ₀ in s ₁	102,1

|| obremenitev vzporedno ploskvam nehomogenosti
⊥ obremenitev pravokotno na ploskve nehomogenosti

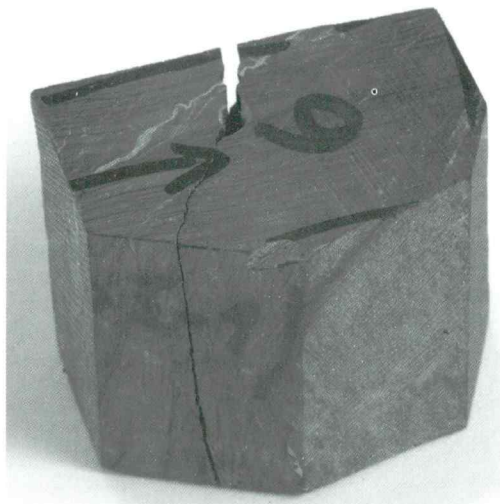
brez vidnih premikov, so koncentrirani zrnati minerali pretežno dolomitno sideritne sestave (sl. 11).

Za točkovni obremenitveni test smo izbrali šest različnih vzorcev, od katerih sta dva obremenjena v dveh pravokotnih smereh. Sestavljeni so iz tanko plastovitih do laminiranih prehodov temno sivega glinastega skrilavca v svetlo sive metameljevce in drobnozrnate peščenjake.

Rezultati trdnosti pri točkovni obremenitvi so prikazani v tabeli 1.

Na slikah 13 do 20 so prikazani načini porušitve. V glinastem skrilavcu je dosežena najnižja trdnost pri točkovni obremenitvi vzdolž sovpadajočih s_0 in s_1 na vzorcu 4 in znaša 4,9 MPa. Lomna površina je gladka, preskoki vzdolž folij skrilavosti so neznatni. V vzorcih 3/1, 5 in 6 so dobljene vrednosti 15,8, 16,9 in 29,7 MPa (tabela 1). Bolj meljasta zrnavostna sestava vzorca 3/1 oblikuje gost prostorski klivaž. Površina preloma je hrapava in nekoliko preskakujoča vzdolž nagubane foliacije. Vzorec 5 je bil prav tako obremenjen vzporedno s_1 , vendar poševno na smer stika plasti glinastega skrilavca s peščenim metameljcem. Prelom ni sledil s_1 preko celotnega vzorca, temveč se je stopničasto odklonil v smeri stika z deformirano kompetentno plastjo peščenega metameljevca (sl. 13). Trd-

nost je dosegla relativno visoko vrednost 29,7 MPa. Posebna porušitev, ki ni odgovarjala predvidevanjem, je nastala pri peščenem metameljcecu s tankimi laminami glinastega skrilavca, t.e. vzorcu 6. Porušil se je prečno na s_1 , v smeri sekundarnih gub sigmoidalnih strižnih zamikov (sl. 14), pri obremenitveni vrednosti 15,8 MPa. Prelomna površina je hrapava in le rahlo zobato preskakujoča.



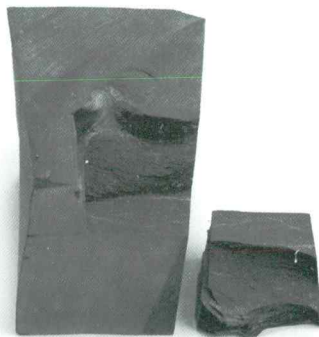
Sl. 14. Lom peščenega metameljevca s tankimi laminami glinastega skrilavca, obremenjen vzdolž s_1 . Vzorec 6. Dolžina zgornjega roba vzorca je 45 mm.

Fig. 14. Failure of the metasiltstone with thin slate lamina, when loaded parallel to s_1 . Sample 6. The length of the upper edge of the sample is 45 mm.



Sl. 13. Porušitev glinastega skrilavca in skrilavega meljevca s filosilikatnimi laminami pri obremenitvi vzdolž s_1 . Vzorec 5. Dolžina spodnjega desnega roba vzorca je 35 mm.

Fig. 13. Failure of the slate and of the slaty siltstone with phyllosilicate lamina, when loaded parallel to s_1 . Sample 5. The length of the lower right edge of the sample is 35 mm.

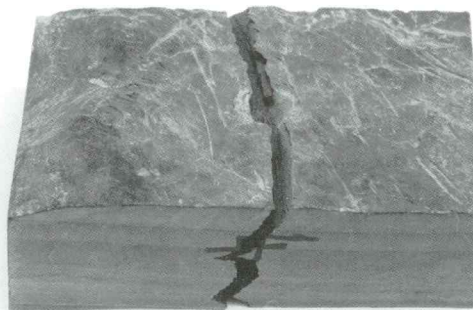


Sl. 15. Odlomna površina glinastega skrilavca pri obremenitvi pravokotno na s_0 in s_1 . Vzorec 1. Dolžina spodnjega roba vzorca je 37 mm.

Fig. 15. Failure surface of the slate when loaded perpendicularly to s_0 and s_1 . Sample 1. The length of the lower edge of the sample is 37 mm.

Pri obremenitvi pravokotno na s_0 in ali s_1 točkovna trdnost doseže kar 102,1, oziroma 103,9 MPa. Nizka vrednost 27,9 MPa je dobljena le pri meljastem vzorcu 3, ki vsebuje zelo tanke lamine glinastega skrilavca. Tako kot pri vzorcu 6 je prelom tudi tu vodila oslABLJENA cona nastala zaradi drobnega gubanja. Z nizko, skoraj polovično trdnostjo (67,6 MPa), v primerjavi z vzorcema 2 in 4/1, je presenetil vzorec 1. Vzrok je v njegovi homogeni sestavi, manjši stopnji dinamične spremenjenosti in sovpadajoči skrilavosti s_0 in s_1 . Lom je potekal v dveh vertikalnih smereh le v zgornji tretjini vzorca, nato pa se je odluščil vzdolž foliacije (sl. 15). Vzorca 2 in 4/1 sta si po zrnavostni strukturi zelo različna, vendar imata identične točkovne trdnosti. Pri vzorcu 2 znaša točkovna trdnost 102,1 MPa. Obremenitev pravokotno na s_1 je povzročila lom vzdolž drobno nagubanih filosilikatnih lamin navzkrižne plastovitosti ter po stiku s plastjo glinastega skrilavca (po s_0), ko je dosegel litološko mejo, kot je vidno na zgornjem robu slike 16. V primeru vzorca 4/1 je trdnost dosegla vrednost 103,9 MPa. Lom poteka prečno na plastovitost in sovpadajočo s_1 . Ob laminah glinastega skrilavca

prelomna ploskev ostro povije v smer skrilavosti, z žagasto prepletajočimi zobci (sl. 17).



Sl. 17. Prelom v laminiranem do tanko plastovitem menjavanju glinastega skrilavca in peščenega metameljevca pri obremenitvi pravokotno na s_0 in s_1 . Vzorec 4/1. Dolžina spodnjega roba vzorca je 53 mm.

Fig. 17. Fracture in the laminated to thinly bedded alternation of slate and sandy metasilstone, loaded perpendicularly to s_0 and s_1 . Sample 4/1. The length of the lower edge of the sample is 53 mm.

Diskusija

Pri laboratorijskem preizkusu točkovne trdnosti glinastih skrilavcev s prehodi v peščene metameljevce smo v prizmo oblikovane vzorce obremenili prečno ter vzdolž prevladujočih diskontinuitet kamnine. Predstavljajo jih:

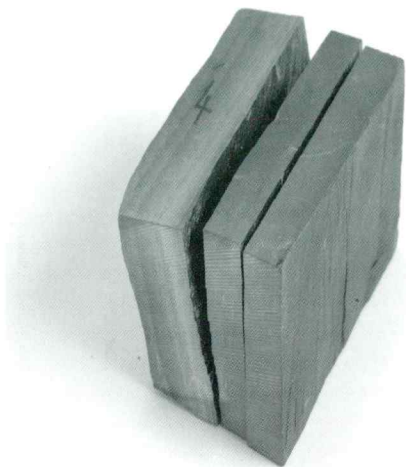
- plastovitost in laminacija s primarno skrilavo teksturo s_0 ,
- sekundarna skrilavost (foliacija) s_1 s koncentracijami v domene klivaža in mikrolitaže
- razlike v mineralni sestavi kot posledica gornjih dveh dejavnikov
- izrazita prednostna orientacija listastih mineralov
- gube in mikrogube
- slednice sekundarnih strigov
- sekundarne zapolnitve in žilice ter
- (mikro)razpokanost zadnje faze tektonskih procesov.

Lomne porušitve pri obremenitvah vzdolž diskontinuitet praviloma sledijo sekundarni skrilavosti s_1 , ne glede na to ali sovпада s plastovitostjo s_0 ali ne. V primeru sovpadanja je dobljena najnižja točkovna trdnost (vzorec 4, sl. 18). Tanke peščeno meljaste plasti nanjo nimajo vpliva. Lom vzorca je vedno nastopil vzdolž domen klivaža s koncentriranimi,



Sl. 16. Tanka plast peščenega metameljevca z drobno nagubanimi filosilikatnimi laminami vzdolž navzkrižne plastovitosti. Prečno na plastovitost je po temenih gubic razvita sekundarna skrilavost. Vzorec 2. Dolžina spodnjega roba vzorca je 35 mm.

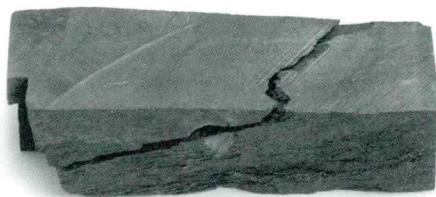
Fig. 16. A thin layer of the sandy metasilstone with finely folded phyllosilicate lamina along the cross-bedding. Secondary foliation has developed along the fold hinges, transverse to the bedding. Sample 2. The length of the lower edge of the sample is 35 mm.



Sl. 18. Prelom v laminiranem do tanko plastovitem menjavanju glinastega skrilavca in peščenega meta-meljevca pri obremenitvi vzdolž s_0 in s_1 . Vzorec 4. Dolžina spodnjega roba vzorca je 35 mm.

Fig. 18. Fracture in the laminated to thinly bedded alternation of slate and sandy meta-siltstone, loaded parallel to s_0 and s_1 . Sample 4. The length of the lower edge of the sample is 35 mm.

vzorcih v tej skupini. Pri točkovnem obremenitvenem testu vzorca 6 je trdnost celo nekoliko nižja od tiste pri vzorcu 3/1, kljub temu, da sta identična. Čeprav je obremenitev potekala vzporedno prevladujoči teksturi s_1 , se ni porušil vzdolž nje, temveč v prečni smeri. Drobne razpoke so že zapolnjene s kremenom in nekaj dolomita. Trdno se preraščata z osnovno kamnino, zato z vidika trdnosti kamnine te žilice ne predstavljajo diskontinuitete. Obnašajo se podobno, kot kompetentne plasti ali lamine. Lom je zato nastal po vmesni sigmoidalno deformirani coni, oslabljeni zaradi strižnih premikov prečno na foliacijo s_1 (sl. 14).



Sl. 19. Peščeni metameljevec s tankimi, nagubanimi laminami glinastega skrilavca, obremenjen vzporedno z s_1 . Vzorec 3/1. Dolžina spodnjega roba vzorca je 53 mm.

Fig. 19. Sandy meta-siltstone with thin, folded lamina of slate, loaded parallel to s_1 . Sample 3/1. The length of the lower edge of the sample is 53 mm.

prednostno orientiranimi listastimi minerali (sericitom in kloritom), ki oblikujejo gladke površine nedeformirane foliacije. V primeru deformirane foliacije ali ko s_0 in s_1 ne sovpadata, so spremembe primarne zrnivosti kamnine pomemben dejavnik. Pri nekoliko višji vsebnosti peščeno meljaste komponente dobimo, pri enaki smeri obremenitve, nekajkrat višje trdnosti za točkovne obremenitve (vzorci 3/1, 5 in 6). Vzorec 3/1 predstavlja metameljevec s tankimi, drobno nagubanimi laminami glinastega skrilavca. Zaradi valovite površine diskontinuitete se ni mogla oblikovati ravna prelomna površina. Prav gubice, še posebno pri obremenitvi prečno na osne ravnine, botrujejo višji trdnosti. Lom sledi nagubanim laminam glinastega skrilavca (sl. 19), vzdolž katerih je prednostno orientiranih del listastih mineralov, kar bi mikroskopsko lahko primerjali s stanjem na sliki 5. Stopničast odklon preloma pri vzorcu 5 je nastal v območju, kjer se je približal kompetentni plasti peščenega metameljevca (sl. 13). Iz dokaj gladkega preloma vzdolž s_1 z nizko kohezijo se usmeri prečno na s_1 , kjer listasti minerali ne pomenijo več oslabljenih cone, ampak igrajo »armirajočo« vlogo. Trdnost je zaradi tega višja kot pri ostalih dveh

Pri obremenitvah prečno na diskontinuitete ima posebno velik vpliv menjavanje kompetentnih in nekompetentnih plasti in lamin, ki hkrati pomeni tudi menjavanje zrnivosti, mineralne sestave in zloga. V začetku poteka lom praviloma v vseh primerih vertikalno, v smeri obremenitve. V peščeno meljastih plasteh in laminah se smer razpoke zadrži vse dokler ne doseže lepidoblastičnih diskontinuitet. V takih delih se razpoka odkloni v smer foliacije. Odklon je odvisen od debeline lamine, odnosno plasti, kot je vidno pri vzorcih 4/1 in 3 (sl. 17, 20). Pri kloritno sericitnih laminah le neznatno zavije, pri debelejših plasteh pa so zajede znatnejše. Preskok ni oster, temveč postopen in je odvisen tudi od velikosti in hitrosti povečevanja obtežbe, do njene končne vrednosti. Pri počasnejšem obteževanju vektor napetosti pri napredovanju porušitve sproti prilagaja smer maksimalne komponente, zato so porušitve prečno na smer obremenitve praviloma globlje. Če rečemo, da je vzorec 4/1 z gladkimi ploskvami foliacije prelomljen v »slu-

čajni« prečni smeri pa je pri vzorcu 3 jasno vidno, da smer vertikalne porušitve vodijo temena drobnih gubic (sl. 20), ki na mikro nivoju oblikujejo plisirano klivaž, z bolj ali manj izrazito sekundarno skrilavostjo.



Sl. 20. Peščeni metameljevec s tankimi, nagubanimi laminami glinastega skrilavca, obremenjen pravokotno na s_1 . Vzorec 3. Dolžina spodnjega levega roba vzorca je 45 mm.

Fig. 20. Sandy meta-siltstone with thin, folded lamina of slate, loaded perpendicular to s_1 . Sample 3. The length of the lower left edge of the sample is 45 mm.

Na primeru vzorca 2 (sl. 16) vidimo prelom, ki ga vodijo neznatne koncentracije prednostno orientiranih listastih mineralov v nagubanih laminah navzkrižne plastovitosti. Kljub relativno trdni kamnini pomenijo odločilen faktor za njeno porušitev. Sekundarna skrilavost peščenega metameljevca poteka prečno na smer obremenitve. Pri mineralni sestavi s prevladovanjem granoblastov (kremena, plagioklaza, dolomita) se ni razvila do te mere, da bi vodila prelom. Nasprotno pa vidimo, da je lom vzorca 1, kljub vertikalni obremenitvi, že na tretjini debeline v začetku stopničasto zavil in nato »stekel« vzdolž nedeformirane foliacije sovpadajočih s_0 in s_1 . Prečna odlomna površina je žagasto nazobčana, foliacijska pa gladka in zaradi koncentracij prednostno orientiranega sericita (in klorita), svileni sijajna (sl. 15).

Vse prikazane porušitve vzorcev so pri preizkusu trdnosti za točkovne obremenitve nastopile v smereh, določenih s teksturno strukturnimi in mineraloški diskontinuitetami, ki jih je v splošnem mogoče vnaprej predvideti.

Zaključek in aplikativni pomen raziskav

Prikazani rezultati jasno kažejo na tesno povezavo med teksturnimi, strukturnimi in mineraloški karakteristikami na eni ter med trdnostjo in odpornostjo kamnine pri usmerjenih obremenitvah na drugi strani.

Najnižja vrednost (4,9 MPa) je dobljena pri obremenitvi vzdolž sovpadajočih primarne skrilavosti po plastovitosti kamnine s_0 in sekundarne skrilavosti, oziroma foliacije s_1 . Maksimalne vrednosti (103,9 MPa) kažejo vzorci pri obremenitvi pravokotno na sovpadajoči s_0 in s_1 , ali v primeru pravokotno na prevladujočo s_1 . Kljub obremenitvi pravokotno na s_0 in s_1 ali samo s_1 so porušitve, po začetni vertikalni preskakujoči razpoki, zavile v smer s_1 .

Pomembne, vendar manj problematične anizotropije predstavljajo plastovitost in mikrogube s plisirano teksturo, prav tako z delno usmerjenimi listastimi minerali ter smeri oslabiljene s sigmoidalno oblikovanimi strižnimi deformacijami, kot predhodniki mikroprelomov. Kljub navidezno masivnim peščeno meljastim delom kamnine, predstavljajo tanke lepidoblastične lamine v njih diskontinuiteto, ki odločilno vpliva na znižanje njene trdnosti. Težava pri teh teksturah je, da so, razen plastovitosti, slabo opazne in jih navadno zanemarimo. V navidezno trdni kamnini pa ravno vzdolž njih nastanejo »nepričakovani« hribinski odlomi.

Prelomi v nobenem primeru niso potekali vzdolž sekundarnih žilnih zapolnitev, ker se je ob njih, zaradi intenzivnega preraščanja žilnih mineralov (kremena in/ali dolomita) z osnovo, celo izboljšala trdnost kamnine.

Močno oslabiljene cone v glinastem skrilavcu so posledica anizotropij. Nastale so v prvi vrsti zaradi dinamometamorfoze primarne, pretežno muljaste sedimentne kamnine, ki je oblikovala izrazito prednostno orientacijo filosilikatov (sericita, muskovita/paragonita, v manjši meri klorita). Vzrok nizke trdnosti je po našem mnenju šibka Van der Waals-ova kemijska vez, ki nastopa med paketi notranje kristalne strukture listastih mineralov, predvsem sericita.

Pri porušenem naravnem ravnotežju, predvsem pri razbremenitvi v prikazanih glinastih skrilavcih, bodo porušitve sledile opisanim diskontinuitetam. Te vodijo lomne deformacije tudi v naravnem okolju. Prevladujoča smer porušitve je odvisna od geološke strukture na terenu, oziroma od smeri

posega v kamnino. Neobhodno je upoštevati tudi zunanje dejavnike, pri katerih naj poudarimo predvsem količino vlage in temperaturo.

Literatura

- Åkesson, U., Stigh, J., Lindquist, J. E. & Goransson, M. 2003: The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. – *Engineering Geology*, 68, 275–288.
- Bratli, B. 1992: The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates. – *Engineering Geology* 33, 31–44.
- Brosch, F.J., Schanner, K., Blümel, M., Fasching, A. & Fritz, H. 2000: Preliminary investigation results on fabric and related physical properties of an anisotropic gneiss. – *Journal of structural Geology* 22, 1773–1787.
- Dolinar, B. 2002: Vloga mineralogije v mehaniki zemljin. – *Geologija*, 45/2, 347–352.
- Dolinar, B. & Trauner, L. 2003: Mehanske lastnosti vezljivih zemljin v odvisnosti od količine vode in mineralne sestave. – *Geologija*, 46/2, 307–312, Ljubljana.
- Dolinar, B. 2004: Vpliv mineralne sestave na mehanske lastnosti zasičenih glin. V: Trauner, L. (ur.), Dolinar, B. (ur.): 5. Šukljjetovi dnevi, Rogaška Slatina, 10. junij 2004. – Zbornik referatov. Slov. geotekh. društvo, 23–34, Ljubljana.
- Ersoy, A. & Waller, M.D. 1997: Textural characterisation of rocks. – *Engineering Geology* 39, 123–136.
- Kolar-Jurkovšek, T. & Jurkovšek, B. 1985: Nova najdišča paleozojske flore v Posavskih gubah med Ljubljano in Litijo. – *Razprave IV. Razr. SAZU*, 199–218, Ljubljana.
- Kolar-Jurkovšek, T. & Jurkovšek, B. 1986: Karbonska (westfalijska) makroflora iz Zavrznika. – *Rudarsko-metalurški zbornik*, 33/1–2, 3–34, Ljubljana.
- Kolar-Jurkovšek, T. & Jurkovšek, B. 2002: Karbonski gozd: karbonske plasti z rastlinskimi fosili pri Ljubljani. – *Geol. zav. Slovenije*, pp 191, Ljubljana.
- Lundquist, S. & Goransson, M. 2001: Evaluation and interpretation of microscopic parameters vs. mechanical properties of Precambrian rocks from the Stockholm region, Sweden. Proceeding of the 8th Euroseminar of Microscopy Applied to Building Materials. 13–20, Athens.
- Mlakar, I. 1959: Geološke razmere Idrijskega rudišča in okolice. – *Geologija* 5, 164–179, Ljubljana.
- Mlakar, I. 1967: Primerjava spodnje in zgornje zgradbe Idrijskega rudišča. – *Geologija* 10, 87–126, Ljubljana.
- Mlakar, I. 1969: Krovna zgradba idrijsko žirovskega ozemlja. – *Geologija* 12, 5–72, Ljubljana.
- Mlakar, I. 1987: Prispevek k poznavanju geološke zgradbe Posavskih gub in njihovega južnega obrobja. – *Geologija* 28/29 (1985/86), 157–182, Ljubljana.
- Mlakar, I., Skaberne, D. & Drovenik, M. 1992: O geološki zgradbi in orudenju v karbonskih kamninah severno od Litije. – *Geologija* 35, 229–286, Ljubljana.
- Mlakar, I. 1994: O problematiki Litijskega rudnega polja. – *Geologija* 36 (1993), 249–338, Ljubljana.
- Mlakar, I. 1996 a: O marijareškem živosrebrnem rudišču ter njegovi primerjavi z Litijo in Idrijo z aspekta tektonike plošč. – *Geologija* 37/38 (1994/95), 321–376, Ljubljana.
- Mlakar, I. 1996 b: Nekaj novih podatkov o rudiščih Češnjice in Zlatenec. – *Geologija* 37/38 (1994/95), 377–390, Ljubljana.
- Mlakar, I. 2003: O problematiki Ba, Pb, Zn rudišča Pleše. – *Geologija* 46/2, 185–224, Ljubljana.
- Moore, D.E. & Lockner, D.A. 1995: The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. – *Journal of Structural Geology* 17, 95–114.
- Placer, L. 1999: Contribution to the macro-tectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. – *Geologija* 41, 223–255, Ljubljana.
- Premru, U. 1982: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Ljubljana. – Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Premru, U. 2005: Tektonika in tektogeneza: geološka zgradba in geološki razvoj Slovenije. Geološki zavod Slovenije, pp 518, Ljubljana.
- Schön, J.H. 1996: Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. In Helbig, K., Treitel, S. (Edit.): *Handbook of Geophysical Exploration Seismic Exploration*, vol. 18. Pergamon, Trowbridge, UK, 133–319.
- Trajanova, M. & Mladenovič, A. 1996: Izbiira kamninske surovine za obrabne asfaltna plasti. – *Gradb. Vestn.*, 45, no. 3/4, 72–76, Ljubljana.
- Trajanova, M. 2001: O stabilnosti karbonskega glinastega skrilavca ob avtocesti Ljubljana-Celje s petrografskega stališča. – *Geologija*, 44/1, 81–88, Ljubljana.
- Trajanova, M. & Mladenovič, A. 2001: Durability response of metamorphic rocks in aggregate-phyllitoid to mylonite comparison. In: Pirjo, K.V. (ur.), Raimo, U. (ur.). *Proceedings of Aggregate 2001 – Environment and Economy*, Tampere Univ. of Technology, Lab. Eng. Geol., Publ. No. 50, 51, 325–330, Tampere.
- Trauner, L., Dolinar, B. & Mišič, M. 2005: Relationship between the undrained shear strength, water content, and mineralogical properties of fine-grained soils. – *International journal of geomechanics*, 5/4, 350–355.