

DETEKCIJA PODZEMNIH VODA I TOKOVA GEORADAROM*

Aleksandar RISTIĆ, Dušan PETROVAČKI, Miro GOVEDARICA, Srđan POPOV
Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu

REZIME

U radu je obrazložen princip i jedna primena nove tehnologije detekcije podzemnih voda i tokova u podpovršinskom sloju 0-10m Georadarom. Neposredna realizacija metode je izvršena na lokaciji "Špic" na Ribarskom ostrvu u Novom Sadu za proces iznošenja materijala iz propusnog sloja nasipa prilikom nadolaženja ili povlačenja vode, odnosno promene nivoa podzemnih voda u zoni stratuma. U rezultate ostvarene skeniranjem Georadarom spadaju egzaktne dimenzije i lokacija zone iznošenja materijala iz propusnog sloja nasipa. Rezultati analize na lokaciji "Špic" su iskorišćeni za prepoznavanje istog procesa na skenovima generisanim po stazi neposredno uz Paličko jezero u Subotici.

Ključne reči: Georadar, GPR, sken, vodopropusni sloj, odbrambeni nasip

1. UVOD

Metode za procenu statusa podpovršinskih voda i tokova, kao kompleksnu oblast od velikog značaja za adekvatno upravljanje hidrološkim resursima, moguće je unaprediti primenom nove tehnologije skeniranja Georadarom (*Ground Penetrating Radar - GPR*). Primena tehnologije skeniranja Georadarom obezbeđuje brzo i efikasno prikupljanje podataka za većinu hidroloških pojava u podpovršinskom sloju (0-10m), na promenljivim, proizvoljno definisanim lokacijama. U osnovne tipove primene ove tehnologije spada analiza stanja zemljanih nasipa oko korita reka i sedimentnih naslaga pre i posle poplava ([12], [13]), detekcija naslaga mulja u rekama i jezerima ([6], [7]), egzaktno lociranje klizišta [8], detekcija nivoa i promena nivoa podpovršinskih podzemnih voda [11], horizontalna i vertikalna migracija padavina i hemikalija kroz zemljište

u podpovršinskom sloju ([9], [10]), analiza zapreminskog udela vlage u zemljištu ([4], [5]) itd.

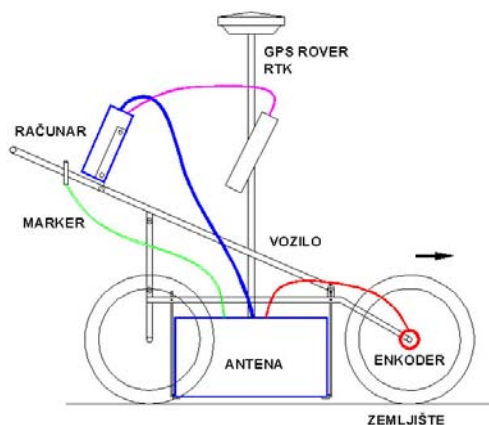
Okosnica problema razmatranog u radu je analiza dejstva rečnog toka i priobalnih podzemnih voda na propusni sloj nasipa, te njegova veza sa rečnim sedimentom za vreme visokog vodostaja u kritičnim zonama nasipa. S obzirom da su poplave fenomen sa teško predvidljivom prirodom neophodno je, na osnovu analiza formirati adekvatan mehanizam za periodično sprovođenje brze i efikasne preventivno dijagnostičke kontrole stanja odbrambenih nasipa. Kompletna analiza unutrašnje strukture nasipa je sprovedena na dve lokacije od interesa za navedenu tematiku, pri čemu je prva lokacija odabrana za detaljnu razradu metode, dok je druga iskorišćena za potvrdu dobijenih rezultata.

2. OSNOVE TEHNOLOGIJE DETEKCIJE

Georadar je uređaj namenjen za detekciju i precizan prikaz lokacije i oblika promena u podpovršinskim slojevima zemljišta, a čine ga sklop predajne i prijemne antene, upravljačka jedinica sa operativnim sistemom, baterijsko napajanje i pokretnog vozila. Vozilo - tricikl je opremljeno obrtnim inkrementalnim enkoderom koji pri skeniranju obezbeđuje tačno pozicioniranje centra antene iznad ose cevovoda [1]. Prateći uređaj je GPS (*Global Positioning System*) rover kojim se mere prostorne koordinate karakterističnih tačaka na površini. Operacije skeniranja radnog područja i merenja koordinata mogu da se vrše nezavisno ili sinhronizovano. Tehnologija nezavisne akvizicije podrazumeva da se u prvom koraku Georadarom detektuje promena, a centar antene pozicionira iznad karakterističnog mesta promene, na primer početka promene. Završni korak akvizicije je merenje koordinata centra antene GPS roverom. Sinhronizovana akvizicija podataka podrazumeva da se kontinuirano beleže tačke

* Ovaj članak rezultat je rada na projektu 410038 - Geografski informacioni sistem vodoprivrede Srbije

na trajektoriji antene Georadara, ili samo početna i krajnja tačka trajektorije antene Georadara. Određivanje položaja i dubine podzemnih voda i tokova u podpovršinskim slojevima zemljišta Georadarom i merenje površinskih koordinata GPS roverom je na nivou centimetarske tačnosti. Slika 1 prikazuje funkcionalne celine uređaja i međusobne veze.

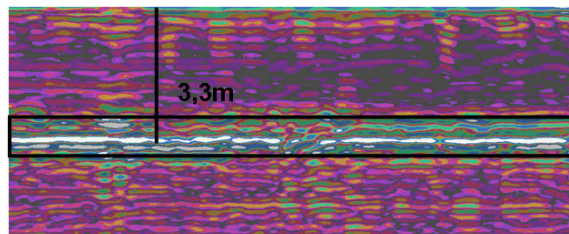


Slika 1. Funkcionalne celine Georadara

Predajna antena Georadara emituje polarizovane elektromagnetne (EM) talase visoke frekvencije u zemljište. Usled različitih nehomogenosti u zemljištu tipa raslojenosti zemljišta, podzemne vode, objekata infrastrukture, kamenja, šljunka i sličnog, jedan deo EM talasa se reflektuje od graničnih površi između različitih materijala, dok drugi deo refrakcijom prolazi do narednih slojeva. Proces se ponavlja sve dok slabljenje emitovanog signala ne bude isuviše veliko [2]. Vreme neophodno da emitovani EM talas od predajne antene dođe do granične površi i reflektuje se nazad do prijemnog dela je vreme dvostrukog puta t_R [ns], što zapravo predstavlja merenu veličinu na osnovu koje se određuje stvarna dubina objekta z [m]. Na slici 2 je prikazan tipičan sken sa obeleženim detektovanim nivoom podzemne vode. Sken je formiran u julu 2005. godine u zoni ispred glavne kapije Novosadske Fabrike Kablova "Novkabel". Apscisa predstavlja trajektoriju antene x [m], a ordinata vreme dvostrukog puta t_R reflektovanog talasa, odnosno relativnu dubinu.

Svaka tačka na radarskom skenu sadrži i informaciju o amplitudi signala. Predajna antena emituje konusni snop EM talasa širine $\beta=35^\circ\div 45^\circ$, tako da uređaj detektuje objekat i kad antena nije direktno iznad ose objekta. U stvarnim uslovima, sken je zašumljen sa različitim smetnjama i hiperboličkim refleksijama koje potiču od

drugih objekata i slojeva što se eliminiše i analizira postprocesingom [1].



Slika 2. Tipičan sken sa nivoom podzemne vode.

3. NASIPI U SISTEMU ODBRANE OD POPLAVA

Sistem za odbranu od poplava je skup objekata i aktivnosti za čije planiranje, upravljanje i održavanje potrebno poznavanje velikog broja parametara koji utiču na pojavu poplavnih voda i na elemente samih sistema za odbranu. Sistem je moguće predstaviti kroz sledeće objekte i postrojenja:

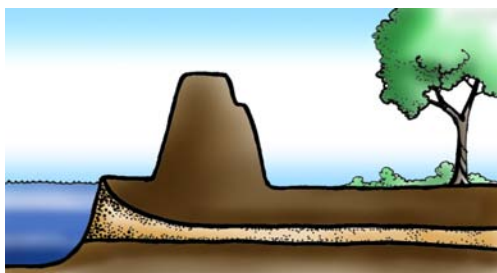
- retenzije i rasteretni bazeni (u ugroženim zonama)
- akumulacije za uređenje režima voda (van ugroženih zona)
- uređena korita vodotoka
- odbrambeni nasipi
- rasteretni kanali
- drenažni sistemi
- merno osmatrački objekti
- pumpne stanice

Redosled kojim su nabrojani objekti i postrojenja ni u kom slučaju ne govori o hijerarhiji njihove važnosti. Svaka od navedenih stavki je nezamenljiva komponenta sistema za odbranu od poplava, čiji se međusobni uticaji dopunjuju preuzimajući određenu ulogu u toku nailaska poplavnog talasa. S obzirom na navedeno, za podršku u odlučivanju prilikom upravljanja sistemom za odbranu od poplava potrebno je poznavanje sledećih karakteristika:

- stalni i promenljivi parametri objekata sistema
- slaba mesta sistema
- osobenosti branjene zone
- štete nastale prilikom prethodnih poplava
- hidrološka i hidraulička karakteristika voda posmatrane zone

Podrška odlučivanju prilikom upravljanja ovakvim sistemom je kompleksna i zahteva raspolaganje brojnim podacima, prikupljenim kako u realnom vremenu tako i preventivno.

Sužavanjem zone od interesa na praćenje podzemnih voda uočljivo je sledeće: podaci o nivou podzemnih voda se uglavnom skupljaju u realnom vremenu, ali i povremenim sondažama; za razliku od toga stanje odbrambenih nasipa nastalo delovanjem podzemnih voda *neophodno* je snimiti preventivno.

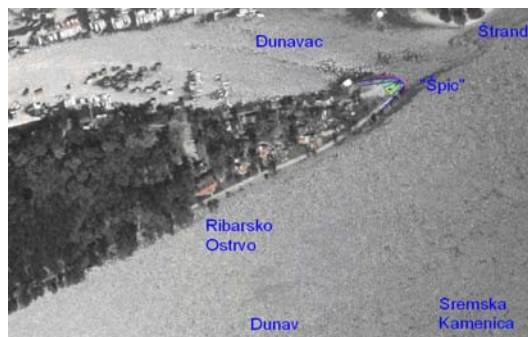


Slika 3. Odbrambeni nasip sa vodopropusnim slojem

Jedan od fenomena koji predstavljaju značajnu opasnost za odbrambeni nasip je proces iznošenja materijala (Slika 3) iz propusnog sloja (pesak ili sitan šljunak) prilikom nadolaženja ili povlačenja vode, odnosno promene nivoa podzemnih voda u zoni stratuma. Navedeni proces dovodi do sleganja, ili čak rušenja dela odbrambenog nasipa [3].

4. ZONA DETEKCIJE

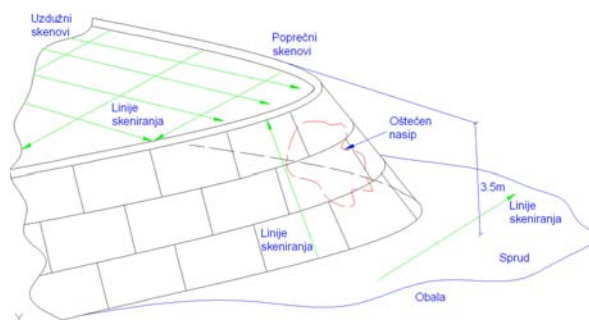
Analiza iznošenja materijala iz vodopropusnog sloja je izvršena na nasipu Ribarskog ostrva u Novom Sadu, na lokaciji "Špic" koja je nakon izuzetno visokog vodostaja Dunava u proleće 2005. godine u potpunosti preplavljena. Navedena lokacija predstavlja krajnju severoistočnu tačku ostrva koja je okrenuta prema Mostu Slobode, odnosno sa zapadnim krajem kupališta "Štrand" formira ulaz u Dunavac do brodogradilišta (Slika 4). Lokacija je karakterisana konstantnim nanošenjem sedimenta iz korita Dunava.



Slika 4. Odbrambeni nasip na "Špicu", Novi Sad

5. AKVIZICIJA PODATAKA

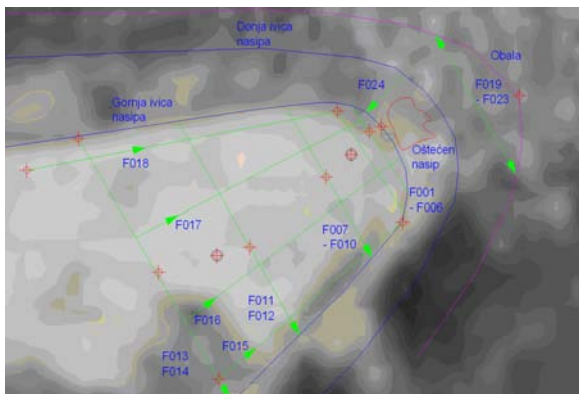
Na slici 5 je prikazano stanje odbrambenog nasipa na "Špicu" u trenutku akvizicije podataka 10. jula 2007 godine. Nasip je obložen betonskim pločama i ojačan na vrhu betonskim cerklažom. Visina nasipa se kreće u granici od 3 do 3.5m u odnosu na trenutni vodostaj Dunava. Na najisturenijoj tački nasipa je uočljivo oštećenje i sleganje kako zemljišta tako i betonskih ploča. Skeniranje lokacije Georadarom je izvedeno u 4 etape [12]. Poprečnim skenovima na platou neposredno ispred je utvrđeno stanje, oblik i struktura nasipa u odnosu na uzdužnu osovinu korita Dunava i Dunavca, dok je uzdužnim skenovima (paralelnim sa osom tečenja Dunava) detektovana oblast sedimentnog sloja sa vidljivim uticajem iznošenja aluvijala iz nasipa. Direktnim skeniranjem po obodu, normalno na osu nasipa je omogućeno kreiranje trodimenzionalne slike zone iznošenja u svrhu mogućeg proračuna količine iznetog aluvijala iz nasipa. Četvrta zona skeniranja obuhvata analizu rečnog sedimenta uz samu obalu. Skeniranjem je utvrđena relativna dubina rečnog sedimenta od približno 2.2m.



Slika 5. Stanje nasipa na "Špicu" u trenutku akvizicije

Skeniranje je izvršeno Georadarom sa antenom centralne frekvencije 200MHz sa kontinualnim premerom pozicije i visokom rezolucijom skeniranja od 1024 samples/scan, odnosno 100 scan/m [13]. Za sve skenove je izvršena odgovarajuća filtracija signala i podešavanje Time Zero rastojanja (rastojanje centra antene do zemljišta). Kalibracija uređaja u smislu određivanja dielektrične konstante zemljišta je izvršena na osnovu poznate dubine azbest-betonske cevi $\Phi 600\text{mm}$ na platou ispred nasipa. Dubina skeniranja je varirana u opsegu od 4m do maksimalnih 10m. Na slici 6 je prikazan prostorni raspored i numeracija izvedenih skeniranja. Kompletan prostorni raspored skeniranja je adekvatno prenešen na georeferenciranu ortofoto podlogu u razmeri 1:5000, odmeranjem koordinata

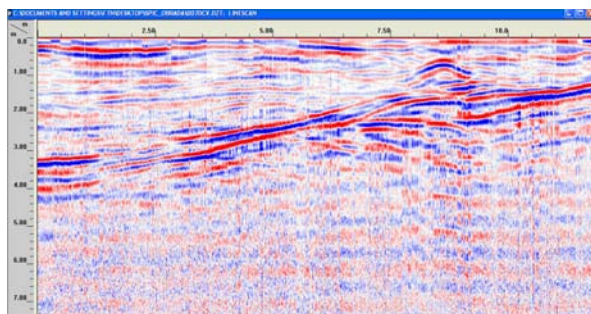
karakterističnih tačaka u RTK VRS režimu sa GPS roverom Trimble 5800.



Slika 6. Raspored skenova na ortofoto podlozi

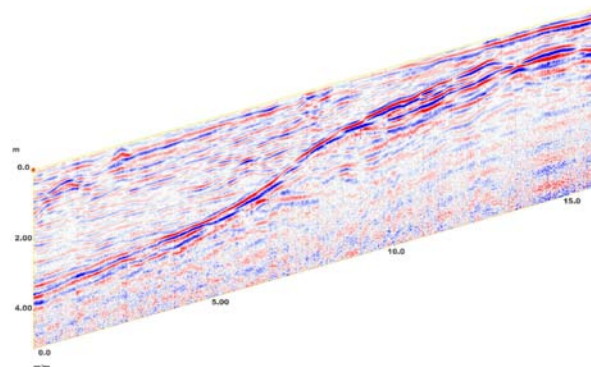
6. REZULTATI AKVIZICIJE

Na slici 7 je ravanski prikaz poprečnog profila platoa F007 na kojem je u zoni od drugog do petog metra, odnosno u zoni od šestog do 8 metra detektovan poremećaj vodonepropusnog sloja koji ukazuje na dejstvo procesa iznošenja aluvijalnog materijala iz nasipa. Profil sa skenom F007 je generisan na približno 6m od krajnje tačke na ivici cerklaža nasipa (Slika 6).



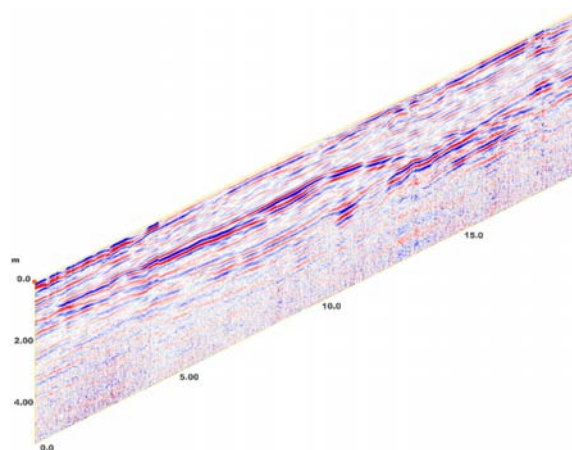
Slika 7. Profil F007, oštećenja vodonepropusnog sloja

Na slici 8 je prikaz poprečnog profila platoa F011 na kojem je detektovan karakterističan oblik vodonepropusnog sloja nasipa sa krunom orjentisanom prema koritu Dunava. Profil sa skenom F011 je generisan na približno 13m od krajnje tačke na ivici cerklaža nasipa (Slika 6) i nema oštećenja vodonepropusnog sloja.



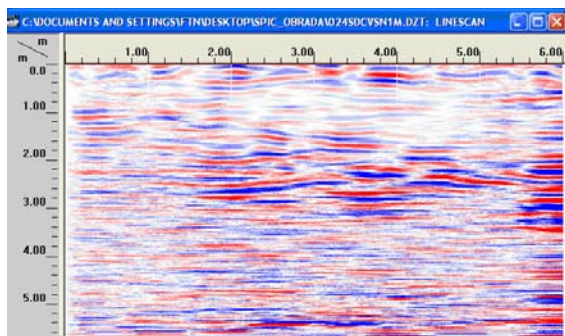
Slika 8. Profil F011, celovit vodonepropusni sloj

Na slici 9 je prikaz uzdužnog profila platoa F016 na kojem je detektovano sleganje od cca 1.5m vodonepropusnog sloja nasipa u zoni od jedanaestog do dvadesetog metra od ivice nasipa. Sleganje je nastalo kao direktna posledica iznošenja materijala iz sedimentnog sloja nasipa. S obzirom da je profil sa skenom F016 generisan od tačke na približno 20m od krajnje tačke na ivici cerklaža nasipa (Slika 6) do same ivice nasipa, iznošenje aluvijala iz nasipa je u zoni na približno 9m od gornje ivice nasipa.



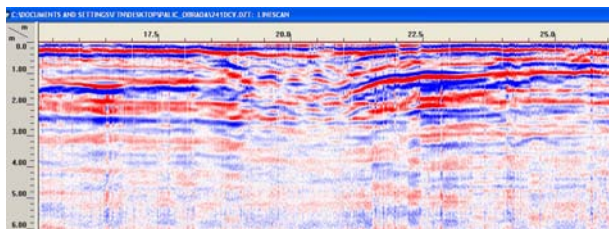
Slika 9. Profil F016, sleganje vodonepropusnog sloja

Na slici 10 je ravanski prikaz profila oboda nasipa F024 na kojem je detektovana dubina iznešenog sloja aluvijala od 1m u donjoj osnovi nasipa do 1.9m prema gornjoj osnovi. Kombinacijom informacija sa skenova F007, F016 i F024 moguće je odrediti zapreminu iznešenog materijala na razmatranoj lokaciji.



Slika 10. Profil F025 (obod), dubina iznetog materijala

Rezultati dobijeni prethodnom analizom su iskorišćeni za interpretaciju skenova generisanih po obodu Paličkog jezera u okolini Subotice. Skenovi su generisani na stazi približno 15m od obale, jer je skeniranje tehnički onemogućeno uz samu obalu (beton sa čeličnom mrežom). Obala Paličkog jezera nema izdignut nasip. Dubina jezera uz samu obalu je približno 1.5m, a dubina sloja mulja 45cm [7]. Skenovi su generisani u potpunosti u skladu sa podešavanjima i opremom definisanim u poglavlju 5. Na slici 11 je ravanski prikaz profila nasipa F241 na kojem je detektovano oštećenje vodonepropusnog sloja (poremećena struktura) od osamnaestog metra do dvadeset i trećeg metra. Oštećenje navedenog sloja se vertikalno proteže do približno 4m dubine.



Slika 11. Profil F241, obod jezera Palić, Subotica

7. ZAKLJUČAK

U radu su navedene mogućnosti nove tehnologije za detekciju podzemnih voda i tokova uz kratko obrazloženje principa funkcionisanja Georadara. Detaljno je obrazložena analiza lokacije "Špic" na Ribarskom ostrvu u Novom Sadu gde je prepoznat proces iznošenja materijala iz propusnog sloja prilikom nadolaženja ili povlačenja vode, odnosno promene nivoa podzemnih voda u zoni stratuma. Analizom podataka dobijenih skeniranjem Georadarom su definisane dimenzije i lokacija zone koja je zahvaćena

navedenim procesom. Na osnovu zaključaka dobijenih analizom lokacije "Špic", izvršeno je poređenje sa skenovima generisanim po stazi neposredno uz Paličko jezero u Subotici, gde je takođe detektovan proces iznošenja materijala.

S obzirom da navedeni proces dovodi do sleganja, ili čak rušenja dela odbrambenog nasipa, upotrebom navedene tehnologije po sistemu preventivnog skeniranja moguće je pravovremeno detektovati slaba mesta na nasipu, odnosno sprečiti dejstvo fenomena opasnih po odbrambeni nasip. Dalji pravac razvoja metode bi obuhvatio prepoznavanje i drugih tipova promena koje utiču na slabljenje i oštećenje nasipa čime bi se u potpunosti formirala brza i efikasna tehnologija za preventivnu analizu odbrambenih nasipa.

LITERATURA

- [1] Petrovački D., Ristić A.: Principles of using Ground Penetrating Radar and GPS technology for detection of underground utilities, 49th ETRAN conference, Budva, Serbia & Montenegro, 2005. (in Serbian)
- [2] Daniels D. J.: Surface penetrating radar, The Institution of Electrical Engineers, London, GBR, 2004.
- [3] Aysen A.: Soil Mechanics: Basic Concepts and Engineering Applications, A.A. Balkema Publishers, GBR, 2005.
- [4] Huisman J. A., Hubbard S. S., Redman J. D., Annan A. P.: Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review, Vadose Zone Journal, Volume 2, pages 476-491, 2003. Soil Science Society of America.
- [5] Galagedara W., Parkin W., Redman JD.: Measuring and Modeling of Direct Ground Wave Depth Penetration Under Transient Soil Moisture Conditions, Subsurface Sensing Technologies and Applications, Volume 6, No. 2, pages 193-205, april 2005.
- [6] Gerber R., Felix-Henningsen P., Salat C., Junge A.: Investigation of the GPR reflection pattern for shallow depths on a test site, 10TH International conference on GPR, Delft, The Netherlands, 21-24 June 2004.

- [7] Inchan P., Joengwoo L., Woncheol C.: Assesment of Bridge Scour and Riverbed variation by GPR, 10TH International conference on GPR, Delft, The Netherlands, 21-24 June 2004.
- [8] Paniagua J., Rio M., Rufo M.: Test site for the analysis of subsoil GPR signal propagation, 10TH International conference on GPR, Delft, The Netherlands, 21-24 June 2004.
- [9] Yoder R., Freeland R., Ammons J., Leonard L.: Mapping agricultural fields with GPR and EMI to identify offsite movement of agrochemicals, Journal of Applied Geophysics, Volume 47, 2001, pages 251-259.
- [10] Freeland R., Yoder R., Ammons J.: Mapping shallow underground features that influence site specific agricultural production, Journal of Applied Geophysics, Volume 40, 1998, pages 19-27.
- [11] Doolittle J., Jenkinson B., Hopkins D., Ulmer M., Tuttle W.: Hydropedological investigation with GPR: Estimating water table depths, and local ground flow pattern in areas of coarse textured soils, Geoderma, Volume 131, 2006, pages 317-329.
- [12] Szykiewicz A.: GPR monitoring of earthen flood banks/levees, 8TH International conference on GPR, Queensland, Australia, 23-26 May 2000.
- [13] Smith G., Hunt I., Ashworth P., Best J., Bridge J., Lane S., Simpson C.: Sedimentological impact of a large flood revealed using sequential GPR surveys, 11TH International conference on GPR, Columbus, Ohio, USA, 19-22 June 2006.

DETECTION OF GROUNDWATER FLOWS BY GROUND PENETRATING RADAR

by

Aleksandar RISTIĆ, Dušan PETROVAČKI, Miro GOVEDARICA, Srđan POPOV
Faculty of Technical Sciences, Novi Sad

Summary

This paper describes the principles of new procedures of groundwater flows detection in shallow subsurface layers (0-10m), using Ground Penetrating Radar data, with one case of application. The analysis was executed at the location "Špic" in the city of Novi Sad and included research of groundwater impact on the sedimentary architecture in the lower part of the flood banks. The exact locations and dimensions of impact

zones of that process were determined by GPR. These results were then used to identify the same pattern in GPR scans of the banks of Lake Palić, near the city of Subotica.

Key words: Ground Penetrating Radar, GPR, scan, flood banks, flood bank sedimentary layer

Redigovano 04.12.2007.