

PREGLED MODELOV VREDNOTENJA GEODETSKIH KONTROLNIH MERITEV

PREVIEW OF EVALUATION MODELS OF GEODETIC CONTROL MEASUREMENTS

Sonja Bogatin, Dušan Kogoj

UDK: 528.2:621.3969

IZVLEČEK

V prispevku je podan pregled modelov vrednotenja geodetskih kontrolnih meritev. Sodobni geodetski merski sistemi ponujajo možnost zajema premikov in deformacij objekta v vseh detajlih in s tem izpolnitev sodobnih trendov v inženirski geodeziji: določiti ne samo geometrične spremembe objekta, ampak predvsem opisati dinamiko procesa spreminjanja v prostoru in času v odvisnosti od vzročnih sil. Ta pristop zahteva uporabo dinamičnih modelov, ki obravnavajo objekt, vzročne sile in posledično premike in deformacije kot celoto. S poenostavitvijo dinamičnih modelov so izpeljani statični, kinematični in identitetni (kongruenčni) modeli.

KLJUČNE BESEDE

geodetske kontrolne meritve, dinamični model, identitetni model, kinematični model, statični model

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.04

ABSTRACT

In the contribution the classification of evaluation models of geodetic control measurements is given. Contemporary geodetic measurement systems offer possibilities to measure movements and deformations of object in all details. As such they give the opportunity to fulfill the trends in engineering surveying which intend to determine not only the geometrical changes of an object but above all to describe the dynamic of the changes in space and time as subject of influencing forces. This procedure demands the use of dynamic models, which consider the object, causative forces and the resulting deformations as the entirety. By simplification of dynamic models the static, kinematic and (identity) models are derived.

KEY WORDS

geodetic control measurements, dynamic model, identity model, kinematic model, static model

1 UVOD

Običajna naloga geodetske deformacijske analize je raziskava premikov in deformacij objekta v prostoru in času. Z razvojem merskih tehnik in analitičnih postopkov na eni strani in potreb po interdisciplinarni obravnavi rešitev na drugi strani se je deformacijska analiza razširila na obravnavo celotnega procesa, ki poleg parametrov nastale deformacije ali premika vključuje zajem in opis celotnega procesa. Gre za fizikalno interpretacijo in modeliranje odnosov med vzročnimi silami in nastalimi spremembami v prostoru in času. Objekt, vplivi in nastale spremembe so obravnavani kot celota v skupnem dinamičnem modelu. Geodetska deformacijska analiza

tako vse bolj pomeni analizo dinamičnih procesov. Takšna obravnava zahteva razširitev geodetskega znanja na področja kot so mehanika, geotehnika in podobne vede, ki se prav tako ukvarjajo s spremembami objektov, kakor tudi z vzroki nastanka le-teh. Za uspešno interdisciplinarno obravnavo procesov spreminjanja objekta, katerih posledica so premiki in deformacije, je potrebna standardizacija postopkov obravnave in terminologije.

Dinamični modeli so najbolj splošni modeli, s poenostavitvijo pa so iz njih izpeljani statični, kinematični in identitetni model. Poenostavljeni modeli omogočajo uporabo deformacijske analize v primerih, kjer ni potrebna obravnava procesa v vseh detajlih, ki bi zahtevala uporabo dinamičnega modela.

Predmet prispevka je opis omenjenih deformacijskih modelov vrednotenja geodetskih kontrolnih meritev.

2 GEODETSKE KONTROLNE MERITVE

Cilj geodetskih kontrolnih meritev je določitev premikov in deformacij merskega objekta. Kontrolne meritve vključujejo projektiranje, zakoličevanje, meritve, obdelavo podatkov in analizo rezultatov ter predstavljajo eno od področij inženirske geodezije. Najpogosteje so merski objekti v inženirski geodeziji grajeni objekti (jezovi, pregrade, mostovi in drugi prometni objekti, industrijske naprave) ter naravni pojavi kot so plazovi, ledeniki ali tektonske plošče. Osnovna naloga geodetskih kontrolnih meritev je spremljanje izbranih merskih točk objekta, s ciljem zaznavanja in napovedovanja premikov in deformacij. Na osnovi geodetskih kontrolnih meritev lahko opišemo geometrični odnos referenčnih in kontrolnih točk opazovanega objekta glede na izbrano izhodišče, v odvisnosti od časa. Spremembe se nanašajo tako na sam objekt kot tudi na odnose z njegovo okolico. Z geodetskimi postopki ugotavljamo stabilnost referenčnih točk in določamo značilne premike kontrolnih točk. Geodetske kontrolne meritve so potrebne vedno, kadar je pomembno poznavanje lastnosti objekta in geometričnih sprememb njegovih referenčnih točk. Z določitvijo premikov in deformacij pa je pomembna tudi določitev in upoštevanje vzrokov teh sprememb.

Cilji geodetskih kontrolnih meritev so:

- izkazovanje funkcionalnosti in stabilnosti objekta, zagotavljanje delovanja brez motenj in okvar,
- ugotavljanje skladnosti zgrajenega objekta s projektno dokumentacijo,
- kontrola izvajanja del med samo gradnjo objekta,
- pravočasno zaznavanje premikov v prostoru in deformacij na objektu ter s tem pravočasna odstranitev nevarnosti za objekt in njegovo okolico ali zmanjšanje le-teh,
- pojasnjevanje vzrokov poškodb in okvar, možnost napovedovanja domnevnih premikov in deformacij v prihodnosti in odnosov pri določenih obremenitvah,
- kontrola in preiskus lastnosti materialov in konstrukcije, s ciljem izboljšave mehaničnih modelov predstavitve objekta in njegovih lastnosti ter procesov,
- kontrola in preiskus objektov s ciljem pravočasnega odkrivanja pomankljivosti objekta in saniranja pred večjimi poškodbami; pravočasno definiranje pomankljivosti, napak in poškodb

pomeni poleg zagotavljanja varnosti tudi bistveno manjše stroške sanacije,

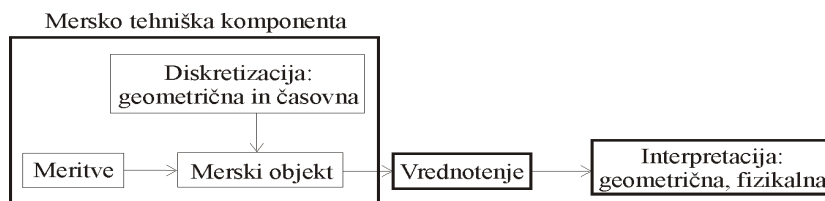
- dognanja, ki so uporabna pri planiranju, kontroli in sanaciji podobnih objektov.

Geodetske kontrolne meritve imajo torej preventivni pomen, predvsem v smislu spremljanja in vzdrževanja grajenih objektov in naprav, kakor tudi naravnih pojavov.

2.1 Vrednotenje kontrolnih meritev iz geodetskega vidika

Nadzor premikov in deformacij objekta zahteva, da objekt kot tudi proces spreminjanja predstavimo z ustreznim modelom. Zajem in določitev premikov in deformacij tako vključuje tri bistvene, med sabo povezane, komponente (slika 1):

- mersko-tehniška komponenta,
- tehnika vrednotenja,
- interpretacija.

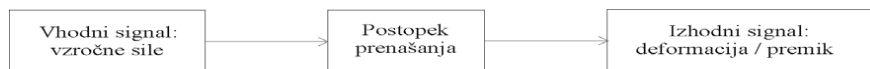


Slika 1: Postopek določitve premikov in deformacij objekta (Welsch et al., 2000)

Postopke izvajanja meritev, vrednotenja in interpretacije v procesu kontrolnih meritev je potrebno definirati skupaj z diskretizacijo merskega objekta v geometričnem in časovnem smislu. Geometrična diskretizacija merskega objekta pomeni izbiro in stabilizacijo določenega števila merskih točk objekta. V okviru časovne diskretizacije je potrebno določiti časovni interval meritev, v okviru katerega bo potek deformacije ali premika ustrezno registriran.

Zajem premikov in deformacij je rekurziven postopek - rekurziven v smislu vključitve predhodnih empiričnih in teoretičnih dognanj (število in položaj merskih točk, število ponovitev meritev, izbira ustreznega instrumentarija, ustreznega modela vrednotenja), ki so z vsako uporabo ponovno ovrednoteni in po potrebi izboljšani. Za vsak objekt posebej pa je potrebno določiti časovni interval meritev. Posebej pri objektih, za katere se predvidevajo večji premiki in deformacije in ogrožajo človeška življenja, je potrebno povečati frekvenco geodetskih kontrolnih meritev ali celo namestiti merske sisteme za kontinuirano spremljanje objekta. Pri tem je potrebno poudariti, da z geodetskimi kontrolnimi meritvami ni mogoče zajeti vseh sprememb objekta, ampak so samo del kontrolnega postopka, kjer so obravnavane skupaj z drugimi indikatorji sprememb (npr. geotehniške meritve z ekstenziometri, klinometri).

Časovni proces premikov in deformacij, ki ga spremljamo s kontrolnimi meritvami, zajema vzroke, njihov prenos na objekt in končne vplive. Govorimo o kavzalni verigi dinamičnega sistema (slika 2).



Slika 2: Kavzalna veriga dinamičnega sistema (Welsch, Heunecke, 2001)

Deformacijske procese lahko obravnavamo iz različnih vidikov glede na:

- časovni potek ločimo periodične in aperiodične deformacije,
- prostorske strukture oz. razširjanja deformacije (globalno, regionalno ali lokano) v eno-, dvo- ali tri-dimenzionalnem prostorskem modelu,
- vzročne naravne in antropogene sile,
- lastnosti materialov,
- vrste deformacij (togo gibanje telesa, premik, zvijanje, sprememba oblike, raztezanje, ukrivljanje, torzija) in
- način analize in vrednotenja.

Predmet prispevka je opis omenjenih deformacijskih modelov vrednotenja geodetskih kontrolnih meritev.

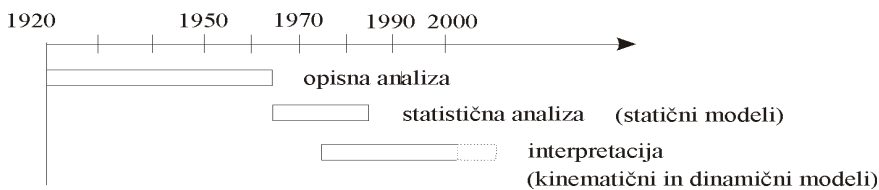
3 RAZVRSTITEV DEFORMACIJSKIH MODELOV

Deformacija ali premik objekta je posledica procesa. Današnja težnja v inženirstvu je opisati dinamiko procesa, torej poleg geometričnih sprememb objekta opisati fizikalne lastnosti objekta in sile, ki povzročajo spremembe. Najbolj splošen in vsestranski je dinamični model. Iz njega s poenostavitvami izhajajo statični, kinematični in kongruenčni (identitetni) model (tabela 1).

Klasični postopki obravnave deformacijskih procesov so v preteklosti temeljili na statičnih oz. kvazi-statičnih modelih. Razvoj računalništva ter razvoj novih merskih tehnik in algoritmov vrednotenja je v sredini 60-ih bistveno spremenil metodiko deformacijske analize. Poleg čisto osnovne določitve geometrijskega stanja je vključen časovni potek deformacij; razvili so se t.i. kinematični modeli. Naslednja stopnja deformacijske analize je vključitev obravnave vzrokov deformacij ter povezava med vzroki in učinki v dinamičnih modelih (slika 3).

Deformacijski model	Kongruenčni (identitetni) model	Kinematični model	Statični model	Dinamični model
Časovna komponenta	čas ni modeliran	premiki in deformacije so funkcija časa	čas ni modeliran	premiki in deformacije
Vzročne sile	vročne sile niso modelirane	vročne sile niso modelirane	premiki in deformacije so funkcija vzročnih sil	so funkcija časa in vzročnih sil
Stanje objekta	v ravnovesju	nenehno v gibanju	v času meritev v ravnovesju	nenehno v gibanju
	deskriptivni (opisni) modeli		kavzalni (vzročni) modeli	

Tabela 1: Razvrstitev deformacijskih modelov (Heunecke, Welsch, 2000)



Slika 3: Razvoj postopkov deformacijske analize (Güral, 1997)

Kongruenčni ali identitetni model spada med klasične geodetske pristope v deformacijski analizi. Model omogoča zgolj geometrijsko primerjavo med dvema stanjema objekta. Gre za ugotavljanje skladnosti geometrije obravnavanega objekta v različnih časovnih obdobjih. Edine vhodne količine modela so geodetska opazovanja, izhodne količine so koordinate značilnih točk objekta v izbranem časovnem trenutku. Vzroki sprememb in časovni odnos niso obravnavani.

Z identitetnim modelom bi lahko opisali dosadani pristop pri spremljanju premikov na pregradah hidroelektrarn. Na osnovi dolžinskih in kotnih meritev v izbranih časovnih razmikih (meritve se izvajajo dvakrat letno) so določeni položajni premiki referenčnih točk opazovanega objekta, z metodo geometričnega nivelmana pa so določeni višinski premiki. Podatek o času je podan zgolj opisno – kot približni časovni interval med posameznimi izmerami. Prav tako niso obravnavani vzroki morebitnih nastalih premikov in deformacij.

Statični model opiše funkcionalno zvezo med silami, ki delujejo na objekt, in geometričnimi spremembami točk objekta. Položaj opazovanih referenčnih točk objekta je med izvajanjem meritev obravnavan kot nespremenjen v izbranem koordinatnem sistemu. Premiki in deformacije so obravnavani zgolj kot posledica obremenitve / sil, ne pa tudi kot funkcija časa. Pri statičnih modelih je potrebno poznati geometrično in fizikalno strukturo objekta, parametre materiala in druge karakteristične količine, ki so vključene v diferencialne enačbe zvez med silami in deformacijami oziroma premiki.

Kot primer statičnega modela zajema procesa premikov in deformacij lahko podamo projekt spremljanja premikov umetne hribine na Žirovskem vrhu. Poleg geodetskih meritev premikov so se na hribini izvajale meritve še z drugimi geotehniškimi senzorji (inklinometri, piezometri, količina padavin ...), na osnovi katerih je mogoče določiti vzroke nastalih premikov. Čas je še vedno podan zgolj opisno in služi za izračun okvirnih vrednosti hitrosti premikov med dvema terminskima izmerama.

Kinematična obravnava koordinat točk poskuša opisati premikanje ali deformacijo s časovnimi funkcijami – spremembo koordinat, hitrostjo in pospeškom, brez upoštevanja vzročnih sil. Zajem gibanja točk omogočajo merski sistemi z visoko frekvenco meritev, ki z ustrezno programsko opremo izvajajo meritve samodejno.

Sodobni geodetski instrumenti omogočajo samodejno sledenje reflektorja in shranjevanje meritev. Zmogljivost je uporabna zlasti pri navigaciji delovnih strojev ali permanentnem sledenju referenčne točke za zajem premika ali deformacije. Pri kontinuiranem spremljanju premikajočega objekta (reflektorja) ni mogoče izvajati nadštevilnih meritev, zato so za pridobitev iskanih količin in natančnosti potrebni postopki filtriranja, kjer je časovna komponenta direktno vključena v model. Govorimo o kinematičnem modelu. Vzroki premikov in deformacij niso upoštevani.

V *dinamičnih modelih* so definirane povezave med vzroki deformacij in velikostmi deformacij v časovnem poteku. Dinamični modeli so najbolj splošni in vsestranski modeli, saj z njimi lahko popolnoma opišemo objekt, kakor tudi dinamični proces. Poleg prostorske in časovne komponente deformacij obravnavajo celotno verigo dinamičnega procesa, kar pomeni, da obravnavajo tudi sile, ki delujejo na telo ter geometrične in fizikalne lastnosti objekta. Dinamični model tako združuje lastnosti statičnega in kinematičnega modela. Sodobna tehnologija omogoča zajem vhodnih in izhodnih količin dinamičnega procesa, zmogljivi računalniki pa zahtevne izračune. Kot glavna težava se še vedno pojavlja ustrezna programska oprema, ki bi omogočala istočasno obdelavo raznovrstnih podatkov, zajetih z različnim merskim instrumentarijem.

V primeru, ko sta v model, poleg časovne obravnave premikov in deformacij, vključena tudi zajem in obravnava vzrokov nastalih sprememb, govorimo o dinamičnem modelu. Model je najbolj splošen in običajno zahteva interdisciplinaren pristop k obravnavi premikov in deformacij. Kot primer bi lahko navedli meritve v predoru Šentvid. Poleg geodetskih meritev spremljanja prostorskih premikov referenčnih in detajlnih točk so se v tunelu izvajale še geomehanske in geološke meritve. Na osnovi dodatnih meritev in spremljanja delovnih procesov pri gradnji predora je mogoče sklepati o vzrokih premikov in časovni odvisnosti. Natančen podatek o času je namreč dodaten atribut za vsako meritev posebej.

V identitetnem in kinematičnem modelu vzroki deformacij niso upoštevani, zato sta oba modela označena tudi kot opisna modela (tabela 1). Za vzročne modele - dinamični in statični model - je značilno, da so parametri, ki opisujejo merski objekt, posebej parametri materiala, določeni iz merjenih vrednosti vhodnih količin in deformacij. Tako je mogoče odkriti nepopolnosti med načrtovanim in dejanskim objektom.

Pri vseh merskih postopkih - geodetskih, geotehniških in gradbeniških - je objekt predstavljen s točkami, katerih premiki so definirani v času (tabela 2). Definiranje časovnega razmika med meritvami zavisi od merskega sistema in je bistvenega pomena. Poleg časovne komponente je izbira ustreznega deformacijskega modela odvisna od željenih rezultatov kontrolnih meritev:

- ali naj bo določena deformacija ali premik ene same točke objekta ali celotne strukture,
- ali naj bodo definirane spremembe samo med dvema časovnima trenutkoma ali nas zanima potek spremembe v nekem časovnem intervalu in
- ali naj bodo z vrednotenjem upoštevani tudi vzroki premikov in deformacij.

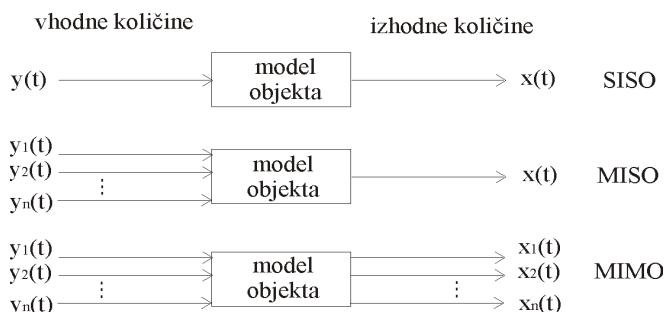
Vzpostavitev ustreznega fizikalno-matematičnega modela prenosa vhodnih količin preko objekta v izhodne količine je ključnega pomena za razlikovanje med pristopi modeliranja.

	realni / merski objekt	inženirsko-geodetski model
geometrijski obseg	objekt je opisan zvezno, kot kontinuum	objekt je predstavljen z izbranimi merskimi točkami
časovni obseg	objekt je pod vplivom stalnega spreminjanja	kontrolne meritve v točno določenih časovnih intervalih

Tabela 2: Inženirsko-geodetska zgradba modela: geodetsko modeliranje procesa deformacij v prostoru in času (Welsch, 2002)

Glede na število obravnavanih vhodnih in izhodnih količin ločimo sisteme in modele (slika 4):

- ena vhodna količina, ena izhodna količina (angl. SISO, Single Input – Single Output)
- več vhodnih količin, ena izhodna količina (angl. MISO, Multiple Input – Single Output)
- več vhodnih količin, več izhodnih količin (angl. MIMO, Multiple Input – Multiple Output).



Slika 4: Sistemi in modeli glede na število vhodnih in izhodnih količin (Welsch et. al, 2000)

4 METODE VREDNOTENJA

Pri izbiri ustreznega modela, s katerim bo opisan sistem, je potrebno izbrati tudi računski postopek za vrednotenje vhodnih in izhodnih količin sistema. Izbira ustrezne metode vrednotenja je ključnega pomena pri analizi kontrolnih meritev. V geodeziji se uporabljajo naslednje metode vrednotenja geodetskih meritev:

- postopki izravnave v Gauss-Markovem modelu po metodi najmanjših kvadratov,
- transformacije med točkami koordinatnih sistemov (podobnostna in afina transformacija),
- tehnike filtriranja (Kalmanov filter, kolokacija),
- regresijska analiza,
- analiza časovnih vrst (zlepki, aproksimacijski polinomi),
- metoda končnih elementov,
- primerjava koordinat in statistično vrednotenje rezultatov,
- umetne nevronske mreže.

Klasičen geodetski pristop je zapis opazovanj in neznan v identitetnem modelu, ki je predstavljen z Gauss-Markovim funkcionalnim modelom. V prvem koraku vrednotenja se preverja skladnost točk, za katere se predpostavlja, da se njihov položaj ni spremenil. Cilj tega postopka je, določiti referenčni okvir, na katerega se bodo navezovali vsi nadaljni izračuni. Čas ni sestavni del modela, ampak ima pomen zgolj v določitvi časovnega intervala med posameznimi merskimi serijami.

Kinematični model vključuje časovno komponento eksplicitno v model. Časovni potek gibanja ali deformacije je poleg spremembe koordinat opisan tudi s časovnimi parametri kot sta hitrost in pospešek, v model pa lahko vključimo še druge neznanke sistema kot so npr. časovne zakasnitve, parametri materiala, idr. Najosnovnejši pristop pri obravnavi zaporednih opazovanj je regresijska analiza. Drugi matematični postopki, ki se uporabljajo za vrednotenje vhodnih in izhodnih količin v kinematičnem modelu, so postopki filtriranja in analiza časovnih vrst.

Zapis ustreznega matematično-fizikalnega modela dinamičnega procesa imenujemo sistemsko

identifikacija (angl. *system identification*). Izvedba, kako je lahko vzpostavljen model prenosne funkcije, je odločilna za izbiro parametrične ali neparametrične identifikacije. V parametričnem modelu je fizikalni odnos oz. prenos vhodnih količin na izhodne količine poznan in je opisan z diferencialnimi enačbami. Parametri modela opisujejo dinamični proces iz fizikalnega vidika. Identifikacija sistema je izpeljana v t.i. beli škatli (angl. *white box model*). V neparametričnih modelih je fizikalna struktura sistema lahko opisana samo z regresijskimi in korelacijskimi koeficienti med vhodnimi in izhodnimi signali. Neparametrične modele imenujemo črna škatla (angl. *black box model*).

Statični model je poseben primer dinamičnega modela. Statični sistem obravnava premike in deformacije objekta med dvema ravnovesnima stanjema pri konstantni obremenitvi. Deformacija ali premik objekta, ki je izražen preko koordinat, je predstavljen kot funkcija vhodnih količin in sil, ki delujejo na objekt. Najpomembnejša matematična metoda za izračun statičnih modelov je metoda končnih elementov.

5 ZAKLJUČEK

V današnjem času pojem geodetske deformacijske analize pomeni vse bolj geodetsko analizo kinematičnih in dinamičnih procesov ter predstavlja interdisciplinarno področje, ki poleg geodetskih metod in tehnik vključuje sorodna področja kot so gradbeništvo, mehanika, kontrolno inženirstvo, filtriranje, obdelava in analiza signala ter sistemska teorija.

Tehnološki razvoj merskih instrumentov je poleg večje natančnosti zajema merskih vrednosti omogočil avtomatizacijo merskih postopkov, prenosa podatkov na zunanje pomnilne enote ter zajem diskretnih merskih vrednosti v krajših časovnih ponovitvah. Vzporedno z razvojem merskih sistemov in instrumentarija se je pojavila potreba po razvoju matematičnih modelov vrednotenja opazovanj in iskanih količin, ki omogočajo upoštevanje časovne komponente ter modeliranje kavzalnih odnosov med vzročnimi silami in posledicami tudi pri hitrih deformacijah. Pri tem so posebnega pomena dinamični in kinematični deformacijski modeli kot teoretična osnova vrednotenja avtomatiziranih meritev.

Literatura in viri:

- Gülal, E. (1997). *Geodätische Überwachung einer Talsperre - Eine Anwendung der KALMAN-Filtertechnik. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover.*
- Heuncke, O., Welsch, W. (2000). *Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys. Journal of Geospatial Engineering, Vol.2, No.1, pp.35-44.*
- Welsch, W.M., (2002): *Zur Entwicklung geodätischer Überwachungsmessungen - Deformationsmodelle gestern, heute und morgen. Geodäsie im Wandel - Einhundertfünfzig Jahre Geodätisches Institut. Schriftenreihe des Geodätischen Instituts. Technische Universität Dresden.*
- Welsch, W., M., Heuncke, O. (2001). *Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations, Official Report of the Ad-Hoc Committee FIG Working Group 6.1.*
- Welsch, W., Heuncke, O., Kuhlmann, H. (2000). *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.*

asist. Sonja Bogatin, univ. dipl. inž. geod., inž. mat.
FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana
E-pošta: sbogatin@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.
FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana
E-pošta: dkogoj@fgg.uni-lj.si

Prispelo v objavo: 6. marec 2006
Sprejeto: 23. maj 2006