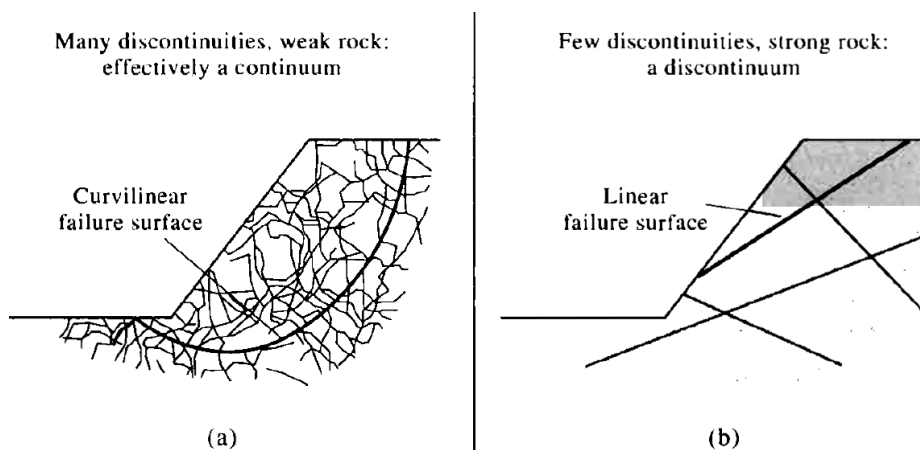


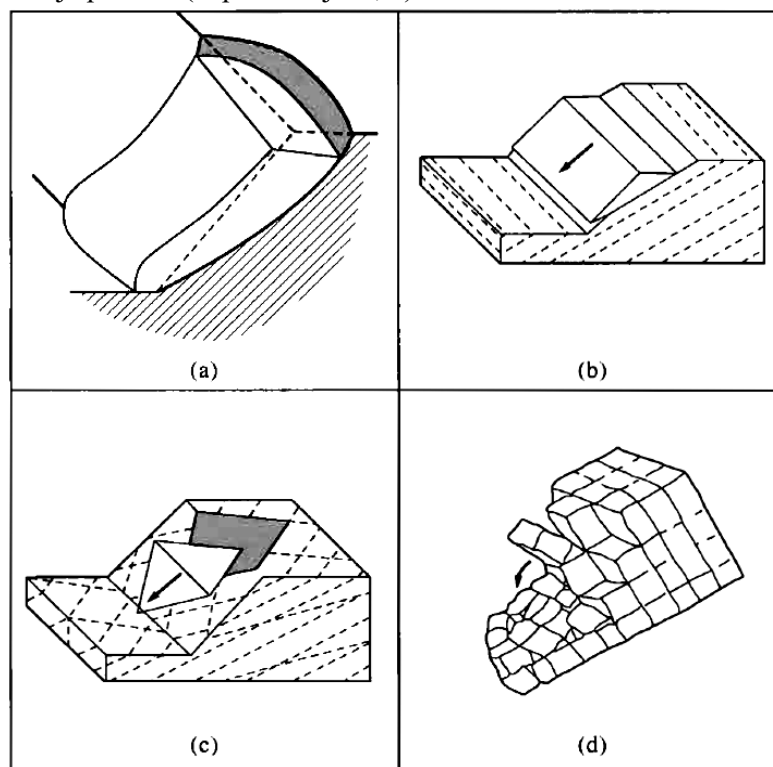
## 8. Стабилност камених косина. Одрони у чврстим стијенским масама.

### 8.1. Стабилност камених косина

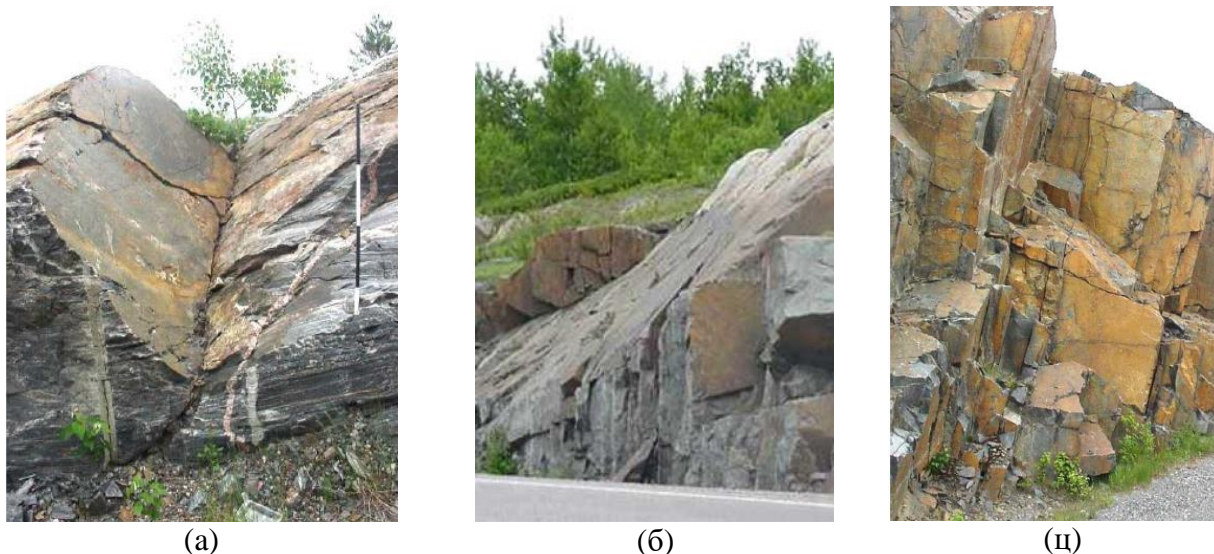
Различити облици нестабилности камених косина су приказани на доњим сликама. Ако је стијена веома испуцала, слаба или деградирана онда су облици нестабилности слични онима који се јављају у тлу. Стилјена се понаша као квази-континуална средина и јављају се криволинијске клизне површи ( слика 8.1а). Уобичајено је да у стилјени постоји једна, двије или три фамилије пукотина па други облик нестабилности је клизање блокова стилјене по једном (8.2б) или два дисконтинуитета (8.2ц). Уколико су фамилије пукотина субвертикалне или нагнуте према лицу косине онда је вјероватније претурање блокова стилјене (*toppling*) као што је приказано на слици 8.2д.



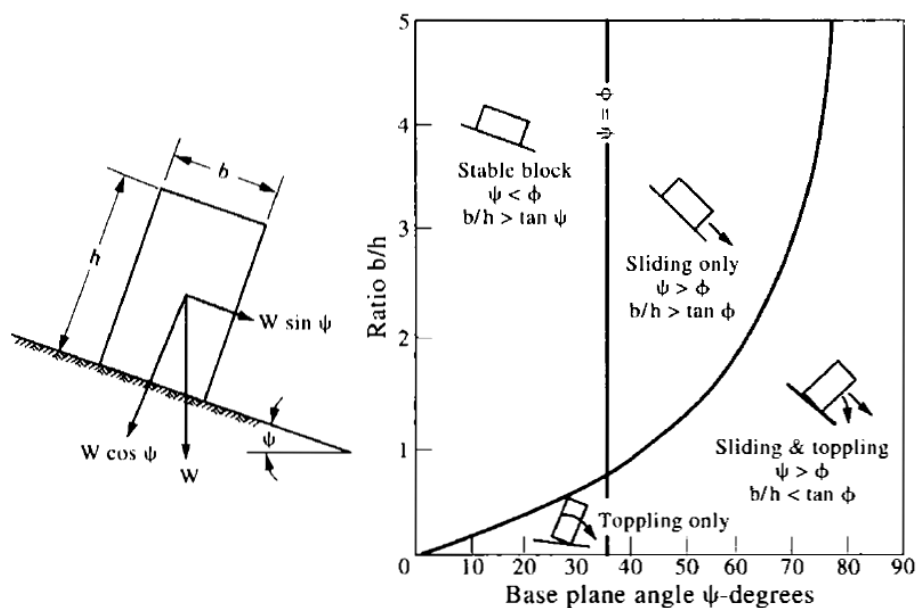
Слика 8.1: Облици нестабилности камених косина у квази-континуалној (слаба стилјена, а) и дисконтинуалној средини (чврста стилјена, б)



Слика 8.2: Основни механизми нестабилности камених косина: а) кружно-цилиндрична клизна површ, б) транслаторно клизање (*planar failure*), ц) клизање нестабилног блока (*wedge failure*), д) претурање - *toppling* (Matheson, 1983)



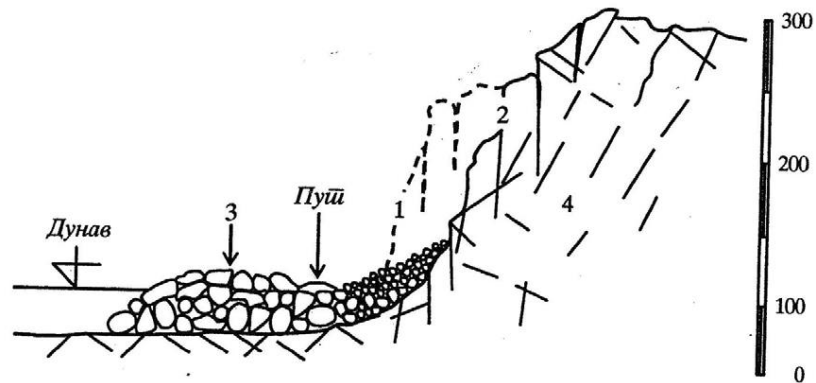
**Слика 8.3:** Облици нестабилности камених косина: а) испадање нестабилног клина (*wedge failure*), б) транслаторно клизање блока (*planar failure*), ц) претурање блокова (*toppling*)



**Слика 8.4:** Критеријуми клизања и претурање блока на косој равни (Hoek и Bray, 1977)

## 8.2. Одроњавање

**Одроњавање** је откидање и нагло слободно падање комада и блокова стијенских маса са стрмих и врло стрмих природних и вјештачких падина под дејством гравитације. Скупине комада и блокова стијенских маса формиране у подножју стрмих одсјека називају се **одрони** (енгл. *rockfall*). Појаве одроњавања су везане за стијенске масе са дисконтинуитетима нагнутим према спољњим површинама косине. Међутим, одрони се могу јавити и у лесу (који је континуалан) подлокавању или подсјецању стрмих одсјека формираних у овом седименту.



**Слика 8.5:** Шематски приказ одрона: 1) профил косине прије одроњавања, 2) профил падине након одроњавања, 3) тијело одрона, 4) испуцали, банковити до масивни кречњаци

Naziv odrona	Površina ( m <sup>2</sup> )	Zapremina ( m <sup>3</sup> )
Vrlo mali	<10	<100
Mali	10 – 100	100 – 1 000
Srednje veličine	100 – 1 000	1 000 – 100 000
Veliki	1 000 – 100 000	100 000 – 1 000 000
Ogromni	> 100 000	> 1 000 000

Брзина кретања појединих комада стијене је у опсегу од неколико метара по секунди до 25-30 м/с. Осим одрона који представљају спорадичне облике деградације стијенске масе, често се се јавља и полу-континуално осипање стијенских маса (*raveling*)



**Слика 8.6:** Полу-континуално осипање услед деградације стијенског материјала (*raveling*)

### 8.2.1. Ублажавање ( митигација) ризика од одроњавања

Мјере за ублажавање ризика од одроњавања се могу подијелити у три групе:

- I. Мјере заштите - контролисање, пресретање и скретање појединих одвојених блокова током њиховог кретања.
- II. Мјере задржавања материјала на косини нпр. мрежа са анкерима.

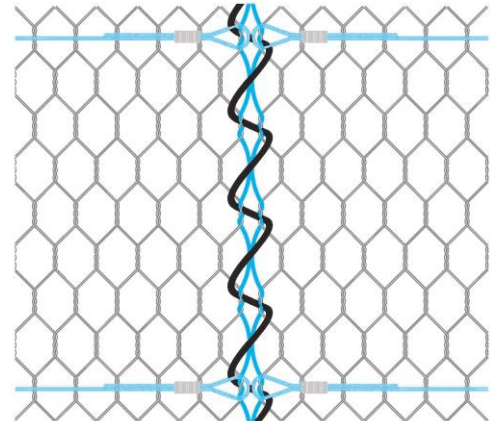


III. Превентивне мјере - стабилизација (заштита) камених косина тј. смањивањем вјероватноће да дође до откидања појединих блокова.

Заштитне мјере се остварују постављањем мрежа ( „путарске мреже“ са или без анкера-*drapery systems*), изградом заштитних канала за прихватање покренутог материјала, заштитних баријера ( армирано тло, габиони, бетон ), постављањем флексибилних баријера од челичне жице (*rockfall net fences*) и изградом заштитних галерија (*rockfall shelters*).



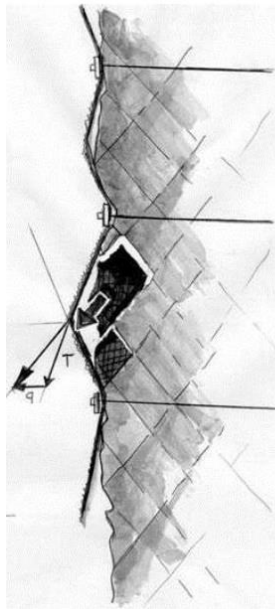
(а)



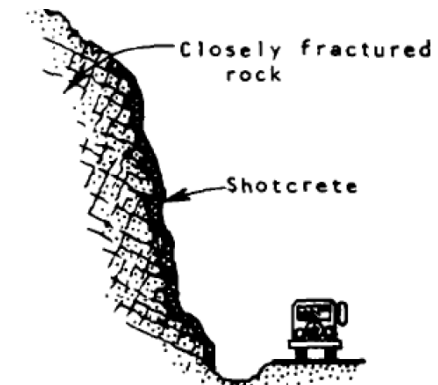
(б)

**Слика 8.7:** Заштитне мјере - Хексагонална двоструко уплетена путарска мрежа ојачана челичним ужадима: а) мрежа на косини, б) веза између два панела мреже

Мјере задржавања материјала на лицу косине обухватају њено површинско ојачање мрежама са анкерима и примјену млазног бетона (*shotcrete*).



а)

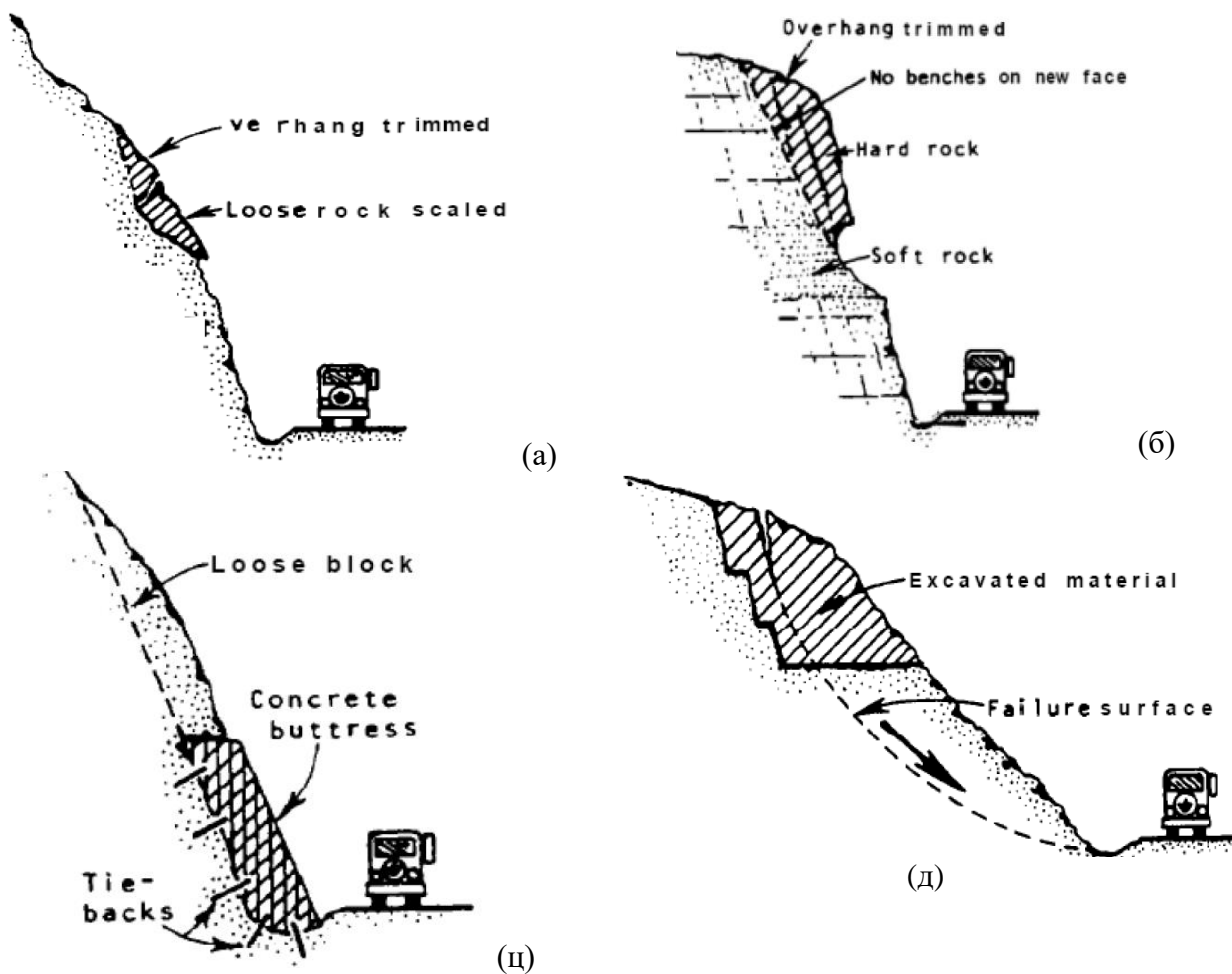


(б)

**Слика 8.8:** Мјере задржавања материјала на косини – површинско ојачање косине: а) мрежа са анкерима, б) торкретирање веома испуцале стијенске масе

Превентивне мјере тј. мјере стабилизације косине обухватају:

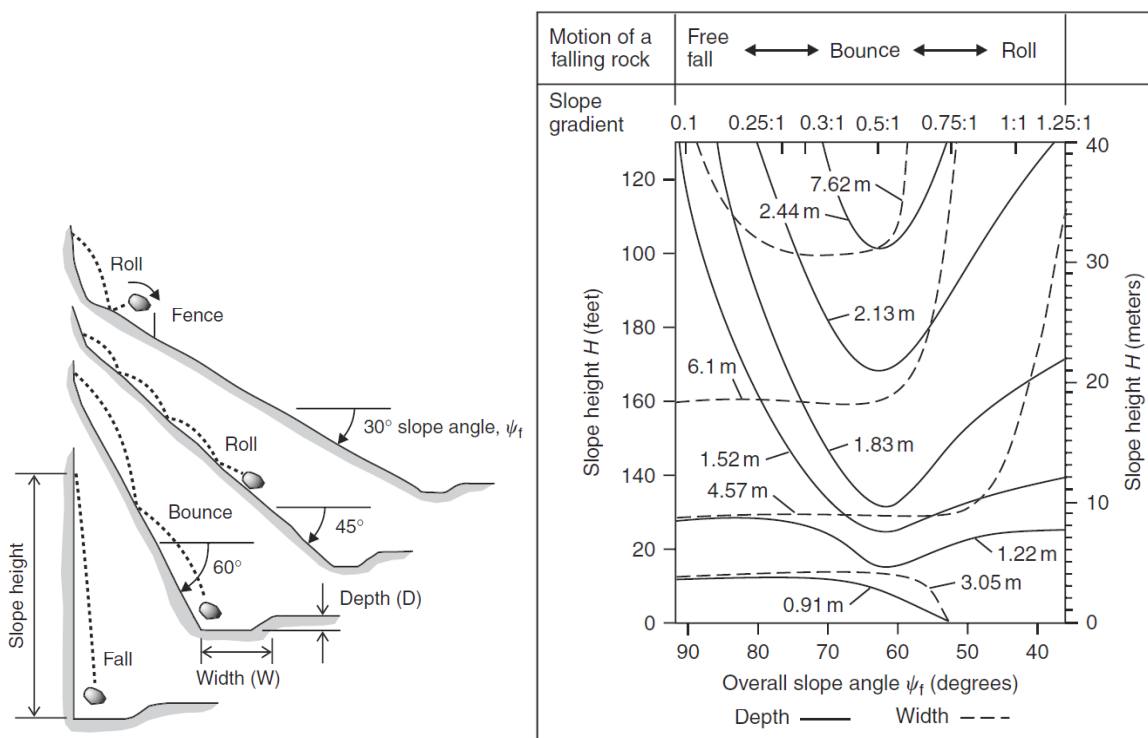
- Уклањање лабилних комада стијенске масе – *кавање* (*scaling*)
- контролисано минирање
- промјена геометрије косине – репрофилисање и растерећење косине
- подзиђивање, пломбирање и ињектирање
- коришћење анкера ( сидара), сидрених АБ конструкција и торкрета
- дренажање



Слика 8.9: Неке од превентивних мјера: а) кавање, б) контролисано минирање, ц) подзиђивање, д) репрофилисање косине

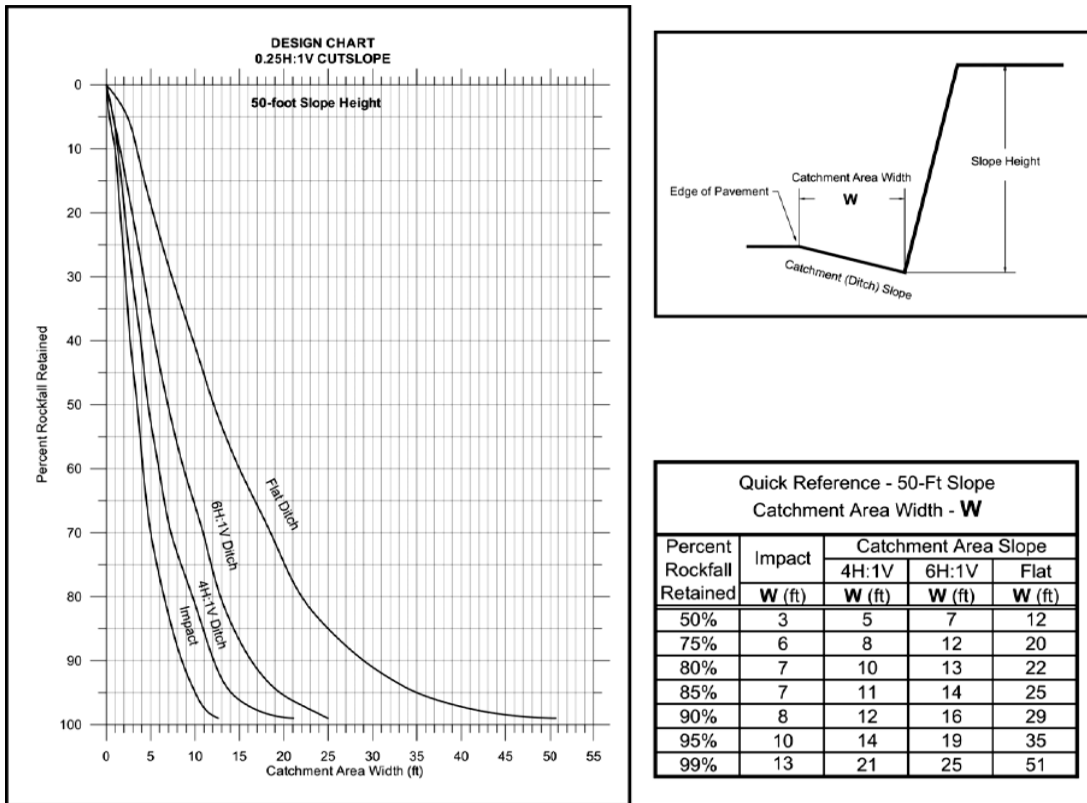
### 8.2.2. Заштитни канали

Потребне димензије канала ( ширина, дубина и инклинација) зависе од висине засјека и његовог нагиба. Са повећањем висине, брзина пада и висина трајекторије расту, што изискује веће димензије канала. За углове засјека веће од 75 до 80 степени, стијене падају близу лица са плитким трајекторијама и спуштају се близу базе косине – узак кана је углавном адекватан. За углове засјека од 55 до 75 степени, комади стијене ће имати више трајекторије и ротације, заустављаће се даље од базе косине, што изискује шири канал. За углове мање од 55 степени, комади стијене имају тенденцију котрљања низ косину са ниским трајекторијама што смањује потребне димензије канала.

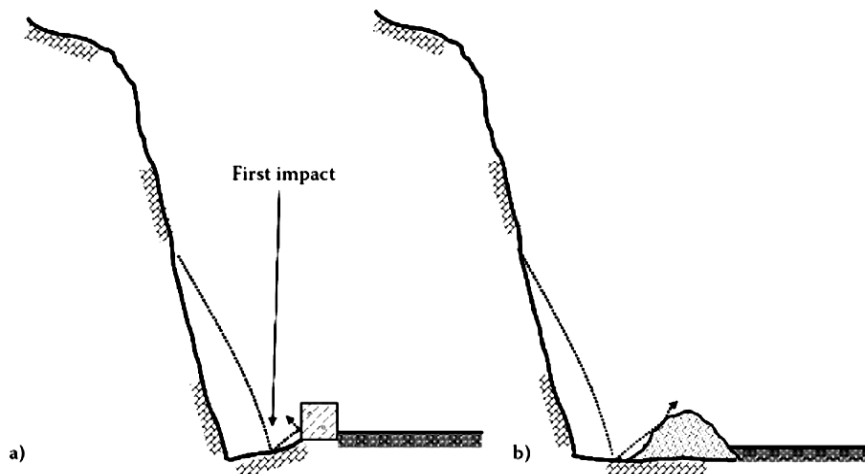


**Слика 8.10:** Различити облици кретања комада стијене у функцији од нагиба косине и емпиријски дијаграм за усвајање потребних димензија канала(зоне) за прихватање одроњеног материјала (Ritchie, 1963).

Опсежно теренско испитивање је извршио Pierson-а (2011) за нагибе косина од 0.25H:1V (76°), 0.5H:1V (63°), 0.75H:1V и 1H:1V. Висине косина су биле 12, 15, 18, 21 и 24м а нагиб канала у тестирањима је био 4:1 (14°) и 6:1 (9.5°) и хоризонтални. У тесту је мјерена позиција првог удара и растојање котрљања комада стијене. На слици је приказан примјер за косину висине 15м нагиба 76 степени. Приказана је зависност ширине заштитне зоне и процента одроњеног стијенског материјала ухваћеног унутар ове ширине. Додатно је приказана корист од усвајања закошеног дна заштитне зоне. Вриједност резултата исказаних у виду процента ухваћеног материјала је у томе што димензије канала могу бити усвојене према жељеном нивоу поузданости заштите. За зграду је адекватан проценат ухваћеног материјала од 100% а за пут са малом фреквенцијом саобраћаја 80%. За блокирање даљег котрљања стијене након првог удара најефикаснија је ниска баријера вертикалног лица на спољној страни канала ( слика 8.10.)



Слика 8.11: Дијаграми за усвајање потребних димензија канала(зоне) за прихватање одроњеног материјала (Pierson ,2011).



Слика 8.12: Геометрија канала за прихватање одроњеног материјала. а) канал са нагнутим дном и баријера са вертикалним лицем, б) канал са хоризонталним дном и берма од шљунка са нагнутим странама.



**Слика 8.13:** Конвенционална земљана баријера пружа заштиту аутопута од комада стијене малог одскока и мале ротационе енергије (лијево) и бетонска баријера са оштећењем од удара веће енергије ( десно)

### 8.2.3. Баријере од габиона

Баријере тј. зидови од габиона ефикасни у апсорпцији удара која се остварује захваљујући флексибилност жичане мреже и помјерању комада камена унутар мреже. Димензије елемента зида од габиона тј. корпе су типично  $1 \times 1 \text{ m}$  при чему се комбинацијом ових елемената добијају веће баријере ако је то потребно. За пуњење габиона се користе комади камена величине од 100-150мм, по могућности оштрих и неправилних ивица због веће смичуће чврстоће, без финих фракција ради дренарања воде кроз габионе. Предности овог типа баријере су:

- коришћење локалног материјала под условом да је постојан у току времена
- габиони се конструишу на лицу мјеста тако да су трошкови транспорта само за мреже
- усљед удара оштећени габиони се могу поправити на лицу мјеста
- врло брзо се по габионима развија вегетација

Недостаци баријера од габиона су што захтијевају доста рада при извођењу, теже су оправке ако дође до пробијања мреже. Такође при пројектовању се мора узети у обзир да се ради о лаганијим конструкцијама чија је јед. тежина  $15 \text{ kN/m}^3$  у односу на јед.теж. стијене  $26 \text{ kN/m}^3$ .

### 8.2.4. Бетонске баријере

Крути и масивни бетонски зидови нису ефективна баријера ударима стијене јер ће се прије поломити неко апсорбовати енергију. Бетонске баријере познате као Jersey-баријере су пројектоване за ударе ниске енергије, мање од 80 кЈ. Често се користе јер су приступачне и релативно јефтине.





Слика 8.14: Комбинација заштитног канала и баријере од габиона

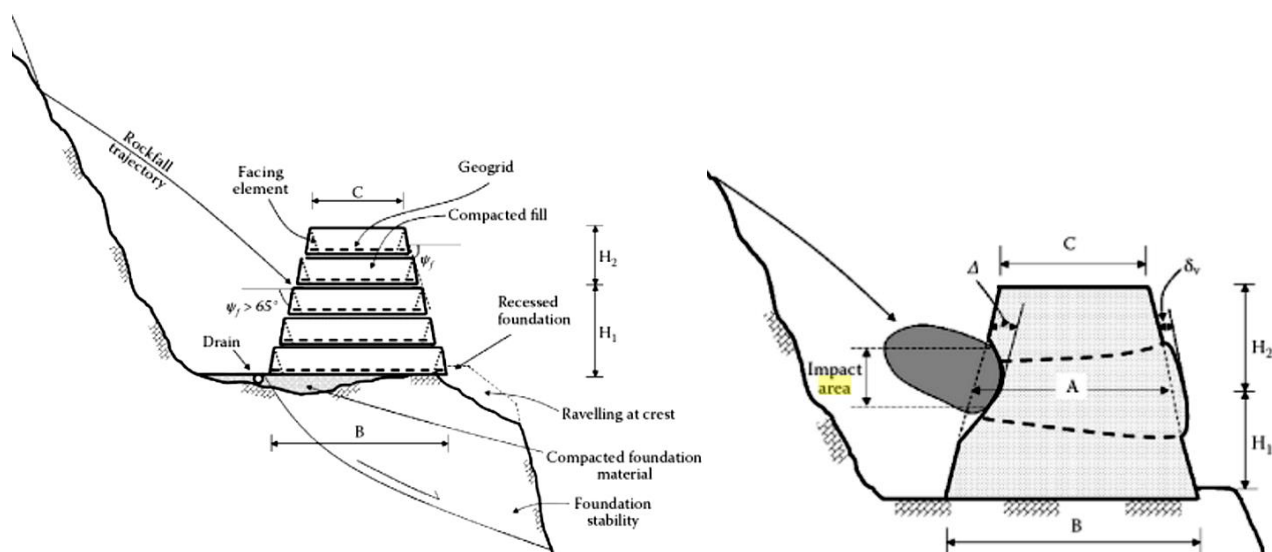
#### 8.2.5. Зидови од армираног тла као баријера ( MSE Barriers )

Конструисани висине и до 15м да могу да апсорбују енергију удара од 15000-20000 кЈ. Висина удара је означена са  $H_1$  док је додатна висина  $H_2$  за обезбјеђење апсорпције у зони удара. Стрмо лице зида ( $\Psi=65^\circ-80^\circ$ ) је повољно да не дође до котрљања стијене преко препреке.

Основни принципи пројектовања ових баријера према радовима Grimod и Giacchetti (2011):

- Баријера мора имати довољну масу ради спречавања помјерања услед удара
- Материјал баријере мора имати способност пластичне деформације у зони удара док остатак конструкције остаје нетакнут.
- Концентрисаном, пробојном ефекту удара баријера се супроставља смичућом чврстоћом збијеног засипа и отпорношћу арматуре.

На основу примјене нумеричких метода и теренских испитивања утврђено је да се 85% енергије удара дисипира пластичним деформацијама насутог материјала у зони удара тј. формирањем кратера у зиду, а 15% се дисипира смичањем унутар материјала зида.



Слика 8.15: а) Типична MSE баријера б) Шематски приказ удара камена у баријеру и одговарајућих помјерања

Помјерање са брдске стране је  $\Delta = \delta_m + \delta_v$ , гдје је

$\delta_m$  – дубина кратера тј. пенетрације стијенског блока са стране брда

$\delta_v$  – помјерање са долинске стране услед смицања између слојева изазваног ударом

Дубина кратера се добија према:

$$\delta_m = \frac{\chi E_i p_c}{(\text{површина удара на лицу зида})^\eta}$$

гдје су  $E_i$  - енергија удара

$p_c \sim 0.85$ , приближни удио енергије удара дисипиране при формирању кратера

$\chi$  – функција која зависи од типа арматуре и одређује се методом коначних елемената

$\eta$  – функција облика блока, за коцку има вриједност 1.0 за сферу 1.20.

Помјерање на долинској страни:

$$\delta_v = \frac{E_i s_c}{\text{сила трења}}$$

гдје је  $s_c \sim 0.15$  енергија дисипирана трењем у армираном тлу. Сила трења се ствара између збијеног тла и арматуре.

Нумеричком анализом се може добити приближан однос:

$$\frac{\delta_v}{\Delta} = 0.60 \div 0.80$$

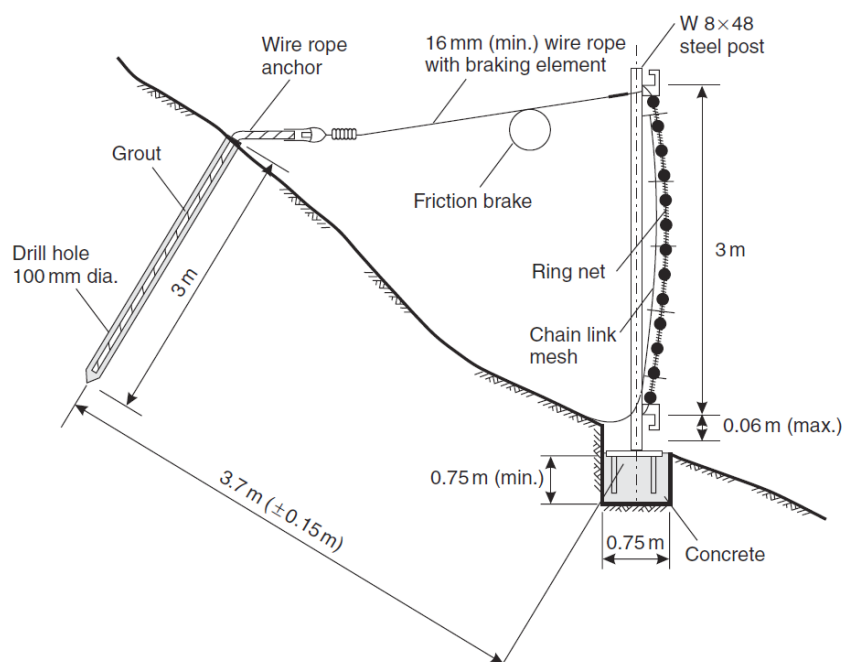
Понашање реалних баријера и резултати нумеричких анализа указују да ширина баријере  $A$  на нивоу тачке удара не треба да буде мања од  $5\Delta$ . За прелиминарну оцјену могу се користити вриједности максималних помјерања  $\Delta$  од 0.5 до 0.70м и  $\delta_v$  од 0.30 до 0.40м.

Адекватна ширина баријере на мјесту удара осигурава да су помјерања насутог материјала локализована у зони удара док је остатак баријере нетакнут. Минимална ширина баријере у круни  $C$  износи  $0.80$  што проистиче из конструктивних услова (збијање). Међутим из услова да не дође до лома типа пробоја потребно је да је  $C > 2\Delta$ . Након одређивања висине удара  $H_1$  и одговарајућих ширина у круни и на мјесту удара, укупна висина и ширина у бази се одређује из нагиба лица зида и геометрије конструкције.

Потребно је провјерити стабилност на претурање и клизање, стабилност на пробој као и потенцијалне клизне површи у тлу испод баријере.

#### 8.2.6. Флексибилне баријере од челичне мреже (*rockfall net fences*)

Флексибилне баријере апсорбују енергију удара путем деформације материјала мреже и помоћу елемената за кочење (*braking elements*). Материја баријере је најчешће деформабилно уже и/или мрежа од уплетене жице (*woven wire-rope*) или челичних прстенова (*ring nets*). Тестови су показали да највећу моћ апсорпције имају мреже од челичних прстенова. Мреже су обично ослоњене на низ челичних стубова анкерисаних у темеље помоћу ињектираних анкера. Темелј стуба се обично састоји бетонске наглавнице осигуране стијенским анкерима или се ради о масивном бетонском темељу. Елементи за кочење су уграђени на каблове који повезују стубове са анкерима. Елементи раде на принципу трења и активирају се при високим енергијама удара као подршка мрежи. Неке од највећих мрежа су у стању да издрже удар енергије до  $5000 \text{ kJ}$ .

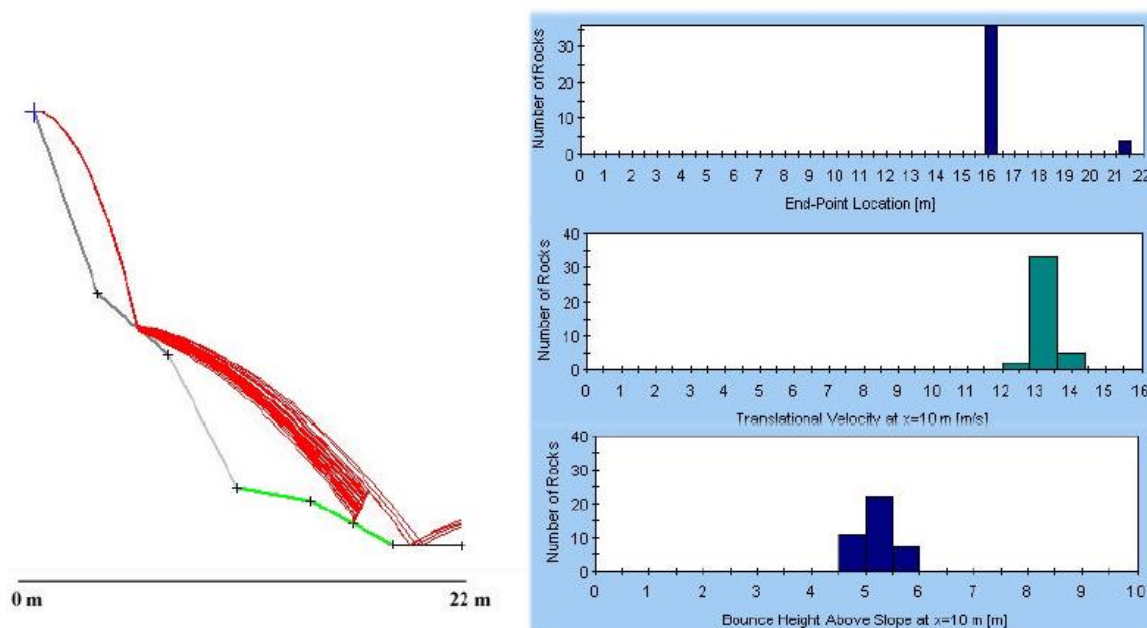


Слика 8.16: Шема флексибилне баријере од челичне мреже (*rockfall net fences*)



Слика 8.17: Флексибилне баријере од челичне мреже (rockfall net fences)

Висина баријере мора да је већа него могуће путање одломљених комада стијене. За симулацију могућих путања и одређивање брзине кретања комада стијене користи се одговарајући програмски пакет нпр. RockFall, Rocscience.



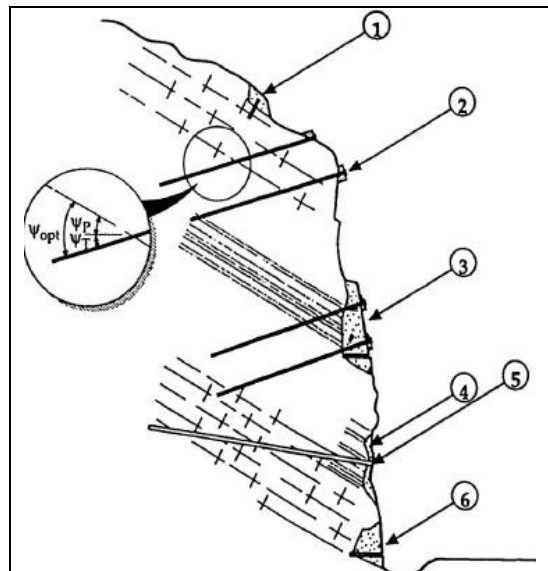
Слика 8.18: Анализа одрона која показује трајекторије за 40 симулираних одрона и одговарајуће крајње позиције, брзине и висине одскока.



### 8.2.7. Превентивне мјере

Преглед превентивних мјера је дат на доњој слици ( слика 8.19)

- 1) ојачање за стијену анкерисаном бетонском гредом (*shear key*) ради спречавања зарушавања у врху косине
- 2) преднапрегнути стијенски анкери (*tensioned rock-anchors*) за осигурање блокова на врху косине
- 3) бетонски зид са затегама за спречавање клизања материјала расједне зоне (*tied-back wall*)
- 4) Наношење млазног бетона (*shotcrete*) за спречавање осипања јако испуцалог дијела косине
- 5) Дренажне бушотине које пресијецају водом испуњене дисконтинуитете (*drain-hole*)
- 6) Испуњавање бетоном – пломбирање каверне у ножици косине (*concrete buttress*)



**Слика 8.19:** Методе ојачања камене косине

Анкерисаном бетонском гредом (*shear key*) се обезбјеђују блокови дебљине до 1м као и зоне деградирание стијенске масе у врху косине. За везу са стијеном се користе вертикалне арматурне шипке-анкери пречника 25-32мм, дужине од око 100цм. Шипке се постављају у бушотине изведене у стабилној стијени, дубине од 50-75цм и на растојању од 50-100цм, након чега се међупростор ињектира. Након постављања подужне арматуре (обично пречника од 6-8мм) и њеног везивања за вертикалне шипке, врши се бетонирање или наношење торкрета. Ојачање потиче од смичућег отпорности вертикалних шипки и могућег смичућег отпора између бетона и стијене ( слика 8.19-1, слика 8.20).



**Слика 8.20:** Ојачање бетонским гредама (*shear key*) у врху косине

Стијенски анкери (*rock anchors*) се примјењују ради спречавања клизања блокова и клинова стијенске масе дуж дисконтинуитета. Основна функција анкера је да модификују нормалне и смичуће напоне на клизној равни. Пасивни стијенски анкери (*dowels*) су ињектирани читавом дужином и уграђују се обично прије ископа. Сила у пасивним анкерима се активира након ископа због довољне крутости анкера који спречавају помјерање дјелова стијене по дисконтинуитетима. Активни или претходно напрегнути анкери (*tensioned rock anchors*) се уграђују тако да пресијецају потенцијално нестабилну површину (дисконтинуитет) и котве се у здравој стијени. Тијело ових анкера може бити крута челична шипка или једно или више челичних ужади. Уградњом ових анкера и њиховим преднапрезањем уноси се преко анкерне плоче сила притиска у стијену чиме се спречава даље помјерање блокова стијенске масе. Дужина дијела анкера преко које се сила преноси у здраву стијену зове се дужина котвљења (*bond length*). Ови анкери се могу користити самостално у одговарајућем распореду – шеми (*anchor pattern*) или као дио бетонске потпорне конструкције зида (*tied-back wall*) или роштиља (слика 8.21).



Слика 8.21: Израда АБ роштиља са анкерима

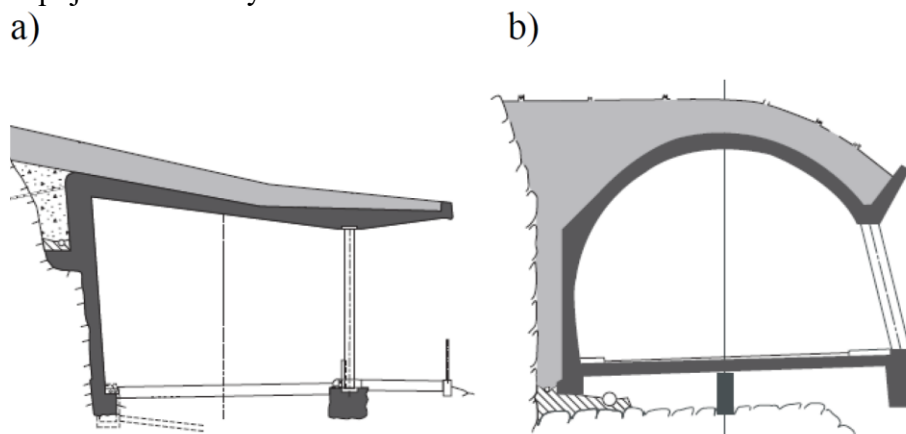
Млазни или прскани бетон (торкрет, *shotcrete*) је ситнозрни бетон (малтер) који се наноси пнеуматски на лице косине у слојевима дебљине од 50-100мм. Испуцале и деградирани зоне стијенске масе могу бити заштићене наношењем слоја млазног бетона чиме се контролише испадање мањих блокова и прогресивно осипање. Торкрет не може да спријечи клизање блокова тј. његова основна функција је површинска заштита. За сталну примјену торкрет може бити армиран мрежастом арматуром или челичним или полипропиленским влакнима. Влакна се додају у бетонску мјешавину при њеном справљању. Челична влакна су израђена од челика високе чврстоће, пречника 0.50мм, дужине од 30-38мм. Прије наношења торкрета површину стијене треба припремити тако да је слободна од слабо везаних и поломљених комада стијене, тла, вегетације и леда. Потребно је избушити дренажне бушотине кроз нанешени млазни бетон ради спречавања пораста порног притиска иза бетона. Дренажне бушотине су обично дубине од око 0.50м и на међурастојању од 1-2м. У масивним стијенама, дренажне бушотине је потребно избушити прије наношења торкрета тако да пресијецају дисконтинуитете испуњене водом.

Тамо гдје је ерозија формирала каверне у лицу косине врши се пломбирање истих тј. израда бетонских потпора (*concrete buttress*) које подупиру зоне деградиране стијене и представљају ослонац за стијену изнад каверне (*rock overhang*).

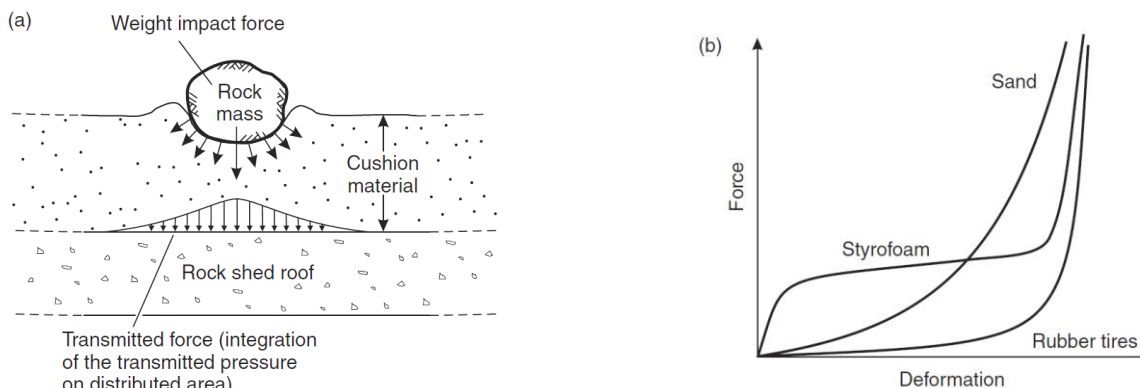
Вода је обично главни узрочник нестабилности код косина. Дренажне мјер обухватају ограничавање инфилтрације површинских вода израдом површинских канала и израду хоризонталних дренажних бушотина и дренажних галерија у циљу смањења порних притисака. Ефикасна мјера смањења порног притиска код многих косина је израда хоризонталних дренажних бушотина (*horizontal drain holes*). Ове бушотине су благо нагнуте према горе (око 5 степени) тако да пресијецају водоносне дисконтинуитете. Буше се на растојању од 3 до 10 м до дужине која је једнака  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{2}{3}$  висине косине.

#### 8.2.8. Заштитне галерије (*rock shed, rockfall shelters*).

Заштитне галерије су обично армирано-бетонске конструкције чији је кров прекривен апсорбујућим материјалом, најчешће засипом од тла, ради дисипације енергије удара појединих комада стијене. Ово је најскупљи тип заштите и примјењује се код озбиљнијих проблема са одроњавањем. Постоје два типа галерија са равном или нагнутом АБ плочом (кровом) и галерије типа АБ љуске.



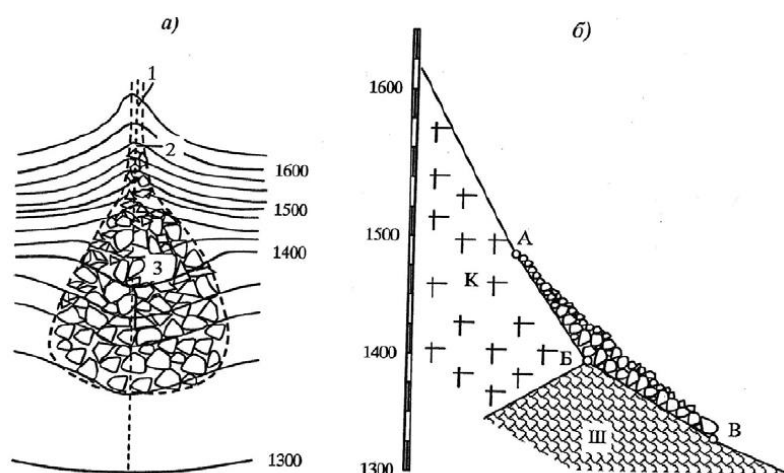
Слика 8.22: Различити типови заштитних галерија а) армирано бетонска плоча, б) АБ љуска



Слика 8.23: Дисипација енергије удара апсорбујућим материјалом а) дио силе удара који се преноси на кров галерије, б) веза између силе и деформација при ударном оптерећењу за различите апсорбујуће материјале ( пијесак, аутомобилске гуме, стиропор)

### 8.3. Сипари

Појединачно, или групно котрљање механички издијељених комада чврстих стијенских маса по стрмим падинама назива се осипање, а групе скотрљаних комада које формирају у поножју падине називају се **сипари** (енгл. *talus, scree*). Називају их другачије и **осулине** или **плазине**. Основни узроци формирања сипара су: инсолација, притисци створени при смрзавању и разарање стијена притисцима које изазива корење биљака. За формирање сипара најповољнији морфолошки, геолошки и климатски услови остварени су у кречњачким теренима. Због тога су сипари карактеристичне појаве кречњачких терена. Код **активних сипара** врши се непрекидно или повремено нагомилавање материјала у површинској зони сипара због чега је њихова површинска зона промјењива. Код смиренних сипара нема нагомилавања новог материјала, али је активан процес заглињавања који временом може превести осипање у клижење. Површина терена под смиреним сипарима најчешће је дјелимично, или потпуно, прекривена шибљем или сличном вегетацијом. Сипари су неповољна подлога и средина за грађење, а нарочито саобраћајница и других линијских објеката (нафтоводи, гасоводи, водоводи). У неким случајевима тешкоће око извођења радова могу бити такве да се траса линијских грађевина измјешта изван сипара или се прелаз преко њих врши мостовима.



**Слика 8.24:** Елементи сипара: а) ситуација: 1-точило, 2 – падина по којој је дошло до осипања, 3- тијело сипара, б) подужни профил: АБ – прислона површина, БВ – базис сипара, АВ – површина сипара, АБВ – тијело сипара, К – кречњак, Ш - шкриљци