



Tudományos Diákköri Konferencia

Gellért-hegy dolomit sziklafalának veszélyességének vizsgálata

Készítette: Kriston Gábor [NTOD96]

Konzulens: dr. Vásárhelyi Balázs



Budapest, 2017.10.26.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	4
Abstract	4
1. Gellért-hegy.....	5
1.1 Geológiai háttér.....	5
1.2 A Gellért-hegy geológiája	6
1.3 Talajvíz.....	7
1.4 Szeizmicitás.....	7
1.5 Kőzetmechanikai tulajdonságok.....	8
2. Sziklarézsűk stabilitásvizsgálata	8
2.1 Kinematikus vizsgálat	9
2.2 Limit equilibrium vizsgálat.....	9
2.3 Ékcsúszás	9
2.4 Kiborulás vizsgálat	10
2.5 Csúszólap kimetsződése	11
2.6 Numerikus vizsgálatok kőzethullásra	12
2.6.1 Kontinuum modell.....	12
2.6.2 Diszkontinuum modell.....	13
3. A Rockfall program ismertetése	15
3.1 Bevezetés.....	15
3.2 A program nehézségei.....	15
3.2.1 A rézsű	15
3.2.2 Anyagtulajdonságok	15
3.2.3 Kezdeti feltételek.....	16
3.3 Megoldás a fent említett nehézségekre.....	16
3.3.1 Rézsű geometria	16
3.3.2 Anyagtulajdonságok	16
3.3.3 Kezdeti feltételek.....	16
3.4 Összefoglalás	16
3.5 A program számítási elve	17
3.5.1 Feltételezések.....	17
3.5.2 Az utazó számítás	17
3.5.3 Az egyenletek	17
3.6 Minta példa bemutatása	19
3.6.1 Eredmények kimutatása.....	24
4. Jellemző metszetek bemutatása, futtatása.....	26

4.1	1. metszet	27
4.2	2. metszet	29
4.3	3. metszet	31
4.4	4. metszet	33
4.5	5. metszet	35
4.6	6. metszet	37
4.7	7. metszet	38
4.8	8. metszet	40
4.9	9. metszet	42
4.10	10. metszet	44
4.11	Veszélytérkép	45
5.	Kőzethullás kockázati minősítési rendszer (Rockfall hazard rating system)	46
5.1	Rézsű magassága	48
5.2	Árok hatékonysága	48
5.3	Átlagos jármű kockázat (Average vehicle risk)	48
5.4	Döntési látótávolság (Decision sight distance)	49
5.5	Útpálya szélesség	50
5.6	Geológiai jellemzők	50
5.6.1	Szerkezeti állapot	50
5.6.2	Felületi súrlódás	50
5.7	Tömb mérete/leeső kőzetek mennyisége	51
5.8	Időjárási viszonyok, csapadék mennyisége	51
5.9	Korábbi kőzethullások	51
6.	Laboratóriumi vizsgálat	52
7.	Összefoglalás	56
8.	Esettanulmány	57
9.	Ábrajegyzék	58
10.	Hivatkozások	60

Bevezetés

A Gellért-hegy Budapest egyik látványossága, mely a közel 230 méteres magasságával, kitűnik a városi látképből. A hegy fő kőzetalkotója a dolomit, mely a meredek keleti oldalon számos veszélyt rejt magában: sziklahullások, kőzetomlások veszélyeztetik mind a gyalogos-, mind pedig a gépjármű forgalmat. Ilyen végzetes baleset történt a '60-as években, az Erzsébet-híd budai hídfőjénél.

A dolgozatom célja a Gellért-hegy keleti oldalán lévő sziklarézsű lehetséges tönkremenetelének vizsgálata. Kimutatható volt, hogy a sziklarézsű tönkremenetele nem következhet be rézsűcsúszás, kiborulás esetleg kifordulás hatására, ám a kőtömbök lehullásának esélyei nagyok [1].

A hegy geodéziai felmérése alapján megvizsgáltuk a lehullott kőtömbök lehetséges pályáit, majd megrajzoltam a hegy veszélyzóna térképét. A kövek vizsgálatára a Rockfall programot használtam, mely a bemenő paraméterek, valamint a rézsű geometriája alapján, megadja a leeső kövek pályáit. Kimutattam, hogy mely zónákba szükséges kőzetfogó háló tervezése, illetve melyek azok, ahol a rézsű tisztítását (kopogózását) különös körültekintéssel kell elvégezni. A numerikus modellezést részletesen ismertetem a dolgozatomban, továbbá a szoftveres vizsgálatot laboratóriumi vizsgálattal ellenőriztem, így megállapítva, hogy melyek azok a paraméterek, melyekre elsődlegesen koncentrálni kell.

Abstract

Gellért Hill is a spectacle in Budapest, which with its approximate 130 meters of height excels from the view of the city. The main rock of the hill is dolomite, which has several dangers on the steep eastern side such as rockfalls. Pedestrians and vehicle traffic are threatened by rockfalls. A fatal accident had happened back in the '60's, because a rockfall occurred close to the buda side of the Elizabeth bridge

The aim of the thesis is to examine the possible failures of the east side of the Gellért Hill. It was evincible that swings and slope failure can not occur, but the possibility of rockfalls are quite high [1].

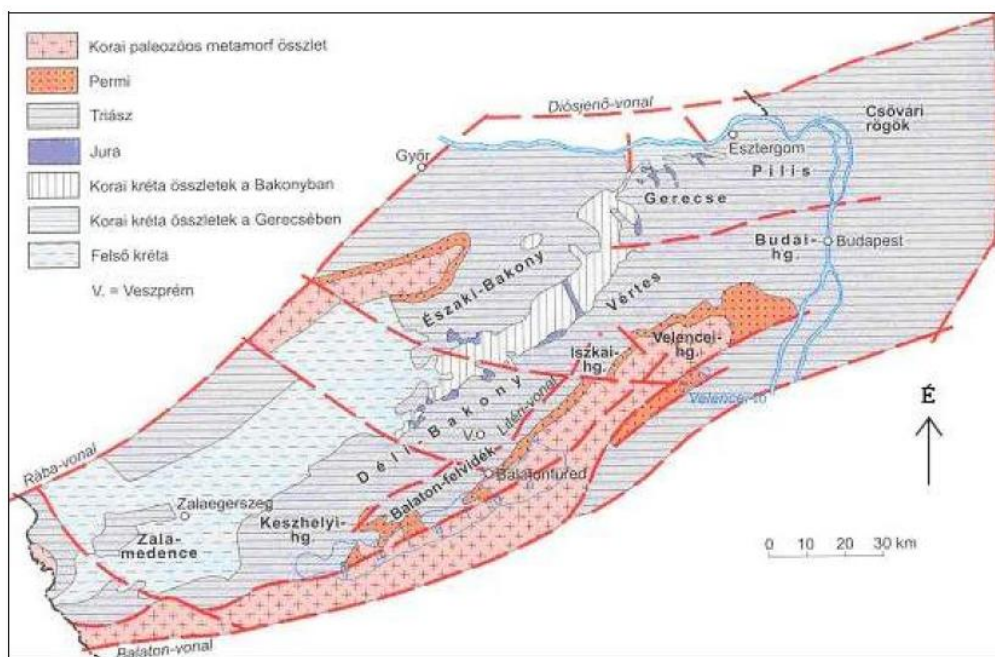
The calculation of the trajectories of the falling rocks was based on the geodetic survey, and later the danger zones was drawn based on the results. Rockfall software was used for the calculations, where the trajectories are calculated from the input parameters and the geometry of the hill. In the thesis, those zones where barriers are necessary were shown, and zones where the cleaning of the cliff's surface should be more precise were shown also. Numerical calculation is described in the thesis, and laboratory experiments were made to compare the results from the calculation and the laboratory, so parameters which are not dependent on other parameters could be identified.

1. Gellért-hegy

1.1 Geológiai háttér

A vizsgált terület a Gellért-hegy keleti oldala, mely a Duna mentén helyezkedik el. A Gellért-hegy a Budai Termáلكarszt rendszer részét képezi, mely karszt a Dunántúli-középhegység északkeleti részén helyezkedik el. Földrajzi értelemben Budapest középpontjában található. Keletről a Duna, északról a Tabán, illetve a Hegyalja út, délről a Bartók Béla út, nyugatról pedig a Kis Gellért-hegy, Sánc utca, Kelenhegyi út határolja.

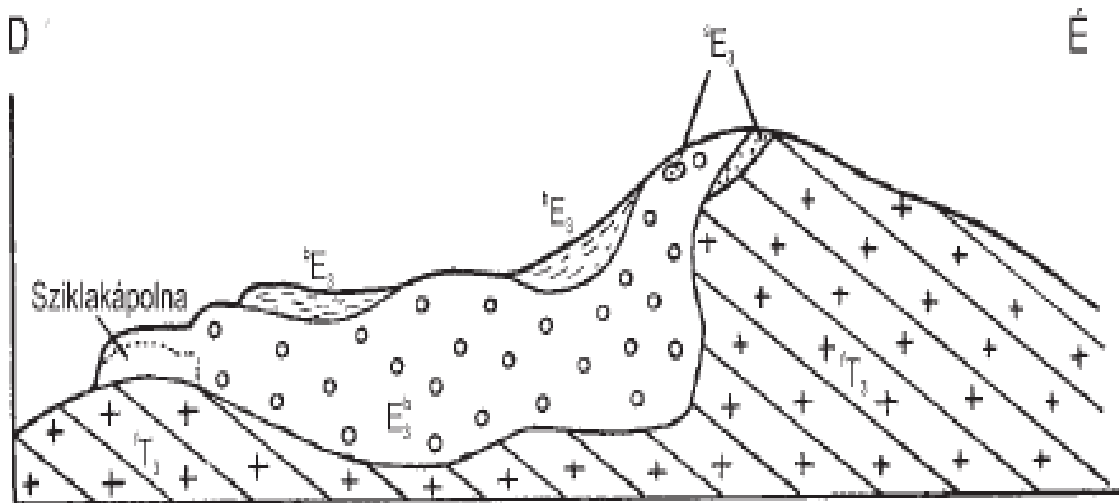
„Geológiai értelemben a határok tektonikai vonalak: északnyugatról a Rába-vonal, északról a Diósjenői vonal, délről pedig a Balaton-vonal határolja.” [2] Nyugat felé földtani alapon nem választható el az alaphegységi pászta folytonossága következtében, a keleti, félkeleti határ pedig még nem tisztázott. [2]



1. ábra Geológiai határok [2]

A Gellért-hegy a Budai-hegység része, mely a Dunántúli-középhegység keleti tagja. Magyarország kistájainak a katasztere szerint a Budai-hegység alakrajzilag alacsony középhegység. „Mai geomorfológiai képét a hosszanti, mozaikosan, helyenként mikrotektonikusan összetoredeztetett sasbérorcok, eltérő mélységbe süllyedt hegységközi medencék, az eróziós völgyek, a laza üledékekből épült medence-dombságok deráziós formakincse, keskenyebb-szélesebb pedimentek és glaciós formacsoportja jellemzik. Karsztos formákban gazdag domborzatát számos barlang teszi változatossá. Minden oldalról középhegységi főtörések határolják. Szerkezeti-morfológiai alkata alapján töréses szerkezetű árkos medencékre és sasbércekre különült középhegység középhegység domborzattípusát képviseli”. [3]

1.2 A Gellért-hegy geológiája

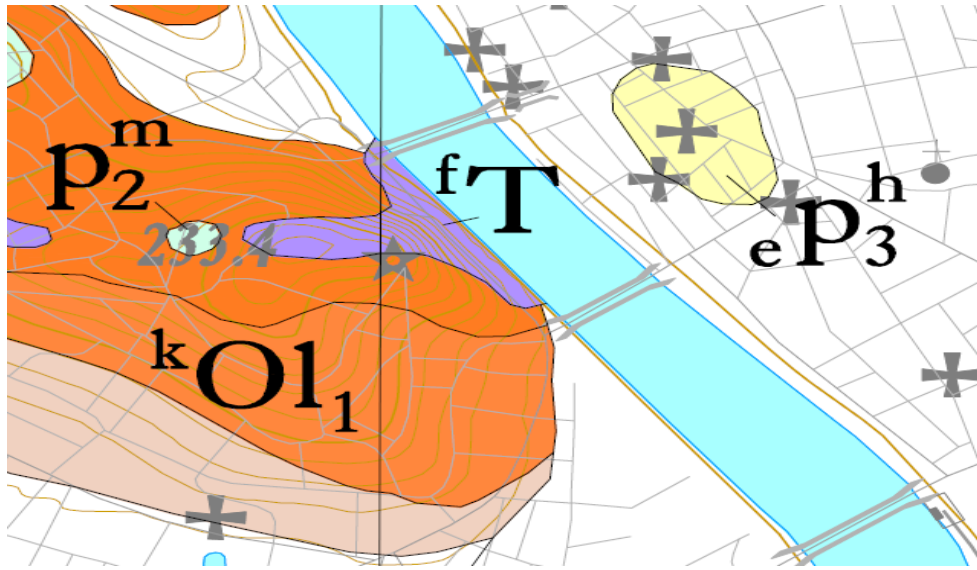


2. ábra Dolomit helyzete a Gellért-hegy metszetében [5]

A Gellért-hegy Budapest központjában, a Duna budai oldalán helyezkedik el. Környezetéből a közel 230 méteres magasságával emelkedik ki. A Citadella előtt elhelyezkedő Szabadság szoborral a tetején, Budapest egyik látványossága.

A hegység fő kőzete triász dolomit, de budai márga, felső-eocén kori breccsa-konglomerátum, valamint bryozoás márga települések is megfigyelhetők. A rétegsorban betelepülésként tűzköves mészkő jelenik meg, ami a Gellért téri sziklakápolna alatt bukkan ki. A felső-eocén, eocén rétegsor mészkőanyagú konglomerátummal vagy tűzkőanyagú breccsával, homokkővel kezdődik. [4] A hegy meredek, keleti oldalát kétféle dolomit alkotja, melyek közül a legjellemzőbb a triász dolomit, e képződmények körülbelül a Duna középvonaláig találhatóak a felszín közelében, ettől keletre, például a Kálvin térnél már 700 méteres mélységben van jelen [5]. „Az Erzsébet híd budai hídfőjével és a Rudas fürdővel szemközt, robbantással kialakított falon egészen közről nézhető meg a breccsásan feltöredezett dolomit [5].” A Gellért-hegyen három fő terciér feszültségtér hatása mutatható ki és valószínű egy késő triász deformáció is. Magyarország Földtani Térképe alapján az alapkőzet középső-pleisztocén kori édesvízi mészkő (p_2^m), alsó-oligocén kori kiscelli agyag (kO_1), valamint felső-triász kori földolomit (fr). A

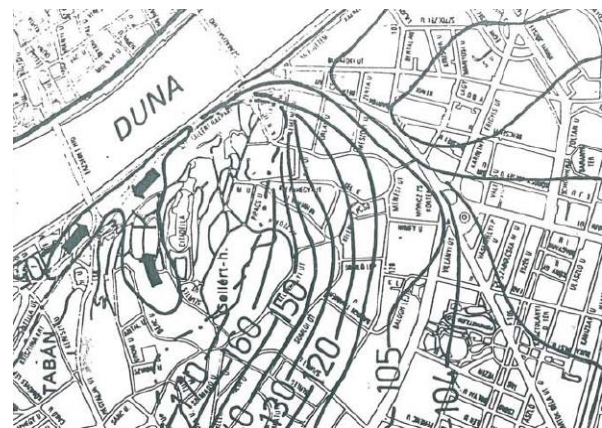
helyszíni terepbejárás során is megerősíthető, hogy a keleti oldalon, észak-déli irányba dolomit található.



3. ábra Gellért-hegy földtani térképe [19]

1.3 Talajvíz

A Budapest Építéshidrologiai Atlasza szerint a talajvízszint változó, a keleti oldalon a rakpart irányába folyik le a víz, míg DDNy-i oldalon a magassággal változik a vízszint. A keleti oldalon a rakpart szintjén előbukkanó források is hozzájárulnak a talajvízszinthez, valamint a Duna vize magas vízálláskor is befolyásoló szerepet tölt be a talajvízszint változtatásában. Korábbi fúrások (2007. január) a Gellért-hegy Hegyalja út felőli oldalán kimutatták, hogy a karsztvíz szintje a talajszint alatt körülbelül 10-11 méterrel lejjebb helyezkedik el. [6]



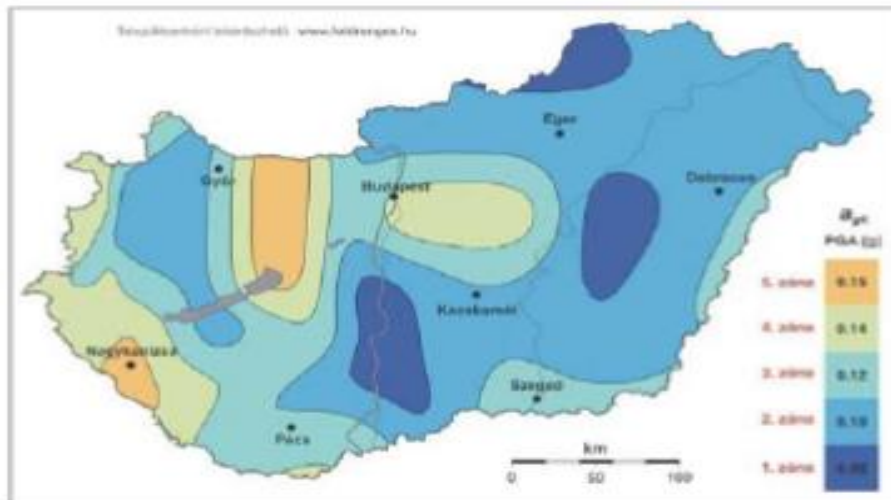
4. ábra Talajvíz viszonyok a Gellért-hegynél [18]

1.4 Szeizmicitás

A terület szeizmicitási besorolására az Európai Unióban jelenleg hatályos és Magyarországon is érvénybe helyezett szabványok

- MSZ EN-1998-1:2008: „Eurocode 8: Tartószerkezetek tervezése földrengésre 1. rész: Általános szabályok, szeizmikus hatások és az épületekre vonatkozó szabályok” és kapcsolódó „Nemzeti Melléklet”
- MSZ EN 1998-5:2009: „Eurocode 8: Tartószerkezetek földrengésállóságának tervezése 5. rész: Alapozások, megtámasztó szerkezetek és geotechnikai szempontok”.

A szabvány alapján a területre a négyes zónába sorolható, ahol a jellemző horizontális gyorsulás az alapkőzeten $a_g R=0,14\text{m/s}^2$. Ez a gyorsulási érték 50 év alatt 10% valószínűséggel fordulhat elő, azaz 475 évenként egyszer.



5. ábra Talaj gyorsulási értékek Magyarországon [7]

1.5 Kőzetmechanikai tulajdonságok

A vizsgált részen a már említett triász kori dolomit a jellemző kőzet. A dolomit fő kőzetmechanikai paramétereit a szakirodalmak alapján vettem. A szakirodalmakban a sűrűséget, a Schmidt kalapáccsal mérhető visszapattanási értékeket (R_N), valamint a Poisson tényezőt kerestem ki. Az adatok a következők:

	Paraméterek		
Kőzet neve	Sűrűség [kg/m ³]	Visszapattanási érték [-]	Poisson-tényező [-]
Dolomit	2750 - 2800	40 - 60	0,1 - 0,35

1. táblázat Dolomit tulajdonságai [8]

2. Sziklarézsűk stabilitásvizsgálata

A sziklarézsűk biztonságának meghatározására vonatkozó módszerek az idő múlásával hatalmas fejlődésen estek át. A napi gyakorlatban a sziklarézsűk külszíni bányák, út-, vasútbevégek, illetve természetes hegyeknél fordulnak elő. A biztonság számítására megválasztott módszer többek közt függ a kőzet szilárdságától, a tönkremenetel várható módjától, illetve a módszer korlátjaitól. Általánosságban elmondható, hogy az elsődleges szempontok a sziklarézsű ellenőrzésekor a következők:

- „meghatározni a sziklarézsű biztonságának körülményeit,
- megvizsgálni a tönkremeneteli módokat,
- meghatározni a rézsű érzékenységet/fogékonyságát a különböző mechanikai hatásokra,
- megvizsgálni és összehasonlítani a különböző megoldásokat,
- a lehető legbiztonságosabban megtervezni a sziklarézsűt”. [9]

A megválasztott módszer függ a tönkremenetel módjától. Többféle számítási eljárás használható, annak függvényében, hogy milyen tönkremenetelt veszünk figyelembe a sziklarézsűknél. A módszerek a következők lehetnek, a teljesség igénye nélkül:

- „Kinematikus vizsgálat,
- Limit equilibrium vizsgálat,
- Közethullás vizsgálat,
- Numerikus vizsgálatok”. [9]

A limit equilibrium illetve a numerikus módszerek tovább bonthatók alosztályokká, ezeket az egyes módszerek bemutatásánál ismertetni fogom. A dolgozatomban a közethullást vizsgálom, ezért a módszerek bemutatása nem a felsorolással megegyező sorrendben történik, a közethullás vizsgálatot utoljára hagyom.

2.1 Kinematikus vizsgálat

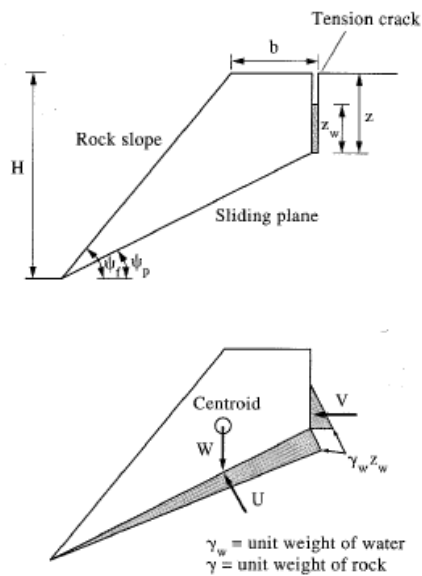
E vizsgálat során olyan tönkremenetelt keresünk, melynek előfordulása valós. E módszer főként azon közettömbök tömegét, valamint a tagoltságait veszi figyelembe, melyek nagymértékben hozzájárulhatnak egy esetleges tönkremenetelhez. Ez a számítási mód főként sztereografikus ábrázolással szemléltethető, illetve erre az kialakított speciális szoftverekkel.

2.2 Limit equilibrium vizsgálat

E módszert gyakran használják olyan sziklarézsűknél, ahol a tönkremenetel, vagy ékcsúszás, vagy kiborulás, esetleg a csúszólap kimetsződésével jön létre. A vizsgálat lényege, hogy vagy egy biztonsági tényezőt, vagy pedig egy nyírószilárdsági értéket kapjunk, ahol már a rézsű megfelel. Noha a legtöbb vizsgálat esetében a tönkremenetek komplex módon jönnek létre, máig ez az egyik legelterjedtebb vizsgálat a közetmechanikában. E módszerek lényege, hogy megvizsgálja a rézsút stabilizáló, illetve destabilizáló erők hányadosát. Ha ez a hányados nagyobb, mint egy akkor a rézsű megfelel, ha kisebb akkor nem. A vizsgálat három alvizsgálatra bontható, melyek a következők: ékcsúszás, kiborulás, illetve csúszólap kimetsződése.

2.3 Ékcsúszás

Ékcsúszás esetén feltételezzük, hogy a tönkremenetel vagy egy sík mentén jön létre, vagy pedig kétsík metszéséből adódóan egy ék alakú tömb csúszik ki. Mivel ezek az ékek nem gördülnek, ezért kijelenthető, hogy az erők a kicsúszni akaró test középpontján átmennek, továbbá kijelenthető, hogy a csúszó felületen lévő pontok a tönkremenetel határán vannak. A számítás során stabilizáló, illetve destabilizáló erőket számolunk, és ha a hányadosa e két erőnek nagyobb, mint 1, akkor a rézsű megfelel ékcsúszásra. A stabilizáló erők a csúszó felületen vannak, ezek a súrlódási szögből, illetve a kohézióból számolhatók, míg a destabilizáló erő magának az éknek az önsúlya. A 6. ábra a biztonsági tényező számításánál az egyenlet figyelembe veszi a rézsű hajlásszögét, a repedés mélységét, a víznyomásból keletkező vízszintes erőt, illetve az ugyanebből a nyomásból keletkező felhajtó erőt, valamint a rézsű magasságát.



$$SF = \frac{c'(H-z) \csc \psi_p + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi'}{V \cos \psi_p + W \sin \psi_p}$$

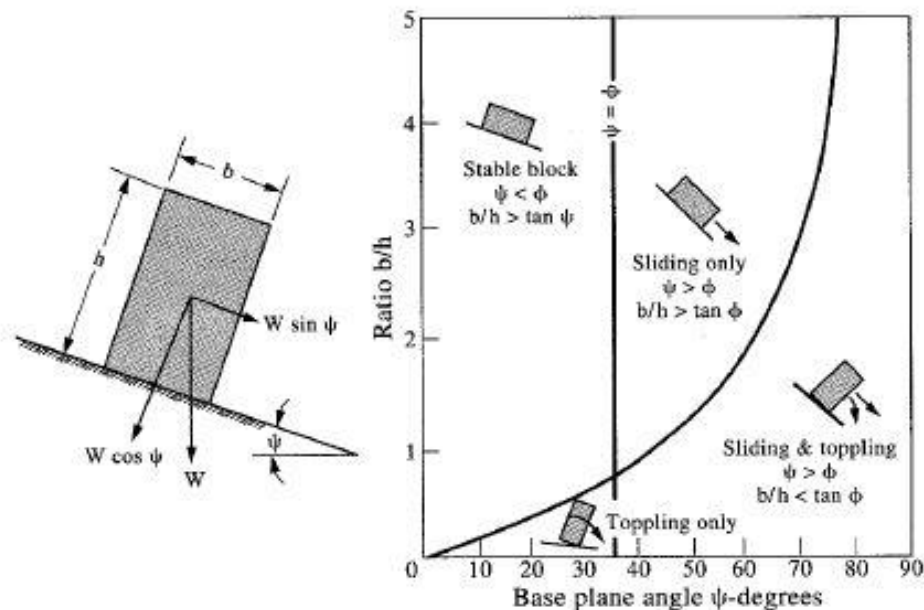
Where:

- SF = safety factor
- c' = effective cohesion
- ϕ' = effective friction angle
- ψ_p = dip of slide plane
- W = weight of block
- U = uplift force due to water pressure along slide plane
- V = force due to water pressure in tension crack
- H = slope height
- z = tension crack depth

6. ábra Ékcsúszás számítása [9]

2.4 Kiborulás vizsgálat

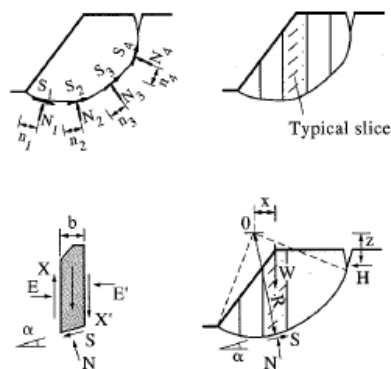
Kiborulás vizsgálat akkor jön létre, ha a rézsű kellően tagolt, illetve a tagoltsági felszínek nem elég érdesek ahhoz, hogy megtartsák a közettömböket. Ha a közettömb eredő erője a tömb belső magján kívül hat, akkor a kiborulási tönkrementel létrejön. A közettömb szélességének, illetve magasságának aránya, valamint a rézsű hajlásszögének a függvénye megmutatja, hogy a sziklarézsű kiborulásra, vagy ékcsúszásra megy-e tönkre. A 7. ábra szemlélteti, hogy kiborulás vagy csúszás miatt megy-e tönkre a rézsű, a keresztmetszeti geometria, valamint a rézsű hajlásszögének függvényében.



7. ábra Kiborulásvizsgálat számítása [9]

2.5 Csúszólap kimetsződése

Nagyon gyenge kőzetek esetén, ahol a kőzet szilárdsága megegyezik a kőzetben ébredő feszültséggel, a csúszólap kimetsződhet. Ez hasonló elven működik, mint a talajok esetében, a csúszólap alakja lehet kör, logaritmikus, illetve egyéb görbületű. A számítás során feltételezni kell, hogy a rézsű egy bizonyos csúszólap mentén megy tönk्रे, majd ennek a csúszólapnak a biztonságát kell meghatározni. Ha a rézsű megfelel, akkor új csúszólapot kell keresni, és egészen addig iterálni, míg a legkisebb biztonsági tényezőt meg nem kapjuk. Ha ez a legkisebb érték nagyobb, mint egy, akkor a rézsű megfelel, ellenkező esetben nem felel meg. Egy körcsúszólap vizsgálatát a 8. ábra szemlélteti.



$$SF = \frac{\sum SF (S \sec \alpha)}{\sum (W \sin \alpha) + Hz / R}$$

Where: SF = safety factor
 S = effective shear strength
 (i.e. $S/\Delta b = c' + \sigma_n \tan \phi$)
 α = dip of base of slice
 W = weight of slice
 H = hydrostatic thrust from tension crack
 z = depth of tension crack (relative to O)
 R = length of moment arm.

8. ábra Csúszólap általi tönkremenetel számítása [9]

Az évek során különböző számítási módok születtek:

- Fellinius módszere (1927),
- Módosított Bishop módszer (1955),
- Janbu módszer (1968),
- Svéd nyomatéki módszer (1970),
- Spencer módszer (1967),
- Morgenstein Price módszer (1965),
- Sarma módszere (1973).

2.6 Numerikus vizsgálatok közethullásra

A hagyományos stabilitási vizsgálatokkal szemben a numerikus vizsgálatoknak megvan az az előnye, hogy bonyolultabb modellek számítását is végre lehet hajtani. A gyakorlatban a sziklarézsűk állékonysági vizsgálatainál a geometria bonyolultsága, az anyag anizotropikus viselkedése, nemlineáris viselkedések, tapasztalhatók. A szoftverek és a számítógépek fejlődésével a numerikus modellezés is fejlődött, így lehetőség van e bonyolultabb modellek pontosabb számítására is. A sziklarézsűk állékonyságának numerikus vizsgálatainál két fő módot különböztethetünk meg, melyek a következők:

- kontinuum modell,
- diszkontinuum modell.

A diszkontinuum modell három kisebb számítási módra bontható, melyek címeit - a jobb megérthetőség érdekében - angolul fogom ismertetni. A három mód a következő:

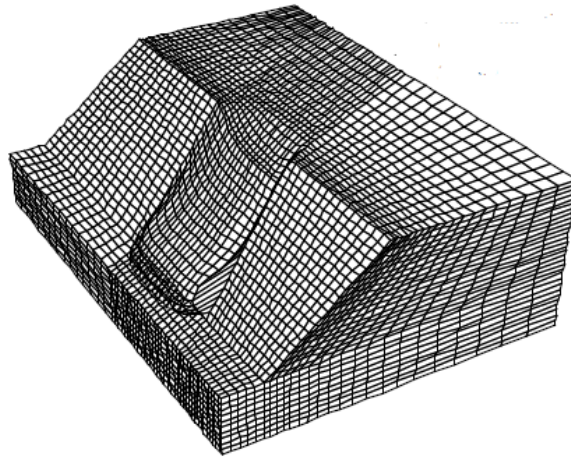
- Distinct-element method,
- Discontinuous deformation analysis,
- Particle flow codes.

E három módszer a diszkontinuum modell ismertetésénél fogom mélyebben részletezni.

2.6.1 Kontinuum modell

E modellt rézsűállékonyságnál alkalmazzák, s főként a véges differencia, valamint a véges elem módszer elveit követi. A módszer lényege, hogy a vizsgált rézsűt tartományokra, ún. véges elemekre bontja (diszkretizálja), majd ezekkel az elemekkel végzi el a numerikus számításokat, és alkalmazza a fizikai összefüggéseket, mint a feszültség-alakváltozás kapcsolata, egyensúlyi differenciálegyenletek stb. A kontinuum modellek jól alkalmazhatók erős, gyenge kőzeteknél, valamint erősen tagolt kőzettömbök esetén.

A kétdimenziós kontinuum modellek síkbeli alakváltozás állapotot definiálnak, melyek inhomogén, változó keresztmetszetű rézsűk esetén nem mondhatók helyes feltételezésnek. A mai véges differencia elven működő szoftverek (FLAC3D, VISAGE), már lehetővé teszik a rézsűk háromdimenziós vizsgálatát, így pontosabb képet kaphatunk a rézsű állékonyságáról.



9. ábra Rézsű modellre generált háló modellje [9]

2.6.2 Diszkontinuum modell

A diszkontinuum modellt másnéven lehet mondani diszkrét elemes vizsgálatnak is. A diszkrét elemes vizsgálat lényege, hogy a rézsű nem egy nagy közettömbként modellezzük, hanem az egyes blokkokat külön-külön definiáljuk, s a blokkok közti kapcsolatot is. Így az egyes blokkok sokkal szabadabban tudnak elmozdulni egymáshoz képest, amivel realisabb képet kaphatunk a rézsű tönkremenetelét illetően.

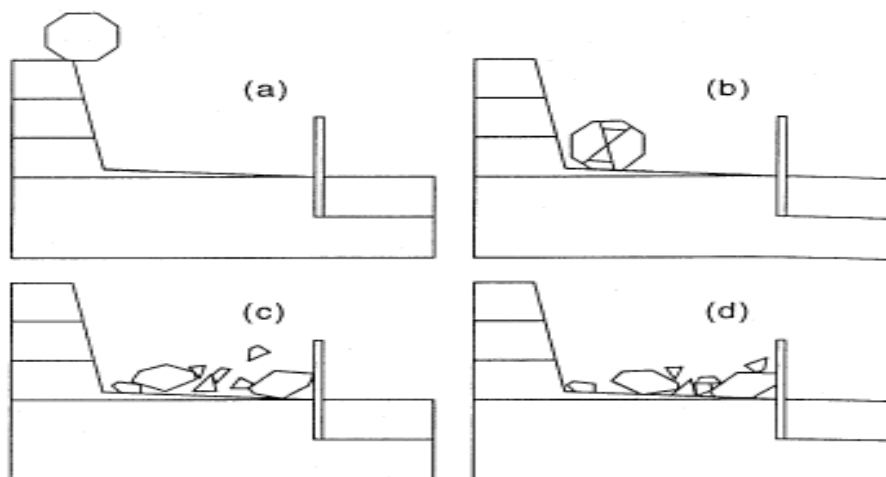
2.6.2.1 Distinct element method

A distinct element method-ot 1971-ben fejlesztette ki Cundall, majd 1993-ban Hart dolgozta tovább. A módszer lényege, hogy a közettestek kvázi-merev állapotúak és a tömbök egymáshoz képest elmozdulhatnak. Emiatt a modell kétfajta mechanikus viselkedést mutat: a diszkontinuitást, illetve a szilárd anyagú viselkedést. A distinct element módszer jól alkalmazható sziklarézsűk stabilitás vizsgálatánál, ugyanis jól lehet modellezni az egyes tömböket, s a tömbök relatív elmozdulásait, valamint a tömbök közti kapcsolatot. A módszer jól használható gyenge kőzeteknél.

A olyan külső hatások, mint például a pórusvíznyomás vagy a szeizmikus hatások szintén jól modellezhetők az említett módszerrel. A vízfolyások modellezése a közettömbök közti kapcsolatoknál van figyelembe véve, míg a köveket vízzárónak tekinti a módszer. E módszer igen hasonlít a véges-differenciák módszerére.

2.6.2.2 Discontinuous deformation analysis

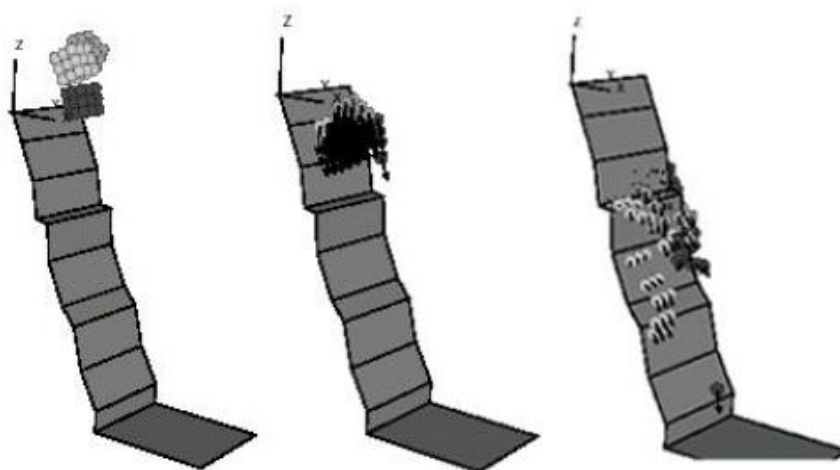
Ezt a módszert Shi fejlesztette ki 1989-ben, és szintén a tagolt kőzetek számítására használható, ám a stabilitás vizsgálat helyett kifejezetten közhullásra alkalmazható. A módszer annyiban különbözik az előző módszertől, hogy itt az ismeretlenek elmozdulások, míg az előző módszerben az erők az ismeretlenek. A módszer a végelemek módszerét veszi alapul, hiszen az ismeretlen elmozdulások kiszámításához, hasonló mátrix műveleteket hajt végre. A számítási elv az, hogy az egyes blokkok a véges elemek, és ezekkel számol a továbbiakban a program.



10. ábra Kőzettest tönkremenetele kőzethullás után [9]

2.6.2.3 Particle flow codes

Ennél a módszernél a kőzettömböket gömb alakú testekkel modellezi a program. A számítás során lehetőség van ezeket a testeket összekapcsolni, ezáltal több kőzettest együttes vizsgálata válik lehetővé. Ezzel a módszerrel lehetőség van szemcefolyás, blokkcsúszás, ép kőzetek törése, valamint dinamikus hatások vizsgálatára. A nyíró vagy húzóerők miatt a tömbök között létrejövő alakváltozások meghatározására is hasznos ez a módszer. Ezzel a módszerrel olyan tönkremenetek vizsgálhatók, melyek több nagy kőzettömböt vizsgálnak, s a tönkremenetel folyamán ezek a kőzettömbök szintén tönkre mennek.



11. ábra Kőzetlabdák hullása [9]

Ezen túl a sziklarézsűket lehetőség van kőzethullásra megvizsgálni. A következő fejezetben ismertetem mélyebben az eljárást, illetve bemutatom a szoftvert.

3. A Rockfall program ismertetése

3.1 Bevezetés

A mérnöki gyakorlatban a lehulló kövek becsapódási helyének a pontos meghatározása igen nehézkes. Ezeket a becsapódási helyeket a statisztika, valamint a valószínűségszámítás segítségével jósolhatjuk meg, ám a pontos meghatározása, szinte még így is nehézkes, ugyanis a sziklák érkezési helye függ a rézsű geometriájától, a felszíntől, a görgeteg kezdeti sebességétől stb. Ezek a bemenő paraméterek nehezen meghatározhatók, s az eredmény érzékeny ezen bemenő értékek változásaira. A Rockfall program segítséget nyújt a mérnököknek abban, hogy kellő pontossággal tudják meghatározni a kövek becsapódási helyét, sebességét, valamint a becsapódás előtti pillanatban a kövek mozgási energiáját.

A program segítségével útmenti sziklafalak, esetleg hegyi lakóépületek biztonságát vizsgálhatjuk, valamint megtervezhetjük a becsapódó kövek felfogó szerkezetét is, melyet méretezhetünk.

A következő fejezetek során ismertetni szeretnénk a program nehézségeit, működési elvét, a bemenő paraméterek helyes megválasztását, valamint bemutatnánk magát a programot egy mintapéldán keresztül.

3.2 A program nehézségei

3.2.1 A rézsű

Mivel a veszélyes sziklarézsűk területe általában számottevően nagy, igen nehéz megválasztani azt a mértékadó keresztmetszetet, amit vizsgálni szeretnénk. Az egész rézsű geodéziai felmérése, valamint több keresztmetszet vizsgálata általában nem költséghatékony, így nem is alkalmazzuk. A gyakorlatban általában néhány jellemző keresztmetszetet vizsgálunk, s ezekből határozzuk meg a kritikus pontokat. A keresztmetszet megrajzolása is nagy mértékben befolyásolja a hulló kövek esési pályáját, hiszen gondoljunk bele, hogy mennyire másképp viselkedik egy szikladarab, ha a rézsű végét lecsapjuk, vagy ha van egy kisebb bukkanó a rézsűben, ahol megpattanhat. Az első esetben a szikladarab aránylag közel érne földet a rézsű lábához, míg a második esetben megpattanhat, és jóval távolabb állhat csak meg. Ezeknek a geometria tulajdonságoknak a pontos meghatározásával nagy mértékben csökkenthetjük a projekt költségeit.

3.2.2 Anyagtulajdonságok

Az anyagtulajdonságok akár az egész rézsű mentén változhatnak, ezzel befolyásolva a kövek visszapattanását. Ha az anyagtulajdonságok állandónak tekinthetők a rézsű mentén, akkor is nehéz meghatározni a rézsű visszapattanási tényezőjét, azaz, a becsapódás előtti sebesség, valamint a kilépési sebesség hányadosát. A visszapattanási tényezőnél megkülönböztetünk a rézsűre merőleges (R_N), valamint azzal párhuzamos (R_T) értékeket. Általában a normális visszapattanási tényező esetén 0,3-0,5 közé eső értéket szokás választani, míg a tangenciális visszapattanási tényező esetén 0,8-0,95 a gyakorlatban használt tartomány. A növényvel borított, illetve a puha altalajú területek esetén az alsóbb tartományból célszerű kiválasztani a visszapattanási tényező értékét, míg kőzetek, esetleg aszfalt esetén a felső tartomány megfelelő a számunkra. A visszapattanási tényező változása nagy mértékben befolyásolja a végeredmény kimenetelét, így nagy körültekintéssel ajánlott ezen érték megválasztása. A számítást

nehezítheti, hogy ez a visszapattanási tényező a rézsű mentén változhat, hiszen nem mindegy, hogy laza törmelékes területre érkezik a leeső kő, esetleg egy keményebb sziklás részre.

A visszapattanási tényezőt meghatározni nehézkes és ennek az értéknek az eloszlását megmondani még nehezebb. A mérnöki gyakorlatban ezért a back analysis-szal határozzák meg egy adott rézsű visszapattanási tényezőjét. Ehhez tudjuk a kőtömb becsapódását, a tömegét, az egyes becsapódási pontokat a rézsűn, egyedül a kiinduló pontot nehéz meghatározni, de egy tartományt meghatározhatunk, s így jóval lecsökkentettük a lehetséges kiindulási pontokat. Számításnál célszerű addig változtatni a visszapattanási tényező értékét, míg meg nem kapjuk a valós becsapódási helyet. Ez a módszer igen egyszerű és megbízható.

3.2.3 Kezdeti feltételek

A legtöbb rézsű, ami annak a veszélynek van kitéve, hogy kőzet hulljon le róla, általában meredek, és több kőtömb van kitéve a leesés veszélyének. Ez azt eredményezi, hogy egy kőtömb tulajdonképpen majdnem bárholonnan kiindulhat a rézsű mentén. Noha a kiindulási pont változása kevésbé van hatással az eredményre, nem úgy, mint a visszapattanási tényező, vagy a rézsű geometriája.

A veszélyes kőtömbök tömege szintén nagy számú eloszlást mutat. A kicsi, párkilogrammos kőzettömböktől egészen a több tonnás tömbökig előfordulhatnak potenciális tömbök. Természetesen normális eloszlást követve, a tonnás tömbök előfordulása meglehetősen alacsony. A tömbök tömegének a meghatározására azért van szükség, mert a felfogó szerkezetet a becsapódó tömb energiájából számítjuk, s az energia meghatározásához pedig nélkülözhetetlen adat a tömb tömege.

3.3 Megoldás a fent említett nehézségekre

A rézsű geometriájának változatossága, a bizonytalan anyagtulajdonságok valamint az ismeretlen bemenő paraméterek meghatározása leegyszerűsíthető valószínűségszámítással.

3.3.1 Rézsű geometria

A rézsű geometria bizonytalanságát kiküszöbölhetjük azzal, hogy az egyes csúcsok koordinátáit normál eloszlással definiáljuk. Ezzel szimulálhatjuk a lejtő változását, s eredményként, érzékenységvizsgálatot készíthetünk, vagy meghatározhatjuk, hogy hol változtassunk a rézsű geometriájában a jobb eredmény érdekében.

3.3.2 Anyagtulajdonságok

Mind a normális, mind pedig a tangenciális visszapattanási tényező értékét modellezhetjük normális eloszlással. Ha megfelelő nagyságú tartományt választunk, akkor lefedhetjük a puha talaj, illetve az aszfalt értékét is.

3.3.3 Kezdeti feltételek

A leeső kőtömböt különböző helyekre rakhatjuk, így modellezve azt, hogy bizonytalan a kiindulási pont. Általában a csúcsok környezetébe érdemes kiválasztani ezeket a pontokat, így a becsapódó kő mozgási energiája a lehető legnagyobb lesz. A tömbök tömegét szintén megadhatjuk normális eloszlással, megbecsülve a legnagyobb, illetve a legkisebb tömeget, ami a rézsű mentén előfordul.

3.4 Összefoglalás

Valószínűségszámításból kapott eredmények esetén fontos, hogy konzervatívak maradjunk a tervezés során. Mint bármely statisztikai számítás során, itt is előfordulhat, hogy a legrosszabb

eset nincs az eredmények között. Példaként említhetünk egy falat, melynek a célja, hogy a lehulló köveket megfogja. Ebben az esetben, ha a legrosszabb eset nem volt az eredmények között, akkor akár az úttestre, vagy lakóházra eshet egy kőtömb, mely komoly anyagi károkat okozhat, vagy akár emberéleteket is veszélyeztethet. Tervezés során ezért mindig mérlegelni kell azt a kockázatot, amit egy-egy kőtömb okozhat.

3.5 A program számítási elve

A program a számítások során a köveket pontszerű testként kezeli. Hasonló egyszerűsített eljárást már Hoek is kidolgozott 1987-ben. A program hasonló módon számol, mint Hoek modellje, helyenként egyszerűsítésekkel élve. Jelen algoritmus a programban lehetővé teszi az egyes rézsű szakaszok egymás fölé hajlását, a kövek felfele csúszását, illetve a kőzetfogó hálók alkalmazását. Azáltal, hogy a program pontszerű testnek kezeli a köveket, a kő alakját, méretét, valamint a perdületét elhanyagoljuk a számítások során. Az egyszerűsítés előnye, hogy a program gyorsan elvégezi a szükséges számításokat.

A számítást három fő részre lehet felbontani: kezdeti, utazó, valamint csúszó számításra. A kezdeti számításnál a program ellenőrzi, hogy a bemenő paraméterek érvényesek-e, illetve felállítja a kiindulási állapotot.

Az utazó számítás során a program a kő útját határozza meg. A kövek parabolikus pályát tesznek meg, melynek egyenletét a program kiszámolja. Ha a parabola pályának, illetve a rézsűnek metszéspontja van, ott a kő visszapattan. Ekkor egy új sebességet számol a program a visszapattanási együtthatóból, az új sebességből pedig meghatározza az irányt, amiből az újabb parabola egyenletét kapjuk meg. A program egészen addig végzi el a műveleteket, míg a visszapattanás utáni sebesség kellően alacsony.

A csúszási számításnál a kő, illetve a rézsű kapcsolatát számolja a program. A következőkben az utazó számításról lesz szó bővebben.

3.5.1 Feltételezések

A program a lehulló köveket infinitezimálisan kicsiny, pontszerű testként modellezi. Nem veszi figyelembe a kövek alakját. Az egyes kövek között nincsen kapcsolat, az esés közben a kövek nem hatnak egymásra. A köveknek továbbá tömege van, ami a mozgási energia számításánál játszik szerepet. A kövek tömege a számítás során állandó marad. A kő törhetetlen. A kő és a levegő közötti súrlódást az egyszerűbb számítás érdekében elhanyagoljuk. A lejtő egyszerű egyenes vonalából áll, ami nem keresztez más vonalakat.

3.5.2 Az utazó számítás

A program e számítás alatt feltételezi, hogy a köveknek van valamekkora kezdeti sebessége, amivel elindulnak. A kövek pályája parabolikus a gravitáció miatt.

A számítás lényege az, hogy a kövek pályája (a parabola), illetve a rézsű geometriája (az egyenes) találkozását/metszéspontját megkapjuk. Amint a metszéspontot megtaláltuk, a számítás folytatódik tovább, egészen addig, míg a minimális sebesség (V_{MIN}) egy bizonyos értéke alá nem megy.

3.5.3 Az egyenletek

A program a számítások során az alábbi egyenleteket használja:

A vonal paraméteres egyenlete:

$$x=X_1+(X_2-X_1)u \quad (1.0)$$

$$y=Y_1+(Y_2-Y_1)u \quad u \in [0,1] \quad (2.0)$$

ahol:

X_1, Y_1 : az első végpontja az egyenesnek

X_2, Y_2 : a második végpontja az egyenesnek

A parabola paraméteres egyenlete:

$$x=V_{X0}t+X_0 \quad (3.0)$$

$$y=\frac{1}{2}gt^2+V_{Y0}t+Y_0 \quad (4.0)$$

ahol:

g : a nehézségi gyorsulás negatív előjellel

X_0, Y_0 : a kő kezdeti koordinátája

V_{X0}, V_{Y0} : a kő kezdeti sebessége (a globális koordináta rendszerben)

A kő sebességének paraméteres egyenlete:

$$V_{XB}=V_{X0} \quad (5.0)$$

$$V_{YB}=V_{Y0}+gt \quad (6.0)$$

ahol:

V_{XB}, V_{YB} : a kő sebessége egy választott pontban a becsapódás előtt

Az egyenleteket összeadva és egyszerűsítve, a következő másodfokú egyenletet kapjuk:

$$\left[\frac{1}{2}g\right]t^2+[V_{Y0}-qV_{X0}]t+[Y_0-Y_1+q(X_1-X_0)]=0 \quad (7.0)$$

ahol:

$$q=(Y_2-Y_1)/(X_2-X_1): \text{ a rézsű lejtése} \quad (8.0)$$

Az egyenlet a másodfokú megoldóképlettel megoldható.

Amint a metszéspont meghatározásra került, a becsapódás előtti sebességek kiszámítása következik, melyet felbontunk a rézsűre merőleges, illetve azzal párhuzamos komponensekre.

$$V_{NB}=(V_{YB})\cos(\Theta)-(V_{XB})\sin(\Theta) \quad (9.0)$$

$$V_{TB}=(V_{YB})\sin(\Theta)+(V_{XB})\cos(\Theta) \quad (10.0)$$

ahol:

V_{NB} , V_{TB} : sebesség komponensek a becsapódás előtt, a rézsűre merőleges (V_{NB}), illetve azzal párhuzamos (V_{TB})

Θ : a rézsű vízszintessel bezárt szöge

A becsapódás utáni sebességeket a visszapattanási tényezővel lehet kiszámolni:

$$V_{NA} = R_N V_{NB} \quad (11.0)$$

$$V_{TA} = R_T V_{TB} \quad (12.0)$$

ahol:

R_N : normál visszapattanási tényező

R_T : tangenciális visszapattanási tényező

V_{NA} , V_{TA} : becsapódás utáni sebességkomponensek, a rézsűre merőleges, illetve azzal párhuzamos.

A becsapódás utáni sebességek átszámítása globális koordináta rendszerbe:

$$V_{XA} = (V_{NA})\sin(\Theta) + (V_{TA})\cos(\Theta) \quad (13.0)$$

$$V_{YA} = (V_{TA})\sin(\Theta) - (V_{NA})\cos(\Theta) \quad (14.0)$$

ahol:

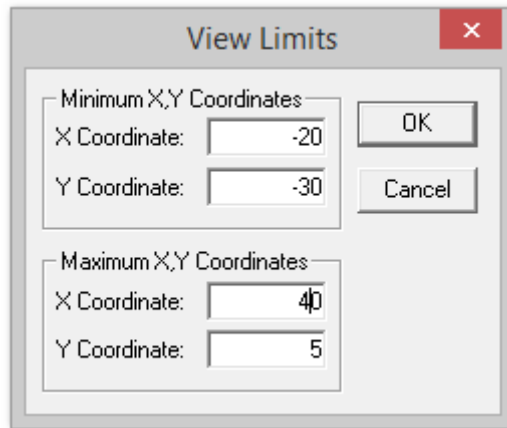
V_{XA} , V_{YA} : a becsapódás utáni sebességkomponensek a globális koordináta rendszerben.

A számítások után a program összehasonlítja az aktuális sebességet a minimális sebességgel (V_{MIN}). Ha a sebesség nagyobb, akkor a számítás folytatódik, ha kisebb akkor a program leállítja a számolást.

3.6 Minta példa bemutatása

A számítás során először meghatározzuk a rézsű geometriáját, ezt követően definiáljuk az anyagjellemzőket, majd ezeket hozzárendeljük az egyes szakaszokhoz. Következő lépésként meghatározzuk a közettömbök kiindulási pontjait, elvégezzük a számítást, s az eredményeket grafikonon ábrázoljuk. A számítás után további elemként köztzfelfogó szerkezetet definiálhatunk.

A program megnyitása után, egy fehér rajzfelületet fogunk látni. Ahhoz, hogy a rézsűt jól láthassuk, állítsuk be a rajztér határait. Ehhez válasszuk ki a Views menüből a Limits parancsot. **Views** → **Limits**. Majd írjuk be a következő adatokat:



12. ábra Koordináta határok beállítása

Ezt követően meghatározzuk a részű geometriáját.



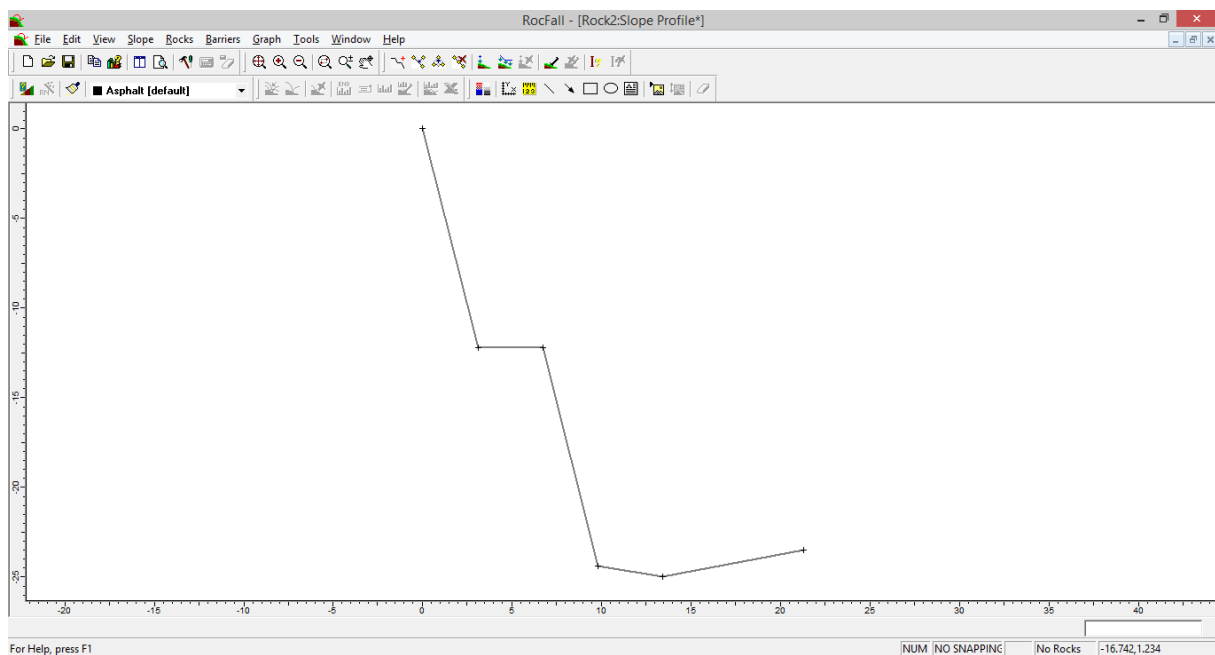
Az alábbi gombra kattintva definiálhatjuk a részünket. A csúcspontokat koordináták megadásával fogjuk bevinni, de lehetőség van szabadkézzel megrajzolni a keresztmetszetet. A koordináták beviteléhez a következőt kell tenni: a jobb alsó sarokban lévő ablakba beírni a koordinátákat. Először az x, majd az y koordinátát írjuk be, szóközzel elválasztva azokat. A tizedesvesszőt ponttal definiálhatjuk. Minden egyes koordináta után nyomjuk meg az ENTER gombot, majd, ha az össze koordinátát bevittük, akkor az ENTER gomb kétszer egymás után való leütésével kilépünk a parancsból. A koordináták a következők:

- 0 0
- 3.1 -12.2
- 6.7 -12.2
- 9.8 -24.4
- 13.4 -25
- 21.3 -23.5

Ha az összes koordinátát megkaptuk, akkor ezt a képet kell magunk előtt látni.



A Zoom All gomb megnyomásával az egész szerkezetet láthatjuk.



13. ábra Minta részsű

A következő lépésben definiáljuk az anyagjellemzőket.



Ehhez a Slope menüből kell kiválasztanunk a Material Editor parancsot, vagy szimplán rákattinthatunk a gombra. **Slope→Material Editor**

A következő ablak fog felugrani:

14. ábra Fizikai paraméterek beállítása anyagonként

Látható, hogy a programnak vannak saját, előre definiált anyagjellemzői, mellyel dolgozhatunk, ám most saját magunkadunk meg paramétereket. Ezt a következő képpen tehetjük meg. Klikkeljünk az „Add materials” gombra. Ezután az új anyagunk „New materials”

néven fog megjelenni a felsorolásban. Írjuk át a nevét Típus 1-re. Ismételjük meg a műveletet, és hozzunk létre Típus 2, illetve Típus 3 nevű anyagokat.

Név	Rn mean/SD	Rt mean/SD	ϕ mean/SD	Roughness SD	Szín
Típus 1	0.8/0.03	0.8/0.03	30/0	0	Fekete
Típus 2	0.7/0.03	0.8/0.03	30/0	0	Zöld
Típus 3	0.5/0.03	0.5/0.03	30/0	0	Rózsaszín

2. táblázat Alkalmazott fizikai paraméterek a mintapéldában

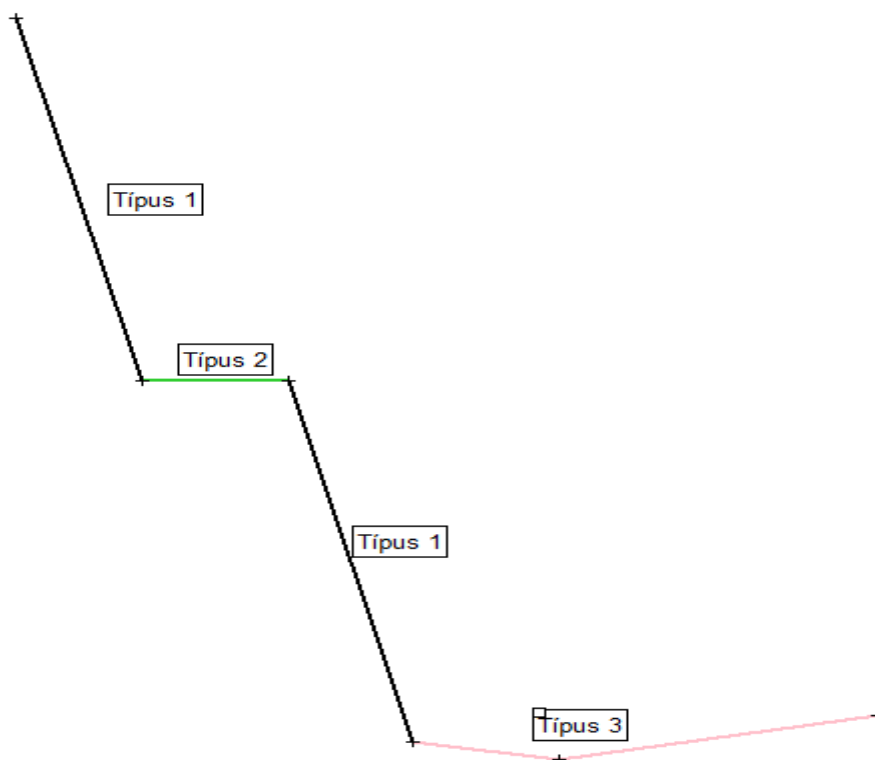
Megjegyezzük, hogy a Standard Deviation kitöltése nem kötelező. Ha azt szeretnénk, hogy a program az általunk beírt értékkel számoljon, akkor írjunk 0-t a helyére.

Anyagjellemzők hozzárendelése.

Az anyagokat kiválaszthatjuk az alábbi legördülő menüből. Ezt követően az ecset ikonra kattintva kiválaszthatjuk az egyes szakaszokat. Kattintással rendelhetjük hozzá a tulajdonságokat az egyes szakaszokhoz. A parancsból való kilépéshez klikkeljünk újból az ecset ikonra.



Az egyes szakaszok tulajdonságait az alábbi ábra szemlélteti.



15. ábra Paramétertípusok az egyes rézsűszakaszokhoz

Ezt követően a végső kötelező lépés a kőzetek kiindulási helyének a meghatározása. Ezt kétféleképpen tehetjük meg. Vagy vonalként definiáljuk, s azt feltételezzük, hogy a vonal mentén bárholnan kiindulhat a kőzettömbünk, vagy pedig pontként definiáljuk, s azt mondjuk, hogy csak ebből a pontból indulhat ki a kőzet. Példánk során az utóbbi eljárást fogjuk alkalmazni. Ehhez a Rocks menüből az Add Point Seeder parancsra kell kattintani, de megtehetjük úgyis, ha a következő ikonra kattintunk:



Ezt követően megadhatjuk a Seeder helyzetét kattintással, vagy a koordináták beütésével is. Írjuk be a jobb alsó sarokba a 0 0 koordinátákat. Ezt követően a következő ablak ugrik fel előttünk:

	Mean	Std Dev.
Horizontal velocity [m/s]	1.5	0.5
Vertical velocity [m/s]	0	0
Mass [Kg]	10	0
Angular Velocity [rad/s]	0	0

OK Cancel

16. ábra Bementi adatok definiálása

Írjuk be a képen látható számokat. Ezzel azt feltételezzük, hogy az átlagos vízszintes sebessége a köveknek 1.5 m/s abban a pontban, normális eloszlás pedig 0.5 értékű. Feltételezzük, hogy függőleges irányú sebessége nincs, illetve a kövek tömege mind 10kg, ugyanis a normális eloszlás 0 értékű. A szögsebesség szintén 0, ezzel azt modellezzük, hogy a kezdeti pontban a kövünk nem gördül a rézsűn, hanem kvázi pattog.

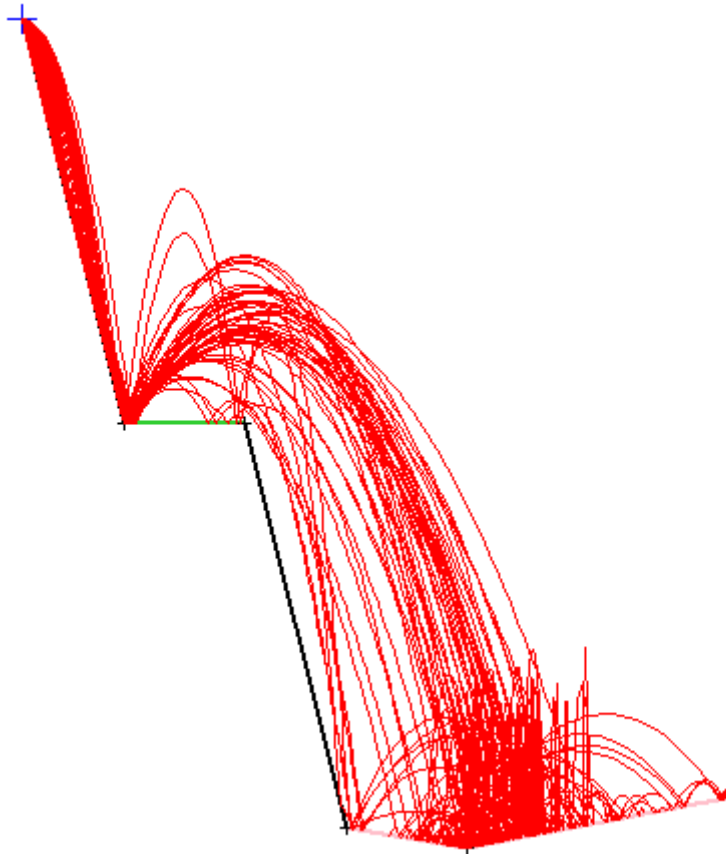
Számítás

Miután ezekkel mind megvagyunk, válasszuk ki a Rocks menüből a Compute parancsot, és indítsuk el a számítást, vagy kattintsunk a Compute parancsra.

Rock→Compute



A számítást követően hasonló képet kell látni.



17. ábra Számítás grafikus eredménye

A program a számítást 50 körre végzi el, de ez változtatható, így akár egy számítással 100 vagy akár 1000 követ is vizsgálhatunk. Természetesen, ha a kövek mozgási trajektóriái nem egyeznek meg az nem jelent problémát, ugyanis a program random számokat generál, így előfordulhatnak kisebb eltérések. A számítás újbóli lefuttatása, újabb 50 darab kőnek a mozgását fogja mutatni, így már 100 „kísérletünk” lesz. Minél több vizsgálatot végzünk, annál jobb eredményeket kapunk majd.

3.6.1 Eredmények kimutatása

Végpontok

Az egyik legfontosabb eredmény a becsapódási pontok vízszintes koordinátája. Ehhez a Graph menüből az Endpoints parancsra kell kattintanunk, vagy egyszerűen az alábbi ikonra




Graph→Endpoint

A kattintás után osztott képernyőn látjuk a lejtőnket, valamint a grafikont, mely mutatja a becsapódási helyek vízszintes koordinátáit. Ha a jobb egérgombbal a grafikonra kattintunk majd a Split view parancsot kiválasztjuk, akkor a program csak a grafikont fogja nekünk ábrázolni. Szintén jobb klikkel és a Chart properties paranccsal a grafikon tulajdonságait

változtathatjuk meg. Ha a Statistics parancsra kattintunk, akkor a program kiírja a grafikon statisztikai adatait, melyet a Copy gomb megnyomásával akár Wordbe is bemásolhatunk. A grafikont továbbá lehetőség van Excelbe is importálni.

Burkoló görbék

A becsapódási pont koordinátáin túl, lehetőség van a mozgási energia, a sebesség, valamint a felpattanási magasság kijelzésére is. Ehhez kattintsunk a Graph menüben a Graph Envelope


parancsra, vagy kattintsunk a  ikonra.

Graph→Graph Envelope

Ekkor egy párbeszédablak jelenik meg, ahol a legördülő menüből választhatjuk ki, hogy mit szeretnénk ábrázoltatni a programmal. Ezek után hasonlóan tudunk eljárni, mint a fent említett végpontok kijelzésénél.

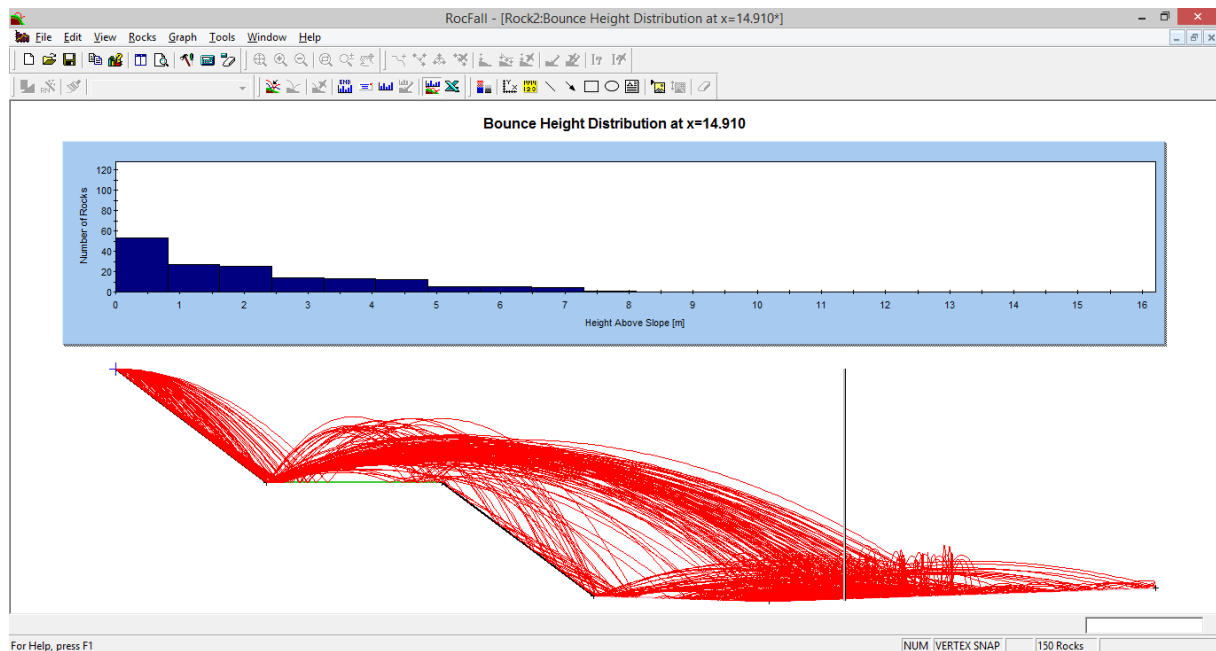
Eloszlások

Lehetőség van az x-tengely mentén megfigyelni az előbbi fejezetben említett értékek eloszlását.

Ehhez a Graph menüből válasszuk a Graph Distribution parancsot vagy kattintsunk a  ikonra.

Graph→Graph Distribution

Itt egy vékony szürke vonal fogja jelezni, hogy az x-tengelyen éppen hol állunk. Ekkor láthatjuk a kiválasztott paraméter eloszlását. A nyilakkal vagy az egér görgőjével a szürke vonalat oldalirányba mozgathatjuk, így megfigyelhetjük a rézsű mentén a vizsgált paraméter változását.



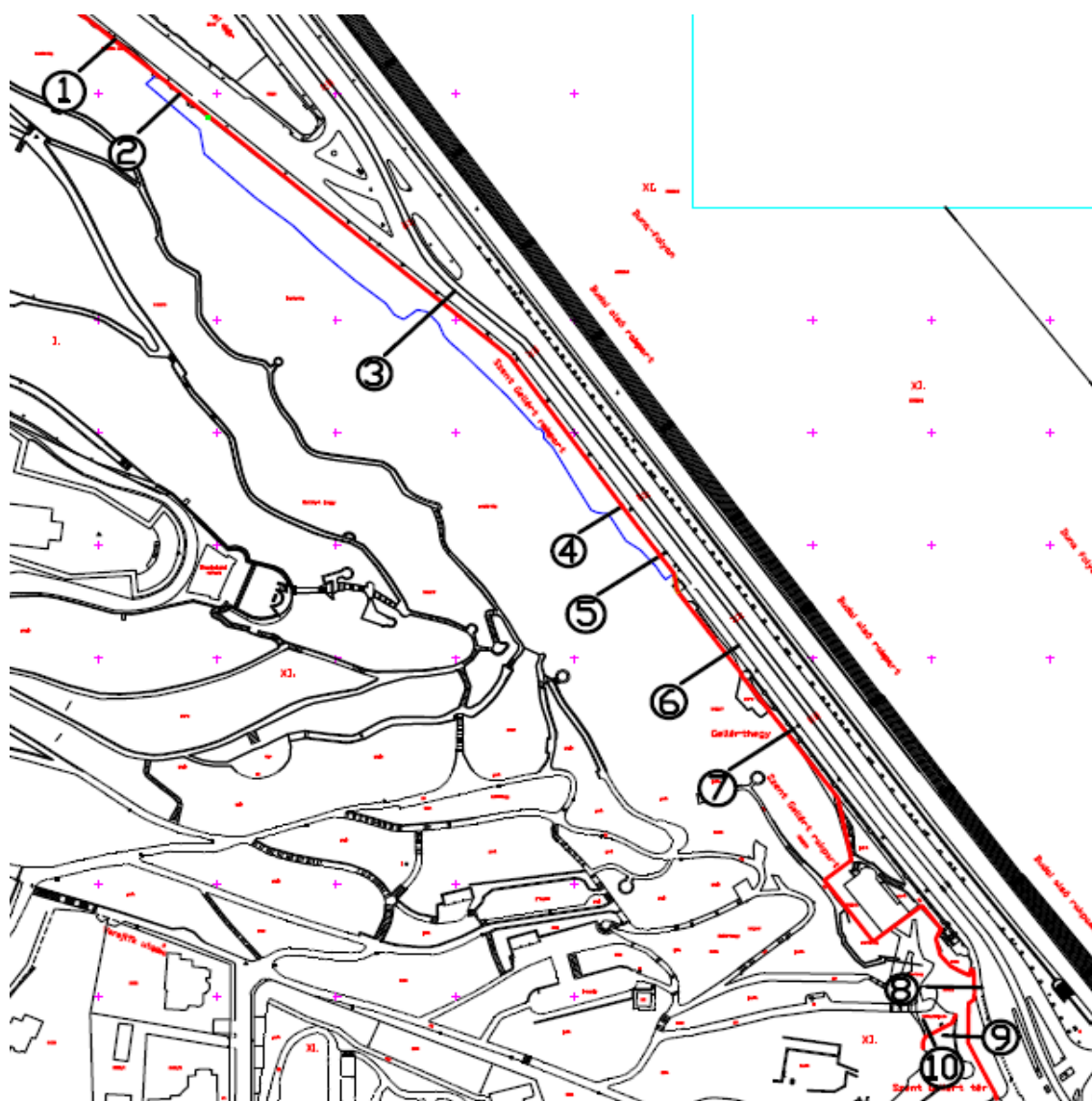
18. ábra Visszapattanási magasság a koordináta függvényében

Ezeket a kimutatásokat az olvasó mind kipróbálhatja.

4. Jellemző metszetek bemutatása, futtatása

A jellemző keresztmetszetek felvétele során törekedtem arra, hogy a lehető legkritikusabb szelvényeket definiáljam. Itt fontos szerepet játszott a hegy geometriája, valamint az is, hogy milyen veszéllyel jár egy-egy lehulló kődarab. Ezen két változó határozta meg a szelvények helyzetét.

A BKK-nak köszönhetően, rendelkezésemre állt a Gellérthegy keleti oldalának geodéziai felmérése. A felmérés alapján a vizsgált szakaszon tíz keresztmetszetet vettem fel. A keresztmetszeteket a Rockfall programmal vizsgáltam. A metszetek számozása egyessel kezdődik, mely megfelel a legészakibb metszetnek, s a számok növekedtével egyre délebre megyünk. Az utolsó metszet a Szikla kápolna fölött található. Az egyes keresztmetszetek helye 19. ábra látható.



19. ábra Metszetek helyszínrajza

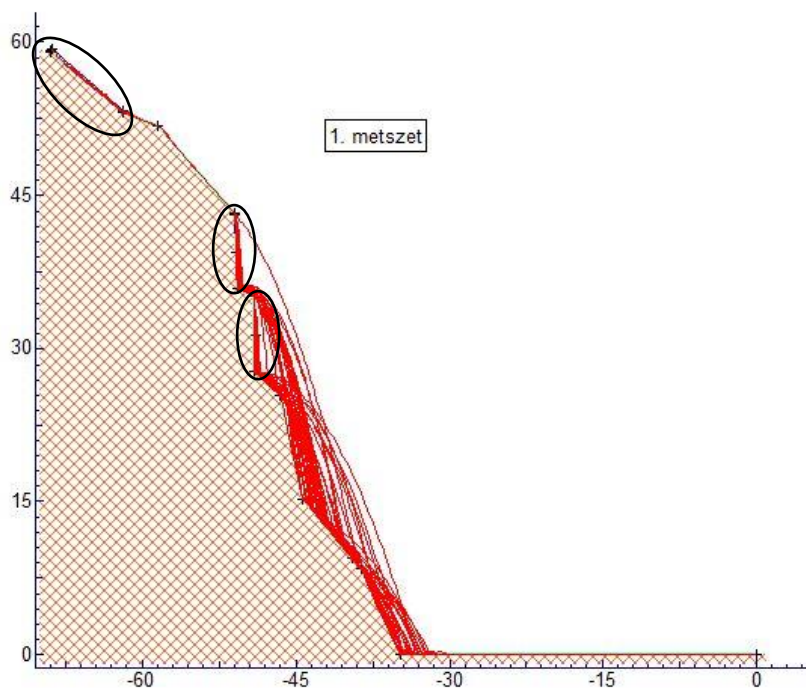
A futtatáshoz szükséges paramétereket a szakirodalmak alapján vettem fel. Így az érintő irányú visszapattanási tényezőt 0,6-nak, míg a normál irányú visszapattanási tényezőt 0,3-nak vettem

fel. A dolomit felületének súrlódási szögét 55° -ban határoztam meg [1]. A szelvényeknél fontos szerepet játszott, hogy a potenciális kődarab veszélyt jelent-e a gyalogos, illetve a közúti forgalomra. Ennek tudatában azt feltételeztük a modellezés során, hogy a hegy alatt húzódó Páva-kert a gyalogosok előtt elzárt terület marad.

A számítások során, a lehulló kövek kiindulási helyét egyeneseken definiáltam, a pontszerű kiindulási helyek helyett. Ez realisabb modellt eredményezett, hiszen a sziklafalról letöredező kőzetek kiindulási helye változó, azt egy pontban megadni nem lenne valós. A vizsgált keresztmetszeteken több ilyen egyenest is definiáltam. Az egyenesekről a kövek egyenlő valószínűséggel hullottak le a számítások során. Minden egyes metszet esetén a lehulló kövek száma 100 darab. A számítás során vizsgáltam a kövek beérkezési helyének a vízszintes koordinátáit, a sebességeket, illetve ott, ahol ez indokolt volt, a kövek mozgási energiáját. A koordináták megmutatják, hogy a lehulló kőzet veszélyezteti-e a gyalogos és/vagy a gépjármű forgalmat. A sebességből, a metszet egyes részein, következtethető, hogy melyek azok a területek, ahol a növényzettel lassítani lehet a lehulló kőzeteket. Ha a lehullókövek veszélyt jelentettek a forgalomra, akkor oda kőzetfelfogó háló létesítését javasoltam. Ebben az esetben a kövek mozgási energiáját is vizsgáltam azért, hogy megfelelő teherbírású szerkezetet lehessen az adott keresztmetszetre létesíteni.

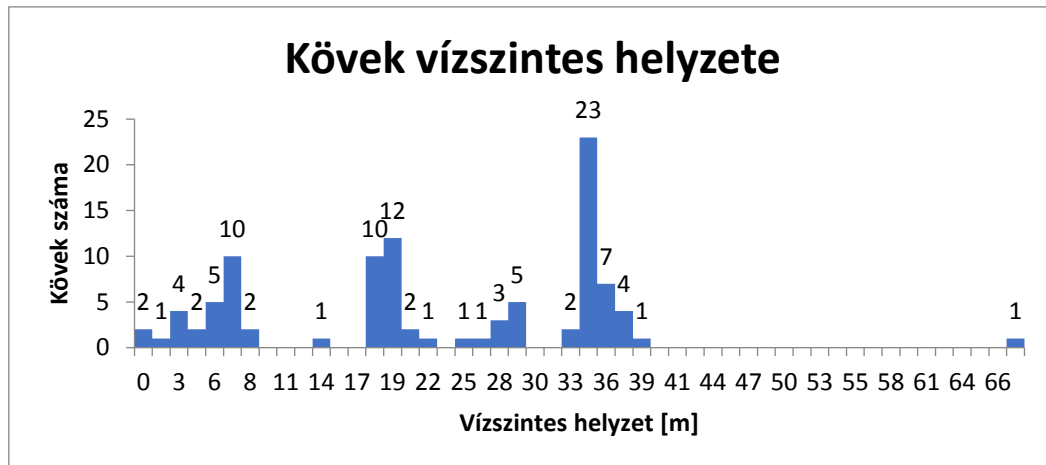
4.1 1. metszet

Az első metszet a Szent Gellért szobortól délre található, a Rudas gyógyfürdővel szemben. A hegy alatt kétszer két sávú autópálya helyezkedik el, illetve gyalogos járda. A metszet magassága közelítőleg hatvan méter. Az alábbi metszet vizsgálatkor három egyenest vettem fel, ahonnan a kövek lehullhatnak. A három egyenes helyét az ábrán fekete ellipszisekkel jelöltem.



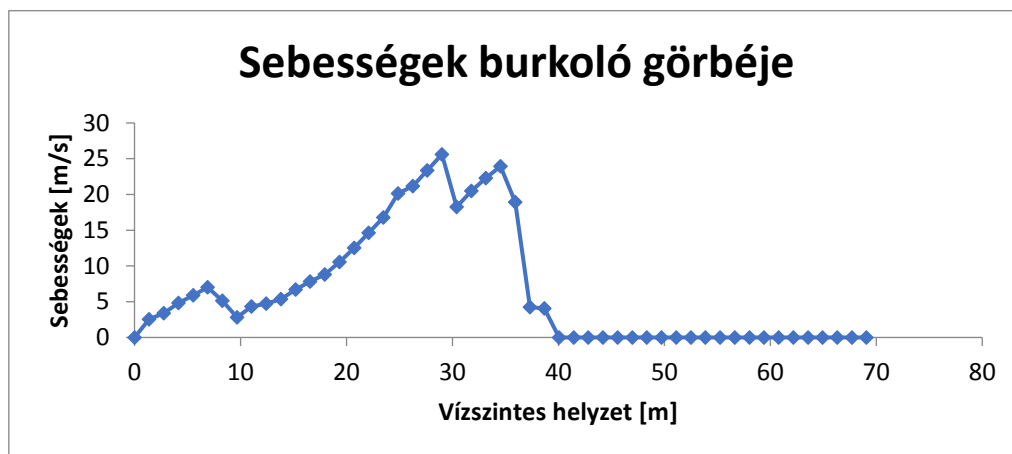
20. ábra 1. metszet

A 20. ábra szemlélteti, hogy a lehulló kövek becsapódási helyei a gyalogos járdára, valamint az úttestre esnek. A vízszintes koordináták grafikonjából látható (21. ábra), hogy a legtöbb kő a gyalogos járdára esett, valamint egy darab kő egészen a vizsgált keresztmetszet széléig elgurult. A fenti szakaszon a lankás rézsűnek köszönhetően a fentmaradt kövek száma jelentős, 100 darab kőből 26 darab az említett szakaszon maradt. A metszetet négy fő részre lehet bontani a kövek beérkezésének vízszintes helyzetétől függően. Az első három nem veszélyes sem a gyalogos, sem pedig az autós forgalomra, ellenben a negyedik rész/terület, már veszélyezteti a forgalmat. Az itt becsapódó kövek száma 37 darab. Ennek elkerülésére javasolt a kőzetfelfogó háló építése, mely jelentősen lecsökkentheti a fenyegető kövek számát.



21. ábra Kövek vízszintes helyzete, 1. metszet

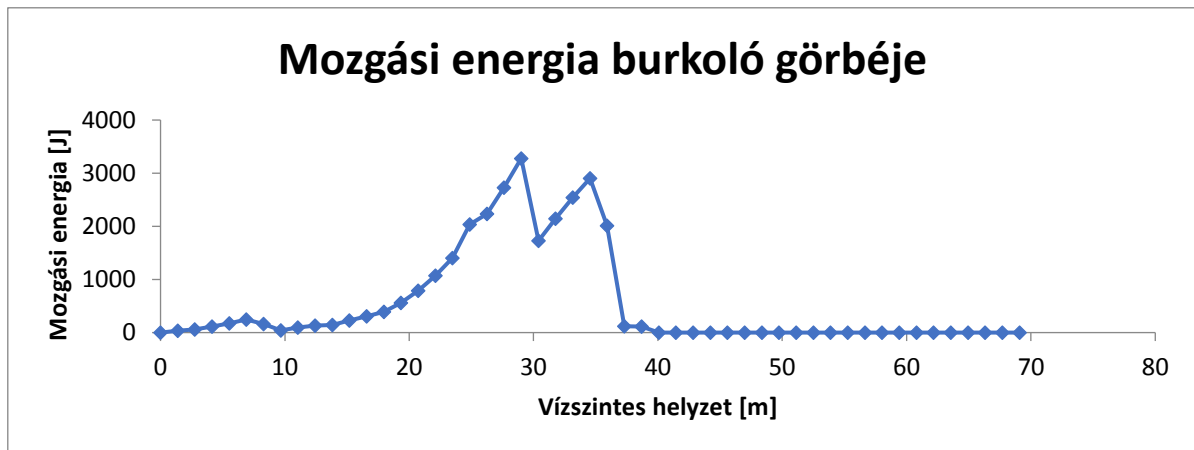
A 22. ábra látható a sebességek burkoló görbéjét. Jól megfigyelhető, hogy a sebesség a megtett úttal szinte lineáris kapcsolatban áll, kisebb ugrásokkal megszakítva azt. A maximális sebességet, ami 25 m/s, a rézsú közepénél éri el a kövek. Az adott keresztmetszetben jelentős a növények száma, így várhatóan ezek a sebességek valamivel csökkennek, a növények lassító hatásának köszönhetően.



22. ábra Kövek sebességének burkoló ábrája, 1. metszet

A kövek becsapódásából adódóan a forgalom megzavarásának, illetve veszélyeztetésének elkerülése végett, a vizsgált keresztmetszetre kőzetfelfogóhálót javaslok. Ahhoz, hogy a szerkezet megfelelő teherbírású legyen, megvizsgálom a kövek mozgási energiáját, mely

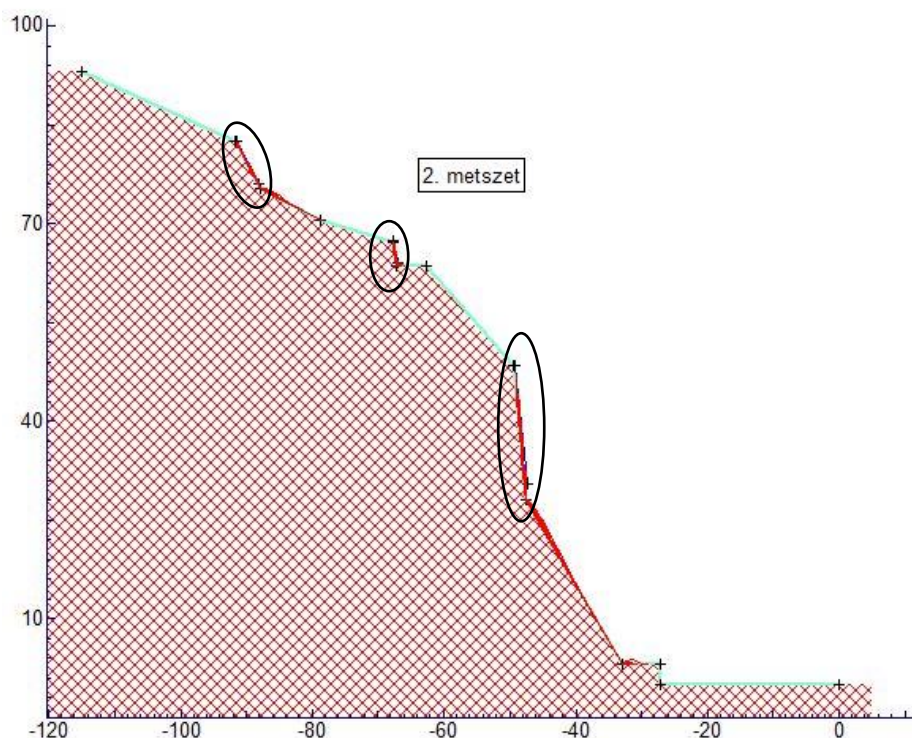
elegendő adat, a szerkezet megtervezéséhez. A mozgási energia burkoló görbét a 23. ábra szemlélteti. A legnagyobb elért energia kicsivel több, mint 3197 J.



23. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 1. metszet

4.2 2. metszet

A második metszet körülbelül 40 méterrel délebbre helyezkedik el az első metszettől. A szelvény szintén a Rudas gyógyfürdő előtt helyezkedik el, és a forgalom megegyezik az első metszetenél lévő forgalommal. A rézsú magassága, illetve a vízszintes vetületi hossza megközelítőleg 100 méter. A lehulló kövek kiindulási helyét az ábrán fekete ellipszisekkel jelöltem. Jól látható, hogy a kövek főként a Páva kertbe esnek, ahol a jelenlegi kerítés kellően merev ahhoz, hogy ezeket a lehulló köveket megfogja. A kerítés a Páva kert talajszintjétől 1,70 méterrel magasodik.



24. ábra 2. metszet

A legrosszabb eset akkor fordulna elő, ha a jelenlegi kerítés nem lenne kellően merev ahhoz, hogy felfogja a lehulló köveket. Ekkor jelentős mennyiségű kőzet kerülne a gyalogos járdára. Mivel az amortizáció miatt előfordulhat, hogy a jelenlegi kerítés az idő múlásával veszít a merevségéből, ennek megfékezésére javaslom az egyes sziklafalokon elhelyezendő hálót, mely megakadályozza a kőzetek lehullását. Az apróbb törmelékek esése bekövetkezhet, de ezt a Páva kert kerítése magabiztosan felfogja. A kövek vízszintes helyzetét három fő csoportra lehet osztani, ebből a harmadik a veszélyes a forgalomra nézve. Minden negyedik lehullott kő eléri a Páva-kertet, így a Páva-kert megnyitása a gyalogosnak ezen a szakaszon nemajánlott.

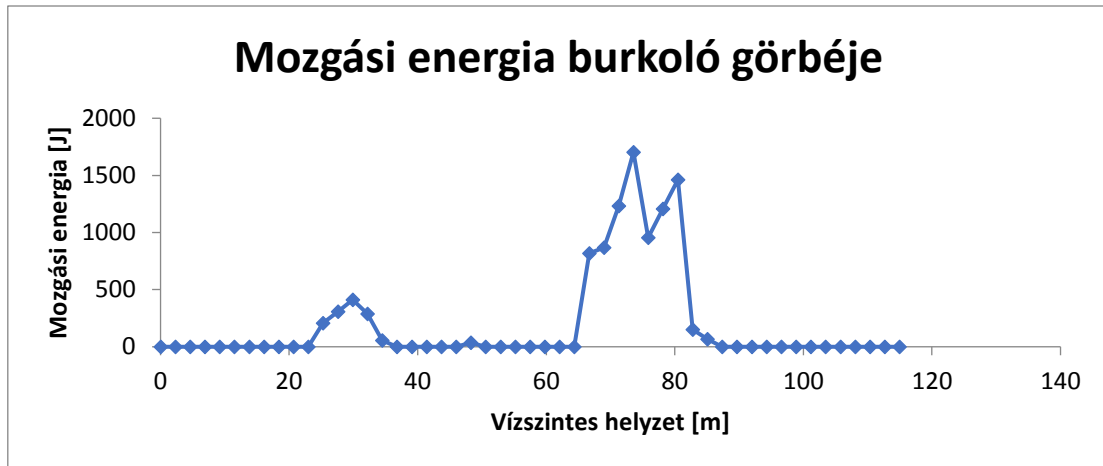


25. ábra Kövek vízszintes helyzete, 2. metszet



26. ábra Sebességek burkoló görbéje, 2. metszet

A sebességek burkoló görbét a 26. ábra mutatja. A sebességek burkoló görbéiből is jól látható az a három szakasz, ami a vízszintes koordinátáknál is megfigyelhető. A maximális sebesség közel 18m/s, ám ez igen rövid távon lecsökken 0m/s-ra. A mozgási energia burkoló görbét a 27. ábra szemlélteti. A fenti három szakasz itt lecsökken kettőre. A maximális energia közel 1800J, mely a fele az első metszeten hulló kövek mozgási energiájának. Az ábrán látható, hogy a kövek fokozatosan vesztenek a mozgási energiájukból, ahogyan lassulnak, majd amint eléri a Páva-kertet a sebességük zérus lesz, ezáltal a mozgási energia is zérus értéket vesz fel.

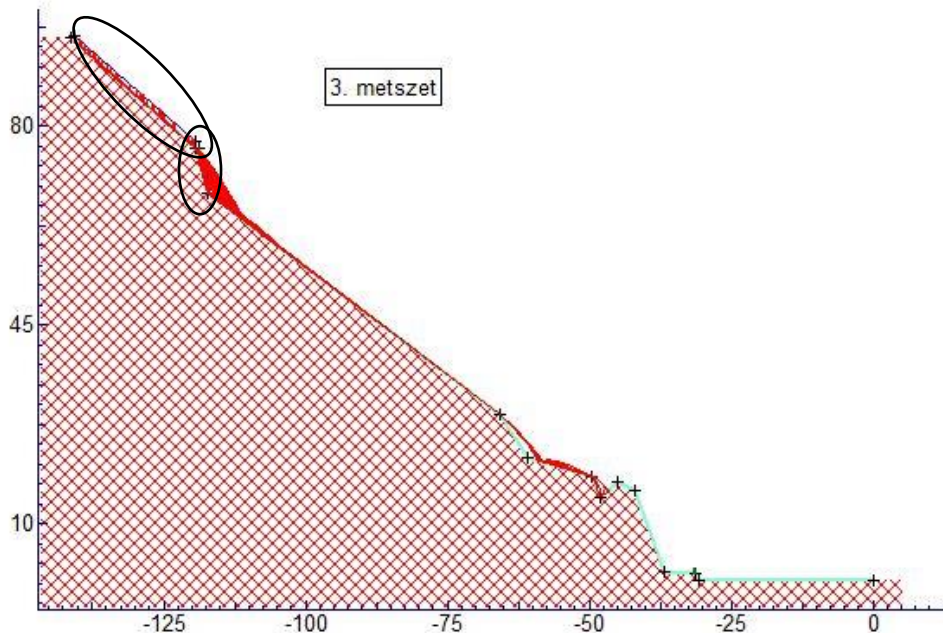


27. ábra Mozgási energia burkoló görbéje

4.3 3. metszet

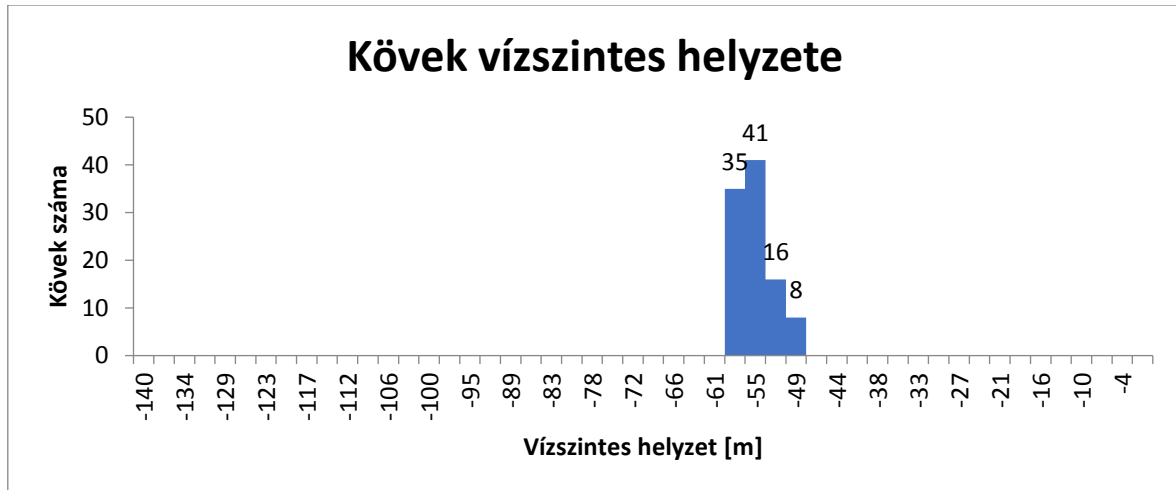
A szelvény 145 méterrel délre helyezkedik el a második szelvénytől. A keresztmetszet 90 méter magas, a vízszintes vetületi hossz pedig 120 méter. A vizsgált terület szintén a Páva-kert felett helyezkedik el, csak úgy, mint az előzőleg vizsgált metszet. A metszet alatti forgalom nagyobb, hiszen ezen a szakaszon az Erzsébet hídról lekanyarodó, valamint a Krisztina körút, illetve a Hegyalja útról érkező forgalom egygyé válik, ezáltal több a közlekedő autó, így nagyobb veszélyt jelent egy lezuhanó kőzetdarab.

A kövek kiindulási helyét a fekete ellipszisek jelzik a 28. ábra. Látható, hogy a meglévő kerítés kellő védelmet nyújt az ellen, hogy a lehulló kövek a járdára esetleg az úttestre essenek, s ezzel akadályoznák a gyalogos, illetve a közúti forgalmat.



28. ábra 3. metszet

A gördülő kövek közül gyakorlatilag egy darab kő sem érte el a Páva-kertet. A kövek a -49- -50 méter helyen lévő ároknál megállnak. Ezek a kövek nem jelentenek veszélyt a forgalomra. A kövek helyzetét a 29. ábra szemlélteti. A 30. ábra szemlélteti a kövek sebességének burkoló görbét. A kövek egészen az árok előtti helyig gyorsulnak, majd elérve az árkot, hirtelen lelassulnak és megállnak.



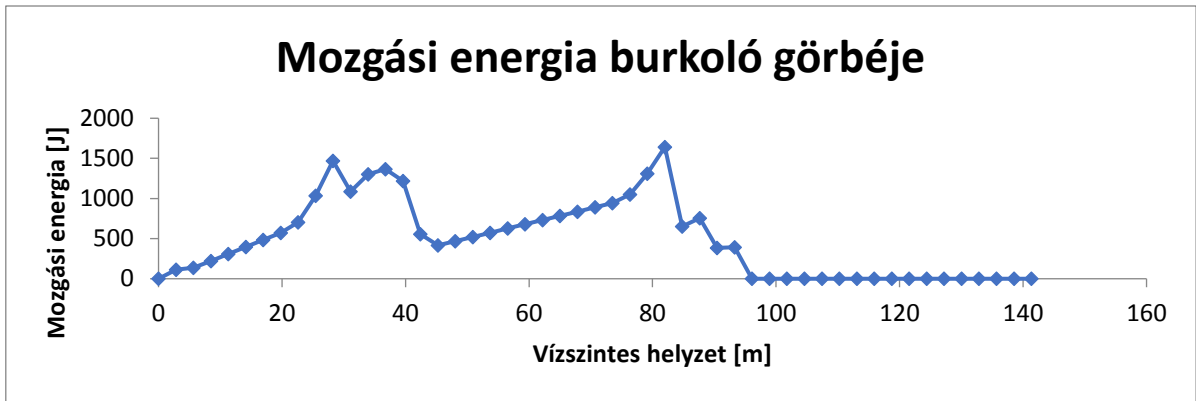
29. ábra Kövek vízszintes helyzete, 3. metszet

A maximálisan elért sebesség a számítás során 18m/s-ra adódott. A kövek nem jelentenek veszélyt a metszet alatt húzódó forgalomra.



30. ábra Sebességek burkoló görbéje, 3. metszet

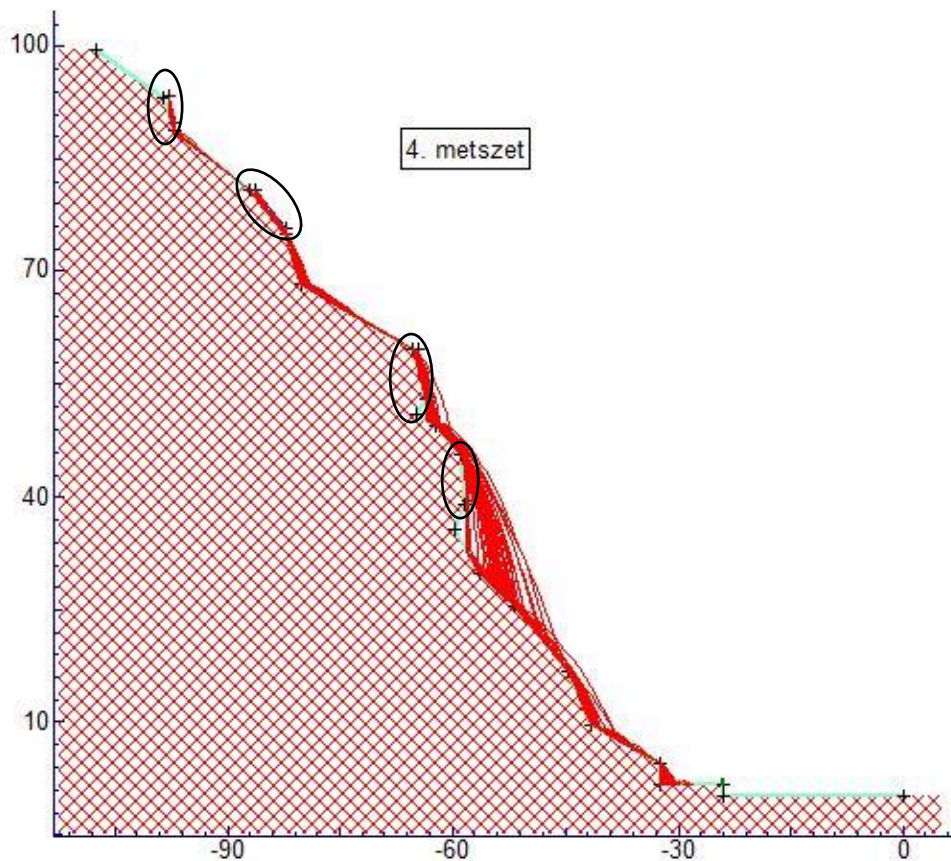
A mozgási energia értékét a becsapódási pont közvetlen közelében érdemes megvizsgálni. Jelen esetben a becsapódási pont a 100 méter távol lévő árok. Az ez előtt mért mozgási energia értéke közel 400 J, melyet egy kisebb háló már képes megfogni.



31. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 3. metszet

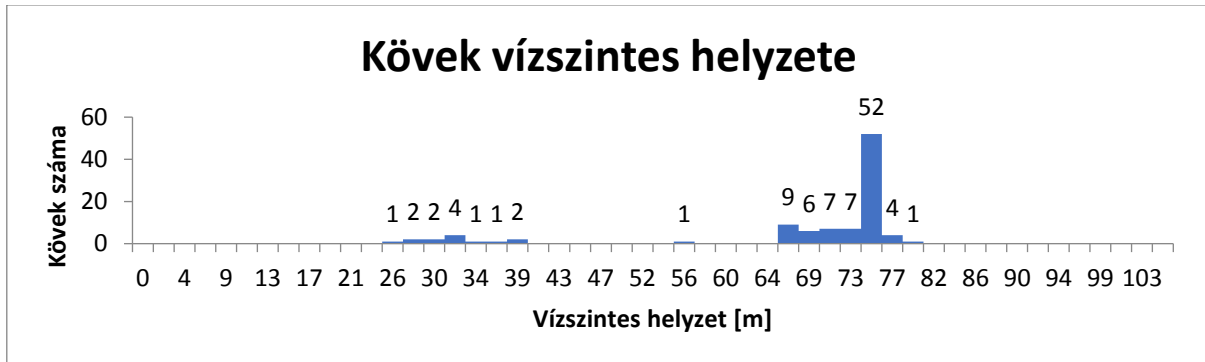
4.4 4. metszet

A negyedik metszet 120 méterrel délebbre helyezkedik el a harmadik metszettől. A keresztmetszvény magassága 100 méter, vízszintes vetületi szélessége pedig 90 méter. A metszet alja beleér a Páva-kertbe. A vizsgálathoz négy helyet jelöltem ki a metszeten, ahonnan a kövek lehetséges kiindulási helyét megadtam. A vizsgált keresztmetszet és a jelölt kiindulási helyek a 32. ábra láthatók.



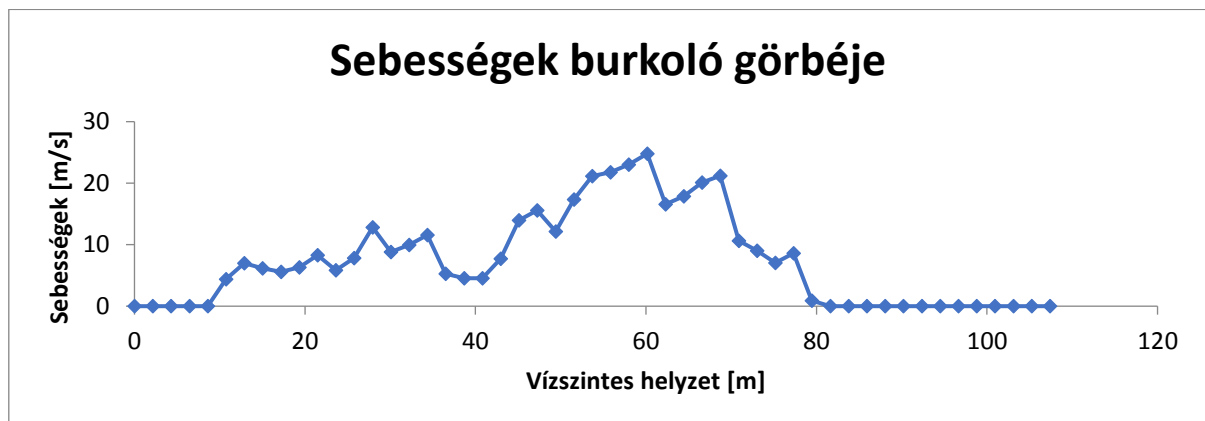
32. ábra 4. metszet

A leeső kövek döntő többsége a Páva-kertbe esett. Látható a 33. ábra hogy néhány kő, már a rézsún fent maradt. A kövek több, mint a fele pedig elérte a rézsú alját. A kerítést egyik kő sem érte el, így nagy veszély nem fenyegeti a forgalmat.



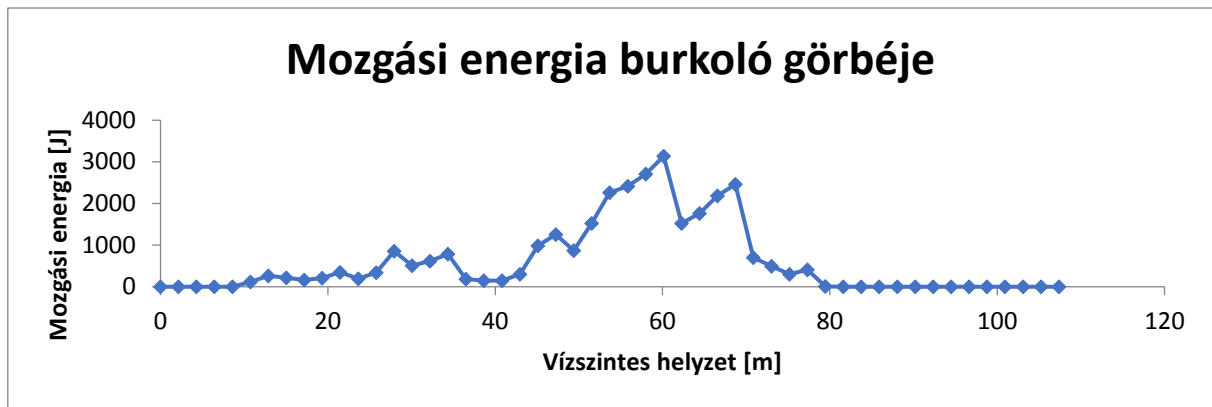
33. ábra Kövek vízszintes helyzete, 4. metszet

A sebességek burkoló ábrája a 34. ábra látható. A maximálisan elért sebesség 25m/s, melyet a kert feletti részen érnek el a kövek. Amint becsapódnak a kövek sebessége zérusra csökken. A rézsún lévő növényzet csökkenti a sebességet, így a becsapódott kövek száma változhat. A sok növény segítheti a gördülő kövek lassítását, ám a növények növekedésével, a gyökerek szétfeszíthetik a sziklafalat, mely sziklahullást okozhat. A megfelelő növény karbantartás sokat segíthet a rézsú biztonságosabbá tételéhez.



34. ábra Sebességek burkoló görbéje, 4. metszet

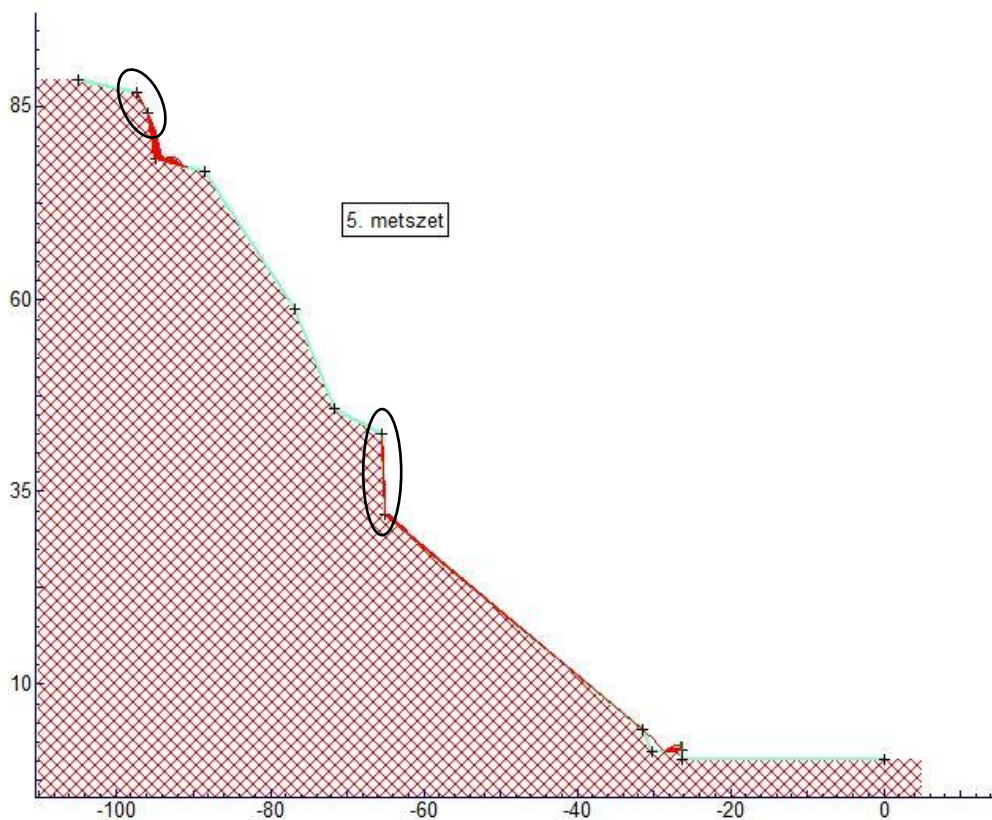
A mozgási energia burkoló görbéje (35. ábra) jól követi a sebesség burkoló görbéjét. A maximális mozgási energia természetesen a maximális sebesség helyén fordul elő, értéke körülbelül 3150J. Ahogy a sebesség csökken úgy csökken a mozgási energia is. A becsapódás előtti pillanatban a kövek mozgási energiája közel 410J. Ez az érték kellően kicsi ahhoz, hogy veszélyt jelentsen a Páva-kert kerítésére.



35. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 4. metszet

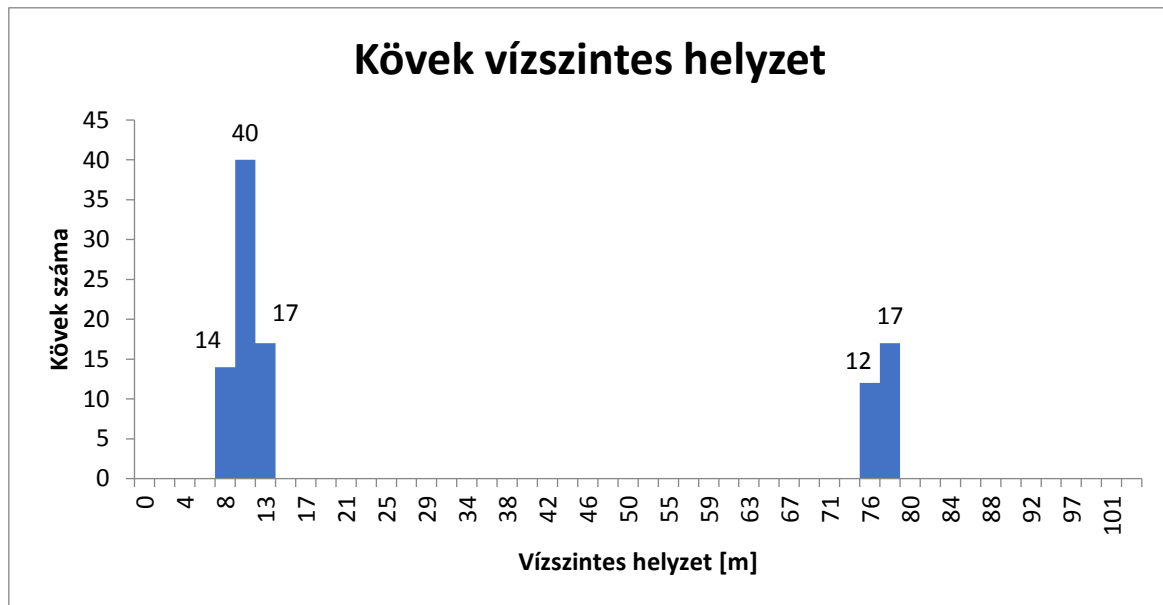
4.5 5. metszet

Az ötödik metszet a Páva-kert déli végében található, körülbelül 30 méter távolságra, déli irányban a negyedik metszettől. A metszeten három egyenest jelöltem ki, ahonnan a kövek kiindulhatnak. Azok a kövek, melyek legfelülről indultak, körülbelül 10 méter megtétele után, az első teraszos részen meg is álltak. A többi kő mind elérte a Páva kert kerítését, mely megfogta azokat. Ha nincs a kerítés, vagy a kerítés rossz állapotban van, akkor elképzelhető, hogy egy-egy kő az úttestre gördül, ezzel akadályozva a forgalmat. A 37. ábra szemlélteti a kövek vízszintes helyzetét, mely alátámasztja azt, hogy azok a kövek, melyek nem a legfelső kiindulási egyenesről indultak, elérték a kerítést.



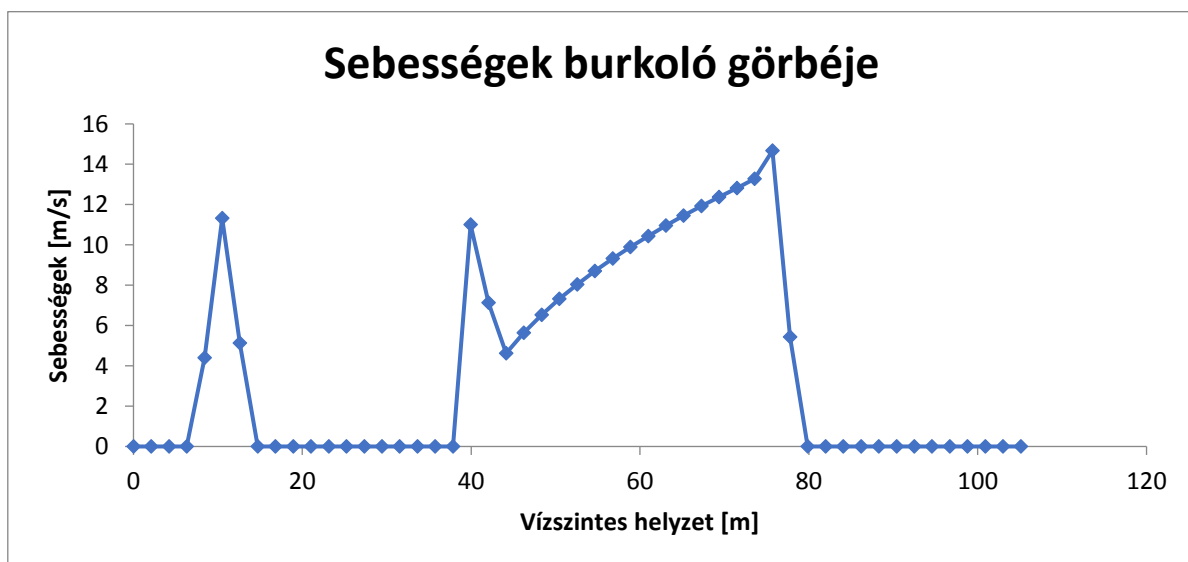
36. ábra 5. metszet

Ahhoz, hogy ezen javítani lehessen, célszerű a sziklafalra leesés ellen hálót építeni. Ez megakadályozná a kövek potyogását. Ezen felül javasolt a sziklarész évenkénti felülvizsgálata.



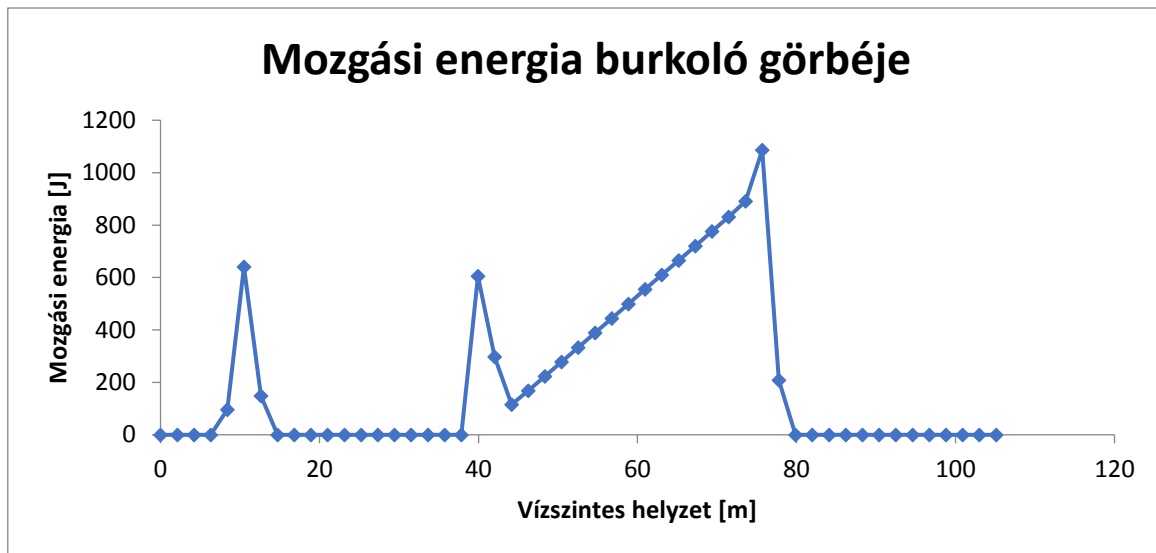
37. ábra Kövek vízszintes helyzete, 5. metszet

A kövek sebessége változó. A felső szakaszon a sebesség értéke nem számottevő, ugyanis hamar lecsökken nullára az értékük. A második szakaszból induló kövek egy rövid szakaszon felgyorsulnak, majd az első pattanás csökkenti a sebességüket. E pattanás után a sebességük újra növekedni kezd, majd amint eléri a kerítést a sebesség nullára csökken. A kövek sebességének a burkoló görbéjét a 38. ábra mutatja.



38. ábra Sebességek burkoló görbéje, 5. metszet

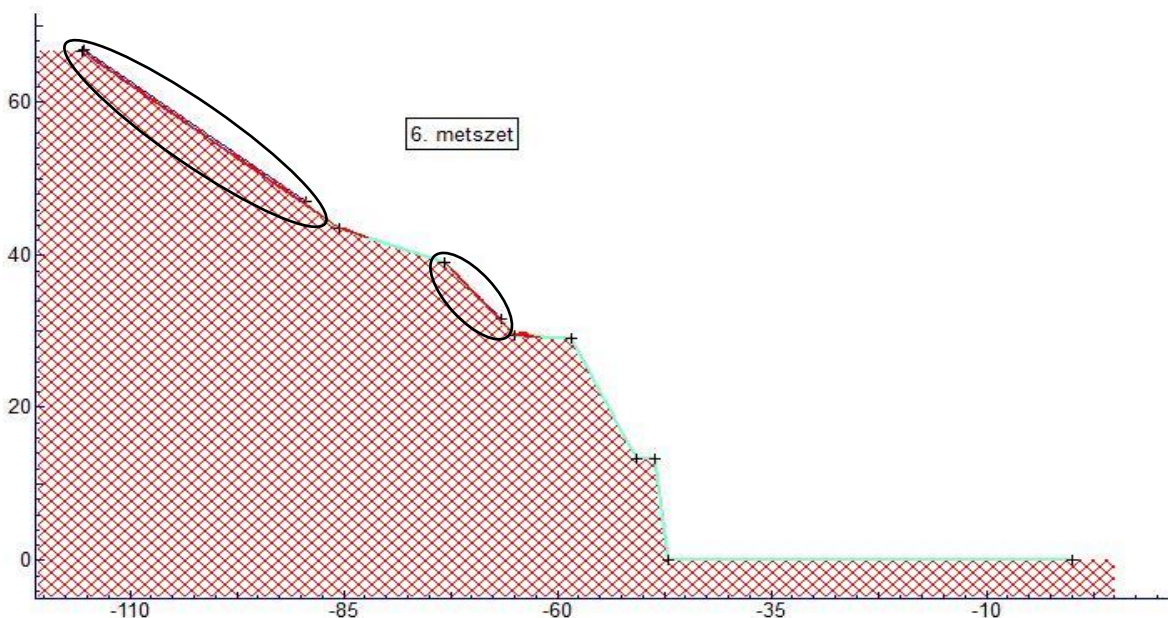
A kövek mozgási energiájának a görbéje megegyezik a sebességek görbéjének az alakjával. A maximális elért energia becsapódás előtt 1086J. A mozgási energia burkoló görbéjét a 39. ábra szemlélteti.



39. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 5. metszet

4.6 6. metszet

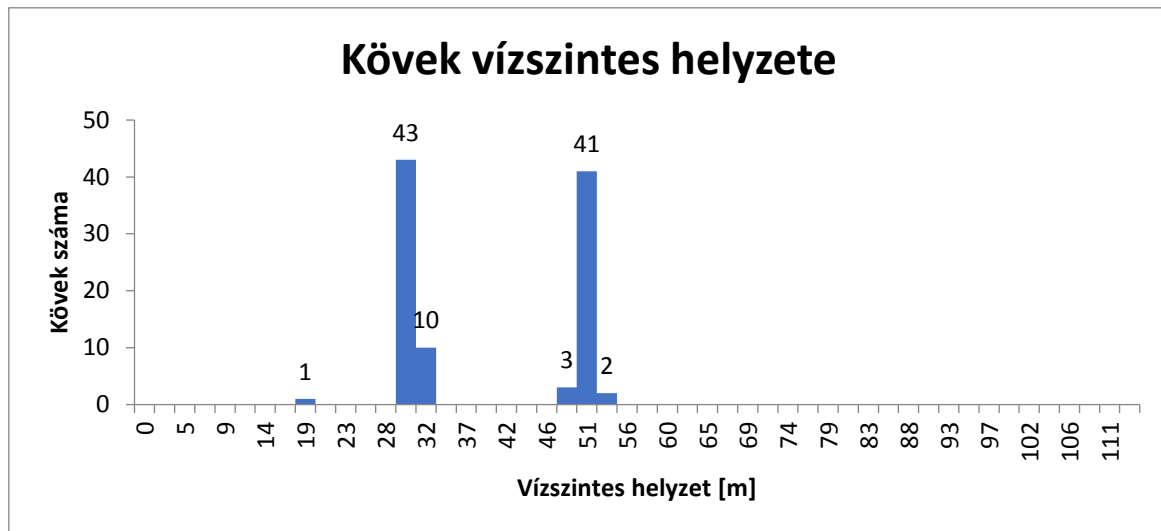
A hatodik metszet már nem a Páva kert felett helyezkedik el, ezért kiemelten fontos. A metszet körülbelül 50 méterrel délebbre helyezkedik el az ötödik metszettől. A rézsú magassága 66 méter, a vízszintes vetületi szélessége pedig 68 méter. A rézsún két egyenest határoztam meg a kövek lehetséges kiindulásának. A kövek beérkezési helyének, két fő tartományt lehet definiálni. A felső egyenesről kiinduló kövek 30-32 méter megtétele után már nem mozognak tovább, míg az alsó egyenesről induló kövek körülbelül 10 méter megtétele után megállnak, a közel vízszintes teraszon.



40. ábra 6. metszet

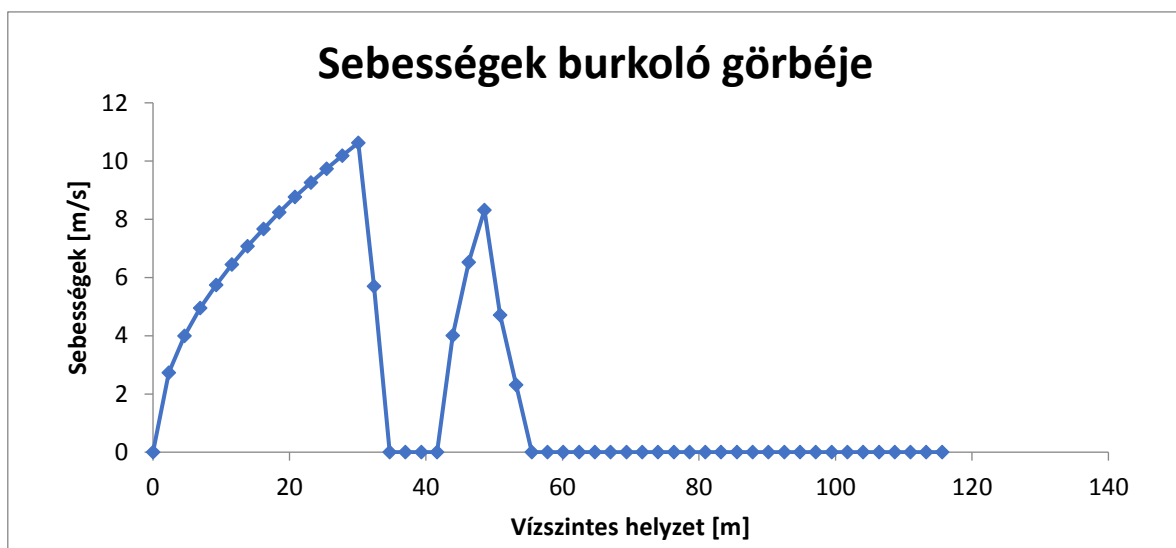
A 41. ábra szemlélteti, hogy a kövek két fő helyszínen álltak meg a zuhanás után. E két hely közül a felső nem jelent nagy veszélyt a hegy alatti forgalomra, ám az úttesthez közelebbi már igen. A vizsgált kövek majdnem a fele, ezen a részen állt meg. Mivel a kövek mozgása nem

biztos, ezért nagy a valószínűsége annak, hogy a kövek tovább gördülnek a teraszos részen, rázuhanva az úttestre, mellyel balesetet okozhatnak.



41. ábra Kövek vízszintes helyzete, 6. metszet

A 42. ábra a kövek sebességének a burkoló görbét mutatja. Látható, hogy a felső teraszon a kövek sebessége nullára csökken, majd a második kiindulási egyenesnél a sebességek nőnek, s hirtelen lecsökkennek nullára. A maximum sebesség melyet a kövek elérnek a becsapódás előtt, 8,3 m/s.



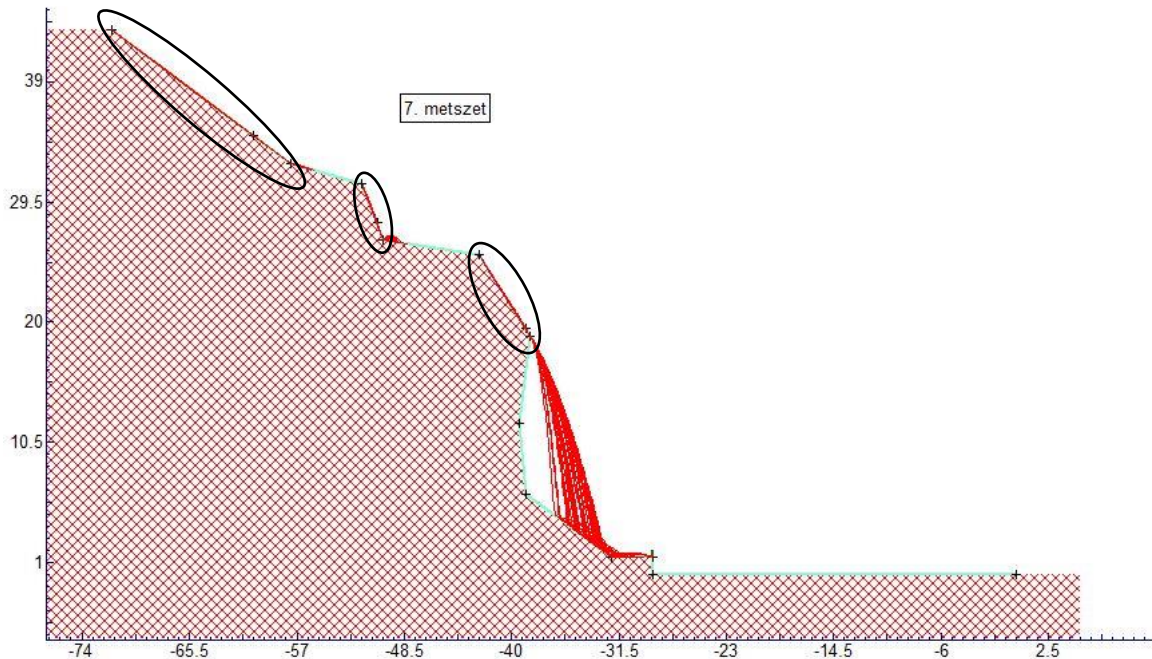
42. ábra Sebességek burkoló görbéje, 6.metszet

Mivel a kövek kigurulhatnak az úttestre, s mivel a helyi viszonyoknak köszönhetően a sziklafogó háló nehezen kivitelezhető, ezért érdekesebb magára a falra hálót szögellni, s már azt megakadályozni, hogy egyes szikladarabok kiszakadjanak. Ezen felül célszerű lenne a szelvény környezetét évente felülvizsgálni, és a mozgó darabokat eltávolítani.

4.7 7. metszet

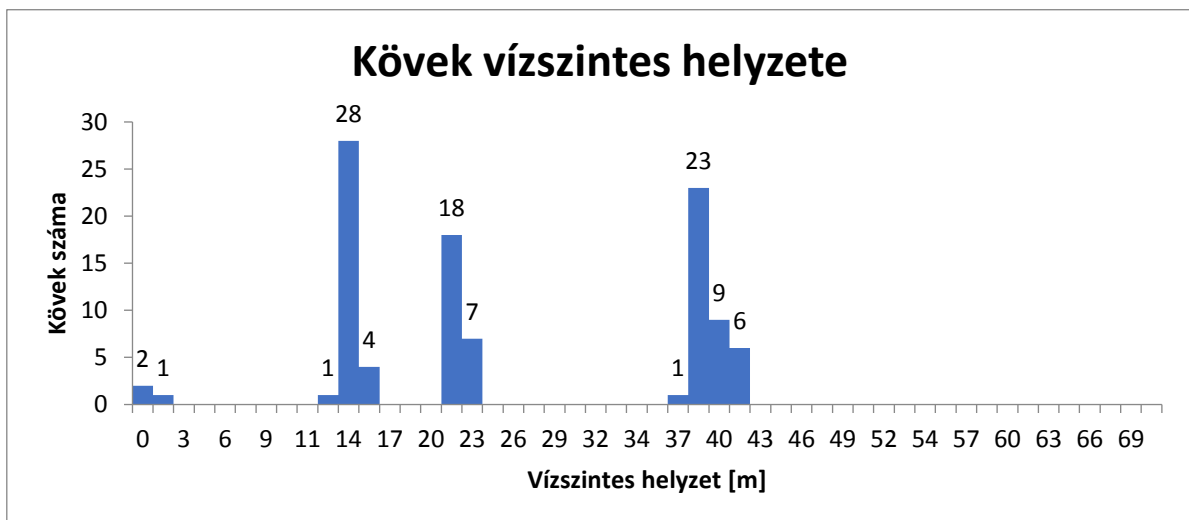
A hetedik metszet nem a Páva kert fölött található, hanem a Pálos kolostortól északra, körülbelül 30 méterrel. A szelvény beleesik a Pálos kolostor kertjébe, így gyakorlatilag a kert

kerítése védelmet nyújt a kiguruló kövek ellen. A szelvény magassága 43 méter a vízszintes vetületi szélessége pedig 42 méter.



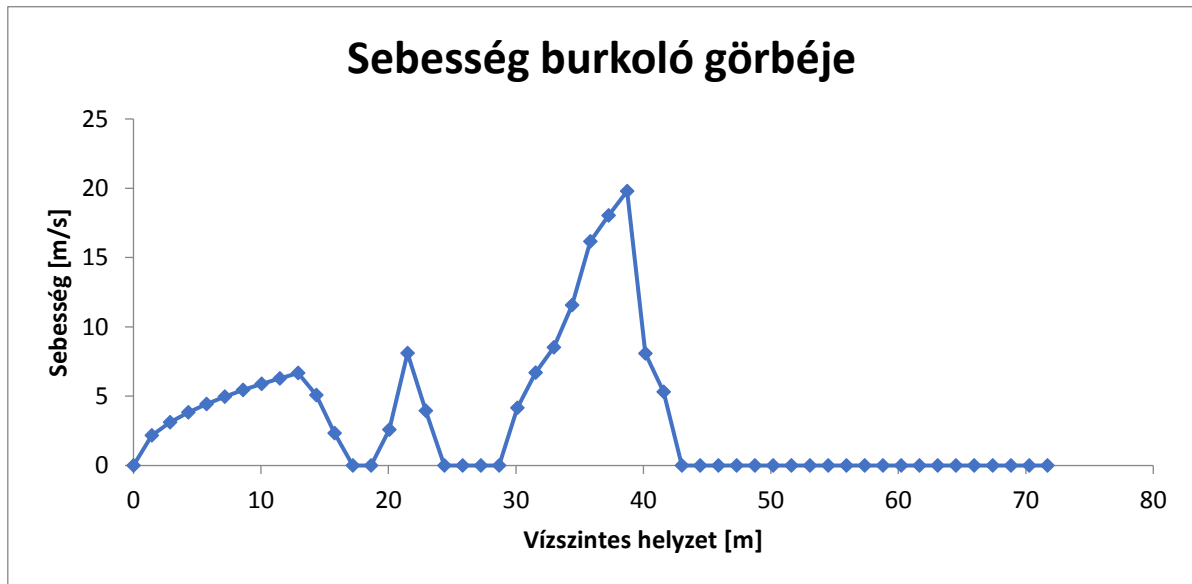
43. ábra 7.metszet

A vizsgálat során három egyenest definiáltam a kövek kiindulásának. A kövek esési pályája a 43. ábra látható. Megfigyelhető, hogy a kövek fele nem érte el a Pálos kolostor kerítését, míg a másik fele igen. A terület jelentős része növényzettel borított, mely segít lassítani a gördülő köveket. A kövek helyzetén látható, hogy a fenti szakasról indult kövek többnyire megállnak, a megállási pontok között pedig körülbelül 10 méteres távolság van. Ez a 10 méter pontosan a két terasz távolsága. Ezen a teraszon a kövek jelentős mennyisége fent marad. Mivel a kövek itt fent maradnak, az segíti a további védelmet, ugyanis ezek a kövek egyfajta gátat képeznek a további gördülőkövek ellen, így segítve a kőzethullás megakadályozását.



44. ábra Kövek vízszintes helyzete, 7. metszet

A kövek sebessége elérheti akár a 20m/s-os sebességet is, mely átszámítva kicsivel több, mint 80km/h. Ez jelentős sebesség, a mozgási energia igen megnő a becsapódás előtti pillanatig. A becsapódást a kerítés felfogja. Ha a kolostor kertjét nem napi szinten használják, akkor a védelmet nem szükséges kialakítani a rézsű mentén. Ha a kolostor napi használatban van, akkor célszerű a rézsűn sziklafogó hálót tervezni. Ez a háló közvetlen a sziklafala lenne csatlakoztatva, így megakadályozva a kövek hullását.

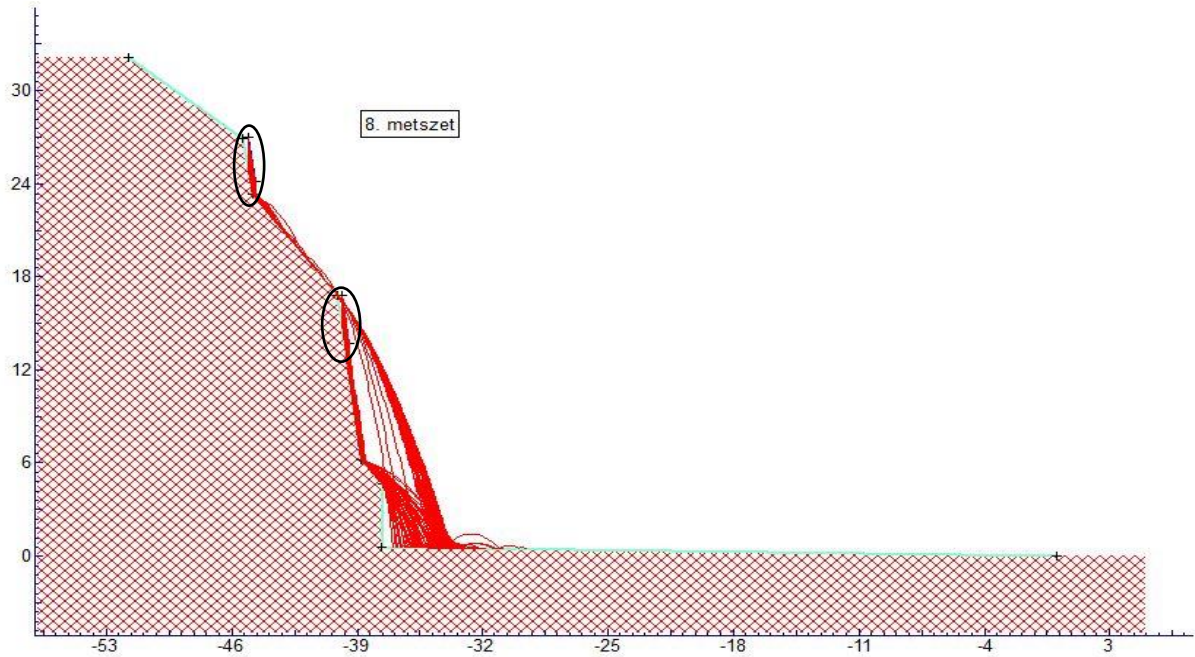


45. ábra Sebességek burkoló görbéje, 7. metszet

Mivel a rézsű közvetlen szomszédságában található a kolostor épülete, ezért nem lehet figyelmen kívül hagyni azt a veszélyt, hogy egy-egy legördül kő az épületet eléri. Ezért az épület feletti részt meg kell erősíteni, annak a vizsgálatát sűríteni kell.

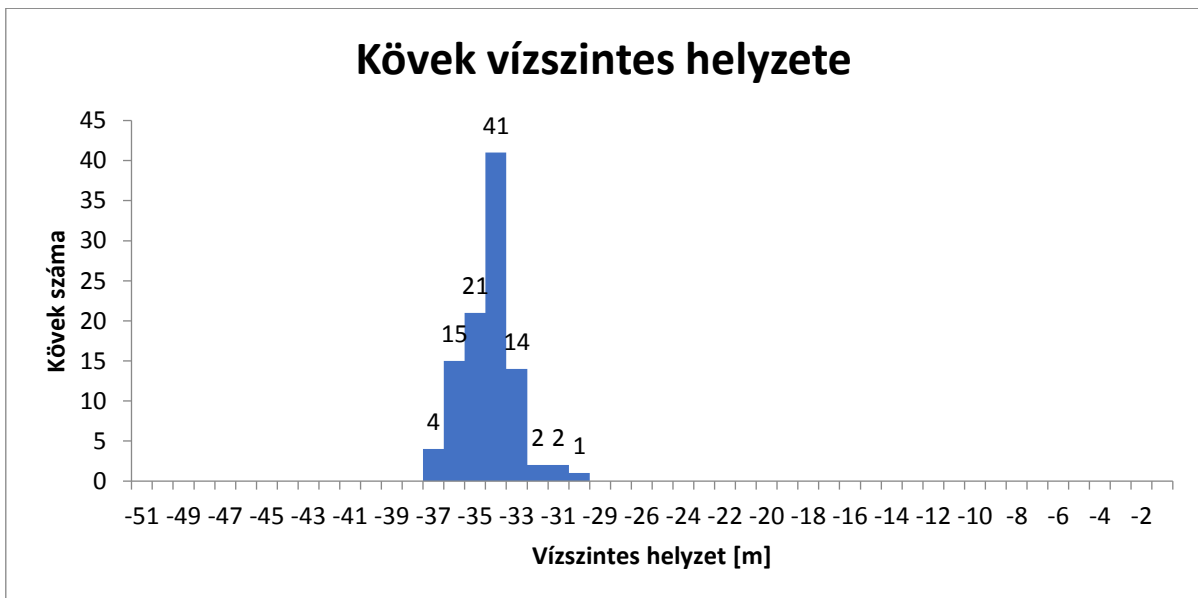
4.8 8. metszet

A 8. metszetet a Pálos kolostortól délre, körülbelül 20-25 méteres távolságban vettem fel. A vizsgálat során két egyenesről indítottam el a köveket. A metszet alatt nem található semmilyen kert, így a lehulló kövek közvetlenül a járdára és/vagy az úttestre esnek. A kövek pályáját a 46. ábra mutatja.



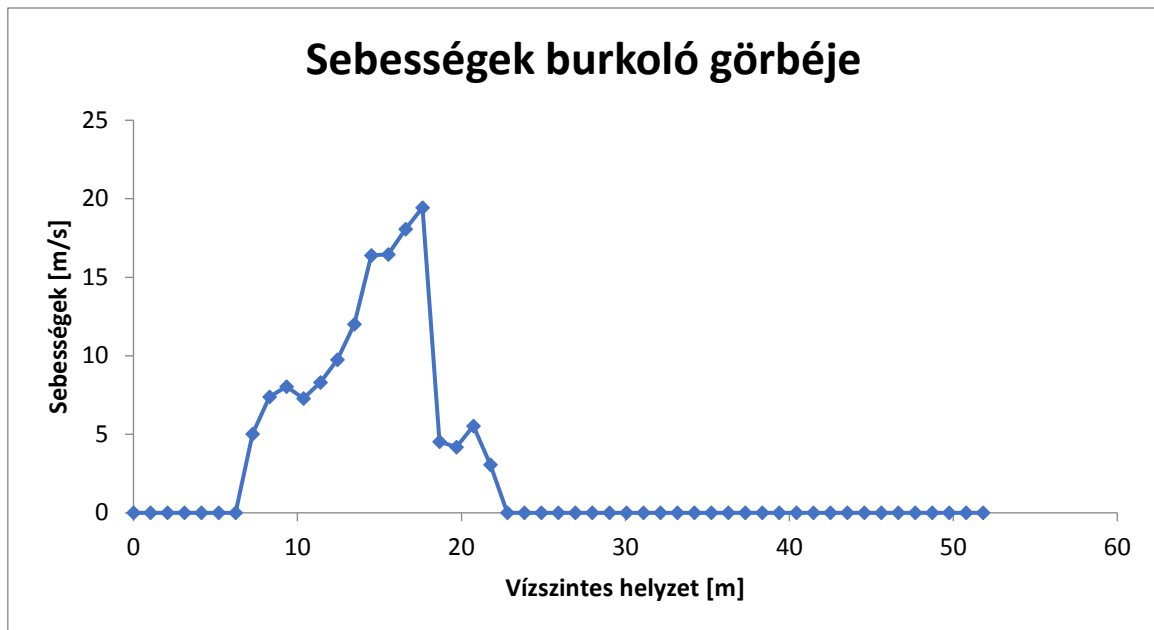
46. ábra 8. metszet

A kövek beérkezési helyét a 47. ábra szemlélteti. Látható, hogy a kövek egy 6 méteres tartományba érkeznek. A koordináták -37-től -31-ig mennek. A kövek a számítások szerint kiesnek az útestre is.



47. ábra Kövek vízszintes helyzete, 8. metszet

A kövek sebességét a 48. ábra szemlélteti. Látható, hogy a kövek maximális sebessége 20m/s, mely hirtelen lecsökken nullára, amint eléri a járda vagy az úttest felületét.

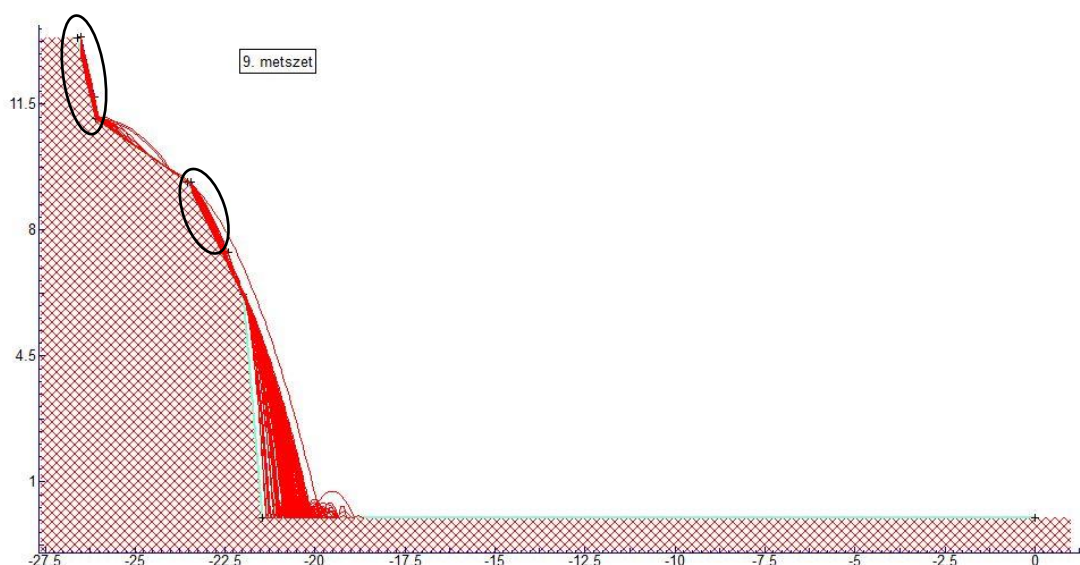


48. ábra Sebességek burkoló görbéje, 8. metszet

Mivel ezen a szakaszon a veszély jelentős, úgy vélem, hogy a kőzetfalhoz fogott háló telepítése lenne célszerű, mivel a geometria nem teszi lehetővé a sziklafogó hálók kialakítását. Ezen felül évenkénti felülvizsgálatot javaslok, hogy az esetleges leeső darabokat időben észre lehessen venni, s a megfelelő intézkedést végrehajtani.

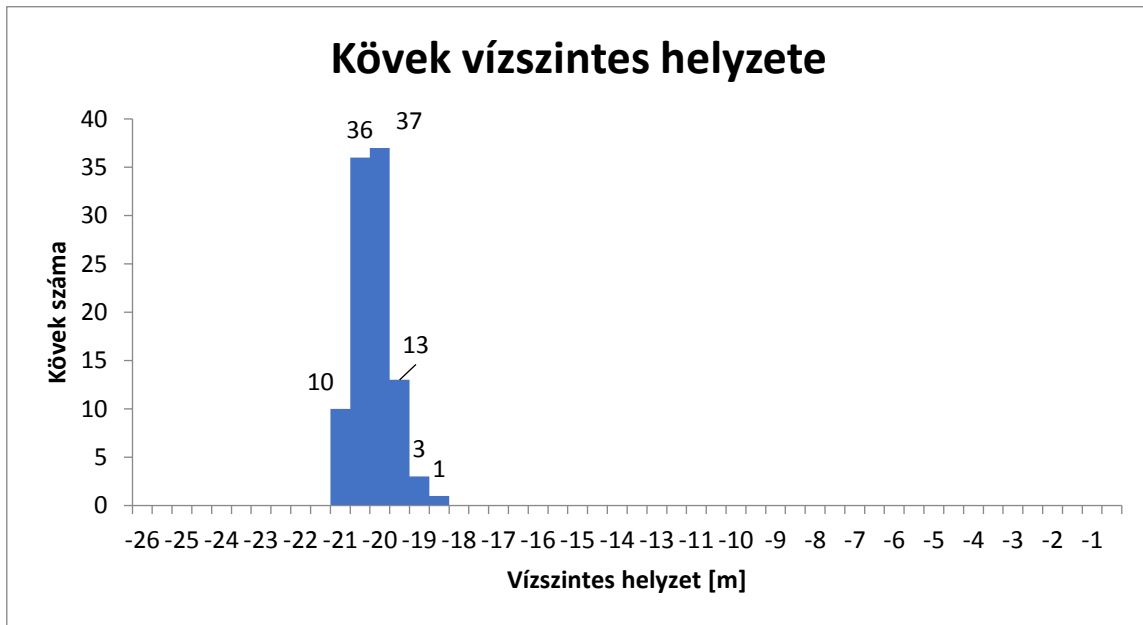
4.9 9. metszet

A 9. metszet a Sziklakápolna alatti részt vizsgálja. A rézsű magassága 13 méter, vízszintes vetületi hossza pedig körülbelül 7 méter. A kövek gyakorlatilag szabadon eshetnek a gyalogos járdára, a metszethez nem tartozik zárt kert. A 49. ábra szemlélteti a kövek esési pályáit, valamint a kiindulási egyenes helyzetét. Az ábráról egyértelműen kivehető, hogy a kövek nem állnak meg a rézsűn, minden kő eléri a gyalogos járdát.



49. ábra 9. metszet

A 50. ábra a kövek helyzetét szemlélteti a becsapódás pillanatában. Látható, hogy a kövek főként a -21 és a -19 koordináták között csapódtak be. Ez a gyalogos járda felülete. A sebességek burkoló görbéjét a 52. ábra szemlélteti. Látható, hogy becsapódás előtt a kövek sebessége eléri a 13m/s-os értéket. Ez átszámítva mintegy 50km/h- nak felel meg. Egy gyalogos reakció ideje nem olyan nagy, hogy egy ilyen gyorsan haladó követ, ilyen rövid úton észre vegyen, feldolgozza azt, hogy mi történik, illetve helyesen cselekedjen.



50. ábra Kövek vízszintes helyzete, 9. metszet



51. ábra Sebességek burkoló görbéje, 9. metszet

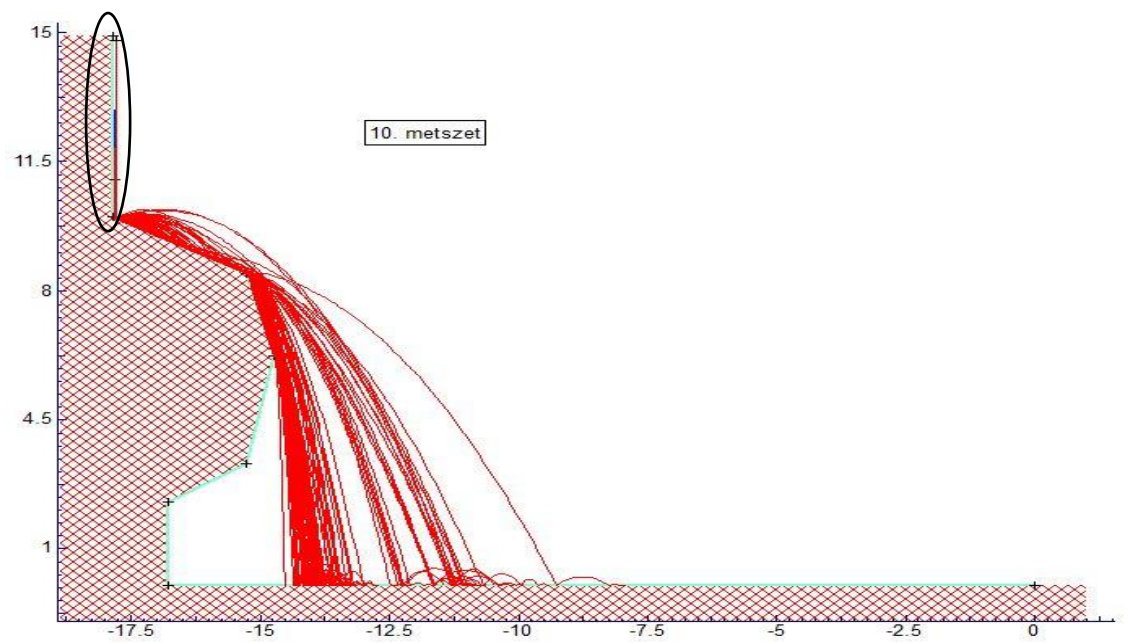
Ezt megelőzendő, fontos, hogy megakadályozzuk azt, hogy a kövek kiszakadjanak a sziklafalból, ezért a sziklafalhoz fogott közethálót javaslok felszerelni. Ezentúl fontosnak

tartom, hogy a sziklafalat gyakrabban ellenőrizték alpin technológiával, és éves kopogózás vizsgálatot végezzenek el.

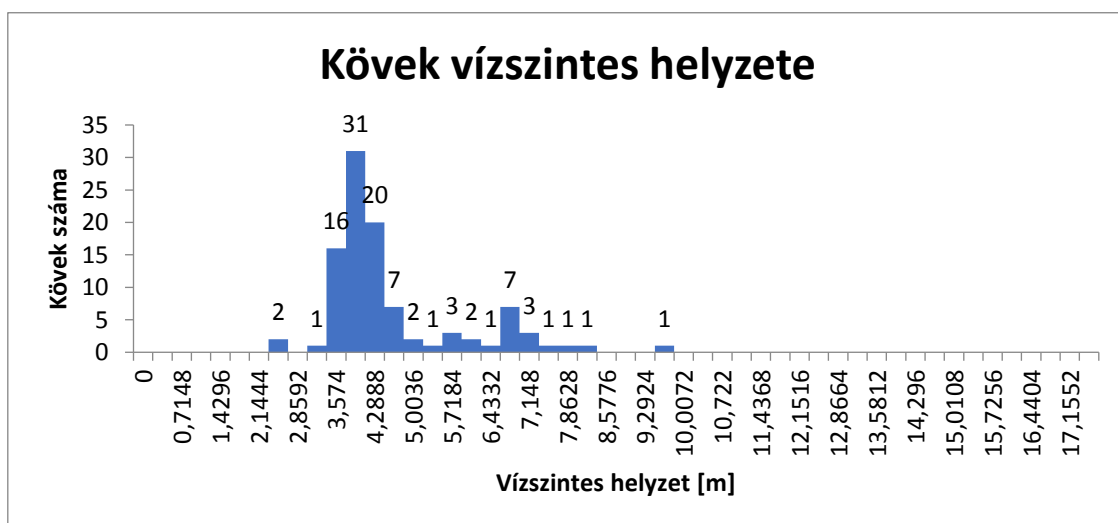
4.10 10. metszet

A 10.metszet a Sziklakápolna fölött helyezkedik el. A vizsgált szelvény magassága 15 méter, a vízszintes vetületi hossza pedig körülbelül 6 méter. A 52. ábra szemlélteti a kövek pályáit a zuhanás közben. Az említett ábrán a kiindulási egyenes fekete ellipszissel van jelölve.

Látható, hogy a kövek gyakorlatilag a bejárat elé esnek, ezért ez a rész kiemelten veszélyes. Megoldásként a bejárat feletti függőleges részre, a falhoz fogott kőzetfogó sziklahálót javaslok telepíteni, valamint a felület éves vizsgálata ajánlott. A 53. ábra a becsapódott kövek helyét mutatja meg. Látható, hogy a kövek egy körülbelül 4 méter széles zónában landolnak, mely meglehetősen nagy, s egy esetleges kőzethullás következtében a veszélyzónában tartózkodó járókelők könnyedén sérülést szenvedhetnek.




52. ábra 10. metszet





53. ábra Kövek vízszintes helyzete, 10. metszet

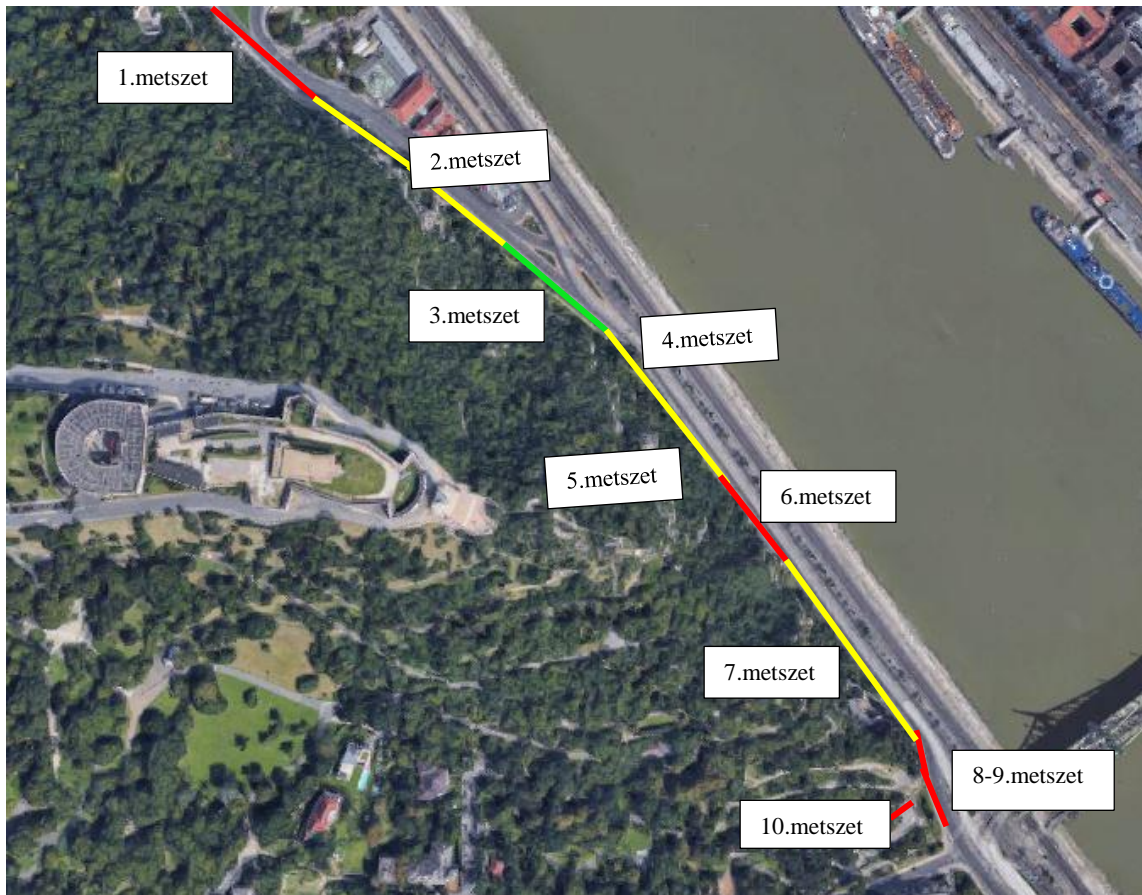
4.11 Veszélytérkép

Miután a jellemző metszetek számítása lefutott, elkészítettem a hegy keleti oldalának a veszélyességi térképét. A térkép lényege, hogy a három veszélyességi osztály közül egybe besorolja az adott metszetet, és ezáltal megoldást javasol az esetleges kőzethullások megakadályozására, illetve a balesetek megelőzésére. A veszélytérkép megmutatja, hogy az egyes részekben a gyalogos, illetve a közúti forgalom mekkora veszélynek van kitéve. A térképen három különböző színnel jelöltem az egyes veszélyességi zónákat. A veszélyzónák helyeit a 54. ábra szemlélteti.

 **szín** jelöli a veszélyes zónákat. Ezek a területeken a vizsgált terület nem a Páva kert vonzáskörzetébe tartozik, ezáltal a kövek szabadon elérhetik a járdát, illetve az úttestet. Itt kőzetfelfogó háló beépítése szükséges, az alpin technikával végzendő kőzetkocogtatást évente szükségsszerű elvégezni. A fenti részen a növények irtása javasolt. Az alsó részen levő növények az esetlegesen elszabaduló köveket jelentős mértékben lassíthatják, így azon növények kivágása nem ajánlott. A növényzet irtására külön tervet célszerű készíteni, s további vizsgálatokat végezni. A piros zónába eső metszetek az 1., 6., 8. 9. és a 10. metszet.

 **szín** a közepesen veszélyes zónákat jelöli. Ezek azok a területek, ahol a vizsgált részsűk a Páva kert vonzáskörzetében vannak, ám a leeső kövek elérik a Páva kert kerítését. Ezek a helyeken nem kell számítani kőzethullásra, csupán az apróbb görgetegek morzsolódására. Ezekben a szakaszokon a kőzetfalhoz fogott háló telepítése javasolt az esetleges kőmorzsalékok felfogására. A növényzet irtása nem javasolt. A sárga zónába eső metszetek a 2., 4., 5. és a 7. metszetek.

 **szín** jelöli azokat a területeket, melyek kis mértékben veszélyesek. Ezek a területek a Páva kert vonzáskörzetébe tartoznak, ám a leguruló kövek nem érik el a Páva kert kerítését. A részsűk vizsgálatát itt elegendő két évente elvégezni, a növényzet irtása nem javasolt. A zöld zónába egyedül a 3. metszet tartozik.



54. ábra Veszélyességi térkép, felülnézet

5. Közethullás kockázati minősítési rendszer (Rockfall hazard rating system)

Az autópálya és vasúti pálya építéseknél nagy gondot okoz, ha az adott műtárgy sziklarézsű mellett helyezkedik el. A sziklarézsűk stabilitását általában egy adott kritikus keresztmetszetre szokták méretezni, ezzel időt és pénzt spórolva a beruházóknak. Ahhoz, hogy a rézsűk stabilitása meghatározható legyen komolyabb számolás nélkül, szükség van egy közelítő eljárás kidolgozására. Hasonló elvek a gyakori közethullásokkal rendelkező országokban már ismertek. Az Egyesült Államokbeli, illetve a kanadai Vasút- és Autópályaügyi Hivatal (*Highway and Railway Department*) ezért kidolgozott egy olyan közelítő módszert, mellyel egy adott sziklarézsű veszélyessége meghatározható közethullásra, gyakorlatilag azonnal, a helyszínen megkapva az eredményt. Az eredményhez szükség van a vizsgált rézsű magasságára, a rézsű lábánál levő árok hatékonyságának meghatározására (ha van árok), az átlagos gépjármű forgalomra, a látótávolságra, az út szélességére, a szikla szerkezeti állapotára, a kőzet súrlódási szögére, a kövek eróziós hajlamára, a közethullások minőségére, klímaviszonyokra és a csapadékok mennyiségére, régebbi közethullások adataira.

A számítás lényege, hogy minden egyes tényezőhöz egy értéket párosít, ezeket az értékeket összeadva megkapjuk, hogy a rézsű mentén várható-e közethullás. A módszert megalkotó Mr Lawrence Pierson javaslata szerint, ha egy rézsű 300-nál kisebb értéket kap, akkor kicsi a veszélyessége a közethullásra míg, ha ez az érték 500-nál nagyobb, akkor a veszélyesség nagy. A két érték között további vizsgálat javasolt. Fontos megjegyezni, hogy ez a besorolás az oregoni sziklarézsűkre vonatkozik, ám én most a Gellért-hegyre alkalmazom az eljárást. A

pontozási rendszert a következő táblázat tartalmazza, részletesebben az egyes tulajdonságok ismertetésénél fogom közölni a számítás lépéseit.

Kategória		Pontozási szempontok, pontok				
		3 pont	9 pont	27 pont	81 pont	
Rézsű magasság		25 láb	50 láb	75 láb	100 láb	
Árok hatékonyság		Kiváló	Átlagos	Korlátolt	Nincs árok	
Átlagos gépjármű forgalom		a nap 25%-ban	a nap 50%-ában	a nap 75%-ában	a nap 100%-ában	
Látási viszonyok		Kiváló	Átlagos	Korlátolt	Nagyon korlátolt	
Burkolat szélesség		44 láb	36 láb	28 láb	20 láb	
Geológiai tulajdonságok	1.eset	Szerkezeti állapot	Tagolatlan kőzet, a tagoltság iránya kedvező	Tagolatlan kőzet, véletlenszerű tagoltsági irányok	Tagolatlan kőzet, kedvezőtlen tagoltsági irányok	Erősen tagolt kőzet
		Felületi sűrűség	Durva, szabálytalan	Hullámos	Síkszerű	Agyaggal kitöltött
	2.eset	Szerkezeti állapot	Kevés eróziós jellemzők	Gyakori eróziós jellemzők	Sok eróziós jellemző	Nagyon sok eróziós jellemző
		Eróziós különbség	Kicsi	Átlagos	Nagy	Extrém
	Tömb mérete/közethullás mennyisége		1 láb/3 yard ³ (2,3m ³)	2 láb/6yard ³ (4,6m ³)	3 láb/9 yard ³ (6,9m ³)	4 láb/12 yard ³ (9,2m ³)
	Időjárási viszonyok, víz előfordulása		Alacsony csapadékintenzitás, fagyhatás nem várható, víz nincs jelen	Mérsékelt csapadék, vagy rövid fagyhatás, vagy víz időszakos előfordulása	Magas csapadékintenzitás, vagy hosszú fagyhatás, vagy víz folyamatos jelenléte	Hosszú fagyhatás és magas csapadékintenzitás/ víz folyamatos jelenléte
Korábbi közethullások		Kevés	Időszakosan	Sok	Folyamatos	

3. táblázat Pontozási segédlet

A pontozás során, ha az adott tulajdonság nem volt egyértelműen meghatározható, akkor a két érték átlagát vettem, illetve, az adott számokkal jellemzett tulajdonságok esetén lineáris interpolációt alkalmaztam, ahol az megoldható volt.

A vizsgálat során zónánként pontoztam az egyes kategóriákat. Így összehasonlíthattam, hogy a numerikus számításból, illetve a tapasztalati vizsgálatból kapott értékek mennyire térnek el egymástól.

5.1 Rézsű magassága

A rézsű magassága alatt a rézsű teljes függőleges magasságát értjük. Minél magasabb a rézsű, annál magasabb lesz a kövek helyzeti energiája is. A rézsű magasságát az a pont határozza meg, ahonnan a legmagasabban fekvő kőzet kiszakadhat és esésnek indulhat. A piros zónába eső metszetek magassága a következő:

- 1. metszet: 59 méter,
- 6. metszet: 66 méter,
- 8. metszet: 31 méter,
- 9. metszet: 13 méter,
- 10. metszet: 15 méter.

A sárga zónába eső metszetek magassága:

- 2. metszet: 93 méter,
- 4. metszet: 99 méter,
- 5. metszet: 88 méter,
- 7. metszet: 43 méter,

Míg a zöld zónába eső metszet magassága:

- 3. metszet: 95 méter.

Ezek alapján az egyes zónáknak kiszámoltam az átlagmagasságát. Az átlagmagasságok a következők:

- piros zóna: 36,8 méter=120,7 láb,
- sárga zóna: 80,75 méter=265 láb,
- zöld zóna: 95 méter=311,6 láb.

A 3. táblázat alapján mind három zóna **81 pontot** kap.

5.2 Árok hatékonysága

Az árok hatékonyságának meghatározása azon alapul, hogy van-e árok a sziklarézsű aljában, és ez az árok képes-e a lehulló köveket valamennyire megfogni, ezzel védve a műtárgyat, utat, vasutat. Mivel a Gellért-hegy alatt húzódik a Páva-kert, ezért esetemben a Páva-kertre úgy tekintettem, mint egy árokra. Mivel a piros zóna a Páva-kerten kívül, ezért arra a részre úgy tekintettem, hogy ott nincs árok, míg a sárga és a zöld zónákban figyelembe vettem a kertet. A táblázat szerinti besorolás alapján a Páva-kert hatékonysága se nem kiváló, se nem átlagos, ezért a kétpont közti értéket adom.

A sárga és a zöld zónákban az árok hatékonysága: **6 pont**.

A piros zónában nincs árok ezért a hatékonysága: **81 pont**.

5.3 Átlagos jármű kockázat (Average vehicle risk)

Ez a mennyiség megmutatja, hogy egy gépjármű az idő hány százalékában van veszélyben, míg elhalad a rézsű mellett. A kockázatot az alábbi képlettel lehet kiszámolni, ami függ a rézsű hosszától, az átlagos napi gépjárműforgalomtól (ÁNGF), valamint a sebességhatártól. A 100%-os arány azt jelenti, a nap bármely szakában várható egy elhaladó jármű a rézsű mellett. A mennyiség kiszámítását a 15.0 egyenlet szemlélteti.

$$\frac{\text{ÁNGF} \left[\frac{\text{autó}}{\text{óra}} \right] * \text{Részű hossz (mér föld)} * 100\%}{\text{Sebesség határ} \left[\frac{\text{mér föld}}{\text{óra}} \right]} \quad (15.0)$$

Az átlagos napi gépjárműforgalmat úgy határoztam meg, hogy hétköznapi reggel 07:00-tól 08:00-ig, valamint este 19:00-tól 20:00-ig megszámláltam az elhaladó járműveket. Ebből átlagot vonva kaptam azt, hogy az átlagos napi gépjárműforgalom kerekítve **1500 autó/óra**. A forgalom gyakorlatilag állandó, a nap bármely napszakjában jelen van. A részükhöz hosszát szintén átlagoltam. Az egyes zónákban lévő metszetek hossza a következő:

A piros zónában lévő metszetek:

- 1. metszet: 68 méter,
- 6. metszet: 96 méter,
- 8. metszet: 35 méter,
- 9. metszet: 14 méter,
- 10. metszet: 15 méter.

A sárga zóna metszetei:

- 2. metszet: 128 méter
- 4. metszet: 130 méter,
- 5. metszet: 119 méter,
- 7. metszet: 61 méter.

A zöld zóna metszete:

- 3. metszet: 146 méter.

Az egyes zónák hossza összeadva rendre 228 méter, 438 méter és 146 méter. Átváltva mérföldre az értékek a következők: 0,14 mérföld, 0,27 mérföld és 0,1 mérföld.

50 km/órát átváltva 31 mph-t kapunk.

Így a százalékos kockázat a piros zónában 677%, a sárga zónában 1306% és a zöld zónában 484%. Ez azt jelenti, hogy gyakorlatilag a nap 24 órájában jelen van gépjárműforgalom. Ezek alapján mindhárom zóna **81 pontot** kap.

5.4 Döntési látótávolság (Decision sight distance)

A döntési látótávolság alatt azt a távolságot értjük, ahol a jármű vezetőjének komplex, váratlan helyzetben kell a lehető legbiztonságosabb döntést meghoznia. A képzetben ezt a távolságot lábban kell megadni. Itt nem választottam szét zónákra a vizsgálatot, az egész szakaszt egyként vizsgáltam, így adva meg a paramétereiket.

Egy közethullásra hajlamos szakaszon ez a látótávolság könnyen változhat. Kőzetkibukkanások, esetleg a növényzet nagy mértékben megnehezítheti a jármű vezetőjének a veszély észlelését, így hiába hozna megfelelő döntést, ha az már túl késő. Ahhoz, hogy pontosítsuk a részükhöz, az alábbi táblázatból meg kell határozni a döntési látótávolságot, majd ezt el kell osztani a valós, jelenlegi látótávolsággal. A látótávolság jelen esetben a vizsgált szakasz hossza lábban. 50km/h 31mph-nak felel meg, így interpolálva megkapjuk, hogy a döntési látótávolság 465 láb. Az aktuális látótávolság pedig 770 méter, ami átszámítva 2526 láb.

Sebességhatár [miles/h]	Sebességhatár [km/h]	Döntési látótáv [láb]
30	48	450
40	64	600
50	80,5	750
60	96,5	1000
70	112,5	1100

4. táblázat Sebességhatár és a döntési látótávolság kapcsolata

A kiszámításhoz a 16.0 egyenletbe behelyettesítve megkapjuk a százalékos láthatóság értékét, ezek alapján pontozhatjuk a rézsút.

$$\frac{\text{Aktuális látótávolság} \cdot 100\%}{\text{Döntési látótávolság}} = \frac{2526 \cdot 100}{465} = 543\% \quad (16.0)$$

Az érték nagyobb, mint 100%, ami azt jelenti esetünkben, hogy a rézsú jól belátható, a veszélyt a vezetők időben el tudják kerülni. Ezek alapján **3 pont** adható.

5.5 Útpálya szélesség

Az útpálya szélességét úgy kell lemérni, hogy a távolság merőleges az úttest középvonalára, és az úttest egyik szélétől a másik széléig tart. Minél szélesebb az úttest, annál biztonságosabb a közlekedés, hiszen annál több hely van kikerülni egy esetlegesen lehulló sziklatömböt. Az úttest szélességénél szintén egy szakaszként vizsgáltam a rézsút, nem osztottam fel zónákra. Az úttest szélessége 14 méter, ami 45 lábnak felel meg, ezek alapján az adható pontszám **3 pont**.

5.6 Geológiai jellemzők

A geológiai jellemzőknek a pontozás során két változatát különböztetjük meg. Az első változat, illetve ahogy a táblázatban látható, az 1. eset során olyan rézsúket értünk, melyekre főként a tagoltságok a jellemzők, és egyéb diszkontinuitások láthatók. A 2. változat vagy eset során azokat a rézsúket értjük, ahol főként az erózióknak, illetve a nagyon meredek lejtőknek köszönhető a kőzethullás. A mérlegelés során a vizsgáló személynek kell eldöntenie, melyik változatot vagy esetet kívánja használni. A tanulmány során az 1. változat a mérvadó, a továbbiakban ezt fogom ismertetni, és ez alapján kap pontot a geológiai jellemzőkre a vizsgált rézsú. Az első eset kapcsán két dolgot kell megfigyelni a vizsgált rézsún: a rézsú szerkezeti állapotát, illetve a rézsú felszínének a súrlódási szögét.

Ennél a kategóriánál szintén egyként kezeltem a hegyoldalt, hiszen az összetételben nincs különbség a zónák között.

5.6.1 Szerkezeti állapot

A szerkezeti állapot esetében a kőzettömbök folytonosságát kell megvizsgálni, illetve azt, hogy milyen a kőzettömbök közti anyag, mivel vannak kitöltve a kapcsolatok, illetve van-e talajvíz. Ezek alapján a keleti oldalon a sziklafal folyamatos, a tagoltságok száma csekély, ám igen véletlenszerű. Ezek alapján a rézsút **9 pontra** értékelem.

5.6.2 Felületi súrlódás

Felületi súrlódás esetén azt keressük, hogy egy kőzettömb hogyan mozdul el egy másik kőzettömbhöz képest. A felületük érdessége meghatározza a mozgás gyorsaságát. A felületi súrlódás makro, illetve mikro érdességből tevődik össze. A makro érdesség a felszín

hullámzottságát mutatja meg, míg a mikro érdesség a felület textúrájától függ. A fentiek alapján és a 3. táblázat szerint a rézsút **27 pontra** értékelem.

Ezek alapján a geológiai jellemzőkre összesen **36 pontot** adtam.

5.7 Tömb mérete/leeső kőzetek mennyisége

Ennél a fejezet résznél vagy meghatározzuk a potenciálisan lehulló kőzettömbök nagyságát lábban, vagy pedig a lehullott kőzetek mennyisége alapján pontozzuk a rézsút. Esetemben az első alternatívát választottam, mivel a kőzethullás gyakoriságára nem volt megfelelő irodalom. A tömbök mérete nem változik jelentősen az egyes zónákban ezért, nem tettem különbséget a zónák között. A 3. táblázat alapján, a potenciálisan lehulló kőzetek nagysága nem haladja meg az 1 lábat, így ezek alapján **3 pont** adható.

5.8 Időjárási viszonyok, csapadék mennyisége

A csapadék, illetve a fagyás/olvadás nagymértékben hozzájárul egy kőzetest romlásához, aprózódásához. Azok a területek, ahol 500 milliliternél kevesebb csapadék hullik egy évben, alacsony csapadékintenzitásúnak soroljuk, míg azok a területek, ahol évente több, mint 1200 milliméter csapadék hullik, nagy intenzitású területként tartjuk számon. A budapesti átlagos éves csapadékmennyiség körülbelül 550-600 mm/év [10]. Ez alapján se nem alacsony, se nem magas intenzitásúnak nem mondható. A fagyhatás jelentős, a téli évszakokban a hőmérséklet meghaladhatja az akár -15C° -ot is.

Az író, Mr. Lawrence Pierson, tanácsa alapján 27 pont adható arra a területre, ahol hosszú fagyhatásnak van kitéve a rézsú, vagy a rézsún lefolyó víz közel folyamatosan jelen van, vagy a csapadék intenzitása nagy. 81 pont adható, ha a területen a fagyhatás nagy időkiterjedésű és ezzel együtt extrém talajvíz és/vagy csapadékviszonyok tapasztalhatók. Ezen ajánlás alapján a rézsúre **27 pontot** adok, hiszen a fagyhatás hossza jelentős, és a csapadékintenzitás is meghaladja az alacsony küszöbértéket. A fagyhatás, illetve a csapadékintenzitás sem változó az egyes zónák esetében, így itt is egy szakaszként kezeltem a zónákat.

5.9 Korábbi kőzethullások

A korábbi kőzethullások feljegyzéséért a mindenkori üzemeltető a felelős. Ha a rézsú újonnan lett kialakítva, esetleg üzemeltető váltás történt, akkor előfordulhat, hogy nem áll rendelkezésre kőzethullási jegyzőkönyv. Ezekben az esetekben a hegyet felül kell vizsgálni, és megbecsülni a korábbi kőzethullások számát. A Gellért-hegy esetében a BKK az üzemeltető, ám a



55. ábra Lehullott kőtömb



56. ábra Lehullott kőtömbök

közethullások számát nem vezetik. A hegy lábánál azonban láthatók kisebb nagyobb tömbök, melyek arra engedtek következtetni, hogy nem csak a már említett '60-as évekbeli eset történt, hanem több kisebb kő is zuhant már le, ám mivel a Páva kertet érintették, nem tulajdonítottak nekik nagy jelentőséget. Az 55. ábra és az 56. ábra szemlélteti a már eddig lehullót köveket. A közethullásoknál sem különítettem el az egyes zónákat, így egy szakaszként kezeltem.

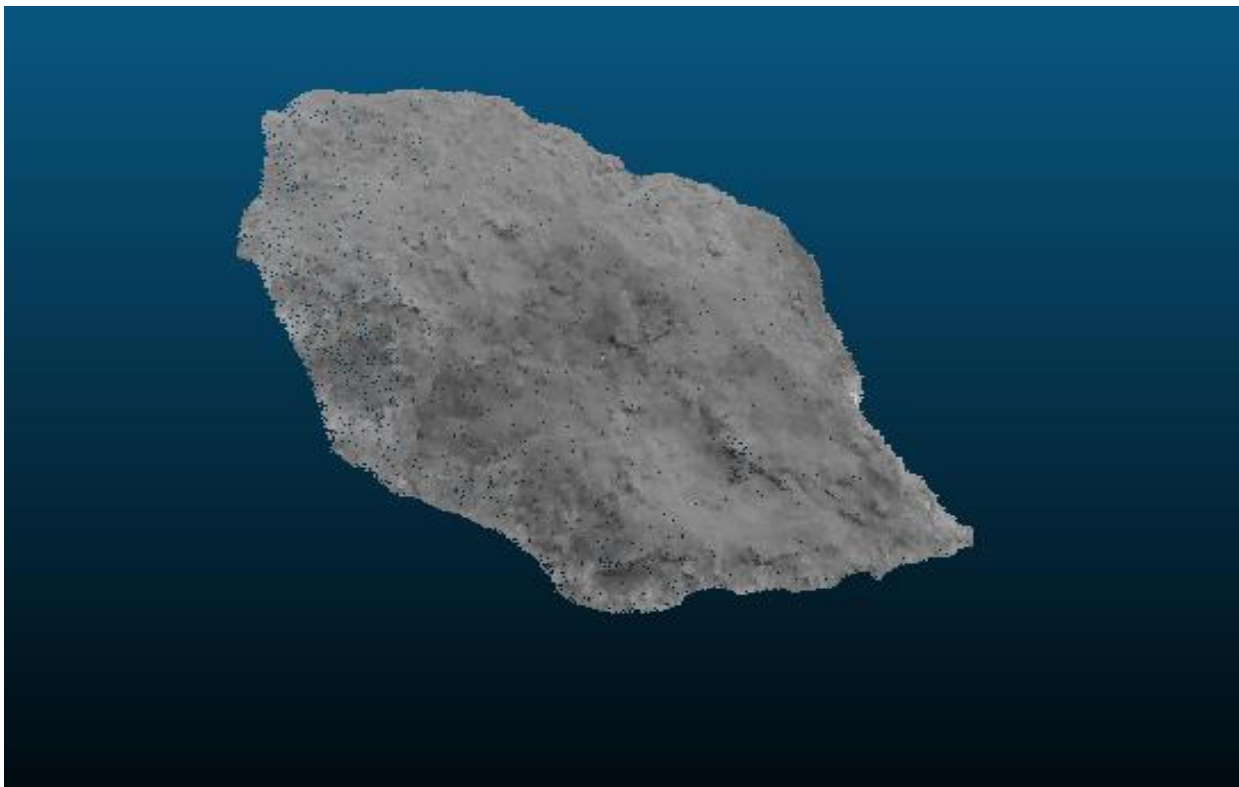
Ezen kategória alapján a rézsűre **10 pontot** adok.

A pontozás alapján a piros zónába eső területekre **325 pont** volt adható összesen. Ez azt jelenti, hogy további vizsgálatot igényelnek ezek a területek. A sárga, illetve a zöld zóna **250 pontot** ért el. Eszerint a két szakasz nem jelent veszélyt közethullás szempontjából.

6. Laboratóriumi vizsgálat

A laboratóriumi vizsgálat során a Gellért-hegy lábainál található dolomit kőzeteket lapokra vágtam fel. Ezekből a lapokból kialakítottam egy fiktív rézsút, melyet a továbbiakban vizsgáltam laboratóriumi körülmények között. A vizsgálat folyamata során egy kisebb dolomit törmeléket engedtem el a modell tetejéről, és mértem a vízszintes becsapódási helyet. A kísérletet százszor végeztem el. E kísérlet elvégzése után a vizsgált rézsút numerikusan is megvizsgáltam Rocscience szoftverben. A kapott eredményeket összehasonlítottam, és az eltérések okát vizsgáltam.

A rézsű vizsgálatánál két vágott dolomit lapot használtam fel, illetve egy vágatlan kőzet darabot. Az alsó lap egy vékonyabb természetes kőzet, melyet lézerszkenneléssel felmértünk a pontosabb modellezhetőség miatt, ám a kis geometriai méretek, a sok pontfelhő miatti nagy adatmennyiség, illetve a program által alkalmazott egyszerűsítések miatt a modellt egyszerűsítve vittem be a programba.



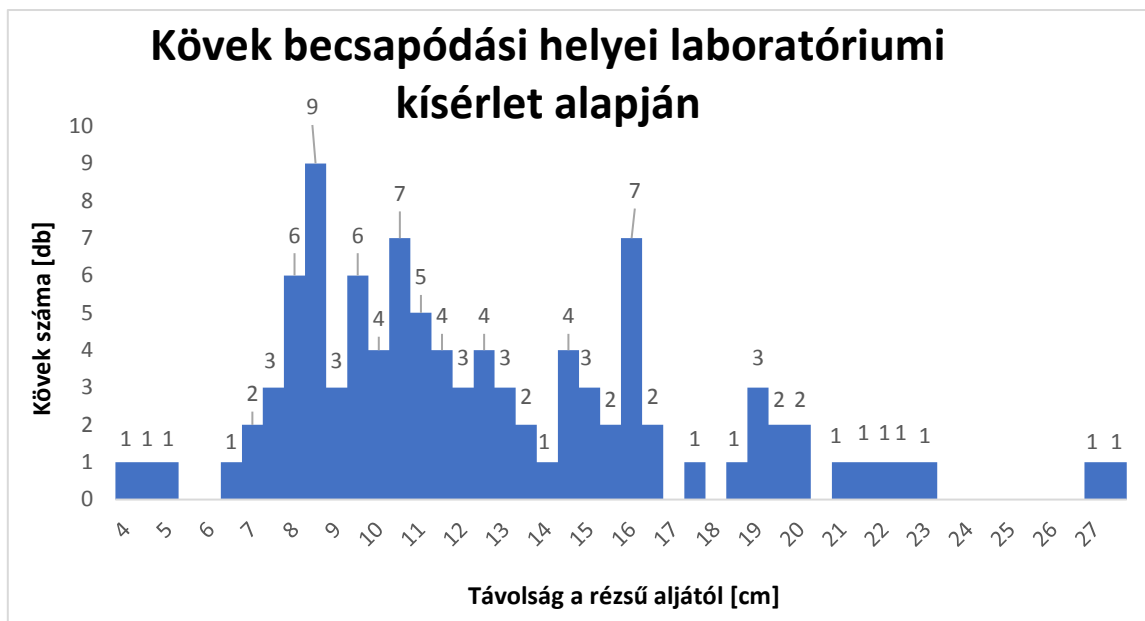
57. ábra Vizsgált kő pontfelhője

A laborvizsgálathoz felállított modellt az 58. ábra mutatja. A vizsgálat során a legalsó követ egy dönthető háttámlájú szerkezetre tettem, melynek dőlésszögét 30° -ra állítottam be. A szerkezeten elhelyezett szelencés libella biztosította, hogy vízszintesen támaszkodjon a szerkezet az asztalra. Ezt folytatva a dolomit lapokat agyaggal „ragasztottam” a szerkezetre, melyeknek a hosszát, valamint a szögét lemértem. A szögméréshez szögmérőt, valamint vízmértéket használtam, így biztosítva a pontos mérést. A hossz leméréséhez egyszerű mérőszalagot használtam. Miután a geometria ismert volt, megépítettem a modellt a Rocscience programban. A paraméterek megadásánál ugyanazokkal az értékekkel dolgoztam, mint a rendes hegyoldal vizsgálatokor.



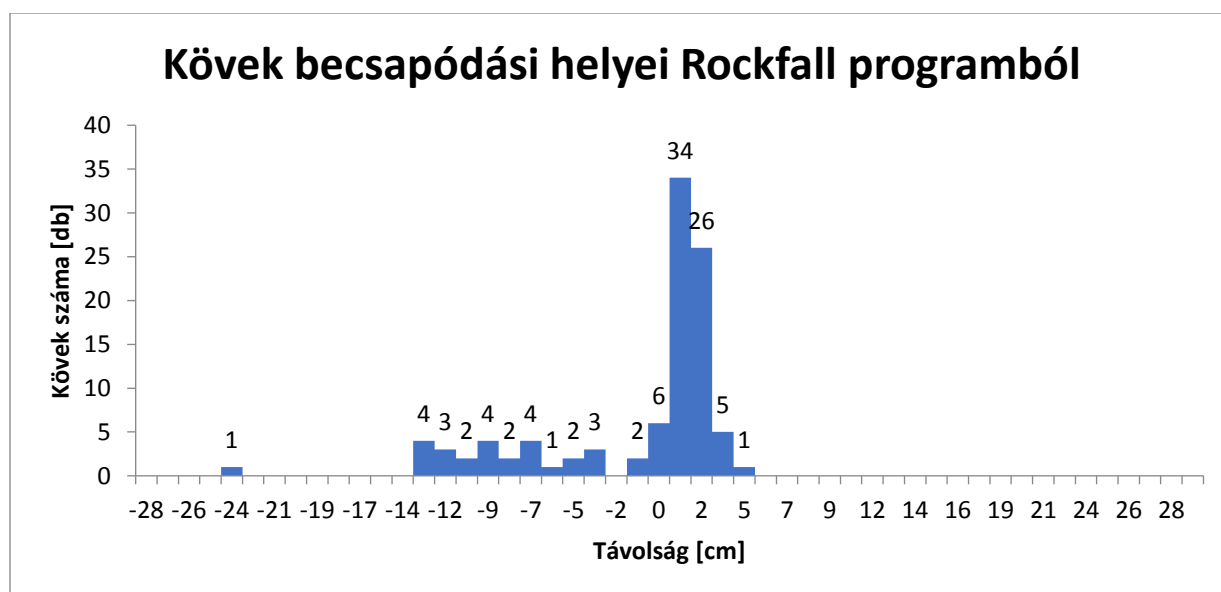
58. ábra A kísérleti rézsű képe profilból

A kísérleti rézsű aljánál egy tálalt helyeztem el, melybe homokot szórtam. A tál célja az volt, hogy felfogja a kavicsot, így az nem gurul tovább, hanem megáll az első beérkezési helyen. A kísérletből adódó eredményeket szemlélteti a 59. ábra.



59. ábra Kövek becsapódási helyei laboratóriumi kísérlet alapján

A szoftveres számításokat elvégezve a kövek becsapódási helye a következőképpen alakult.



60. ábra Kövek becsapódási helyei RocScience programból

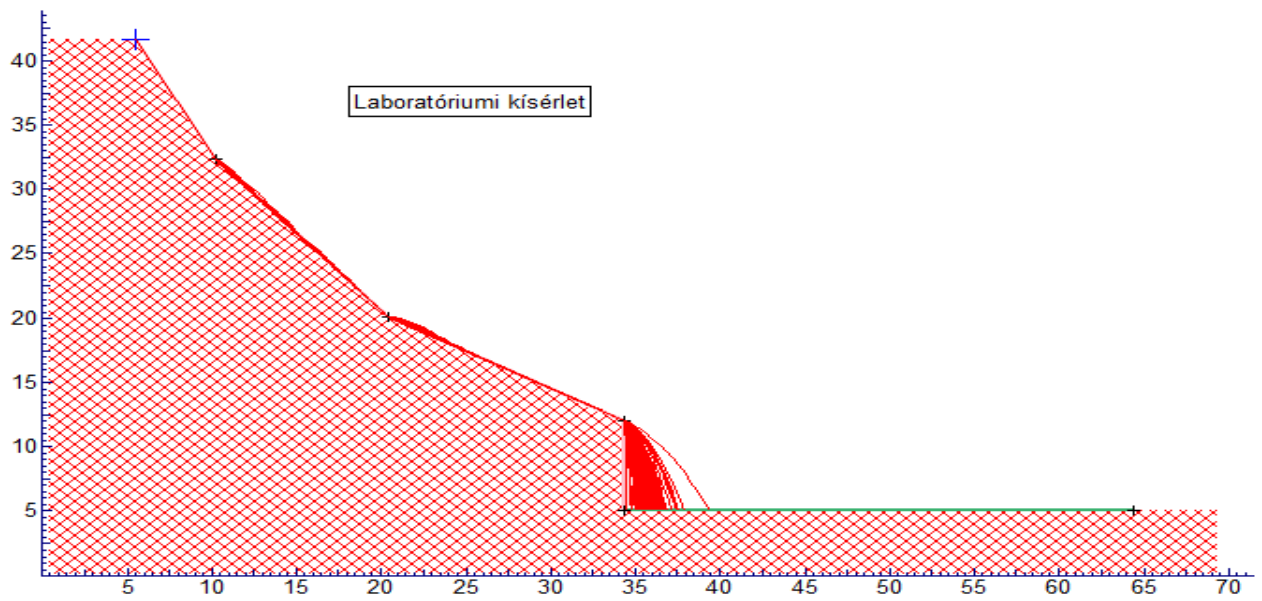
Látható, hogy a szoftveres számítás kedvezőbb eredményeket adott, mint a laboratóriumi vizsgálat. Míg a szoftveres vizsgálat esetében a kövek többsége körülbelül 6 centiméterre távolodott el a rézsű lábától, addig a laboratóriumi vizsgálatnál a kövek főként a 7-16 centiméteres tartományba estek, illetve egy-egy kő elérte az 20 centiméteres vagy annál messzebbi tartományt.

A laboratóriumi vizsgálatokról videófelvételt készítettem, mely alapján elmondható, hogy a kövek esési pályája az utolsó szakasz végéig megegyezik. A laboratóriumi vizsgálatok esetében a kövek becsapódási helyeinek nagyobb a szórása, mint a szoftveres vizsgálat esetén. A kövek pályáját 61. ábra szemlélteti. A videót nagy sebességű kamerával vettem fel, fél másodpercenként vizsgálva a kövek helyzetét. Az ábra egy erős közelítést ad, hiszen nem

minden pontban tudtam megvizsgálni a kövek helyzetét. A Rockfall számítás eredményét a 62. ábra szemlélteti.



61. ábra Kövek mozgási pályája a videófelvételtől



62. ábra Kövek mozgása Rockfall programból

7. Összefoglalás

A Gellért-hegy kiemelkedő jelenség a budai oldalon. Noha egy természeti katasztrófa valószínűsége csekély, a kockázat jelentős, mely főként a nagy forgalomnak köszönhető. A rézsú veszélyességét kétféle módszerrel határoztam meg, numerikus vizsgálattal, illetve tapasztalati módszerrel.

A szoftveres vizsgálat eredményei alapján öt szakaszon egy esetleges közethullás nagy kockázattal járna. E szakaszok alatt a Páva-kert folytonossága megszűnik, így a rézsú lábak védtelenek. A biztonság növelése érdekében ezeket a részeket minimum éves rendszerességgel ellenőrizni szükséges, a potenciális veszélyforrásokat pedig a sziklafalhoz rögzített hálóval kell kevésbé veszélyessé tenni. Négy szakaszon a rézsúk veszélyessége közepes. Ezekben a szakaszokon várható közethullás, ám a kövek a Páva-kerten belül maradnak, így amíg a kert zárt a járókelők előtt, a sziklafal nem jelent veszélyt. Ha a jövőben a kertet megnyitják a járókelőknek, úgy ezek a területek a piros kategóriába esnek, és ugyanazok az intézkedések szükségesek, mint a mostani piros zónában lévő szakaszokon. Egy metszet kapott zöld minősítést, ami azt jelenti, hogy a lehulló kövek nem érik el a Páva-kertet. Itt a rendszeres ellenőrzés gyakorisága csökkenthető, a kövek akkor sem jelentenek veszélyt, ha a Páva-kert nyilvánossá válik. Ha ez megtörténik, akkor a szakasz automatikusan sárga minősítést kap, és a sárga szakaszokra érvényes munkákat kell végrehajtani.

Az empirikus módszer több jellemzőt figyelembe véve pontoszza a vizsgált rézsút, és az ezen jellemzők alapján kapott pontok függvényében határozható meg a rézsú veszélyessége. A módszer figyelembe veszi a rézsú alatti forgalmat, a kőzet geológiai tulajdonságait, és még egyéb tényezőket. Az összes jellemzőt a 3. táblázat szemlélteti.

A veszélyességi osztályba sorolás a kapott pontszám alapján történik. Ha a rézsú 300 pontnál kevesebbet kap, akkor a nem veszélyes kategóriába sorolandó, ha 500 pontnál többet akkor pedig a veszélyes kategóriába esik. Ha a két érték közötti a kapott eredmény, akkor további vizsgálatok szükségesek.

A 3. táblázat alapján a piros zóna 325 pontot, a sárga és a zöld zóna pedig 250 pontot értek el. Ezek alapján a hegyoldal egy része további vizsgálatot igényel, míg a sárga, illetve zöld zónába eső részek a nem veszélyes kategóriába sorolhatók. A szoftveres vizsgálatokból kapott eredmények alapján a rézsúnek több része szintén a veszélyes tartományba esik. Noha ez az empirikus módszer főként az Egyesült Államokbeli rézsúkra használandó (azon belül is csak bizonyos államokban elfogadott a használata), látható, hogy nagy eltérés nem volt tapasztalható. A táblázatban több olyan érték is előfordul, ami elég szubjektív, nagyban függ a tervező tapasztalatától. Előfordulhat egy kevésbé tapasztalt tervező esetében az alul értékelés, míg egy tapasztalatlanabb tervező esetében a túlértékelés. A becslést célszerű kiegészíteni valamilyen numerikus számítással, ezáltal meggyőződve a módszer helyességéről.

A táblázatot célszerű lenne átültetni a hazai gyakorlatba, noha az itthoni közethullások száma csekély, egy gyors helyszíni ellenőrzés során magabiztosabban lehet folytatni a tervezést.

A laboratóriumi vizsgálat során láthatóvá vált, hogy a szoftveresvizsgálat kedvezőbb eredményeket adott, mint a kísérleti eredmények. Ennek oka lehet egyrészt a méretarányokból eredő különbség, másrészt a programban minimálisan 10 kilogrammos követ lehet definiálni, míg ez a valóságban sokkal kisebb volt. További magyarázat, hogy a szoftver egyszerűsítéseket alkalmaz a gyorsabb számítás végett. A leeső követ pontszerű testként kezeli a szoftver, míg a valóságban a leeső követ nem pontszerű, hanem amorf, nehezen definiálható a geometriája. További egyszerűsítés, hogy a szoftver csak egy metszetet vizsgál, 2 dimenzióban, míg a laboratóriumi kísérletben valós 3 dimenziós folyamat ment végbe. Ezeket az egyszerűsítéseket célszerű megfontolni egy hasonló vizsgálat esetében.

Célszerű lenne egy valós szimulációt végezni egy kijelölt szelvényben, így több információt kapva a lehulló kövek mozgásáról.

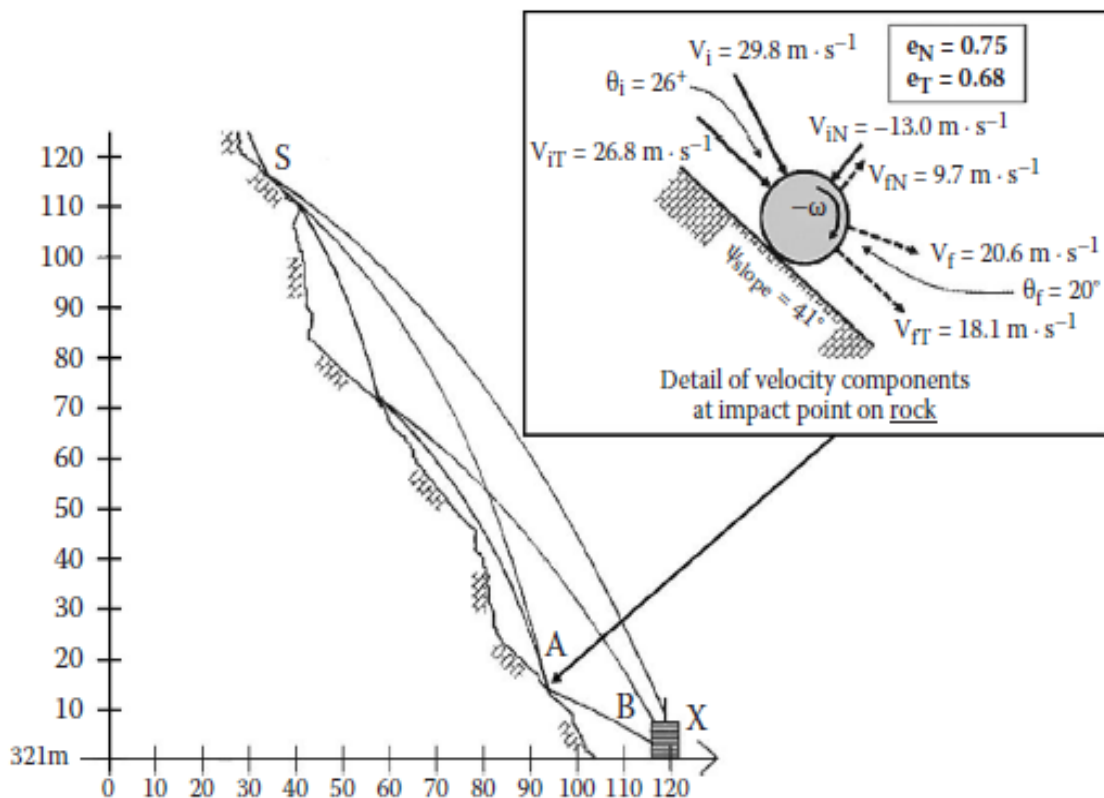
8. Esettanulmány

Mount Stephen, Canada (2000m)

A Stephen-hegy a kanadai Sziklás-hegységben található, mely számos lavinának és kőzethullásnak adott otthon az elmúlt években. A hegy 50°-os meredeksége és a hegy lábánál húzódó vasútvonal miatt a helyiek szükségesnek érezték egy kőzethullógó háló kiépítését. A hegy főként erős, lemezes szerkezetű, vízszintesen kialakult mészkőből áll, helyenként vékony, ám nagy területű agyagpala beágyazásokkal tarkítva. Mivel az agyagpala gyorsabban kopik, ennek következményeként a kopott üregeknél a mészkő leválik, így kőzethullás jön létre.

A tervezett kőzethullógó szerkezet az alábbiakból áll:

- mechanikailag stabilizált talaj,
- előfeszített betonelemek, négyzetes hasáb alakú, 1,5 m hosszú, 0,75m szélességű,
- tömörített kavicszúzalék és georács elemek a falak között,
- acél kábelkerítés a fal tetején.



63. ábra Kővek mozgási pályái [11]

A teljes szerkezet elérte a 11.6 méteres magasságot. Az 63. ábra a kövek lehetséges mozgási pályái láthatók, egy kiválasztott szelvényben. A számítások során a lehulló kövek mind a betonszerkezetet, mind pedig az acélkerítést elérték, s ezalatt 466 becsapódást dokumentáltak a tervezők. Azon szelvényeknél, ahol mind a merőleges, mind pedig a párhuzamos visszapattanási tényező értékét meg tudták állapítani, ott kiszámolták az egyes pontokban a visszapattanás előtt, valamint a visszapattanás utáni sebességeket. Az ábrába beágyazott kisebb kép az A pontban kiszámolt sebesség komponenseket mutatja, ha a kő az SAB pályán mozog.

Látható, hogy a kőzet sebessége eléri a 30m/s-os értéket. Továbbá a kövek sebessége a kőzetfelfogó szerkezeteknél elérheti akár a 48m/s-os értéket is. A sebességek egyenesen arányosak a rézsű hajlásszögével, valamint a magassággal.

A becsapódási energia a sebességből, valamint a kövek tömegéből kiszámítható. A becsapódó kőzetek nagy valószínűséggel apró darabokra törnek szét a becsapódás pillanatában. A tervezők számításai szerint a kövek egy körülbelül 300-500mm nagyságú ovális alakú kőzetestté alakulhatnak át, melyeknek tömege elérheti az 50-150kg-ot is. Így a kőzetfelfogó hálónál, a becsapódás pillanatában, a kövek energiája elérheti akár a 60-180kJ-os értéket is. A tervezők álláspontja az volt, hogy a stabilizált talajréteg a rajta fekvő vasalatlan betonblokkokkal, illetve a közöttük lévő tömörített kavicsréteggel és georácsokkal, elengedő védelmet nyújt a lehulló kőzetek ellen. [11]

9. Ábrajegyzék

1. ábra Geológiai határok [2].....	5
2. ábra Dolomit helyzete a Gellért-hegy metszetében [5]	6
3. ábra Gellért-hegy földtani térképe [19]	7
4. ábra Talajvíz viszonyok a Gellért-hegynél [18]	7
5. ábra Talaj gyorsulási értékek Magyarországon [7]	8
6. ábra Ékcsúszás számítása [9]	10
7. ábra Kiborulásvizsgálat számítása [9]	11
8. ábra Csúszólap általi tönkremenetel számítása [9].....	11
9. ábra Rézsű modellre generált háló modellje [9].....	13
10. ábra Kőzetest tönkremenetele közethullás után [9].....	14
11. ábra Kőzetlabdák hullása [9].....	14
12. ábra Koordináta határok beállítása	20
13. ábra Minta rézsű	21
14. ábra Fizikai paraméterek beállítása anyagonként.....	21
15. ábra Paramétertípusok az egyes rézsűszakaszokhoz	22
16. ábra Bementi adatok definiálása.....	23
17. ábra Számítás grafikus eredménye	24
18. ábra Visszapattanási magasság a koordináta függvényében	25
19. ábra Metszetek helyszínrajza.....	26
20. ábra 1. metszet.....	27
21. ábra Kövek vízszintes helyzete, 1. metszet	28
22. ábra Kövek sebességének burkoló ábrája, 1. metszet.....	28
23. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 1. metszet	29
24. ábra 2. metszet.....	29
25. ábra Kövek vízszintes helyzete, 2. metszet	30
26. ábra Sebességek burkoló görbéje, 2. metszet	30
27. ábra Mozgási energia burkoló görbéje	31
28. ábra 3. metszet.....	31
29. ábra Kövek vízszintes helyzete, 3. metszet	32
30. ábra Sebességek burkoló görbéje, 3. metszet	32
31. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 3. metszet	33
32. ábra 4. metszet.....	33

33. ábra Kövek vízszintes helyzete, 4. metszet	34
34. ábra Sebességek burkoló görbéje, 4. metszet	34
35. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 4. metszet	35
36. ábra 5. metszet.....	35
37. ábra Kövek vízszintes helyzete, 5. metszet	36
38. ábra Sebességek burkoló görbéje, 5. metszet	36
39. ábra Mozgási energia burkoló görbéje, 5. metszet	37
40. ábra 6. metszet.....	37
41. ábra Kövek vízszintes helyzete, 6. metszet	38
42. ábra Sebességek burkoló görbéje, 6. metszet	38
43. ábra 7. metszet.....	39
44. ábra Kövek vízszintes helyzete, 7. metszet	39
45. ábra Sebességek burkoló görbéje, 7. metszet	40
46. ábra 8. metszet.....	41
47. ábra Kövek vízszintes helyzete, 8. metszet	41
48. ábra Sebességek burkoló görbéje, 8. metszet	42
49. ábra 9. metszet.....	42
50. ábra Kövek vízszintes helyzete, 9. metszet	43
51. ábra Sebességek burkoló görbéje, 9. metszet	43
52. ábra 10. metszet.....	44
53. ábra Kövek vízszintes helyzete, 10. metszet	44
54. ábra Veszélyességi térkép, felülnézet.....	46
55. ábra Lehullott kőtömb	51
56. ábra Lehullott kőtömbök	51
57. ábra Vizsgált kő pontfelhője.....	52
58. ábra A kísérleti rézsú képe profilból	53
59. ábra Kövek becsapódási helyei laboratóriumi kísérlet alapján	54
60. ábra Kövek becsapódási helyei RocScience programból	54
61. ábra Kövek mozgási pályája a videófelvételtől.....	55
62. ábra Kövek mozgása Rockfall programból	55
63. ábra Kövek mozgási pályái [12].....	57

10. Hivatkozások

- [1] B. dr. Vásárhelyi és M. Gévai, „Geotechnikai veszélytérkép; Budapest, XI. Gellért-hegy keleti oldalára,” Budapest, 2006.
- [2] V. Anna, *A radon eredetének és a felszín alatti vizek keveredésének vizsgálata a Gellért-hegy környezetében (diplomamunka)*, Budapest: Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Földrajz-és Földtudományi Intézet, 2008.
- [3] D. Zoltán, *Magyarország kistájainak katasztere*, Budapest: MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, 2010.
- [4] L. Dr. Korpás, L. Dr. Fodor, Á. Dr. Magyar, G. Dr. Dénes és J. Dr. Oravecz, „A Gellért-hegy földtana, karszt- és szerkezetfejlődése,” *Karszt és barlang*, pp. 57-93, 1998-1999.
- [5] L. Gyalog, G. Maros és P. Pelikán, *Budapest geokalauza*, Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 2016.
- [6] Á. Dr. Török és G. Dr. Balázs L., „A Gellérthegyi sikló területének mérnökgeológiai, és hidrogeológiai ismertetése,” 2007.
- [7] Eurocode, *MSZ EN 1998-5:2009: „Eurocode 8”*, 2009.
- [8] d. V. Balázs, *Az alkalmazott kőzetmechanika alapjai*, Budapest: Hantken kiadó, 2016.
- [9] D. E. Eberhardt, *Rock slope stability analysis - utilization of advanced numerical techniques*, University of British Columbia, 2003.
- [10] www.met.hu, „www.met.hu,” 2017. [Online]. Available: www.met.hu.
- [11] D. C. Wyllie, *Rock fall engineering*, Taylor & Francis Group, 2015.
- [12] C. D. Wyllie és W. C. Mah, *Rock slope engineering*, Spon Press, 2005.
- [13] T. Dr. Budai és G. Dr. Konrád, *Magyarország földtana*, Pécsi Tudományegyetem, 2011.
- [14] M. Palotai, A. Mindszenty, K. Kopecskó és Z. Poros, „Az Ínség-kő geológiája,” *Földtani közlöny*, %1. kötet142/3, pp. 243-250, 2012.
- [15] d. W. György, „A Budai-hegység szerkezete (A Budai-hegység kialakulásának története),” *Földtani közlöny*, pp. 329-347, 1977.
- [16] W. D. Steven, *Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls*, University of Toronto, 1998.
- [17] E. Hoek, *Analysis of rockfall hazards*, U.S.A.: <https://www.rocscience.com/learning/hoek-corner/books>, 2000.
- [18] F. T. Vállalat, *Budapest építéshidrologiai atlasza*, Budapest: FTV, 1988.
- [19] HM Térképészeti Kht., *Magyarország földtani térképe*, Budapest: Intergraph, 2005.

