

VSESTRANSKA UPORABA AERO-LASERSKEGA SKENIRANJA ZA UGOTAVLJANJE NEVARNOSTI ZARADI NARAVNIH NESREČ NA OBMOČJU ALP

Tomaž PODOBNIKAR^{a), b), c)}, Balázs SZÉKELY^{b), d)}, Markus HOLLAUS^{b)}, Andreas RONCAT^{b)}, Peter DORNINGER^{b)}, Christian BRIESE^{b)}, Thomas MELZER^{b)}, Carsten PATHE^{b)}, Bernhard HÖFLE^{b)} in Norbert PFEIFER^{b)}

^{a)} Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Novi trg 2, 1000 Ljubljana, e-pošta: tp@zrc-sazu.si

^{b)} Tehniška univerza na Dunaju, Inštitut za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Dunaj, Avstrija, e-pošta: {tp,bs,mh,ar,pdo,cb,tm,cp,bh,np}@ipf.tuwien.ac.at

^{c)} Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju, Vipavska 13, 5000 Nova Gorica

^{d)} Univerza Eötvös, Oddelek za geofiziko in vesoljske znanosti, Pázmány P. sétány 1/C, H-1117 Budimpešta, Madžarska

IZVLEČEK

V gorskem svetu so antropogene strukture občutljive na geološke, geomorfološke, hidrološke ali izjemne vremenske pojave. Ocena potencialne škode je pomembna za načrtovanje protiukrepov. Pri modeliranju možnih scenarijev nesreč potrebujemo poleg podatkov o ranljivih antropogenih strukturah tudi prostorske topografske podatke. Aero-lasersko skeniranje (ALS) je osnovno orodje, ki omogoča pridobivanje podrobnih podatkov o premikih gmot, eroziji in podobnih pojavih, z vertikalno natančnostjo 10 cm. Z naprednim (pol)samodejnim procesiranjem pridobivamo podatke o topografiji, višini gozda, obliki stavb, daljnovodih itd. Pridobljeni rezultati so kombinirani z dodatnimi podatki za oceno potencialne škode (npr. funkcija in vrednost stavb). Dobljene informacije ter modele določenega tipa nesreče (npr. sprožitev snežnega plaz) integriramo v preliminarnem (brez preverjanja z referenčnimi podatki) funkcionalnem objektnem modelu za oceno potencialne škode, ki temelji predvsem na uporabi aplikacij ALS.

Ključne besede: nevarnost pred naravnimi nesrečami, Alpe, aero-lasersko skeniranje, DMR, funkcionalno objektno modeliranje

Comprehensive Utilization of Airborne laser Scanning in Natural Hazard Studies in Alpine Areas

ABSTRACT

Man-made structures in mountainous areas are prone to hazards related to geological, geomorphic, hydrological or extreme weather phenomena. The estimation of potential damage is important to plan countermeasures. Beside of the data on vulnerable man-made structures, spatial data are needed on the topography to model the possible disaster scenarios. Airborne Laser Scanning (ALS) is an ultimate tool for elevation data acquisition with 10 cm accuracy and high data density to monitor the mass movements, erosion and related phenomena. With sophisticated (semi)automated processing the topography, forest height, shape of buildings, power lines can be extracted. These results are combined with auxiliary data (function and value of buildings) to estimate the potential damage. The functional object modelling integrates the derived data with the models of specific disaster types (e.g. avalanches) to assess the potential damage.

Key words: natural hazard, Alpine area, airborne laser scanning, DTM, functional object modelling

1 UVOD

Velik del bivalnih območij, javnih, trgovskih in industrijskih objektov ter infrastrukture na območju Alp ogrožajo naravne nevarnosti, npr. močne padavine, potresi, poplave, hudourniški izbruhi, zemeljski plazovi, drobirski tokovi, skalni podori ali snežni plazovi. Poleg ocene potencialne škode, ki je pomembna za zavarovalnine in sklade družbene pomoči, so izjemno pomembni podatki o izpostavljenosti nevarnostim, ki omogočajo vzpostavitev sistemov za zaščito in obveščanje.

Za analizo naravnega okolja, pojavov in procesov je pomembna razpoložljivost kakovostnih prostorskih podatkov. Za območje Alp so uporabni različni podatki, kot so pokrovnost, geološki in podnebni podatki, sociološki parametri ipd. Za naš prispevek so še posebej pomembni digitalni topografski podatki (Geist in ostali 2010). Izpostaviti velja analize mikromorfoloških struktur ali hrapavosti terena, izdelavo natančnega modela površinskega drenažnega sistema, erozijskega modela (Podobnikar in ostali 1998), sloja vegetacije – posebej gozdov, geološkega sloja, podatkov o rabi ter vlažnosti tal itd. Te analize omogočajo izdelavo in pridobivanje informacij o pretokih voda, stabilnosti pobočij, izpostavljenosti snežnim plazovom ipd. Po drugi strani potrebujemo informacije o antropogenih strukturah in s tem podatke o položaju in orientaciji stavb, poteku cestne in železniške mreže, daljnovodov itd.

Integracijo različnih podatkov in informacij o naravnih in antropogenih strukturah lahko izvajamo z različnimi tehnikami. Tradicionalno so bili takšni podatki zajeti s terestričnimi geodetskimi meritvami.

Danes relativno hitro in poceni zajemamo podatke s tehnikami aerofotogrametrije in satelitskega daljinskega zaznavanja, ki so ponavadi edina možnost za pridobivanje podatkov na težko dostopnih območjih Alp (Oštir in ostali 2003). Aero-lasersko skeniranje (ALS) kot aktivna tehnika snemanja omogoča pridobivanje natančnih 3D-informacij in hkrati veliko število drugih geometričnih ter atributnih informacij o naravnih in antropogenih strukturah ter objektih. Vse navedene metode zajema podatkov so podprte s tehnikami in modeli za obdelavo ALS.

V prispevku se osredotočamo na (pol)samodejne metode zajema podatkov in predvsem na tehnike pridobivanja vsestranskih informacij iz ALS za potrebe študij navarnosti zaradi naravnih nesreč.

Izbrani študijski območji (slika 1) sta: Zgornjesavska dolina – Sava Dolinka (dimenzije 39 km krat 15 km) ter Montafon (Predarlberško, Avstrija; dimenzije 7 km krat 5 km). Podatki ALS so bili zajeti iz helikopterjev in letal.



Slika 1: Študijsko območje Zgornjesavske doline in Montafona.

2 PODATKI ALS IN FUNKCIONALNI OBJEKTNI MODEL (FOM)

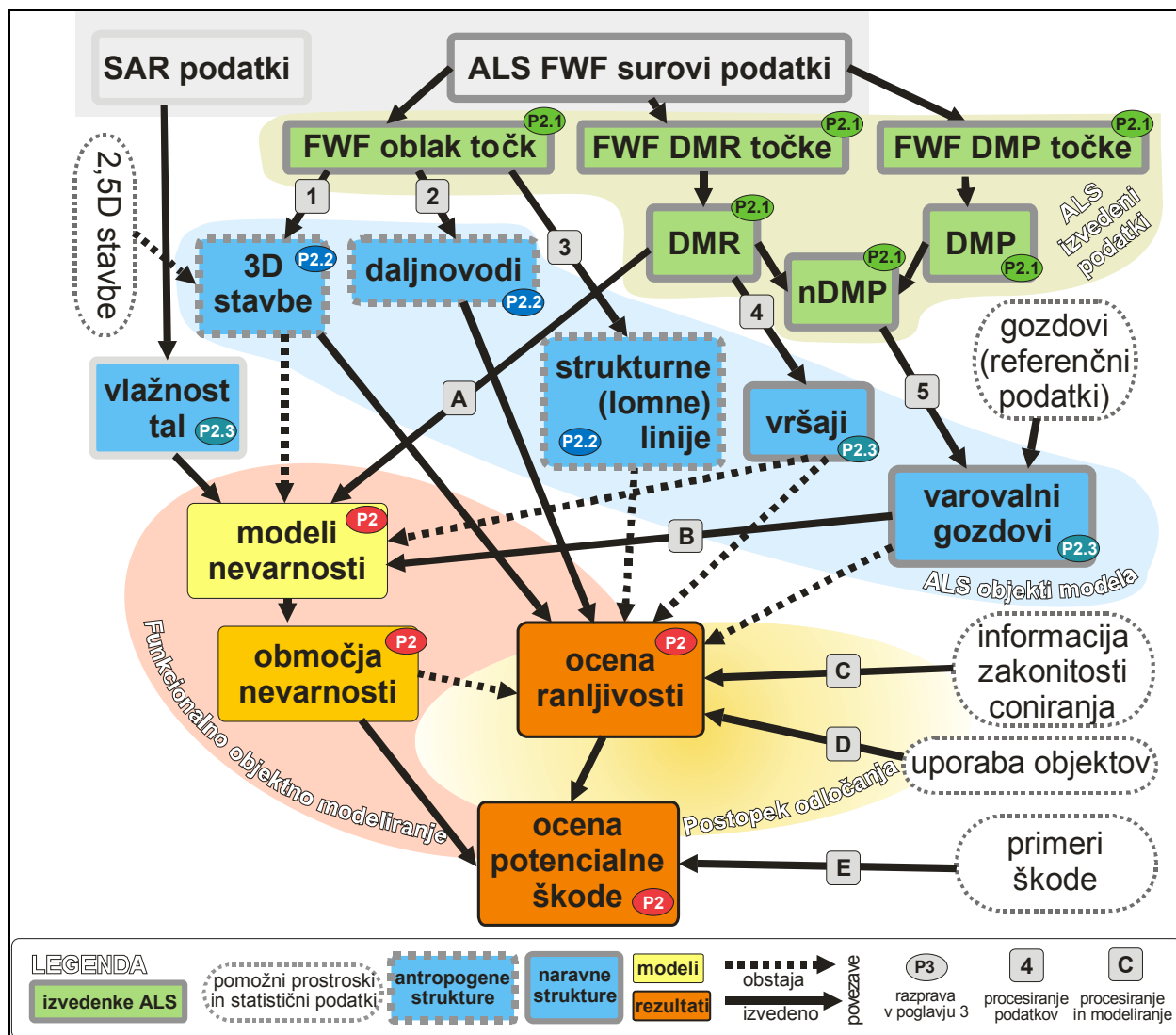
V prispevku se osredotočamo na dejavnike naravnih nevarnosti, v povezavi z geomorfološkimi značilnostmi. Naš cilj je, da z izvajanjem analiz topografskih značilnosti ter z integriranjem dodatnih podatkov (predvsem ekonomski atributi) izvedemo aplikacije možnih škod. V ta namen predlagamo funkcionalni objektni model (FOM). Tak model oziroma sistem lahko nadalje uporabimo kot informacijo pri planiranju, odločanju in pri oceni zavarovalne vsote ob razumni prostorski ločljivosti podatkov. Študija predstavlja razvoj večjega števila orodij na osnovi surovih podatkov aero-laserskega skeniranja (ALS). Poleg tega predstavljamo orodje, ki omogoča analizo stabilnosti tal v povezavi z njihovo vlažnostjo ter taljenjem/zmrzovanjem snega pri uporabi mikrovalovnih satelitskih podatkov (slika 2).

Osnova za FOM je bila razvita v okviru projekta ASAP EO-NatHaz. FOM obravnava tri osnovne vidike:

- izpostavljenost objektov/zgradb z njihovimi merami in lastnostmi,
- modeliranje tipov nevarnosti na osnovah: (1) statistične analize preteklih nevarnih pojavov, (2) geomorfološke analize oblik, generiranih s pomočjo digitalnega modela reliefa (DMR) ter
- ocena potencialne škode za rekonstrukcijo prvotnega stanja po določenem dogodku – primer za stavbe: (1) za industrijsko, javno, komercialno in bivalno rabo, (2) glede na število bivalnih enot itd.

Na osnovi navedenih vidikov je možno oceniti celotno škodo določenega nevarnega dogodka. Aplikacije ALS lahko uporabimo vsaj pri dveh izmed navedenih vidikov (drugi in tretji):

- modeliranje določenega tipa nevarnosti: funkcija varovalnih gozdov (npr. v primeru zemeljskih plazov in skalnih podorov) in
- samodejna detekcija in izdelava modelov zgradb: stavbe, mostovi, daljnovodi ipd.;
- ocena količine lesne mase, ki je izpostavljena nevarnostim.



Slika 2: Funkcionalni objektni model (FOM), s poudarkom na aplikacije ALS-a: od surovih podatkov FWF prek FWF-oblaka točk, do DMR-ja, DMP-ja in nDMP-ja (razdelek 2.1). Priprava objektov modela: antropogene strukture – objekti (razdelek 2.2) in naravne strukture – objekti (razdelek 2.3). Primer FOM (razdelek 3).

2.1 Zajem topografskih podatkov

Aero- ali zračno (letalsko in helikoptersko) lasersko skeniranje ali snemanje (analogno fotografiji) je tehnologija za zajem trirazsežnostnih topografskih informacij, predvsem podatkov o reliefu (Kraus in Pfeifer 1998). Ta se z razvojem skenerjev, večanjem zmogljivosti strojne opreme ter razvojem aplikacij zelo hitro razvija. Splošno uveljavljena okrajšava za aero-lasersko skeniranje je ALS (*airborne laser scanning*). Pogosto uporabljamo tudi splošen izraz LIDAR (*light detection and ranging*) ali LADAR (*laser detection and ranging*), ki bi ga lahko prosto prevedli kot »zaznavanje svetlobe in merjenje razdalj (laserskih pulzov)«. Poleg ALS-a se s fiksnih ali premičnih platform na tleh uporablja tudi terestrično (talno) lasersko skeniranje (TLS, *terrestrial laser scanning*). Prednost TLS-a pred ALS-om je predvsem nižja cena, slabost pa nepokritost celotnega območja z enega stojišča, nezmožnost prodiranja laserskih pulzov skozi gozd »s strani« ipd. (Podobnikar 2008).

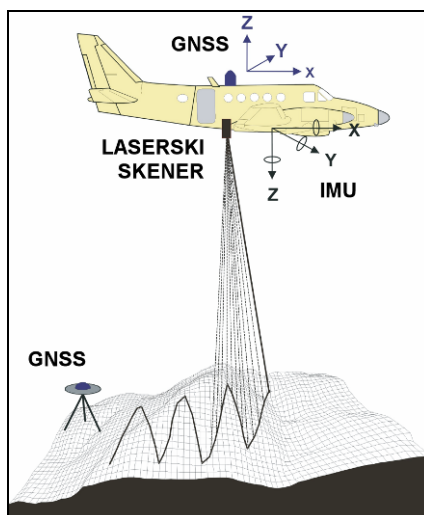
Glede na donedavno uveljavljenost stereofotogrametrije pri zajemu topografskih podatkov, je to tehnologijo umestno primerjati z ALS-jem. Pri stereofotogrametriji so bili uspešno

uporabljeni samodejni postopki slikovnega ujemanja (*matching*), na zaraščenih in gosto poseljenih območjih pa so zajem izvajali operaterji. Na avtomatizacijo celotnega fotogrametričnega postopka je vplival predvsem razvoj visokoločljivostnih digitalnih snemalnih naprav in integrirani sistemi za neposredno georeferenciranje.

ALS je za razliko od fotografskih posnetkov aktivna tehnika snemanja. Način delovanja sloni na merjenju časa potovanja oddanega laserskega pulza od laserskega skenerja do objektov na površini in nazaj. Na splošno se beleži najmanj prvi in zadnji odboj. V kombinaciji z višino in s položajem, ki ga registrira globalni navigacijski satelitski sistem (GNSS, *global navigation satellite system*) in inercialna merska enota (IMU, *inertial measurement unit*) ali INS (*inertial navigation system*) laserskega skenerja, dobimo trirazsežne koordinate praktično vsakega topografskega objekta (Kraus 2007; slika 3). Glede na standardno višino leta, ki ga izvajamo po posameznih pasovih, dobimo tipično gostoto nekaj točk/m². Natančnost lahko povečamo s poravnavo neskladnosti med posameznimi prekrivajočimi se pasovi laserskega skeniranja z metodo najmanjšega kvadrata (Kager 2004). ALS naprave zadnje generacije (npr. Riegl 2008) omogočajo zapis odbitih podatkov v obliki »*full-waveform*« (FWF) oziroma z upoštevanjem oblike signalov odbitega valovanja. Ta oblika zapisa ne omogoča le zajema geometričnih informacij, temveč tudi ugotavljanje fizičnih lastnosti zaznanih objektov (npr. odbojnost, hrapavost), in sicer glede na parametre oblike odboja kot so amplituda (intenziteta, jakost), doseg in širina (Wagner in ostali 2006; Chauve in ostali 2007).

Pomembna prednost ALS-ja pred stereofotogrametrijo je v zajemu podatkov na območjih vegetacije. Pasivni senzorji (aero-posnetki) zajemajo le rastlinski pokrov. Laserski žarki ALS-ja pa lahko prodirajo skozi vrzeli med listi in zaznavajo območja pod pokrovom ter površje tal. Naslednja prednost je visoka vertikalna natančnost ALS-ja (5 do 10 cm) in gostota (6 točk/m²) (Kraus 2007). Druge prednosti ALS-ja pred stereofotogrametrijo so tudi, da je laserski sistem aktiven in ne potrebuje sončne svetlobe za zajem podatkov, kar pomeni večjo razpoložljivost časa za polete. Visoka natančnost in gostota podatkov, ki jo dosežemo z ALS-jem, omogoča razvoj različnih tehnik za pridobivanje DMR-ja, kot tudi drugih naravnih in antropogenih topografskih podatkov, npr. sestoj gozda ali poljščin, višina snežne odeje, oblika stavb, potek transportnih poti ali daljnovodov ipd.

Izdelava DMR-ja je tesno povezana s pojmom DMP (digitalni model ploskve) ali v angleščini DSM (*digital surface model*) (Podobnikar 2002). DMP predstavlja ploskev ali površje, ki ga dobimo iz prvih odbojev ALS-ja. Taka ploskev vsebuje zgornje območje krošnje dreves, strehe stavb in drugih struktur nad površjem (Maune 2001). Digitalni model višin (DMV) vsebuje višine točk, zapisane v obliki pravilnih kvadratnih celic (matrika), medtem ko vsebuje DMR tudi druge strukture objekte, ki opisujejo ploskev reliefa, npr. strukturne črte ali izohipse. Če DMP odštejemo od DMV-ja, dobimo normalizirani DMP (nDMP). Zajem podatkov pri uporabi surovih podatkov ALS FWF-ja poteka samodejno z neposrednim modeliranjem oblaka točk ter po standardnem postopku za izdelavo DMV in DMP (Briese in ostali 2002; SCOP++ 2008): (1) predobdelava, (2) izbor točk zadnjega odboja, (3) filtriranje in klasifikacija točk in (4) interpolacija. Prednosti FWF izkoristimo z uporabo naprednih metod filtriranja (Wagner in ostali 2006). Omeniti velja tudi razvito in aplicirano metodo utežnega seštevanja virov z geomorfološkimi popravki (Podobnikar 2005). Posamezni koraki te metode omogočajo kombiniranje na desetine podatkov različnega izvora in kakovosti za izboljšanje kakovosti izdelave DMR-ja.

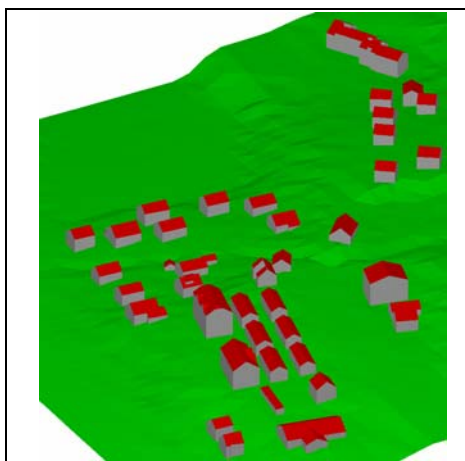


Slika 3: Načela delovanja ALS (Kraus 2007).

2.2 Antropogene strukture – objekti

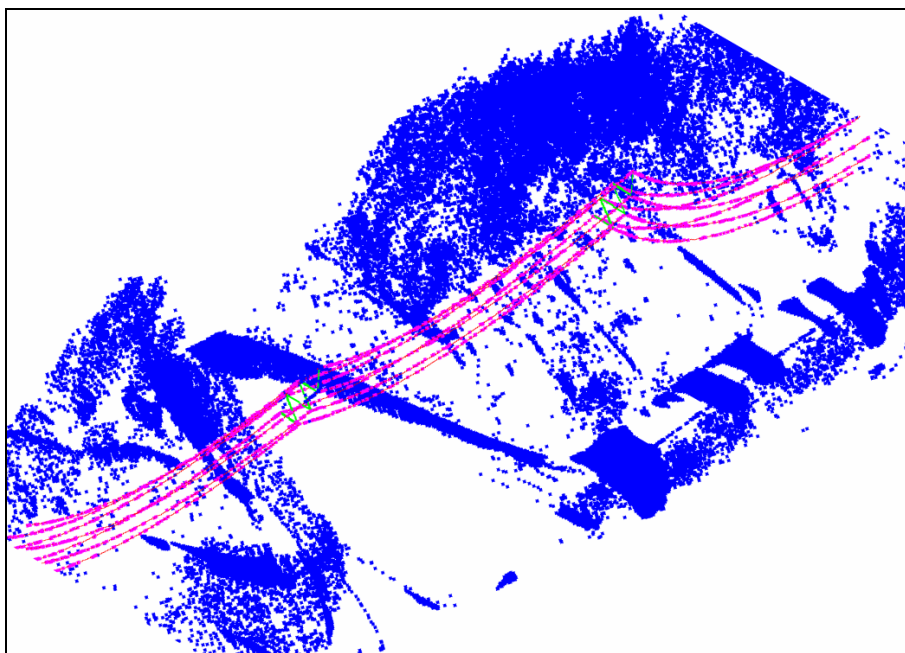
Antropogene strukture obsegajo infrastrukturni vidik naravnih nesreč v FOM-u pri uporabi ALS. Pri tem opisujemo samodejne postopke izdelave 3D-modelov stavb, daljnovodov in strukturnih (lomnih) črt.

Informacija o položaju, oblikah in konstrukciji stavb je smotrna iz dveh osnovnih razlogov: (1) gradnja vpliva na spreminjanje površja in vodnih tokov, (2) ocenimo lahko nevarnost zaradi nesreč in s tem boljše zaščitimo stavbe in prebivalstvo. Podatki ALS so primerni za učinkovito izdelavo natančnega 3D-modela stavb. Kakovost izdelave je odvisna predvsem od gostote podatkov ALS ter od zapletenosti oblik stavb. Razvili smo samodejni postopek izdelave modela stavb na podlagi segmentacije oblaka točk ALS (Dorninger in Pfeifer 2008), ki obsega pet stopenj podrobnosti (*level of detail*, LOD) abstrakcije: LOD0 je opisan kot nDMP (kot »model mest«), ki mu lahko npr. dodamo teksture DOF-a, LOD1 je blok-model (2,5D) z vodoravno streho in navpičnimi zidovi, omejenimi s krivuljo terena, LOD2 je model z generaliziranimi strešinami, LOD3 obsega dejanske oblike strešin, LOD4 pa je dejanski natančen arhitekturni načrt stavbe, za katerega potrebujemo dodatne podatke poleg ALS. Iz ALS-ja smo samodejno izdelali model LOD3. Na splošno za potrebe FOM zadostuje LOD1, ki se je v primerjavi z Katastrom stavb Geodetske uprave RS izkazal za natančnejšega (slika 4).



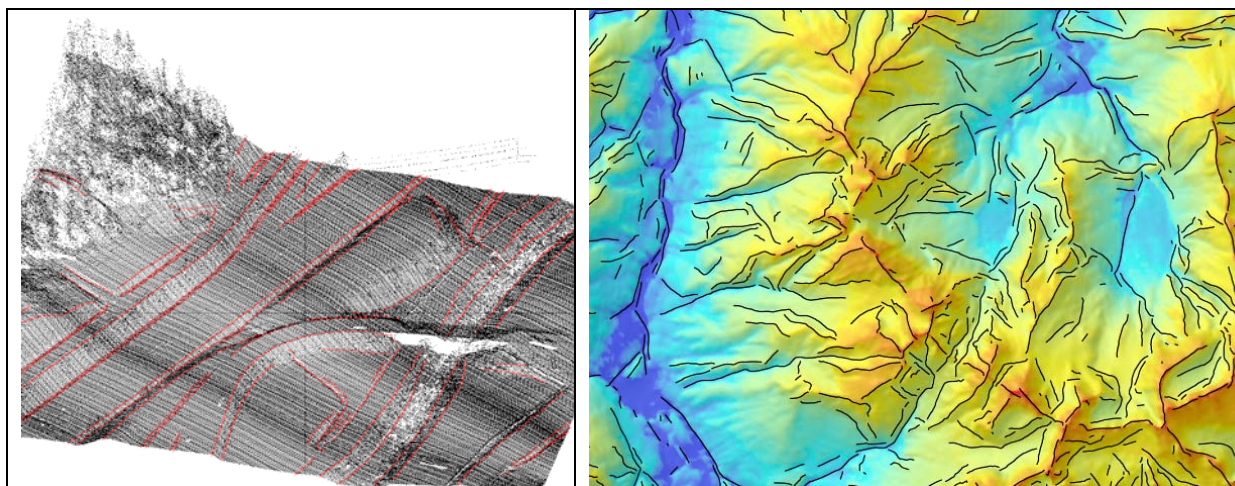
Slika 4: Natančen 3D-model stavb LOD3 (s strešinami) za del Jesenic.

V ELES-u imajo dolgoletno tradicijo kontrole daljnovodov ob uporabi ALS (Bilc 2002; Tomažič in ostali 2008), iz katerega polsamodejno klasificirajo žice, izdelajo 3D model in pripravijo druge attribute. Naša rekonstrukcija daljnovodov je pomembna, ker (1) so posamezni stebri postavljeni načrtno po določenih koridorjih, (2) za kontrolo položajev žic glede na fizične parametre, (3) ter za ugotavljanje potencialne nevarnosti za daljnovode glede na okoliško vegetacijo in stavbe. Razvili smo modelno-orientirano 3D-segmentacijo zapletenih objektov s pomočjo matematičnega modela verižnice. Samodejna metoda na podlagi oblaka točk ALS poišče in rekonstruira potek daljnovodnih žic ter dodatno prijemališča žic in paličja stebrov (Melzer in Briese 2004; slika 5).



Slika 5: Rekonstrukcija daljnovodov na podlagi modela verižnice za del Zgornjesavske doline (rdeče črte).

Določanje linearnih lastnosti je pomembno tako za določanje antropogenih kot tudi naravnih struktur. Za doseg boljših rezultatov se uporabljajo podatki oblaka točk ALS-ja, lahko pa le DMV (Briese 2004; glej tudi Podobnikar 2009). S pomočjo strukturnih črt eksplicitno določimo linearne oblike antropogenih struktur kot so ceste, železnice, jezovi, arheološka dediščina ipd. Poleg njih odkrivamo in opisujemo tudi naravne značilnosti za hidrološka modeliranja. Postopek samodejnega odkrivanja strukturnih črt je naslednji: (1) generiranje začetnih segmentov strukturnih črt in (2) iskanje 3D-strukturnih črt z algoritmom podaljševanja črt (*line-growing*) – postopno po korakih, vse do konca posamezne strukture. Opisana metoda omogoča tudi boljšo klasifikacijo točk ALS pri izdelavi DMR-ja. Aplikacija kaže visoko stopnjo pravilnosti določanja strukturnih črt, pri čemer so trenutno problemi pri topološko zapletenejših primerih, kjer sta dve črti blizu druga drugi ali v primeru njunega križanja (slika 6).

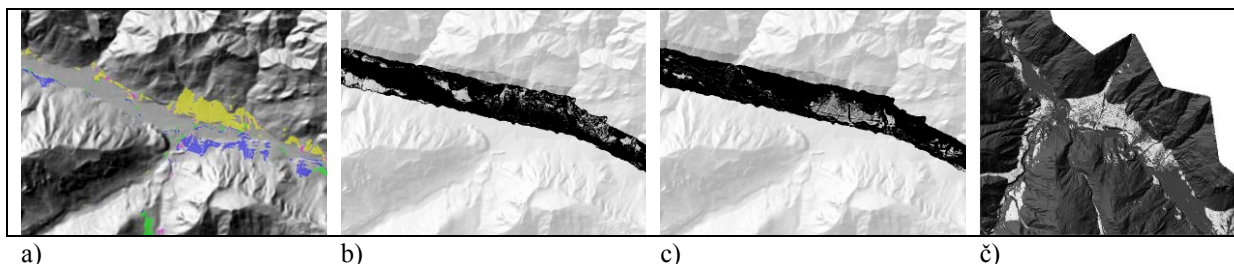


Slika 6: Določanje strukturnih črt za območje Zgornjesavske doline. Levo: ALS-oblak točk (vsi zadnji odboji, črne pike) s samodejno določenimi strukturnimi črtami (rdeče). Desno: samodejno določene strukturne črte naravnih značilnosti.

2.3 Naravne strukture – objekti

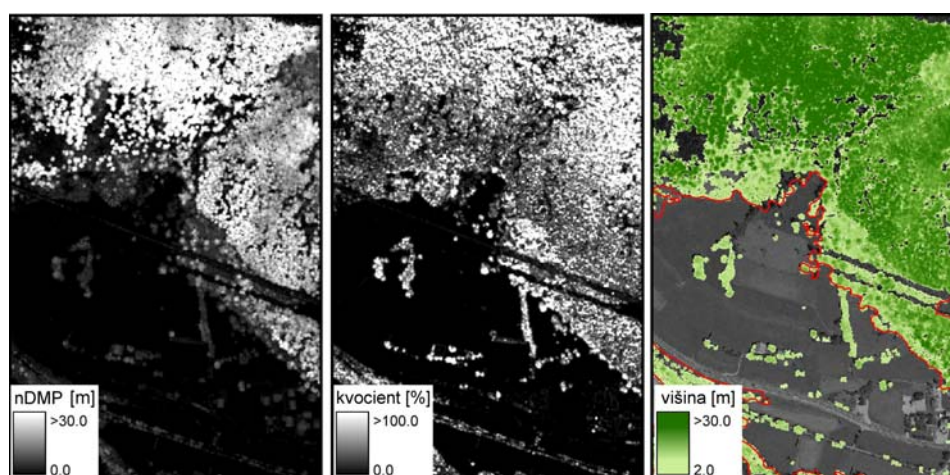
Naravne strukture so objekti FOM-a kot DMR-ja ali DMP-ja, velikosti od nekaj metrov do nekaj sto kilometrov. Primera sta: manjši podor in Idrijski prelom (Gosar 2007), pri čemer oba igrata pomembno vlogo pri študijah naravnih nesreč. Podatke ALS smo uporabili na primeru strukturnih črt, opisanih v prejšnjem razdelku ter na primerih vršajev ter varovalnih gozdov. Dodatno obravnavamo primer vlažnosti tal, pri čemer smo namesto (še) nezanesljivih tehnik ALS-ja uporabili podatke radarja z umetno odprtino (SAR, *synthetic aperture radar*) v domeni daljinskega zaznavanja.

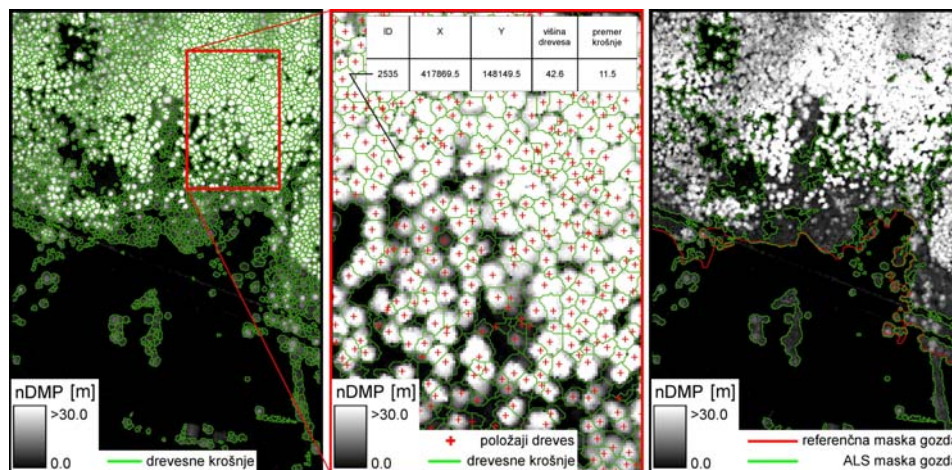
Modeliranje različnih tipov vršajev je pomembno, (1) ker gre za območja, ki se relativno hitro spreminjajo z nanosi novega gradiva (Petje in ostali 2005; Mikoš in ostali 2006) in (2) zaradi splošne nestabilnosti takih pobočij (Zorn in Komac 2007, Podobnikar in Székely 2008). Modeliranje vršajev omogoča detekcijo območij nestabilnosti, spodjedanja (reke, peskokopi) ter zaradi omenjenih značilnosti označitev območij potencialno ogrožene infrastrukture. Samodejna metoda določanja vršajev poteka po naslednjih korakih: (1) ročna izdelava referenčnih podatkov z značilnimi območji vršajev (podpis), pri uporabi DMR-ja in DOF-a, (2) izdelava slojev značilnih spremenljivk iz ALS, (3) izbira primernih parametrov in praga za klasifikacijo v binarne sloje, (4) prekrivanje slojev in (5) kartiranje različnih tipov vršajev. Rezultat modeliranja kaže na delno zanesljivost postopka (slika 7). Določen problem predstavljajo posamezni antropogeni in naravni dejavniki, ki preoblikujejo vršaje v manj značilne oblike. Primer so hudourniki, ki so se zarežali v pobočja vršajev ali izdelava teras ter izgradnja cest.



a) b) c) č)
 Slika 7: Potencialna območja vršajev za območje Zgornjesavske doline (SI) in Montafona (AT): a) na podlagi DMV 12.5 (SI), na podlagi ALS: b) določanje vršajev z večjim naklonom (SI) in c) manjšim naklonom (SI) ter č) za območje AT.

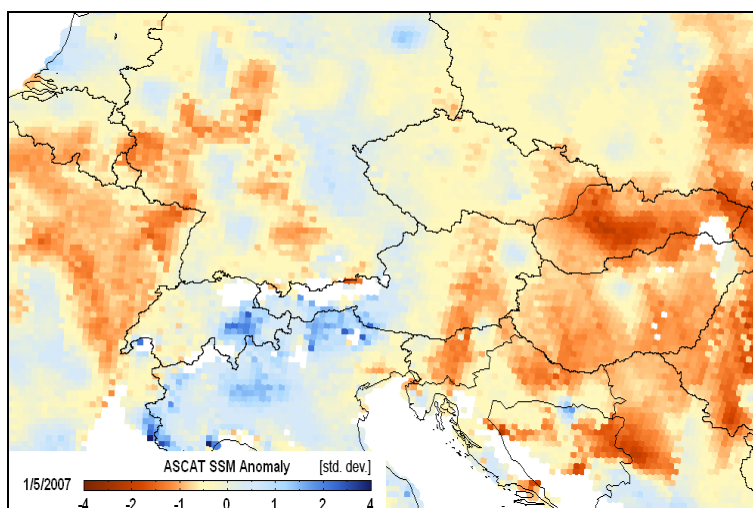
Določanje območij in strukture varovalnih gozdov, lesne mase, vrste dreves ter območij, dimenzij in geometrije posameznih krošenj dreves je naloga, ki se jo da kakovostno rešiti s podatki ALS (Kobler in Ogrinc 2007). Gozdovi imajo pomembno vlogo v gospodarstvu (lesarstvo), zadrževanju vode in varovanju infrastrukture pred naravnimi nesrečami. Prav zato je pomembno natančno načrtovanje, upravljanje in monitoring gozdov. Uporaba ALS omogoča pridobivanje parametrov, ki omogočajo natančen opis določenih lastnosti s statističnimi metodami in služijo kot empirični vhodni podatek za nadaljnje analize (Hollaus 2006). Dodatno potrebujemo referenčne podatke za kalibracijo modela. Razvili smo dve dopolnjujoči se metodi za opis varovalnih gozdov: (1) opis območij na podlagi pikselov in (2) segmentacija drevesnih krošenj. Pri prvi metodi določamo območja gozda na podlagi dosega ALS (prvi, zadnji, vmesni odboj) ter intenziteto odbitega signala. Pri tem kot prvi približek uporabimo nDMP. Drugi pristop je objektni s segmentacijo 3D-oblaka točk (Rutzinger in ostali 2008) ali (in v kombinaciji z) nDMP (Höfle in ostali 2008). Oblike krošenj lahko pridobivamo z rastrskimi metodami, strukturne parametre posameznih dreves pa s 3D-točkami znotraj posamezne krošnje. Segmentacija krošenj poteka po naslednjem postopku: (1) iskanje vbočenih območij na nDMP, (2) skeletizacija vbočenih območij, (3) generiranje poligonov drevesnih krošenj in (4) določitev položaja debla. Slika 8 prikazuje samodejno določitev območij gozdov, klasifikacijo po višini, določitev položaja debel dreves ter možnost pridobivanja informacij o strukturi dreves na posamezno drevesno krošnjo.





Slika 8: Določanje območij in strukture varovalnih gozdov za območje Zgornjesavske doline. Zgoraj: opis območij na podlagi pikselov s končnim rezultatom območij in višine gozdov na desni, Spodaj: določanje debel posameznih dreves ter informacija o strukturi dreves glede na posamezno drevesno krošnjo (za primerjavo smo uporabili referenčno območje gozdov).

Natančni podatki o vlagi tal so zelo pomembna informacija FOM za varstvo pred naravnimi nesrečami. Pri tem smo uporabili satelitske podatke radarja z umetno odprtino (SAR). Gre za visokoločljivostni mikrovalovni radar z valovno dolžino 1 mm do 1 m. Prednost te tehnike je izjemna občutljivost na vodo v prsti (tal). Glede na to lastnost smo izvajali dve aplikaciji, in sicer pridobivanje podatkov o vlažnosti tal in monitoring taljenja snega (Wagner in Pathe 2004). Obe aplikaciji igrata v povezavi s prej omenjenimi geomorfološki, geološki itd. strukturami pomembno vlogo pri opazovanju stabilnosti tal, napovedovanju plazov, pri varovanju infrastrukture pred naravnimi nesrečami ipd. Pri pridobivanju podatkov o vlagi tal smo se naslonili na empirične in teoretične modele, pri čemer smo podatke kontrolirali na podlagi kratkoročnih sprememb, ki se nanašajo na vsebnost vlage ter dolgoročnih sprememb na podlagi hrapavosti površine in stopnje vegetacije (Wagner in ostali 2003). Opazovanje taljenja snega poteka dvakrat dnevno, zjutraj in zvečer v daljšem časovnem obdobju (Kidd in ostali 2003).



Slika 9: Anomalija sestavljenih podatkov treh dni za MetOp ASCAT (Meteorological Operational Advanced Satellite Scatterometer; C-pas 5,255 GHz) glede na dolgoročno povprečje podatkov satelitov ERS-1/2 začenši leta 1991. Podatki o vlagi tal so na voljo dnevno pri ločljivosti 25 km, v kombinaciji z Envisat ASAR Global Monitoring Mode pa do 1 km.

3 INTEGRACIJA PODATKOV ZA OCENO NEVARNOSTI S FOM

Ovrednotene dejavnike nevarnosti, ki smo jih opisali, vključimo v FOM. Osredotočimo se na model stavb (LOD1 ali boljši), pridobljen iz podatkov ALS, kombiniran s pomožnimi atributi različnih virov. V primeru stavb so atributi za bivališča, javne, trgovske in industrijske objekte; pri bivališčih je dodaten atribut število bivalnih enot. Tako pripravljeno zbirko podatkov analiziramo glede na kategorije slojev s potenciali nevarnosti. Za primer nevarnosti pred poplavami hudourniških voda v alpskem svetu vključimo modele poplavnih con. Pridobljene sloje oziroma tematske karte lahko uporabimo za oceno potencialne škode glede na tip nevarnega dogodka. Rezultati se lahko uporabljajo tudi za oceno nevarnosti, izvedljivosti protiukrepov in za izračun zavarovalnin. V primeru več hkratnih tipov nevarnosti moramo upoštevati verjetnost oziroma pričakovane vrednosti vseh tipov ranljivosti. Če je možno, izračunamo tudi vse posredne ali posledične nevarnosti, kot je npr. ogroženost ob podrtju jezov ali ob izbruhu požara pri poškodbi daljnovoda.

Kot smo že omenili, lahko večino kakovostnih podatkov pridobimo z analizami podatkov ALS, ki jih dopolnimo z drugimi viri. Podatke integriramo v geografski informacijski sistem (GIS), ki omogoča združevanje prostorskih podatkov in druge operacije. Poudariti velja tudi, da v predstavljenem konceptu FOM dejansko nismo uporabili referenčnih podatkov, kot so npr. dejanski podatki zavarovalnic. Opisani pristop je preliminaren in ga je možno še prečistiti ter dopolniti ob upoštevanju dodatnih objektov modela, dopolniti sam postopek FOM ter celovito pretresti problematiko v skladu z vsemi možnimi dejavniki.

4 SKLEP

V prispevku smo predstavili postopek k funkcionalnemu objektnemu modeliranju (FOM) za študij nevarnosti pred nesrečami. Poudariti velja, da smo celoten proces modeliranja omejili na uporabnost aero-laserskega skeniranja (ALS). ALS se je izkazal kot kakovosten in vsestransko uporaben vir podatkov, ki smo jih kategorizirali v antropogene in naravne prostorske strukture oziroma objekte z naslednjimi prednostmi:

napredne analize ALS za različne aplikacije lahko uspešno uporabimo za upravljanje sistema za obveščanje in oceno tveganja pred naravnimi nesrečami ter uporaba podatkov z dveh neodvisnih in različnih študijskih območij v Alpah je omogočila testiranje in dodelavo določenih tehnik procesiranja, za katere lahko trdimo, da so neodvisne od virov podatkov in pretežno tudi od izbrane lokacije.

Stopnjo integracije podatkov ALS in raznovrstnih dodatnih prostorskih virov omejuje zahtevana natančnost oziroma podrobnost modela nevarnosti/tveganja. Polno integracijo lahko izvedemo po uspešno izbranem merilu ob upoštevanju ločljivosti posameznih podatkov (Podobnikar 2005).

ZAHVALA

Aktivnosti je financirala Avstrijska agencija za promocijo znanosti (FFG) v sestavu Programa avstrijskih vesoljskih aplikacij (ALR-OEWP-CO-413/07) in njihovega raziskovalnega projekta TMIS-morph v okviru programa ASAP. Podatki ALS ter drugi prostorski podatki so bili pridobljeni s pomočjo Geodetske službe Zvezne dežele Predarlbeško (Landesvermessungsamt Vorarlberg), Avstrija ter podjetja Flycom d.o.o., Slovenija. Podatke o upravljanju nevarnosti ter kartografsko gradivo so prispevali Avstrijska služba za kontrolo hudournikov in snežnih plazov, Predarlbeško, Avstrija (Wildbach- und Lawinenverbauung). Podatki o varovalnih gozdovih so od Uprave za gozdove Montafon, Predarlbeško, Avstrija. Pomemben delež prostorskih podatkov je prispevala Geodetska uprava Republike Slovenije.

5 VIRI IN LITERATURA

- Bilc, A. 2002: Ali dobiva klasična fotogrametrija konkurenco? *Geodetski vestnik* 46-4. Ljubljana.
- Briese, C., Pfeifer, N., Dorninger, P. 2002: Applications of the Robust Interpolation for DTM Determination. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV*, 3A. Graz.
- Briese, C. 2004: Three-dimensional Modelling of Breaklines from Airborne Laser Scanner Data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV*, B3. Istanbul.
- Chauve, A., Mallet, C. Bretar, F., Durrieu, S., Deseilligny, M.P., Puech, W. 2007: Processing full-waveform lidar data: Modelling raw signals. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, 3/W52. Espoo.
- Dorninger, P., Pfeifer, N. 2008: A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction and regularization from airborne laser scanning point clouds. *Sensors* 8-11. Basel.
- Geist, T., Höfle, B., Rutzing, M., Pfeifer, N., Stötter, J. 2010: Laser scanning - a paradigm change in topographic data acquisition for natural hazard management. Heidelberg.
- Gosar, A. 2007: Letalsko lasersko skeniranje (LiDAR) Idrijskega in Ravenskega preloma v zahodni Sloveniji. *Ujma* 21. Ljubljana.
- Höfle, B., Hollaus, M., Lehner, H., Pfeifer, N., Wagner, W. 2008: Area-based parameterization of forest structure using full-waveform airborne laser scanning data. *SilviLaser 2008*. Edinburgh.
- Hollaus, M., 2006: Large scale applications of Airborne Laser Scanning for a complex mountainous environment. *Doktorsko delo. Tehniška univerza na Dunaju, Dunaj*.
- Kager, H.J. 2004: Discrepancies between overlapping laser scanner strips - simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV*, B/1. Istanbul.
- Kidd, R. A., Scipal, K., Bartalis, Z., Wagner, W. 2003: A diurnal difference indicator for freeze-thaw monitoring from Ku band scatterometer applied within the Siberia II project. *IGARSS '04. IEEE International* 3.
- Kobler, A., Ogrinc, P. 2007: REIN algorithm and the influence of point cloud density on nDSM and DEM precision in a submediterranean forest. *Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Espoo.
- Kraus, K. 2007: *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*. Berlin.
- Kraus, K., Pfeifer, N. 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53-4. New York.
- Maune, D. F. (ur.) 2001: *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. Maryland.
- Melzer, T., Briese, C. 2004: Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Point Clouds. *Osterreichische Computer Gesellschaft*.
- Mikoš, M., Majes, B., Fazarinc, R., Rajar, R., Žagar, D., Krzyk, M., Hojnik, T., Četina, M. 2006: Numerical simulation of debris flows triggered from the Strug rock fall source area, W Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6-2. Katlenburg-Lindau.
- Oštir, K., Veljanovski, T., Podobnikar, T., Stančič, Z. 2003: Application of satellite remote sensing in natural hazard management: the Mount Mangart landslide case study. *International Journal of Remote Sensing* 24-20. London.
- Petje, U., Mikoš, M., Ribičič, M. 2005: Ocena nevarnosti padajočega kamenja za odsek regionalne ceste v dolini Trente. *Geologija* 48-2. Ljubljana.
- Podobnikar, T. 2002: Model zemeljskega površja - DMR ali DMV? *Geodetski vestnik* 46-4. Ljubljana.
- Podobnikar, T. 2005: Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality. *International Journal of Geographical Information Science* 19-1. London.
- Podobnikar, T. 2008: *Geodetski vestnik* 52-4. Ljubljana.
- Podobnikar, T. 2009: Visibility simulation technique to support the visual recognition of morphologic features. *International Cartography Conference*. Santiago (v tisku).
- Podobnikar, T., Stančič, Z., Oštir, K. 1998: Modelling erosion and deposition with GIS. *COST action G2: paysages antiques et structures rurales: The use of Geographic Information Systems in the study of ancient landscapes and features related to ancient land use*. Norwick.
- Podobnikar, T., Székely, B. 2008: Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008*. Ljubljana.
- Riegl 2008: Medmrežje: http://www.riegl.com/airborne_scanners/airborne-scanner-packages/pdf_airbone-laser-scanner-packages/lms-q560_datasheet.pdf (24. 7. 2008).
- Rutzing, M., Höfle, B., Hollaus, M. and Pfeifer, N. 2008: Object-based point cloud analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanning data for urban vegetation classification. *Sensors* 8-8. Basel.

- Scop++ 2008: SCOP++ - Programpackage for Digital Terrain Models. Medmrežje: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/products>; <http://www.inpho.de>. (24. 7. 2008).
- Tomažič, R., Polak, M., Kozjek, D. 2008: Geografski informacijski sistemi (GIS) v podjetju Elektro-Slovenija d.o.o. - Infrastruktura za zagotavljanje neprekinjenega poslovanja. Povzetek predavanja. Ljubljana.
- Wagner, W., Pathe, C. 2004: Has SAR failed in soil moisture retrieval? Envisat & ERS Symposium. Salzburg.
- Wagner, W., Scipal, K., Pathe, C., Gerten, D., Lucht, W., Rudolf, B. 2003: Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. Journal of Geophysical Research 108-D19. Washington D.C.
- Wagner, W., Ullrich, A., Dučić, V., Melzer, T., Studnicka, N. 2006: Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60-2. New York.
- Zorn, M., Komac, B. 2007: Probability modeling of landslide hazard. Acta geographica Slovenica 47-2. Ljubljana.