

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski strokovni študij  
geodezije, Geodezija v inženirstvu

Kandidatka:

**Metka Ivnik**

# **Geodetske meritve pri analizi padanja kamenja**

**Diplomska naloga št.: 316**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

**Somentor:**

doc. dr. Mihael Ribičič

Ljubljana, 2010

<b>VSEBINA</b>	<b>stran</b>
<b>KAZALO VSEBINE .....</b>	<b>I</b>
<b>KAZALO SLIK .....</b>	<b>III</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>	<b>V</b>
<b>IZJAVA O AVTORSTVU .....</b>	<b>VII</b>
<b>ZAHVALA .....</b>	<b>IX</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>	<b>X</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION .....</b>	<b>XIII</b>

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1	Cilji in potek dela .....	3
1.2	Definicije in pojmi.....	4
<b>2</b>	<b>TEORETIČNE OSNOVE PADANJA KAMENJA .....</b>	<b>9</b>
2.1	Mehanika padanja kamenja .....	11
2.2	Vrste simulacijskih modelov .....	15
2.2.1	Analitični procesni modeli.....	16
2.3	Zaščitni ukrepi .....	21
<b>3</b>	<b>MERSKE METODE .....</b>	<b>24</b>
3.1	Enostavne meritve .....	25
3.2	Klasična terestrična izmera.....	27
3.2.1	Polarna metoda .....	27
3.2.2	Presečno snemanje (snemanje v profilih) .....	30
3.3	GNSS izmera .....	31
3.4	Terestrično 3R lasersko skeniranje.....	34
3.4.1	Uvod .....	34
3.4.2	Osnovni elementi terestričnih laserskih skenerjev.....	36
3.4.3	Izsledki meritev .....	40
3.4.4	Načrtovanje zajema: .....	41
3.4.5	Zaključki.....	43
3.5	Druge geodetske metode .....	44
3.5.1	Ortofoto .....	44
3.5.2	LIDAR.....	48
3.6	Vidiki pri izbiri metode .....	50
<b>4</b>	<b>PRAKTIČNI PRIMERI.....</b>	<b>54</b>
4.1	Terestrično lasersko skeniranje skalnega podora pod slapom Čedca nad Jezerskim.....	55

4.1.1	Uvod .....	55
4.1.2	Terenski zajem podatkov in modeliranje trenutnega stanja .....	56
4.1.3	Izdelava 3R območja sedanjega stanja.....	60
4.1.4	Pridobitev stereoparov ter fotogrametrično izvrednotenje topografskih podatkov stanja območja pred trenutkom podora za potrebe določitve 3R ploskovnega modela takratnega stanja	62
4.1.5	Izdelava modela stanja območja pred trenutkom podora.....	64
4.1.6	Izračun spremembe volumna med ploskvijo stanja pred in po podoru za potrebe izračuna ocene količine sproženega materiala.....	66
4.1.7	Prečni in vzdolžni prerezi predhodnega in sedanjega stanja.....	70
4.1.8	Zaključki projekta .....	71
4.2	Projekt zaščite zaščite ceste G2 102/1040 Peršeti–Most na Soči pred padanjem kamnov na območju pod Ključem.....	71
4.2.1	Geodetski posnetek prečnih profilov stene Ključ pri Mostu na Soči .....	72
4.3	Projekt zaščite regionalne ceste št. 403 Podbrdo-Kneža pred padanjem skal in kamnov na območju Klonte .....	74
4.3.1	Uvod .....	74
4.3.2	Geološko poročilo (povzetek).....	75
4.3.3	Geodetski posnetek obstoječega stanja in DMV.....	78
4.3.4	Opredelitev sanacijskih ukrepov s pomočjo modeliranja padanja kamenja.....	81
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>VIRI .....</b>	<b>92</b>
	<b>PRILOGE.....</b>	<b>97</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Vrste skalnih podorov (Hoek & Bray, 1977; Ribičič & Vidrih, 1998c).....	8
Slika 2: Skalni okruški na nezavarovanem delu ceste. ....	9
Slika 3: Stabilitetna karta severozahodnega dela Slovenije s štiristopenjsko oceno možnosti nastanka podorov. Legenda: velika (rdeča), srednja (temno modra), majhna (svetlo modra), ni možnosti (bela). ....	10
Slika 4: Padajoči kamen (foto: Ivnik M.). ....	11
Slika 5: Značilna trajektorija za gmoto, težko 1000 kg (Ribičič, 2002, po Hoek-u, 2000). ....	12
Slika 6: Način gibanja kamna v odvisnosti od nagiba brežine (Ribičič, 2002, po Ritchie-ju, 1963). ....	13
Slika 7: Primer "smučarske skakalnice" (Ribičič, 2002). ....	14
Slika 8: Nema priča – primer skale, ki leži na brežini (foto: Ivnik M.). ....	17
Slika 9: Diagram poteka simulacije gibanja (Spang, 2003). ....	20
Slika 10: Dinamična varovalna ograja (foto: Ivnik M.). ....	21
Slika 11: Detajl dinamične varovalne ograje.....	22
Slika 12: Zadržana skala.....	22
Slika 13: Zavorni obroči pri 1.000 kJ sistemu (foto: Ivnik M.). ....	22
Slika 14: Povsem zapolnjena varovalna ograja, ki ni več funkcionalna. ....	23
Slika 15: Suunto tandem (www.navigator.si). ....	25
Slika 16: Leica DISTO D8 (www.surveyequipment.com). ....	26
Slika 17: Izhodiščna točka.....	26
Slika 18: Točke vzdolž profila. ....	26
Slika 19: Višinska razlika in horizontalna razdalja do točk.....	27
Slika 20: Profil terena.....	27
Slika 21: Princip polarne metode izmere (www.geoservis.si). ....	28
Slika 22: Leica TPS1200. ....	29
Slika 23: Princip presečnega snemanja.....	30
Slika 24: Leica GPS 1200.....	32
Slika 25: Omrežje permanentnih postaj SIGNAL (www.geoservis.si). ....	33
Slika 26: Permanentna postaja v Bovcu (www.geoservis.si). ....	33
Slika 27: Oblak točk. ....	35
Slika 28: Vidno polje 360° x 310° pri HDS600 (www.leica-geosystems.com). ....	38
Slika 29: Tarče za 3R lasersko skeniranje in skenirana tarča (www.leica-geosystems.com). ....	39
Slika 30: Odbojnost različnih površin. ....	40
Slika 31: Merjenje z izhodiščem v centru skenerjevega koordinatnega sistema. ....	40
Slika 32: Inštrument med delom - levo in skenogram skalne stene - desno (www.riegl.com). ....	43
Slika 33: Ortofoto DOF050. ....	45
Slika 34: Topografska karta (DTK 5). ....	45
Slika 35: Grafični prikaz izdelanih listov DOF050. ....	46
Slika 36: Digitalni model višin (www.adventurehistory.com). ....	46
Slika 37: Shema laserskega skeniranja (www.flycom.com). ....	49
Slika 38: LIDAR – prvi odboj. ....	50
Slika 39: Zadnji odboj predstavlja površje terena. ....	50



---

Slika 40: Območje podora. ....	56
Slika 41–42: Terenska oprema .....	57
Slika 43: Prikat treh različnih koordinatnih sistemov (skenerjev, projektni in globalni).....	58
Slika 44: Lokacije stojišč laserskega skenerja. ....	59
Slika 45: Shema oktalnega drevesa.....	61
Slika 46: Združen oblak točk z dodanimi RGB vrednostmi. ....	61
Slika 47: 3R model sedanjega stanja. ....	62
Slika 48: Točke in 3R model DMR. ....	63
Slika 49: Primer posnetka terena .....	64
Slika 50: Prikaz točk in karakterističnih linij terena, pomočjo katerih je bila referenčna ploskev teren izboljšana. ....	65
Slika 51: 3R model popravljenega DMR-ja.....	65
Slika 52: Odstopanja DMR-ja glede na popravljeni DMR. ....	66
Slika 53: Območje računanja spremembe volumnov.....	67
Slika 54: Vzдолžni prerez za določitev ožjega območja interesa. ....	67
Slika 55: Prejšnje in sedanje stanje terena. ....	68
Slika 56: Odstopanja med stanjem pred in po podoru. ....	69
Slika 57: Razlike modelov. ....	69
Slika 58: Vzдолžni prerezi terena pred in po podoru. ....	70
Slika 59: Prečni prerezi terena pred in po podoru.....	70
Slika 60: Dolvodni pogled na obravnavani odsek. ....	72
Slika 61: Izbrana vzдолžna profila. ....	73
Slika 62: Elektronski tahimeter SOKKIA 3030R3. ....	73
Slika 63: Podor skalnih blokov marca 2008. ....	76
Slika 64: Poškodbe cestišča po podoru. ....	76
Slika 65: Obravnavano območje Klonte (foto: Ribičič M.).....	77
Slika 66: Kritična območja padajočega kamenja na brežini Klonte. ....	78
Slika 67: Parametri uporabljene kamere. ....	79
Slika 68: Izbrani profili.....	83
Slika 69: Profil št. 2. ....	84
Slika 70: Trajektorije gibanja skal na profilu št. 2. ....	85
Slika 71: Histogram lokacij mest ustavljanja skal. ....	85
Slika 73: Histogram spreminjanja kinetične energije skale vzдолž poti potovanja. ....	86
Slika 72: Histogram višine odbijanja skal od podlage. ....	86
Slika 74: Simulacija gibanja skal z lovilno ograjo.....	87
Slika 75: Kinetična energija za skalo, težko 4.320 kg. ....	87
Slika 76: Shematski prikaz varovalnega sistema. ....	89

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Poglavitni vzroki in povodi podorov (Zorn, 2002b) .....	6
Preglednica 2: Kvantitativna opredelitev podorov glede na prostornino in dolžino odlomnega roba (Zorn, 2002b) .....	7
Preglednica 3: Tangencialni $R_t$ in normalni koeficient odboja $R_n$ ter koeficient trenja $\mu$ .....	18
Preglednica 4: Položajna natančnost točk glede na doseg skeniranja.....	37
Preglednica 5: Priporočljive oddaljenosti skenerja od objekta za doseganje želene natančnosti in ločljivosti. ....	42
Preglednica 6: Seznam stojšč inštrumenta s koordinatami v državnem koordinatnem sistemu .....	58
Preglednica 7: Vrednosti odbojnih koeficientov. ....	83

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana METKA IVNIK izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
“GEODETSKE MERITVE PRI ANALIZI PADANJA KAMENJA”.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske  
separatoteke FGG.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, maj 2010

---

(podpis)

## **ZAHVALA**

*Pri izdelavi diplomskega dela se za strokovno pomoč, prijaznost in nesebične nasvete iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Dušanu Kogoju in somentorju izr. prof. dr. Mihaelu Ribičiču.*

*Najlepša hvala podjetju DFG Consulting, d.o.o., ki mi je s posredovanimi podatki omogočilo prikaz terestričnega laserskega skeniranja skalnega podora pod slapom Čedca, Andreju Grilcu GRANGEO, d.o.o. za ortofoto načrt in geodetski posnetek območja Klonte, Marku Valiču VGP PROJEKT, d.o.o. za geodetski posnetek brežine Ključ ter Domnu Lajevecu in Darju Durjavi EHO PROJEKT, d.o.o. za prijazno pomoč pri podatkih projekta zaščite ceste na območju Klonte.*

*Hvala slavistki Jožici Koder za lektoriranje diplomske naloge.*

*Posebna zahvala tudi možu, sinovoma in staršema za vso podporo in razumevanje, ki so mi ju izkazali v času študija.*

*Na koncu naj se zahvalim še Rudiju Korošču in vsem ostalim, ki so mi kakorkoli pomagali pri študiju, pa jih nisem omenila.*

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>528.624.131.5(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Metka Ivnik</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Dušan Kogoj,</b>
<b>Somentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Mihael Ribičič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Geodetske meritve pri analizi padanja kamenja</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>91 str., 7 pregl., 76 sl., 10 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>podor, padajoče kamenje, merske metode, klasična terestrična izmera, GNSS izmera, terestrično lasersko skeniranje, ortofoto, matematično modeliranje, slap Čedca, Klonte, Ključ</b>

### **Izvilleček**

Obravnava podorov v kamninah, s poudarkom na padajočem kamenju, se začne s pregledom izrazoslovja na tem področju. Nadaljuje se s teoretičnimi osnovami podornih pojavov, opisov vzrokov za njihov nastanek in mehanike padanja kamenja. Poseben praktični problem predstavlja modeliranje padanja kamenja, zato so v nadaljevanju na kratko opisani razpoložljivi računalniški modeli, ki se uporabljajo za analizo potovanja kamninskih gmot po pobočju. Sledi opis tehničnih ukrepov za zaščito pred padajočim kamenjem, predvsem uporaba dinamičnih varovalnih ograj in njihovo delovanje.

Osrednji del naloge predstavlja pregled različnih merskih metod, ki se uporabljajo pri analizi padanja kamenja. Pomembni vhodni podatki za izračun simulacije padajočega kamenja so vzdolžni karakteristični profili terena, ki jih izdelamo v izbranem merilu. Posebej so opisane osnovne značilnosti merskih metod, in sicer meritev s preciznim kompasom in naklonomerom, klasičnih terestričnih geodetskih meritev, GNSS meritev in terestričnega laserskega skeniranja. Na kratko je predstavljeno brezkontaktno pridobivanje podatkov s pomočjo helikopterja ali letala ob uporabi fotogrametrije in uporaba podatkov letalskega

snemanja za ortofoto podlage območja Slovenije. Predstavljeni so tudi vidiki pri izbiri najprimernejše merske metode.

Nalogo zaključujem s praktičnim delom, kjer so podani primeri uporabe geodetskih meritev v praksi. Geodetski posnetek je namreč osnova za izdelavo projekta zaščite pred padajočim kamenjem. Prikazano je tudi modeliranje padanja kamenja z računalniškim programom RockFall.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 528.624.131.5(043.2)  
**Author:** Metka Ivnik  
**Supervisor:** assoc. prof. dr. Dušan Kogoj  
**Cosupervisor:** assoc. prof. dr. Mihael Ribičič  
**Title:** Geodetic Surveying for Rockfall Analyses  
**Notes:** 91 p., 7 tab., 76 fig., 10 ann.  
**Key words:** collapse, rockfall, measurement methods, classic terrestrial surveying, GNSS surveying, terrestrial laser scanning, orthophoto, mathematical modelling, Čedca waterfall, Klonte, Ključ

### **Abstract**

The evaluation of rockfall starts with a review of the relevant terminology in this field of study and continues with theoretical bases of collapse, reasons for their occurrence and mechanics of rockfalling. Modeling of rockfalling presents a special practical problem, so shortly described of mathematical modelling are presented and used for analysis of rockfalls. Technical measures for protection against falling rocks are described - mostly rockfall catch fences and their performance.

The central part of the thesis is an overview of various measuring methods that are being used for the analysis of rockfalling. Important entering data for calculation of simulation of rockfalling is the longitudinal characteristic profiles of the ground, which are implemented in selected scale. We specially described the basic characteristics of measurement methods, namely measurement with compass and clinometer, classical terrestrial geodetic measurements, GNSS measurements and terrestrial laser scanning. We shortly introduced contactless acquisition of information with the help of helicopter or airplane and with use of

photogrammetry and data from airplane shooting for ortophoto surfaces of Slovenian area. We also presented the points of view for the selection of most appropriate measurement methods.

The thesis is concluded with practical part, where the examples of geodetic measurements in practice are given. Surveying plan is the base for implementation of project of protection against rockfalls. It is also demonstrated how to model rockfalls with computer program RockFall.



## 1 UVOD

Podorni pojavi so razvojno stari toliko kot planet Zemlja, ko je začel prehajati v trdnejše agregatno stanje. So eden izmed mnogih nenehnih preoblikovalcev njenega površja, ki se nam ob klimatskih ekstremih dogajajo pred očmi z vsemi neugodnimi posledicami na živi svet. Njihove nevarnosti se še posebno zavedamo v zadnjih nekaj desetih letih, saj je človekov življenjski prostor postal veliko bolj omejen in dragocen, s tem pa se je povečala uporaba prostora na bolj ogroženih območjih. V Sloveniji se podorni pojavi pojavljajo v gorskem svetu, pri zelo strmih in navpičnih pobočjih ter na umetnih brežinah (kamnolomi, cestni in železniški useki). Objekti transportnega povezovanja krajev so velikokrat umeščeni v hribovito okolje, zato so še posebej izpostavljeni številnim oblikam podornih pojavov, tudi padajočemu kamenju, ki spada v manj intenzivno, vendar pogosto in nevarno obliko podornega procesa. Na eni strani ni mogoče zanesljivo napovedati točno mesto, čas in velikost podornega dogodka, na drugi pa pogosto ni finančnih sredstev za varovalne preprečevalne ukrepe, zato je in bo ogrožanje človeških življenj in obstoječe rabe prostora vedno v manjši ali večji meri prisotno.

Zavarovanju pred padajočim kamenjem bo zaradi posledic, ki jih prinaša sprememba podnebja, tudi v Sloveniji v prihodnosti treba nameniti večjo pozornost. Na to nas opozarjajo številni primeri skalnih podorov in padajočega kamenja, katerih pogostost v zadnjih letih narašča.

Glede na pristop do reševanja problematike padajočega kamenja ločimo:

- pasivne ukrepe, ki vplivajo na zmanjšanje škode, ki nastane ob naravnih nesrečah (npr. prostorsko načrtovanje, ki upošteva karte nevarnosti in tveganj zaradi naravnih nevarnosti; zaščita nepremičnin idr.);

- aktivne ukrepe, ki vplivajo na naravne procese, ki so vzrok za naravne nesreče (klasični tehnični in biotehnični ukrepi za urejanje hudournikov in sanacije erozijskih žarišč). Nadalje jih delimo na ukrepe primarnega in ukrepe sekundarnega varovanja. Primarno varovanje izvajamo na mestu nastanka porušitev. Z njimi skušamo preprečiti padanje kamenja oz. ga zaustaviti na mestu sprožitve. Sekundarno varovanje uporabljamo, ko se kamenje že zruši in ga skušamo zaustaviti, preden povzroči škodo.

V diplomski nalogi se bom omejila na sekundarno varovanje, natančneje na zaščito z dinamičnimi varovalnimi ograjami. Osnovni način delovanja dinamičnih varovalnih ograj je v dinamičnem prenosu energije padajočega kamenja na deformacije ograje. Konstrukcijo pregrade izberemo na osnovi pričakovane kinetične energije, ki jo mora pregrada absorbirati in je odvisna od velikosti padajočega kamna in njegove hitrosti. Potrebno sposobnost absorpcije kinetične energije in višino pregrade določimo na osnovi računalniške simulacije padajočega kamenja. Pomembni vhodni podatki za izračun simulacije so vzdolžni karakteristični profili terena, ki jih izdelamo z geodetskimi meritvami v izbranem merilu.

Največ pozornosti pa bo v nalogi namenjeno predstavitvi merskih metod, ki jih uporabljamo za potrebe analize padanja kamenja. Najbolj razširjena je klasična terestrična polarna metoda izmere, ki nam na osnovi kotov in dolžin poda koordinate posnetih točk. V zadnjih letih se vse bolj uveljavljata GPS RTK metoda in lasersko skeniranje. GPS se je trdno zasidral kot metoda merjenja in se predvsem v kombinaciji s klasično terestrično polarno metodo vedno bolj uporablja. Najsodobnejša metoda je lasersko skeniranje, ki nam z zajemom ogromnega števila točk zagotavlja najbolj podrobne posnetke vseh detajlov in se najbolj približa realnemu stanju. V sedanjem času vse večkrat priskočijo na pomoč metode in izdelki, pridobljeni s pomočjo daljinskega zaznavanja in fotogrametrije. Opisane bodo tudi enostavne meritve v težkih pogojih, ki ne omogočajo izvajanja meritev visoke geodetske natančnosti, pa jih za oceno nevarnosti padajočega kamenja v težkih pogojih dela vseeno uporabljamo.

## 1.1 CILJI IN POTEK DELA

Namen diplomskega dela je:

- podati teoretične osnove podornih pojavov, predvsem proces padanja kamenja,
- predstaviti uporabo različnih metod meritev, ki jih jih je moč uporabiti za potrebe modeliranja padajočega kamenja,
- prikazati različne metode meritev na praktičnih primerih.

Pomemben del naloge predstavlja teoretični del. V prvem sklopu so s sistematičnim zbiranjem virov in s preučevanjem strokovne literature predstavljene definicije, pojmi in sam proces nastanka podorov in padanja kamenja. Ta del naloge obsega naslednja poglavja:

- splošna definicija padanja kamnov,
- mehanika padanja kamnov,
- vrste računalniških modelov, s katerimi simuliramo padanje kamnov,
- tehnični varovalni ukrepi za zaščito pred padajočim kamenjem in skalami.

V drugem sklopu so na podlagi praktičnih izkušenj in študija literature prikazane največkrat uporabljene merske metode. Poudarek je na geodetskih merskih metodah.

Nadalje so prikazani praktični primeri geodetskih meritev. Geodetski posnetek je osnova za izdelavo projekta zaščite pred padajočim kamenjem. Karakteristični vzdolžni profili terena so namreč eden izmed pomembnejših vhodnih podatkov pri računalniški simulaciji padajočega kamenja.

V diplomskem delu sem želela ugotoviti uporabnost različnih merskih metod za analizo nevarnosti padajočega kamenja in na tej osnovi poudariti potrebnost izvajanja preventivnih in zaščitnih ukrepov za zmanjšanje te nevarnosti.

## 1.2 DEFINICIJE IN POJMI

Ker v svetu in tudi pri nas še ni enotne klasifikacije in terminologije na področju podornih pojavov, je za razumevanje pojmov potrebno opredeliti znanstveno izrazje. V nadaljevanju bom obravnavala nekatere osnovne izraze, povezane z masnim gibanjem, s poudarkom na skalnih podorih.

Skupek geoloških/geomorfoloških procesov, ki ga imenujemo prelaganje gmot, ima dve pojavni obliki: masno gibanje in masni transport. Pri masnem gibanju gre za prelaganje materiala z enega na drugi kraj zaradi delovanja sile teže in brez pomoči transportnega medija (led, sneg, voda ...), kot je to slučaj pri masnem transportu (povzeto po Kienholzu, 1998). Ribičič (2002) navaja tri tipične vrste geoloških destruktivnih procesov, ki delujejo pod vplivom eksogenih sil: preperevanje, erozija in masno gibanje. Erozijo sestavlja celoten proces razpadanja kamnin in njihov transport z višjih delov navzdol (Pavšič, 1993), torej lahko rečemo, da preperevanje predstavlja primarno, masno gibanje pa sekundarno fazo erozijskega procesa.

Problematično je tudi poimenovanje samih pojavnih oblik masnih premikov. Gams (2001) ugotavlja: "Iz tuje in domače literature je razvidno, da so poimenovanja vrst masnih gibanj navadno sestavljena iz dveh prvin: prva določa način in hitrost premikanja gmote, druga pa zrnnavostno sestavo plazovine."

Iz Prispevka k slovenskemu izrazoslovju za pobočna premikanja (Skaberne, 2000) je povzeto, da vrste masnih premikov lahko, glede na mehaniko in hitrost gibanja, delimo na:

- prevračanje (angl. topple) je rotacijsko gibanje strmo nagnjenih blokov, stebrov in plošč kamnin, koherentnih sedimentov in preperine, ki so ločeni z diskontinuitetami (plastnatost, razpoke, foliacija itd.);

- padanje (angl. fall) in kotaljenje (angl. roll) je hitro neodvisno gibanje, prosto padanje po zraku, poskakovanje in kotaljenje, pri čemer deli kamnine udarjajo ob pobočje, vendar med njimi ni pomembnejše interakcije. Ločimo primarno padanje sveže odlomljenih kosov kamnin in preperine ter sekundarno padanje kamenja, ki so bili že prej mehansko ločeni in nekoliko premaknjeni. S primarnim padanjem so povezani tudi izrazi odlom, podor, udor in zrušek, ki označujejo pojav. Odlom je lahko trenuten dogodek odlamljanja in geomorfološka oblika sveže odlomljenega dela stene, pobočja, medtem ko je podor prosto padanje, poskakovanje ali kotaljenje kamninskih mas. Odlom (trenutni dogodek) lahko preide v prevračanje ali padanje (podor);
- plazenje (angl. slide) je gibanje zemeljske mase, značilno za preperino in tudi za trdno kamnino. Porušitev ravnotežja je vezana na drsno ploskev, ki je lahko vzporedna s pobočjem, lahko jih je tudi več. Drsna ploskev je podpovršinski del zemljine ali kamnine z zmanjšano strižno trdnostjo, ki je nastal zaradi manjše odpornosti proti preperevanju, tektonske poškodovanosti, plasti glinenih mineralov, preobremenitve vrhnje debelejše plasti. Značilno je translacijsko in rotacijsko gibanje mase. Ob izteku na vznožju pobočja se plaz pahljačasto razširi (če to omogoča izoblikovanost površja), material plazovine je nesortiran. Primeri so zemeljski plazovi, snežni plazovi, usadi;
- tečenje (angl. flow) bi lahko opredelili kot delce, ki se pomikajo neodvisno drug od drugega, ne kot sprijeta masa. Tok je lahko počasno enakomerno gibanje, lahko pa hitro turbulentno mešanje, dvigovanje drobnih zrnastih delcev, zaradi velike hitrosti lahko izpodrine in ponese v gibanje material na poti. Material v toku je zmes (mineralnih, kameninskih, organskih) delcev ter vode in/ali zraka. Primeri so polzenje, drobirski tok, soliflukcija.

Pod pojmom podor razumemo nenaden naravni zdrs velikih blokov trdnih kamnin (apnencev, tonalitov itd.) na goratem ali hribovitem terenu, kjer so pobočja vertikalno nagnjena. Podori nastanejo ob različnih, med seboj sekajočih se sistemih razpok, pri čemer je eden izmed njih

blizu navpičnega nagiba. Zaradi človeškega delovanja lahko podori nastanejo ob visokih in strmih umetnih usekih v trdih kamninah (Ribičič, 1999).

Vzroki za nastanek podorov so različni ali pa deluje istočasno več dejavnikov. Med najpogostejšimi dolgoročnimi dejavniki so preperevanje kamnine in erozija, med sprožilnimi pa potresi in odmrzovanje ter antropogeni dejavniki, kot so poseganje v pobočja z useki ali miniranjem (Zorn, 2002). Pri vrednotenju dejavnikov podorov je potrebno vključiti časovno komponento in s tem razlikovati med vzroki in povodom sprožitve. Na primer, preperevanje ne more biti neposreden povod za nastanek gibanja, lahko je le vzrok sprožitve gibanja pod vplivom gravitacije.

Povzeto po Zornu (2002), v širšem pomenu lahko med skalne podore uvrščamo vse porušitve trde kamnine na pobočjih, kjer gradivo prosto pada, se kotali ali odskakuje proti vznožju pobočja, ne glede na količino premaknjene gradiva. Takšna definicija zajame vse vrste porušitve v trdi kamnini; tako manjše krušenje kamnin (odlomi) kot večje porušitve. Širši pomen skalnih podorov so še vse oblike kamnitih zdrsov, pri katerih je začetno gibanje plazenje, in bi jih zato lahko uvrstili med plazove, vendar to gradivo zaradi strmega pobočja kmalu preide v fazo padanja.

**Preglednica 1: Poglavitni vzroki in povodi podorov (Zorn, 2002).**

<b>POGLAVITNI VZROKI PODOROV</b>	<b>POGLAVITNI POVODI PODOROV</b>
tektonska poškodovanost kamnin	potresi
vremenska dogajanja	vremenski dogodki (ekstremne padavine, spomladansko odtajevanje ledu v razpokah)
preperevanje kamenine (mehansko, kemično, biološko)	človeški posegi v pobočja
erozija (ledeniška, rečna, vetrna)	
človeški posegi v pobočja	

Vrste podorov lahko opredelimo glede na:

- skupno prostornino podornega gradiva,
- način in obliko sprožitve,
- starost gradiva.

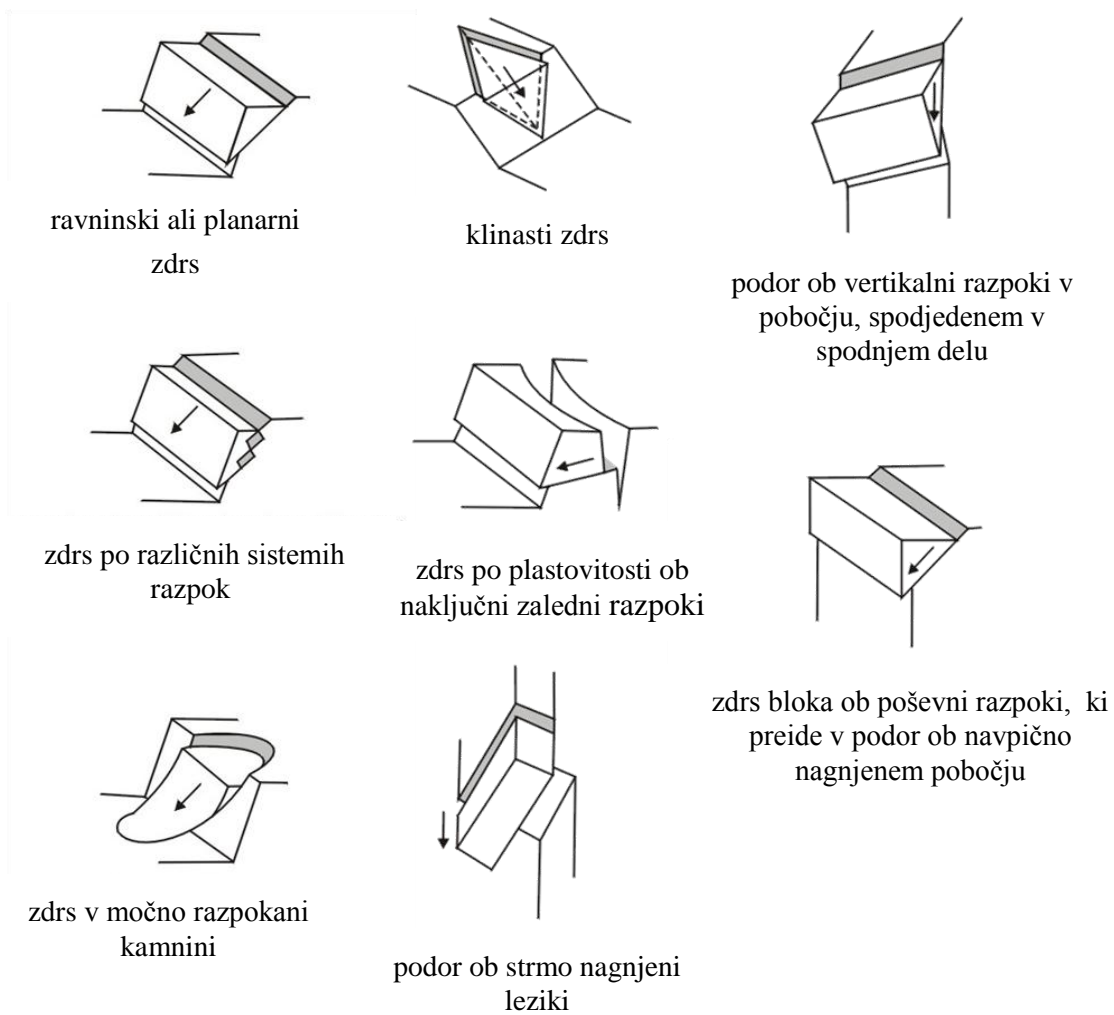
**Preglednica 2: Kvantitativna opredelitev podorov glede na prostornino in dolžino odlomnega roba (Zorn, 2002).**

<b>VRSTE PODOROV</b>	<b>PROSTORNINA PORUŠENEGA MATERIALA (m<sup>3</sup>)</b>	<b>DOLŽINA OBMOČJA PORUŠENJA (m)</b>
padanje kamenja	0,01–0,1	0,2–0,5
padanje skal	0,1–2	0,5–1,5
skalni podor	10.000–1.000.000	25–100
gorski podor	>1.000.000	>100

V diplomu največ uporabljam izraz padanje kamenja, ki pa zajema tudi druge oblike podorov.

Najbolj značilne vrste skalnih podorov glede na način in obliko sprožitve gradiva (slika 1) sta v Sloveniji opredelila M. Ribičič in R. Vidrih (1998), ki ločita:

- ravninski ali planarni zdrs, ki nastane, kadar potekata padnica pobočja in padnica razpok v isti smeri;
- klinasti zdrs, ki nastane, ko je presečišče dveh sistemov razpok usmerjeno v isti smeri kot padnica pobočja in nagnjeno navzdol;
- zdrs po različnih sistemih razpok;
- zdrs po plastovitosti ob slučajni zaledni razpoki;
- zdrs v močno razpokani kamnini;
- podor ob strmo nagnjeni ploskvi;
- podor ob vertikalni razpoki v pobočju, spodjenem v spodnjem delu;
- zdrs bloka ob poševni razpoki, ki preide v podor ob navpično nagnjenem pobočju.



Slika 1: Vrste skalnih podorov (Hoek & Bray, 1977; Ribičič & Vidrih, 1998c).



## 2 TEORETIČNE OSNOVE PADANJA KAMENJA

Padanje kamenja je proces, pri katerem se gmote različnih velikosti premikajo po strmih pobočjih in je najhitrejša oblika premikanja materiala. V angleškem jeziku se uporablja izraz "rockfall", ki pa v slovenskem jeziku na področju inženirske geologije še ni natančno definiran. Na splošno velja, da kamenje najpogosteje pada z zelo strmih, navpičnih pobočij, ki so lahko naravnega ali umetnega nastanka.



**Slika 2: Skalni okruški na nezavarovanem delu ceste.**

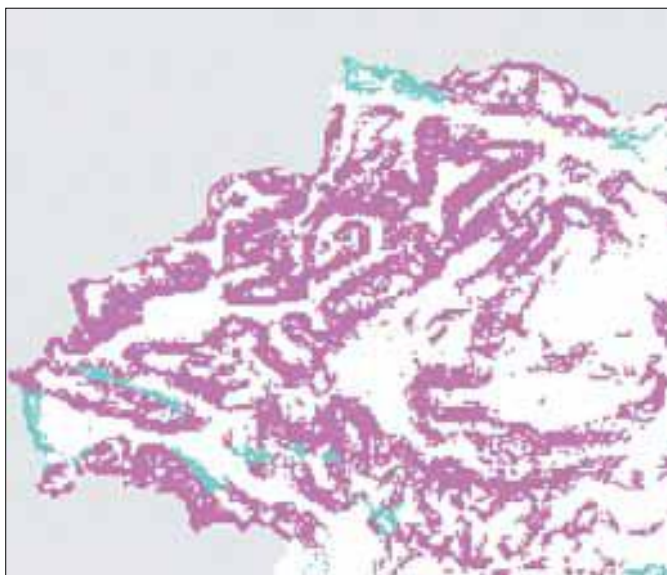
Osnovni dejavniki, ki povečujejo nevarnost padanja kamnov so:

- vrsta kamnine; padanje kamnov običajno nastopa v srednje trdnih hribinah (npr. fliš), ki hitro preperevajo, in v trdnih hribinah, ki so razpokane zaradi tektonike (apnenec, dolomit, tonalit, peščenjak, gnajs in podobno);
- naklon pobočja; nestabilnosti se pojavljajo pri večjih naklonih (pod nagibom 1:1 je nevarnost nizka);
- tektonska pretrtost kamnine (večja pretrtost pomeni večjo nevarnost);

- poraščenost pobočij; rastlinstvo v veliki meri zmanjša nevarnost izpadanja kamnov, ublaži hitrost padanja ali celo zaustavi padajoče kamenje.

Največja nevarnost pred padanjem kamnov v Sloveniji (sl. 3) nastopa v Julijskih Alpah, Karavankah in Kamniških Alpah (Ribičič et al., 1995). Drugje v Sloveniji nevarnost pred padanjem kamnov ogroža ceste, ki se prebijajo skozi soteske vodotokov s strmimi pobočji zgrajenimi iz trdnih kamnin, največkrat iz apnencev (npr. pobočja ob Savi med Litijo in Trbovljami). Nevarnost se poveča tudi na območjih, kjer ceste potekajo pod strmimi naravnimi robovi apnencev na klastične kamnine (npr. strma območja na Vipavsko dolino, kjer se apnenec Trnovskega gozda nariva na fliš).

Zaradi padanja kamenja in skal so ogroženi ljudje in premoženje. V gorskem in hribovitem svetu so ogroženi planinci, pastirji in sprehajalci, prav tako so ogrožene tudi hiše in drugi objekti, ki se nahajajo pod strmimi pobočji. Pri umetnih strmih brežinah v kamninah so ogrožena predvsem vozila, ki se nahajajo na prometnicah, posredno pa tudi ljudje v njih.



**Slika 3:** Stabilitetna karta severozahodnega dela Slovenije s štiristopenjsko oceno možnosti nastanka podorov.

Legenda: velika (rdeča), srednja (temno modra), majhna (svetlo modra), ni možnosti (bela).

## 2.1 MEHANIKA PADANJA KAMENJA

Padanje kamenja običajno sprožijo različni mehanski, klimatski in biološki dejavniki, ki povzročijo spremembo razmerja sil, ki delujejo na kamen. Ravnotežje sil se poruši, in kamen pade iz brežine (slika 4).



Slika 4: Padajoči kamen (foto: Ivnik M.).

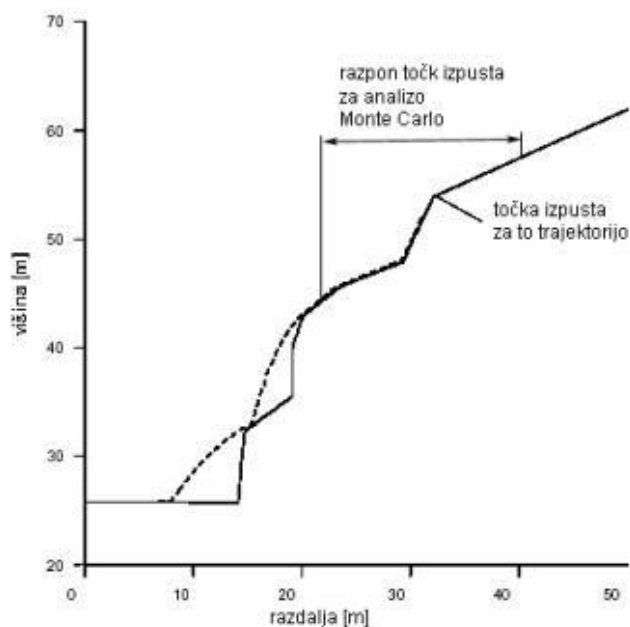
Glede na čas delovanja lahko dejavnike, ki povzročajo padanje kamenja, delimo:

- dolgotrajni: na kamnino v brežini dalj časa delujejo tektonski procesi, brežina fizikalno prepereva, nanjo delujejo klimatski dejavniki (sprememba temperature, voda), biološki dejavniki (rastline);
- kratkotrajni: so t. i. sprožilni dejavniki in delujejo krajši čas, lahko tudi samo trenutek. To so zmrzovanje, različni tresljaji (žival, človek, potres), vremenske spremembe (dež, veter, otoplitev).

Vzrokov za sprožitev kamenja s pobočja je veliko in se lahko medsebojno prepletajo. Najpogostejši sprožilni dejavniki so:

- povečanje pornega tlaka v kamnini zaradi infiltracije vode,
- erozija okoliškega materiala med močnim deževjem,
- zmrzal v hladnejšem podnebju, kemično preperevanje,
- širjenje oz. rast korenin rastlin,
- v času močnega vetra korenine delujejo kot vzvod in privzdigujejo kamnino,
- strohnitev drevja oz. vegetacije, na katero so oprti zadržani kamni in skale,
- prevrnitev drevesne in grmovne vegetacije in posledično razrahljanje matične podlage,
- premikanje divjadi po pobočju in posledična sprožitev,
- potresi,
- snežni plazovi.

Možnost, da mehanski dejavnik sproži padanje kamna, je za stopnjo do dve večja od možnosti, da klimatski oz. biološki dejavnik sproži padanje (Hoek, 2000). Ko kamenje pade z brežine, se njegovo gibanje nadaljuje po pobočju navzdol. Krivuljo (pot), ki jo opiše telo (kamenje) pri gibanju, imenujemo trajektorija.

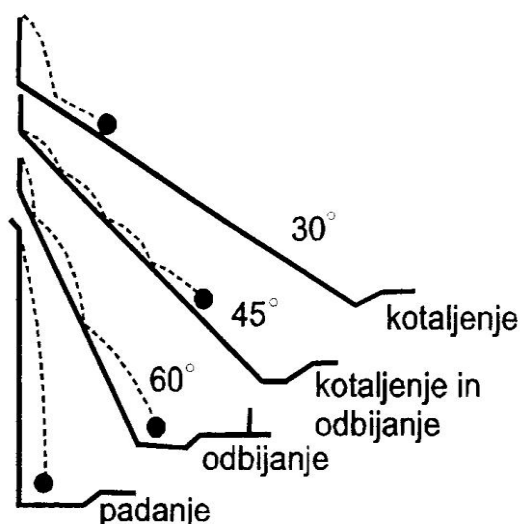


Slika 5: Značilna trajektorija za gmoto, težko 1000 kg (Ribičič, 2002, po Hoek-u, 2000).

Smer, dolžina in oblika trajektorije je po Ribičiču (2002) zaradi odbojev odvisna od več faktorjev, in sicer:

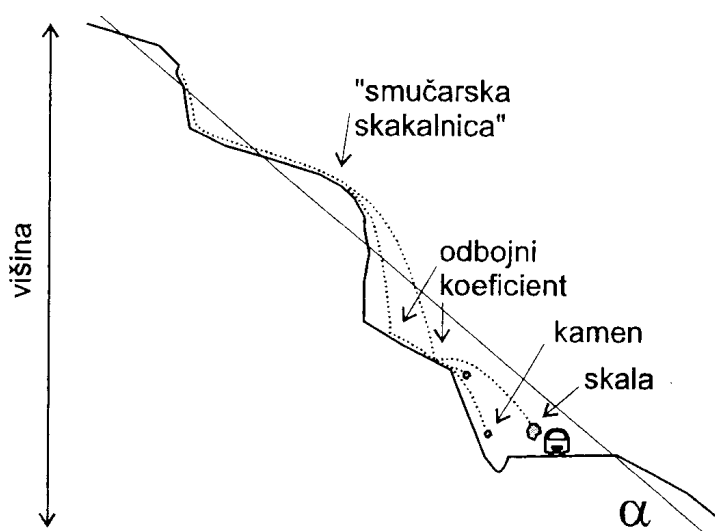
- topografije pobočja (višina, nagib, orientacije, oblike),
- padajočega kamenja (velikosti, oblike, trdnosti),
- lastnosti hribine (odbojnega koeficienta, poraščenosti, lokalnih gruščnatih odsekov, teras),
- kota, pod katerim pade kamenje na pobočje,
- deformacije skale in tal.

Podorna višina, višina prostega pada, naklon pobočja in ukrivljenost pobočja so glavni topografski faktorji, ki vplivajo na trajektorijo gibanja kamninskega bloka. Višina pobočja, po katerem poteka trajektorija, predstavlja največjo potencialno energijo, ki jo je imel blok. Naklon pobočja ima direkten vpliv na trenje in na normalno silo, zato je najpomembnejši faktor za določitev hitrosti in dosega. Bolj ko je pobočje strmo, manjše so energijske izgube pri trku s tlemi. Pri ukrivljenosti pobočja ločimo vertikalno in horizontalno izbočenje oz. vbočenje. Od naklona je odvisno, na kakšen način se bo kamen premikal po pobočju. Načeloma velja, da čim položnejše je pobočje, tem bolj je stabilno.



Slika 6: Način gibanja kamna v odvisnosti od nagiba brežine (Ribičič, 2002, po Ritchie-ju, 1963).

Oblika brežine ima prav tako velik vpliv na trajektorijo padajočega kamna. Na strmem pobočju iz trdnih kamnin se lahko pojavljajo t. i. smučarske skakalnice, ki vertikalno gibanje kamnov pretvorijo v horizontalno in s tem povečajo njihov domet.



Slika 7: Primer "smučarske skakalnice" (Ribičič, 2002).

Pomemben faktor, ki vpliva na trajektorijo je tudi velikost, oblika in trdnost padajočih kamnov. Velikost vpliva na verjetnost izpada kamnov. V splošnem velja, čim večji je kamen, manjša je verjetnost izpadanja. Večkrat bo prišlo do padanja manjših kamnov, z maso do 5 kg, kot do padca velikih in masivnih skal. Oblika kamnov vpliva predvsem na način gibanja po brežini. Kamen bolj okrogle oblike se bo lažje kotalil in odbijal kot kamen, ki je bolj podolgovate in ploščate oblike. Od trdnosti kamnov je odvisno ali bo kamen pri udarcu ob brežino razpadel ali ne. Kamni iz zelo trdnih, kompaktnih kamnin pri udarcih ne razpadejo in se močno odbijajo od stene, še posebno, če je ta čista in brez gruščnatih površin. Kamni iz mehkejših kamnin oz. kamnin, ki so preperale ali tektonsko prizadete, bodo pri udarcu ob brežino razpadli na manjše kose, od katerih bo potem vsak nadaljeval svojo pot (Ribičič, 2002).

Naslednji pomemben faktor, ki vpliva na trajektorijo, je lastnost hribine. Zmožnost površine, da ustavi padajoči kamen, je izražena z odbojnim koeficientom. Hrapavost in plastičnost

pobočja vplivata na energijske izgube pri trku blokov. Čiste površine trdnih kamnin gibanja kamenja ne ustavijo; imajo visok odbojni koeficient. Mehke površine, kot so zemlja, prod in ostali nevezani materiali ter ostanki vegetacije, pa absorbirajo večino energije padajočega kamenja; imajo nizek odbojni koeficient. Hrapavost pobočja je odvisna od vegetacije, grušča in od sprememb reliefa. Pri trkih z ovirami, kot so drevesa, hiše, zaščitni objekti pride do velikih izgub kinetične energije in s tem do zmanjšanja hitrosti.

## 2.2 VRSTE SIMULACIJSKIH MODELOV

Modele padanja kamenja, ki se jih uporablja v inženirski praksi, delimo na:

- dispozicijske (statični) in
- procesne (dinamični).

Dispozicijski modeli služijo za raziskavo možnih izvorov nevarnosti. Produkt dispozicijskega modela je karta dovzetnosti, torej nam povedo, kje lahko pride do nevarnega procesa. Procesni modeli simulirajo dinamiko procesa. Opisujejo, kako proces poteka, predvidijo hitrosti, kinetično energijo, možne trajektorije in mesta odlaganja. Produkt procesnega modela je karta magnitude nevarnosti.

Dispozicijski in procesni modeli lahko temeljijo na dveh različnih osnovah, na opisu s pomočjo fizikalnih zakonov (realistični oz. analitični modeli) ali na povezavi med topografskimi faktorji in dolžino območja odlaganja (empirični modeli).

Prostorske pojave lahko modeliramo z modeli za lokalno ali regionalno merilo. Slednje delimo na dispozicijske modele, modele trajektorij in modele trenja.

V nadaljevanju bodo prikazane osnove inženirske potrebe najuporabnejših analitičnih procesnih modelov.

### 2.2.1 Analitični procesni modeli

Analitični procesni modeli so sestavljeni iz:

- modela trajektorij in
- modela trenja.

Analitični procesni modeli opisujejo oz. simulirajo gibanje padajočega kamenja v dveh ali treh dimenzijah.

Cilj modeliranja je določiti možne poti padajočega kamenja (trajektorije) in zanje predvideti hitrost, kinetično energijo in mesto odlaganja (doseg). Lahko bi rekli, da teoretično modeliranje padajočega kamenja ni zahteven proces. Če bi poznali začetne pogoje, geometrijo pobočja in povezavo med energijskimi izgubami pri trku ali kotaljenju, bi moralo biti enostavno izračunati položaj in hitrost kamenja v kateremkoli trenutku. Vendar v dejanskem okolju temu ni tako, saj je veliko pomembnih parametrov v naravi težko določiti. Napovedovanje trajektorije je zato kompleksna operacija, ki vsebuje veliko negotovosti.

Za izračun trajektorij padanja kamnov potrebujemo naslednje podatke:

- izvor padanja skal,
- obliko in geometrijo skal,
- možno velikost in maso skal,
- mehanske lastnosti skal in pobočja,
- odbojni koeficient,
- značilne vzdolžne profile in topografijo pobočja,
- drobljenje skal ob padcu.



Pri modeliranju simulacije padanja kamnov nastopi v praksi kar nekaj problemov. Večina programov uporablja značilne vzdolžne profile, ki jih mora uporabnik določiti sam. Tu se pojavi problem izbora kritičnih profilov, ki naj bi jih geodet posnel. V pomoč pri izbiri so nam lahko neme priče. To so skale, ki so se nekoč sprožile iz stene, poškodbe na drevju, uničena podrast, odtisi skal na mehki podlagi, poškodbe cestišča in podobno. Kadar do podora ali padanja skal še ni prišlo, je izbira profilov še težja, saj nam je v pomoč le oblika terena. Kljub natančnim geodetskim posnetkom pa celotne geometrije pobočja ne moremo zajeti, saj se spreminja vzdolž pobočja. Variacije so zajete z amplitudo površinske hrapavosti in frekvenco hrapavosti. Ta dva parametra imata zelo velik vpliv na rezultate, zato je za bolj zanesljive rezultate potrebno izvesti čim več računov.



**Slika 8:** Nema priča – primer skale, ki leži na brežini (foto: Ivnik M.).

Naslednji problem nastopi pri mestu izvora padanja. Pri svežih odlomih so ta mesta še vidna, saj je skala svetlejšje barve. V večini primerov upoštevamo za mesta izvora zgornji rob stene. Pomemben vhodni podatek simulacije je tudi velikost skal. Običajno je lahko veliko skal, ki padajo z maso do 5 kg, ne vemo pa, kolikšna je možna največja masa, ki jo je smiselno upoštevati. Ta problem zadovoljivo rešimo z verjetnostno analizo in z uporabo računalniškega programa, ki lahko v kratkem času izvede veliko število izračunov. Spet si lahko pomagamo z nemimi pričami.

Vzdolž profila lahko spreminjamo koeficiente odboja in kotaljenja, seveda pa vseh variacij v lastnostih podlage ne moremo upoštevati. Koeficient odboja je tista spremenljivka s katero umerjamo model padanja kamnov. V model vnesemo dva odbojna koeficienta. Pravokotni odbojni koeficient  $R_n$ , ki se uporablja za primere, ko kamen na površino pade blizu normale, in tangencialni odbojni koeficient  $R_t$ , in sicer za padce kamnov, ki pod ostrim kotom padejo na površino.

**Preglednica 3: Tangencialni  $R_t$  in normalni koeficient odboja  $R_n$  ter koeficient trenja  $\mu$  prikazan za različne pokrovnosti tal (Dorren, 2003).**

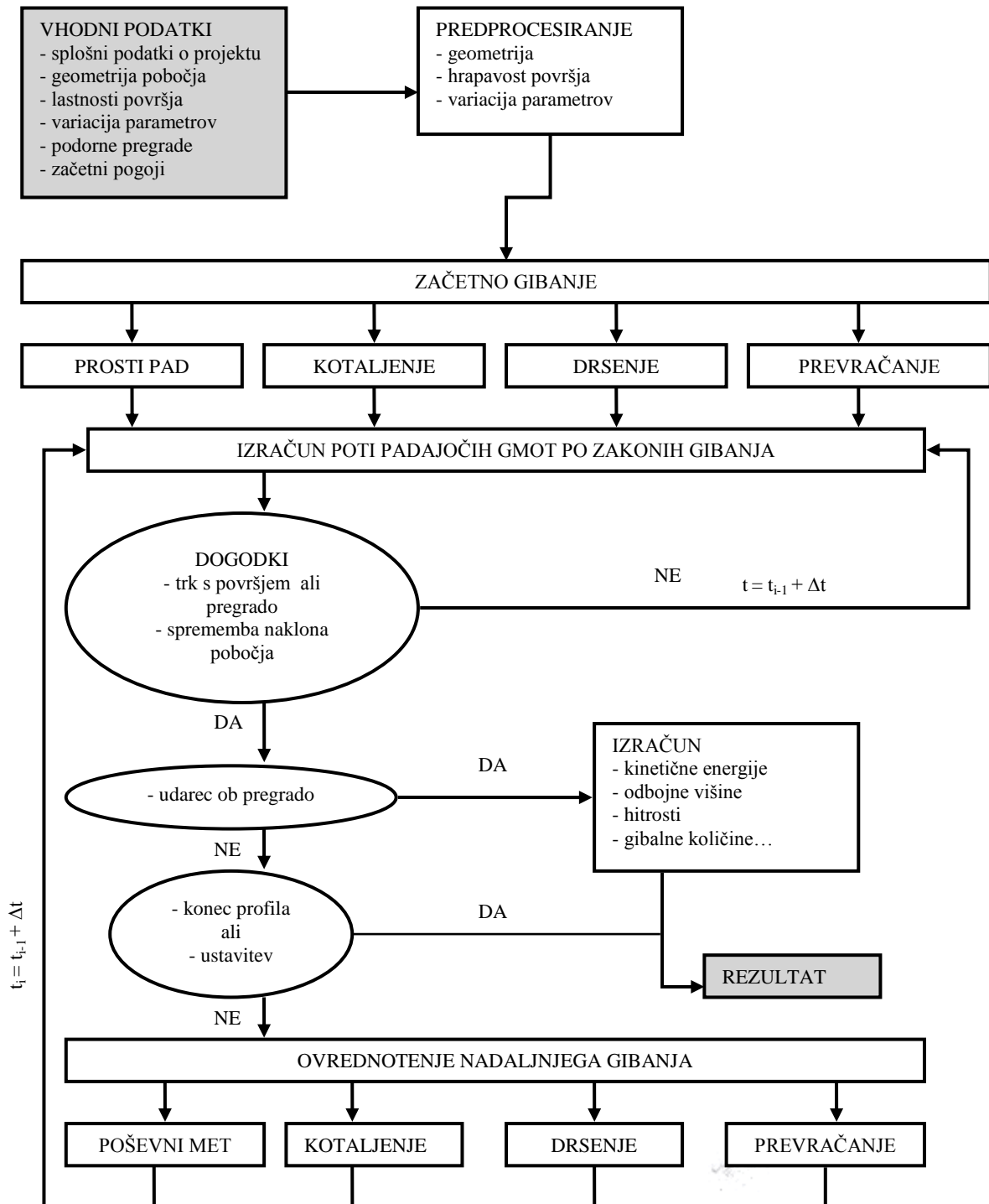
POKROVNOST TAL	$R_t$	$R_n$	$\mu$
klif, strme stene 60–90°	0,95	0,45	0,25
strma, gola pobočja 40–60°	0,90	0,40	0,45
gruščnata pobočja 30–40°	0,88	0,32	0,60
gola pobočja 0–30°	0,87	0,35	0,50
travnik	0,87	0,30	0,55
alpsko grmovje	0,085	0,30	0,60
grmovje	0,83	0,30	0,65
gozd (200 dreves/ha)	do 0,85 povprečno 0,67	0,28	1,00
gozd (300 dreves/ha)	do 0,85 povprečno 0,57	0,8	0,50
gozd (500 dreves/ha)	do 0,85, povprečno 0,38	0,28	2,00
gozd (700 dreves/ha)	do 0,85 povprečno 0,27	0,28	2,20

Določitev pravega koeficienta odboja je zelo pomembna, saj že majhna sprememba prinese popolnoma druge rezultate. Zato z računalniškim programom opravimo povratno analizo, dokler ne dobimo pravih (izmerjenih) rezultatov padanja kamenja (tj. dejansko ugotovljena končna mesta padca kamnov).

Programi za simuliranje nevarnosti padanja kamenja uporabljajo statistične metode; pogosto metodo Monte Carlo. Osnova simulacije je proučevanje obnašanja naključnih spremenljivk sistema s pomočjo naključnega generiranja števil (Biloslavo, 1999). Za primer odloma za vsak vplivni faktor določimo spodnjo in zgornjo mejo ter statistično porazdelitev vrednosti med obema mejama. Računalniški program nato s slučajnim izbiranjem vrednosti spremenljivk med obema mejnima vrednostima izračun ponovi več tisočkrat in ob tem izračunava trajektorije potovanja kamnov. S spreminjanjem odbojnega koeficienta izračun umerimo glede na v naravi ugotovljene posamezne padce kamnov. Rezultat je ovojnica trajektorij padanja kamnov.

V inženirski praksi se navadno podore simulira v dveh razsežnostih vzdolž profilov, ki smo jih definirali. Čeprav je dvorazsežnostni pristop najbolj priljubljen zaradi operacijskega in računalniškega pogleda, pa je interpretacija rezultatov in njena razširitev na sosednja območja subjektivna. Dvorazsežnostni programi ne upoštevajo trirazsežnostnega učinka topografije na trajektorije in možnosti lateralne disperzije podora. Lateralna disperzija je deviacija trajektorij od smeri z največjim gradientom in predstavlja ključni problem pri modeliranju, saj ima velik vpliv na način modeliranja dinamike, projektiranja ukrepov in določevanja nevarnosti. Največja slabost dvorazsežnostnih programov je, da so neprimerni za določitev tveganja na širšem območju, kjer podrobnejše tematske informacije niso dosegljive.

Modeliranje padanja kamnov nam torej omogoča izračun trajektorij, energetskih razmer vzdolž trajektorij in višine pri odboju kamnov. Smiselne rezultate dobimo, kadar so osnovni podatki verjetni in so izbrane predpostavke realne. Prevelike poenostavitve ali posploševanja sicer vodijo h konkretnim rezultatom, ki pa ne odražajo realnosti in so komaj uporabni.



Slika 9: Diagram poteka simulacije gibanja (Spang, 2003).

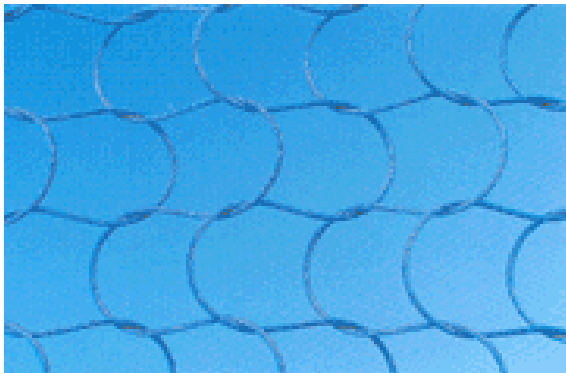
### 2.3 ZAŠČITNI UKREPI

Padajoče kamenje in skale najbolj ogrožajo linijske objekte, npr. ceste, železnice in turistične poti v ozkih dolinah in soteskah. Po podatkih Direkcije RS za ceste (DRSC) je konec leta 2003 skupna dolžina državnih cest znašala 6.215 km. Od tega je po podatkih Podjetja za urejanje hudournikov dolžina ogroženih državnih cest zaradi padajočega kamenja znašala 175 km, kar pomeni približno 2,8 % skupne dolžine državnih cest v Sloveniji. Pri zagotavljanju varnosti pred padajočim kamenjem in skalami uporabljamo različne tehnične ukrepe. Odločitev za določeni ukrep je najbolj odvisna od obsega ogroženosti. Za zaustavitev padajočega kamenja iz zaledja so zelo primerne dinamične varovalne ograje.

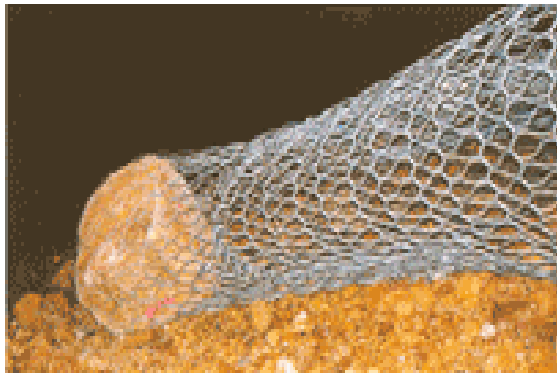


**Slika 10: Dinamična varovalna ograja (foto: Ivnik M.).**

Osnovni način delovanja dinamičnih varovalnih ograj je v dinamičnem prenosu energije padajočega kamenja in skal. Dinamične varovalne ograje sestavljajo gibljivi jekleni nosilci, členkasto povezani s temeljnimi sidri, v zgornjem delu pa sidrani z jeklenimi pletenicami, ki imajo vgrajene posebne dinamične zavore.



Slika 11: Detajl dinamične varovalne ograje  
([www.trumerschutzbauten.com](http://www.trumerschutzbauten.com)).



Slika 12: Zadržana skala  
([www.trumerschutzbauten.com](http://www.trumerschutzbauten.com)).

Energijo najprej delno prevzame obročasta mreža, nato se energija zmanjša na zavornih obročih, preostala energija pa se prek sider prenese na okoliška tla. Tako zasnovana konstrukcija prenese s svojim nihanjem precejšen del dinamičnih obremenitev, ki jih povzročajo padajoče skale. Zaradi nekajkrat večje kompenzacije dinamičnih pritiskov imajo lovilne ograje bistveno prednost pred togimi lovilnimi ograjami in tudi pred večino drugih togih lovilnih objektov. Odvisno od vrste dinamične varovalne ograje lahko ta absorbira do 5.000 kJ dinamične obremenitve.



Slika 13: Zavorni obroči pri 1.000 kJ sistemu (foto: Ivnik M.).



Učinkovitost varovalnih objektov je poleg ustreznega dimenzioniranja in lociranja objektov v veliki meri odvisna od izvajanja rednih in izrednih vzdrževalnih del. Akumulirano kamenje, skale in drevnine za lovilno ograjo lahko povzročijo preveliko statično obremenitev in zmanjšanje absorpcijske sposobnosti lovilne ograje, ob morebitni porušitvi objekta pa predstavljajo tudi nevarnost hkratne sprožitve večjih količin kamenja na prometnico, kar pomeni dodatno ogroženost v primerjavi z ogroženostjo zaradi sprožitve posameznega kamenja in skal.

Dimenzije in lokacije posameznih dinamičnih ograj so določene na podlagi računalniške simulacije poti gibanja skal in kamenja (trajektorije) in na podlagi terenskega ogleda. Računalniški model namreč lahko uporabimo kot orodje za opazovanje teoretičnega obnašanja padajočega kamenja ob simuliranih varovalnih ukrepih. Opazujemo lahko na stotine porušitev in preučujemo poti ter kinetično energijo padajočega kamenja. Ograje postavimo na mestih, kjer računalniška simulacija pokaže, da se skale in kamenje najmanj odbijajo od pobočja. Po svoji konstrukciji in uporabljenih materialih so sodobne varovalne ograje zasnovane tako, da jih je mogoče postaviti na najbolj kritičnih odsekih, ne glede na težavnost in težko dostopnost terena, vendar lahko uspešno služijo svojemu namenu le, če so redno vzdrževane.



**Slika 14: Povsem zapolnjena varovalna ograja, ki ni več funkcionalna.**

### 3 MERSKE METODE

Osnova vsakega geodetskega posnetka je izmera karakterističnih točk na terenu, ki so predstavljene s prostorskimi koordinatami. Izmero podatkov, potrebnih za pridobitev koordinat točk, s katerimi prikazujemo teren obravnavanega območja, lahko izvedemo z različnimi merskimi metodami. Izbira merske metode je odvisna predvsem od natančnosti, ki jo želimo doseči, ter od lokalnih dejavnikov na terenu.

Najhitrejši in najenostavnejši način za zajem terenskih podatkov, ki jih potrebujemo za prikaz karakterističnih vzdolžnih profilov, je s pomočjo busole, naklonomera in merskega traku. Za ta način se po navadi odločimo le, ko se podori nahajajo na zelo zaraščenem strmo nagnjenem terenu, ki onemogoča uporabo drugih spodaj omenjenih metod. V zadnjih letih se vse več uporablja GNSS<sup>1</sup>, pri katerem pa se prav na zaraščenem terenu in v ozkih dolinah pojavi problem v sprejemanju signala, ki ga lahko deloma rešimo, tako da se pozanimamo, kdaj je na obravnavanem območju največ satelitov. Če nimamo problemov s sprejemom signala, je uporaba GNSS sprejemnika primerna alternativa zahtevnejšim klasičnim terestričnim geodetskim meritvam z elektronskimi tahimetri. Ti omogočajo merjenje tudi brez uporabe reflektorjev in s tem meritve na nedostopnih območjih (vertikalne stene). Vse pogosteje se uporablja kombinacija klasične terestrične polarne in GNSS RTK izmere. Smiselna je tudi uporaba terestričnega laserskega skenerja, ki ravno tako omogoča meritve območij, ki so nedostopna. Naslednja možnost je brezkontaktno pridobivanje podatkov s pomočjo daljinsko vodenega helikopterja ali letala ob uporabi fotogrametrije ali uporaba podatkov letalskega snemanja za ortofoto podlage območja Slovenije.

---

<sup>1</sup> Je kratica skupnega imena za globalne navigacijske satelitske sisteme (iz angl. Global Navigation Satellite System), kot so ameriški GPS, ruski GLONASS, evropejski Galileo.



### 3.1 ENOSTAVNE MERITVE

Med enostavne meritve sodijo meritve s pomočjo preciznega kompasa, naklonomera in merskega traku. Za uporabo te metode se običajno odločimo, kadar je teren gosto zaraščen in onemogoča uporabo drugih geodetskih merskih metod, vendar se moramo zavedati, da z omenjenim priborom v najboljšem primeru dosežemo decimetrsko natančnost.

Danes lahko na trgu kupimo instrumente, v katerih je združena kombinacija preciznega kompasa in naklonomera. To so ponavadi lahki priročni instrumenti, zelo primerni za rabo na terenu. Z njimi enostavno določamo horizontalne smeri, vertikalne kote in naklone. Primer take merilne naprave je Suunto Tandem, pri katerem sta precizni kompas in naklonomer združena v aluminijastem ohišju (slika 15). Precizni kompas ima razdelitev od 0° do 360° z obratno skalo. Naklonomer ima dvojno razdelbo, v procentih (0–150 %) in stopinjah (0–45°). Pri kalibriranem instrumentu je natančnost  $\pm 0,25^\circ$  ([www.suunto.com](http://www.suunto.com)).



Slika 15: Suunto tandem ([www.navigators.si](http://www.navigators.si)).

Kjer zaraščenost terena dopušča, je smiselno razmisliti o uporabi ročnega laserskega razdaljemera, ki je veliko bolj učinkovit in omogoča hitrejše merjenje tudi do težko dostopnih mest. Tak primer ročnega razdaljemera je Leica DISTO D8. Laserska pika (pinpoint) je na

podlagi dobro vidna in omogoča natančno določitev točke, do katere merimo. Merilni doseg znaša do 100 m brez uporabe reflektorja in 200 m z reflektorjem ter omogoča relativno veliko natančnost merjenja.



Slika 16: Leica DISTO D8 ([www.surveyequipment.com](http://www.surveyequipment.com)).

Potrebno je omeniti, da ima DISTO D8 že vgrajeno posebno funkcijo, ki omogoča merjenje višinskih profilov. Določanje razdalj in višin točk po profilu je tako zelo preprosto. Najprej s pomočjo digitalnega vizirja namerimo na izhodiščno točko (slika 17), za katero smo predhodno v DISTO D8 vnesli znano višino. Po izmerjeni referenčni točki merimo točke vzdolž profila (slika 18). DISTO D8 prikaže višinsko razliko od referenčne točke in horizontalno razdaljo do inštrumenta za vsako izmerjeno točko (slika 19).



Slika 17: Izhodiščna točka.



Slika 18: Točke vzdolž profila.



Slika 19: Višinska razlika in horizontalna razdalja do točk.



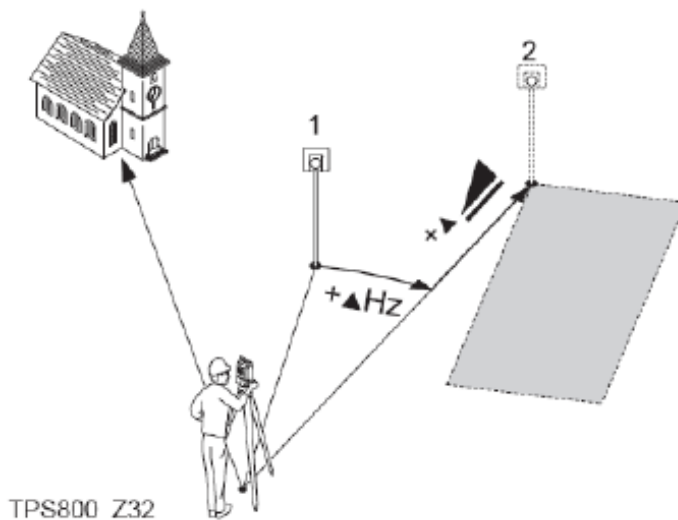
Slika 20: Profil terena.

## 3.2 KLASIČNA TERESTRIČNA IZMERA

### 3.2.1 Polarna metoda

Geodetski posnetek za izdelavo karakterističnih profilov najpogosteje izvajamo s polarno metodo izmere. Polarna metoda detajlne izmere pomeni izračun koordinat detajlnih točk na osnovi direktno merjenih relativnih prostorskih polarnih koordinat detajlnih točk. Položaj detajlne točke je določen na podlagi istočasnega merjenja horizontalnega kota, zenitne razdalje in poševne dolžine do detajlne točke. Za umestitev naših meritev v prostor potrebujemo stojišče z znanimi koordinatami v izbranem koordinatnem sistemu in eno ali več dobro vidnih navezovalnih točk, ki nam zagotavljajo orientacijo horizontalnih smeri. V ta namen lahko koristimo obstoječo državno mrežo. V primeru, da na merjenem območju ni obstoječih geodetskih podatkov, ki bi jih lahko uporabili za navezavo, si mrežo vzpostavimo z navezovalno terestrično mrežo (trigonometrična ali poligonska) ali z GNSS meritvami.

Polarno detajlno izmero izvajamo z elektronskimi tahimetri (slika 21), ki omogočajo avtomatsko registracijo podatkov in njihovo preprosto nadaljnjo avtomatsko obdelavo (primer: Leica TPS1200). Že na terenu lahko zajete podatke deloma obdelamo in kontroliramo, kar odstrani možnost grobih pogrškov in poveča ekonomičnost postopkov meritev.



Slika 21: Princip polarne metode izmere (www.geoservis.si).

Sodobni elektronski tahimetri, imenovani tudi TPS sistemi (angl. Terrestrial Positioning System) podpirajo napredne funkcije, kot so avtomatsko prepoznavanje tarče, avtomatsko sledenje tarče, avtomatsko iskanje in možnost krmiljenja instrumenta prek radijske zveze. Večina modelov omogoča tudi merjenje brez uporabe reflektorjev. Ta možnost je še posebno dobrodošla, kadar merimo na točke, ki so težko ali pa celo nedostopne. V naših primerih so to skalne stene, strma, težko dostopna pobočja in podobno. Svetlobni žarek se odbije od površine objekta in tako izmeri razdaljo. Vidna rdeča laserska pika je lahko v veliko pomoč tudi pri viziranju v slabših svetlostnih pogojih ali v temnih prostorih (www.geoservis.si).

Sodobni instrumenti so opremljeni z zahtevnimi algoritmi ter z dovršenimi in grafično podprtimi uporabniškimi vmesniki. Številni uporabniški programi nam pomagajo hitreje in bolj učinkovito reševati tako vsakdanje kot specifične merske naloge. Najnaprednejša sistemska programska oprema nam celo omogoča, da terenske podatke zajamemo kar neposredno v CAD<sup>2</sup> okolje. Z merilnim inštrumentom tako lahko upravljamo neposredno iz

<sup>2</sup> CAD – Računalniško podprto konstruiranje (iz angl. Computer - Aided Design).

CAD okolja in elektronski načrt izdelamo kar na terenu. Merjeni objekti so takoj opremljeni s pripadajočimi simboli in shranjeni na ustrezni informacijski sloj. Seznam objektov, atributov, pripadajočih blokov in plasti si vnaprej pripravimo glede na vrsto dela. Uporabljamo lahko vse ukaze v CAD okolju, merilni inštrument je le še orodje, ki nam zagotavlja podatek o položaju.



Slika 22: Leica TPS1200.

Elektronski tahimeter je sestavljen iz dveh osnovnih delov: elektronskega razdaljemera in elektronskega teodolita. Natančnost razdaljemera je podana z dvema parametroma. Prvi definira vpliv konstantnega dela pogreška, drugi pa je vpliv pogreškov, ki so odvisni od velikosti dolžine.

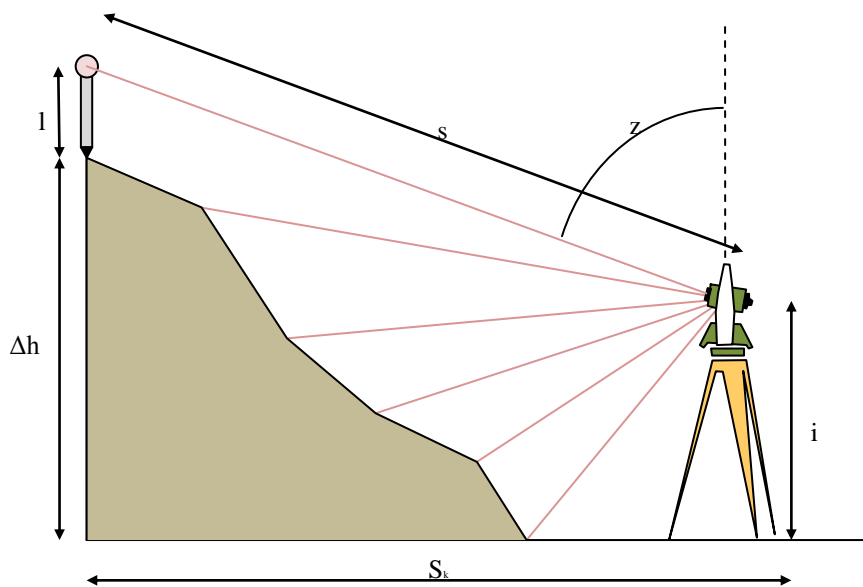
Nadzor oz. kontrola instrumentalnih pogreškov je mogoča s periodičnim preizkusom instrumenta. Za teodolit v normalni situaciji zadostuje letni preizkus. S preizkusi določimo vrednosti pogreškov, z elektronskim justiranjem pa instrumentu "ukažemo", da na osnovi teh vrednosti korigira merske vrednosti. Druga možnost sprotne kontrole je uporaba primerne

metode meritev. Iz rezultatov meritev je mogoče sklepati na velikost pogreškov, metode pa omogočajo tudi sočasno eliminacijo večine teh.

Terenska izmera z elektronskimi tahimetri spada med najnatančnejše metode merjenja točk v prostoru.

### 3.2.2 Presečno snemanje (snemanje v profilih)

Presečno snemanje je po principu podobno polarnemu snemanju. Primerno je predvsem za prečne profile, katerih lastnost je ravna linija, pravokotna na vzdolžni profil oz. os objekta. Pri presečnem snemanju se izračunajo le dolžine ter višine glede na merjene dolžine in opazovani vertikalni kot. V tem postopku, za razliko od polarne metode, zanemarimo horizontalni krog, ki v času merjenja miruje.



Slika 23: Princip presečnega snemanja.

Pri presečnem snemanju se največkrat uporabljajo instrumenti, ki omogočajo merjenje razdalj brez reflektorja.

### 3.3 GNSS IZMERA

GNSS metoda izmere temelji na signalih, ki jih oddajajo GNSS sateliti in jih sprejme in obdela GNSS sprejemnik. Z GNSS sistemom lahko določimo položaj kjerkoli na Zemlji, ne glede na čas in vremenske razmere. Dosežena natančnost je odvisna od vrste in zmogljivosti sprejemnika, od načina opazovanja in od izbrane merske metode (Ribičič et al., 2005).

Za snemanje karakterističnih profilov terena je uporabna RTK<sup>3</sup> GNSS metoda izmere, katere značilnosti so natančnost meritev, enostavna uporaba in visoka produktivnost. Podatke o količini in kvaliteti opravljenega dela pridobimo že med izmero samo. Za delo na terenu potrebujemo le sprejemnik in GNSS anteno, vlogo referenčnega sprejemnika (bazne postaje) pa prevzame najbližja permanentna postaja. Z vzpostavitvijo permanentnih GNSS postaj, ki pokrivajo celotno območje Slovenije (omrežje SIGNAL) je uporaba RTK GNSS metode še enostavnejša in uporabniku prijaznejša. Pri izvedbi te metode mora biti zagotovljen sprejem satelitskih signalov in nemotena radijska povezava med permanentno postajo in mobilnim sprejemnikom, tako imenovanim roverjem. Vzpostavljamo jo prek GSM<sup>4</sup> modema, ki je najpogosteje že vgrajen v GNSS sprejemnik. V praksi je pogosto uporabljen sprejemnik LEICA GPS 1200, ki je prikazan na sliki 24.

RTK GNSS metoda sloni na opazovanju faze nosilnega valovanja in omogoča pridobivanje položaja v realnem času s centimetrsko natančnostjo. Za doseganje takšne natančnosti ta metoda zahteva zanesljivo izvedbo inicializacije<sup>5</sup>, ki predstavlja ključno fazo postopka izmere, saj le dobra inicializacija zagotavlja dobre položaje novih točk. Po uspešno opravljeni inicializaciji je potreben neprekinjen sprejem signala z vsaj štirih satelitov.

---

<sup>3</sup> kratica za kinematično metodo GNSS izmere v realnem času (iz angl. Real Time Kinematic).

<sup>4</sup> GSM kratica za najpopularnejši svetovni standard mobilnih komunikacij (iz angl. Global System for Mobile communications).

<sup>5</sup> Inicializacija je postopek določitve neznanega števila valov med GNSS sprejemnikom in vsakim satelitom.



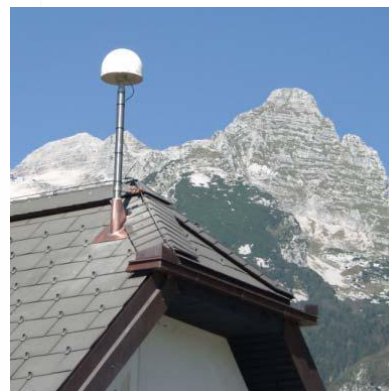
**Slika 24: Leica GPS 1200.**

V Sloveniji je bilo omrežje SIGNAL (SlovenIja-Geodezija-NAvigacija-Lokacija) postopno vzpostavljeno med letoma 2000 in 2006. Je v lasti Geodetske uprave RS in je del področja distribucije geodetskih podatkov. Omrežje SIGNAL je zato temeljna državna geoinformacijska infrastruktura za določanje natančnega položaja s satelitsko tehnologijo povsod na ozemlju Slovenije (Radovan, 2007). Sestavlja ga 15 permanentnih postaj GNSS in nadzorno-distribucijski center Službe za GNSS na Geodetskem inštitutu Slovenije, ki z omrežjem tehnično upravlja.





Slika 25: Omrežje permanentnih postaj SIGNAL ([www.geoservis.si](http://www.geoservis.si)).



Slika 26: Permanentna postaja v Bovcu ([www.geoservis.si](http://www.geoservis.si)).

Vsaka referenčna postaja ima natančno izmerjen položaj, zato lahko iz prejetih satelitskih signalov določi lastni položaj in ga primerja z znanim. Ker so glavni vplivi na opazovanja v okolici referenčnega sprejemnika v nekem trenutku zelo podobni, relativni položaj, ki ga določamo z mobilnim sprejemnikom, ni obremenjen z večino teh vplivov. Podatke meritev z referenčnih postaj zato posredujemo na uporabnikov premični sprejemnik in tako izboljšamo njegov položaj. Če uporabnik svoje meritve opravi z navezavo na eno samo referenčno postajo, potem v radiju 20 km okrog nje meri z natančnostjo nekaj centimetrov. Če pa se uporabnik naveže na omrežje referenčnih postaj, centimetrsko natančnost doseže na celotnem državnem ozemlju. Po zagotovitvi proizvajalcev programske opreme za omreženje postaj je dovolj, da so postaje omrežja med seboj oddaljene do 70 km (Radovan, 2007).

S povezavo prek ADSL (angl. Asymmetric Digital Subscriber Line) in varno storitvijo VPN (angl. Virtual Private Network) so postaje internetno povezane z nadzornim centrom (Berk et al., 2006). V centru je strežniška oprema z domačo stranjo omrežja ([www.gu-signal.si](http://www.gu-signal.si)) in programom za nadzor omrežja, izračun in posredovanje podatkov opazovanj v realnem času ter za naknadno obdelavo. Posredovanje podatkov od centra do uporabnika lahko teče prek

omrežja mobilne telefonije (GSM) ali prek mobilnega interneta (tj. internetnega radia, kot npr. GPRS, UMTS, EDGE). Ker je zakasnitev sporočila s podatki običajno manjša od polovice sekunde, lahko uporabnik z veliko natančnostjo meri tudi med gibanjem. Uporabnik lahko meri tudi brez omrežja SIGNAL in šele po prihodu v pisarno z domače strani omrežja prečrpa podatke opazovanj. Kadar na terenu mobilno telefonsko omrežje ni na razpolago, sateliti pa so vidni, je to tudi edina možna rešitev.

### 3.4 TERESTRIČNO 3R LASERSKO SKENIRANJE

Metoda terestričnega laserskega skeniranja je zaradi relativno nove tehnologije in velike uporabnosti za obravnavani problem opisana nekoliko bolj podrobno.

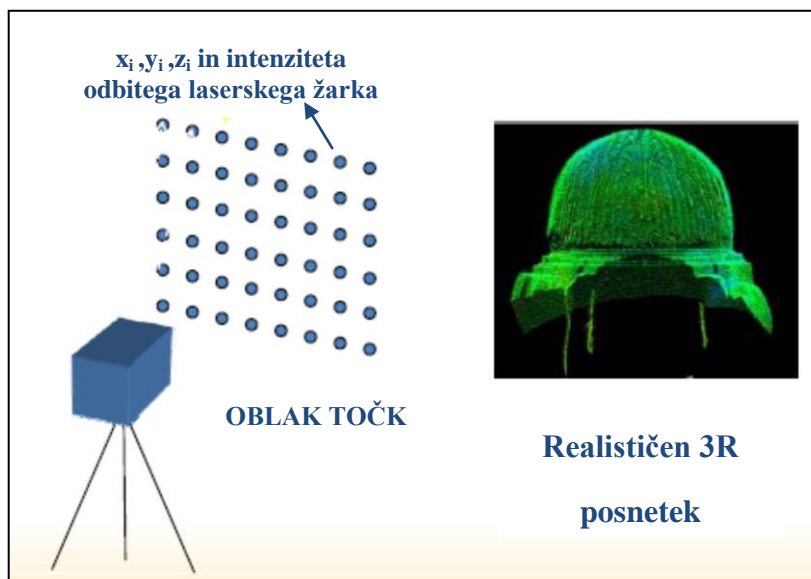
#### 3.4.1 Uvod

Terestrično lasersko skeniranje se danes močno uveljavlja kot metoda za zajem površin. Zaradi hitrosti zajema, resolucije podatkov, dolžinskega dosega in natančnosti je terestrični laserski skener zelo primeren za snemanje sprememb oblik nestabilnih površin.

Večina komercialno dostopnih skenerjev poleg geometrijskih informacij z merjenjem intenzivnosti odbitih žarkov omogoča tudi prepoznavanje materiala na površini objekta. Poleg skenerja sodi k opremi tudi kalibrirana in skladno s skenerjem orientirana digitalna kamera visoke ločljivosti, ki omogoča določitev RGB<sup>6</sup> barve vsaki točki, s čimer je poleg izdelave fotografij omogočen tudi nanos fototeksture na površino objekta. To omogoča lažjo vizualizacijo oblaka točk in izdelavo realističnega 3R posnetka. Končni rezultat terenskega dela je torej oblak točk (enotna zbirka podatkov o lastnostih zajetih točk).

---

<sup>6</sup> RGB barvni princip je zapis neke barve z vrednostmi treh komponent: rdeče, zelene in modre (iz angl. Red, Green, Blue).



Slika 27: Oblak točk.

Možnosti uporabe oblaka točk so velike:

- točke so jasno ločene po koordinatah in pripisanih lastnostih, zato lahko z njimi delamo kot s tabelarično bazo podatkov;
- med skeniranjem lahko oblak točk obračamo in opazujemo z različnih oddaljenosti in perspektiv;
- med različnimi točkami v oblaku lahko določamo geometrijske količine;
- oblake točk lahko poljubno obdelujemo (ustvarjamo najboljše prilagajajoče elemente, izdelamo trikotniške mreže, določimo 2R izreze objektov ...);
- možen je izvoz posameznih delov oblaka točk, ravno tako lahko iz oblaka zajetih točk s filtriranjem podatkov izločimo točke, ki nas ne zanimajo, kar se pokaže koristno pri določanju reliefa terena brez vegetacije.

Pravilno izdelana vizualna predstavitev lahko veliko pripomore pri predstavitvah projektov zainteresirani javnosti. Poleg tega natančnost zajema in možnost naknadne obdelave podatkov omogoča izdelavo virtualnih terenskih situacij za potrebe projektiranja in zmanjša potrebno število terenskih ogledov. Ne nazadnje pa takšni podatki predstavljajo tudi dragocen arhivski posnetek stanja terena v času snemanja.

### 3.4.2 Osnovni elementi terestričnih laserskih skenerjev

#### Natančnost

Na natančnost skeniranih podatkov poleg natančnosti, ki izhaja iz tehničnih lastnosti instrumenta, vpliva tudi lastnost odbojne površine skeniranega objekta in razdalja do objekta. Standardna deviacija v velikosti nekaj milimetrov za eno skenirano točko ni tako pomembna, če je ta točka del geometrično pravilnega objekta (npr. valj, ravnina ... ) in se uporabi samo pri določitvi parametrov, ki opišejo ta element v grafičnem prikazu. Če je potrebno modulirati nepravilne površine, so oblaki z razpršenimi točkami problematični za obdelavo, še posebno če prisotnost vogalov ne dovoljuje uporabe glajenja<sup>7</sup> cele površine. Zaradi tega je za vsako predvideno uporabo skeniranih podatkov potrebno izbrati najprimernejši skener, pri čemer upoštevamo zahtevano natančnost določitve položaja točk, velikost objekta in oddaljenost od objekta (Wunderlich, 2002).

V terestrični rabi v splošnem uporabljamo tri tipe skenerjev:

- skenerji za kratke razdalje,
- skenerji za srednje razdalje in
- skenerji za dolge razdalje.

Natančnost prostorskega položaja skenirane točke je odvisna tudi od natančnosti kotne meritve. Terestrični laserski skenerji za srednje in velike razdalje omogočajo natančnost  $\pm 5$  mm za poljubno točko v skenogramu ter  $\pm 2$  mm za referenčno točko na razdalji 50 m.

---

<sup>7</sup> Rasterska operacija, s katero odstranimo šume.

**Preglednica 4: Položajna natančnost točk glede na doseg skeniranja.**

<b>SKENERJI GLEDE NA DOSEG</b>	<b>NATANČNOST DOLOČITVE POLOŽAJA TOČKE</b>
SKENERJI ZA KRATKE RAZDALJE (do 10 m – close range scanners) triangulacijski skenerji	$\pm 0,1$ mm; $\pm 0,5$ mm pri 2 m
SKENERJI ZA SREDNJE RAZDALJE (10-100 m – mid range scanners) triangulacijski skenerji	$\pm 2$ mm pri 10 m
SKENERJI ZA DOLGE RAZDALJE (100 m ali več – long range scanners) impulzni in fazni skenerji – TOF	Nekaj mm do nekaj cm

### **Doseg skeniranja**

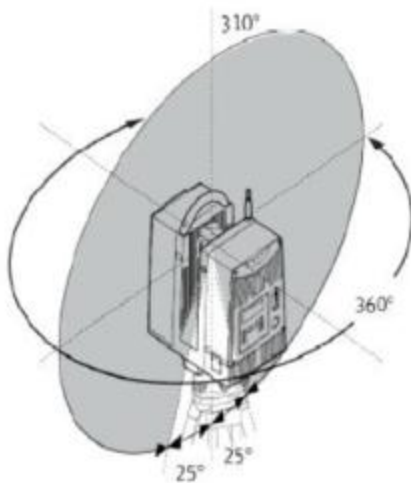
Podatki o dosegu skeniranja niso vedno zanesljivi. Doseg skeniranega območja je zelo odvisen od odbojne površine skeniranega objekta, čistosti atmosferskega zraka, difuzne svetlobe (odbita sončna svetloba ali svetloba iz drugih virov) in motečih virov v bližini objekta. Na splošno so impulzni skenerji, ki delujejo na osnovi merjenja časovnega intervala, manj občutljivi kot fazni in triangulacijski skenerji, ki zahtevajo meritve v temi.

### **Hitrost zajemanja**

Hitrost zajemanja se giblje od cca. 1.000 točk/s do 500.000 točk/s. Kljub veliki hitrosti zajemanja podatkov lahko lasersko skeniranje postane časovno potraten postopek, kadar je potrebna velika gostota točk za doseganje visoke ločljivosti zajetega objekta. Hitrost zajemanja 100 točk/s lahko še vedno obravnavamo kot počasno skeniranje. Hitrost 1.000 točk/s pa je zadovoljiva v večini primerov. Iz tega ne smemo sklepati, da bomo za izvedbo projekta potrebovali 10-krat manj časa, saj časa, ki ga porabimo za druge operacije (prevoz, priprava opreme, meritve kontrolnih točk, premikanje s stojišča na stojišče, pisarniška obdelava podatkov ... ) ne moremo skrajšati.

### Velikost vidnega polja

Velikost vidnega polja, ki ga razdelimo na vodoravno in navpično sestavino, je odvisna od izvedbe 3R laserskega skenerja. Fiksni 3R laserski skenerji, ki nimajo možnosti samodejne rotacije okrog osi med skeniranjem, imajo zato manjše vidno polje, saj je omejeno z zgradbo snemalne glave. Običajno lahko skeniramo vidno polje  $40^\circ \times 40^\circ$  (ILIRIS 3R). 3R laserski skenerji z eno rotacijsko osjo pokrijejo območje  $80^\circ \times 360^\circ$  (Reigl LMS-420i), medtem ko skenerji z dvema rotacijskima osema pokrijejo območje  $360^\circ \times 180^\circ$  (Callidus PS 3200). Izvirno rešitev z dvema oknoma predstavlja Leica s terestričnim laserskim skenerjem HDS3000, ki pokriva območje zajema  $360^\circ \times 270^\circ$ . Velikost vidnega polja je pomembna pri skeniranju v zaprtih prostorih, kjer lahko iz enega samega stojišča brez posredovanja operaterja skeniramo ves prostor. Panoramski skenerji se obračajo okrog vertikalne osi instrumenta in zajemajo točke v vertikalnih profilih.



Slika 28: Vidno polje  $360^\circ \times 310^\circ$  pri HDS600 ([www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com)).

### Gostota skeniranja in velikost pike

Gostota točk na objektu je teoretično funkcija velikosti kotnega zasuka zrcala, ki usmerja laserski žarek in oddaljenost od objekta do stojišča instrumenta. V praktični uporabi je ločljivost odvisna od divergence laserskega žarka, saj velikost laserske pike na objektu omejuje lokalno gostoto točk. Če je potrebna velika gostota točk, je treba preveriti, kako dobro je izostren žarek in ali postopek samodejnega ostrenja deluje za različne oddaljenosti.

Pri 3R laserskih skenerjih z enim zrcalom je gostota skeniranja odvisna od kotnega zasuka zrcala, ki omogoča navpično odklanjanje laserskega žarka in od kotnega zasuka merilne glave, ki omogoča vodoravne premike laserskega žarka. Pri 3R laserskih skenerjih z dvema zrcaloma je gostota skeniranja odvisna le od kotnega zasuka zrcal, velikost laserske svetlobne pike pa od natančnosti fokusiranja ter oddaljenosti objekta od stojišča instrumenta.

### Tarče

Za združevanje več skenogramov (oblakov točk), narejenih z različnih stojišč, ali preslikavo meritev v želeni koordinatni sistem je priporočljiva uporaba posebnih tarč, ki jih skenerjeva programska oprema zazna samodejno. Nekateri proizvajalci ponujajo kot dodatno opremo posebne tarče z visoko odbojnostjo, ki so primerne tudi za polarno terestrično izmero in fotogrametrične meritve. Zato moramo pri meritvah večje natančnosti uporabiti standardizirane tarče, ki jih skenerjeva programska oprema lažje in prostorsko natančneje prepozna. To je še posebej pomembno pri združevanju skenogramov istega objekta iz različnih smeri in oddaljenosti.

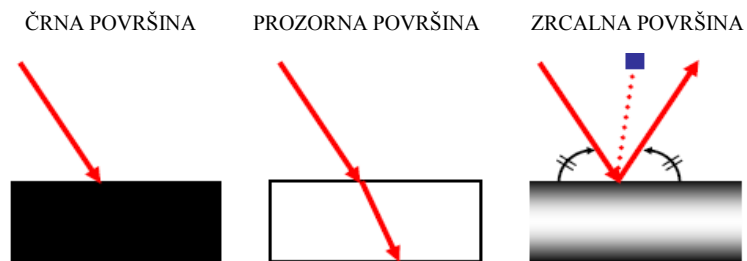


Slika 29: Tarče za 3R lasersko skeniranje in skenirana tarča (www.leica-geosystems.com).

### Odbojnost površin

Osnovni pogoj za izvedbo 3R laserskega skeniranja brez posebnih odbojnih tarč je, da skenirane površine odbijajo lasersko svetlobo določene valovne dolžine. Površine iz različnih materialov različno odbijajo lasersko svetlobo. Nekatere je sploh ne, zato nastajajo v 3R oblakih točk "črne luknje" – območja brez točk. Laserska svetloba se odbija tudi od vseh objektov (ljudi, avtomobilov, dreves, uličnih svetilk ...), ki se med skeniranjem nahajajo v

vidnem polju 3R laserskega skenerja. Odvečne točke v oblaku točk imenujemo šumi, ki jih hitro in preprosto odstranimo s posebnimi programi.

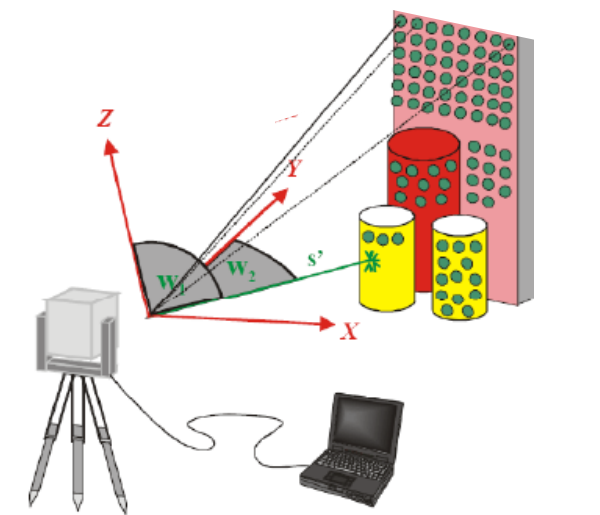


Slika 30: Odbojnost različnih površin.

### 3.4.3 Izsledki meritev

S skenerji, ki so namenjeni pokrivanju velikih območij, pridobimo več meritev za vsak impulz, in sicer:

- horizontalno in vertikalno smer,
- poševno razdaljo in
- intenziteto odbitega impulza.



Slika 31: Merjenje z izhodiščem v centru skenerjevega koordinatnega sistema.



Vse točke imajo pripadajoče 3R koordinate ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) v skenerjevem koordinatnem sistemu z izhodiščem v skenerjevem centru. Več različnih oblakov točk združimo na osnovi najmanj treh identičnih veznih točk, označenih s tarčami. Če želimo, da imajo točke v prostorskem oblaku točk podane koordinate v državnem koordinatnem sistemu, uporabimo oslonilne točke, ki imajo določene skenerjeve in državne koordinate. Dosežek obdelave oblakov točk so 2R načrti in 3R prostorski modeli objektov.

#### **3.4.4 Načrtovanje zajema**

Glede na zahtevano natančnost zajema je potrebno prilagoditi način in včasih tudi čas zajema. Pravilno načrtovanje skeniranja nam namreč poleg pridobitve kakovostnih podatkov prihrani tudi precej časa pri terenskem zajemu in nato pri obdelavi podatkov.

Zahtevana resolucija in natančnost meritev razdalj predstavljata osnovna parametra, ki določata prehod od manj do bolj zahtevnih zajemov. Natančnost razdalj pada z razdaljo zaradi atmosferskih vplivov. Resolucija je strojno omejena s kotnim korakom žarka. Poleg teh dveh parametrov na končni rezultat (določitev lokalnih  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinat točk) vpliva še razpršitev žarka, katerega premer se z dolžino povečuje, s tem pa se zmanjšuje natančnost določitve koordinat. Najmanj zahtevne so ploskve, ki opisujejo površja stabilnih območij in kjer takšno območje zadovoljivo opišemo tudi z manjšo gostoto točk (sem sodijo npr. kamnolomi, ostenja). Naslednja skupina so stabilna območja, kjer je potrebna večja gostota podatkov. Najbolj zahtevna so območja oz. objekti, ki zahtevajo veliko gostoto podatkov, hkrati pa so podvrženi morebitnim premikom. Tovrstna območja (plazovi, ugreznine, nosilne konstrukcije ...) je včasih potrebno izmeriti z maksimalno ločljivostjo in natančnostjo. Glavni vpliv na končno kvaliteto zajema imajo snemalna razdalja, odbojnost površinskih materialov in vpadni kot ter vremenske razmere.

Preglednica 5: Priporočljive oddaljenosti skenerja od objekta za doseganje želene natančnosti in ločljivosti.

NATANČNOST RAZDALJE (4 mm do 10 mm, pada z D)		LOČLJIVOST (<1 mm do 4 cm, pada z D)	
manjša zahtevnost (natančnost x, y, z $\pm$ 2-3 cm)	maksimalni domet (cca. 1.000 m)	maksimalni domet (cca. 1.000 m)	
večja zahtevnost (natančnost x, y, z $<$ $\pm$ 1 cm)	200 m	50 m	

Odbojnost materialov in vpadni koti snemanja vplivajo predvsem na gostoto zajema, saj se na nekaterih snoveh žarki ne odbijejo proti instrumentu, ampak v druge smeri, ali pa se vračajo bistveno oslabljeni in zato težje zaznavni. Občasno lahko predstavlja problem tudi preveč močna sončna svetloba. Terestričnega laserskega skenerja ne uporabljamo pri močnih padavinah. Pri šibkejših lahko z uporabo podatka o prvem oz. zadnjem odboju eliminiramo tiste točke, ki predstavljajo dežne kapljice v zraku, in ohranimo le zadnji odboj.

Konfiguracija terena ponavadi onemogoča zajem zahtevanega območja z enim samim skenogramom, zato se zajame več skenogramov z različnih stojišč. Združeni podatki tako zajemajo celotno zahtevano območje. Poleg tega z izvedbo vsaj dveh posnetkov istega območja in s tem prekrivanja podatkov znatno povečamo zanesljivost izmere. Skenogrami se združujejo na podlagi referenčnih točk (na zajetem objektu se postavijo posebne odbojne tarče, ki jih skener maksimalno natančno zajame z enim skenogramom, lokacija pa je lahko določena z GNSS izmero) ali na podlagi prekrivanja podobnih površin (specializirani programi iščejo podobne ploskve na dveh sosednjih skenogramih in jih tako združijo). Za natančnejše izmere uporabljamo združevanje s skupnimi referenčnimi točkami, ki so izmerjene s tahimetrom. Točke v oblaku točk, ki predstavljajo takšno tarčo, so tako zelo dobro umeščene v prostor, primerno temu pa se natančneje napne tudi mreža ostalih točk iz oblaka.

Hitrost zajema nekaj tisoč oz. deset tisoč točk na sekundo, posledično pomeni pridobitev ogromne količine podatkov. Za procesiranje tolikšne količine podatkov je potrebna posebna programska oprema, ki omogoča delo v CAD okoljih in izdelavo izdelkov, ki jih nato lahko uporabljajo naročniki.

### 3.4.5 Zaključki

Lasersko skeniranje nudi enostavno rešitev za zajem podatkov na območjih, ki so težko dostopna, nevarna ali pa preveč detajlna za klasične meritve. Omogoča izdelavo izredno natančne površinske mreže območja ali objekta. Za pridobitve točkovnih in linijskih podatkov iz georeferenciranega oblaka točk obstajata dva načina. Lahko jih neposredno prenesemo v poznana CAD okolja, kar pomeni, da lahko obdelavo podatkov izvajamo z znanimi programskimi orodji. Lahko pa jih obdelamo s programsko opremo, namenjeno obdelavi podatkov, zajetih z laserskim skenerjem, jim dodajamo attribute in jih v obliki standardnega ASCII<sup>8</sup> formata izvozimo v želen programski paket. Posebna programska orodja omogočajo, da iz oblaka točk ustvarimo TIN<sup>9</sup> mrežo in na njeni podlagi uporabimo več funkcij, ki so povezane z obliko terena. Zaradi ogromne množice meritev lasersko skeniranje omogoča zelo detajlno določitev ploskve terena. Tako za naše potrebe lahko npr. izrisujemo poljubno število karakterističnih profilov terena, ki so zelo natančno definirani.



Slika 32: Inštrument med delom - levo in skenogram skalne stene - desno (www.riegl.com).

---

<sup>8</sup> ASCII - ameriški standardni nabor za izmenjavo informacij je 7-bitni nabor znakov; obsega  $2^7=128$  znakov (iz angl. American Standard Code for Information Interchange).

<sup>9</sup> TIN - nepravilna trikotniška mreža (iz angl. Triangulated Irregular Network).

Na natančnost podatkov poleg natančnosti, ki izhaja iz tehničnih lastnosti laserskega skenerja, vpliva tudi lastnost materiala odbojne površine skeniranega objekta in njegova razdalja od skenerja. Pri modeliranju nepravilnih površin so oblaki razpršenih točk problematični za obdelavo, še posebno, če prisotnost vogalov ne dovoljuje uporabe glajenja cele površine. Zato je za vsako predvideno uporabo skeniranih podatkov potrebno izbrati najprimernejši skener, pri čemer se upošteva zahtevana natančnost določitve položaja točk, velikost objekta in njegovo oddaljenost (Wunderlich, 2002).

### 3.5 DRUGE GEODETSKE METODE

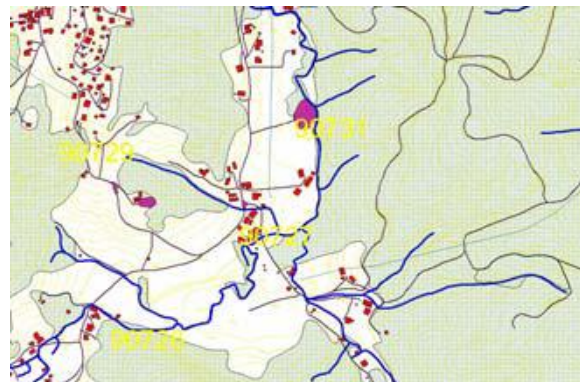
Poleg zgoraj navedenih merskih metod je smiselno omeniti še druge geodetske metode, ki nam v današnjem času vse večkrat priskočijo na pomoč. Pogosto sicer niso primerne za natančne meritve terena, lahko pa jih koristno uporabimo kot dopolnilne metode, npr. za evidentiranje skalnih podorov, kot rastrske podlage v geolociranih prostorskih bazah, kot geodetske podlage za potrebe planiranja, z njimi lahko "oblepimo" 3R modele (projekcija na digitalni model reliefa). Osnovni vir, ki bi lahko zadostil tem potrebam, so s fotogrametričnimi metodami pridobljeni barvni digitalni ortofoto načrti. Poleg njih pa danes vse večji potencial kažejo prostorski podatki lidarskega snemanja, ki postaja vse bolj uporabna tehnologija za pridobivanje prostorskih podatkov.

#### 3.5.1 Ortofoto

Ortofoto je skeniran aeroposnetek, ki je z upoštevanjem centralne projekcije posnetka in digitalnega modela reliefa transformiran v državni koordinatni sistem (državna kartografija, 2002). Po metričnosti je podoben karti, po vsebini pa je ortofoto še vedno fotografija. Z ortofoto načrta je mogoče pridobiti le planimetrične podatke. Njegova geometrična natančnost je zaradi vpliva vhodnih podatkov oz. same tehnologije izdelave v splošnem nekoliko slabša od natančnosti topografske karte istega merila.



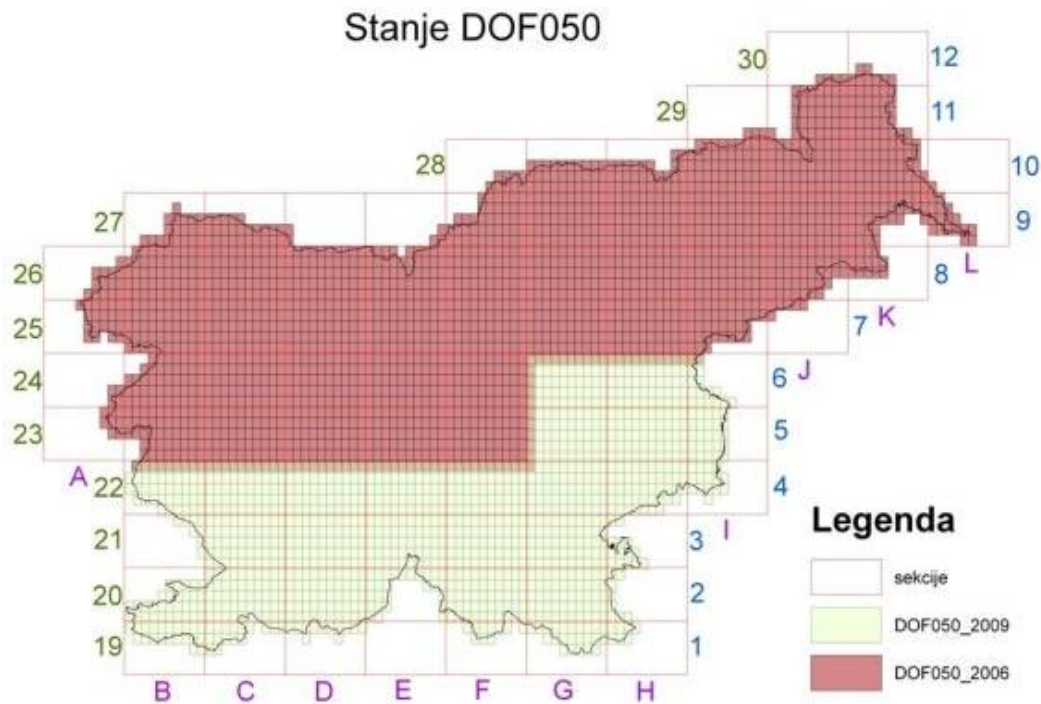
Slika 33: Ortofoto DOF050.



Slika 34: Topografska karta (DTK 5).

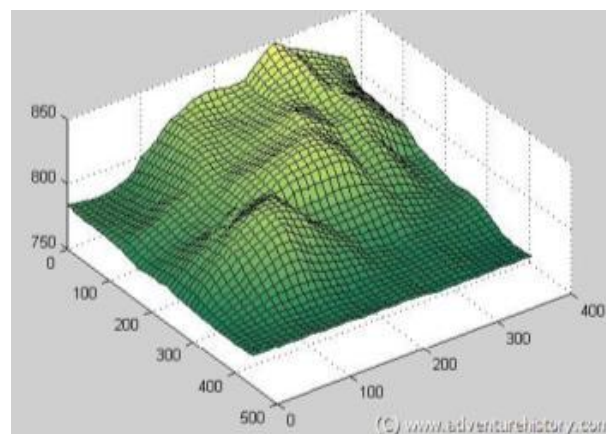
V sodobnem času se ortofoto izdeluje z digitalnimi postopki izdelave. Z ortofoti v merilu 1 : 5.000 (DOF050) in 1 : 25.000 (DOF025) je pokrito celotno območje države.

Kot rečeno, so mersko ortofoti primerljivi z linijskimi kartami (temeljnimi topografskimi načrti v merilu 1 : 5.000), zato je delitev na liste ortofota enaka razdelitvi na liste TTN 5. Slovenija je bila z ortofoti ločljivosti 0,5 m (DOF 5) v celoti prvič pokrita avgusta 2001. Osnovni vir za izdelavo DOF 5 so posnetki cikličnega aerosnemanja Slovenije (CAS) z merilom okrog 1 : 17.500. V letih 2006 so bili za območje Slovenije izdelani novi, barvni ortofoti. Zaradi prehoda na digitalni način zajema podatkov in razširitve produktov se je DOF5 preimenoval v DOF050. Za nekaj območij je bil izdelan barvni ortofoto z velikostjo slikovnega elementa 0,25 m (DOF025) in barvni bližnje infrardeči ortofoto z velikostjo slikovnega elementa 1,0 m (DOF100IR). Tako za DOF050 kot za posnetke CAS velja, da so javno dostopni viri, namenjeni široki uporabi za potrebe različnih strok.



Slika 35: Grafični prikaz izdelanih listov DOF050.

Stranski produkt izdelave ortofoto načrtov je digitalni model reliefa (DMR). Digitalni model reliefa je digitalni zapis nadmorskih višin terena in predstavljajo njegovo obliko. Prikazujemo ga lahko kot pravilno ali nepravilno mrežo višinskih točk ali s plastnicami. Koordinate prostorskih točk so podane z vsemi tremi absolutnimi koordinatami. Zaradi tega je takšen model pri predstavitvi neodvisen od merila prikaza. Uporaben je za verodostojen prikaz oblike terena, za izračune izkopov, nasipov in drugih sprememb v naravi.



Slika 36: Digitalni model višin (www.adventurehistory.com).



Vzporedno z izdelavo DOF 5 je bil tako izdelan DMR 25, katerega položajna natančnost je vezana na grid z velikostjo celice  $25 \times 25$  m. Povprečna višinska natančnost podatkov za raven teren je 1,5 m, za razgiban teren 3 m in za hribovit teren 6,5 m. Višinska natančnost na poraščenih območjih je približno 5 m. V goratih območjih lahko nekatere grobe napake presegajo 50 m.

V določenih primerih obstoječi fotogrametrični viri ne morejo ustreči vsem uporabnikovim zahtevam. V takšnih situacijah je potrebno izvesti novo snemanje v večjih merilih oz. v barvni ali infrardeči tehniki.

Fotogrametrične tehnike so med najbolj učinkovitimi metodami masovnega zajema in umestitve v prostor posameznih objektov v naravi. Poleg metričnih podatkov pridobimo tudi nemetrične oz. opisne podatke o prostorskih pojavih in objektih. Pomembno dejstvo pri fotogrametrični izmeri je, da je terenskega dela razmeroma malo, in se opravi v relativno kratkem času. Rezultat terenskega dela je analogen oz. digitalen posnetek. Fotogrametričen postopek, s katerim izvedemo umestitev aeroposnetka v prostor (običajno v državni koordinatni sistem) se imenuje aerotriangulacija. Za izvedbo postopka je potrebno poznati parametre snemalnega sistema (analogen fotogrametrični aparat, umerjen digitalni aparat, umerjena digitalna videokamera). Poleg tega postopek zahteva tudi izvedbo identifikacije t. i. oslonilnih točk na posnetkih. Oslonilne točke so dobro prepoznavne točke v naravi, ki so vidne na posnetku in imajo znane koordinate v državnem koordinatnem sistemu. Število oslonilnih točk je odvisno od velikosti snemanega območja.

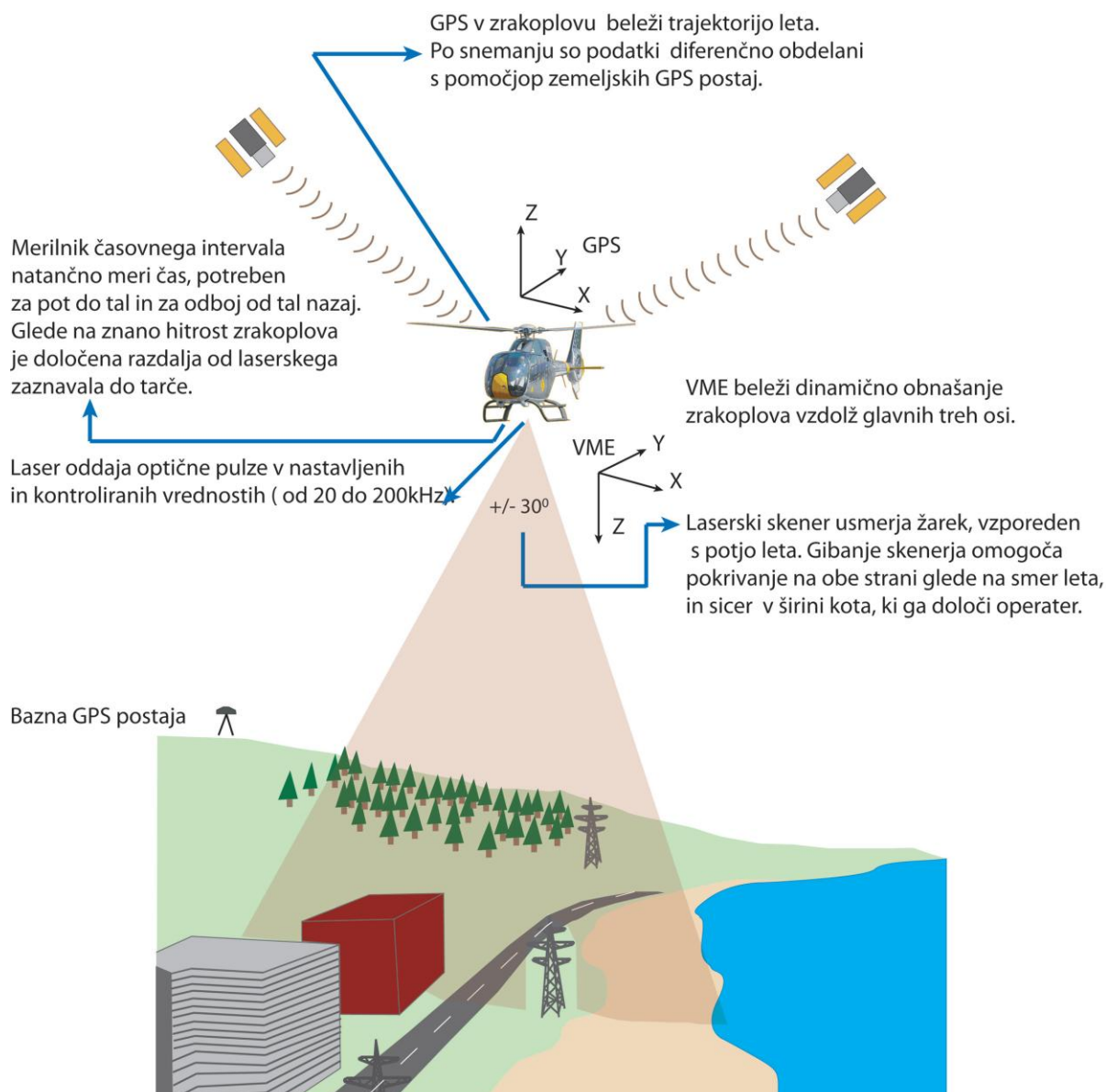
Za ortofoto lahko rečemo, da je postal že skoraj vsakdanji izdelek, nepogrešljiv predvsem kot podlaga za različne prostorske aplikacije. Uporablja se pri evidentiranju in spremljanju sprememb v prostoru, nenadomestljiv je ob beleženju obsega naravnih nesreč – požarov, poplav, plazov in predvsem tam, kjer je dostopnost do terena otežena ali celo onemogočena. Glede na velikost prostora, ki ga lahko istočasno zajamemo in glede na metode obdelave (digitalna tehnologija) je količina na ta način pridobljenih podatkov izredno velika in cenovno ugodna.

### 3.5.2 LIDAR

Letalsko lasersko skeniranje površja je razmeroma nova metoda daljinskega zaznavanja, s katero izdelujemo zelo podrobne digitalne modele višin in omogoča natančnost zajema podatkov površja nekaj 10 cm ali manj. Zanj se pogosto uporablja tudi kratica LIDAR (angl. LIght Detection And Ranging), ker podobno kakor RADAR (angl. RAdio Detection And Ranging), ki uporablja radijske valove za določitev položaja in oddaljenosti, npr. letal in helikopterjev, uporablja svetlobni žarek za določanje oddaljenosti do objekta, od katerega se je žarek odbil (Flood in Gutelius, 1997). Ker tudi na površju, ki ga pokriva gozd, nekaj laserskih pulzov doseže tla, lahko tudi za tako površje izdelamo model višin golega površja, česar druge metode, na primer fotogrametrija, ne omogočajo.

Pri LIDAR-ju je na letalu ali helikopterju laserski oddajnik, ki oddaja zelo kratke pulze (do 33.000 pulzov v sekundi), in optično-mehanska naprava, ki zelo hitro odklanja žarek prečno na smer leta, tako da vsak pulz zadane drugo točko na površju v pasu, pokritem s spiralno črto. Poleg oddajnika se nahajata senzor z majhnim teleskopom, ki zazna odbite žarke, in ura, ki zelo natančno izmeri čas potovanja žarka od letala do tal in nazaj do letala. Z znano hitrostjo laserskega žarka pretvorimo čas potovanja v razdaljo od letala. Za določitev koordinat točk odboja laserskega žarka moramo v vsakem trenutku poznati položaj in usmerjenost merilne naprave na letalu. To je omogočil šele razvoj diferencialnih sistemov GPS in inercialnih navigacijskih sistemov INS, ki so vgrajeni v letalo. V eni ali dveh referenčnih točkah na tleh morajo med snemanjem potekati vzporedne meritve z GPS (slika 37).

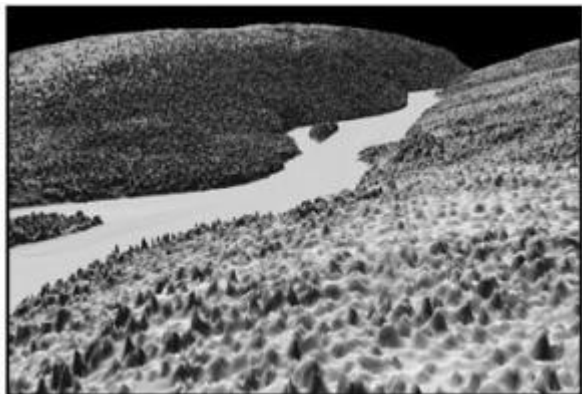




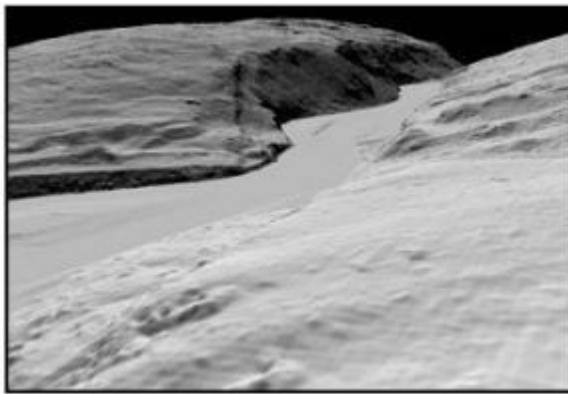
Slika 37: Shema laserskega skeniranja (www.flycom.com).

Natančnost določitve koordinat točk odbojev, ki jo lahko na ta način dosežemo, je v navpični smeri praviloma boljša od 15 cm in v vodoravni smeri boljša od 25 cm. Relativna natančnost pa je seveda še bistveno boljša. Razdalja med točkami odboja je od manj kakor en meter do nekaj metrov. Prvi laserski skenerji so merili le razdaljo do prve ovire, ki je odbila žarek. V gozdnih območjih je to običajno vrh drevesne krošnje (slika 38). Novejši sistemi pa zaznajo večkratne odboje vsakega radarskega pulza. Širina laserskega žarka je na površju tal namreč okoli enega metra. Del tega žarka se v gozdu lahko odbije od listja, del od vej, del pa doseže

tla. Posebej pomemben je zadnji odboj, ki najbolj verjetno predstavlja površje terena (slika 39).



Slika 38: LIDAR – prvi odboj.



Slika 39: Zadnji odboj predstavlja površje terena.

Za prepoznavanje odbojev od tal uporabljamo dokaj zapletene algoritme. Na podlagi nepravilno razporejenih točk odbojev nato izdelamo digitalni model višin (DMV), ki predstavlja topografijo površja s podatki o nadmorski višini v mreži višinskih točk.

Lasersko skeniranje se je v zadnjih letih zelo uveljavilo v različnih vedah. V gozdarstvu ga uporabljajo za analizo vertikalne strukture gozdnih krošenj in ocene letnih prirastkov, v arheologiji za prepoznavanje arheoloških ostalin v gozdnih območjih, v elektrogospodarstvu za načrtovanje tras daljnovodov, v urbanih območjih za izdelavo 3R modelov naselij in v geomorfologiji za analize sprememb na obalnih in poplavnih območjih.

### 3.6 VIDIKI PRI IZBIRI METODE

V zgornjih poglavjih so opisane merske metode, ki se uporabljajo za oceno nevarnosti padajočega kamenja. Vsaka od omenjenih metod ima svoje prednosti in slabosti. Pri izbiri merske metode ima odločilen pomen konfiguracija, dostopnost in lega terena, velikost področja, ki ga želimo posneti, oz. potrebno število geodetskih točk, njihova razporeditev ter stopnja zaraščenosti terena. Poleg želene natančnosti določitve položaja detajlnih točk, na

katero se ponavadi najbolj osredotočimo, je pri izbiri merske metode vsekakor pomemben tudi ekonomski faktor.

Busolna metoda je hitra, enostavna, vendar dosega slabo natančnost in je močno podvržena pogreškom. Ta metoda nikakor ne omogoča izvajanja meritev visoke geodetske natančnosti, vendar jo za oceno nevarnosti padajočega kamenja vseeno uporabljamo v primerih, ko izmera poteka po zelo zaraščenem in zahtevnem terenu, ki onemogoča uporabo drugih primernejših geodetskih metod. V prid tej metodi sicer govori enostavnost in nizka cena inštrumenta, vendar se moramo vprašati, če s to metodo res dosežemo potrebno natančnost.

Na zelo razgibanem terenu, ki je pri analizi padanja kamenja nekaj zelo običajnega, se posnetki največkrat izvajajo s klasično tahimetrično metodo – polarno izmero. Hiter razvoj tahimetrov in programske opreme je postopek izmere zelo olajšal in bistveno poenostavil delo operaterja, saj je delovanje sodobnega tahimetra popolnoma avtomatizirano. Možnost merjenja razdalj brez reflektorja je z vidika varnosti zelo uporabna za analizo nevarnosti padajočega kamenja, saj omogoča brezkontaktno merjenje na nevarnih in težko dostopnih področjih. Prednost omenjene metode je tudi v tem, da pripadajoči programski paketi že omogočajo obdelavo podatkov in pridobitev rezultatov v skoraj realnem času. Med slabosti vsekakor štejemo dejstvo, da za izmero detajla potrebujemo geodetske točke v izbranem koordinatnem sistemu, na katere meritve navežemo. Ker geodetske točke niso vedno na voljo, jih je v bližino delovišča potrebno zagotoviti s posebno definirano izmeritveno mrežo, za kar v določenih primerih porabimo precej časa. Večkrat je zato smiselno meritve izvajati lokalno, brez navezave v globalni ali državni koordinatni sistem. Poleg tega mora biti zagotovljena vidnost vizur, kar pa na razgibanem in poraščenem terenu velikokrat predstavlja problem.

GNSS RTK metoda zaradi natančnih meritev, enostavne uporabe, visoke produktivnosti in pridobivanja informacij o količini in kvaliteti opravljenega terenskega dela že na terenu samem na prvi pogled izgleda kot idealno orodje za pridobivanje hitrih in zanesljivih podatkov. Veliko prednost predstavlja tudi dejstvo, da na območju, kjer delamo ne potrebujemo že vzpostavljene državne geodetske mreže. Vendar pa ima ta metoda dve veliki

pomanjkljivosti. Prva je v tem, da nam konfiguracija terena velikokrat onemogoča dostop do detajlnih točk oz. je gibanje po terenu zaradi padajočega kamenja lahko prenevarno. Drugi in največji minus pa predstavlja neuporabnost za delo na poraščenem terenu, saj zelo hitro izgubi signal in s tem natančnost, ali pa se zaradi motenj sploh ne moremo navezati na bazno postajo.

V današnjem času je vse bolj prisotna kombinacija klasične terestrične in GNSS RTK metode izmere. Na ta način lahko izkoristimo prednosti obeh metod. V primeru omejenega GNSS signala uporabimo tahimeter, če pa med instrumentom in tarčo ni čiste vizure, preprosto preklopimo na GNSS. Poleg tega za izmero detajla ne potrebujemo danih točk za stojišče in orientacijo tahimetra, saj jim položaj enostavno določimo z RTK GNSS metodo izmere. To pomeni svobodno izbiro postavitve inštrumenta, neodvisnost od obstoječih geodetskih točk, prihranek časa za pripravo izmere in prihranek časa pri sami izmeri (manj hoje med točkami, dane točke in detajlne točke lahko zajemate hkrati). Na trgu že obstajajo instrumenti, ki združujejo GNSS in TPS tehnologijo in omogočajo kombiniranje GNSS in TPS meritev na terenu.

Najsodobnejši pristop izvedbe posnetka predstavlja terestrično lasersko skeniranje, ki nam z zajemom ogromnega števila točk zagotavlja najbolj podrobne posnetke vseh detajlov in se najbolj približa realnemu stanju terena. Pri nas se ta metoda za potrebe analize padajočega kamenja še ne uporablja, čeprav se je v tujini izkazala kot hitra in učinkovita metoda (edini primer je terestrično lasersko skeniranje podora pod slapom Čedca, ki ga opisujem v praktičnem delu diplomske naloge). Razloge za to gre verjetno iskati v dragem inštrumentariju in programski opremi, ki pomenita za podjetje veliko začetno investicijo. Terestrično lasersko skeniranje je nekontaktna metoda in zato z vidika varnosti zelo primerna za zajem podatkov na nedostopnih in nevarnih območjih. Ogromno število zajetih točk nam nudi veliko možnosti za kasnejšo obdelavo in predstavlja bistveno prednost pred klasičnimi geodetskimi metodami, ki so omejene na manjše število točk.

Topografske površine lahko ustvarimo tudi na druge načine, na primer iz zračnega laserskega snemanja (LIDAR) ali iz digitalnih podatkov o višinah (DMV). "Tradicionalni" DMV, ustvarjen z interpolacijo izohips, digitaliziranih iz topografskih kart na podlagi aeroposnetkov, seveda nima zadostne natančnosti za potrebe modeliranja padajočega kamenja, pa zato ne smemo zanemariti novih obetajočih in že obstoječih možnosti opisa topografije z večjo natančnostjo. Klasično pridobljenim postopkom daljinskega zaznavanja iz letal in izdelavi podrobnejših modelov višin vedno bolj konkurirajo LIDAR-ski posnetki. Te nove tehnike se že uspešno uporabljajo za številne namene, med njimi tudi za modeliranje skalnih podorov in padajočega kamenja. Z vidika varnosti je prednost teh metod tudi v tem, da lahko ogroženo območje dosežejo in o njem pridobijo podatke, ne da bi opravili neposreden stik s površjem. Za zajem večjih območij pa so tudi ekonomsko gledano ugodnejše.

## 4 PRAKTIČNI PRIMERI

V nadaljevanju bom opisala različne praktične primere geodetskih meritev za potrebe modeliranja skalnih podorov.

Prvi primer je Projekt terenske izmere na območju skalnega podora pod slapom Čedca nad Jezerskim, kjer je bila uporabljena metoda terestričnega laserskega skeniranja. Čeprav primer mogoče ne sodi povsem v tematiko te diplomske naloge, sem se zanj odločila, ker je terestrično lasersko skeniranje dokaj nova metoda, ki se za analizo padajočega kamenja pri nas še ne uporablja. Njena uporaba pa bi bila na večjih področjih padajočega kamenja, kjer je potrebno posneti večje območje, vsekakor smiselna.

Drugi primer obravnava geodetske meritve, uporabljene v Projektu zaščite ceste G2 102/1040 Peršeti–Most na Soči, pred padanjem kamnov na območju pod Ključem, kjer se stalno pojavlja padanje manjših kamnov na cesto in ob cesto v Sočo. Za zavarovanje vozil in ljudi pred padajočim kamenjem je bila l. 2000 predvidena postavitve dinamičnih lovilnih ograj. Izmera karakterističnih profilov terena za potrebe simulacije padanja kamnov je bila izvedena s klasično polarno metodo. Čeprav projekt kasneje ni bil sprejet in se danes na tem mestu gradi galerija, se mi je ta primer zdel zanimiv zaradi zahtevne izvedbe meritev, opisanih v nadaljevanju.

Tretji primer prikazuje geodetske meritve uporabljene v Projektu zaščite regionalne ceste 403 Podbrdo–Kneža, pred padanjem skal in kamenja na območju Klonte. Osnova za izdelavo projekta je poleg geološkega poročila tudi geodetski posnetek obstoječega stanja, pridobljen s klasično polarno izmero in digitalni model reliefa. V nadaljevanju je prikazan tudi postopek modeliranja padajočega kamenja z računalniškim programom RockFall in rezultati simulacije.

## 4.1 TERESTRIČNO LASERSKO SKENIRANJE SKALNEGA PODORA POD SLAPOM ČEDCA NAD JEZERSKIM

### 4.1.1 Uvod

Spomladi 1. 2008 se je v več zaporednih podorih porušilo območje slapu Čedca nad Jezerskim, ki je bil do takrat poznan kot najvišji slovenski slap. Po prvih ocenah naj bi se sprožilo nekaj 10.000 m<sup>3</sup> kamnine in gre za enega pomembnejših skalnih podorov v zadnjih letih pri nas. Po sami sprožitvi podora so izrednega pomena kvalitetni prostorski podatki. Potrebno je določiti neposredno lokacijo podora, umestiti njegov obseg v prostor in izračunati količino sproženega materiala. Ti podatki so v veliko pomoč pri kasnejši sanaciji podora. V našem primeru so bili prostorski podatki zajeti z metodo terestričnega laserskega skeniranja.

Projekt zajema topografskih podatkov in izračuna volumna materiala, sproženega pri podoru pod slapom Čedca nad Jezerskim, katerega naročnik je bilo Ministrstvo za okolje in prostor RS, je izvedlo podjetje DFG Consulting, d.o.o. Projekt je bil, glede na zahtevane rezultate, razdeljen v sledeče sklope:

- terenski zajem podatkov z metodo laserskega skeniranja (izveden dne 8. 10. 2008) za potrebe določitve 3R modela sedanjega stanja;
- izdelava 3R modela območja sedanjega stanja;
- pridobitev stereoparov ter fotogrametrično iz vrednotenje topografskih podatkov stanja območja pred trenutkom podora za potrebe določitve 3R ploskovnega modela takratnega stanja;
- izdelava 3R modela stanja območja pred trenutkom podora;
- izračun spremembe volumna med 3R ploskvijo stanja pred in po podoru za potrebe izračuna ocene količine sproženega materiala;
- priprava prečnih in vzdolžnih prerezov predhodnega in/ali sedanjega stanja na območju plazu.

#### 4.1.2 Terenski zajem podatkov in modeliranje trenutnega stanja

Dne 2. 7. 2008 je bil opravljen predogled terena. Ta ima pomembno vlogo pri izvedbi meritev, saj se na njegovi osnovi določi območje zajema ter pripravi plan snemanja. V okviru predogleda se preuči dostopnost objekta, ki ga želimo zajeti, ugotovi se morebitne nevarnosti in tveganja, izbere se najprimernejša oprema za delo. Okvirno se določi stojišča skenerja in postavitev tarč. Izdela se plan izvedbe geodetske izmere točk za vključitev v izbran koordinatni sistem in časovni plan poteka izmere.

Posebna omejitev pri skeniranju je odbojnost površin. Visoko polirane površine, črna barva in nekateri odtenki rdeče ne zagotavljajo zadovoljivega odboja laserske svetlobe. Zato so take površine za skener skoraj nevidne in jih ne moremo zajeti, razen če jih posujemo s prahom. V takem primeru je potrebno narediti testni zajem točk in preveriti, ali dobljeni podatki ustrezajo zahtevam o natančnosti pri projektu.



Slika 40: Območje podora.



### Terenska oprema:

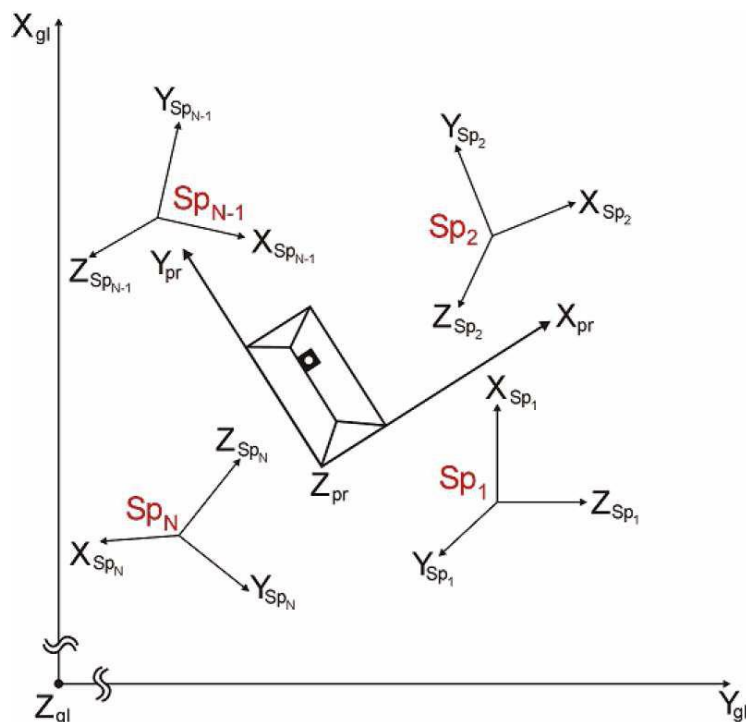
- laserski skener Riegl LMS Z420i in akumulator,
- prenosni računalnik,
- digitalni fotoaparati Nikon D200,
- tarče.



Slika 41–42: Terenska oprema

### Opis metode in potek merjenja

Prvi korak na terenu predstavlja določitev stojišč inštrumenta. Ta morajo biti razporejena tako, da zagotavljajo vidnost celotnega območja, ki ga želimo zajeti. Okvirno se ta mesta določi že v pisarni, na terenu pa se jih še optimizira. V tem primeru je bilo uporabljeno šest stojišč s katerimi je bilo pokrito celotno območje, ki smo ga želeli zajeti. Tehnologija laserskega skeniranja nam omogoča združitev oblakov točk z različnih stojišč že na terenu. Za to potrebujemo oslonilne točke, na katere postavimo odbojne tarče, ki jih čim bolj enakomerno razporedimo po celotnem območju interesa. S pomočjo oslonilnih točk se v fazi obdelave vhodnih podatkov izvede transformacija podatkov iz skenerjevega koordinatnega sistema v skupen projektni koordinatni sistem (v našem primeru Gauss-Kruegerjev koordinatni sistem).



Slika 43: Prikaz treh različnih koordinatnih sistemov (skenerjev, projektni in globalni).

Potrebna je torej še dodatna geodetska metoda, s katero določimo lokacijo tarč, da lahko oblake točk umestimo v prostor. V našem primeru je bila uporabljena GNSS RTK metoda izmere. Preglednica 6 podaja seznam stojišč laserskega skenerja na terenu, lokacije stojišč pa so prikazane na sliki 44.

Preglednica 6: Seznam stojišč inštrumenta s koordinatami v državnem koordinatnem sistemu

OZNAKA	$X_{GK}$ (m)	$Y_{GK}$ (m)	$Z_{GK}$ (m)
S1	463475,876	136425,184	1290,489
S2	463475,783	136425,184	1290,730
S3	463538,490	136436,595	1289,916
S4	463473,039	136588,143	1229,044
S5	463330,280	136827,763	1160,295
S6	463377,663	136993,581	1127,062



Slika 44: Lokacije stojišč laserskega skenerja.

Skeniranje območja podora se je izvajalo dne 8. 10. 2008 in je potekalo ob naravni svetlobi. Prvi korak je bila izvedba predogleda celotnega skenograma z nizko resolucijo. Skener v tem postopku avtomatsko zazna in izmeri lokacije tarč. Temu koraku sledi fino skeniranje terena. Skenerju se določi območje, ki ga želimo posneti (definira se zgornji desni in spodnji levi vogal) in horizontalno ter vertikalno ločljivost oblaka točk. Od teh nastavitvev je odvisen čas snemanja. Zadnji korak, ki ga izvedemo na vsakem stojišču je fotografiranje terena. S tem pridobimo barvne vrednosti oblakov točk, kar nam olajša kasnejšo obdelavo podatkov. V našem primeru je bilo s šestih stojišč izmerjeno 20.441.210 meritev. Ločljivost oblaka točk je bila od 0,040 do 0,070 milistopinj, snemanje na posameznem stojišču je trajalo 15–25 min. Čas, potreben za snemanje, je znašal 7 ur.

Meritve so potekale brez večjih težav. Edina problema sta bila onemogočen dostop do zgornjega dela plazu, kjer je prišlo do podora materiala, in slabša razpoložljivost GNSS

signala pod steno. Kljub temu ocenjujemo, da to bistveno ni vplivalo na izračun volumenskih kapacitet.

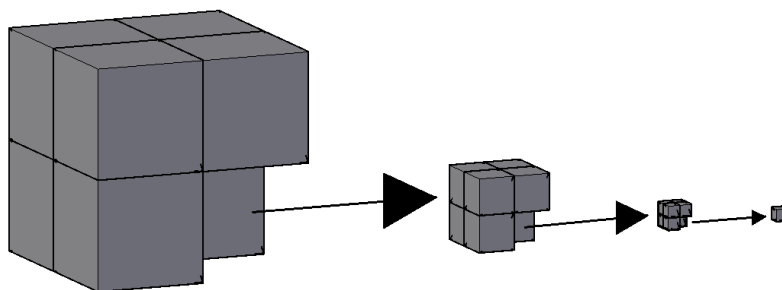
### **4.1.3 Izdelava 3R območja sedanjega stanja**

Z vsakim posameznim skenogramom na posameznem stojišču smo pridobili oblak točk s prostorskimi koordinatami v skenerjevem koordinatnem sistemu z izhodiščem v skenerjevem centru. Posamezni skenogram je zajemal povprečno 10.000.000 točk. Oblak točk je prikazan v 3R modelu, kjer je vsaki točki določena barva (RGB), s pomočjo kalibrirane in skladno s skenerjem orientirane digitalne kamere.

### **Obdelava terenskih podatkov**

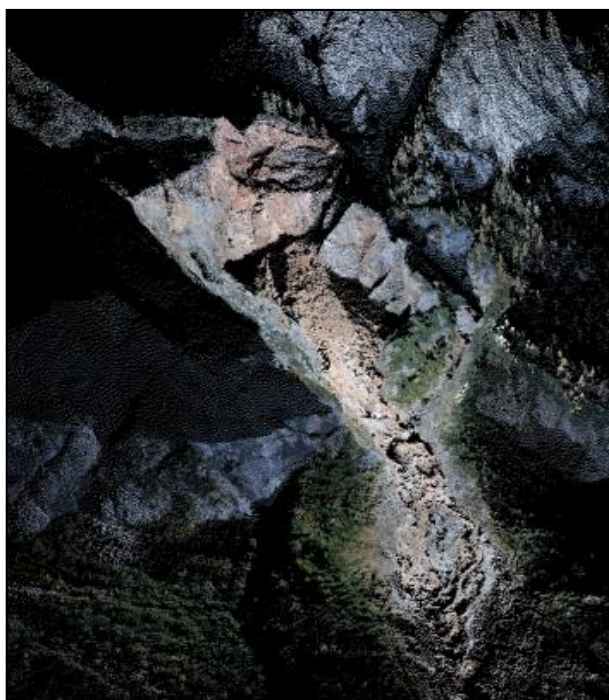
Za obdelavo podatkov je bil uporabljen programski paket RiSCAN PRO, ki je sestavni del sistema za lasersko skeniranje Riegl. Programski paket je namenjen upravljanju s skenerjem pri zajemu podatkov, združevanju skenogramov, obdelavi podatkov, izpisu in analizam. Metričnost točk v skenogramu omogoča učinkovito in enostavno merjenje razdalj, modeliranje, izdelavo višinskih profilov terena, izračun volumnov in površin, izdelavo geodetskih posnetkov terena in podobno.

Prvi korak obdelave podatkov je združevanje posameznih skenogramov v enega skupnega. Ker je število točk posameznega skenograma ogromno in predstavljajo veliko breme za računalnik, je njihovo število potrebno zmanjšati. Za ta namen uporabimo funkcijo filtriranja, ki odstrani točke po metodi oktalnega drevesa (ang. octree). Ta metoda temelji na kocki, ki se deli na osem enakih kock, ki se tako delijo naprej do neke določene minimalne vrednosti velikosti kocke. V te kocke so zajete vse točke obravnavanega območja. Filter v vsaki najmanjši kocki ohrani samo eno točko, ki je težišče vseh točk v tej kocki. Zredčene točke so tako enakomerno razpršene po površini modela, kar nudi hitrejšo izvedbo operacij.



Slika 45: Shema oktalnega drevesa.

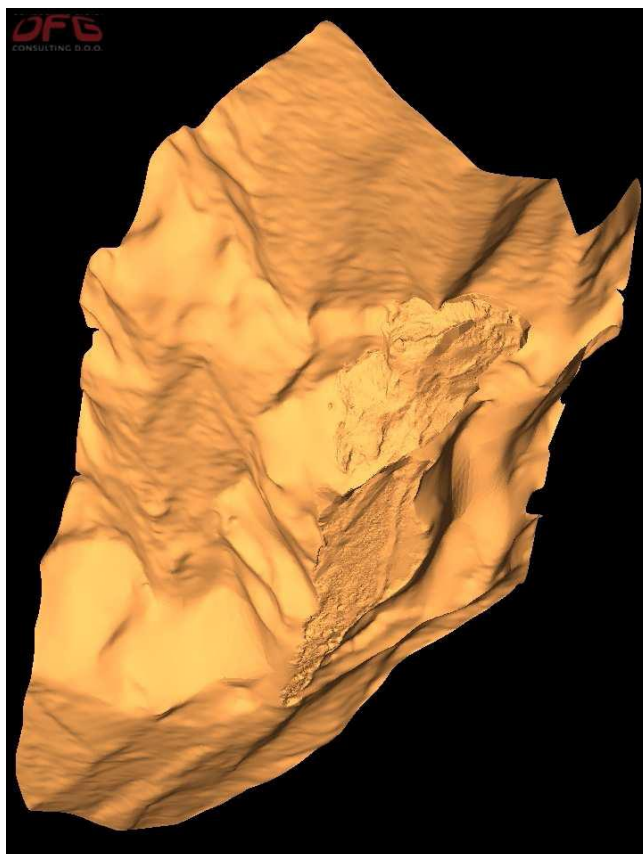
Z vgrajenimi funkcijami (npr. na celici izbrane velikosti 0,5 x 0,5 m ohranimo le najnižjo točko oblaka – ta je verjetno na tleh) in naknadno ročno kontrolo lahko odstranimo tudi vse odvečne objekte (vegetacija, grajeni objekti, prevozna sredstva ...), ki so bili zajeti v skenogramu. V našem primeru to ni bilo potrebno, saj na ožjem območju interesa takih objektov ni bilo. V spodnjem delu se je sicer pojavila vegetacija (borovci), ki je bila zajeta v oblakih točk, vendar na tem območju ni bilo potrebno računati spremembe volumenske razlike. Za izdelavo modelov smo tako obravnavali filtrirano območje s 1.079.169 meritvami, kar pomeni, da smo število točk zmanjšali za 94,7 %.



Slika 46: Združen oblak točk z dodanimi RGB vrednostmi.



Naslednji korak obdelave podatkov je triangulacija. Točke terena povežemo v trikotniško mrežo in s tem ponazorimo ploskev terena. Program izvede triangulacijo pa Delaunay-evi metodi, ki točke poveže, tako da tvorijo čim bolj enakostranične trikotnike.

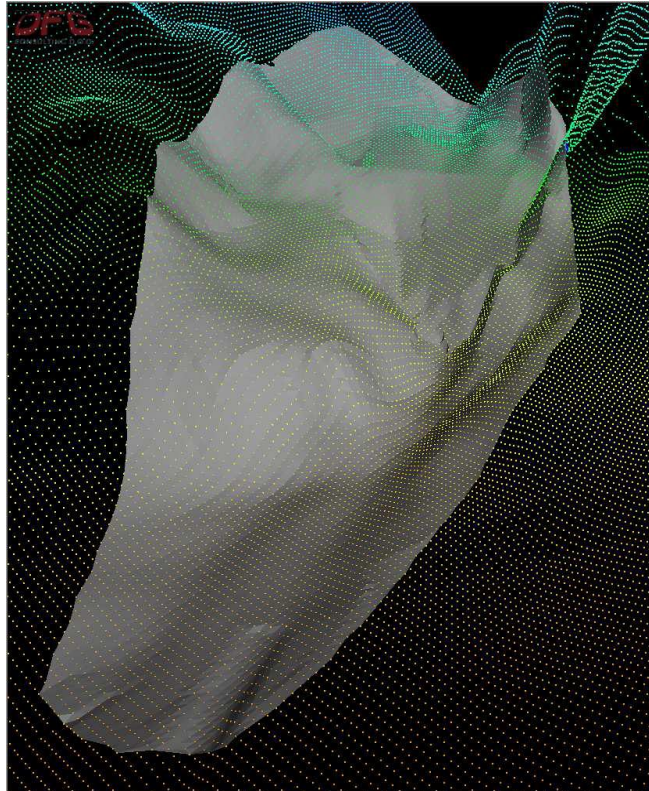


Slika 47: 3R model sedanjega stanja.

#### **4.1.4 Pridobitev stereoparov ter fotogrametrično izrednotenje topografskih podatkov stanja območja pred trenutkom podora za potrebe določitve 3R ploskovnega modela takratnega stanja**

Pri vsakem podoru nas zanima, kakšno je bilo stanje pred nastankom podora, saj lahko le na osnovi razlike med prejšnjim in trenutnim stanjem ugotovimo za kakšne spremembe gre. Za ta namen so najpogosteje uporabljeni posnetki cikličnega ali posebnega aerosnemanja, na osnovi katerih lahko izvedeno fotogrametrične meritve.

V našem primeru so bili za določitev stanja pred sprožitvijo podora najprej pridobljeni podatki digitalnega modela reliefa DMR5 (vir: Geodetska uprava Republike Slovenije). Zaradi slabe kakovosti izhodiščnega modela terena (problematična je predvsem višinska komponenta modela) je bilo le-tega potrebno izboljšati s postopki digitalne fotogrametrije.



**Slika 48: Točke in 3R model DMR.**

Poleg omenjenega DMR-ja so bili za izboljšanje izhodiščnega modela potrebni še stereopari tj. orientirani digitalni letalski posnetki tega območja (vir: Geodetska uprava Republike Slovenije). Le ti so bili zajeti v okviru snemanja DASO 2006.

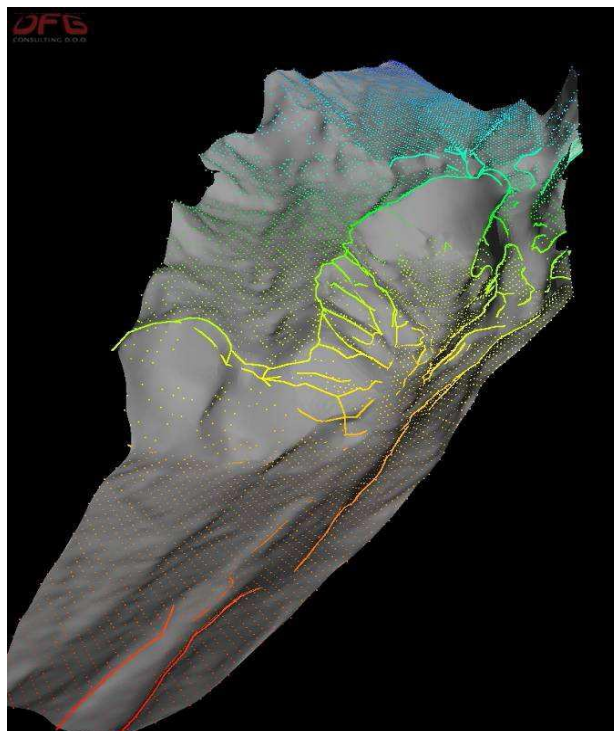


Slika 49: Primer posnetka terena

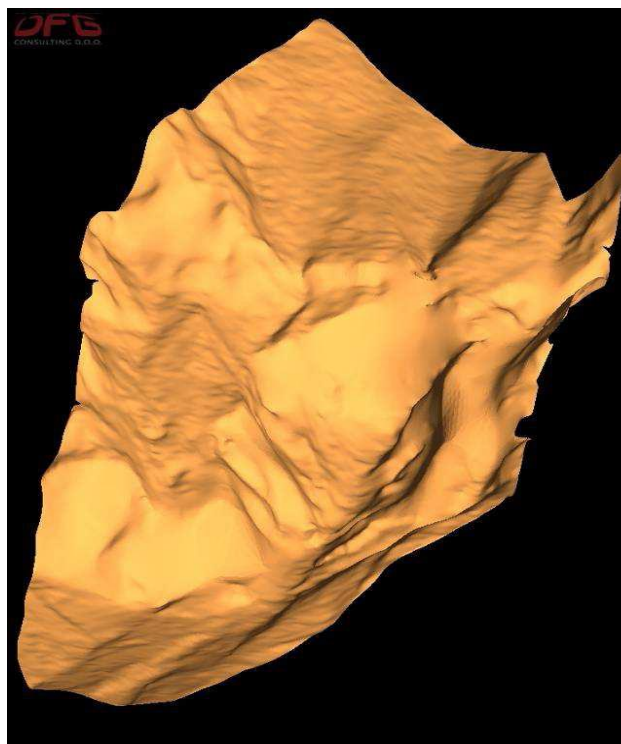
#### 4.1.5 Izdelava modela stanja območja pred trenutkom podora

Za izdelavo modela stanja območja pred trenutkom podora je bila uporabljena programska oprema StereExplorer, ki je last podjetja DFG Consulting d.o.o. Le-ta omogoča, da vsako točko DMR-ja postavimo na dejansko višino, določeno s pomočjo stereogledanja na stereoparu. Poleg popravljanja višine posameznih točk je bil obstoječ DMR5 nadgrajen še z lomnimi linijami (slika 50). Te izboljšajo morfologijo terena na mestih strmih naklonov, kjer je točkovna-klasična predstavitev DMR-ja premalo natančna zaradi premajhne ločljivosti osnovne celice, ki znaša 5 m. Na podlagi teh izboljšav je bil izdelan 3R model popravljenega DMR-ja (slika 51).



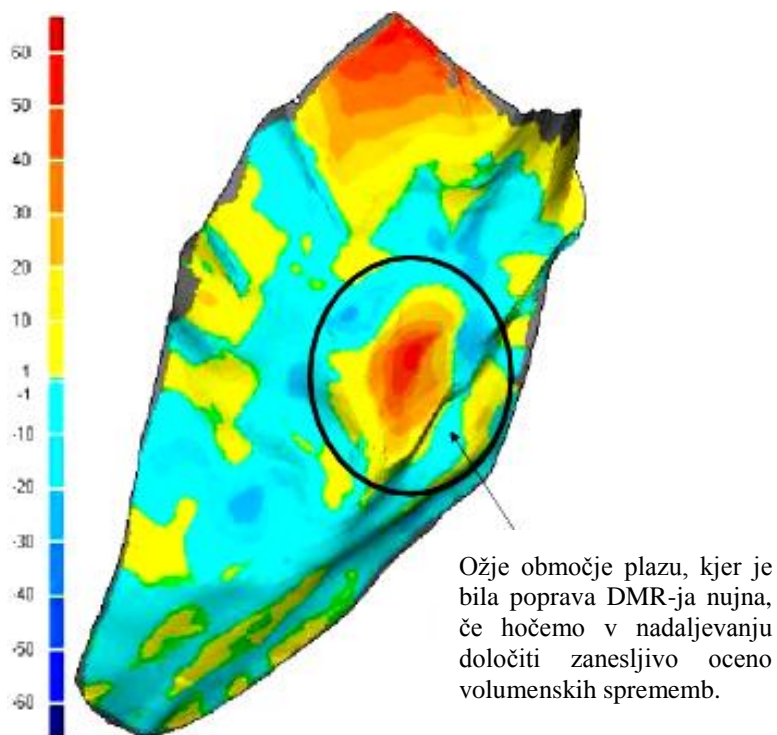


Slika 50: Prikaz točk in karakterističnih linij terena, pomočjo katerih je bila referenčna ploskev teren izboljšana.



Slika 51: 3R model popravljenega DMR-ja.

Na sliki 52 so prikazana odstopanja med 3R modelom DMR-ja, ki je bil izdelan iz podatkov GURS-a, ter popravljenim DMR-jem po fazi ponovnega stereoizvrednotenja. Odstopanja obeh modelov so predstavljena v metrih in so znašala tudi do 60 m.



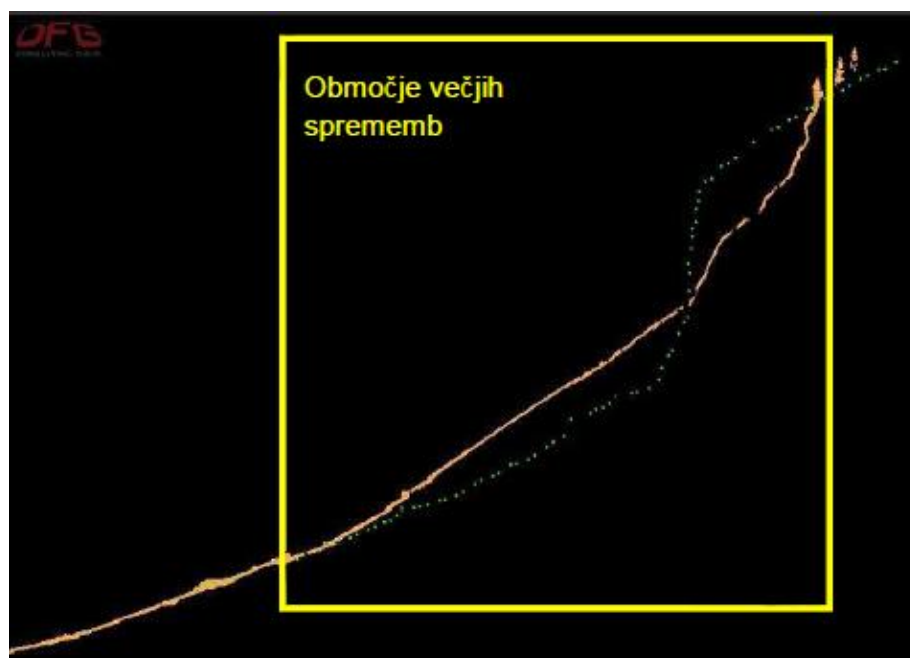
Slika 52: Odstopanja DMR-ja glede na popravljeni DMR.

#### 4.1.6 Izračun spremembe volumna med ploskvijo stanja pred in po podoru za potrebe izračuna ocene količine sproženega materiala

Največja sprememba volumna je nastala na območju, ki je prikazano na sliki 53. Na posnetku je prikazano stanje pred podorom plazu. Na označenem območju je bila računana tudi sprememba volumnov. Območje večjih sprememb smo izbrali glede na vzdolžne prereze plazu. Primer takega vzdolžnega prereza je na sliki 54.

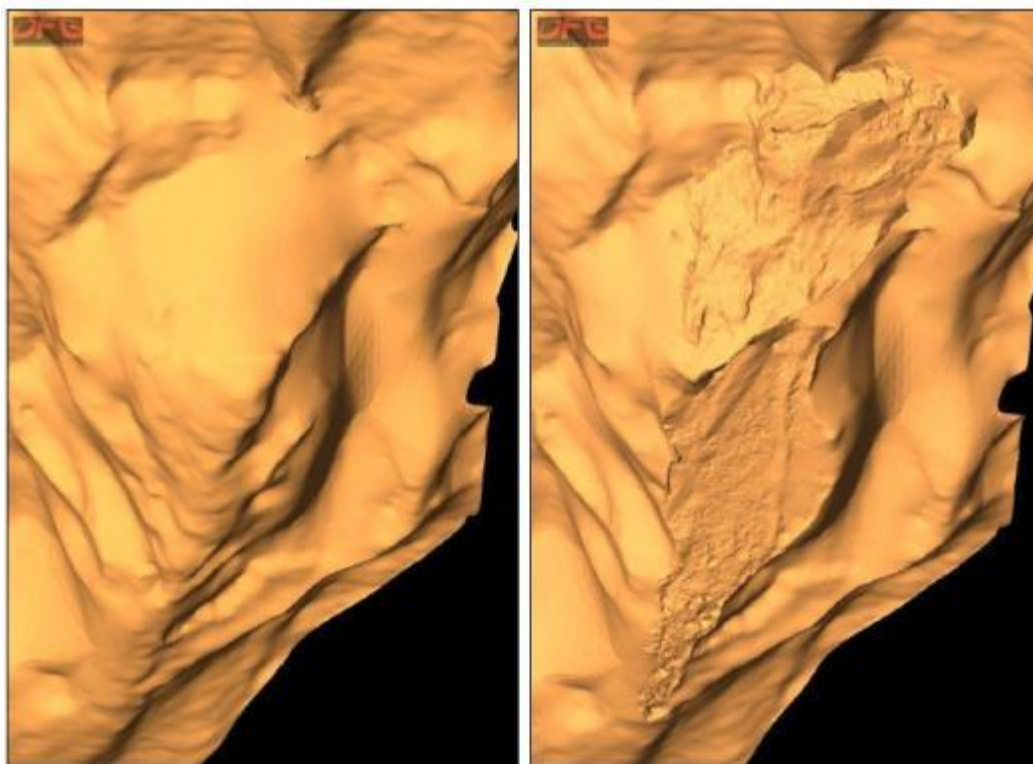


Slika 53: Območje računanja spremembe volumnov.



Slika 54: Vzdolžni prerez za določitev ožjega območja interesa.

Primerjava ploskev prejšnjega in sedanjega stanja terena na ožjem območju interesa je prikazana na spodnjih dveh slikah.

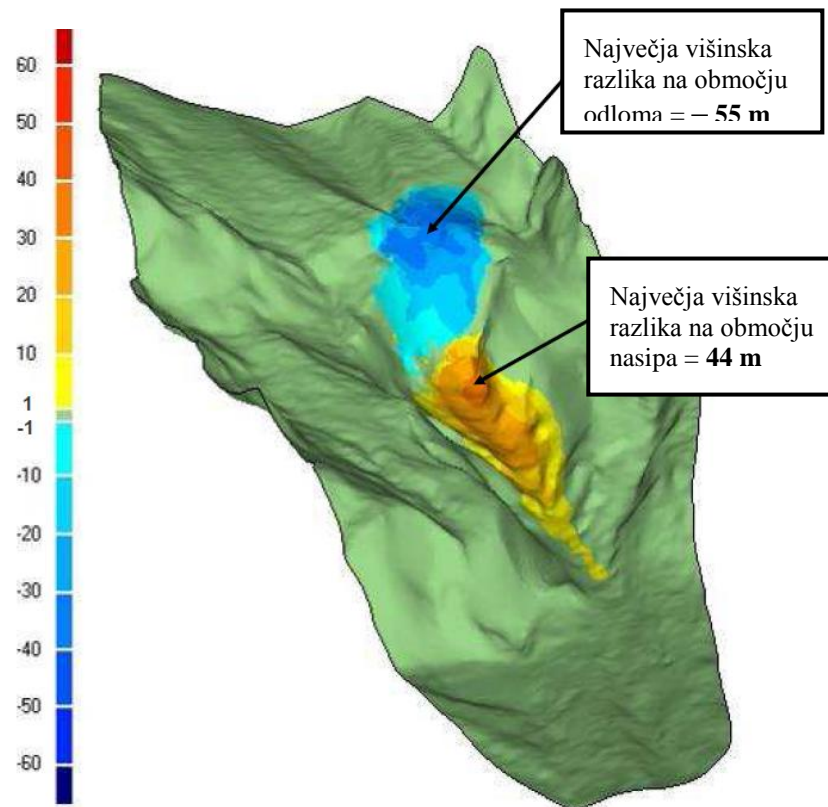


**Slika 55: Prejšnje in sedanje stanje terena.**

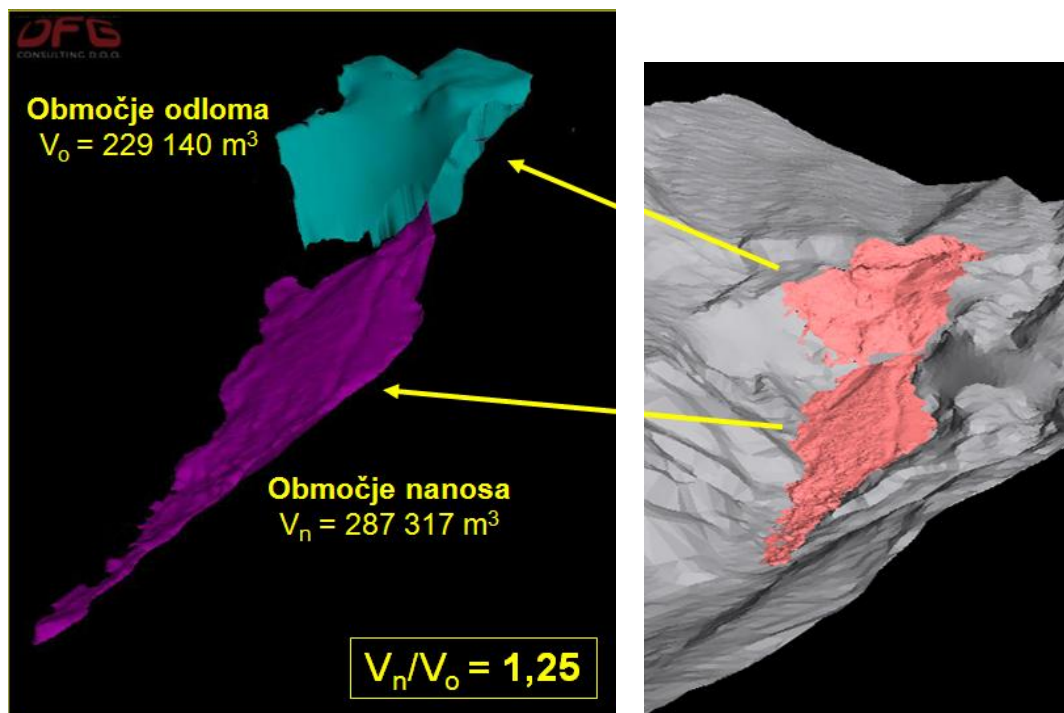
Višinske razlike med modeloma so predstavljene na sliki 56. Podana je višinska razlika trenutnega stanja glede na stanje pred podorom. Kjer so nastale največje spremembe, je na modelu prikazano v temno rdeči in modri barvi. Odstopanja so podana v metrih.

Razlike volumnov so bile izračunane z odštevanjem 3R modelov pred in po podoru. Grafično je razlika med obema modeloma predstavljena na sliki 57.





Slika 56: Odstopanja med stanjem pred in po podoru.

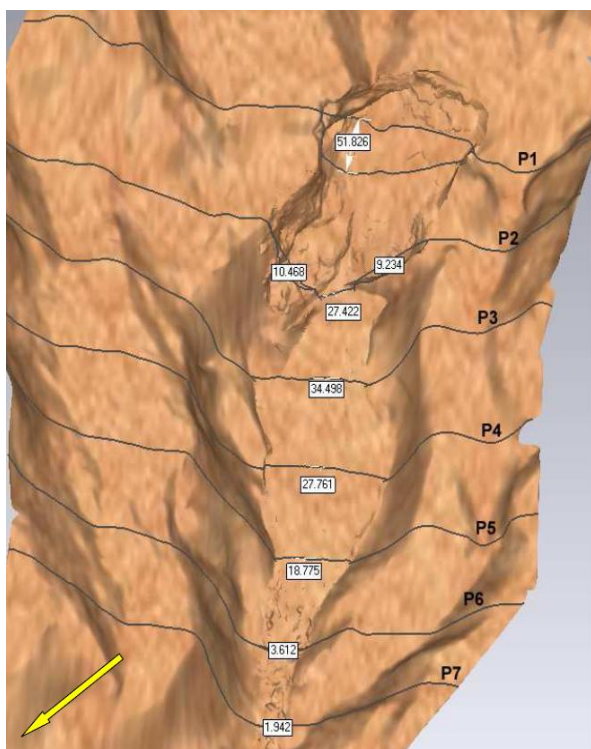


Slika 57: Razlike modelov.

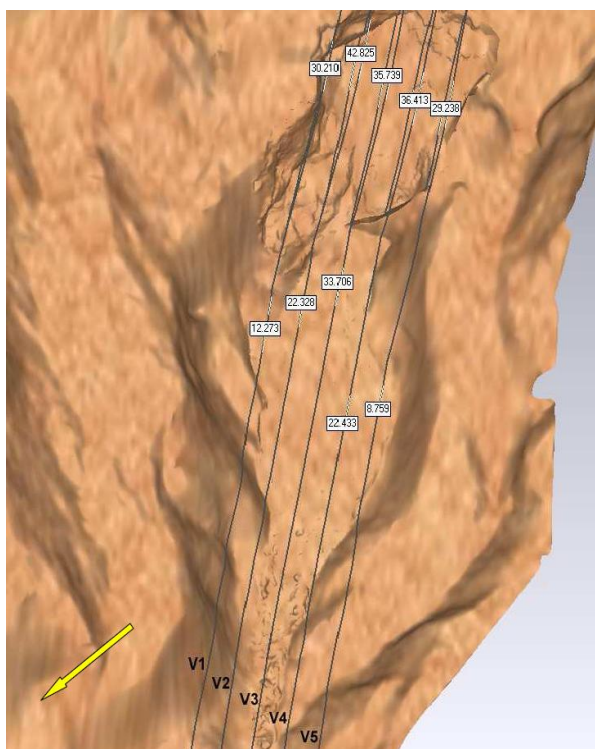
Volumen skalnega podora in nastalega melišča je bil izračunan kot razlika med dvema ploskvama. Volumen se računa med dvema ploskvama na podlagi odštevanj višinskih komponent med primerjalnima ploskvama. Kjer je sedanje stanje nižje od prejšnjega, se računa volumen skalnega podora, kjer je višje, pa volumen nastalega melišča. Pri izračunu volumnov smo se omejili na območje znotraj poligona (slika 54). Na ta način smo se izognili morebitnim višinskim razlikam med modeloma terena izven tega območja. Tako eliminiramo prenos šuma, ki je prisoten na območjih izven poligona na izračun volumskih kapacitet.

Volumen skalnega podora po izračunih znaša  $229.100 \text{ m}^3$ , volumen nastalega melišča pa  $287.300 \text{ m}^3$  in je 1,25-krat večji od volumna skalnega podora. Pri izračunu ni bil upoštevan material, ki ga je voda odnesla v dolino. Po ocenah strokovnjakov gre za relativno majhno količino materiala.

#### 4.1.7 Prečni in vzdolžni prerezi predhodnega in sedanjega stanja



Slika 58: Prečni prerezi terena pred in po podoru.



Slika 59: Vzdolžni prerezi terena pred in po podoru.

Med ploskvijo stanja pred podorom in ploskvijo trenutnega stanja so bili izdelani prečni in vzdolžni prerezi. Podane so tudi višinske razlike med ploskvama na izbranih prerezih. Smer severa je označena z rumeno puščico. Posamezni prerezi so podani v prilogi 1 in 2.

#### **4.1.8 Zaključki projekta**

- Metoda laserskega skeniranja se je izkazala kot ustrezna in jo je smotrno uporabljati v primeru zajema večje količine podatkov,
- obstoječi DMR ni dovolj natančen za uporabo,
- metoda laserskega skeniranja omogoča natančen izračuna volumnov, različne prikaze stanja pred in po sprožitvi podora ter izdelavo prerezov.

#### **4.2 PROJEKT ZAŠČITE ZAŠČITE CESTE G2 102/1040 PERŠETI–MOST NA SOČI PRED PADANJEM KAMNOV NA OBMOČJU POD KLJUČEM**

Na cesti G2 102/1040 Peršeti–Most na Soči je na območju pod Ključem strmo pobočje (skala), kjer se stalno pojavlja padanje manjših kamnov na cesto in ob cesto v Sočo. Asfalt je bil na tem območju od udarcev kamenja že zelo poškodovan. Za zavarovanje vozil in ljudi pred padajočim kamenjem je bila predvidena postavitve dinamičnih varovalnih ograj.

Na tem odseku je na levi strani ceste visoka skalna brežina s katere na cestišče stalno pada kamenje. Kamenje pada tudi direktno v Sočo oziroma v akumulacijsko jezero, ki sta na desni strani ceste cca 2,5 m nižje od cestišča. Zaradi padlega kamenja je bilo evidentirano več prijav in tudi nesreč. Brežina je bila višje že sanirana s težkimi mrežami, ki so bile tudi očiščene, vendar taka zaščita ni povsem učinkovita. Odsek poteka ob naravnem spomeniku z imenom Geološke plasti pri Ključu. Vidni so nagubani skladi ploščatega apnenca, med skladi pa ležijo plasti roženca (ploščati mikritni in kalakarenitni volčanski apnenec z roženci), kar je tudi

potrebno upoštevati pri izbiri sanacije in izvedbe del. Projekt za izvedbo<sup>10</sup> (PZI) je po naročilu investitorja Direkcije Republike Slovenije za ceste, l. 2000 izdelalo Podjetje za urejanje hudournikov, d.o.o.



**Slika 60:** Dolvodni pogled na obravnavani odsek.

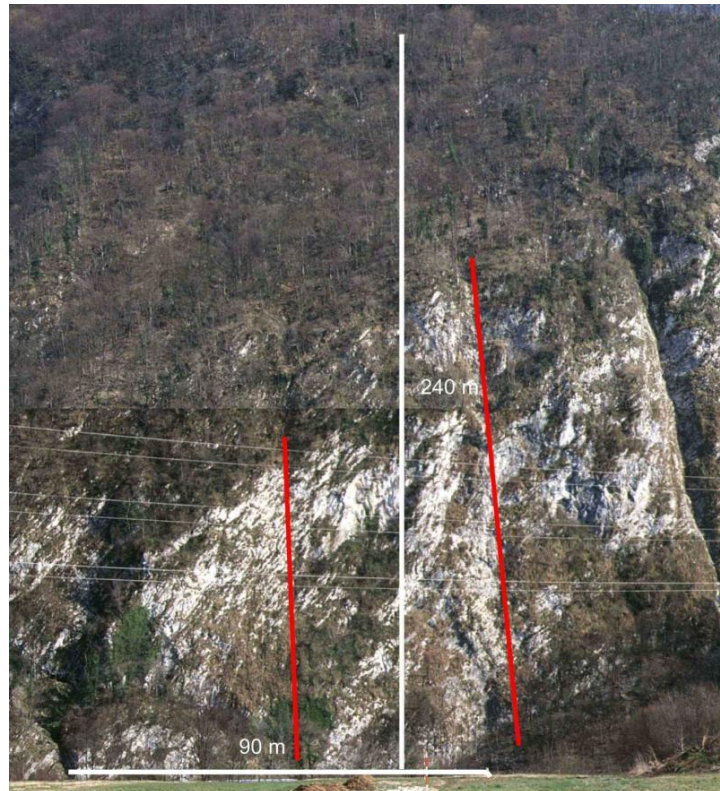
#### **4.2.1 Geodetski posnetek prečnih profilov stene Ključ pri Mostu na Soči**

Za namen projektne rešitve zaščite ceste Most na Soči–Tolmin pred padajočim kamenjem je bilo potrebno izmeriti dva karakteristična vzdolžna profila stene Ključ. Položaj profilov je bil izbran tako, da je čim bolj zajel karakteristike nevarnega območja.

---

<sup>10</sup> Projekt za izvedbo (PZI) je namenjen gradnji objekta. Vsebuje vse potrebne načrte, tehnična poročila in izračune za izvedbo objekta.





**Slika 61: Izbrana vzdolžna profila.**

Geodetski posnetek je izdelalo Podjetje za urejanje hudournikov, d.o.o. Izbrana je bila klasična terestrična metoda – polarna izmera. Za izmero je bil uporabljen elektronski tahimeter SOKKIA 3030R3 s pripadajočo opremo.



**Slika 62: Elektronski tahimeter SOKKIA 3030R3.**

Stena Ključ je precej strma in visoka, zato je bilo potrebno izmeritvena stojišča locirati na večji oddaljenosti, in sicer na drugi strani reke Soče. Posebnost izmere je bila v tem, da so bili profili posneti na zahteven in tudi nevaren način. Čez steno se je namreč po vrvi spuščal figurant – alpinist, ki je na karakterističnih lomnih točkah držal odbojno prizmo. Na ta način sta bila posneta oba karakteristična profila. Geodetski posnetek in vzdolžna profila sta podana v prilogi 3 in 4. Inštrumentov, ki bi omogočali izmero detajlnih točk brez uporabe prizme in nam danes zelo olajšajo delo v podobnih primerih, takrat še ni bilo na voljo.

Na terenu posnete točke so bile preračunane in prenesene v Autocad in s Kaliopo obdelane – izrisana karakteristična profila.

Ker so bili terestrično pridobljeni podatki uporabljeni samo za simulacijo sil padajočega kamenja, posnetek ni geolociran in višinsko umeščen.

#### 4.3            PROJEKT ZAŠČITE REGIONALNE CESTE ŠT. 403 PODBRDO–KNEŽA                   PRED PADANJEM SKAL IN KAMNOV NA OBMOČJU KLONTE

##### 4.3.1        Uvod

Po naročilu investitorja (Direkcija Republike Slovenije za ceste) je bil l. 2009 izdelan Projekt za izvedbo (PZI) za varovanje brežine Klonte, nad cesto R2-403, odsek 1072 Kneža–Podbrdo, od km 6.500 do km 6.900 (izdelal Darjo Durjava, univ. dipl. ing. gozd).

Omenjeni odsek je ogrožen s padajočim kamenjem. Trasa poteka v pobočju, sestavljenega iz baških dolomitov, ki se pojavljajo v obliki plošč in skladov. Med ploščami se pojavlja tudi dolomitna breča. Vpad plasti je v smeri severa pod sorazmerno strmimi koti ( $50^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ). Na območju je več žarišč in potencialno nevarnih predelov, iz katerih je pogosto padanje skal na

cesto, kar je najboljše razvidno iz evidentnih poškodb cestišča, poškodb na drevju ter grmovju nad cesto in historičnim pregledom dogodkov.

Osnova za izdelavo projekta zaščite pred padajočim kamenjem je geodetski posnetek obstoječega stanja, ortofoto načrt (izdelal Andrej Grilc, univ. dipl. geod.) ter Geološko poročilo za izdelavo projekta zaščite regionalne ceste št. 403 Podbrdo–Kneža pred padanjem skal in kamnov na območju Klonte (izdelal izr. prof. dr. Mihael Ribičič, univ. dipl. inž. geol.).

#### **4.3.2 Geološko poročilo (povzetek)**

##### **Historični pregled**

Historični pregled je podan na osnovi zapisov Stanislava Ortarja iz Koritnice, ki je zabeležil naslednje dogodke na območju Klonte nad regionalno cesto in zaselkom Zarakovec:

- "V 70-ih letih prejšnjega stoletja je skala v Klontah padla na avtomobil, ki je slučajno pripeljal mimo. Avto je bil popolnoma uničen, šofer na levi strani je čudežno preživel.
- Nekaj let za tem je velika skala nekega popoldneva priletela preko ceste v hišo Ortarja in podrla del severne stene hiše, ki se je sesula v notranje prostore. (njegova stara mama jo je za las odnesla, ker je slučajno odšla iz hiše, ravno tako avtobus poln delavcev iz Bače Podbrdo, ki je par minut prej peljal mimo).
- Nekaj za tem je velika skala priletela na cesto malo pred hišo št. 13, napravila luknjo v cesti, pretrgala lokalni vodovod in zid pod njivo.
- 8. 3. 2008 se je zgodil podor skal na cesto v Klontah, ki mu je sledil velik in časovno daljši sanacijski poseg.
- Nazadnje se je 27. 3. 2008 zgodil podor skal, ki je poleg poškodbe cestišča in zidov ponovno pretrgal lokalni vodovod."

Poleg naštetih dogodkov je bilo še več podobnih, ki pa niso bili zabeleženi. Na spodnjih slikah predstavljamo del dokumentacije Stanislava Ortarja, ki jih je posnel in izdelal ob podornih dogodkih.



Slika 63: Podor skalnih blokov marca 2008.



Slika 64: Poškodbe cestišča po podoru.

### Splošna morfološka in geološka zgradba

Obravnavano območje se nahaja pod južnim strmim pobočjem Koriške gore z nadmorsko višino 1.049 m, ki se dviga nad regionalno cesto 403, med naseljema Koritnica in Hudajužna. Skale, ki padajo iz pobočja, ogrožajo cesto in zaselek Zarakovec. Morfološko teren predstavlja strmo nagnjeno pobočje z vmesnimi plitvimi grapami ter lokalnimi skalnimi subvertikalno nagnjenimi čermi in grebeni, ki so žarišča izpada skalnih gmot.

Teren je poraščen z nizkimi drevesi in grmovjem. Drevesa in grmovja so po oceni povprečno na medsebojni razdalji med 2,5 m in 5,0 m. Debelina grmovja je med 0,02 in 0,05 m, debelina dreves pa med 0,1 in 0,2 m. Številna debela kažejo poškodbe udarcev kamnov. Poškodbe je bilo opaziti do 5 m nad tlemi, kar priča, da lahko kamni odskakujejo tudi tako visoko. Številne skale in kamni so se ustavili na pobočju in za drevesi, kar priča na stalno izpadanje kamnov iz skalnih predelov. Gole skalne površine so, ker so na južnem pobočju, podvržene delovanju preperevanja zaradi temperaturnih razlik, v zimskem času pa se temu pridruži tudi delovanje zmrzovanja. Znaki padanja skalnih gmot nam omogočajo opredeliti glavne

parametre, ki jih potrebujemo za vhodne podatke pri modeliranju padanja skal in kamenja (fotografije so podane v prilogi 5).



**Slika 65: Obravnavano območje Klonte (foto: Ribičič M.).**

Obravnavan teren gradi zgornjetriasni siv baški dolomit, ki se pojavlja v obliki plošč in skladov, debelih med 0,1 in 0,5 m. Dolomit je nastal diagenetsko iz apnenca. Med dolomitom pogosto zasledimo pole in gomolje črnega ali svetlo sivega roženca. Na terenu med kartiranjem smo med dolomitom zasledili tudi prehode v dolomitne breče. Na osnovi meritev nagiba plasti smo ugotovili, da je njihov vpad proti severu, včasih tudi nekoliko proti severovzhodu pod sorazmerno strmimi naklonskimi koti, okoli  $50^{\circ}$ – $60^{\circ}$ .

### **Terenski pregled kritičnih mest**

V geološkem poročilu je podanih 14 kritičnih območij (slika 66). Za vsako od teh je določena stopnja nevarnosti in način zaščite. Stopnja nevarnosti je lahko manjša, srednja ali velika.





Slika 66: Kritična območja padajočega kamenja na brežini Klonte.

Najnevarnejši sta območji št. 2 in 3. Na območju št. 2 se je zgodil zadnji podor skal marca 2008, omenjen je tudi v geološkem poročilu. Na obeh območjih so vidni večji prepereli skalni bloki. Kot srednje nevarna območja so v geološkem poročilu navedeni predeli št. 6, 8, 9 in 10. Na teh predelih je ravno tako možno izpadanje skalnih blokov, ki pa niso enakih dimenzij kot pri žariščih 2 in 3. Ostala obravnavana območja so označena kot manj nevarna, pa vendar se kljub temu zaradi večjih naklonov in specifičnih terenskih pogojev lahko zgodi odlom tudi srednje velikih blokov. Zaradi tega je potrebno varovati tudi območje pod preostalimi žarišči.

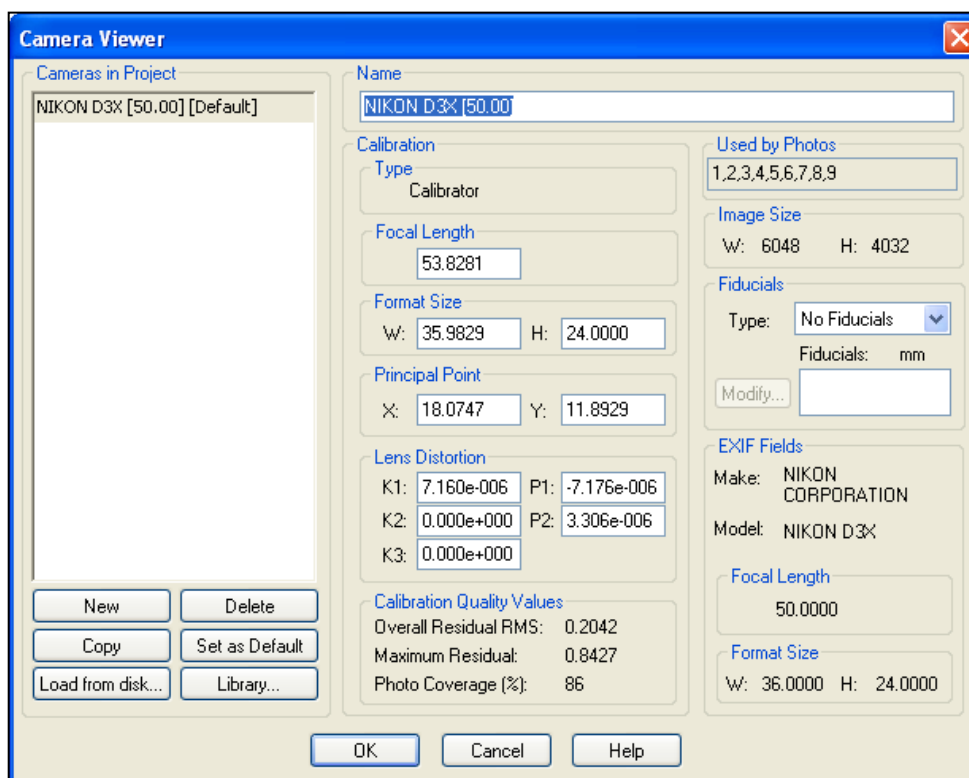
### 4.3.3 Geodetski posnetek obstoječega stanja in DMV

Geodetski posnetek obstoječega stanja in digitalni model višin (DMV) je za potrebe Projekta zaščite regionalne ceste št. 403 Podbrdo–Kneža pred padanjem skal in kamnov na območju Klonte izdelalo podjetje Grangeo, d.o.o. Odločitev za izdelavo podrobnejšega ortofoto načrta in DMV je bila sprejeta predvsem iz razloga, da z enim postopkom fotografiranja pridobi tako metrične kot tudi opisne podatke o kritičnem območju ceste. Velikost slikovnega elementa v

naravi je na izdelanem ortofotu 10 cm, kar se je izkazalo za izredno primerno tako za opazovanje geomorfoloških procesov kot za izdelavo vzdolžnih profilov na podlagi DMV.

Letalsko snemanje širšega področja Koritnice v Baški grapi je potekalo dne 23. 11. 2008. Snemanje je izvedlo podjetje Iluzija iz Rečice ob Savinji, ki za tovrstne projekte uporablja ultralahko letalo in kamero znamke NIKON D3X. V osnovi gre za nemetrično kamero, ki je bila za potrebe fotogrametričnih del kalibrirana. Kalibracijski parametri so prikazani na sliki 67.

S kalibracijo kamere dobimo vse podatke oz. parametre kamere, ki jih potrebujemo pri nadaljnjih fotogrametričnih delih. Kalibracija je bila izvedena na podlagi fotografiranja za to prirejenega testnega polja in na podlagi na terenu določenih oslonilnih točk.



Slika 67: Parametri uporabljene kamere.

Aerofotografiranje celotnega območja projekta je bilo izvedeno tako, da je bila nominalna vrednost DTI<sup>11</sup> 5 cm, pri čemer je bila povprečna višina leta cca. 300 m nad terenom. Pred preletom oz. snemanjem je bilo na podlagi predvidenega poteka na terenu signaliziranih in izmerjenih 17 oslonilnih točk. Bile so v obliki štirikrakah križev. Izmera je bila izvedena z RTK-GNSS metodo, pri čemer se je natančnost gibala med 0,02 m in 0,04 m. Za izmero je bil uporabljen GNSS sprejemnik Trimble R6. Izmerjene podatke smo nato transformirali v državni koordinatni sistem (takrat še D48). Položaj oslonilnih točk je bil določen tako, da je čim bolj obkrožal območje kasnejše izdelave končnega produkta.

Pri aerotriangulaciji je bilo uporabljenih 10 posnetkov v 1. redu in 17 oslonilnih točk. Poleg prej omenjenih izmerjenih točk je bilo uporabljenih še nekaj predhodno izmerjenih točk in nekaj točk iz baze GURS-a. Natančnost veznih točk po aerotriangulaciji se je gibala med 0,05–0,07 m, odstopanja na oslonilnih točkah pa so znašala med 0,04–0,06 m po položaju in 0,06–0,08 m po višini.

Na osnovi orientiranih posnetkov se je izdelal DMV izbranega področja z geometrično ločljivostjo 2 m. DMV je bil izdelan z avtomatskimi postopki slikovnega ujemanja (angl. Image Matching). Cilj teh postopkov je, da z ustreznimi matematičnimi in statističnimi metodami izbrani točki na eni podobi avtomatsko poiščemo najbolj verjetno homologno točko na drugi podobi. Merila podobnosti so opredeljena z relativnimi odnosi, na primer kot korelacija ali najmanjše odstopanje. Ustrezni računalniški program izbira točke za zajem natančno na pozicijah X, Y izbrane kvadratne mreže, višin nato izračuna iz avtomatsko izmerjene paralakse točke. Ker pa je območje precej poraščeno je bilo potrebno precej ročnega 'popravljanja' avtomatsko dobljenega DMV-ja. Problem se namreč pojavi v sami vsebini fotografije, saj so na njej upodobljeni vrhovi dreves, zato avtomatski algoritem izmeri višine po vrhu gozda, čeprav bi moral DMV potekati po tleh. Ocenjena natančnost DMV-ja za to področje je 0,30 m.

---

<sup>11</sup> Dolžina talnega intervala (iz angl. GSD – Ground Sampling Distance).



DMV in orientirani posnetki so kasneje služili kot vhodni podatek za izdelavo digitalnega ortofoto načrta (priloga 6). Le ta je bil narejen z geometrično ločljivostjo 0,1 m. Kasneje je bil še radiometrično obdelan in medsebojno barvno usklajen. Poleg DMV-ja in digitalnega ortofota je bil na njihovi osnovi izdelan in naročniku predan še 3R model v OBJ formatu (primeren za 3R tisk na posebnih tiskalnikih).

Poleg fotogrametričnega izvrednotenja smo na terenu na klasičen način (polarna metoda) izmerili tudi cestno telo ter cca. 10 m brežine nad njo. Za izmero je bil uporabljen instrument Trimble VX Spatial Station, ki poleg mnogih drugih funkcij omogoča tudi merjenje detajlnih točk brez uporabe reflektorja. Za navezavo na državni koordinatni sistem je bil uporabljen GNSS instrument Trimble R6. Meritev je bil izvedena iz 6 stojišč (priloga 7).

V primerjavi s fotogrametričnimi meritvami je »klasični« način sicer natančnejši, je pa zato pri takem terenu precej zamudnejši in za ljudi, nevajenih takega okolja, tudi nevarnejši. Tudi iz ekonomskega vidika se je izdelava vzdolžnih profilov iz DMV izkazala za ugodnejšo rešitev.

#### **4.3.4 Opredelitev sanacijskih ukrepov s pomočjo modeliranja padanja kamenja**

Na podlagi geološkega poročila, digitalnega modela reliefa in geodetske izmere, narejene za projekt izvedenih del sanacije padanja skal in kamenja, je bilo izdelano osem karakterističnih profilov za potrebe računalniške simulacije padanja kamenja. Po predhodnem ogledu terena so bili profili izdelani tako, da se je ortofoto posnetek prekril z DMV-jem (tlorisno) in se je nato iz potencialnega žarišča padajočega kamenja po padnici t.j. grapi ali terenu narisalo polilinije (Polyline). Upoštevalo se je lome naklona padnice in vozlišča DMV-ja. Vsaka linija je podana s približno 15-imi točkami. Z njo se določi razdalje med posameznimi točkami v profilu ter njihovo višinsko razliko. Obstoječa situacija in vzdolžni profili terena so podani v prilogah 8 in 9.

Za modelne izračune je bil uporabljen program RockFall 4.048. Modeliranje je potekalo v vseh osmih vzdolžnih profilih, vendar sem za potrebe diplomske naloge v nadaljevanju prikazala modeliranje le za izbrani profil.

### **Modeliranje padanja kamenja s programom RockFall**

Za določitev pristopa k sanaciji oziroma zagotovitvi varnosti pred padanjem skal smo izvedli modeliranje z računalniškim programom RocFall verzija 4.048. Program s pomočjo simulacije gibanja skal ali kamnov, glede na vhodne podatke, določi trajektorije gibanja skalnih gnot in druge potrebne parametre za opredelitev načina sanacije. Zaradi zelo težke določitve poti potovanja skal se izvede veliko število simulacij poti, pri čemer program s slučajnostno funkcijo spreminja vrednosti vhodnih spremenljivk v podanih mejah (statistična metoda Monte Carlo). Odločujoč vpliv na kinetično energijo in potek poti padajočega kamenja imata poleg same oblike kamenja predvsem geometrična konfiguracija terena in sestava podlage. Kinetična energija padajočega kamenja se v splošnem manjša, in ko kamenje končno obleži, povsem izniči. Morebitni varovalni ukrepi na poti padanja morajo zato upoštevati sproščeno kinetično energijo s prevzemom zadostne funkcionalne višine.

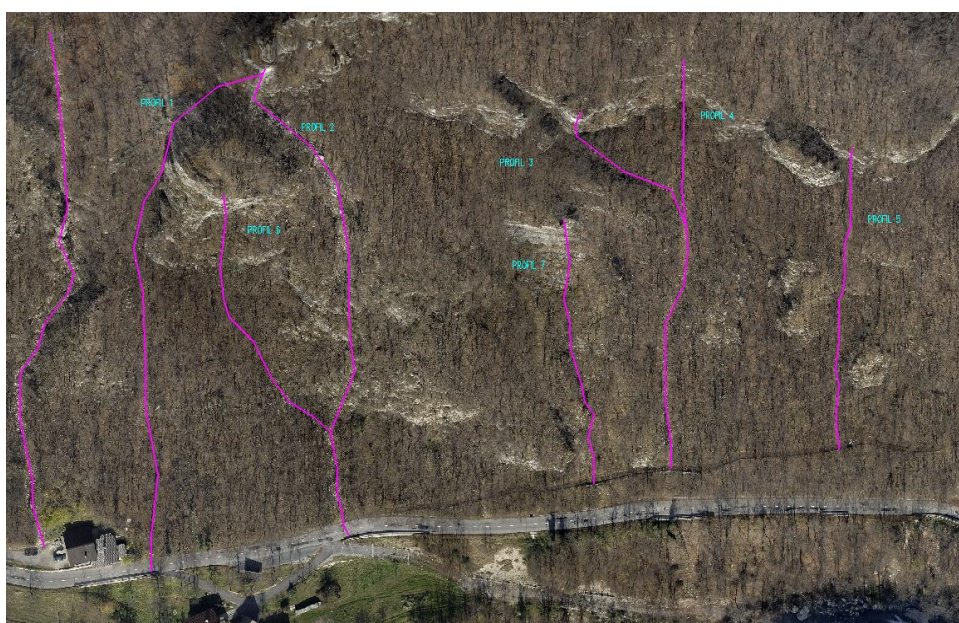
Iz računalniške simulacije lahko dobimo naslednje zaključke:

- % padajočega kamenja, ki bi predvidoma doseglo ogroženi objekt;
- maksimalno sproščeno kinetično energijo ob posameznem udarcu padajočega kamenja na poti padanja in na lokaciji, kjer je predvidena lovilna ograja;
- potek sprostitve kinetične energije na poti posameznega padajočega kamna;
- statistično razporeditev višine odskoka posameznega kamna na lokaciji postavljene ovire in
- število kamnov, ki preskočijo postavljeno oviro.

Pri računalniški simulaciji in dimenzioniranju varovalnih ograj se upošteva udarec posameznega kamna ali skale na dinamično lovilno grajo.

### Potek in rezultati analize

V našem primeru smo za vsak izračun na profilu uporabili 100 trajektorij poti skal. Vrednosti odbojnih koeficientov smo določili s pomočjo povratne analize, ki smo jo izvedli tako, da smo toliko časa spreminjali lastnosti odboja od površine na geodetsko izmerjenem profilu (profil št. 2) za dejansko izpadlo skalo, dokler nismo dobili najbolj verjetne trajektorije gibanja glede na mesto ustavljanja skal. S tako dobljenimi odbojnimi lastnostmi smo nato izvedli simulacijo možnih sanacijskih ukrepov in izračun za ostale profile, prikazane na spodnji sliki:

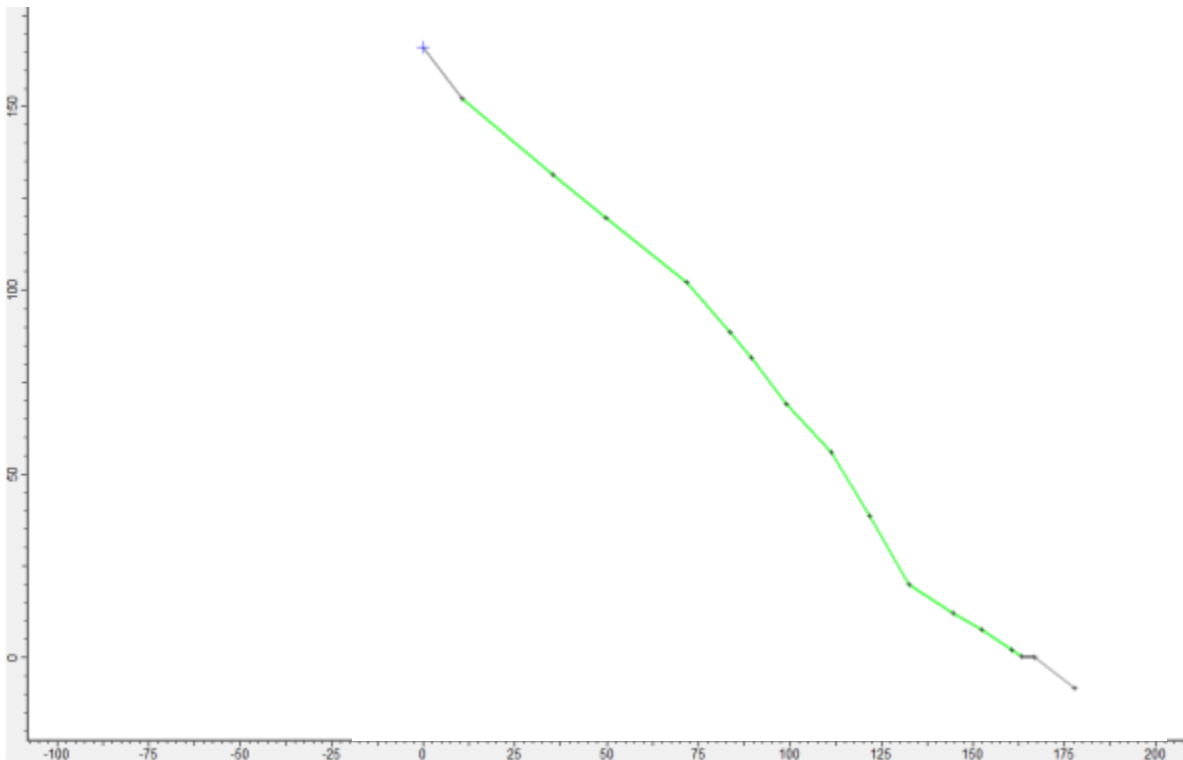


Slika 68: Izbrani profili.

Uporabljene vrednosti odbojnih koeficientov, ki smo jih določili s povratno analizo, so prikazane v naslednji tabeli in z barvami na profilu št. 2.

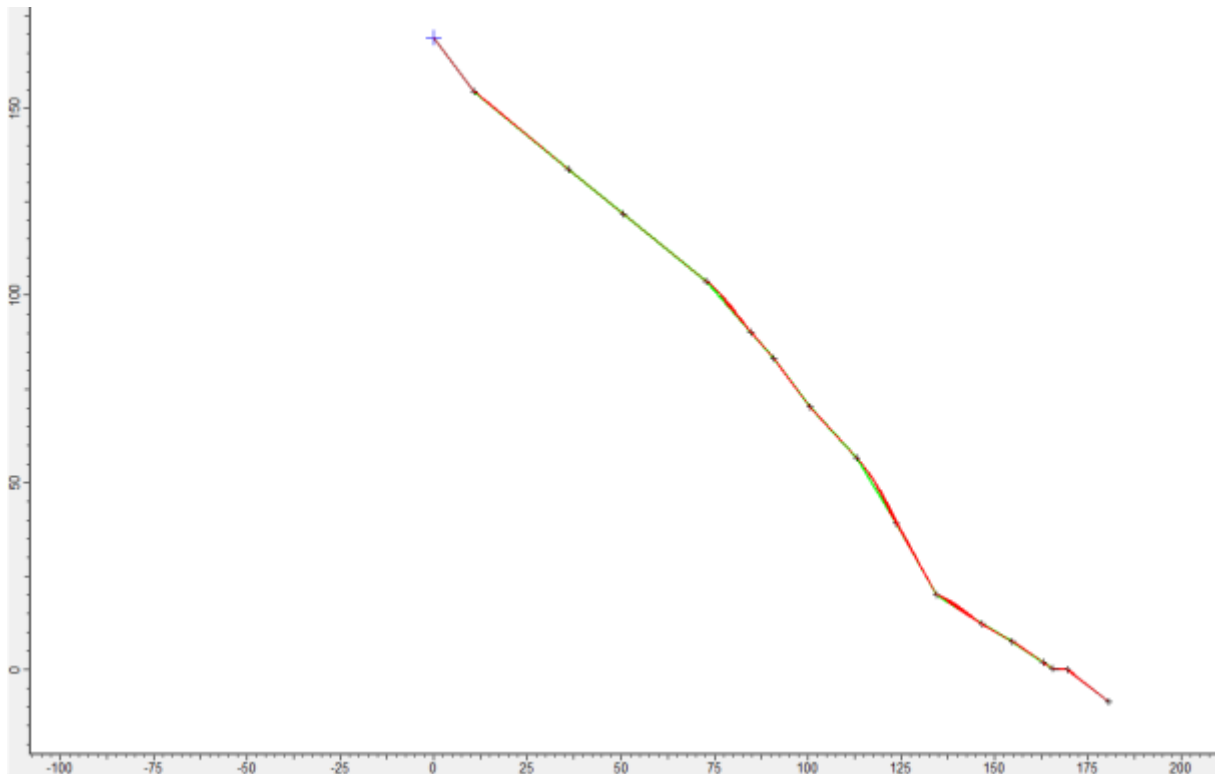
Preglednica 7: Vrednosti odbojnih koeficientov.

Material	Opis	Pravokotni odboj (Rn)	Tangencialni odboj (Rt)	Trenje ( $\mu$ )	Barva
TlaVrsta 1	Masivna navpična stena	0.53	0.99	30	Grey
TlaVrsta2	Zemljina z vegetacijo	0.40	0.90	30	Black
TlaVrsta2a	Asfalt	0.30	0.80	30	Green
TlaVrsta2c	Gruščnoato pobočje	0.50	0.97	30	Grey



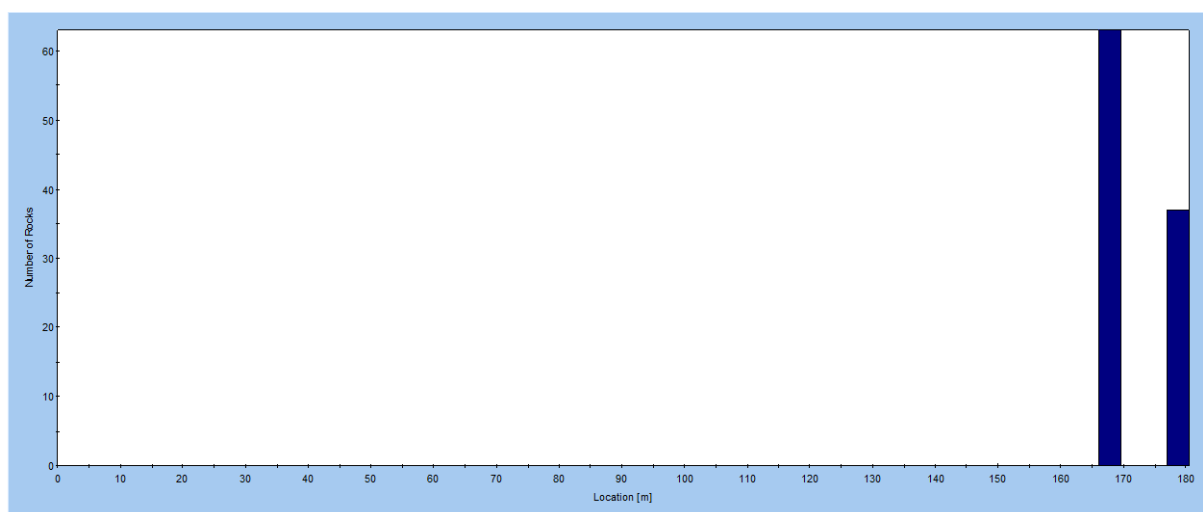
Slika 69: Profil št. 2.

Za določitev trajektorij gibanja skal smo privzeli mesto izpada skale tik pod vrhom profila. Za skalo, ki je služila za umeritev odbojnih koeficientov, smo privzeli skalo, ki je 27. 3. 2008 (slika 63) padla na cesto. Njeno maso smo ocenili na 4.320 kg. Po izvedbi simulacije smo dobili sto trajektorij gibanja skal, kot prikazuje slika 70.



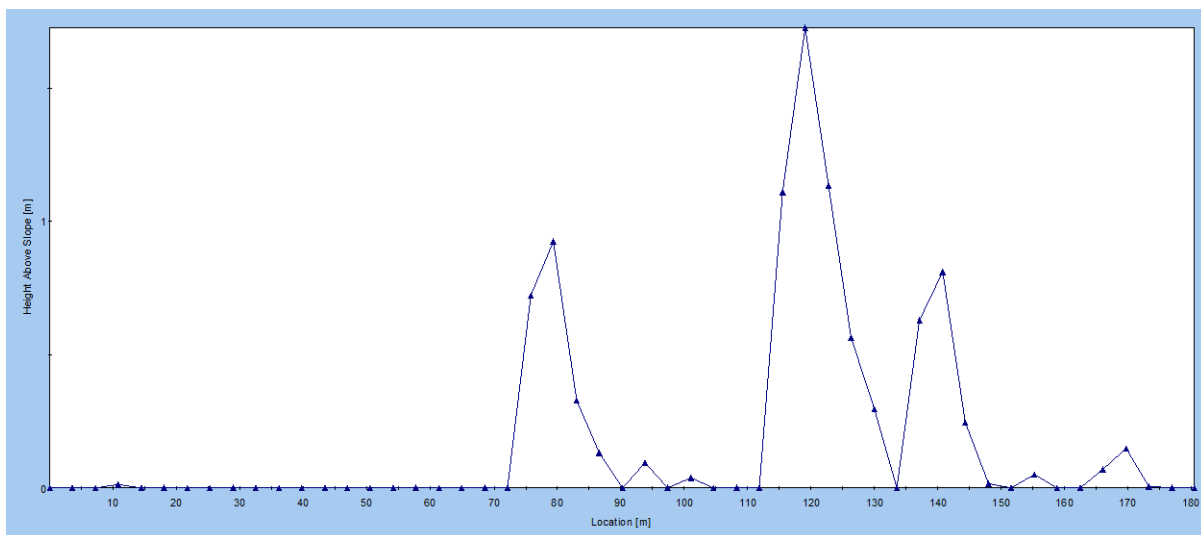
Slika 70: Trajektorije gibanja skal na profilu št. 2.

Na histogramu lokacij mest ustavljanja skal lahko vidimo, da se 60 % skal ustavi na cesti, ostale pa se zvalijo čez cesto in naprej po pobočju.



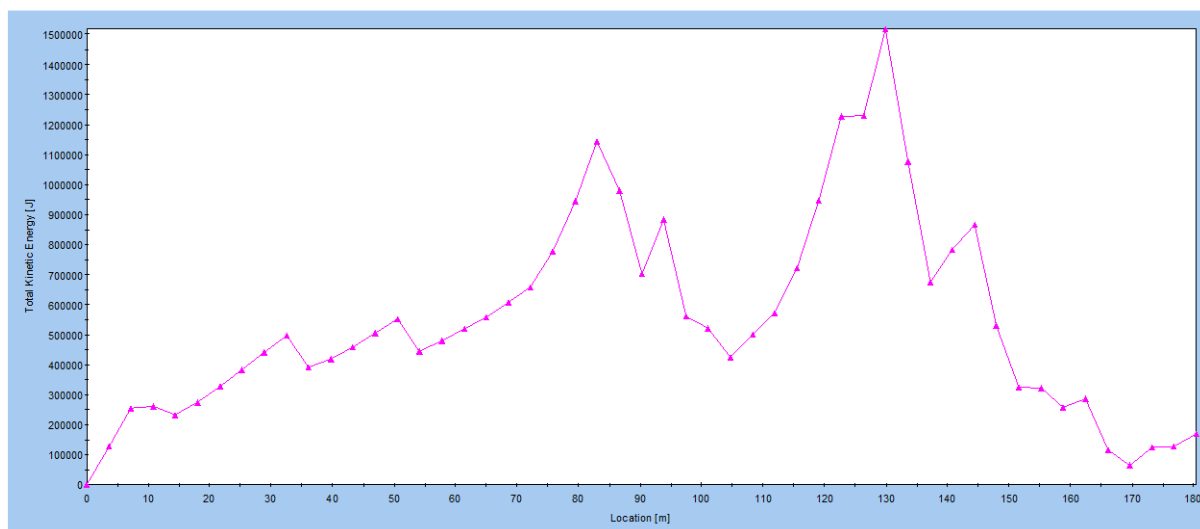
Slika 71: Histogram lokacij mest ustavljanja skal.

Višina odbijanja skal od podlage je pomemben podatek za določitev višine dinamičnih varovalnih ograj in je v spodnjem delu pobočja med 1 in 2 m.



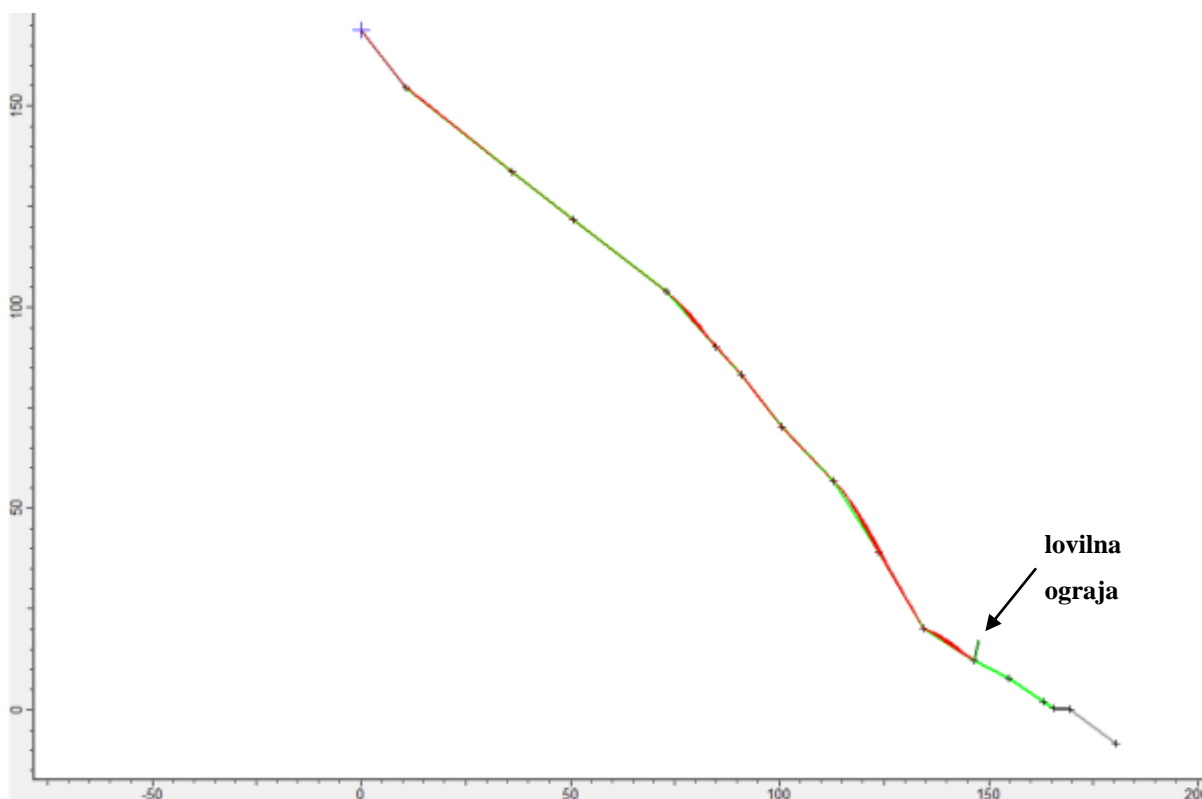
Slika 72: Histogram višine odbijanja skal od podlage.

Četrty diagram simulacije gibanja skal kaže spreminjanje kinetične energije skal vzdolž poti potovanja.

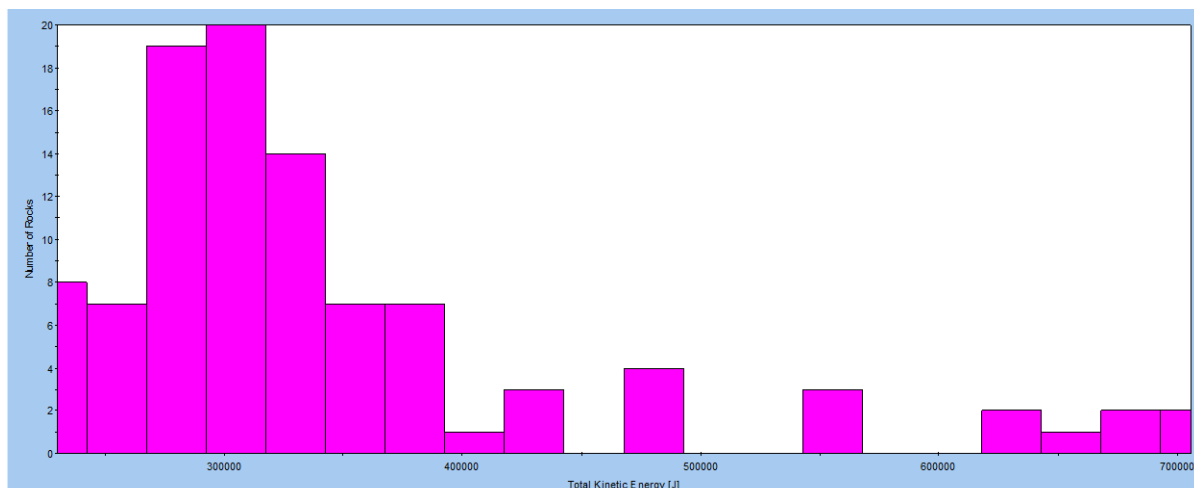


Slika 73: Histogram spreminjanja kinetične energije skale vzdolž poti potovanja.

Naslednje modeliranje je zajelo ugotavljanje vpliva postavitve lovilne ograje na brežino. Iz simulacije gibanja skal vidimo, da bi zaslon zaustavil vse skale. Največja kinetična energija udarca skale v lovilno ograjo bi bila 730 kJ.



Slika 74: Simulacija gibanja skal z lovilno ograjo.



Slika 75: Kinetična energija za skalo, težko 4.320 kg.

Statistics: Total Kinetic Energy on Barrier001 (in J)

\*\*\*\*\*

Number of data points:	100
Minimum:	229877
Maximum:	730639
Mean:	360952
Standard deviation:	112857
Range:	500762
Median:	326322
Variance:	1.27367e+010

Glede na rezultate simulacije padanja skal na profilu št. 2 je bila za zaščito tega dela brežine Klonte izbrana postavitev dinamične lovilne ograje. Lovilna ograja je locirana cca. 20 m nad cesto. Višina lovilne ograje je najmanj 2 m, dimenzionirana mora biti na udarce skale s kinetično energijo 1.000 kJ.

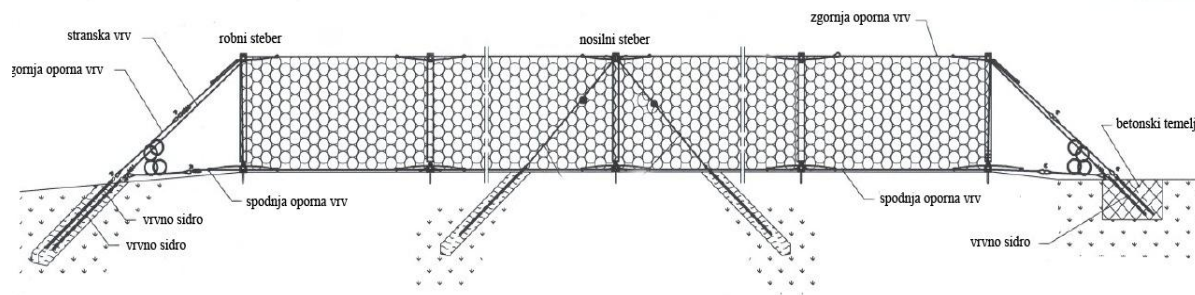
### **Sanacijski ukrepi**

Simulacije so bile izvedene v vseh osmih profilih, ki zajemajo problematiko padajočega kamenja na tem odseku. Pri smotni izbiri velikosti skal in ostalih parametrov so rezultati pokazali, da bi bila na nekaterih mestih najustreznejša izbira zaščitnih mrež s sposobnostjo zaustavitve skal s kinetično energijo 2.000 kJ, na nekaterih pa 1.000 kJ. Maksimalne vrednosti izračunov so namreč v območju profilov dosegle kinetično energijo med 652 in 2.512 kJ.

Lokacije dinamičnih lovilnih ograj ter njihove absorpcijske zmožnosti so vrisane v gradbeni situaciji v prilogi 10. V prilogi 11 je prikazan DMV z ureditvijo.

Shematski prikaz varovalnega sistema je prikazan na sliki 76.





**Slika 76: Shematski prikaz varovalnega sistema.**

## 5 ZAKLJUČEK

Vrsta podornega pojava so tudi odlomi kamenja, skalovja ali blokov, ki ogrožajo zlasti objekte transportnega povezovanja krajev (cestni in železniški useki v kamninskem materialu pod naravnimi strmimi skalnimi pobočji), včasih pa tudi gradnje v bližini naravnih strmih skalnih pobočij, opuščenih kamnolomov ipd. Čeprav ne povzročajo take stopnje tveganja na nivoju škodnega potenciala materialnih dobrin kot na primer skalni in gorski podori ali drugi masni premiki – prelaganja gmot (plazovi, tokovi), ki včasih popolnoma prekinejo komunikacijske poti, pa lahko kljub temu rečemo, da pri ogrožanju človeških življenj ne zaostajajo za drugimi oblikami masnih premikov. Za zaščito prometnic pred padajočim kamenjem se izvajajo zlasti ukrepi aktivnega varstva. Izbira ukrepov je odvisna predvsem od jakosti in obsega ogroženosti ter tehničnih možnosti, pogojenih z naravnimi danostmi. Največ se uporabljajo sodobne dinamične lovilne ograje za zaščito cest pred plazovi in padajočim kamenjem. Po svoji konstrukciji in uporabljenih materialih so zasnovane tako, da jih je možno postaviti na najbolj kritičnih odsekih, ne glede na težavnost in težko dostopnost terena, vendar lahko uspešno služijo svojemu namenu le, če so redno vzdrževane.

Kot orodje za opazovanje teoretičnega obnašanja padajočega kamenja lahko uporabimo za to razvite računalniške modele. Z njimi lahko simuliramo na stotine porušitev in preučujemo poti in kinetično energijo padajočega kamenja. Za določevanje nevarnosti v lokalnem merilu se največ uporabljajo dvorazsežni matematični modeli. V praktičnem delu naloge je prikazana uporaba programa Rockfall. Pomembni vhodni podatki za računalniško simulacijo so karakteristični vzdolžni profili terena, ki jih pridobimo z meritvami na terenu.

Merske metode, ki so za to primerne in jih v praksi uporabljamo, so predstavljene v osrednjem delu diplomske naloge. Posebej so opisane osnove, prednosti in slabosti še vedno največkrat uporabljene klasične terestrične izmere detajla in novejša RTK GNSS metode izmere. Z vzpostavitvijo permanentnih GNSS postaj, ki pokrivajo celotno območje Slovenije, je uporaba te metode še enostavnejša in uporabniku prijaznejša. Vse več se uporablja

kombinacija klasične terestrične in GNSS metode. Nato so podane lastnosti terestričnega laserskega skeniranja, ki se zaradi nekontaktnosti in velikega števila pridobljenih podatkov izkaže za zelo primerno metodo. Poleg geodetskih metod so opisane še enostavne meritve, ki ne dosegajo geodetske natančnosti, pa jih v težkih pogojih dela vseeno uporabljamo. Uporabne so predvsem na poraščenih območjih, kjer GNSS ne deluje, pri uporabi klasičnih geodetskih inštrumentov pa se zaradi zaraščenosti pojavi problem viziranja tarč. Ker se podorni pojavi velikokrat pojavljajo na težko dostopnih, strmih, zaraščenih in odmaknjenih mestih, kjer ni obstoječih geodetskih točk, velik problem predstavlja geolociranje podatkov snemanja. Potrebna je dodatna vzpostavitev mreže, kar lahko zelo podaljša in podraži terenska dela. Meritve je v tem primeru velikokrat smiselno izvajati povsem lokalno, brez navezave v državni koordinatni sistem.

Zanemariti ne smemo možnosti brezkontaktnega pridobivanja topologije terena s tehnologijo LIDAR, ki omogoča neposredno in podrobno izdelavo digitalnega modela višin (DMV). Dovolj podroben DMV lahko pridobimo tudi s postopki aerofotogrametrije. Barvne digitalne ortofoto načrte in podatke lidarskega snemanja sicer pogosteje uporabljamo kot dopolnilne geodetske vire za evidentiranje skalnih podorov, kot rastrske podlage v geolociranih prostorskih bazah, kot geodetske podlage za potrebe planiranja in podobno.

Diplomsko nalogo zaključujem s praktičnim delom, v katerem prikazujem primere uporabe karakterističnih vzdolžnih profilov pri obravnavi padajočega kamenja. Za snemanje manjšega območja je kombinacija klasične polarne in RTK GNSS izmere še vedno prevladujoča metoda. Vse več se uporablja metoda terestričnega laserskega skeniranja, ki se je zaradi velike količine metričnih podatkov, ki jih z njo pridobimo v razmeroma kratkem času, izkazala kot zelo uporabna. Opisana je tudi uporaba podatkov letalskega snemanja za izdelavo ortofoto podlage izbranega območja. Ta metoda je sicer manj natančna kot zgoraj omenjeni metodi, vendar se je tudi ta metoda za zajem podatkov na večjih območjih izkazala kot smiselna.

**6 VIRI**

Aerial Photogrammetry, Digital Mapping, GIS Data, Lidar and Photogrammetry. URL:

<http://www.aerometric.com>, (12. 1. 2010)

Bevk, S. 1989. Plaz ogrozil bolnišnico Franjo. *Ujma* 3: 30–33

Blom Sweden. URL: <http://www.topeye.com>, (4. 1. 2010)

Böll, A. 2000. Landslides and Rockfall. Birmensdorf. Swiss Federal Institute of Forest, Snow and Landscape Research WSL,

Budetta, P. 2003. The modified “Rockfall Hazard Rating System”: a new tool for roads risk assessment.

Durjava, D. 2008. PZI za varovanje brežine Klonte, nad cesto Kneža–Podbrdo, odsek od km 6.500 do km 6.900, Tehnično poročilo

Đurivič, B., Ribičič, M., Mikoš, M. 2005. RHDM postopek analize potencialne ogroženosti zaradi odlomne nevarnosti. *Geologija* 48/1: 33–51

Đurovič, B. 2004. Določanje podorne ogroženosti prostora, Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta: 33–36

Ecoffey, P. 1999. Sistem zavarovanja pred naravnimi nesrečami v Švici in nekaterih drugih alpskih državah. *Ujma* 13: 301–302

Flycom, d.o.o. Pregledi iz zraka in obdelava podatkov. URL: <http://www.flycom.si>, (12. 1. 2010)

Geobrugg, Protection Systems against Natural Hazards. URL: <http://www.geobrugg.com>, (2. 2. 2010)

Geoservis, d.o.o. URL: <http://www.geoservis.si>, (4. 12. 2009)

Gosar, A. 2007. Letalsko lasersko skeniranje (LIDAR) Idrijskega in ravenskega preloma v zahodni Sloveniji. *Ujma* 21: 139–144

- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Wieczorek, G.F. 2003. Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3: 491–503
- Gvozdanović, T. 2008. Zajem topografskih podatkov in izračun ocene volumna materiala plazu pod slapom Čedca nad Jezerskim, Zaključno poročilo
- Horvat, A., Koren, M., Savnik, P. 2007. Zaščita regionalne ceste Kalce–Col pred padajočim kamenjem. *Ujma* 21: 118–123
- Horvat, A., Papež, J., Koren, M. 2006. Zaščita pred padajočim kamenjem ob prometnicah z lovilnimi ograjami – pomen in način izvedbe vzdrževalnih ukrepov
- Ivnik, M. 2007. Geodetska izmera v omrežjih GNSS. Seminarska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
- Ivnik, M. 2008. Terestrični laserski skenerji. Seminarska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
- Kogoj, D. 2008. Sodobne metode terestrične geodetske izmere. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
- Kogoj, D., Bilban, G., Bogatin, S. 2004. Tehnične lastnosti tahimetrov Leica Geosystems. *Geodetski vestnik* 48, 4: 508–518
- Kogoj, D., Kosmatin Fras, M., Grigillo, D., Ribičič, M., Ambrožič, T., Marjetič, A., Gvozdanović, T., Smole, D., Ranfl, U., Krivec, M., Vezočnik, R., Balon, M. 2007. Mobilna enota za hitri zajem prostorskih podatkov v primeru zemeljskih plazov, Zaključni elaborat, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
- Kogoj, D., Stopar, B. 2009. Geodetska izmera. *Material za pripravo na strokovni izpit iz geodetske stroke*
- Konič, S. 2008. Prispevek k preverjanju zdrsa skalnega bloka z modelom medsebojne preslikave oblakov točk. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo
- Kosmatin Fras, M. 2004. Vpliv vhodnih podatkov na kakovost ortofota. *Geodetski vestnik* 48, 4: 167–178

- Kosmatin Fras, M., Drobne, S., Gregorič, H., Oven, J. 2006. Raziskava uporabe Ortofota (DOF5) v praksi. *Geodetski vestnik* 50, 2: 258–269
- Kozmus, K., Stopar, B. 2003. Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami. *Geodetski vestnik* 47, 4: 404–413
- Leica Geosystems. URL: <http://www.leica-geosystems.com>, (4. 12. 2009)
- Lenarčič Švab, A. 2009. Uporaba lidarskih podatkov za klasifikacijo pokrovnosti. Magistersko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
- Maccaferri, Engineered Environmental Solutios URL: <http://www.maccaferri.com.au>, (1. 2. 2010)
- Mikoš, M. 1998. Izrazje na področju erozijskih pojavov. *Gradbeni vestnik* 49, 5: 102–114
- Ministry of Lands and Mineral Resources. URL: <http://www.mrd.gov.fj/>, (1. 2. 2010)
- Navigator.si, Profesionalna in navigacijska oprema. URL: <http://www.navigator.si>, (2. 2. 2010)
- Omrežje SIGNAL. URL: <http://www.gu-signal.si/>, (25. 12. 2009)
- Optical Survey Equipment. URL: [www.surveyequipment.com](http://www.surveyequipment.com), (16. 1. 2010)
- Orožen Adamič, M. 1990. Podor v Trenti. *Ujma* 4: 18
- Oštir, K., Podobnikar, T., Stančič, Z., Mlinar, J. 2000. Digitalni model višin Slovenije InSAR 25. *Geodetski vestnik* 44, 4: 374–383
- Pavšek, M. 1994a. Skalni podor v Trenti. *Ujma* 8: 24–29
- Pavšek, M. 1994b. Zemeljski plaz pod Krnom. *Ujma* 8: 30–32
- Pavšek, M. 1996. Skalni podor na Velikem Mangartu. *Ujma* 10: 67–69
- Petje, U. 2005. Analiza nevarnosti padajočega kamenja na cestah v alpskem prostoru. Magistersko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
- Petje, U., Mikoš, M., Majes, B. 2005. Modeliranje gibanja skalnih podorov – pregled. *Acta hydrotechnica* 23/38: 19–38
- Petje, U., Mikoš, M., Ribičič, M. 2005. Ocena nevarnosti padajočega kamenja za odsek regionalne ceste v dolini Trente. *Geologija* 48/2: 341–354

- Podobnikar, T., Mlinar, J. 2006. Izdelava in vzdrževanje digitalnega modela relief Slovenije z integracijo obstoječih virov. *Geodetski vestnik* 50, 4: 472–480
- Potočnik, D., Vertačnik, M. 2009. Topografski posnetki in kartiranje površinskih kopov. V: *Posvetovanje rudarskih in geotehniških strokovnjakov ob 41. Skoku čez kožo: 20–32*
- Prešeren, P. 2007. Slovenija po novem v celoti v barvah. *Geodetski vestnik* 51, 3: 614–615
- Ribičič, M. 2008. Geološko poročilo za izdelavo projekta zaščite regionalne ceste št. 403 Podbrdo–Kneža pred padanjem kamnov in skal na območju Klonte
- Ribičič, M., Vidrih, R. 1998a. Plazovi in podori kot posledica potresov. *Ujma* 12: 95–105
- Ribičič, M., Vidrih, R. 1998b. Potresi in pojavi nestabilnosti (podori in plazovi) (potres v Posočju 12. aprila 1998). V: *III. slovensko posvetovanje o zemeljskih plazovih*.
- Ribičič, M., Vidrih, R. 1998c. Poškodbe v naravi ob letošnjem potresu v Posočju. *Življenje in tehnika* 49 (9): 48–56
- RIEGL Laser Measurement Systems. URL: <http://www.riegl.com>, (16. 2. 2010)
- Setnikar, D. 2007. Terestrični laserski skener – pripomoček za sodobnejši zajem podatkov. V: *Posvetovanje rudarskih in geotehniških strokovnjakov ob 40. Skoku čez kožo: 146–151*
- Skaberne, D. 2001. Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj – pobočnega transporta. *Geologija* 44/1: 89–100
- Skaberne, D. 2001. Prispevek k slovenskemu izrazoslovju za pobočna premikanja. *Ujma* 14–15: 454–458
- Slob, S., Hack, R., Van Knapen, B., Klementy, J. 2004. Automated identification and characterisation of discontinuity sets in outcropping rock masses using 3D terrestrial laser scan survey techniques, EUROCF 53<sup>rd</sup> Geomechanics Colloquium
- Smrdelj, B. 2005. Uporabnost programa za simulacijo padanja kamenja za določitev ogroženosti na primeru Partizanske bolnice Franje, Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo: 12-26
- Spang, R. M. 2003. Rockfall 6.1. Rockfall Simulation Program, Manual.
- Suunto. URL: <http://www.suunto.com>, (26. 11. 2009)

Temesgen, B., Mohammed, M. U., Korme, T. 2001. Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the Wondogenet area, Ethiopia. *Phys. Chem. Earth* 26: 665–675

Topcon GLS – 1500 Laser scanning hire and services, Teradat UK. URL:

<http://www.terradat.co.uk/3d-measurement/laser-scanning>, (16. 1. 2010)

Toppe, R. 1987. Terrain models – A tool for natural hazard mapping. V: *IAHS Publication* 162: 629–638

Trumer Shutzbauten. URL: <http://www.trumerschutzbauten.com>, (6. 2 2010)

Vidrih, R., Ribičič, M. 1999. Posledice potresa v naravi. *Ujma* 13: 107–116

Vlah, M.M., Marjetič, A., Ježovnik, V., Kogoj, D. 2008. Avtomatski elektronski tahimetri ali kam vodi razvoj TPS sistemov. *Geodetski vestnik* 52, 3: 487–499



## **PRILOGE**

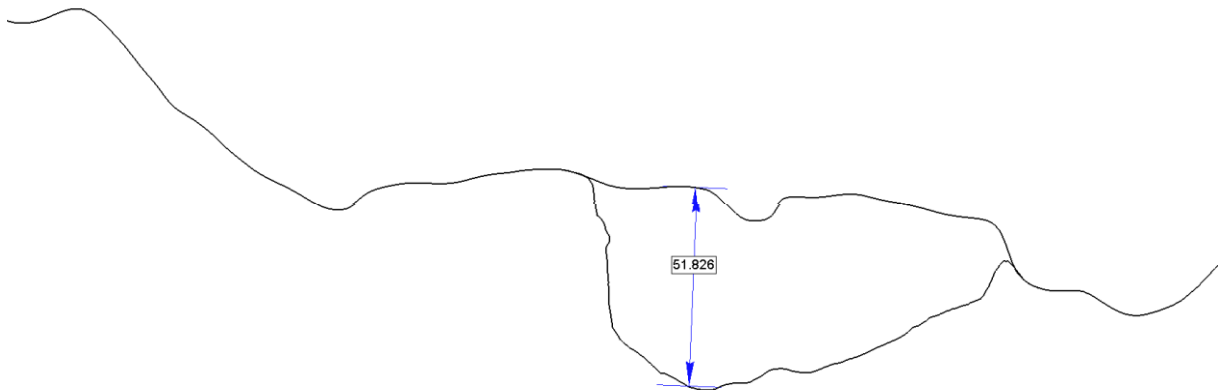
1. SLAP ČEDCA - PREČNI PREREZI PLOSKEV TRENUTNEGA IN PREJŠNJEGA STANJA
2. SLAP ČEDCA - VZDOLŽNI PREREZI PLOSKEV TRENUTNEGA IN PREJŠNJEGA STANJA
3. KLJUČ - VZDOLŽNA PROFILA M 1 : 200
4. KLJUČ - SITUACIJA VZDOLŽNIH PROFILOV M : 500
5. KLONTE - FOTOGRAFIJE OBMOČJA
6. KLONTE - GEODETSKI POSNETEK M 1 : 1.000
7. KLONTE – OBSTOJEČA SITUACIJA M 1 : 1.000
8. KLONTE - VZDOLŽNI PROFILI M 1 : 1.000
9. KLONTE - GRADBENA SITUACIJA M 1 : 1.000
10. KLONTE - DIGITALNI MODEL RELIEFA Z UREDITVIJO M 1 : 1.000

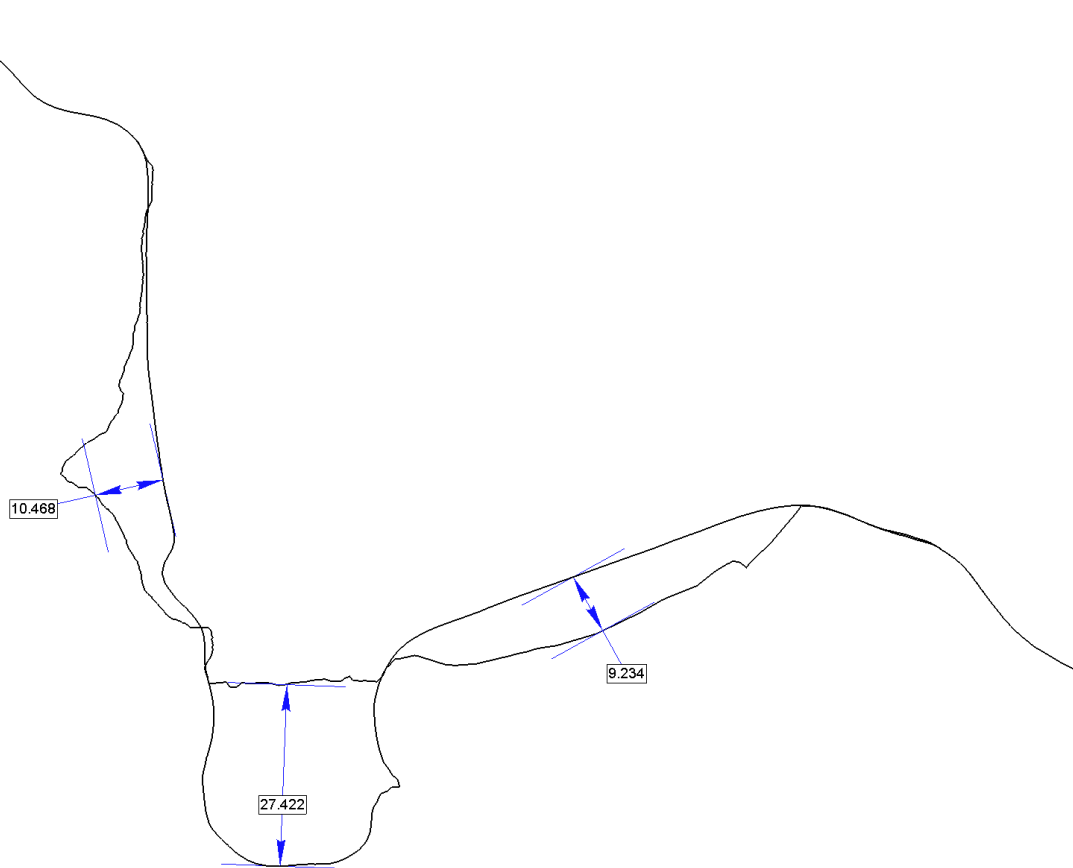
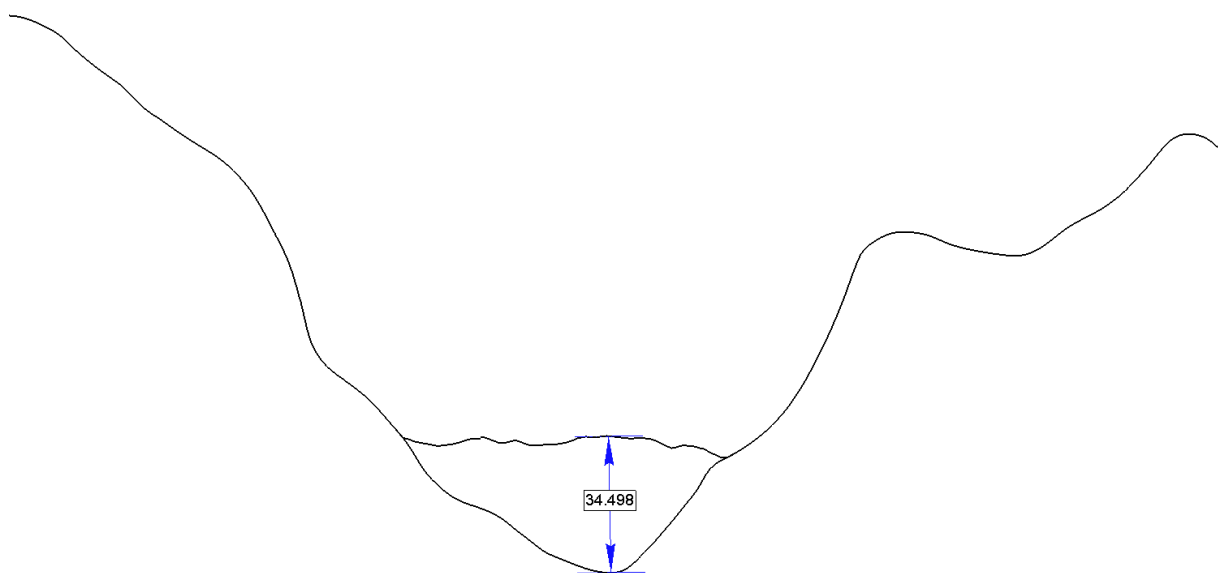


## 1. SLAP ČEDCA - PREČNI PREREZI PLOSKEV TRENUTNEGA IN PREJŠNJEGA STANJA

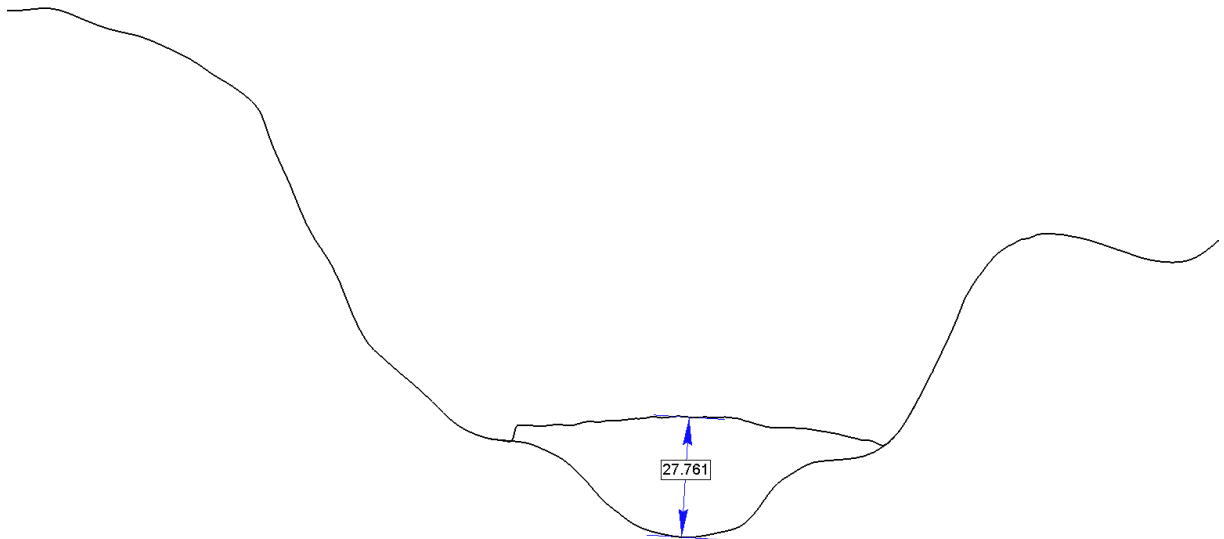
Na spodnjih slikah je prikazanih 7 prečnih profilov ploskev trenutnega in prejšnjega stanja terena. Dimenzije na profilih so prikazane v metrih.

### P1

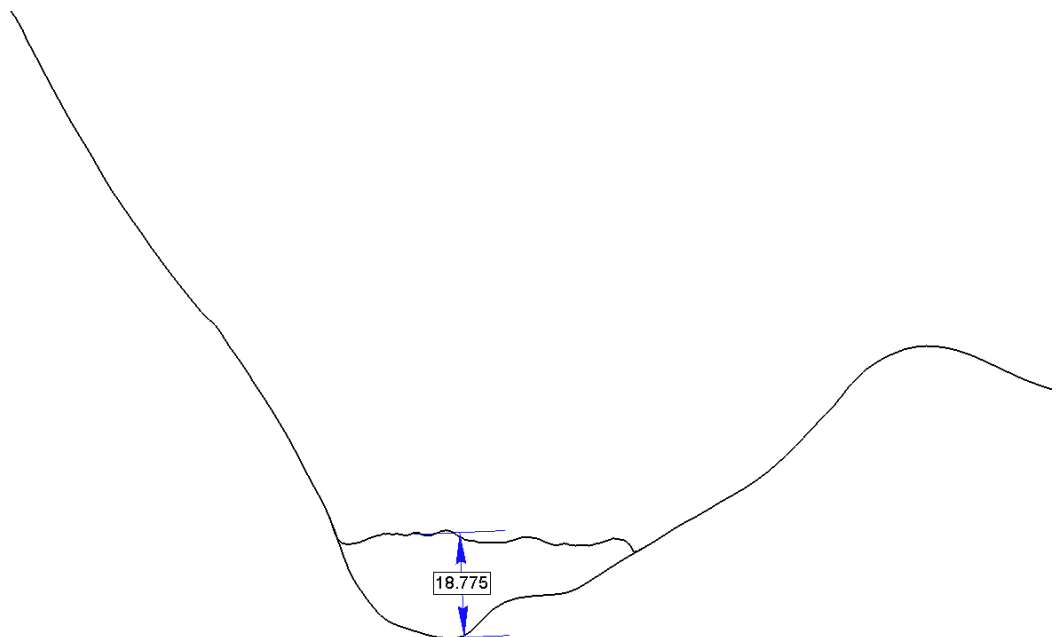


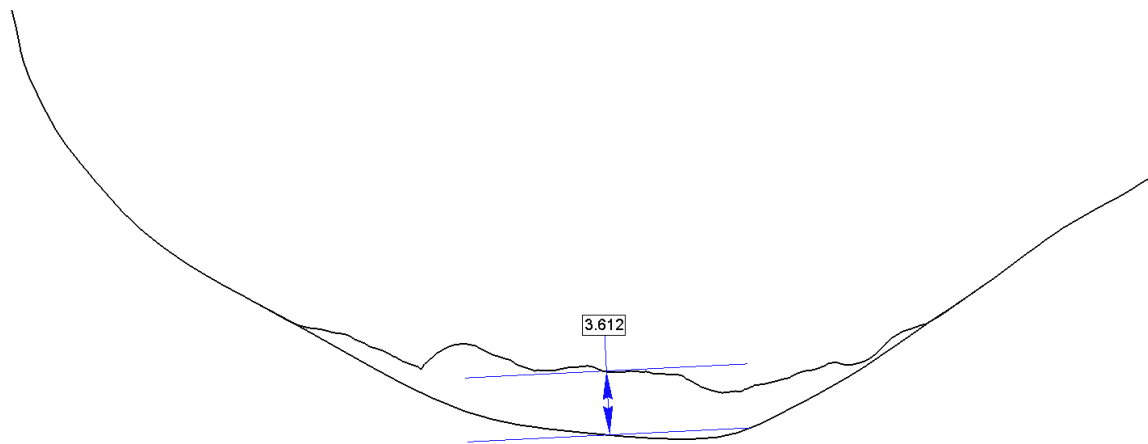
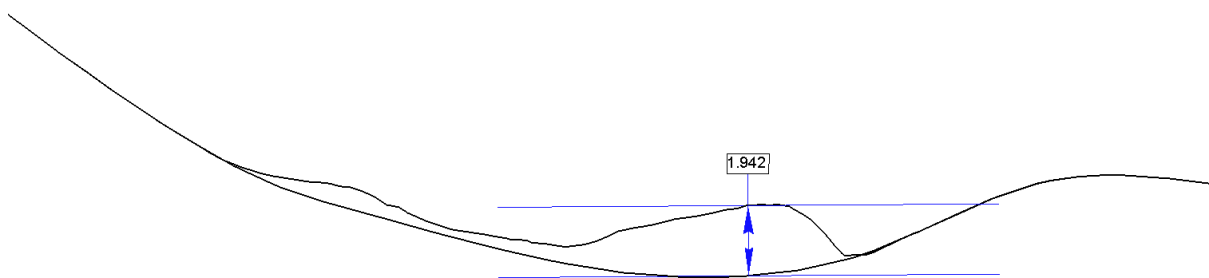
**P2****P3**

**P4**



**P5**

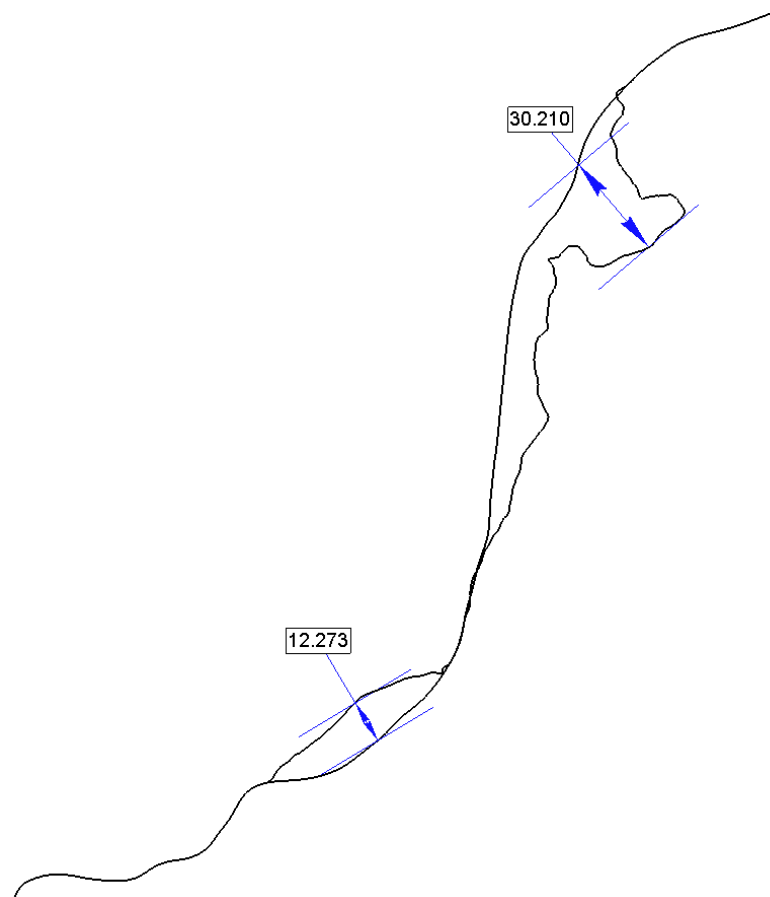


**P6****P7**

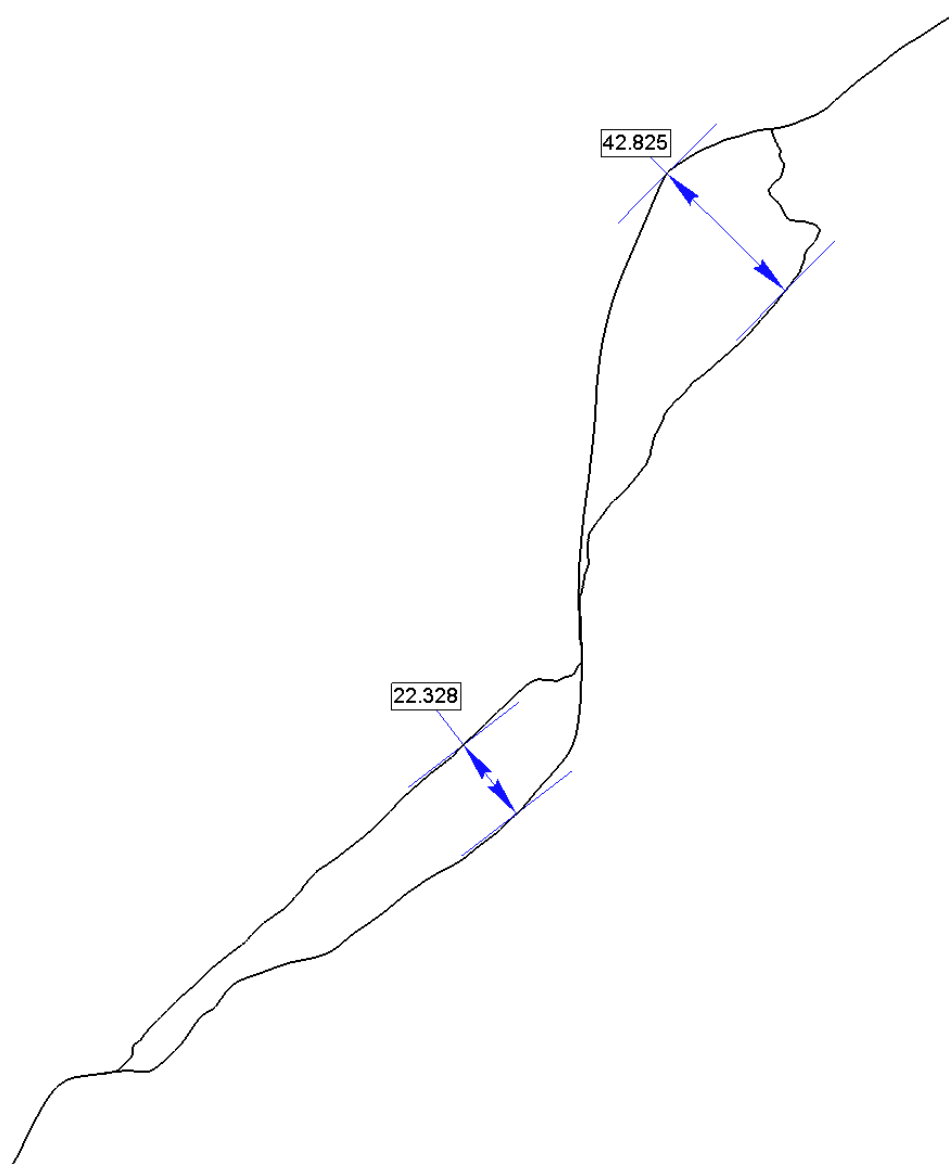
## 2. SLAP ČEDCA - VZDOLŽNI PREREZI PLOSKEV TRENUTNEGA IN PREJŠNJEGA STANJA

Na spodnjih slikah je prikazano 5 vzdolžnih profilov ploskev trenutnega in prejšnjega stanja terena. Dimenzije na prerezih so prikazane v metrih.

**V1**

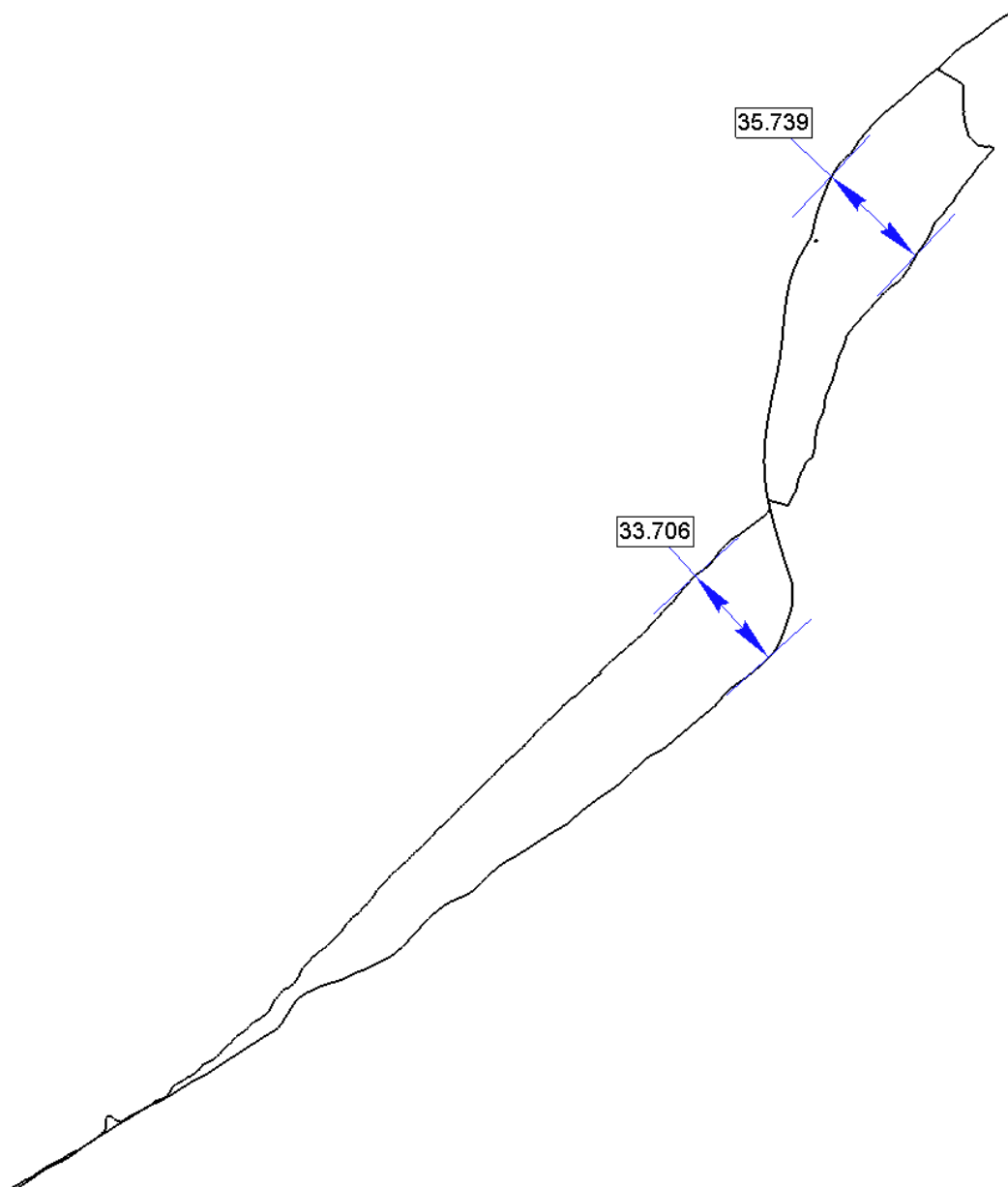


V2

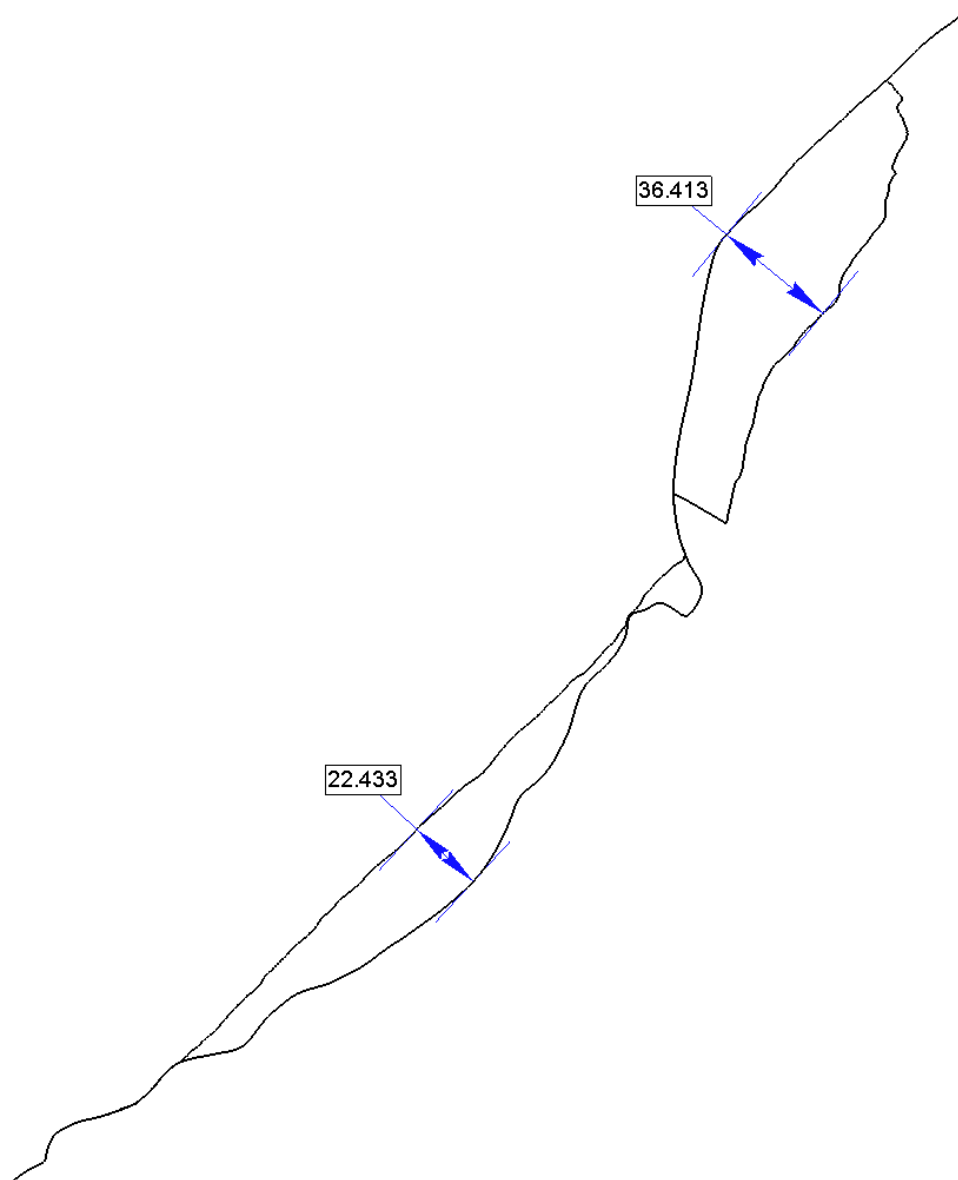




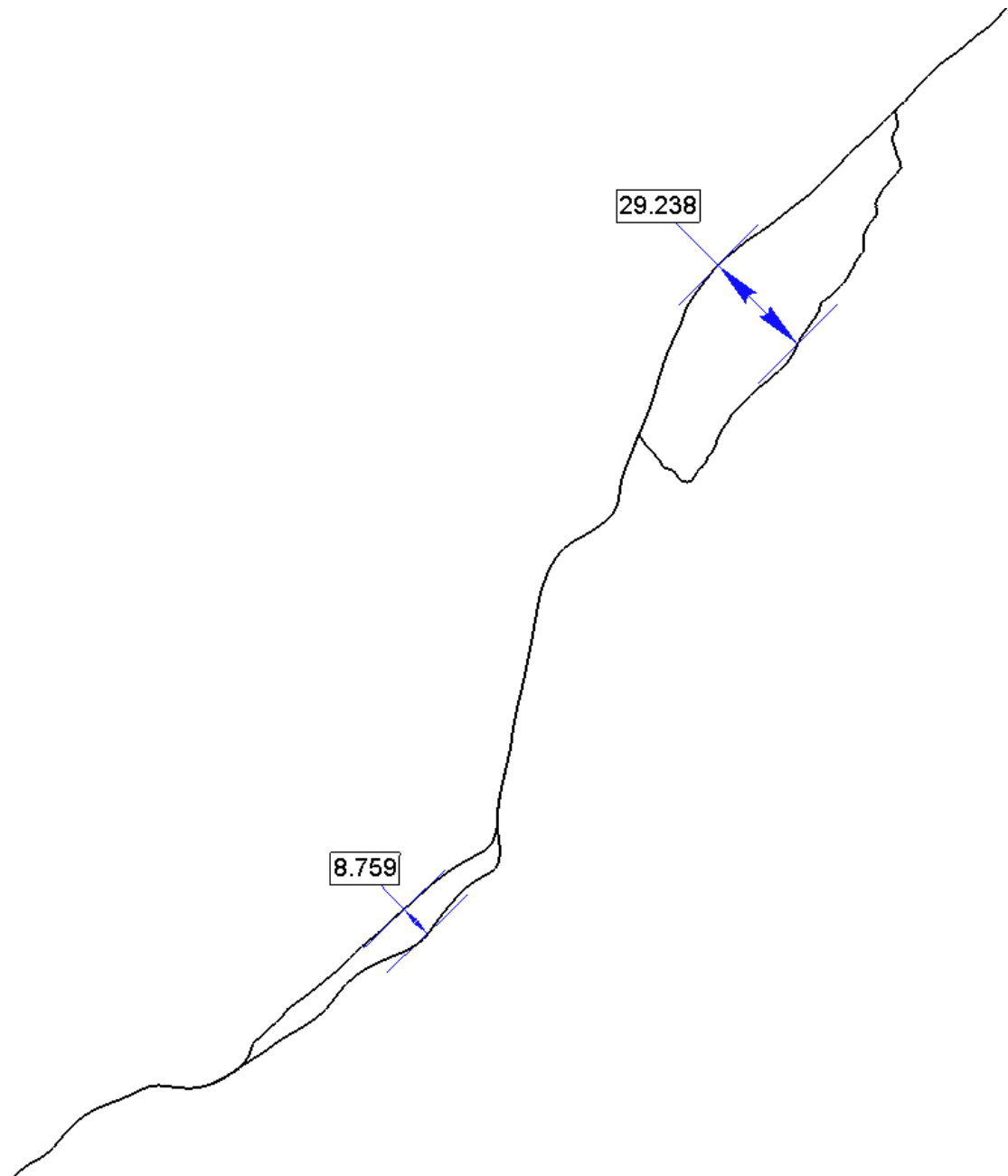
V3



V4



V5





### 3. KLJUČ - KARAKTERISTIČNA PROFILA M 1 : 200



#### 4. KLJUČ - SITUACIJA KARAKTERISTIČNIH PROFILOV M 1 : 500





## 5. KLONTE - FOTOGRAFIJE OBMOČJA

Vse fotografije na območju Klonte je jeseni l. 2008 posnel izr. prof. dr. Mihael RIBIČIČ, univ. dipl. inž. geol.



Fotografija 1: Vpad plasti je ugoden proti izdrsavanju plošč iz skalnih sten, pojavlja se prevračanje izpodjedenih plošč kamnine.



Fotografija 2: Drug pogosti način izpadanja blokov je padanje plošč iznad previsov.



Fotografija 3: Bloki največkrat izpadajo iz bočnih strani skalnih masivov.



Fotografija 4-5: Opaziti je tudi nekatere večje slučajne razpoke, ki visijo v smeri pobočja, vendar pod naklonom, ki je manjši od okoliškega terena. Na slikah je prikazana ploskev starega (levo) in novega (desno) ploskovnega zdrsa.

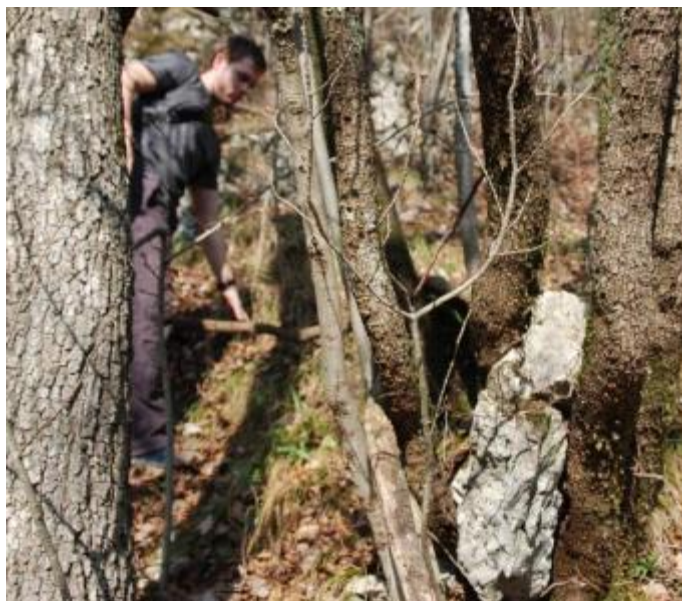




Fotografija 6: Opaziti je tudi nekaj manjših porušitev nepravilnih oblik, na mestih močne tektonske prizadetosti dolomita, še pogosteje pa v dolomitni breči



Fotografija 7: Teren je poraščen z nizkimi drevesi in grmovjem. Številna debela kažejo poškodbe udarcev kamnov. Poškodbe je opaziti do 5 m nad tlemi, kar priča, da lahko kamni odskakujejo tudi tako visoko. Drevesa in grmovja so po oceni povprečno na medsebojni razdalji med 2,5 m in 5,0 m. Debelina grmovja je med 0,02 in 0,05 m, debelina dreves pa med 0,1 in 0,2 m.

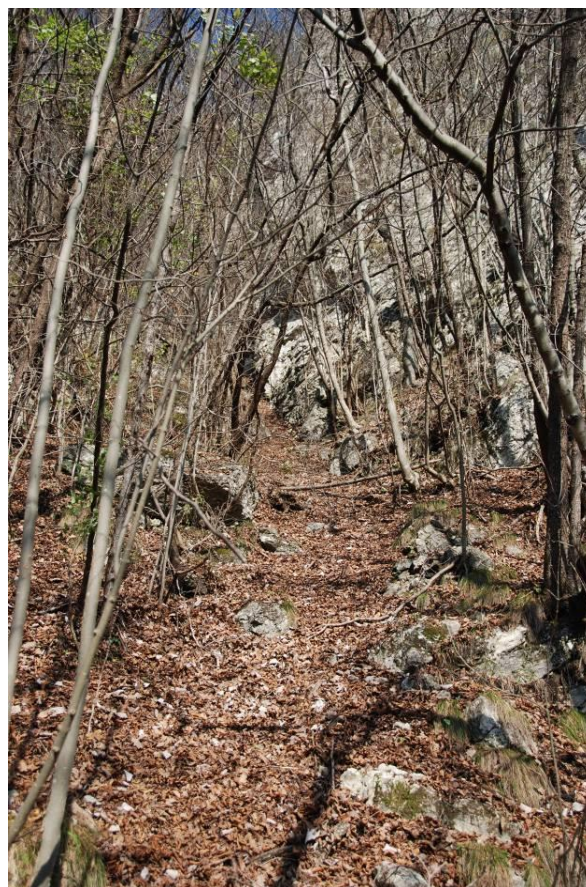


Fotografija 8: Večje skale se lahko ustavijo na pobočju le v bližini mesta izpada, kajti kasneje dobijo preveliko kinetično energijo, da bi jih lahko drevesa ustavila.



Fotografija 9: Številni kamni se ustavijo na poti skozi gozd. Mnogi od njih so v labilnem stanju in njihovo gibanje lahko sprožiljo divje živali, veter in podobno.





Fotografija 10-15: Na pregledanem območju smo ugotovili več glavnih poti potovanja skal, ki so vezane na plitve jarke oziroma grape, ki so jih ustvarile vode ob močnejših nalivih. Položaj poti določajo tudi skalni grebeni. Potekajo v smeri najbolj strme padnice pobočja navzdol. Vzdolž njih smo opazili bistveno večje število labilnih kamnov. Ob hoji znotraj teh jarkov smo ob najmanjši neprevidnosti prožili labilne kamne, kar priča, da po njih navzdol potuje glavnina kamnov. Tako rekoč, vsa debla in grmovja v teh jarkih so zaradi naletov kamenja močno poškodovana.





Fotografija 16: Na regionalni cesti pod kritičnim območjem je opaziti številne znake padanja skal in kamnov. Slika kaže mesto padca velike skale na cesto, ki je bila ponovno asfaltirana in v spodnjem desnem kotu odtise padanja manjših kamnov.

## 6. KLONTE - GEODETSKI POSNETEK M : 1000





## 7. KLONTE - OBSTOJEČA SITUACIJA M 1:1.000



## 8. VZDOLŽNI PROFILI BREŽINE KLONTE

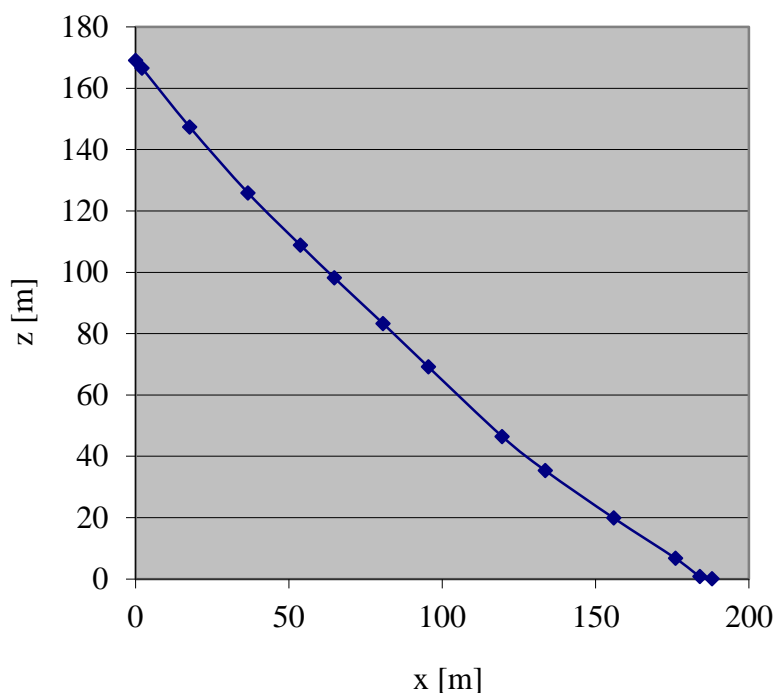
**Profil 1**

Najvišje žarišče (žarišče št. 2), kjer sta potencialno možni dve poti padajočega kamenja (profil 1 in 2).

*Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 220 cm. V zgornjem delu (med točkama 1 in 2) je žarišče, v katerem je v bližnji preteklosti prišlo do večjega odloma. Skale tega odloma so po tem profilu potovale do ceste, na kateri so povzročile večje poškodbe.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	169
2	2,15	166,5
3	17,69	147,3
4	36,70	125,8
5	53,79	108,8
6	64,86	98,1
7	80,78	83,2
8	95,52	69,1
9	119,61	46,4
10	133,65	35,3
11	156,00	19,8
12	176,11	6,7
13	184,06	0,8
14	187,98	0

*Profil 1*

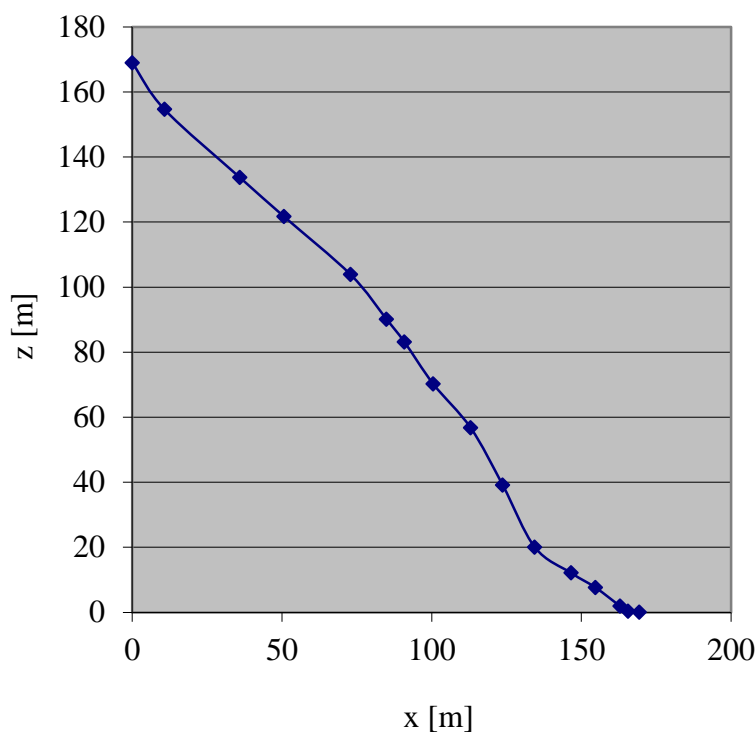
**Profil 2**

Najvišje žarišče (žarišče št. 2), kjer sta potencialno možni dve poti padajočega kamenja (profil 1 in 2).

*Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 220 cm. V zgornjem delu (med točkama 1 in 2) je žarišče, v katerem je v bližnji preteklosti prišlo do večjega odloma. Skale tega odloma so po tem profilu potovale do ceste, na kateri so povzročile večje poškodbe.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	168,9
2	10,77	154,6
3	35,92	133,7
4	50,65	121,7
5	72,95	103,8
6	84,93	90,1
7	90,90	83,1
8	100,54	70,2
9	113,04	56,7
10	123,74	39,1
11	134,46	20
12	146,62	12,1
13	154,76	7,6
14	162,97	1,9
15	165,63	0,3
16	169,42	0

*Profil 2*

### Profil 3

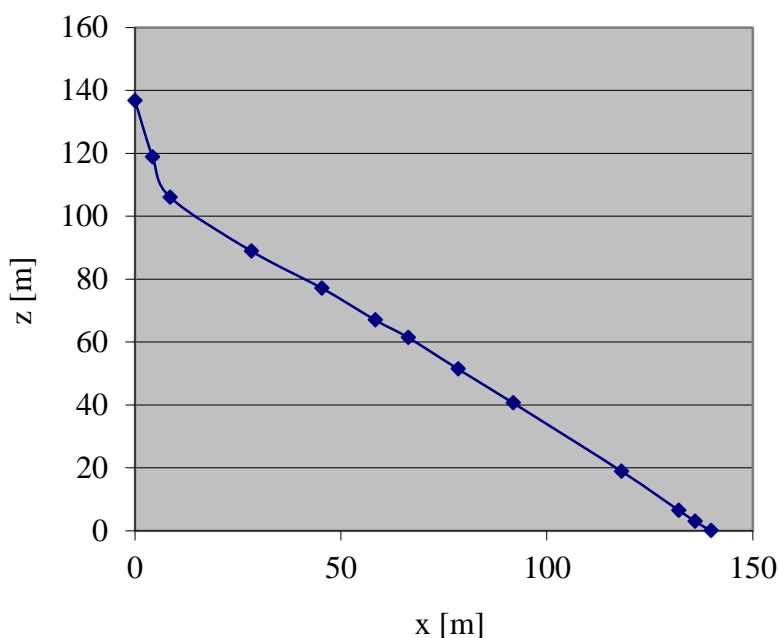
Žarišče v osrednjem delu (žarišče št. 4).

#### *Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 100 cm. V zgornjem delu (med točkama 1 in 2) je potencialni večji odlom v zelo strmi skalni brežini, spodaj se je izoblikovala ozka grapa. Le ta se združi z grapo profila 4 v srednjem delu poteka.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	136,7
2	4,26	118,8
3	8,55	106
4	28,27	88,9
5	45,40	77,1
6	58,32	67
7	66,36	61,4
8	78,46	51,4
9	91,85	40,6
10	118,16	18,9
11	132,02	6,5
12	136,00	3
13	139,87	0

*Profil 3*



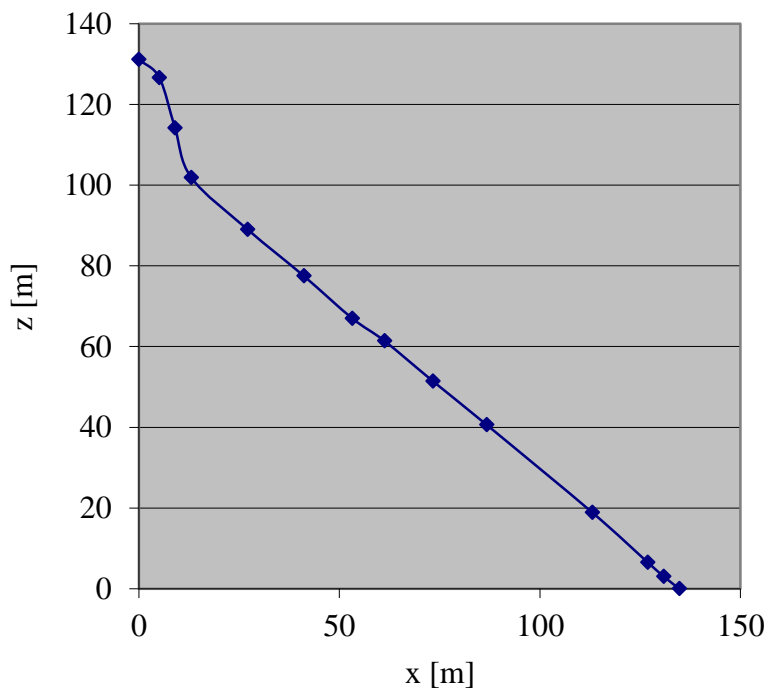
**Profil 4**

Žarišče v osrednjem delu (žarišče št. 5, levi del).

*Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 100 cm. V zgornjem delu (med točkama 2 in 4) je daljša strma skalna brežina v kateri je več manjših žarišč. Brežina ima lijakasto obliko, kar posledično pogojuje združevanje grap pod njo. V to območje prihaja tudi grapa profila št. 3.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	131,15
2	5,10	126,65
3	9,02	114,15
4	13,06	101,9
5	27,15	89
6	41,12	77,5
7	53,20	67
8	61,24	61,4
9	73,34	51,4
10	86,73	40,6
11	113,03	18,9
12	126,90	6,5
13	130,88	3
14	134,75	0

*Profil 4*

## Profil 5

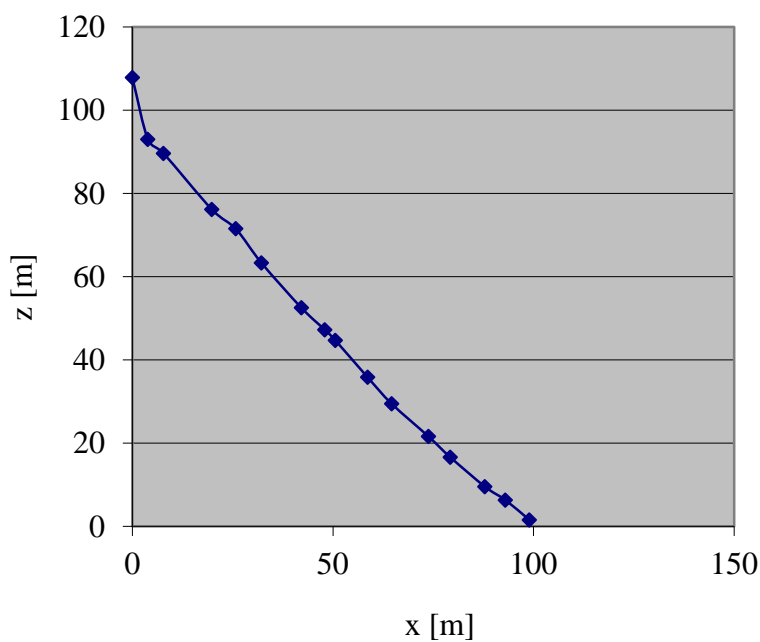
Žarišče v osrednjem delu (žarišče št. 5, desni del).

### *Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 100 cm. V zgornjem delu (med točkama 1 in 2) je vertikalna skalna brežina s potencialnim odlomom. Na desni strani žarišča se je izoblikovala grapa, po kateri je evidentno razvidno kotaljenje kamenja.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	107,8
2	3,88	93
3	7,81	89,6
4	19,87	76,1
5	25,79	71,5
6	32,19	63,3
7	42,16	52,5
8	48,02	47,2
9	50,61	44,7
10	58,66	35,8
11	64,70	29,4
12	73,82	21,6
13	79,28	16,6
14	87,94	9,5
15	93,01	6,3
16	99,03	1,5
17	101,03	0

*Profil 5*



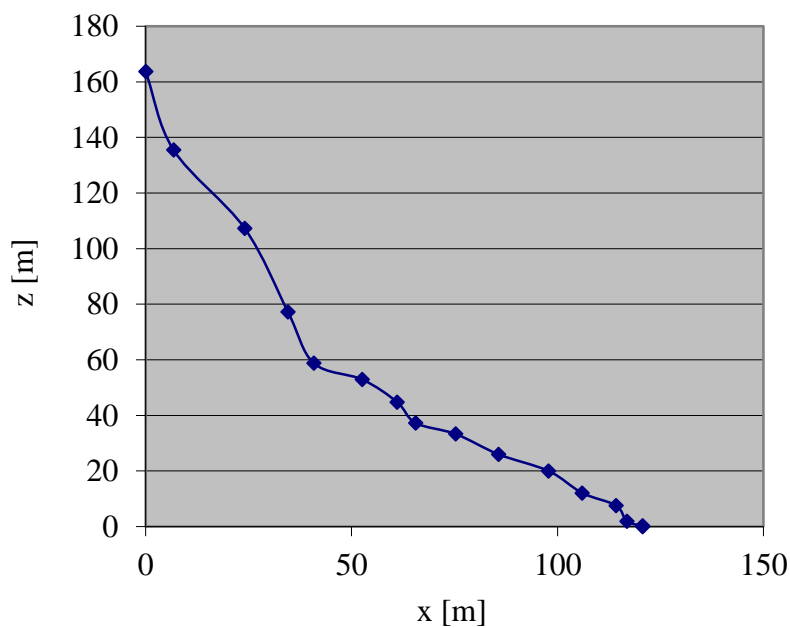
**Profil 6**

Žarišče pod najvišjim žariščem (št. 2).

*Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 110 cm. V zgornjem delu (med točkama 1 in 2) je vertikalna skalna brežina s potencialnim odlomom. Na desni strani žarišča se je izoblikovala grapa, po kateri je evidentno razvidno kotaljenje kamenja. Grapa se v spodnjem delu združi z grapo profila 2. V spodnjem delu je profil položnejši, v začetnem pa zelo strm.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	163,7
2	6,76	135,5
3	24,03	107,3
4	34,56	77,2
5	40,82	58,8
6	52,60	52,9
7	61,05	44,8
8	65,53	37,3
9	75,30	33,3
10	85,69	26
11	97,85	20
12	105,99	12,1
13	114,21	7,6
14	116,86	1,9
15	120,65	0,3
16	120,65	0

*Profil 6*



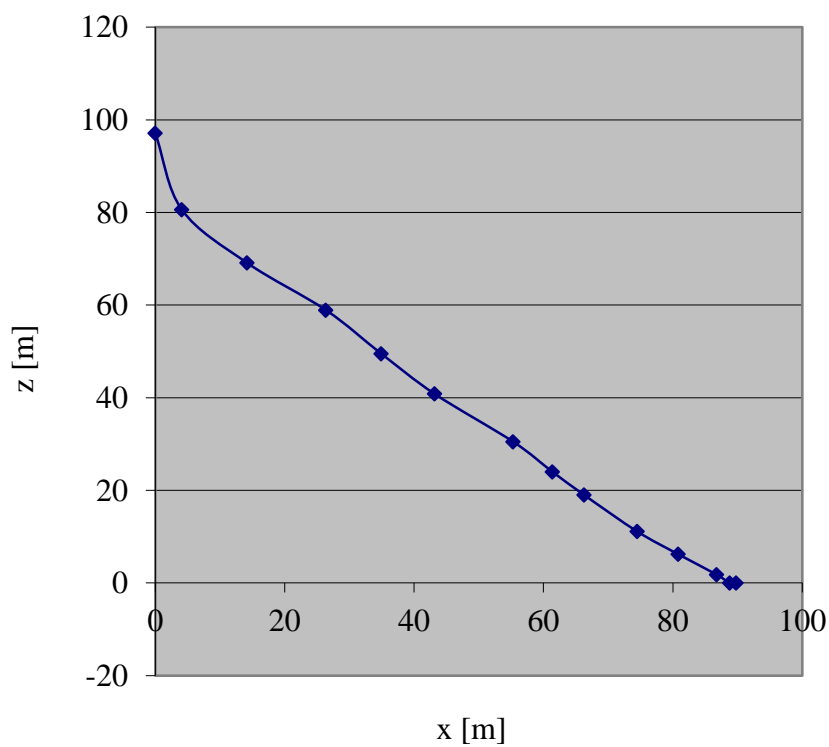
**Profil 7**

Žarišče v osrednjem delu (žarišče št. 3).

*Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 100 cm. V zgornjem delu (med točkama 1 in 2) je večje žarišče. V nadaljevanju se je izoblikovala neizrazita grapa s skalnimi skoki.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	97,1
2	4,09	80,6
3	14,18	69,1
4	26,38	58,9
5	34,92	49,5
6	43,19	40,8
7	55,30	30,5
8	61,38	24
9	66,28	19
10	74,50	11,1
11	80,82	6,2
12	86,77	1,8
13	88,78	0
14	89,78	0

*Profil 7*

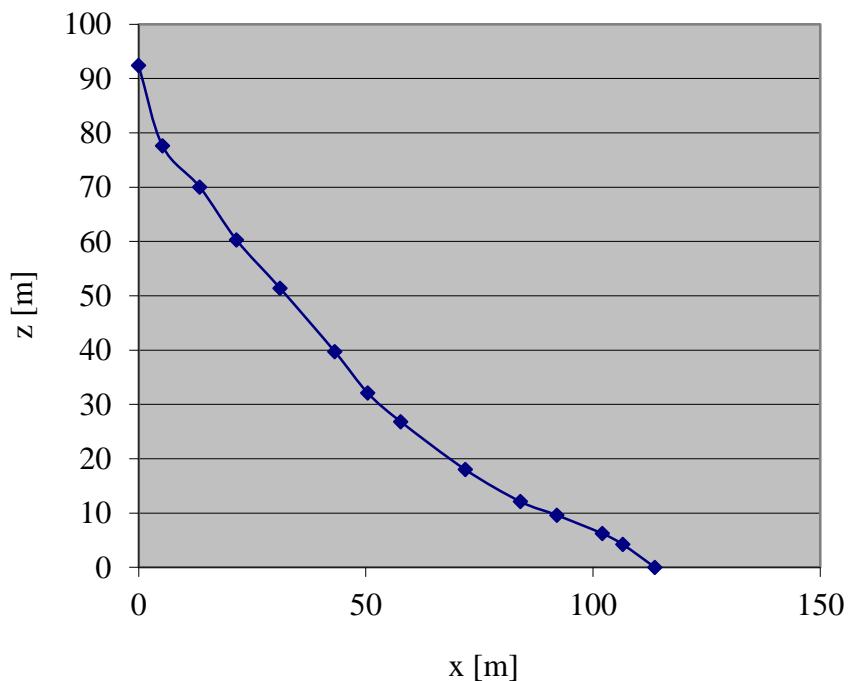
**Profil 8.**

Žarišče na skrajnem levem delu

*Opis profila*

Velikost skal v profilu je znašala do cca. 100 cm. V zgornjem delu (med točkama 1 in 2) je večje žarišče. V nadaljevanju se je izoblikovala neizrazita grapa s skalnimi skoki.

Točka	x [m]	y [m]
1	0	92,4
2	5,24	77,6
3	13,47	70
4	21,51	60,3
5	31,12	51,4
6	43,18	39,7
7	50,42	32,1
8	57,70	26,8
9	71,89	18
10	84,03	12,1
11	92,05	9,6
12	102,09	6,2
13	106,56	4,2
14	113,61	0

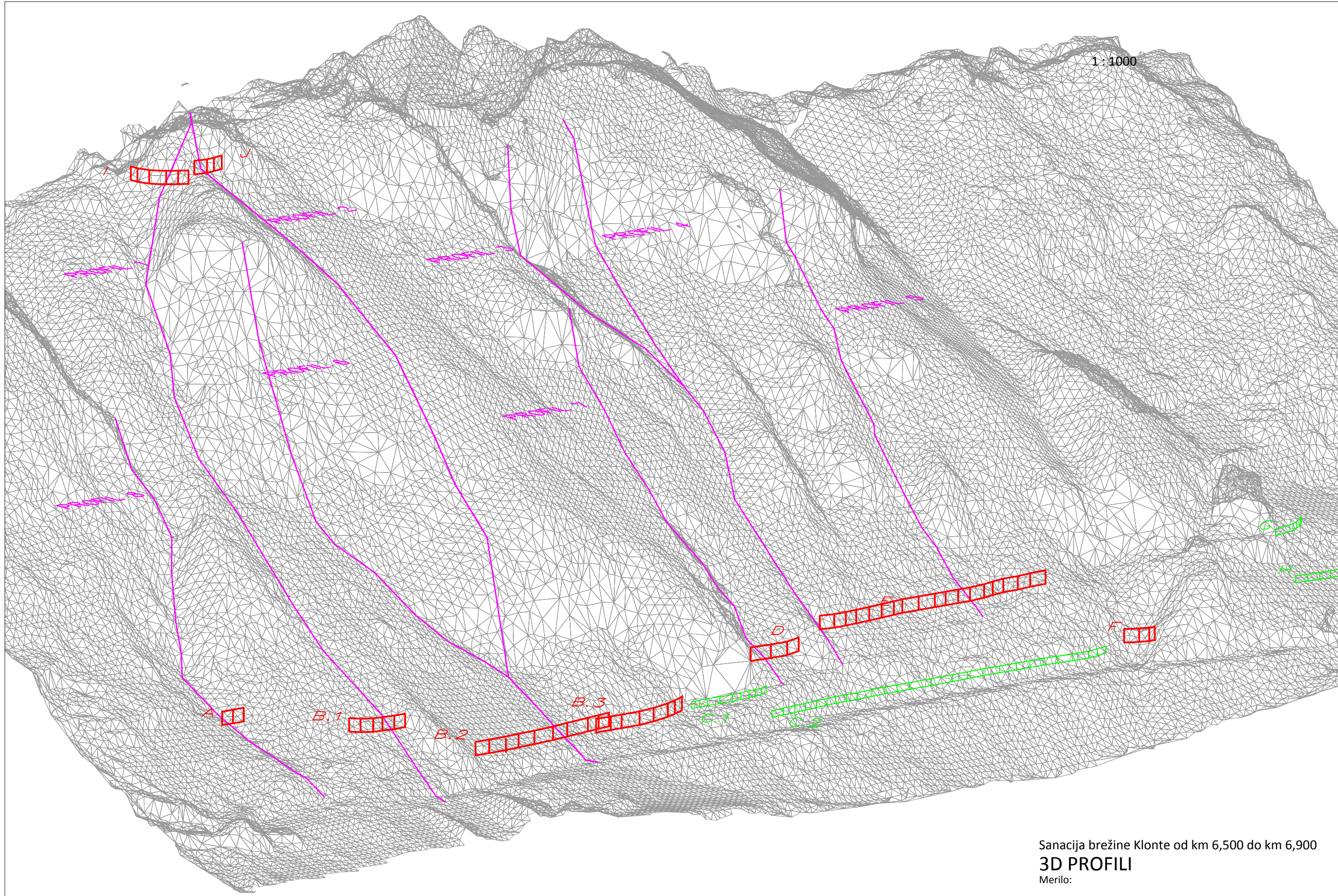
*Profil 8*

## 9. KLONTE - GRADBENA SITUACIJA M 1 : 1.000

## 10. KLONTE - DIGITALNI MODEL RELIEFA Z UREDITVIJO M 1 : 1.000



1:1000



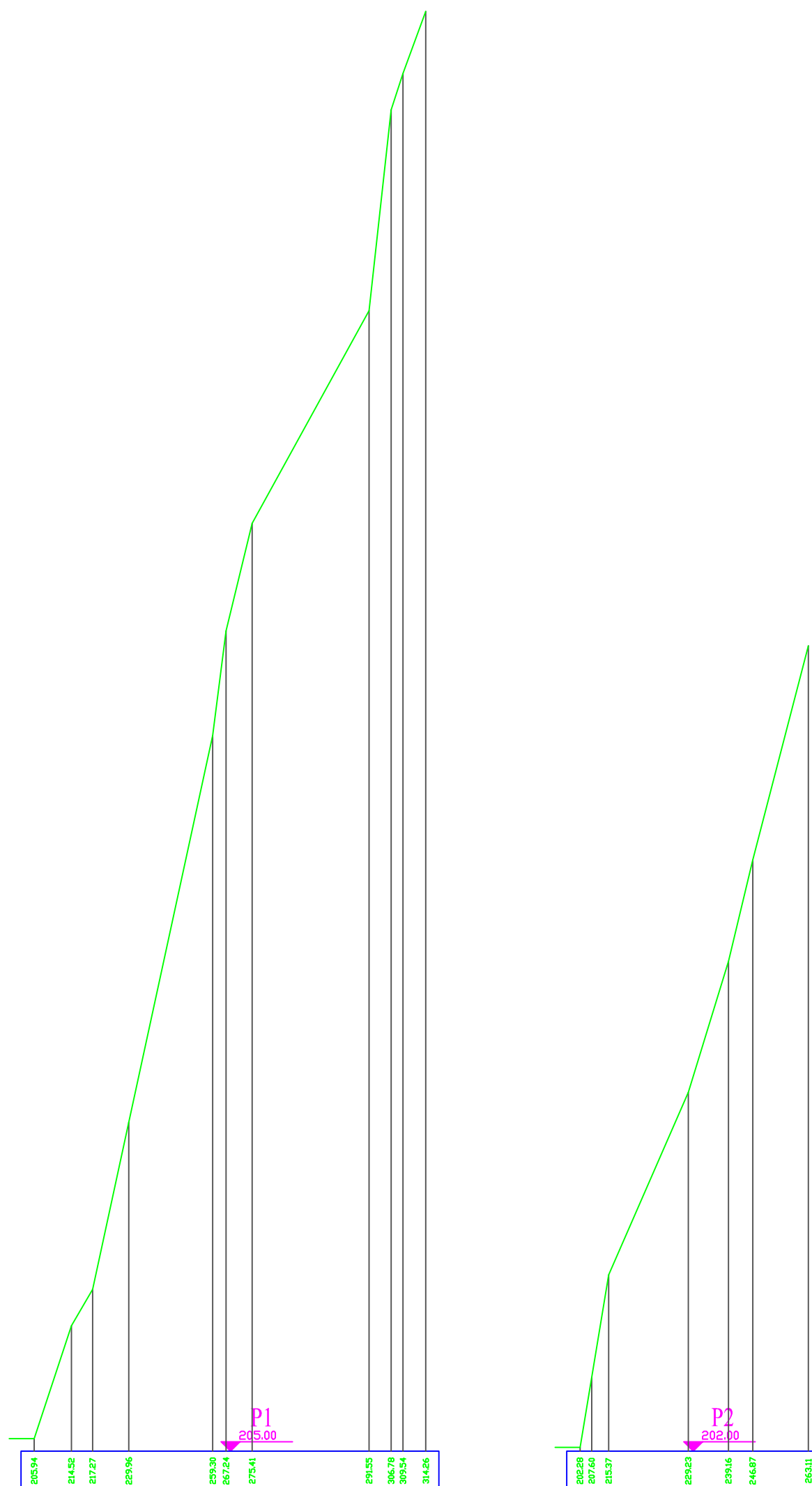
Sanacija brežine Klonte od km 6,500 do km 6,900  
**3D PROFILI**  
Merilo:



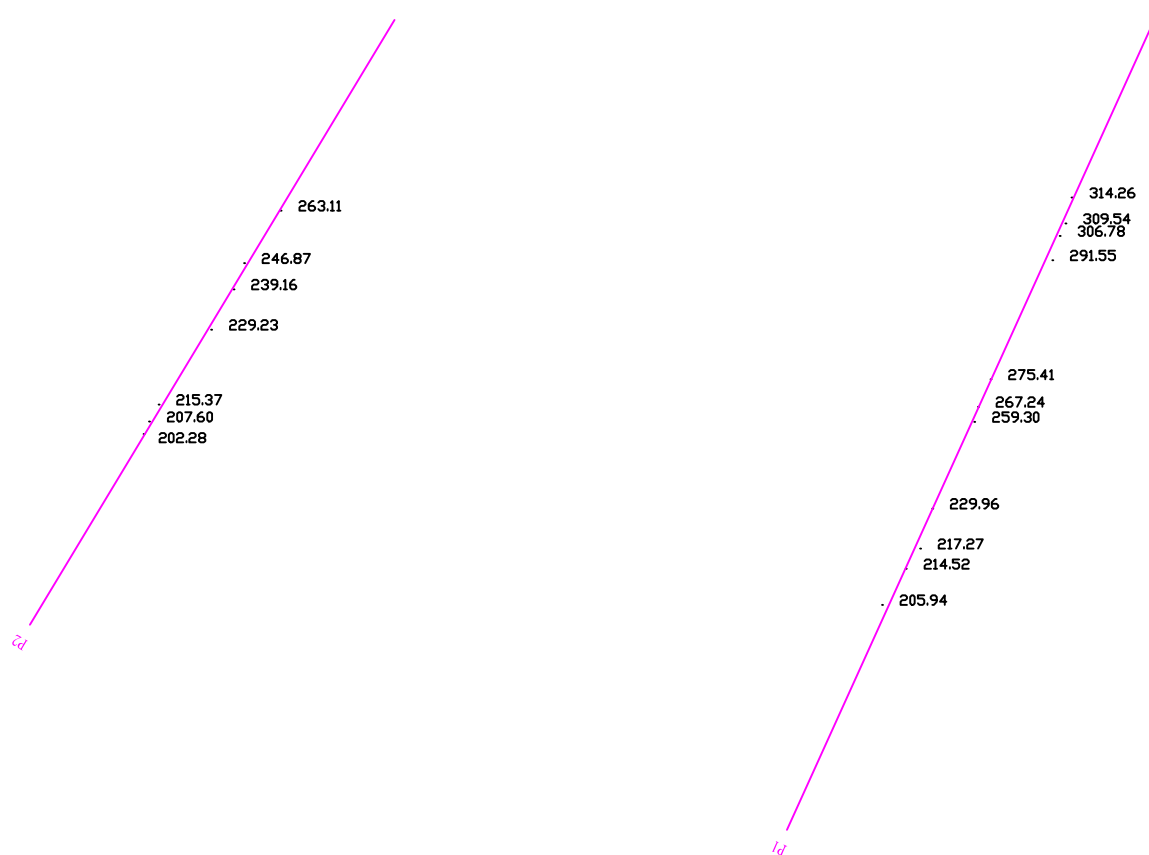
KLJUČ – MOST NA SOČI

PREČNA PROFILA STENE

MERILO 1:200/200

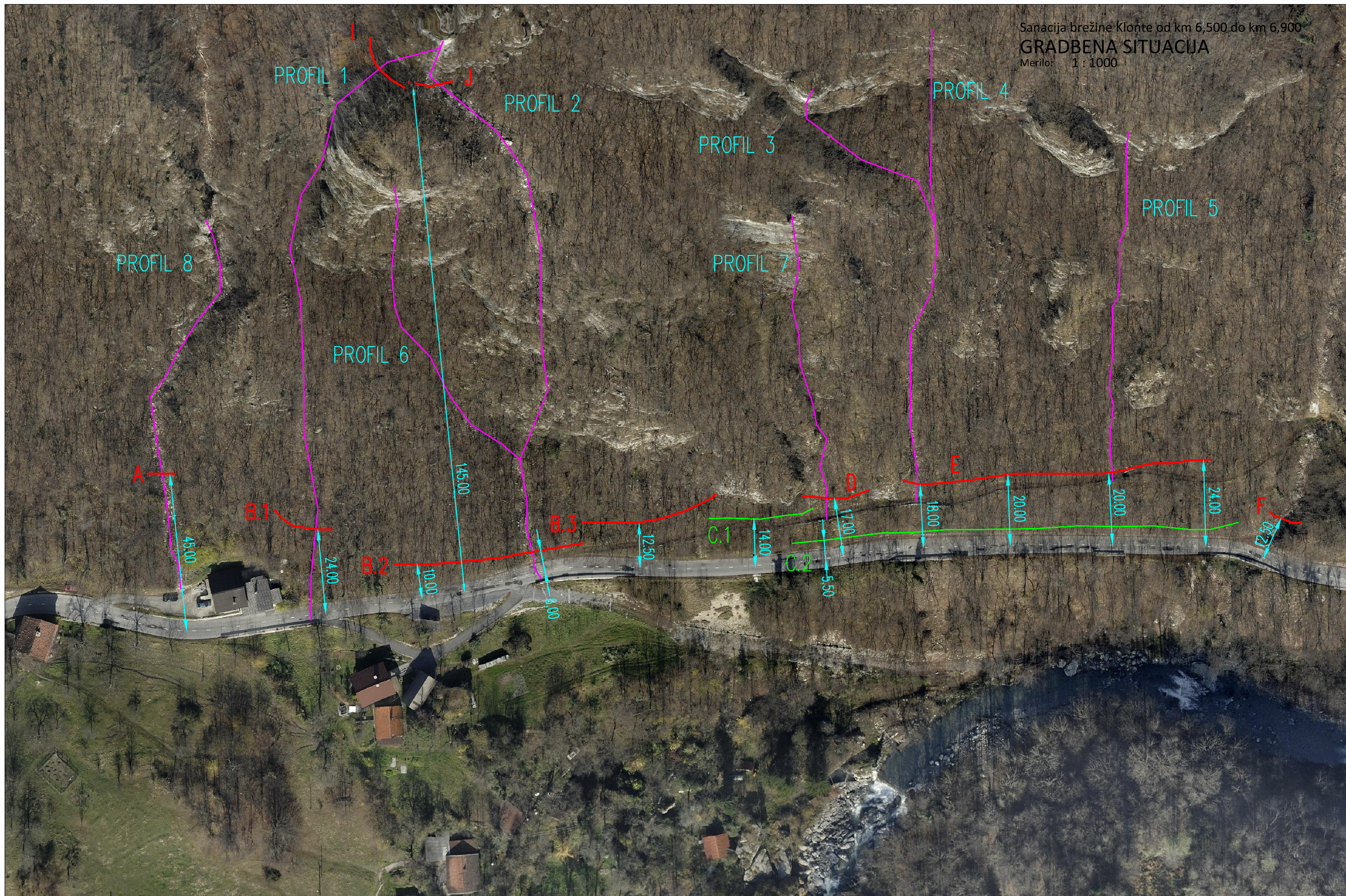


KLJUČ – MOST NA SOČI  
SITUACIJA PREČNIH PROFILOV  
MERILO 1:500





Sanacija brežine Klonte od km 6,500 do km 6,900  
**GRADBENA SITUACIJA**  
Merilo: 1 : 1000





Sanacija brežine Klonte od km 6,500 do km 6,900  
**SITUACIJA OBMOČJA**  
Merilo: 1 : 1000



PROFIL 1

PROFIL 2

PROFIL 3

PROFIL 4

PROFIL 5

PROFIL 6

PROFIL 7

PROFIL 8

2

4

5

7

12

1

3

11

13

8

9

14