

Ana PETKOVŠEK

mag., univ.dipl.inž.geol., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Primož PAVŠIČ

univ.dipl.kem., Zavod za gradbeništvo Slovenije

## **DIELEKTRIČNE (TDR) MERITVE ZA KONTINUIRNO SPREMLJANJE SPREMINJANJA VLAGE V ZEMLJINAH – PRVE GEOTEHNIČNE IZKUŠNJE TUDI V SLOVENIJI**

**POVZETEK:** V geotehniki se vlažnost zemljin običajno preverja v fazi predhodnih raziskav in v fazi gradnje, v okviru kontrole kakovosti. O tem, kaj se dogaja z vlago v življenjski dobi objekta, kakšne so sezonske in trajne spremembe vlage pa vemo sorazmerno malo. Razvoj novih merilnih tehnik pa omogoča tudi kontinuirano merjenje vlažnosti v tleh in s tem pridobivanje pomembnih novih znanj in spoznanj. V članku so predstavljeni rezultati kontinuiranih meritev vlažnosti z uporabo TDR merilnikov, pridobljeni na enem od štirih odsekov cest, vključenih v 3 – letni raziskovalni projekt spremljanja sezonskih vplivov spreminjanja vlage na nosilnost in deformabilnost vozišč v Sloveniji.

## **USING DIELECTRIC MEASUREMENTS TO PREDICT WATER MOVEMENT IN SOILS – FIRST SLOVENIAN EXPERIENCES**

**SUMMARY:** A common practice in earth works is the determination of water content during the preliminary geological investigations as well as during the construction, for QA – QC purposes. Some basic questions, such as what is going on with water content during the life time of the structure, what are the permanent and the seasonal effects to the water content in the soil are still open. The newly developed measurement techniques give us the possibility for continuous measurements and observations of water content and water movement. This paper presents the results of a 3-year measurement and monitoring of water movement and water content in the unbound layers and subgrades on one of the four different typical roads in Slovenia, which were included into the seasonal monitoring program. TDR probes and FWD techniques were used for the measurements.

## UVOD

Merjenje vlažnosti je najbolj pogosto uporabljeni postopek pri geomehanskem preiskovanju zemljin. Vlažnost vpliva na vse mehanske lastnosti zemljine: trdnost, deformabilnost, prepustnost in tehnološko obvladljivost. Pomembne identifikacijske lastnosti, na primer meje plastičnosti in optimalna vlažnost, so v resnici le vlažnosti, izmerjene pri dogovorjenem stanju zemljine. S klasičnimi postopki merimo vlažnost, ki jo ima zemljina v nekem trenutku, na primer v času odvzema vzorca na terenu, pred in po edometriki ali strižni preiskavi, pred nadgradnjo zgoščene plasti z novo nasipno plastjo in podobno.

Na obnašanje geotehničnih objektov pomembno vplivajo spremembe vlažnosti, ki lahko nastopijo v tleh po izgradnji objekta. O teh spremembah vemo zelo malo, čeprav je gospodarska škoda, ki pri tem nastaja, velika. Zato so sodobna načrtovanja podzemnih objektov, gradnje deponij odpadkov, predvsem pa strateški razvojni projekti na področju vzdrževanja prometnic tesno povezani tudi z raziskavami za izboljšanje znanj o transportu in posledicah transporta vlage v zemeljskih objektih.

V letih 2000 – 2003 je Ministrstvo za promet, Direkcija republike Slovenije za ceste, financiralo raziskovalni projekt (Petkovšek in ostali; 2003), v okviru katerega smo na štirih izbranih cestnih odsekih izvajali kontinuirne meritve vlage v nevezanih plasteh in raziskovali vpliv sezonskih sprememb vlage na nosilnost in deformabilnost vozišč. Za kontinuirno spremljanje vlage smo uporabili dielektrične merilnike, ki smo jih skupaj z merilniki temperature vgradili v značilne plasti vozišč. V tem prispevku predstavljamo dielektrične meritve in nekaj zanimivih rezultatov, pridobljenih v triletnem opazovalnem obdobju.

## VPLIVI SPREMOMB VLAGE NA MEHANSKE LASTNOSTI ZEMLJIN

### Mehanizmi spreminjanja vlage v tleh

Spremembe vlažnosti v tleh lahko v grobem razdelimo v dve značilni skupini:

- stalno ponavljajoče se, sezonsko pogojene spremembe. Vezane so na plitev, nekaj metrov debel sloj zemljin v vplivnem območju delovanja zmrzali, razsuševanja ali kapilarnega dviga. Te spremembe vplivajo na prometnice, na površinske mineralne tesnilne naboje in na lažje objekte.
- Postopno napredujoče, trajne spremembe. Nastanejo kot posledica sprememb totalnih tlakov, temperature ali kemije okolja ali kot posledica kombinacije le teh. Sežejo lahko nekaj deset ali sto metrov v vplivno zaledje objekta, proces pa lahko traja več deset let. Te spremembe vplivajo predvsem na globoko vkopane in podzemne objekte.

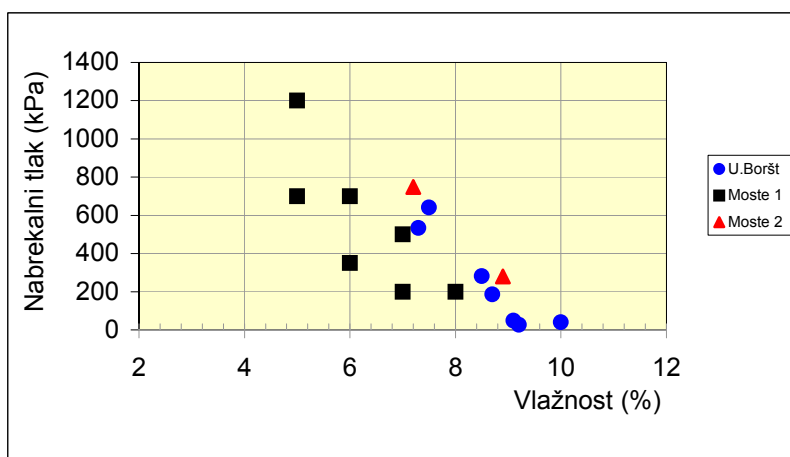
Posledice spreminjanja vlage se lahko odrazijo v obliki:

- volumenskih sprememb, nabrekanja, krčenja ali dezintegracije mehkih kamnin,
- sprememb nosilnosti, togosti, deformabilnosti,
- sprememb prepustnosti oziroma sposobnosti zemljine za transport snovi.

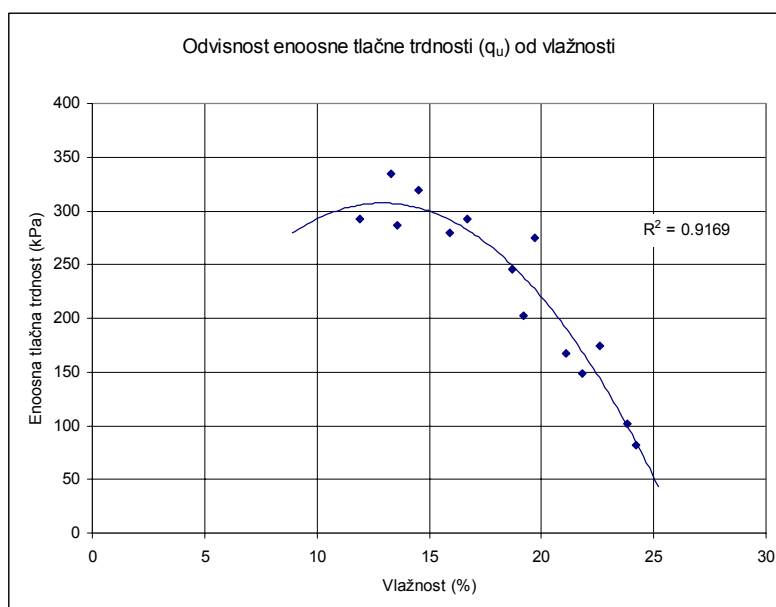
V Ameriki ocenjujejo, da je škoda, ki nastane na inženirskih konstrukcijah zaradi spreminjanja vlage in nabrekanja zemljin večja od škode, ki jo povzročijo potresi, poplave in tornadi skupaj. Že leta 1980 naj bi preseгла 10 milijard dolarjev (Steinberg; 1985). V Sloveniji je podzemna strojnica HE Moste, ki je vkopana v oligocensko sivico in je bila dograjena leta 1952, verjetno najbolj znan in najboljše dokumentiran geotehnični objekt, ki je utrpel poškodbe zaradi nabrekanja (Šuklje;1980). Med novejšimi izkušnjami lahko omenimo približno 200 m dolg odsek globoko vkopane mednarodne železniške povezave Puconci – Hodoš – državna meja, kjer se je progga, dograjena v letu 2000, po enem letu dvignila za 7 cm. Nepričakovane spremembe vlage v temeljnih tleh so na avtocesti Razdrto – Čebulovica, dograjeni leta 1993, povzročile razpad temeljnih tal iz fliša in hude poškodbe vozišča še pred iztekom garancijske dobe.

## Vplivi sprememb vlage na lastnosti zemljin

Vplive vlage na lastnosti zemljin je možno meriti in prikazati na različne načine (slike 1 - 3). Enake spremembe vlage povzročajo v enakih ali različnih zemljinah različne spremembe mehanskih lastnosti. V primeru oligocenske sivice, prikazane na sliki 1, ki ima naravno vlažnost 5 %, pomeni prirastek vlage za 2 % razvoj nabrekalnih tlakov nad 500 kPa. Pri enaki sivici, ki ima naravno vlažnost večjo od 12 %, prirast vlage ne povzroči nobenih nabrekalnih tlakov. V primeru gline Lenart, prikazane na sliki 3, ki ima začetno vlago 20 %, pomeni 5 % prirast vlage znižanje CBR nosilnosti za 3 x. Pri začetni vlagi 15 %, enak prirast vlage na isti glini ne povzroči večjih sprememb nosilnosti. Kaj se dogaja z morebitnimi spremembami volumna, ta raziskava ne pokaže.



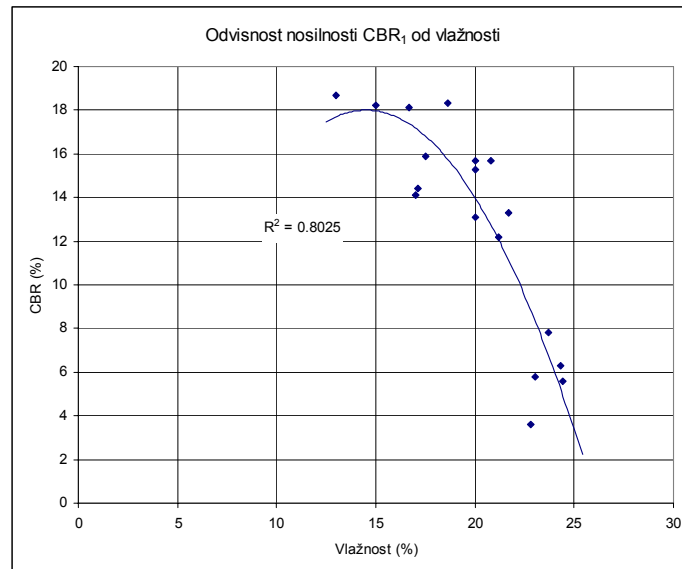
**Slika 1.** Odvisnost nabrekalnih tlakov od vlažnosti sivice. Moste 1 (Šuklje; 1980), U. Boršt in Moste 2 (Petkovšek; 1983, 2002).



**Slika 2.** Pliokvartarna glina Lenart. Odvisnost enoosne tlačne trdnosti od vlažnosti nabitih vzorcev. Standardna energija nabijanja po Proctorju (Petkovšek in ostali; 2003).

Iz predstavljenih primerov lahko vidimo, da je vpliv spreminjanja vlage na mehanske lastnosti zemljin odvisen od različnih dejavnikov (kemije okolja v nadaljevanju ne upoštevamo):

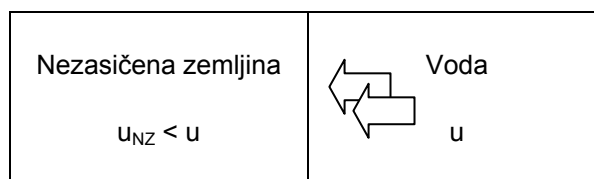
- naravne vlažnosti zemljine (nivoja vlage v tleh),
- dovzetnosti zemljine za vodo,
- možnosti dostopa vode (razpoložljive vode),
- temperature in temperaturnih razlik.



**Slika 3.** Pliokvartarna glina Lenart. Odvisnost CBR od vlažnosti nabitih vzorcev. Standardna energija nabijanja po Proctorju (Petkovšek in ostali; 2003).

### Dovzetnost (občutljivost) zemljine za vodo

»Dovzetnost« je posebna lastnost zemljine, da privlači določene količine vode. Odvisna je od sposobnosti vsesavanja vode (sukcije), ki je sestavljena iz ozmotske in matrične sukcije. Ozmotska sukcija je posledica soli, raztopljenih v porni vodi, matrična sukcija pa je posledica mineralne sestave, zgoščenosti in načina medsebojnega pakiranja zrn v strukturo. Mineralna sestava zemljine vpliva na površino zrn, ki lahko adsorbirajo vodo in na debelino obroča adsorbirane vode. Vsesavanje vode je vselej odvisno od začetne vlage v zemljini (slika 4) in z naraščanjem vlage hitro upada.



**Slika 4.** Ko pride nezasičena zemljina v stik z vodo, se sproži proces vsesavanja vode. Tok vode se zaključi, ko je porni tlak enak tlaku vode v okolici (Richards; 1974).

### Vpliv vode in transport dostopne vode

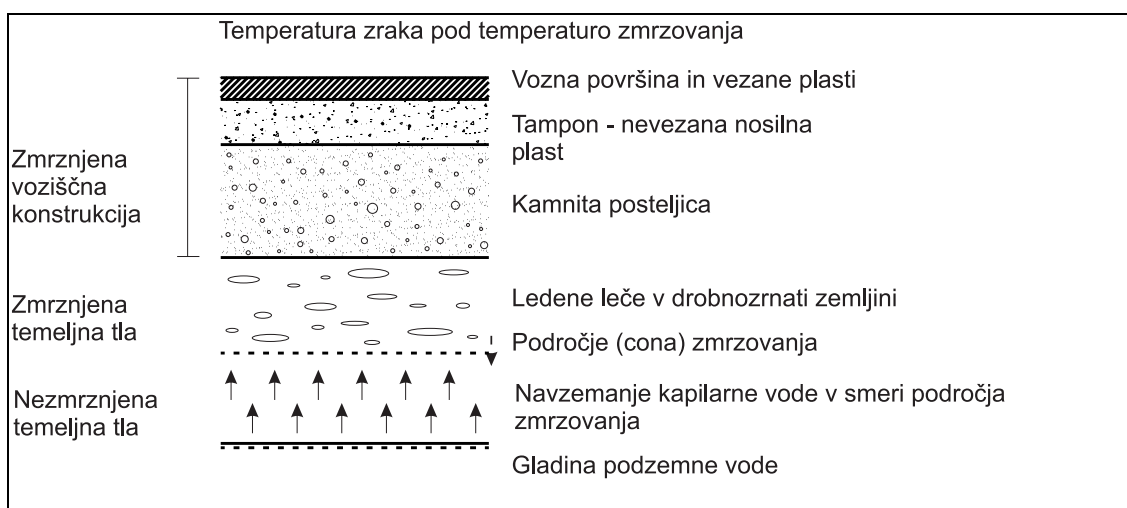
Zemljine z visoko sukcijsko imajo v suhem ali malo vlažnem stanju zelo dobre trdnostne in deformacijske lastnosti, z naraščanjem vlažnosti pa se jim lastnosti hitro spreminjajo. Raziskave kažejo (Saarenketo in ostali; 1998), da se deformacijski moduli v agregatih z visoko sukcijsko že ob majhnih prirastih vlage znižajo do 75 %. Za takšne materiale je škodljivost sprememb vlage odvisna od dostopnosti vode in

od možnosti inkorporacije vode v strukturo zemljine. Čeprav sta gravitacijski in kapilarni transport najpogostejša načina gibanja vode v porozni sredini, lahko pride do migracij vode tudi v zemljinah brez proste gladine.

Med gibanjem vode v naravnih tleh in gibanjem vode v nevezanih plasteh vozišč so določene razlike. Vezane plasti delujejo kot zaporni sloj pred pronicanjem meteorne vode v tla, hkrati pa tudi kot zapora pred izhlapevanjem vode iz tal. Asfaltne plasti ne morejo v celoti preprečiti pronicanja vse meteorne vode, ki pade na vozno površino. H količini voda, ki se infiltrirajo v cestno telo pomembno prispevajo nezaščitene površine, na primer bankine v makadamski izvedbi, neobdelani, netesnjeni odvodni jarki, zatravljene površine med prometnimi pasovi, pa tudi razpoke in druge poškodbe na asfaltu.

### Vpliv temperature in temperaturnih razlik

Površinska napetost vode z zniževanjem temperature narašča in obratno, ob naraščanju temperature upada. Ob nizkih temperaturah prihaja do povečane migracije vode zaradi povečanega kapilarnega dviga v zemljini (slika 5). V času odjuge potuje voda iz nezamrznjene podlage v smeri proti coni zamrzovanja. V času pomladanske odjuge se prebitne količine vode, nastale ob tajanju, le počasi drenirajo skozi prehodne zračne pore, zato ustvarjajo povečano zasičenost nevezanih plasti. Ob visoki stopnji zasičenja se pod prometom razvijejo presežni porni tlaki, trenjska odpornost med zrnji se zmanjša, zato pride do znižanja nosilnosti (povečanih defleksij) vozišča in do znanih »pomladanskih« poškodb. Vzporedno poteka v tleh neviden proces potovanja drobnih zrn med različnimi nevezanimi plastmi. Ta proces spreminja lastnosti nevezanih nosilnih plasti, povečuje njihovo dovzetnost za vodo in tako dodatno pospešuje propadanje vozišča.



Slika 5. Shematski prikaz gibanja vode v vozišču v času zmrzali.

## METODE ZA SPREMLJANJE GIBANJA VODE V TLEH

### Direktne in indirektne metode

Metode za merjenje vlage v zemljinah v splošnem delimo na direktne in indirektne. Med najbolj zanesljive sodijo direktne ali gravimetrične metode, ki pa za kontinuirno spremljanje vlage niso primerne. Indirektne metode so tiste metode, pri katerih ne merimo vlažnosti tal, temveč neko drugo lastnost, ki je v povezavi z vlažnostjo. Merilni element namestimo v tla na izbrano globino in ga na ta način zlijemo z okolico. Odvisno od tega, kako merilni instrument zaznava spremembe vlage, se indirektne metode delijo v dve skupini:

- merilnik in okolna zemljina tvorita skupaj merilni krog (dielektrični merilniki - TDR, merilniki kapacitivnosti – kondenzatorji, nuklearni merilniki – izotopske sonde, merilniki na bazi jedrske magnetne resonance – NMR, georadar – GPR)
- merilnik je potopljen v medij, ki deluje kot posrednik med merilnikom in zemljino. Zemljina ni neposredno vključena v merilni krog (meritve upornosti – sadreni bloki, tenziometri, toplotni bloki).

V prvem primeru potuje snop žarkov (nevtroni, gama žarki, elektro magnetni pulzi) skozi zemljino, nanj pa vplivajo vodne molekule. Nevtroni se na primer upočasnijo na vodikovih atomih, delež vode v zemljini pa je izračunan kot razmerje med deležem oddanih hitrih in prejetih upočasnjenih nevtronov.

V drugem primeru medij privzema lastnosti zemljine, ki jo opazujemo. V sadrinih blokih meritev vlage temelji na meritvah upornosti, ki se spreminja v odvisnosti od vlažnosti sadrinega bloka, ta pa od vlažnosti okolne zemljine.

### Permitivnost tal (dielektrična konstanta) in TDR meritve

Permitivnost – dielektrična konstanta je merljiva lastnost zemljine, na kateri temelji princip merjenja vlažnost tal s TDR (Time domain Reflectometry) in s kondenzatorji. TDR meritve so se najprej uporabljale za detekcijo poškodb na kabljih (včasih naletimo na izraz »cableradar«). Leta 1980 so kanadski strokovnjaki (Topp, Davis in Annan; 1980), objavili rezultate raziskav meritev vlažnosti z uporabo TDR, s katerimi so ugotovili naslednje povezave med volumetrično vsebnostjo vode in dielektrično konstanto (1), (2):

$$Q_{vol} = - 0,053 + 0,0292K_a - 0,00055K_a^2 + 0,0000043K_a^3 \quad (1)$$

$$K_a = 3,03 + 9,3 Q_{vol} + 146Q_{vol}^2 - 76,7 Q_{vol}^3 \quad (2)$$

kjer je:

$Q_{vol}$  = volumetrična vsebnost vode (vol. %)

$K_a$  = permitivnost, dielektrična konstanta

Princip meritve TDR temelji na oddajanju elektromagnetnega pulza v tla in na spremljanju hitrosti oz. časa, v katerem elektromagnetni val potuje skozi zemljino. V vakuumu je hitrost elektromagnetnega valovanja enaka hitrosti svetlobe ( $c_0$ ). Za nemagnetne materiale se lahko prevzame vrednost magnetne permeabilnosti:  $\mu_r = 1$ . V tem primeru je čas, potreben za prehod elektromagnetnega vala odvisen le od dielektrične konstante materiala  $k_a$ , kar pomeni, da je za določitev dielektrične konstante potrebno poznati le hitrost elektromagnetnega vala v tleh. Poznavanje razdalje od izvora vala do konca sonde omogoča enostaven izračun hitrosti potovanja vala.

**Razpredelnica 1:** Permitivnost (dielektrična konstanta), izmerjena v laboratoriju (Look, Reeves; 1992).

Material	Permitivnost
Zrak	1
Suha zemljina	2 – 6
Led	3 – 4
Voda	79 - 82

Oprema za izvajanje meritev TDR se sestoji iz generatorja – proizvajalnika elektromagnetnega pulza, osciloskopa, koaksialnega kabla in sonde. Generator pulza pošlje elektromagnetni pulz preko koaksialnega kabla v sondo. Sonda je zgrajena iz nerjavnega jekla in ima običajno obliko trizoba različnih oblik in dolžin. Oddajni oz. potovalni čas je funkcija permitivnosti zemljine okrog sonde. Hitrost širjenja elektromagnetnega vala se zmanjšuje z naraščanjem vlage v zemljini.

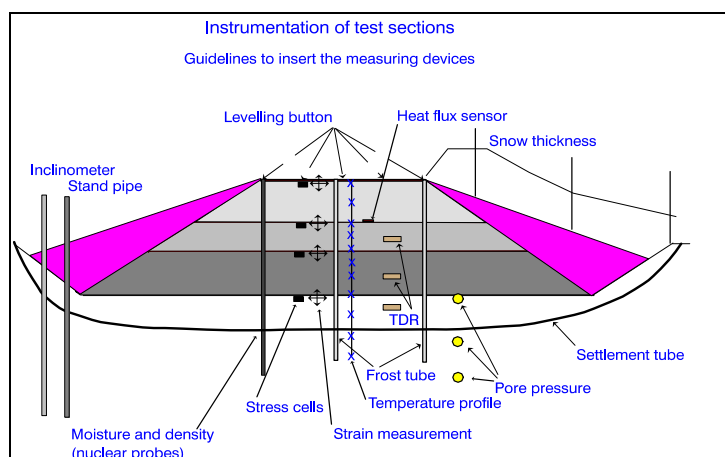
Podobno kot vse metode, ima tudi metoda TDR nekatere omejitve:

- glavni merilni problem predstavljajo izjemno kratki časi registriranja pulza



Glede na razpoložljiva sredstva smo naše cestne odseke instrumentirali po ameriškem vzorcu, toda le z merilniki vlage in temperature, ki smo jih vgradili v nevezano nosilno plast in v temeljna tla. Podatke o padavinah in temperaturah zraka je posredoval takratni Hidrometeorološki zavod Slovenije iz najbližje opazovalnice. Vzporedno s kontinuirnimi meritvami vlage in temperature smo opravljali periodične meritve podajnosti vozišč z deflektografom Lacroix in z deflektometrom FWD.

V razpredelnici 2 so prikazani instrumentirani cestni odseki, v razpredelnici 3 pa lastnosti zemljin in karakteristični profil Odseka Rogla, ki smo ga izbrali za tokratno podrobno predstavitev rezultatov meritev. Instrumentirani odseki se medsebojno razlikujejo po geotehnični zgradbi tal, hidroloških in hidrogeoloških prilikah, klimatskih razmerah, značilnem profilu cestne konstrukcije in karakterističnem profilu vozišča.



**Slika 8.** Prerez instrumentiranega cestnega odseka na Finskem. Osebni kontakt g. Laaksonen, VTT.

**Razpredelnica 2:** Pregled instrumentiranih cestnih odsekov

Odsek 1: Hrušica	AC A2	Odsek 0602	Hrušica - Lipce
Odsek 2: Šentjacob	HC H3	Odsek 0085	Zadobrova – Lj. - Šmartinska
Odsek 3: Zreče - Rogla	R3 701	Odsek 1430	Pesek – Zreče, km 11+500
Odsek 4: (Ložane) Lenart	R1 229	Odsek 1287	Senarska – Lenart, km 3 +900

**Razpredelnica 3:** Značilnosti odseka Rogla

Prerez vozišča	Vlaga določena v laboratoriju	Vsebnost zrn < 0.06mm/< 0.02 mm	Kontrola zasipa ob vgradnji TDR, uporaba izotopske sonde
8 cm/ BD + AB			
5 cm/nov NNP			
8 cm/ stara asfaltna plast			
22 cm/ star TMU	3.2 %	9.7/6.3 %	$\rho_d = 2045 \text{ kg/m}^3$ $w = 2.7 \%$
Ttla, glinast melj z zrni gruščča, preperina glinavcev	24.1%	26.3/16.2 %	$\rho_d = 1433 \text{ kg/m}^3$ $w = 26.8 \%$

BD + AB: bitumenski drobir in asfaltni beton, TMU – nevezana nosilna plast, Ttla – temeljna tla

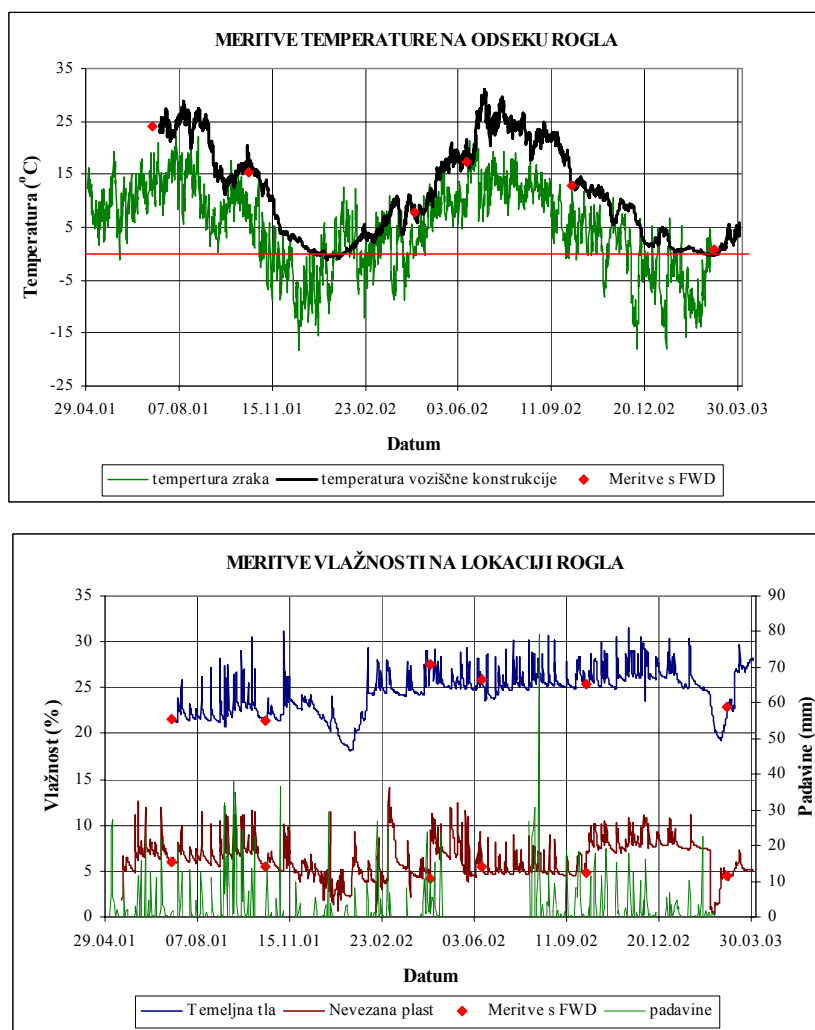
**REZULTATI MERITEV – ANALIZA ODSEKA ROGLA**

Na sliki 9 sta prikazana diagrama z rezultati meritev, ki smo jih pridobili v času april 2001 – marec 2003. Na zgornjem diagramu so prikazani podatki o temperaturi zraka, pridobljeni v najbližji opazovalnici HMZ Slovenije in podatki o temperaturi na dnu tamponske plasti. Na spodnjem diagramu so prikazani rezultati kontinuirnih meritev vlage v temeljnih tleh in v nevezani tamponski plasti ter



podatki o višini padavin. Posamezne pike, predstavljene v obeh diagramih, označujejo čas, ko so bile na vozišču izvedene meritve z deflektometrom in deflektografom. Glavne ugotovitve in sklepi opravljenih meritev so naslednji:

- ob vgradnji smo gravimetrično določili vlažnost vzorcev glinastega melja, odvzetega iz temeljnih tal 24.1 %, na terenu pa smo s kontrolnimi meritvami z izotopsko sondo izmerili vlago plasti iz melja 26.8 %,
- naravna vlažnost se je obdržala v temeljnih tleh, z odstopanji ob nalivih, še vse leto 2001. Iz diagrama so jasno vidni direktni, a kratkotrajni odzivi vlage na vsakokratne padavine.
- Okrog 15. januarja 2002 so se pričele v temeljnih tleh tvoriti nehomogene ledene leče. Vendar pa niti nevezana tamponska plast, niti temeljna tla v zimi 2001/2002 niso v celoti zamrznila.
- Odjuga v plasti je nastopila okrog 24. januarja 2002. Po nastopu odjuge so se lastnosti meljastih temeljnih tal povsem spremenile. Vlažnost je v plasti narasla za skoraj 5 %. Tako povečan nivo vlage se je obdržal vse leto 2002.



**Slika 9.** Rezultati kontinuirnega spremljanja temperature, vlage in padavin na odseku Rogla.

- Nevezana nosilna plast je tudi po odjugi v januarju 2002 ohranila začetno stanje vlage. Primerjava rezultatov gravimetrično določene vlage in vlage, izmerjene s TDR merilniki kaže, da so vrednosti, določene s TDR precej višje. Možni sta dve razlagi: prva razlaga je napaka, ki izhaja iz TDR meritve v debelo zrnatem agregatu, druga razlaga, pa je, da so se že takoj po vgradnji, drobni delci zemljine iz temeljnih tal delno vtisnili v tanek sloj tamponskega drobljenca in tako prispevale k njegovi povečani vlagi. Suho poletje 2002 se jasno odraža na znižanju vlage v tamponski plasti.

- V jeseni 2002 je nastopilo obdobje velikih padavin. Ker so bila temeljna tla zasičena z vodo, se je pričela padavinska voda, ki je pronicala skozi asfaltno plast in morda tudi od strani, akumulirati v tamponski plasti. Od oktobra 2002 dalje je opazno trajno povečanje vlage tudi v nevezani plasti.
- Nevezane plasti so pričele zmrzovati v januarju 2003, tamponski drobljenec je v celoti zamrznil v sredini februarja 2003 in ostal zamrznjen do konca februarja. Potek zmrzovanja tal kažejo meritve temperature na zgornjem diagramu slike 9, enako dobro pa so vidne tudi iz podatkov TDR meritev.

Meritve deformacijskih modulov, izvedenih na odseku Rogla z deflektometrom FWD so pokazale direktno odvisnost upadanja modulov elastičnosti ob naraščanju vlage. V letih 2001 – 2003 so se elastični moduli temeljnih tal zmanjšali za polovico.

## ZAKLJUČEK

S sistematsko zasnovanim sistemom instrumentiranja in spremljanja štirih cestnih odsekov smo pridobili prve izkušnje z uporabo dielektričnih merilnikov za kontinuirno spremljanje vlage v zemljinah. V prispevku smo prikazali le rezultate, pridobljene na testnem odseku Rogla. Meritve so pokazale, da se vlažnost v nevezanih plasteh hitro odziva na padavine. Pronicanje vode skozi asfaltno vozišče, bankine in boke je močnejše od vseh pričakovanj. Ugotovili smo, da se kompaktirane glinene zemljine, kljub temu, da so »varno zaprte« pod asfaltom in visoko nad gladino podzemne vode, zelo hitro dodatno navlažijo, ob čemer se jim poslabšajo mehanske lastnosti.

TDR merilniki so se izkazali kot zanesljivo orodje pri spremljanju sprememb vlage v zemljinah. Čeprav se v prispevku nismo dotaknili kalibracije TDR merilnikov in nekaterih težav, ki spremljajo vgradnjo v debelo zrnatih zemljinah, menimo, da bi njihovo uporabo kazalo razširiti tudi na druga področja zemeljskih del v geotehniko, še posebej tam, kjer z deli posegamo v nezasičene zemljine z visoko sukcijo.

## LITERATURA

- (1) FHWA–US Departement of Transportation. (1999). Analysis of Time Domain Reflectometry Data From LTPP Seasonal Monitoring Program Test Sections – Final Report. No. FHWA-RD-99-1115.
- (2) Look, G. J., Reeves, N.I. (1992). The application of Time Domain Reflectometry in geotechnical instrumentation. ASTM, Technical note. 277 – 283.
- (3) Majes, B., Pulko, B. (2001). Presoja vpliva nabrekljivosti na nastale deformacije tira v km 56,250 proge Puconci – Hodoš. FGJ Univerze v Ljubljani (neobjavljeno).
- (4) Petkovšek, A. (1983). Poročilo o preiskavah sive iz vkopa Udin Boršt na trasi GAC, 1. in 2. del. ZRMK Ljubljana, 2-15/a. Neobjavljeno.
- (5) Petkovšek, A. (2002). Nabrekljivost izbranih vrst glinavcev v Sloveniji. Magistrsko delo. UL – NTF Ljubljana
- (6) Petkovšek, A., Kokot, D., Leben, B., Pavšič, P. (2003). Sezonski vplivi spreminjanja vlage in temperature na nosilnost vozišč. Razvojno raziskovalni projekt, končno poročilo 2000 – 2003. ZRMK – ZAG za naročnika Ministrstvo za ceste.
- (7) Richards, B. G. (1974). Behaviour of Unsaturated Soils. Soil Mechanics – New Horizons. Butherworths. London. 112 – 115.
- (8) Saarenketo, T., Scullion, T., Kolisoja, P. (1998). Moisture susceptibility and Electrical Properties of Base Course Aggregates, V. International conference BCRA. Trondheim, Norway. 1401 – 1410.
- (9) Steinberg, M.L.(1985). Controlling Expansive Soil Destructiveness by deep Vertical Geomembranes of Four Highways. TRR, 1032, TRB, Washington. 48 – 53.
- (10) Svensson, J. (1997). Moisture Content in Road Pavements. VTI, Swedish National Road and Transport Research Institute, 809A - 1997.
- (11) Šuklje, L. (1980). Zemeljski pritiski na podzemno strojnico Moste. Gradbeni vestnik Ljubljana. 29.10. 202 – 212.
- (12) Topp, G., Davis, J. L., Annan, A. P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmissions Lines. Water Resources Research 16/3. 574 – 582.