

Potres 12. aprila 1998 v zgornjem Posočju
**ODSEV VELIKIH HRIBINSKIH PODOROV V DIGITALNEM
MODELU RELIEFA**

The earthquake on April 12, 1998 in the upper Soča Territory
**EVIDENCE (REFLECTION) OF MASSIVE ROCKFALLS IN
DIGITAL ELEVATION MODELS**

Andrej Gosar*

Izvleček. S primerjavo dveh digitalnih modelov reliefa (DMR) za čas pred (DMR 100) in po potresu (DMR 25) smo ocenili prostornino dveh večjih hribinskih podorov v zgornjem Posočju. Nov 25-metrski DMR je bil izdelan na podlagi cikličnega aerosnemanja julija 1998 (3 mesece po potresu). Za enega najbolj spektakularnih podorov celotnega jugovzhodnega ostenja Osojnice nad dolino Tolminke smo ocenili prostornino 3 milijone m³. Verjetno največji pa je bil podor v severni in zahodni steni Velikega Lemeža nad zatrepom Lepene s prostornino, ocenjeno na 15 milijonov m³. Nekatere sistematčne napake in nizka ločljivost DMR 100 so ponekod zmanjšale natančnost analize ali pa celo onemogočile izračun prostornine podora. Preliminarna analiza možne odvisnosti pojava podorov od usmerjenosti pobočij ni pokazala kakšne korelacije. V članku so opisane tudi druge možnosti uporabe visokoločljivega DMR v raziskavah potresnih območij.

Abstract. By comparison of two digital elevation models (DEM) of the terrain before (DEM 100) and after the earthquake (DEM 25) the volume of two larger massive rockfalls in Krn mountains were estimated. The new 25 m DEM is based on cyclic aerial photogrammetry survey performed in July 1998 (3 months after the earthquake). For the one of most spectacular massive rockfall of complete south-east wall of Osojnica mountain above the Tolminka valley, the volume of fallen rock of 3×10^6 m³ was estimated. The largest was perhaps the rockfall in north and west walls of Veliki Lemež above the Lepena valley with the estimated volume of 15×10^6 m³. Some systematic errors and low resolution of DEM 100 reduced the accuracy of analysis in some areas or even precluded estimation of rockfall volume. Preliminary analysis of a possible relation between the appearance of rockfalls and the aspect of the terrain didn't show any correlation. Other possible applications of high-resolution DEM in studies of an earthquake region are also described in the article.

Digitalni modeli reliefa v Sloveniji

Digitalni model reliefa (DMR) je postal eno osnovnih in nepogrešljivih orodij pri analizi različnih prostorskih podatkov. Diskretni podatki o nadmorski višini so pri DMR navadno zapisani v pravilni mreži (grid) različnih gostot. Včasih pa se uporablja tudi nepravilno razporejene podatke, kjer točke sledijo na primer plastnicam.

V Sloveniji so prvi DMR z ločljivostjo 500 m, ki je še zelo omejevala njegovo večjo uporabnost, izdelali že leta 1975. Sledil je DMR 100 z ločljivostjo 100 m, izdelan leta 1984 in izboljšan v letih 1995 in 1997, ki je že omogočal resnejše analize, čeprav tudi v zadnji verziji še niso odpravljene vse napake. Podatki so bili zajeti z ročno digitalizacijo presečišč plastnic s pravilno koordinatno mrežo oziroma s pomočjo

* Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za geofiziko, Pot na Golovec 25, Ljubljana

interpolacije vrednosti med posameznimi plastnicami. Ocenjen je 10-metrski srednji pogrešek višin (GURS, 1998).

V zadnjih letih Geodetska uprava RS skupaj s partnerji izdeluje DMR 25 z ločljivostjo 25 m. Do sedaj je z njim pokrito približno 30 odstotkov Slovenije (Podobnikar, 1999). DMR 25 se izdeluje fotogrametrično iz aeroposnetkov (digitalni ortofoto) v postopku izdelave temeljnih topografskih načrtov merila 1 : 5.000. Osnova so posnetki cikličnega aerosnemanja Slovenije. Natančnost je deklarirana s srednjim pogreškom 2 m (GURS, 1998).

Poleg topografskih kart različnih meril in digitalnega ortofota predstavljajo novejši vir podatkov (za Evropo od začetka devetdesetih let) za izdelavo DMR radarski satelitski posnetki. Natančnost, ki jo dosežemo z radarsko interferometrijo, je približno deset metrov v vodoravni smeri in nekaj metrov v navpični smeri. Še bolj zanimiva je diferencialna metoda, pri kateri lahko s primerjanjem različnih posnetkov opazujemo majhne relativne premike tal ali druge časovno odvisne spremembe na površju z natančnostjo nekaj centimetrov. (Oštir, 1998). Radarska interferometrija se v Sloveniji še ne uporablja sistematično za izdelavo DMR, uporablja pa se v okviru nekaterih mednarodnih raziskovalnih projektov.

Uporaba DMR v raziskavah potresnih območij

Visokoločljivi DMR-ji so se uveljavili tudi v geoloških analizah na območjih z aktivno tektoniko ali neotektoniko, s čimer označujemo tektonsko aktivnost v najmlajši geološki dobi – kvartarju. Geomorfološko se namreč aktivni prelom kaže v zmikih različnih linijskih pojavov v naravi, kot so reke, grebeni, rečne terase, morene ali enakomerna pobočja (Audia et al., 1998). Dokaz za močnejše potrese v bližnji geološki preteklosti so lahko tudi paleopodori ali paleoplazovi, ki prav tako predstavljajo geomorfološko posebnost v okolju. Vsi našteti pojavi se preučujejo s pomočjo topografskih kart različnih meril, z geološkim in geomorfološkim kartiranjem na terenu ter z analizo aeroposnetkov. DMR je odprl nove možnosti, ker omogoča različne matematične transformacije (digitalnih) podatkov, s katerimi okrepimo željeno informacijo.

Satelitska metoda radarske interferometrije s sintetično odprtino (synthetic aperture radar – SAR) pa ponuja še možnost študija časovno odvisnih sprememb na Zemljinem površju, kot so premiki ob prelomih, ki spremljajo močnejše potrese. Satelit ERS (European Remote Sensing) posname namreč isto območje površja vsakih 35 dni. Površina enega posnetka je okoli 100 x 100 km. Poleg običajnih podatkov o odboju radarskih valov se pri SAR-metodi uporablja tudi njihova faza. Ena od večjih pomanjkljivosti te metode pri uporabi v hribovitih območjih so nepokrite »sence« zaradi poševnega kota snemanja.

Kmalu po uvedbi SAR-metode so se domislili, da bi z njo lahko opazovali koseizmične premike ob močnejših potresih. Večina klasičnih geodetskih metod namreč zahteva vzpostavitev ustrezne merske mreže že pred samim potresom, medtem ko SAR omogoča poznejšo analizo. S primerjavo SAR-posnetkov, narejenih pred in po potresu 28. junija 1992 v Landersu (Kalifornija) z magnitudo $M_w=7,3$, so z diferencialno metodo dobili koseizmični premik med 3 in 6 m na različnih odsekih preloma, kar se ujema s klasičnimi geodetskimi meritvami in geološkimi opazovanji (Massonnet et al., 1993).

Zadnja možnost uporabe DMR (in seveda tudi SAR) na potresnih območjih je, v primeru velikih hribinskih podorov ali plazov, v analizi odvisnosti teh pojavov od smeri in vpada pobočij ter za ocenjevanje površine in prostornine kamnine, ki je v njih udeležena. Takšna analiza zahteva dva modela reliefa, in sicer za čas pred in po potresu.

Analiza DMR po potresu v zgornjem Posočju

Ena od značilnosti potresa z nadžariščem v zgornjem Posočju, ki je 12. aprila 1998 prizadel zgornje Posočje, so obsežne poškodbe v naravi, predvsem v obliki velikih hribinskih podorov v visokogorju (Vidrih in Ribičič, 1999). Po naključju je bilo širše območje že pred potresom predvideno za ciklično aerosnemanje v poletnih mesecih leta 1998. Dejansko je bilo aerosnemanje potem res izvedeno v juliju 1998, približno tri mesece po potresu. Stereo pari aeroposnetkov, ki smo jih pridobili od GURS, so bili zato dragocen vir podatkov za fotogeološko analizo, pri kateri smo uporabili tudi starejše posnetke iz leta 1995 (Poljak, 1998). GURS in Geodetski zavod Slovenije sta posnetke fotogrametrično obdelala v okviru izdelave TTN 1:5.000. Produkt digitalne ortofoto obdelave je tudi DMR 25, ki je bil za to območje na voljo uporabnikom že konec leta 1998.

Novi DMR 25 smo se odločili uporabiti tudi pri geološki analizi potresnega območja. V prvi fazi smo želeli preveriti predvsem možnost njegove uporabe: (a) pri oceni obsežnosti sprememb v reliefu zaradi velikih hribinskih podorov in (b) pri analizi odvisnosti pojava podorov od usmerjenosti in vpada pobočij. V nadaljnjih raziskavah načrtujemo še podrobnejšo analizo geomorfoloških pojavov. Ko bo celotno območje idrijskega preloma in nekaterih močnejših vzporednih prelomov pokrito z DMR 25, načrtujemo tudi analizo, ki bi lahko prispevala k pojasnitvi neotektonske aktivnosti v Zunanjih Dinaridih in na njihovem stiku z alpskimi strukturami.

Zaenkrat ni dokazov o koseizmičnem premiku na Zemljinem površju ob potresu 12. aprila 1998. Spričo relativno velike globine žarišča (približno 10 km), je pri dani magnitudi potresa ($M_{WA}=5,8$) povsem mogoče, da do trajnega premika na površju sploh ni prišlo. Ne pričakuje se tudi, da bi bile lahko uspešne geološke metode

dokazovanja koseizmičnega premika (pretrga), ker je površje za to zelo neprimerno (močno zakraseli visokogorski podi). Dodati velja, da v Sloveniji zaenkrat še ni bil dokazan koseizmični premik ob kakšnem potresu. Gre za pojav, ki je v Evropi značilen predvsem za močne potrese v Grčiji, Turčiji ter srednji in južni Italiji.

Na območju zahodne Slovenije, Furlanije in avstrijske Koroške so bile v letu 1995 in v avgustu 1998 opravljene geodetske GPS–meritve, ki kažejo na določene horizontalne premike ozemlja v vmesnem obdobju (Mišković et al., 1998), vendar interpretacija, ki bi kazala na nedvoumno povezavo s tem potresom, še ni mogoča. Zelo koristno bi bilo opraviti analize satelitskih posnetkov z diferencialno metodo radarske interferometrije, čeprav bi zaradi razgibanega visokogorskega reliefa naleteli na že omenjene omejitve te metode.

Odsev velikih hribinskih podorov v DMR

Oba novejša digitalna modela reliefa (DMR 100 – zadnja revizija iz leta 1997 in DMR 25) smo uporabili za prikaz reliefa zgornjega Posočja s senčenjem pri položaju »sonca« na severozahodu, na višini 45° nad obzorjem. Razlika v ločljivosti DMR 100 (slika 1) in DMR 25 (slika 2) je zelo jasna. Poleg tega se pri DMR 100 vidijo nekatere sistematične napake v obliki pasov v vodoravni in navpični smeri:

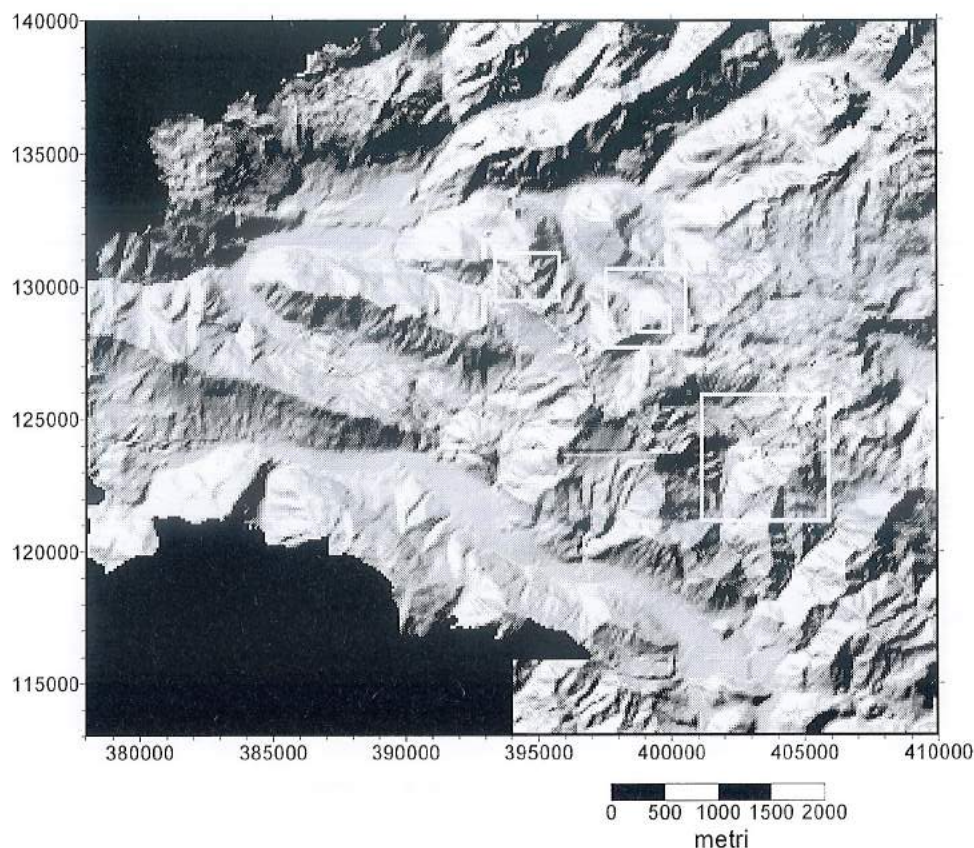
- vodoravno pri $Y = 124.000$ (prek južnega pobočja Krna),
- vertikalno, več pasov med $X = 392.000$ in $X = 395.000$.

Pri DMR 25 (slika 2) podobnih sistematičnih napak nismo opazili. Vse koordinate v članku so Gauss-Krügerjeve in zapisane brez prve cifre 5. Za analize in izris slik smo uporabili program Surfer 6.0 (Golden Software).

Za preučevanje odseva velikih hribinskih podorov v DMR smo izbrali tri območja (sliki 1 in 2), kjer so bili ti pojavi najboljšejši (Vidrih in Ribičič, 1999), in sicer:

- a) Osojnico nad dolino Tolminke,
- b) Veliki Lemež nad zatrepom Lepene,
- c) koto 1776 m med Vršičem in Lipnikom.

Iz DMR 100 (relief pred potresom) in DMR 25 (relief po potresu) smo izpisali območja, označena na slikah 1 in 2, velikosti $2 \times 1,5$ km (kota 1776 m), $2,5 \times 2,5$ km (V. Lemež) in 4×4 km (Osojnica). DMR 25 smo nato prevzorčili na gostoto mreže 100 m, ki je omogočila direktno primerjavo z DMR 100, ter izračunali razliko med obema mrežama. Relief pred in po potresu smo izrisali v perspektivi s pogledom iz različnih smeri in višin ter kot konturno karto (izohipse), s katero smo prikazali tudi razliko med obema površinama (karta debelin ali izopah) (sliki 3 in 4).



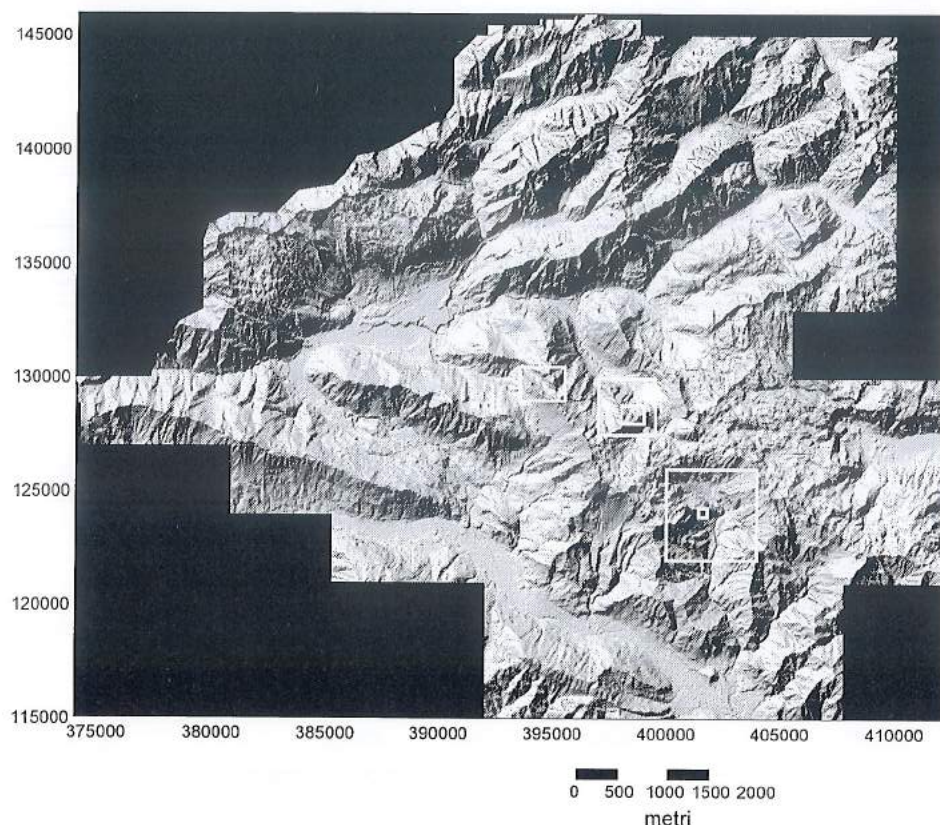
Slika 1: Digitalni model reliefa zgornjega Posočja z gostoto 100 m (DMR 100). Senčenje s položajem »sonca« na severozahodu, 45° nad obzorjem. Označena so območja raziskav hribinskih podorov, in sicer od leve proti desni (kota 1776 m, V. Lemež, Osojnica).

Fig. 1. Digital elevation model of upper Soča Territory with 100 m density (DEM 100). For shading the northwest position of »sun« was used at 45° above the horizon. Indicated are areas of massive rockfalls investigations, from left to right (kota 1776 m, V. Lemež, Osojnica).

Pri podrobni analizi so se pokazale nekatere napake v starejšem DMR 100. Prek območja kote 1776 m poteka eden od že omenjenih pasov s sistematično napako v višini, kar je onemogočilo izračun prostornine tega sicer zelo velikega hribinskega podora. Več napak je tudi v reliefu doline Tolminke, vendar na srečo ne na sami Osojnici, ki je označena kot manjši kvadrateg (400 x 400 m) na slikah 1 in 2 ter na sliki 3.

Podor na Osojnici

Osojnica (1313 m) je zgrajena iz močno razpokanega in zakraselega zgornjetriasnega apnenca. Močno zakraselost dokazuje eden večjih jamskih sistemov v Sloveniji, ki je nastal v njej – 704 m globoka in 11 km dolga Pološka jama. Jama ima dva vhoda, prvega v vznožju jugovzhodnega ostenja in drugega na vrhu Osojnice pri planini Lašca. Po srečnem naključju je spodnji vhod kljub podoru celotnega ostenja nad njim ostal prehodan. Jamarji, ki so obiskali jamo po potresu, so poročali o prevrnjenih skalnih blokih v vhodnih delih jame, medtem ko dlje v notranjost gore ni bilo vidnih večjih poškodb.



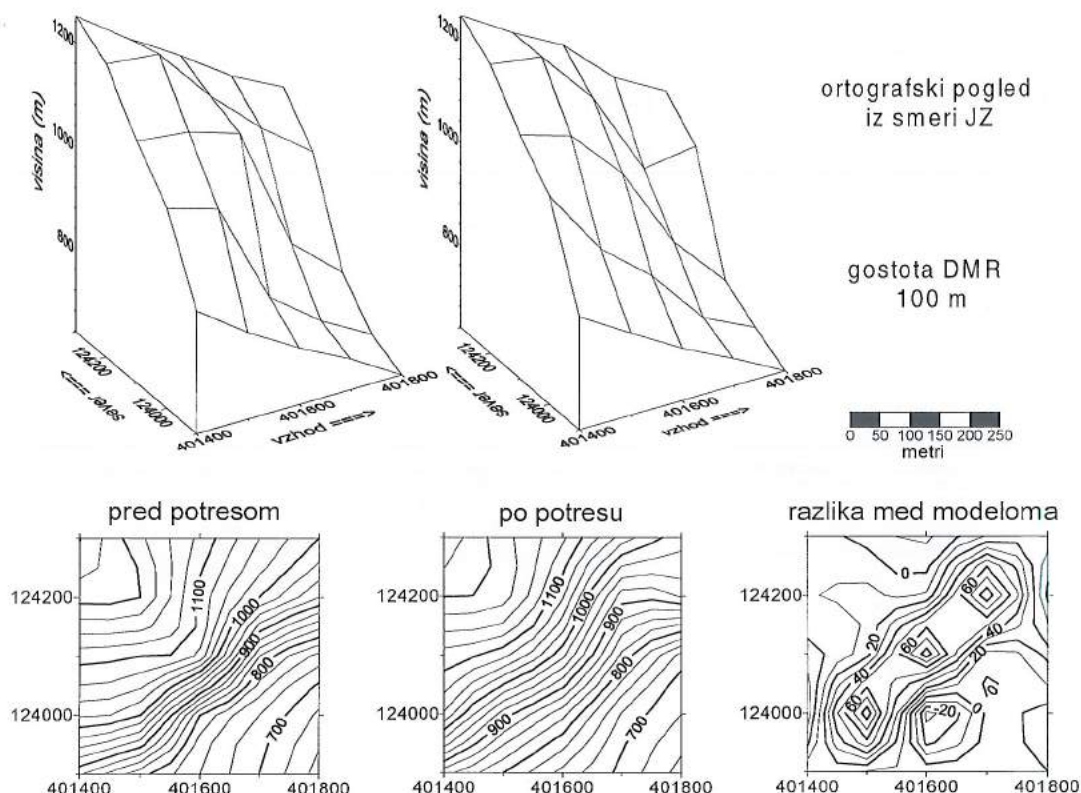
Slika 2: Digitalni model reliefa zgornjega Posočja z gostoto 25 m (DMR 25). Senčenje s položajem »sonca« na severozahodu, 45° nad obzorjem.

Območja raziskav so označena enako kot na sliki 1.

Fig. 2. Digital elevation model of upper Soča Territory with 25 m density (DEM 25). For shading the northwest position of »sun« was used at 45° above the horizon. Investigated areas are indicated as in Fig. 1.

Osojnica leži približno 8 km jugovzhodno od nadžarišča potresa v bližini ravskega preloma, ki domnevno predstavlja seizmogeno strukturo in poteka mimo izvirov Tolminke. Tako obsežen podor celotnega jugovzhodnega ostenja je bil zaradi razmeroma majhne nadmorske višine in pokritosti z gozdom manj pričakovan. Zato pa je bil pogled na Osojnico po potresu med njegovimi najbolj dramatičnimi učinki, saj se je spremenila celotna podoba doline Tolminke. Kjer je bilo prej strmo, delno poraščeno, delno skalno pobočje, zijajo sedaj gole stene. V vznožju pa je podor v celoti uničil gozd prav do poti v dolini, posamezne skale pa so se privalile do same struge Tolminke. Inženirskogeološko analizo podora na Osojnici je izdelal Benedik (1999).

Podor se jasno kaže na DMR (slika 3), čeprav je stometrška gostota mreže očitno preredka za prikaz njegovih podrobnosti. Na karti razlike obeh modelov je največja debelina manjkajoče kamnine okoli 80 m, zaprto območje izopahe 20 m pa je veliko približno 450 x 150 m. Iz karte razlik smo z uporabo trapezoidalnega pravila ocenili prostornino manjkajoče kamnine na $3 \times 10^6 \text{ m}^3$, ki ustreza 38 m debeli plošči, veliki 400 x 200 m. Ocenjen primanjkljaj kamnine zaradi podora ni v celoti kompenziran



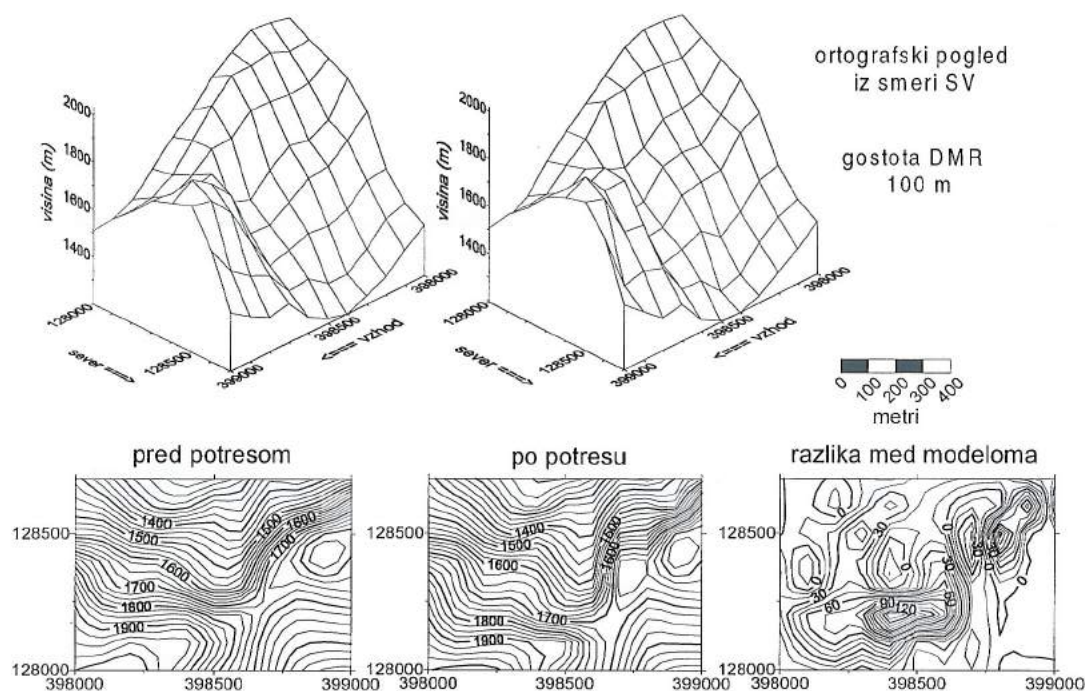
Slika 3: DMR Osojnice pred in po potresu, prikazan v perspektivi in s konturami, ter karta razlik med modeloma.

Fig. 3. DEM of Osojnica mountain showing pre and post-earthquake relief in perspective and as contours together with the map of differences between the models.

kot njen višek v vznožju gore, kjer je nastalo veliko melišče. Površina nasutega dela je mnogo večja od površine podrtega dela, kar skupaj z omejeno natančnostjo DMR lahko pojasni nesoglasje. Na natančnost DMR pred potresom je lahko vplivala tudi višina dreves v gozdu, ki je bil s podorom uničen. Ker mi način korekcij za višino dreves pri izdelavi DMR ni znan, je to lahko le domneva.

Podor na Velikem Lemežu

Verjetno največji hribinski podor je nastal na severni in zahodni steni Velikega Lemeža (2035 m) nad zatrepom Lepene. Odlom je nastal na samem vršnem grebenu, skalne mase pa so po številnih odbojih dosegle dno doline na višini okoli 700 m. Mešanica skal in snega, ki je padala in drsela s take višine, je povzročila močan zračni piš, ki je v gozdu v vznožju podrl drevesa v dveh koridorjih širine okoli 20 m in dolžine več sto metrov. Zračni piš, ki je sledil strugi Lepenice, je dosegel okoli 150 m dolg travnik in na drugi strani za 1 m prestavil leseno lopo, ki je stala na kamnitem podstavku (Vidrih in Ribičič, 1999). Veliki Lemež loči od sosednje Grive sedlo Čez potoče, prek katerega domnevno poteka raven prelom. Za prikaz reliefa (slika 4) in



Slika 4: DMR Velikega Lemeža pred in po potresu, prikazan v perspektivi in s konturami, ter karta razlik med modeloma.

Fig. 4. DEM of Veliki Lemež showing pre and post-earthquake relief in perspective and as contours together with the map of differences between the models.

izračun prostornine podora smo uporabili območje velikosti 1000 x 700 m (manjši pravokotnik na slikah 1 in 2). Iz karte razlik med DMR pred in po potresu, se vidi, da je podor manj pravilne oblike kot na Osojnici (potek izopahe 30 m na sliki 4). Največja debelina manjkajoče kamnine je okoli 160 m. Območje, kamor se je podorni material odložil, je zelo obsežno in ni več zajeto na sliki 4. Z uporabo trapezoidalnega pravila smo ocenili prostornino manjkajoče kamnine na $15 \times 10^6 \text{ m}^3$, kar ustreza 68 m debeli plošči velikosti 500 x 500 m. Izključiti ne moremo tudi morebitnih napak v enem od obeh uporabljenih DMR, še posebej, če se zavedamo, da je njihova natančnost pri zelo strmih pobočjih lahko slabša od deklarirane.

Odvisnost pojava podorov od usmerjenosti pobočij in vpada

Digitalni model reliefa zgornjega Posočja smo uporabili tudi za analizo odvisnosti pojava podorov od usmerjenosti in vpada pobočij (Gosar in Zupančič, 1999). Pri tem smo uporabili del podatkov o podorih, ki so jih zbrali na Geoinženiringu ter na Geološkem zavodu Slovenije. Del podatkov za visokogorje pa je bil pridobljen z analizo aeroposnetkov (Poljak, 1998). Preliminarne raziskave niso pokazale kakšne sistematike odvisnosti pojava podorov od usmerjenosti pobočij, večina podorov pa je pričakovano nastala na najbolj strmih pobočjih (več kot 60°). Pri usmerjenosti pobočij bi bila možna hipoteza, da je pojav podorov odvisen od smeri premika, torej bi imeli na obeh krilih preloma različno prevladujočo usmerjenost. Ker pa je bilo žarišče

potresa razmeroma globoko (približno 10 km), je verjetnost takega vpliva v zgornjem Posočju zelo majhna. Vzroke za pojav podorov je tako potrebno iskati predvsem v večji labilnosti kamnine na nekaterih območjih. Karta podorov sicer pokaže razpotečenost v smeri severozahod-jugovzhod, vzporedno s smerjo struktur. Zanimivo pa je, da segajo podori od nadžarišča mnogo dlje v smeri proti severozahodu (Trenta in dolina Koritnice) kot pa proti jugovzhodu, kjer jih je jugovzhodno od doline Tolminke bistveno manj.

Sklep

Zanimivo je primerjati podore v zgornjem Posočju s podobnimi pojavi ob večjih potresih v preteklosti, ki pa so v literaturi razmeroma skopo opisani. Nekaj podatkov o podorih in plazovih ob zgodovinskih potresih v Sloveniji in sosednjih pokrajinah sta zbrala Vidrih in Ribičič (1994). Najbolj znan je podor v dolžini 5 km z južnega pobočja Dobrača, ki je nastal ob potresu leta 1348 pri Beljaku (ocenjena magnituda med 6,4 in 6,6). Podor je pod seboj pokopal 17 vasi in zajezil reko Ziljo pri vasi Schutt. Višina nasutja, ki je zajezilo Ziljo, je dosegla 30 m. Za njo je nastalo jezero, ki je odtekalo več stoletij (Vidrih in Ribičič, 1994). Po Ambraseysu (1976) je bila prostornina podornega materiala 1 milijarda m^3 (1 km^3), kar je 300-krat več kot na Osojnici ali 70-krat več kot na Velikem Lemežu.

Literatura

- Ambraseys, N.N. 1976. The Gemona di Friuli earthquake of 6 May 1976, part II. Italy – promotion of the study of natural hazards of geophysical origin, Unesco, Paris.
- Audia, A., Costa, G., Suhadolc, P. 1998. GIS for earthquake hazards mitigation in the Friuli area (NE Italy). In: Brebbia, C.A., Pascolo, P. (eds.), GIS technologies and their environmental applications, 131-143, Computational Mechanics Publications, Southampton.
- Benedik, A. 1999. Analiza hribinskih podorov na območju Osojnice. Diplomsko delo, NTF – Univerza v Ljubljani, 83. str.
- Gosar, A., Zupančič, P., 1999. Effects of 12 April 1998 Krn, Slovenia, earthquake ($M_{WA}=5.8$) on natural surroundings and their intensity-related distribution. IUGG 99, Book of abstracts, P.189, Birmingham.
- GURS, 1999. Državna geodezija. MOP, Geodetska uprava Republike Slovenije.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabante, T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. Nature, 364, 138-142.

- Mišković, D., Pesec, P., Stangl, G. 1998. GPS re-measurements in the Bovec-Tolmin earthquake region. Second International symposium »Geodynamics of Alps-Adria by means of terrestrial and satellite methods«, 10 pp., Dubrovnik.
- Oštir, K. 1998. Izdelava modela višin z radarsko interferometrijo. V: Krevs, M., Perko, D., Podobnikar, T., Stančič, Z. (uredniki), geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1997-1998, 243-252.
- Podobnikar, T. 1999. Le z natančnim DMR moremo izvajati učinkovite prostorske analize. Delo-priloga Znanost, 27.10.1999.
- Poljak, M. 1998. Analiza letalskih posnetkov Bovškega potresnega območja. Neobjavljeno poročilo, arhiv URSG.
- Vidrih, R., Ribičič, M. 1994. Vpliv potresov na nastanek plazov v Sloveniji. Prvo slovensko posvetovanje o zemeljskih plazovih, 33-46, Idrija.
- Vidrih, R., Ribičič, M. 1999. Porušitve naravnega ravnotežja v hribinah ob potresu v Posočju 12. aprila 1988 in Evropska makroseizmična lestvica. Geologija, 41, 365-410.