

UDK 528.482:531.1:007.52:624.19:726.54(430)
Pregledni znanstveni članak

Kinematički mjerni sustavi za praćenje pomaka i deformacija građevina

Vlado CETL, Zdravko KAPOVIĆ¹ – Zagreb,
Thomas A. WUNDERLICH² – München

SAŽETAK. Mjerenja pomaka različitih prirodnih i izgrađenih objekata imaju važnu ulogu u deformacijskoj analizi. Takva se mjerenja u geodeziji obavljaju već dulje vrijeme, a razvoj mjernih tehnologija omogućuje njihovo poboljšanje. To se odnosi posebice na razvoj robotiziranih mjernih stanica. U ovom radu prikazano je praćenje pomaka mostova i povijesnih crkava u Bavarskoj, koje provodi Katedra za geodeziju pri Fakultetu za građevinarstvo i geodeziju na Tehničkom Sveučilištu u Münchenu. Prikazani su i konkretni primjeri praćenja pomaka mosta na autocesti München – Berlin te u crkvi sv. Ignacija u Landshutu u Bavarskoj.

Ključne riječi: pomaci i deformacije, robotizirane mjerne stanice.

1. Uvod

Geodetska mjerenja pomaka već dugo vrijeme imaju važnu ulogu u deformacijskoj analizi. Iako fotogrametrijske i satelitske (GPS) metode imaju veliku primjenu u mjerenjima pomaka, mnogo je slučajeva kada točnost, cijenu, uvjete na terenu i zahtjeve za opremom bolje zadovoljavaju klasična geodetska mjerenja kutova i duljina, odnosno polarna mjerenja i nivelman. Mjerenja s pomoću totalnih mjernih stanica važan su izvor informacija u praćenju pomaka različitih objekata.

Do prije nekoliko godina velik je problem bio nemogućnost automatskih izvođenja mjerenja, no danas su ona omogućena razvojem robotiziranih mjernih stanica. Precizni servomotori u kombinaciji s funkcijom automatskog prepoznavanja cilja (Automatic Target Recognition – ATR) danas omogućuju mjerenje kutova s preciznošću boljom od 1". Daljnji razvoj tehnologije omogućuje kombiniranje GPS opažanja i polarnih mjerenja na istoj centralnoj platformi (Stempfhuber i Wunderlich 2004).

¹Mr. sc. Vlado Cetl i prof. dr. sc. Zdravko Kapović, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: vcetl@geof.hr, zkapovic@geof.hr

²Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Alexander Wunderlich, Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Arcisstraße 21, D-80290 München, e-mail: th.wunderlich@bv.tum.de

Kada je potrebno mjeriti pomake u određenom području, najčešće se razvija samostalna geodetska mreža s koje se obavljaju opažanja u nekoliko različitih epoha. U specifičnim slučajevima potrebno je kontinuirano praćenje pomaka, što je moguće upravo uporabom robotiziranih mjernih stanica (Michel i dr. 2003).

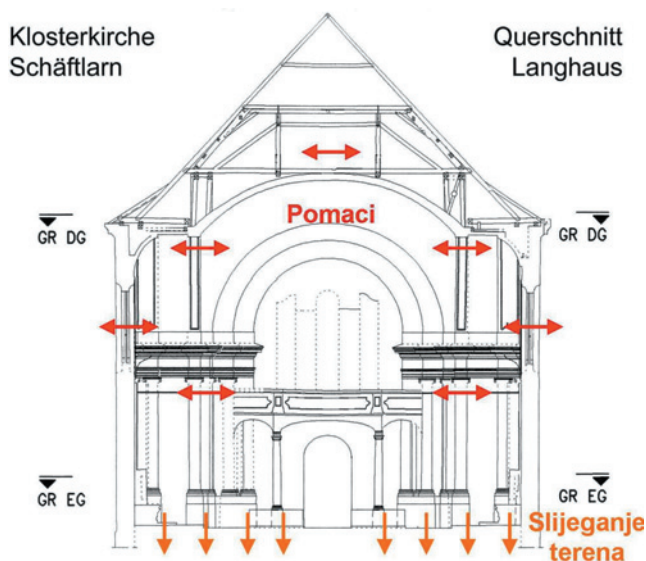
Prikupljanje podataka robotiziranim mjernim stanicama u kinematičkome modu rada u kombinaciji s računalom i odgovarajućim softverom za obradbu podataka mjerenja predstavlja veliki potencijal u izmjeri i praćenju pomaka. Kako se praćenje pomaka obavlja frekventno, tj. u određenom broju ponavljanja mjerenja istih točaka, povezivanjem mjerne stanice s računalom moguće je unaprijed kontrolirati i postaviti redoslijed mjerenja. Na tržištu postoje različiti softveri za tu namjenu poput GeoMoS tvrtke Leica (URL 1).

Iako se kontinuirana praćenja pomaka građevinskih objekata najčešće izvode samo s mjernim stanicama, u nekim je slučajevima potrebna i kombinacija s GPS mjerenjima. To je posebice važno ako se mjerna stanica postavlja u području deformacija. GPS mjerenja se tada koriste za izmjeru kontrolnih točaka mreže (Cranenbroeck i Brown 2004).

2. Praćenje pomaka povijesnih građevina

Crkve i druge povijesne građevine (dvorci, kule, samostani, ...) vrijedna su kulturna baština i od općeg je interesa njihova zaštita i očuvanje kao spomenika kulture.

S obzirom na njihovu starost, povijesne građevine s vremenom su podložne različitim utjecajima. Slijeganjem terena dolazi do pomaka objekta što uzrokuje različita oštećenja, pukotine i lomove u konstrukciji (slika 1).



Slika 1. Deformacije objekta zbog slijeganja terena.

Zbog toga, ali i zbog različitih oštećenja tijekom vremena, obavljaju se geodetska mjerenja radi određivanja pomaka. Takva su mjerenja važna iz više razloga (Foppe 2004):

- održavanje, očuvanje i zaštita kulturnih dobara
- praćenje teorijski predviđenih pomaka
- sigurnost posjetitelja i sigurnost građevinskih radnika na poslovima sanacije
- religijski značaj objekta.

Rezultati geodetskih mjerenja pružaju dobru osnovu za deformacijsku analizu, koja je podloga građevinskim stručnjacima za izradbu projekata sanacije i restauracije takvih građevina.

2.1 Pregled mjernih metoda

Pri mjerenju pomaka unutar građevinskih objekata (tunelogradnja, različite konstrukcije i dr.) upotrebljava se termin mjerenje konvergencije, što predstavlja mjerenje promjene udaljenosti dviju točaka na konstrukciji.

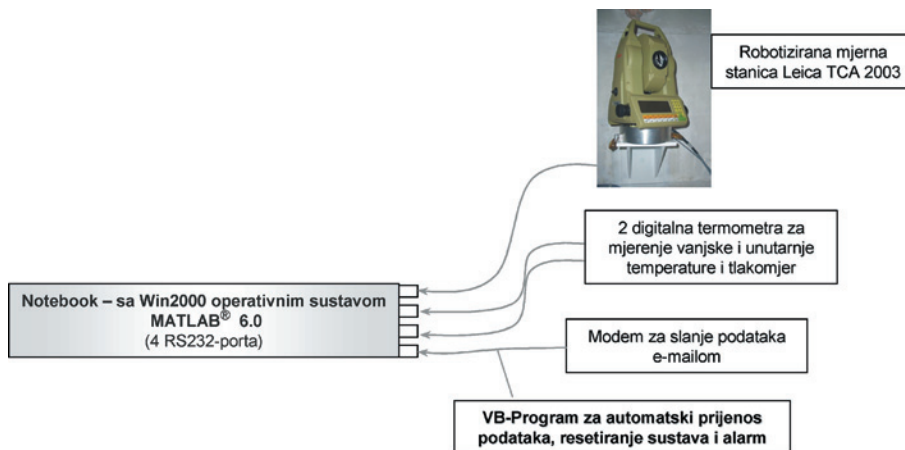
Pri mjerenju pomaka upotrebljavaju se različite metode i oprema. Tablica 1 prikazuje pregled metoda i preciznosti (Stempfhuber i dr. 2004).

Tablica 1. *Pregled mjernih metoda.*

mjerni sustav	cijena	preciznost	frekvencija mjerenja	automatizacija	broj udaljenosti	3D	postava sustava
invarna žica	niska	0,2 mm	1x dnevno	--/+ ++	1	ne	--
ručni laserski daljinomjer	niska	1–2 mm	1 Hz po mjernoj točki	++	1	ne	++
robotizirana mjerna stanica s prizmama	visoka	< 1 mm	1 Hz po mjernoj točki	++	bez ograničenja	da	++
robotizirana mjerna stanica bezreflektorno	visoka	2 mm	1 Hz po mjernoj točki	++	bez ograničenja	da	++

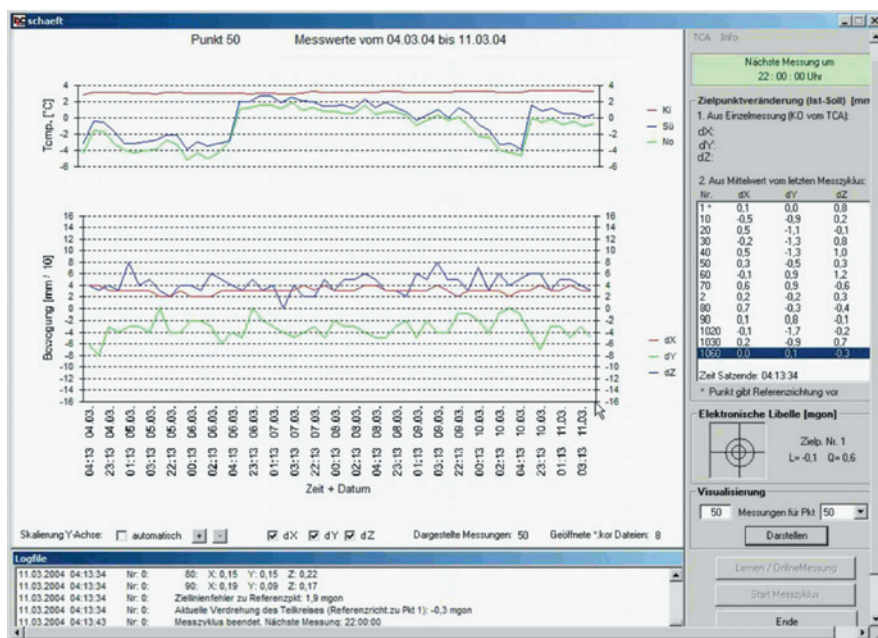
Najveći stupanj automatizacije mjerenja pomaka postiže se uporabom robotiziranih mjernih stanica u kinematičkom modu rada. Softverske aplikacije omogućuju “učenje” ciljeva mjernom stanicom. Na početku mjernog ciklusa viziraju se sve ciljne točke koje se poslije automatski opažaju. Ako su ciljne točke signalizirane prizmama uz podršku automatskog prepoznavanja cilja, dovoljno je grubo vizirati sve ciljeve koji se žele opažati. Ovisno o zahtijevanoj točnosti, mjerenje pomaka izvodi se prizmama ili bezreflektorno. Ako se izvodi bezreflektorno, preporuča se signalizacija određenog broja točaka prizmama radi kontrole mjerenja.

Slika 2 shematski prikazuje kinematički mjerni sustav za mjerenje pomaka razvijen na Katedri za geodeziju na Tehničkom Sveučilištu u Münchenu.



Slika 2. Kinematički mjerni sustav za mjerenje pomaka.

Osnovnu sastavnicu sustava čini robotizirana mjerna stanica Leica TCA 2003, koja podržava automatsko prepoznavanje cilja i odlikuje se preciznošću od $s_{Hz,V} = 0,5''$ ($0,15\text{mgon}$) i $s_d < 1\text{ mm} + 1\text{ ppm}$. Meteorološka korekcija mjerenja obavlja se na temelju mjerenja temperature zraka unutar objekta i vanjske temperature, tlaka zraka i vlažnosti. Za potrebe mjerenja pomaka, na Katedri za geodeziju razvijen je originalni program MoSTUM u Visual Basicu (slika 3).



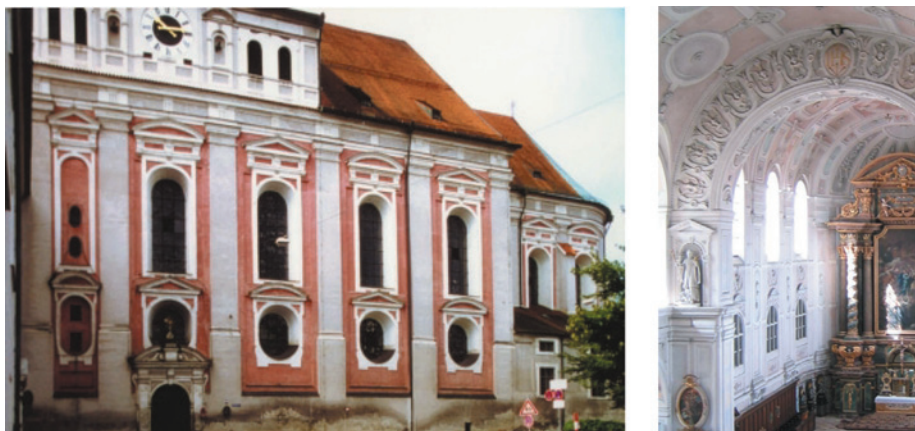
Slika 3. MoSTUM sučelje.

Zadaća je programa pokretanje ciklusa mjerenja u točno određeno vrijeme, preuzimanje sirovih podataka mjerenja iz mjerne stanice, meteorološka korekcija mjerenja, računanje koordinata ciljnih točaka, računanje pomaka u odnosu na nultu epohu mjerenja i vizualizacija. Nakon obradbe podataka program automatski preko e-mail klijenta jednom dnevno šalje e-mail s podacima mjerenja na TUM. Daljnja vizualizacija mjerenih podataka moguća je u softveru MatLab ili kojem drugom softveru.

Nakon postavljanja takvoga mjernoga sustava, mjerenje pomaka obavlja se automatski bez potrebe za geodetskim stručnjakom na terenu, odnosno u objektu. Mjerni ciklusi unaprijed se mogu programirati tako da se izbjegnu mjerenja za vrijeme služenja svete mise ili organiziranih posjeta.

2.2 Praćenje pomaka u crkvi sv. Ignacija u Landshutu

Isusovačka crkva Sv. Ignacija nalazi se u Landshutu, gradu u Bavarskoj, udaljenom oko 70 km od Münchena. Crkva je izgrađena u 17. stoljeću (slika 4).



Slika 4. Crkva sv. Ignacija u Landshutu.

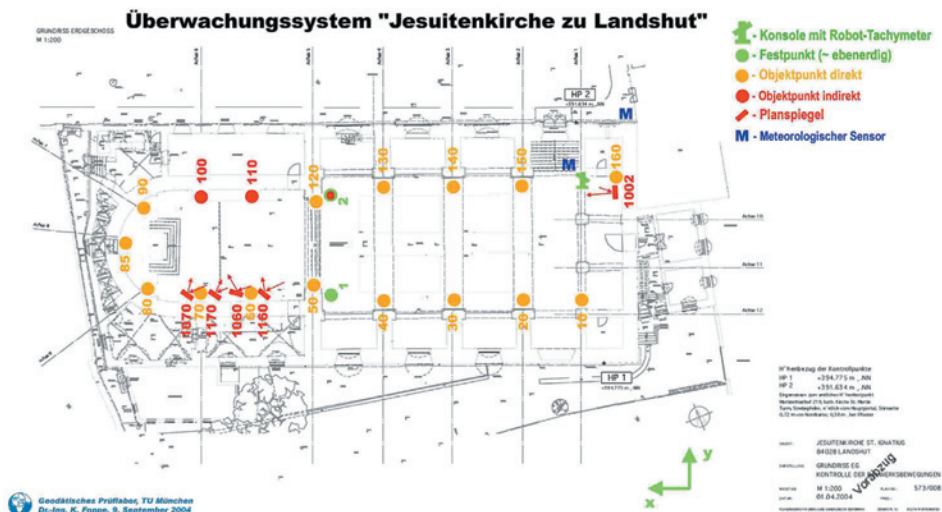
Za potrebe restauracije u rujnu 2004. započeto je geodetsko praćenje pomaka koje će se neprekidno obavljati kroz idućih nekoliko godina. Ciljne točke kod kojih će se pratiti pomaci signalizirane su prizmama (slika 5).

Ukupno je signalizirano 17 točaka. Na 15 prizama opaža se izravno, a 2 prizme (100 i 110) opažaju se neizravno preko 4 zrcala. Signalizirane su također dvije fiksne točke (1 i 2) te zrcalo kojim se kontrolno opaža točka 120.

Robotizirana mjerna stanica postavljena je iznad balkona na posebnoj konzoli, a prizme i zrcala su s pomoću dizalice postavljeni na predviđena mjesta na zidove (slika 6).

Na slici 7 prikazan je mjerni sustav, gledano od konzole s mjernom stanicom.

Prvo je mjerenje obavljeno početkom rujna 2004. i uzeto kao nulta epoha mjerenja. Koordinate svih točaka izračunane su u lokalnom koordinatnom sustavu. Koordi-



Slika 5. Shematski prikaz sustava za mjerenje pomaka.



Slika 6. Postavljanje instrumenta i signalizacija točaka.

nate ishodišta uzete su u točki gdje je postavljena mjerna stanica. Mjerenja se obavljaju svakodnevno, a mjerni ciklusi u trajanju od otprilike 24 minute započinju u 0.00, 4.00, 7.00, 12.00, 16.00 i 20.00 sati. Mjerenja se na svakoj točki obavljaju u tri ponavljanja, iz kojih se računa obična aritmetička sredina. Nakon toga računa se i dodaje meteorološka korekcija. Konačan rezultat razlika je koordinata (pomak) u odnosu na nultu epohu mjerenja (slika 8).



Slika 7. Mjerna stanica i signalizirane točke.

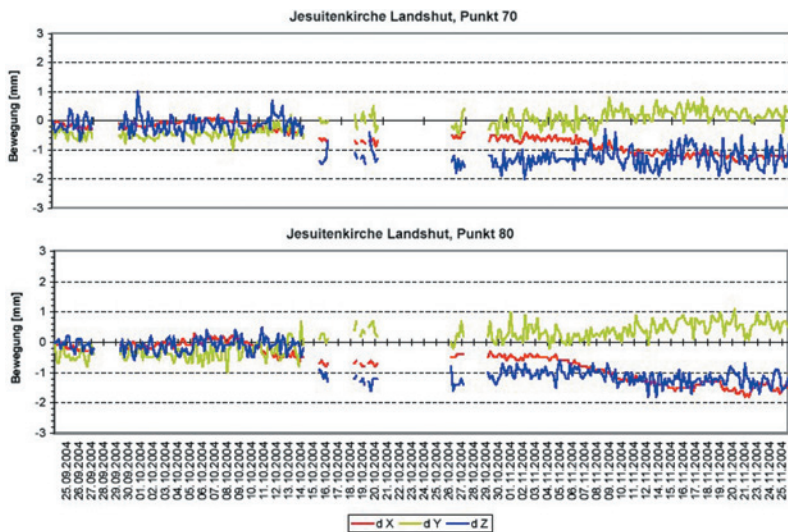
70_20041123.kor - Editor					
File	Edit	Format	?		
70	0.0020	-0.0041	-0.0008	23.11.2004	00:24:32
70	0.0020	-0.0041	-0.0007	23.11.2004	04:24:30
70	0.0019	-0.0041	-0.0009	23.11.2004	07:54:40
70	0.0018	-0.0039	-0.0009	23.11.2004	12:24:24
70	0.0018	-0.0041	-0.0007	23.11.2004	16:24:41
70	0.0017	-0.0041	-0.0006	23.11.2004	20:24:27

80_20041123.kor - Editor					
File	Edit	Format	?		
80	0.0018	-0.0042	-0.0007	23.11.2004	00:24:32
80	0.0018	-0.0041	-0.0007	23.11.2004	04:24:30
80	0.0017	-0.0042	-0.0006	23.11.2004	07:54:40
80	0.0017	-0.0040	-0.0007	23.11.2004	12:24:24
80	0.0016	-0.0042	-0.0005	23.11.2004	16:24:41
80	0.0016	-0.0042	-0.0004	23.11.2004	20:24:27

Slika 8. Izračunani pomaci za točke 70 i 80 dana 23. XI. 2004.

Takve datoteke, za svaku točku, svakodnevno se e-mailom s računala smještenoga u crkvi šalju na TUM. Na temelju njih moguća je daljnja deformacijska analiza (slika 9).

Slika 9 grafički prikazuje pomake za mjerene točke 70 i 80 u razdoblju od 25. IX. do 25. XI. 2004. Mjerenja u određenim danima nisu obavljena zbog pada mjernog sustava uslijed problema s napajanjem, što je vidljivo iz prekida na dijagramu, tako da za te dane podatci ne postoje. Pomaci su prikazani kao razlike koordinata dy , dx i dz u odnosu na nultu epohu mjerenja. Uočljivo je da pomaci po x i z osi imaju negativan, a po y osi pozitivan trend. To je tek grubi pokazatelj u kratkom vremenskom



Slika 9. Vizualizacija pomaka za točke 70 i 80 u razdoblju od 2 mjeseca.

roku jer će se pouzdani zaključci i pokazatelji moći donijeti tek nakon daljnjih mjerenja u duljem vremenskom razdoblju.

3. Praćenje pomaka mostova

Praćenje mostova tijekom njihove izgradnje i poslije tijekom uporabe već je dugo vrijeme zadaća inženjerske geodezije. Nadležnost za poslove održavanja i praćenja mostova u Njemačkoj ima Uprava za izgradnju cesta *Straßenbauverwaltung*, a njezini su poslovi zakonski regulirani. Geodetski poslovi vezani uz izgradnju mostova u Hrvatskoj se obavljaju i pri probnim opterećenjima mostova neposredno nakon izgradnje, što u Njemačkoj nije praksa. Određivanje pomaka i deformacija obavlja se u slučajevima različitih oštećenja i dotrajalosti konstrukcije. Tehnička podloga za mjerenje pomaka i ispitivanje mostova dano je normama. Osnovnu podlogu za geodetska mjerenja na mostovima u Njemačkoj daje norma DIN 1076 *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung* iz 1999. godine. Normom se, za potrebe sigurnosti u prometu, propisuju različita probna ispitivanja mostova i drugih građevnih konstrukcija svakih 6 godina. Takvim ispitivanjima nastoje se otkriti oštećenja u geometrijskoj konstrukciji mosta kako bi se na vrijeme spriječila daljnje štete.

Općenito, praćenje pomaka mostova, ovisno o terenskim prilikama i zahtijevanoj točnosti, može se obavljati:

- nivelmanom
- mjernim stanicama
- GPS opažanjima
- laserskim skenerima.

S obzirom na veću položajnu nego visinsku točnost, GPS opažanja daju zadovoljavajuće rezultate pri određivanju horizontalnih pomaka (Kapović i dr. 1998). Stoga se mjerenja vertikalnih pomaka u pravilu obavljaju preciznim nivelmanom, što je ujedno i najtočnija metoda. Vrlo često je međutim nemoguće fizički zatvoriti promet preko mosta (Kuhlmann 2002), pa se tada upotrebljavaju GPS prijammnici, mjerne stanice i u novije doba laserski skeneri.

3.1 Praćenje pomaka mosta na autocesti München – Berlin

Na vanjskom području Münchena, na autocesti München – Berlin nalazi se prometno visokofrekventni most (slika 10).



Slika 10. Most na autocesti München – Berlin.

Most je izgrađen potkraj 1960-ih godina, dugačak je više od 600 m i sastavljen od 20 raspona. Ispod mosta prolaze željeznička pruga i pruga podzemne željeznice.

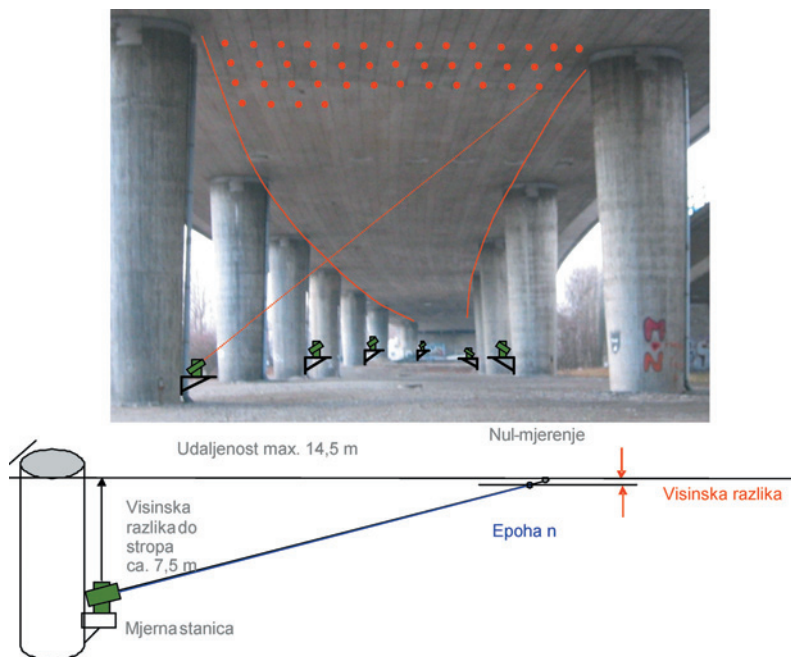
S obzirom na dugogodišnju visoku gustoću prometa preko mosta i na vremenske utjecaje, na više mjesta na konstrukciji pojavila su se različita oštećenja (slika 11).



Slika 11. Oštećenja armature mosta.

Posebno su uočljiva oštećenja na željeznoj armaturi na donjem dijelu rasponske konstrukcije mosta zbog djelovanja vode i soli, što uzrokuje pucanje i otpadanje betona.

S obzirom na veliki prometni značaj i sve veću prometnu gustoću, most je potrebno sanirati. U tu je svrhu Katedra za geodeziju na TUM-u dobila je u rujnu 2004. zadatak pratiti vertikalne pomake konstrukcije radi točnog određivanja deformacija, što će biti podloga daljnjem građevinskom projektu sanacije. Kako se promet na mostu ne smije zaustavljati, razvijen je kinematički sustav za mjerenje pomaka ispod mosta (Wunderlich 2004). Sustav obuhvaća bezreflektorno mjerenje pomaka u 18 polja na donjem dijelu rasponske konstrukcija mosta s pomoću robotizirane mjerne stanice (slika 12).



Slika 12. Kinematički mjerni sustav za praćenje vertikalnih pomaka mosta.

Područje mjerenja obuhvaća raster točaka od 2 x 2 m. Visinske razlike (vertikalni pomaci) računaju se kao razlike između n-te i nulte epohe mjerenja. Dva polja iznad željezničke pruge naknadno su pojačana posebnom čeličnom konstrukcijom tako da njih nije potrebno pratiti. Za potrebe praćenja pomaka mosta uspostavljena je referentna geodetska mreža ispod mosta. Na stupove mosta, na visini od otprilike 0,5 m, postavljene su posebno izrađene metalne konzole kao stajališta instrumenta s uređajem za prisilno centriranje (slika 13).

Postavljene su ukupno 22 konzole. Osim konzola na stupovima mosta, na donjem dijelu rasponske konstrukcije mosta postavljeno je i 65 prizama koje služe za praćenje pomaka, ali i za kontrolu bezreflektornih mjerenja (slika 14).




Slika 13. Konzole s uređajem za prisilno centriranje.



Slika 14. Postavljanje prizama.

Na konzole je na podnožne ploče postavljena mjerna stanica i prizme te je izmjerena referentna mreža. Visinske razlike između konzola izmjerene su preciznim nivelmanom. Kutovi su mjereni u tri girusa s pomoću robotizirane mjerne stanice Leica TCRA1101plus (tablica 2). Korišten je i meteorološki uređaj za mjerenje temperature i tlaka zraka za izračunavanje pripadne korekcije.

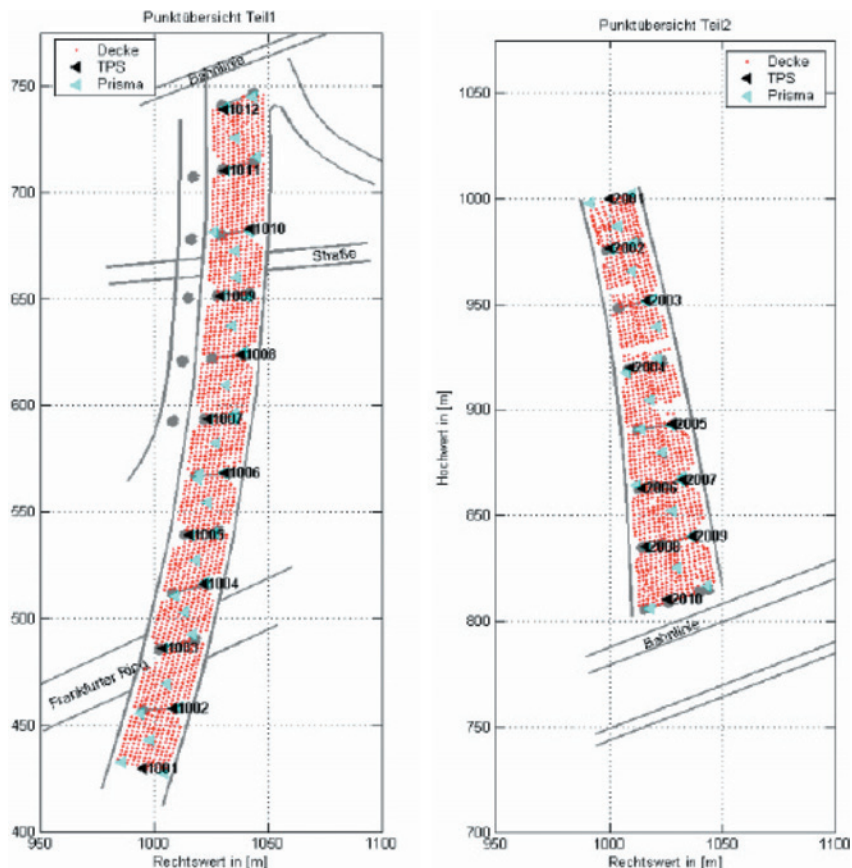
Tablica 2. Tehnička svojstva mjerne stanice Leica TCRA1101plus.

 ATR	Mjerenje	Preciznost
	kutovi	1.5"
	duljine (s prizmom)	2 mm + 2 ppm
	duljine (bezreflektorno)	3 mm + 2 ppm

Za izjednačenje referentne mreže uzeti su podatci polarnih mjerenja i nivelmana. Izjednačenje je obavljeno s pomoću softvera Panda (URL 2) i Caplan (URL 3), a postignuta je ukupna horizontalna nesigurnost od 0,6 mm i visinska nesigurnost od 0,5 mm. Za potrebe mjerenja pomaka razvijen je originalni program u GeoBASIC softveru tvrtke Leica.

Iz CAD crteža mosta izrađena je datoteka s rasterom točaka na stropu koja sadrži broj točke i koordinate. Program automatski učitava datoteku s točkama i započin-

je mjerni ciklus. Na osnovi koordinata točke preuzetih iz datoteke, mjerna stanica servomotorima se usmjerava na cilj i obavlja mjerenje. Mjerenja na donjem dijelu rasponske konstrukcije obavljena su u tri niza sa pet ponavljanja. Mjerenja se obavljaju automatski, bez potrebe za učešćem geodetskog stručnjaka. Na slici 15 prikazana je referentna geodetska mreža sa stajališnim točkama (konzolama) i prizma te raster opažanih točaka.



Slika 15. Mreža opažanih točaka.

Između točaka 1012 i 2010 nalaze se dva polja ispod kojih prolazi željeznička pruga. Na tom je mjestu referentna mreža povezana preko dviju pomoćnih točaka.

3.2 Početni rezultati mjerenja

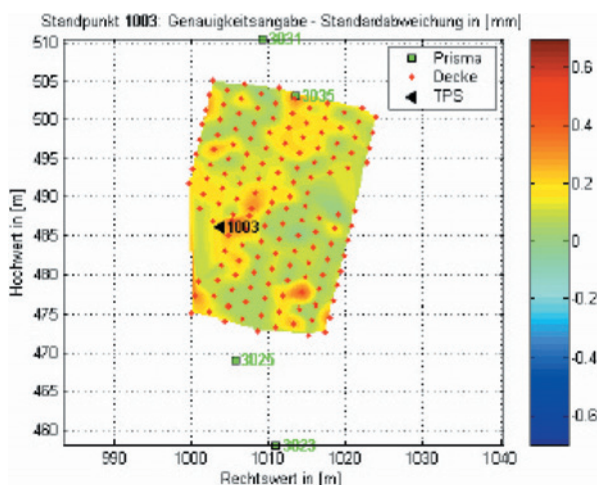
Prva mjerenja obavljena su potkraj listopada 2004. godine i služit će kao nulta epoha za ostala mjerenja. Bezreflektorno je izmjereno ukupno više od 2800 točaka na stropu mosta. Mjerenja će se periodično obavljati svakih 6 mjeseci do kraja 2006. godine.

Slika 16 prikazuje primjer mjerenih podataka dobivenih robotiziranom mjernom stanicom sa stajališta 1003.

STATIONSDATEN									
Datum	:	26.10.2004							
Temp (int)	:	12.6400°C							
Korrektur	:	16.7263 ppm							
Standpunkt	:	1003							
Rechtswert	:	1003.6818 m							
Hochwert	:	486.0782 m							
Höhe	:	102.8838 m							
Instr.-H.	:	0.0000 m							
Fernziel	:	1006							
Rechtswert	:	1031.2460 m							
Hochwert	:	568.3335 m							
Höhe	:	101.8008 m							
Ref.-H.	:	0.0000 m							
INITIALISIERUNG									
Umrechnung kart2polar:									
dH (inkl i.l.)	:	-1.0829 m							
Strecke (3D)	:	86.7577 m							
Strecke (2D)	:	86.7509 m							
RWI	:	20.5848 gon							
Zenitdistanz	:	100.7947 gon							
Setzen des Richtungswinkels:									
Hz aktuell	:	20.5848 gon							
HzOffset	:	167.4438 gon							
Hz real	:	253.1410 gon							
HzOffset neu	:	167.4438 gon							
KONTROLL-/ABSCHLUSSMESSUNG ZU FERNZIEL									
Pkt-Nr	Hz [gon]	V [gon]	Dist [m]	East [m]	North [m]	Elev [m]	h.h:mm:ss		
1006	20.5840	100.7992	86.7573	1031.2448	568.3334	101.7951	11:45:38		
1006	220.5855	299.2046	86.7573	1031.2468	568.3328	101.8004	11:45:51		
Mittel			1031.2458	568.3331	101.7978				
Delta			-0.0008	0.0007	0.0005				
EINZELPUNKTAUFNAHME									
Pkt-Nr	Hz [gon]	V [gon]	Dist [m]	East [m]	North [m]	Elev [m]	h.h:mm:ss		
3023	183.8657	88.8201	29.3944	1010.9386	458.0604	108.0864	11:47:14		
3023	183.8657	88.8204	29.3946	1010.9386	458.0602	108.0863	11:47:17		
3023	183.8655	88.8200	29.3946	1010.9387	458.0603	108.0864	11:47:20		
3023	183.8655	88.8197	29.3947	1010.9387	458.0602	108.0866	11:47:24		
3023	183.8653	88.8201	29.3945	1010.9388	458.0604	108.0864	11:47:27		
3025	192.6870	81.0723	17.9086	1005.6444	469.0682	108.1972	11:47:36		
3025	192.6871	81.0725	17.9086	1005.6444	469.0682	108.1971	11:47:40		
3025	192.6867	81.0731	17.9087	1005.6445	469.0680	108.1970	11:47:43		
3025	192.6869	81.0729	17.9086	1005.6445	469.0681	108.1970	11:47:47		
3025	192.6870	81.0717	17.9086	1005.6444	469.0682	108.1973	11:47:50		
3031	14.1229	84.8013	25.8189	1009.2015	510.5500	109.0564	11:48: 3		
3031	14.1232	84.8013	25.8190	1009.2017	510.5501	109.0565	11:48: 6		
3031	14.1237	84.8014	25.8189	1009.2018	510.5500	109.0564	11:48:10		
3031	14.1241	84.8014	25.8187	1009.2019	510.5497	109.0564	11:48:13		
3031	14.1241	84.8014	25.8188	1009.2020	510.5498	109.0564	11:48:16		
3035	33.3853	80.9229	20.5415	1013.5087	503.0669	109.0146	11:48:25		
3035	33.3853	80.9233	20.5415	1013.5087	503.0669	109.0145	11:48:28		
3035	33.3852	80.9231	20.5416	1013.5088	503.0670	109.0146	11:48:32		
3035	33.3848	80.9223	20.5415	1013.5086	503.0669	109.0148	11:48:35		
3035	33.3847	80.9220	20.5416	1013.5086	503.0670	109.0149	11:48:38		
142465	149.0675	82.0003	19.9856	1017.4500	472.7078	108.4595	11:48:47		
142465	149.0674	82.0002	19.9857	1017.4501	472.7075	108.4596	11:48:49		
142465	149.0674	82.0001	19.9859	1017.4502	472.7074	108.4596	11:48:51		
142465	149.0674	82.0002	19.9856	1017.4500	472.7076	108.4595	11:48:53		
142465	149.0674	82.0003	19.9861	1017.4503	472.7073	108.4596	11:48:55		
142466	143.0626	80.9989	19.1247	1017.9362	474.6353	108.5075	11:49: 1		

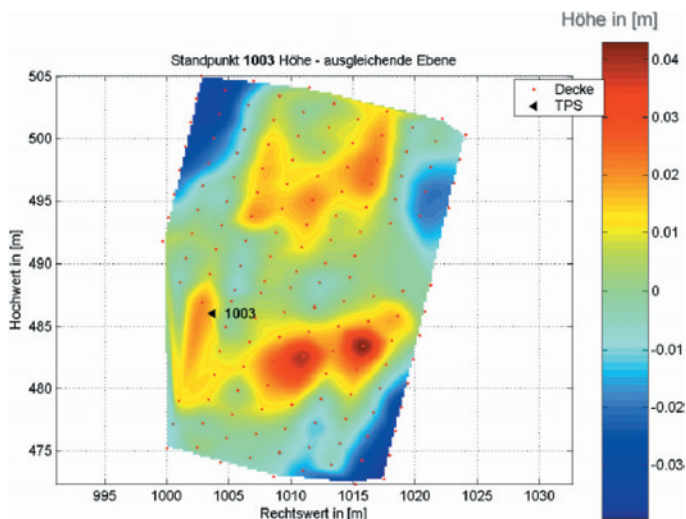
Slika 16. Primjer datoteke mjerenih podataka.

Točke s numeracijom od 3001 na dalje prizme su postavljene na donjem dijelu rapsijske konstrukcije mosta, a točke s numeracijom od 14001 na dalje bezreflektor-no su opažane točke (raster). Svaka je točka opažana pet puta. Na osnovi mjerenja iz triju epoha konačni je rezultat izračunan kao obična aritmetička sredina. Standardno odstupanje mjerenja sa stajališta 1003 prikazano je na slici 17.



Slika 17. Standardno odstupanje mjerenja pomaka sa stajališta 1003.

Kako su za to praćenje najvažniji vertikalni pomaci, za svako je stajalište izračunana teoretska ravnina donjeg dijela rasponske konstrukcije mosta. Razlike između dobivenih visina i te ravnine prikazuju upravo deformacije u polju odnosno konstrukciji (slika 18).



Slika 18. Razlike visina.

Iz slike je vidljivo da se visinske razlike kreću u području od nekoliko centimetara, što je već dobar pokazatelj postojanja određenih deformacija.

Mjerenja u nultoj epohi dobivena su s preciznošću boljom od 1 mm. Daljnjim mjerenjima dobit će se razlike u odnosu na nultu epohu, a time će se moći izvesti pouzdani zaključci o deformacijama mosta.

4. Zaključak

Razvoj mjernih tehnologija i instrumentarija doveo je do pojave robotiziranih mjernih stanica i mogućnosti bezreflektornih mjerenja, što se još ne tako davno činilo nezamislivim. Takvi mjerni senzori mogu se uspješno implementirati u sustave za kinematičko određivanje pomaka i deformacija različitih građevina.

Kinematički mjerni sustavi prikazani u ovom radu, ovisno o konkretnom zadatku, pokazuju iznimno dobru preciznost i pouzdanost pri mjerenju pomaka. Povezivanjem mjernih senzora s računalom, uz odgovarajući softver, moguće je uspostaviti potpuno automatizirani mjerni sustav. Posebno su važna bezreflektorna mjerenja, koja omogućuju praćenje pomaka i ondje gdje je fizički nemoguće signalizirati mjerne točku prizmom ili ondje gdje bi njihov broj i postavljanje bili neekonomični.

Daljnjim razvojem bezreflektornih mjerenja duljina zasigurno će postići bolji rezultati s obzirom na njihovu kvalitetu. U budućim aplikacijama očekuje se primjena takvih sustava u praćenju klizišta tla te u drugim različitim inženjerskim zadacima.

**Ovaj rad nastao je tijekom znanstvenoistraživačkog boravka mr. sc. Vlade Cetla od 1. IX. 2004. do 1. II. 2005. u Institutu za geodeziju, GIS i upravljanje zemljištem na Tehničkom sveučilištu u Münchenu. Znanstveno-stručni projekti prikazani u ovom radu izvode se na Katedri za geodeziju pod voditeljstvom Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomasa Alexandra Wunderlicha u kojima sudjeluju njegovi suradnici: Dr.-Ing. Karl Foppe, Dr.-Ing. Werner Vitus Stempfhuber, Dipl.-Ing. Thomas Schäfer i Dipl.-Ing. (FH) Stefan Zinsberger.*

Literatura

- Cranenbroeck, J., Brown, N. (2004): Networking Motorized Total Stations and GPS Receivers for Deformation Measurements. Proceedings of FIG Working Week 2004 Athens, Greece.
- Foppe, K. (2004): Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen in und an historischen Bauwerken. Vortrag am Tag der Forschung der Fachhochschule Neubrandenburg im Rahmen des Geodätischen Kolloquiums der Fachhochschule Neubrandenburg.
- Kapović, Z., Ratkajec, M., Roić, M. (1998): Control Survey of a New Maslenica Bridge. In Proceedings of the 1st International Conference of Engineering Surveying – INGENEO'98. Bratislava, Slovakia.
- Kuhlmann, H. (2002): Untersuchung von alternativen Meßverfahren zur Brückenüberwachung am Beispiel der Klosterwegbrücke. Deutsche Geodätische Kommission, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B, Heft 311, München.
- Michel, V., Person, T., Kasser, M. (2003): 74 Motorized Tacheometres Aiming at 5350 Prisms in Amsterdam: The Largest Topometric Continuous Real Time Monitoring System in the World? Proceedings of FIG Working Week 2003 Paris, France.
- Stempfhuber, W., Zinsberger, S., Bergmann, N. (2004): Online Monitoring historischer Kirchen mit einem Präzisionstachymeter mittels reflektorloser, direkter oder indirekter Winkel- und Streckenmessung. Ingenieurvermessung 2004, 14th International Course on Engineering Surveying ETH Zürich.
- Stempfhuber, W., Wunderlich, T. (2004): Leica System 1200: Auf dem Weg zur Sensorsynchronisation von GPS und TPS für kinematische Messaufgaben. AVN, 111. Jg., Heft 5, S.175-184, Wichmann-Hüthig Verlag, Heidelberg.
- Wunderlich, T. (2004): Geodetic Monitoring with Prismless Polar Methods. In Proceedings of INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia.

POPIS URL-a:

URL 1: GeoMoS Surveying & Engineering Software,

http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/ndef/lgs_4802.htm, (20. 11. 2004.).

URL 2: GEOTEC, <http://www.geotec-gmbh.de/>, (22. 11. 2004.).

URL 3: Cremer Programmentwicklung GmbH, <http://www.cpentw.de>, (22. 11. 2004.).

Kinematic Systems for Displacements and Deformation Monitoring of Buildings

ABSTRACT. The measurements of displacements of various natural and man-made objects plays an important role in the deformation analysis. Such measurements have been employed in geodesy for quite a period of time, and the development of measuring technologies has enabled its improvement. This primarily concerns the development of robotic total stations. In this paper monitoring of the displacements of bridges and historical churches in Bavaria is presented, which is being done by Department of Geodesy at Technical University of Munich. There are also particular examples of the displacements monitoring at one bridge on the highway Munich-Berlin and in St. Ignatius Church in the town Landshut in Bavaria.

Key words: displacement, deformation, robotic total stations.