

## Poplavne ravnice v novi luči: LiDAR in tafonomija aluvialnih krajin

### *Floodplains in a New Light: LiDAR and the Taphonomy of Alluvial Landscapes*

© Dimitrij Mlekuz

Ghent University, Faculty of Arts and Philosophy, Department of Archaeology and Ancient History of Europe, Ghent, Belgium  
dimitrij.mlekuz@UGent.be

**Izvleček:** Lasersko skeniranje površja (LiDAR, Light Detection and Ranging) je metoda daljinskega zaznavanja, ki zazna tudi najmanjše variacije v topografiji. Natančnost, zmožnost "gledanja" skozi vegetacijski pokrov in tridimenzionalni model zemljinega površja, ki je rezultat metode, ponujata velik potencial za preučevanje arheoloških krajin in razumevanje geomorfoloških ali antropogenih procesov, ki so krajino preoblikovali. V članku skozi dva primera predstavljamo možnosti uporabe LiDAR za interpretacijo preoblikovanja in nastajanja aluvialnih krajin.

**Gljučne besede:** arheologija, daljinsko zaznavanje, lidar, arheološke krajine, tafonomija, poplavne ravnice

#### Uvod

LiDAR je orodje, s katerim je moč zelo natančno izmeriti zemljino površje. Omogoča nam opazovanje sledov, brazgotin in odtisov naravnih in antropogenih procesov na površini tal. LiDAR je tako odlično orodje za preučevanje arheoloških pokrajin, še posebej to velja za stabilne pokrajine, kjer je palimpsest človeških aktivnosti dobesedno odtisnjen na površini pokrajine in kjer je ritem naravnih procesov spreminjanja krajine v primerjavi z antropogenimi aktivnostmi zelo počasen. V takih pokrajinah je raba LiDAR-ja relativno enostavna in ponuja spektakularne rezultate (prim. Bewley et al. 2005).

Raba LiDAR-ja pri preučevanju pokrajin, kjer naravni procesi erozije in akumulacije v dolgoročni perspektivi zasenčijo človeško delovanje, pa je veliko manj spektakularna in neproblematična. V dinamičnih pokrajinah, ki se spreminjajo zelo hitro, kot so npr. poplavne ravnice, se pri uporabi LiDAR-ja poraja vrsta novih vprašanj in problemov. Še več, ker gre za pokrajine, kjer so sledovi preteklih človeških aktivnosti zabrisani, uničeni ali pokopani, jih z LiDAR-jem ne moremo odkriti, temveč z njim "le" poskušamo razumeti vzorce v arheološkem zapisu, ki so posledica predelave, uničenja ali prekritja.

V članku predstavljamo uporabo LiDAR-ja pri preučevanju tafonomije dveh aluvialnih pokrajin. Čeprav z LiDAR-jem preučujemo "le" površino pokrajine, poskušam pokazati, da je z njegovo pomočjo moč prodrati tudi v časovno globino pokrajine.

**Abstract:** Laser scanning of the earth surface (LiDAR, Light Detection and Ranging) is a remote sensing method, which is able to detect smallest variations in topography. Its precision, ability to "see" through vegetation cover and three-dimensional digital surface model, which is the result of the method, offers a great potential in the study of archaeological landscape and understanding of anthropogenic and geomorphologic processes, which shaped and reworked it. The paper presents the rationale, application and interpretation of LiDAR data for the understanding of development of complex and dynamic landscapes in two case studies.

**Keywords:** archaeology, remote sensing, LiDAR, archaeological landscapes, taphonomy, floodplains

#### Tafonomija

Pokrajine<sup>1</sup> niso statične entitete, temveč so v stalnem procesu nastajanja. Čeprav se v izkušnji in spominu človeškega življenja zdi, da je topografija, relief in geologija pokrajine nekaj stalnega in nespremenljivega, to v dolgoročni perspektivi ne velja. Gladine morij se dvigajo in spuščajo v ritmu globalnih klimatskih sprememb, erozija znižuje gore in reže doline v pobočja, reke odnašajo ogromne količine zemljinega površja in ga odlagajo v zasipih. Ta tok sprememb, skozi katerega krajine "vedno že", nastajajo, ni stvar geološke preteklosti, temveč se dogaja tudi danes in se bo tudi prihodnosti (Ingold 2000, 203).

To pa še posebej velja za poplavne ravnice. Poplavne ravnice so zelo dinamična okolja. Reke so pomembni dejavniki sprememb v pokrajini. S svojo energijo uničujejo, preoblikujejo ali pokopljejejo starejše pokrajine skozi cikle erozije in akumulacije. Poplavna ravnica je, tako kot vse krajine, v stalnem procesu nastajanja in preoblikovanja, le da so ti procesi še intenzivnejši in hitrejši.

Nepreoblikovanih pokrajin ni. So le manj ali bolj preoblikovane ali spremenjene. Ko se ukvarjamo z arheologijo tako intenzivno preoblikovanih, spremenjenih, uničenih ali pokopanih pokrajin, je seveda ključno vprašanje: kaj je uničeno, kaj je spremenjeno, koliko je pokrajina spremenjena, kako je spremenjena? Kateri so glavni procesi, ki so spreminjali pokrajino, in kje so fragmenti starejših, manj ali nepreoblikovanih pokrajin še ohranjeni?

1 Zavedam se, da je "krajina" zelo problematičen in obtežen pojem in da obstaja mnogo zelo različnih definicij kaj "krajina" sploh pomeni. V tem tekstu naj bo "krajina" prostorski vidik človeškega soočanja z okoljem, kjer pojem "okolje" vključuje predvsem značilnosti reliefa, geologije, hidrologije ...

S temi vprašanji se ukvarja tafonomija krajin. Tafonomija izhaja iz paleontologije in je običajno razumljena kot študij izgube informacij v kostnih zapisih. Efremov, začetnik discipline, jo definira kot: *the study of the transition (in all its details) of animal remains from the biosphere to the lithosphere, i.e. the study of a process in the upshot of which the organism pass out of the different parts of the biosphere and being fossilized, become part of the lithosphere* (Efremov 1940, 85).

Ta definicija predstavi tafonomijo zgolj kot preučevanje entropijskega procesa, ki zmanjšuje količino informacij o kostnem zapisu. Obstajajo pa tudi druge definicije, ki poudarjajo, da je vsaka izguba informacij tudi nova informacija, ki se v procesu tafonomskih preoblikovanj doda zapisu. Tako paleontologa Behrensmeyer in Hill definirata tafonomijo kot: *“the study of processes of preservation and how they affect information”* (Behrensmeyer, Hill 1985, 105).

Ta definicija ne priznava le izgube informacij in pristranskosti zapisov, ki so posledica tafonomskih procesov, temveč tudi “pozitivne posledice”, dodajanje informacij h kostnemu zapisu: npr. sledi plenilcev (obiranja na kosteh) in procesov premikanja (abrazija in zaokrožanje zaradi vodnega transporta (Colley 1990, 59).

Ta vidik tafonomije je še posebej pomemben pri preučevanju pokrajin. Pokrajine so vedno v procesu nastajanja in preoblikovanja in vsak poseg in proces, ki pokrajino spremeni, “dodaja” nekaj k zgodovini pokrajine; pokrajina je kumulativna zgodovina vseh posegov in preoblikovanj, kjer imajo vse spremembe in posegi enako težo. Ni manj ali bolj pomembnih posegov, so le bolj ali manj intenzivni posegi.

Spreminjanje krajine seveda pomeni, da se nekateri vidiki njene zgodovine preoblikujejo, zabrišejo, pokopljejo ali celo popolnoma uničijo, vendar vsak proces uničenja ne pomenijo, da je krajine kaj manj, pomeni le, da je imela bolj burno zgodovino in bolj intenzivno nasledje posegov in sprememb.

Predmet preučevanja tafonomije krajine je tako tafonomska zgodovina krajin, serija tafonomskih agentov in procesov, ki so pripeljali do moderne, kvantificirane krajine, ki jo preučujemo. Tafonomski proces je dinamična aktivnost, dejanje, s katero tafonomski agent deluje na pokrajino in na njej pusti tafonomsko sled, sta-

tični rezultat tega procesa. Tafonomski agent je izvor ali neposredni fizični vzrok modifikacije pokrajine.

Tafonomija krajine je tako proces razumevanja zgodovine krajine skozi razumevanje procesov preoblikovanja, spreminjanja, zakrivanja in uničenja pokrajine (tafonomskih procesov) skozi branje tafonomskih sledi.

Tafonomija krajine je še posebej pomembna v aluvialnih okoljih, kjer je intenzivnost in hitrost pojavljanja tafonomskih procesov zelo velika. Pokrajino preoblikuje zaporedje deloma se prekrivajočih tafonomskih procesov v različnih prostorskih merilih. Ti procesi se med seboj kombinirajo in prepletajo in sledove posameznih procesov bodisi zabrišejo ali uničijo ali, v redkih primerih, celo izostrijo. V dolgoročni perspektivi aluvialna krajina postane palimpsest različnih tafonomskih sledi, ki so jih zapustili tafonomski agentje, predvsem reke in vode (Howard, Macklin 1999).

Študij tafonomije krajin je tako pomemben tudi za razumevanje preteklih, arheoloških krajin. Arheološki zapis krajine ni nikdar neproblematičen ostanek preteklosti, temveč je rezultat zaporedja tafonomskih procesov, ki so ga preoblikovali ali uničili. To, da vidimo sledove preteklih krajin ali arheoloških najdišč tam, kjer jih vidimo, je rezultat zaporedja tafonomskih procesov. Brez razumevanja tega zaporedja ne moremo nikoli vedeti, zakaj vidimo najdišča tam, kjer jih vidimo; ocenimo, kaj in koliko arheološkega zapisa manjka in kje bi lahko še bil, pa ga zaradi tafonomskih procesov ne vidimo (Barton et al. 2002).

## Poplavne ravnice

Poplavne ravnice so rezultat stalnih erozijskih in depozicijskih procesov in so v nenehnem procesu spreminjanja in izgrajevanja. Razumevanje procesov in oblik poplavnih ravnin je nujno za interpretacijo arheoloških ostankov iz teh okolij in razumevanje odnosov med ljudmi in okoljem. Kot izredno raznoliki in produktivni ekosistemi ponujajo ljudem in živalim mnogo več možnosti kot njihova okolica. So tesno povezane s svojim porečjem in zelo občutljivo odgovarjajo na dogodke v njem. Kot palimpsesti hranijo, odkrivajo in zakrivajo zapise bivanja v njih in njihovem zaledju. Kompleksne, dinamične in pogosto večumne ponujajo vrsto težav in izzivov arheološki intepretaciji.

Poplavno ravnico lahko preprosto definiramo kot občasno poplavljenno ravnino ob rekah (Brown 1997, 17). Zgodovina poplavne ravnice je tesno povezana z zgodovino njenega porečja. Reke poplavno ravnico povezujejo s porečjem; spremembe in posegi v porečju vplivajo na značilnosti reke, kot so pretok in energija vodnega toka, oblika rečnega korita, količina sedimentov, ki jih transportira in podobno. Te značilnosti se odražajo v morfologiji poplavne ravnice. Poplavno ravnico in njeno porečje lahko opišemo kot dinamičen samoorganiziran sistem, oblikovan z množico povratnih zank (Knighton 1998, 282).

Obrežni nasipi (*levée*) so linearne oblike tik ob bregu rečnega korita, dvignjene nad poplavno ravnico, ki se podolžno spuščajo proti poplavni ravnici, običajno so najbolj izraženi na konveksnih straneh rečnih zavojev. Nasipi nastanejo ob poplavah, ko voda prekorači bregove in izgubi energijo, kar povzroči hitro usedanje debelozrnatega suspenzijskega materiala neposredno za bregom. Višina nasipa se veča z vertikalnim priraščanjem (agracijo) ob poplavah (Skaberne 1995, 256; van Andel, Runnels 1996, 484; Brown 1997, 7-37). Ob katastrofalnih poplavah lahko voda na nekaterih mestih prebije obrežni nasip.

Voda, ki udre skozi obrežni nasip, lahko erodira poplavno ravnico in izoblikuje prebojno korito in kmalu odloži debelejši suspenzijski material v obliki prebojne pahljače. Večino poplavne ravnice med bregom reke in robom doline prekriva mozaik mokrišč, manjših jezer in močvirij. Poplavna ravnica preide v območje obrežne ravnine, ki jih poplave dosežejo redko ali nikoli. Teraso predstavljajo različno stare površine poplavnih ravnin, ki ležijo na različnih višinah. Njihov nastanek je posledica menjavanja obdobja povečane sedimentacije in erozije, vezanih na spreminjanje erozijske baze (Skaberne 1995, 256-257; Brown 1997, 17-37).

Rečno korito je oblika, ki jo voda vreže v podlago. Oblike rečnih korit so dinamične tako v tlorisu kot preseku, dinamiko določa razmerje med erozivnimi dejavniki (vodni pretok, naklon korita, količina sedimentov, ki jih reka prenaša) in silami, ki kljubujejo eroziji (kohezivnost sedimentov, v katere je korito vrezano). Obstaja mnogo klasifikacij kontinuuma rečnih oblik (prim. Knighton 1998; Howard, Macklin 1999; Skaberne 1995; Brown 1997), najpogosteje jih delimo na ravne, meandrirajoče, prepletajoče in anastomozne. Ravna korita so v naravi zelo redka, so pa najpogostejša oblika

antropogenih regulacijskih ali umetnih kanalov. Meandriranje je prilagoditev notranji energiji toka, običajno nastopa pri manjših naklonih. Ob stabilnem toku se meandri spreminjajo in premikajo počasi, v nestabilnih stanjih, najpogosteje ob poplavah, pa lahko pride do nenadnih sprememb in premikov. Ob poplavi lahko voda poišče krajšo pot in prebije vrat meandra, to imenujemo meandrski presek (*meander neck cut-off*).

Odrezani del meandra postane opuščeno korito ali mrtvica. Premik meandra nastane s prebojem obrežnega nasipa in poglobljanjem prebojnega korita, ki se oblikuje v novo korito. Najdramatičnejši proces spreminjanja oblike rečne struge je premik (*avulsion*) celotne struge, stara struga ostane opuščena; v njej se lahko ohrani stoječa voda v obliki trakastega jezera ali močvirja (*ribbon lake/swamp*). Prepletajoče oblike so značilne za visokoenergijske tokove z velikimi nihanjmi v pretoku in nastopajo v okoljih, kjer prevladujejo nekohezivni debelozrnati sedimenti. Anastomozne oblike srečujemo v poplavnih ravninah z drobnozrnatimi, kohezivnimi sedimenti in nizkoenergijskimi vodnimi tokovi. Nenadni premiki strug so najpogostejši procesi spreminjanja rečnih oblik in oblikovanja poplavne ravnine (Skaberne 1995, 257-259; Brown 1997, 17-37; Knighton 1998).

Poplavne ravnice so pomemben krajinski element v Sloveniji. Območja, ki jih poplavlja petdesetletne vode, obsegajo kar 775km<sup>2</sup>. Danes, ko je večina vodotokov reguliranih, potisnjenih v ravna korita, le redkokje naletimo na ohranjene, nespremenjene poplavne ravnice. Vendar so meandrirajoče reke, mokrišča in mrtvice bili včasih sestavni del vsake pokrajine in zaradi svojih lastnosti zelo primerni prostori za poselitev in življenje. Očitni naravni ritmi, kot so poplave, ustvarjajo časnost krajine, ki oblikuje vsakodnevne aktivnosti ljudi. Arheologija se je šele v zadnjih nekaj desetletjih začela zavedati pomena aluvialnih pokrajin in georheoloških in tafonomskih pristopov k razumevanju njihove dinamike in odnosov med ljudmi in poplavnimi ravninami (Brown 1997).

Tudi v Sloveniji – izven Ljubljanskega barja – so raziskave na avtocestah ponudile namig o tem, kako bistveno drugačna je bila pokrajina v preteklosti in kako tesno je bilo življenje ljudi povezano z ritmi poplavnih ravnin. Vzorec najdišč na avtocestah je pokazal, da so bile poplavne ravnice veliko bolj intenzivno poseljene, kot smo mislili do sedaj. Na velikem številu izkopavanja na najdiščih ali ob njih naleteli na opuščena rečna korita,

pomembno vlogo pri izbiri lokacij za naselbine in aktivnosti. Kar pogrešamo, je na eni strani bolj kontekstualno razumevanje arheologije in poselitve poplavnih ravnin, ki bi vključevalo tako krajinske, naravoslovne in geoarheološke pristope, in na drugi strani bolj ekspliciten tafonomski pristop, ki bi pokazal, zakaj smo najdišča našli tam, kjer smo jih in ne morda drugje.

### LiDAR

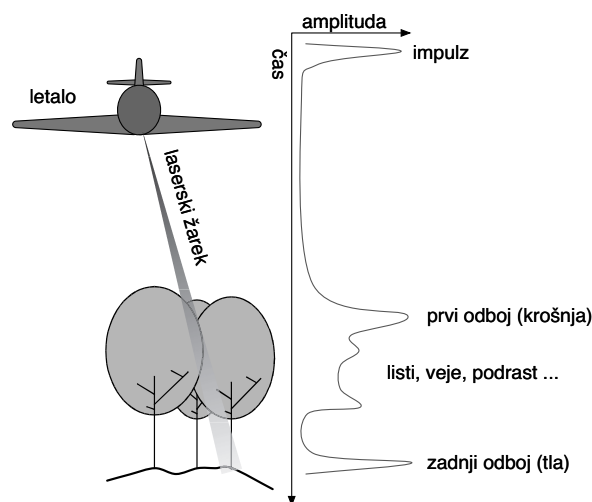
LiDAR je pomembno orodje, ki ga že desetletje uporabljajo pri geomorfoloških prospekcijah in preučevanju poplavnih ravnin ter napovedih poplav (Lohani and Mason 2001; Charlton et al. 2003; Cobby et al. 2001; Marks, Bates 2000; Challis 2005; 2006; Jones et al. 2007).

LiDAR (*Light Detection and Ranging*, "svetlobno zaznavanje in merjenje razdalj") ali ALA (*Airborne Laser Altimetry*, "lasersko merjenje višin iz zraka") je metoda, ki omogoča horizontalno in vertikalno natančne meritve višine zemljinega površja. Metoda izkorišča lastnosti koherentne laserske svetlobe v povezavi z natančnim kinematičnim pozicioniranjem s pomočjo diferenčnega GPS in inercialnih merilcev smeri. Laser projicira pulze laserskega žarka na zemljino površje, kjer se odbijejo do sprejemnika. Iz časa potovanja pulza od oddajnika do sprejemnika izračunajo razdaljo do tal. Sprejemnik zazna tudi amplitudo (intenzivnost) odboja. Diferenčni GPS omogoča natančno trodimenzionalno lociranje naprave, inercialni merilci pa dajejo informacije o smeri in naklonu letala. Celotno napravo sestavljajo laserski skener, diferenčni GPS in inercialni merilci, povezani z računalnikom, ki nadzoruje komponente in zapisuje podatke. Naprava je običajno nameščena na letalu, kar omogoča, da lahko zelo hitro pokrijemo velike površine. Gostota izmerjenih točk je odvisna od višine in hitrosti leta in od lastnosti instrumenta. Običajno, ob hitrosti letala med 200 in 250 km/h, višini leta med 500 in 2000 m, širini zamaha inštrumenta med 10 in 20 stopinj in meritvi med 2.000 in 50.000 točk na sekundo, je gostota točk med 2 do 0.3 točke na m<sup>2</sup>.

Surovi podatki, ki jih dobimo iz naprave, so v obliki oblaka trodimenzionalnih točk, običajno v lokalni geografski projekciji. Obdelava podatkov po meritvi s sortiranjem in filtriranjem točk omogoča rekonstrukcijo višin zemljinega površja. Iz sortiranih in filtriranih podatkov lahko generiramo rastrske površine ali digitalne modele površ-

ja.

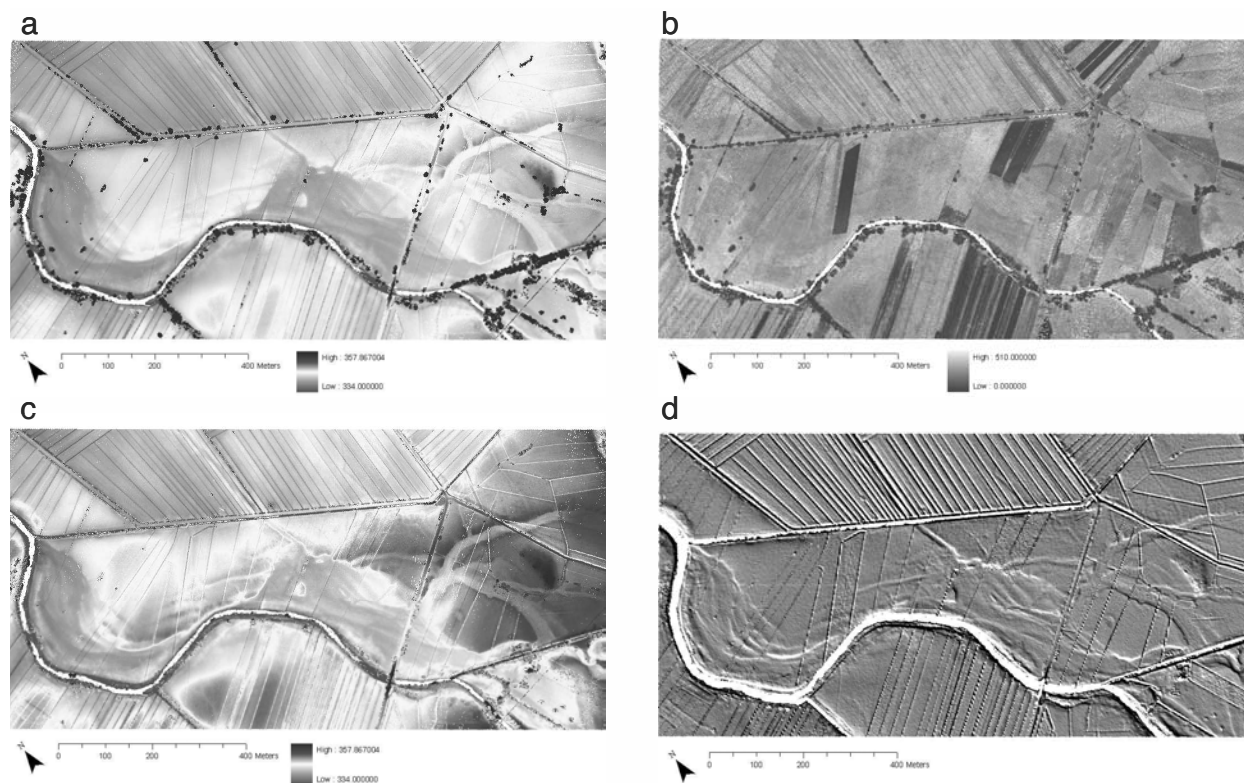
LiDAR zazna višino tal in vseh neprosojnih ali napol prosojnih predmetov na površini (sl. 1). Laserski žarek LiDAR se odbije od tal in neprosojnih predmetov, kot so recimo stavbe in drugi predmeti, ki stojijo na tleh. Pri "prosojnih" predmetih, kot so npr. drevesa ali druga vegetacija, se del žarka odbije od listnega pokrova ali vej, del žarka pa prodre do tal. Tako je moč odboj žarka razločiti na več komponent, t.i. odbojev, običajno pa na prvi odboj (*first pulse*), ki je odboj od površine prosojnih predmetov, kot so listje, veje, ... in zadnji odboj (*last pulse*), ki predstavlja tla pod "prosojnimi" predmeti. Tako lahko z LiDAR-jem "gledamo" tudi pod listni pokrov in merimo površino gozdnih tal. To je ena od močnejših prednosti LiDAR-ja.



Slika 1. Princip delovanja LiDAR-ja. Žarek, ki ga odda instrument na letalu, se na poti do tal običajno odbije od več predmetov, listov vej, podrasti in končno tal.

Figure 1. Airborne LiDAR. Each pulse is reflected from objects on the surface, generating multiple returns that are captured discrete pulses.

LiDAR tu odlično zamenjuje aerofotografijo, kjer drevje in gozd običajno pomenita, da je površina skrita in "zaprta" za opazovanje. Gozdna površina je običajno tudi znak, da tla niso bila obdelovana, kar pomeni, da topografski znaki niso zabrisani. Ta prednost je še posebej izrazita v deželah, kot je Slovenija, kjer so velike površine prekrte s gozdom, kar pomeni, da so površinski znaki dobro ohranjeni, a jih ni bilo moč sistematično opazovati.



Slika 2. Primerjava med digitalnim modelom površja (a), intezivnostjo odboja laserskega žarka (b), digitalnim modelom terena (c) in analitično senčenim digitalnim modelom terena (d).

Figure 2. Comparison between LiDAR digital surfacemodel (a), pulse intensity (b), digital terrain model generated from last pulse data (c) and hillshaded digital terrain model (d).

Z interpoliranjem podatkov dobimo zvezne rastrske površine. LiDAR podatke, ki vsebujejo vse detajle površine, običajno imenujemo digitalni model površja (DMP, *digital surface model*, DSM). Ta model površja tako vključuje krošnje dreves, grmovja, strehe stavb, stebre daljnovodov in celo žice (sl. 2a).

Če želimo dobiti model tal brez prosojnih predmetov, je podatke potrebno obdelati in odstraniti vse nezaželene predmete in detajle površja, t.i. "krajinsko navlako" (*landscape clutter*), tako da dobimo golo površje tal (*bare earth*), običajno poimenovano tudi digitalni model terena (DMT, *digital terrain model*, DTM). Krajinsko navlako običajno identificiramo in izrežemo z uporabo različnih filtrov, izrezane površine pa dopolnimo z interpolacijo (sl. 2c).

Čiščenje golega površja in interpolacija zveznih površin

je kritičen del procesa, saj lahko z neselektivno uporabo neprimernih filtrov izgubimo tudi mnogo detajlov površja, ki so predmet naše analize. Zato nekateri predlagajo uporabo popolnoma nefiltriranih podatkov.

Verjetno je najbolj smiselno ubrati srednjo pot, kar pomeni, da je smiselno uporabljati zadnji odboj, izbrisati pa le najbolj očitno in nepotrebno navlako; vsekakor pa je dobro imeti pri roki tudi surove, neprečiščene podatke.

Rezultat obdelave podatkov je običajno rastrska površina, ki zelo natančno opisuje površje ali tla in odraža tudi najmanjše variacije v topografiji (od nekaj centimetrov do nekaj deset centimetrov), ki so posledica geomorfoloških ali antropogenih procesov. Poglavitni cilj obdelave LiDAR podatkov je vizualiziranje, ojačanje in identifikacija pomenljivih sprememb v topografiji. Te operacije običajno izvedemo znotraj geografskih infor-

macijskih sistemov, ki ne omogočajo le interpoliranja, manipuliranja, analize in vizualizacije podatkov, temveč tudi integriranje s drugimi vrstami podatkov (zemljevidi, aerofotografije ipd.) in izdelavo novih, iz digitalnega modela terena izpeljanih slojev, bodisi s pomočjo analitičnih tehnik ali ročnega digitaliziranja.

Izredno količina podatkov, ki jo prinaša LiDAR (pri gostoti 1 točke na m<sup>2</sup> to pomeni milijon točk na kvadratni kilometer) še vedno najbolje obvladujemo s pomočjo vizualiziranja. Grafično prikazovanje, vizualizacija v različnih oblikah, je osnovna analitična tehnika pri analizi površin, izdelanih iz LiDAR podatkov. Običajno pri analizi rasterskih slojev velja pravilo, da so za prepoznavanje značilnosti potrebni vsaj 3 slikovni elementi (piksli).

LiDAR modele površine najpogosteje vizualiziramo kot analitično senčene površine, ki najbolje kažejo subtilne razlike v topografiji tudi znotraj večjih površin, kjer prevladujoči trendi zakrivajo lokalne razlike (sl. 2d).

Če smo pri analizi topografskih znakov na aerofotografijah omejeni s trenutno višino in smerjo sončnih žarkov ob snemanju (ki jih ne moremo poljubno spreminjati, temveč so odvisne od letnega časa in ure snemanja), lahko pri analitičnem senčenju rasterskih površin poljubno menjamo kot žarkov (višino sonca) kot smer, od koder prihajajo. Ustvarimo lahko celo animacijo, kjer vrednosti smeri ali naklona žarkov zvezno spreminjamo skozi čas ali pa površino osvetlimo iz različnih smeri z različnimi barvami svetlobe. Iz različnih smeri analitično senčena površja lahko združimo v eno površje s pomočjo rasterske algebre in izračunamo opisno statistiko za vsako rastersko celico. Na ta način dobimo senčene površine, ki nimajo ekvivalenta v naravi, nam pa omogočajo, da odkrivamo tudi najbolj subtilne razlike v reliefu.

Analitično senčenje dopolnjuje barvno kodiranje višin (sl. 2). Višine tako vizualiramo s pomočjo barvnih palet (*colour ramps*) bodisi s krčenjem kontrastov (*contrast stretch*) ali izenačenjem histogramov višin (*histogram equalization*). Pogosto je potrebno analize omejiti le na določen interval višin, ki predstavljajo le dele poplavne ravnice in teras, ki so pomembne za cilje študije. Na ta način ves razpon barvne palete uporabimo za najpomembnejši interval višin, a zanemarimo območja na robu intervala višin. Prosojne barvno kodirane modele površine lahko kombiniramo z analitično senčenimi površinami, tako da smo dobili barvno kodirane anali-

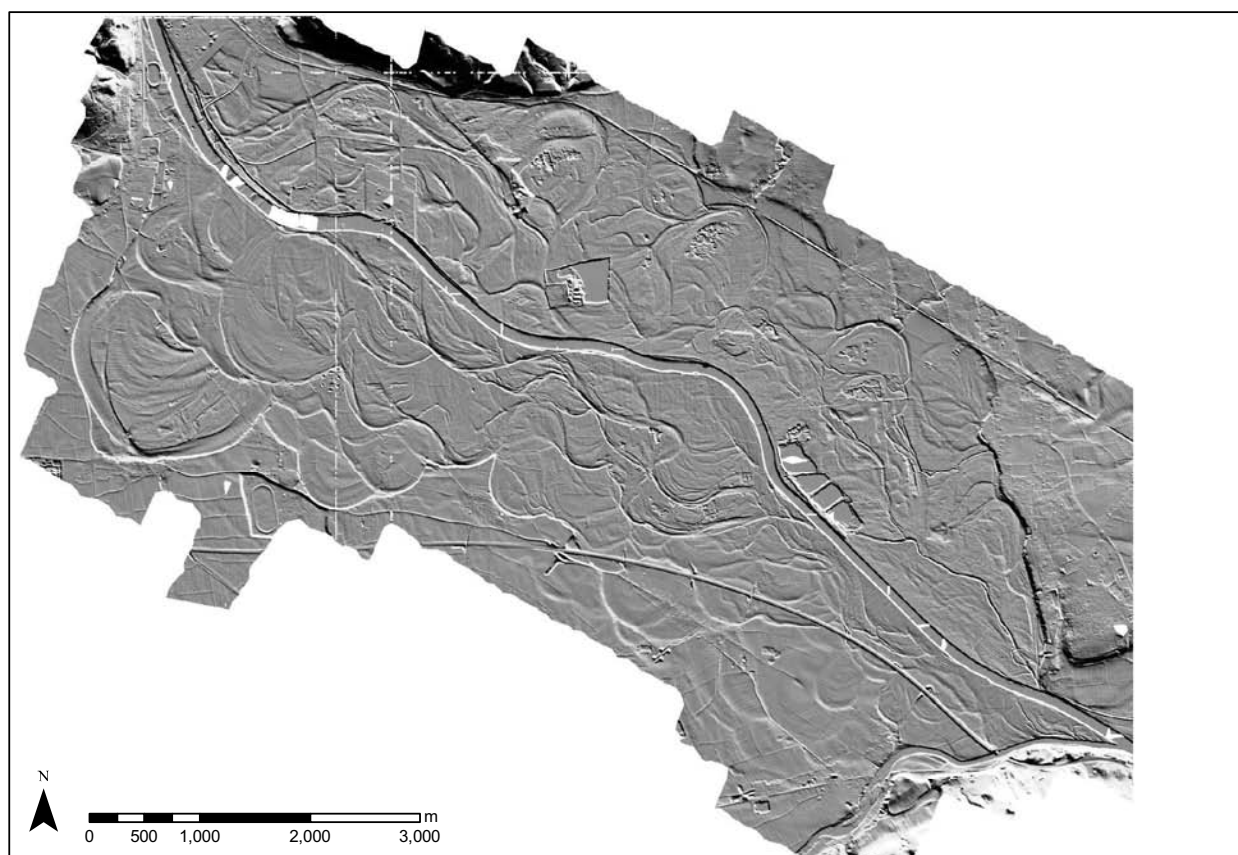
tično senčene površine.

Rastrske površine lahko prikazujemo v aksonometričnih ali perspektivnih tridimenzionalnih prikazih ali celo okoljih virtualne resničnosti, kamor se lahko potopimo (*immersive virtual reality*). Zelo učinkovit način vizualizacije drobnih razlik v višini je karta "odprtosti" in vidnosti neba iz posamezne rasterske celice (*skyview factor*; Kokalj et al. 2008).

Ker so rastrske površine, izdelane iz LiDAR podatkov, "le" zelo natančen model reliefa, lahko uporabimo ves nabor GIS orodij za analizo površin, kot so analiza naklonov in usmeritev rasterskih celic, analiza značilnosti površja (ukrivljenost, konveksnost, konkavnost, ...). Pri analizi poplavnih ravnice je zelo koristna izdelava presekov čez model, ki nam omogočajo identifikacijo zaporedja teras, oblike in relativne globine paleostrug. Gostota informacij o površju, ki nam jo ponuja LiDAR, prinaša precej možnosti, ki še niso bile izkoriščene. Ena izmed njih je analiza teksture površine. Agrarne aktivnosti, predvsem čiščenje površin in oranje teksturo površja zelo zmehčajo in zabrišejo sledove. Tako je moč zelo hitro ugotoviti ali so določene površine bile obdelovane, s primerjavo tekstur površin med seboj pa je moč celo ugotoviti, katera je bila bolj intenzivno ali dlje časa obdelovana.

Poleg informacij o višini površja LiDAR ponuja tudi informacijo o intenzivnosti odboja laserskega žarka (sl. 2b). Ker je valovna dolžina laserskega žarka, ki ga običajno uporablja LiDAR, v spektru blizu infrardeče svetlobe, lahko iz teh podatkov sestavimo skoraj infrardečo fotografijo površja. Novejše študije (Challis et al. 2006) kažejo, da je intenzivnost odboja (tudi) funkcija vlažnosti tal, kar pomeni, da je lahko sloj intenzivnosti odboja koristen pri identificiranju in kartiranju majhnih sprememb vlažnosti tal, ki so vzrok za oblikovanje vegetacijskih in barvnih znakov (*crop and soil marks*) arheoloških struktur ali vlažnih okolij z velikim potencialom za ohranjanje organskega materiala (kot so opuščena rečna korita, ...).

Kljub možnosti, ki jih ponujajo analitični moduli GIS pri obdelavi in analizi rasterskih površin, narejenih iz LiDAR podatkov, nas te možnosti ne smejo zavesti. Avtomatizirano luščenje geomorfoloških/ali arheoloških značilnosti s pomočjo različnih filtrov se je pokazalo kot neproduktivno (saj pogosto odkriva le najbolj očitne znake) ali celo nemogoče. Najhitrejši in najučinkovitejši



Slika 3. Analitično senčen digitalni model terena Vrbinine.  
Figure 3. Hill-shaded digital terrain model of the Sava floodplain (Vrbina).

način luščenja informacij je – podobno kot pri arheološki interpretaciji aerofotografij – analiza izkušenega analitika (prim. Barnes 2003).

Vektoriziranje, spreminjanje kontinuiranih rastrskih podatkov v diskretne vektorske je povezano z vrsto težav, ki izhajajo iz prevajanja kompleksnih geomorfoloških (in arheoloških) značilnosti iz kontinuiranih višinskih podatkov v diskretni vektorski sloj ali risbo. Vektorski sloji, pridobljeni z vektorizacijo LiDAR posnetkov, so tako v najboljšem primeru generalizirane interpretacije, ki lahko služijo zgolj za opozarjanje na nekatere značilnosti topografije in jih je potrebno uporabljati skupaj z originalnimi LiDAR podatki ali vsaj rastrskimi kartami, generiranimi iz LiDAR digitalnega modela površine.

Skozi dve študiji primerov si bomo pogledali, kako nam

LiDAR pomaga razumeti tafonomijo krajine.

### *Vrbina*

Vzhodni del Krške kotline, Krško polje, je v celoti prekrit s prodnimi savskimi zasipi, ki ležijo v superpoziciji ali neposredno na terciarnih sedimentih. Ločimo tri zasoje in štiri terase. Najmlajša terasa (t.i. Vrbina) je holocenska, vrezana v pleistocenske prodne zasoje, ki sestavljajo teraso iz zadnje ledene dobe (Verbič, Berič 1993-1994; Verbič 2004).

Cilj raziskave je bila tafonomija poplavne ravnice Save, predvsem identifikacija in kartiranje značilnosti poplavne ravnice in teras, s pomočjo katerih bi lahko ugotavljali poslednje spremembe pokrajine; ugotavljanje potenciala za ohranjanje arheoloških, paleoekoloških

zapisov in identifikacija prostorov, ki bi lahko bili zanimivi za preteklo poselitev.

Ker je bilo LiDAR snemanje opravljeno v okviru projekta izgradnje elektrarn na spodnji Savi, smo dobili že filtrirane in obdelane podatke, kar pomeni, da nismo imeli nadzora nad obdelavo podatkov, niti osnovnih informacij o prvem in zadnjem odboju in intenzivnosti odboja.

Tako smo dobljene podatke uporabili, kot da so model golih tal in jih nismo čistili z nadaljnjimi filtri, kljub temu, da je moč prepoznati še nekaj krajinske navlake, predvsem na urbanih območjih. Prav tako nismo imeli dostop do sloja intenzivnosti odboja laserskega žarka.

LiDAR ponuja zelo natančno sliko površja Vrbine (sl. 3). Gostota podrobnosti je preprosto osupljiva. Očitno je, da je holocenska poplavna ravnica zelo kompleksen palimpsest, pravi preplet prekrivajočih in sekajočih se opuščenih korit. Da bi razumeli in razčlenili ta palimpsest, smo se zatekli k historičnim kartam; upali smo, da bomo lahko nekatere od opuščenih korit prepoznali na historičnih kartah kot aktivne struge in jih tako uspeli datirati. Na ta način bi v zmedo paleostrug vnesli časovno globino in uspeli datirati nekatere od epizod preoblikovanja pokrajine.

Historične karte in druga poročila kažejo, da je bila Sava plovna reka z infrastrukturo, kot so vlečne poti, utrjene brežine in brodovi. Upali smo, da bomo del teh struktur prepoznali tudi na LiDAR posnetku. Vendar se je to izkazalo za skoraj nemogoče. Razen v zelo grobih obrisih ni mogoče niti en daljši odsek reke Save iz historičnih kart jasno prepoznati na LiDAR posnetku. Prepoznamo lahko le glavne koridorje toka reke Save in posamezne fragmente opuščenih korit. To pomeni, da je bila večina pokrajine v zadnjih dvesto letih močno preoblikovana ali uničena.

Dober primer obsega in intenzivnosti spremembe pokrajine v zadnjih 200 letih kaže primer vasi Zasavje. Zasavje je stalo v Vrbini v bližini Krške vasi. Leta 1781 je ob hudi povodnji Sava spremenila svoj tok in odnesla del vasi (Škofljanec 2001). Vas je bila delno opuščena, na historičnih kartah z začetka 19. stoletja so hiše še vrisane. Danes Zasavja na LiDAR posnetku ni moč več prepoznati. Prostor, kjer je nekoč stalo Zasavje, je prekrit z opuščenimi strugami, terenski pregledi pa so pokazali, da je nekaj ostankov le še na nekaj izoliranih

“otočkih”, dvignjenih površinah, ki so se jim rečna korita izognila (Mlekuz in Pergar 2009).

Je v Vrbini sploh še kaj ostalo? Je bila celotna pokrajina, skupaj z arheološkimi in paleoekološkimi zapisi uničena in odplavljena?

Prvi korak pri odgovoru na vprašanje je kartiranje značilnosti poplavne ravnice, predvsem opuščenih korit. Identificirati smo uspeli dve vrsti opuščenih korit. Prva, najbolj izražena in očitna so manj sinusoidna in ožja in izgledajo bolj “sveže”, saj so globlje vrezana v poplavno ravnico. Najdemo jih predvsem v osrednjem delu poplavne ravnice, kjer so popolnoma prekrila in izbrisala drugo vrsto opuščenih korit. Ta so običajno širša in bolj sinusoidna, skoraj meandrirajoča. Najdemo pa jih le na robovih, kjer jih mlajša, bolj ravna korita niso izbrisala.

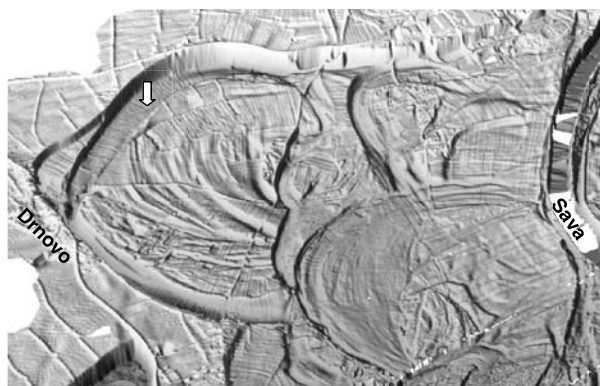
Očitno imamo opraviti z vsaj dvema fazama rečne aktivnosti: prva, starejša, za katero je značilna meandrirajoča oblika reke Save in druga, mlajša, za katero je značilen anastomozen tok.

Ostanki meandrov na starejših holocenskih terasah kažejo, da je Sava, preden je njen tok postal anastomozen, bila meandrirajoča reka, z najbrž bolj stabilno poplavno ravnico in morda bolj zanimiva za poselitev in izrabo. V poplavnih ravninah meandrirajočih rek z enim ali več aktivnih kanali je poselitev in izraba tipično vezana na območja, ki niso sezonsko poplavljeni, to so predvsem predvsem terase, otoki in obrežni nasipi (Brown 1997, 38). Največja nevarnost za poselitev so nepričakovane, katastrofalne poplave, ki lahko prestrukturirajo poplavno ravnico in preusmerijo tok reke. Žal so ostanki starejših poplavnih ravnin ohranjeni le v fragmentih.

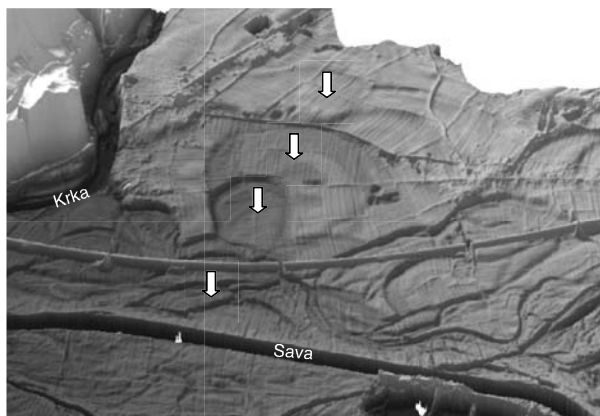
Tridimenzionalni podatki, ki jih ponuja LiDAR, nam omogočajo izdelavo presekov čez poplavno ravnico in prepoznavanje otokov, “krp”, dvignjenih nad poplavno ravnico, katerih površina je starejša od poplavne ravnice. Na ta način nam je uspelo identificirati na severnem delu študijskega območja, ob izhodu Save iz soteske, posledice dramatičnih migracij strug, ki

2 Meander pri Drnovem je najbrž erodiral del rimskega municipija Neviodunum in je tako porimske starosti, kar pa je v nasprotju z hipotezo izkopovalca, da je Neviodunum bil pristanišče ob Savi (Petru in Petru 1987). Če to opažanje drži, potem je potrebno ostanke “pristanišča” interpretirati drugače (morda kot forum). Dokončen odgovor na to vprašanje po ponudila šele posebna študija, ki bo vključevala tudi naravoslovna vzorčenja in datiranja sedimentov iz menadra.





Slika 4. Tridimenzionalni prikaz opuščenega meandra pri Drnovem (puščica).  
Figure 4. Three-dimensional visualization of palaeomeander near Drnovo (arrow).



Slika 5. Zaporedje holocenskih teras pri Krški vasi (puščice).  
Figure 5. Three-dimensional visualization of the sequence of the Holocene terraces near Krška vas (arrows).

so ustvarile serijo "otokov", izoliranih površin, dvignjenih nad poplavno ravnico. Najizrazitejši otok je pri Žadovinku, velik otok pa je tudi pri Drnovem (sl. 4).<sup>2</sup>

Uspeli smo identificirati tudi zaporedje vsaj treh holocenskih teras na robu poplavne ravnice v bližini Krške vasi, med seboj ločenih z meandrirajočimi opuščeni koriti (sl. 5). Te površine so tako starejše od moderne poplavne ravnice, ki je bila v zadnjih 200 letih močno preoblikovana in uničena. In prav na eni od teras smo ob pregledu LiDAR posnetka odkrili ostanke okrogle strukture z jarkom in dvignjenim osrednjim delom.

Druga značilnost, ki namiguje na starost krp in teras, je tekstura površja. Na starejših površinah so oranje in druge kmetijske aktivnosti zbrisale značilnosti

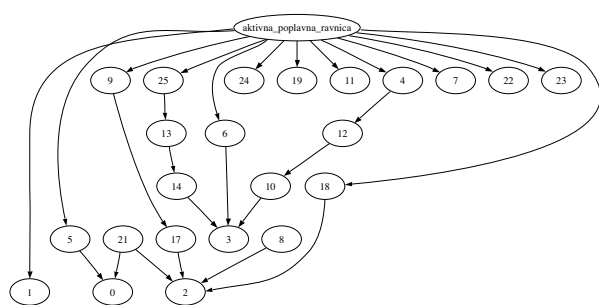
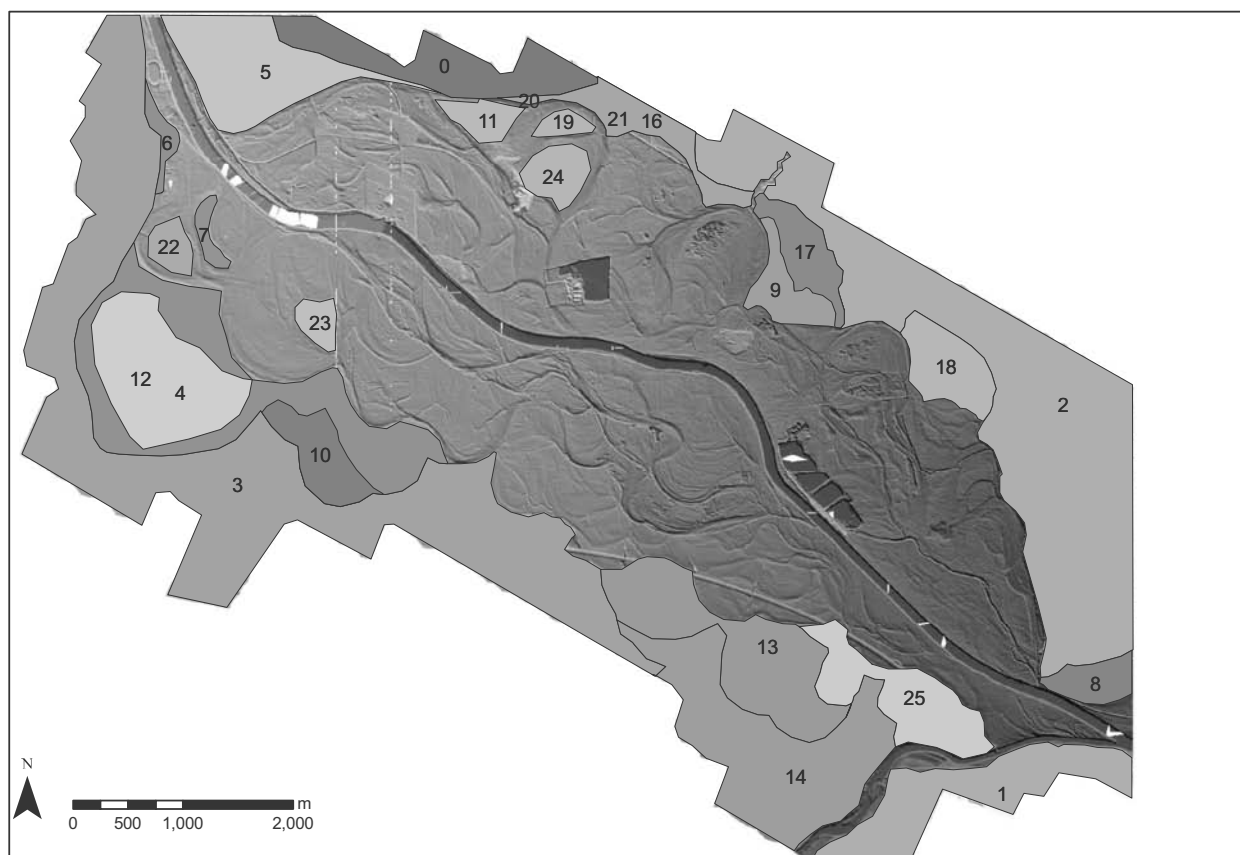
poplavne ravnice, kot so opuščena korita in ježe teras, ki jih je tu le težko prepoznati. Tekstura površja je tu očitno mehkejša od osrednjega dela poplavne ravnice, za katerega so značilna "sveža", globoko vrezana korita. Na podlagi teh analiz lahko poplavno ravnico Save razdelimo na krpe ali površine različne starosti z različnim potencialom za ohranjanje ostankov človeških aktivnosti ali paleoekoloških zapisov (sl. 6).

Cikli globinske erozije in lateralnih migracij reke Save so uničile ali preoblikovale večino poplavne ravnice. Večina Vrbine je bila uničena ali preoblikovana v zadnjih 200 letih in tu lahko pričakujemo kvečjemu zelo fragmentirane arheološke zapise. Starejše arheološke zapise lahko pričakujemo le na starejših površinah, kot so "otoki" v severnem delu Vrbine, in na holocenskih terasah v bližini Krške vasi. Dokončen odgovor o starosti teh površin bo ponudilo šele sistematično vzorčenje paleoekoloških zapisov in njihovo radiokarbonsko datiranje.

To seveda tudi pomeni, da je poplavna ravnica Save bila zelo dinamično in nestabilno okolje in tako verjetno manj zanimivo za stalno poselitev in kmetijstvo, kot je bila pleistocenska terasa. Sava na Krškem polju je v holocenu spremenila svoj tok iz meandrirajočega v anastomoznega, kot ga lahko prepoznamo na kartah iz 19. stoletja, in je vsaj trikrat poglobila (degradirala, Brown 1997, 34-36) poplavno ravnico. V tem procesu je vsaj v osrednjem delu uničila starejše površine. Fragmenti zaporedja starejših površin so ohranjeni na stiku s pleistocensko teraso in posameznih izoliranih "otokih" v zgornjem delu študijskega območja.

### Poplavna ravnica Ižice

Ljubljansko barje je obsežno mokrišče na stiku med Alpami in Dinaridi. Je tektonska depresija, zapolnjena z debelimi plastmi kvartarnih sedimentov. Za regijo je značilna močna tektonska aktivnost, ki sega od počasnega, dolgoročnega pogrezanja in dviganja do katastrofalnih potresov. Čeprav se Ljubljansko barje zdi brez posebnih značilnosti, je mozaik različnih ekosistemov in topografskih enot. Prekriva ga gosta rečna mreža. Najdbe kolišč v drugi polovici 19. stoletja so sprožile veliko zanimanje arheologov za regijo. Ljubljansko barje ima tako dolgo zgodovino arheoloških in paleoekoloških raziskav in je najbrž ena najintenzivneje raziskanih regij v Sloveniji.



Kljub množici raziskav, modelov in hipotez je vprašanje, ali je Ljubljansko barje v zgodnjem in srednjem holocenu prekrivalo jezero, še vedno aktualno. Je bilo Ljubljansko barje, preden ga je prekrila šota, stalno ali presihajoče jezero ali morda poplavna ravnica, prekrita z mrtvicami, jezerci in močvirji?

Ker nas je zanimalo bolj holistično razumevanje prazgodovinske pokrajine in razmerja med ohranjenimi arheološkimi zapisi in značilnostmi pokrajine, smo opravili pilotsko LiDAR (*Light Detection and Ranging*) merje-

Slika 6. Interpretacija digitalnega modela terena Vrbinje, kjer je poplavna ravnica razdeljena na krpe ali površine različne starosti z različnim potencialom za ohranjanje ostankov človeških aktivnosti ali paleoekoloških zapisov (zgoraj) in stratigrafsko sosledje površin (levo).

Figure 6. Taphonomical interpretation of the digital terrain model of the Vrbinja. The floodplain is divided into patches of different ages and different potential for preservation of cultural and paleoecological remains.

nje poplavne ravnice Iščice na območju, ki ga zaznamuje velika gostota prazgodovinskih arheoloških najdišč (detajlne študije poplavne ravnice Iščice so objavljene v Mlekuz et al. 2006; Budja, Mlekuz 2008a; Budja, Mlekuz 2008b).

Ižica izvira na južnem robu Ljubljanskega barja. Njeno obširno kraško porečje obsega Dinarske kraške planote južno od Ljubljanskega barja. Ižica je v vsem svojem toku reka z majhno energijo, nizkim padcem in obširno poplavno ravnico, kjer je odlagala drobnozrnate sedimente. Ižica je bila mobilna reka, ki je na svoji poplavni ravnici pustila sledove starejših rečnih korit. Te je na letalskih posnetkih mogoče prepoznati kot obsežne anomalije vegetacijskih znakov. Letalski posnetki tako

razkrivajo kompleksen palimpsest opuščenih rečnih korit, ki prekrivajo poplavno ravnico in pričajo o preteklih rečnih dinamikah. Rezultati LiDAR meritev jasno in natančno prikazujejo geomorfologijo študijskega območja in nam tako omogočajo, da razločimo detajle značilnosti poplavne ravnice in teras (sl. 7).

Tridimenzionalni podatki o površju omogočajo razločevanja njihovih stratigrafskih odnosov in izdelavo presekov čez pokrajino in opuščena korita. LiDAR tako ponuja precej bolj popolno in natančno sliko o geomorfologiji površja kot npr. tradicionalna aerofotografija in omogoča, da študijsko območje razdelimo na dve različno stari geomorfološki enoti. Najstarejša površina je terasa, vanjo pa je vrezana mlajša poplavna ravnica. Meja med njima je do 40 cm visoka ježa. Starejše površine so ohranjene le na starejši terasi, na mlajši terasi so uničene ali preoblikovane. Najočitnejša značilnost študijskega območja so plitve linearne depresije in ostanki opuščenih korit, ki so ohranjene tako na terasi kot v poplavni ravnici. Opuščena korita so različnih oblik in dimenzij. Nekatere so v očitni superpoziciji in pričajo o časovni strukturiranosti rečne aktivnosti.

S pomočjo stratigrafskih odnosov med opuščenimi koriti in ježo terase lahko prepoznamo vsaj štiri faze rečne aktivnosti. Za prvo, najstarejšo fazo, ohranjeno na terasi, so značilna ozka, malo vijugava, skoraj ravna korita, ki pričajo o anastomoznem toku Ižice in pritokov. Za drugo fazo so značilna široka in manj vijugava korita anastomoznega rečnega toka, ki sekajo korita prve faze. Tudi ta faza je ohranjena le na terasi.

Prehod v tretjo fazo zaznamuje globinska erozija (degradacija) poplavne ravnice Ižice in nastanek aktivne, nižje poplavne ravnice. Poglobitev poplavne ravnice je uničila del površine starejše terase z morebitnimi arheološkimi in paleoekološkimi zapisi. Rezultat procesa je dobro vidna ježa terase.

Tok Ižice je postal bolj vijugav, celo meandrirajoč, korita so bočno erodirala po poplavni ravnici. Najočitnejša sled tega procesa so meandrske sipine in žlebovi poplavnih voda. Zadnja, najmlajša faza je moderna rečna mreža, rezultat regulacijskih del zadnjih stoletij.

Spremembe toka reke iz anastomoznega v vijugav in meandrirajoč ter degradacija poplavne ravnice Ižice kažejo na velike spremembe v hidrološkem režimu v porečju Ižice v preteklosti.

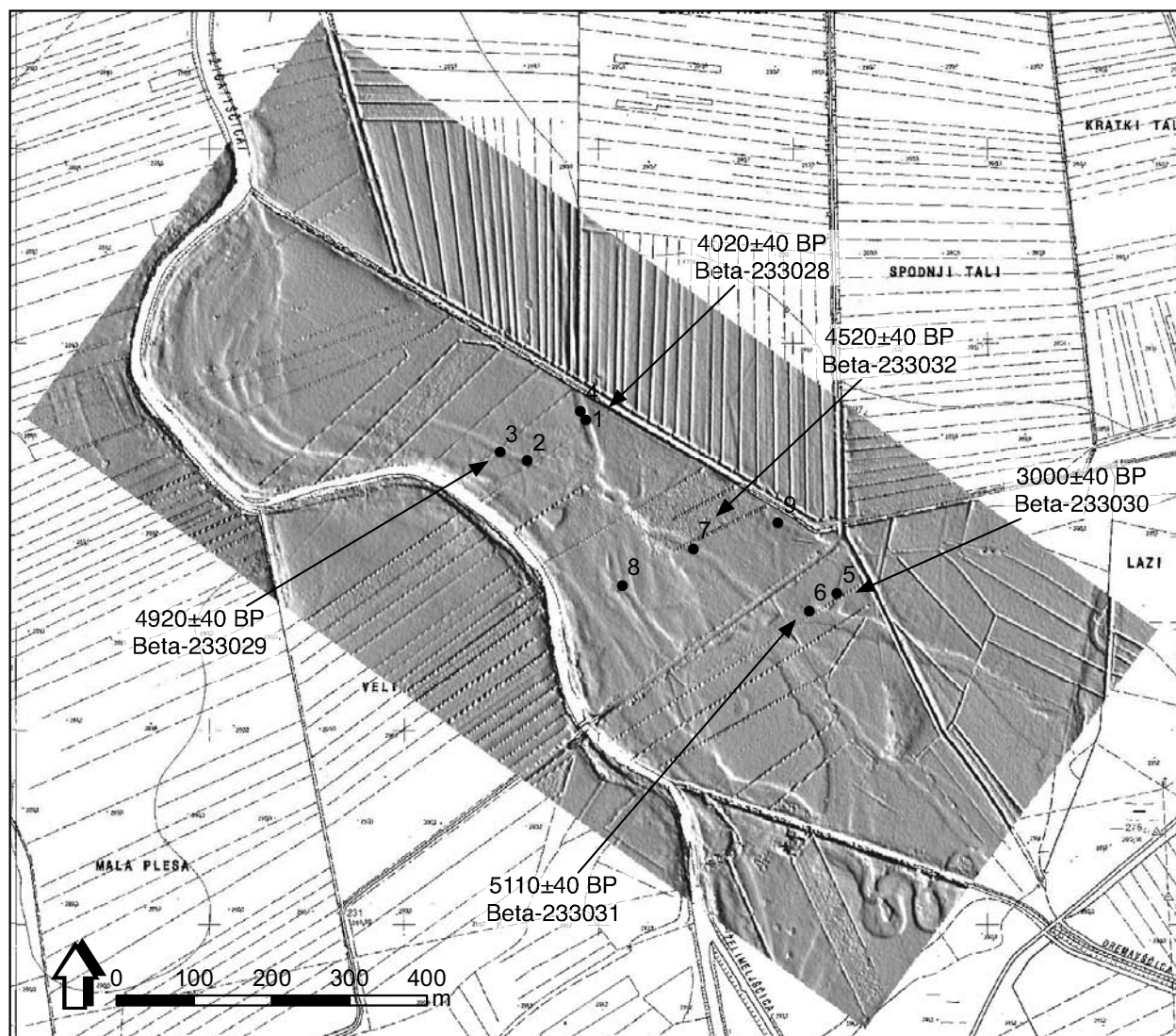


Slika 7. Tridimenzionalni prikaz dela digitalnega modela terena poplavne ravnice Iščice. Zelo dobro je moč razločiti starejšo teraso, razčlenjeno z opuščenimi koriti. Videti je celo moč obrežne nasipe ob koritih.

Figure 7. Three-dimensional visualization of the digital terrain model of the Iščica floodplain. Holocene terrace with palaeochannels is visible in high detail, even channel levees can be discerned.

Sistematično kartiranje poplavne ravnice s pomočjo LiDAR nam je omogočilo izbor točk za neposredno absolutno datiranje opuščenih rečnih korit in faz rečne aktivnosti (sl. 8). Točke za vrtnice smo izbrali na podlagi LiDAR posnetka in terenskih ogledov. Radiokarbonski datumi organskih sedimentov v polnilu strug postavljajo čas opustitve korit prve faze v čas med 2300 in 4000 BC, kar pomeni, da je vsaj od leta 4000 BC poplavna ravnica Iščice bila aktivna poplavna ravnica in ne jezero. Sočasnost datumov s kolišča Maharski prekop z datumi opuščenih korit kaže, da so "kolišča" stala na bregovih rek.

Rečna aktivnost je razbila pokrajino v mozaik različno starih površin. Večina "kolišč" se nahaja na teh otokih, ali natančneje, na naravnih vrezih, ježah teras in robovih paleostrug. To ima pomembno posledico za vidnost arheološkega zapisa. Najdišča brez trdnih struktur (kolov) so veliko verjetneje uničena ali preoblikovana ali nevidna (prekrita z sedimenti) kot najdišča s koli, ki se ohranjajo in so bolj vidna. Tako se zdi, da so "kolišča" ali najdišča z ohranjenimi vertikalnimi koli v arheološkem zapisu preveč zastopana.



Slika 8. Analitično senčen digitalni model terena poplavne ravnice Iščice z absolutno starostjo opuščenih rečnih korit prve faze (po Budja, Mlekuz 2008, slika 1).

Figure 8. Hillshaded digital terrain model of the Iščica floodplain with the absolute dates for paleochannel fills (after Budja, Mlekuz 2008, Figure 1).

Poplavna ravnica Ižice je bila v preteklih tisočletjih dinamična, zaradi delovanja rek močno preoblikovana pokrajina. Na LiDAR posnetku je mogoče jasno razločiti površino starejše terase in sledove stratificiranih opuščenih rečnih korit, ki so strukturirali pokrajino, ponujali okolje za poselitev in bivanje in preoblikovali vzorec vidnosti arheološkega zapisa.

### Zaključek in sklep

Študij preteklih pokrajin ali njihova zaščita je brez razumevanja tafonomije pokrajine preprosto naivna. Študij tafonomije arheoloških krajin nam omogoča odgovoriti na vprašanja, kot so: Kaj vidimo v pokrajini? Zakaj vidimo le to, kar vidimo? Kaj manjka? Kaj je bilo uničeno? Kaj je morda še skrito?

LiDAR nam omogoča zelo natančno dokumentiranje

površja Zemlje. Tridimenzionalni podatki velike ločljivosti pomenijo preskok kvantitete v novo kvaliteto, saj omogočajo nov, zelo jasen pogled na poplavne ravnice in njihove značilnosti. Skozi sledenje in iskanje razmerij med palimpsestom tafonomskih sledi, vtisnjenimi v površje, lahko identificiramo zaporedje preoblikovanj pokrajine skozi cikle erozije in akumulacije in razumemo zgodovino krajine.

Z LiDARjem tako ne vidimo "zgolj" površja, ampak lahko razberemo tudi časovno globino poplavne ravnice. V zelo dinamičnih okoljih, kot je poplavna ravnica Save, je arheološka raba LiDAR posnetkov prej omejena na identifikacijo uničenja in sprememb v pokrajini, kot na identificiranje arheoloških struktur in kulturne krajine. LiDAR nam iz palimpsesta destrukcij, preoblikovanj in sprememb poplavne ravnice pomaga izluščiti prostore, kjer so starejše površine/krajine bolje ohranjene in ki imajo boljši potencial za ohranjanje arheoloških in paleoekoloških zapisov in kulturne krajine.

Drugače je v poplavnih ravninah rek z nizko energijo in majhnim padcem kot je Iščica na Ljubljanskem barju. Tam so epizode erozije in akumulacije mnogo manj dramatične, tako da je na LiDAR posnetkih moč razločiti površino starejše terase in sledove stratificiranih opuščanih rečnih korit, ki so strukturirali pokrajino, ponujali okolje za poselitev in bivanje in preoblikovali vzorec vidnosti arheološkega zapisa.

LiDAR tako ponuja nov način opazovanja poplavnih ravnin, s katerim lahko prepoznamo sledove uničenja, preoblikovanja in sprememb poplavne ravnice in krpe ohranjenih starejših pokrajin, kjer so arheološki in naravoslovni sledovi morda še ohranjeni.

Seveda je LiDAR le orodje, ki je učinkovito šele ko ga kombiniramo z drugimi pristopi, bodisi klasičnimi arheološko krajinskimi, geoarheološkimi ali naravoslovnimi. Vendar LiDAR tudi tu prinaša novo kvaliteto: preko velikih površin, ki jih pokriva in z jasno sliko površja nam omogočajo, da vidimo pokrajine kot celote in se ne ukvarjamo zgolj z izoliranimi fragmenti zapisov brez kontekstualnih povezav med njimi samimi in širšo pokrajino.

## Zahvale

LiDAR snemanje Ljubljanskega barja smo opravili v okviru projekta Spreminjanje arheološke krajine Ljubljanskega barja (J6-6013 pri Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo), ki ga je vodil prof. Mihael Budja z Oddelka za arheologijo Filozofske fakultete, Univerze v Ljubljani. LiDAR podatke za Krško polje smo pridobili v kontekstu predhodnih arheoloških raziskav na vplivnem območju načrtovanih posegov za HE Brežice, ki ga je naročil Holding Slovenske elektrarne d.o.o in izvajal Zavod za varstvo kulturne dediščine, OE Ljubljane v sodelovanju s Oddelkom za arheologijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani.

*Floodplains in a New Light: LiDAR and the Taphonomy of Alluvial Landscapes*  
(Summary)

The paper presents two examples of a taphonomical approach to alluvial landscapes. It develops the argument that although LiDAR (Light Detection and Ranging) deals with the Earth's surface alone, it is nevertheless an important tool in understanding landscape development and modification, as it gives us an immense level of detail, which can help us in understanding how the past landscape was reworked and modified.

Taphonomy is a term which derives from paleontology and it is often seen as the study of the loss of information. However even the loss of information, the modification or destruction of the part of the landscape is in fact new information, a new episode in landscape history. Landscape taphonomy is therefore an essential part of the study of landscape change, especially in alluvial landscapes, where the landscape is acted upon by a series of partially overlapping depositional and postdepositional processes of widely varying scales. These processes combine the products of different episodes; they blur or sharpen their apparent boundaries. These effects are important, for they determine where we see the traces of past human activity or past landscapes and what these traces or past landscapes look like. They also may be responsible for the fact that we think we see sites at all in many places.

Landscape taphonomy therefore deals with the questions such as What is missing in the landscape? What was destroyed? What has survived?

LiDAR is an excellent tool for the investigation of stable, fossilized landscapes, where the palimpsest of human activities is impressed onto the surface of the landscape.

Its use is in alluvial environments, where natural processes of erosion and deposition dwarf human agency, is not as straightforward or as spectacular.

The first case study presents the Holocene floodplain of the Sava river on the Krško polje. The interpretation of LiDAR images demonstrates that cycles of erosion and lateral migrations of the Sava river destroyed and reworked most of the floodplain.

Most of the Holocene floodplain has been destroyed and reworked in the past 200 years; no remains of past

human activities can be identified or expected. Only patches of past, stable surfaces are preserved and they are located mainly on the edges of the floodplain. It is only there that preserved archaeological remains can be expected.

However, this means that the Sava floodplain was a very dynamic and unstable environment, and therefore probably not as interesting for settlement and agriculture as the Pleistocene terrace.

The second case study investigates the Iščica plain in the Ljubljansko barje.

The Iščica floodplain was a complex landscape, greatly affected by fluvial activity. LiDAR images of the microregion clearly demonstrate a pattern of stratified palaeochannels that structured the landscape, provided the context for human settlement and habitation and restructured the visibility of the archaeological record.

Thus LiDAR helps us to understand how the taphonomy of the landscape structured the pattern of visible archaeological sites, allows us to put the archaeological sites in the wider landscape context and map them against floodplain features. Radiocarbon dates of palaeochannel fills suggest that prehistoric "pile dwellings" were not located on a shallow lake, as the traditional view suggests, but were located next to the active streams, which frequently changed their course.

Although LiDAR sees only the Earth's surface, the level of detail it provides helps us enormously in the identification of past events, which reworked the landscape. Very detailed three-dimensional elevation data literally gives us "new insight" in the identification and mapping of floodplain features.

It is clear that LiDAR is particularly effective for mapping features of mature, middle reach floodplains, dominated by lateral channel movement and desiccating peat dominated wetlands/floodplains. However, it is less effective in river valleys, which are dominated by rapid erosion and little survival of paleolandscape features.

LiDAR gives us new opportunities for the recognition of episodes of destruction, reworking and modification of floodplains and helps us to identify stable parts of the landscape, older, preserved surfaces with the potential for the preservation of archaeological and environmental remains.

### Literatura

- BARTON, C. M., J. E. AURA, O. GARCIA, N. LA ROCA 2002, Dynamic landscapes, artifact Taphonomy and Landuse Modeling in the Western Mediterranean. – *Geoarchaeology: An International Journal* 17(2), 155–190.
- BARNES, I. 2003. Aerial remote-sensing techniques used in the management of archaeological monuments on the British army's Salisbury Plain training area, Wiltshire, UK. – *Archaeological Prospection* 10, 83-90.
- BEHRENSMEYER, A. K., A. P. HILL 1985, Taphonomy's contribution to the paleobiology. – *Paleobiology* 11, 105–119.
- BAWLEY, R. H., C. A. CRUTCHLEY, C. A. SHELL 2005, New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site.– *Antiquity* 79, 636–647.
- BROWN, A. G. 1999, *Aluvial geoarchaeology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- BUDJA, M., D. MLEKUŽ 2008a, Poplavna ravnica Ižice in prazgodovinska "kolišča". – *Arheološki vestnik* 59, 459–370.
- BUDJA, M., D. MLEKUŽ 2008b, Settlements, landscape and palaeoclimate dynamics on the Ižica floodplain of the Ljubljana Marshes. – *Documenta praehistorica* 35, 46–54.
- CHALLIS, K. 2005, Airborne Lidar: A Tool for Geoarchaeological Prospection in Riverine Landscapes. – V: H. STOEPKER (ur.), *Archaeological Heritage Management in Riverine Landscapes*. Rapporten Archeologische Monumentenzorg, 126, 11–24.
- CHALLIS, K. 2006 Airborne laser altimetry in alluviated landscapes. – *Archaeological Prospection* 13, 103-127.
- CHALLIS, K., A. J. HOWARD, D. MOSCROP, B. GEAREY, D. SMITH, C. CAREY, A. THOMPSON 2006, *Using Airborne Lidar Intensity to Predict the Organic Preservation of Waterlogged Deposits*. – Predavanje na konferenci "From space to place", Rim, 4.-6.december 2006.
- CHARLTON, M. E., A. R. G. LARGE, I. C. FULLER 2003, Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland, UK. – *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 299–306.
- COBBY, D. M., D. C. MASON, I. J. DAVENPORT 2001, Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 56, 121-138.
- COLLEY, S. M. 1990, Humans as taphonomic agents. – V: S. SOLOMON, I. DAVIDSON in D. WATSON (ur.), *Problem solving in taphonomy*, vol. 2. Tempus, 50–64.
- EFREMOV, I. A. 1940, Taphonomy: a new branch of paleontology. – *Pan-American geologist*, 74(2): 81–93.
- HOWARD, A.J., M.G. MACKLIN 1999, A generic geomorphological approach to archaeological interpretation and prospection in British river valleys: a guide for archaeologists investigating Holocene landscapes. – *Antiquity* 73, 527–541.
- INGOLD, T. 2000, *The preception of the environment*. Routledge, London.
- JONES, A.F., P.A. BREWER, E. JOHNSTONE, M. G. MACKLIN 2007, High-resolution interpretative geomorphological mapping of river environments using airborne LiDAR dara. – *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 1574-1592.
- KNIGHTON, D. 1998, *Fluvial forms and processes*. Hodder Education, London.
- KOKALJ, Ž., K. OŠTIR, K. ZAKŠEK, 2008, Uporaba laserskega skeniranja za opazovanje preteklih pokrajin - primer okolice Kobarida. – *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008*, (GIS v Sloveniji, 9). Ljubljana: Založba ZRC, 321-329.
- LOHANI, B., D.C. MASON 2001, Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 56, 100-120.
- MARKS, K., BATES 2000, Integration of highresolution topographic data with floodplain flow models. – *Hydrological Processes* 14, 2109-2122.

MLEKUŽ, D., M. BUDJA, N. OGRINC 2006, Complex settlement and the landscape dynamic of the Iščica floodplain (Ljubljana Marshes, Slovenia). – *Documenta Praehistorica* 33, 253-271.

MLEKUŽ, D., M. PERGAR 2009, *Poročilo o ekstenzivnih in intenzivnih arheoloških pregledih na območju gradnje hidroelektrarne Brežice*. – Neobjavljeno poročilo, Zavod za varstvo kulturne dediščine, OE Ljubljana, Ljubljana.

PETRU, S., P. PETRU 1987, *Neviodunum* (Drnovo pri Krškem). Katalogi in monografije 15. Narodni muzej Slovenije, Ljubljana.

SKABERNE, D. 1995, Rečni sistemi in njihovi sedimentacijski modeli. – *Geologija* 37/38, 251-26.

ŠKOFLJANEC, J. 2001, Savska poplava leta 1781. - *Rast* XII št. 2 (74), 205-208

VAN ANDEL, T. H., C. N. RUNNELS 1996, The earliest farmers in Europe. – *Antiquity* 69, 481-500.

VERBIČ, T., B. BERIČ, 1994, Struge reke Save med Krškim in Brežicami v 19. stoletju. – *Proteus* 56, 327-333.

VERBIČ, T. 2004, *Stratigrafija kvartarja in neotektonika vzhodnega dela Krške kotline*. 1. del: stratigrafija. - Razprave IV razreda SAZU XLV-3, 171-225.

---