

# Prispevek k boljšemu prepoznavanju nabrekalnega potenciala v zemljinah in mehkih kamninah

## A contribution to the better understanding of swelling in soils and soft rocks

Ana PETKOVŠEK, Matej MAČEK & Bojan MAJES

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: matej.macek@fgg.uni-lj.si

Prejeto / Received 6. 9. 2010; Sprejeto / Accepted 7. 10. 2010

*Ključne besede:* deformacija, nabrekanje, retencijska krivulja, sukcija  
*Key words:* deformation, swelling, soil water retention curve, suction

### Izvleček

Nabrekanje in krčenje z glino bogatih sedimentov sodi med geološko pogojene dejavnike tveganja. Gospodarska škoda, ki nastaja zaradi volumskih sprememb v geološkem zaledju zgradb in infrastrukturnih objektov, je ogromna. Nepravočasno prepoznano nabrekanje povzroča podražitve in nepotrebne zamude med gradnjo. V primerih, ko z globokimi vkopi in podzemnimi prostori posegamo v visoko prekonsolidirane zemljine in mehke kamnine, ki vsebujejo glino, porušitve brežin in pod-dimenzioniranih opornih ukrepov zaradi nabrekanja niso redke. Tudi periodično pojavljanje plazov na določenih ozemljih je lahko posledica nabrekanja. Nekatere države, na primer ZDA, imajo že desetletja uveljavljene smernice in standarde za prepoznavanje, vrednotenje in ravnanje z nabreklijivimi geološkimi materiali. Zaradi drugih, bolj aktualnih geološko pogojenih tveganj, kot so plazovi, potresi in gradnje na mehkih tleh, je razvoj znanj na področju nabreklijivih zemljin v Sloveniji dolga leta zaostajal za znanji v svetu. Pri gradnji slovensko madžarske železniške povezave po letu 1998, avtocest v Pomurju in z vpeljavo novih znanj o zemljinski sukciji pa smo tudi v Sloveniji dobili drugačen vpogled v razsežnost problema, ki ga predstavljajo nabreklijive zemljine, pridobili pomembne izkušnje in odprli nove možnosti raziskovanja in razumevanja volumskega obnašanja nabreklijivih zemljin. To je še posebej pomembno ob napovedanih vremenskih ekstremih, saj bomo le z ustreznimi znanji znali nove pojave v tleh pravilno razložiti in se pred njimi tudi ustrezno zavarovati.

### Abstract

Swelling and shrinkage of sediments rich with clay belong to geologically conditioned risk factors. Economic loss as the consequence of volume changes in the geological catchment area of buildings and infrastructural objects is immense. Untimely detected swelling causes higher prices and unnecessary delays during the construction. In those cases when deep cuts and underground spaces are used as intervention into highly preconsolidated soils and soft rock with clay contents, failures of embankments and improperly designed supporting measures due to swelling are not infrequent. Also periodic appearance of landslides at certain areas can be the consequence of swelling. Some countries, such as the USA, introduced the guidelines and standards for the detection, assessment and handling with swellable geological materials decades ago. Due to some other more urgent geologically conditioned risks, such as landslides, earthquakes and constructions on soft ground, in Slovenia the development of knowledge in the area of swelling soils was several years behind the knowledge in the rest of the world. With the construction of the Slovenian-Hungarian railway connection after 1998, motorways and the introduction of new knowledge about soil suction, also Slovenian experts were introduced to a different dimension of the problem of swelling soils, as well as some important experiences were learned and new possibilities for the investigation and understanding of volume behaviour of swelling soils were opened. This is especially important for the predicted weather extremes, as only adequate knowledge will allow us to adequately explain any new phenomena in the ground and prepare appropriate protection.

### Uvod

Na spremembo vlage in sukcije se nekatere zemljine in kamnine odzovejo s spremembo volumna. V času vlaženja nabrekajo, v času sušenja pa se krčijo. V določenih napetostnih razmerah lahko nabreklijive zemljine v času vlaženja tudi

kolapsirajo. Krčenja in nabrekanja z glino bogatih sedimentov uvrščamo v skupino geoloških nevarnosti (geohazard), na katere imajo podnebne spremembe velik vpliv (KOMAC, 2009). Nabrekajo lahko nezasičene in zasičene zemljine kot tudi kamnine, ki vsebujejo glino.

Razlaga deformacijskega obnašanja zasičenih zemljin temelji na načelu učinkovitih tlakov (TERZAGHI, 1936), po katerem so volumske spremembe v zemljini posledica spremembe učinkovitih napetosti ( $\Delta\sigma'$ ), zveza med totalnimi napetostmi ( $\sigma$ ), učinkovitim napetostmi ( $\sigma'$ ) in tlakom porne vode ( $u$ ) pa je določena z enačbo (1). TERZAGHI (1936) je predpostavil, da so vsa zrna v zemljini inertna, sprememba volumna zemljine je tako po spremembi učinkovitih napetosti proporcionalna spremembi volumna vode v zemljini.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

Volumenske spremembe so v nezasičenih zemljinah veliko bolj zapletene kot v zasičenih zemljinah. Elektrokemične privlačne in odbojne sile ter kapilarnost, ki delujejo med zrni, ustvarjajo v nezasičeni zemljini stanje tako imenovane »meta« stabilne strukture. Zemljinska sukcija ( $u_a - u_w$ ) prispeva k medzrnskemu tlaku ( $\sigma'$ ) in posledično k trdnosti zemljine. Ob navzemanju vode zemljinska sukcija upada, zato se med zrni niža učinkovita napetost, volumen se večja (lahko pa tudi nenadoma upade – kolaps). Zemljina izgublja na trdnosti in se mehča (angl. softening). Če je v saturiranih zemljinah sprememba vlage proporcionalna spremembi volumna, pa v nesaturiranih zemljinah načelo proporcionalnosti ne velja. BISHOP A. W. (1959) je za nezasičene zemljine predlagal korekcijo Terzaghijeve enačbe v obliko (2).

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w) \quad (2)$$

kjer je:  $\chi$  parameter, direktno odvisen od stopnje zasičenosti,  $u_a$  tlak zraka v porah,  $u_w$  tlak vode v porah,  $u_a - u_w$  zemljinska sukcija.

Vendar pa z enačbo (2) ne moremo pojasniti kolapsa. FREDLUND D. G. (1985) je spremembo volumna v povezavi s sukcijo opisal z zvezo (3).

$$de = a_t d (\sigma - u_a) + a_m d (u_a - u_w) \quad (3)$$

kjer je  $e$  – količnik por,  $a_t$  – koeficient stisljivosti glede na spremembo ( $\sigma - u_a$ ) in  $a_m$  – koeficient stisljivosti glede na spremembo ( $u_a - u_w$ ).

Med novjšimi modeli nesaturiranih zemljin je danes najbolj znan tako imenovani BExM ali Barcelona oz. Alonso model (GENS & ALONSO, 1990). Ta razlikuje med mikro in makro porami. Ko sukcija upada, lahko zemljina na mikro nivoju nabreka, na makro nivoju pa tudi kolapsira.

V preteklosti (v Sloveniji pa vse prevečkrat tudi še danes) se je nabrekljivost zemljine v glavnem prepoznavala glede na mineralno sestavo, približno po načelu:

- v zemljini ali kamnini ni nabrekljivih mineralov glin – zemljina ne bo nabrekala
- v zemljini so prisotni nabrekljivi minerali glin (npr. montmorillonit) – zemljina bo verjetno nabrekala
- v zemljini je več nabrekljivih mineralov glin – zemljina bo bolj nabrekala.

Izkušnje kažejo, da so geološke napovedi nabrekanja, kadar temeljijo samo na podatkih mineraloške analize, za geotehnično rabo premalo zanesljive ali celo zavajajoče. Po novem standardu za geotehnično projektiranje Evrokod (SIST EN, 1997-1) je preiskovanje nabrekljivosti uvrščeno med preizkuse za razvrščanje in identificiranje zemljin in kamnin. S kakšnimi postopki naj se nabrekljivost preizkuša in kako postaviti mejo med nabrekljivimi in nenabrekljivimi geološkimi materiali, standard ne določa. Zato je napovedovanje nabrekalnih deformacij in nabrekalnih tlakov, ki se lahko razvijejo v zemljinah in kamninah zaradi spremembe napetostnega stanja porne vode, še vedno velik inženirski izziv.

Ta prispevek smo pripravili z namenom, da bi boljše razumeli procese nabrekanja in znali tveganja, povezana z volumskimi spremembami zaradi trajno ali sezonsko pogojenih sprememb vlage v zemljinah in mehkih kamninah, pravočasno prepoznati in pravilno ovrednotiti. Pa tudi zato, da že pridobljena znanja in izkušnje ne bi utonila v pozabo.

### Nabrekanje – geološko pogojeni dejavnik tveganja

Škoda, ki jo na infrastrukturnih objektih po svetu povzročata nabrekanje, je večja od skupne škode, povzročene zaradi potresov, poplav in orkanov (CHEN, 1975; NAGARAJ & MURTHY, 1985; FREDLUND & RAHARDJO, 1993) in še narašča. Izjemna suša, ki je leta 2003 prizadela Evropo, je po oceni zavarovalnic samo v Franciji povzročila za ca 1060 milijonov evrov škode (CORTI et al., 2009). Z nabrekljivimi zemljinami se srečujemo na vseh petih kontinentih, nekatere nabrekljive zemljine pa so splošno prepoznavne s svojimi lokalnimi imeni, na primer »Warsaw clay«, »Belgrade marl«, »Black cotton clay«, »Oligocenska sivica« itd.. V zbornikih geoloških in geotehničnih kongresov ter v znanstvenih revijah najdemo na desetine objav na temo nabrekljivosti (DEMENGI, 2009; SKUTNIK & GARBULEWSKI, 2006; HOFFMAN et al., 2005; CHIAPPONE et al., 2004; COKCA, 2002; ABDU-LJAUWAD et al., 2000; DAY, 1993).

Vplivi nabrekanja in krčenja na obnašanje zgradb in prometnic so odvisni od lokalnih razmer in lokalno uveljavljenih načinov gradnje (CRILLY, 2001). Zato so se v svetu uveljavili različni postopki za preiskovanje in vrednotenje nabrekljivosti. V ZDA imajo v okviru Ministrstva za obrambo izdelane tehnične pogoje za preiskave, vrednotenje podatkov in projektiranje na nabrekljivih zemljinah (UFC, 2004). V Franciji so po letu 2003 pričeli z obsežnimi raziskavami odziva stavb na periodične dvižke in skrčke tal, torej nekaj podobnega, kot jih izvajamo v Sloveniji v primerih potresno varne gradnje (TOMAŽEVIČ, 2010). Na modelih zgradb, zgrajenih v realnem merilu, simulirajo dvižke in skrčke tal pod temelji z uporabo hidravličnih batov. Ozko gledano, francoske modelne raziskave nimajo veliko skupnega z raziskavami nabrekljivosti, kažejo pa, kako moderna

država pravočasno reagira na prepoznano tveganje, zaradi katerega je potrebno izboljšati načine gradnje. V Libiji na primer, kamor se širi tudi delovanje slovenskega gradbeništva, tehnični pogoji za gradnjo nekaterih pomembnih prometnic prepevujejo rabo zemljin z mejo židkosti  $w_L > 45\%$ . V Sloveniji je bila do leta 1989 ta meja postavljena na  $w_L < 65\%$  (PTP, Zagreb, 1986), z novjšimi dokumenti pa je ta preprosta a nadvse učinkovita zahteva za zaščito cest pred nabrekanjem utonila v pozabo.

Po avstrijskih smernicah (ÖGG, 2001) se tla uvrščajo v 11 tipov (BT – behaviour type) glede na obnašanje v izkopu predora brez podpiranja. V kategorijo 10 je uvrščeno nabrekanje – to je časovno pogojeni prirastek volumna hribine, razbremenjene ob izkopu.

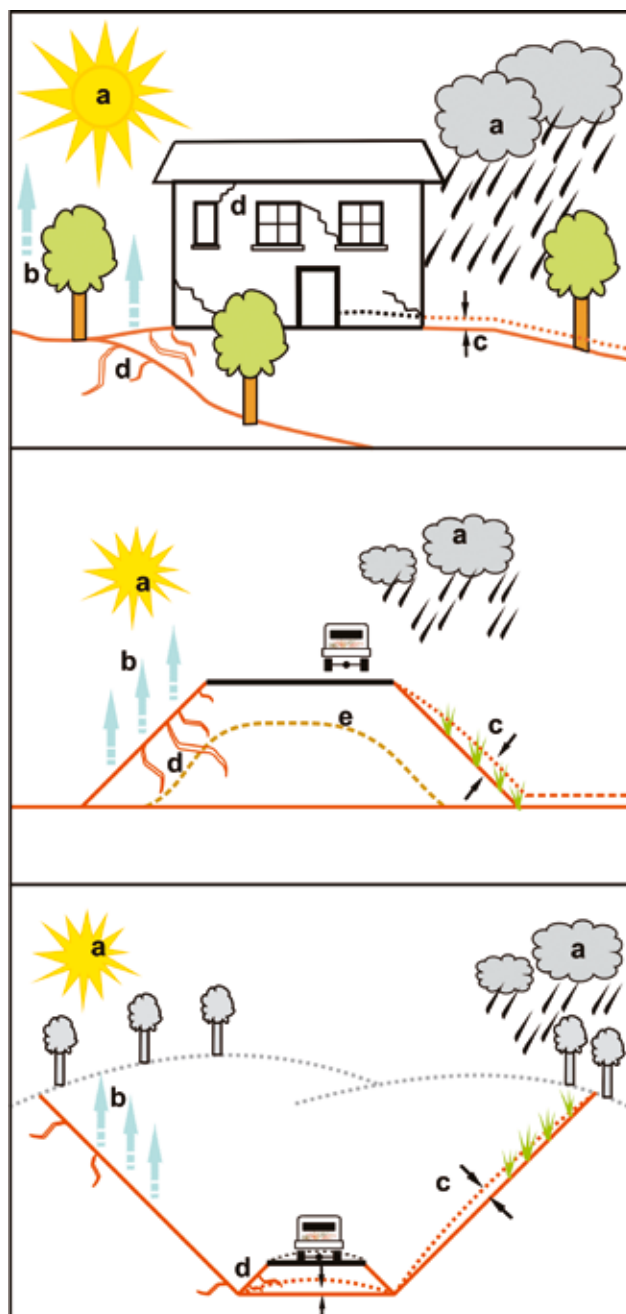
Za vrednotenje kakovosti z vezivi (apnom, cementom) izboljšanih zemljin je vidik volumske stabilnosti enakovreden vidiku trdnosti in odpornosti. Volumsko stabilnost se vrednoti z linearnim nabrekanjem in volumsko ekspanzijo (SIST EN 14227-10), materiali pa se razvrščajo v več razredov (kategorij). Razredi so opredeljeni z absolutnimi vrednostmi volumske ekspanzije, na primer: razred  $G_{V3}$  pomeni manj kot 3 % ekspanzijo, razred  $G_{V5}$  manj kot 5 %, razred  $G_{DV}$  pomeni s projektom deklarirano vrednost. Tveganju nastanka poškodb zaradi nabrekanja se v zgradbah z različno konstrukcijo izognemo z izbiro ustreznega razreda  $G_V$ .

V geotehnikih ne moremo izbirati zelene kategorije geološkega materiala, zato pa moramo čim bolj natančno oceniti nabrekalni potencial v geološkem okolju načrtovane zgradbe. Žal je pomen pravočasnega prepoznavanja nabrekljivosti v Sloveniji absolutno podcenjen. V projektnih nalogah za velike infrastrukturne gradnje, kljub jasnim določilom Evrokod 7 (SIST EN 1997-1:2005) in drugih smernic, preiskave nabrekljivosti največkrat niso predvidene. V procesu izobraževanja je bodoči inženir geologije ali gradbeništva premalo in enostransko poučen o nabrekanju, razloge za celo vrsto »presenečenj«, ki nastajajo med gradnjo in so posledica nabrekljivosti pa se največkrat pripiše drugim vzrokom, kar pravzaprav niti ni težko.

Prispevek M. KOMACA (2009) je eden redkih, zato pa toliko bolj dragocen v slovenski geološki literaturi, ki je eksplicitno pokazal, da sodi nabrekanje med splošne geološke nevarnosti, tako kot na primer plazovi, poplave in erozija. Da pa bo sporočilo doseglo svoj namen, bo treba na vseh nivojih geo-inženirskih znanosti izboljšati razumevanje fenomena nabrekljivosti, ne le pri obravnavi splošnih geoloških nevarnosti temveč tudi pri vrednotenju geoloških raziskav za gradnjo konkretnih geotehničnih objektov.

### Nabrekanje – povratni (reverzibilni) in nepovratni proces

Procesi nabrekanja so povratni (reverzibilni) ali nepovratni (slika 1).



Sl. 1. Shema delovanja reverzibilnega nabrekanja (nabrekanje, krčenje) zgoraj in v sredini ter shema delovanja nepovratnega in/ali reverzibilnega nabrekanja spodaj.

Fig. 1. Scheme of reversible swelling (swelling, shrinkage) activities above and in the middle, and scheme of non-recurring and/or reversible swelling activities below.

Na reverzibilno nabrekanje so najbolj občutljive lahke zgradbe in prometnice, zgrajene v ravnini naravnih tal in na nizkih nasipih na nabrekljivih zemljinah (slika 1 zgoraj in v sredini). Ker so nabrekljive zemljine občutljive na vlago, so gonilo reverzibilnega nabrekanja sezonsko pogojene meteorološke razmere (na sliki 1 pomenijo: a, b: temperatura, celokupna in sezonska razporeditev padavin, evapotranspiracija), ki vplivajo na sezonske spremembe vlage v tleh, odločujoči dejavnik pa so lastnosti tal, predvsem vsebnost nabrekljivih mineralov glin, debelina plasti iz nabrekljive zemljine in globina, do katere segajo sezonske spremembe vlage. V času padavin



zemljina nabreka, kar se odraža v neenakomernih dvizkih (c). V času suše se zemljina krči (d), krčitvene razpoke pa napredujejo globoko v tla in odpirajo nove poti za vodo tudi v plasteh tal, ki v običajnih sezonah niso bile podvržene nabrekanju. Zaradi vremenskih ekstremov se debeli plast zemljine, izpostavljene vplivom sezonsko pogojenih sprememb vlage (e), zato globine temeljev stavb ali spodnjih ustrojev cest, ki so v preteklosti veljale za varne, danes niso več.

Nepovratno nabrekanje je značilno za globoke vkope in podzemne prostore, zgrajene v visoko prekonsolidiranih zemljinah ali mehkih kamninah, ki vsebujejo glino (slika 1 spodaj). Ker so visoko prekonsolidirane zemljine razmeroma malo občutljive na spremembo vlage in močno občutljive na spremembo napetostnega stanja (sukcije), je gonilo nabrekanja ekvilibracija sukucije v razbremenjeni zemljini/kamnini, odločujoči dejavniki pa so velikost spremembe efektivnega tlaka in sukucije, velikost zemljinske sukucije pred razbremenitvijo, sposobnost zemljine/kamnine za navzemanje vode in debelina in prepustnost plasti, ki navzema vodo.

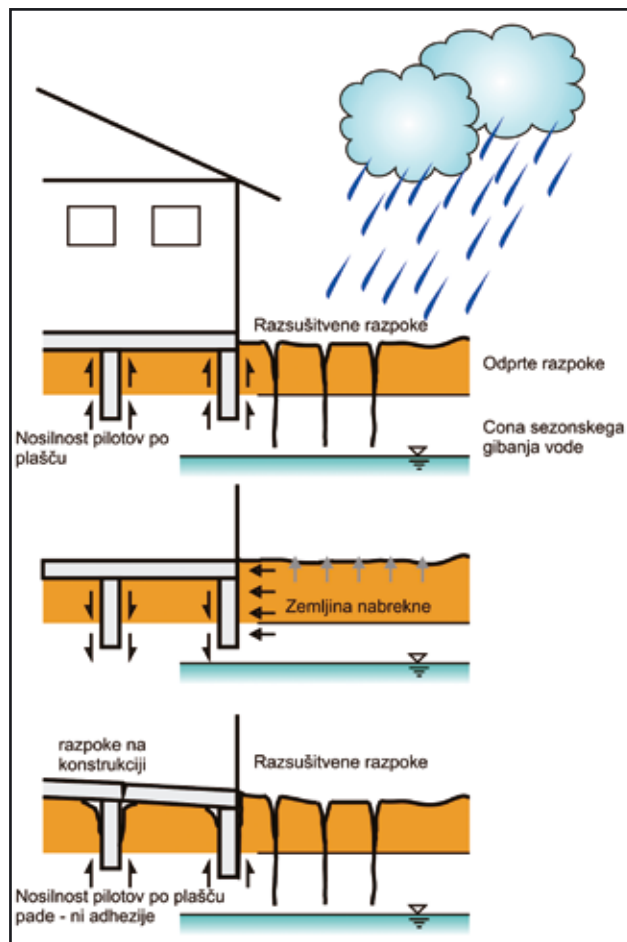
Nepovratno nabrekanje se lahko pojavi tudi v nasipih, če so bili ti dobro kompaktni pri pre nizki stopnji zasičenja. Pri rahlih tleh ali premalo kompaktnih nasipih pri pre nizki stopnji zasičenja se pojavi kolaps.

### Geotehnična razlaga interakcij med objektom in tlemi med nabrekanjem

Primer vpliva reverzibilnega nabrekanja na obnašanje lahke zgradbe lahko obrazložimo s pomočjo slike 2. Zgradba je temeljena na visečih kolih. Med sušo, ko je idealen čas za gradnjo, so se v glini na površini pojavile krčitvene razpoke (slika zgoraj). Po nastopu padavin voda vdira v razpoke, razsušena zemljina nabreka (slika v sredini). Adhezija ob plašču se v času nabrekanja poveča. Debelina nabrekajoče plasti narašča, saj padavine segajo vse globlje v tla zaradi razpok, nastalih ob sezonski suši (slika spodaj).

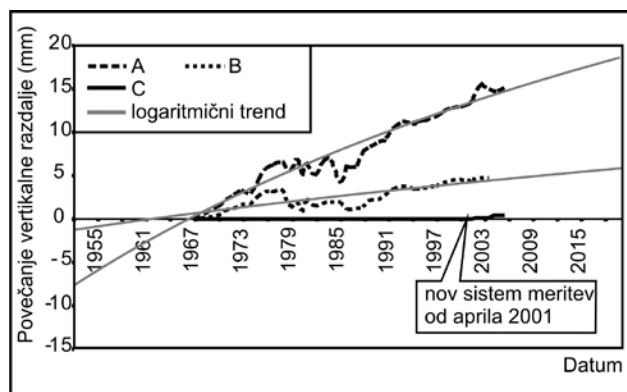
Če bi bila stavba temeljena na plitvih temeljih, bi v času padavin opazovali diferenčne dvizke objekta – zunanje stene bi se relativno bolj dvignile od notranjih. V času ponovne sezonske suše se zemljina znova krči. Zaradi krčenja se zmanjša adhezija med zemljino in plaščem kolov, zmanjša se nosilnost kolov in zunanji koli popustijo. V nabrekljivi zemljini se zunanji deli zgradbe posedejo, zaradi diferenčnih posedkov med zunanjimi in notranjimi temelji se temeljna plošča upogne, zgradba se nagne in razpoka. Opazujemo torej svojevrsten paradoks: na nabrekljivi zemljini se zgradba zaradi posledic nabrekanja diferenčno poseda – podobno kot se na primer posedejo stare zgradbe na barju potem, ko so v njihovi bližini napeljali kanalizacijo in s tem znižali gladino podzemne vode.

Procesi nepovratnega nabrekanja so vselej specifični za posamezno geotehnično zgradbo in interakcijo med zgradbo in geološkim zaledjem.



Sl. 2. Razlaga mehanizmov reverzibilnega nabrekanja v vplivnem območju lahke zgradbe.

Fig. 2. Explanation of reversible swelling mechanisms in the influential area of a light-weight structure.



Sl. 3. Napredujoče deformacije značilnih opazovalnih reperjev A, B in C v strojnici HE Moste. Začasna umiritev deformacij je vezana na sanacijska dela (MAJES, 2006).

Fig. 3. Advanced deformations of typical monitored benchmarks A, B and C in the engine room of PP Moste. Temporary arrest of deformations is related to repair works (MAJES, 2006).

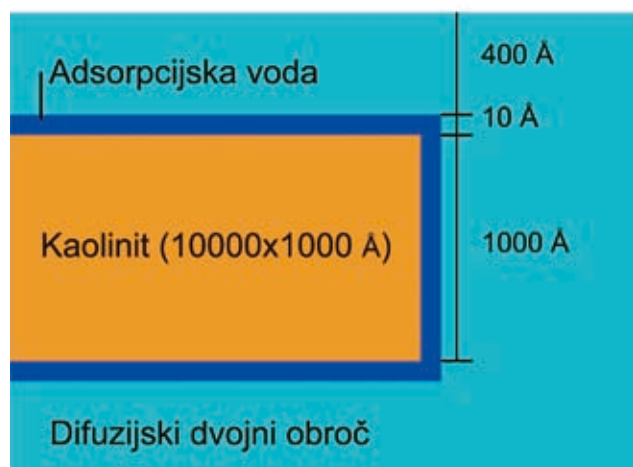
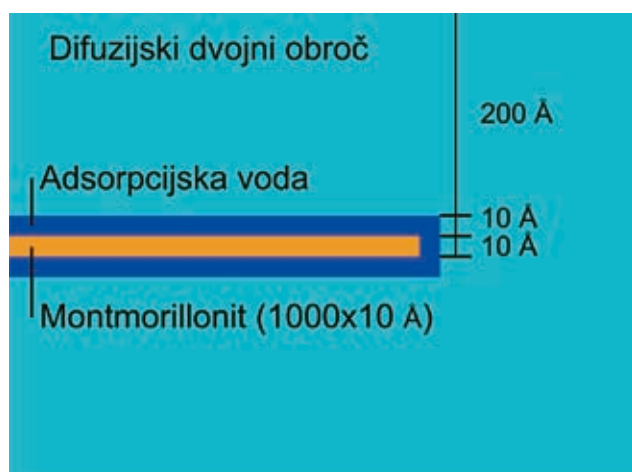
Med značilne primere nepovratnega nabrekanja lahko uvrstimo deformacije v podzemni strojnici HE Moste na zgornji Savi. Na objektu, vkopanim v oligocensko sivico so se kmalu po izgradnji objekta leta 1952 pojavile poškodbe in se do leta 2007 niso zaustavile kljub stalnim vzdrževalnim in sanacijskim delom (ŠUKLJE, 1980). Zaradi spremembe napetostnega stanja in mikroklimi v

vplivnem zaledju strojnice, se je proces nabrekanja širil v zaledje (slika 3). Danes je strojnica HE Moste v popolni rekonstrukciji.

### Različnost geološke in geotehnične razlage nabrekanja

#### Geološka razlaga nabrekanja

V geologiji obravnavamo nabrekanje kot posledico adsorpcije vode nabreklih mineralov glin (CHEN, 1975). Osnovna geološka ocena nabreklih mineralov temelji na podatkih mineraloško petrografske analize, podpirata pa jo BET (Brunauer-Elmet-Teller) določitev specifične površine zrn in določitev kationske izmenjalne kapacitete (CEC). Z mineraloško analizo identificiramo prisotnost nabreklih glinenih mineralov, z vrednostmi CEC in BET pa potencialno aktivnost in specifično površino zrn. Ker geokemične reakcije potekajo na stiku med površino zrna in raztopino, sta vrednosti CEC in BET hkrati tudi kvantitativna geološka kazalnika nabreklih mineralov (slika 4).



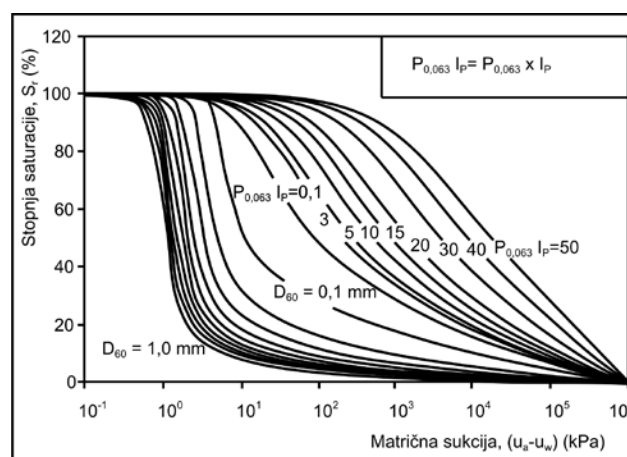
Sl. 4. Shematski prikaz adsorpcijskega ovoja vode na zrnu nabreklih mineralov (montmorillonit slika zgoraj) in ne-nabreklih mineralov (kaolinit, slika spodaj) glinenega minerala, na katerem temelji geološka razlaga nabrekanja glin (prirejeno po DAS, 1993).

Fig. 4. Schematic presentation of adsorption double layer of water on a grain of expansive (montmorillonite, top) and non-expansive clay (kaolinite, bottom), which represents the basis of the geological explanation of swelling (adapted according to DAS, 1993).

Nasprotni pojav »geološkemu« tipu nabrekanja je krčenje, ki nastopi, ko se začne difuzijski dvojni obroč tanjšati. Po geološki razlagi je velikost nabrekanja ali krčenja proporcionalna debelini vodnega obroča, ki se lahko ustvari na zrnu glin. Od tod izvira tudi podatek, da lahko nekateri montmorillonitne glin povečajo svoj volumen tudi za več desetkrat. Vendar ta podatek lahko velja le za posamezno glineno zrno. V zemljinah – trifaznih sistemih mineralnih zrn, vode in zraka – do tako velikega nabrekanja ne more priti zaradi velikega volumna, ki ga v zemljinem deležu zavzema pore.

#### Geološka razlaga nabrekanja v povezavi z zemljiško sukucijo

Na potencialno nabreklih mineralov zemljin lahko v geološkem smislu sklepamo tudi iz poteka retencijske krivulje. Retencijska krivulja je temeljna zveza, s katero opišemo obnašanje zemljine v stiku z vodo. Vsaka zemljina ima svojo značilno retencijsko krivuljo (slika 5), katere potek je odvisen od mineralne sestave, zrnivosti, zgoščenosti in preteklih napetostnih stanj.



Sl. 5. Retencijske krivulje za značilne zemljine (po ZAPATA et al., 2005).  $D_{60}$  pomeni velikost sita pri presejku 60%,  $I_p$  je indeks plastičnosti in  $P_{0,063}$  delež finih zrn.

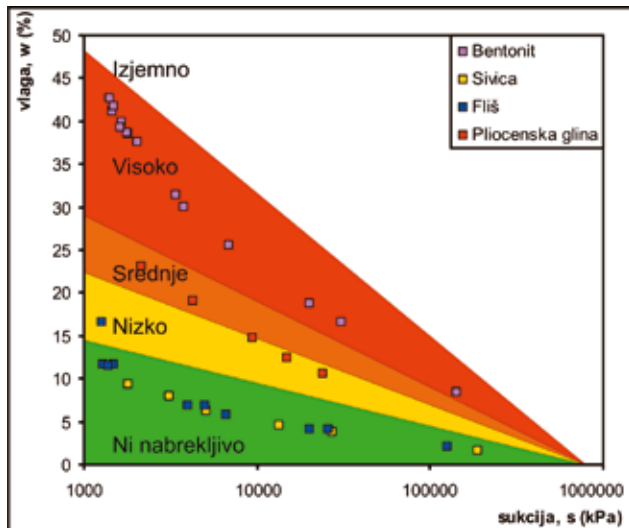
Fig. 5. Soil water characteristic curve for typical soils (according to ZAPATA et al., 2005).  $D_{60}$  represents the particle size such that 60% of the particles by weight are smaller than that size,  $I_p$  is the plasticity index and  $P_{0,063}$  is the fines fraction.

R. G. McKEEN (1992) je izdelal klasifikacijski diagram na osnovi poteka retencijske krivulje v coni rezidualne vlage, to je pri sukucijah nad 1000 kPa. Zaradi lažjega razumevanja smo osnovni diagram po McKEENU priredili tako, da sukucijo podajamo kot negativni tlak porne vode (v kPa) in ne kot pF vrednost (logaritem višine v cm vodnega stolpca) (slika 6). V diagram smo vnesli tudi retencijske krivulje treh značilnih slovenskih zemljin: oligocenske sivice iz območja predora Ljubno, fliša iz območja plazu Slano blato ter pliocenske glin iz trase pomurske avtoceste na odseku Cogetinci – Vučja vas. Za ilustracijo smo dodali še retencijsko krivuljo komercialnega makedonskega kalcijevega bentonita.

Iz diagrama vidimo, da so zemljine z retencijskimi krivuljami, ki ležijo zgoraj v diagramu na



sliki 6 veliko bolj nabreklijive od tistih spodaj. Sivica in fliš se po McKEENU nahajata v coni »nenabreklijih« in »nizko nabreklijih« materialov, čeprav vemo, da so tako v sivici kot v flišu dokumentirani številni pojavi nabrekanja. Ali je torej diagram po McKEENU lahko sploh splošno veljaven? Podobno kot smo s primerom na sliki 2 pojasnili, zakaj se na stavbah, temeljenih na nabreklijih zemljinah, pojavljajo poškodbe v obliki posedanja, bomo tudi primere na sliki 6 pojasnili z nekaj osnovnimi geotehničnimi zakonitostmi.



Sl. 6. Diagram za prepoznavanje nabreklijih zemljin na osnovi retencijske krivulje (prirejeno po McKEEN, 1992).

Fig. 6. Diagram for the recognition of swelling soils based on soil water characteristic curve (adapted according to McKEEN, 1992).

McKEEN je postavil meje za ocenjevanje nabreklijivosti zemljin glede na vlago pri sukaciji 1000 kPa. Sukacija 1000 kPa ustreza približno meji plastičnosti ( $w_p$ ) večine zemljin. Pri tej sukaciji je tudi večina vode vezana na adsorpcijski obroč in ne kot kapilarna voda. Flišni lapor in sivica sta v naravnem stanju v trdnem konsistentnem stanju in ju po veljavnih standardih za opisovanje zemljin (SIST ISO) lahko opišemo kot kamnini. V naravnem stanju je njuna naravna vlaga daleč pod mejo plastičnosti ( $w_p$ ) in se običajno giblje okoli meje krčenja ( $w_s$ ). Zato je gonilo nabrekanja v flišu in sivici ekvilibracija sukacije v območju med naravno vlago in vlago v točki rezidualne vlage. Za tako nabrekanje so značilni pojavi nenakomernega napihovanja in odpiranja razpok zaradi gradienta sukacije.

Na sliki 7 so prikazane posledice nabrekanja sivice v avtocestnem vkopu pri Vranskem. Nabrekanje sivice v času gradnje avtoceste (1996–1997) je predstavljalo prvovrstno »geološko presenečenje«, zaradi katerega je bilo treba izdelati nov projekt varovanja vkopne brežine, ki je danes namesto s prvotno predvideno nizko kamnito zložbo zavarovana s sidrano pilotno steno.

Nasprotno pa se retencijski krivulji malo prekonsolidirane pliocenske gline in komercialnega bentonita nahajata na sliki 6 v pričakovanem območju in dobro identificirata naravo materia-

la brez dodatne razlage. Opisani primer sivice v vkopu na Vranskem je torej značilen primer, pri katerem samo geološka razlaga nabreklijivosti



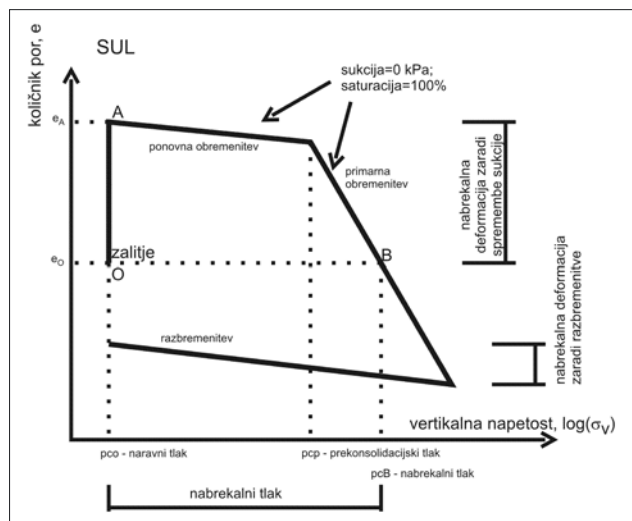
Sl. 7. Nabrekanje in odpiranje razpok v sivici zaradi gradienta sukacije, avtocestni vkop pri Vranskem v letih 1996–1997, sveže odkopana brežina. Predhodne geološke raziskave niso opozorile na možnost nabrekanja.

Fig. 7. Swelling and opening of cracks in the siltstone "sivica" due to suction gradient, motorway cut near Vransko in 1996–1997, freshly excavated embankment. Previous geological investigations did not indicate the possibilities of swelling.

odpove in je treba za dobro razumevanje možnih volumskih sprememb geološkega materiala preveriti tudi druge, predvsem geotehnične vplive.

### Geotehnična razlaga nabrekanja

V geotehniko obravnavamo nabrekanje kot povečanje volumna zaradi znižanja efektivnega tlaka (SIST EN 1997-2), do katerega pride ali zaradi znižanja totalnih tlakov ob razbremenitvi ali zaradi adsorpcije vode v nezasičeno zemljino pri nespremenjenem totalnem tlaku (slika 8).



Sl. 8. Obremenilna in razbremenilna krivulja v diagramu količnik por – vertikalna napetost.

Fig. 8. Loading and unloading curve in the diagram pore coefficient – vertical stress.

Nabrekalna deformacija med točkama O-A na sliki 8 je posledica navzemanja vode v nezasičeno zemljino (zemljino s sukcijo) pri nizkem in konstantnem totalnem tlaku. Velikost vertikalne nabrekalne deformacije ( $\epsilon_{lin}$ ) ob omejenem bočnem širjenju lahko zapišemo z enačbo (4).

$$\epsilon_{lin} = (e_A - e_O) / (1 + e_O) \quad (4)$$

Kako se spreminja efektivni tlak v zemljini v času nabrekanja pri taki raziskavi ne vemo, vemo pa, da se v času nabrekanja sukcija znižuje, saj vzporedno z naraščanjem vlage narašča tudi poroznost. V točki A je zemljina zelo verjetno zasičena. Ko nabreklo zemljino obremenjujemo, bo v zasičenem stanju dosegla začetni volumen v točki B. Tlak med točkama A in B imenujemo

nabrekalni tlak ( $\sigma_{nab}$ ). Če zemljino po obremenitvi razbremenimo, se bo relaksirala. Tudi to deformacijo imenujemo nabrekalna deformacija, vendar pa se njena velikost močno razlikuje glede na začetno nabrekalno deformacijo, določeno po enačbi (4), saj so se od točke A dalje, vsi dogodki odvijali v stanju popolne saturacije, torej pri nizki oz. nični sukciji in v pogojih drugačnih efektivnih napetostnih stanj.

Nasprotna pojava »geotehničnemu« tipu nabrekanja sta kompresija in konsolidacija.

Posledice nabrekanja merimo kot nabrekalni dvizek bočno omejenega vzorca ali kot nabrekalni tlak, to je tlak, s katerim vzdržujemo konstantni volumen vzorca ob navzemanju vode.

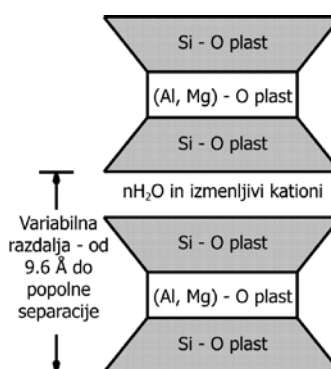
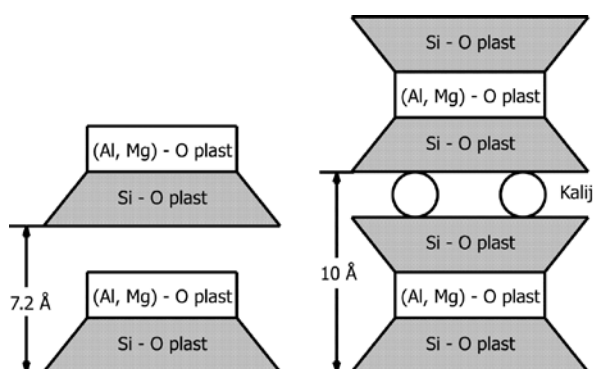
Ne glede na različnost geološke in geotehnične definicije, se nabrekljivost vselej razume kot težnjo po spremembi volumna zaradi spremembe vlage ali sukcije v porah zemljine in razpokah kamnine. Geotehnična definicija nabrekanja je širša od geološke, saj pokriva tudi volumske spremembe zaradi spremembe napetostnih stanj v tistih zemljinah in kamninah, ki jih po geološki definiciji sicer ne prepoznamo kot nabrekljive.

Nobena od obeh definicij pa v tem kontekstu ne vključuje volumskih sprememb zaradi prehodov nestabilnih v stabilne mineralne faze, zaradi reakcij med različnimi minerali v zemljini ob spremembi pogojev v okolju (na primer nastanek sadre zaradi reakcij med piritom in kalcitom) ali zaradi kristalizacije soli iz pre-nasičenih raztopin.

### Geotehnična identifikacija nabrekljivih zemljin v povezavi z geološko razlago nabrekljivosti

#### Mineralna sestava glin in identifikacijski parametri zemljin

Iz mineralogije glin vemo (MITCHELL, 1993), da sta za strukturo mineralov glin značilna dva gradbena geometrijsko orientirana elementa: silicijev tetraeder in aluminijev ali magnezijev oktaeder, ki se menjavata v značilnih zaporedjih – paketih, kot je shematsko prikazano na sliki 9. Med paketi je medpaketni prostor, v katerega se lahko vrinejo molekule vode ali drugi ioni. Najbolj urejeno in zato tudi najbolj stabilno strukturo ima kaolinit ( $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ ), zato imajo kaolinitne glin majhno specifično površino, nizko plastičnost, nizko kationsko izmenjalno kapaciteto in niso podvržene krčenju in nabrekanju.



Sl. 9. Shematski prikaz značilne paketne zgradbe nenabrekajočega kaolinita in illita ter nabrekajočega montmorillonita (DAS, 1993). Namesto gibsitne plasti se lahko pojavi tudi brucitna.

Fig. 9. Schematic presentation of clay layers with stable kaolinite and illite structure and unstable montmorillonite structure (DAS, 1993). Instead of Gibbsite sheet occurs also Brucite sheet occurs.



V montmorillonitovi strukturi se ponavljajo tetraedrska, oktaedrska in spet tetraedrska plast. V njej so zelo pogoste izomorfne zamenjave višje valentnih z nižje valentnimi kationi, zato se tudi kemična formula prikazuje v širokem razponu kemične sestave ( $\text{Na}_{0,35}(\text{Al}_{1,65}\text{Mg}_{0,35})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). V tetraedrski plasti so pogoste zamenjave  $\text{Si}^{4+}$  z  $\text{Al}^{3+}$ , v oktaedrski pa  $\text{Al}^{3+}$  z  $\text{Mg}^{2+}$  in številnimi drugimi dvo in tro valentnimi kationi. Zaradi naštetih možnih nadomeščanj na kationskih tetraedrskih in oktaedrskih mestih takšen paket ni več električno nevtralen. Zato se na površino montmorillonitnega zrna adsorbirajo molekule vode. Posamezni negativni paketi se med seboj odbijajo, vmes pa se lahko vrivajo molekule vode, različni anioni in tuji kationi. Pojav vrivanja spremljajo velike volumenske spremembe, ki jih razlagamo kot geološko nabrekanje, minerale pa označujemo kot nabreklijve ali nabrekajoče minerale.

Značilna struktura v povezavi z defekti strukture in energijo, s katero so različni kationi vezani na površino zrna, vpliva na značilne prepoznavne lastnosti glin, ki jih lahko merimo samo v specializiranih laboratorijih in so:

- Specifična površina zrn ( $A_s$ )
- Aktivnost ( $A_c$ )
- Kationska izmenjalna kapaciteta (CEC)
- Permanentni strukturni naboj na površini itd.

V geotehniki je določanje vlažnosti ( $w$ ) s sušenjem pri  $105^\circ\text{C}$  najbolj razširjena in tudi najbolj enostavna preiskava. V tej vlažnosti so zajeti vsi tipi vode: medzrnska (kapilarna), adsorpcijska in medpaketna voda. V posebnih primerih, na primer če je v glinah prisotna sadra, je v vlago vključen tudi del kristalno vezane vode. Ker je v zemljinah, ki vsebujejo nabrekajoče minerale, delež medpaketne in adsorpcijske vode neprimerno večji kot v inertnih zemljinah, lahko vrsto mineralov glin ali nabrekalni značaj glinenih zemljin prepoznamo posredno, z merjenjem količine vode, ki jo zemljina zadrži pri karakterističnih konsistenčnih stanjih, karakterističnih sukciyah, karakteristični nedrenirani trdnosti in podobno. To pomeni, da lahko nabreklijvost zemljine prepoznamo z uporabo najbolj enostavnih indeksnih kazalnikov, kot so:

- meja židkosti ( $w_L$ )
- indeks plastičnosti ( $I_p$ )
- meja krčenja ( $w_s$ )
- linearno krčenje ( $\epsilon_s$ )
- adsorpcija vode ( $w_A$ )
- prosto nabrekanje ( $\epsilon_{in}$ )
- točka vstopa zraka in točka rezidualne vlage ali tudi meja venenja na retencijski krivulji.

V skupino takih enostavnih metod uvrščamo tudi vse bolj popularno titracijsko metodo, s katero ugotavljamo adsorpcijsko sposobnost zemljine za organski kation metilen modro ( $\text{MB}$ ,  $\text{MB}_f$ ,  $\text{MB}_i$ ) (SIST EN 933-9:2009, ASTM C837 - 09).

Zvezo med mineralno sestavo in geotehničnimi identifikacijskimi parametri zemljin so prepozna-

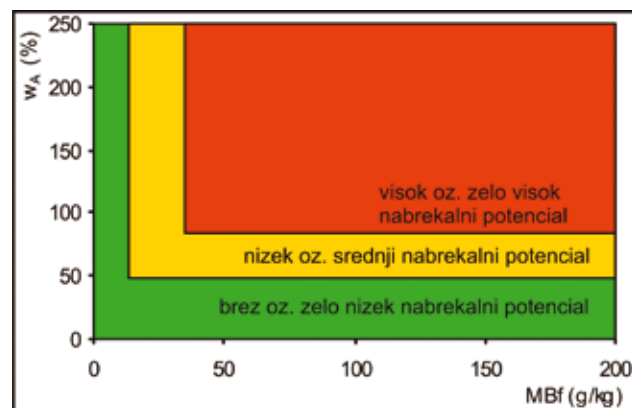
li različni avtorji že pred več kot štiridesetimi leti (HOLTZ & GIBBS, 1956; SEED et al. 1962; FARRAR & COLMAN, 1967). Na osnovi eksperimentov so izpeljali empirične enačbe med mejo židkosti, indeksom plastičnosti, specifično površino zrn in /ali nabrekalno deformacijo. Te enačbe so se kasneje izkazale za uporabne le za ozke skupine zemljin, na katerih so se eksperimenti tudi izvajali, saj je vsaka enačba vsebovala določen koeficient, veljaven samo za izbrano skupino testiranih zemljin. Kljub temu pa je bilo možno na osnovi ustvarjene baze podatkov povezati mineralno sestavo, katere določanje je možno le v specializiranih laboratorijih z enostavnimi indikativnimi lastnostmi, ki jih lahko izmerimo tudi v najbolj skromno opremljenem laboratoriju (razpredelnica 1).

#### *Adsorpcija vode po Enslin – Neff in retencijska krivulja pri prepoznavanju nabreklijvosti*

Enostavno metodo za določanje kapacitete finih zrn za adsorpcijo vode je odkril Enslin leta 1933. Metoda, ki je bila po odkritju deležna številnih dopolnitev, je danes vključena v nemški standard DIN 18132 in je znana kot Enslin Neff test adsorpcije vode. Metoda se danes na veliko uporablja v industriji, med drugim na primer za preizkušanje bentonitov (DIENG, 2006; PETKOVŠEK et al., 2009). Z eksperimenti je potrjena tudi neposredna zveza med adsorpcijo vode ( $w_A$ ) in retencijsko krivuljo (PETKOVŠEK et al., 2009). Parameter adsorpcije vode ( $w_A$ ) je hkrati tudi prva točka na deviški retencijski krivulji. To pomeni, da je možno na osnovi enostavnega testa z določitvijo ( $w_A$ ) ugotoviti tudi, kakšen bo nabrekalni potencial zemljine (razpredelnica 1, slika 10).

McKEEN R.G. (1992) je predlagal klasifikacijski sistem za oceno nabreklijvosti na osnovi zemljinske sukucije. Zemljine razvršča v 5 kategorij na osnovi treh kazalnikov, prikazanih v razpredelnici 2 in na sliki 6.

V Sloveniji je A. PETKOVŠEK (2002) izdelala empirični diagram za hitro prepoznavanje nabreklij-



Sl. 10. Diagram za hitro prepoznavanje potencialne nabreklijvosti (prirejen po PETKOVŠEK, 2002). Legenda:  $w_A$  – vodovpojnost po Enslin-Neff postopku v masnih procentih,  $\text{MB}_f$  – metilen modro vrednost.

Fig. 10: Diagram for quick recognition of swelling soils (adapted according to PETKOVŠEK, 2002). Legend:  $w_A$  – wateradsorption after Enslin-Neff in mass percent,  $\text{MB}_f$  – methylene blue value.



Parameter	Kaolinit	Illit	Montmorillonit
Debelina zrn ( $\mu\text{m}$ )	0,5–2	0,003–0,1	< 9,5A
Premer zrn ( $\mu\text{m}$ )	0,5–4	0,5–10	0,05–10
Specifična površina ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	10–20	65–180	50–840
Kationska izm. kapaciteta CEC (meq/100g)	3–15	10–40	70–80
Meja židkosti, $w_L$ (%)	29–39	61–90	158–344
Indeks plastičnosti, $I_P$ (%)	1–11	27–44	99–251
Indeks plastičnosti, $I_P^{**}$ (%)	10–25	50–70	250–650
Aktivnost, $A_c$	0,4–0,5	0,5–1	1–7
Adsorpcija po Enslinu, $w_A^{***}$ (%)	42–57	88–130	> 230

\* različni avtorji navajajo različne vrednosti; \*\* po HEAD (1980), \*\*\* (test po DIN 18132)

Kategorija	$(\Delta h/\Delta w)$	$C_h$	$\Delta H$ (%)	Nabrekanje
I	< 6	– 0,227	10	Izjemno
II	6–10	– 0,227 do – 0,12	5,3	Visoko
III	10–13	– 0,12 do – 0,04	1,8	Srednje
IV	13–20	– 0,04 do 0	---	Nizko
V	> 20	0	---	Ni nabrekljivo

\*v razpredelnici je  $(\Delta h/\Delta w)$  nagib retencijske krivulje,  $C_h$  sukcijski kompresijski indeks in  $\Delta H$  vertikalni dvizek, oboje računsko določeno po MCKEENU (1992).

vosti na osnovi dveh enostavnih indeksnih kazalnikov, adsorpcija barvila metilen modro in adsorpcije vode (slika 10). Oba indeksna kazalnika zemljin je povezala z njihovo mineralno sestavo, kationsko izmenjalno kapaciteto CEC in z direktnimi meritvami nabrekalnih tlakov in nabrekalnih deformacij. V raziskavo je vključila tipične vzorce slovenskih klastičnih kamnin, ki vsebujejo glino (karbonski triadni, eocenski glinavci), visoko prekonsolidirane zemljine (sivica, miocenski laporji, tufi) ter visoko plastične pliocenske gline iz vzhodne ter osrednje Slovenije. Diagram je bil prvič preizkušen v času gradnje slovensko madžarske železniške povezave v letih 1999–2001 in se izkazal za dokaj zanesljivega (PETKOVŠEK, 2006). V diagramu, prikazanem na sliki 10 je izvedena korekcija osnovnega diagrama za kazalnik metilen modro  $MB_f$ . V času postavitve osnovnega modela so se za preiskovanje uporabljali ameriški standardi ASTM, metilen modro vrednost pa se je določala kot vrednost MBI. Po sprejetju skupnih evropskih standardov se je za preiskave metilen modro v Evropi uveljavil modificiran francoski postopek, po katerem se rezultat raziskave podaja kot MB, če se raziskava izvaja na zrnih velikosti pod 2 mm ali  $MB_f$  za zrna velikosti pod 0,125 mm. Kot zanimivost naj dodamo, da je diagram zelo uporaben tudi v kamninah. Pri vrtnanju vrtnih za avtocestno tretjo razvojno os, smo v vzorcih meljevcev iz trase na območju južno od Velenja odkrili plast meljevca z vrednostjo  $w_A$  nad 100% in vrednostjo  $MB_f$  nad 25 g/kg, kar kaže na prisotnost nabrekljive kamnine.

### Nabrekanje in periodično ponavljajoči se plazovi

Znano je, da se na določenih območjih plazovi ponavljajo v določenem sosledju nekaj let ali več deset let. Običajno se zadovoljimo z razlago, da je glavni prožitelj plazov obilno deževje, kar tudi

Razpredelnica 1. Značilni kazalniki za prepoznavanje osnovnih vrst glin (CHEN, 1975)\*  
Table 1. Typical indicators for the detection of the basic clay types (CHEN, 1975)\*

Razpredelnica 2. Klasifikacija nabrekljivih zemljin (MCKEEN, 1992)

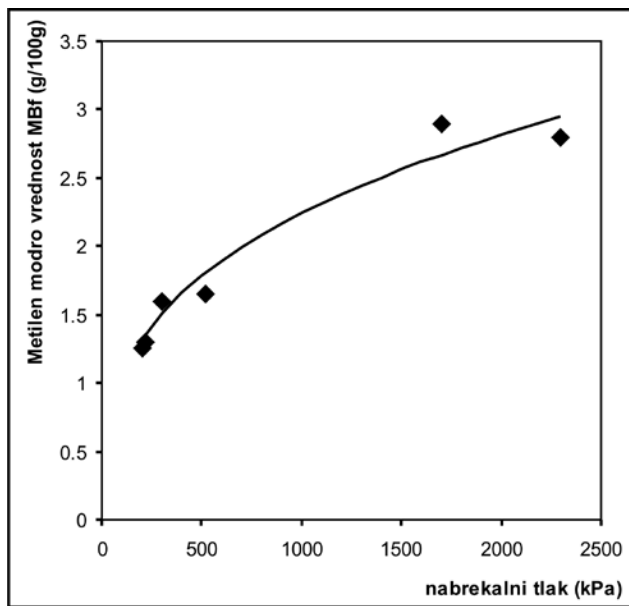
Table 2: Classification of swelling soils (MCKEEN, 1992)

drži. Vendar pa k dodatnemu znižanju varnosti na plazovitih pobočjih znatno prispeva znižanje sukucije in večanje debeline »zmehčane« cone oz. preperine, ki se v letih »mirovanja« ustvarja nad trdno podlago ali v posameznih plasteh znotraj nje.

CHIAPONE in njeni sodelavci (2004) so raziskovali zvezo med vrednostjo metilen modro in nabrekalnim tlakom na zemljinah iz različnih plazov v Italiji. Povod za raziskave so bile poplave leta 1994 v severozahodni italijanski pokrajini Langhe, kjer se je po obilnem deževju sprožilo okoli 800 plazov na relativno položnih pobočjih (nakloni 8–15°), zgrajenih iz sedimentov oligocenske in miocenske starosti. Za sedimentacijo je značilno menjavanje laporjev in peskov. Da bi razjasnili fenomen proženja so bile opravljene obsežne raziskave, ki so pokazale, da je znotraj posameznih plasti prisoten visok nabrekalni tlak, od 1–3 MPa. Z usmerjenimi preiskavami so ugotovili direktno zvezo med nabrekalnim tlakom in vrednostjo metilen modro (slika 11). Pazljivemu bralcu ali poznavalcu razmer verjetno ne bo ušla podobnost med opisanim primerom iz pokrajine Langhe in nastopanjem plazov v Goriških brdih, na Bizeljskem itd.

Omenili smo že, da je vrednost metilen modro za ocenjevanje nabrekljivosti v Sloveniji vpeljana in v uporabi že od gradnje slovensko madžarske proge (PETKOVŠEK, 2002), že več desetletij jo uporabljajo v Turčiji in drugih arabskih državah, pogosto v povezavi s sukucijo (СОКСА, 2002).

Glavna težava pri uporabi literaturnih podatkov in enačb, ki vključujejo vrednosti metilen modro za izračune potencialnih nabrekalnih dvizkov in nabrekalnih tlakov je, da se postopek izvaja na različne načine, vrednosti pa podajajo kot parametri MBI, MB,  $MB_f$ ,  $V_B$  in medsebojno niso direktno primerljive. Zato velikanskega nabora podatkov, ki je sicer na razpolago v svetovni literaturi, ni možno kar direktno uporabiti.



Sl. 11. Zveza med metilen modro vrednostjo in nabrekalnim tlakom, določena na oligo- miocenskih sedimentih v pokrajini Langhe (CHIAPONE et al., 2004).

Fig. 11. Relation between methylene blue and swelling pressure, defined on Oligo-Miocene sediments in the region Langhe (CHIAPONE et al., 2004).

### Pomen zemljinske sukcije pri določanju nabrekljivosti v geotehničnih gradnjah

Smernice ameriškega ministrstva za obrambo (UFC, 2004, TM 5-818-7) za fundiranje na nabrekljivih zemljinah vsebujejo karto ZDA z opredeljenim hazardom zaradi nabrekljivih zemljin in med drugim predlagajo več različnih postopkov za preiskovanje in evalvacijo nabrekljivosti. Na prvem mestu je opisan postopek WES (razpredelnica 3), ki temelji na raziskavah različnih glin in glinavcev iz teritorija ZDA. Nabrekalne dvižke so merili v edometrih, v katerih so bile zemljine obremenjene z vertikalnim tlakom, ekvivalentnim geološkemu tlaku na globini od 0,3 m do 2,5 m. Za zemljine z oznako »nizko« smernice pravijo, da nadaljnje raziskave načeloma niso potrebne, ko je meja židkosti ( $w_L$ ) nižja od 40 % in indeks plastičnosti ( $I_p$ ) nižji od 15 %, razen če gre za konstrukcije, zelo občutljive na deformacije. Ostale postopke je možno najti v smernicah, ki so dosegljive na svetovnem spletu ali pa v delih številnih avtorjev (FREDLUND, 1979; AITCHISON & MARTIN, 1993 in drugi).

Posebnost smernic ameriške vojske (UFC, 2004, TM 5-818-7) je aneks B, v katerem je podrobno obrazložena karakterizacija nabrekalnega obnašanja zemljin z uporabo zemljinske sukcije. Zveza med nabrekalnimi dvižki in sukcijo je določena z enačbo 5.

Ocena potencialnega nabrekanja	Potencialni nabrekalni dvižek $\epsilon$ (%)	Meja židkosti $w_L$ (%)	Indeks plastičnosti $I_p$ (%)	Sukcija v naravnem stanju $s$ (kPa)
Nizko	< 0,5	< 50	< 25	< 144
Mejno	0,5–1,5	50–60	25–35	144–383
Visoko	> 1,5	> 60	> 35	> 383

Razpredelnica 3. Postopek WES ocenjevanja nabrekljivosti zemljin po smernicah UFC, 2004

Table 3. Procedure of WES assessment of soil swellability according to UFC guidelines, 2004

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{e_1 - e_0}{1 + e_0} = \frac{c_\tau}{1 + e_0} \log \frac{\tau_{m0}}{\tau_{mf}} \quad (5)$$

kjer pomenijo:  $\Delta H$  – potencialni dvig temeljnega dna,  $H$  – debelina nabrekljive zemljine,  $e_1$  in  $e_0$  – končni in začetni količnik por,  $C_\tau = \alpha G_s / 100B$  – sukcijski indeks,  $\alpha$  – kompresijski faktor,  $B$  – parameter nagiba retencijske krivulje,  $\tau_{m0}$  – začetna matrična sukcijska brez obremenitve in  $\tau_{mf}$  – končna matrična sukcijska brez obremenitve.

Sukcija je vključena tudi v druge izpeljanke enačb za vrednotenje nabrekalnih dvižkov (LYTTON, 1977; FREDLUND, 1979; MCKEEN, 1981).

Zemljinska sukcijska ima v sodobni geotehniko vse večji pomen. Danes si je težko zamišljati napredne raziskave nabrekljivosti brez poznavanja retencijske krivulje in zemljinske sukcije. Retencijska krivulja igra pomembno vlogo med tremi osnovnimi faktorji, ki kontrolirajo procese nabrekanja in jih opišemo kot:

- indikatorji nabrekanja (dvižka, potenciala, tlaka) ki so kar indeksni kazalniki lastnosti zemljin (meja plastičnosti, indeks plastičnosti, adsorpcija, metilen modro, retencijska krivulja),
- sedanja ter pričakovana nova (totalna, efektivna) napetostna stanja ter
- sedanji ter pričakovani novi negativni tlak porne vode oziroma sukcije.

Zemljine ali kamnine, ki vsebujejo glino imajo pri enaki mineralni sestavi in enakih indeksnih kazalnikih plastičnosti in adsorpcijske sposobnosti lahko zelo različno sukcijsko, kar torej pomeni tudi zelo različne nabrekalne potenciale oziroma dovzetnost za volumske spremembe.

### Monitoring sukcije v geotehničnih objektih v Sloveniji

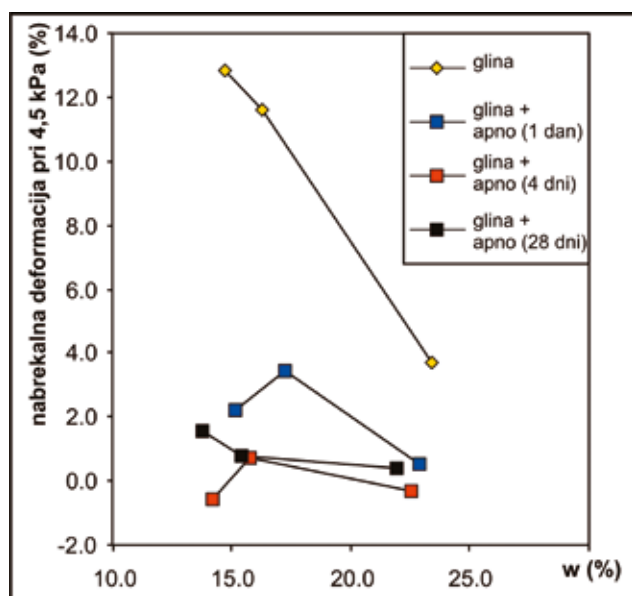
#### Meritve sukcije v Sloveniji

Oprema za laboratorijsko merjenje sukcije za geotehnično rabo je v času objave tega prispevka v redni rabi v Sloveniji samo na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

Kontinuirane meritve sukcije na terenu se že več let izvajajo na plazu Slano blato nad Lokavcem za nadzorovanje proženja blatnega toka (PETKOVŠEK et al., 2009; MIKOŠ et al., 2009), v pokrovu jalovišča Jazbec pri Rudniku Žirovski vrh za nadzorovanje delovanja pokrova in v nasipih avtoceste Cogetinci – Vučja vas za nadzorovanje nabrekanja in krčenja (MAČEK et al., 2010).

*Predstavitev monitoringa sukcije v nasipih na avtocesti Cogetinci – Vučja vas*

Odločitev, da se v nasipe avtoceste med Cogetinci in Vučjo vasjo v vzhodni Sloveniji vgrajujejo lokalne nabrekljive zemljine je bila povezana z veliko inženirsko odgovornostjo. Iz diagrama na sliki 12 je vidno, da so nabrekalne deformacije – linearni dvižki naravne glin iz globokih vkopov na trasi presegle 10 %. Z dodatnim vlaženjem se je nabrekalni potencial sicer nižal, vendar pa se je hkrati z naraščajočo vlago zmanjševala možnost vgrajevanja in zagotavljanja potrebne togosti vgrajenih plasti iz glin.



Sl. 12. Diagram odvisnosti nabrekalnih deformacij nasipne glin brez in po izboljšanju z apnom. Legenda: w – vlaga v masnih odstotkih

Fig. 12. Diagram of dependence of swelling deformations in embankment clay without and after improvement with lime. Legend: w – water content in mass percent

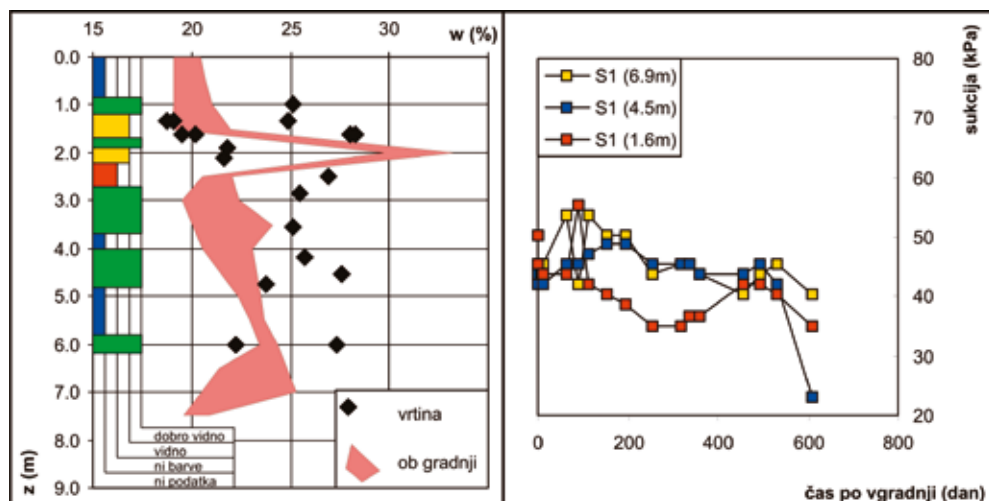
Zato so se za znižanje nabrekalnega potenciala vse glin za nasipe izboljšale z apnom. Vendar pa apno ni v celoti izničilo nabrekalnega potenciala (slika 12, spodnje krivulje), kar smo v laboratoriju ugotavljali z direktnimi meritvami nabrekalnih deformacij in sukcije.

Za izboljšanje nadzora nad učinkovitostjo kemične stabilizacije z apnom in nadzora nad ekvilibracijo vlage in sukcije so bili v treh avtocestnih nasipih vgrajeni merilniki sukcije na po treh karakterističnih globinah. Iz dosedanjih meritev je vidno (slika 13 in 14), da je bil na terenu doslej prisoten samo proces enosmerne nabrekanja in mehčanja, kar je tudi bilo upoštevano v terminskih planih gradnje in pri dimenzioniranju zgornjega avtocestnega ustroja. Vezane plasti voziščne konstrukcije je bilo dovoljeno vgrajevati šele potem, ko so nasipi odležali in so meritve pokazale ekvilibracijo zemljske sukcije na sprejemljive vrednosti.

V kontekstu tega prispevka je treba poudariti velik pomen razumevanja ekvilibracije vlage in sukcije v novem geološkem okolju, ki nastopi ob vsaki geotehnični gradnji. Na sliki 13 (levo) vidimo, da so vse vlage iz kontrolnih vrtin S1 višje od vlage, zabeležene pri kontrolnih meritvah v času gradnje. Tudi merilniki sukcije (slika 13 desno) kažejo, da so bile že ob vgradnji merilnikov, sukcije nizke in v varnem območju. Po dveh letih opazovanj se razmere niso bistveno spreminjale. Lepo so vidni odzivi sukcije na sezonsko pogojene vremenske spremembe, nobena vrednost pa ne sega v nevarno območje.

Na merskem profilu S 3 so razmere precej drugačne (slika 14). Ob vrtanju kontrolnih vrtin je bila ugotovljena vlaga nasipnih plasti do 5 % nižja od tiste, dosežene ob vgrajevanju. Tudi merilniki sukcije kažejo na visoko vrednost sukcije, ki po ameriških smernicah (razpredelnica 3) uvršča material med tiste z visokim nabrekalnim potencialom. Po približno 180 dneh mirovanja nasipa opazujemo ekvilibracijo sukcije pri okoli 50 kPa. Vezane plasti avtocestnega vozišča so bile vgrajene šele po ekvilibraciji sukcije. Po dveh letih obratovanja se vozišče obnaša skladno s pričakovanji, kar je dodaten dokaz, da je možno z ustreznimi inženirskimi znanji dobro obvladovati gradnje v nabrekljivem geološkem okolju.

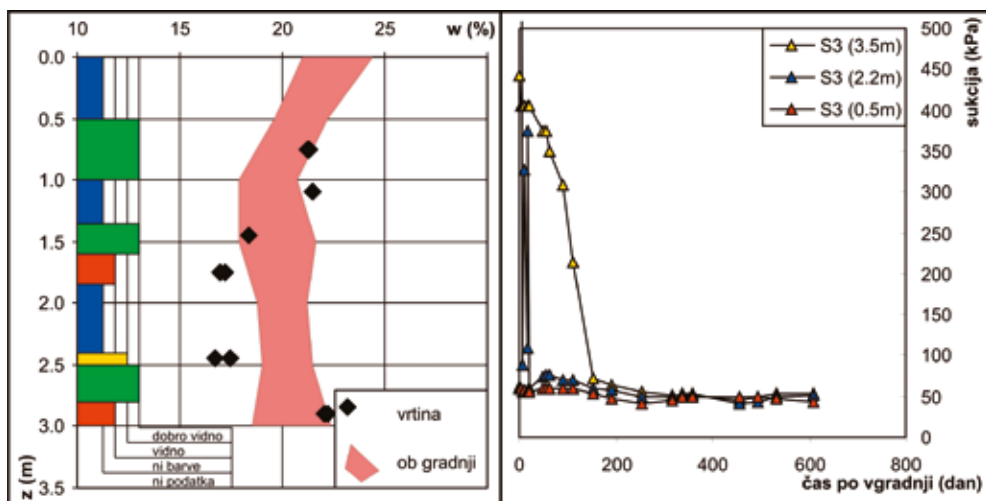
Če bodo nastopili podobni vremenski ekstremi kot je bil primer izjemne suše v letu 2003, ko je v Pomurju v času med aprilom in septembrom padlo manj kot 50 % povprečnih 20 letnih padavin, povprečne temperature pa so bile za nekaj



Sl. 13. Rezultati monitoringa sukcije na kontrolnem profilu S 1 avtoceste Cogetinci – Vučja vas. Legenda: w – vlaga v masnih odstotkih, z – globina

Fig. 13. Results of suction monitoring at the control profile S 1 on the motorway Cogetinci – Vučja vas. Legend: w – water content in mass percent, z – depth





Sl. 14. Rezultati monitoringa sukcije na kontrolnem profilu S 3 avtoceste Cogetinci - Vučja vas. Legenda:  $w$  - vlaga v masnih odstotkih,  $z$  - globina

Fig. 14. Results of suction monitoring at the control profile S3 of the motorway Cogetinci - Vučja vas. Legend:  $w$  - water content in mass percent,  $z$  - depth

stopinj Celzija višje od dolgoletnega povprečja (ČEĖNAR, 2004), bo verjetno treba brežine avtocestnih vkopov in nasipov namakati, sicer bo prišlo do poškodb zaradi krčenja in ponovnega nabrekanja tako, kot smo pokazali na shemi na sliki 1. Odločitev o potrebi po namakanju bo možno sprejeti prav na osnovi vgrajenih merilnikov sukcije (če pristojne službe ne bodo prehitro pozabile na njihovo vzdrževanje).



Sl. 15. Posnetek iz časa gradnje avtocestnih nasipov iz nabreklih glin na odseku Cogetinci - Vučja vas.

Fig. 15. Picture from the time of embankment construction made of expansive clays at the motorway section Cogetinci - Vučja vas.

### Merjenje nabrekalnih tlakov in nabrekalnih deformacij pri geoloških raziskavah

Če zasičeno zemljino obremenimo enodimenzionalno, na primer v edometru, pride do časovnega zmanjševanja količnika por tako, kot je poenostavljeno prikazano na sliki 8 od točke A v smeri proti desni. Ko zasičeno konsolidirano zemljino razbremenimo, beležimo dvižke ali povečanje količnika por. Zemljina je ves čas zasičena, sukcija je minimalna oz. je nižja od vrednosti pri točki vstopa zraka.

Iz slike 8 lahko zaključimo, da »nabreka« vsaka zemljina, podvržena razbremenitvi (npr. po odstranitvi nasipa na mehkih tleh, po izvedbi glo-

bokega izkopa). To tudi drži in pri geotehničnih delih računsko ovrednotimo in na terenu tudi merimo takšne dvižke, a jih v običajnem inženirskem žargonu ne imenujemo nabrekalni dvižki, temveč dvižki (deformacije) zaradi relaksacije. Če bi se dosledno držali terminologije relevantnih standardov (SIST EN 1997-2), bi seveda morali uporabljati termin nabrekanje (angleško swelling) tudi za dogajanja na razbremenilni krivulji.

Če je končna efektivna napetost, imenujmo jo  $\sigma'_b$ , po izkopu globokega vkopa ali predora manjša od nabrekalne napetosti  $\sigma'_{nab}$ , bo obremenjen vzorec po stiku z vodo nabrekal. Količnik por se bo povečal za  $\Delta e_{nab}$ , deformacijo pa lahko opišemo z enačbo (6).

$$\Delta \varepsilon_{nab} = \frac{\Delta e_{nab}}{1 + e_{\beta}} \quad (6)$$

kjer je  $e_{\beta}$  količnik por takoj po izkopu, še preden se izvršijo nabrekalne deformacije,  $\Delta e_{nab}$  sprememba količnika por zaradi nabrekalnih deformacij.

Nabrekanje bo navidezno teklo pri konstantni obremenitvi oziroma napetosti, saj je vzorec v edometru obremenjen z znano totalno obremenitvijo  $\sigma_b$ . V resnici pa se bodo zaradi nabrekanja (adsorpcije vode) zrnca zemljine razmaknila, dejanska efektivna medzrnska napetost  $\sigma'_{ig}$  pa se bo zmanjšala, a je v razmerah, ki vladajo v edometru, dejansko ne poznamo.

Kot smo že uvodoma ugotovili, je slaba stran rabe postopkov, razvitih za preiskovanje saturiranih zemljin in kasneje preprosto prenesenih v nesaturirane zemljine ta, da ne poznamo dejanske velikosti efektivnega tlaka med nabrekanjem in v posameznih fazah merjenja »nabrekalnega tlaka« in tudi ne dejanske stopnje zasičenja v času nabrekanja. Zato pa lahko dokaj natančno ovrednotimo končno vlago nabrekle zemljine in posredno, preko retencijske krivulje tudi njeno končno sukcijo.

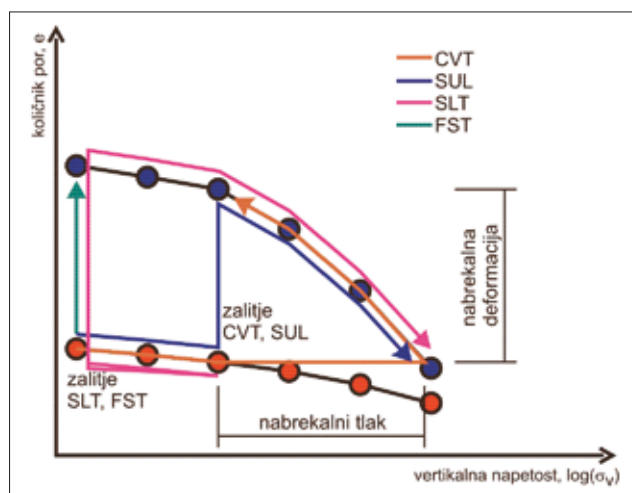
Za merjenje nabrekalnih tlakov in deformacij so bili razviti najrazličnejši standardizirani (ASTM 4546-96) in nestandardizirani raziskovalni postopki (KASSIFF & BEN SHALOM, 1971; BUCHER & SPIEGEL, 1984). Med najpopolnejše naprave za izvajanje temeljnih raziskav v tem trenutku sodi

sukcijski edometer, a si ga lahko privoščijo le veliki raziskovalni centri in ga v Sloveniji nimamo.

Komercialne metode za merjenje nabrekalnih tlakov in nabrekalnih dvizkov za inženirsko rabo lahko v splošnem razdelimo v štiri glavne skupine, izvajamo pa jih predvsem v edometrih ali v edometrom podobnih aparatih in so:

- prosto nabrekanje pri ničnem tlaku (FST – free swelling test).
- nabrekalni tlak pri konstantnem volumnu (CVT- constant volume test),
- nabrekanje pod znanim tlakom (SUL – swelling under load) in
- nabrekanje in obremenjevanje (SLT – swelling load test).

Ker je rezultat vsake meritve odvisen od postopka merjenja, bomo z uporabo naštetih postopkov na istem materialu izmerili različne vrednosti nabrekalnega tlaka ali nabrekalne deformacije, kar je tudi prav in pričakovano. Vendar pa je treba pri podajanju izmerjenih vrednosti precizno opisati pogoje (napetosti), pri katerih je raziskava potekala (slika 16).



Sl. 16. Merjenje nabrekalnih tlakov in deformacij z uporabo različnih metod v edometru.

Fig. 16. Measurement of swelling pressures and swelling deformations by using different methods in oedometer.

Najbolj enostavne so meritve prostega nabrekanja (FST) na umetnih zemljinskih kompozitih, nabitih v kontroliranih pogojih, na primer po Proctorju. V standardni kalup nabiti preizkušane potopimo v vodo, nabrekalno deformacijo pa merimo z mikrometrsko urico, nameščeno na kovinsko ploščo na površini preizkušanca. Ta postopek je v redni rabi pri vrednotenju uporabnosti zemljin za konstrukcijske nasipe, meja med uporabnimi in neuporabnimi zemljinami pa je v srednje-evropskem geološkem okolju ocenjena z linearnim dvizkom, ki se giblje med 3 in 4 %.

Pri CVT testu naravno vlažno zemljino ali kamnino (lahko pa tudi nabito zemljino) v kalupu zalijemo in z dodajanjem uteži preprečujemo vsako deformacijo. Nabrekalni tlak imenujemo tlak, pri katerem potopljen vzorec ne kaže več želje po nabrekanju. Če vzorec razbremenimo na naravni tlak, lahko ocenimo nabrekalne deformacije.

Pri SUL testu nesaturirano zemljino najprej pripeljemo do izbranega totalnega tlaka in jo nato zalijemo. Merimo deformacije (nabrekanje ali kolaps) pri znanem totalnem tlaku. Če vzorec obremenimo do tlaka, ki stisne vzorec nazaj na volumen nesaturiranega vzorca pri naravnem stanju, dobimo oceno nabrekalnega tlaka.

SLT test se od FST testa razlikuje samo po tem, da najprej v nesaturiranem stanju izvedemo obremenilno – razbremenilni preizkus do izbranega totalnega tlaka, šele nato vzorec saturiramo in najprej opazujemo nabrekalne deformacije, nato pa izvajamo kompresijo saturiranega vzorca. Razlika volumna saturiranega in nesaturiranega vzorca pri naravnem tlaku služi za oceno nabrekalne deformacije. Tlak, pri katerem ima saturiran vzorec enak volumen kot nesaturiran vzorec pri naravnem tlaku, pa nam služi za oceno nabrekalnega tlaka.

Poudariti je treba, da so pri visoko prekonsolidiranih zemljinah nabrekalni tlaki zelo visoki, pri nekaterih sivicah tudi preko 1500 kPa. Zato se priporoča kombinacija različnih postopkov merjenja tlakov in deformacij, z interpretacijo katerih se nato poskušajo določiti karakteristične vrednosti nabrekalnega tlaka in deformacij kot tudi zmanjšanje trdnosti zaradi nabrekanja.

### Nabrekljive zemljine med stanjem in dogajanjem

Nabrekljive zemljine spremenijo svoj volumen potem, ko pride do spremembe vlage in/ali sukucije. Nabrekaajo vse glinene zemljine, razlika med »nenabrekljivimi« in »nabrekljivimi« zemljinami je le v tem, da slednje nabrekaajo tudi pri visoki vlagi. V sušnem vremenu se nabrekljive zemljine krčijo. V razpredelnici 4 so prikazani glavni vzroki, zaradi katerih prihaja do spremembe vlage in sukucije v zemljinah.

Pri obravnavi nabrekljivosti moramo razlikovati med karakterističnim začetnim stanjem in pričakovanimi dogajanjem, kot je informativno prikazano v razpredelnici 4 in na slikah 1 in 2.

### Terminološke zagate v povezavi z nabrekanjem

Za pravilno razumevanje stanj in dogajanj v zvezi z nabrekanjem v zemljinah in mehkih kamninah je treba vzpostaviti ustrezno terminologijo, s katero bomo nedvoumno znali razlikovati med pomembnimi pojmi, kot so: nabrekljivost, nabrekanje, nabrekalni potencial, nabrekalni tlak in nabrekalni dvizek (deformacija). Avtorji predlagamo v uporabo naslednjo slovensko terminologijo:

**Nabrekljivost:** je lastnost zrna ali združbe zrn v hribinski masi, da ob navzemanju vode ali ob znižanju efektivne napetosti pri nespremenjeni vlagi povečajo svoj volumen. Tudi če se vlaga ne spremeni, se ob nabrekanju spremeni zemljinska sukucija.

Razpredelnica 4. Vzroki volumskih sprememb zaradi sprememb vlage in sukcije

Table 4 Reasons for volume changes due to water content and suction changes

Spremembe v naravnem okolju:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spremembe klime: dolgotrajna suša, ekstremno visoke padavine, nenavadna koncentracija padavin v določenem obdobju</li> <li>– Trajne spremembe gladine podzemne vode: gradnja akumulacij, prekomerno črpanje vode, melioracije</li> </ul>
Spremembe zaradi geotehničnih gradenj:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Razgaljene površine (odstranjena drevesa) povečujejo infiltracijo in znižujejo sukcijo</li> <li>– Slabo izvedeni drenažni in kanalizacijski vodi »umetno močijo« zemljine, ki so bile predhodno suhe</li> <li>– V globokih vkopih so zemljine podvržene intenzivnemu sušenju in močenju</li> <li>– Pokrite površine (na primer raba geomembran za zaščito podzemne vode pred onesnaženji) zmanjšujejo naravno evaporacijo iz tal in povečujejo vlago v zemljini</li> <li>– Pokrite površine zmanjšujejo transpiracijo preko koreninskega sistema in na ta način povečujejo vlago v tleh</li> <li>– Globoki vkopi in velike razbremenitve (zmanjšanje totalnih tlakov) povzročijo velike gradientne sukcije med zemljino na razgaljeni brežini in zemljino v zaledju brežine</li> <li>– Drugi pogoji (na primer gradnja nasipov iz presušenih materialov)</li> </ul>
Spremembe zaradi uporabe objekta:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– V ogrevanih podzemnih objektih prihaja do gibanja vode z vodno paro v smeri od toplih sten objekta proti hladnemu zaledju, kar povzroča počasno trajno nabrekanje (strojnica Moste), ki bi ga lahko poimenovali tudi »nabrekalno lezenje«</li> <li>– Ogrevani vkopani objekti lahko vplivajo na sušenje in krčenje zemljine za objektom</li> <li>– Umetno vzdrževanje zatravljenih površin prispeva k dodatnemu vlaženju</li> </ul>

**Nabrekanje:** je proces, ki poteka v zemljini ob spremembi razmer v geološkem okolju in se odraža v povečanem volumnu (npr. dvižku tal) ali povečanih tlakih na oviro (konstrukcijo).

**Nabrekalni potencial:** je zmožnost, da se v zemljini sproži proces nabrekanja in je direktno odvisen od sukcije. Visok nabrekalni potencial imajo lahko tudi zemljine, ki ne vsebujejo nabrekajočih mineralov glin, imajo pa zelo visoko sukcijo.

**Nabrekalna deformacija:** je prirastek volumna zaradi nabrekanja, ki jo lahko izrazimo kot linearni nabrekalni dvižek ali nabrekalno volumensko ekspanzijo. Velikost nabrekalne deformacije je odvisna od nabrekalnega potenciala in zunanje obremenitve. Pri dovolj visoki zunanji obremenitvi (totalnem tlaku) nabrekljiva zemljina ne bo spremenila volumna, tudi če ima visok nabrekalni potencial.

**Nabrekalni tlak:** je tlak, s katerim vzdržujemo konstantni volumen zemljine ob navzemanju vode ali zniževanju sukcije. Velikosti nabrekalnega tlaka in nabrekalne deformacije nista v neposredni zvezi. Nekatero zemljino, na primer oligocenska sivica, lahko razvijejo zelo visoke nabrekalne tlake ob relativno majhnih deformacijah in obratno.

#### Kako zanesljive so napovedi nabrekanja za geotehnično rabo

V saturirani zemljini je možno deformacije zaradi konsolidacije ali nabrekanja računsko dokaj natančno napovedati, razmerja med spremembo vlage in volumna pa so proporcionalna. V nesaturirani zemljini so nabrekalne deformacije vselej nehomogene, ker procesa navzemanja vode in ekvibracije sukcije ne potekata enakomerno. Tudi čas, v katerem se izkoristi celoten nabrekalni potencial je težko napovedati, saj so mehanizmi gibanja vode v nezasičeni coni veliko bolj kompleksni od tistih, ki potekajo v zasičeni coni.

Na splošno velja, da je v primerih, ko imamo opravka z normalno konsolidiranimi zemljinami ali umetno nabitimi kompoziti, napovedovanje nabrekalnega potenciala, nabrekalnih dvižkov in tlakov kljub vsemu razmeroma enostavno. Ker so napovedi zanesljive, lahko temu primerno tudi prilagodimo potrebne zavarovalne ukrepe. Te smo opisali na primeru gradnje nasipov na avtocesti med Cogetinci in Vučjo vasjo.

V nezasičenih, visoko prekonsolidiranih zemljinah, v katerih so prisotni aktivni glineni minerali in soli pa je napovedovanje deformacijskega obnašanja izjemno težavno, predvsem pa je še vedno zelo slabo raziskano. Zato se v prekonsolidiranih zemljinah vseh vrst in starosti kar naprej srečujemo s pojavi, ki jim pravimo geološka presenečenja. Dolgotrajne deformacije zaradi mehčanja, strukturni razkroj, popuščanje geotehničnih sider, periodično pojavljanje plazov na določenih območjih so značilne oblike dogajanj v prekonsolidiranih zemljinah. Velja tudi obratno. Iz marsikaterega gradbišča poročajo, da so bile geološke napovedi preveč pesimistične. Ali slednje tudi drži, ne vemo, ker o preveč pesimističnih napovedih slišimo predvsem iz gradbišč, kjer so bile med gradnjo uporabljene ustrezno dimenzionirane podporne konstrukcije.

Največja težava pri vrednotenju nabrekljivosti v visoko prekonsolidiranih glinah in mehkih kamninah je v tem, da so le te v naravnem stanju trdne in ne kažejo posebnih znakov, ki bi nas opozorili na nabrekanje. Smola je tudi, da so se v sodobni geotehniki uveljavile napredne terenske preiskave s presiometri, dilatometri in najrazličnejšimi penetracijskimi preizkusi, s katerimi zelo dobro identificiramo in situ trdnost, deformabilnost, razmerja med vertikalnimi in horizontalnimi napetostmi, zelo malo pa izvemo o obnašanju zemljine, v spremenjenih razmerah geološkega okolja in na dolgi rok.

Zato so za vrednotenje nabrekljivosti laboratorijske raziskave neobhodno potrebne.

Posebno pomemben vidik nabrekanja v visoko prekonsolidiranih zemljinah in mehkih kamni-



nah je mehčanje (softening) in zniževanje trdnosti s časom ter razpad po razpokah. Tudi ta vidik obnašanja materiala je možno ustrezno raziskati le s kombinacijo terenskih in laboratorijskih preiskav.

Nabrekalni tlaki, merjeni v laboratoriju, so v prekonsolidiranih zemljinah včasih tako visoki, da bi njihova direktna uporaba v geostatičnem izračunu narekovala izjemno močne in neekonomične podporne konstrukcije. Zato je pogosto treba pri projektiranju poiskati kompromis med laboratorijskimi meritvami in izkušnjami, z opazovanji med samo gradnjo pa po potrebi sprejemati dodatne zavarovalne ukrepe.

### Zaključek

Novi standardi in smernice za geotehnično projektiranje namenjajo raziskavam nabrekljivosti vse večji pomen. Vzroka sta dva: prvi je ta, da bodo napovedane klimatske spremembe močno vplivale na obnašanje tal v plitvem, pripovršinskem delu, kjer je temeljenih večina lahkih zgradb in prometnic, drugi pa ta, da se nove velike gradnje selijo globoko v tla, v območje visoko prekonsolidiranih zemljin in mehkih kamnin, ki vsebujejo glino. Tam so dogajanja v zvezi z volumenskimi deformacijami še posebej zapletena.

Za identifikacijo nabrekljivosti v geotehničnih zgradbah samo podatki mineraloško petrografskih raziskav ne zadoščajo. Potencialno nabrekljivost zemljin in mehkih kamnin je treba prepoznati z uporabo indeksnih kazalnikov lastnosti materiala v povezavi z določitvijo naravne vlage in sukcije. Če indeksni kazalniki potrdijo sum na nabrekanje, je treba pričakovano velikost nabrekalnih tlakov ali deformacij ovrednotiti z direktnimi meritvami, prilagojenimi pričakovanim spremembam efektivnih napetosti, ki jih bo novogradnja vnesla v geološko okolje.

Pri načrtovanju geološko geotehničnih raziskav za velike infrastrukturne objekte bi morali bazičnim preiskavam, to je mineraloško petrografskim raziskavam in raziskavam za identifikacijo obnašanja materiala v »pogojih uporabe« vselej namenjati ustrezno pozornost. Izkušnje zadnjih let kažejo, da se je ob uvajanju naprednih in situ raziskav za merjenje napetostno deformacijskih parametrov s presiometri, dilatometri in različnimi tipi penetrometrov, nekako pozabilo na temeljne geološke raziskave, brez katerih pa ni možno razumeti in napovedati obnašanja materiala. Zato se v nekaterih geoloških sredinah geološka presenečenja med gradnjo kar prepogosto ponavljajo. Veliko teh presenečenj je posledica premajhnega obsega temeljnih raziskav in nerazumevanja volumenskih sprememb, ki se lahko razvijejo v nekaterih geoloških materialih.

### Literatura

ABDULJAUWAD, S. N., AL-SULAIMANI, G. J., BASUNBUL, I. A. & AL-BURAIN, I. 2000: Laboratory and field studies of response of structures to heave

- of expansive clay. *Geotechnique* (London) 50/2: 197-198.
- AITCHISON, G. D. & MARTIN, R. 1973: The quantitative description of the stress-deformation behaviour of expansive soils. 2: A membrane oedometer for complex stress-path studies in Expansive clays. V: Proc. of the 3rd int. conf. on expansive soils, (Haifa, Izrael) 2: 83-88.
- ALONSO, E. E., GENS, A. & JOSA, A. 1990: A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique* (London) 40/3: 405-430.
- BISHOP, A. W. 1959: The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad* (Oslo) 106/39: 859-863.
- BUCHER, F. & SPIEGEL, U. 1984: Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten. *Nagra Technical Report NTB 84-18* (Wettingen, Švica).
- CEGNAR, T. 2004: Podnebne razmere v letih 2002 in 2003. *Ujma* (Ljubljana) 17/18: 16-31.
- CHEN, F. 1975: Foundations on expansive soils. Elsevier Scientific Publishing Company (Amsterdam): 1-282.
- CHIAPPONE, A., MARELLO, S., SCAVIA, C. & SETTI, M. 2004: Clay mineral characterization through the methylene blue test: comparison with other experimental techniques and application of the method. *Canadian Geotechnical Journal* (Montreal, Kanada) 41: 1168-1178.
- COKCA, E. 2002: Relationship between Methylene blue value, initial soil suction and swell percent of Expansive Soils. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* (Ankara) 26: 521-529.
- CORTI, T., MUCCIONE, V., KÖLLNER-HECK, P., BRESCH, D. & SENEVIRATE, S. I. 2009: Simulating past droughts and associated building damages in France. *Hydrol. earth syst. sci.* (Göttingen) 13: 1739-1747.
- CRILLY, M. 2001: Analysis of a database of subsidence damage, Structural survey (Bingley, Velika Britanija) 19: 7-14.
- DAS, B. M. 1993: Principles of Geotechnical Engineering. PWS Publishing company (Boston).
- DAY, R. W. 1993: Expansion Potential According to Uniform Building Code. *Journal of Geotechnical Engineering* (New York). 119/6: 1067-1071.
- DEMENGGHI, A. 2009: Deformations assessment in expansive soils. V: HAMZA, M., SHAHIEN, M. & EL-MOSSALLAMY, Y. (eds.): Proc. of the 17<sup>th</sup> inter. conf. on soil mech. and geotech. eng., 5-9 October 2009, Alexandria, Egypt (Aleksandrija): 719-722.
- DIENG, M. A. 2006: Bestimmungsmethode der Konsistenzgrenzen mittels Wasseraufnahmeversuchen, *Bautechnik* (Berlin) 83/7: 492-496.
- FARRAR, D. M. & COLEMAN, J. D. 1967: The correlation of surface area with other properties on nineteen British clay soils. *Journal of Soil Science* (Oxford) 18/1: 118-124.
- FREDLUND, D. G. 1979: Appropriate concepts and technology for insaturated soils. *Can. Geotech. J.* (Montreal, Kanada) 16: 121-139.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. 1985: Theoretical context for understanding unsaturated residual soils behaviour. *Proceeding of the 1<sup>st</sup> International conference Geomechanics in Tropical*

- Laterite and Saprolitic Soils (Sao Paolo, Brazilija): 295-306.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. 1993: Soil Mechanics for unsaturated Soils. John Wiley & Sons (New York): 1-517.
- HEAD, K. H. 1980: Manual of Soil Laboratory testing. John Wiley & Sons (London): Volume 1, 2, 3.
- HOFFMANN, C., ROMERO, E. & ALONSO, E. E. 2005: Combining different controlled-suction techniques to study expansive clays. V: TARANTINO, A., ROMERO, E. & CUI, Y.J. (eds.): Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics – Proceedings of an International Symposium, Trento, Italy, 27-29 June 2005 (Trento, Italija): 61-67.
- HOLTZ, W.G. & GIBBS, H. J. 1956: Engineering properties of expansive clays, Transactions of the American society of civil engineering. (ZDA) 121: 641-677.
- KASSIFF, G. & BEN SHALOM, A. 1971: Experimental relationship between swell pressure and suction. Geotechnique (London) 21: 245-255.
- KOMAC, M. 2009: Vloga javnega instituta geološkega zavoda pri preprečevanju geohazardov in zmanjševanju njihovih posledic. Geologija (Ljubljana) 52/1: 105-112.
- LYTTON, R. L. 1977: Foundations in expansive soils. V: DESAI, C.S. & CHRISTIAN, J. T. (eds.) Numerical methods in geotechnical engineering. McGraw Hill Book Company. (New York).
- MAJES, B. 2006: Slovenian geotechnics. V: LOGAR, J., GABERC, A. & MAJES, B. (eds.): Proc. XIII<sup>th</sup> Danube European Conference on Geotechnical Engineering. (Ljubljana): 3-54.
- McKEEN, R. G. 1981: Design of Airport Pavements for Expansive Soils. Engineering Res. Inst., University of New Mexico, NMERI-AP-37.
- McKEEN, R. G. 1992: A model for predicting expansive soil behavior. V: 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, (Dallas, ZDA) 1: 1-6 (izsek članka).
- MAČEK, M., BEBAR, M. & PETKOVŠEK, A. 2010: High embankments from highly plastic, stiff clays in North-East Slovenia. V: FRANKOVSKÁ, J. (ed.): XIV<sup>th</sup> Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Bratislava, Slovak Republic, 2<sup>nd</sup> - 4<sup>th</sup> June 2010. From research to design in European practice: proceedings of the XIV<sup>th</sup> Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Bratislava, Slovak Republic, 2<sup>nd</sup> - 4<sup>th</sup> June 2010. Bratislava: Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering. (Bratislava): 1-10, zgoščenka
- MIKOŠ, M., PETKOVŠEK, A. & MAJES, B. 2009: Mechanisms of landslides in over-consolidated clays and flysch. Landslides (Springer) 6/4: 367-371.
- MITCHELL, J. K. 1993: Fundamentals of Soil behaviour. John Wiley and sons (New York) 1-437.
- NAGARAJ, T. S. & MURTHY, BRS. 1985: Rational approach to predict Swelling soil behaviour. Transportation Research Record TRB (Washington) 1032: 1-8.
- PETKOVŠEK, A. 2002: Metilen modro test – enostavna in hitra metoda za prepoznavanje nabrekliivosti zemljin in drobnih zrn v tamponskih agregatih. V: VILHAR, M. (ur.). 6. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 23.-25. oktobra 2002. Zbornik referatov. Ljubljana, (Ljubljana): 1. del: 197-205.
- PETKOVŠEK, A. 2006: Stabiliziranje zemljin pri gradnji avtocest v severovzhodni Sloveniji. Zbornik referatov. Megra 2006 - Gornja Radgona. DRC Ljubljana (Ljubljana): 13-35.
- PETKOVŠEK, A., MAČEK, M. & MAJES, B. 2009: A laboratory characterization of soils and clay-bearing rocks using the Enslin-Neff water-adsorption test. Acta geotech. Slov. (Maribor) 6/2: 4-13.
- SEED, H. B., WOODWARD, R. J. & LUNDGREN, R. 1962: Prediction of swelling potential for compacted clays. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE (ZDA) 88: 53-57.
- SKUTNIK, Z., BOROWCZYK, M. & KRYSIAK, S. 2006: Long term pore water pressure measurements for effective stress evaluation in Warsaw clays. V: LOGAR, J., GABERC, A. & MAJES, B. (eds.). Proc. of the 13<sup>th</sup> Danube-European conf. on geotech. eng., 29-31 May 2006, Ljubljana, Slovenia, Active geotechnical design in infrastructure development (Ljubljana) 2: 113-118.
- ŠUKLJE, L. 1980: Zemeljski pritiski na podzemno strojnico Moste. Gradbeni vestnik. (Ljubljana) 29/10: 202-212.
- TERZAGHI, K. 1936: The shear resistance of saturated soil. V: Proc. 1<sup>st</sup> int. conf. soil. mech. found. eng. Cambridge MA (Cambridge): 1.
- TOMAŽEVIČ, M. & GAMS, M. 2010: Obnašanje hiš Ytong pri potresni obtežbi : modelne preiskave na potresni mizi = Seismic behaviour of confined aerated autoclaved concrete masonry buildings : a shaking table study. Gradb. vestn. (Ljubljana) 59/6: 130-146.
- ZAPATA, C. E., ANDREI, D., WITCZAK, M. W. & HOUTSTON, W. N. 2005: Incorporation of environmental effects in pavement design. V: International Workshop on Water in Pavements-wip 2005. (Madrid)
- ASTM C837 - 09 Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay.
- ASTM 4546-96: Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils.
- DIN 18132:1995. Messung der Wasseraufnahme von Boden.
- ÖGG - Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2001 Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2001. Richtlinie für Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit Zyklischem Vortrieb, Salzburg.
- SIST EN 14227-10 Hidravlično vezane zmesi – Specifikacije – 10. del: Izboljšanje zemljin s cementom.
- SIST EN 1997-1:2005 Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila.
- SIST EN 933-9:2009 Preskusi geometričnih lastnosti agregatov – 9. del: Ugotavljanje finih delcev – Preskus z metilen modrim.
- TM 5-818-7, Foundations in expansive soils (technical manual), 1983.
- UFC 3-220-07 Unified Facilities Criteria, Foundations in expansive soils, 2004.