

Процена хазарда од одроњавања у регионалним размерама, на путном правцу Краљево-Ушће

Павле Манасијевић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Процена хазарда од одроњавања у регионалним размерама, на путном правцу Краљево-Ушће | Павле Манасијевић
|| 2022 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006493>

Универзитет у Београду
Рударско-геолошки факултет



Завршни рад

Мастер академске студије

**Процена хазарда од одроњавања у регионалним
размерама, на путном правцу Краљево-Ушће**

Кандидат

Павле Манасијевић

Г603/21

Ментор

проф. др Милош Марјановић

Београд, септембар 2022

Комисија:

1. проф. др Милош Марјановић
Рударско-геолошки факултет, Београд
2. проф. др Биљана Аболмасов
Рударско-геолошки факултет, Београд
3. доц. др Зоран Берисављевић
Рударско-геолошки факултет, Београд

Датум одбране: 22.09.2022

РЕЗИМЕ

Карактеристика путева у кањонима и клисурама јесу појаве одроњавања, наглог откидања једног или више блокова стене од стенске косине који се даље гравитационо крећу. Магистрални пут између града Краљева и места Ушћа, који пролази кроз клисуру и долину реке Ибар, је један од таквих путева у Србији, познат по честим одронима. Тема овог мастер завршног рада јесте одређивање хазарда од одроњавања на овом путу, на предметној деоници између места Маглич и насеља Ушће, укупне дужине од 23,46 километара.

Терен је доминантно представљен серпентинисаним перидотитима, који су тектонски веома изломљени и подложни одроњавању, заједно са мање заступљеним филитима, и гранитима, који су отпорнији. Ради дефинисања потенцијално лабилних зона у терену, извршена је кинематска регионална анализа терена. Одабрана су два типа нестабилности, чији си кинематски услови искоришћени за издвајање нестабилних зона, а то су планарно клизање и клизање клина. Поступак је детерминистичке природе и врши се у GIS платформи, која је погодна за анализе регионалног карактера.

У софтверу CONEFALL су вршене симулације одрона тј. прорачун домета одрона у односу на тачку његовог извора. Параметри одрона добијени симулацијама су брзине одрона, као и максимална кинетичка енергија одрона. Кинетичка енергије одрона зависи од масе одронутог блока по тачки извора, и представљени су резултати симулације за кинетичку енергију у четири сценарија, за четири различите вредности запремине блока.

Дефинисање хазарда је извршено према енергијама које заштитне мере, присутне у терену, могу поднети, и тиме су издељене зоне ниског, средњег и високог хазарда. Установљено је да планарно клизање представља опасност на генерално 10% деонице, док клизање клина на генерално 30% деонице.

Кључне речи: *одрони, хазард, регионална анализа*

САДРЖАЈ

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | УВОД | 1 |
| 2. | ОПШТЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ТЕРЕНА | 2 |
| 2.1. | Географске и геоморфолошке карактеристике..... | 2 |
| 2.2. | Геолошка грађа терена | 3 |
| 3. | ОДРОЊАВАЊЕ И СТАБИЛНОСТ СТЕНСКИХ КОСИНА..... | 7 |
| 3.1. | Планарно клизање | 10 |
| 3.2. | Клизање клина | 12 |
| 3.3. | Узроци одроњавања | 16 |
| 4. | МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ..... | 20 |
| 4.1. | Методика регионалне кинематске анализе | 21 |
| 4.2. | Софтвер CONEFALL..... | 27 |
| 5. | РЕГИОНАЛНА КИНЕМАТСКА АНАЛИЗА | 31 |
| 5.1. | Подаци о дисконтинуитетима | 31 |
| 5.2. | Дефинисање критеријума | 36 |
| 5.3. | Резултати регионалне кинематске анализе | 37 |
| 5.3.1. | Резултати анализе планарног клизања | 37 |
| 5.3.2. | Резултати анализе клизања клина..... | 38 |
| 5.4. | Дискусија резултата | 40 |
| 6. | СИМУЛАЦИЈЕ ОДРОЊАВАЊА | 43 |
| 6.1. | Симулације брзине одрона | 43 |
| 6.2. | Симулације кинетичке енергије одрона | 44 |
| 7. | ХАЗАРД ОД ОДРОЊАВАЊА | 47 |
| 8. | ЗАКЉУЧАК | 50 |
| | ЛИТЕРАТУРА..... | 51 |

СПИСАК ПРИЛОГА

Прилог 1. Карте рељефа и експозиције терена, 1:50 000

Прилог 2. Карта нагиба терена и инжењерскогеолошка карта терена, 1:50 000

Прилог 3. Карта издвојених тачака одламања, насталих планарним клизањем, 1:25 000

Прилог 4. Карта издвојених тачака одламања, насталих клизањем клина, 1:25 000

Прилог 5. Карте брзине одрона насталих планарним клизањем и клизањем клина, 1:50 000

Прилог 6. Карте кинетичке енергије одрона за различите масе блока код планарног клизања, 1:50 000

Прилог 7. Карте кинетичке енергије одрона за различите масе блока код клизања клина, 1:50 000

Прилог 8. Карте хазарда од одроњавања, за масу блока од 525 kg, 1:50 000

Прилог 9. Карте хазарда од одроњавања, за масу блока од 1825 kg, 1:50 000

Прилог 10. Карте хазарда од одроњавања, за масу блока од 4350 kg, 1:50 000

1. УВОД

На седници Катедре за геотехнику Рударско-геолошког факултета, одржаног у марту текуће године, ми је одобрена тема мастер завршног рада под називом „Процена хазарда од одроњавања у регионалним размерама, на путном правцу Краљево-Ушће“. Предложену комисију чине ментор, проф. др Милош Марјановић, проф. др Биљана Аболмасов и доц. др Зоран Берисављевић.

Предмет изучавања овог мастер завршног рада јесте хазард од одроњавања у стенским косинама на државном путу IБ реда, који повезује град Краљево са насељем Ушће. Циљ завршног рада јесте процена поменутог хазарда, у регионалној размери, као и израда карте хазарда за дати простор. Сврха процене хазарда од одроњавања на било ком путном правцу јесте прецизно лоцирање оних зона у простору, код којих је степен хазарда висок, ради бољег осигурања датих зона, одређивања алтернативних рута и места евакуације, и подизања свести код надлежних органа за дати пут и локалног становништва.

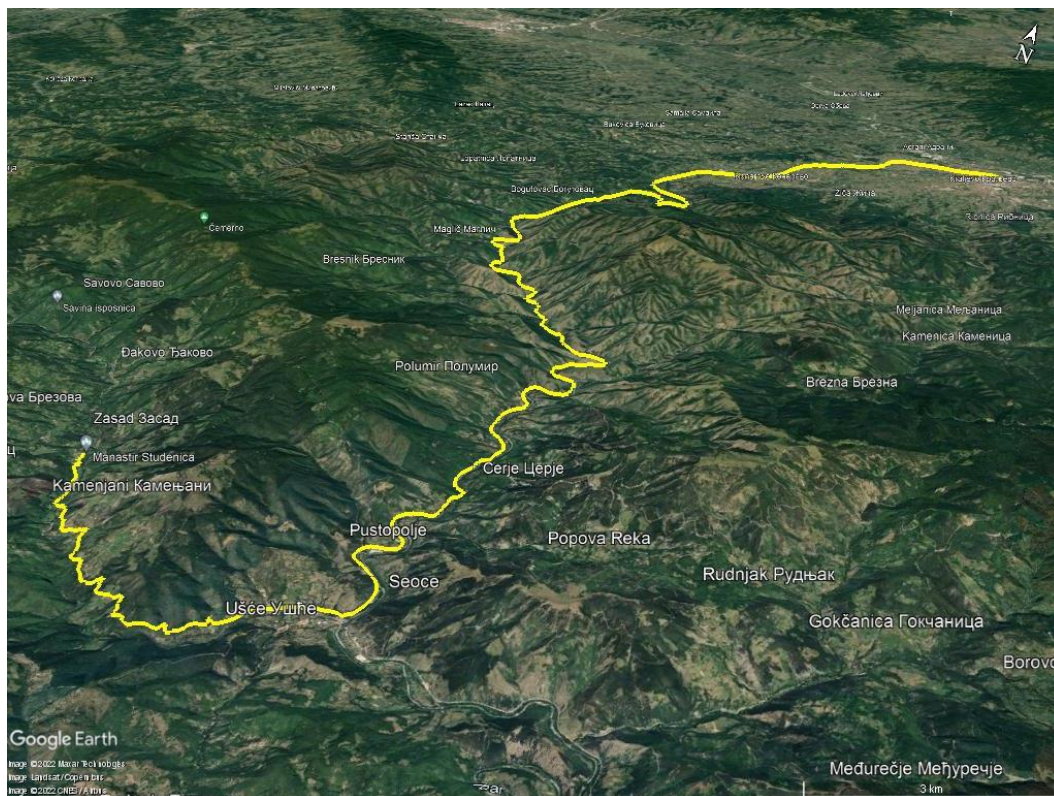
Почетна поглавља ће се односити на опште одлике терена, где ће се дати кратак приказ геоморфолошке и геолошке грађе, и на постојећу евиденцију о одронима на датом путном правцу. Даље ће бити речи о општем механизму одроњавања и типовима нестабилности у стенским косинама. Након тога следи приказ методике рада, базиране на Kim et al, 2004; Mavrouli et al, 2015 и Марјановић et al, 2022, где ће бити описан поступак регионалне кинематске анализе, и биће представљени програми неопходни за процену хазарда, као и њихов начин функционисања. Ово поглавље ће бити допуњено поглављима о резултатима регионалне кинематске анализе и симулације одрона, усаглашавањем са реалном ситуацијом у терену. На самом крају рада биће дат приказ хазарда, са потребним пратећим параметрима.

2. ОПШТЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ТЕРЕНА

2.1. Географске и геоморфолошке карактеристике

Краљево и Ушће се налазе у административном подручју Шумадије и Западне Србије, ситуирани на реци Ибар која се код Краљева улива у Западну Мораву. Само Ушће се налази на ушћу реке Студенице у Ибар. Подручје од интереса се налази између $43^{\circ}26'$ и $43^{\circ}40'$ северне географске ширине и између $20^{\circ}28'$ и $20^{\circ}40'$ источне географске дужине. Укупна дужина путног правца између Маглича и Ушћа износи 23 km, и прати ток реке Ибар, која формира клисуру на датом подручју.

Терен је брдовито-планински, са најнижим котама од око 250 mnnv долином реке Ибар, а највиши оближњи врхови су Равни сто (1375 mnnv) и Чикер (1325 mnnv) који припадају планини Столови, и Мршава ливада (1258 mnnv), западно од насеља Церје. Западно се налази планина Чемерно, а на југозападу се налазе Голијске планине. Предео је веома разуђен, планине су избраздане потоцима и мањим притокама које се уливају у Ибар. На слици 2.1 је дат сателитски приказ терена, у 3D перспективи. Знатније притоке су Маглашница, код места Маглич, Брезанска река, која се улива северно од Полумира, Желебић, и река Студеница. Карта рељефа и експозиције терена су дате у Прилогу 1, док је карта нагиба терена дата у Прилогу 2. Више од три четвртине терена (76%) се налази на висинским котама од 300 до 500m, док 23% се налази на котама од 500 до 700m. Оријентација падина терена је претежно ка северу и истоку-југоистоку, где 75% површине терена има вредности азимута у рангу 0 - 120° . Падине су претежно благих до средње стрмих нагиба, доминантно у распону од 15 до 35° , затим у распонима 5 - 15° и 35 - 45° . Субхоризонтални и хоризонтални нагиби у терену генерално прате само корито и долину реке Ибар. Терен је разуђен, са јасно израженим гребенима, са честим јаругама дуж којих је могуће стварање повремених водених токова. Такође, сам пут генерално прати ток реке Ибар, која знатно меандрира у овом пределу, са појачаном ерозијом у одређеним деловима, поготово при вишем водостају.



Слика 2.1. Сателитски приказ терена (Google Earth, Maxar)

2.2. Геолошка грађа терена

Две веће тектонске јединице су заступљене на датом простору, а то су Западна Вардарска офиолитска зона и блок Јадар-Копаоник (Schmid et al, 2008). Блок Јадар-Копаоник заузима мањи простор у централном и југозападном делу терена, а представљен је у подини серицитско-хлоритским филитима и шкриљцима (F), са прослојцима амфиболитских шкриљаца, кварцита и већој мери метапешчара. Код места Полумир, стене су контактено метаморфисане до биотитисаних филита. До контактеног метаморфизма је дошло услед утискивања гранитоида (γ) Чемерна (Урошевић et al, 1966). Гранитоиди се јављају у виду жица, које се генерално пружају у правцу СЗ-ЈИ. Повлату овог блока чине тријаски карбонати (Т), представљени кречњацима који су претрпели низак степен метаморфизма, стога су често мермерисани.

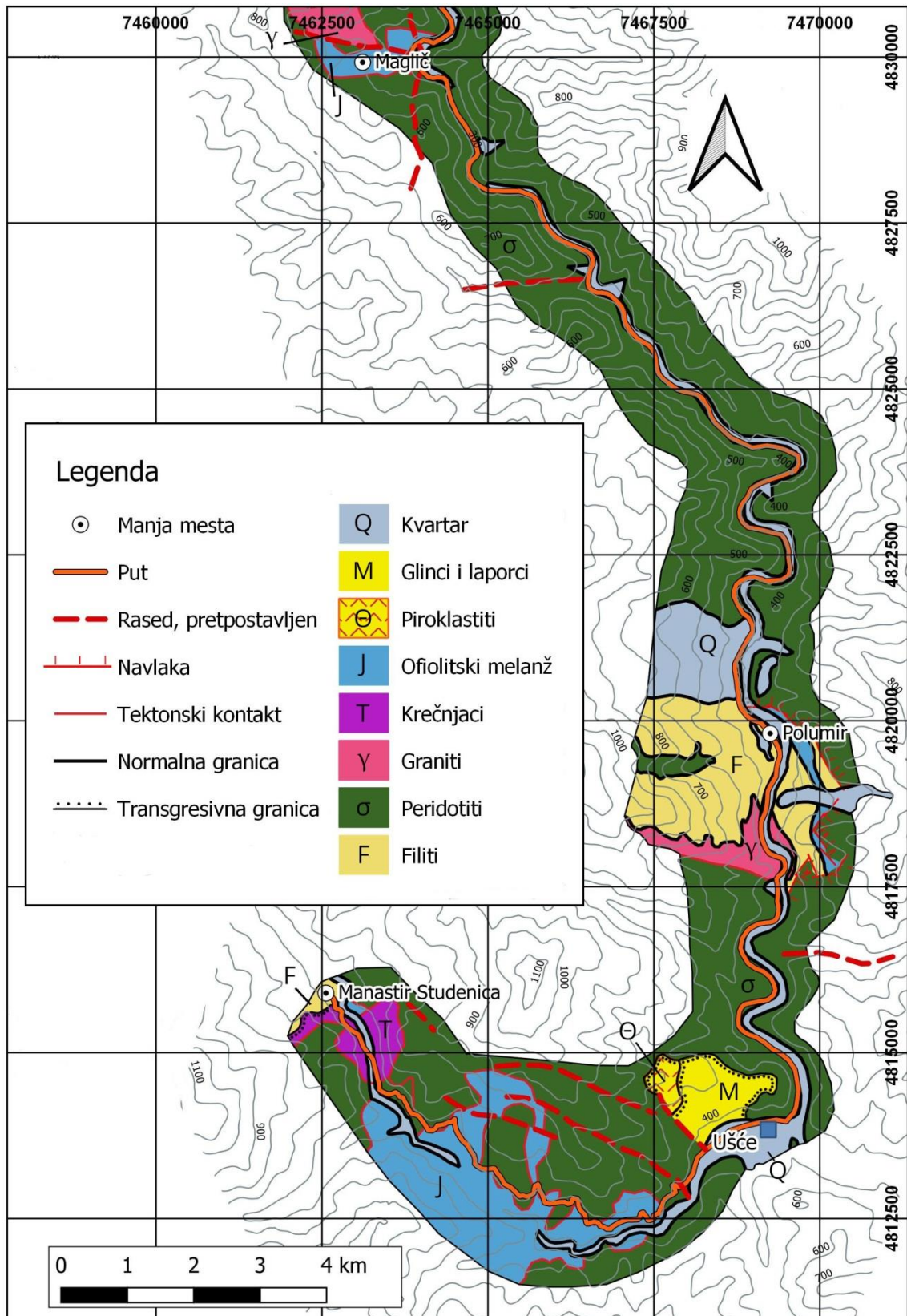
Западна Вардарска офиолитска зона је навучена преко блока Јадар-Копаоник. Представљена је ултрамафитским комплексом, изграђеном од серпентинисаних перидотита (σ), који заузимају велику већину терена, и офиолитским меланжом јурске старости (J). У меланжу су заступљене базичне магматске стене, са пешчарима, глинцима, глиненим шкриљцима и

рожнацима. Офиолитски меланж је мање заступљен у северним и централним деловима, а знатније у јужним деловима терена.

Код Ушћа се јављају туфови и вулканске брече (θ) доњомиоценске старости, као и глинци и лапорци (М) са угљоносним хоризонтима. Квартарни (Q) седименти су доминантно представљени алувионом реке Ибар, али и сипарима, речним терасама, делувијалним и пролувијалним наслагама. Геолошка грађа терена је приказана на слици 2.2.

Терен је тектонски веома изломљен, као последица интензивног навлачења у правцу запада, док су контакти између већине јединица тектонски, изузев код утиснутх магматских тела. Сам терен је настао обдуковањем и навлачењем јединице Јадар-Копаник, која представља најунутрашњије делове из некадашњег Вардарског океана (Schmid et al, 2008). Ова јединица је у ствари композитна навлака, преко које су Западно Вардарски офиолити обдуковани са повлатним седиментима. Обе јединице имају правац кретања ка западу-југозападу, дуж веома стрмих раседа, који су настали услед затварања Вардарског океана крајем јуре. Овом приликом су стенске масе обе јединице претрпеле значајне деформације. У случају Јадар-Копаник јединице, то је била друга фаза, јер је прва уследила директно током обдукције офиолита (Schefer et al, 2010). То је довело до благе али и каткад потпуне мермеризације тријаских кречњака, као и метаморфизма ниског кристалинитета палеозојских седимената (глинаца и пешчара јединице Јадар-Копаник), који су уско заступљени у атару села Полумир на датом терену.

Следећи битан догађај у историји стварања терена јесте утискивање гранита Чемерна тј. интрузије Полумира. То су гранити са високим садржајем SiO_2 (преко 70%), старости између 18,06 и 17,74 милиона година, датирани U-Pb методом (Schefer et al, 2011).



Слика 2.2. Упростиена геолошка карта терена, на основу Основне геолошке карте СФРЈ листа Врњци, 1966.

Крајем еоцена и почетком олигоцена је започет магматизам који је, према Schefer-у, настао због повлачења Адријатичке плоче (тзв. roll-back) и њене потоње деламинације, тиме отварајући пут магматизму западно од Сава зоне (Schmid et al, 2008) која представља шав Адријатичке и Европске плоче. Главна фаза магматизма у ужем али и ширем простору је трајала од касног еоцена до раног миоцена, што је и довело до формирања пирокластичних седимената који се јављају у мањој мери на терену.

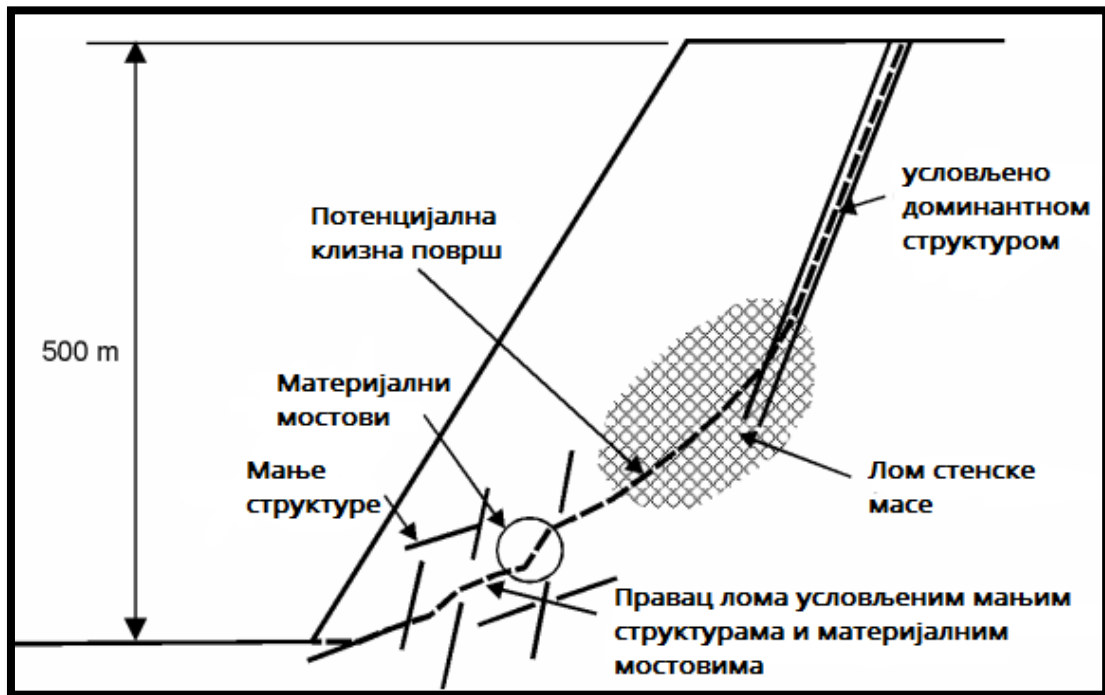
Изнад свих поменутих јединица леже миоценско-плиоценски слатководни језерски седименти, са обода некадашњег Панонског мора, и квартарни покров, представљен алувионима река Ибар и Студеница, речним терасама, честим сипарима и пролујивалним наслагама и у пределу око Полумира делувијалним покровом.

3. ОДРОЊАВАЊЕ И СТАБИЛНОСТ СТЕНСКИХ КОСИНА

Одроњавање спада у велику групу гравитационих-падинских процеса, који су дефинисани као кретање стенске масе, дробине или тла низ падину (Cruden et al, 1991). Творац класификације ових процеса, коју је прихватила Међународна асоцијација за инжењерску геологију (IAEG), је Varnes (Varnes, et al 1978), који је поделио све процесе према механизму кретања и врсти покренутог материјала. Како се у пракси свако откидање стене од своје масе и њено даље гравитационо кретање сврстава под кровним појмом одроњавање (rock fall), под овим процесом су укључене следеће комбинације из Varnes-ове класификације: одроњавање стенске масе (rock fall), претурање стенске масе (rock topple) и клижење стенске масе (rock slide). Потребно је прецизно дефинисати који типови клижења стенске масе одговарају механизму одроњавања. У пракси се сматра да се сви ломови у стенским масама дешавају након прекорачења чврстоће на смицање (осим код претурања), где је најчешћи случај да се смицања одвија делом дуж пукотина, и делом кроз материјалне мостове или монолитни део стенске масе (Лапчевић, 2004). Управо ова чињеница представља велики проблем при пројектовању и анализи стенских косина, јер се разликују приступи одређивања чврстоће стенске масе у зависности од начина испољавања лома, који су представљени на слици 3.1.

С обзиром на то да је лом у стенској маси условљен чврстоћом смицања дуж пукотина и чврстоћом смицања стенске масе, а да је тешко квантификовати тај однос у самој косини, генерално се претпоставља да је укупан лом условљеном дисконтинуитетом (discontinuity controlled failure у страниј литератури) или условљен смичућом чврстоћом стенске масе (Hoek & Bray, 1981). Одатле произилазе **планарно клизање** и **клизање клина**, чије је кретање транслаторно и контролисано пукотинама, и **општи лом** стенске масе, која је или веома испуцала, или пак слабих физичко-механичких параметара, и кретање је ротационог типа. За потребе овог рада ће се у обзир

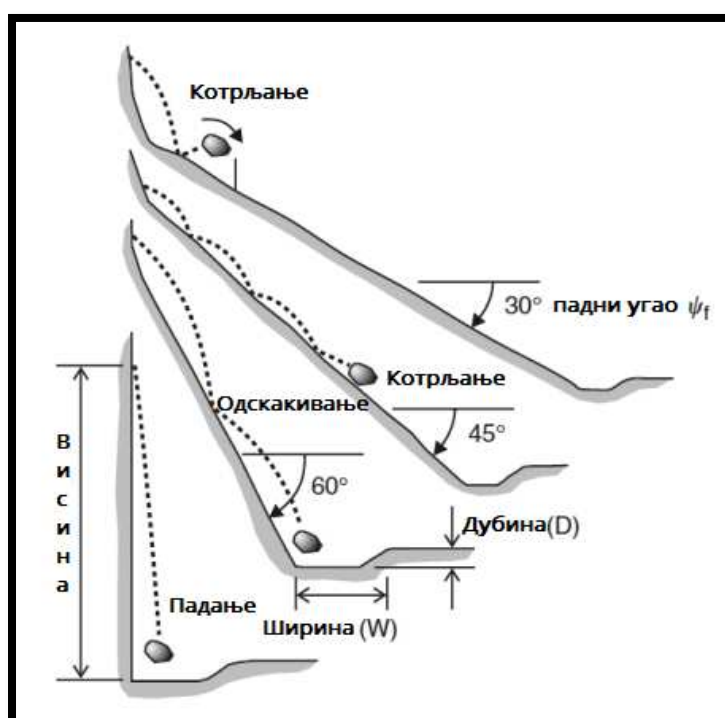
узимати само планарно клизање и клизање клина, док се изоставља претурање блокова и општи лом, као и прогресивни лом.



Слика 3.1. Шематски приказ различитих видова превазилажења смичуће чврстоће у косини у стенској маси (Hoek et al, 2000)

Када се стенски блок/блокови одвоје од косине, због силе гравитације почињу да се крећу наниже. У зависности од геометрије косине ће се механизам кретања разликовати, па се тако на слици 3.2 може видети да се на благим нагибима блокови котрљају, затим на стрмијим нагибима одскакују, а код веома стрмих нагиба директно падају надоле (Ritchie, 1963). Геометрија косине, као и величина и тежина блока утичу на трајекторију одроњеног блока тј. на његову кинетичку енергију, тиме и на локацију где ће се зауставити, о чему ће бити више речи касније. Комбинација механизма кретања блокова низ косину је могућа уколико има и промене у самој геометрији косине, па тако нпр. блок се може прво котрљати, па затим одскакивати, или пак падати, затим одскакивати и потом котрљати. Такође, цео процес се може започети чистим клизањем па наставити неким од наведених механизма, осим ако се клизна равна директно не завршава у ножици косине. Приликом кретања блока наниже ће се његова брзина и

трајекторија мењати у зависности од типа материјала по којем се креће, што се дефинише коефицијентом реституције (еластично својство које дефинише однос улазног и излазног дела трајекторије при удару о подлогу), који заједно са геометријом косине представља главне факторе кретања блока, у поређењу са мање битним факторима као што су величина и облик блока, коефицијент трења и уситњавање и расипање блока на мање комаде приликом удара (Ноек et al, 2007), термички ефекти, отпор евентуалне вегетације, пластична деформација подлоге или самог блока, лубрикација итд. Најгори случај је ако се откинути блок креће по свежој и чврстој, еластичној стенској маси која природно има висок коефицијент у поређењу са дробинским материјалом и тлом. Генерално, велики блокови се депонују уз лице косине, док облик нема великог утицаја, осим ако блок није знатно издужен (Ritchie, 1963). Како два до три фактора одређују већи део трајекторије и домета блокова, могуће је уз грубе симулације одроњавања доћи до прилично прецизних процена истих (Ноек et al, 2007).

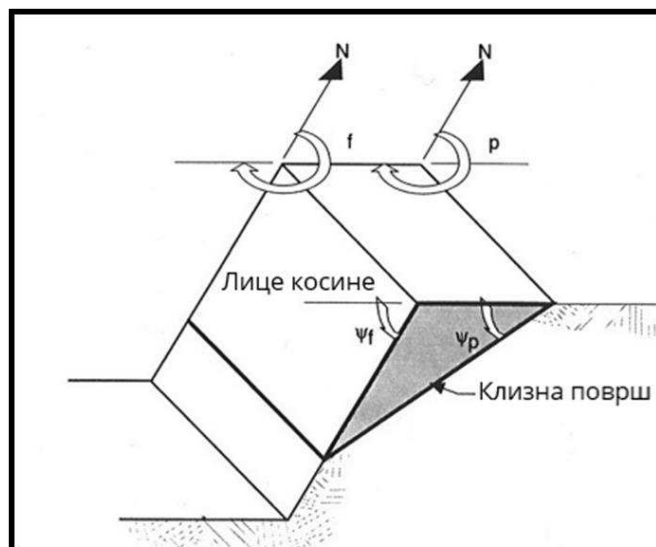


Слика 3.2. Механизми кретања откинутог блока низ косину у зависности од нагиба косине (Ritchie et al, 1963; презето из Bar et al, 2016)

3.1. Планарно клизање

Планарно клизање представља кинематски најпростији вид нестабилности у косинама у стенској маси, али се само по себи релативно ретко јавља у природи (Wyllie&Mah, 2004). Више аутора је дало предлог за кинематску проверу овог типа нестабилности, но у пракси се највише користе услови које је дао Markland (Markland, 1972), а које су употпунили Hoek и Bray (Hoek & Bray, 1981). Планарно клизање је могуће уколико су испуњени следећи геометријски услови, а који су илустровани на слици 3.3:

- Азимут равни (дисконтинуитета) α_p по којој долази до клизања, мора бити у распону од $\pm 20^\circ$ у односу на азимут косине α_f .
- Падни угао дисконтинуитета ψ_p мора бити мањи од падног угла саме косине ψ_f .
- Падни угао дисконтинуитета ψ_p мора бити већи од угла унутрашњег трења ϕ .
- Горњи крај дисконтинуитета или пресеца горњи део косине, или се завршава у пукотини затезања
- Морају постојати равни отпуштања, тј. равни које дефинишу бочне границе клизајућег блока, а саме по себи пружају занемарљив отпор клизању.



Слика 3.3. Шематски приказ планарног клизања (Norrish et al, 1996)

Анализа стабилности косина у стенској маси код којих се јавља планарно клизање је са статичког аспекта проста и погодна у 2D простору, поготово у случају да пукотина сама пресеца косину и у доњем и у горњем делу (нпр. слика 3.1.), као што је представио Culmann (Culmann, et al 1866):

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{cA + W\cos\psi_p \tan\varphi}{W\sin\psi_p} \quad [3.1]$$

где је FS фактор сигурности, τ_f смичућа чврстоћа стенске масе, τ_m мобилисани смичући напон, c кохезија стенске масе, A површина клизне равни, а W тежина блока. Овде је фактор сигурности изражен помоћу МС (Mohr-Coulomb) критеријума лома, који се конвенционално користи у пракси. Поред њега се могу користити и други критеријуми, а од којих је веома погодан Barton-Bandis-ов критеријум, који у себи садржи битне параметре од којих зависи смичућа чврстоћа дуж једног дисконтинуитета, као што су храпавост и чврстоћа зидова пукотина.

Чешћи је случај да се јавља пукотина затезања, која спаја крај равни клизања и површину косине. Она се може јавити у самом лицу косине, или пак у њеном горњем делу. Када се овакви случајеви анализирају, генерално се претпоставља следеће (Wyllie & Mah, 2004): пружање дисконтинуитета и тензионе пукотине је паралелно пружању косине, тензиона пукотина је вертикална и испуњена водом до дубине z_w , вода се креће по клизној површи и избија на површину на контакту клизна површ-косина, не постоје моменти сила тако да је кретање чисто транслаторно. Поред тога, проблем се анализира у дводимензионалном простору, тако да се клизна површ може представити својом дужином, а запремина блока његовим попречним пресеком. Када се у обзир узму ове претпоставке, фактор сигурности гласи (Hoek & Bray, 1981):

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{cA + (W\cos\psi_p - U - V\sin\psi_p)\tan\varphi}{W\sin\psi_p + V\cos\psi_p} \quad [3.2]$$

где је U сила порног притиска дуж равни клизања, а V сила хидростатичког притиска на вертикални зид пукотине затезања.

Досад је у тексту било усвојено да се планарно клизање дешава дуж континуалних пукотина, као што је нпр. слојевитост или пукотина лучења. Међутим, да би дошло до планарног клизања није потребно постојање ових доминантних структура, већ је могуће да до клизања долази тако што се формира клизна раван која делом захвата мање геолошке структуре, а делом и интактну стенску масу. Ово важи за стрме стенске косине (Hoek & Bray, 1981), за које постоји образац за приближно одређивање нагиба критичне клизне равни ψ_{pc} (уколико нема присуства подземне воде):

$$\psi_{pc} = \frac{1}{2}(\psi_f + \varphi) \quad [3.3]$$

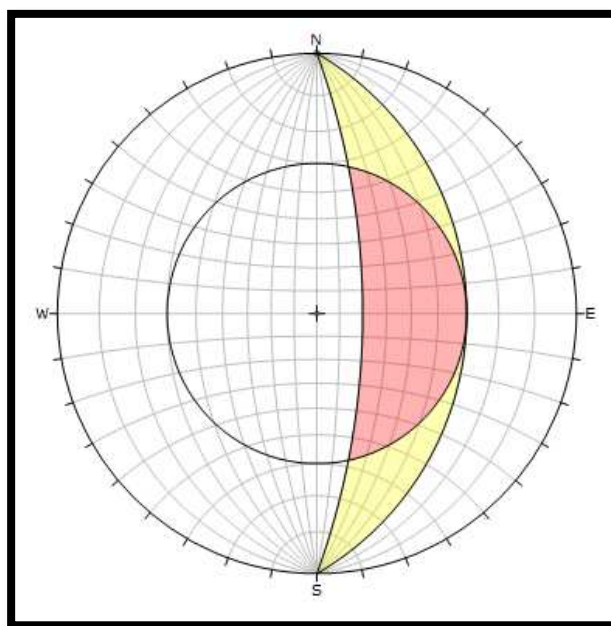
3.2. Клизање клина

За разлику од планарног клизања, клизање клина се може десити у много разноврснијим геолошким и геометријским условима (Hoek & Bray, 1981), стога анализа клинова представља веома важан аспект анализе стабилности косина. Да би се формирао клин, морају се испунити следећи услови:

- морају постојати два дисконтинуитета, који ће имати линију пресецања тј. пресечницу дефинисану азимутом α_i и падним углом ψ_i , а која је на стереомрежи представљена тачком где се пресецају равни дисконтинуитета.
- падни угао пресечнице мора бити мањи од привидног падног угла косине ψ_{fi} , а већи од просечне вредности угла унутрашњег трења φ двеју пукотина које образују клин. Привидни падни угао косине постаје прави кад је азимут пресечнице исти као и азимут косине.

- пресечница треба да „пада“ низ косину, да би клизање било могуће, што се на стереомрежи види као падање од лица косине ка периферији

Из првог и трећег услова се види разлог знатно чешћег појављивања клизања клина у природи од планарног клизања. Како је дисконтинуалност основно физичко-структурно својство стенске масе (Кујунџић, 1979), генерално се у стенској маси јављају три фамилије пукотина (Goodman, 1989), а и више. Пошто било које две планаре образују своју пресечницу, довољно је да она пада низ косину, што је представљено на стереомрежи на слици 3.4, за репрезентативну косину азимута од 90° , падног угла од 70° и угла унутрашњег трења од 30° . Ако се пресечница налази било где у широј, жутој зони, кинематски је могуће да долази до клизања клина, но то не узима у



Слика 1.4. Приказ зона на стереомрежи где је клизање могуће (софтвер Dips 6.0, Rocscience)

обзир угао унутрашњег трења. Ако се пак, налази у црвеној зони, тада су сва три услова за формирање клина испуњена, и може се рећи да постоје нестабилни клинови у косини. Битно је рећи да је то прелиминарна анализа, јер права стабилност клина зависи од геометријских детаља самог клина, смичуће чврстоће сваке равни и притиска воде (Hoek & Bray, 1981). Анализа

стабилности клина кога образују само две планаре, где се сматра да су услови суви и да нема кохезије, је проста и захтева познавање само два додатна угла.

$$FS_W = \frac{(R_A + R_B)\tan\varphi}{W\sin\psi_i} \quad [3.4]$$

Претпоставка је да је угао унутрашњег трења исти за обе пукотине, или да је пак осредњен. Силе R_A и R_B су силе које нормално делују на дисконтинуитет А и В респективно, које кад се разложе, дају следеће релације:

$$R_A \sin\left(\beta - \frac{1}{2}\xi\right) = R_B \sin\left(\beta + \frac{1}{2}\xi\right) \quad [3.5]$$

$$R_A \cos\left(\beta - \frac{1}{2}\xi\right) + R_B \cos\left(\beta + \frac{1}{2}\xi\right) = W \cos\psi_i \quad [3.6]$$

где је ξ угао између дисконтинуитета, мерен у хоризонталној равни, а β хоризонтални угао између пружања косине и симетрале угла ξ . Ова два угла се на стереомрежи мере на планари која спаја пол пресечнице и половине пукотина које образују клин. Када се реши систем једначина [5] и [6] за $(R_A + R_B)$, и потом решење убаци у формулу [4], добија се:

$$FS_W = \frac{\sin\beta}{\sin\left(\frac{\xi}{2}\right)} \frac{\tan\varphi}{\tan\psi_i} = K \cdot FS_P \quad [3.7]$$

где је FS_P фактор сигурности на планарно клизање блока који има еквивалентни падни угао пресечници. Ноек и Брау су дали графички поступак ради одређивања вредности коефицијента K у зависности од β и ξ , где су показали да се његова вредност креће од 1 до 3, што значи да је фактор сигурности клина увек већи (или исти) за еквивалентни блок који планарно клиза. Наравно, ово је веома упрошћен и конзервативни прорачун. Комплекснији случајеви укључују разлику у вредности φ за обе планаре, кохезију, присуство подземне воде и постојање додатне, треће пукотине која додатно мења геометрију блока. Може бити вертикална пукотина затезања,

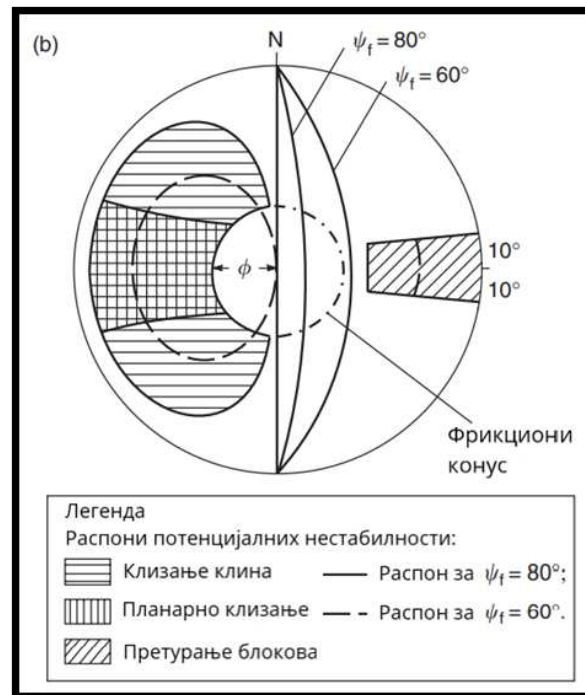
али и разне друге, па тако нпр. може бити и хоризонтална, представљајући „плафон“ клина. У случају да се не узима у обзир постојање треће пукотине, постоји директна једначина и поступак за прорачун фактора сигурности (Hoek et al, 1973), који се може брзо добити уз познавање пресечних линија, како оне између два дисконтинуитета, тако и оне између оба дисконтинуита и саме косине, и одговарајућих углова. Hoek и Bray предлажу да се овај поступак уради само уз евалуацију ϕ (дакле, без кохезије и подземне воде), за које постоје графички поступци за брзо и лако израчунавање. Формула за тзв. friction-only analysis садржи у себи константе А и В, које се одређују на основу разлике у азимуту и падним угловима, а гласи:

$$FS = A \tan \phi_A + B \tan \phi_B \quad [3.8]$$

где је ϕ_A угао унутрашњег трења планаре А, а ϕ_B угао унутрашњег трења планаре В. У случају да је $FS < 2$, тада треба приступити комплетној анализи, која у себе укључује све параметре.

За потребе регионалне анализе, где треба на већем простору брзо и једноставно идентификовати кинематски нестабилне/потенцијално нестабилне блокове у стенским косинама, довољна је и анализа преко фрикционог конуса, чији су поступак описали Hoek и Bray (Hoek&Bray, 1981). Главна претпоставка је да само угао унутрашњег трења пружа отпор кретању блокова. Ако се замисли блок у стању мировања, који лежи на некој равни под нагибом који је еквивалентан углу унутрашњег трења, онда се вектор силе нормале на блок налази унутар конуса, чија је ширина базе такође једнака углу унутрашњег трења, а конус „пробада“ површину блока својим врхом и вертикалан је. Када само гравитација утиче на стабилност блока, тада је пол клизне равни управан на површину блока тј. има исти правац као нормална сила на блок. Ако се пак пол налази ван замишљеног конуса, тада стабилност није задовољена. На слици 3.5 је приказан изглед комплетне кинематске анализе преко фрикционог конуса, на стереомрежи, где нестабилне зоне важе за половине планара. Јасно се види знатно већи распон

код клизања клина у поређењу са планарним клизањем, као и утицај падног угла саме косине.



Слика 3.5. Приказ кинематске анализе на стереомрежи методом фрикционог конуса (Wyllie & Mah, 2004)

3.3. Узроци одроњавања

Постоје разни природни и антропогени узроци одроњавања (Guzzetti & Reichenbach, 2010), од којих се у групу природних издвајају земљотреси, одмрзавање-замрзавање воде, топљење снега или пермафроста, интензивне падавине, деглацијација, вулканска активност и раст корења биљака. Антропогени узроци јесу подсецање косина, минирање, цурење водовода, неефикасно дренарање, као и вибрације које могу бити последице ископа, минирања или саобраћаја (Palma et al, 2011).

Већина природних узрока спада у узроке метеоролошког-температурног типа, па тако на примеру 308 косина дуж аутопутева у Калифорнији, у 68% процената је узрок везан за дејство воде, што укључује падавине, стварање леда, топљење снега и разне ерозије водом (Wyllie & Mah, 2004). Постоје разни примери у пракси где су интензивне падавине, мржњење

воде у пукотинама и топљење леда довели до одроњавања (Sandersen et al, 1997; Pinca, 2008; Krautblatter & Moser, 2009; Ansari et al, 2014). На истражном подручју овог рада су поменути узроци веома релевантни. Историјски тренд показује за целу Србију, а поготово за централне и западне делове, раст укупних годишњих падавина у периоду од 1996. до 2015. године (Вуковић et al, 2018). Прогнозе за будућност указују да на годишњем нивоу порасте укупне количине падавина, али да ће летњи месеци бити сушнији него сада, што значи да ће се повећати концентрација изразито кишовитих дана (>20 mm/дан). Према RCP4.5 моделу до краја овог века ће број тих дана порасте за 10 до 20% на датом подручју, а према RCP8.5 моделу ће бити 20% до 30% више екстремно кишовитих дана, а локално и преко 30% (Вуковић et al, 2018). Инфилтрација у перидотитима, филитима и гранитима се врши искључиво пукотински, што додатно повећава могућност одроњавања, због испирања зидова пукотина.

Поред ових узрока, Wyllie дефинише и тзв. геолошке услове, који у себе укључују неповољне оријентације пукотина, саму испуцалост стенске масе и распадање стенске масе, који су на претходном примеру чинили 17% процената узрока. Перидотити и филити који су заступљени у терену су изразито тектонизирани и испуцале стенске масе, јер као што је већ поменуто у поглављу 2.2, затварање Вардарског океана је резултовало у обдукцији перидотита и регионалном метаморфизму који је формирао филите. Тектонизираност терена умногоме доприноси подложности стенских маса одроњавању, а у случају филита је подложност још израженија, због инхерентне изразите анизотропности и високог садржаја глиновитих минерала, који су подложни бубрењу при провлажавању.

Последњи природни узрок одроњавања од значаја за дати простор јесу земљотреси. Одрони изазвани земљотресом су веома добро документовани (Keefer et al, 1984; Aydan, 2016) и они знатно доприносе одроњавању јер енергија коју они ослободе се на косини јавља као додатна гурајућа сила, што повећава нестабилност косине (Hoek&Bray, 1981). Keefer је у својој студији

изучавао све главне падинске-гравитационе процесе коју си били изазвани земљотресима, и дефинисао је емпиријске границе према којој доња граница магнитуде земљотреса, потребног за активирање одрона, износи $M_w=4.0$. Касније је Aydan (Aydan et al, 2012) емпиријски дефинисао функцију максималне хипоцентралне удаљености одрона у зависности од магнитуде земљотреса и оријентације раседа где се земљотрес десио. Недостатак оваквих емпиријских модела је што не могу предвидети мале одроне који се могу десити при мањим магнитудама, као ни одроне где је могуће садејство више узрока одроњавања. Еврокод 8 (EC-8) дефинише пратеће појаве земљотреса у зависности од интензитета земљотреса према модификованој Меркалијевој скали од 12 степени. Мањи одрони и кретања сипара су могућа већ од шестог степена интензитета, док за веће одроне су потребни интензитети већи од седмог степена. Републички сеизмолошки завод је 2018. године урадио карте сеизмичког хазарда Србије по параметру убрзања и по параметру макросеизмичког интензитета. За повратни период од 95 година, на овом простору се очекује земљотрес интензитета од 6 до 7 степени, и максималног убрзања од 0,09g. Треба поменути земљотрес који се десио код Краљева 3.11.2010, магнитуде 5,4 по Рихтеровој скали, који је довео до два одрона у близини места Маглич, а који су забележени у Извештају о резултатима и активностима Републичког сеизмичког завода после земљотреса код Краљева. Оба одрона су се десила у серпентинитско-перидотитској стенској маси. Први од одрона се десио сат времена пре главног удара, док се други десио пет дана касније, са напоменом да је након главне фазе земљотреса забележено укупно 44 земљотреса магнитуде веће од 2,4 у периоду од 14 дана након главног удара.

Од техногених узрока су за дати простор најважнији подсецање косина. Наиме, велики број косина на путу Краљево-Ушће није у свом природном стању, него су у њима вршени засеци и усеци, који су некадашње благе до средње стрме нагибе претворили у нагибе $>60^\circ$, и притом открили стенску масу. Откривање стенске масе и уклањање ножичног дела знатно повећава шансе да дође до одроњавања, јер омогућавају директну инфилтрацију воде и

распадање стенске масе, и умањују ефекат отпорних сила, што може довести до великих и комплексних одроњавања, или кретања уопште. Такође, као што је запажено у претходном поглављу, што су косине стрмије, повећава се површина кинематски нестабилних зона на стереомрежи. Због ових разлога се може рећи да је људска активност на овом простору, ради формирања пута, омогућила да дође до одроњавања на локацијама где то раније није било могуће, или пак учинила постојеће косине још подложнијим на одроњавање. Једина заштита пута од одрона јесу челичне мреже, међутим су оне ефективне само за блокове димензија до максимум 1 метар (Wyllie & Mah, 2004). Такође, оне нису ојачане анкерима на самој косини, што омогућава деформације, а на крају и кидање мреже услед тежине акумулираних блокова.

4. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

Поступак одређивања хазарда од одроњавања се у овом раду састоји из три главна корака. Први корак јесте вршење кинематске анализе за цео истражни простор у GIS окружењу, тиме издвајајући места код којих су кинематски услови испуњени. Овај корак омогућава имплементацију добијених растера са тачкама одламања у програм Conefall, који симулира брзине и енергије одроњених блокова. Трећи и последњи корак је представљен издвајањем зона на путу које су изложене процесу одроњавања у зависности од енергије и брзине блокова. Да би вршење поменутих корака било могуће, потребни су следећи материјали за анализе:

- 1) локације откривених стенских косина дуж пута
- 2) подаци о дисконтинуитетима у терену (азимут и падни угао)
- 3) геолошка и инжењерскогеолошка карта терена
- 4) дигитални елевациони модел терена (DEM)
- 5) траса пута
- 6) угао унутрашњег трења инжењерско-геолошких јединица

Аквизиција и примена података 1) и 2) у општем случају ће бити приказана у поглављу 4.1., док ће подаци искоришћени за анализу датог подручја бити приказани у поглављу 5. Резолуција DEM-а износи 12.5×12.5 метара, док је сам DEM изведен из архиве PALSAR снимака мисије ALOS, коју је званично вршила Јапанска агенција за аерокосмичко истраживање (JAXA). NASA је омогућила приступ овој архиви, из које се могу преузети потребни снимци. Ова резолуција је знатно боља од стандардних снимака 30×30 m који се генерално користе при регионалним анализама.

Траса пута је директно исцртана у GIS-у, уз помоћ OpenStreetMap основне карте, што је веома задовољавајуће прецизности за размеру од 1:50 000. **Укупна дужина пута износи 23 km, од Маглича до самог улаза у Ушће.** Геолошка и инжењерскогеолошка карта се доступне на сајту Геолошког Информационог Система Србије. Геолошка карта, која је изведена

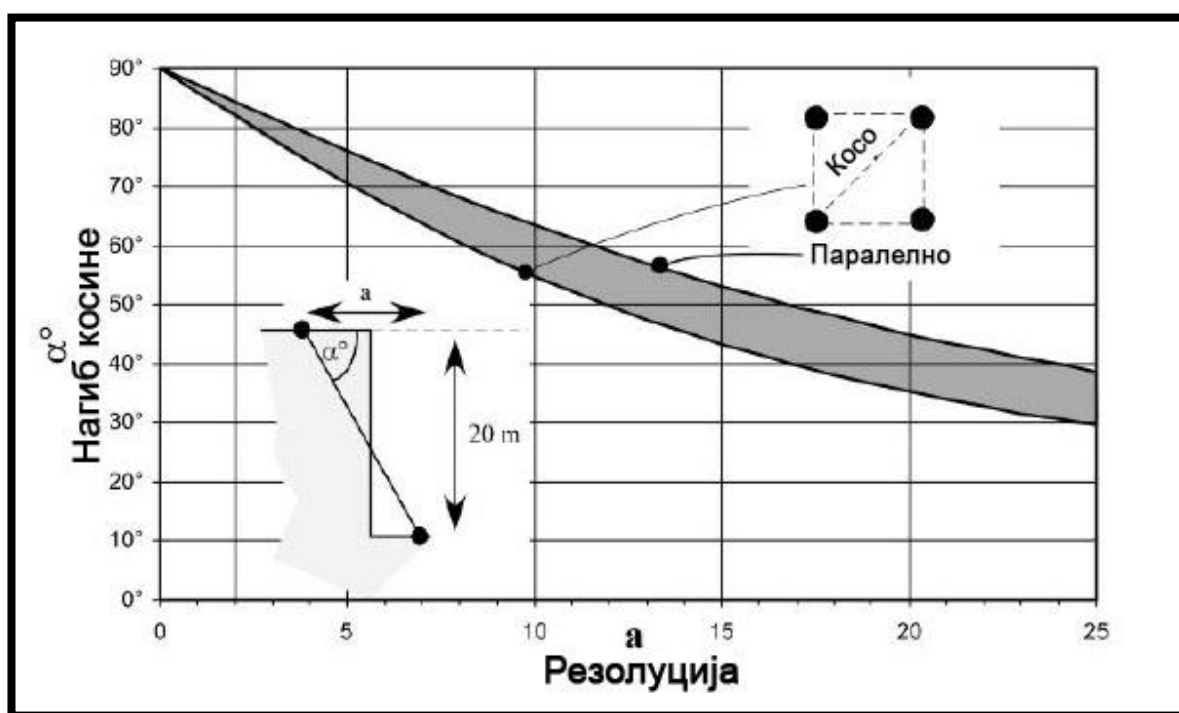
из Основне Геолошке Карте Југославије, је дата у размери од 1:100 000, док се путем WebGIS апликације може приказати инжењерскогеолошка карта. Она је у размери од 1:300 000, и садржи податке о јединицама, тектоници, као и појавама нестабилности, од којих су од интереса одрони.

4.1. Методика регионалне кинематске анализе

Традиционалан приступ вршења кинематске анализе је подразумевао да се теренским радом утврде подаци о геометрији косине, падним елементима фамилија пукотина, као и угао унутрашњег трења, чија вредност може бити и номинално усвојена. Потом би се или ручно на стереомрежи, или у оквиру програма као што су Dips, DipAnalyst и Stereonet, вршила кинематска анализа за сваку појединачну косину, која је имала свој сет параметара. Међутим, за истражна подручја која захватају веће површине, и у оквиру којих се налази знатан број косина, рад у GIS окружењу се показао као изузетно користан, како за кинематску анализу, тако и за анализу хазарда и ризика, до те мере да се овакав приступ строго препоручује за наведене анализе (Fell et al, 2008). Једна од основних предности рада у GIS софтверу који је неопходан за регионалну анализу јесте чињеница да GIS омогућава сакупљање и ефективну анализу великог броја података који су распоређени у терену на регионалном нивоу, чак и када су време и финансијска средства ограничена (Kim et al, 2004). Уз то, најчешће коришћени GIS софтвери као што су ArcGIS и QGIS, самостално или уз екстензије, омогућавају вршење великог низа операција, што аутоматизује неке процесе, као што су нпр. одређивање нагиба и експозиције у терену, које су неизоставни део регионалне кинематске анализе.

Независно од врсте анализа и приступа, постоји неколико универзалних фактора који имају директан утицај на квалитет и прецизност резултата. Наиме, морфологија косине и директно окружење потенцијално одроњених блокова су најбитнији фактори који одређују могућност одроњавања стене (Dorren et al, 2003). Подаци неопходни за дефиницију морфологије терена се одређују у GIS-у, на основу DEM терена. Из овог

разлога је размера посматрања и резолуција самог DEM-а од изузетног значаја, због начина на који се рачуна азимут, али и још битније, нагиб косина. У случају да се у терену налази потпуно вертикална косина, са хоризонталним горњим делом и подножјем, прерачунати нагиб за DEM резолуције од 25×25m ће износити 30 до 40°, док за DEM резолуције од 2×2m ће износити преко 80° (Jaboyedoff et al, 2006), што се може видети на слици 4.1. Ово је веома критична разлика, јер се углови унутрашњег трења суве, свеже стенске масе генерално крећу у распону од 25° до 35° (Barton&Choubey, 1977). Што су косине стрмије, то се зона нестабилности на стереомрежи повећава, стога велики број регионалних анализа користи DEM резолуције 1×1m, 2×2m или 5×5m, који су добијени прерадом података LiDAR снимака, или пак интерполацијом постојећих детаљних топографских карата.



Слика 4.1. Утицај резолуције на детектован нагиб косине, у поређењу са реалном морфологијом у терену (Jaboyedoff et al, 2006)

Нажалост, у Србији се слабо користи LiDAR технологија за моделовање топографије терена, и није уопштено веома приступачна. Као алтернатива LiDAR технологији се могу примењивати фотограметријске методе, које су веома погодне за откривене стенске косине и могу дати

изузетно прецизне моделе нпр. 45×45 cm (Keskin& Polat, 2022). Још једна предност LiDAR и фотограметријских метода се огледа у чињеници да оне могу бити искоришћене за аутоматско или полу-аутоматско извлачење података о броју, елементима пада и густини пукотина у самој косини. Помоћу софтвера као што су COLTOP 3D и DSE је омогућено из облака тачака издвојити пукотине и класификовати их у фамилије. У скорије време је LiDAR технологија доступна на одређеним мобилним телефонима, попут iPhone 12 pro, који се такође може искористити за добијање података о пукотинама (Riquelme et al, 2021). Генерално, структурно-тектонски подаци се прикупљају теренским обиласком и/или коришћењем постојеће литературе и геолошких, тектонских и инжењерскогеолошких карата, и потом се у зависности од приступа рада, уносе у GIS окружење.

Поред квалитета самог дигиталног модела терена, други битни универзални фактор у регионалној кинематској анализи је тај што кинематска анализа фриксионим конусом подразумева да се само угао унутрашњег трења опире одламању и кретању блокова. Као што је већ поменуто, ово је доста конзервативно, али прецизније одређивање стабилности стенских косина (укључујући кохезију, подземне воде, пукотине затезања и др.) захтева знатно већи број података који би морали да се измере на терену и у лабораторији, јер је могуће да и мале промене улазних параметара могу довести до знатне промене фактора сигурности.

Два главна приступа регионалној кинематској анализи, који су базирани на GIS-у, јесу детерминистички и пробабилистички приступ. Детерминистички приступ се заснива на вршењу кинематске анализе са репрезентативним вредностима елемената пада дисконтинуитета из сета података, репрезентативном или номиналном вредности угла унутрашњег трења дате стенске масе. Другим речима, инжењер сам бира вредности потребних параметара, што може урадити искуствено, или усвајањем средњих вредности. Овај процес одабира/усвајања вредности је истоветан као и код класичне анализе стабилности косина, где се она изражава преко

фактора сигурности, који је инжењерима у пракси лакши за баратање него вероватноћа лома, која се добија пробабилистичком анализом (El-Ramly, 2002). Да би се са добром сигурношћу одабрали прорачунски параметри, потребан је велики број података, што је у пракси редак случај. Постоје разне методе за усвајање репрезентативне вредности, неке које су и описане у Еврокоду 7. Лоше одабране вредности могу дати превише конзервативне резултате, или пак резултате који су недовољно на страни сигурности и не детектују неке нестабилне косине (Tabba, 1984).

У оквиру детерминистичког приступа се издвајају два типа поступка, који су по својим принципима исти, а главна им је разлика у начин третирања косина. Код оба поступка се дефинишу локације и геометрије косина, дефинишу структурни параметри и угао унутрашњег трења. Пример првог поступка је дао Kim (Kim et al, 2004), који је са сарадницима урадио и читаву анализу стабилности за простор око језере Џунгђу у Јужној Кореји. Након дефинисања растера топографије (нагиба и експозиције), терен је издељен на тзв. структурне домене у облику полигона, који унутар себе имају униформно дефинисан и јединствен структурни склоп. Сам терен је издељен на полигоне (у овом случају 3033). Тада се задају упити који проверавају кинематске услове, тако што се задају следеће команде, за проверу планарног клизања:

$$\psi_f > \psi_p > \varphi ; |\alpha_f - \alpha_p| \leq 20^\circ \quad [4.1]$$

, и за проверу стабилности клина:

$$\psi_{fi} > \psi_f > \varphi ; |\alpha_f - \alpha_i| < 90^\circ \quad [4.2]$$

Пошто се код анализе клина користи привидни пад ψ_{fi} (препоручљиво и код анализе планарног клизања, али се у пракси не ради) он се може прерачунати следећом формулом:

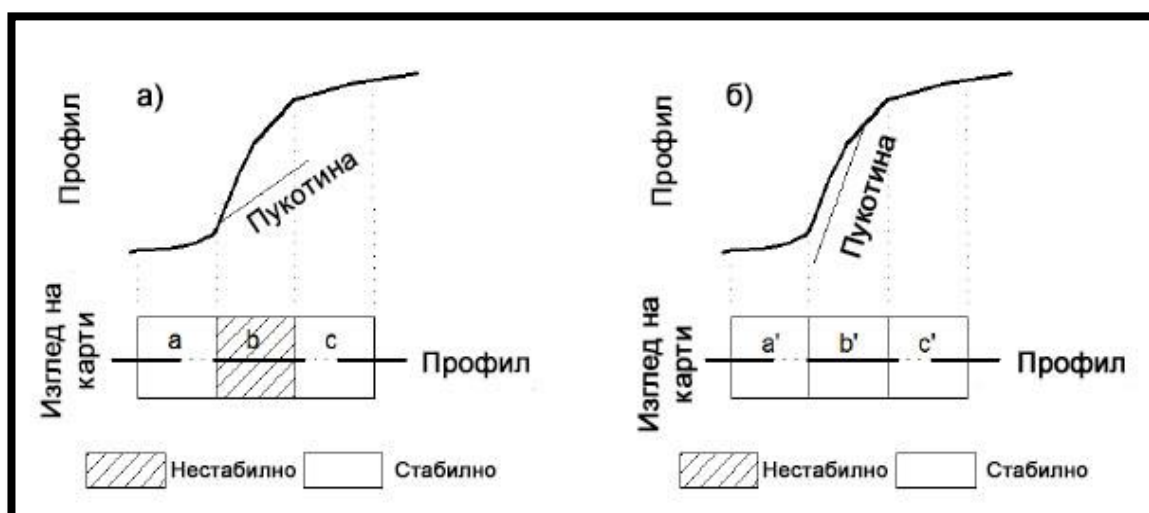
$$\psi_{fi} = \arctan[\tan\psi_f \times \cos(\alpha_f - \alpha_i)] \quad [4.3]$$

На овај начин се добијају два растера, један са полигонима који су испунили критеријум по азимуту, а други са полигонима који су испунили критеријум по падном углу. Преклапањем ова два растера се издвајају полигони у којима су кинематски услови задовољени. Овај поступак је такође могућ задавањем IF функција у Python-у или Matlab-у.

Други поступак, који ће се применити за анализу у овом раду, је тзв. grid-based анализа која проверава да ли су кинематски критеријуми испуњени у свакој тачци тј. пикселу на карти. Примери на којима се базира одабрана процедура су дали Mavrouli (Mavrouli, et al 2015) и Марјановић (Марјановић et al, 2022), заједно са уважавањем принципа из првог детерминистичког поступка. Поступак се врши по идентичној логици. Прво се аутоматским генерисањем добију растера нагиба и експозиције терена. Косине се могу уоквирити у полигоне, ради прегледа, али се анализирају као скуп тачака. Ова процедура омогућава више ствари: унос структурних података који су мерени на косинама, и њихова интерполација са тачкама у терену где су познати елементи пада одређених фамилија пукотина. Интерполација може бити између насумично оријентисаних пукотина, или као што је случај у овом раду, интерполација се примењује на тачкама које у себи садрже податке о пукотинама које припадају истој фамилији. Као резултат интерполације се добијају растери азимута и падног угла свих засебних фамилија пукотине која се примењује за анализу планарног клизања, као и њихових пресечница, потребних за анализу клина. Након што се зада команда за нпр. проверу кинематских критеријума за планарно клизање, добију се два растера са издвојеним пикселима где су задовољени услови или по азимуту или по падном углу. Преклопом растера се издвајају засебни пиксели на карти, који су означени као нестабилни на планарно клизање, што се може видети на слици 4.2.

Предност grid-based анализе се огледа у томе што може прецизно дефинисати нестабилне и стабилне делове унутар једне косине, за разлику од првог поступка где је цела косина или стабилна или нестабилна. Уколико се

grid-based анализа врши на DEM-у високих резолуција, она може узети у обзир мале промене у самој геометрији косине, што доводи до знатно прецизнијих резултата, јер онда се у косинама које су традиционалним поступком означене као стабилне могу издвојити засебни нестабилни делови (Park & Lee, 2014; Park et al, 2016). Један од примера у пракси јесте Park & Lee, 2014, на путу код места Баехурјеон у Јужној Кореји. Аутори су издвојили традиционалном кинематском анализом установили да је планарно клизање могуће само на 3 од 13 косина, за које се сматрало да имају униформно пружање и пад, док по grid-based систему (резолуција 5m x 5m) су се у сваком полигону косина јављале зоне које су кинематски нестабилне. Процентуално учешће нестабилних зона по косинама је варирано од 12,2% до 72,7%, а на карти се аутоматски издвајају тачно ти пиксели који испуњавају дате услове, што може одлично послужити за даље анализе.

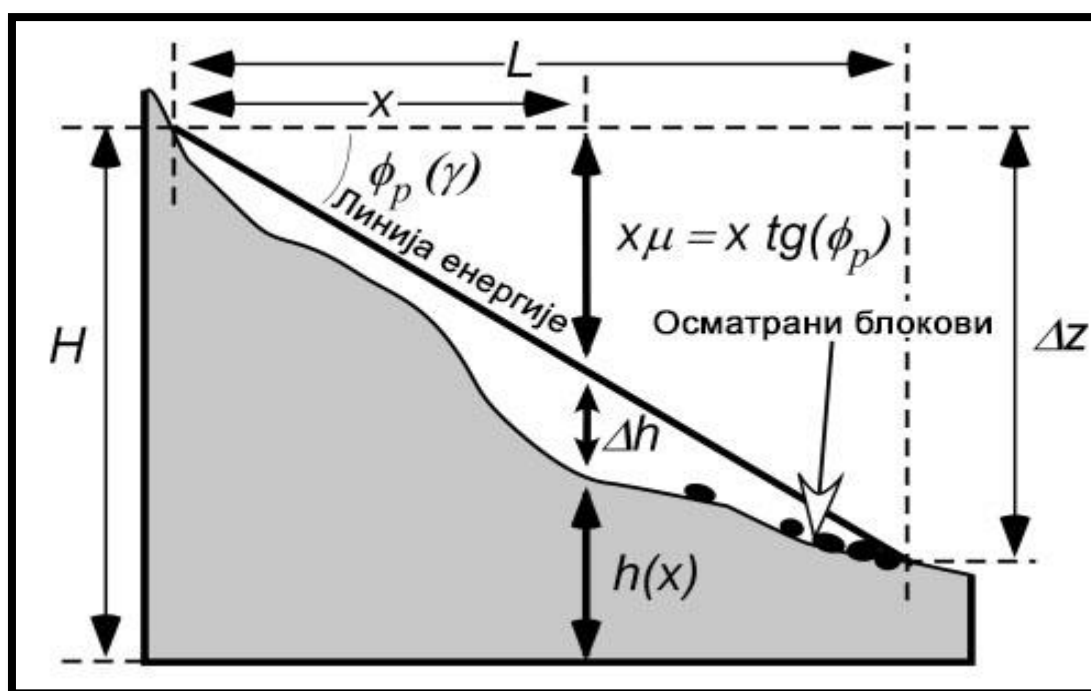


Слика 4.2. Приказ пиксела у случају да задовољава услов планарног клизања под а) и у случају када услов није испуњен под б) (Mavrouli et al, 2015)

Финалне карте које се добију grid-based анализом у себи имају издвојене пикселе са униформном вредношћу (1), који испуњавају кинематске услова планарног клизања или клизања клина, док остали пиксели имају вредност 0. Тиме је омогућено коришћење ових резултата у софтверу Conefall.

4.2. Софтвер CONEFALL

Картирање хазарда од одроњавања захтева дефинисање дистанце од косине до које могу стићи одрони (Jaboyedoff & Labiouse, 2011). Један од првих и једноставнијих модела који су развијани за детерминисање транспорта и места акумулације одроњеног блока је аналоган блоку који клиза низ замишљену косину одређеног градијента односно угла отвора ϕ_p (Heim, 1932). У литератури се та косина тј. линија у 2D приказу по којој блок клизи (или котрља) зове линија енергије или угао сенке и она спаја сам врх косине са максималним дометом одроњеног блока (L), као што је приказано на слици 4.3.



Слика 4.3. Линија енергије и пратећа геометрија (Jaboyedoff&Labiouse, 2011)

Линија енергије се добија уважавањем закона о одржању енергије, који за блок масе m који се откида од косине на висини H гласи (Evans & Hungr, 1993):

$$mgH - mgh(x) = \frac{1}{2}mv^2(x) + mgx\mu \quad [4.4]$$

где је g убрзање Земљине теже, x хоризонтална координата, $h(x)$ висина у тачки x , $v(x)$ брзина у тачки x и μ средњи кинетички коефицијент трења. Да би се одредила дистанца где ће блок стати након одламања, у формули [4.4] треба да се постави услов $v(x)=0$. Тада се преуређењем једначине долази до следећег израза, уз претпоставку да је коефицијент трења једнак тангенсу φ_p , који одређује нагиб линије енергије:

$$\mu = tg\varphi_p = \frac{H - h(x_{stop})}{x_{stop}} \quad [4.5]$$

где x_{stop} означава тачку максималног домета одроњеног блока. Блок ће се зауставити оног момента када линија енергије под углом φ_p пресече топографију терена. У реалности блок може наставити са кретањем које се смањује, али за потребе овог рада је ова дефиниција довољно прецизна. Овај модел се може представити замишљеним вертикалним конусом, чији се врх налази у тачки одламања, а угао између вертикале и омотача конуса износи $90^\circ - \varphi_p$ тј. падни угао странице конуса гледано у 2D приказу је једнак φ_p . Према моделу, одроњени блок може доспети до било које тачке која се налази унутар самог конуса (Торре, 1987).

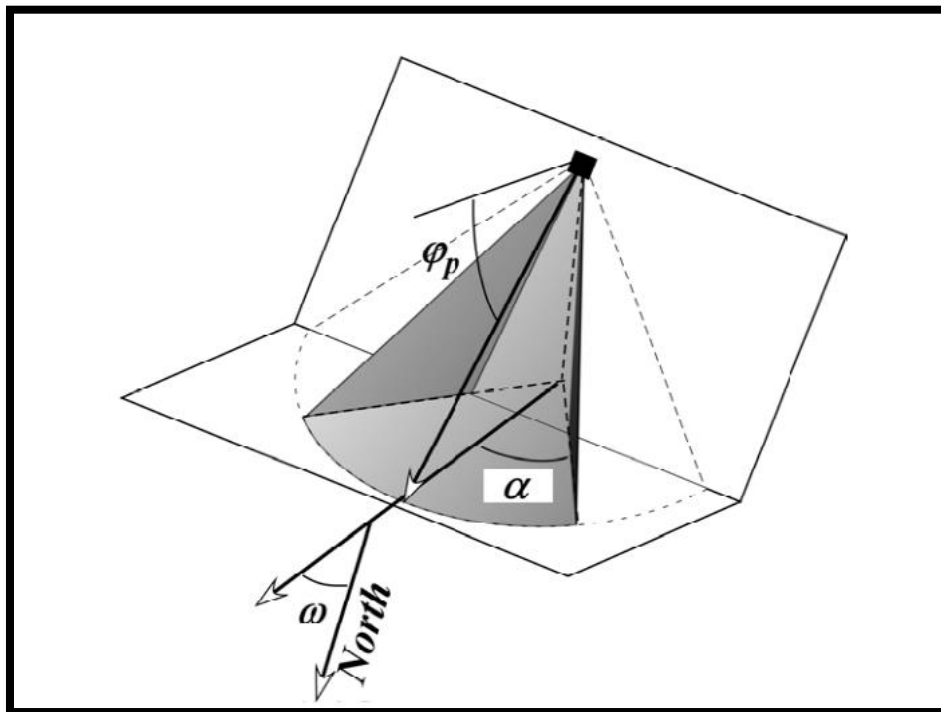
Софтвер CONEFALL је управо моделиран на основу модела конуса који је поменут, а које је развио М. Jaboyedoff, 2003. године. Пропагација одроњеног блока и његов максимални дOMET се проверава простим идентитетом:

$$0 < \Delta x^2 + \Delta y^2 - \tan(\pi/2 - \varphi_p) \times (z - z_0)^2 \quad [4.6]$$

где су Δx и Δy хоризонталне дистанце између тачке откидања (source point) и било које топографске тачке, z је висина тачке откидања, z_0 висина топографске тачке. Да би коришћење софтвера било могуће, потребно је унети два растера. Први растер је DEM терена, док други растер у ствари представља финални растер описан у претходном поглављу, који садржи тачке откидања у терену, чија вредности треба да износи 1, док остале тачке имају вредности -1. Оба растера морају бити или у GRD формату, или у

ASCII формату. Затим, корисник дефинише угао отвора, као и латералне границе пропагације блока α , или сам дефинише те границе у односу на угао азимута тачака ω . Ова три параметра су геометријски приказана на слици 4.4.

Вредности угла отвора су одређивали разни аутори, па тако се вредности могу кретати од 22° (Wieczorek et al, 1999) до 37° (Gerber, 1994). У самом корисничком упутству се предлаже да угао отвора износи $27\text{-}37^\circ$, док су Jaboyedoff & Labiouse 2011 показали да на основу резултата више аутора, средња вредност угла отвора износи 34° . Угао отвора се може интерпретирати као угао унутрашњег трења, тиме фактички постављајући услове сувог фрикционог конуса којим је вршена кинематска анализа. Како клизна раван код планарног клизања и пресечница код клизања клина морају бити већег нагиба од ϕ , и падати од стенске масе, ова претпоставка се веома фино уклапа у целу анализу. С обзиром да су услови по азимуту већ испуњени кинематском анализом, може се задати софтверу да не узима бочне границе у обзир.



Слика 4.4. Приказ геометрије косине и потребних параметара (User's Guide to Conefall 1.0, Jaboyedoff, 2003)

Софтвер може у зависности од жеље корисника, дати:

- укупан број нестабилних тачака у терену
- средњу и максималну вредност брзине блока
- средњу и максималну вредности кинетичке енергије блока

Последње две ставке су изузетно битне, јер ће се на основу њих моделирати хазард од одроњавања, као што је представљено у разним радовима (Jaboyedoff & Labiouse, 2003; Loye et al, 2008; Jaboyedoff & Labiouse, 2011, Марјановић et al, 2022). Брзина се сматра да је чистог транслационог карактера тј. нема ротационе брзине, али се зато у прорачун брзина уводи коефицијент f_v за кога аутор предлаже да износи 0,9, тако да формула за брзину одроњеног блока гласи (Jaboyedoff & Labiouse, 2003):

$$v = f_v \sqrt{2g\Delta h} \quad [4.7]$$

где је Δh висинска разлика између линије енергије и топографије терена, као што је дато на слици 10. Кинетичка енергија се одређује преко стандардне формуле $E=mv^2/2$, што захтева да се дефинише и тежина блока, која уколико су познате густине фамилија пукотина и њихови међусобни углови може бити веома прецизно дефинисана, или пак, као што је случај у овом раду, тежина блока ће се усвојити на основу дефинисаних величина за различит ниво хазарда који су дати у Budetta, 2004. На овај начин ће се добити хазард од одроњавања за више реалних сценарија.

5. РЕГИОНАЛНА КИНЕМАТСКА АНАЛИЗА

5.1. Подаци о дисконтинуитетима

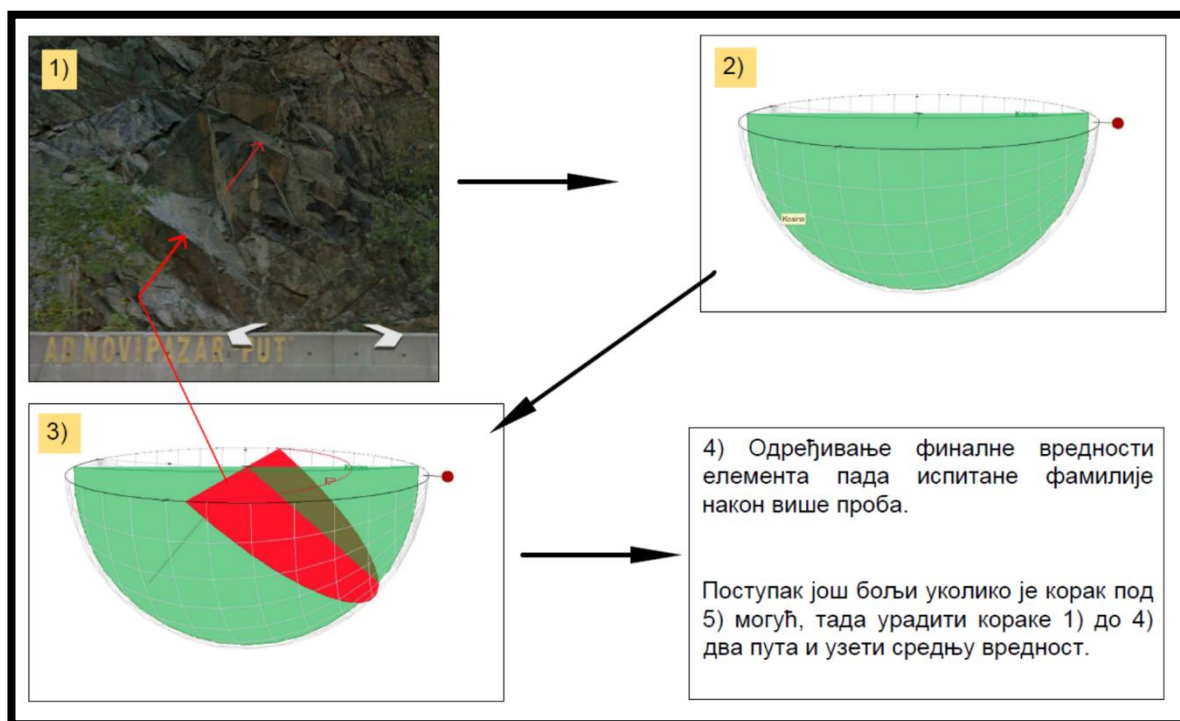
Аквизиција података о дисконтинуитетима је извршена помоћу комбинације софтвера Google Earth и Stereonet. У оквиру Google Earth-а постоји потпрограм под називом Google Street View, који уколико је могуће, транспортује поглед из птичје перспективе на тзв. „приземни поглед“, који је снимљен помоћу камере у покрету. Цео пут од Маглича до Ушћа има опцију да се посматра из перспективе особе која се налази у регуларним размацама на путу. Овим путем је омогућено запажање свих откривених стенских косина на терену, као и њихово прецизно лоцирање у географским координатама.

Забележено је укупно 34 откривених стенских косина на предметној деоници, које су на нивоу карте сведене на 27 косина. Висока резолуција снимака омогућава детекцију пукотина, чији се подаци могу са задовољавајућом прецизношћу одредити уз помоћ Stereonet. Stereonet служи за унос елемената пада дисконтинуитета и њихов приказ на стандардној стереографској мрежи, али још битније и у 3D, другим речима могуће је видети пресек између планаре косине и планаре пукотине. Азимут и падни угао косине се могу проценити директно из Google Earth-а, а подаци о пукотинама следећим поступком, који је дат и текстуално, а и шематски на слици 5.1:

- 1) Бирају се само косине или делови косина у којима постоје блокови издвојени пукотинама који „штрче“ од косине, или пак места где је већ дошло до одроњавања јер су ту видљиве пукотине које су створиле те нестабилне блокове. Другим речима, мора да се види пружање пукотине.
- 2) У Stereonet-у или у онлајн програму од Visible Geology се унесу подаци о косини и укључи 3D преглед, тако да се косина посматра под правим углом.

- 3) Уносе се пробни подаци елемената пада пукотине.
- 4) Варирањем азимута и падног угла пукотине треба наћи пресек пукотине и косине, који је веродостојан изгледу реалног пресека на слици.
- 5) Уколико је могуће, пукотину тј. фамилију пукотина треба осматрати из два или више угла. Овим последњим кораком је могуће повећати сигурност добијених података, али је знатно захтевно и ограничено је закривљењем објектива. Виши делови косине су највише погођени овим ограничењем.

Овим поступком је утврђено да у терену постоје **5 фамилија пукотина** које укупно граде **10 међусобних фамилија пресечница**. У табели 5.1 су дати подаци о фамилијама дисконтинуитета по редном броју косине, а у табели 5.2 подаци о фамилијама пресечница по редном броју косине. Локације косина су приказане у Прилогу 2, заједно са издвојеним ИГ јединицама и картом нагиба терена.



Слика 5.1. Шематизован приказ за одређивање елемената пада пукотина на стенским косинама, описаном у тексту.

Табела 5.1. Елементи пада пукотина, распоређени по косинама и по фамилијима

| фамил. косина | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | 170/45 | 340/50 | 90/80 | 240/40 | |
| 2 | 160/60 | 330/40 | | 250/80 | |
| 3 | 200/20 | 355/85 | 80/75 | 270/40 | |
| 4 | 160/60 | 310/50 | | | 30/70 |
| 5 | 140/80 | | 100/70 | 240/40 | 30/40 |
| 6 | | 330/50 | 120/55 | 220/50 | 30/70 |
| 7 | 180/40 | 325/60 | | 245/65 | 65/55 |
| 8 | | 345/77 | 100/70 | 230/50 | 55/65 |
| 9 | | 350/60 | 110/65 | | 45/75 |
| 10 | 190/50 | 340/40 | 110/70 | 270/40 | 50/40 |
| 11 | 200/60 | 350/75 | 100/70 | | |
| 12 | 200/40 | 345/55 | 115/55 | 240/40 | |
| 13 | | 350/60 | 130/50 | 230/60 | 30/70 |
| 14 | | 340/60 | 130/40 | 260/70 | 40/70 |
| 15 | | 350/70 | 130/40 | 270/50 | 30/70 |
| 16 | 180/45 | 350/70 | 100/40 | 250/50 | |
| 17 | 170/60 | 340/60 | 90/40 | 260/50 | |
| 18 | | | 140/30 | | |
| 19 | 160/25 | | | 290/15 | 50/60 |
| 20 | | | 130/60 | 220/65 | 20/50 |
| 21 | | | 90/60 | 220/80 | 30/15 |
| 22 | 160/40 | 310/80 | 80/85 | | 20/30 |
| 23 | 190/40 | 330/60 | 90/60 | 270/40 | |
| 24 | 170/50 | 330/60 | 70/50 | 240/50 | |
| 25 | 180/45 | 340/35 | 80/60 | 240/50 | 30/45 |
| 26 | 190/45 | 350/60 | 80/60 | 230/40 | |
| 27 | | 340/60 | 90/70 | 275/30 | |

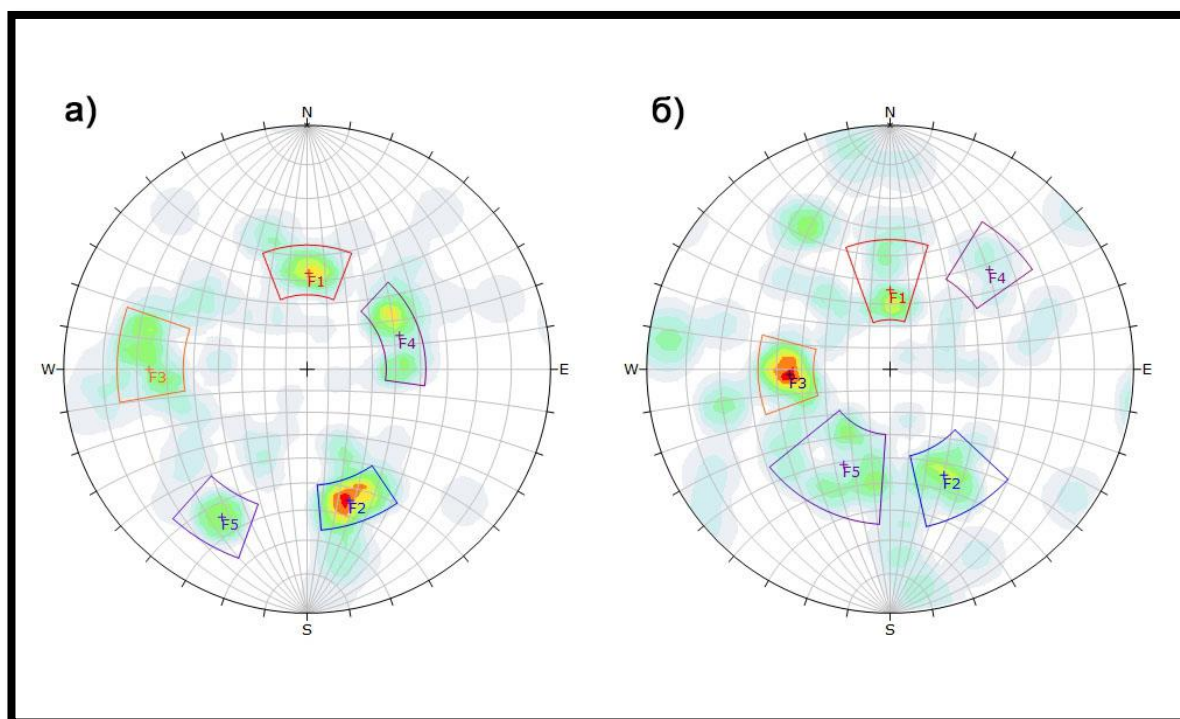
Табела 5.2. Елементи пада пресечница пукотина, распоређени по косинама (симбол *P* означава пресечницу, а бројеви иза ознаке респективне фамилије пукотина)

| косин. пресеч. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------|-------|-------|-------|--------|---|---|--------|---|---|
| P12 | 255/5 | 247/6 | 275/7 | 240/20 | | | 246/18 | | |

| | | | | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P13 | 169/45 | | 165/16 | | 88/70 | | | | |
| P14 | 205/38 | 177/59 | 206/20 | | 232/40 | | 178/40 | | |
| P15 | | | | 101/42 | 67/40 | | 132/30 | | |
| P23 | 10/46 | | 71/75 | | | 44/19 | | 51/60 | 46/44 |
| P24 | 278/29 | 332/40 | 274/40 | | | 275/34 | 293/55 | 268/43 | |
| P25 | | | | 325/50 | | 326/50 | 20/45 | 45/65 | 342/60 |
| P34 | 141/26 | | 171/7 | | 141/23 | 173/40 | | 173/35 | |
| P35 | | | | | 28/40 | 92/52 | | 61/65 | 100/65 |
| P45 | | | | | 315/12 | 303/8 | 155/0 | 143/4 | |
| косин. пресеч. | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| P12 | 268/14 | 270/31 | 268/18 | | | | 263/7 | 255/9 | |
| P13 | 175/49 | 161/53 | 173/37 | | | | 134/34 | 130/53 | |
| P14 | 242/36 | | 220/38 | | | | 208/42 | 226/44 | |
| P15 | 116/19 | | | | | | | | |
| P23 | 31/28 | 50/60 | 50/31 | 64/26 | 60/16 | 65/36 | 65/35 | 35/45 | |
| P24 | 305/34 | | 281/32 | 290/41 | 315/57 | 285/49 | 285/45 | 288/47 | |
| P25 | 15/34 | | | 338/60 | 349/60 | 10/69 | | | |
| P34 | 195/12 | | 185/26 | 171/42 | 181/28 | 197/19 | 172/15 | 174/7 | |
| P35 | 37/39 | | | 98/45 | 38/30 | 91/53 | | | |
| P45 | 340/16 | | | 308/20 | 43/70 | 317/39 | | | |
| косин. пресеч. | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| P12 | | | | 224/20 | 253/24 | 248/14 | 262/8 | 265/14 | |
| P13 | | | | 166/39 | 156/35 | 120/37 | 143/43 | 146/35 | |
| P14 | 232/8 | | | | 230/33 | 205/44 | 201/43 | 223/40 | |
| P15 | 127/21 | | | 86/13 | | | 105/14 | | |
| P23 | | | | 6/72 | 30/41 | 29/42 | 10/31 | 48/56 | 26/50 |
| P24 | | | | | 269/40 | 274/44 | 302/29 | 273/32 | 269/30 |
| P25 | | | | 34/29 | | | 344/35 | | |
| P34 | | 169/53 | 141/47 | | 178/3 | 155/6 | 162/14 | 160/16 | 1/2 |
| P35 | | 68/38 | 8/14 | 353/27 | | | 25/45 | | |
| P45 | 327/12 | 303/15 | 310/2 | | | | 316/16 | | |

Подаци мерени поменути поступком су употпуњени са структурним подацима учртаним на Основној Геолошкој Карти Југославије, лист Врњци,

који се налазе у оквиру предметног подручја, као и непосредно изван њега, како би интерполација била могућа. База постојећих структурних података на овом путу постоји и налази се у оквиру пројекта ClirTheRoads (<http://clirtheroads.rgf.rs/>). Пошто је ограничење резолуције коришћеног DEM-а такво, да највећи нагиб у терену не прелази 50° , за потребе рада су на косинама одабрани они елементи пада од скупа који имају потенцијал да и у регионалној анализи верификују процес одроњавања, пошто у реалности све означене косине имају предиспозиције за одроњавање. На слици 5.2 су приказане концентрације полова за 5 фамилија пукотина, добијене поступком описаним у раду и заједно са подацима из ОГК, као и из базе података ClirTheRoads. Види се да су највећа одступања између фамилија 4 и 5. Фамилија 4 на скоро читавој дужини деонице пада у масу и врло ју је тешко запазити и генерално јој је тешко прићи, док се фамилија 5 ретко појављује, а често се налази у вишим деловима косине, захтевајући визирање што уноси одређену грешку.



Слика 5.2. Приказ концентрације полова фамилија пукотина, добијене а) поступком у раду, и из б) базе података ClirTheRoads

Регионална кинематска анализа усвајањем јединствених вредности елемената пада за сваку фамилију пукотина и усвајајући је за цео терен је могућа, но због знатних варијација у структурном склопу, више је погоднија пробабилистичка од детерминистичке методе. У овом раду ће се вршити интерполација између косина са засебно заступљеним фамилијама пукотина како би се донекле смањило утицај великих варијација.

5.2. Дефинисање критеријума

Као што је поменуто, у овом раду ће се вршити кинематска анализа за планарно клизање и клизање клина. Претурање блокова се изоставља, због нагиба детектованих у DEM-у, који задају изузетно уске зоне нестабилности, иако у реалности косине на путу су веома стрме и добар део њих показује потенцијал ка претурању. Кинематски услови за клизање клина су традиционални и дати су у формулама [4.2] и [4.3], док код планарног клизања постоји модификација. Границе азимута су уместо стандардних $\pm 20^\circ$ у односу на азимут косине повећане на $\pm 40^\circ$ из два разлога. Први разлог је то што су у неколико случајева у терену запажена места где је очигледно дошло до планарног клизања, а да је разлика у азимуту нешто већа од 20° . Други разлог јесте уважавање чињенице да у оквиру пиксела величине $12,5 \times 12,5$ m се не могу регистровати промене у експозицији лица косина, реда величине пар степени. Овај утицај се посебно осећа на деловима пута са релативно малим радијусом кривина.

Што се тиче угла смичуће отпорности по дисконтинуитету, с обзиром да су у терену заступљене три инжењерскогеолошке јединице – серпентинисани перидотити, филити и гранити, свакој јединици је придодата засебна вредност ϕ . Номиналне вредности су усвојене из Barton & Choubey, 1977, али са узимањем у обзир да филити и перидотити нису свежи на површини, док су гранити који су релативно млађи нешто мање распаднути. У обзир је узета и чињеница да се косине налазе у приповршинским условима у којима се услед падавина или влаге трење може додатно смањити. Вредности угла смичуће отпорности по дисконтинуитету су:

- Перидотити – $\varphi = 26^\circ$
- Филити – $\varphi = 24^\circ$
- Гранити – $\varphi = 30^\circ$

Квартарне творевине, иако заступљене у терену дуж Ибра и у малом појасу код места Полумир се не разматрају, јер су углавном представљени елувијумом матичне стене, која је код перидотита мале дебљине а код гранита незнатне дебљине, и оне више клизе него што прате одроњавање.

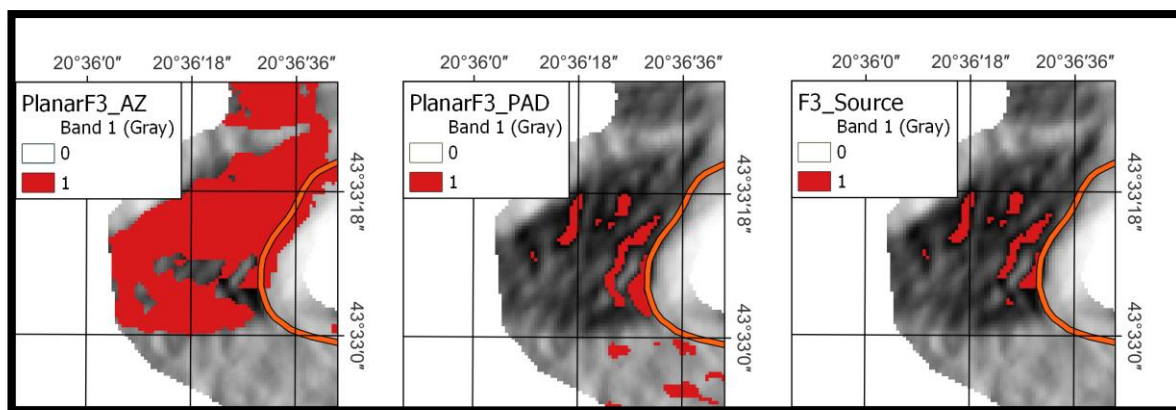
5.3. Резултати регионалне кинематске анализе

5.3.1. Резултати анализе планарног клизања

Вршењем провере кинематских услова за планарно клизање за свих 5 фамилија пукотина у терену, добијени су следећи резултати:

- Планарно клизање **није** детектовано за фамилије F1 и F4
- Планарно клизање **је могуће** за фамилије F2, F3 и F5

Фамилија F2 је као резултат дала само један пиксел у терену, док фамилије F3 и F5 имају знатно већи број, као што се може видети у прилогу 3. Укупан проценат површине терена где је планарно клизање за фамилију F3 могуће износи 0,28% (40312,5 m²), док за фамилију F5 износи 0,52% (74531,25 m²). Овај резултат има смисла, с обзиром да две трећине терена има вредност азимута од 0° до 110°, а вредности од 110° до 360° заузимају само једну трећину. Ограничење код резултата планарног клизања јесу нагиби у DEM-у, јер је познато да и фамилија F1 на неколико косина испуњава услове за планарно клизање. На слици 5.3 је приказан исечак терена, где су за фамилију F3 приказани растери добијени кинематском провером за азимут, потом падни угао, и њихов преклоп тј. производ, који даје тачке где је планарно клизање могуће. Да се приметити да добрим делом издвојене површине где је планарно клизање могуће се налазе непосредно уз сам пут, и у ређим случајевима даље од њега, што знатно повећава шансе да одроњени блок дође до самог пута, што је чест случај.



Слика 5.3. Слева на десно: проверен критеријум по азимуту, по падном углу и финални резултат (преклоп) са тачкама где је могуће планарно клизање (вредност 1)

5.3.2. Резултати анализе клизања клина

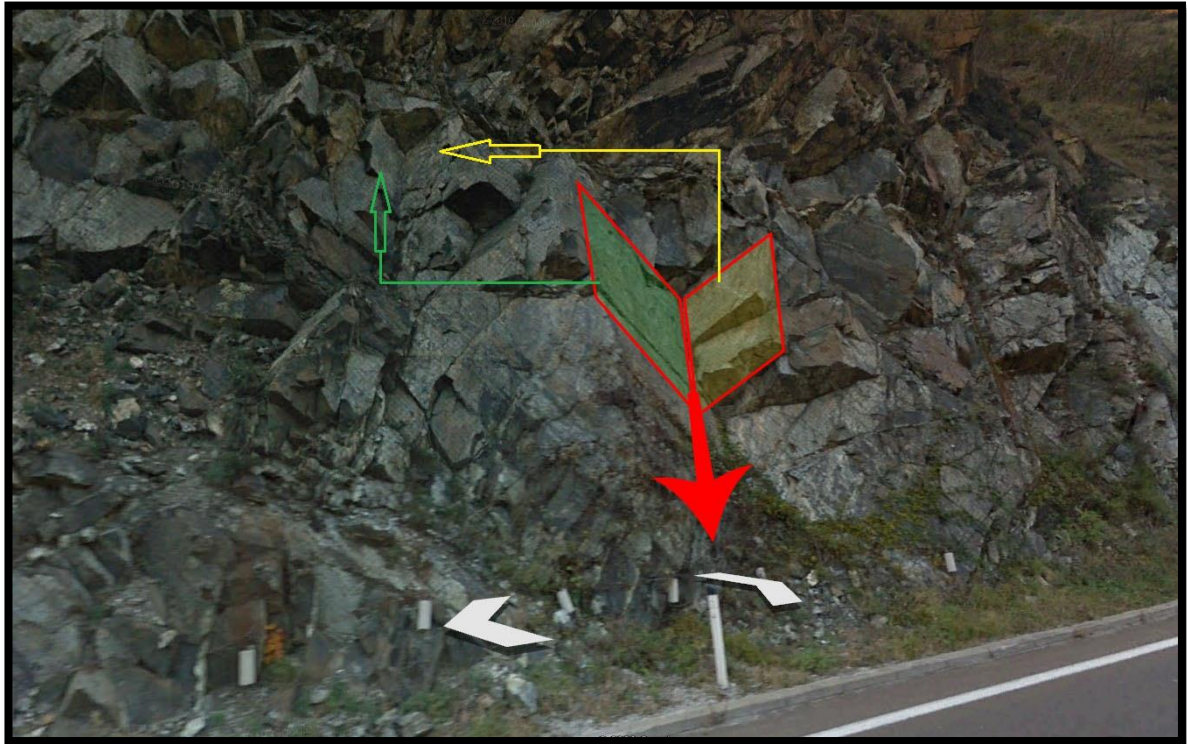
Клизање клина због својих кинематских услова је знатно чешћи процес у природи, што је и у овом терену случај. Од десет фамилија пресечница, фамилије **P13**, **P15**, **P23**, **P25**, **P34** и **P35** стварају клинове који су оријентисани ка самом путу, док осталих 4 фамилија пукотина или дају конзистентно преблаге нагибе, или пак падају у стенску масу. Као што се види у Прилогу 4, површина терена захваћена клизањем клина је знатно већа него код планарног клизања. Овај резултат је слаже са ситуацијом у великој већини косина на путу, где је присутан барем један од наведених клинова, чије величине знатно варирају. Пример класичног клизања клина на косини у терену се може видети на слици 5.4.

У табели 5.3 су дате површине на терену захваћене овим процесом, подељене према фамилијама пресечница. Клинови P23 и P13 су убедљиво највише заступљени, после којих редом иду P15, P25, P35 и на крају P34.

Табела 5.3. Површине терена захваћене појединачним системима клина

| Клин | Површина (m ²) | Површина (%) |
|------|----------------------------|--------------|
| P13 | 508 750 | 3,54 |
| P15 | 197 656 | 1,37 |
| P23 | 673 125 | 4,68 |

| | | |
|-----------|-----------|-------|
| P25 | 167 969 | 1,17 |
| P34 | 95 312 | 0,66 |
| P35 | 139 531 | 0,97 |
| $\Sigma=$ | 1 782 343 | 12,39 |



Слика 5.4. Косина 14 – делови у косини где је дошло до клизања клина (пресечница је приказана црвеном стрелицом, а остале стрелице маркирају присуство другог клина исте геометрије)

Укупна површина терена захваћена неким клизањем клина је конзервативна са аспекта да захвата делове терена изнад косина, који у већини случајева имају изданке стенске масе, али не на великим површинама, а такође су падине пошумљене што додатно инхибира процес одроњавања. Ипак, скоро све нестабилности у косинама дуж пута јесу управо клинови јер се фамилије пукотина F1, F2 и F3 врло често јављају на површини косина, а њихове пресечнице генерално, барем према азимуту, упадају у зону нестабилности велике већине косина. Нажалост, величину блокова није могуће одредити ни за планарно ни за клизање клина, због недостатка правог

размерника у оквиру Google Street View и мерења густине пукотина, али су варијације знатне, чак и у оквиру самих косина.

Укупна површина терена, захваћена барем једним од два типа основних кинематских нестабилности износи 1,9 km², тј. 13,19% од целог истражног подручја.

5.4. Дискусија резултата

Резултате анализа за планарно клизање и клизање клина је потребно упоредити са реалним стањем у природи. У табели 5.4 су дате косине и њихова стабилност у односу на планарно клизање и/или клизање клина, која је запажена у Google Street View, као и процентуални садржај нестабилне површине на одређени механизам унутар самих полигона, добијених путем регионалне кинематске анализе.

Табела 5.4. Опсервирани механизми одроњавања на косинама и учешће нестабилних површина у косинама добијени регионалном кинематском анализом. Црвена поља – уочена нестабилност, зелена поља – косина нема наведени вид нестабилности

| Косина | Опсервирано | | Анализа | |
|--------|------------------|---------------|----------------------|-------------------|
| | Планарно клизање | Клизање клина | Планарно клизање (%) | Клизање клина (%) |
| 1 | | | | 86,35 |
| 2 | | | | 5,97 |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | 1,95 |
| 5 | | | 31,16% | 34,98 |
| 6 | | | | 30,51 |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | 18,41 |
| 9 | | | | |
| 10 | | | 23,74% | 71,89 |
| 11 | | | | 12,90 |
| 12 | | | | 90,12 |

| | | | | |
|----|--|--|--------|-------|
| 13 | | | | 50,74 |
| 14 | | | 22,41% | 39,34 |
| 15 | | | 1,52% | 39,65 |
| 16 | | | | |
| 17 | | | | 12,71 |
| 18 | | | | |
| 19 | | | | |
| 20 | | | | 25,77 |
| 21 | | | | 53,81 |
| 22 | | | 4,61% | 6,62 |
| 23 | | | | 76,05 |
| 24 | | | 10,12% | 42,67 |
| 25 | | | | |
| 26 | | | | |
| 27 | | | | |

Види се да планарно клизање детектовано регионалном анализом се поклапа са само на четири (5, 10, 14 и 22) од једанаест потврђених косина код којих је овај механизам запажен. Такође, аномалија на косини 15 се појавила, где се прорачунатих 1,52% на косини 15 може занемарити, док за косину 24 је утврђена могућност планарног клизања из базе ClirTheRoads. Као што је већ поменуто, недовољна покривеност терена површинама нестабилним на планарно клизање је до резолуције DEM-а, што објашњава недетектовано планарно клизање на косинама 2, 3, 9, 13, 17, 20 и 25.

Клизање клина има боља поклапања између запажене ситуације и регионалне анализе – на 16 од 20 косина је потврђено клизање клина регионалном кинематском анализом. Аномалије се јављају на косинама 11 и 17, које у себи садрже пукотине за образовање клина, међутим на самој површини није дошло до пресецања које би се могло потврдити. Супротно томе на косинама 3, 7, 15, 25 анализом није потврђена евидентна кинематска

предиспозиција. Лимитације код клизања клина су знатно мање него код планарног клизања, због своје знатно шире зоне нестабилности, па су бољи резултати и били очекивани код ове анализе.

Оно што би било неопходно урадити је, ако је могуће, извршити исту анализу али за DEM веће резолуције, где ће бити више преклапања поготово код планарног клизања, и ради дефинисања критичне вредности нестабилне површине у оквиру једне косине. Такође, неке екстремно високе вредности, као што су проценти клизања клина на косинама 1 и 12 ће највероватније бити мало редуковане, јер је исувише конзервативно сматрати да клинову обухватају 80%+ површине једне косине.

Даље унапређење ове анализе се огледа у вршењу детаљног LiDAR скенирања косина, где је могуће прецизно издвојити нестабилне блокове за ова два типа нестабилности. Тиме се могу добити укупне површине косине покривене овим нестабилностима, као и величине блокова, које се накнадно могу унети у симулације одроњавања у CONEFALL, али и у софтверима као што су RocFall и RocFall3D, који у својим анализама могу укључити и мреже које су постављене на већини косина. Такође, софтвери попут RocPlane и SWEDGE могу, након прераде облака тачака, дати факторе сигурности на планарно клизање и клизање клина, респективно. Овим анализама би се модел приказан у овом раду могао проверити и по потреби кориговати колико је могуће, јер се разликују размере посматрања терена.

Вршење пробабилистичке анализе би за овај простор и на овом нивоу детаљности дало исувише конзервативне резултате, али може послужити као добра провера за DEM-ове виших резолуција.

6. СИМУЛАЦИЈЕ ОДРОЊАВАЊА

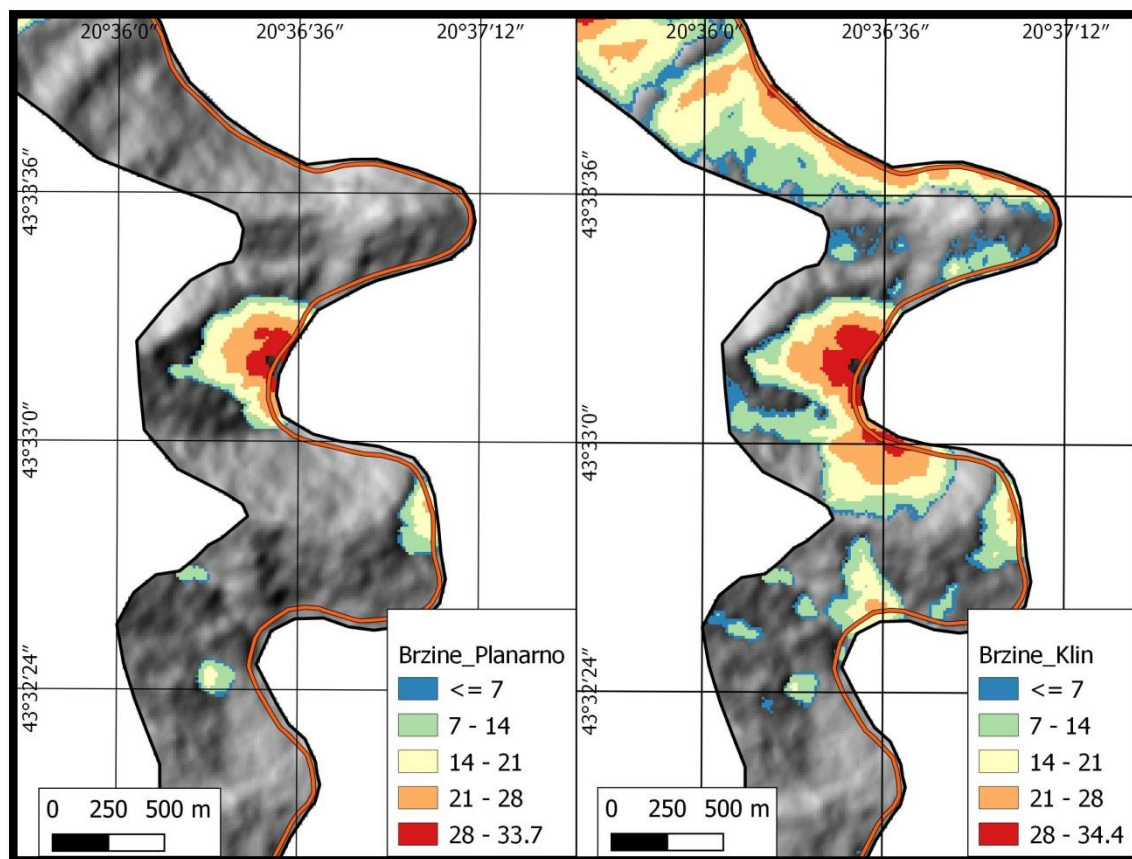
За симулације одроњавања, тј. брзине кретања и кинетичке енергије блокова, ће се, као што је већ поменуто, користити софтвер CONEFALL. С обзиром да не постоји катастар одроњавања за овај терен, где су дефинисане величине одрона и самим тим величине блокова, потребно је усвојити одређене вредности. Budetta, 2004, је дао модификацију система за одређивање хазарда од одроњавања (RHRS), који је оригинално направљен за потребе Министарства транспорта државе Орегон у САД, тада под називом Комисија за аутопутеве државе Орегон (Pierson, et al 1990). Овај систем омогућава да се на основу девет карактеристика стенске косине одреде косине које представљају опасност, и које захтевају хитну санацију.

Једна од карактеристика јесу величине блокова који се одроњавају. У оригиналном издању RHRS, димензије су дате у метарским јединицама, а не по запреминама. Модификација система из 2004. године у себе укључује и опис блокова по њиховој запремини, од којих су издвојене следеће: **0,026 m³, 0,21 m³, 0,73 m³ и 1,74 m³**. За потребе овог рада је усвојено да просечна запреминска тежина стенских маса заступљених у терену износи 25 kN/m³. Тиме се добијају следеће масе блокова, које ће се искористити приликом симулација кинетичке енергије блокова: **m₁=65 kg; m₂=525 kg; m₃=1825 kg и m₄=4350 kg**. Јасно је да су шансе за одроњавање мањих блокова знатно веће од шансе да се одрони блок од 4350 kg, али то се не може квантификовати за овај терен због одсуства катастра.

У свим симулацијама се сматра да угао сенке износи 30°.

6.1. Симулације брзине одрона

Брзине одрона се прорачунавају по формули [4.7], са усвојеном вредношћу $f_v = 0,9$. Прилог 5 садржи приказ брзине одроњеног блока за планарно клизање и за клизање клина. Види се да максималне брзине износе 33,7 m/s и 34,4 m/s ресективно. На слици 6.1 је дат исечак из Прилога 5, са брзинама одрона у случају планарног клизања и клизања клина.



Слика 6.1. Брзине одрођених блокова (у m/s) насталих планарним клизањем (лево) и клизањем клина (десно)

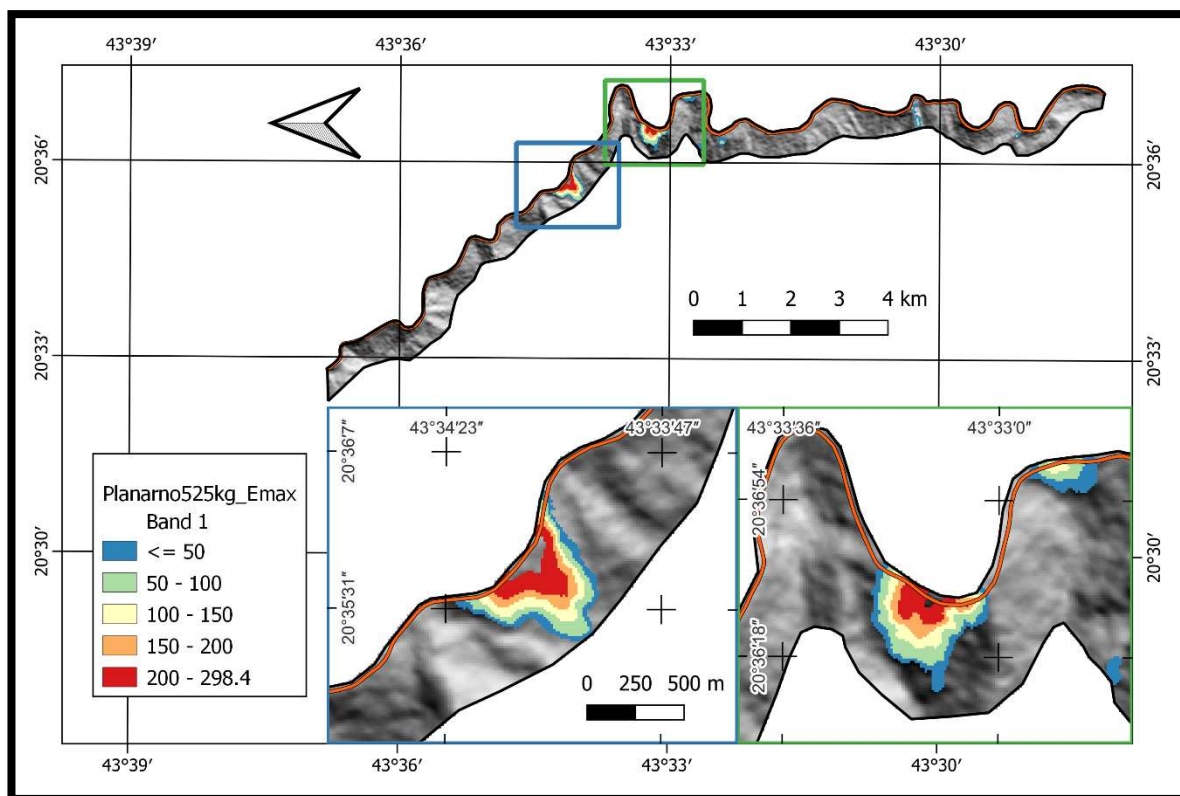
Најкритичније косине за планарно клизање су косине 10 и 14 где се јављају брзине од преко 28 m/s. На косинама 5, 10, 14, 15 и 22 одрођени блокови могу завршити на самом путу у случају планарног клизања. Што се тиче клизања клина, косине 8, 10, 12, и 14 представљају највећу опасност, као и део терена између косина 4 и 5. Одроњавање на косинама где је детектовано клизање клина, па чак и на деловима терена ван означених косина, резултује депоновањем блока на пут.

6.2. Симулације кинетичке енергије одрона

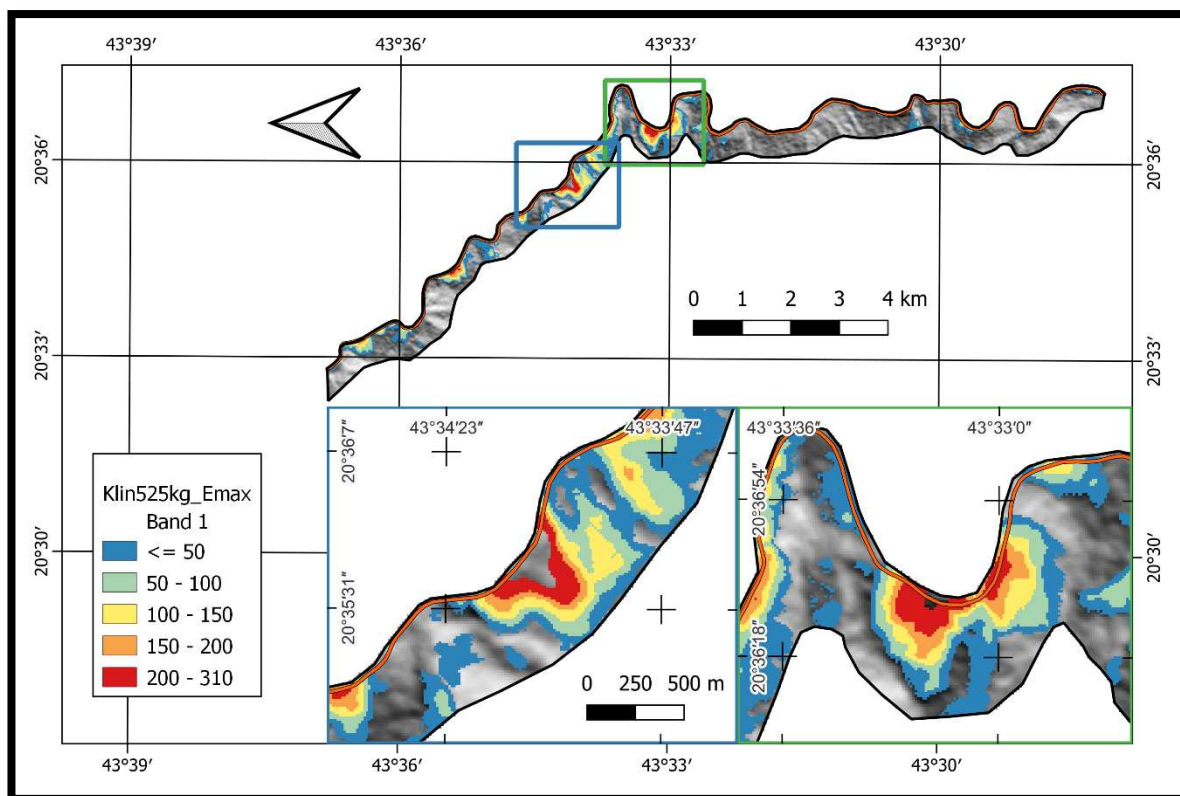
Симулације максималних кинетичких енергија одрона за дефинисане тачке одроњавања су вршене и за планарно клизање, и за клизање клина. Како ове симулације урачунавају у себе просечну масу блока, извршена су по четири сценарија за четири различите вредности масе тј. запремине блока, као што је описано у почетку овог поглавља.

У Прилогу 6 је дат приказ за сва четири сценарија код планарног клизања, а у Прилогу 7 код клизања клина. Види се да су енергије за блокове запремине $0,026 \text{ m}^3$ и код планарног клизања и код клизања клина малих вредности, са максимумом испод 40 kJ . Већ са повећањем масе са 65 на 525 kg енергије одрона почињу да достижу и преко 300 kJ , док преостала два сценарија дају три до седам пута веће енергије. Косине 10, 12 и 14, као и део терена између косина 4 и 5 се издвајају као највеће опасности за пут, узимајући у обзир и случај планарног клизања, и случај клизања клина.

На слици 6.2 је дат приказ кинетичке енергије за блок запремине $0,21 \text{ m}^3$, односно масе од 525 kg , за косине 10, 14 и 15 у случају планарног клизања, а на слици 6.3 у случају клизања клина. Табела 6.1 садржи дефинисане квантиле из распона вредности енергија по типу нестабилности и запремини блока, изражене у kJ и m^3 , респективно.



Слика 6.2. Кинетичке енергије (у kJ) одрона за косине 10, 14 и 15 у случају планарног клизања.



Слика 6.3. Кинетичке енергије (у kJ) одрона за косине 10, 14 и 15 у случају планарног клизања.

Табела 6.1. Квартилне вредности кинетичке енергије по типу нестабилности и запремини блока

| Vb | Планарно клизање | | | | Клизање клина | | | |
|-------|------------------|-------|-------|--------|---------------|-------|-------|--------|
| | 1Q | 2Q | 3Q | 4Q | 1Q | 2Q | 3Q | 4Q |
| 0,026 | 3,1 | 7,2 | 13,4 | 24,4 | 1,9 | 4,6 | 8,8 | 15,7 |
| 0,21 | 24,7 | 58 | 108,1 | 197,2 | 15,2 | 37,5 | 71,3 | 127 |
| 0,73 | 85,8 | 201,5 | 375,7 | 685,4 | 53 | 130,2 | 248 | 441,6 |
| 1,74 | 204,5 | 480,2 | 895,5 | 1633,8 | 126,3 | 310,4 | 591,1 | 1052,6 |

7. ХАЗАРД ОД ОДРОЊАВАЊА

Дефинисање хазарда у класичном смислу захтева познавање локације, врсте, магнитуде и периода понављања одређеног процеса у природи. Нажалост, за дати терен не постоје апсолутно прецизни подаци и мерења који би могли да послуже одређивању потпуно квантификованог хазарда. За генерално подручје постоје историјски подаци о одронима дуж овог пута, без дефинисане магнитуде одрона ни величине блокова:

- 03.11.2010 и 08.11.2010 – одрони у близини Маглича као последица дејства земљотреса (Извештај о резултатима и активностима Републичког сеизмичког завода после земљотреса код Краљева, Републички сеизмолошки завод)
- 19.02.2016 – одрон код места Полумир, настао због већих падавина (<https://kossev.info/foto-vest-na-putu-kraljevo-raska-zastoj-u-saobracaju-usled-odrona/>)
- 17.04.2017 – одрон у близини Маглича, настао због већих падавина (<https://naslovi.net/2017-04-17/vecernje-novosti/oprezno-kroz-ibarsku-klisuru-odroni-na-magistrali/19883589>)
- 06.04.2018 – одрон код места Бресник, настао због већих падавина, груба процена од 1000 m³ стене и тла (<https://www.kurir.rs/vesti/drustvo/3026257/odron-na-putu-kraljevo-raska-vozila-se-propustaju-naizmenicno>)
- 29.01.2020 – одрон код места Бресник, настао због већих падавина (<https://www.novosti.rs/vesti/srbija.73.html:844417-Odron-zatrpao-lokalni-put-u-selu-Bresnik-kod-Kraljeva-VIDEO>)

Ови подаци, иако корисни да се добије генерална слика учесталости одрона на овом путу, не могу послужити за утврђивање довољно добре матемичке регресије, где је приказана зависност између запремине одронутог материјала и времена, као и прецизне локације дешавања. Такође, бележење

мањих одрона који директно не представљају штету за пут, него заврше у мрежама или пак по странама пута је изузетно ретко.

Имајући у виду наведено, хазард од одроњавања у овом раду ће бити дефинисан у односу на кинетичку енергију одрона, која у зависности од свог интензитета може оштетити или чак и пробити безбедносне мере које се налазе у терену. Хазард је, може се рећи, више прелиминарног карактера, и дели се на три категорије у овом раду у зависности од граничних енергија стандардних мера заштите пута (мрежа, бетонска баријера, еластична баријера), као што је дефинисано у Марјановић et al, 2022:

- Зона ниског хазарда, када је $E_k < 100 \text{ kJ}$
- Зона средњег хазарда, за $100 < E_k < 300 \text{ kJ}$
- Зона високог хазарда, када је $E_k > 300 \text{ kJ}$

У прилозима 6 и 7 се види да код симулације одрона у случају планарног клизања и клизања клина, за блок масе 65 kg, дају максималне енергије које не прелазе зону ниског хазарда. Може се дакле закључити, да **уколико долази до одроњавања блокова запремине $V_b \leq 0,021 \text{ m}^3$ хазард од одроњавања на путу је низак, читавом дужином пута.**

У прилогу 8 је дат приказ издвојених зона средњег и високог ризика на путу, за масу блока од 525 kg, у случају код оба типа нестабилности. Зона високог хазарда код планарног клизања и код клизања клина у овом сценарију износи **1,41% и 1,96% дужине пута**, респективно. Зона средњег хазарда код планарног клизања је знатно краћа у поређењу са клизањем клина, **3,58% наспрам 18,49%**. Ова знатна разлика у зони средњег хазарда се јавља из инхерентно конзервативнијих услова за стварање клина, као и умањење реалног планарног клизања заступљеног у терену због резолуције DEM-а.

Што се тиче сценарија где маса одроњеног блока износи 1825 kg, долази до знатног и наглог повећања зоне високог хазарда у оба случаја. Дужина зоне високог хазарда код планарног клизања и код клизања клина

износи **5,36%** и **23,06%** респективно, док дужина зоне средњег хазарда износи **1,91%** и **10,54%**. Резултати овог сценарија су видљиви у Прилогу 9.

Прелаз са претходног сценарија на најређи сценарио, где долази до одрона блока масе 4350 kg, је нешто блажи, поготово код планарног клизања. Дужина зоне високог хазарда се код планарног клизања мало подигла, до **7,2%**, а код клизања клина захвата статистички гледано трећину пута, чак **33,35%**. Зона средњег хазарда код планарног клизања је незнатно дужа од претходног сценарија, само **1,93%**, док код клизања клина се смањује на **5,86%**. Графички приказ ових резултата је дат у Прилогу 10.

Најреалистични сценарио од наведених јесте први, са одређеним девијацијама у вредностима, али показује да **више од једне петине пута није у потпуности обезбеђено од одрона**. Ради лоцирања егзактних места у зонама средњег и високог хазарда, потребна су детаљна теренска истраживања, по могућству уз помоћ LiDAR и фотограметријских технологија.

8. ЗАКЉУЧАК

За магистрални пут који повезује град Краљево са насељем Ушће, на деоници Маглич – Ушће, је урађена регионална кинематска анализа, чији су резултати дали локације у терену где су испуњени кинематски услови за два типа нестабилности – планарно клизање и клизање клина. На основу детектованих локација, односно тачака почетка одроњавања је извршена симулација одрона, за различите запремине одроњених блокова, и за оба типа нестабилности. Циљ симулација је издвајање зона на деоници које су више угрожене од других, да би се на овом путу, познатом по одронима, могла усмерити пажња ка зонама високог и средњег хазарда, ради потенцијалног снижавања истих санационим мерама или увођењем додатних заштитних мера.

Резултати кинематске анализе за планарно клизање имају мања поклапања са реалном ситуацијом у терену, у поређењу са резултатима добијеним за анализу клизања клина. Иако је критеријум за планарно клизање додатно проширен, овај тип нестабилности је више условљен самом резолуцијом DEM-а терена. Поновљене анализе за елевационе моделе терена веће резолуције би дали знатно боља поклапања. Анализа клизања клина је дала задовољавајуће резултате, где су аналитички добијени клинови потврђени на 16 од 20 косина, тј. у 80% случајева.

Симулације кинетичке енергије одрона су урађене за четири сценарија, у зависности од масе тј. запремине самог блока. Показало се да, након класификације зоне хазарда на зону ниског ($E_k < 100 \text{ kJ}$), средњег ($E_k = 100-300 \text{ kJ}$) и високог хазарда ($E_k > 300 \text{ kJ}$), је низак хазард читавом дужином пута у сценарију са најмањом масом блока, док се на следећа три сценарија јављају зоне и високог и средњег хазарда. Установљено је да у случају планарног клизања, 5-15% пута се налази у зони високог и средњег хазарда, у зависности од сценарија, док код клизања клина чак 20-35% терена је покривено зонама високог и средњег хазарда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ansari, M.K., Ahmed, M., Singh, R., Singh, T.N., Ghalayani, I., 2014. Rainfall, A Major Cause for Rockfall Hazard along the Roadways, Highways and Railways on Hilly Terrains in India. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 1: Climate Change*, стр. 457-460.
2. Aydan, O., Ulusay, R., Hamada, M., Beetham, D., 2012. Geotechnical aspects of the 2010 Darfield and 2011 Christchurch earthquakes of New Zealand and geotechnical damage to structures and lifelines. *Bull Eng Geol Environ*, 71(4), стр. 637–662.
3. Aydan, O., 2016. Large Rock Slope Failures Induced by Recent Earthquakes, *Rock Mech Rock Eng*, 49, стр. 2503-2524.
4. Bar, N., Nicoll, S., Pothitos, F., 2016. Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock. *APSSIM 2016*, Brisbane, Australia.
5. Barton, N., Choubey, V., 1977. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics 10*, стр. 1-54.
6. Budetta, P., 2004. Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences (2004):4*, стр. 71-81.
7. ClirTheRoads. URL: <http://clirtheroads.rgf.rs/>
8. Cruden, D.M., 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 43(1), стр. 27-29.
9. CULMANN, K., 1866. *Die graphische Statik*. Verlag von Meyer&Zeller, Zürich, стр. 547-561.
10. Dorren, L. 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 27,1, стр. 69-87.
11. El-Ramly, H., Morgenstern, N.R., Cruden, D.M., 2002. Probabilistic slope stability analysis for practice. *Can. Geotech. J.* 39, стр. 665–683.
12. Evans, S., Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes, *Can. Geotech. J.*, 30, стр. 620–636.

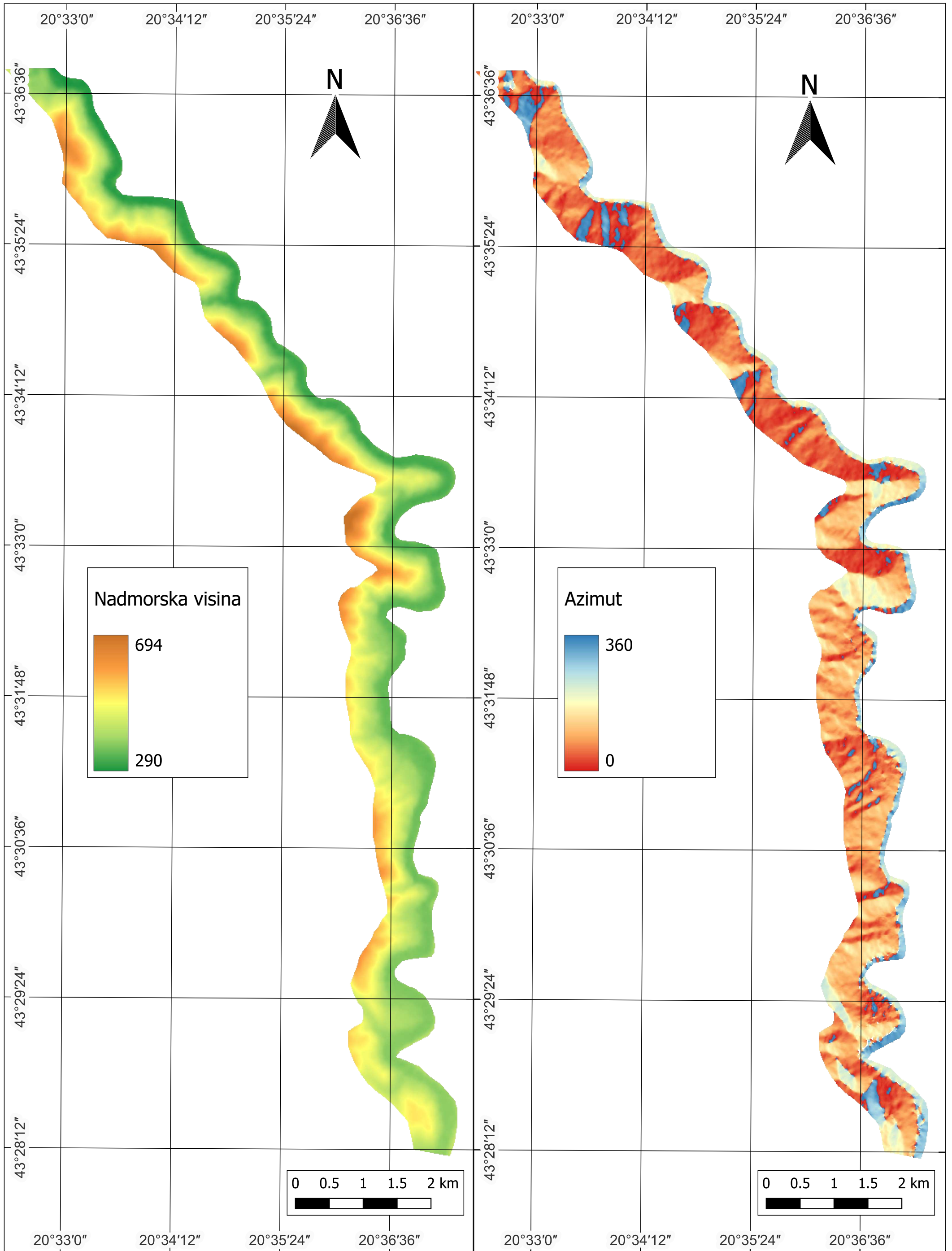
13. Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for landuse planning. *Engineering Geology*, v.102, n.3-4, стр. 85-98.
14. Gerber, W., 1994. Beurteilung des Prozesses Steinschlag, Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN). *Herbstkurs Poschiavo, Kursunterlagen, WSL, Birmensdorf*, стр. 20.
15. Геолошки Информациони Систем Србије. URL: <https://geoliss.mre.gov.rs/>
16. GOODMAN, R.E., 1989. *Introduction to Rock Mechanics, 2nd Edition*. John Wiley&Sons, New York, стр. 141
17. HEIM, A. 1932. *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth, Zürich, стр. 112-155
18. Hoek, E., Bray, J., Boyd, J. 1973. The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. *Quart. J. Engng Geol.*, 6(1), стр. 22–35.
19. HOEK, E., BRAY, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*. Institute of Mineralogy and Metallurgy, London.
20. Hoek, E., Read, J., Karzulovic, A., Chen, Z.Y., 2000. Rock slopes in Civil and Mining Engineering. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne.
21. Hoek, E., 2007 Practical rock engineering. *Rocscience-Hoek's Corner, USA*
22. Ilinca, V., 2008. Rockfall Hazard Assessment, Case study: Lotru Valley and Olt Gorge. *IAG Regional Conference on Geomorphology: Landslides, Floods and Global Environmental Change in Mountain Regions*, Brasov, Romania
23. Jaboyedoff, M., 2003. *User's Guide to Conefall 1.0*. URL: <https://quanterra.ch/portfolio-items/conefall/>
24. Jaboyedoff, M., Labiouse, V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. *10th International Congress on Rock Mechanics ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa, стр. 575–578.

25. Jaboyedoff, M., Giorgis, D., Riedo, M., 2006. Apports des modèles numériques d'altitude pour la géologie et l'étude des mouvements de versant, *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 90, стр. 1-21.
26. Jaboyedoff, M., Labiouse, V., 2011. Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, стр. 819–828.
27. Kim, K.S., Park, H.J., Lee, S., Woo, I., 2004. Geographic Information System (GIS) based stability analysis of rock cut slopes. *Geosciences Journal Vol. 8, No. 4*, стр. 391 – 400.
28. Keefer, D.K., 1984. Slope failures caused by earthquakes. *Geol Soc Am Bull* 95, стр. 406–421
29. Keskin, I., Polat, A., 2022. Kinematic Analysis and Rockfall Assessment of Rock Slope at the UNESCO World Heritage city (Safranbolu/Turkey). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering (2022)* 46, стр. 367–384.
30. Krautblatter, M., Moser, M., 2009. A nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, стр. 1425–1432.
31. КУЈУНЦИЋ, Б., 1979. *Основи механике стена I*. Грађевински календар, Београд, стр. 45-50.
32. ЛАПЧЕВИЋ, Р., 2004. *Чврстоћа, деформабилност и природна напругнутост чврстих стенских маса, монографија*. Рударско-геолошки факултет, Београд, стр. 38.
33. Loye, A., Pedrazzini, A., Jaboyedoff, M., 2008. Preliminary regional rockfall hazard mapping using lidar based slope frequency distribution and conefall modelling. *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: from Causes to Management, Laval University Press, Quebec*.
34. Markland, J.T., 1972. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19, 10 pp*.

35. Марјановић, М., Аболмасов, Б., Ђурић, У., Крушић, Ј., Богдановић, С., 2022. Regional rockfall exposure assessment, experience from Serbia. *Proceedings of the 5th Regional Symposium on Landslides*, Rijeka.
36. Mavrouli, O., Corominas, J., Jaboyedoff, M., 2015. Size distribution for potentially unstable rock masses and in-situ rock blocks using LIDAR generated Digital Elevation Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48(4), стр. 1589-1604.
37. Norrish, N.I., Wyllie, D.C., 1996. Chapter 15: Rock slope stability analysis. *Landslides: Investigation and Mitigation*, National Academy Press, стр. 397.
38. Palma, B., Parise, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., 2011. Rockfall hazard assessment along a road in the Sorrento Peninsula, Campania, southern Italy. *Natural Hazards*, 61, стр. 187-201.
39. Park, H.J., Lee, S.H., 2014. Kinematic Analysis of Plane Failure for Rock Slope Using GIS and Probabilistic Analysis Method. *Econ. Environ. Geol.*, 47(2), стр. 121-131,
40. Park, H.J., Lee, J.H., Kim, K.M., Um, J.G., 2016. Assessment of rock slope stability using GIS-based probabilistic kinematic analysis. *Engineering Geology*, 2016. 203: стр. 56-69.
41. Ritchie, A.M., 1963. Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record* 17, Highway Research Board, Washington, стр. 13–28.
42. Riquelme, A., Tomas, R., Cano, M., Navarro, J.L.P., Jorda, L., 2021. *Extraction of discontinuity sets of rocky slopes using iPhone-12 derived 3DPC and comparison to TLS and SfM datasets*. IOP Conference Series Earth and Environmental Sciences, 833(1), EUROCK 2021, Torino.
43. Rocscience Ltd. DIPS – Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data, Version 6.0
44. Sandersen, F., Hestnes, E., Lied, K., 1997. The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. *Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt*, vol. 201, стр. 97-114.
45. Schefer, S., Cvetković, V., Fugenschuh, B., Kounov, A., Ovtchareva, M., Schaltegger, U., Schmid, S.M., 2010. *Dating intrusion and cooling of Cenozoic*

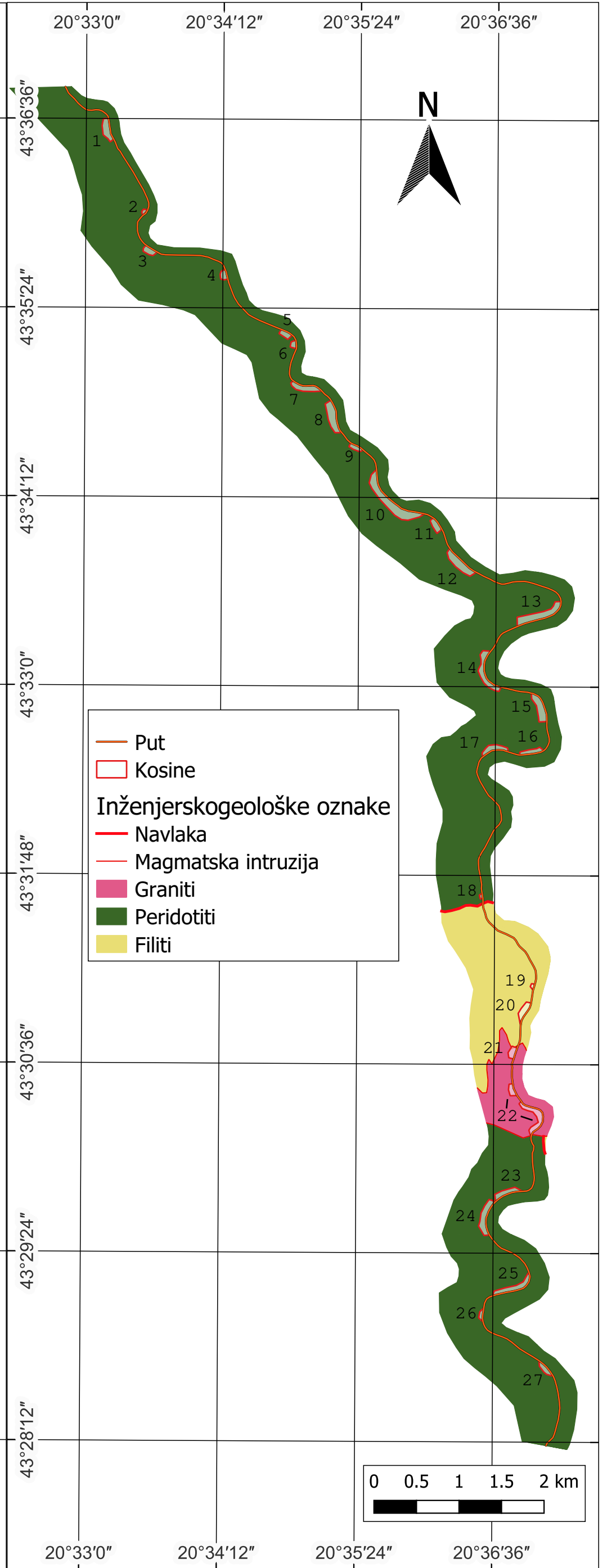
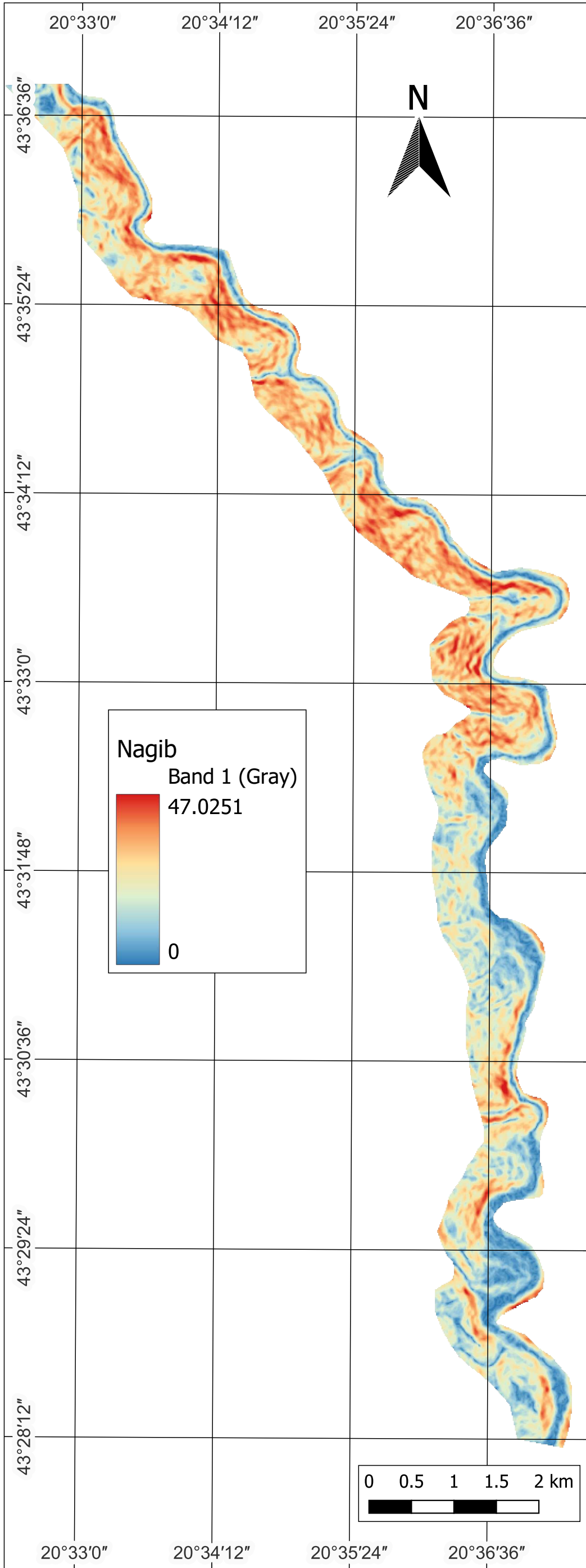
- granitoids in the Dinarides of Southern Serbia and discussion of the geodynamic setting of Paleocene-Miocene magmatism in the Balkan Peninsula.* Conference: EGU General Assembly, Vienna.
46. Schefer, S., Cvetković, V., Fugenschuh, B., Kounov, A., Ovtchareva, M., Schaltegger, U., Schmid, S.M., 2011. Cenozoic granitoids in the Dinarides of southern Serbia: Age of intrusion, isotope geochemistry, exhumation history and significance for the geodynamic evolution of the Balkan Peninsula. *International Journal of Earth Sciences*, 100(5), стр. 1181-1206.
47. Schmid S.M., Bernoulli D., Fugenschuh B., Matenco L., Schefer S., Schuster R., Tischler M., Ustaszewski K., 2008. The Alpine–Carpathian–Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss J Geosci* 101, стр. 139–183.
48. Tabbá, M.M., 1984. Deterministic versus risk analysis of slope stability. *Proceedings of Fourth International Symposium on Landslides. Toronto, Canada*, стр. 491-498.
49. Toppe, R., 1987. Terrain models: a tool for natural hazard mapping, *in: Avalanche formation, movement and effects, edited by: Salm, B. and Gubler, H., International Association of Hydrological Sciences Wallingford, UK, 162*, стр. 629–638.
50. Урошевић, М., Павловић, З., Клисић, М., Малешевић, М., Брковић, Т., Трифуновић, С., 1966. *Лист и тумач Основне Геолошке Карте СФРЈ Врњци, К34-18*. Завод за геолошка и геофизичка испитивања, Београд.
51. Varnes, D.J., 1978. Slope Movement Types and Processes. *Landslides and Engineering Practice, Special Report 29*, Highway Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C., стр. 20-47
52. Wiczorek, G.F., Morrissey, M.M., Iovine, G., Godt, J.: Rockfall Potential in the Yosemite Valley, California. *USGS Open-file Report*, 99–578

ГРАФИЧКИ ПРИЛОЗИ



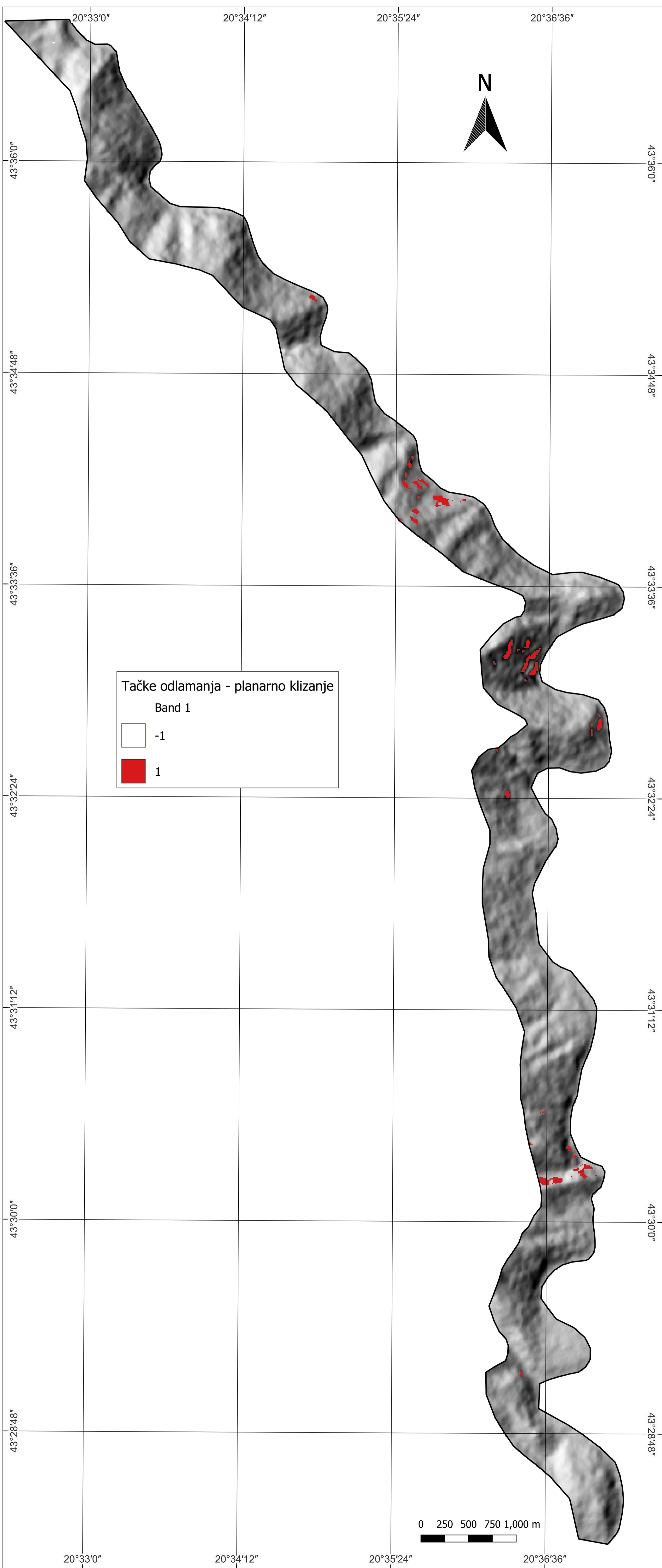
Прилог 1. Карте рељефа и експозиције терена, 1:50 000

Аутор: Павле Манасијевић



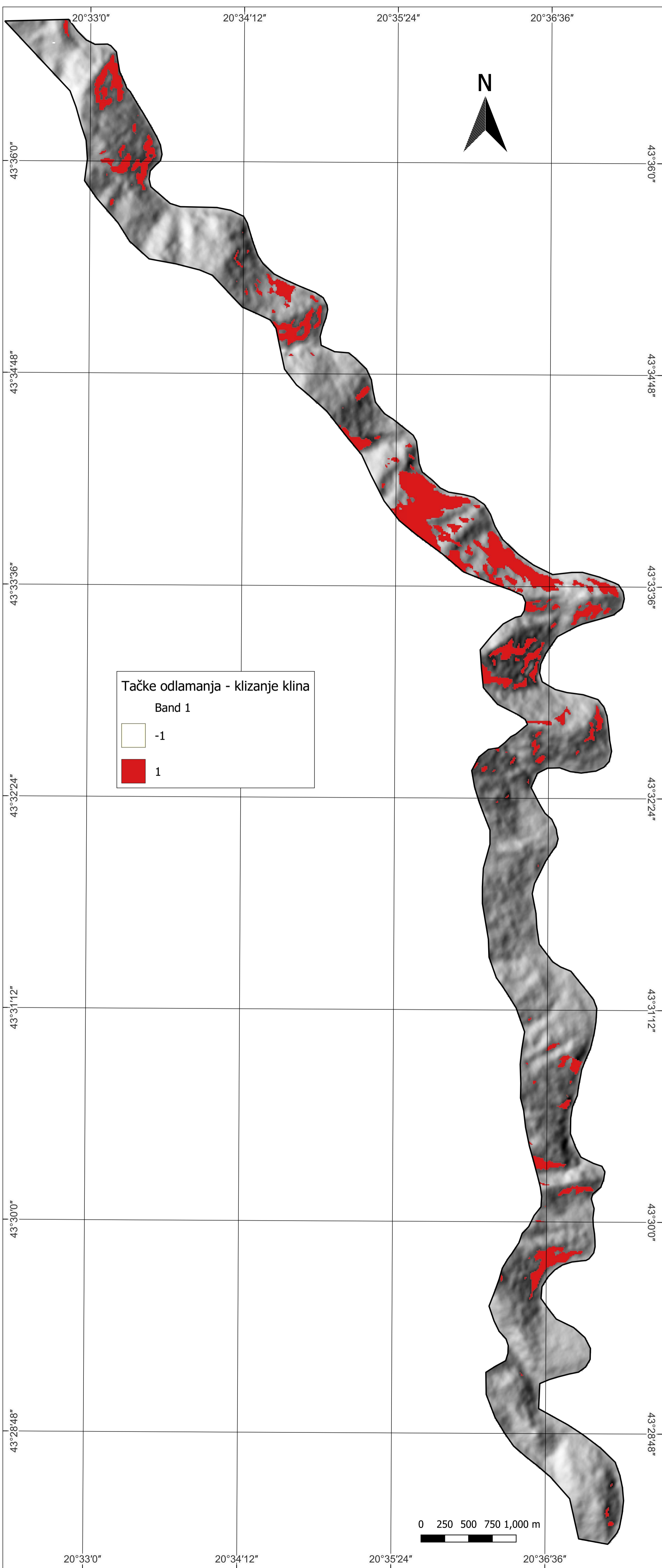
Прилог 2. Карта нагиба терена и инжењерскогеолошка карта терена, 1:50 000

Аутор: Павле Манасијевић

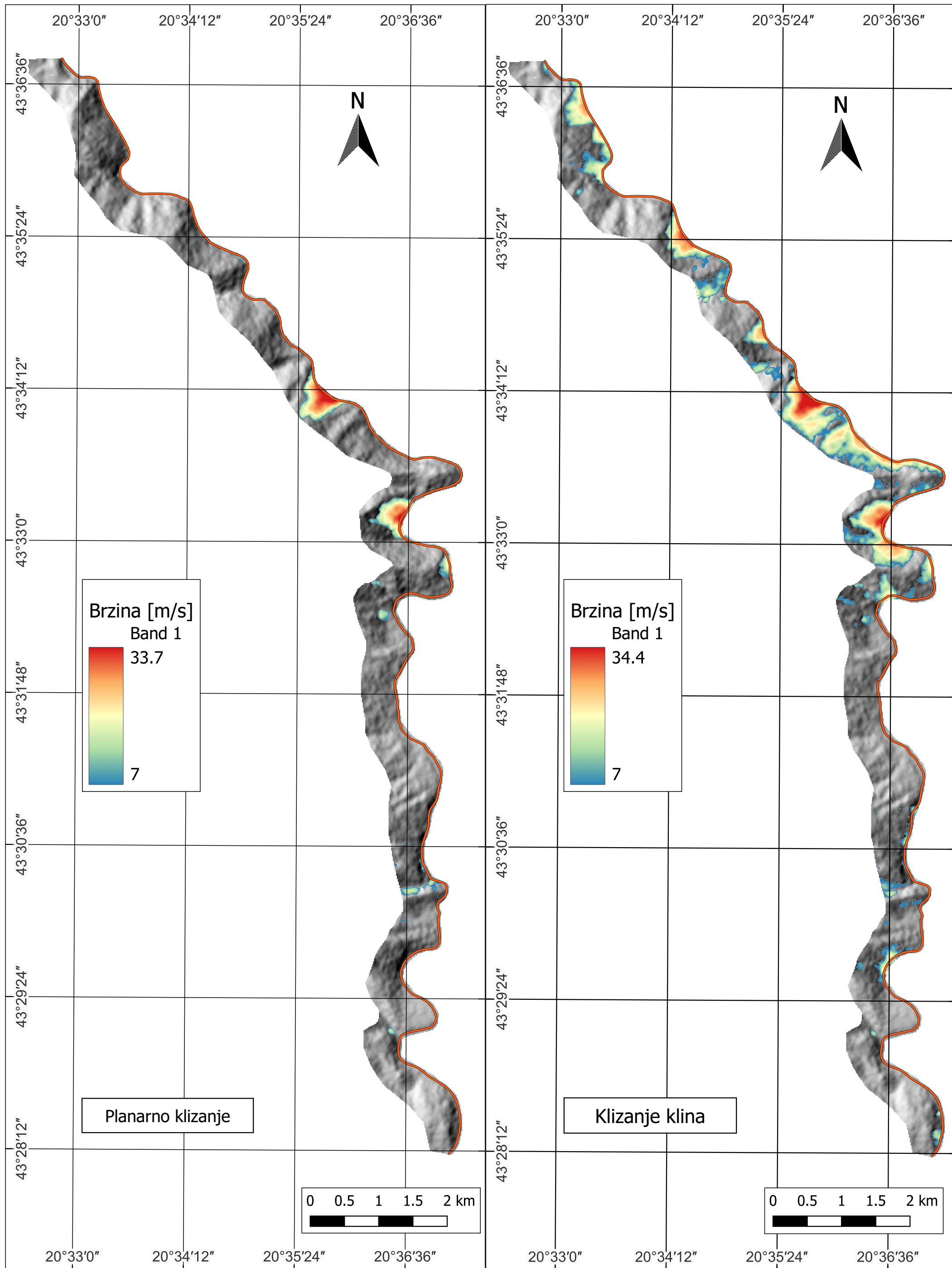


Прилог 3. Карта издвојених тачака одламања, насталих планарним клизањем, 1:25 000

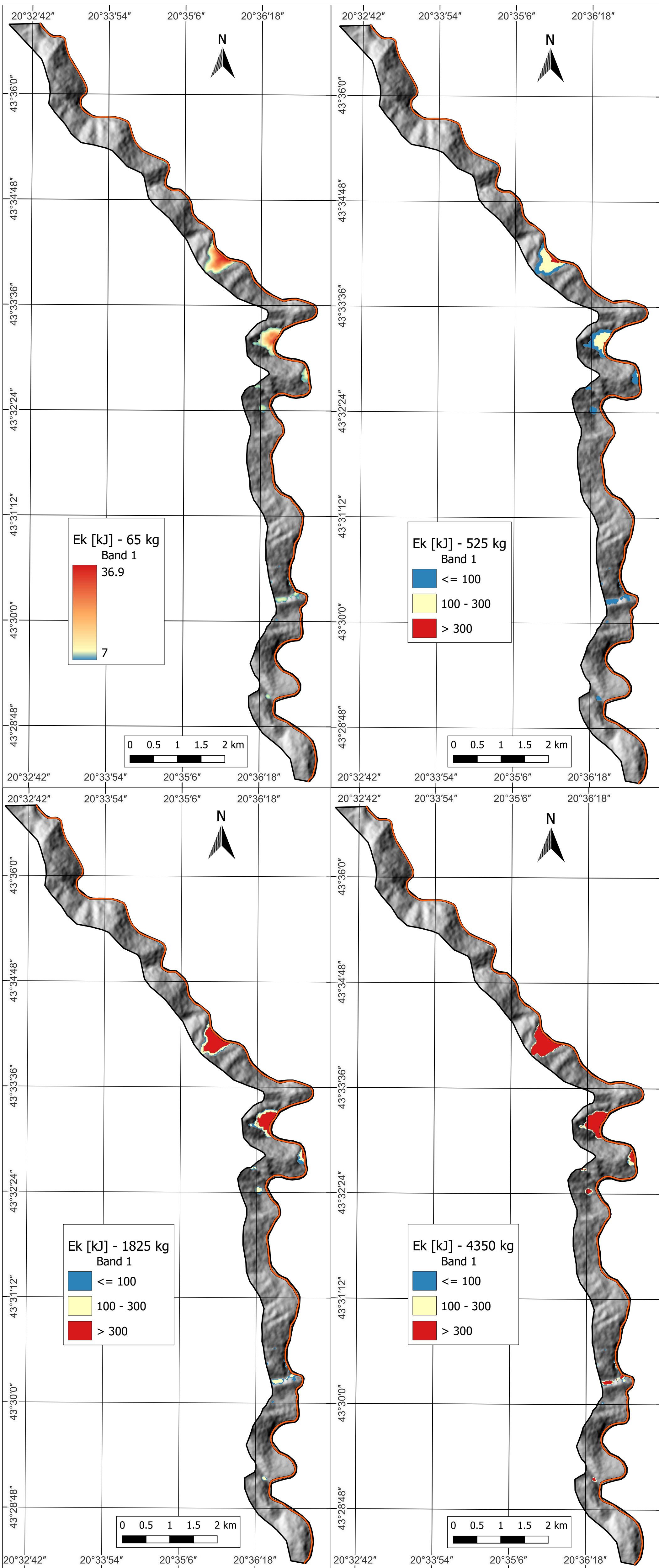
Аутор: Павле Манасијевић



Прилог 4. Карта издвојених тачака одламања, насталих клизањем клина, 1:25 000
Аутор: Павле Манасијевић

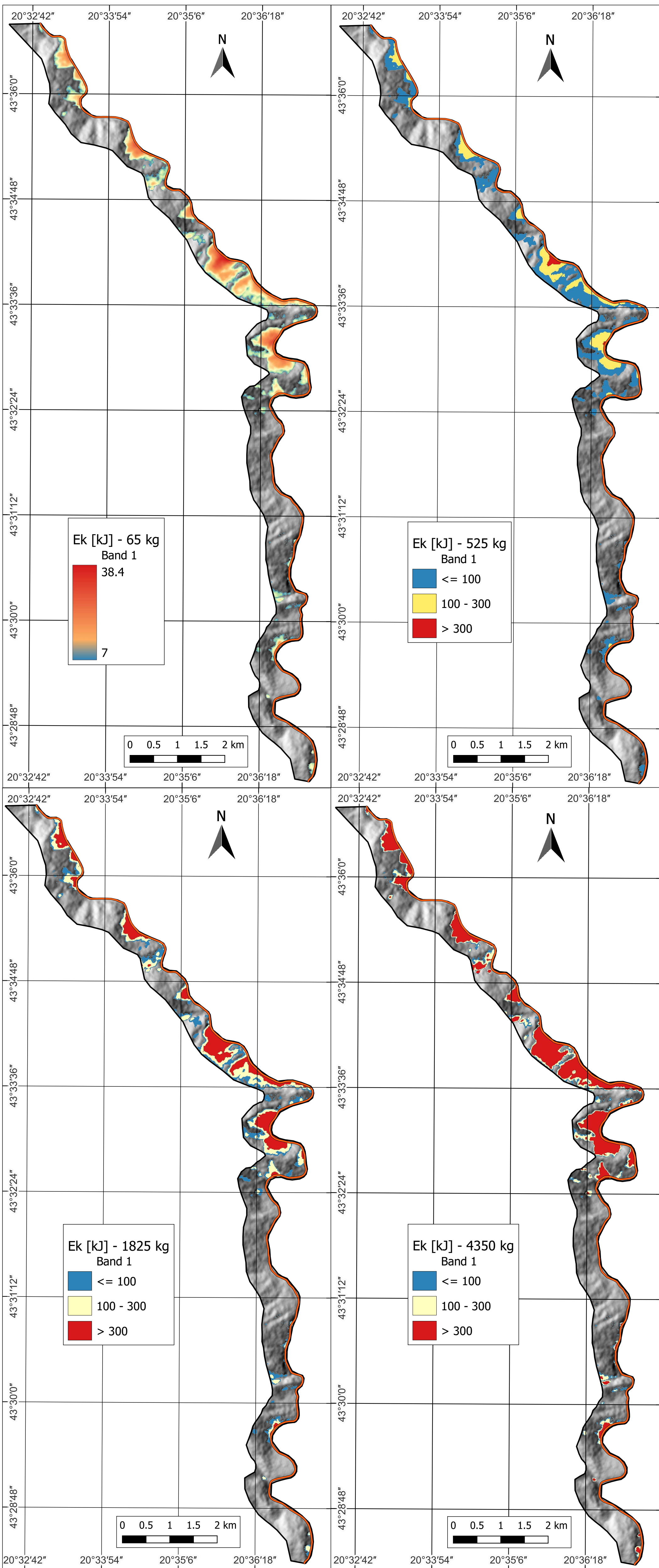


Прилог 5. Карте брзине одрона насталих планарним клизањем и клизањем клина, 1:50 000
 Аутор: Павле Манасијевић



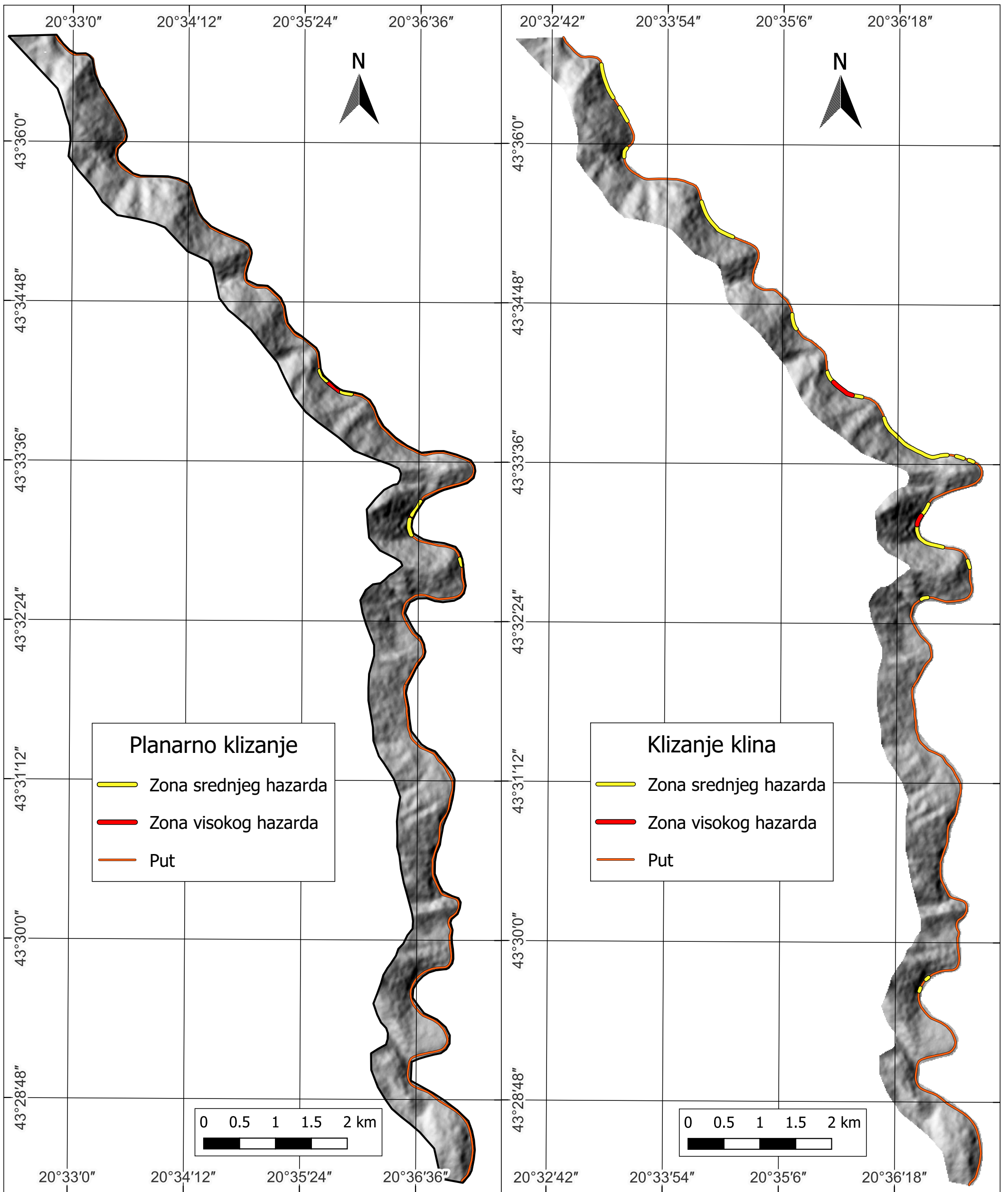
Прилог 6. Карте кинетичке енергије одрона за различите масе блока код планарног клизања, 1:50 000

Аутор: Павле Манасијевић



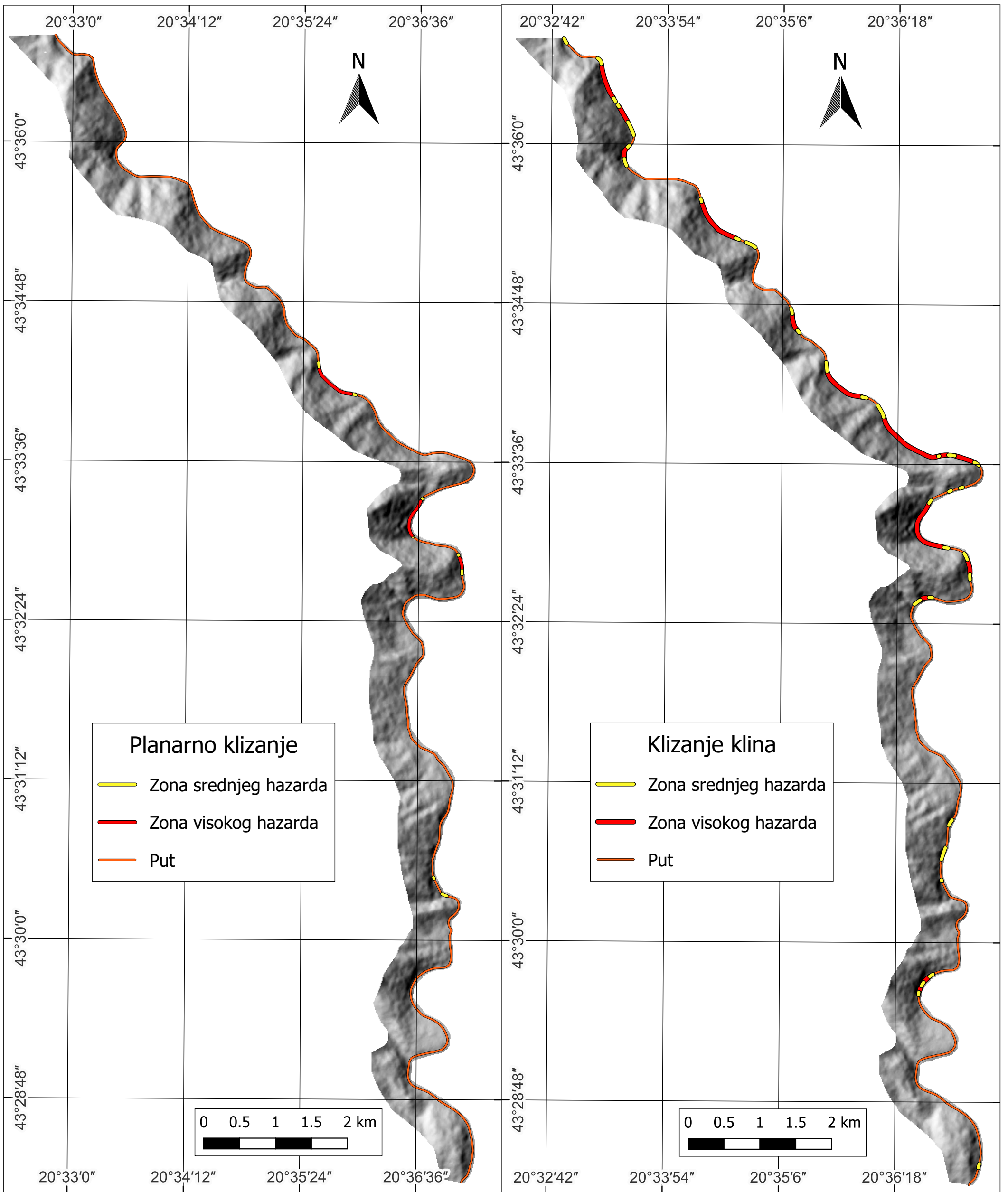
Прилог 7. Карте кинетичке енергије одрона за различите масе блока код клизања клина, 1:50 000

Аутор: Павле Манасијевић



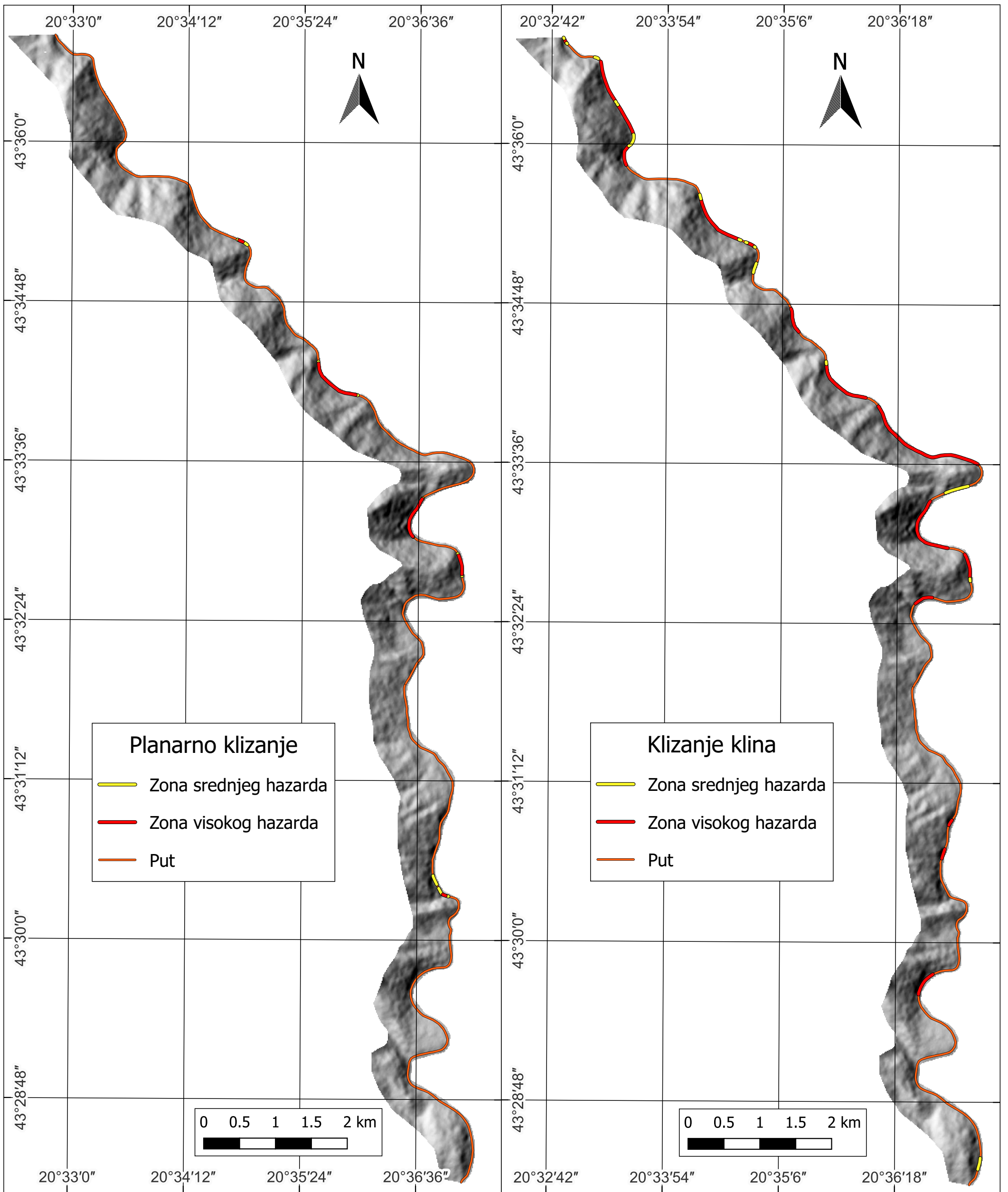
Прилог 8. Карте хазарда од одроњавања, за масу блока од 525 kg, 1:50 000

Аутор: Павле Манасијевић



Прилог 9. Карте хазарда од одроњавања, за масу блока од 1825 kg, 1:50 000

Аутор: Павле Манасијевић



Прилог 10. Карте хазарда од одроњавања, за масу блока од 4350 kg, 1:50 000

Аутор: Павле Манасијевић

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента _ Павле Манасијевић _____
Број индекса _ Г603/21 _____

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

_____ Процена хазарда од одроњавања у регионалним размерама, на
путном правцу Краљево-Ушће _____

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, __19.09.2022_____

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента __ Павле (Зоран) Манасијевић _____

Број индекса __ Г603/21 _____

Студијски програм __ Геотехника _____

Наслов рада __ Процена хазарда од одроњавања у регионалним размерама, на
путном правцу Краљево-Ушће _____

Ментор __ проф. др Милош Марјановић _____

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, __19.09.2022_____

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

_____ Процена хазарда од одроњавања у регионалним размерама, на путном правцу Краљево-Ушће _____

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је *(заокружити једну од две опције)*:

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

Ⓐ јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

Ⓐ Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, __19.09.2022._____

Потпис ментора

Потпис студента

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
 2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
 3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
 4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
 5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
 6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-