

RAZPRAVE

GEORADARSKE MERITVE NA TRIGLAVSKEM LEDENIKU

AVTOR

Tomaž Verbič

Naziv: mag., univerzitetni diplomirani geolog

Naslov: Vogelna ulica 1, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: tomaz.verbic@guest.arnes.si

Telefon: 01 429 44 66

Faks: –

AVTOR

Matej Gabrovec

Naziv: dr., mag., univerzitetni diplomirani geograf in etnolog, višji znanstveni sodelavec

Naslov: Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, Gosposka ulica 13, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: matej@zrc-sazu.si

Telefon: 01 470 63 64

Faks: 01 425 77 93

UDK: 551.324.4(234.323.6)

COBISS: 1.01

IZVLEČEK

Georadarske meritve na Triglavskem ledeniku

Georadar je nedestruktivna elektromagnetna geofizikalna metoda za raziskovanje, pregledovanje in opazovanje (prekritih) materialov. Raziskovalno orodje so elektromagnetni valovi, ki jih oddajna antena pošilja v preiskovan material. Na Triglavskem ledeniku smo z georadarjem uspešno posneli 12 prerezov. Največja izmerjena debelina ledu je 9,5 m. Na podlagi georadarskih meritev smo izračunali prostornino ledenika, ki jebila v letu 2000 približno 35.000 m³.

KLJUČNE BESEDE

georadar, Triglavski ledenik, Julijske Alpe, Slovenija

ABSTRACT

The ground-penetrating-radar measurements of the Triglav Glacier

The ground penetrating radar (GPR; also georadar) is a non-destructive electromagnetic geophysical method of investigating, surveying and monitoring the (covered) materials. The electromagnetic waves, as a tool of research, are sent by the transmitting antenna into the investigated material. By means of the GPR, 12 profiles of the Triglav glacier were successfully scanned. The maximum thickness of the measured ice was 9.5 meters. On the basis of the GPR measurements, the volume of the glacier was calculated, amounting to about 35,000 m³ in the year 2000.

KEY WORDS

Ground penetrating radar/GPR, Triglav Glacier, Julian Alps, Slovenia

Uredništvo je prispevek prejelo 25. marca 2002.

1 Uvod

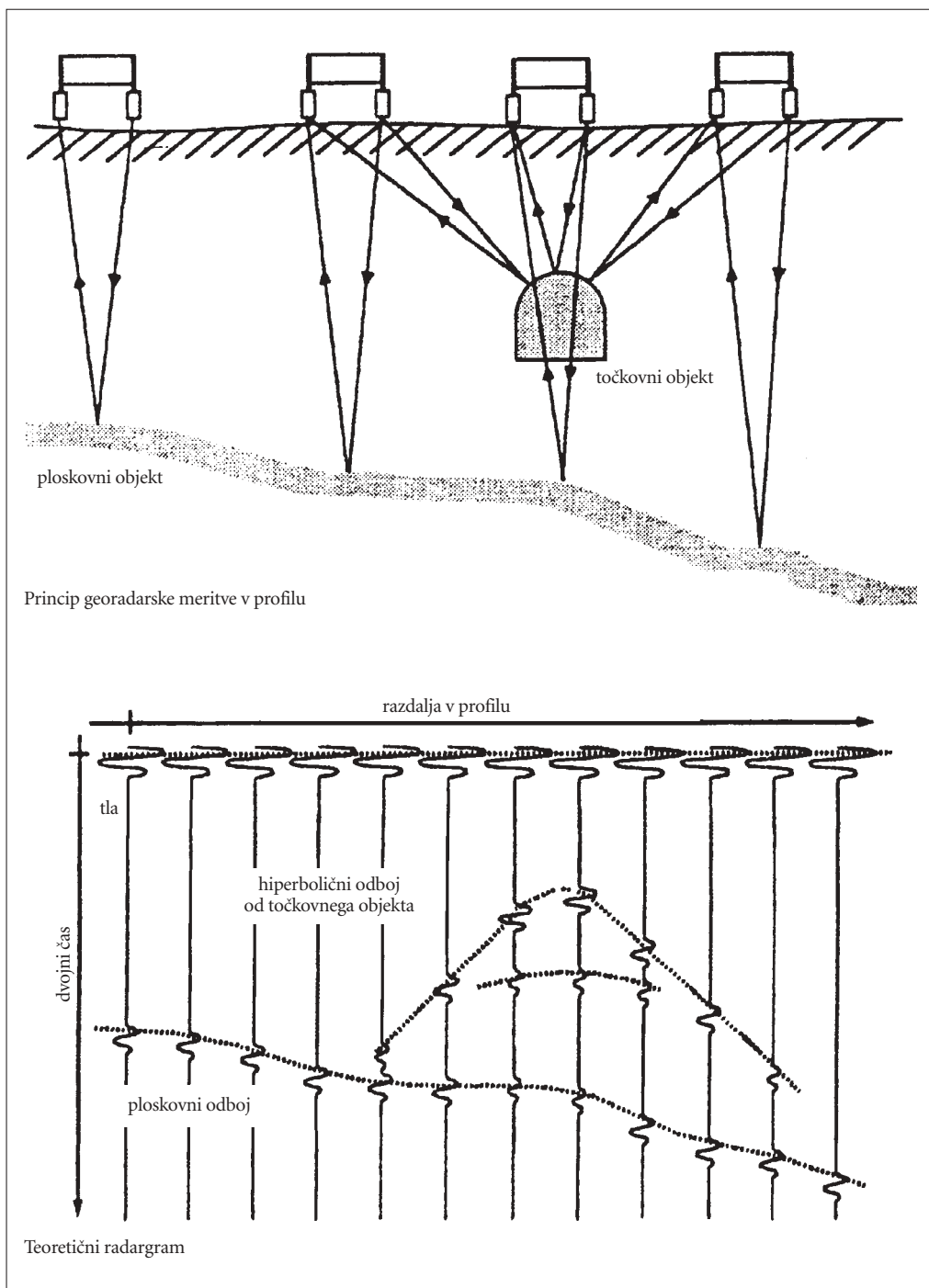
Triglavski ledenik vse od leta 1946 redno opazujejo in merijo sodelavci Geografskega inštituta Antona Melika Znanstvenoraziskovalnega centra Slovenske akademije znanosti in umetnosti (Meze 1955, Šifer 1963, 1976 in 1987, Gabrovec 1998). V prvih desetletjih merjenja so uporabljali povsem enostavne metode. Na obrobje ledenika so postavili merilne točke. Od teh merilnih točk so vsa kasnejša leta merili vodoravno in/ali navpično oddaljenost od ledenika. S pomočjo kompasa in vrvi so bile izmerjene razdalje od točke do točke, na tej podlagi so izdelali skice ledenika za posamezna leta in izračunali njegovo površino. Le-ta se je v dobre pol stoletja opazovanj skrčila na desetino prvotne, od začetnih 15 ha na 1,375 ha v letu 1999. V devetdesetih letih 20. stoletja zaradi hitrega krčenja in razpadanja ledenika stare merilne točke niso bile več uporabne, v tem času smo zato ledenik dvakrat izmerili s teodolitom z optičnim razdaljemerom (Gabrovec 2002). Mnogo večje od površinskih spremembe ledenika so prostorninske, ki pa jih s klasičnimi meritvami ni mogoče ugotavljati. Zgodovinske spremembe prostornine je mogoče raziskati s fotogrametričnimi metodami, trenutno debelino ledu pa je mogoče izmeriti z georadarjem. Njegovo delovanje ter rezultati meritev so prikazani v nadaljevanju te razprave.

‘RADAR’ je akronim, skovan leta 1934 iz angleškega izraza *Radio Detection And Ranging*. Georadar je že uveljavljen izraz v slovenski strokovni javnosti in opisuje elektromagnetno napravo, s katero preiskujemo različne naravne in tudi nekatere umetne agregate. V angleškem jeziku je zanj bolj uveljavljen izraz *ground penetrating radar* (GPR), zasledimo pa tudi sinonime, kot so *ground probing radar*, *subsurface radar* in *georadar*. Prve georadske meritve segajo že v leto 1929, in sicer prav v zvezi z ugotavljanjem debeline ledenika v Avstriji. Radarska tehnologija se je na eni strani močno razvila predvsem v letalstvu, pri preiskovanju materialov pa je bil georadar bolj ali manj pozabljen vse do poznih petdesetih let prejšnjega stoletja. Pred tem je kar nekaj letal ameriške vojske strmoglavilo, ko so skušala pristajati na Grenlandiji oziroma Antarktiki s pomočjo radarske kontrole. Radarski valovi prodrejo v led, a se odbijejo od podlage, zato so letala v slabem vremenu popolnoma zgrešila višino tal in strmoglavila na ledeno površino. Te nesreče so posredno vzbudile zanimanje za uporabo radarskih signalov za ugotavljanje sestave tal.

Do začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja je več raziskovalnih ustanov projektiralo unikatne georadske naprave za svoje potrebe. Georadar je bil predvsem orodje za preiskovanje stalno zamrznjenih tal ter ledu. Šele leta 1972 je podjetje *Geophysical Survey Systems Inc.* tržišču ponudilo prve komercialne naprave. Tedaj se je razvoj usmeril v številna nova področja (preglednica 1). Na tržišču danes zasledimo številne ponudnike georadske opreme, velika večina deleža pa pripada trem firmam: že omenjeni *Geophysical Survey Systems Inc.* iz ZDA, *Sensors & Software* iz Kanade in *Mala GeoScience* iz Švedske.

Preglednica 1: Glavna področja uporabnosti georadarja z nekaterimi aplikacijami.

področje	aplikacija
geologija in sorodne vede	debelina tal ali naplavin (zemljine) nad hribino, prelomi in razpoke, plastnatost, spremembe v litologiji, sedimentne teksture, nivo podtalnice, podpovršinski kraški pojavi, debelina ledu, debelina plazečega materiala ...
gradbeništvo	debelina in kvaliteta vgrajenih materialov (beton, asfalt ...), detekcija infrastrukture iz različnih materialov (na primer cevi in kabli) ...
hidrologija	globina vode, morfologija tal pod vodo, debelina sedimentov na dnu (jezera) ...
arheologija	prekrita arhitektura, zasuti izkopi (grobovi ...), prekrita infrastruktura (na primer ceste) ...
umetnostna zgodovina	prezidave sten, oken ali vrat, spremembe v tlorisih oziroma temeljih ...
varstvo okolja	detekcija prekritih odlagališč, prepojenost tal z nevarnimi snovmi ob izlitihi ...
forenzika	detekcija prekritih grobov



Slika 1: Temeljna teoretična načela georadske meritve (Mala Geoscience 1999).

Georadar je nedestruktivna elektromagnetna geofizikalna metoda za raziskovanje, pregledovanje in opazovanje (prekritih) materialov. Raziskovalno orodje so elektromagnetni valovi, ki jih oddajna antena pošilja v preiskovani material. Spremenljive lastnosti materiala(ov) so razlog, da se del valovanja ob različnih nezveznostih odbije – to zajame sprejemna antena, del pa pot nadaljuje. Različne »tarče«, ki jih georadar zazna, so nezveznosti v dielektričnosti in električni prevodnosti. Georadska kontrolna enota meri čas, v katerem je signal opravil pot od oddajne antene do tarče in nazaj do sprejemne antene. Meritve večinoma opravljamo v linijah oziroma prerezhih. Ker hitrost elektromagnetnih valov v različnih materialih lahko izmerimo, metoda omogoča dvodimenzionalno sliko preiskovanega materiala. Georadar je torej zelo podoben refleksijski seizmiki, le da pri slednji uporabljamo akustične (seizmične) valove. Slika 1 shematsko prikazuje princip georadarskih meritev.

2 Georadska metoda

2.1 Komponente georadske naprave

Opis temelji na georadarski napravi *RAMAC/GPR* izdelovalca *Mala GeoScience*, vendar se tudi druge naprave bistveno ne razlikujejo od opisane. Oprema tega proizvajalca je projektirana tako, da celotno meritev v običajnih razmerah lahko izvaja ena sama oseba. Georadarsko napravo sestavlja več elementov: kontrolna enota, elektronska enota (oddajnik in sprejemnik), antene, kabelske povezave, baterije, merilec razdalje in osebni računalnik z ustrežno programsko opremo za akvizicijo.

Kontrolna enota generira visokonapetostne električne signale, ki se prek optičnih kablov prenesejo do oddajnika. Tu se signal dodatno oblikuje in okrepi, nakar prek oddajne antene prodira v preiskovani material. Frekvenca generiranja signala je 100 kHz, kar omogoča do 200 meritev (sledi) v sekundi. Ko se signal odbije od tarče, ga zajame sprejemna antena, prek sprejemne elektronske enote (sprejemnika) in optičnega kabla pa se prenese nazaj do kontrolne enote. Kontrolna enota je povezana s prenosnim računalnikom. Akvizicijski program omogoča on-line spremljanje poteka (surovih) meritev na ekranu.

Vse našteje enote imajo lastno električno napajanje. Sistem *RAMAC/GPR* omogoča različne načine sprožanja signala. Signal lahko sprožimo prek tipkovnice ali posebnega stikala, lahko z določitvijo časovnega intervala, največkrat pa v praksi uporabljamo merilec razdalje, ki avtomatično sproži signal na zelenem dolžinskem intervalu. Kot merilec razdalje uporabljamo merilno kolo (na ravni površini) ali merilno »vrvico«. Omogočena je tudi GPS podpora.

Pri georadarskih meritvah poznamo tri vrste anten: ločene bistatične (nezaščitene), zaščitene in antene za meritve v vrčinah. Ločene bistatične antene (oddajna in sprejemna) imajo tudi ločeni elektronski enoti. Večinoma bistatične antene uporabljamo pri nižjih frekvencah, od 200 MHz navzdol vse do 10 MHz. Gre za povsem funkcionalno omejitve, saj je dolžina 50 MHz antene (razdalja med dipoloma) že štiri metre in je praktično ni možno okviriti. Bistatične antene imajo pred okvirjenimi veliko prednost, saj lahko z njimi z različnimi metodami izmerimo hitrost elektromagnetnih valov na lokaciji. Po drugi strani pa je v nekaterih akvizicijskih okoliščinah očitna tudi njihova pomanjkljivost, saj prestrežejo več nezaželenega šuma kot zaščitene okvirjene. Okvirjene antene zaradi funkcionalnih omejitev običajno pokrivajo le frekvence od 200 MHz do nekaj GHz. Antene za meritve v vrčinah so ločene bistatične, vendar za specifične potrebe posebej oblikovane.

2.2 Frekvenčno območje, globinski doseg meritev in ločljivost

Frekvenčno območje, globinski doseg meritev in ločljivost so med seboj povezani, in sicer teoretično velja: višja frekvenca določa manjši globinski doseg in večjo ločljivost. Na doseg meritev in ločljivost seveda vplivajo še številne lastnosti preiskovanega materiala ter razmere na mestu snemanja. Na splo-

šno pa je dušenje (izraz za pojevanje amplitude) pri nižjih frekvencah manjše, vendar je to hkrati povezano z večjo valovno dolžino, ki zmanjšuje ločljivost.

Antene so naravnane na neko centralno frekvenco, ki jo oddajajo in sprejemajo, vendar so seveda dovzetne za cel frekvenčni pas ob centralni frekvenci. Antene, ki so dostopne na tržišču, imajo večinoma frekvenčno širino dve oktavi, to pomeni, da frekvenčno območje zajema od polkratnika do dvakratnika centralne frekvence. Za 500 MHz anteno pomeni, da sprejema (oddaja) signal v frekvenčnem obsegu 250 do 1000 MHz.

Ločljivost je po Rayleighovem kriteriju velikostna kategorija, s katero opredeljujemo zmožnost ločevanja dveh bližnjih oblik, preden za opazovalca postaneta ena oblika. V prvi vrsti jo opredeljuje centralna frekvenca antene, hkrati pa nanjo močno vpliva relativna dielektrična konstanta oziroma dielektričnost materiala, v katerem izvajamo meritve. Valovna dolžina elektromagnetnih valov 500 MHz antene je v zraku 0,6 m. V materialu z relativno dielektrično konstanto 15 se ta zmanjša na 0,15 m. Valovna dolžina pa neposredno določa ločljivost. Nasploh je pojmovanje ločljivosti povezano z vprašanjem, ali želimo najti tridimenzionalni objekt, ali le ploskev ali pa morda le infrastrukturni kabel ali plastično cev. Da bi izločili tridimenzionalni objekt, na primer plast s spodnjo in zgornjo mejo, mora biti ta debelejša od četrte valovne dolžine ($\lambda/4$). To je primer vertikalne ločljivosti. Obstaja modelni diagram vertikalne ločljivosti v odvisnosti od frekvence (Davis, Annan 1989; Brezigar, Tomšič, Štern, Raškovič 1996).

Horizontalna ločljivost je definirana s prvim Frenselovim območjem (na primer Sigurdsson 1995). Premer tega območja ($r_f \approx \sqrt{\lambda Z:2}$) približno določa horizontalno ločljivost (r_f je polmer prvega Frenselovega območja, λ je valovna dolžina, Z pa globina tarče). Če je tarča približno enako velika ali večja kot prvo Frenselovo območje, je na radargramu korektno prikazana. Če pa je manjša ali celo bistveno manjša, se na radargramu pojavijo difrakcijski vzorci, ki popačijo dejansko sliko tarče na radargramu. Horizontalne ločljivosti torej ne smemo enačiti z zmožnostjo detekcije. Horizontalna ločljivost torej upada z globino tarče. V zgornji modelni formuli pa ni zajet vpliv dielektrične konstante, ki v naravnih razmerah prav tako vpliva na površino prvega Frenselovega območja.

Nizkofrekvenčne antene generirajo elektromagnetno energijo z večjo valovno dolžino. Ti imajo v določenih pogojih sposobnost globoke penetracije. Led je medij, ki izrazito dobro prevaja radarsko energijo, na Antarktiki so z georadarskimi meritvami določevali debelino ledu, ki marsikje presega 3 km. Na enak način so odkrili številna jezera pod antarktičnim ledom. Glede na naše izkušnje dajejo georadarske meritve na apnencih s 100 MHz antenami zelo dobre rezultate tudi na globini do 20 m. Po drugi strani pa je doseg 800 MHz antene v običajnih tleh (zemljini) manj kot meter. Hkrati pa je ločljivost v takih razmerah zelo velika, georadar s takimi antenami lahko »vidi« (izloči) plast debelo le nekaj cm. Pri kovinskih predmetih, na primer kovinski žici, pa loči tudi takšno, ki ni debelejša od nekaj mm.

2.3 Elektromagnetne lastnosti materialov in dušenje elektromagnetnih valov

Globina dosega elektromagnetnih valov, njihova hitrost in amplituda v različnih materialih je poleg izbire anten odvisna tudi od lastnosti materiala, skozi katerega penetrirajo. Nanje vplivajo poroznost, zrnatost, orientiranost zrn, namočenost in prisotnost soli, mineralna sestava in druge lastnosti. Ti parametri vplivajo na elektromagnetne lastnosti materialov. Za nas je najbolj pomembna dielektričnost, to je lastnost (konstanta), ki določa gostoto električnega polja v materialu glede na električno polje v vakuumu. Prsti ali kamnine, ki so visoko »dielektrične«, prepuščajo elektromagnetno energijo, ne da bi se ta razpršila. Višja dielektričnost določa manjšo hitrost elektromagnetnih valov. Večja je razlika v dielektričnosti materialov, ki jih preiskujemo, bolj izrazit je odboj elektromagnetnih valov, ki se generirajo na stiku. Če se dielektričnost spreminja postopoma z globino in je razlika v dielektričnosti na kratkih razdaljah majhna, dobimo le šibke odboje ali pa sploh ne.

Na prehod radarskih valov skozi material med fizikalnimi lastnostmi vplivata še električna prevodnost in magnetna prepustnost. Magnetna prepustnost je merilo sposobnosti materiala postati

magnetni, če je izpostavljen elektromagnetnemu polju. Večja je magnetna prepustnost, bolj se bo elektromagnetni signal oslabil med prehodom skozi material. Tla, ki vsebujejo večje količine železovih oksidov in hidroksidov, imajo visoko magnetno prepustnost in zato so slab prevodnik radarske energije. Električna prevodnost je merilo sposobnosti materiala, da prevaja električni tok. Če ima material visoko električno prevodnost, se bo elektromagnetna energija pri prehodu skozenj močno oslabila. Pri visoko prevodnem materialu se električna komponenta elektromagnetne energije v glavnem prenaša stran in se tako izgubi. Če se izgubi ena komponenta, elektromagnetno polje izgine. Visoko prevodni materiali so na primer tisti, ki so prepojeni s slano vodo (ali drugim elektrolitom) in tisti z veliko količino glinaste komponente. V določenih razmerah radarski valovi ne prodrejo globlje kot meter ne glede na frekvenco.

Preglednica 2: Dielektrična konstanta, hitrosti radarskih valov in njihovo dušenje v različnih materialih. Posamezne vrednosti so za različne materiale navedene v intervalnih vrednostih, ker nanje vplivajo številni specifični dejavniki. V praksi imata na širino intervala največji vpliv stopnja nasičenosti z vodo in kemična sestava te vode (Davis, Annan 1989; RAMAC/GPR Operating Manual 1999; Sigurdsson 1995).

material	dielektrična konstanta	prevodnost (mS/m)	hitrost elektromagnetnih valov (m/ns)	dušenje (dB/m)
zrak	1	0	0,3	0
sladka voda	80	0,01–30	0,03	0,1–20
morska voda	81–88	30.000	0,01	100–1000
led	3–4	0,01	0,15–0,17	0,01
permafrost	4–8		0,10–0,15	
pesek, suh	3–5	0,01	0,10–0,15	0,01–5
pesek, namočen	20–30	0,03–0,3	0,05–0,08	0,03–0,3
melj	3–30	1–100	0,06–0,100	1–100
glina	4–40	1–300	0,07–0,15	4–800
premog	4–5		0,13–0,15	
apnenec	4–16	0,4–1	0,07–0,11	0,5–20
dolomit	6–8		0,09–0,12	
skrilavec, glinovec	5–15	1–100	0,07–0,13	1–100
granit	5–15	0,01–1	0,11–13	0,04–2
kvarcit	4		0,15	
beton	4–10		0,09–0,15	
asfalt	3–5		0,13–0,17	

2.4 Oblika georadskega signala

Številni uporabniki menijo, da radarska energija prodira iz antene v globino v obliki kot igla tankega curka. Dejstvo je seveda drugačno. Vse georadske naprave, ki jih lahko dobimo na tržišču, oddajajo energijo v tla v obliki, podobni eliptičnemu stožcu.

Antena (zaščiten ali nezaščiten), položena na tla, ustvari tako imenovani talni spoj (*ground coupling*). Talni spoj je zmožnost elektromagnetnega polja, da se bolj usmeri v tla kot v zrak. Višja je dielektričnost površinskega materiala, manjša je hitrost elektromagnetnih valov in ožji je snop eliptičnega stožca. Eliptični stožec se širi počasneje, če si v globino sledijo plasti z vedno večjo dielektričnostjo. Če je dielektričnost plasti v podlagi vedno manjša, je stožec že pri majhnih globinah lahko dokaj širok. Lom elektromagnetnih valov v plasteh z različno dielektričnostjo je zato izredno pomemben in dolo-

ča kvaliteto meritev. Velikost eliptičnega prereza, ki ga imenujemo tudi tipalo ali stopalo, lahko približno ocenimo z naslednjo formulo (Conyers, Goodman 1997; Annan, Cosway 1992):

$$R \approx (\lambda : 4) + (Z : \sqrt{K + 1}),$$

kjer je R daljša polos elipse, λ valovna dolžina elektromagnetnih valov v materialu, Z globina tarče oziroma eliptičnega prereza in K dielektrična konstanta materiala.

Tipalo georadarja torej nima oblike igle temveč obliko eliptičnega stožca, v preseku elipse, imenujemo ga tudi stopalo. Tako georadar ne »vidi« oziroma ne snema le neposredno pod anteno, ampak tudi pred in za njo ter ob njej. Velikost preseka stopala je odvisna od globine preiskovanega horizonta, snemalne frekvence in elektromagnetnih lastnosti materiala.

2.5 Šum

Šum pri georadarskih meritvah predstavljajo različne komunikacijske naprave, ki uporabljajo elektromagnetne valove: radio, televizija, mobilna telefonija in druge. Pri delu ob teh aparatih lahko pride do interference med napravo in georadarjem. Večina teh naprav uporablja ozek pas frekvenčnega območja, tako da lahko ta šum pri obdelavi naknadno izločimo, vendar je bolj priporočljivo, da se mu, če je možno, izognemo že pri akviziciji. Večja težava je v bližini stacionarnih anten, letališč in podobno. Pri nezaščiteneh antenah moramo upoštevati še objekte na mestih georadarskih meritev: drevje, zgradbe, zračne vode in podobno. Večino teh шумov moramo na terenu najprej natančno evidentirati, da nas pri interpretaciji ne zavajajo. Lažne odboje dobimo tudi pri snemanju v zaprtih prostorih, na primer rudnikih ali predorih. Georadarsko snemanje z nezaščiteneh antenami je močno omejeno v gozdu z gostimi krošnjami.

Posebno vrsto šuma predstavljajo tudi vsi objekti v tleh, ki niso tarča našega zanimanja, pa jih georadar zazna. Pri interpretaciji nas ti objekti lahko zmotijo. Proti takemu šumu se praktično ne moremo zavarovati, lahko le izberemo antene, za katere menimo, da bodo objekt, ki ga želimo poiškati, najbolj kvalitetno izločile.

Faktor učinka naprave RAMAC/GPR je 150 dB in več. To jo glede na dostopno literaturo (Davis, Annan 1989) uvršča v zgornji kakovostni razred dostopnih georadarskih naprav. Davis in Annan (1989) sta konstruirala modelni diagram vpliva kvalitete georadarske naprave na globinski doseg v odvisnosti od dušenja (glej tudi Brezigar, Tomšič, Štern, Rašković 1996).

3 Georadarsko snemanje Triglavskega ledenika

3.1 Akvizicija

Prereze smo snemali 5. in 6. julija 2000. Sneg je tedaj prekrival skoraj ves ledenik. Georadarske prereze smo snemali s 500 MHz zaščiteno anteno. Razdalja med sprejemnim in oddajnim elementom je 20 cm. Snemalno okno smo nastavili na 144 ns, kar nam je, glede na hitrosti elektromagnetnih valov v ledu, omogočalo snemanje do globine 12 m. V tem oknu smo snemali s 512 vzorci na vsaki meritvi oziroma sledi. Debelina enega vzorca v sledi je pri danih parametrih torej okoli 2,5 cm. Snemali smo s tako imenovano zvezno metodo refleksijskega profiliranja. Razdaljo med meritvami (gostota sledi) v prerezu smo nastavili na 10 cm. Kot merilec razdalje smo uporabili merilno vrstico.

Izbrali smo možnost združevanja sledi. V našem primeru je vsaka zapisana sled (na vsakih 10 cm) »aritmetično povprečje« osmih zaporednih združenih sledi, ki so bile izmerjene na vsakih 1,25 cm. S tem je do dobršne mere izključena možnost »slučajnih« шумov. Tako snemanje s sodobnimi georadarskimi napravami ni problem, saj omogočajo velike frekvence vzorčenja tja do 100 GHz.

Razdalje med prerezi so bile različne glede na naravne danosti oziroma glede na možnost varovanja. Vsi prerezi so potekali vzdolžno, od vrha proti dnu ledenika. Topografijo prereza oziroma njegovo

geodetsko postavitve smo zagotavljali s klasičnimi geodetskimi meritvami. Uspešno smo posneli 12 prerezov, ki si sledijo od vzhoda (prerez 1) proti zahodu (prerez 12).

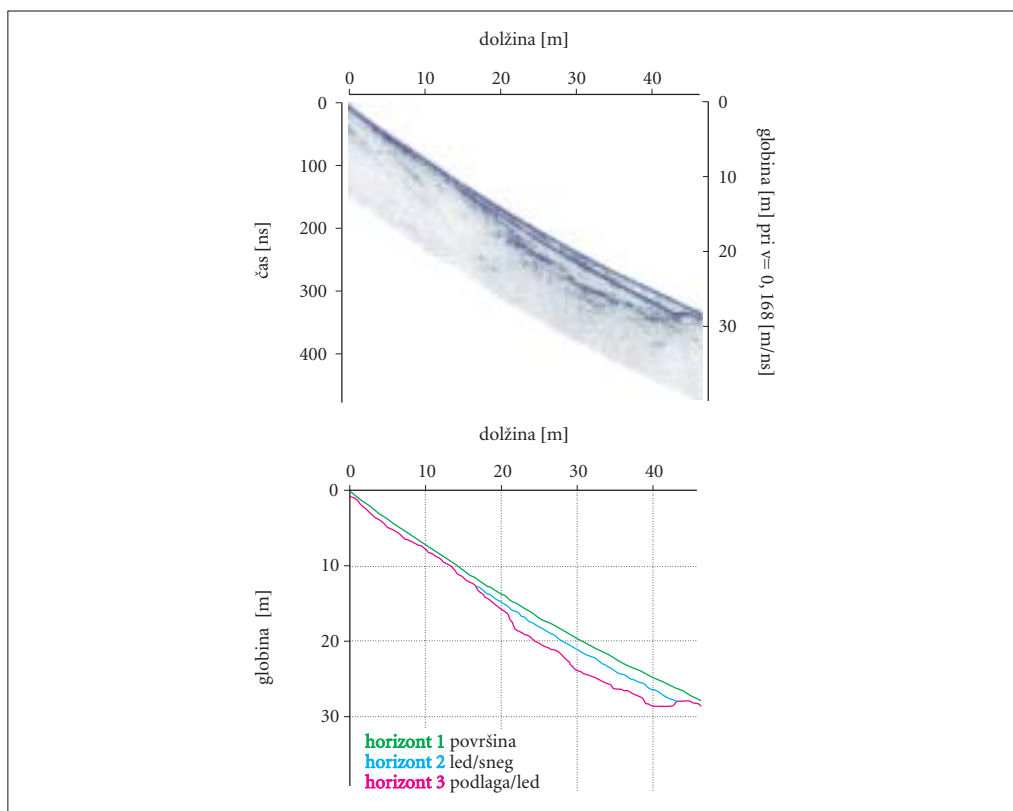
3.2 Obdelava prerezov

Prereze smo obdelali s programom REFLEXW (*Sandmeier Scientific Software Development*). Obdelavo so sestavljali:

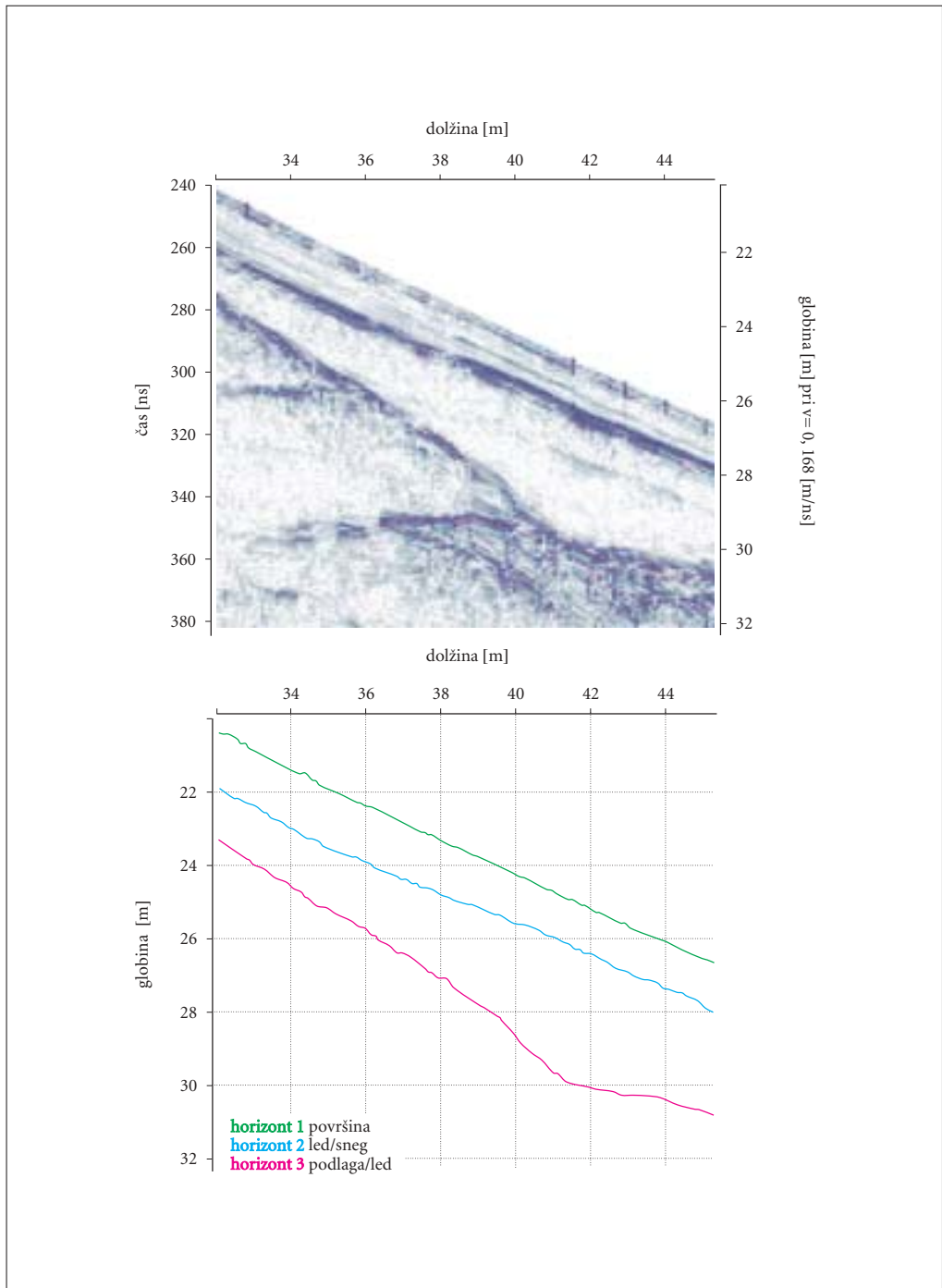
- odstranitev šuma samega instrumenta (*DC subtract*),
- odstranitev šuma v ozadju (*background removal*),
- odstranitev podvojenih sledi,
- kreiranje frekvenčnega pasu,
- okrepitev signala,
- hiperbolična adaptacija, in
- migracija
- statična (topografska) korekcija.

Migracijo smo pri končnih izpisih opustili, v konkretnem primeru smo ocenili, da kljub nekaterim izboljšavam v celoti poslabša jasnost oziroma povednost obdelanega radargrama.

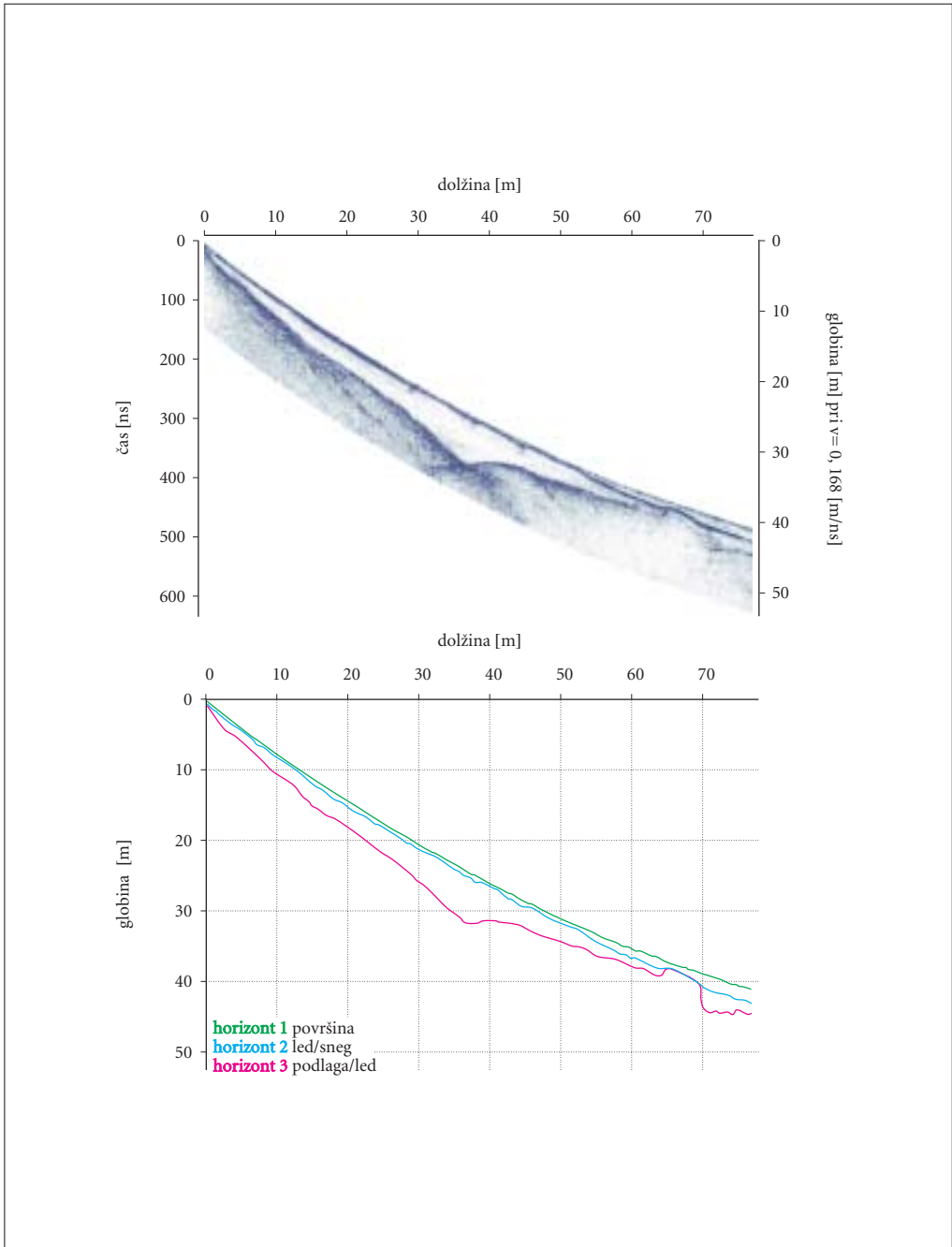
3.3 Opis in interpretacija prerezov



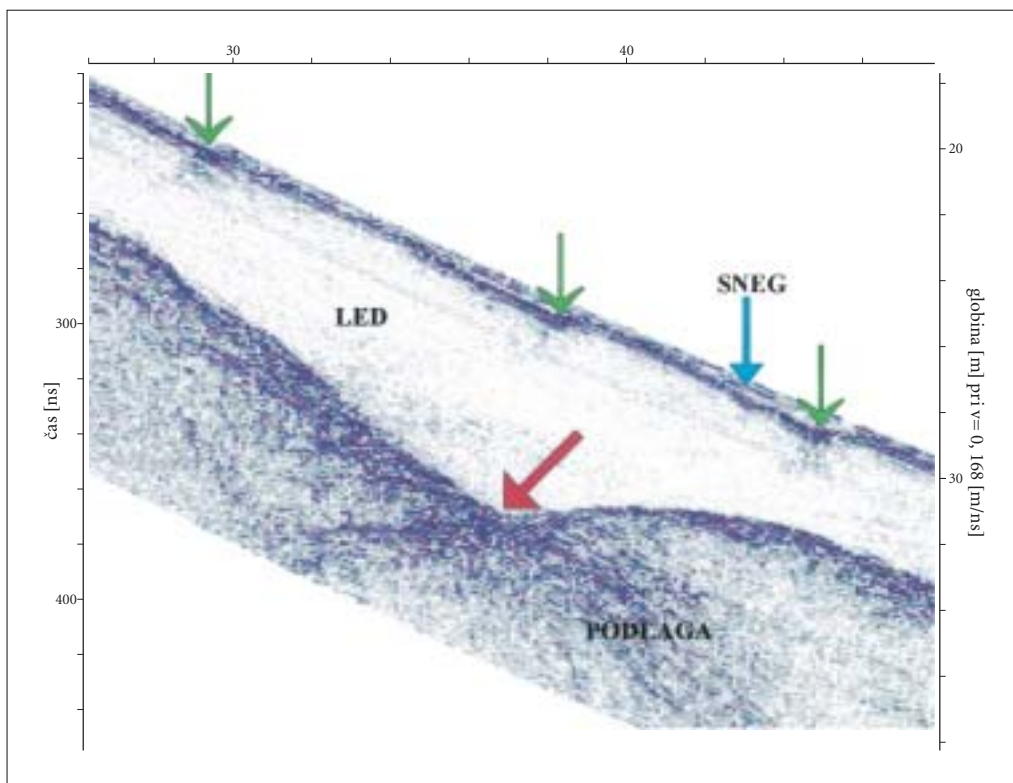
Slika 2: Prerez 3.



Slika 3: Prerez 5.



Slika 4: Na izseku prereza 5 so z zelenimi puščicami označena mesta z nakopičenim kamnitim drobirjem, rdeča puščica pa kaže na pregib v podlagi, ki ga razlagamo kot morfološki odraz naravnice slatenskega pokrova.

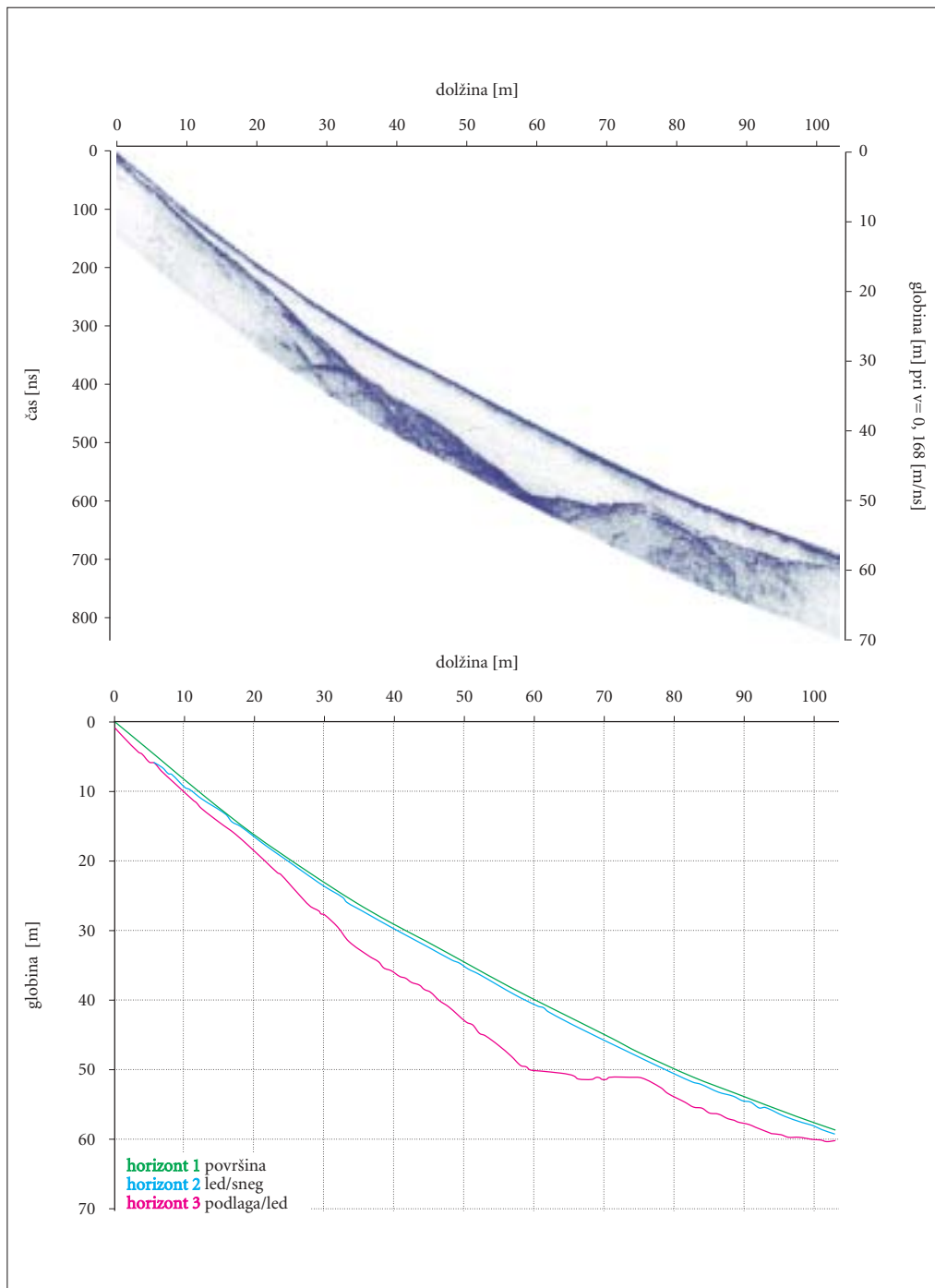


Slika 5: Prerez 8.

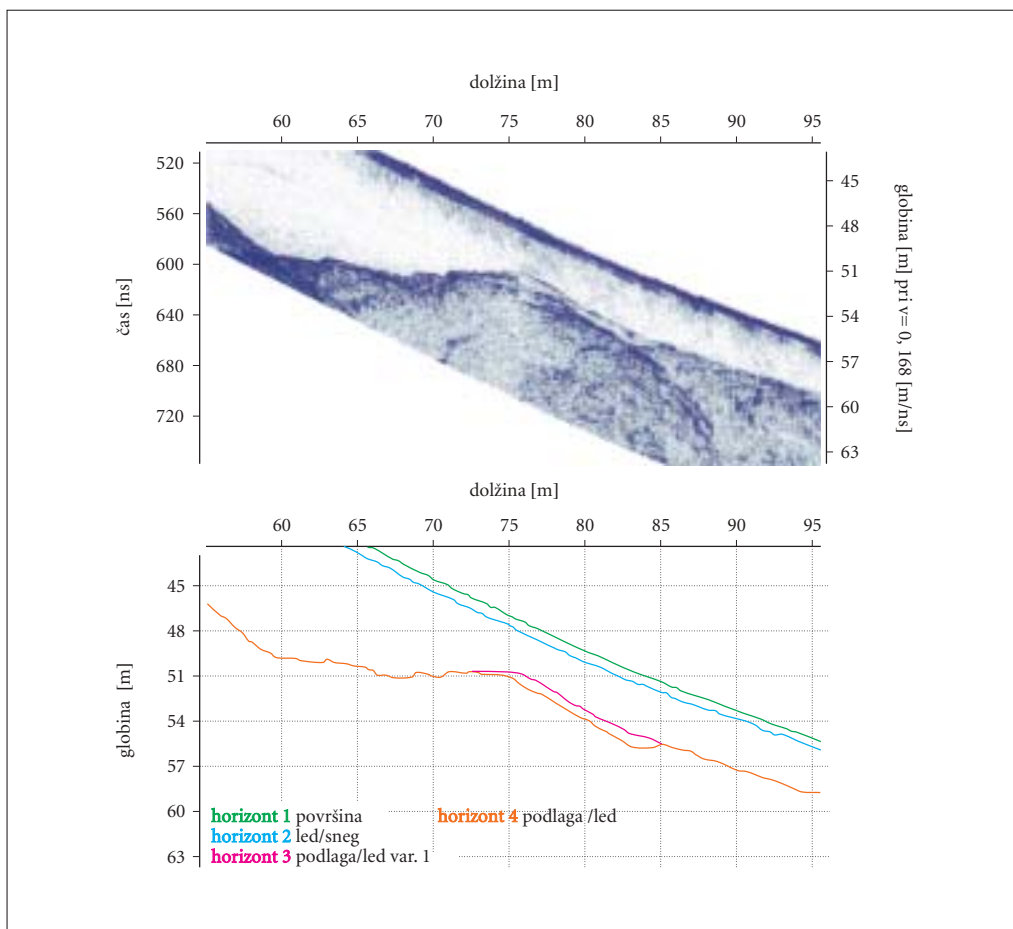
Najprej moramo opozoriti na dejstvo, da je georadarsko stopalo pod ledom (dielektričnost 3–4) relativno veliko. Na podlagi formule (2) lahko približno ocenimo površino stopala pod šest metrov debelim ledom na okoli 20 m². Hkrati moramo upoštevati tudi prvo Frenselovo območje (formula 1), premer tega je na globini 6 m okoli 2 m. Zaradi relativno velikega premera in zaradi neravne podlage (tudi talna morena s kosi grušč) se na stiku podlage z ledom pojavljajo številne difrakcije. Glede na odboje v sami podlagi menimo, da je podlaga ponekod zglajena, ponekod pa gruščnata. Natančnejših podatkov o značilnostih podlage pa ne moremo dati. V posameznih prerezhih lahko opazujemo razpoke v podlagi.

Najizrazitejša oblika v podlagi je prav gotovo morfološka stopnja, kjer se pobočje v podlagi v izrazitem kolenu prelomi iz strmega v izrazito položnega (na primer prerezi 5, 8, 9 in 12, slike 3, 4, 5, 7, 9). Pod ledom poteka naravnica slatenskega pokrova. Po tej naravnici je na dachsteinski apnenec narinjen zgornjetriasni masivni apnenec (Jurkovšek 1987). Z veliko gotovostjo lahko rečemo, da pregibna kolena na prerezhih predstavljajo traso omenjene naravnice. Na nekaterih prerezhih lahko interpretiramo tudi naravnico samo (prerez 12, slika 9, 10). Sicer pa taki pregibi v pobočju zaradi zapletene geometrije odbojev popačijo radargram, tako da je interpretacija takih odsekov otežena. Vsekakor bi bila za boljšo interpretacijo kamninske podlage nujna dodatna snemanja z nižje frekvenčnimi antenami.

Na vseh prerezhih sta meji med podlago in ledom ter ledom in snegom izraziti. Konstrukcija oziroma interpretacija na radargramih je večinoma enoznačna. Na redkih mestih (na primer prerez 8, slika 6) lahko izločimo dve ali več variant interpretacije, vendar se tudi te variante med seboj bistveno ne razlikujejo. Občasno lahko na radargramih opazimo nezveznosti, ki so posledica težav pri akviziciji.



Slika 6: Izsek prereza 8.

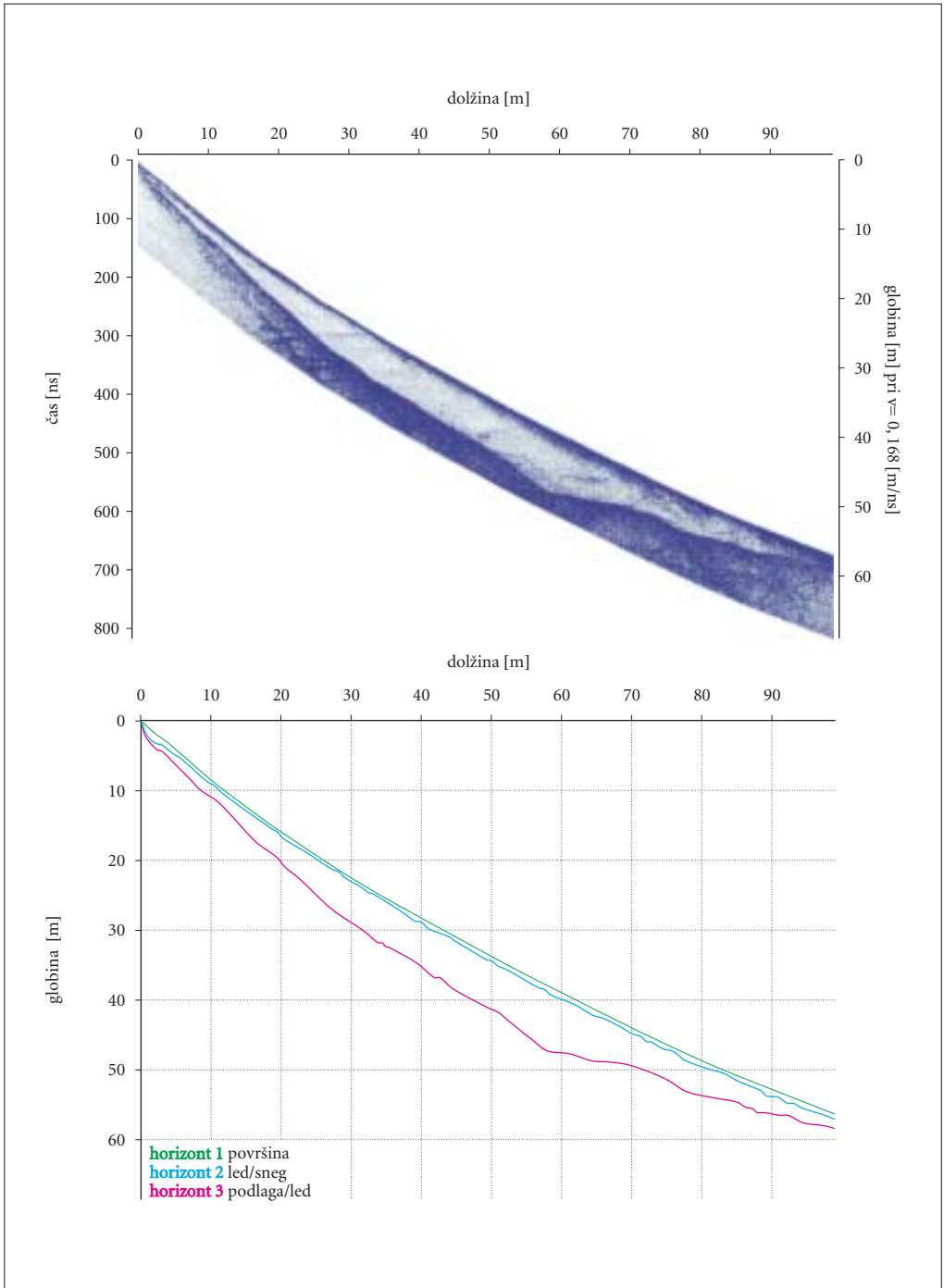


Slika 7: Prerez 9.

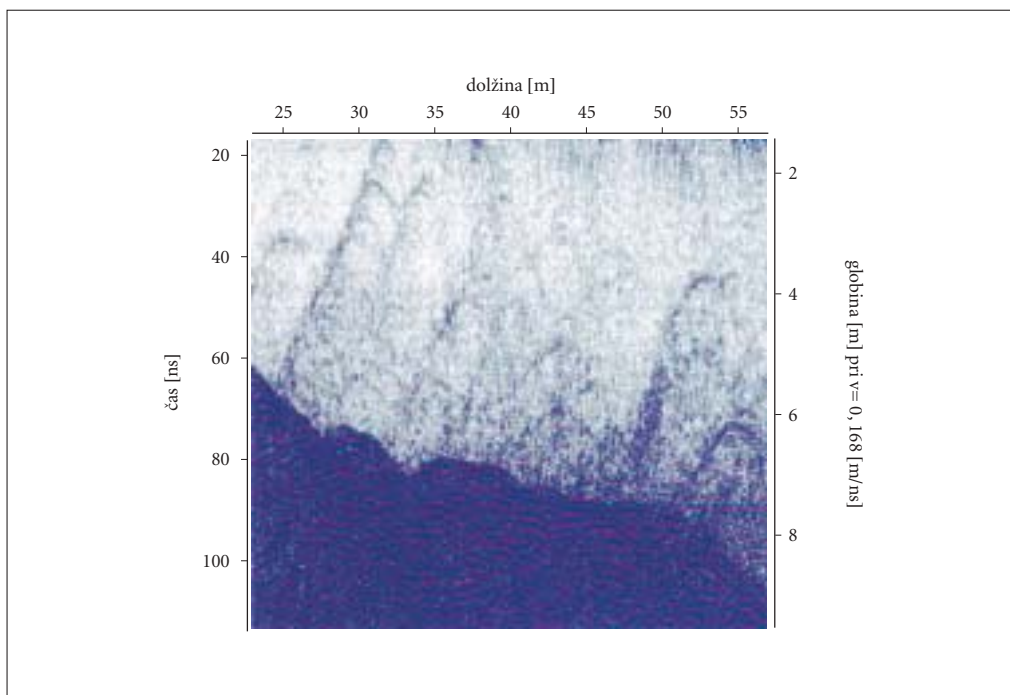
Debelina snega je bila do 3 metre. Sneg je bil debelejši na obeh bokih ledenika, medtem ko v osrednjem delu nikjer ni presegal debeline enega metra (slike 4 do 7). Debelina je bila večja na vznožju in manjša v zgornjem delu. Na prerezih na bokih ledenika (prerezi 1, 2, 3, 11, 12; slike 2, 9 in 10) lahko opazujemo plastnatost snega. Glede na to, da se je sneg na koncu talilne dobe leta 1999 na ledeniku povsem stalil, sklepamo, da pri tem opazujemo priraščanje snega v eni sami sezoni.

Pod snegom lahko na številnih mestih na ledeni površini opazujemo zgostitve odbojev z izrazitimi amplitudami. Te so morfološko »vdrt« v led (sliki 3 in 4). Menimo, da so to odboji od pobočnega grušča na ledeni površini. Zaradi sposobnosti akumulacije toplote je taljenje ledu pod gruščem bolj intenzivno.

Debelina ledu je največ do 9,5 m na prerezu 8. Na bokih (prerezi 1, 2, 3 in 12, sliki 2 in 9) ne presegajo 3 m. V ledu ne opazimo notranje plastnatosti. Izjema je prerez 12 (slika 10), kjer lahko v ledu opazujemo sicer prekinjen horizont z izrazitimi odboji. Znotraj ledu so najizrazitejši hiperbolični odboji (slika 8), ki so posledica prisotnosti posameznih kosov grušča v ledu samem. Glede na adaptacijske hiperbole menimo, da gre za manjše kose. Grušč v ledu se v prerezih pojavlja v izrazito spremenljivih količinah.



Slika 8: Izsek prereza 9 pred migracijo in statično korekcijo.

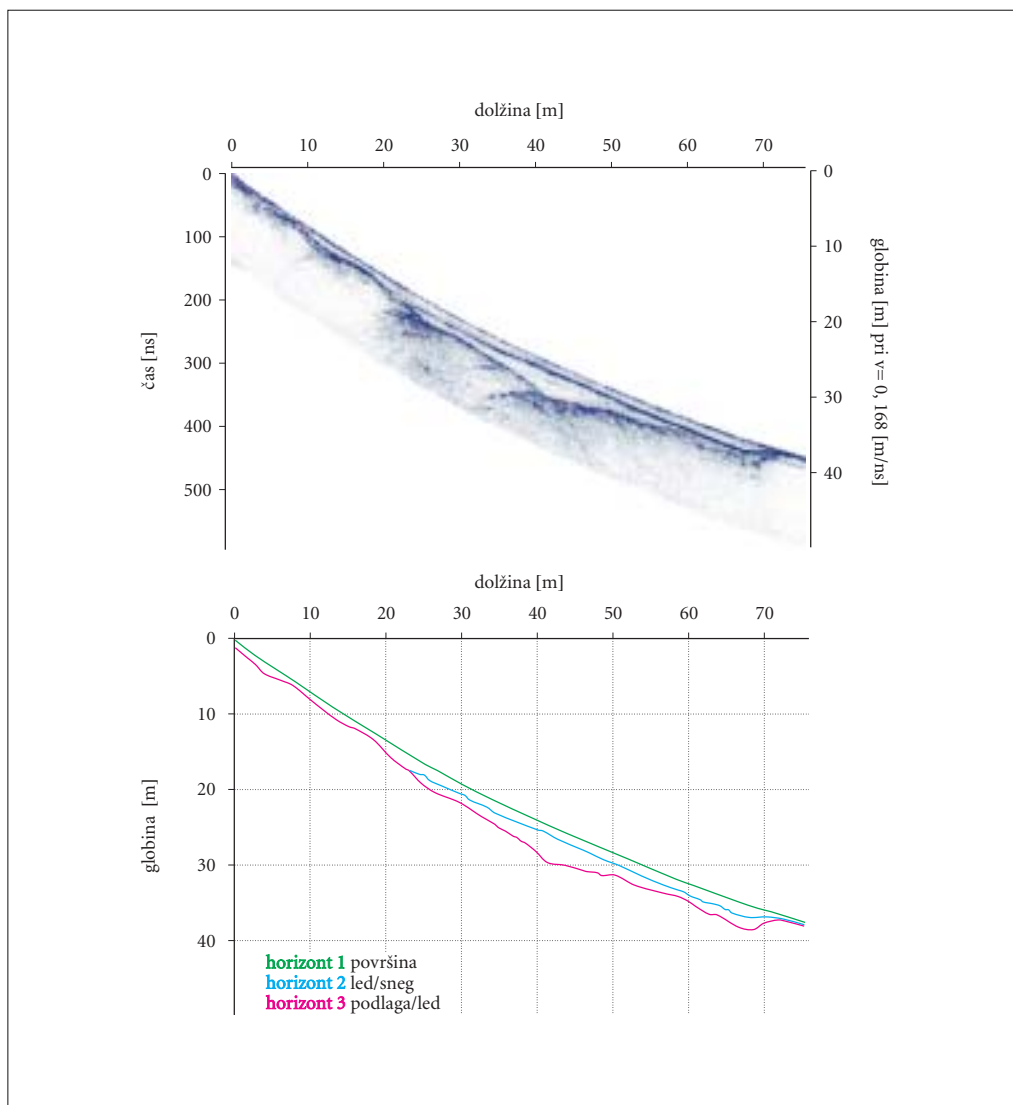


Slika 9: Prerez 12.

4 Prostornina ledenika

Med snemanjem georadarskih prerezov smo njihovo lego tudi geodetsko izmerili. Meritve s teodolitom z optičnim razdaljemerom je opravil Franjo Drole z Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU, izmerjen je bil začetek in konec vsakega prereza, vmesne točke pa na vsakih 5 do 10 m. Na posameznih prerezih smo tako izmerili 9 do 24 točk. Skupaj je bilo tako na 12 prerezih geodetsko izmerjenih 195 točk. Za te točke imamo podatke o geografski širini in dolžini ter nadmorski višini, iz obdelanih radargramov pa smo na teh točkah izmerili debelino snega in ledu. S pomočjo teh podatkov smo tako za vse te točke izračunali nadmorsko višino skalne podlage pod ledenikom. Slednji podatek bo ključen pri izračunavanju prostornine ledenika v preteklih razdobjih. Za posamezna leta v drugi polovici 20. stoletja načrtujemo izdelavo digitalnega modela višin površine takratnega ledenika, s pomočjo poznavanja skalne podlage ledenika bomo lahko izračunavali takratne prostornine.

Za izračun prostornine ledenika pa je pomemben le podatek o debelini ledu. Ker so georadarske meritve potekale v času, ko je bil ledenik pod snegom in njegova meja ni bila povsod vidna, smo posamezne meritve začeli nad zgornjim robom ledu in končali pod spodnjim robom. Prvi, najbolj vzhodni prerez pa celo v celoti poteka po snegu ob ledeniku. Severovzhodni del ledenika je bil leta 1999 sicer popolnoma prekrit z gruščem, georadarske meritve pa so lepo pokazale tamkajšnji led, zato smo vse točke v tem delu vključili v obdelavo. Skupaj smo tako v obdelavo vključili 146 točk s prisotnostjo ledu z enajstih prerezov. Točkovne podatke o debelini ledenika smo interpolirali s pomočjo računalniškega programa IDRISI z modulom TINSURF. Točnost interpolacije je v podrobnostih v primeru drobno razčlenjenega kraškega reliefa v podlagi ledenika vprašljiva, kljub temu pa lahko na podlagi teh rezultatov dobimo solidno oceno prostornine ledu. Ta je bila ob meritvah približno 35.000 m³.



Slika 10: Izsek prereza 12.

5 Sklep

Georadarsko snemanje je dalo na primeru Triglavskega ledenika odlične rezultate. Izmerjena debelina ledu je največ devet metrov in pol, povprečna debelina pa približno tri metre. Meritve so potrdile predhodne strokovne ocene. Na podlagi georadarskih meritev smo izračunali prostornino ledenika, ki je bila leta 2000 okoli 35.000 m³. Prvi izračuni fotogrametričnih analiz kažejo, da se je samo na območju, kjer se je ohranil ledenik do leta 1999, v predhodnih sedmih letih stalilo okoli 100.000 m³ ledu (Gabrovec 2002). Primerjava obeh podatkov torej jasno nakazuje ledenikovo prihodnost.

6 Viri in literatura

- Annan, A. P., Cosway, S. W. 1992: Simplified GPR Beam Model for Survey Design. 62nd Annual International Meeting. Soc. Explor. Geophy. New Orleans.
- Brezigar, A., Tomšič, B., Štern, J., Raškovič, G. 1996: Georadar – visokoločljiva geofizikalna elektromagnetna naprava. *Geologija* 37–38. Ljubljana.
- Conyers, L. B., Goodman, D. 1997: Ground – Penetrating Radar: an introduction for archaeologists. Walnut Creek.
- Davis, J. L., Annan, A. P. 1989: Ground – Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37. Oxford.
- Gabrovec, M. 1998: The Triglav Glacier between 1986 and 1998 (Triglavski ledenik med letoma 1986 in 1998). *Geografski zbornik* 38. Ljubljana.
- Gabrovec, M. 2002: Triglavski ledenik. Visokogorska jezera v vzhodnem delu Julijskih Alp. Ljubljana.
- Jurkovšek, B. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Beljak in Ponteba. Beograd.
- MalaGeoscience 1999: RAMAC/GPR Operating Manual Ver. 3. Mala.
- Meze, D. 1955: Ledenik na Triglavu in na Skuti. *Geografski zbornik* 3. Ljubljana.
- Sigurdsson, T. 1995: Ground penetrating radar for geological mapping. Aarhus.
- Šifrer, M. 1963: Nova geomorfološka dognanja na Triglavu. *Triglavski ledenik v letih 1954–1962*. *Geografski zbornik* 8. Ljubljana.
- Šifrer, M. 1976: Poglavitna dognanja na Triglavskem ledeniku v letih 1963 do 1973. *Geografski zbornik* 15. Ljubljana.
- Šifrer, M. 1987: Triglavski ledenik v letih 1974–1985. *Geografski zbornik* 26. Ljubljana.

7 Summary: The ground-penetrating-radar measurements of the Triglav Glacier

(translated by Branka Klemenc)

The Triglav glacier lies in the Julian Alps, Slovenia. From 1946 onwards it has been regularly observed and measured by the associates of the Anton Melik Geographical Institute at the Scientific Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts. During the early decades of measuring, simple methods were only used. Marker poles were fixed at the edge of the glacier. From these marker poles horizontal and/or vertical distances of the glacier were measured in the following years. Distances from point to point were measured by means of a compass and rope and sketches of the glacier were drawn on this basis for individual years, and its size was calculated. In a gross half of a century of observations it diminished to a mere tenth of its former size, i. e. from the initial 15 ha in 1946 to 1.375 ha in 1999. In 1999 we also began to investigate the changes in the volume of the glacier. Photogrammetric methods were used for the study of historical changes, and the ground-penetrating-radar (GPR) measurements were taken for the study of its current state.

The ground penetrating radar (GPR; also georadar) is a non-destructive electromagnetic geophysical method of investigating, surveying and monitoring the (covered) materials. The electromagnetic waves, as a tool of research, are sent by the transmitting antenna into the investigated material.

GPR measurements of the Triglav glacier were taken on 5 and 6 July, 2000. The glacier was almost completely covered with snow at that time. The GPR profiles were scanned with a protected 500 MHz antenna. The distance between the transmitting and receiving elements was 20 cm. The scanning window was set to 144 ns, which, considering the speed of electromagnetic waves in ice, rendered possible the scanning to the depth of 12 m. Distances between the profiles were different, depending on the physical conditions or the possibility of protection. All the profiles ran longitudinally, from the top of the glacier to its lower edge. The topography of the profile or its surveying setting was granted by the classical

surveying measurements. 12 profiles were successfully scanned, following one another in the westward direction. The borders, one between the ground and the ice and another between the ice and the snow, are explicit on all the profiles. The construction and interpretation of radargraphs are mainly uniform. There are only rare places where two or more different interpretations can be made, though even these variations do not vary a lot. The maximum thickness of the ice amounts to 9.5 m, and the average thickness is about three meters.

In the case of the Triglav glacier the GPR scanning gave excellent results. The measurements corroborated previous expert assessments. Calculated on the basis of the GPR measurements was the volume of the glacier which is, presently, about 35,000 m³. The first calculations of the photogrammetric analyses show that during the seven years prior to 1999, about 100,000 m³ of ice melted only in the area where the glacier was then still preserved. A comparison of both the above stated data clearly indicates the prospects of the glacier.