

RIZIK OD SLIJEGANJA TLA U URBANIM PROSTORIMA

dr. sc. Ognjen Bonacci prof. emerit., dr. sc. Tanja Roje-Bonacci prof. emerit.

Pisanje ovog rada potaknuto je člankom *Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises* – Rizik od slijeganja tla za infrastrukturu američkih metropola (Ohenhen i sur. 2025) objavljenom u časopisu *Nature Cities* u kolovozu 2025. Radi se o izuzetno važnoj i vrlo aktualnoj, ali nedovoljno izučavanoj problematici, koja se sve češće javlja u urbanim prostorima. Danas više od polovice svjetske populacije živi u gradovima – trenutno oko 4,8 milijardi ljudi živi u gradovima, što predstavlja otprilike 58 % svjetske populacije. Do 2035. godine očekuje se povećanje na 5,6 milijardi, odnosno 62 %. (https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview?utm_source=chatgpt.com). Rastući trend urbanizacije rezultira time da sve više ljudi živi u gradovima, a velik broj megagradova nastavlja se širiti, posebice u Aziji i Africi. Ovaj nezaustavljiv porast donosi izazove i stvara ozbiljne probleme mogućnostima održivog razvoja, ugrožavajući skupu i složenu urbanu infrastrukturu, okoliš i kvalitetu života.

Širenje urbanih površina nezaustavljiv je proces povezan s brojnim i različitim opasnostima. Koncentracija stanovništva na malom prostoru rezultira izgradnjom velikih i teških građevina, naglom promjenom strukture površinskog tla, narušavanjem stabilnosti terena (pojava klizišta, urušavanje itd.), povećanim crpljenjem podzemnih voda te povećanjem ugroze od svih vrsta poplava itd. Sve prethodno navedeno, a i mnogo drugoga, predstavlja rizik koji se već manifestira, a u budućnosti se može očekivati njegovo češće i razornije pojavljivanje. Budući da je vrlo teško pouzdano predvidjeti kada će se i u kakvom obliku postojeći rizici ostvariti, nužno je toj problematici posvetiti mnogo ozbiljniju pažnju. Pri tome se prvenstveno misli na potrebu za kontinuiranim praćenjem najrazličitijih potencijalno opasnih procesa. To je shvaćeno u brojnim državama svijeta, čija iskustva bi mogla biti od koristi i za Hrvatsku, a prije svega za naš glavni grad Zagreb, koji se ubrzano širi ne vodeći dovoljno (ako uopće) računa o mogućim negativnim posljedicama.

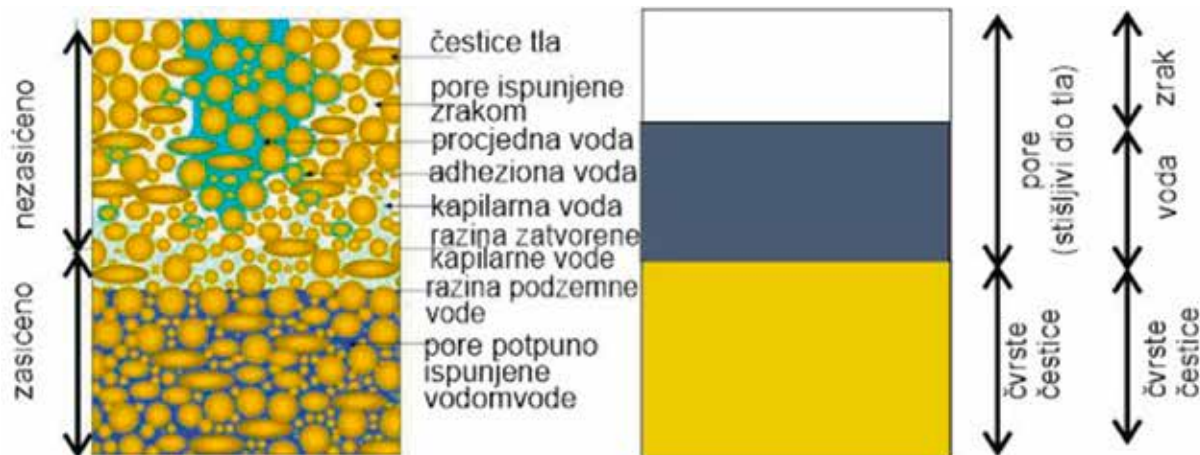
Proces slijeganja tla spor je, stalno rastući i teško zaustavljiv. Riječ je o prirodnom procesu koji urbanizacija može značajno ubrzati i time uzrokovati društveno iznimno opasna i teško rješiva stanja. Radi se o procesu s kojim se suočavaju razvijene, ali i zemlje u razvoju. U

SAD-u se do sada pojava slijeganja najčešće promatrala isključivo kao obalna prijetnja povezana s relativnim porastom razine mora. Međutim, novija istraživanja su pokazala da slijeganje tla ozbiljno ugrožava i unutrašnje gradske sredine. Unatoč tome, detaljni podaci o veličini slijeganja, koji bi omogućili uvid u prostorne razlike unutar gradova, često nedostaju, što otežava preciznu procjenu rizika za infrastrukturu.

U prethodno navedenom članku korištena su geodetska satelitska mjerenja u razdoblju od 2015. do 2021. godine kako bi se izradile karte visoke rezolucije veličine slijeganja za 28 najnaseljenijih američkih gradova. Rezultati pokazuju da se najmanje 20 % površine u svim gradovima sliježe, uglavnom zbog pretjeranog crpljenja podzemnih voda, što pogađa oko 34 milijuna ljudi. Također je utvrđeno da je više od 29 tisuća zgrada smješteno u područjima s visokim i vrlo visokim rizikom od oštećenja, što upućuje na veliku vjerojatnost štete na infrastrukturi. Ovi su podaci od ključne važnosti za razvoj odgovarajućih politika kojima će se gradska središta prilagoditi složenim okolišnim izazovima budućnosti.

Slijeganje tla u Joaquin Valleyju (Kalifornija, SAD) jedan je od najpoznatijih primjera antropogenog slijeganja na svijetu, kao i slijeganje Mexico Cityja. Glavni razlog leži u prekomjernom crpljenju podzemnih voda. To je naročito izraženo u Kaliforniji tijekom sušnih razdoblja kada je navodnjavanje poljoprivrednih površina intenzivno. Kada se velike količine vode ispumpaju iz vodonosnika, slojevi gline i mulja postaju djelomično zasićeni i postupno se zbijaju na račun prostora ispunjenog zrakom umjesto vodom, što dovodi do trajnog smanjenja zapremine tla. Proces je nepovratan jer se smanjeni prostor više ne može vratiti u prvobitno stanje.

Na slici 1 prikazan je model tla koji prikazuje koji dio tla se može zbiti kada se za to stvore uvjeti. Slijeganje nastaje uslijed dodatnih opterećenja na površini ili u plitkoj dubini tla. U stišljivim, zasićenim tlima dodatno opterećenje povećava porne tlakove i istiskuje vodu u okolni prostor nižeg tlaka. Što je opterećena površina veća to je utjecaj dodatnih opterećenja dublji. Slijedom toga se može jasnije zamisliti kako na tlo u gradovima



Slika 1: Trofazni model tla

utječu velike površine opterećene građevinama i gradskom strukturom.

Drugi uzrok slijeganja je crpljenje vode. Tim se procesom spušta razina podzemne vode i oslobađa prostor ispunjen zrakom koji se slobodno sliježe.

U oba slučaja pretpostavlja se da su čestice tla nestišljive.

Trajanje ovoga procesa ovisi o vodopropusnosti tla.

Razmjeri ovog fenomena su impresivni: u nekim dijelovima San Joaquin Valleyja zabilježeno je slijeganje tla veće od 9 metara tijekom 20. stoljeća. Poznato je da je grad Tuzla, (www.bhstring.net) zbog iskorištavanja slane vode u 130 godina potonuo za oko 10 metara. Takvo slijeganje šteti infrastrukturi poput kanala za navodnjavanje, cesta, mostova i cjevovoda. Osim toga, smanjuje se kapacitet vodonosnika jer zbijeni slojevi više ne mogu primiti jednaku količinu vode. Ovaj problem predstavlja dugoročan izazov za održivo upravljanje vodnim resursima u Kaliforniji, kao i bilo gdje drugdje, osobito u kontekstu klimatskih promjena i rastuće potražnje za vodom. Zbog intenziviranja trenda porasta temperatura zraka, suše su u Kaliforniji sve češće i sve dugotrajnije, a borba s njima sve neizvjesnija.

Na [slici 2](#) prikazana je legendarna fotografija slijeganja tla u San Joaquin Valleyju. Znakovi na stupu označavaju približnu nadmorsku visinu površine terena 1925., 1955. i 1977. godine. Površina se slegla za oko 9 metara od 1925. do 1977. godine zbog zbijanja vodonosnog sloja. Zbijanje nekonsolidiranih vodonosnih slojeva koje prati prekomjerno crpljenje podzemnih voda daleko je najčešći uzrok slijeganja (Poland i sur., 1975).

Lees i Knight (2024) su korištenjem satelitskih geodetskih mjerenja (InSAR), kvantificirali volumetrijsko slijeganje tla u dolini tijekom razdoblja 2006. – 2022. Ustanovili su da je ukupni volumen slijeganja tijekom tih 16 godina iznosio 14 km³. Važno je naglasiti da to odgovara količini slijeganja zabilježenoj tijekom znatno duljega "povijesnog razdoblja" od 45 godina (1925. – 1970.). Autori preporučuju smanjenje pretjeranog crpljenja podzemnih voda, posebno iz dubljih vodonosnika i u najugroženijim područjima. Slijeganje

tla u središnjoj kalifornijskoj dolini (uključujući San Joaquin Valley) uzrokovalo je pad cijena kuća od 2,4 % do 5,8 %. Riječ je o ukupnom padu vrijednosti od oko 1,87 milijardi dolara u razdoblju 2015. – 2021. (Nemati i sur., 2025).

Na globalnoj razini, ubrzano slijeganje gradova smještenih uz obalu poput Jakarte, Bangkoka, Venecije i New Orleansa privuklo je u početku pažnju javnosti i stručnjaka. Taj je fenomen nazvan „gradovi koji tonu” te se dosta dugo smatralo da se on javlja isključivo, ili barem prvenstveno, u urbanim prostorima uz mora i oceane. Primjera radi se navodi da Jakarta tone brzinom od 5 do 10 cm godišnje, a u sjevernim dijelovima čak do 20 cm, prvenstveno zbog pretjeranog crpljenja podzemne vode. Iz tog razloga je vlada Indonezije odlučila izgraditi novi glavni grad na sigurnijem terenu (<https://www.index.hr/vijesti/clanak/jakarta-sve-vise-tone-vec-2050-trecina-grada-bit-ce-potpuno-pod-vodom/2110113.aspx>).

Tek je kasnije uočeno da i mnoge unutrašnje metropole poput Mexico Cityja, Pekinga i Teherana, bilježe značajne stope slijeganja. To je ukazalo na nužnost posvećivanja znatno veće pozornosti ovoj problematici. Na žurno djelovanje gradske su vlasti bile prisiljene zbog sve razornijih posljedica slijeganja tla na infrastrukturu. Pokazalo se da čak i relativno umjereni iznosi urbanog slijeganja mogu ozbiljno ugroziti stabilnost zgrada, cesta, mostova, podzemne infrastrukture i brana. S vremenom dolazi do nakupljanja malih pomaka, što dodatno utječe na ranjivost složenih gradskih sustava i vodi njihovom uništavanju.

Pri tome je posebno uočeno povećanje rizika od posljedica naglih urbanih poplava. Zbog slijeganja tla pojedini se prostori u gradovima spuštaju, pa se u njima oborinska voda brže nakuplja, dulje zadržava i ne otječe. U primorskim gradovima ili onima kroz koje teku rijeke, gubi se prirodna nadmorska zaštita od visokih voda rijeka, mora i oborinskih bujičnih tokova. Pri naglim urbanim poplavama slijeganje terena može utjecati na prirodne ili projektirane smjerove otjecanja, usmjeravajući vodu u dijelove gradova koji prije nisu



Slika 2: Joseph F. Poland stoji pored dalekovoda i pokazuje koliko se teren u San Joaquin Valley slegao u razdoblju 1925. – 1977.

bili ugroženi poplavama. Dolazi do otežanog otjecanja oborinskih voda jer su sustavi odvodnje (kanali, kolektori, crpne stanice) projektirani za više razine terena. Kada se tlo slegne, gravitacijsko otjecanje postaje slabije ili potpuno nefunkcionalno. Slijeganje tla spušta određene gradske prostore u odnosu na okolne vodene tokove i smanjuje kapacitet oborinske odvodnje, što izravno povećava učestalost i težinu naglih urbanih poplava, ali i poplava uzrokovanih velikim vodama rijeka i gradskih vodotoka. Navarro i sur. (2023) koristili su InSAR i HEC-RAS 2D modele za simulaciju poplava u urbanom području doline Alto Guadalupe (jugoistočna Španjolska) za poplave koje su se zbile 1992. i 2016.

godine. Ustanovili su da je od 1992. do 2016. na 2,04 km² došlo je do povećanja područja koje je poplavljeno s dubinom vode većom od 0,7 m. Usijedanje terena je znatno promijenilo oblike reljefa, usporilo protok vode i povećalo zadržavanje oborinskih voda.

Analize su nedvojbeno pokazale da su glavni pokretači slijeganja tla povezani s ljudskim djelovanjem, što prvenstveno uključuje crpljenje podzemnih voda i opterećenje nastalo urbanizacijom. Nedvosmislen je zaključak da će ti procesi, potaknuti rastom gradova i klimatskim promjenama, dodatno ubrzati slijeganje. Posebno zabrinjava činjenica da će klimatski uvjetovane suše i rastuća potražnja za pitkom vodom dodatno povećati rizik od slijeganja, otvarajući perspektivu budućnosti u kojoj će sve veći broj gradova morati rješavati izazove upravljanja tim procesom. Postavlja se pitanje jesu li i koji su gradovi u Hrvatskoj ugroženi od slijeganja, pri čemu se prvenstveno misli na naš glavni grad, Zagreb.

Sustavnim pregledom literature Othenien i sur. (2025) ustanovili su da je u SAD-u slijeganje tla zabilježeno na više od 44.000 km² u 45 saveznih država. Navode da su dokumentirani slučajevi slijeganja u više od 50 gradova. Među najpoznatijim regijama pogođenima slijeganjem ističu se područje Houston – Galveston u Teksasu (Tirmizi i Khan, 2023), Phoenix u Arizoni, dolina Las Vegasa u Nevadi, delta Mississippija u Louisiani, brojni gradovi na istočnoj obali poput Hampton Roads u Virginiji i Charlestona u Južnoj Karolini te dijelovi Aljaske.

U Houstonu i Galvestonu dugotrajno crpljenje podzemnih voda te eksploatacija nafte i plina doveli su u pojedinim zonama do slijeganja brzinom i do 5 cm godišnje. Phoenix i Las Vegas bilježe stope slijeganja i do 9 cm godišnje. Delta Mississippija pokazuje slijeganje veće od 1 cm godišnje. Ti su procesi ovdje dodatno pogoršani smanjenim donosom sedimenata, što je posljedica izgradnje brana i nasipa. Na istočnoj obali, kombinacija prirodnih procesa (glacijalna izostatska prilagodba) i ljudskih aktivnosti uzrokuje slijeganje brzinom i do 5 mm godišnje. Na Aljasci topljenje permafrosta izaziva lokalna slijeganja do 1 cm godišnje.

Široka rasprostranjenost i raznolikost uzroka čine problem slijeganja tla posebno složenim za održavanje infrastrukture, planiranje gradova i upravljanje okolišem. Nužno je organizirati učinkoviti sustav stalnog praćenja prostornih i vremenskih obrazaca promjena nadmorske visine terena. To je ključno jer precizne, ali prostorno ograničene metode, poput GPS-a ili nivelmana, ne mogu dati cjelovitu sliku razvoja procesa u vremenu i prostoru.

Ograničenje informacija koje pružaju lokalna mjerenja moguće je prevladati korištenjem satelitskih tehnologija, posebno radarske interferometrije (InSAR). Ona omogućuje sustavno praćenje promjena visine tla s milimetarskom preciznošću i visokom prostornom rezolucijom, a podaci se mogu koristiti u globalnim modelima te kao neophodna dopuna terenskim mjerenjima.

Analize pokazuju da čak 25 od 28 najvećih gradova SAD-a trenutno bilježi slijeganje tla različitim brzinama. Posebno je alarmantno stanje u najbrže rastućoj saveznoj državi Teksasu. Gradovi Houston, Fort Worth i Dallas imaju najviše izmjerene stope slijeganja koje iznose više od 4 mm godišnje. U svim je gradovima barem 20 % površine podložno slijeganju, a u 25 gradova taj udio prelazi 65 %. Procjenjuje se da se ukupno 17.900 km² urbanih površina u SAD-u spušta. U gradovima poput Chicaga, Dallasa, Columbusa, Detroita, Fort Wortha, Denvera, New Yorka, Indianapolisa, Houstona i Charlotte gotovo je čitavo gradsko područje (98 %) zahvaćeno slijeganjem.

Iznimno nepovoljna situacija bilježi se u Houstonu, najbrže tonućem gradu među 28 analiziranih. Ondje se 42 % površine spušta brže od 5 mm godišnje, a 12 % čak brže od 10 mm godišnje. Slične zone lokalno povišenog rizika, u kojima tlo tone brzinom većom od 5 mm godišnje, identificirane su i na ključnim lokacijama poput Zračne luke LaGuardia u New Yorku, dijelova Las Vegasa, Washingtona, San Francisca i Los Angelesa.

Procjene pokazuju da oko 33,8 milijuna ljudi živi na područjima koja tonu. Najpogođeniji su New York, Los Angeles, Houston, Dallas i Washington. U osam najvećih gradova više od milijun ljudi u svakom gradu izloženo je ovom riziku. Samo New York broji oko 26 % ukupno ugrožene populacije. Ovaj problem dodatno pogoršava činjenica da su upravo ti gradovi od 2000. godine doživjeli više od 90 poplavnih epizoda, a nastavak slijeganja u kombinaciji s klimatskim promjenama povećava rizik od budućih katastrofa.

Na procese slijeganja tla u američkim gradovima utječu i prirodni i antropogeni čimbenici. U gradovima poput New Yorka, Philadelphije, Washingtona, Denvera, Indianapolisa, Columbusa, Detroita, Nashvilea, Chicaga i Portlanda važnu ulogu ima glacialna izostatska prilagodba. Riječ je o sporom procesu spuštanja tla nakon povlačenja ledenjaka, koji se odvija stopama od 1 do 3 mm godišnje. Na zapadnoj obali, primjerice u Seattleu, Portlandu i San Franciscu, regionalne razlike u slijeganju povezane su s tektonskim aktivnostima i zbijanjem sedimenata uz aktivne rubove tektonskih ploča.

Ipak, većina slijeganja nije posljedica prirodnih procesa, nego ljudskog djelovanja. Ohenhen i sur. (2025) tvrde da je čak 80 % slijeganja tla u gradovima uzrokovano crpljenjem podzemnih voda. Mehanizam se temelji na principu efektivnog naprezanja: crpljenjem podzemne vode, tlak u porama tla opada, povećava se efektivno naprezanje tla (naprezanje u kosturu tla, što dovodi do premještanja čestica u prostore ispunjene zrakom). Dolazi do zbijanja podzemnih slojeva, što rezultira spuštanjem površine.

Ova veza između crpljenja vode i slijeganja posebno je izražena u gradovima izgrađenim na finim, zbijenim sedimentima gdje čak i umjereni pad razine podzemne vode dovodi do mjerljivog spuštanja tla.

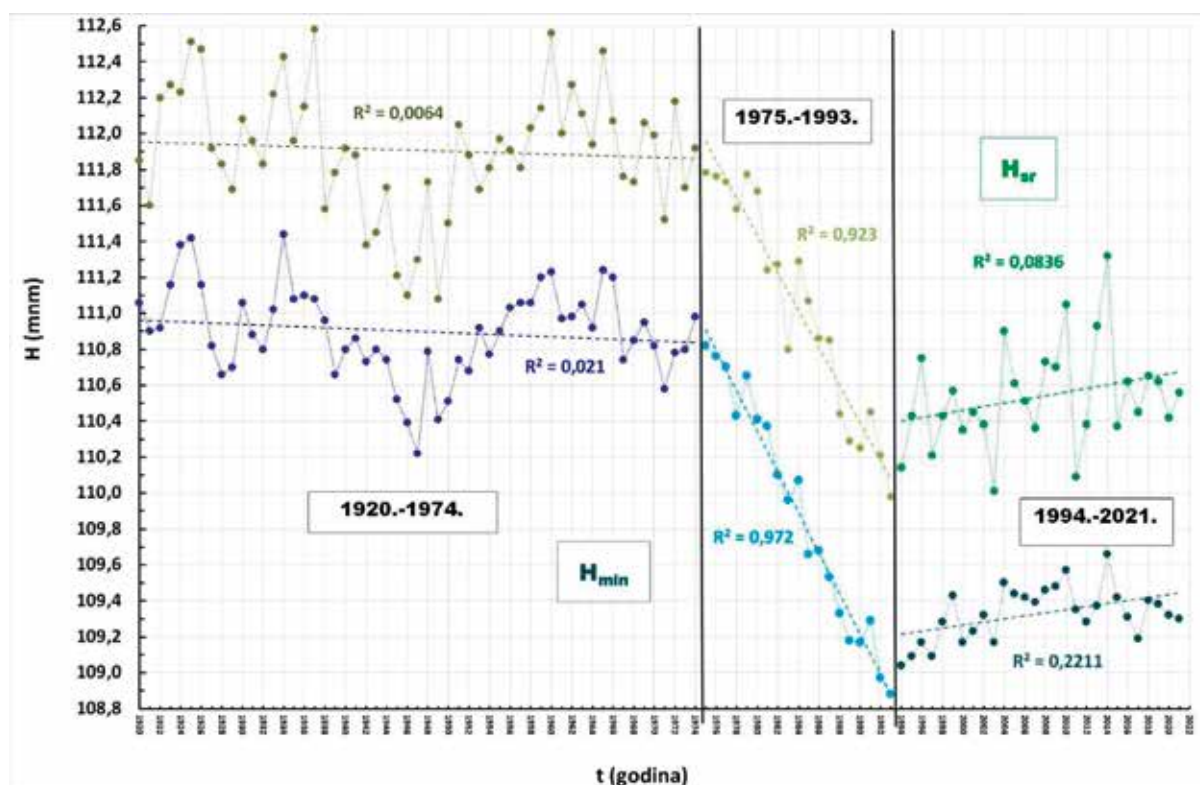
Bitno je naglasiti da između promjena razina podzemnih voda i vertikalnih pomaka tla, postoji vremensko kašnjenje. U zatvorenim vodonosnicima pad razine podzemnih voda gotovo izravno uzrokuje slijeganje, a povratak razine može djelomično zaustaviti, ali ne može preokrenuti proces.

Štete na građevinama i infrastrukturi uzrokovane neravnomjernim pomacima tla, najopasnije su posljedice urbanog slijeganja. Oštećenja na infrastrukturi mogu nastati i pri vrlo malim pomacima. Problem je što takva oštećenja često ostaju skrivena dok ne postanu ozbiljna ili čak katastrofalna. Rizik je posebno velik u brzorastućim urbanim sredinama u kojima se infrastruktura širi na područja osjetljiva na slijeganje.

Sama činjenica da se zgrada nalazi u rizičnoj zoni ne znači da će nužno biti oštećena. Šteta nastaje kombinacijom čimbenika kao što su vrsta tla, način temeljenja, upotrijebljeni građevinski materijal, starost zgrade, ali i dodatnih rizika poput potresa ili poplava. Navedeno ukazuje na važnost uključivanja podataka o slijeganju u urbanističko planiranje, građevinske propise i politike upravljanja rizicima. Za pronalaženje učinkovitih rješenja za ublažavanje rizika nužno je da se urbanističko planiranje, sustavi upravljanja vodama i prilagodba klimatskim promjenama promatraju integrirano.

Nužno je kombinirati znanstvena istraživanja, tehničke mjere i političke odluke. Najvažniji korak je upravljanje crpljenjem podzemnih voda. U gradovima u kojima je slijeganje povezano s prekomjernom eksploatacijom stroža kontrola crpljenja može značajno smanjiti rizike. Drugi važan alat su sustavi ranog upozorenja. Korištenjem satelitskih podataka (InSAR) i lokalnih mjernih postaja moguće je u stvarnom vremenu pratiti slijeganje i pravovremeno reagirati, prije nego što nastane ozbiljna šteta. Urbanističko planiranje i građevinski standardi moraju uzeti u obzir rizike slijeganja. To prije svega znači izbjegavanje gradnje na izrazito osjetljivim područjima ili primjenu temeljenja i materijala otpornijih na pomake tla. Osobito je važno voditi računa o fleksibilnosti raznih vrsta cjevovoda i sličnih instalacija. Ključna je i edukacija javnosti; stanovnici i donositelji odluka moraju razumjeti rizike koje slijeganje nosi te važnost održivog upravljanja vodnim resursima. Važno je biti svjestan činjenice da ne postoje univerzalna rješenja. Svaka zajednica mora razviti vlastite strategije prilagođene lokalnim hidrogeološkim i društvenim uvjetima.

Sve prethodno izneseno navodi na zaključak da je nužno integrirati podatke o slijeganju u procese urbanog planiranja, prilagodbe klimatskim promjenama i upravljanja vodnim resursima. Problem je u tome što rijetko koji grad na svijetu raspolaže takvom vrstom informacija. Pravovremeno prepoznavanje problema može značajno smanjiti štete i troškove njihove sanacije, ali i zaštititi živote stanovnika. Svijest o postojanju problema prvi je korak u njihovu rješavanju. Tek kada



Slika 3: Nizovi minimalnih i srednjih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba u razdoblju 1920.-2021. (Bonacci i Roje-Bonacci, 2023)

odgovorni shvate rizike koje slijeganje nosi, mogu se razviti učinkovite strategije za njihovo ublažavanje.

Na kraju ćemo se osvrnuti na problematiku slijeganja tla u gradu Zagrebu. Za razvoj ovog opasnog fenomena na prostoru na kojem se grad razvijao, a osobito na onom na kojem se intenzivno širi, postoje jasni fizički preduvjeti. Tu se prije svega misli na aluvijalni nanos s finim međuslojevima, na produbljivanje korita rijeke Save (Bonacci i Roje-Bonacci, 2023) i na intenzivni pad razine podzemne vode (Nakić i sur., 2013; Vujević i Posavec, 2018) uzrokovan crpljenjem za potrebe vodoopskrbe (Meaški i sur., 2021).

Na slici 3 prikazani su nizovi minimalnih, H_{min} i srednjih H_{sr} godišnjih vodostaja Save kod Zagreba opaženih u razdoblju 1920. – 2021. Na oba se niza uočava da u podrazdoblju 1920. – 1974. postoji blagi, statistički neznačajni trend opadanja. Naglo opadanje započelo je 1975. godine i trajalo je do 1993. godine. U tom relativno kratkom podrazdoblju oba su se vodostaja snizila za oko 2 m. Budući da razina minimalnih vodostaja prati razinu dna korita, taj se pad odnosi i na eroziju dna korita Save na profilu vodomjerne postaje Zagreb. Od 1994. do 2021. uočava se blagi, statistički neznačajan trend porasta minimalnih i srednjih godišnjih vodostaja Save kod Zagreba što se pripisuje izgradnji praga na lokaciji toplane (TE-TO Zagreb). Bitno je naglasiti da su gotovo identična sniženja dna korita rijeke Save uočena na cijelom potezu od granice sa Slovenijom do lokacije uzvodno od Rugvice.

Rijeka Sava ima izravan hidrološki utjecaj na vodonosnik. Njezino korito je usječeno u vodonosnik,

što znači da su razine podzemne vode i vodostaji Save u uskoj vezi. Zbog izravne hidrauličke veze s vodonosnikom, svaka promjena vodostaja Save odmah se odražava na razine podzemne vode u vodonosniku. Sam se vodonosnik sastoji od šljunkovito-pjeskovitih naslaga, često nehomogene debljine (5 – 100 m). Odnos vode u Savi snažno je povezan s razinama podzemnih voda u okolnom vodonosniku. Tijekom visokih vodostaja Sava prihranjuje vodonosnik, dok tijekom malovodnih razdoblja voda iz vodonosnika prihranjuje rijeku. Slijedom toga, evidentno je da snižavanje vodostaja Save utječe i na snižavanje razine podzemne vode u pripadajućem vodonosniku.

Kad se tome doda činjenica da se iz ovog vodonosnika crpe goleme količine vode za opskrbu grada Zagreba i šire regije, jasno je da je u posljednjih 60-ak godina uočen zabrinjavajući trend snižavanja razine podzemnih voda u cijelom vodonosniku. Analizom povijesnih podataka iz piezometara zagrebačkog i samoborsko-zaprešićkog vodonosnika od 1960-ih do danas utvrđeno je da su razine podzemne vode općenito niže za 3 do 6 metara u odnosu na povijesno stanje iz 1960-ih (Vujević i Posavec, 2018). Kao faktori usporavanja negativnog trenda istaknuti su izgradnja praga TE-TO na rijeci Savi i razdoblja hidrološki natprosječno povoljnih godina, poput 2013. i 2014. Ključni uzroci snižavanja su dugotrajno crpljenje vode te smanjena prirodna infiltracija zbog urbanizacije i prenamjene korištenja zemljišta. Na stanje utječe smanjenje prirodne infiltracije vode zbog širenja urbanih površina, asfalta i betona, koji sprječavaju prodiranje kišnice u tlo. Ne

smije se zanemariti niti utjecaj klimatskih promjena koje uzrokuju duža sušna razdoblja i manju količinu oborina, ali i nepovoljnu preraspodjelu oborina tijekom godine. Očuvanje stabilne razine podzemnih voda ključno je ne samo za sigurnu vodoopskrbu Zagreba već i za sprječavanje slijeganja tla.

Važno je naglasiti da satelitski nadzor do sada nije zabilježio opsežno slijeganje tla u urbanom području Zagreba, no rizik je realan i povezan s nastavkom/pojačanjem pada razine Save i podzemnih voda te lokalnom građom tla (Pribičević i sur., 2017). Stoga se predlaže sustavno povezivanje piezometarskih mjerenja s rezultatima dobivenim metodom InSAR kao učinkovito sredstvo praćenja slijeganja terena na širem urbanom području grada.

U slučaju Zagreba riječ je o kvartarnom nanosu rijeke Save koji po granulometrijskom sastavu nije izrazito sitnozrnat. U takvim tlima slijeganje traje nešto kraće nego u izrazito sitnozrnim tlima. Često je slijeganje izazvano izgradnjom nove građevine uz staru (neboderi u Gradišćanskoj ulici) pa tako i uz infrastrukturne građevine. To može uzrokovati deformacije cjevovoda koje dovode do pucanja.

Pucanje vodovodnih i toplovodnih cijevi u Zagrebu česta je pojava. Osim kao posljedica starosti cijevi i povećanja prolaza teških vozila, pucanje bi na nekim lokacijama moglo, barem dijelom, biti uzrokovano i lokalnim usijedanjem terena. Kako bi se ispitala ta pretpostavka, bilo bi korisno izvršiti detaljnu analizu lokacija na kojima dolazi do učestalih pucanja. Na osnovi te analize moglo bi se pokušati zaključiti utječe li i u kojoj mjeri slijeganje terena na ove, nažalost, prečeste i opasne događaje. ■

LITERATURA

Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (2023). Hidrološka analiza nizova vodostaja i protoka Save na vodomjernoj postaji Zagreb. *Hrvatske Vode* 31(125), 173-184.

Lees, M.; R. Knight, R. (2024). Quantification of record-breaking subsidence in California's San Joaquin Valley. *Communications Earth & Environment*, 5, 677.

Meaški, H.; Biondić, R.; Loborec, J.; Oskoruš, D. (2021). The possibility of managed aquifer recharge (MAR) for

normal functioning of the public water-supply of Zagreb. Croatia. *Water* 13, 1562.

Nakić, Z.; Ružičić, S.; Posavec, K.; Mileusnić, M.; Parlov, J.; A. Bačani, A.; G. Durn, G. (2013). Conceptual model for groundwater status and risk assessment - case study of the Zagreb aquifer system. *Geologia Croatica* 66(1), 55-77.

Navarro-Hernández, M. I.; Valdes-Abellan, J.; Tomás, R.; Tessitore, S.; Ezquerro, P.; Herrera, G. (2023). Analysing the impact of land subsidence on the flooding risk: evaluation through InSAR and modelling. *Water Resources Management* 37(11), 4363-4383.

Nemati, M.; Sneed, M.; Dinar, A. (2025). Impact of Land Subsidence on Housing Sale Values: Evidence from the San Joaquin Valley, California. *Land Economics* 101(3)

Ohenhen, L. O.; Zhai, Z.; Lucy, J.; Werth, S.; Carlson, G.; Khorrami, M.; Onyike, F.; Sadhasivam, N.; Tiwari, A.; Ghobadi-Far, K.; Sherpa, S. F.; Lee, J.-S.; Zehsaz, S.; Shirzaei, M. (2025). Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nature Cities*, 2(6), 543-554.

Poland, J. F.; Lofgren, B. E.; Riley, F. S.; Ireland, R. L. (1975). Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1972.

U.S. Geological Survey Professional Paper 437-H.

Pribičević, B.; Govorčin, M.; Đapo, A. (2017). Surface deformation monitoring in the Republic of Croatia with MT-InSAR. *Annual of the Croatian Academy of Engineering* 1(25), 371-381.

Tirmizi, O.; Khan, S. D. (2023). Factors of subsidence in Katy, Texas, USA. *Remote Sensing*, 15, 4424.

Vujević, M.; Posavec, K. (2018). Identification of groundwater level decline in the Zagreb and Samobor-Zaprešić aquifers since the sixties of the twentieth century. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin* 33(4), 55-64.

www.bhstring.net (posjet 27. kolovoza 2025.)

www.index.hr/vijesti/clanak/jakarta-sve-vise-tone-vec-2050-trecina-grada-bit-ce-potpuno-pod-vodom/2110113.aspx (posjet 27. kolovoza 2025.)

https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview?utm_source=chatgpt.com (posjet 27. kolovoza 2025.)