

Karotažne krivulje v metamorfnih kamninah pri Mariboru

Well log responses in metamorphic rocks near Maribor

Aleksander Brezigar & Mirka Trajanova
Geološki zavod Ljubljana

Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko
Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

Kratka vsebina

V Stražunskem gozdu – Pobrežje pri Mariboru je bilo izvrtanih šest vrtin, globokih od 860 do 1600m. V prispevku podajamo geološke razmere v omenjenih vrtinah in v širši okolici Maribora s poudarkom na metamorfnih kamninah. S petrografskimi analizami izvrtanin in s karotažnimi merjenji smo ločili zgoraj filitni del metamorfnega kompleksa in spodaj Pohorsko serijo kamnin. V filitnem delu nastopa filit z vložki filitnega kvarcita in silikatnega marmoriziranega apnenca. V Pohorski seriji nastopata dvosluždni gnajs in blestnik predvsem z vložki amfibolita in eklogita in redkeje kloritno amfibolskega skrilavca. Opisana je problematika litološke interpretacije karotaž v metamorfnih kamninah. Karotažne krivulje za posamezne litološke člene smo določili iz konvencionalne elektrokarotaže in naravne radioaktivnosti. Obstajata dve polji odzivnosti, ki sta med seboj ločeni po stopnji radioaktivnega sevanja. V filitnem delu metamorfika so visoko radioaktivne vse kamnine razen žilnega kvarcita. V Pohorski seriji so visoko radioaktivni gnajs, blestnik in diaforit-filonit, nizkoradioaktivni pa amfibolit, eklogit in domnevno retrogradni kloritnoamfibolski skrilavec. Končno podajamo tipične karotažne krivulje posameznih litoloških členov.

Abstract

In the Stražun forest at Pobrežje near Maribor, (Eastern Slovenia) six boreholes have been drilled from 860 to 1600m deep. The paper describes geological conditions in mentioned boreholes, as well as in wider surroundings of Maribor with stress on metamorphic rocks. Based on petrographic analysis of the rocks cuttings and well logs the upper phyllitic part and the lower Pohorje series of the metamorphic complex could be separated. The first one includes phyllites with phyllitic quartzites and silicate marmorized limestones. The Pohorje series is represented by two-mica gneiss and schist, mainly with inclusions of amphibolite and eclogite, and subordinately retrograde chlorite-amphibole schist. The well log responses for particular lithological sequences of metamorphic complex have been distinguished on the basis of conventional electrologs and gamma ray measurements. The problem of lithological interpretation of well logs in these rocks is described. Two fields of well log responses are distinguishable, as separated by the degree of natural radioactivity. Apart from veined quartzite, all rocks from the phyllitic part of the metamorphic complex are highly radioactive. In the Pohorje series gneiss, schist and diaphorite-phyllonite are highly radioactive, while

amphibolite, eclogite and retrograde chlorite-amphibole schist have low radioactivity. Finally, typical well log responses in lithological sequences of the discussed metamorphic rocks are presented.

Uvod

V splošnih prizadevanjih, da bi našli alternativne »čiste« vire energije, ima pomembno vlogo geotermalna energija. V podjetju za zdravstvo, turizem in rekreacijo Pohorje so kmalu spoznali, da lahko ta energija, povezana z zdravilnimi učinki, predstavlja lepo možnost razvoja. Tako je bilo v letih 1989–1994 v Stražunskem gozdu – Pobrežje pri Mariboru (sl. 1a in 1b) izvrtanih šest vrtin, globokih od 860–1600 m z namenom, da bi mariborskemu okolišu zagotovili ustrezno količino termalne vode.

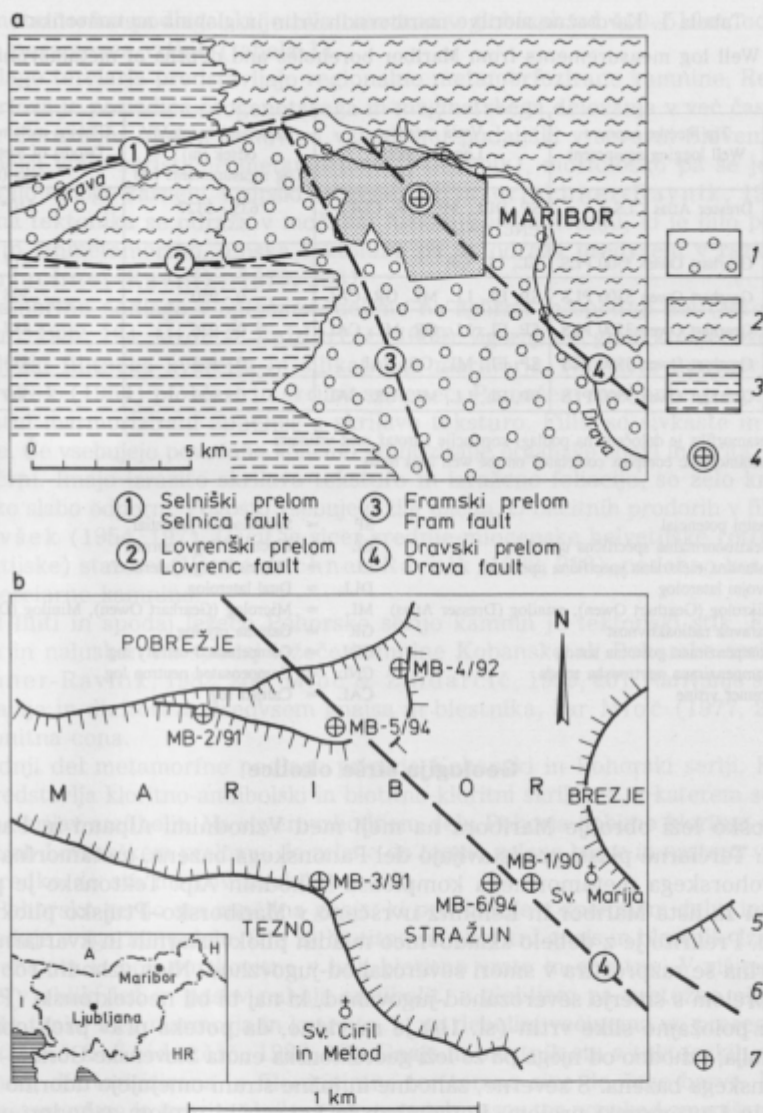
Članek opisuje karotažne krivulje v metamorfnih kamninah in težave ter omejitve, na katere naleti interpretator. Pogoj za interpretacije karotažnih krivulj je dobro poznavanje geoloških razmer nekega področja. Pri mariborskih vrtinah so bile geološke razmere v okolici dobro znane, vendar niso bile ovrednotene v vrtinah. Tako smo najprej opravili petrografske analize izvrtanin, podali pregled nastopajočih litoloških členov v vrtinah in izločili geološke formacije. Sledila je izdelava ustreznega karotažnega interpretacijskega modela.

Najprej podajamo kratek geološki pregled širše okolice Maribora, sledi pregled metamorfnih členov v vrtinah in končno opis karotažnih krivulj v posameznih litoloških členih metamorfika. Opravljene raziskave imajo veliko vrednost že zato, ker nam prvič omogočajo pogled v vertikalni presek metamorfnih kamnin na tem področju.

Mariborske vrtine so označene z oznakami MB-1/90 do MB-6/94. Največja oddaljenost med njimi je 1300 m, v prečni smeri pa 700–800 m. Vrtine ležijo na aluvialni ravnici reke Drave tako, da je nadmorska višina ustij skoraj enaka. Ocenjujemo, da je možna napaka pri karotažnem globinskem določanju kamnin v območju dveh metrov. Vse vrtine, razen MB-1, smo izvrtali na podlagi istega programa vrtnja in na podoben način. Uporabljali smo vrtalna stroja WIRTH B-3A in WIRTH B-4B. Vrtanje je bilo brezjedrno, pač pa smo v dvometrskih odsekih s siti lovili drobce izvrtanine. Ker je bila obtežitev drogovja majhna, so bili drobci veliki komaj 2–3 mm. Slednje je pri makroskopskem in mikroskopskem litološkem določevanju predstavljalo precejšnjo oviro. Makroskopske petrografske preiskave smo opravili zvezno na vseh vrtinah, mikroskopske pa na vrtinah MB-3 do MB-6, in sicer le v delih metamorfnih kamnin, kjer smo opravili karotažne meritve. Za preverjanje petrografskih analiz izvrtanine so nam služili trije segmenti jeder iz vrtin MB-1, MB-2 in MB-6.

S karotažnimi meritvami smo zajeli kvartarne, terciarne in nekaj sto metrov metamorfnih kamnin. Uporabili smo različne merske metode in opremo. Karotaže v vrtinah MB-2 do MB-6 smo opravili s tipom karotažne opreme Gearhart Owen 3500 PLS pri podobnih razmerah merjenja in so med seboj neposredno primerljive. Vrtino MB-1/90 pa smo merili z opremo Dresser Atlas tip CLS-2 s širšim izborom karotažnih sond. Tako nam je služila za dopolnilo. Pregled opravljenih meritev je podan v tabeli 1.

Pred mariborskimi vrtinami smo v Sloveniji v metamorfnih kamninah opravili karotažne meritve leta 1990 v tisoč metrov globoki vrtini v Stibuhu – Stari trg pri Slovenj Gradcu, ki pa ni bila interpretirana.



Sl. 1. Položajni karti: geološka skica okolice Maribora, poenostavljeno po Mioč & Žnidarčič, 1989 (a); položaj mariborskih vrtin (b)

1 Pliokvartarni in kvartarni nanosi; 2 Miocenski sedimenti; 3 Metamorfne kamnine; 4 Položaj vrtin; 5 Rob kvartarne terase; 6 Dravski prelom; 7 Vrtina

Fig. 1. Location maps: geological sketch of Maribor surroundings, modified after Mioč & Žnidarčič, 1989 (a); location of Maribor boreholes (b)

1 Pliocene-Quaternary and Quaternary beds; 2 Miocene beds; 3 Metamorphic rocks; 4 Location of boreholes; 5 Edge of Quarternary terrace; 6 Drava fault; 7 Borehole

Tabela 1. Karotažne meritve mariborskih vrtin in globina metamorfika

Table 1. Well log measurements from Maribor boreholes and depths of metamorphic rocks

Vrtina Borehole	Tip merske naprave Well logging equipment	Vrsta meritev Logging tools	Izmerjeni karotažni odsek (m) Log measurements (m)	Globina metamorfika (m) Depths of metamorphic rocks (m)
MB-1/90	Dresser Atlas CLS-2	SP, DLL, ML, GR, CDL, CNL, CAL	635 - 1327	510*
MB-2/91	Gearhart Owen 3500 PLS	EL, LL, GR	0 - 949	417
MB-3/91	Gearhart Owen 3500 PLS	SP, EL, LL, ML, GR, CAL	0 - 950	508
MB-4/92	Gearhart Owen 3500 PLS	SP, EL, LL, GR, ML, CAL	0 - 936	487
MB-5/94	Gearhart Owen 3500 PLS	SP, EL, ML, GR, CAL	0 - 838	433
MB-6/94	Gearhart Owen 3500 PLS	SP, EL, LL, ML, GR, CAL	0 - 929	509

* Globina metamorfika je določena na podlagi korelacije karotaž med vrtinami

* Depth of metamorphic complex correlated on the well logs basis

SP = Lastni potencial

EL = Elektronormalna specifična upornost

LL = Lateralna električna specifična upornost

DLL = Dvojni laterolog

ML = Mikrolog (Gearhart Owen), minilog (Dresser Atlas)

GR = Naravna radioaktivnost

CDL = Kompenzirana gostotna sonda

CNL = Kompenzirana nevtronska sonda

CAL = Premer vrtine

SP = Spontaneous potential

EL = Electrical log - normal

LL = Electrical log - lateral 6'

DLL = Dual laterolog

ML = Microlog (Gearhart Owen), Minilog (Dresser Atlas)

GR = Gamma ray log

CDL = Compensated density log

CNL = Compensated neutron log

CAL = Caliper log

Geologija širše okolice

Geološko leži obrobje Maribora na meji med Vzhodnimi Alpami in Panonskim bazenom. Terciarni plasti predstavljajo del Panonskega bazena, metamorfna podlaga pa del Pohorskega metamorfnega kompleksa Vzhodnih Alp. Tektonsko je področje v Tolmaču za lista Maribor in Leibnitz uvrščeno v Mariborsko-Ptujsko plikiokvararno depresijo. Prekrito je z debelo skladovnico mladih plikiokvararnih in kvartarnih nanosov. Udorina se razprostira v smeri severozahod-jugovzhod. Njen vzhodni rob omejuje Dravski prelom s smerjo severozahod-jugovzhod, ki naj bi bil neotektonski (Premru, 1976). Iz položajne slike vrtin (sl. 1b) je razvidno, da poteka prav prek obravnavanega ozemlja, vzhodno od njega pa že leži geotektonska enota Slovenske Gorice – sestavni del Panonskega bazena. S severne, zahodne in južne strani omejujejo udorino Selniški, Framski in Ljutomerski prelom. Pomemben je Lovrenški prelom zahodno od obravnavanega ozemlja. Poteka v smeri zahod-vzhod južno od Ribnice in severno od Lobnice ter se konča ob Framskem prelomu zahodno od Maribora. Ob precejšnjem delu tega preloma se na južni strani pojavlja filitni pas, ki je narinjen na kloritno-amfibolov skrilavec pohorskega dela Kobanske serije. Tudi Lovrenški prelom naj bi bil aktiven, oziroma naj bi se reaktiviral v neotektonskem obdobju (Premru, 1976, 232).

Vrtine so v zgornjem delu prevrtale kvartarne in domnevno plikiokvararne prodne in peščene zasipe, debele več deset metrov. Nato so prešle skozi miocenske helvetijske (ottnangijske in karpatijske) laporje, meljaste glinovce in karbonatne meljevece z vložki peščenjakov in peskov. V spodnjem delu miocenskih plasti je ponekod ležal miocenski dacitni tuf. Skupna debelina terciarnih plasti je bila prek 400 metrov. Sle-

dila je metamorfna podlaga, ki je bila navrtana v globinah od 410–510m, odvisno od položaja posamezne vrtime (tabela 1).

Podlago terciarja predstavljajo regionalno metamorfozirane kamnine. Regionalna metamorfoza je posledica orogenetskega in magmatskega delovanja v več časovnih intervalih. Centralne Alpe z njihovimi vzhodnimi podaljški v severni Sloveniji kažejo najmočnejši vpliv varistične metamorfoze (paleozoik), morfološko pa se je gorovje izoblikovalo mnogo kasneje, v alpski orogenezi (Hinterlechner-Ravnik, 1973, 256). Varistična tektonika se odraža v močnem luskanju in narivanju, ki je bilo predmetamorfno in sinmetamorfno, alpska tektonika pa se odraža predvsem v razkosavanju (Hinterlechner-Ravnik, 1973, 258).

Metamorfno podlago v splošnem delimo na zgornji in spodnji del (Mioč, 1977; Faninger 1982, 194; Mioč & Žnidarčič, 1989). Zgornji del gradi kremenovo-sericitni filit z vložki filitnega kvarcita in silikatnega marmorja. Namesto marmorja navaja Germovšek (1954) ploščast in skrilav apnenec. Po našem mišljenju gre pravzaprav za silikatni marmorizirani apnenec s skrilavo teksturo. Filiti so sivkaste in zelenkaste barve. Če vsebujejo povečano količino grafitizirane organske snovi in pirita, so temno sivi do črni. Imajo izrazito skrilavo teksturo in izraženo foliacijo, so zelo krušljivi in mehansko slabo odporni. Pogosto vsebujejo žile dacita. O dacitnih prodorih v filit poroča Germovšek (1954, 197). Dacit je sicer srednje-miocenske helvetske (ottnangijske in karpatijske) starosti (Hinterlechner-Ravnik, 1982, 258), podobno kot nad njim ležeče terciarne kamnine.

Med filiti in spodaj ležečo Pohorsko serijo kamnin je tektonski stik. Filit je bil narinjen in naluskan na spodaj ležeče kamnine Kobanske ali Pohorske serije (Hinterlechner-Ravnik, 1982, 256; Mioč & Žnidarčič, 1989, 20). Narivanje spremljata filonitizacija in diaforeza predvsem gnajsa in blestnika, kar Mioč (1977, 216) imenuje filonitna cona.

Spodnji del metamorfne podlage pripada Kobanski in Pohorski seriji. Kobansko serijo predstavlja kloritno-amfibolski in biotitno-kloritni skrilavec, v katerem se pojavlja nekoliko skrilav amfibolit. Na severovzhodnem delu Pohorja dobimo kloritno-amfibolov skrilavec ob Lovrenškem prelomu. Je zelene do temno zelene barve in nastopa v relativno tankih, redko do sto metrov širokih pasovih.

Za Pohorsko serijo sta značilna gnajs, ki prevladuje v spodnjem delu, in blestnik, ki prevladuje v zgornjem delu. Gre za biotitno-muskovitni gnajs in blestnik. Izmenjujeta se in prehajata iz bolj muskovitne v bolj biotitno vrsto in obratno. V višjem delu te serije se v obliki leč in pasov nahaja amfibolit, v globljem pa pretežno eklogit. Nastopajo še tanke leče marmorja in kvarcita, ki po debelini večinoma ne presegajo nekaj metrov (Mioč & Žnidarčič, 1989, 19). Gnajs in blestnik sta v tektonskih conah kaktaklazarana, diaforitizirana in filonitizirana ter temno sive do črne barve. Posledica dinamometamorfoze je izrazito skrilava tekstura teh pasov ter ponekod zmanjšana mehanika trdnost kamnin. Po literaturnih podatkih lahko v Pohorski seriji nastopata tudi aplitoidni in pegmatoidni gnajs, leče pa so debele od nekaj decimetrov do nekaj metrov (Hinterlechner-Ravnik, 1977, 131). Pegmatoidni gnajs nima s pegmatitnimi žilnimi diferenciat pohorskega tonalita nič skupnega, ker so le-ti mnogo mlajši od omenjenih (Faninger, 1973, 292).

Kamnine Pohorske serije so v redkih primerih presekanе z žilami dacita, ki so prišle na površje ob prelomih. Dacit je spremenjen in tektoniziran.

Pregled metamorfnih litoloških členov v vrtnah

Zaporedje metamorfnih litoloških členov smo določili na podlagi petrografskih makroskopskih in mikroskopskih pregledov drobcev kamnin in treh segmentov jeder. Člene smo sledili do globin, do katerih smo opravili karotažne meritve (tabela 1). Ločili smo filit in pohorsko serijo kamnin.

Filit gradijo peliti in psamiti z nizko stopnjo metamorfoze. Našli smo ga v vseh vrtnah. Metapelitni del sestavljajo kremenovo-sericitni filit s spremenljivo vsebnostjo klorita in neprozornih mineralov (pirita in grafitne snovi). Metapsamiti so po analogiji s filitom na Strojni in Kobanskem lamelarni vložki (prehodi) v metapelitih. Po drobcih sodeče dosežejo ti vložki debeline do nekaj metrov. Metapsamiti so pretežno kremeneve sestave in se po lastnostih približujejo kvarcitom (skrilavim kremenovim metapeščenjakom). Tako teksturno-strukturno kot tudi po sestavi se povsem razlikujejo od žilavih in masivnih kvarcitnih leč, ki nastopajo v globlji Pohorski, pretežno gnajnsni seriji. Še vedno imajo delno ohranjeno primarno klastično teksturo, primesi klorita, sericita in akcesornih mineralov ter filitne lamine tam, kjer je bila povečana količina primarne glinaste komponente. Če je v metapsamitu pogost klorit, je dokaj podoben kloritnemu skrilavcu. Ponekod je kalcitiziran. Kalcitizirane cone so lahko tudi posledica zapolnitve tektonskih razpok s kalcitom v obliki žilic. V vrtini MB-5 nastopa debelejši vložek marmoriziranega silikatnega apnenca s skrilavo teksturo, ki spominja na močno kalcitizirane metapsamite. Metapsamiti kot filiti kažejo nizko stopnjo metamorfoze v faciesu zelenih skrilavcev. V nadaljevanju bomo metapsamite kratko imenovali filitni kvarciti. V filitu so pogostni vključki dacita, ki je večinoma sericitiziran in kalcitiziran. Na osnovi izvrtaninskih drobcev njegovega odnosa z okolno kamnino ni mogoče določiti. Drobci dacitnega izvora so pogostni tudi ob zelenih skrilavcih. Slednji so pretežno biotitno-amfibolski skrilavci z močno epidotizacijo in kloritizacijo, pogosto tudi razpoklinsko kalcitizacijo. Petrografsko torej odgovarjajo (epidot)-klinozoisitnim-kloritno-amfibolskim skrilavcem s kremenom in malo albita. Enoten paket teh skrilavcev, debel okrog 50 m, smo pod filitom izdvojili le v vrtini MB-4, kjer prehaja navzdol v amfibolit. Vendar to še ni zadosten dokaz za navzočnost Kobanske serije kamnin, zato v mariborskih vrtnah o njej ne govorimo. Kloritno-amfibolski skrilavci se lahko pojavljajo tudi globlje v Pohorski seriji predvsem ob amfibolitnih vložkih, kjer predstavljajo produkt retrogradne metamorfoze.

Filiti nalegajo na Pohorsko serijo. Kontakt med njima je tektonski, njegov vpliv pa je močnejše izražen v spodaj ležečih kamninah, to je v gnajnsu in blestniku. Drobci kažejo na močno dinamometamorfozo, zaradi katere so kamnine v njihovi bližini milonitizirane (filonitizirane) in se makroskopsko težko ločijo od filitov. Imajo značilno blastomilonitno strukturo. Z oddaljevanjem od kontakta je izražena kataklaza, katero pogosto spremlja razpoklinska kalcitizacija. Slednja nastopa tudi v sistemih razpok, ki so posledica mlajše tektonske aktivnosti.

Pohorska serija. Mioč in Žnidarčič (1982, 342) imenujeta Pohorsko serijo tudi gnajnsno serijo, saj gnajsi prevladujejo nad blestniki. Blestniki pripadajo pretežno muskovitnim različkom. V obeh je količina biotita spremenljiva in redko prevlada nad muskovitom. Močno niha tudi vsebnost granatov. Zaradi tektonskih procesov je pogostna retrogradna metamorfoza. Njen vpliv je viden kot degradacijska rekristalizacija kremena. Ta ima značilno curkasto (mortar) strukturo in je kot lažje migrativna komponenta pogosto koncentriran v kvarcitnih lezikah in laminah ali celo v kvarcitnih lečah. Tako drobci kremena in kalcita verjetno pripadajo žilnim izločkom v tektonizirani kamnini kot tudi tanjšim lečam kvarcita in marmorja. Reševanju teh vprašanj

nameravamo posvetiti več pozornosti v nadaljevanju preiskav. Muskovit je ponekod zdrobljen v sericit, vendar je jasno izražena delna potektonska ali kasnosintektonska rekristalizacija v obliki lepidoporfiroblastov. Tudi biotit je zdrobljen in navadno topotaktično nadomeščen s kloritom. V kataklaziranih gnajsih zasledimo pogostne porfiroklaste mikroklina, kislega plagioklaza in rožnatih granatov. V drobcih so ti izrazitejši šele nekje pod 1400 m globine in dajejo vtis očesnih struktur, kar bi lahko kazalo na prisotnost očesnega gnajsa. Nekoliko nad njim (pod 1200 m globine) se v vrtnah pojavi cona z distenom in stavrolitom ter nekoliko zvečana količina drobcev, ki kažejo na blestnik. V takih primerih nastopajo številni rožnati granati in grafitni listki.

V gnajsu in blestniku se v globinah med 600 in 800 m pojavijo prvi različki amfibolita. V zgornjem delu so navadno izraziteje skrilavi (amfibolski in amfibolitni skrilavci), z globino postaja tekstura masivnejša, reliktni minerali in struktura pa kažejo na nastanek iz eklogita. V sestavi prevladuje rogovača s poikiloblastično strukturo. Relikti piroksenov in granatov imajo izrazite simplektitne obrobe, reakcijske robove pa srečamo tudi pri lamelarnem plagioklazu, distenu in rutilu. Poleg amfibolitizacije je med spremembami močna tudi zoisitizacija, manj izraženi pa sta kloritizacija in kalcitizacija.

Dobljeno litološko zaporedje je skladno z dosedanjimi podatki Hinterlechner-Ravnikove (1971, 1982) in Hinterlechner-Ravnikove s sod. (1991a, b), razmere pa so podobne tudi na sosednjih ozemljih v Avstriji in delno na Madžarskem. V talnini filitnih kompleksov obravnavajo staropaleozojske polimetamorfne kamnine epidot-amfibolskega in amfibolitnega faciesa Neubauer in Sassi (1993), Lelkes-Felvari in Sassi (1981) in številni drugi avtorji. Prevladujoča je večfazna varistična metamorfoza, lokalno pa je prisotna tudi alpska metamorfoza. Čeprav so kamnine, ki so jih prevrtale vrtnice, močno prizadete z mlajšimi tektonskimi procesi, še posebno so ti izraziti v vrtini MB-6/94, lahko po globini sledimo naslednje litološko zaporedje.

1. Kvartarni, pliokvartarni in miocenski-helvetijski (ottnangijski in karpatijski) sedimenti: prodni nanosi, karbonatni meljevci, peščenjaki, redkeje meljasti glinovci (t.i. serija laporjev). V spodnjem delu se pojavi dacit.
2. Filit: kremenovo-sericitni filit, filitni kvarcit, silikatni marmorizirani apnenec. Filit spremlja dacit.
3. Zeleni skrilavci: klinozoisitno-kloritno-amfibolski skrilavci. Tudi tu se v manjši količini pojavlja dacit.
4. Zelo drobnozrnati različki biotitno-muskovitnega gnajsa in blestnika, filonitizirani na stiku s filitno serijo; vključki amfibolskih skrilavcev.
5. Dvosljudni gnajs in blestnik s stavrolitom in lečami amfibolita.
6. Dvosljudni blestnik in podrejeno gnajs s pogostnimi amfibolitiziranimi eklogitnimi lečami.
7. Pretežno muskovitni gnajs s prehodi v očesni gnajs in blestnik.

Če zgornje zaporedje primerjamo z litološkim zaporedjem Hinterlechner-Ravnikove (1982, 258–262), opazimo odsotnost šibkometamornih kamnin štalensko-gorske serije ter predvsem aplitoidnih in pegmatoidnih gnajsov ter leč marmorja in kvarcita. Vzroka sta lahko dva. Kot pravi Hinterlechner-Ravnikova, na Pohorju ne najdemo celotnega kamninskega razvoja vzdolž enega samega profila. Drugi vzrok je lahko nastopanje aplitoidnih in pegmatoidnih gnajsov v zelo majhnih debelinah in so zato v naših mešanih vzorcih dvometrskih intervalov prikriti.

Pričakovani karotažni odzivi

V tabeli 2 podajamo petrografski izvleček po zastopanosti najpomembnejših metamorfnih kamnin z njihovo osnovno mineralno sestavo. V njej smo z zvezdico označili minerale s kalijem, kjer pričakujemo relativno zvišano naravno radioaktivno sevanje.

Naravna radioaktivnost (GR). Ugotovljeno je, da je približno 0,012% naravnega kalija radioaktivnega, torej da pripada izotopu K^{40} , ki med svojim razpadom seva. Kalij kot tak je pomembna sestavina sljud (muskovit, biotit) in K-glinencev, npr. ortoklaza in mikrokлина. Zato pričakujemo v kamninah, ki jih gradijo ti minerali, zvišano naravno radioaktivnost. Pomemben vir sevanja so uranovi in torijevi minerali. Tudi ti gradijo metamorfne kamnine (npr. cirkon) in so prisotni v sledovih. Vsi skupaj s K^{40} daleč največ prispevajo k stopnji naravne radioaktivnosti (Carmichael, 1984, 283). V nekaterih kamninah sta U in Th izrazito obogatena. To so skrilavci z organskimi snovmi in naftni skrilavci. V mariborskih vrtninah so z organskimi grafitoidnimi snovmi lokalno obogateni filiti ter redko blestniki in gnajsi. Med čiščenjem vrtnin so bili ugotovljeni tudi sledovi ogljikovodikov.

Zelo nizko radioaktivnost ima amfibolit in skrajno nizko eklogit (Dresser Atlas, 1985, 152). Amfibolit južnonemškega kristalinika pri Oberpfalzu severno od Regensburga ima naravno radioaktivnost okrog 20 API*, tamkajšnji gnajs pa ocenjeno od 70–135 API (Gatto & Casten, 1990, 255; Gatto, 1992). O tem kristaliniku je pri nas pisal Ravnik (1991). Keys (1988, 32) navaja visoko radioaktivnost v gnajsih in biotitnih skrilavcih. Na str. 33 primerja biotitni in kloritni skrilavec, kjer ima kloritni skrilavec podobno radioaktivnost kot amfibolit, torej zelo nizko. Nizko radioaktivnost kloritnega skrilavca navaja tudi Serra (1986, 101). Pričakujemo lahko, da bodo imeli gnajs, blestnik, filit in filitne različice visoko radioaktivnost, vložki amfi-

Tabela 2. Poenostavljena mineralna sestava kamnin v mariborskih vrtninah

Table 2. Simplified mineral composition of metamorphic rocks in Maribor boreholes

Kamnina Rock	Mineralna sestava Mineral composition
Filit Phyllite	sericit*, kremen, klorit sericite*, quartz, chlorite
Kloritno amfibolski skrilavec Chlorite-amphibole schist	amfibol (rogovača), klorit, biotit*, plagioklaz, kremen amphibole (hornblende), chlorite, biotite*, plagioclase, quartz
Blestnik Micaschist	muskovit*, biotit*, kremen, plagioklaz, granat muscovite*, biotite*, quartz, plagioclase, garnet
Gnajs Gneiss	kremen, plagioklaz, K-glinenec*, muskovit*, biotit*, granat quartz, plagioclase, K-feldspar, muscovite*, biotite*, garnet
Amfibolit Amphibolite	amfibol (rogovača), plagioklaz, kremen, epidot, titanit amphibole (hornblende), plagioclase, quartz, epidote, titanite
Eklogit Eclogite	piroksen (omfacit), amfibol (rogovača), granat, plagioklaz, zoisit, disten pyroxene (omphacite), amphibole (hornblende), garnet, plagioclase, zoisite, disthene

* Minerali vsebujejo element kalij. Količinsko nepomembnih in akcesornih mineralov ne omenjamo

* Minerals containing potassium. Not mentioned quantitatively insignificant and accessory minerals

* API – kratica za American Petroleum Institute. Enota API predstavlja naravno radioaktivno sevanje dvestotega dela med najnižjo in najvišjo vrednostjo karotažne krivulje, merjene v kalibracijski vrtnini na Univerzi v Houstonu – ZDA.

bolitov, eklogitov, kvarcitov in marmorjev pa nizko. Kloritno-amfibolski skrilavci imajo nizko radioaktivnost, ki pa jim jo lahko zvišuje primes biotita. Pri hitro se menjavajočih in tektonsko pregnetenih ter mešanih kamninskih različnih pričakujemo anomalne vrednosti.

Električna specifična upornost (EL, LL, ML, DLL). Električne lastnosti v metamorfnih kamninah zelo nihajo zaradi velike litološke anizotropije teh kamnin. Anizotropijo povzroča hitro menjavanje kamninskih različkov, npr. pojavi žil in vložkov, variacije v petrografskih lastnostih, zlasti nakopičenja mineralov v neenakomernih pasovih ali gnezdih (kremen, sljude), dalje razpokanost v različnih smereh, skrilavost (foliacija) in predvsem tektonska porušenost. V splošnem imajo metamorfne kamnine relativno visoke električne specifične upornosti. Nižje imajo kamnine ali deli kamnin, ki so večinoma zgrajeni iz sljud in klorita. Nižje od standardnih so vrednosti v tektonsko prizadetih delih kamnin, torej v conah, ki imajo zaradi tektonike skrilavo teksturo ali so celo zdrobljene (povečana razpoklinska poroznost). V filitu pričakujemo izrazito nizke vrednosti zaradi njegove mineralne sestave in skrilavosti. Nasprotno pričakujemo v masivnih metamorfnih kamninah, ki niso porozne (amfibolit, eklogit, marmor, kvarcit) visoke upornosti. Laboratorijske meritve električne specifične upornosti metamorfnih kamnin pri standardnih pogojih merjenja ($T = 15,6^{\circ}\text{C}$, tlak 1 bar) kažejo izredno veliko nihanje. Za gnajs velja od $100\text{--}10000\ \Omega\text{m}$, za skrilavce pa več kot $1000\ \Omega\text{m}$ (Gearhart Owen, 1976, 28). Pomembna je smer meritve glede na skrilavost kamnine.

Lastni potencial (SP) za litološko razlikovanje metamorfnih kamnin ni diagnostičen. Elektrokemični tokovi potekajo med oddaljenimi odseki, ki so kolikor toliko elektroprevodni. Prihaja do zelo dolgih in ravnih odbojev, ki se spremenijo na stiku elektroprevoden-elektroneprevoden odsek. Pomembne so tektonske cone in spremembe v slanosti podtalne vode ali formacijske tekočine.

Gostota (CDL), poroznost (CNL) in premer vrtine (CAL). Gostota in poroznost kamnin sta bili merjeni le v vrtini MB-1/90. Laboratorijske meritve gostote se od karotažnih v splošnem le malo razlikujejo in so navadno nekoliko nižje. Na vrednosti pa v obeh primerih zelo vplivajo nečistoče in tektonska prizadetost (Carmichael, 1982, 312). Gostotna sonda je diagnostična za razločevanje amfibolita od eklogita, ker ima slednji od metamorfnih kamnin daleč najvišjo gostoto ($3,45\text{g/cm}^3$). Najnižje gostotne vrednosti imata kvarcit in gnajs. Vse metamorfne kamnine, razen filita, imajo zelo nizko poroznost, ki pa se povečuje v tektonskih conah. Povečanje premera je spet povezano bolj s tektonskimi conami kot s spremenjeno litologijo. Širjenje premera pričakujemo v filitu, ki ima zaradi visoke vsebnosti sericita in klorita zmanjšano kamninsko trdnost in večjo krušljivost. V tabeli 3 podajamo iz literature izločene karotažne vrednosti. Poudariti velja, da gre pri teh podatkih za petrografsko čiste kamnine, ki se od lokalno merjenih in od petrografsko mešanih lahko precej razlikujejo.

Karotažne krivulje v mariborskih vrtinah

V vrtini MB-1/90 razpolagamo s štirimi fizikalno neodvisnimi karotažnimi merjenji (tabela 1). To so elektrokarotaža (SP, ML, DLL), naravna radioaktivnost (GR), gostota kamnin (CDL) in poroznost (CNL). V vseh preostalih vrtinah sta bili opravljeni le dve fizikalno neodvisni meritvi: konvencionalna elektrokarotaža (EL, LL, SP) in naravna radioaktivnost (GR). Med seboj smo lahko primerjali meritve, opravljene z aparaturou Gearhart Owen, torej konvencionalne elektrokarotažne meritve (EL in LL) in narav-

Tabela 3. Primerjalne karotažne vrednosti metamorfnih kamnin

Table 3. Log responses of metamorphic rocks

Metamorfna kamnina Metamorphic rock	Radioaktivnost Radioactivity	Prostorninska teža (g/cm ³) Bulk density (g/cm ³)			Poroznost Porosity
	GR (API)	Lab. meritve Laboratory data	CDL	CDL	CNL (%)
	Vir 2 in 4 Source 2 and 4	Vir 1 Source 1	Vir 2 Source 2	Vir 3 Source 3	Vir 2 Source 2
Filit - Phyllite	108 - 156 ²	/	2,75 - 2,80	2,89	6 - 10
Skrilavec - Schist	172 - 216 ²	2,73 - 3,19	2,90 - 3,10	2,83 - 3,19	≈ 3
Blestnik - Micaschist	128 - 260 ²	/	2,75 - 2,85	/	4 - 7
Gnajs - Gneiss	70 - 135 ⁴	2,59 - 2,84	2,65 - 2,90	2,68 - 3,04	≈ 3
Amfibolit - Amphibolite	≈ 20 ⁴	2,79 - 3,14	2,80 - 3,20	3,10	/
Eklogit - Eclogite	/	3,32 - 3,45	/	3,45	/
Kvarcit - Quartzite	40 - 60 ²	2,65	2,62 - 2,70	2,65	- 2
Marmor - Marble	10 - 30 ²	2,67 - 2,75	2,72 - 2,90	2,74 (kalcitni) 2,89 (dolomitni)	≈ 0

Vir: - Source:

1 - Carmichael, 1984, 34

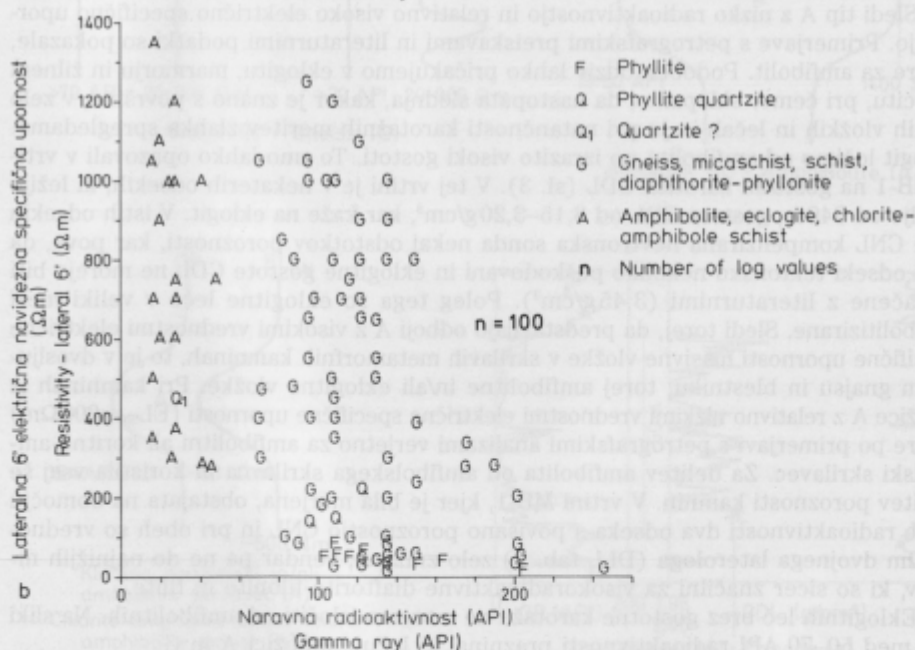
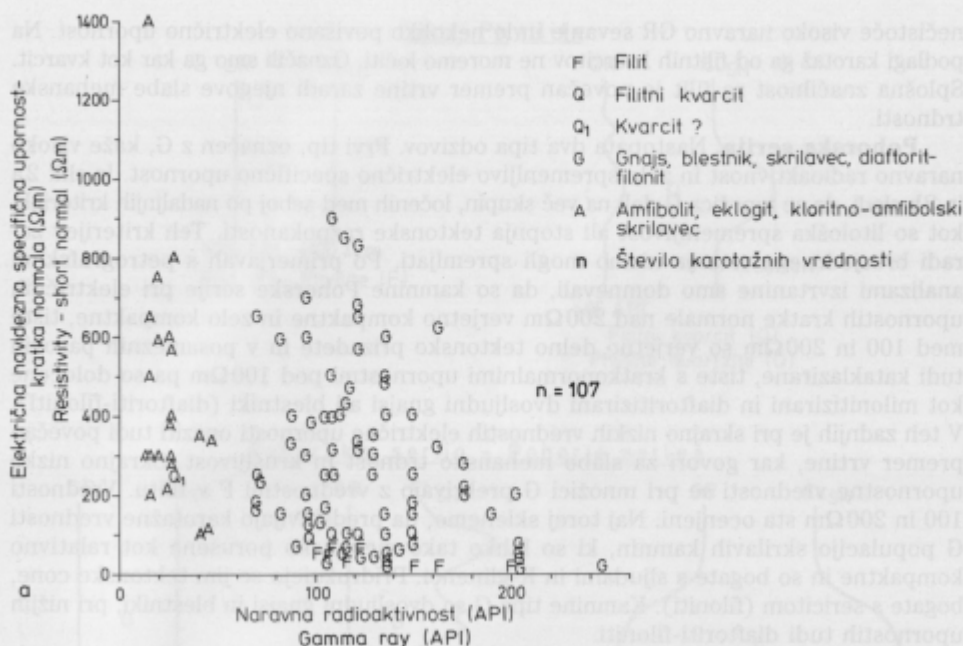
3 - Dresser Atlas, 1985, 150

2 - Serra, 1986, 101 and 104 after Desbrandes, 1982

4 - Modified after Gatto & Casten, 1990, 255; Gatto, 1992

no radioaktivnost (GR). Skupna populacija 107 izločenih karotažnih vrednosti posameznih globinskih odsekov vrtin MB-2, MB-3, MB-4, MB-5 in MB-6 je prikazana na sliki 2a. Iz slike je razvidno, da bi bila brez rešenega geološkega modela in petrografskih litoloških informacij interpretacija nezanesljiva. Vrednosti karotažnih meritev v metamorfnih členih se namreč prekrivajo. V sliki ni nanosenih nekaj karotažnih odsekov, kjer je očitno, da se v zelo tankih odsekih menjavata dve litološko različni kamnini (npr. filit in filitni kvarcit). Krivulje tedaj ne morejo doseči resničnih vrednosti. Izločili smo tudi odsek v filitu, kjer so sonde zaradi prekomerne razširitve vrtine merile izplako. V nekaj primerih so vrednosti odsekov enake in se na diagramu prekrivajo, en odsek pa je izpuščen v delu, kjer je prišlo do zloma vrtnega drogova. Na sliki 2a je tako izpuščenih 11 od 118 odsekov. Po geoloških enotah so karotažne krivulje naslednje:

Filit. Nastopajo filit (F) z vložki filitnega kvarcita (Q) in silikatnega marmoriziranega apnenca. Filit kaže relativno visoko in zelo visoko radioaktivnost ($GR > 100$ API) ter nizko električno upornost kratke normale ($EL_{SN} < 100 \Omega m$, sl. 2a). Odseki, kjer je povišana vsebnost kremena ali le-ti celo prehajajo v filitni kvarcit, kažejo nekoliko višjo elektroupornost, ponekod tudi zmanjšano GR, kar pa ni pravilo. Zaradi večje nečistoče se GR lahko celo poveča. Edini odboj v filitnem delu, ki je bil ugotovljen na območju nizke radioaktivnosti ($GR < 50$ API), je odboj v vrtini MB-2, gl. 450–468 m. Kaže 27 API sevanja ter $250 \Omega m$ kratkonormalne specifične upornosti. Po petrografskih opisih je določen kot žilni kremen kvarcitnega videza s kloritiziranimi conami, sekundarno razpoklinsko kalcitiziran. Na sliki 2 smo ga označili s Q_1 . Odsek je relativno debel in gre morda za paket subvertikalnih žil, posledično nastalih zaradi večfazne tektonske dejavnosti. Petrografsko določeni silikatni marmorizirani apnenec ima zaradi večje



Sl. 2a. Navzkrižni diagram GR-EL (kratka normala) vrtin MB-2, MB-3, MB-4, MB-5 in MB-6

Sl. 2b. Navzkrižni diagram GR-LL 6' vrtin MB-2, MB-3, MB-4 in MB-6

Fig. 2a. GR-EL_{SN} crossplot of MB-2, MB-3, MB-4, MB-5 and MB-6 boreholes

Fig. 2b. GR-LL 6' crossplot of MB-2, MB-3, MB-4 and MB-6 boreholes

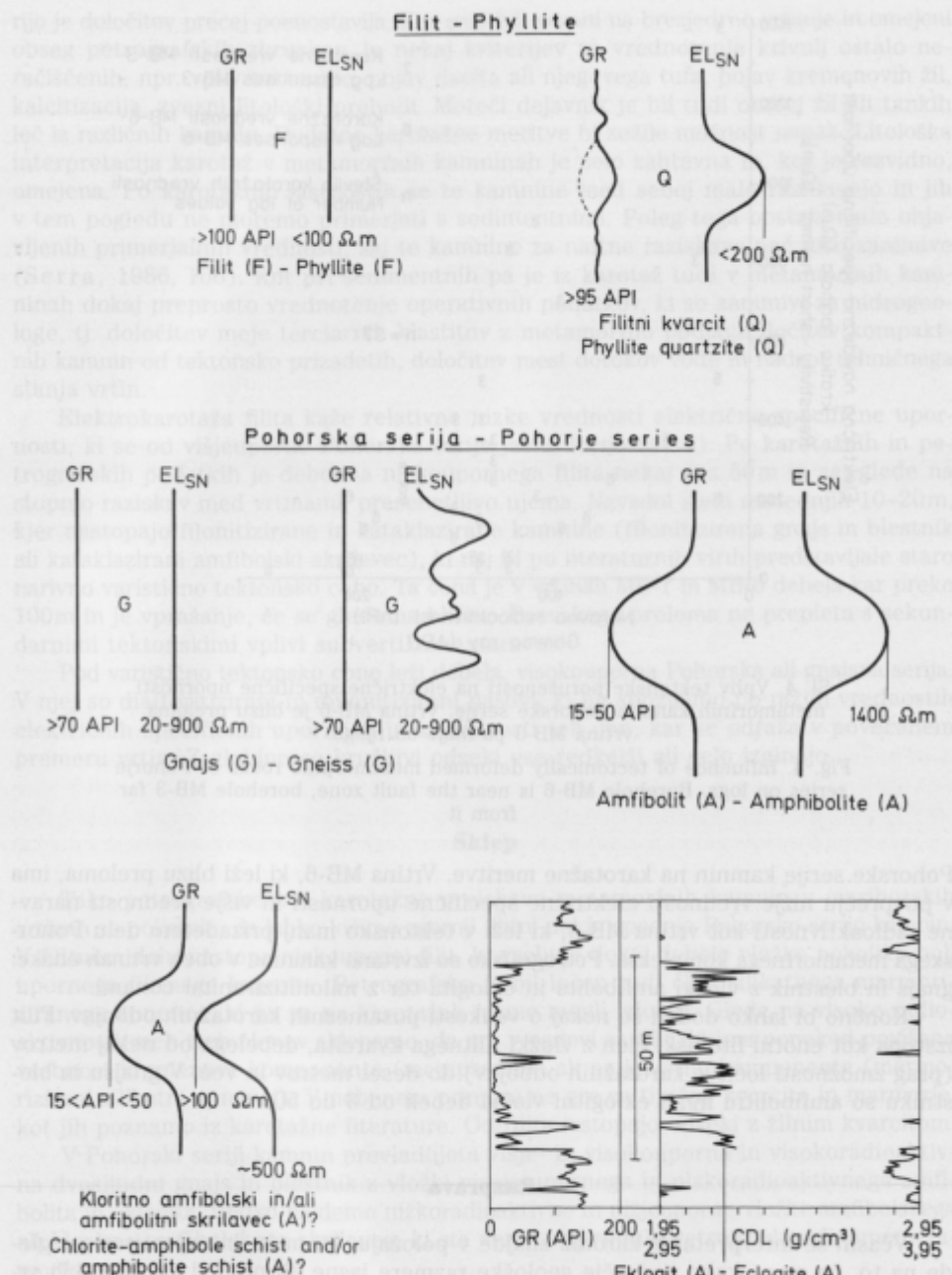
nečistoče visoko naravno GR sevanje in le nekoliko povišano električno upornost. Na podlagi karotaž ga od filitnih kvarcitov ne moremo ločiti. Označili smo ga kar kot kvarcit. Splošna značilnost za filit je povečan premer vrtine zaradi njegove slabe mehanske trdnosti.

Pohorska serija. Nastopata dva tipa odzivov. Prvi tip, označen z G, kaže visoko naravno radioaktivnost in zelo spremenljivo električno specifično upornost. Iz slik 2a in 2b sledi, da se množica G deli na več skupin, ločenih med seboj po nadaljnjih kriterijih, kot so litološka spremenljivost ali stopnja tektonske razpokanosti. Teh kriterijev zaradi brezjedrnega vrtanja nismo mogli spremljati. Po primerjavah s petrografskimi analizami izvrtanine smo domnevali, da so kamnine Pohorske serije pri električnih upornostih kratke normale nad $200\Omega\text{m}$ verjetno kompaktne in zelo kompaktne, tiste med 100 in $200\Omega\text{m}$ so verjetno delno tektonsko prizadete in v posameznih pasovih tudi kataklazirane, tiste s kratkonormalnimi upornostmi pod $100\Omega\text{m}$ pa so določene kot milonitizirani in diaforitizirani dvosljudni gnajsi ali blestniki (diaforiti-filoniti). V teh zadnjih je pri skrajno nizkih vrednostih električne upornosti opaziti tudi povečan premer vrtine, kar govori za slabo mehansko trdnost in krušljivost. Skrajno nizke upornostne vrednosti se pri množici G prekrivajo z vrednostmi F v filitu. Vrednosti 100 in $200\Omega\text{m}$ sta ocenjeni. Naj torej sklenemo, da predstavljajo karotažne vrednosti G populacijo skrilavih kamnin, ki so lahko tako mehansko porušene kot relativno kompaktne in so bogate s sljudami in K-glinenci. Pridružujejo se jim tektonske cone, bogate s sericitom (filoniti). Kamnine tipa G so dvosljudni gnajsi in blestniki, pri nižjih upornostih tudi diaforiti-filoniti.

Sledi tip A z nizko radioaktivnostjo in relativno visoko električno specifično upornostjo. Primerjave s petrografskimi preiskavami in literaturnimi podatki so pokazale, da gre za amfibolit. Podoben odziv lahko pričakujemo v eklogitu, marmorju in žilnem kvarcitu, pri čemer sklepamo, da nastopata slednja, kakor je znano s površine, v zelo tankih vložkih in lečah in ju pri natančnosti karotažnih meritev zlahka spregledamo. Eklogit ločimo od amfibolita po izrazito visoki gostoti. To smo lahko opazovali v vrtini MB-1 na gostotni karotaži CDL (sl. 3). V tej vrtini je v nekaterih odsekih, ki ležijo globlje od 840m , gostota CDL od $3,15\text{--}3,20\text{g/cm}^3$, kar kaže na eklogit. V istih odsekih kaže CNL kompenzirana nevtronska sonda nekaj odstotkov poroznosti, kar pove, da so ti odseki tektonsko nekoliko poškodovani in eklogitne gostote CDL ne morejo biti izenačene z literaturnimi ($3,45\text{g/cm}^3$). Poleg tega so eklogitne leče v veliki meri amfibolitizirane. Sledi torej, da predstavljajo odboji A z visokimi vrednostmi električne specifične upornosti masivne vložke v skrilavih metamorfnih kamninah, to je v dvosljudnem gnajsu in blestniku, torej amfibolitne in/ali eklogitne vložke. Pri kamninah iz množice A z relativno nizkimi vrednostmi električne specifične upornosti ($EL_{SN} \leq 300\Omega\text{m}$) pa gre po primerjavi s petrografskimi analizami verjetno za amfibolitni ali koritno-amfibolski skrilavec. Za delitev amfibolita od amfibolskega skrilavca bi koristila vsaj še meritev poroznosti kamnin. V vrtini MB-1, kjer je bila merjena, obstajata na območju nizke radioaktivnosti dva odseka s povišano poroznostjo CNL in pri obeh so vrednosti Ωm dvojnega laterologa (DLL tab. 1) zelo znižane, vendar pa ne do najnižjih nivojev, ki so sicer značilni za visokoradioaktivne diaforite-filonite in filite.

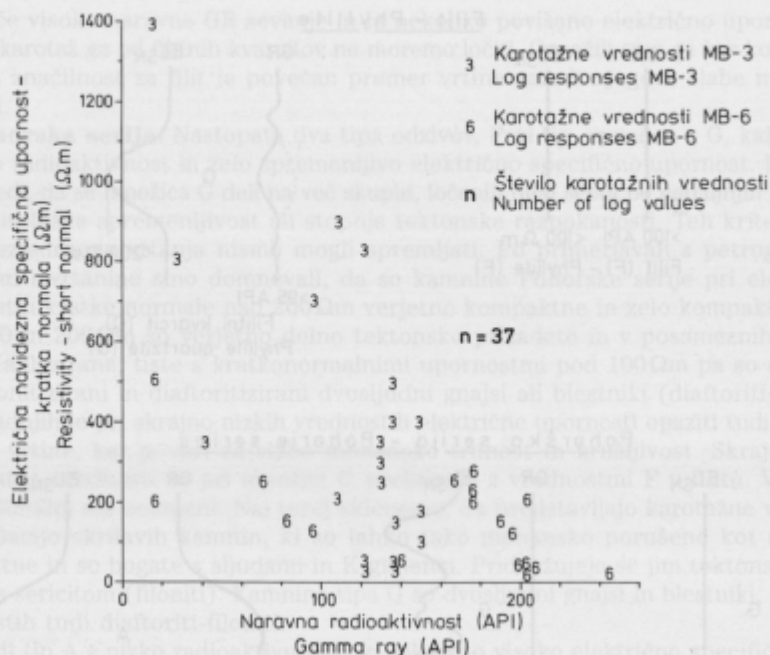
Eklogitnih leč brez gostotne karotaže ne moremo izločiti od amfibolitnih. Na sliki 2 je med $50\text{--}70$ API radioaktivnosti praznina, ki ločuje množici A in G.

Karotažne krivulje v metamorfnem kompleksu mariborskih vrtin so simbolno prikazane na sliki 3. Sodimo, da je njihovo litološko vrednotenje zadovoljivo, pri čemer se v interpretiranih odsekih amfibolskega skrilavca ali amfibolita nedvomno skriva še kakšen odsek z žilnim kalcitom ali leča marmorja. Slika 4 kaže vpliv tektonske prizadetosti



Sl. 3. Idealizirane karotažne krivulje v metamorfnih kamninah mariborskih vrtin
GR – naravna radioaktivnost; ELSN – električna navidezna specifična upornost – kratka normala; CDL – kompenzirana gostotna sonda (vrtina MB-1/90). Ni v merilu

Fig. 3. Idealized schematic log responses in metamorphic rocks in Maribor boreholes
GR – Gamma ray; ELSN – Resistivity – short normal; CDL – Compensated density log (borehole MB-1/90). Not to scale



Sl. 4. Vpliv tektonske porušenosti na električne specifične upornosti metamorfnih kamnin pohorske serije. Vrtina MB-6 je blizu preloma, vrtina MB-3 pa dalje od njega

Fig. 4. Influence of tectonically deformed metamorphic rocks of Pohorje series on logs. Borehole MB-6 is near the fault zone, borehole MB-3 far from it

Pohorske serije kamnin na karotažne meritve. Vrtina MB-6, ki leži blizu preloma, ima v povprečju nižje vrednosti električne specifične upornosti in višje vrednosti naravne radioaktivnosti kot vrtina MB-3, ki leži v tektonsko manj prizadetem delu Pohorskega metamorfnega kompleksa. Petrografsko so izvrtane kamnine v obeh vrtinah enake: gnajs in blestnik z vložki amfibolita in eklogita ter z milonitiziranimi conami.

Končno bi lahko dodali še nekaj o velikosti posameznih karotažnih odbojev. Filit izstopa kot enotni litološki člen z vložki filitnega kvarcita, debelega od nekaj metrov (prag zmožnosti ločitve karotažnih odbojev) do deset metrov in več. V gnajsu in blestniku so amfibolitni in/ali eklogitni vložki debeli od 3 do 50m.

Razprava

Včasih se interpretator karotaz znajde v položaju, ko mora interpretirati ne glede na to, če so za kako področje geološke razmere jasne ali ne. Pri mariborskih vrtinah so bile geološke razmere v širši okolici dobro znane, pač pa niso bile potrjene v vrtinah. Tako je bilo potrebno geološko znanje najprej prenesti na vrtine in zanje izdelati geološki pregled. Šele nato smo se lahko lotili razčiščevanja karotažnih krivulj. Delitev metamorfnega kompleksa na zgornji filitni del in spodnjo Pohorsko se-

rijo je določitev precej poenostavila. Ker smo bili vezani na brezjedrno vrtnje in omejeni obseg petrografskih zbruskov, je nekaj kriterijev za vrednotenje krivulj ostalo neraziščenih, npr. vpliv tektonike, pojav dacita ali njegovega tufa, pojav kremenovih žil, kalcitizacija, zvezni litološki prehodi. Moteči dejavnik je bil tudi obstoj žil ali tankih leč iz različnih kamnin. Dodatne karotažne meritve bi zožile možnost napak. Litološka interpretacija karotaž v metamorfnih kamninah je zelo zahtevna in, kot je razvidno, omejena. Po karotažnih lastnostih se te kamnine med seboj malo razlikujejo in jih v tem pogledu ne moremo primerjati s sedimentnimi. Poleg tega obstaja malo objavljenih primerjalnih vrednosti, saj te kamnine za naftne raziskave pač niso zanimive (Serra, 1986, 106). Kot pri sedimentnih pa je iz karotaž tudi v metamorfnih kamninah dokaj preprosto vrednotenje operativnih podatkov, ki so zanimivi za hidrogeologe, tj. določitev meje terciarnih klastitov z metamorfnó podlago, ločitev kompaktnih kamnin od tektonsko prizadetih, določitev mest dotokov vode in nadzor tehničnega stanja vrtin.

Elektrokarotaža filita kaže relativno nizke vrednosti električne specifične upornosti, ki se od višjeuporne Pohorske serije jasno ločijo (sl. 5). Po karotažnih in petrografskih podatkih je debelina nizkoupornega filita nekaj čez 50m in se, glede na stopnjo raziskav med vrtinami, presenetljivo ujema. Navzdol sledi naslednjih 10–20m, kjer nastopajo filonitizirane in kataklazirane kamnine (filonitizirana gnajs in blestnik ali kataklazirani amfibolski skrilavec), ki naj bi po literaturnih virih predstavljale staro naravno varistično tektonsko cono. Ta cona je v vrtinah MB-1 in MB-6 debela kar preko 100m in je vprašanje, če se glede na bližino Dravskega preloma ne prepleta s sekundarnimi tektonskimi vplivi subvertikalne narave.

Pod varistično tektonsko cono leži debela, visokouporna Pohorska ali gnajsna serija. V njej so diaforitizirani in milonitizirani pasovi, ki jih spoznamo po nižjih vrednostih električnih specifičnih upornosti in krušljivosti teh con, kar se odraža v povečanem premeru vrtin. Z globino so krušljivi odseki vse redkejši ali celo izginejo.

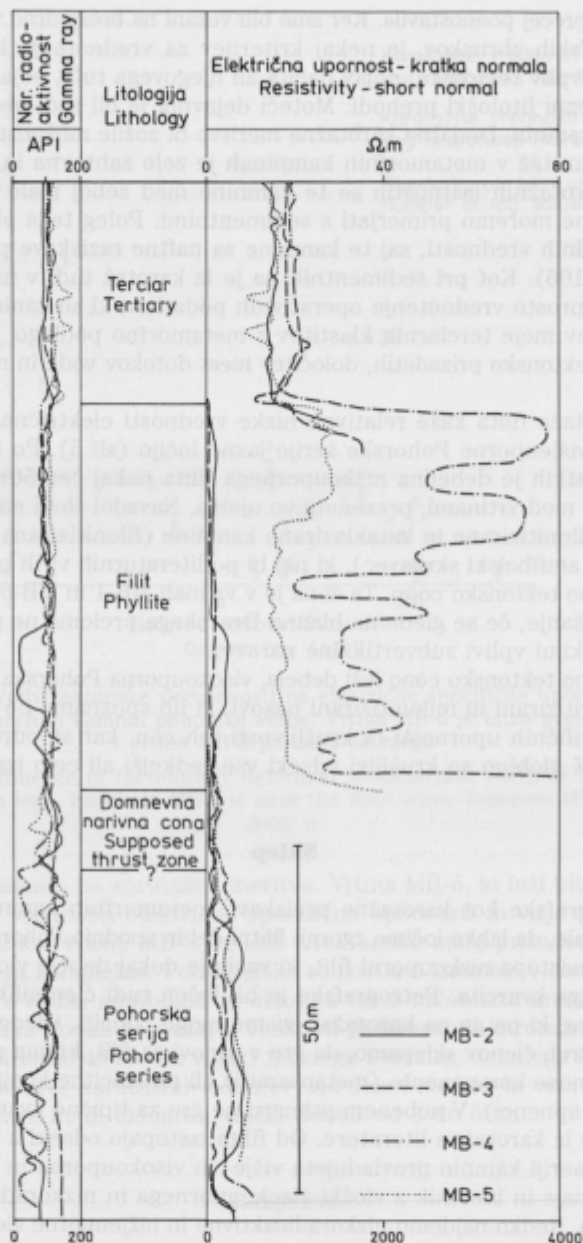
Sklep

Tako petrografske kot karotažne preiskave metamorfnih kamnin v mariborskih vrtinah so pokazale, da lahko ločimo zgornji filitni del in spodnjo Pohorsko serijo kamnin. V filitnem delu nastopa nizkouporni filit, ki vsebuje dokaj debele vložke nekoliko bolj upornega filitnega kvarcita. Petrografsko je bil ločen tudi člen silikatnega marmoriziranega apnenca, ki pa ga na karotažah nismo mogli izločiti. Glede na visoke radioaktivnosti vseh treh členov sklepamo, da gre v osnovi za filit, ki ima ponekod povišano vsebnost kremenove komponente (metapsamiti) ali pa kalcitne komponente (marmorizirani silikatni apnenci). V nobenem primeru ne gre za tipične kvarcite in marmorje, kot jih poznamo iz karotažne literature. Od filita izstopajo odseki z žilnim kvarцитom.

V Pohorski seriji kamnin prevladujeta višje- in visokouporna in visokoradioaktivna dvosljudni gnajs in blestnik z vložki visokoupornega in nizkoradioaktivnega amfibolita in eklogita. Redko najdemo nizkoradioaktivne in nižjeuporne vložke amfibolskega ali kloritno-amfibolskega skrilavca, ki sta verjetno produkt retrogradne dinamometamorfoze.

Karotažno večinoma ni mogoče izločiti kvarcitnih žil in marmornih leč Pohorske serije, ker so pretanke ali pa jih zakrivajo vložki amfibolita in amfibolskega skrilavca. V mariborskih vrtinah zaenkrat tudi petrografsko niso dokazane.

V splošnem je interpretacija karotaž tem lažja, čim mnogovrstnejše merilne me-



Sl. 5. Filit in pohorska serija kamnin v mariborskih karotazah. Karotaže so globinsko izenačene na stiku terciar-metamorfik, ki nam je služil kot primerjalna ploskev

Fig. 5. Phyllite and Pohorje series of metamorphic rocks in Maribor well logs. Logs are depth equalized on the Tertiary-metamorphic rock contact used as a reference level

tode uporabljamo. Za ustrezno vrednotenje v metamorfnih kamninah je ugodno imeti tudi meritve nevtronske poroznosti, gostotne in aktistične karotaže. Za izdelavo petrografskih analiz pa bi bilo najugodnejše imeti vzorce jeder, če se že zadovoljimo z uporabo izvrtanine pa je ugodno, da so analize dovolj goste, da jih s karotazami lahko statistično povezujemo. Pričujoč prispevek po eni strani pojasnjuje geološke razmere v mariborskih vrtnah, po drugi strani pa s številnimi vprašanji poziva k celovitejšim geološkim raziskavam v teh vrtnah.

Zahvala

Prispevek je bil pripravljen z dovoljenjem in odobritvijo Pohorja – podjetja za zdravstvo, turizem in rekreacijo iz Maribora, ki je v celoti financiralo vrtanje in vsa spremljevalna dela na vrtnah. Posebej se zahvaljujemo gospodu direktorju Krešimirju Čabrijanu, dipl. jur., ki nas je pri delu vseskozi spremljal in nam kočno tudi omogočil objavo pričujočega prispevka.

Well log responses in metamorphic rocks near Maribor

Introduction

In the Stražun forest at Pobrežje near Maribor (NE Slovenia) six boreholes from 860 to 1600m deep (fig. 1a and 1b) have been drilled. The aim of investigations was to supply sufficient amount of thermal water for this region. The boreholes are designated MB-1/90 to MB 6/94. They are situated on the Drava river alluvial plain. Apart from three short intervals the boreholes were not cored. Rock cuttings have been recovered at two metres intervals. By well logs 400 to 510 metres of Quaternary-Tertiary sedimentary beds and several hundred metres of metamorphic rocks were investigated. In the borehole MB-1/90 the Dresser Atlas CLS-2 equipment was used and in boreholes MB-2 to MB-6 the Gearhart Owen 3500 PLS equipment. As the drilling program of MB-2 to MB-6 was the same, logs from these boreholes are directly comparable.

In the present paper the vertical lithological succession, well log responses and problems concerning the log interpretation in metamorphic rocks are described.

Geology of the region

The margin of the Maribor area lies at the boundary between the Eastern Alps and the Pannonian basin. The Pohorje metamorphic complex belongs to the first one and Tertiary beds to the second. The following authors studied its rocks from the geological, tectonical and petrological aspects: Germovšek (1954), Mioč (1977), Mioč and Žnidarčič (1982, 1989), Premru (1976), Faninger (1973), Hinterlechner-Ravnik (1973, 1977, 1982). The metamorphic complex originated as a consequence of multistage regional metamorphic and magmatic activity. The Variscan metamorphism has had the strongest influence, while the Alpine tectonics, is reflected mainly in displacements. The Drava fault is important for the discussed region. The

metamorphic basement is divided into the upper phyllitic part with dacite intrusions, inclusions of phyllitic quartzite and silicate marmorized limestone, and the lower part. The latter is further divided into the Kobansko and Pohorje series. Chlorite-amphibole and biotite-chlorite schists belong to the Kobansko series, while gneisses and micaschists with inclusions of amphibolite, eclogite, quartzite and marble belong to the Pohorje series. The phyllitic part is overthrust on the Kobansko or the Pohorje series, and thick mylonitized and retrogressed boundary zones occur in them. There are local occurrences of aplitoid and pegmatoid gneisses within the Pohorje series.

Review of metamorphic lithology

The succession of metamorphic lithology in the boreholes is based on the petrography of cuttings and the three cored intervals. The phyllite part and the Pohorje series of rocks were determined.

Phyllites are present in all boreholes. Lithologically they represent the quartz-sericite phyllites with variable amount of chlorite and opaque minerals (pyrite, graphite matter). Usually they include schistose quartz metasandstones that can be according to the cuttings, a few metres thick. Their clastic structure is partly still preserved. This metasandstones contain admixtures of chlorite, sericite and accessory minerals, and phyllitic laminae. With higher amount of chlorite they are very similar to chlorite schists. Locally they are calcitized. Calcite zones can as well be the result of filling the tectonic fractures by veined calcite. In the further text we shall in short call them phyllitic quartzite. Thicker inclusions of schistose marmorized silicate limestone occur only in borehole MB-5. Rocks of the phyllitic sequence indicate the greenschist facies metamorphism. Admixtures of dacite cuttings are frequent in phyllite but their relation cannot be determined.

Only one borehole (MB-4) includes green biotite-amphibole schist, strongly epidotized and chloritized. The rock is frequently calcitized along cracks. In fact it represents the epidotized chlorite-amphibole schist with quartz and some albite. Its thickness is about 50m. Downward it passes into amphibolite. Its appearance is not yet a satisfactory proof for the presence of the Kobansko rock series, so we do not consider it in the Maribor boreholes. The chlorite-amphibole schists occur also in some deeper parts of Pohorje series in amphibolite lenses where they represent product of retrograde metamorphism.

Phyllites lie over the Pohorje series. Their contact is of tectonic character that has a stronger effect on the underlying gneiss and micaschist. Cuttings indicate strong dynamometamorphism owing to which the rocks near contact are mylonitized (phyl-lonitized) and therefore very similar to phyllites. Away from the contact rocks are cataclastic which is often accompanied by fissure calcitization. This occurs also in fissure systems which are the consequence of younger tectonic activity.

Pohorje series. It is called also gneiss series, since gneisses prevail over micaschists. Both rock types contain variable amounts of biotite which rarely predominates over muscovite. Content of garnets is variable, too. The influence of tectonic activity is seen in degradation recrystallization of quartz that shows characteristic mortar texture. Quartz is frequently concentrated in quartzite veins, laminae and lenses as a consequence of easier silica migration. So it is likely that quartz and calcite cuttings originate from veins secreted from tectonized rocks and from thinner lenses of quartzite and marble. We intend to devote more attention to these problems in fur-

ther investigations. Muscovite is very often degraded to sericite. Partial late-tectonic or post-syntectonic recrystallization is clearly expressed by porphyroepidoblasts. Topotactic replacement of chlorite after biotite is observed. Below about 1400 m of depth occur frequent porphyroclasts of microcline, acid plagioclase and pink garnets. The structure may point to the presence of augen gneiss. Above it a zone with kyanite and staurolite occurs, and cuttings show the presence of micaschist. In such cases numerous pink garnets and graphite flakes occur.

The first appearance of amphibolite varieties in gneiss and micaschist is at the depth of 600 to 800 m. They are distinctly schistose in the upper part (amphibole and amphibolite schists). Downward their structure becomes massive with relict minerals showing their eclogite origin. Several reaction rims are seen around pyroxene, garnet, plagioclase, kyanite and other blasts. Hornblende has the sieve texture. Apart from amphibolitization, zoisitization is strong and to a lesser extent chloritization and calcitization.

The lithological succession fits with the Hinterlechner-Ravnik data (1971, 1982), and Hinterlechner-Ravnik et al. (1991a, 1991b). Circumstances are similar in Austria and Hungary. Neubauer and Sassi (1993), Lelkes-Felvari and Sassi (1981) and numerous other authors consider the old Palaeozoic polymetamorphic rocks of epidote-amphibole and amphibolite facies in the footwall of phyllitic complexes. The polyphase Variscan metamorphism prevails, locally with Alpine metamorphism imprints. Although the rocks in the boreholes are strongly affected by younger tectonics, especially distinctive in borehole MB-6/94, the following lithological succession can be established.

1. Quaternary, Plioquaternary and Miocene-Ottnangian and Karpathian beds: gravel, carbonate siltstone, sandstones, rarely silty shales (so called marl series). Dacite occurs in the lower part.
2. Phyllite: quartz-sericite phyllite, phyllitic quartzite and marmorized silicate limestone. Some dacite occurs.
3. Greenschists: epidote-chlorite-amphibole schist. Here too some dacite occurs.
4. Very finegrained varieties of biotite-muscovite gneiss and micaschist, phyllonitized at the contact with phyllite; inclusions of amphibole schists.
5. Two-mica gneiss and schist with staurolite and amphibolite lenses.
6. Two-mica schist and subordinately gneiss with frequent amphibolitized eclogite lenses.
7. Predominantly muscovite gneiss with transitions to augengneiss and micaschist.

If comparing this succession with the one given by Hinterlechner-Ravnik (1982, 258–262), the absence of low metamorphic Magdalensberg rocks, aplite and pegmatite gneisses, lenses of marble and quartzite can be noted. The reasons can be two. According to Hinterlechner-Ravnik, there is no complete rock development along a single profile. The second reason can be the occurrence of aplite and pegmatite gneisses in very thin layers which can remain unnoticed in mixed cutting samples of two metres intervals.

Expected well log responses

Table 2 shows the most important metamorphic rocks, according to their frequency in the boreholes, together with their major mineral composition. By an asterisk potassium bearing minerals with increased natural radioactivity are marked.

Gamma ray (GR). It is known that about 0,012% of natural potassium is radioactive owing to the K^{40} isotope that radiates during its decay. Potassium is an important constituent of micas (muscovite, biotite) and K-feldspars (orthoclase, microcline). In rocks containing these minerals we therefore expect increased natural radioactivity. An important source of radiation are also accessory uranium and thorium minerals (e.g. zircon). They together have far the greatest contribution to the degree of natural radioactivity (Carmichael, 1984, 283). In some schists with organic matter and oil schists U and Th can be enriched. In investigated boreholes the phyllites are locally enriched with graphitic matter, rarely also micaschists and gneisses. Traces of oil were stated during water pumping.

Amphibolite has a very low radioactivity, while that of eclogite is extremely low (Dresser Atlas, 1985, 152). Radioactivity of amphibolite from South German crystalline basement in Oberpfalz amounts to about 20 API* units, while that of gneiss there is from 70 to 135 API (Gatto & Casten, 1990, 255; Gatto, 1992). Keys (1988, 32/3) quotes high radioactivity in gneisses and biotite schists, and states that chlorite schist has radioactivity similar to amphibolite, i.e. very low.

Low radioactivity of chlorite schist is stated also by Serra (1986, 101). Consequently we expect high radioactivity of gneiss, micaschist and phyllite and low radioactivity of amphibolite, eclogite, quartzite and marble inclusions in the Pohorje series. Presence of biotite in chlorite schists may increase their radioactivity. Anomalous values are expected at rapid lithological changes or in tectonized zones.

Specific electrical resistivity (EL, LL, ML, DLL). Electrical properties in metamorphic rocks show great oscillations due to their relatively high lithological anisotropy that is caused by rapid changes of rock properties, as for example veins, inclusions, laminae, fracturing, schistosity (foliation) and degree of tectonic deformation. Metamorphic rocks have in general relatively high specific electrical resistivities. Lower values occur in tectonically affected zones with schistosity or increased fracture porosity. Distinctively low values can be expected in phyllite due to its mineral composition and schistosity. In contrary, the expected values in massive metamorphic rocks of extremely low porosity (amphibolite, eclogite, marble, quartzite) should be high. Laboratory measurements in metamorphic rocks at standard conditions ($T=15.6^{\circ}\text{C}$, $P=1$ bar) show very large oscillations. Values for gneiss are from 100 to $10000\Omega\text{m}$ (Gearhart Owen, 1976, 28). Important is the direction of measurements with respect to the schistosity.

Spontaneous potential (SP) is not diagnostic for metamorphic rocks. Electrical currents flow between distant sections that are of moderate electric conductivity. The responses are long curves, changing only at the contacts or high conductivity, to low conductivity segments. Tectonic zones are important, as well as changes of the ground water or formation liquid salinity.

Compensated density log (CDL), compensated neutron log (CNL) and caliper log (CAL). Density and neutron logs were measured only in borehole MB-1/90. Laboratory density values are in general slightly lower than the log values. In both cases they are influenced by impurities and tectonic deformations (Carmichael, 1982, 312). Density log is diagnostic to distinguish amphibolite from eclogite. The former has by far the greatest density (3.45g/cm^3) among metamorphic rocks. The lowest density log values have quartzite and gneiss. Except for phyllite, all metamorphic

* API - abbreviation for American Petroleum Institute. The API unit of gamma radiation corresponds to 1/200 of the deflection measured between two reference levels (low and high) of gamma ray activity in a test pit at the University of Houston.

rocks have very low porosity. It is increased in tectonized zones. This is valid also for the caliper. Increased caliper is expected in phyllite because of its high content of sericite and chlorite. Table 3 includes literature log values for petrographically pure rocks. They can differ much from values for tectonically disturbed and compositionally mixed rock varieties.

Log responses in Maribor boreholes

We were able to correlate conventional electrical log measurements (EL and LL) with gamma ray (GR) measurements, both made by Gearhart Owen equipment. Population of 107 selected log measurements for particular MB-2 to MB-6 borehole sections is shown in figures 2a and 2b. Log responses of geological units are as follows.

Phyllite. It is represented by phyllite (F) with phyllite quartzite (Q) and silicate marmorised limestone inclusions. Phyllite has relatively high and very high radioactivity ($GR > 100$ API) and low electrical log short normal ($EL_{SN} < 100 \Omega m$, fig. 2a). Segments with higher quartz content that can even pass to phyllite quartzite show somewhat higher electrical resistivity, and locally also reduced GR, which is not the rule. Impurities can even increase GR. The only value stated in phyllite within the low radioactivity field ($GR < 50$ API) was in borehole MB-2 at depth 450 to 468 m. The gamma ray was 27 API and electrical log short normal $250 \Omega m$. Petrography is determined as veined quartz with chloritized zones and secondary fracture calcitization. In figure 2 it is marked by Q₁. This section is relatively thick. We suppose there occurs a subvertical system of veins originating from polyphase tectonic activity. High GR and slightly increased electrical resistivity shows also the marmorized silicate limestone due to impurities. The rock cannot be separate from phyllitic quartzites by well logs. Therefore we marked it as quartzite. The general characteristics for phyllite is the increased caliper owing to its low mechanical strength.

Pohorje series. Two kinds of responses occur. The one marked by G is characterized by high natural radioactivity and very variable electrical specific resistivity. It can be seen from figures 2a and 2b that the set G is further divided into several groups. Separation is made according to lithologic variation and degree of tectonic deformation. These criteria could not be checked owing to uncored drilling. On the basis of correlation of log values with petrographic analyses of cuttings we suppose that the Pohorje series rocks with electrical resistivity short normal above $200 \Omega m$ are probably relatively massive, those with values between 100 and $200 \Omega m$ partly disturbed or locally cataclastic, while those under $100 \Omega m$ belong to mylonitized and diaphthoritic two-mica gneisses and schists (phyllonites). Within the last one, when electrical resistivity is extremely low, greater caliper appears which indicates low mechanic strength and crumbling. The extremely low resistivity values of G coincide with values F in phyllite. Values of 100 and $200 \Omega m$ are only estimated, since the investigations without core recovery do not permit statistical connections. We conclude that the G log values represent schistose rocks either compact or mechanically destroyed, and rich in micas and K-feldspars (table 2). Similar are zones rich in sericite (phyllonites). The G type rock are two-mica gneisses and schists, and those with lower resistivity also diaphthorites – phyllonites.

Next is the A type with low radioactivity and relatively high electrical specific resistivity. Comparisons of results and literature data indicate amphibolite. Similar responses can be expected in eclogite, marble and veined quartzite. The last two

usually occur as thin inclusions and lenses, so they can easily be overlooked regarding the well log accuracy. Eclogite can be distinguished from amphibolite by its high density. This can be seen from compensated density log made in borehole MB-1 (fig. 3). There the CDL values in some sections deeper than 840m were 3.15–3.20g/cm³, which suggests eclogite. Within the same section CNL showed a few percent porosity as a result of tectonics. Therefore the CDL values of eclogite are not the same as in literature (3.45g/cm³); besides, the eclogite lenses are usually strongly amphibolitized. We conclude that the A responses with high values of specific electrical resistivity represent massive inclusions in schistose metamorphic rocks, i.e. amphibolite and/or eclogite lenses within gneiss and micaschist. Low radioactivity and relatively low specific electrical resistivity readings of A ($EL_{SN} \leq 300 \Omega m$) indicate, when correlated with petrographic analyses, amphibolite schist or chlorite-amphibole schist. At least the porosity measurements would be necessary for more accurate separation of amphibolites from amphibolite schists.

We are not able to distinguish eclogite lenses from amphibolite lenses without the density log. Figure 2 shows an open space between the 50 and 70API radioactivity values, which clearly separates the sets A and G.

The idealized log response curves from boreholes in the Pohorje metamorphic complex are shown in figure 3. We think that the lithologic interpretation of logs in Maribor boreholes is satisfactory. It is probable that some sections with veined calcite or lenses of marble remain hidden within the interpreted amphibolite and amphibolite schist. Figure 4 shows the influence of tectonics upon log measurements in the Pohorje series rocks. Borehole MB-6 which is situated close to the fault has on average lower values than borehole MB-3 which is in tectonically less affected part of the Pohorje metamorphic complex.

Finally we can comment the thicknesses of particular well log segments. Phyllite represents a relatively uniform lithologic sequence with inclusions of phyllitic quartzite which can reach up to ten metres and more. In gneiss and micaschist the amphibolite and/or eclogite lenses can reach thicknesses from 3 to 50m. The whole phyllitic sequence of low resistivity is about 50m thick (fig. 5). It is succeeded by a 10–20m thick phyllonitized and cataclastic zone. According to literature data it represents a Variscan overthrust zone. Below is the thick Pohorje or gneiss serie of high resistivity. It includes mylonitized and diaphthorised belts which are recognized by their lower specific electrical resistivity values, and if brittle, by larger caliper. With increasing depth the brittle sections become rare or absent.

Literatura

- Carmichael, R. S. 1982: Handbook of physical properties of rocks. – V. II., CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Carmichael, R. S. 1984: Handbook of physical properties of rocks. – V. III., CRC Press, Boca Raton Florida.
- Dresser Atlas 1985: Dresser Atlas log interpretation charts. – Rev. 02/85, Dresser Industries, Inc., Houston, Texas.
- Faninger, E. 1973: Pohorske magmatske kamenine. – *Geologija* 16, 271–315, Ljubljana.
- Faninger, E. 1982: Ali je predkambrij na Pohorju? – *Geologija* 25/1, 191–200, Ljubljana.
- Gatto, H. 1992: Relationen zwischen Konzentration, Aktivität und Wärmeproduktion von natürlichen radioaktiven Isotopen. – KTB Report 92/1, Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 13), 215–217, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- Gatto, H. & Casten, U. 1990: Bohrlochgravimetrisch ermittelte Dichte (BHGM) in

Vergleich zur Logdichte (RHOB). – KTB Report 90/1, Grundlagenforschung und Bohrloch Geophysik (Bericht 8), 247–264, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.

Gearhart Owen 1976: Formation evaluation data handbook. – Gearhart Owen Industries, Inc., Fort Worth, Texas.

Germovšek, C. 1954: Petrografske preiskave na Pohorju v letu 1952. – *Geologija* 2, 191–210, Ljubljana.

Hinterlechner-Ravnik, A. 1971: Pohorske metamorfne kamnine. – *Geologija* 14, 187–226, Ljubljana.

Hinterlechner-Ravnik, A. 1973: Pohorske metamorfne kamnine II. – *Geologija* 16, 245–271, Ljubljana.

Hinterlechner-Ravnik, A. 1977: Geochemical characteristics of the metamorphic rocks of the Pohorje mountains. – *Geologija* 20, 107–140, Ljubljana.

Hinterlechner-Ravnik, A. 1982: Pohorski eklogit. – *Geologija* 25/2, 251–288, Ljubljana.

Hinterlechner-Ravnik, A., Sassi, P. F. & Visona, D. 1991a: The Austridic eclogites, metabasites and metaultrabasites from the Pohorje area (Eastern Alps, Yugoslavia): 1. The eclogites and related rocks. – *Atti della Accademia nazionale dei Lincei, Rendiconti Lincei, Sci. fis. e nat.*, S. 9, V. 2, N°2, 157–173, Roma.

Hinterlechner-Ravnik, A., Sassi, P. F. & Visona, D. 1991b: The Austridic eclogites, metabasites and metaultrabasites and concluding remarks. – *Atti della Accademia nazionale dei Lincei, Rendiconti Lincei, Sci. fis. e nat.*, S. 9, V. 2, N°2, 175–190, Roma.

Keys, W. S. 1988: Borehole geophysics applied to ground-water investigations. – US Geological Survey, Open-file Report 87–539, Denver, Colorado.

Lelkes-Felvari, G. & Sassi, F. P. 1981: Outlines of the Pre-Alpine Metamorphisms in Hungary. – *IGCP No. 5, Newslett.*, V. 3, 89–99.

Mioč, P. 1977: Geološka zgradba Dravske doline med Dravogradom in Selnico. – *Geologija* 20, 193–230, Ljubljana.

Mioč, P. & Žnidarčič, M. 1982: Komparacija metamorfnih stijena Slovenije sa širim Jugoslavenskim područjem, 10. Jubilarni kongres geologa Jugoslavije. – *Zbornik radova, Knjiga 1*, 341–350, Organizacioni odbor 10. jubilarnog kongresa geologa Jugoslavije, Budva.

Mioč, P., & Žnidarčič, M. 1989: Tolmač za lista Maribor in Leibnitz. – *Zvezni geološki zavod, Beograd*.

Neubauer, F. & Sassi, F. P. 1993: The Austro-Alpine quartzphyllites and related Palaeozoic formations. In: von Raumer and Neubauer (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology in the Alps*. – Spr. Verlag, 423–439, New York, Berlin, Heidelberg.

Premru, U. 1976: Neotektonika vzhodne Slovenije. – *Geologija* 19, 211–249, Ljubljana.

Ravnik, D. 1991: Globoko znanstveno vrtnje v zemljino skorjo. – *Rudarsko-metalurški zbornik* 38/3, 369–384, Ljubljana.

Serra, O. 1986: Fundamentals of well-log interpretation, 2. The interpretation of logging data. – Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo.

Abstract

Two synthetic structures in the Maribor region were analysed as the most promising in Slovenia for the construction of an underground gas storage facility. In an equidistant geophysical reflection lines with a total length of 10 km were recorded and three boreholes were drilled. Structural models corresponding to two different horizons, the pre-Tertiary basement and the Neogene-Cenozoic (Quaternary) cover, were calculated using the Sierra-Minic program. Evaluation of synthetic velocity data (velocity analysis) according to the down-hole method and laboratory measurements on rock was carried out in order to perform correct interpretation necessary and to establish correct velocity equations. The porous rock

