

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2020

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE (Errata)

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	627.14/.15(497.4)(043.3)
Avtor:	Rok Indihar
Mentor:	prof. dr. Matjaž Mikoš
Somentor:	viš. pred. dr. Jošt Sodnik
Naslov:	Klasifikacija hudourniških pregrad s primerom uporabe
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	99 str., 66 sl., 15 pregl., 3 pril.
Ključne besede:	hudournik, hudourniške pregrade, urejanje hudournikov, Brezovski graben, Lukenjski graben

IZVLEČEK

Za Slovenijo je značilno prepletanje gorskega, hribovitega in gričevnatega sveta z rečnimi dolinami in kotlinami. Reliefna in geološka razgibanost ter raznolikost, klimatske razmere ter način gospodarjenja s prostorom so vzroki, da erozija in hudourniki neposredno in posredno ogrožajo okoli 237.000 ha ozemlja.

Da bi izboljšali varnost pred škodnim delovanjem hudournikov in zmanjšali ogroženost se te urejajo z različnimi ukrepi. Najbolj učinkoviti ukrepi urejanja hudournikov so prečni objekti, katerih je veliko z različnimi funkcijami. Zato je v magistrskem delu opravljena klasifikacija hudourniških pregrad z vidika namembnosti, konstrukcijskega materiala ter s primerom uporabe na realnem problemu. Najprej je predstavljena sistematika varovalnih objektov, nato je opisano oblikovanje in konstruiranje varovalnih objektov ter načrtovalske in računske osnove. Predstavljeni so pristopi k analizi delovanja prečnih objektov z enačbami za enostaven preračun hidravlike. V zadnjem delu je na osnovi idejnega načrta predstavljena uporaba znanj na dejanskem problemu.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	627.14/.15(497.4)(043.3)
Author:	Rok Indihar
Supervisor:	Prof. Ph.D. Matjaž Mikoš
Cosupervisor:	Sen. Lect. Jošt Sodnik, Ph.D.
Title:	Classification of Torrential Dams with a case study
Document type:	Master's Thesis
Scope and tools:	99 p., 66 fig., 15 tab., 3 ann.
Key words:	torrents, check dams, protection works, Brezovški graben Torrent, Lukenjski graben Torrent

ABSTRACT

Slovenian landscape typically consists of mountains and hills that are intertwined with river valleys and basins. Erosion and torrents indirectly and directly threaten approximately 237,000 ha of territory due to the relief and geological diversity as well as the climatic conditions and the landscape management methods.

Various measures can be taken to improve security with hazardous torrential activities and decrease the danger. The most effective method for torrent regulation is the use of transverse structures, which are numerous and have different functions. Because of that, this MA thesis contains a classification of torrential barriers with the focus on their purpose, construction materials and the examples of use. Firstly, a systematic overview of protective structures is presented. Secondly, the establishment and construction of the protective structures are described as well as the planning and calculation bases. Approaches to the analysis of the functioning of transverse structures with equations for a simplified hydraulic calculation are also defined. Lastly, on the basis of a conceptual design, an application of knowledge in a real-life situation is presented.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Matjažu Mikošu in somentorju viš. pred. dr. Joštu Sodniku za strokovno pomoč, usmerjanje in prijaznost pri nastajanju magistrskega dela.

Za literaturo, ki mi je bila v pomoč pri pisanju magistrskega dela, se zahvaljujem podjetju Tempos d.o.o.

Za prijaznost in razpoložljivost bi se rad zahvalil doc. dr. Gašperju Raku, ki mi je skozi vsa leta študija pomagal z različnimi nasveti.

Tini Hostinger in Katarini Lavtar bi se še enkrat posebej zahvalil za vse zapiske in pomoč ter prijetna sodelovanja. Brez njiju bi mi bil študij precej otežen.

Na koncu bi se posebno rad zahvalil družini, ker mi je omogočila izobraževanje ter me podpirala tekom študija. Hvala tudi vsem prijateljem, ki so mi stali ob strani in mi v težkih časih pomagali odmisлити probleme.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

stran

Izjava	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	V
Zahvala	VII
Kazalo slik	XI
Kazalo preglednic	XV
1 UVOD	1
2 SISTEMATIKA VAROVALNIH OBJEKTOV	5
2.1 Načela razvrščanja	5
2.1.1 Učinki hudourniških varovalnih objektov (funkcijske vrste)	5
2.1.2 Sistematika hudourniških varovalnih objektov	7
2.1.3 Razvrstitev hudourniških pregrad	9
3 OBLIKOVANJE IN KONSTRUIRANJE VAROVALNIH OBJEKTOV	13
3.1 Pravila oblikovanja enostavnih prečnih objektov	13
3.2 Zaplavne pregrade in sistem zaplavnih pregrad	13
3.3 Pregrade z velikimi odprtini in odprtimi kronami z uravnalnim in prebiralnim učinkom	16
3.3.1 Režaste pregrade	17
3.3.2 Pregrade z zagatnicami	18
3.3.3 Rešetkaste pregrade	18
3.4 Objekti za razbijanje in zaustavljanje drobirskih tokov	22
3.4.1 Razbijači drobirskega toka	22
3.4.2 Pregrade za pretvorbo energije drobirskega toka	24
3.4.3 Mrežne pregrade za zaustavljanje drobirskega toka	24
3.5 Težnostne pregrade	26
3.5.1 Težnostne pregrade s konstrukcijskega betona	27
3.5.2 Prednapete betonske težnostne pregrade	27
3.5.3 Kamnita pregrada	28
3.5.4 Lesene kaštne pregrade	29
3.5.5 Žičnate (gabionske) pregrade	33
3.6 Ločne pregrade	35
3.7 Netežnostne pregrade	39
3.8 Hibridne pregrade	41
3.9 Kotni podporni zid	42
3.10 Stebrne pregrade z ravno ploščo	45

3.10.1	Pregrade s podpornimi stebri na vodni strani.....	46
3.10.2	Pregrade s podpornimi stebri na zračni strani.....	46
3.11	Razbremenilne nosilne konstrukcije.....	48
3.11.1	Masovno aktivni objekti	48
3.11.2	Vektorsko aktivni objekti	52
4	NAČRTOVALSKE IN RAČUNSKE OSNOVE	56
4.1	Ocena pretoka plavin	57
4.2	Ocena pretoka drobirskega toka	58
5	HIDRAVLIČNA ZASNOVA VAROVALNIH OBJEKTOV	60
5.1	Dimenzioniranje pretokov v strugi	60
5.1.1	Analiza rinjenih plavin v strugi.....	60
5.2	Hidravlično dimenzioniranje prečnih objektov.....	65
5.2.1	Dimenzioniranje preliva.....	65
5.2.2	Dimenzioniranje podslapja in pregradnih tolmunov	69
5.2.3	Pretok skozi pregradne odprtine	70
5.2.4	Dimenzioniranje zaustavitvenega prostora (kapaciteta zadrževanja) za pretok trdih delcev	71
6	PRIMER NAČRTOVANJA UKREPA NA IZBRANEM HUDOURNIKU	73
6.1	Hidrološka analiza Brezovškega in Lukenjskega grabna v hudourniškem območju potoka Reka.....	73
6.1.1	Topografska analiza prispevnega območja	73
6.1.2	Modeliranje površinskega odtoka visokih voda	78
6.1.3	Ocena količine drobirskega toka	84
6.2	Dimenzioniranje pregrade	86
6.2.1	Dimenzioniranje preliva.....	86
6.2.2	Dimenzioniranje odprtine	86
6.2.3	Dimenzioniranje podslapja	90
6.3	Opis predlaganih rešitev.....	91
6.3.1	Zaplavna pregrada.....	91
6.3.2	Zadrževalni bazen	92
6.3.3	Podslapje.....	92
7	ZAKLJUČEK.....	93
VIRI.....		95

KAZALO SLIK

stran

Slika 1: Skupine ukrepov (prirejeno po [3]).....	7
Slika 2: Prečni objekti v hudourniških ureditvah: (A) pregrada; (B in C) talni prag (1 masivni, 2 leseni, 3 "vodarski" kamen); (D) drča (kamnita); (E) jezica (prirejeno po [3]).....	8
Slika 3: Vrste hudourniških pregrad razvrščene glede na izgradnjo: (A) polnostenska pregrada; (B) kronsko zaprta pregrada z majhnimi odprtinami; (C) kronsko zaprta pregrada z velikimi odprtinami; (D) kronsko zaprta pregrada z režastimi odprtinami; (E-G) režaste; (H) razbremenilna; (I) mrežna; (J) rešetkasta (prirejeno po [3]).....	11
Slika 4: Sistem zaplavnih pregrad (povzeto po Suda, 2007)	14
Slika 5: Odtok v sistemu zaplavnih pregrad (po [3])	15
Slika 6: Uravnalna oz. filtrirna pregrada z velikimi odprtinami (povzeto po Suda, 2007)	19
Slika 7: Oblike rešetk in statični sistemi: (A) poševne rešetke (grablje) na I profilih; (B) lomljene rešetke na I profilih; (C) poševne rešetke na sestavljenem nosilcu; (D) dvojno lomljene rešetke (postavljene na dveh okroglih nosilcih); (E) dvakrat lomljene rešetke (podprte na podpornih letvah in okroglem nosilcu) (prirejeno po [3]).....	20
Slika 8: Prečni prerez nosilcev ali rešetk: (A) varjeni škatlasti profil; (B) okrogli sestavljeni prerez; (C) polni votli profil; (D) prazni votli profil; (E) I-nosilec (prirejeno po [3])	21
Slika 9: Razbijači drobirskega toka (povzeto po Suda, 2007).....	22
Slika 10: Funkcionalna veriga z razbijačem drobirskega toka, sistemom zaplavnih pregrad in zaustavitveno pregrado (povzeto po Suda, 2007)	23
Slika 11: Mrežna pregrada (ovira drobirskemu toku) za večje širine dolin (> 15 m) (prirejeno po [3])	25
Slika 12: Prerez (betonskih) težnostnih pregrad: (A) z ravno zadnjo stranjo; (B) z odrezanim spodnjim ali stopničastim zgornjim delom zadnje strani (prirejeno po [3])	26
Slika 13: Težnostna pregrada, kot prečni objekt (zaplavna pregrada) in kot obrežni zid (povzeto po Suda, 2007)	27
Slika 14: Izračun napetosti prednapete pregrade (prirejeno po [3])	28
Slika 15: Enostenska lesena kašna pregrada (prirejeno po [3]).....	30
Slika 16: Dvostenska kašna pregrada (po [6]).....	30
Slika 17: Polnila za lesene kašte: (A) kamnito polnilo; (B) dve različici za polnjenje (vzdolžno) z lesom; (C) polnjenje z lesom vzdolž prečnih hlodov (po [6])	31
Slika 18: Različne izvedbe pregradnih kril: (A) krila iz žičnatih košar polnjenimi s kamenjem (gabioni); (B) poševna in vodoravna lesena krila; (C) krila iz skalnih blokov; (D) krila z vstavljenimi hlodi (prirejeno po [3]).....	32
Slika 19: Žičnate košare (gabioni): (A) različice z ravnimi pokončnimi površinami; (B) različice z nagnjenimi površinami; (C) primer prereza varnostnega zidu; (D) primer prereza pregrade (prirejeno po [3])	34
Slika 20: Enostavna zadrževalna ločna pregrada (povzeto po Suda, 2007)	35
Slika 21: Ločna (dozirna) pregrada s krili in odprtinami (pogled dolvodno) (povzeto po Suda, 2007)	36
Slika 22: Osnovne oblike ločnih pregrad: (A) valjasta; (B) ravnotežna (prirejeno po [3]).....	37
Slika 23: Območje stika: kot med okoliško skalo in tangento stika (prirejeno po [3])	38
Slika 24: Možni prerezi netežnostnih pregrad: (A) s konstantno debelino; (B) z enostranskim naklonom; (C) z obojestranskim naklonom (prirejeno po [3]).....	39
Slika 25: Enostavna netežnostna pregrada (brez odprtini) (povzeto po Suda, 2007)	39
Slika 26: Tipični prerezi hibridnih pregrad: (A) z zelo kratko horizontalno peto; (B) s srednje dolgo horizontalno peto (C) z zelo dolgo horizontalno peto (prirejeno po [3])	41
Slika 27: Kotna podporna pregrada brez prečnih reber (zaplavna pregrada) in z varovanjem pred spodjedanjem (obrežni zid) (povzeto po Suda, 2007)	42
Slika 28: Kotna podporna pregrada s stebri na vodni strani (povzeto po Suda, 2007).....	42

Slika 29: Kotna podporna pregrada s prečnimi opornimi stebri na zračni strani (grajenimi kot stranska varovanja urejenega podslapja) (povzeto po Suda, 2007)	43
Slika 30: Oblike kotnih podpornih zidov: (A) brez prečnih opornih stebrov; (B) z varnostjo pred tolmunom (spodjedanjem temeljev); (C) s podaljškom (povečana varnost proti zdrsu); (D) s konzolo; (E) s prečnimi opornimi stebri na vodni strani; (F) s prečnimi opornimi stebri na zračni strani; (G) posebna oblika z opornimi stebri na zračni strani (prirejeno po [3])	44
Slika 31: Oblike stebrnih pregrad z ravnimi ploščami: (A, C, E) s stebri na vodni strani; (B, D, F) s stebri na zračni strani; (a) in (b) so možne alternativne oblike zadrževalnih sten (prirejeno po [3])	45
Slika 32: Stebrna ploščata pregrada z oporniki (rebri) na vodni strani, ki služijo kot opora rešetki (uravnalna pregrada) (povzeto po Suda, 2007)	46
Slika 33: Stebrna netežnostna pregrada z oporniki (rebri) na zračni strani (zaplavna pregrada) (povzeto po Suda, 2007)	47
Slika 34: Masovno aktivni objekt; enostavna izvedba razbremenilne pregrade iz stebrov (odstranjevanje plavja) (povzeto po Suda, 2007)	48
Slika 35: Masovno aktivni objekt; enostavna izvedba razbremenilne pregrade iz plošč in stebrov (razbijač drobirskega toka) (povzeto po Suda, 2007)	49
Slika 36: Oblikovanje stebrov in plošč: (A) oblike stebrov (1,2 armiran beton, 3,4 ojačan armiran beton, 5,6,7 jekleni profili); (B) oblike plošč (1 s padcem, 2 enojno zlomljena, 3 dvojno zlomljena); (C) oblikovanje protitočne strani plošč (1 nezaščiten, 2 ravno zaščiten z jekleno pločevino, 3 zaščiten z ukrivljeno jekleno pločevino) (prirejeno po [3])	50
Slika 37: Masovno aktivni objekt; razbremenilna pregrada z nosilci iz stebrov in plošč (uravnalna pregrada) (povzeto po Suda, 2007)	51
Slika 38: Masovno aktivni objekt; pregrada z velikimi odprtini, stenami, ploščami in nosilci (uravnalna pregrada) (povzeto po Suda, 2007)	51
Slika 39: Vektorsko aktivna struktura; podprta ravna rešetkasta pregrada z masivnimi krili (povzeto po Suda, 2007)	52
Slika 40: Rešetkaste pregrade: (A) raven (urejen) sistem (1 vertikalna rešetka, 2 horizontalna rešetka, 3 mrežasta rešetka); (B) podprt ravninski sistem (1 podprt na zračni strani, 2,3 podprt na vodni strani); (C) prostorski sistemi (1 paličje z diagonalnimi prečkami, 2 prostorsko paličje) (prirejeno po [3])	53
Slika 41: Prostorska konstrukcija; prostorska rešetkasta pregrada (toga) iz paličja (povzeto po Suda, 2007)	54
Slika 42: Vektorsko aktivna struktura; upogibljiva mrežna struktura (povzeto po Suda, 2007)	55
Slika 43: Pregled sistematike vrst premestitev in njihove sestave na povirjih hudournikov (prirejeno po [3])	56
Slika 44: Vrste pretokov mešanice vode in trdih delcev: (A) poplavne vode; (B) transport trdnih snovi; (C) drobirski tok (po [21])	64
Slika 45: Popolni preliv preko prečnega objekta (po [62])	66
Slika 46: Tipi padanja vode preko prečnih objektov (po [62])	66
Slika 47: Nepopolni preliv: določanje koeficienta c (po [51])	68
Slika 48: Prost iztok iz odprtine (prirejeno po [51])	71
Slika 49: Digitalni ortofoto posnetek obravnavanega območja (vir: ATLAS VODA)	73
Slika 50: DMR prispevne površine Brezovškega grabna	74
Slika 51: DMR prispevne površine Lukenjskega grabna	75
Slika 52: Pedološka karta (vir: Atlas okolja)	77
Slika 53: Geološka karta (vir: Geološki zavod Slovenije)	77
Slika 54: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Brezovski graben pri Q_{100}	80
Slika 55: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q_{100}) iz prispevne površine Brezovškega grabna	80

Slika 56: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Lukenjski graben pri Q_{100}	81
Slika 57: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q_{100}) iz prispevne površine Lukenjski grabna	81
Slika 58: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Brezovški graben pri Q_{25}	82
Slika 59: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q_{25}) iz prispevne površine Brezovškega grabna	82
Slika 60: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Lukenjski graben pri Q_{25}	83
Slika 61: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q_{25}) iz prispevne površine Lukenjski grabna.....	83
Slika 62: Fotografija naplavin uporabljena za določanje reprezentativnega vzorca	87
Slika 63: Obdelava fotografije v programu BASEGRAIN	88
Slika 64: Zrnavostna krivulja narejena s programom BASEGRAIN	88
Slika 65: Material, ki ni dosegel zaplavne pregrade ob dogodku 2018 (Lukenjski graben) ...	89
Slika 66: Akumulacija materiala okoli postaje žičnice po hudourniškem dogodku 30.5.2018 (foto: PGD Cerklje na Gorenjskem).....	90

KAZALO PREGLEDNIC

stran

Preglednica 1: Sistematika varovalnih ukrepov pred hudourniškimi nevarnostmi	3
Preglednica 2: Osnovna razvrstitev hudourniških pregrad (prirejeno po [45])	10
Preglednica 3: Klasifikacija tipov pregrad glede na funkcijo in konstrukcijo (prirejeno po [3])	12
Preglednica 4: Enostavne empirične enačbe za približno oceno obremenitve hudourniškega dogodka s plavinami in trdimi snovmi (sestavljeno po [50])	58
Preglednica 5: Dodatek "čisti" vodi pri določanju največjega odtoka mešanice vode in trdih delcev (po Hübl [21])	65
Preglednica 6: Vrste prelivov po sliki 46 (po [62])	69
Preglednica 7: Priporočen padec zaplavljanja rinjenih plavin za načrtovanje zadrževalnega prostora hudourniških pregrad (merjeno v smeri osi potoka) (prirejeno po [3])	72
Preglednica 8: Topografske značilnosti prispevnih območij	74
Preglednica 9: Deleži rabe tal na prispevni površini Brezovski graben	76
Preglednica 10: Deleži rabe tal na prispevni površini Lukenjski graben	76
Preglednica 11: Koeficient CN glede na rabo tal	76
Preglednica 12: Izračunane vrednosti odtočnega koeficienta CN za posamezno prispevno površino	77
Preglednica 13: Izračunane vrednosti časov zakasnitve (T_p) za posamezne prispevne površine	78
Preglednica 14: Višina ekstremnih padavin za povratne dobe, za postajo Kamniška Bistrica (vir: ARSO)	79
Preglednica 15: Določanje geološkega indeksa	85

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Nevarne dogodke v naravi dojemamo, kot naravne nevarnosti, ki lahko ogrožajo ljudi, okolje in premoženje. Poznamo pa tudi nevarnosti zaradi tehničnih napak in odpovedi sistemov (kot so jezovi, jedrske elektrarne, prometni objekti, itd.). Geološko in hidrometeorološko pogojene naravne nevarnosti izvirajo v atmosferi ali na Zemeljski skorji. Tovrstne nevarnosti obravnavamo in določamo njihovo pogostost pojavljanja (verjetnost nastopa), jakost delovanja (intenziteto) in škodni potencial (učinek škode) na območju njihovega delovanja. Naravne nevarnosti lahko pripeljejo tudi do katastrof. O naravni katastrofi govorimo ko je naravni dogodek tako močan, ko je obseg delovanja na ljudi in njihovo premoženje velik in obseg škod prav tako. V primeru naravne katastrofe prebivalci prizadetega območja ne morejo več pomagati sami in potrebujejo zunanjo pomoč. Podnebne spremembe imajo že danes in bodo imele še večjo vlogo v povezavi z naravnimi nevarnostmi v prihodnosti, obenem dinamični, gospodarski in vsesplošni družbeni razvoj veča škodni potencial.

Zaradi naravnih razmer v gorskih območjih je varstvo tam pred naravnimi nevarnostmi še posebej pomembna dejavnost. Naravne nevarnosti v alpskem svetu se pojavljajo v hudourniških območjih, zaradi delovanja aktivnih zemeljskih plazov ter na labilnih območjih z geološkim tveganjem. Take nevarnosti prožijo visokoenergijski procesi, ki potekajo z visoko hitrostjo gibanja sproščenih mas. Poplave, drobirski tokovi, padajoče kamenje, druge vrste zemeljskih plazov, tudi počasni in stalni premiki labilnih pobočij in različne oblike vodne erozije lahko sprožijo katastrofalne dogodke z velikim potencialom uničenja tako narave kot človeka in njegovega imetja. Zanje je značilen hiter potek (kratek čas opozorila) in možnost premikanja velikih kosov ali mase trdne snovi (skale, melišča, blato, les, sneg). Naloga obravnava naravne nevarnosti, ki jih povzročajo hudourniki v hudourniških območjih ter na varovalne objekte, ki preprečujejo ali vsaj omilijo posledice takih procesov.

Hudournik je naravno, neprekinjeno ali začasno tekoče vodno telo z mestoma velikimi nakloni dna struge, kakor tudi s hitro in močno spreminjajočimi se razmerami odtoka voda. Hitro naraščajoči in kratkotrajni poplavni dogodki erodirajo velike količine trdnih snovi (erozijski drobir) s prispevne površine in iz brežin in dna struge hudournika, jih premeščajo in odlagajo znotraj ali zunaj struge hudournika ali pa v dolinskem vodotoku, v katerega se stekajo. Prispevna površina hudournika vključuje padavinsko zlivno območje, od koder se stekajo površinske vode vanj in v njegove stranske pritoke (območje zbiranja), kot tudi območje odlaganja hudournika (naplavinski stožec, vršaj). Hudourniški procesi tako vključujejo hitro odtekanje hudourniških poplavnih voda in s tem povezano erozijo (mobilizacijo), premeščanje in odlaganje trdnih snovi (hudourniških plavin).

Hudourniški procesi lahko povzročijo tveganja za ljudi, naravo (habitat) in naseljena območja, pa tudi prometne poti, kulturno dediščino in ostalo infrastrukturo. V širšem smislu ta tveganja ustrezajo možnosti, da lahko nevarni naravni dogodki povzročijo škodo, ali v ožjem smislu tako obseg (intenzivnost) kot tudi verjetnost nastanka škode. Tveganje, ki mu je izpostavljen posameznik (posameznikovo tveganje) in tveganje, ki mu je izpostavljena skupnost kot celota (kolektivno tveganje), morata biti upoštevana pri našem delu na strokovnem področju hudourništv. Varstvo pred hudourniki vključuje vse ukrepe, ki zmanjšujejo obstoječe tveganje. Varnost pred nevarnostmi hudournika se lahko poveča z izvajanjem varovalnih ukrepov. Obseg varovalnih ukrepov temelji na potrebi po varnosti, to je na potrebi po varnosti pred bližajočimi se nevarnostmi, ki jih ogroženi dojemajo objektivno ali subjektivno. Zmnožek nevarnosti in škodnega potenciala (ranljivosti) je prikazan v kartah ogroženosti, nevarnost pa je prikazana na opozorilnih kartah nevarnosti in kartah nevarnosti.

Hudourniške gradnje zajemajo vse gradbenotehnične ukrepe, ki se izvajajo v hudourniku ali na njegovem prispevnem območju, zlasti za zavarovanje struge hudournika in sosednjih pobočij, za odtok poplavnih voda in plavin brez poškodb ter vpliva poplavnih dogodkov na razumen obseg (preglednica 1). Aktivni varovalni ukrepi vključujejo ukrepe, ki preprečujejo naravni dogodek, da se zmanjša nevarnost oz. vplivajo na potek dogodka ali da se znatno zmanjša njegova verjetnost za pojav. Razlikujemo med ukrepi, ki vplivajo na razporeditev dogodkov, in tistimi, ki neposredno vplivajo na pojav.

Preglednica 1: Sistematika varovalnih ukrepov pred hudourniškimi nevarnostmi

Varnostni ukrepi			Trajni učinek	Začasni učinek
Aktivni	Preventivni učinek	Vpliv načrtovanih dogodkov	Upravljanje s povodjem Gozdno-biološki ukrepi Tehnični varovalni ukrepi	
		Interakcija direktno na proces	Tehnični varovalni ukrepi	
	Odziv na dogodek			Takojšnji ukrepi (v primeru dogodka)
Pasivni	Preventivni učinek		Karte nevarnosti Tveganju prilagojeni prostorski načrti in raba zemljišč Varstvo stavb (in lastnine) Načrt za izredne razmere	Informacije Opozorila Alarmiranje
	Odziv na dogodek			Pregrade Evakuacija Obvladovanje nesreč

Ureditveni ukrepi so dopolnjeni s pasivnimi varovalnimi ukrepi: to so ukrepi, ki so namenjeni zmanjšanju škode, ne da bi vplivali na potek naravnega dogodka. Vplivajo na občutljivost lastnine na škodo ali vključujejo takojšnje protiukrepe (nujne ukrepe) v primeru škode. Učinek varovalnih ukrepov je trajen, če obstaja ves čas oz. dlje časa, in začasen, če je namen le kot začasen varovalni ukrep.

Ukrepi hudourniškega urejanja vključujejo preprečevanje nastajanja obremenitev s plavinami in zadrževanje vremenskih vplivov, izboljšanje vodne bilance ter neškodljivo odvajanje vode in plavin s prispevnih površin hudournika, omilitve in ozelenitev območij lomov in plazov (varovanje podnožja brežine, izsuševanje pobočij, ponovno pogozdovanje in zavarovanja tal), preprečevanje nastajanja brazd (jarkov) in zemeljskih plazov, kot tudi skrb in vzdrževanje prispevnih površin hudournikov ter ukrepov urejanja hudournikov. Poleg tega vključujejo takojšnje ukrepe, ki preprečujejo škodo v primeru poplav in erozije ali preprečujejo njihovo širitev [58].

Sistematično urejanje hudournikov v alpskih regijah poznamo že od leta 1870. Varovalni objekti (sistemi) se trenutno v veliki meri uporabljajo v skoraj vseh alpskih državah (Slovenija, Nemčija, Avstrija, Francija, Italija, Švica, Lihtenštajn), pa tudi v drugih državah, ki so podvržene takim tipom naravnih nevarnosti, kot so Kanada, Norveška, Japonska, Kitajska, Južna Koreja, Tajski, Rusija, Čile ali Venezuela. Hudourniški varovalni objekti so še posebej pomembni v tistih regijah, kjer so zaradi intenzivne rabe prostora ljudje, naselja in prometne poti v precejšnji meri na ogroženih območjih.

Zasnova in dimenzioniranje teh konstrukcij postavlja načrtovalcu posebne zahteve zaradi varovalnega učinka, ki mora biti zagotovljen, ter zahteva široko poznavanje procesov, ki potekajo na območjih povodja in ogroženosti, ter vplivov na konstrukcije. Čeprav se je urejanje hudournikov razvilo v pomembno inženirsko disciplino, so norme in standardi, ki na splošno predstavljajo najsodobnejše načrtovanje in izvedbo konstrukcij, v Sloveniji še nedorečeni, v tujini pa so pogosto nepopolni. Za Švico obstajajo smernice Zveznega urada za cestno in rečno

gradnjo [15] iz leta 1973 za dimenzioniranje hudourniških pregrad iz betona in armiranega betona. Za Nemčijo velja standard DIN 19 663 [13], ki ureja pogoje, načrtovanje in izvedbo hudourniških ureditev. V Avstriji se je sistem urejanja hudournikov razvil predvsem iz prakse gozdarske službe, sistemi varovalnih objektov in njihovi učinki pa temeljijo predvsem na delu *Lays-a*, *Aulitzky-ja*, *Hampel-a*, *Kronfellner-Kraus-a*, *Üblagger-ja* in *Kettl-a*, dimenzioniranje konstrukcij pa na standardih, ki jih je razvil *Czerny*. Za področja, ki niso zajeta v teh standardih načrtovanja, se v praksi uporabljajo ustrezni standardi hidrologije, hidrotehnike, konstruiranja betonskih konstrukcij in geotehničnega inženiringa.

Pomankanje specifičnih tehničnih standardov za urejanje hudournikov je predvsem posledica negotovosti, ki še vedno obstaja pri določanju odtoka in vplivov na konstrukcije. Na primer, kljub intenzivnim raziskavam in razvoju še ni bilo mogoče razviti splošnega standarda za vpliv drobirskega toka na konstrukcije, primeri obremenitve (kombinacije ukrepov), pomembni za preverjanje stabilnosti varovalnih objektov, pa so bili prej znani le v osnovnih pojmi. Največja negotovost pa je v določitvi projektnega dogodka za varovalne objekte, zaradi težav pri oceni pogostosti in intenzivnosti padavin, odtoka in transporta trdnih snovi na prispevnih površinah hudournikov. Negotovosti močno vplivajo na rezultate konstrukcijske zasnove in relativizirajo kakovost "natančnih" metod preverjanja.

Šele dobrih 10 let si prizadevamo za celovito standardizacijo osnov za načrtovanje, gradnjo in obratovanje varovalnih objektov (sistemov) za urejanje hudournikov. V Avstriji so rezultate različnih avtorjev sistematično zbrali v strokovni monografiji (Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J., Miklau, F. R. 2009. *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren*) in jih vključili v ONR (avstrijski nacionalni pravilnik) "Varovalni objekti za urejanje hudournikov", kar je bil tisti čas prvi celoviti standard na področju urejanja hudournikov. Razvit je bil tudi varnostni koncept, primeren za hudourniške varovalne objekte, ki temelji na konceptu delne varnosti, opredeljenem v evropski standardizaciji.

V tem magistrskem delu sem povzel najpomembnejše osnove in pravila za načrtovanje, dimenzioniranje in gradnjo varovalnih objektov v urejanju hudournikov. Delo ponuja sistematični pregled funkcijskih in konstrukcijskih sistemov varovalnih objektov, daje osnove oblikovanja in dimenzioniranja (hidravlično), povzema najpomembnejše vrste gradnje urejanja hudournikov, ter na realnem primeru prikaže način ureditve odseka hudournika. Poudarek je na pregradnih konstrukcijah (prečni objekti).

2 SISTEMATIKA VAROVALNIH OBJEKTOV

Varovalni objekti v hudourništvu sodijo med gradbene (tehnične) varnostne ukrepe (preglednica 1), ki preprečujejo delovanje hudournika in so zgrajeni na prispevni površini hudournika. Objekti so integrirani v tla in so iz gradbenih materialov ali iz delov sestavljen sistem (vključno z elektronskimi in mehaničnimi komponentami). Gradbeni objekti vključujejo tudi odlagališče, izkop in varnostni nasip. To poglavje se nanaša na tehnične hudourniške varnostne ukrepe, kamor sodijo vse vodne in obvodne zgradbe, ki vsebujejo gradbene materiale, kot so les, beton, naravni kamen ali jeklo.

Za hudourniške objekte je v teku razvoj ustanavljanja lastne terminologije, ki se razlikuje od sorodnih področij (geologija, varovalni vodni objekti, geotehnika, inženirska biologija). Izrazi, uporabljeni za opis naravnih prostorskih dogodkov na hudourniških območjih, predstavljajo predvsem morfološke in procesne lastnosti. Običajno sistematika izrazov hudourniških zgradb temelji na funkcijskih in konstrukcijskih kriterijih.

Ustrezne definicije pojmov najdemo med drugim v nemškem standardu DIN 19 663 [13] in v slovarju varstva pred visokimi vodami [40], prva celovita predstavitev vseh pojmov v zvezi s hudourništvom je opisana v avstrijskem standardu ONR 24 800 [45]. V Sloveniji podobnih standardov za hudourništvost ne poznamo.

2.1 Načela razvrščanja

2.1.1 Učinki hudourniških varovalnih objektov (funkcijske vrste)

Varovalni objekti neposredno vplivajo na procese ali zmanjšajo verjetnost pojava. Za izbiro načina varovanja velja splošno načelo, da bolj kot so ukrepi učinkoviti, večji je učinek na ogroženost. Pogosto pa topografske razmere na prispevnih površinah hudournikov delujejo neposredno na nastanek procesov in so tehnični in gospodarski ukrepi omejeni.

Ovisno od pomembnosti procesov in nevarnosti se običajno izberejo alternativni koncept varnosti, tako da so učinkoviti in koristni. Osnova za izbiro koncepta varnosti je celovita študija ogroženosti in aktivnosti procesov na prispevnih površinah. Ta osnova za načrtovanje vključuje faze evidentiranja pomembnih prostorskih podatkov, analizo in oceno podatkov ter končni razvoj pomembnih scenarijev nevarnosti (ocena dogodkov). Naslednji korak je osnovni koncept ukrepanja, pri čemer se pripisane nevarnosti optimalno prilagodijo varovalnim konceptom.

Ovisno od okoliščin na prispevnih površinah učinki procesov zahtevajo običajno zelo specifične varovalne koncepte. Zato zasnova varovalnih objektov v vsakem primeru poteka odvisno od potrebnih varovalnih učinkov (funkcij). Kljub temu je možna splošna razvrstitev funkcij (učinkov) varovalnih hudourniških ukrepov (vrste funkcij) [45].

Izpeljava vključuje vse ukrepe, ki služijo, da procese toka (visoke vode, drobirskih tokov) speljemo mimo nevarnih odsekov po najkrajši poti. Ta vrsta funkcije vključuje regulacijo hudournikov.

Stabilizacija vključuje vse ukrepe, ki služijo dnu struge in brežinam (skupaj s pobočji) na obstoječi trasi, da se zavaruje in prepreči bočna in talna (globinska) erozija.

Konsolidacija vključuje ukrepe, ki podpirajo pobočja nad konstrukcijo, tako da zvišamo dno struge. Posredni učinek konsolidacije je v zadrževanju plavni (trdih delcev) in pozitivnem vplivu na ravnotežje obremenitve s plavinami. Konsolidacijski ukrepi so vzrok za znatno zmanjšanje padca dna struge, hitrosti toka, omogočajo prosto prelivanje (prepadanje) in pretvorbo energije toka. S tem je povezano zmanjšanje prodonosnosti, bodisi zmanjšanje erozivne moči ali začasno odlaganje (sedimentacija) transportiranih plavin. S hidrobiološkega vidika konsolidacija povzroči prekinitev kontinuirnega toka.

Preusmeritev vključuje vodenje in preusmerjanje odtoka na erozijsko ranljivih odsekih hudournikov ali nestabilnih prispevnih površinah. Preusmeritve potekajo v odprtih preusmeritvenih kanalih ali po zaprtih preusmeritvenih ceveh.

Zadrževanje vključuje zadrževanje vode in/ali trdih snovi z naravnim skladiščenjem ali z umetnimi ukrepi. Zadrževanje (zaustavljanje) vode povzroči zmanjšanje največjega odtoka zaradi naravnega ali umetnega skladiščenja. To opravljajo zadrževalni bazeni (stoječe zadrževanje) ali z aktiviranjem poplavnih ravníc oz. prostora (zadrževanje pretoka). Zadrževanje plavin je zaustavljanje z umetnimi ukrepi, na primer v zaustavitvenem oz. zadrževalnem prostoru pregrade ali v zaplavnem bazenu. Zadrževanje plavin zahteva strojno odstranjevanje ali samo-čistilno sposobnost zaplavnega prostora, saj moramo ponovno omogočiti prvotno obstoječo zadrževalno kapaciteto.

Doziranje vključuje začasno zadrževanje vode v bazenu in zmanjšuje količino spodnje vode na neškodljiv obseg. Uravnavanje plavin temelji na začasnem zadrževanju rinjenih plavin pri visokih vodah in premeščanju plavin s potekom poplavnega vala ali pri srednji vodi (splakovanje).

*Filtriranje** obsega selektivno zadrževanje grobih trdih delcev (plavje, skale, kamniti bloki) iz procesa odtoka z umetnimi ukrepi. Zadržijo se komponente plavin, ki lahko dolvodno zamašijo ali blokirajo pretočni profil. Drobnim komponentam je omogočen neoviran prehod.

Sprememba energije vključuje zmanjšanje energije odtoka skozi zaustavitveni učinek konstrukcije ali padanje. Kot rezultat tega ukrepa je zmanjšanje hitrosti toka, sprememba lastnosti transportnega medija in transformacija oblike toka. Pretvorba energije se uporablja predvsem pri razbijanju in zaustavljanju drobirskega toka.

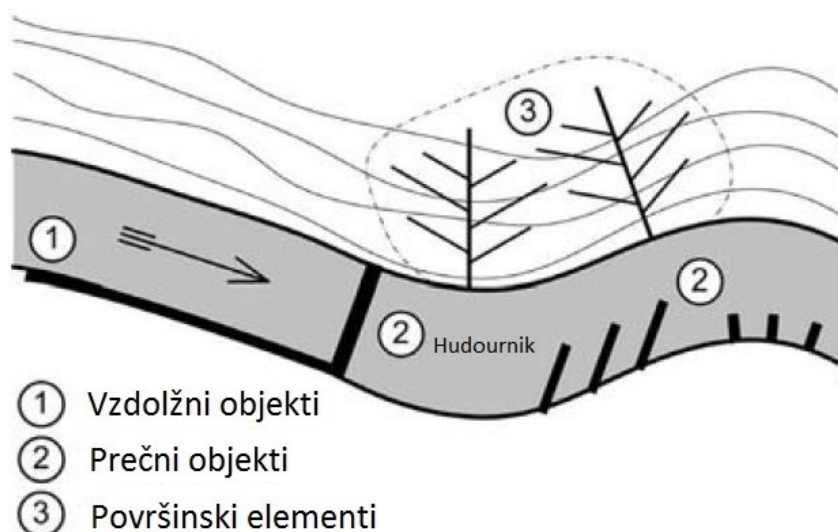
Preusmerjanje vključuje ciljno spremembo smeri toka in usmerja mimo nevarnih območij. Značilno za scenarije nevarnosti v hudournikih je prekrivanje različnih procesov in procesnih učinkov. Zato je zahtevan celovit koncept varovalnih kombinacij različnih ukrepov (učinki ukrepov). V tem smislu predstavljajo prej opisani učinki (funkcije) elemente strategije varovanja. Za načrtovanje ukrepov moramo izpeljati in določiti cilje varovanja na osnovi analize nevarnosti, in izbrati najučinkovitejšo kombinacijo učinkov (funkcij). Vsota vseh izbranih vrst funkcij bi morala popolnoma izpolnjevati cilje varovanja [23].

* Del te sistematike je bil prvotno tudi *razvrščanje*, torej selektivno zadrževanje grobo zrnatih frakcij plavin je odvisno od večjih pragov, od velikosti odprtín ali širine odprtín rešetak (zaprte z zagatnicami). Zaradi nestalnih transportnih procesov v hudourniku je funkcijo praktično težko nadzorovati in se v inženirski praksi ne uporablja več. Vendar se del koncepta izvaja pri *filtriranju*. Naravno razvrščanje se odvija na dnu struge skozi izmenjavo med rinjenim plavinam in odloženim sedimentom na dnu. Predvsem pri srednji in nizki visoki vodi prevladuje transport velikih zrn. Pomembno funkcijo za razvrščanje imajo prodišča.

2.1.2 Sistematika hudourniških varovalnih objektov

Varovalni ukrepi lahko izpolnjujejo svojo vlogo kot samostojne (posamezne) konstrukcije ali v okviru gradbenega sistema objektov (funkcionalna veriga). Samostojne konstrukcije izpolnjujejo svoj učinek (funkcijo) ne glede na učinek drugih varovalnih ukrepov. V sistemu ukrepov se varovalni učinek ukrepa doseže skozi združevanje varovalnih objektov z enakimi ali drugačnimi nalogami. Zato je celoten učinek sistema ukrepov zagotovljen samo s popolnim učinkom vseh (delov) elementov (posameznih ukrepov), četudi zmanjšanje učinkovitosti posameznega ukrepa (npr. nižja življenjska doba) upada. Gradbeni sistem je seštevka vseh ukrepov, ki prispevajo k varovalnemu učinku.

Kot pomembno merilo za razvrščanje varovalnih objektov, je uveljavljen postopek, ki razvršča glede na položaj konstrukcije na smer gibanja glavnega toka. V tem smislu se razlikujejo v hudourniških gradnjah prečni in vzdolžni objekti. V tretji skupini se uporabljajo varovalni ukrepi s površinskim učinkom (površinski elementi). Združbo ukrepov večinoma sestavljajo vse tri skupine ukrepov (slika 1).



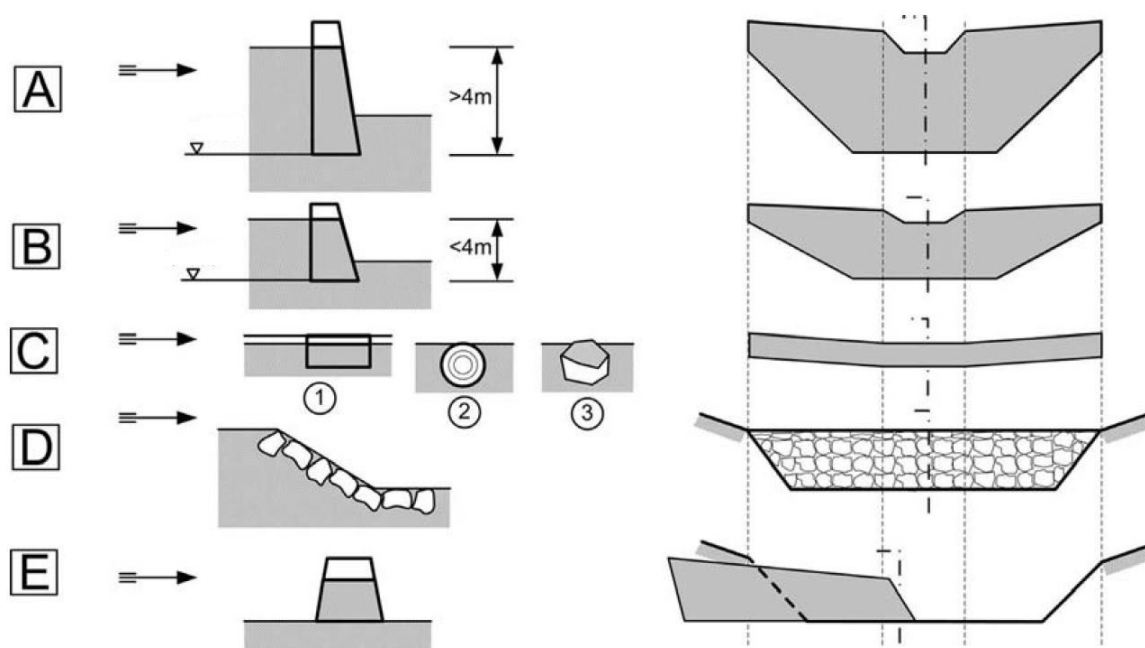
Slika 1: Skupine ukrepov (prirejeno po [3])

Prečni objekt (konstrukcija) je prečno na smer toka (smer procesa) urejena struktura. Naslednji grajeni ukrepi se štejejo za prečne objekte (slika 2).

Pregrade (hudourniške pregrade) povzročajo vertikalni padec v strugo in so visoke med 4 in 15 m (navpična razdalja med spodnjim robom temelja in prelivno sekcijo). Pregrade se lahko uporabljajo za utrjevanje dna hudournika, zadrževanje in doziranje trdih delcev transporta, zadrževanje vode, filtriranje ter pretvorbo energije.

Pragovi s stopnjo imajo višino do 4 m (navpične razdalje med spodnjim robom temelja in prelivno sekcijo). Lahko se uporabljajo za utrditev dna hudournika, stabilizacijo brežin in zadrževanje plavin.

Talni pragovi so v originalu poravnani s strugo in zato ne ustvarjajo padca ali pa je padec zelo nizek. Zaradi padca nastaja tolmun in strukturirano dno. Njihova funkcija je stabilizacija dna.



Slika 2: Prečni objekti v hudourniških ureditvah: (A) pregrada; (B in C) talni prag (1 masivni, 2 leseni, 3 "vodarski" kamen); (D) drča (kamnita); (E) jezbica (prirejeno po [3])

Drče povzročijo poševni padec in imajo navadno visoko hrapavost površine. Služijo za stabilizacijo dna in pretvorbo energije.

Jezbice (ostroge) so podolgovate strukture, ki iz brežine štrlijo v vodotok, vendar razpon ni preko celotne širine struge. Ostroge so krajše kot jezbece, ampak izpolnjujejo enako funkcijo. Funkcija je usmerjanje toka proti sredini struge in varovanje brežin ali vzdolžnih zgradb pred erozijo.

Vzdolžne zgradbe so razporejene vzdolž toka. Naslednje objekte štejemo med vzdolžne zgradbe.

Obrežni zidovi so običajno izvedejo iz betona, armiranega betona ali naravnega kamena. Vodna stran zida je navpična ali v strmem naklonu. Njihova funkcija je varovanje brežin pred erozijo in spodjedanjem, kot tudi podpora pred zemeljskim pritiskom brežin.

Kamnite zložbe so sestavljene iz neobdelanega naravnega kamenja (skal), poševno nagnjenega obrežnega zavarovanja, postavljenega v suho ali v beton. Kamnite zložbe služijo za zavarovanje brežin proti eroziji. Površina je hidravlično groba.

Vzdolžna pregrada (vodilna konstrukcija) služi, da preusmerja procese (visoko vodo, drobirski tok, gravitacijske procese) od ogroženih območij. Vzdolžna pregrada mora biti postavljena pod ostrim kotom na smer procesa, da se doseže najboljši možni preusmeritveni učinek. Njihova funkcija je izpeljava ali preusmeritev procesov.

Strukturni varovalni ukrepi s površinskim učinkom (površinski elementi) se uporabljajo v stranskih pobočjih hudournikov proti delovanju erozije ali gibanju pobočij. V to skupino ukrepov so vključeni tudi gozdarski in inženirsko-biološki ukrepi. Pri strukturnih ukrepih se razlikuje odvodnjavanje, spremembe terena in utrditev brežin.

Drenaže (sistemi odvodnjavanja) odvajajo vodo iz navlaženih pobočij in prispevajo k stabilizaciji. Z odvajanjem vode s pobočij se zmanjšajo kritični porni tlaki v tleh in preprečujejo

potencialne drsne površine. Odtok vode poteka v odprtih ali zaprtih (podzemnih) cevovodih do urejenega iztoka. Funkcija je odvodnjavanje in stabilizacija pobočij.

Umetno *spremenjen teren* služi za ravnanje in stabilizacijo nestabilnih pobočij ter proti površinskem spiranju in erozijskim jarkom. Funkciji sta tako stabilizacija brežin in varnost pred erozijo.

Konstrukcije za *stabilizacijo pobočja* (utrditev pobočja) dajejo stabilizacijski učinek s podporo vznožja pobočja, s sidranjem (pilotiranjem) nestabilnega sloja pobočja (skozi strižno ploskev) v stabilno podlago ali z ravno podporo pobočja. Uporabljajo se tudi kombinacije podpornih konstrukcij in sidranja. Druge oblike so objekti s prekrivnim oz. površinskim učinkom ali terasiranje pobočij. Tehnično kompleksne konstrukcije za stabilizacijo brežin/pobočij, kot se na primer uporabljajo pri gradnji cest, so v hudourniških gradnjah redko uspešno uporabljene. Funkciji sta stabilizacija pobočij in erozijska varnost.

Samostojne (posamezne) konstrukcije stojijo v strugi tako, da imajo učinkovit odnos ena z drugo in tako delujejo na proces v sistemu. Te strukturni sistemi predstavljajo kombinacijo vzdolžnih in prečnih objektov, kot tudi konstrukcijske varovalne ukrepe z učinkom na območje. Strukturni sistemi so v hudourniških gradnjah lahko organizirani kot regulacije, sistem pregradnih objektov in funkcionalne verige.

Regulacija je zaprta konstrukcija hudournika, kombinacija neprekinjenih, obojestranskih obrežnih zavarovanj in prečnih objektov z učinkom stabilizacije dna. Njihova funkcija je izpeljava pretočnih procesov (visoke vode, drobirskih tokov), stabilizacija brežin in varnost brežin proti eroziji. Regulacija pritrdi potek toka na položaj in preprečuje morfološke spremembe.

Sistem pregradnih objektov je serija več zaporednih pregrad ali talnih pragov podobne zasnove in funkcije na odseku, da ustreza načrtovanemu padcu dna potoka. Funkcije so konsolidacija potoka, zadrževanje plavin in pretvorba energije.

Funkcionalna veriga je serija več zaporednih varovalnih objektov različnih zasnov in lastnosti, katerih učinki v kombinaciji zagotavljajo varnost pred enim ali več procesi hudournika (primer: funkcionalna veriga pregrad s funkcijo pretvorbe energije, filtriranja in uravnavanja). Neposredna prostorska povezava ni potrebna. Pogosta praksa funkcionalnih verig je povezava naslednjih delov funkcij: uravnavanje plavin, filtriranje, pretvorba energije in zadrževanje trdih delcev in vode. Prav tako so možne tudi druge funkcionalne kombinacije.

2.1.3 Razvrstitev hudourniških pregrad

Pregrade štejemo med najpomembnejše in univerzalne objekte v hudourništvu. Glede literature je veliko predlogov razvrstitve hudourniških pregrad. Sistematična razporeditev v strokovnem izrazoslovju hudournišтва doslej še ni v celoti uveljavljena.

Najpomembnejša merila za razvrstitev pregrad so naslednja:

- prevladujoči hudourniški procesi,
- učinki pregrad (vrste funkcij),
- ureditev konstrukcij,
- višina padca in naklon padca,
- glavni uporabljeni gradbeni materiali,
- zasnova pregrad (vrsta konstrukcij),

Preglednica 2: Osnovna razvrstitev hudourniških pregrad (prirejeno po [45])

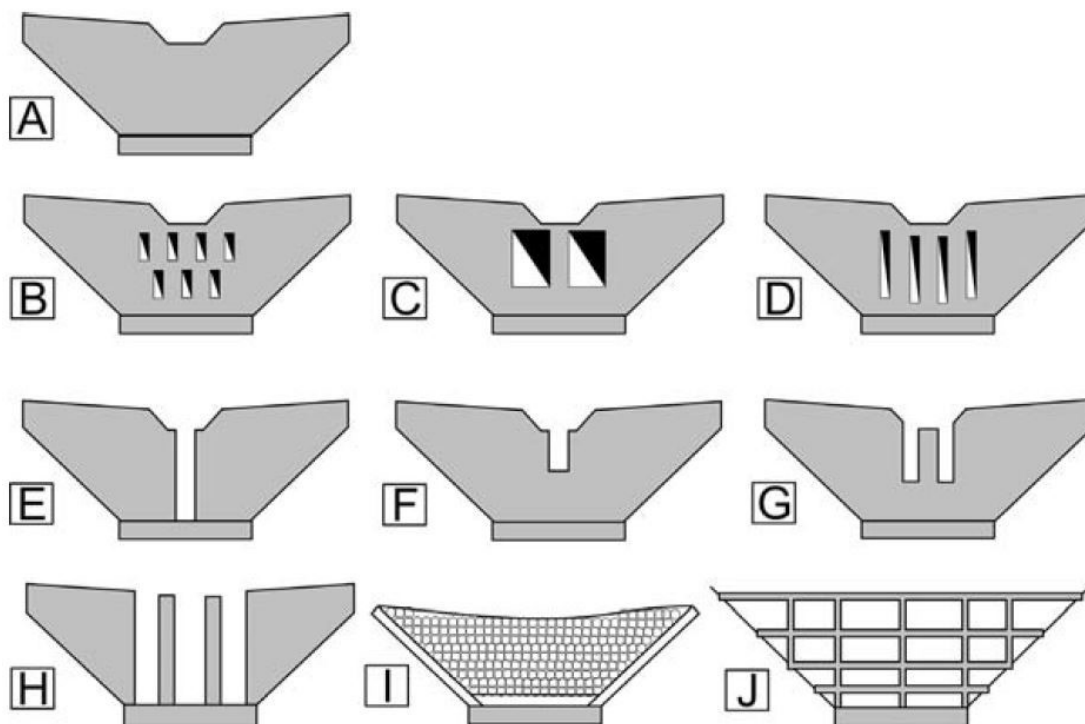
Glavna funkcija	Stabilizacija Konsolidacija	Zadrževanje	Doziranje	Filtriranje	Pretvorba energije
Objekt	Zaplavna pregrada	Zadrževalna pregrada	Uravnalna pregrada	Filtrina pregrada	Razbijač drobiškega toka
	Talni prag	Vodo-Plavine-	Vodo-Plavina-	Grobe plavine-Plavje-	Kaskadni objekti
	Nizka pregrada				Upočasnitveni objekti
	Drča		Drobirski tok-		
Vrsta gradnje	Polnostenska (zaprta) pregrada	Enostavna polnostenska pregrada		Večdelna polnostenska pregrada (kaskade)	
	Odprta pregrada	Kronsko zaprta pregrada		Kronsko odprta pregrada	
		Pregrada z majhnimi odprtinami Pregrada z velikimi odprtinami		Režasta pregrada	Razbremenilna pregrada
Statični sistem					Rešetkasta pregrada Mrežna pregrada Pregrada iz jeklenic
	Težnostna pregrada	Ločna pregrada	Razbremenilna nosilna konstrukcija		
			Enostavna ploščata pregrada	Steburna ploščata pregrada	Kotni podporni zid
Gradbeni material	Les				
	Kamen				
	Konstrukcijski beton (zaščiten, nezaščiten)				
Prepreke odprtin	Jeklo				
	Nosilci (les, jeklo)				
	Rešetka (poševna)				
	Mreža				
	Zaščita z zapornico				

- statični sistemi.

Poleg tega je mogoče najti naslednje dodatne attribute uporabe: tlorisna oblika, oblika reže, odprte/zaprte krone, število pregradnih odprtín, kontrolirane/nekontrolirane zapornice (varovala, lopute, zapornice), na vodni strani zgrajeni ukrepi z učinkom ločevanja, nespremenljiva/spremenljiva razdalja med palicami rešetk, premična (daljinska) krila, oblika kril, učinek v konstrukcijskem sistemu. V preglednici 2 so prikazane razporeditve glede na glavne kategorije.

V praksi se za določitev pregradnih objektov priporoča uporaba klasifikacije glede na vodilno funkcijo, vrsto konstrukcije in statični sistem pregrade, ki temelji na standardu ONR 24 800 [45]. Razširitev te klasifikacije z atributom gradbenega materiala in po potrebi zapiranjem (prekrivanjem) pregradnih odprtín. Osnovne funkcijske vrste (stabilizacija, konsolidacija, zadrževanje, uravnavanje, filtriranje in pretvorba energije) so bile obravnavane v poglavju 2.1.1.

Za razvrstitev glede na vrsto konstrukcije se sprva razdeli na odprtine pregradne stene: razlikujejo se polne (brez odprtín) pregrade (zaprte pregrade) in odprte pregrade. Razvrstitev odprtih pregrad se izvede po kriteriju neprekinjene ali prekinjene krone pregrade: razlikujejo se zaprte in odprte krone pregrade. V eni skupini so rešetkaste, mrežne in pregrade iz jeklenic (slika 3).



Slika 3: Vrste hudourniških pregrad razvrščene glede na izgradnjo: (A) polnostenska pregrada; (B) kronsko zaprta pregrada z majhnimi odprtinami; (C) kronsko zaprta pregrada z velikimi odprtinami; (D) kronsko zaprta pregrada z režastimi odprtinami; (E-G) režaste; (H) razbremenilna; (I) mrežna; (J) rešetkasta (prirejeno po [3])

Pomembno merilo za razvrščanje je oblika in velikost pregradnih odprtín. Če so pregradne odprtine omejene na vrhu (zaprta krona), govorimo o *precednicah*, če pa so na vrhu odprte, so to *reže* (odprta krona). Pregrade z več odprtinami imenujemo razbremenilne pregrade.

Naslednja merila za predlagano klasifikacijo hudourniških pregrad sta gradbeni material in oblika zapiranja pregradnih odprtín. Obe merili se imenujeta po glavnem atributu pregrade.

Kompleksnost sistema hudourniških pregrad izhaja iz raznolikosti, večinoma v inženirski praksi razvitih oblik, ki se izvajajo v zadnjem desetletju. Celovit in primerljiv pregled vseh znanih vrst objektov, v zvezi z njihovimi vplivi in učinkovitostjo, ki temelji na vseh ustreznih procesih (učinkih) v modelnem poskusu ali kot analiza učinkov v naravi, doslej še ni bil izveden. Izvedene so bile študije le na posameznih konstrukcijskih vrstah. Po drugi strani je iz prakse pridobljeno veliko izkušenj o različnih vrstah pregrad. V tem okviru se lahko sklicujemo zlasti po Kettl-u [30, 31] in Hübl-u [25].

Projektant izbere za značilne učinke najbolj primerno vrsto konstrukcije, ki ustreza procesom prispevnega območja. Načeloma je možno ustreznost nekaterih vrst pregradnih objektov predstaviti v odvisnosti od funkcijskih tipov, konstrukcijskih tipov in statičnih sistemov. Kot odločilna pomoč za projektanta pri izbiri primerne vrste konstrukcije, lahko služi razporeditev vrst pregrad v funkcijsko-konstrukcijsko matriko (preglednica 3). Za dodatne razlage statičnega sistema glej poglavje 3.5 (težnostne pregrade).

Funkcijsko-konstrukcijska matrika (preglednica 3) prikazuje, da so zaprte (polnostenske) pregrade in pregrade z majhnimi odprtinami, primerne za funkcijo konsolidacije in zadrževanja. Od tod prihaja eno najpomembnejših meril za načrtovanje hudourniških pregrad, prehodnost zgradb za trde delce in vodo: večji je delež odprtin na celotni površini pregrade, večja je prehodnost in bolj se funkcija preusmeri od zadrževanja proti uravnavanju in filtriranju grobih plavin. Posebno vlogo imajo rešetkaste, mrežne in pregrade iz jeklenic, saj imajo največji delež odprtin (v razmerju s površino pregrade), zato njihova konstrukcija (sitasto razporejene odprtine) deluje bolj selektivno na prehodnost transporta trdih delcev. Pri režastih pregradah nastopi (delno) praznjenje zadrževalnega prostora ob odtekanju visoke vode. Ne glede na vrsto gradnje ima vsaka vrsta pregrade določeno stopnjo, kjer začne transport trdih delcev zapolnjevati odprtine, kar povzroči neselektivno odlaganje plavin. Zlasti plavje je povzročitelj začetne zaježitve pregradnih odprtin.

Preglednica 3: Klasifikacija tipov pregrad glede na funkcijo in konstrukcijo (prirejeno po [3])

		Konstrukcijska vrsta						
		Polnostenska (zaprta) pregrada	Odprta pregrada					
			Pregrada z odprtinami		Režasta pregrada	Razbremenilna pregrada	Rešetasta, mrežna in pregrada iz jeklenic	
Majhne odprtine	Velike odprtine							
Funkcija	Konsolidacija	Konsolidacijska pregrada						
	Zadrževanje	Zadrževalna pregrada (plavine ali/in vodo)						
	Uravnavanje			Uravnalna pregrada				
	Filtriranje				Filtrna pregrada (plavine, plavje)			
	Pretvorba energije	Kaskadna pregrada			Razbijač drobirskega toka			

3 OBLIKOVANJE IN KONSTRUIRANJE VAROVALNIH OBJEKTOV

3.1 Pravila oblikovanja enostavnih prečnih objektov

V hudourništvu so prečni objekti zasnovani tako, da se prostor (zaplavni oz. zaustavitveni) gorvodno postopno zapolni s plavinami (sedimenti). Visoka voda, na katero je objekt dimenzioniran, odteče preko prelivne sekcije in pade na zračni strani v tolmun, kjer poteka pretvorba energije (slika 5). Pregradna krila se v nobenem primeru ne smejo preliti. Za katastrofalni primer, ko pride do prelivanja kril, so krila pregrade običajno oblikovana med 10 in 20% padcem, vsekakor pa nad najvišji padec zaplavka, da koncentrirajo odtok v središče hudournika in ne ob boke doline. Pregradna krila so na obeh straneh vpeta (vkopana) v pobočje doline, da ne prihaja do obtekanja pregrade.

Dno hudournika je običajno labilno, zato je potrebno pregrado temeljiti dovolj globoko, da ne bi prišlo do spodjedanja. Po priporočilu se hudourniške pregrade temelji od 1,5 do 2 m globoko, vendar pa je odvisno od posameznega primera, globine tolmana, stabilnosti brežin in kakovosti gradbiščnih tal.

Stacionarni pogoji vode v tleh lahko povzročijo dodatne obremenitve na pregradne objekte. Gibanje vode v območju zemeljskih tlakov, povzroči dodatne obremenitve obrnjene proti pregradi, ki povečajo efektivne pretočne sile aktivnega zemeljskega tlaka. Takšna dodatna bremena moramo pri gostih pregradnih jedrih preprečiti z dreniranjem. Pri betonskih (cementnih) objektih to uredimo z odprtini (precednicami). Lesene kašne pregrade in gabionske pregrade iz žičnatih košar so zaradi njihove konstrukcije vodoprepustne.

Prerez pregrade (plošče) se na vodni strani po navadi oblikuje navpično, medtem ko je lice na zračni strani oblikovano v naklonu. Oblika zračne strani je običajno odvisna od statičnega sistema – med 5:1 in 10:1.

Širina temeljev je odvisna od nosilnosti tal, širitev je potrebna pri slabši nosilnosti tal.

3.2 Zaplavne pregrade in sistem zaplavnih pregrad

Cilj konsolidacije je doseči podporo pobočij nad pregradnim objektom, tako da zvišamo dno struge. S tem postavimo strugo v stabilen položaj, saj ji preprečimo globinsko erozijo. Posredni učinek konsolidacije je v zadrževanju hudourniških plavin in pozitivnem vplivu na prodni režim. Konsolidacijski ukrepi zmanjšajo poglobljanje dna struge, zmanjšajo pretočno hitrost, oblikujejo prosto prelivanje (prepadanje) vode preko objektov in pretvarjajo energijo toka v erozijskem tolmunu pregrade. Z zaplavnimi pregradami tako zmanjšamo premestitveno zmogljivost za plavine, ki se izrazi v zmanjšani erozijski moči ali začasnem odlaganju rinjenih plavin.

Praviloma se konsolidacija nestabilnega odseka hudournika načrtuje z zaporedjem pregrad (slika 4). Običajno so na takih odsekih pregrade med seboj podobne ali enake, tako zaporedje imenujemo sistem pregradnih objektov. Sistem načrtujemo tako, da se pregrade medsebojno podpirajo in preprečujejo spodjedanje temeljev pregrade, zaradi oblikovanja erozijskega tolmana.

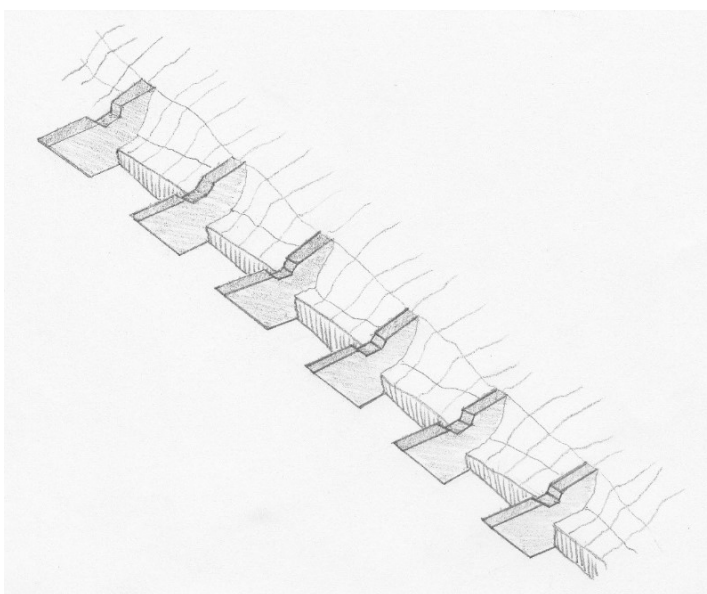
Pretok plavin skozi zaplavne prostore sistema zaplavnih pregrad poteka po lastnih hudourniških plavinah, kjer plavine v dnu in dotečajoče plavine medsebojno učinkujejo ena na

druge. Sistem prispeva k ravnovesju premeščanja plavin, saj naraščanje dotoka plavin vodi k odlaganju plavin in povečanju zaplavnega padca, zmanjševanje dotoka plavin pa k odpavljanju in zmanjševanju zaplavnega padca v zaplavnem prostoru. Učinkovitost sistema pregrad za uravnavanje pretoka rinjenih plavin je lahko ob določenih pogojih višja, kot pri posamezni (veliki) uravnalni pregradi, saj sistem omogoča odlaganje in odnašanje plavin v prostorih med pregradami ter je manj podvržen zamašitvi pretočnega prereza.

Nedvomno je zadrževalna zmogljivost za plavine v zadrževalnem prostoru za konsolidacijsko pregrado omejena. Pri zelo povečanem dotoku plavin lahko pride na območju sistema pregrad od strmih vršajov podobnih zaplavlkov, ki pretok po hudourniku usmerijo iz struge v peto pobočij. Zato tudi ob takih dogodkih lokalna erozija, spodkopavanje pete pobočij in usadi niso popolnoma izključeni, ampak obseg plazenja ni nikoli takšen, kot na nezavarovanih odsekih hudournikov. Za stabilnost pregrade je to tveganje izrednega pomena, ker ob pomanjkljivem vpetju krila pregrade v pobočja, lahko pride do spodjedanja temeljev. Posledično tok obide pregrado, kar ogrozi stabilnost pregrade.

Naslednji dejavnik tveganja za varnost sistema pregrad je pojavljanje zajezev gorvodno od sistema pregrad in možne nenadnih porušitve zajezitve. Ta lahko privede do hitrega nihanja pretoka celo drobirskih tokov, katerih magnituda je precej višja nad projektno visoko vodo. V obeh primerih je sistem pregrad izpostavljen vplivom, na katere ti objekti praviloma niso dimenzionirani (izredni dogodek). Sistemi pregrad na območjih, ki jih ogrožajo nihajoči pretoki in drobirski tokovi, je potrebno zavarovati z ustreznimi varnostnimi ukrepi. Med te varnostne ukrepe uvrščamo:

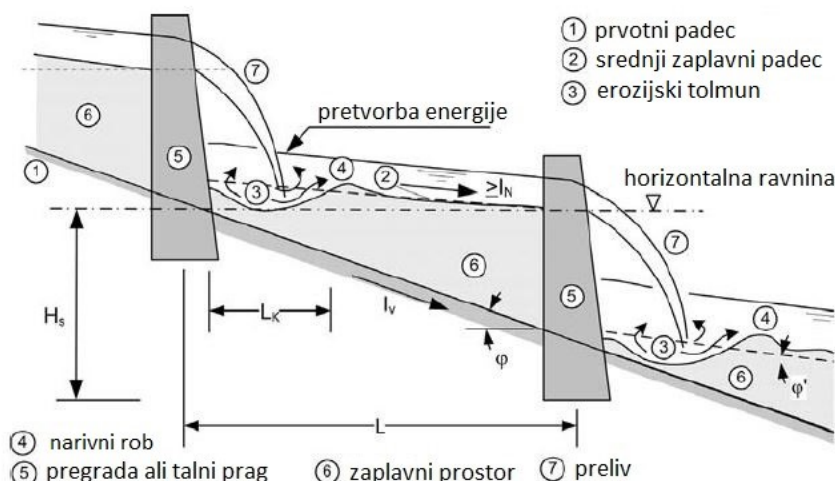
- ustrezen pretočni profil prelivne sekcije (bistveno večji, kot ga zahteva projektna visoka voda),
- koritasto (in ne trapezno) oblikovana prelivna sekcija (skledasta oblika),
- strmi naklon krone pregradnega krila (minimalno 15 %), pri čemer je krilo v zunanji krivini strmejše od krila na notranji strani (kadar pregrada ni na ravnem odseku),
- ustrezno vpetje temeljev v pobočja,
- zavarovanje pobočij/brežin v območju erozijskega tolmana pod pregrado in
- izgradnjo razbijačev drobirskega toka gorvodno od sistema (zaplavnih) pregrad.



Slika 4: Sistem zaplavnih pregrad (povzeto po Suda, 2007)

Zaplavne pregrade in sistemi pregrad nimajo pomembnega vpliva na visokovodne pretoke razen, ko pretvarjajo energijo v erozijskih tolmunih pregrade. Z izvajanjem prej navedenih varnostnih ukrepov lahko dosežemo učinkovito pretvorbo energije drobirskega toka, zaradi prepadanja toka preko pregrad.

Zaplavni padec (ϕ') v sistemu zaplavnih pregrad je odvisen od pretoka, koncentracije plavin in zrnastostne sestave sedimentov, zato je nihanje vedno prisotno. Za razporeditev zaplavnih pregrad, zlasti pri izbiri razdalje med njimi (L), ima odločilno vlogo zaplavni padec nad pregrado. Bistven je minimalni padec (ϕ'), ki se oblikuje po visokovodnem dogodku. V hudourniku je minimalni padec vedno bistveno manjši, kot padec struge (ϕ) v nezagrajenem hudourniku. Poleg tega je za stabilnost pregradnih objektov zelo pomembna tudi dolžina (L_K) in globina (h_K) erozijskega tolmana. Če je padec med dvema pregradama večji, kot je minimalni padec (ϕ'), pride ob visokih vodah do poglobljanja dna. Stabilnost pregrade se zato zmanjša (slika 5).



Slika 5: Odtok v sistemu zaplavnih pregrad (po [3])

Če v sistemu pregrad pride do porušitve ene od pregrad, to vpliva na stabilnost vseh gorvodno ležečih pregrad v sistemu. Zaradi tega moramo biti najbolj pozorni na stabilnost najnižje ležeče pregrade, ki prevzema vlogo ključnega objekta v celotnem sistemu.

Za načrtovanje sistema pregrad je zelo pomembno določiti minimalen padec (ϕ'), ki zagotavlja ustrezno prekrivanje temelja pregrade in preprečuje globinsko erozijo v območju erozijskega tolmana, kar bi lahko povzročilo spodjedanje temeljev. V praksi je padec dna struge med pregradami v sistemu odvisen od sestave sedimentov. Izberemo ga do največ 5 %, v idealnem primeru pa je 0 % (nepokrit temelj pregrade). Spodnji rob temelja pregrade leži približno 1 m nižje od zgornjega roba prelivne sekcije spodaj ležeče pregrade.

Razdalja (L) med pregradami mora biti dvakratna dolžina tolmana (L_K). V strmih hudournikih je ta zahteva večinoma dosežena z velikimi prepadnimi višinami objektov. V tem primeru je razdalja med pregradami (L) večja od 10 m [6].

Proces zaplavljanja hudourniških pregrad je težko nadzorovati, saj je močno odvisen od pretoka in prodonosnosti ter od cikličnih dogodkov. Če zaplavne pregrade po izgradnji niso zapolnjene, nastopi zapolnjevanje prostora šele ob naslednjih hudourniških dogodkih. Tako zaplavljanje je nepovratno in ga pogosto izkoriščamo za zmanjševanje stroškov strojnega zasipa pregrad. Po zaplavitvi do krone pregrade se vzpostavi gorvodno od nje zaplavni padec, ki ustreza ravnovesnemu padcu določenemu razmerju med premestitveno zmogljivostjo in dejanskim dotokom plavin.

3.3 Pregrade z velikimi odprtini in odprtimi kronami z uravnalnim in prebiralnim učinkom

Prodonosnost hudournika izstopa v odvisnosti od količine plavin in vodnatosti v kratkem času spremembe faze z masnim presežkom in primanjkljajem. Zaradi tega razloga se pojavlja, na manjših območjih in v kratkem časovnem zaporedju, odnašanje (erozija) in odlaganje. Tako je morfologija struge na pogled zelo nestabilna. Režim plavin je večinoma v stanju neravnovesja.

Posegi v transportu plavin vodijo do hitre spremembe režima plavin. Na primer, vzrok postavitve zadrževalne pregrade rinjenih plavin v spodnjem toku privede do primanjkljaja plavin in sprožitve novih erozijskih žarišč. Za hudournike z nestabilnim režimom plavin so taki načini delovanja vprašljivi, zaradi visoke stopnje prehodnosti rinjenih plavin in omogočanja selektivnega zadrževanja grobih komponent plavin. Podlaga za ta koncept leži v načinih delovanja uravnavanja in prebiranja rinjenih plavin skozi odprte pregrade [31].

Naslednja merila so za določanje funkcij pregrad z odprtini:

- selektivno zadrževanje grobih trdnih delcev (plavja in plavin), katerih skladiščenje vodi v zajezev odtoka, prelom hudournika in obrežno erozijo;
- obsežna prehodnost za transport srednje in drobno zrnatih plavin še posebej pri nizkih visokovodnih dogodkih;
- učinek zadrževanja le pri visokovodnih dogodkih;
- možnost (delnega) neodvisnega praznjenja;
- zagotavljanje zadostnega prostora za zadrževanje plavin ocenjenega dogodka brez stalnega preverjanja;
- dobro odtekanje zaplavka;
- prehodnost pregrade za makro organizme in (če je potrebno) za ribe.

Prednost tega koncepta leži v učinkoviti rabi energije vode, v ohranjanju ravnovesja rinjenih plavin v spodnjem toku, v možnosti dolgo prostega zadrževalnega prostora, v ekološki prehodnosti pregradnega objekta, kakor tudi v manjših stroških gradnje zaradi nižje (priporočene) višine objekta.

Koncept doziranja je v praksi izveden v obliki pregrade z odprto krono ali pregrade z velikimi odprtini. Naslednje vrste objektov najpogosteje zastopajo:

- režaste pregrade z:
 - enojno ali z več režami,
 - zagatnicami,
 - mrežo;
- pregrade z velikimi odprtini in:
 - rešetkami,
 - (poševnimi) rešetkami,
 - zagatnicami,
 - mrežo.

Koncept prebiranja (grobih plavin in plavja) je v praksi izveden v obliki pregrade z odprto krono. Naslednje vrste objektov najpogosteje zastopajo:

- režasta pregrada z enojno ali z več režami,
- razbremenilne pregrade (npr. lovilci plavja),
- rešetaste pregrade,
- mrežne pregrade.

Bistvenega pomena za uravnlalni in prebiralni učinek hudourniških pregrad je velikost pregradne odprtine, premer odprtini in širine reže ali čista širina odprtini v rešetki, mreži ali med zagatnicami. Kriterij načrtovanja ni samo velikost plavin, ki jih je treba zadržati, ampak tudi ciljna kapaciteta začasnega zadrževanja v zaplavnem prostoru, sedimentacija plavin in splavitev plavja. Da je omogočena prehodnost pregradnih odprtini, moramo upoštevati dve različni zahtevi: pregradne odprtine morajo biti dovolj nizko, da plavine učinkovito vstopajo, in dovolj velike, da se zadrževalni prostor učinkovito splakuje. Ob gradnji zajezev se na koren zastojev postavi sedimentacijska ovira (oblikovanje potopljenega naplavnega stožca), kar upočasni premikane plavin proti pregradnemu objektu. Tako bodo pregradne odprtine dlje časa proste. Odvisno od funkcije pregrade se za uravnlalne pregrade velikost pregradnih odprtini (npr. širina utora) oceni, tako da zajezev nastopi že pri srednji vodi, visoki vodi ali šele pri dimenzionirani visoki vodi. Po drugi strani pa so odprtine prebiralnih objektov ocenjene, da je prehodnost večja od dimenzionirane visoke vode in se odprtine zajeziijo samo v katastrofalnih dogodkih.

Kritičen je ocena učinka pregrad z velikimi odprtinami ali odprtimi kronami z visoko prehodnostjo za hudournike, na povodjih s karbonatno podlago (apnenec, dolomit), kjer so plavine lahko mobilizacijske, kašaste ali nekoherentne. Pri takih hudournikih obstaja tveganje prostega prehoda rinjenih plavin skozi odprtine brez učinka pregrad [52].

3.3.1 Režaste pregrade

Režaste pregrade se glede na učinek imenujejo tudi praznilne pregrade. Načelo te vrste pregrade temelji na tem, da se plavine začnejo med visokovodnimi dogodki zaustavljati v zaplavnem prostoru in sedimentirati ob korenu zaustavljanja. Zamašitev reže (zajezev) naj se pojavi čim kasneje. Izkušnje kažejo, da se reža, tudi brez plavja, pri visokovodnih dogodkih hitro zamaši. Bistven dogodek za zamašitev reže je lahko trenutek prelivanja preko prelivne sekcije, ki močan tok skozi režo oslabi s prelivanje preko pregrade.

Praznjenje zaplavnega prostora poteka – če reža ni popolnoma zamašena – z odtokom poplavnega vala. Kot rezultat zaplavljanja so večji padci, posledično se povečajo pretoki in vlečne sile v območju reže. Izpiranje sedimentov iz zaplavnega prostora poteka zgoraj tik ob reži in se širi v obliki erozijskega kanala gorvodno v telo zaplavka. Praviloma lahko dosežemo z naravnim izpiranjem le delno prazen zadrževalni prostor, ker je razvoj erozijskega jarka, v smeri toka in bočno, omejen. Odločilnega pomena za doseženo praznjenje je višina reže.

Režaste pregrade so občutljive na hitro zamašitev, občasno tudi za nenaden preboj zapore pri polni zamašitvi, kar vodi v poplavni val na dolvodnem območju in nenadno praznjenje zaplavnega prostora. Ta tveganja lahko v potrebnih primerih nevtraliziramo z dodatnimi konstruktivnimi varnostnimi ukrepi. Ti vključujejo dodatke, katere se namesti na vodno stran reže (stebre, usmerjevalce), pred katerimi je potrebno zadržati les (zadrževanje brez plavja) z ureditvijo tramov ali več režastih oziroma razbremenilnih pregrad.

Kot vodilo za minimalne širine reže daje Leys [39] širino dna struge potoka gorvodno od pregrade ali trojni premer velikosti zrna. Določitev širine reže je kritičen kriterij načrtovanja, saj se napačno določena širina hitro zamaši ali prepušča preveč. Širine reže se kasneje praktično ne more več spremeniti.

3.3.2 Pregrade z zagatnicami

Pregrade z jeklenimi zagatnimi nosilci imajo širše odprtine ali reže, z delno vzdanimi horizontalnimi palicami. Učinkovitost zagatnih pregrad je odvisna od višine pregrade, prevodnosti (razdalja med zagatnicami) in širine zagatnic. Pri običajni velikosti pregradnih odprtin redko pride do zaježitve v zaplavnem prostoru, zato je razdalja med zagatnicami bistven kriterij za prevodnost. Zatikanje grobih plavin in plavja med zagatnice postopoma privede do zamašitve odprtin, kar pa se ne pojavi tako nenadoma, kot pri režastih pregradah. Do zamašitev pride navadno kot posledica neselektivnega odlaganja finih plavin na zaustavljenem plavju in grobih plavinah.

Samodejno praznjenje zaplavnih prostorov se pri zagatnih pregradah ne zgodi tako lahko, kot pri režastih pregradah. Če na zagatnicah leži plavje, se odprtine zamašijo in je čiščenje zaježitev neizbežno. Bistvena prednost zagatnih pregrad je v zagotavljanju učinkovitega zaustavljanja grobega materiala, katerega premer je večji od razdalje med zagatnicami.

Kot smernico za minimalno razdaljo med zagatnicami daje *Hampel* [19] 1,5-kratnik premera velikosti zrna ali dvojno širino zagatnice. Prednost je prilagodljivost razdalj med zagatnicami.

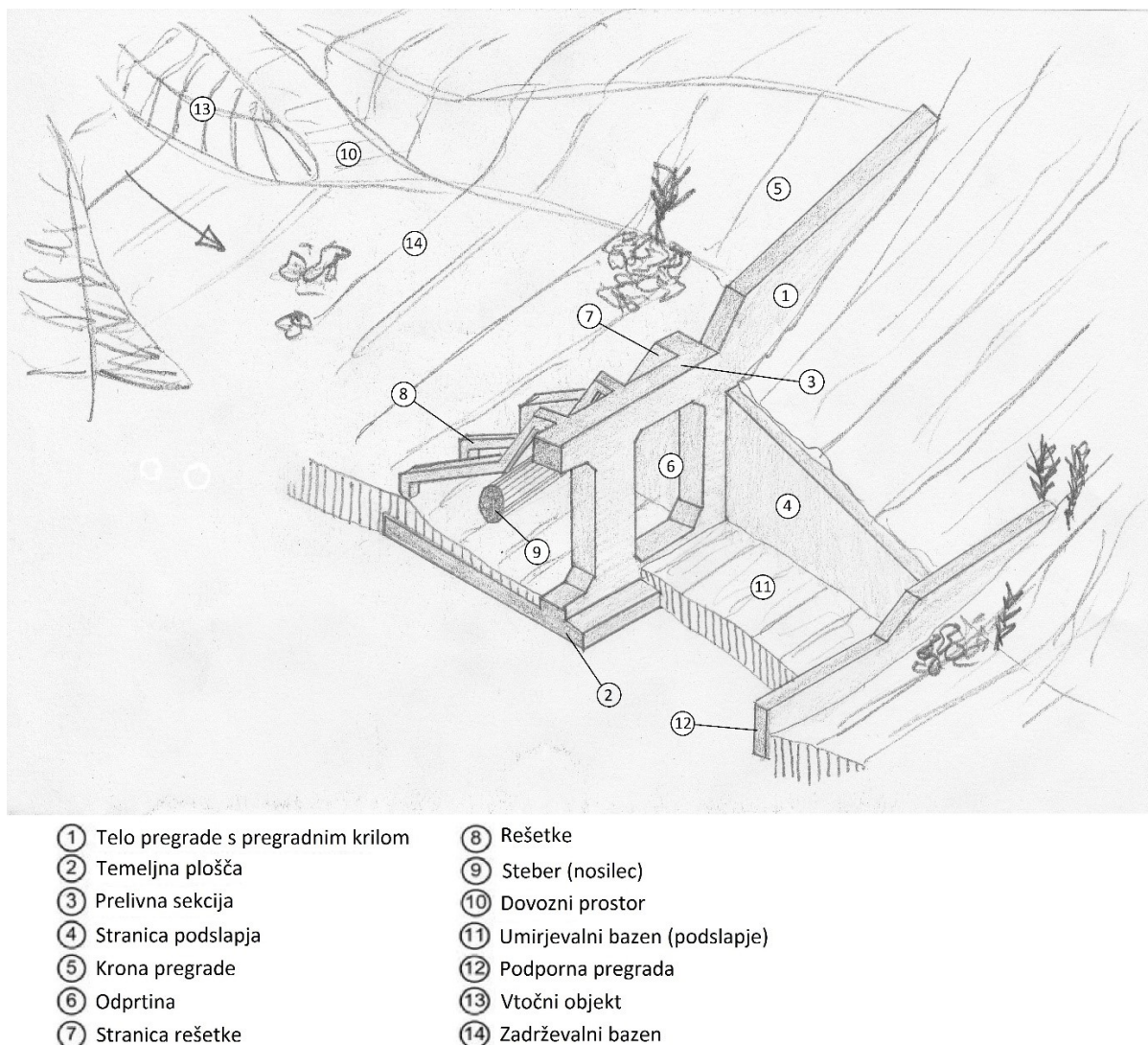
3.3.3 Rešetkaste pregrade

Osnovna zamisel te vrste pregrad je, da plavje zdrsne navzgor po nagnjenih rešetkah in s tem vzdržujejo dlje časa dobro pretočnost rinjenih plavin. Navpičnih rešetak se pri objektih v hudournikih ne uporablja. Konstrukcija rešetak v hudourniku z močnim stalnim tokom in velikim deležem plavja omogoča, da je prodonosnost potoka v spodnjem toku v ravnovesju. Na sliki 7 je prikazana uravnalna oz. filtrirna pregrada z velikimi odprtinami.

Zaradi zožitve prečnega prereza se pojavi med palicami rešetke povečana vlečna sila, kar lokalno poveča prodonosnost. Osnovna ideja teh vrst objektov je pri visokovodnem valu naravno izpiranje zadrževalnega prostora, ter daljše zadrževanje grobih plavin. Skozi pregrado se izpira precejšnji del plavin – še posebej drobnih frakcij – v spodnjem delu toka. V praksi se pojavlja, da potopljen les na rešetkah v nekaterih primerih zaježi in prekine izpiranje. Taka zaježitev v zadrževalnem prostoru vodi do nekontroliranega odlaganja sedimentov. Zato se pogosto namestijo rešetke tako, da se že med pretokom visokovodnega vala sproži izpiranje. Pri načrtovanju objektov je zelo pomembno zagotoviti ne samo dostop do zaplavnega prostora ampak tudi do rešetak.

Rešetka nagnjena pod 45° (slika 7 A) izpolnjuje opisane funkcije, vendar lahko z dodatnimi konstruktivnimi varnostnimi ukrepi učinek izboljšamo. Pogosto najnižji del rešetke izvedemo horizontalno ali rahlo nagnjeno, podobno kot pri tirolskem zajetju (slika 7 B-E). Višji deli rešetke so nagnjeni strmeje. Na območju pretočne sekcije se lahko rešetka izvede horizontalno. Rešetke so namenjene za velike odprtine, njihova pretočnost pa je večja od dimenzionirane visoke vode.

Pri zaježitvi lahko občasno naplavi plavje v območje prelivne sekcije. Za preprečevanje potiskanja lesa preko prelivnega dela, moramo rešetko izvesti tako, da les obtiči v zgornjem območju. Ta učinek je na primer lahko dosežen z navpično postavljenimi palicami na vrhu rešetke (grablje) (slika 7 C).



Slika 6: Uravnalna oz. filtrirna pregrada z velikimi odprtinami (povzeto po Suda, 2007)

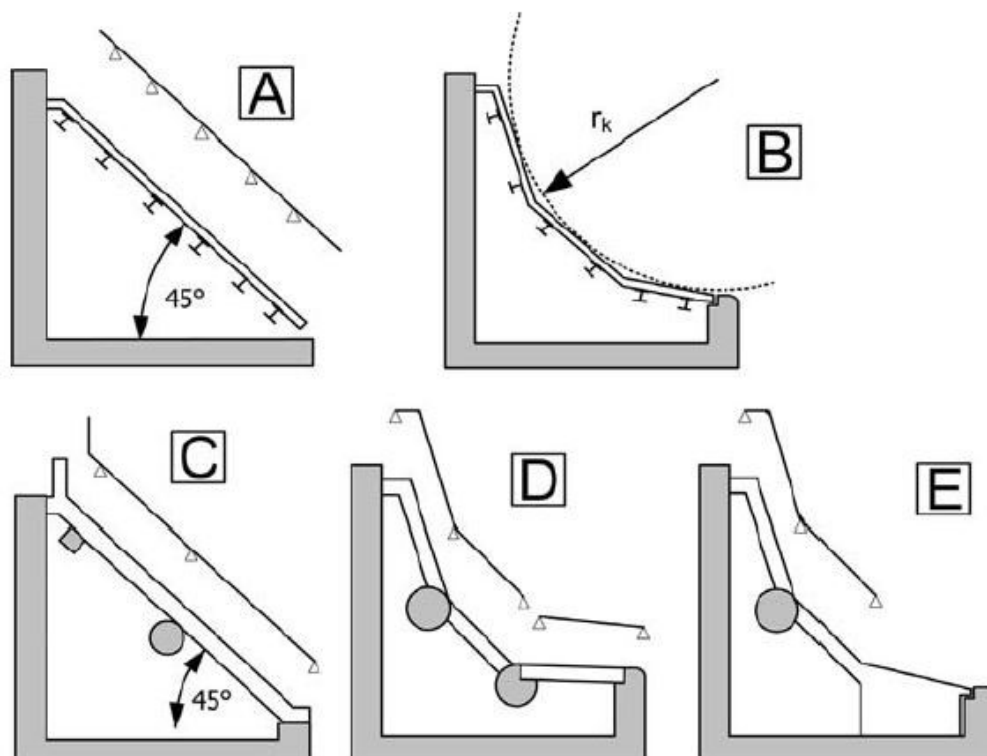
Masivne poševne grablje na hudourniških pregradah so danes večinoma iz jeklenih profilov. Rešetke so glede na obremenitev iz I-nosilcev (IPE, IPB), votlih profilov ali z betonom polnjenih profilov (slika 8). Enostavne rešetke je enostavno konstruirati. Na horizontalnih I-profilih ležijo navpične palice rešetke. Horizontalni I-nosilci so pri straneh sidrani v stranici (lice) rešetke (slika 7 A in B).

Nosilci večkrat prelomljenih pregradnih rešetak so bili sprva iz prečno ležečih jeklenih nosilcev, na katere so palice rešetke privarjene. V zadnjih letih se uporabljajo okrogli armirano-betonski nosilci oblečeni v jekleno pločevino, kot horizontalni nosilci navpičnih palic (slika 7 C-E). Iz visoko nosilnih sestavljenih prečnih prereзов se je število horizontalnih nosilcev zmanjšalo. Za prečne nosilce ali močno obremenjene palice rešetak se uporablja z betonom obložene I-nosilce ali z betonom polnjene cevi. Pri I-nosilcih se na obe strani prirobnic privari jeklena pločevina ($t \geq 8 \text{ mm}$). Varjene škatlaste prečne prereze se napolnijo z betonom (slika 8 A), potrebno je doseči največjo možno nosilnost za dinamično obremenitev toka, plavin in plavja [17].

Izbira razdalje med rešetakami, za pregrade z odprtinami, je odvisna od funkcije pregrade in sestave plavin, zato Leys [38] predlaga določiti srednje zrno grobe frakcije plavin. V praksi se

izbira razdalje samo glede na pretekle izkušnje, matematično določevanje se ne zdi smotno. Za ločevanje plavja se predlaga razdalja rešetk med 100 in 200 cm.

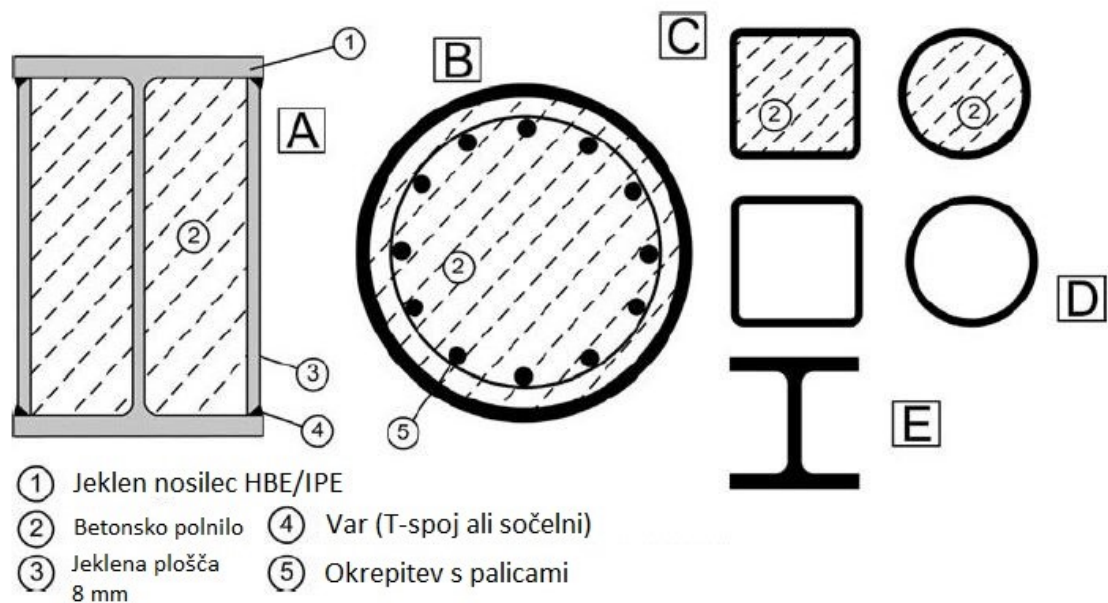
Zaradi negotovosti pri izbiri širine rešetk je zaželena možnost kasnejše prilagoditve. *Krimpelstätter* [34] predlaga dva podporna sistema za poznejše prilagajanje. Možnost je polaganje na podporne profile ali na valjast nosilec, lahko pa tudi na dva valjasta nosilca.



Slika 7: Oblike rešetk in statični sistemi: (A) poševne rešetke (grablje) na I profilih; (B) lomljene rešetke na I profilih; (C) poševne rešetke na sestavljenem nosilcu; (D) dvojno lomljene rešetke (postavljene na dveh okroglih nosilcih); (E) dvakrat lomljene rešetke (podprte na podpornih letvah in okroglem nosilcu) (prirejeno po [3])

Polaganje na podporne palice (profile) in okrogle nosilce (slika 7 E): Če se za polaganje palic uporablja prečne podporne profile ali prečni nosilec, spodnji zob ni potreben. Taka konstrukcija rešetk ostaja pri srednji in visoki vodi dlje pretočna. Ker se med palicami vodni tok zoži, dolvodno od rešetk ne pride do odlaganja plavin. Profili so izdelani iz montažnih jeklenih elementov, ki so napolnjeni in zaščiteni z betonom. Največja pomanjkljivost profilov je draga konstrukcija in stabilizacija, da se razdalja med nosilci ne spreminja. Zgornja opora je sestavljena iz armirano-betonskega nosilca, oblečenega v hidravlično ugodno jekleno pločevino. Jeklena pločevina se lahko uporablja kot trajni opaz, s čimer zmanjšamo stroške opaza. Te konstrukcije se lahko izvedejo z drugačnimi odprtini rešetke v najnižjem in v obeh zgornjih poljih rešetk [34].

Polaganje na dva okrogla nosilca (slika 7 D): Ta konstrukcija omogoča različne odprtine nosilcev v vseh treh poljih rešetk. Še ena odločilna prednost teh konstrukcij je, da lahko razdaljo med rešetkami prilagajamo, glede na nove ugotovitve v zvezi z načrtovanjem drobirskih tokov in visokih voda. Pri teh konstrukcijah so nosilci neprekinjeni in zaščiteni s podporami brežin. Prostor med nosilci se po potrebi zapolni z macesnovim lesom [34].

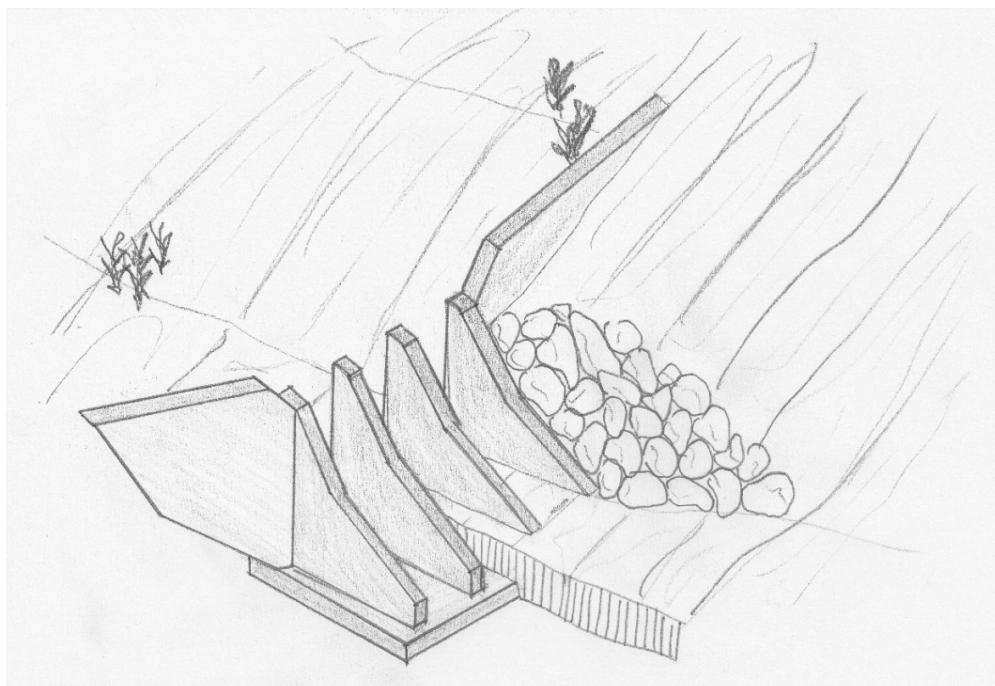


Slika 8: Prečni prerez nosilcev ali rešetk: (A) varjeni škatlasti profil; (B) okrogli sestavljeni prerez; (C) polni votli profil; (D) prazni votli profil; (E) I-nosilec (prirejeno po [3])

3.4 Objekti za razbijanje in zaustavljanje drobirskih tokov

3.4.1 Razbijači drobirskega toka

Cilj razbijanja ali zaustavljanja drobirskega toka je znižati nivo energije (energijska preobrazba). Hitrost procesa lahko upočasnimo in učinek na dolvodno ležeče objekte (dinamična obremenitev objektov) bistveno zmanjšamo. S poseganjem v proces se spremeni tudi lastnosti srednjega toka in preoblikujejo način toka. Masa drobirja potrebuje za odlaganje primerno mesto.



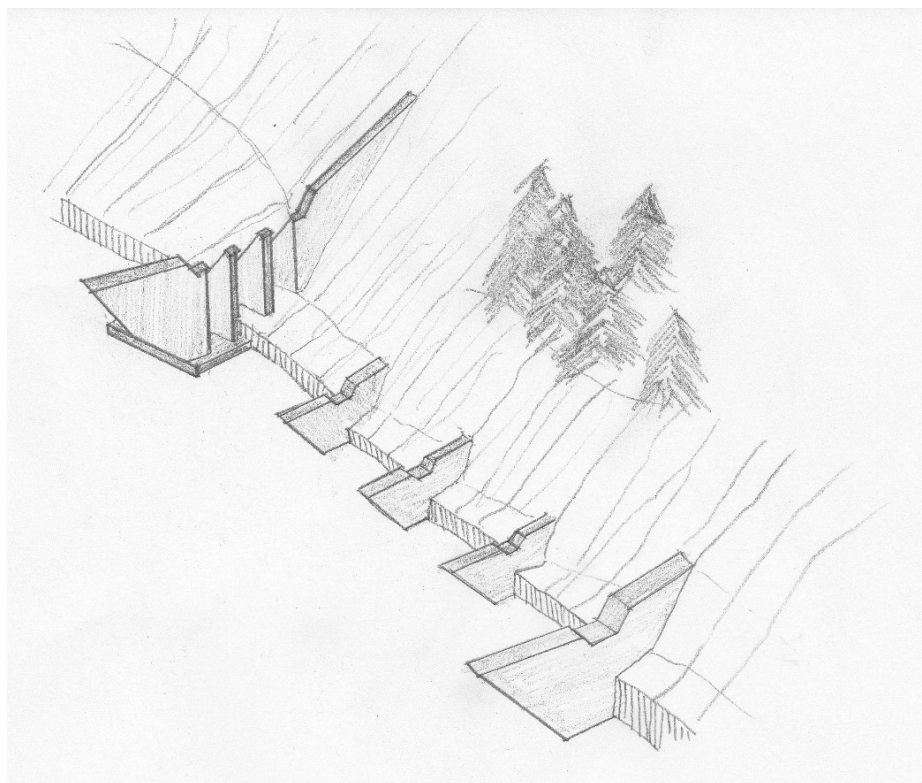
Slika 9: Razbijači drobirskega toka (povzeto po Suda, 2007)

Funkcija pretvorbe energije (razbijanje in zaustavljanje drobirja) se običajno izvaja za ločen objekt, ki je ocenjen za primeren učinek (slika 9). To ločevanje funkcij od drugih učinkov (zadrževanje, uravnavanje, konsolidiranje) je smiselno, saj morajo biti vsi objekti načrtovani na obremenitev drobirskega toka. Koncept ločevanja funkcionalnosti omogoča pretvorbo energije drobirskim tokovom na gorvodnem objektu za varovanje (v smeri toka) naslednjega objekta.

Obremenitev vključuje dinamično obremenitev obtežbe, impulzni trki potiskanja blokov in debel, abrazijo na izpostavljenih površinah in erozijski učinki v okolici objektov. V nekaterih primerih, ko drobirski tok, kot proces, igra podrejeno vlogo, je lahko razbijač drobirskega toka komponenta pregrade z drugo funkcijo. Na primer, režastim pregradam (z namenom doziranja oz. ločevanja) dodamo betonske plošče z učinkom razbijačev drobirskega toka ali betonske plošče razporedimo čez pregradno telo z zadrževalnim učinkom. Kot posebne konstrukcije so zamišljene razbremenilne pregrade z masivnimi betonskimi ploščami in stebri ("armirano-betonske rešetke" z visoko prevodnostjo) ali mrežne pregrade (ovire za drobirski tok), njihova uporaba je do sedaj dosežena samo v posebnih primerih.

Razbijači drobirskega toka so razporejeni gorvodno od objekta, saj morajo uvesti drobir in varovati dolvodni objekt (npr. gorvodno od uravnalne pregrade ali pred sistemom pregrad s konsolidacijsko oz. zaplavno funkcijo) (slika 10). Temeljnega pomena za učinkovit varovalni sistem je pravilna ocena kopičenja drobirja v povirju. Napačna ocena lahko vodi do resne

škode in izgube funkcionalnosti objekta, zaradi prevelike obremenitve z drobirskim tokom. Na škodo drobirskih tokov so še posebej nagnjeni masivni deli pregrad, kot na primer rešetke, mreže in nosilci oz. zagatnice.



Slika 10: Funkcionalna veriga z razbijačem drobirskega toka, sistemom zaplavnih pregrad in zaustavitveno pregrado (povzeto po Suda, 2007)

Razbijači drobirskega toka so v osnovi rešetkastih oblik, armirano-betonske plošče razporejene druga ob drugi. Reže zagotavljajo zadostno prevodnost za fluvialni transport plavin. Plošče so na vodni strani navadno oblikovane poševno ali pa so večkrat zlomljene, praviloma pa so oblečene (zavarovane) s pločevino proti obrusu.

Prevodnost razbijačev drobirskega toka je v osnovi zasnovana tako, da pregradni objekt ob visokovodnih dogodkih bistveno ne zaustavlja ali zadržuje fluvialnega transporta plavin in čim manj ovira tok skozi odprtine. Širina odprtin razbijačev je odvisna od vrste in sestave drobirskega toka: Bolj so zrna groba in bogatejši je tok s plavjem, večje morajo biti razdalje med stebri. Za spodnjo mejo (referenčno vrednost) je navedena najožja širina od 1,5 do 2 m.

3.4.2 Pregrade za pretvorbo energije drobirskega toka

Alternativni koncept za pretvorbo energije drobirskega toka so objekti s prepadanjem v dolvodni zadrževalni bazen [27]. Učinek teh objektov temelji na padanju drobirja ali poplavnih valov preko večjih prepadnih višin in udarcu na ravno dolvodno površino (podslapje). S pretvorbo kinetične energije drobirskega toka se spremeni pretok rečnih sedimentov dolvodno in lastnosti transportnega medija. Podobni učinki se pojavijo tudi pri sistemih pregradnih objektov. Plavine se v bazenu odlagajo v obliki strmega stožca, preko katerega poteka hitro ločevanje grobega in finega zrnja.

Objekti za pretvorbo oz. disipacijo energije se običajno štejejo za vitke pregrade brez odprtin (enostavna netežnostna pregrada, kotni podporni zid, hibridna pregrada, stebrna netežnostna pregrada) z izvedenimi precednicami. Prelivna sekcija mora biti zasnovana za drobirski tok, pregradna krona pa mora ležati v nivoju z naravno niveleto dna struge hudournika. Vendar pa se dolvodni odlagalni bazeni poglobijo pod teren.

Objekti za prepadanje drobirskega toka so postavljeni večinoma na strmem naplavnem stožcu, zato je zadrževalna zmogljivost odlagalnih bazenov (zaradi topografskih razlogov) večinoma omejena z 10.000 m^3 . Če ima drobirski tok zelo veliko prostornino, lahko zgradimo sistem pregrad za prepadanje.

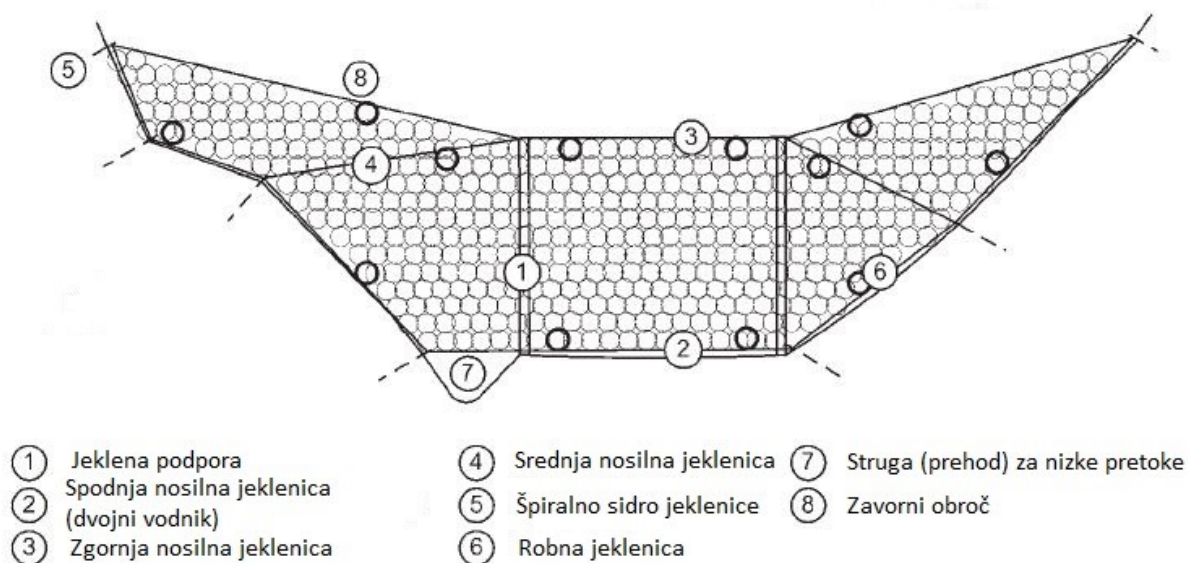
3.4.3 Mrežne pregrade za zaustavljanje drobirskega toka

V zadnjem času se z naraščanjem uspeha mrežne pregrade uporabljajo, kot ovira drobirskemu toku. Prednost je predvsem nižja transportna teža in elastično obnašanje materiala pregrade ob dogodkih. Obročne mreže imajo v primerjavi z mrežami iz jeklenic večjo učinkovitost. Prednost obročnih mrež je višja fleksibilnost in prevzemanje energije, boljša porazdelitev obremenitve na zgornji konstrukciji ter obročnih spojih, ki so močnejši kot objemke v jeklenicah. Mrežne pregrade se lahko uporabljajo za ločevanje plavja ali za oviro drobirskemu toku. Zaradi prepustnosti konstrukcije iz obročev se dotok odvaja, medtem ko se grob material zadrži, fin pa odteče z vodo. Del plavin se ustavi zaradi dreniranja. Te odkladnine (efektivna teža) pozneje ustavijo ostale plavine. Naloga obročnih mrež je, da prenesejo obremenitev na nosilne jeklenice. Ker so največji bloki predvsem v sprednjem delu transporta plavin, imajo obročne mreže idealne lastnosti za zaustavljanje drobirskega toka, saj imajo sposobnost selektivnega prejemanja.

Za lokacijo take pregrade je priporočen raven odsek z rahlim naklonom dna struge [60]. To zmanjšuje hitrost drobirskemu toku in poveča zaustavitveno silo. Lokacija naj bo dostopna za kontrole in potrebno čiščenje. Dno potok in brežine, kamor je zasidrana mreža ali jeklenica, morajo biti dovolj stabilne, da lahko prevzamejo obremenitev. Če je stabilnost premajhna, potem je potrebno sprejeti podporne ukrepe. Po dogodku je potrebno oviro pregledati, očistiti in po potrebi popraviti.

Poskusi kažejo, da se padec zmanjša za $2/3$ prvotnega, zato je preostala višina pregrade $3/4$ prvotne višine, iz tega lahko določimo minimalna višina pregrade za predvideno kapaciteto zadrževanja [60]. Iz tega lahko razberemo, da je zadrževalna zmogljivost v bistvu odvisna od topografskih razmer in višine sistema. Če je višina previsoka, moramo za lokacijo pregrade najti bolj širok ali položnejši prostor.

Če je širina pregrade večja kot približno 15 m, jo je v pravilu potrebno ojačati s podporami (slika 11). Na splošno je pri uporabi mrežnih pregrad potrebno upoštevati, da primanjkuje izkušenj o mejnih obremenitvah.



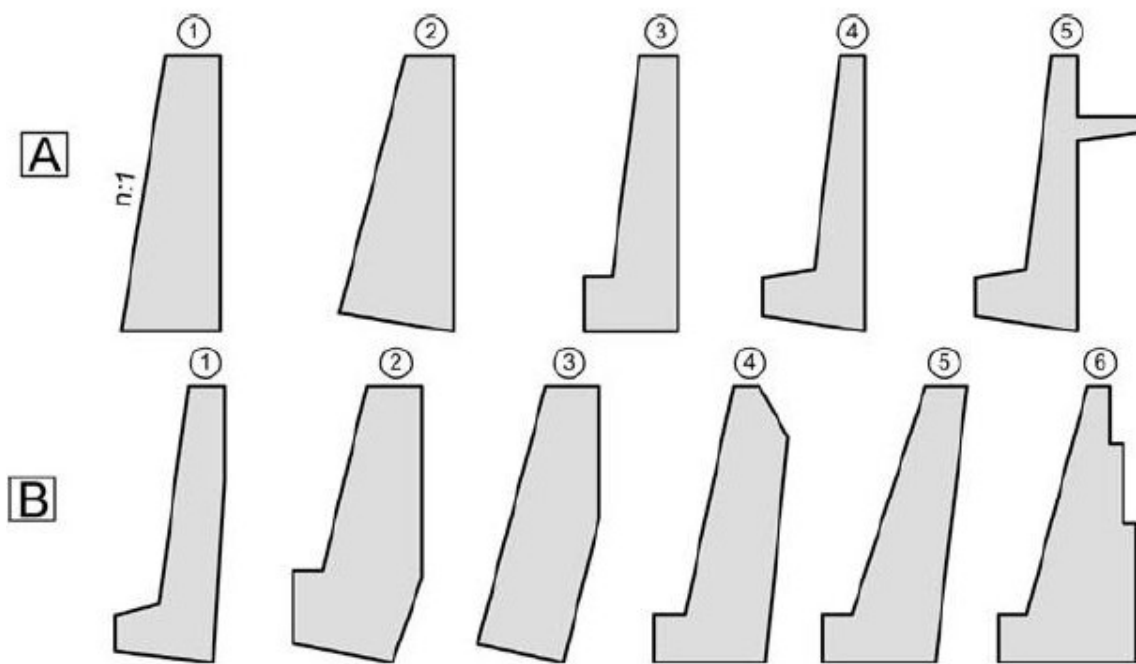
Slika 11: Mrežna pregrada (ovira drobirskega toka) za večje širine dolin (> 15 m) (prirejeno po [3])

3.5 Težnostne pregrade

Podporni učinek teh objektov je izključno teža. Na osnovno konstrukcijo deluje moment, kot rezultat obremenitve horizontalnih zemeljskih tlakov. Tem tlakom se upira vertikalna sila teže pregradne konstrukcije. Pri dimenzioniranju upoštevamo enosno napetostno stanje. Enostransko vpetje v brežino pri statični presoji ne upoštevamo.

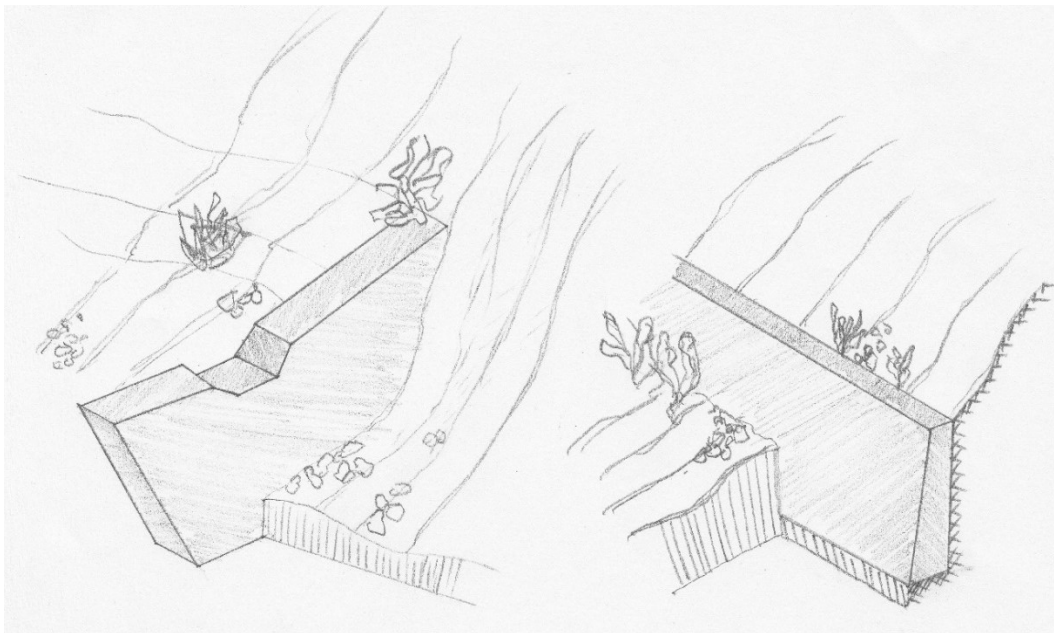
Težnostne pregrade imajo praviloma prerez trapezne oblike. Na zračni strani mora biti izveden naklon, ki preprečuje prevrnitev, zaradi aktivnih zemeljskih tlakov. V osnovi mora biti naklon nekje med 4:1 in 10:1 (slika 12). Vodna stran ni nujno navpična, lahko je tudi nagnjena ali stopničasta. Težnostne pregrade so v tlorisu večinoma zasnovane kot ravni prečni objekti. Uporablja se jih predvsem ob nestabilnih dolinskih pobočjih (npr. manj globoke doline z rahlo nagnjenimi pobočji).

Če je zid v spodnjem delu odrezan (slika 12 B), zmanjša zemeljski tlak in potreben prečni prerez. Vendar mora biti obenem zagotovljena stabilnost nezaplavljenih pregrad.



Slika 12: Prerezi (betonskih) težnostnih pregrad: (A) z ravno zadnjo stranjo; (B) z odrezanim spodnjim ali stopničastim zgornjim delom zadnje strani (prirejeno po [3])

Težnostne pregrade kot pregradni objekti so v splošnem izvedene brez odprtín pod krono pregrade, lahko pa se uporabljajo tudi kot pobočni objekti z odprtínami pod krono pregrade (npr. režaste pregrade). Lahko so to objekti iz nearmiranega ali armiranega betona, kot kamnite pregrade pa so lahko izvedene v suho ali cementno zidane, lesene kaštne pregrade ali žičnate (gabionske) pregrade.



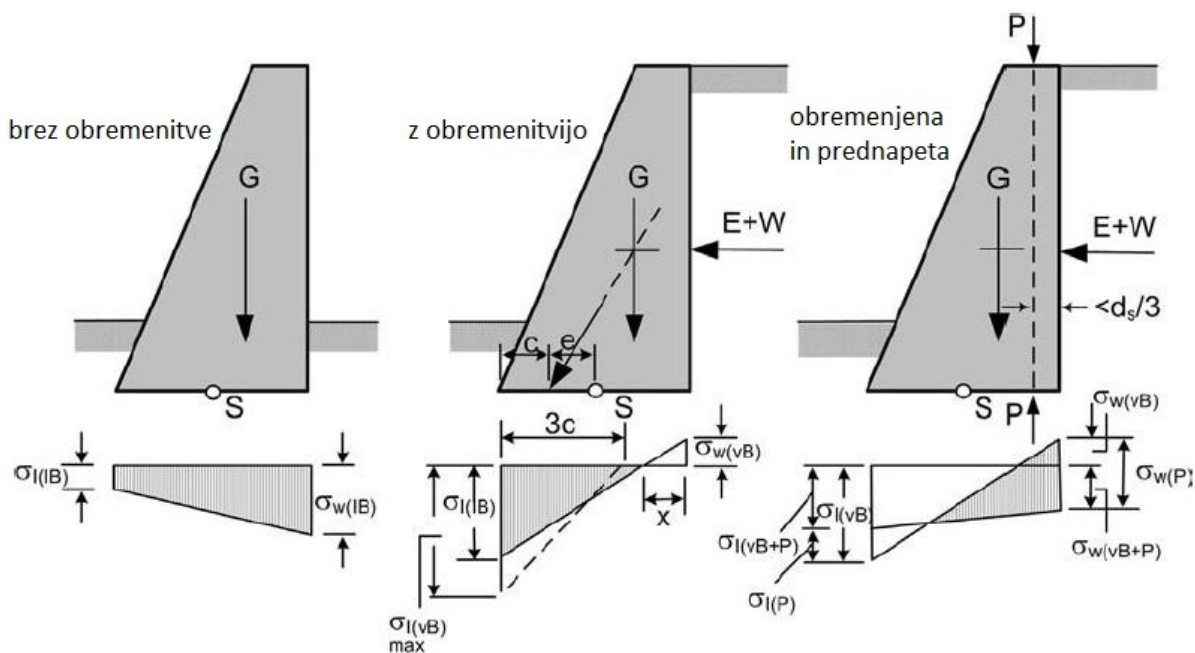
Slika 13: Težnostna pregrada, kot prečni objekt (zaplavna pregrada) in kot obrežni zid (povzeto po Suda, 2007)

3.5.1 Težnostne pregrade s konstrukcijskega betona

V večini primerov so težnostne pregrade izdelani iz nearmiranega betona in mrežasto armaturo, na vodni strani, za preprečevanje razpok. Čeprav te objekti potrebujejo veliko materiala za gradnjo, je količina izkopa lahko razmeroma majhna. Težnostne pregrade iz armiranega betona se ne izvajajo, saj je njihova lastna teža za zagotovitev notranje nosilnosti (optimizacija prečnega prereza) prenizka za zagotovitev zunanje stabilnosti. V takih primeru gradimo hibridne in netežnostne pregrade z ravno ploščo ali podporne zidove s konzolo. V praksi je minimalna debelina pregradne krone 70 cm.

3.5.2 Prednapete betonske težnostne pregrade

Prednapeta težnostna pregrada je posebna vrsta hudourniške pregrade, ki se uporablja zelo redko. Vzrok za sidranje nateznih sider je v horizontalnih spojih težnostne pregrade, kjer se ob polni obremenitvi pregrade pojavljajo natezne napetosti, katerim sidra nasprotujejo. Natezne napetosti obremenitve (zaplavka) dvigujejo dno pregrade samo delno ali v celoti. Prednapenjanje tako služi za zmanjšanje potrebne lastne teže težnostne pregrade in preprečuje širjenju razpok.



Slika 14: Izračun napetosti prednapete pregrade (prirejeno po [3])

Pri načrtovanju je potrebno paziti, da se ob praznem zadrževalnem bazenu, na zračni strani, ne pojavljajo prevelike natezne napetosti. Temu stanju se lahko izognemo tako, da pregrado napnemo po delni zapolnitvi (obremenitvi) [10]. Poleg tega vzpostavimo varnost pred korozijo, paziti je potrebno na stiskanje nateznih kanalov.

Sidra z enojnimi palicami, "pletena" sidra in talni žebli morajo biti enojno ali dvojno tovarniško zaščiteni pred korozijo. Ob prednapenjanju z naknadnim kompozitom naj se natezni del zaščiti z maso proti koroziji in ovije v PE cev, zaradi česar so sidra odpornejša in trajnejša.

V skladu z [10] so ekonomske in tehnične omejitve pri uporabi prednapenjanja pri višinah pregrad med 15 in 60 m in s tem nad maksimalno višino hudourniških objektov. Slika 14 prikazuje izračun napetosti prednapetih pregrad.

3.5.3 Kamnita pregrada

Kamnita pregrada je pregrada sestavljena iz kamna, lahko je zgrajena v suho (kamnita zložba) ali v cementno (betonsko) oblogo. Prerezi so podobni kot pri betonskih pregradah (slika 12).

3.5.3.1 Suhozid (kiklopski zid, zid v suho)

Težnostni zid iz natančno oblikovanega kamnja brez malte (betona), se imenuje suhozid ali kiklopski zid. Pri tej obliki zidu se na zračni strani izvede nagib od 5:1 do 2:1 in je primerna tudi za varnostno konstrukcijo nižjih višin. Pri postavljanju suhozida je glede nosilnosti in trajnosti potrebno biti pozoren na drgnjenje, posledično na trenje med kamni. Material je bistveno odvisen od natančnosti ujemanja in od velikosti kontaktnih površin.

Suhozid ponuja veliko različnih možnosti oblikovanja površine. Za boljše vključevanje pregrade v krajino, je za gradnjo priporočena uporaba kamena iz okolice. Praviloma so suhi kamniti zidovi uporabljeni kot talni pragovi ali nizke zaplavne pregrade.

Posebno obliko suhozida danes predstavlja grobo brušeno kamenje, ki ga običajno, z velikimi zemeljskimi deli, položijo na nagnjen nasip ali brežino. Grobo brušeno kamenje v praksi ni cenjeno.

Vmesni prostor obrežnih ali podpornih suho-zidanih zidov se lahko zapolni z mešanico trav in plevela s pomočjo vodne setve [16]. Dobro obraščanje dosežemo z (lesenimi) potaknjenci in/ali z ukoreninjenimi listnatimi rastlinami (dober primer so sadike z zemljo). Smiselno je vstavljanje rastlin med gradnjo suhozida, toda obstaja tveganje poškodb zaradi težkega kamena. Potaknjence in rastline lahko tudi vstavimo v z zemljo polne vmesne prostore.

3.5.3.2 Betonski zid

Glede na vrsto konstrukcije je možen prehod od betonskega zidu le navzdol proti šibkejšim konstrukcijam od armiranega betona. Polaganje armature ($8 \text{ mm} \leq d_s \leq 14 \text{ mm}$) pomaga pri omejevanju razpok in nateznih napetosti, katere povzroči zemeljski tlak ali pogrezanje. Za preprečevanje lomljenja kamena v zidu, obstaja zaščitna možnost, da se približno en meter ojačajo koti (armaturo/kovino/pločevino). V zid z betonskimi krili se vgradijo odvodne odprtine (precednice) za dreniranje vode iz zaledja.

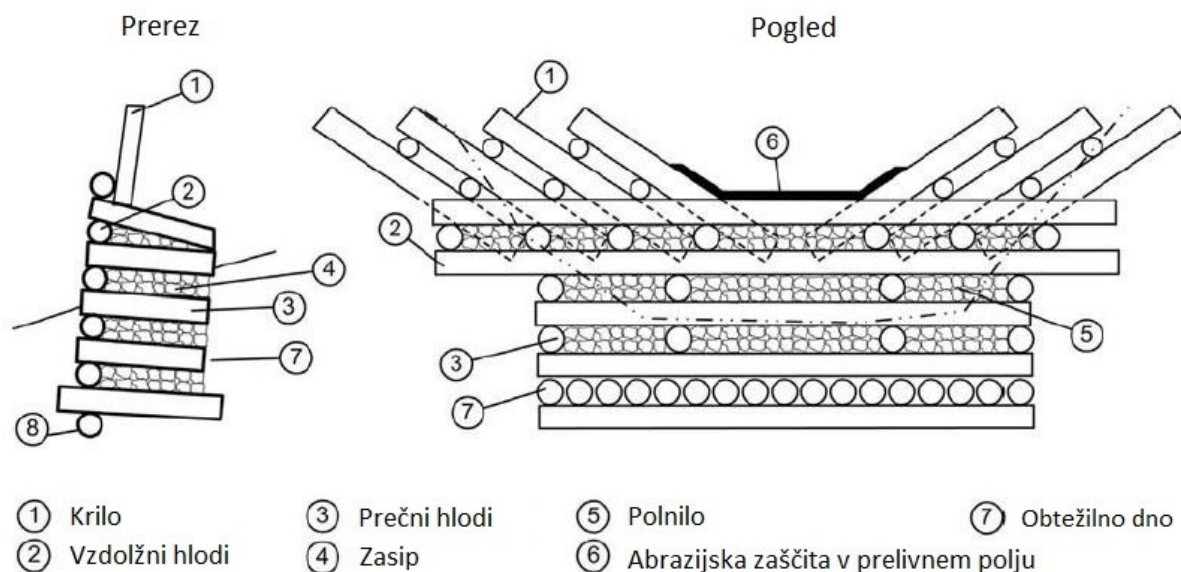
3.5.4 Lesene kašne pregrade

Razlikujemo lahko med enostensko in dvostensko oz. večstensko konstrukcijo [6]. Dvostensko ali več stensko konstrukcijo imenujemo tudi Krainerjeva stena (kašna konstrukcija iz lesa in kamena). Ta lesena kašna konstrukcija je prostorska mrežna konstrukcija iz lesa, polnjena s kamenjem, grobim drobljencem ali izkopanim materialom. Za uporabo lokalnega materiala za izdelavo lesene kašte imamo razvite različne, nekoliko drugačne metode načrtovanja. Preprečiti je potrebno izpiranje polnila lesene kašte, zlasti pri zaplavnih pregradah, ki imajo obtežilno dno iz tesno položenih okroglih hlodov, položen na utrjena tla.

3.5.4.1 Enostenske kašne pregrade

Enostenske konstrukcije, za stabilizacijo dna struge, sestavljajo vzdolžni hlodi sidrani (zabiti) v zemljo s prečnimi hlodi (kleščami).

Če obstaja možnost, se na zračni strani enostenske lesene kašne pregrade v tla zabijejo piloti. Ti piloti delujejo na pregradna krila kot podpora in poleg tega prenašajo del obtežbe v tla. Vzdolžni hlodi morajo biti v pobočje vpeti vsaj en meter. Pregrada ne sme biti nagnjena strmeje kot pod naklonom 10:1 [6], saj mora biti zračna stran stalno navlažena. Največja višina pregrade pri enostenski kašni pregradi ne sme presegati dveh metrov, pod optimalnimi pogoji treh metrov. V bistvu se enostenska lesena pregrada izvede kot dvostenska, samo brez zadnje stene.

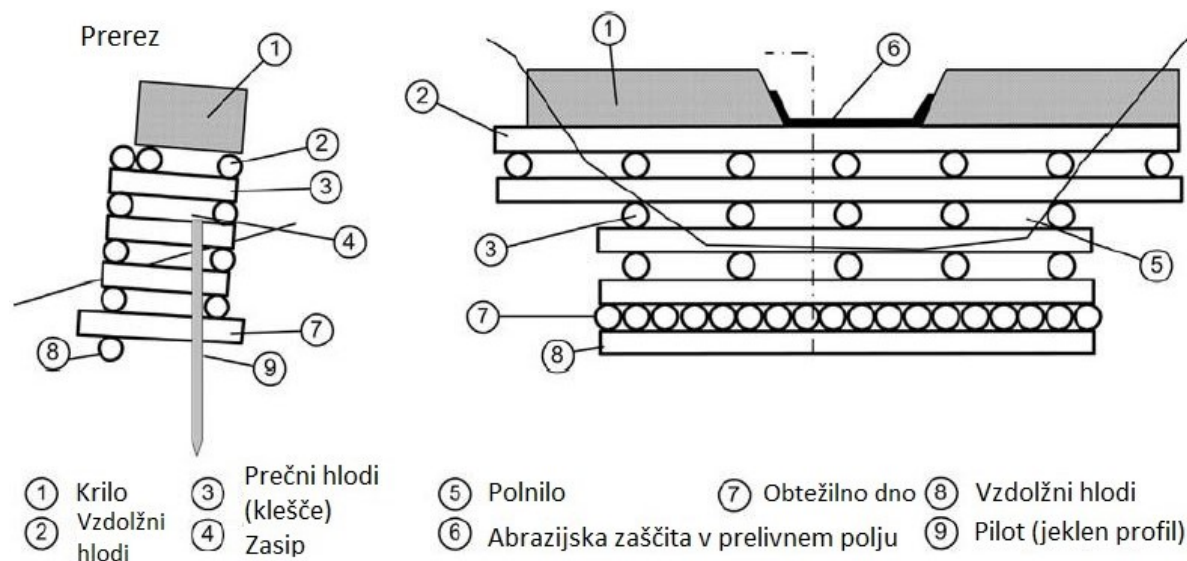


Slika 15: Enostenska lesena kašna pregrada (prirejeno po [3])

3.5.4.2 Dvostenske kašne pregrade

Lesene kašte prvotno nosijo obremenitev kot težnostni zid. Če vzdolžni hlodi niso dobro potisnjeni in vpeti v pobočje, lahko leseno kašto nosijo tudi prečne podpore [7]. Dvostenska lesena kašta je iz dveh vrst vzporedno razporejenih vzdolžnih hlodov, kateri so med seboj povezani s prečnimi hlodi (škarjami). Prečni hlodi, ki štrlijo iz pregradnega objekta, se lahko uporabijo kot dodatno zaledno sidrišče [6]. Če v zaplavnem prostoru pričakujemo pogrezanje, taka rešitev ne pride v poštev. Vzdolžni in prečni hlodi so na vozliščih povezani z žebli iz ojačanega jekla ali kovanega železa.

Pregrado je potrebno graditi na ravno podlago [7]. Pregradni objekt naj se zaradi robustnosti postavi na trdna tla. Spodnji vzdolžni hodi, na zračni strani, ležijo na trdnih tleh. Za dodatno povečanje varnosti proti zdrsru se lahko na vodno stran v tla zabije pilote iz jeklenih profilov (slika 16).



Slika 16: Dvostenska kašna pregrada (po [6])

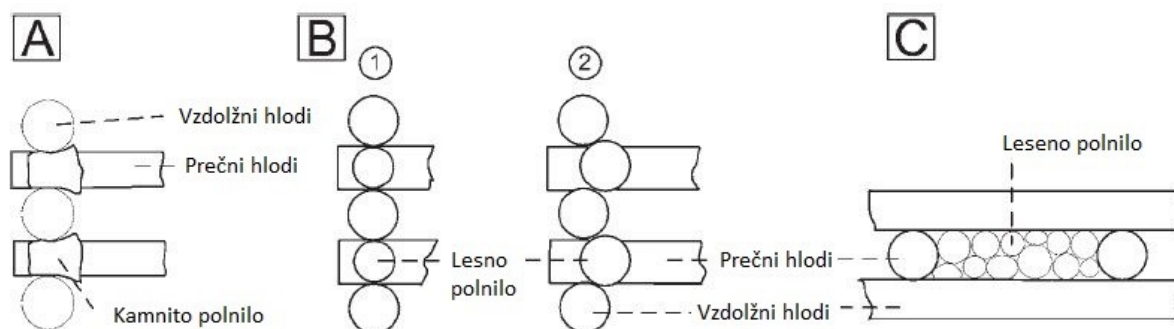
Ker so vzdolžni hlodi samo v tem območju zelo močno napeti, je potrebno sistem dobro povezati. To lahko dosežemo s pomočjo neprekinjenih vijakov oz. navojnih palic z maticami na obeh straneh ali kovanimi jeklenimi sponami ali žebli [6].

Prazne lesene kašte imajo zelo nizko togost, ker vozlišča statično gledano predstavljajo členke. Zahtevano togost dosežemo tako, da sistem zasipamo s grobim kamenjem, katero mora biti po robovih pravilno zloženo. Kamenje lahko uporabimo le iz hudourniške struge, če smo omejeni z odstranjevanjem iz zaplavnega prostora. Gre za fin material rinjenih plavin, ki potrebuje veliko časa, da zapolni leseno kašno pregrado. V tem primeru se položiti geotekstilno prevleko na gorvodno stran pregrade ali zasipa leseno kašo s finim materialom. V tem primeru je potrebno z lesom dodatno utrditi togost in z enakim sistemom zgraditi tudi krila pregrade [6]. Pri uporabi geotekstila v praksi občasno pride do problema pronicanja, saj se tkanina zamaši z drobnimi delci.

S skrbnim postopkom izgradnje lahko postavimo do 4 m visoke lesene kašte, ob posebno dobrimi pogoji lahko tudi 5 m. Naklon dvostenske konstrukcije bi moral biti primeren enostenskim. Pri zelo visokih pregradah velja meja naklona do 7:1 [6].

Močno obremenjene dele pregrade se enostavno zamenja, na kritičnih mestih pa je bolje uporabljati tradicionalne žeblje [6]. Razpadanju lesa ob žeblju, zaradi prevrtanja, se je potrebno izogniti, življenjska doba lesene konstrukcije je v bistvu odvisna od kvalitete vsakega stika in povezave. Na območju trkov v vzdolžne hlode se te podvoji in uredi levo in desno med prečne hlode. V hudourniških ureditvah naj bodo prečni hlodi položeni eden na drugega, tako je lahko lesena prelivna sekcija na ven odprta [6].

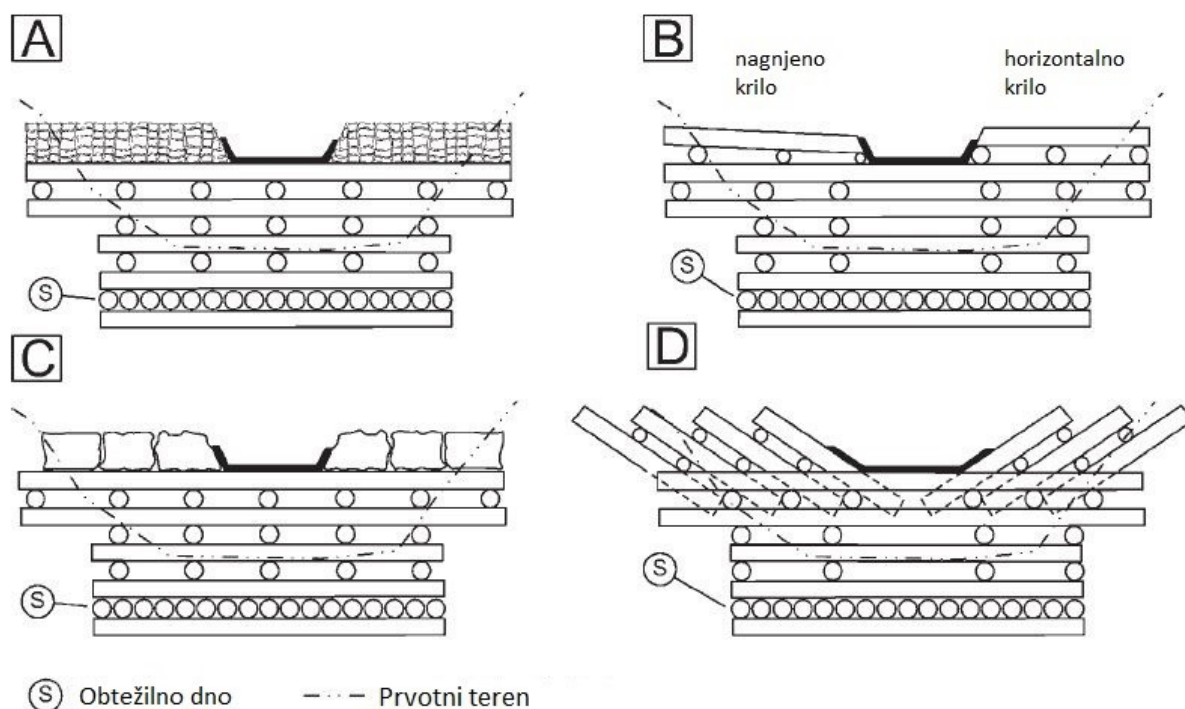
Polnilo dvostenske lesene kašne pregrade je lahko leseno ali kamnito (slika 17 A). Prednost kamnitega polnila je v višji togosti in daljši življenjski dobi. Pomanjkanje primernega kamnja v praksi pogosto vodi do izbire druge vrste polnila. V primeru, da se kašte zasipajo s finim izkopanim materialom, je potrebno pričakovati izpiranje [7].



Slika 17: Polnila za lesene kašte: (A) kamnito polnilo; (B) dve različici za polnjenje (vzdolžno) z lesom; (C) polnjenje z lesom vzdolž prečnih hlodov (po [6])

Kamenje v polnilu mora ležati tako, da ne pade ven. Prvi sloj ne sme biti iz ploščatega kamnja, ampak iz kamnja, ki se lahko zagozdi v odprtinah. Razlogi za to so horizontalni tlaki v kaštah in možnost izpiranja. V idealnem primeru lahko gradimo neprekinjeno steno iz suhega kamnja [7].

Nosilno leseno prednjo stran z vzporednimi vzdolžnimi hlodi lahko razdelimo na dve različni varianti. V prvi varianti so hlodi z enakimi premeri, kot je velikost odprtin (slika 17 B1). Ti vmesni hlodi so pribiti na vzdolžne hlode. Druga različica uporablja les z večjim premerom kot je velikost odprtin, zato so postavljeni za vzdolžne hlode (slika 17 B2). V tem primeru je obremenitev žebeljev manjša, kljub temu pa se lahko les premika in naknadno pogreza.



Slika 18: Različne izvedbe pregradnih kril: (A) krila iz žičnatih košar polnjenimi s kamenjem (gabioni); (B) poševna in vodoravna lesena krila; (C) krila iz skalnih blokov; (D) krila z vstavljenimi hlodi (prirejeno po [3])

Leseno polnilo leži na sprednjem in zadnjem vzdolžnem hlodu, vzporedno s prečnimi hlodi (slika 17 C). Pri tem je rezultat nekoliko manjša specifična (prostorninska) teža pregrade. Ta okoliščina lahko slabo koristi objektu. V pogledu je med polnilom in prečnimi hlodi težko razlikovati. Vendar je treba vedno paziti, da so vozlišča vzdolžnih in prečnih hlodov v okvirju tehnično brezhibno oblikovana [7]. Pomanjkljivost te zasnove je kratka življenjska doba pregrade, še posebej na mestih, kjer se spreminja suho vlažno.

Pregradna krila lahko izvedemo na več različnih načinov. Postopek gradnje z gabioni (žičnatimi košarami) se kljub daljši življenjski dobi in večji stabilnosti v praksi ne izvaja pogosto (slika 18 A). Konstrukcija krila iz lesa je podobna telesu pregrade [7]. Potrebno je biti previden, saj se zaradi menjave suho vlažno življenjska doba pregradnega krila močno zmanjša. Lesena krila se izvede z vodoravnimi ali proti prelivni sekciji nagnjenimi vzdolžnimi hlodi (slika 18 B). Večjo odpornost proti strigu ponujajo krila z vstavljenimi hlodi (slika 18 D). Pri tem, kot je prikazano na sliki 18 D, oblice vstavimo med vzdolžne in prečne hlode. Slika 18 C prikazuje krila iz razvrščenih skalnih blokov, kot zgodovinski način gradnje.

Prelivne sekcije lesenih pregrad z vstavljenimi krili se v glavnem izvedejo s trapezno obliko profila, v primeru velike obremenitve s prodonosnostjo je potrebna zaščita krone (npr. zaliti zgornje kamnito polnilo s cementno malto, podlaga iz oblic, armirano-betonska krona, zaščita iz jeklene pločevine).

3.5.4.3 Trostenske kaštne pregrade

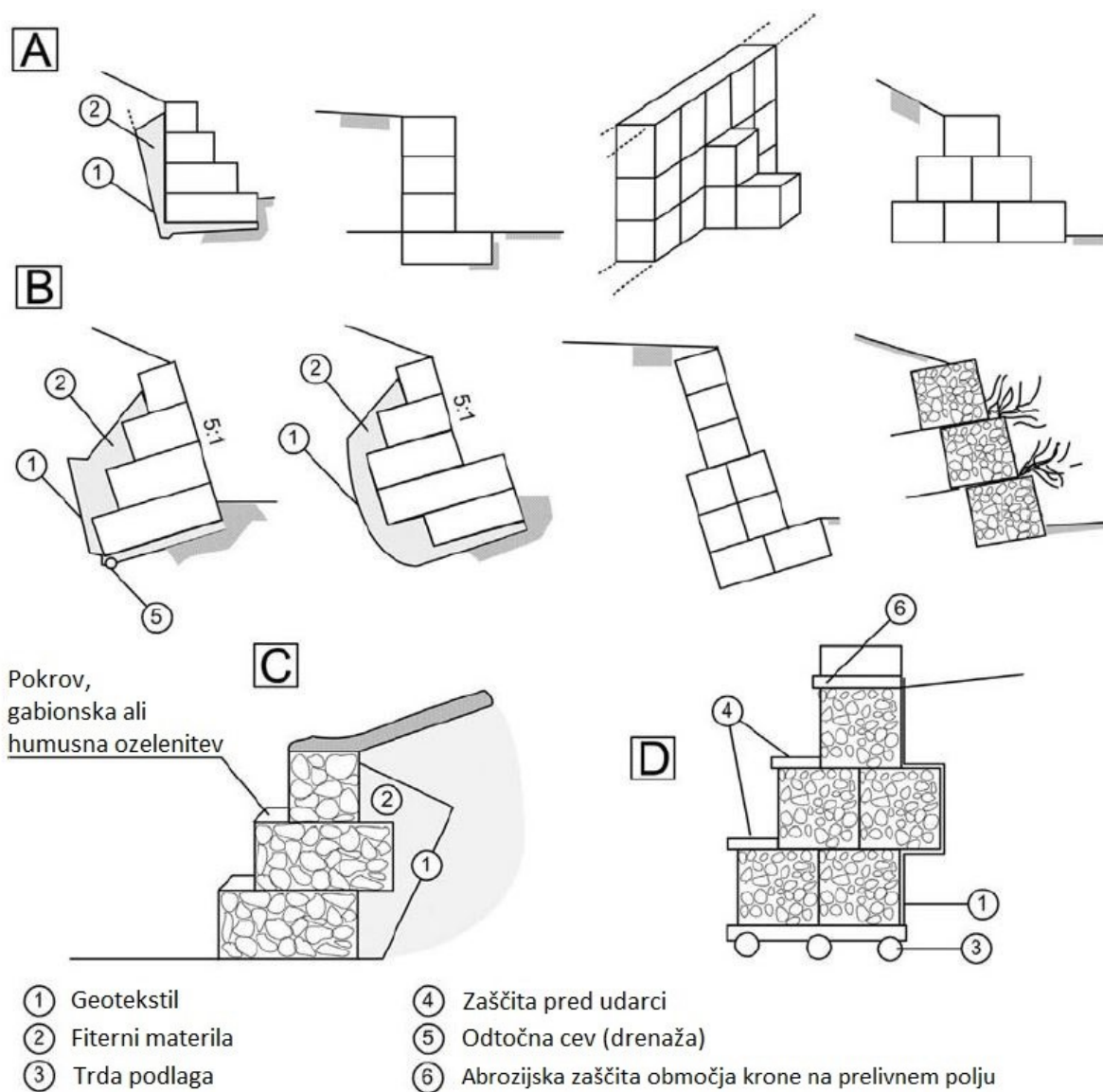
Včasih so v hudournikih gradili zelo velike trostenske pregrade. Velike trostenske sisteme danes redko uporabljamo. Lahko so visoke tudi do 15 m. Te pregrade so večinoma v spodnjem delu grajene tro- in v zgornjem delu dvostensko.

3.5.5 Žičnate (gabionske) pregrade

Žičnate gabionske pregrade so prizmatično razporejene eno na drugo naložene žičnate košare, polnjene s kamenjem [58]. Slika 19 prikazuje različne načine postavljanja košar. Gabioni so lahko sestavljeni iz pocinkanega žičnega pletenja ali iz žične mreže. Priporočeno je uporaba podajno (fleksibilno) žičnatega pletenja pred varjeno s toga žično mrežo [6]. Gabioni se bolj uporabljajo v brežinah kot v hudourniških objektih. Gabioni, kot hudourniški objekti, so lahko v uporabi ob nizkih prodonosnosti in finih plavinah [6]. Ob ugodnih pogojih imajo žičnate košare zelo visoko življenjsko dobo (npr. v Italiji obstajajo pregrade starejše od 100 let).

Bistvena prednost gabionskih objektov je, da se pregrado lahko kadarkoli zveča ali zmanjša, enostavno lahko dodamo ali odvzamemo vrsto mrežnih košar [1]. Ker gabioni predstavljajo vodo prepustne objekte, moramo pobočja sestavljati v veliki meri vodotesni materiali. Odpornost proti drobirskim tokovom, v kolikor ni grobozrnate sestave, deluje. Če je sestava relativno velika, je bistvenega pomena vrsta prevleke (pokrova) krone. Ob podlagi iz oblic, pri normalni prodonosnosti, lahko pričakujemo življenjsko dobo od sedem do deset let. Prevleka iz jeklene pločevine in prelivna sekcija iz armiranega betona je v nasprotju veliko bolj odporna.

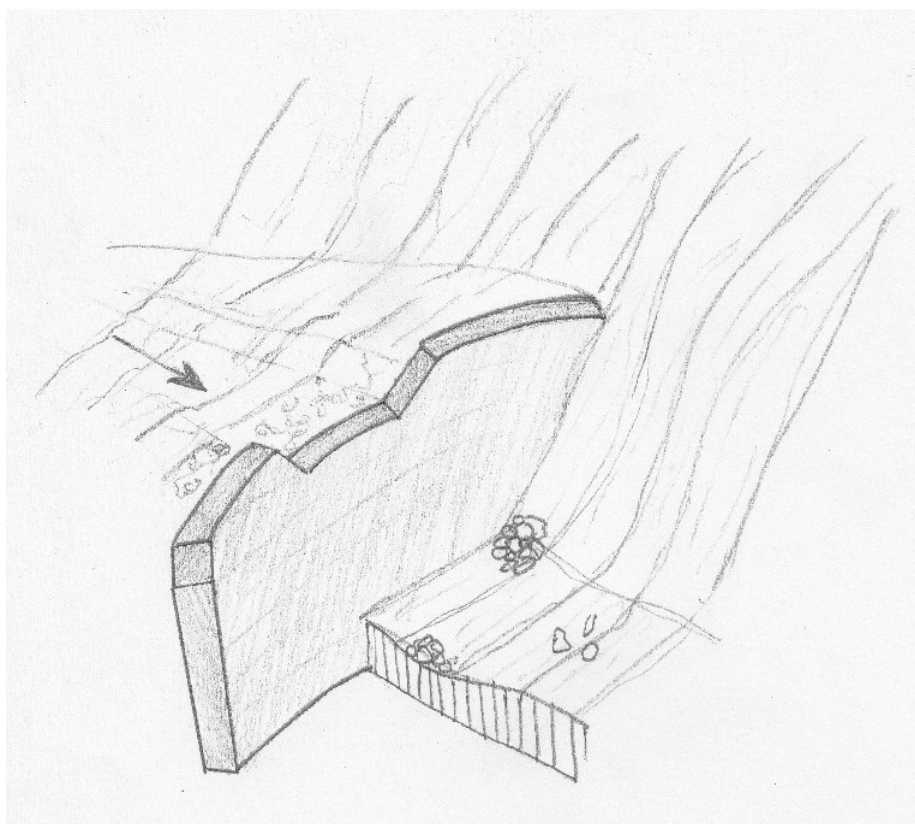
Posebna pozornost je na kvaliteti polnila žičnatih košar. V hudourniških objektih je uporabno polnilo iz grobo-lomljenega materiala (kamenja). Sprednji in zadnji del žičnate košare opravlja podobno vlogo kot pri suhozidu [6].



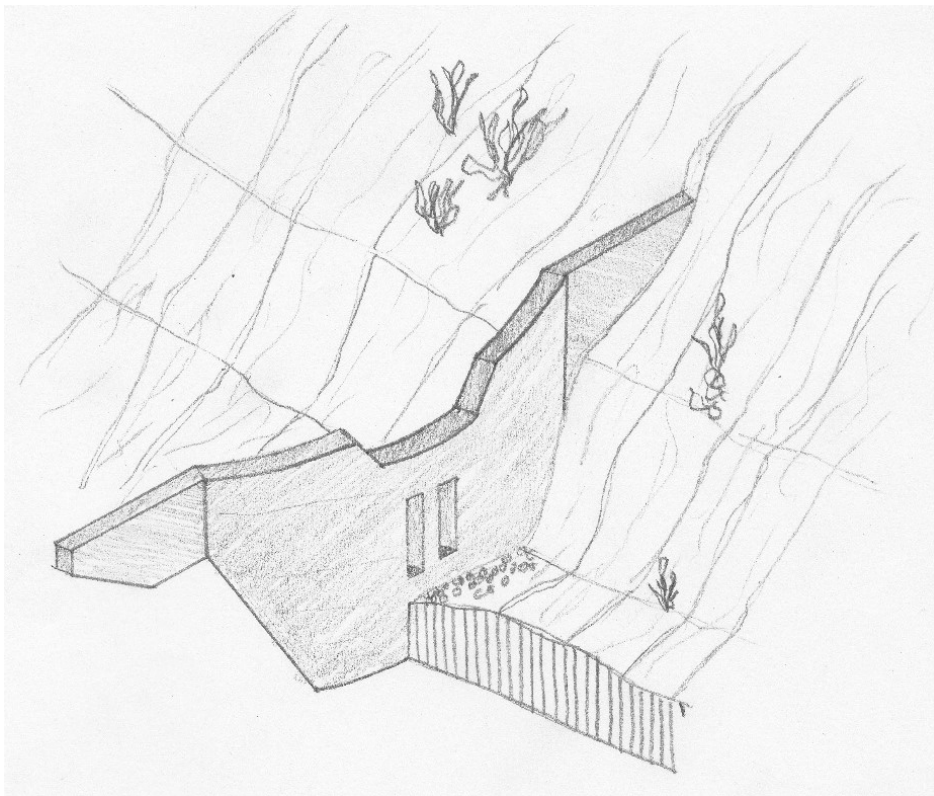
Slika 19: Žičnate košare (gabioni): (A) različice z ravnimi pokončnimi površinami; (B) različice z nagnjenimi površinami; (C) primer prereza varnostnega zidu; (D) primer prereza pregrade (prirejeno po [3])

3.6 Ločne pregrade

Ločne pregrade se tlorisno pojavljajo v obliki loka z gorvodno usmerjenim vozliščem (sliki 20 in 21). Kot hudourniški objekti se ločne pregrade na vodni strani gradijo večinoma navpično in na zračni strani kot težnostne pregrade. Med ravno težnostno in ločno pregrado obstaja prehodna konstrukcija, ukrivljena težnostna pregrada (ločna težnostna pregrada). Vendar pa je prenos obremenitve pri ukrivljenih težnostnih pregradah, vertikalni, v območje dna struge. Odpor proti prevrnitvi je dosežen izključno z geometrijo in nosilnostjo telesa pregrade. Pri ločni pregradi del horizontalne obremenitve (vode in zemlje) prevzameta pobočji doline (ločni učinek), medtem ko se ostala obremenitev prenese v dno struge (učinek konzolnega nosilca). Po Leys-u [37] ločna pregrada tako statično ustreza oboku z ukrivljeno zidno osjo, ki se na stiku prosto vpenja v teren. Prednostna lokacija je torej kanjon ali skalnat (ozek) profil.

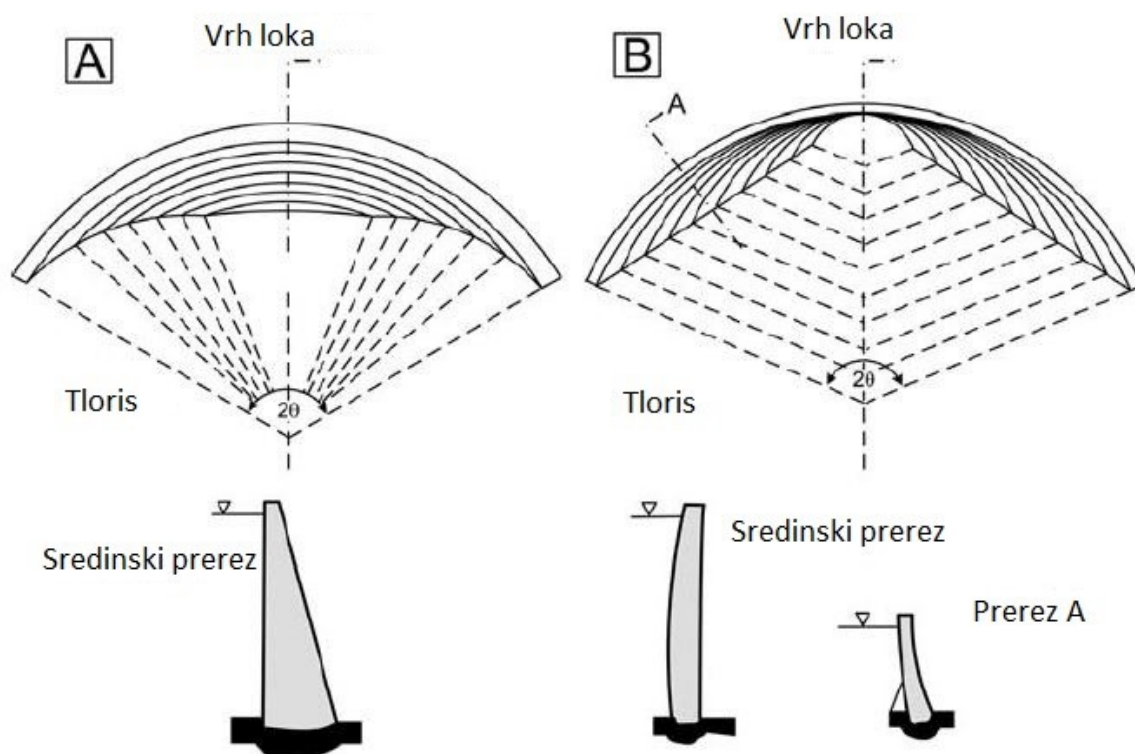


Slika 20: Enostavna zadrževalna ločna pregrada (povzeto po Suda, 2007)



Slika 21: Ločna (dozirna) pregrada s krili in odprtinami (pogled dolvodno) (povzeto po Suda, 2007)

Glede na obliko ločnih pregrad ločimo, cilindrične, enakokotne in proste zidne oblike. Značilnost cilindrične oblike je približno enaka ukrivljenost radijev po celotni višini pregrade. Odpiralni kot je navzdol po pregradi manjši. Po *Drobir-u* [14] lahko v zelo ozkih dolinah s skoraj navpičnimi pobočji z dobrim približkom sprejmemo, da se tlak vode prenaša čez ločni učinek, horizontalno na pobočja. Pregrada z enakokotno obliko je konstruirana iz vidika, da ostane začetna tangenta z višinskimi črtami (izohipse) doline v vseh slojih približno enaka. Prerez na sredini tipične enakokotne oblike, kot dolinske pregrade, je približno navpičen (slika 22 B). Če je radij ukrivljenosti proti podlagi manjši, nastane v ločnem vozlišču trapezna oblika prečnega prereza podobno, kot je prikazano na sliki 22 A.



Slika 22: Osnovne oblike ločnih pregrad: (A) valjasta; (B) ravnotežna (prirejeno po [3])

Prednost, ki jo Lays [37] daje ločnim pregradam je, da se pregrada zaradi primarnega tlaka obremenitve večinoma lahko izvede iz nearmiranega betona. Ločna pregrada je proti preobremenitvi robustnejša kot ploščata nosilna konstrukcija. S tanjšimi prečnimi prerezi pregrade, pri normalni uporabi komponent, pride v primerjavi z upogibanjem komponent do varčevanja z materialom. Pri nosilnih skalah v pobočju je ločna pregrada ugodnejša gradbena oblika. Možno je tudi oblikovanje nesimetrične pregrade, ko leži prelivna sekcija zunaj sredine pregrade. Pasche [46] kot drugo prednost omenja elastično in monolitno obnašanje objekta, zaradi nižje lastne teže in statične učinkovitosti kompozita. Zaradi teh značilnosti ločnih pregrad je gradnja primerna tudi na potresnih območjih.

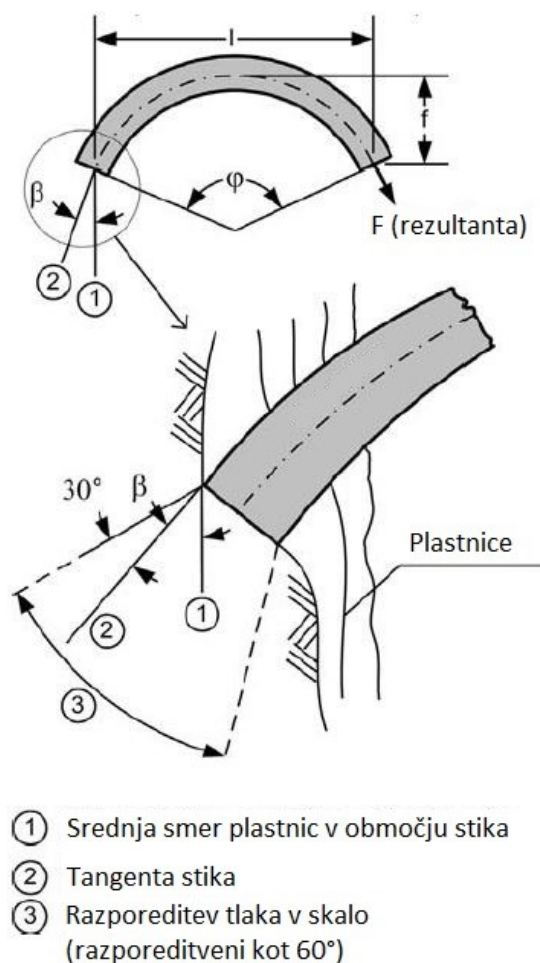
Kot slabost navajajo predvsem težavnost in stroškovno intenzivno gradnjo v primerjavi z ravnimi gradbenimi konstrukcijami [37]. V primeru, da so pobočja slabo nosilna, da v mokrem prožijo plazovi in je kamnina slabo sprijeta, je lahko težava tlak v stiku. Pri nizki nosilnosti tal razporejena stična razširitev zahteva veliko betona in se varčevanje s količino betona lahko kompenzira zaradi tanjših prereзов.

Za izračun ločnih pregrad je zelo pomembno razmerje togosti tal (skale) in pregrade. Če imamo opornike manj toge, nastopi nosilno obnašanje loka kot pri ploščah. Od razmerja širine razpona in stika (slika 23) lahko po spodnjih enačbah določimo ločni nosilni učinek. Po Lays-u [37] je najbolj ugodno razmerje širine razpona in stika glede za horizontalni tlak med 3,5 in 4.

$$l/f \leq 3 \text{ za nearmirane pregrade}$$

$$l/f \leq 7 - 10 \text{ za armirano-betonske pregrade}$$

Po Lays-u je tehnično in gospodarsko načelo gradnje ločnih pregrad iskanje najugodnejšega ločnega učinka za čim manj porabljenega gradbenega materiala.



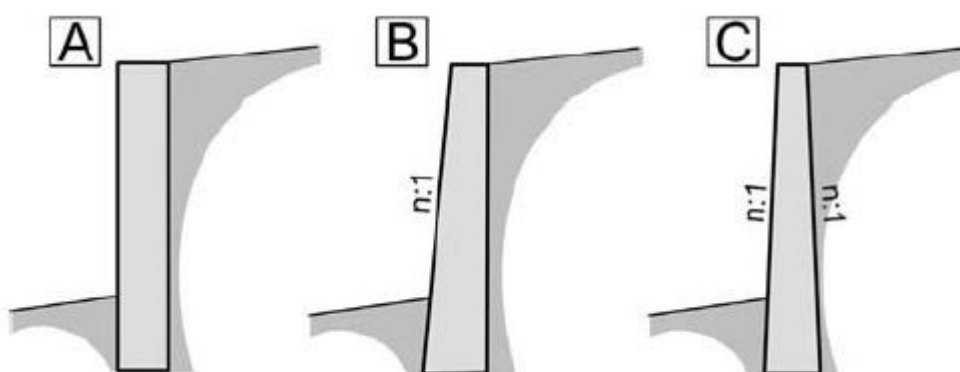
Slika 23: Območje stika: kot med okoliško skalo in tangento stika (prirejeno po [3])

Za doseg ugodnega ločnega učinka in majhnih dimenzij prečnih prereзов, moramo optimalno izkoristiti tlačno trdnost gradbenih materialov (kamen, beton), kot tudi načrtovati majhen radij ukrivljenosti in velik odpiralni kot. Večja je debelina pregrade, manjša je elastičnost telesa pregrade in povzroči povečanje upogibnega momenta. Za to so optimalne ločne pregrade z možnostjo manjše debeline zidu. S čimer pride predvsem do ločnega prenosa obremenitve na normalne sile. Pri oblikovanju ločne pregrade si moramo prizadevati za ustrezno razmerje odpiralnega kota in čim manjši radij ukrivljenosti. Načrtovanje je pogojeno s prečnim prereзом doline oz. obliko doline, radiji se manjšajo proti dnu doline, pri enakokotni obliki pregrade pa se manjša še obseg betona na zračni strani. To omogoča pojavljanje nateznih napetosti na vodni strani. S premikanjem srednje točke ločne lamele v spodnjem delu jezusa proti pregradi, se lahko tej pomanjkljivosti izognemo. S čimer ustvarimo dvojno ukrivljenost pregradnega telesa.

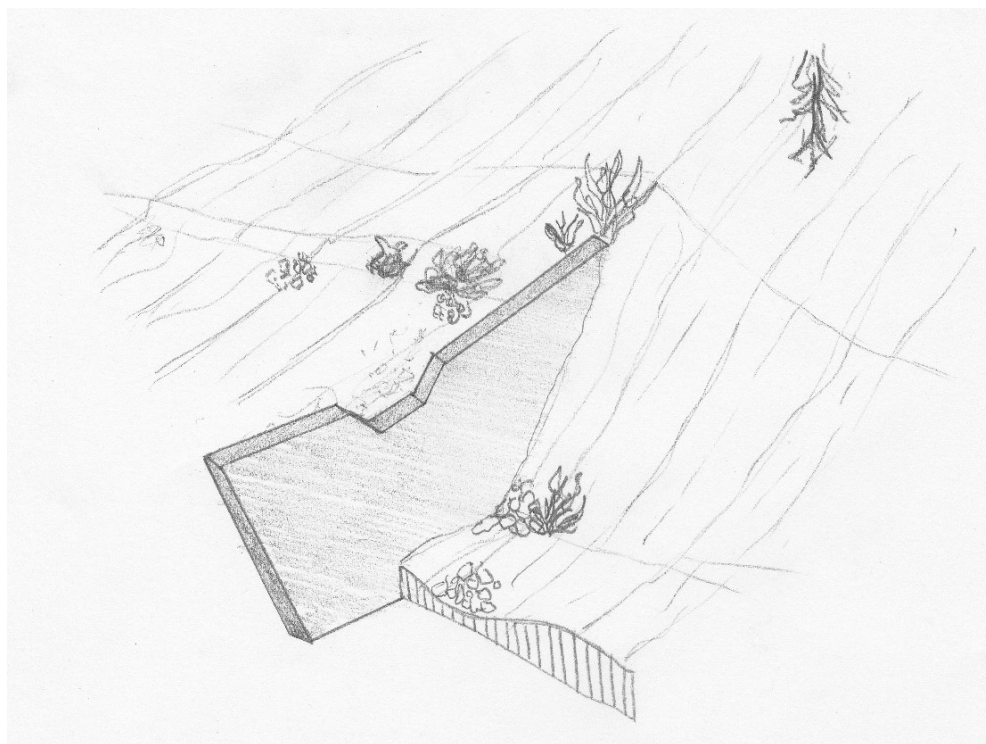
Običajno imajo ločne pregrade krožni tloris (segmentni lok). V praksi je odpiralni kot φ med 60° in 135° . Hampel [18] in Jörgensen [29] predlagata najbolj ekonomičen odpiralni kot enakokotne oblike pregrade (φ) 133° . Pri temu kotu dobimo največje prihranke materiala. Paziti moramo, ker središčni kot vseh ločnih lamel zahteva, da kot med tangento stika in dolvodno linijo kamnitega pobočja (β) ni ostrejši od 40° , v drugih telesih pregrade pa naj se ne zmanjša pod 30° (slika 23). Če oblika dolin ne omogoča minimalnega kota β , morajo biti oporniki primerno postavljeni na skale. Zaradi velikega odpiralnega kota (φ) se ustvarja večji ločni tlak v vzdolžni smeri doline, pri čemer se izogibamo prečni deformaciji pobočja. Manjši kot je polmer, večja je ukrivljenost in odpiralni kot, manjši delež prenese konzolni učinek in večji ločni učinek.

3.7 Netežnostne pregrade

Netežnostne pregrade se lahko uporablja samo kot prečni objekt. Kot hudourniške pregrade, so v veliko primerih zgrajene na težko dostopnih območjih, pri gradnji pa je za varčevanje nepogrešljiva uporaba primernih materialov. Netežnostne pregrade so zasnovane iz armirano-betonskega sistema konstrukcijskih elementov. Gre za raven nosilni sistem. Take pregrade imajo referenčne dimenzije dolžine in višine ter relativno majhen prečni prerez (slika 25). Prenos obremenitve namesto ukrivljenja poteka na boke doline. Območje uporabljanja je predvsem omejeno s stabilnim pobočji dolin. Ker so netežnostne pregrade samo brez odprtin v telesu pregrade, je njihova uporaba vprašljiva. Za razliko od stebrih netežnostnih pregrad in kotnih podpornih zidov nimajo nobenih ojačitvenih reber (podpornih stebrov) in so brez razširjenih temeljev. Prečni prerez zidu je konstanten ali navzdol širjen (slika 24).



Slika 24: Možni prerezi netežnostnih pregrad: (A) s konstantno debelino; (B) z enostranskim naklonom; (C) z obojestranskim naklonom (prirejeno po [3])

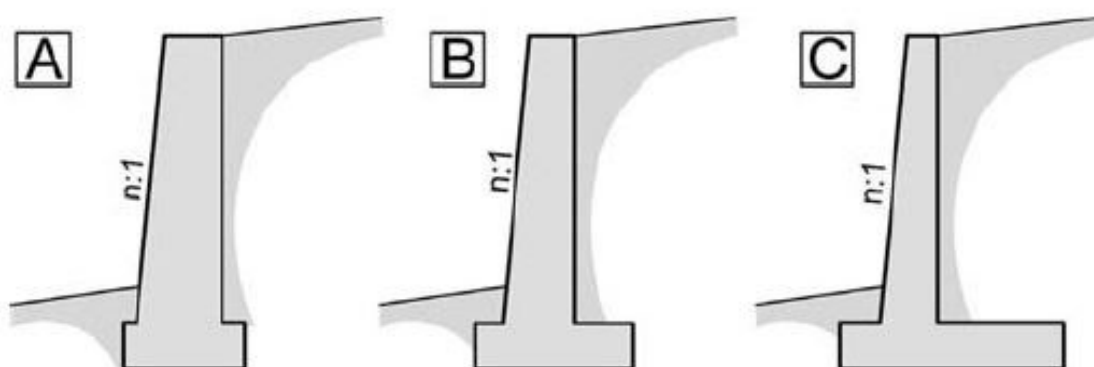


Slika 25: Enostavna netežnostna pregrada (brez odprtin) (povzeto po Suda, 2007)

Obremenitev na pregrado, ki delujejo pravokotno na srednjo ravnino (zemeljski tlak, tlak vode in tlak plavin), razbremenjuje učinek plošče, medtem ko je vzrok za stebrni učinek v sredini ravnine, delovanje vertikalne obremenitve (lastne teža, obremenitev na kroni pregrade). Za konstrukcijske namene je po Czerny-ju [9] dovoljeno pojavljanje stebrnega učinka, relativno nizko napetost (v vzdolžni smeri) zanemarimo in zato merimo pojavljanje učinka napetosti plošče (po širini in višini pregrade). Stebrni učinek upoštevamo, ko je pregrada v sredinskem delu spodjedena in je pregrada izključno podprta v pobočjih doline, ali če je pregrada močno stransko izpostavljena pobočnim tlakom.

3.8 Hibridne pregrade

Ta oblika preseka pregrade je v literaturi imenovana tudi kot "poltežnostni zid". V konceptu za zagotavljanje prenosa obtežbe v tla predstavlja vmesno obliko med težnostno pregrado, stranskim (kotnim) podpornim zidom in enostavno netežnostno pregrado. Zato zadostujejo značilnosti prečnega prereza od velikega prereza z majhno projekcijo temelja do vitkejšega prereza z dolgo horizontalno peto (slika 26). Težnostne pregrade, kotne podporne pregrade in ravne nosilne sisteme lahko med seboj ločimo samo na podlagi preiščljenih metod. Pri težnostnih pregradah in kotnih podpornih zidovih se obtežba prenaša v tla izključno preko spodnje ploskve, brez ali s horizontalne peto. Pregrade z ravno ploščo prenašajo velik del vodoravnega delovanja v pobočja. Hibridne pregrade se običajno izvedejo iz armiranega betona.



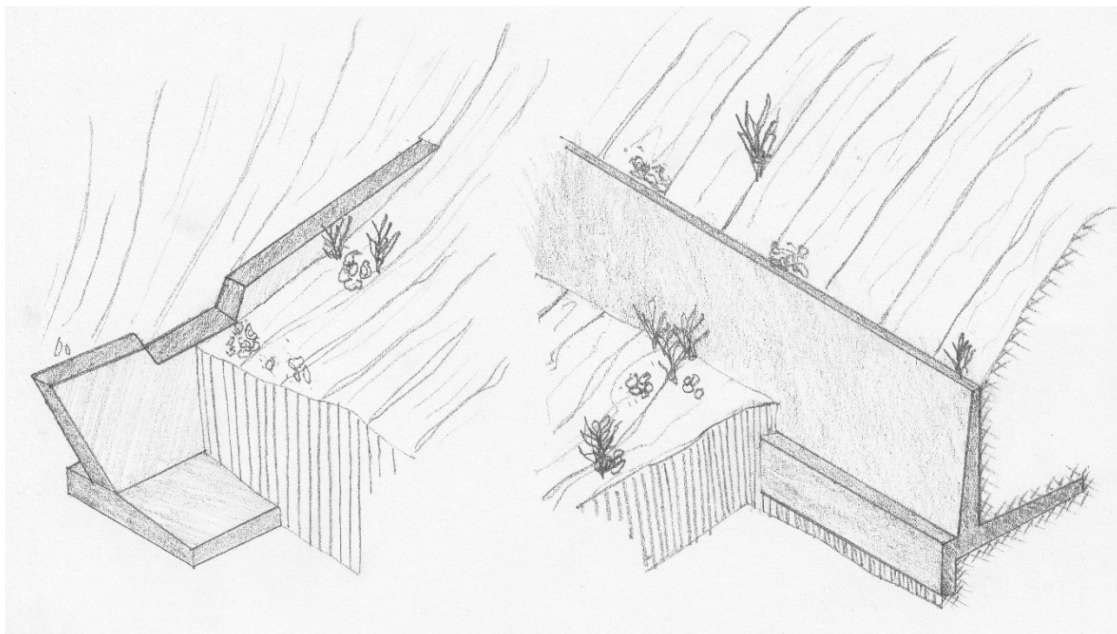
Slika 26: Tipični prerezi hibridnih pregrad: (A) z zelo kratko horizontalno peto; (B) s srednje dolgo horizontalno peto (C) z zelo dolgo horizontalno peto (prirejeno po [3])

Oblika hibridne pregrade je v bistvu odvisna od tega kako visoko deluje ugodni učinek (odpornost) pobočij dolin in nosilnost nasipa (na horizontalni peti). V literaturi je mogoče najti empirično določene krivulje za določitev odpornosti pobočij dolin. Ta odpornost je odvisna od vpetosti in srednje višine navpičnice pregradnega telesa.

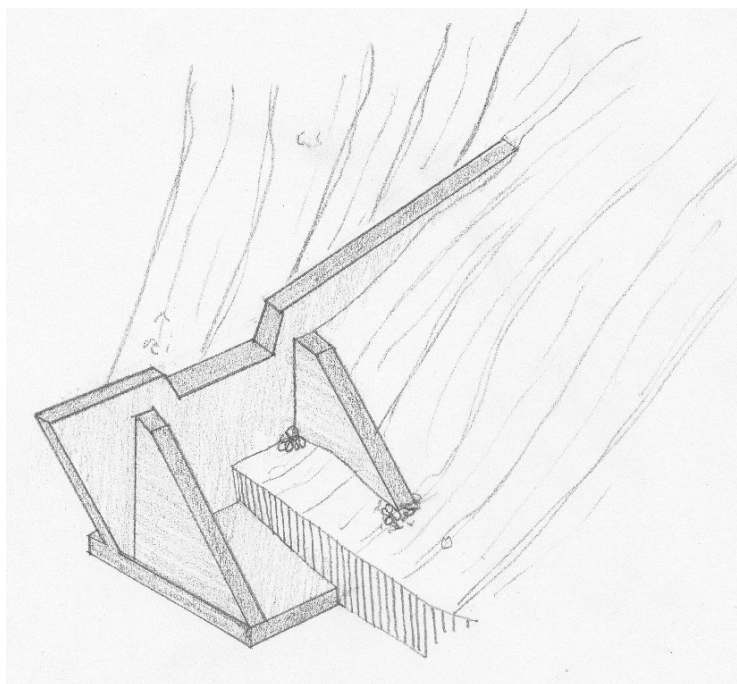
Oblikovanje hibridnih pregrad z zelo kratko horizontalno peto je po analogiji kot težnostna pregrada, tista z daljšo horizontalno peto pa je po analogiji podobna kotnem podpornem zidu. Ob dokazih za notranjo stabilnost je potrebno usmeriti pozornost na bremena, ki nosijo odpornost, v pregradnih pobočjih, dvoosno. Zaustavitvena pregradna plošča je tako dimenzionirana in ojačana na dvoosno napetost.

3.9 Kotni podporni zid

Kotni podporni zidovi se lahko uporabljajo kot pregradni (prečni) objekti in kot obrežni zidovi (vzdolžni objekt) (slike 27, 28 in 29). Kotni podporni zid je sestavljen iz plošče in opornih stebrov. Kotni podporni zidovi so vitkejše kot težnostne pregrade in imajo povečano natezno (gorvodno) peto. Pri preučevanju notranje stabilnosti se primarno uporabljajo na ukrivljenih in zato ojačanih delih, saj se okoli pojavljajo natezne napetosti. Prečni prerez je sestavljen iz stoječega in ležečega dela (peto) (L-profil).

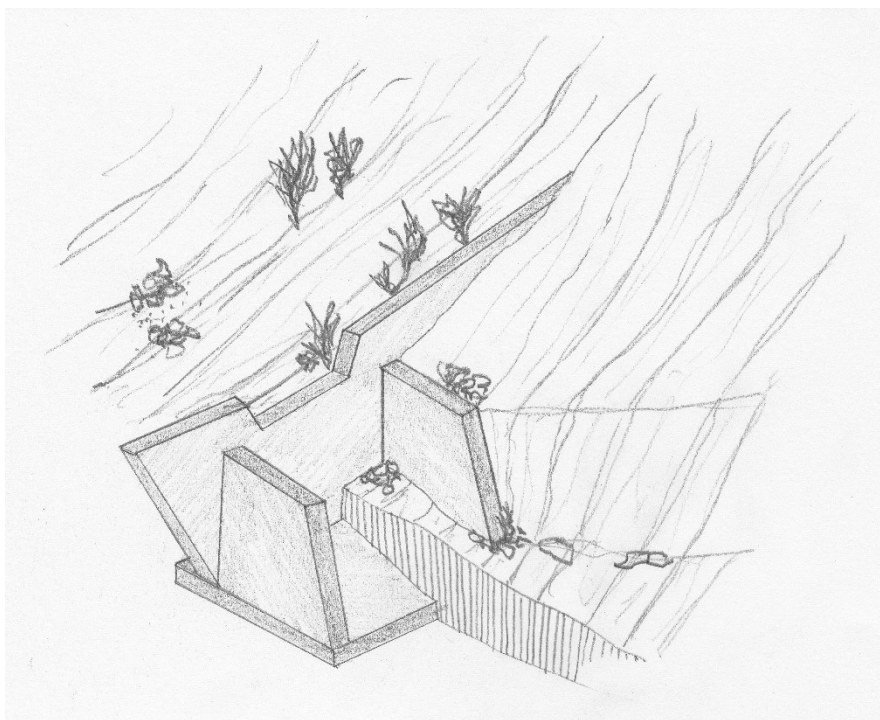


Slika 27: Kotna podporna pregrada brez prečnih reber (zaplavna pregrada) in z varovanjem pred spodjedanjem (obrežni zid) (povzeto po Suda, 2007)

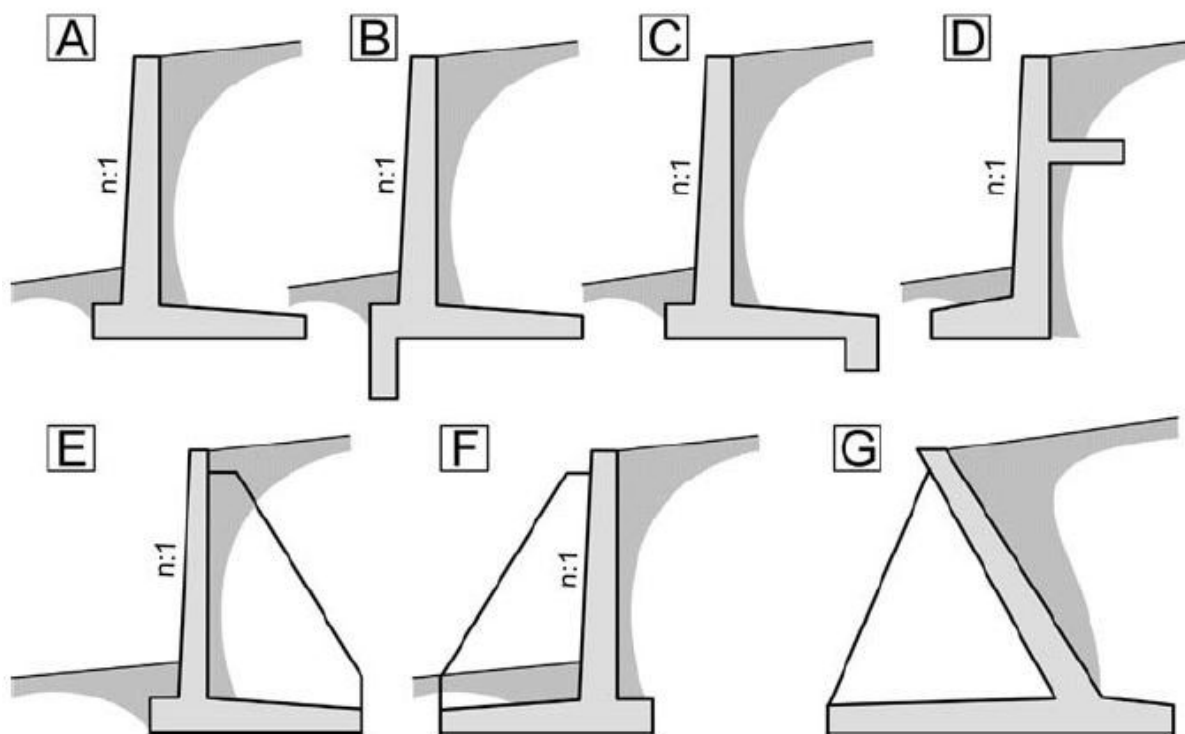


Slika 28: Kotna podporna pregrada s stebri na vodni strani (povzeto po Suda, 2007)

Telo zida je obremenjeno z vodnim in zemeljskim tlakom, medtem ko vodoravna peta nosi obremenitev z zasipom ali vodo. Zaradi večinoma velikih območij obremenitev je še posebej pomembna na manj nosilnih podlagah. Lastna obremenitev teh armirano-betonskih konstrukcij je v primerjavi s težnostnimi pregradami nizka, vendar se zaradi zasipa poveča. Značilnost kotnih podpornih zidov je, da rezultanta normalne napetosti v vseh prečnih prerezih pregrad oz. stranskih zidov, leži zunaj širine telesa pregrade. Po Czerny-ju [10] moramo izbrati velikost talne (horizontalne) plošče hudourniških pregrad tako, da tudi rezultanta skupne obremenitve pade v 1. tretjino širino jedra pregrade oziroma zidu.



Slika 29: Kotna podporna pregrada s prečnimi opornimi stebri na zračni strani (grajenimi kot stranska varovanja urejenega podslapja) (povzeto po Suda, 2007)



Slika 30: Oblike kotnih podpornih zidov: (A) brez prečnih opornih stebrov; (B) z varnostjo pred tolmunom (spodjedanjem temeljev); (C) s podaljškom (povečana varnost proti zdrsu); (D) s konzolo; (E) s prečnimi opornimi stebri na vodni strani; (F) s prečnimi opornimi stebri na zračni strani; (G) posebna oblika z opornimi stebri na zračni strani (prirejeno po [3])

Prednost teh objektov je, da se celotna obremenitev prenaša na spodnji stik z dnom struge in daje upor pobočju, ki ga je običajno težko oceniti. Pomanjkljivost gradnje kotnih podpornih zidov je nepraktičnost zaradi velike količine izkopanega materiala, za gradnjo horizontalne pete. Izkopan material je težko deponirati, saj v večini gradimo v ozkih nedostopnih hudourniških grapah.

Prečni prerezi kotnih podpornih zidov kot varovalnih objektov, so prikazani na sliki 30. Kotni podporni zidovi se lahko izvedejo z ali brez prečnih opornih stebrov. Pri kotnih podpornih zidovih brez prečnih opornih stebrov (slika 30 A-D) vplivajo navpične pregradne plošče kot konzolna stojala (konzolne plošče). Učinek konzolnega sistema ustreza površinskemu spiranju. V primeru, da pričakujemo velike globine erozijskega tolmana v podslapju obrežnih zidovih ali pregradnih objektih, lahko prečni prerez izvedemo z varnostjo pred spodjedanjem temeljev (slika 30 B). Kotni podporni zid s klinom oz. konzolo (slika 30 C) ima večjo varnost proti zdrsu. Poleg tega podaljša pronicanje in poviša varnost proti hidravličnemu lomu tal in izpiranju. Kotni podporni zid s peto na zračni strani (slika 30 D) je primeren za sanacijo pregrade, če je obstoječe telo pregrade nastavljeno samostoječe.

Kotni podporni zid s prečnimi rebri oz. opornimi stebri povzroča v navpični pregradni plošči, kot tudi v horizontalni talni plošči, zaradi odlaganja ob prečnih rebrih, neprekinjen sistem plošč z nadomestnimi nateznimi in tlačnimi območji v ploščah. Spreminjajoče vrste napetosti (natezna in tlačna območja) v ploščah, kot tudi v stebrih, je pri dimenzioniranju potrebno upoštevati.

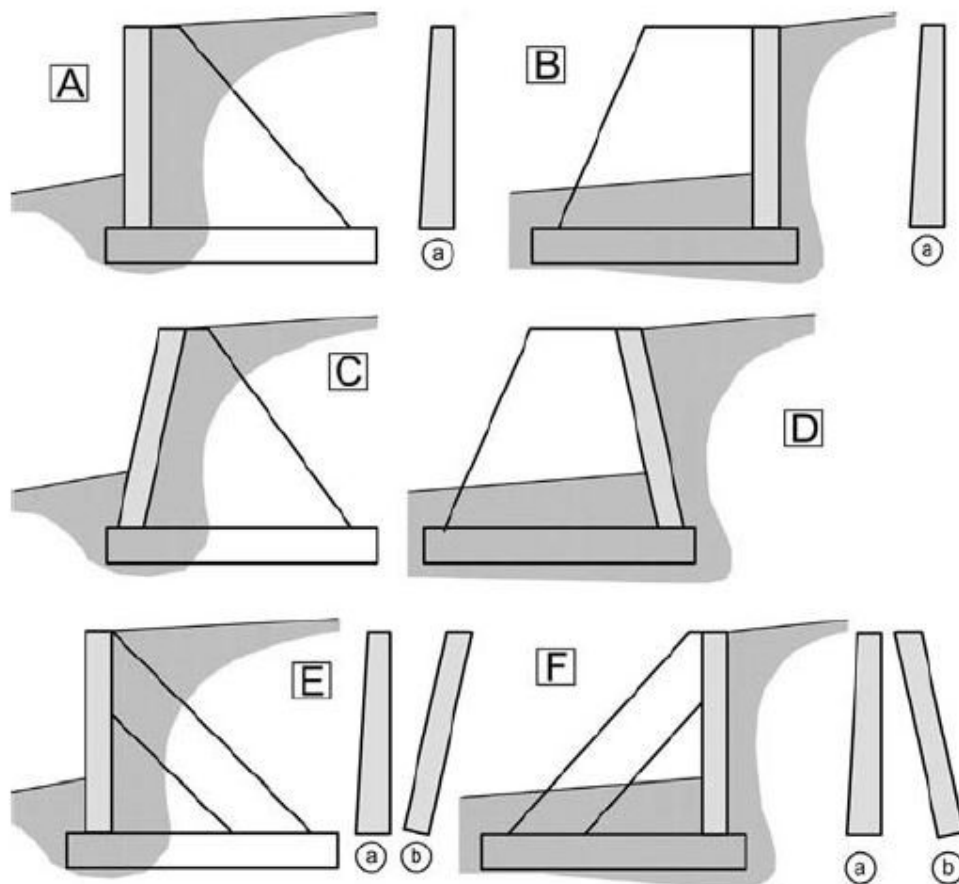
3.10 Stebrne pregrade z ravno ploščo

Stebrna pregrada z ravno ploščo je lahko brez odprtin ali z odprtinami. Gre za ravno nosilno konstrukcijo, katera je podprta z vzporedno na smer toka postavljenimi stenami (stebri). Stebri so lahko polni, votli ali razširjeni in razporejeni na zračni ali vodni strani. Med stebri so razporejene armirano-betonske plošče ali proti krčenju in temperaturi manj občutljivi loki. Zadrževalna stena lahko ustrezno zmanjšuje vodni (hidravlični) tlak, z oženjem prečnega prereza proti vrhu ali s konstantno nagnjenim prečnim prerezom gorvodno (slika 31).

Za razliko od kotnih podpornih zidov s prečnimi oporniki, tukaj ni neprekinjene temeljne plošče. Pregradna plošča in stebri so temeljeni na linijskih temeljih. Temelji prenašajo horizontalno obremenitev, preko stebrov in talnega stika, v tla. To vpliva ugodno na velikokrat razširjen moment upora dna struge, v primerjavi z enostavno ravno pregrado.

Take konstrukcije lahko uporabljamo pri večjih širinah dolin, kjer lahko telo pregrade zgradimo vitkejše. V primeru, da je objekt predviden na slabši podlagi, lahko izvedemo posamezne stebre, ki jih moramo skrbno temeljiti. Primerna razporeditev stebrov teh konstrukcij je podobna kotnim podpornim zidom grajenih na lokacijah z nizkimi nosilnimi pobočji. Prednost pred kotnimi podpornimi zidovi je lahko, da konstrukcija leži na manjši površini, na dnu struge, zaradi česar deluje nanjo manjši vzgon.

Načrtovanje teh konstrukcij med stebri ne predvidevajo odprtin, če pa jih so pa prekrite z rešetkami (nosilci) in so samo krila zgrajena iz plošč.



Slika 31: Oblike stebrnih pregrad z ravnimi ploščami: (A, C, E) s stebri na vodni strani; (B, D, F) s stebri na zračni strani; (a) in (b) so možne alternativne oblike zadrževalnih sten (prirejeno po [3])

3.10.1 Pregrade s podpornimi stebri na vodni strani

Značilnost takega tipa pregrade je, da podporni stebri ob prelivni sekciji služijo tudi za pritrditev rešetke, nosilcev ali mreže. Ta različica se običajno uporablja pri zadrževalnih in uravnalnih pregradah z gorvodnim objektom za prebiranje (slika 32).

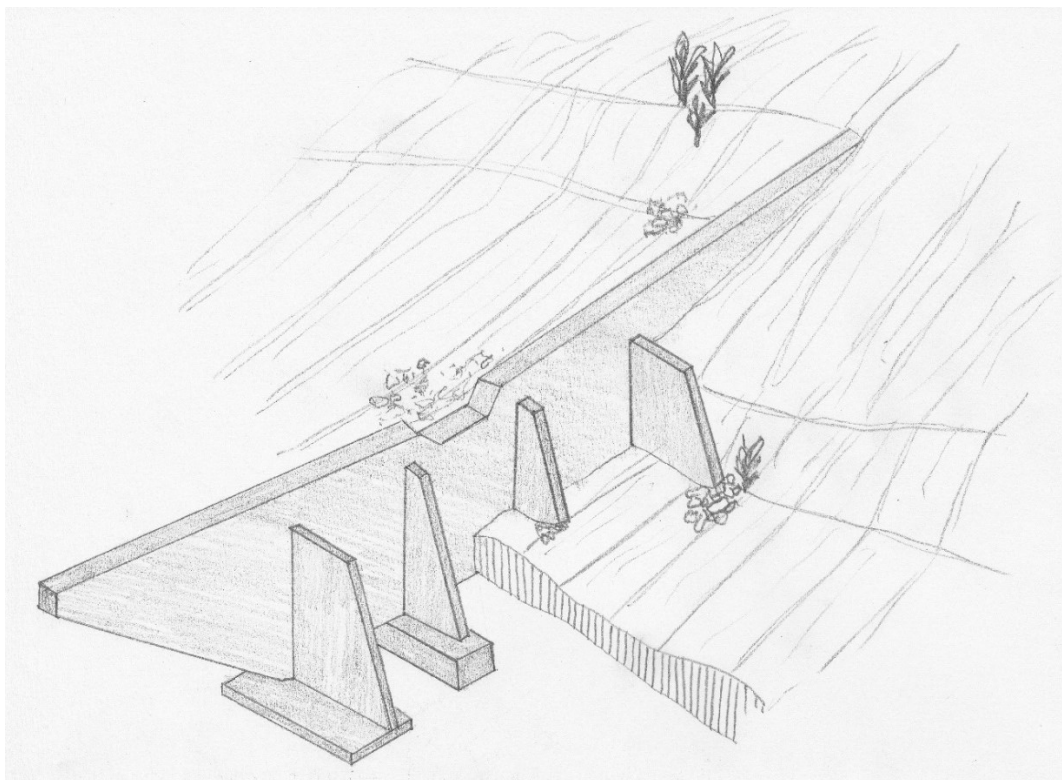


Slika 32: Stebrna ploščata pregrada z oporniki (rebri) na vodni strani, ki služijo kot opora rešetki (uravnalna pregrada) (povzeto po Suda, 2007)

Pri razporeditvi stebrov na vodni strani jih je možno napeti v podlago, da je varnost pred prevrnitvijo in zdrsom večja.

3.10.2 Pregrade s podpornimi stebri na zračni strani

Pri tem tipu lahko podslapje močno poveča stabilnost pregradnega objekta. Na primer, če se krila pregrade izvedejo preplitko (optimalno je 10-20% višine), lahko to privede do obtekanja pregrade in pojavljanja erozijskih poškodb na zračni strani, kar zmanjšuje stabilnost pregrade. S primernim podslapjem lahko spodjedanje in pojav erozijskega tolmana preprečimo (slika 33).



Slika 33: Stebrna netežnostna pregrada z oporniki (rebri) na zračni strani (zaplavna pregrada)
(povzeto po Suda, 2007)

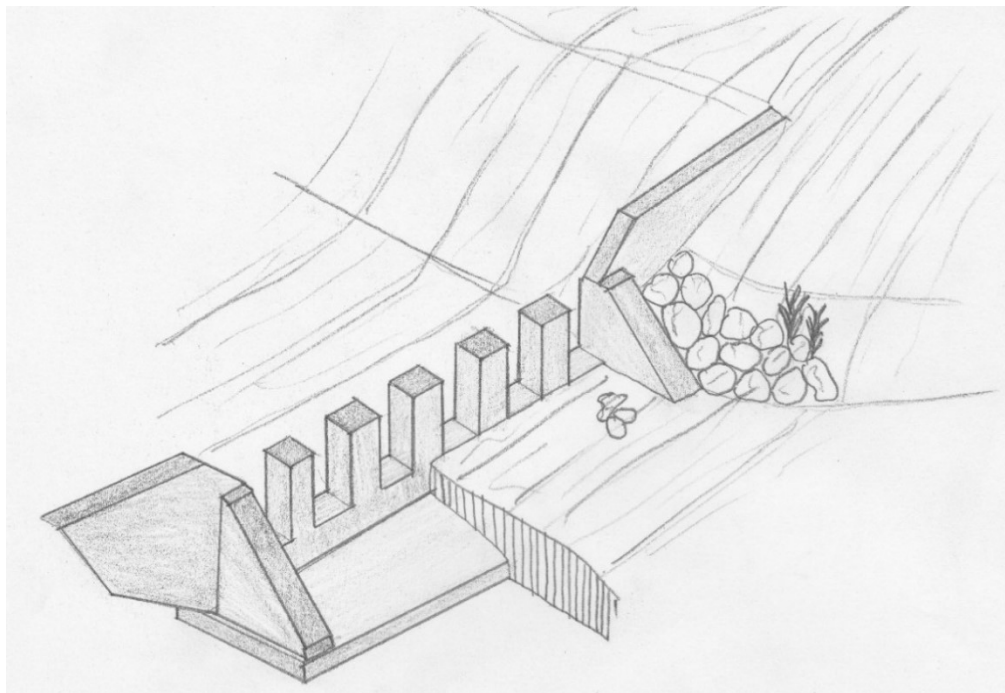
3.11 Razbremenilne nosilne konstrukcije

Objekte lahko razvrstimo glede na to kateri podporni sistem sestavlja glavino podpornega mehanizma. Večino razbremenilnih pregradnih tipov lahko razvrstimo v to statično skupino. Vsem je skupno, da gre za pregrade z odprtinami. Glede na to ali obremenitev v podpornem sistemu proizvaja predvsem upogibalne ali normalne sile, razlikujemo med masovno aktivnimi in vektorsko aktivnimi razbremenilnimi podpornimi strukturami.

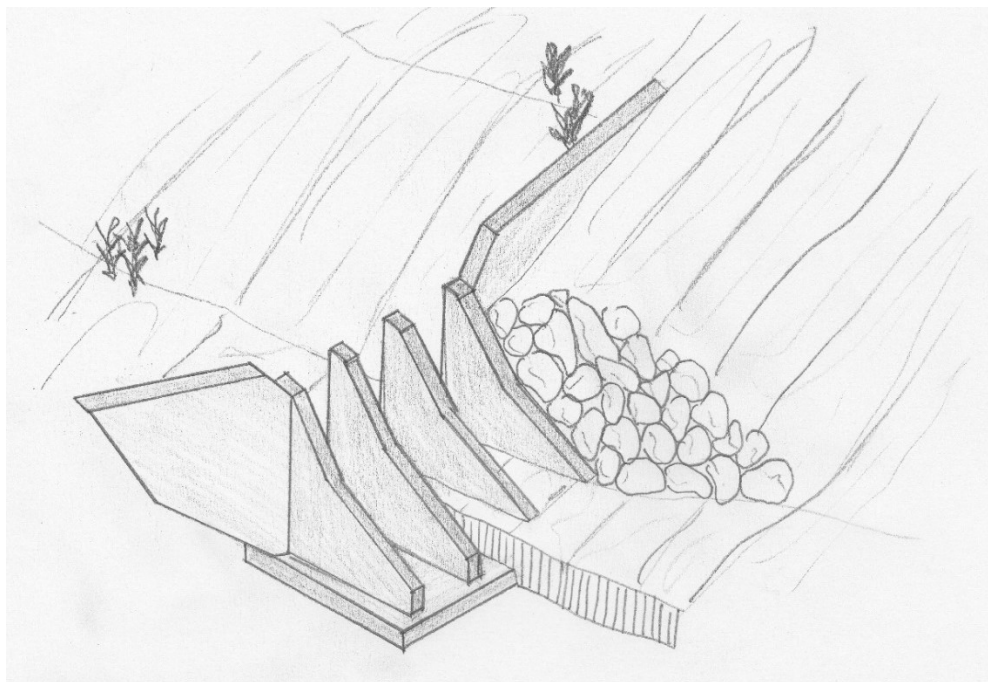
3.11.1 Masovno aktivni objekti

Masovno aktivni sistemi pripadajo podpornim sistemom, ki s svojim delovanjem prenašajo v tla predvsem upogibalne sile. Podporni sistemi so odvisne od zahtevanih delov pregrade (plošč, sten, nosilcev in ozkih opornikov). Taki sistemi imajo visoko variabilnost, ki je odvisna od funkcije objekta. Te objekte lahko kombiniramo tudi z vektorsko aktivnimi razbremenilnimi podpornimi sistemi.

Za varovanje stranskih delov pregrade se običajno zgradijo stranska krila, podpora rešetke ali stranska lica podslapja. V območju med krili, kjer poteka pretok, se vzporedno na smer toka razporedijo plošče ali vitki stebri. Uporaba plošč in vitkih stebrov je odvisna od funkcije objektov in delujoče obremenitve. Filter plavja se po navadi izvede z ozkimi stebri (slika 34). Pri objektih, kjer je predvidena obremenitev z drobirskim tokom, se na vodni strani vzporedno s smerjo toka zgradijo plošče ali podporni stebri (npr. razbijač drobirskega toka) (slika 35). Take vzdolžne plošče se imenujejo tudi razdelilniki drobirskega toka. Poleg razbremenjevanja je njihova funkcija tudi stabiliziranje pregrade s prestavitvijo težišča objekta gorvodno, kar poveča varnost proti prevrnitvi. Posamezne plošče so lahko temeljene ločeno ali na skupni plošči. Pri slednji je povečanje robustnosti bistvenega pomena.



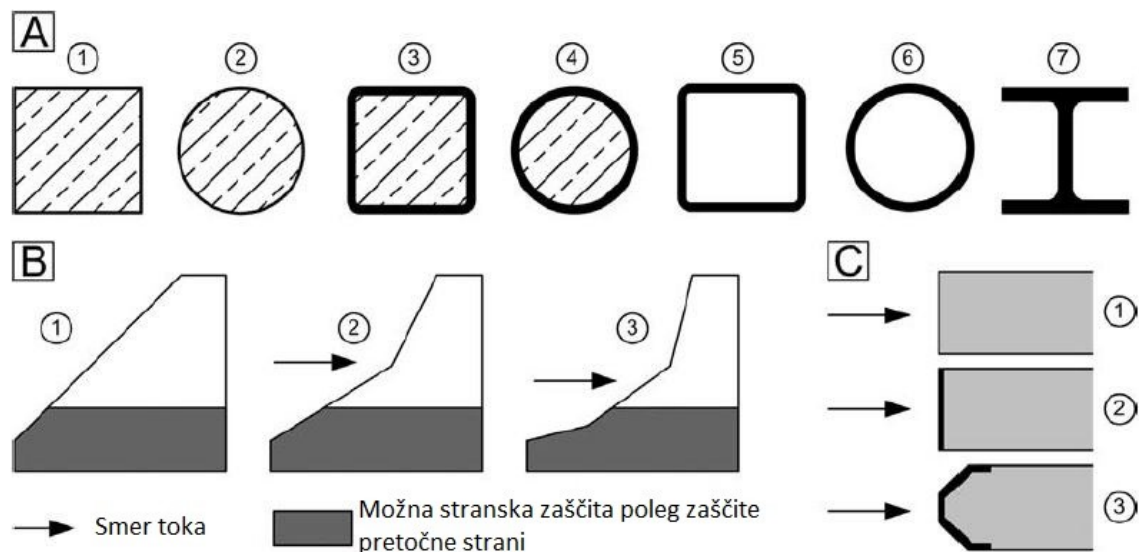
Slika 34: Masovno aktivni objekt; enostavna izvedba razbremenilne pregrade iz stebrov (odstranjanje plavja) (povzeto po Suda, 2007)



Slika 35: Masovno aktivni objekt; enostavna izvedba razbremenilne pregrade iz plošč in stebrov (razbijač drobirskega toka) (povzeto po Suda, 2007)

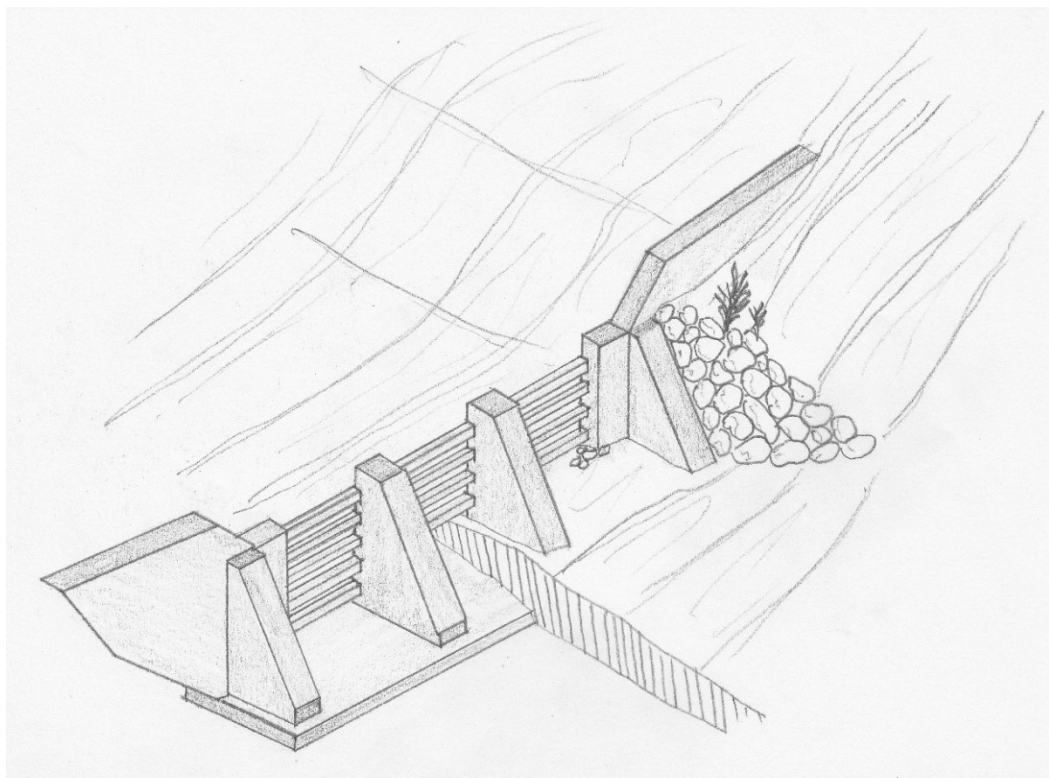
Prednost te razporeditve objektov je, da se lahko podporni sistem v skladu s funkcijo in obremenitvijo optimizira. To lahko vodi v materialno varčno in robustno konstrukcijo. Czerny [8] daje več prednosti razbremenilnemu podpornemu sistemu. V primerjavi s težnostnimi zidovi lahko sistem optimiziramo tako, da znatno privarčujemo z gradbenim materialom. S tem je povezan tudi čas gradnje, ki se v tem primeru skrajša. Omeniti pa je pomembno, da zapletene oblike plošč ali vitkih stebrov povzročijo visoke stroške opažanja (4 opažne strani), ki nadomestijo prihranke z materialom. Če objekti nima neprekinjene talne plošče, lahko v vmesnih območjih temeljenja stebrov pri hudourniških pregradah kratkočasno polno obremenitev tlaka vode na dno struge, zanemarimo. Stebre lahko sidramo v tla, kar bistveno zviša varnost pred prevrnitvijo in zdrsom. Gradnjo lahko ločimo na posamezne dele (zlasti na stebre in plošče), tako da opaž lahko uporabimo večkrat. Iz hidravličnega vidika je taka gradnja prednost, saj v primerjavi s polno stenskiimi pregradami, lahko tekom gradnje lažje odstranjujemo vodo in plavine med stebri (preusmerjanje vode).

V uporabi so različne vrste plošč in stebrov. Stebri so lahko sestavljeni iz armiranega betona, jeklenih profilov ali zabetoniranih votlih jeklenih profilov (sestavljani prevez) (slika 36 A). Stebri iz armiranega betona se običajno pojavljajo v obliki pravokotnega prečnega prereza. Po potrebi se protitočna stran oblikuje hidravlično, zmanjša se hidravlična upornost ali pa se zmanjša obrabna površina razdelilnika drobirskega toka (slika 36 C3). Pri različnih objektih (prebiralne pregrade, lovilci plavja) so stebri podobno uporabljeni (slike 34, 35, 37 in 38).

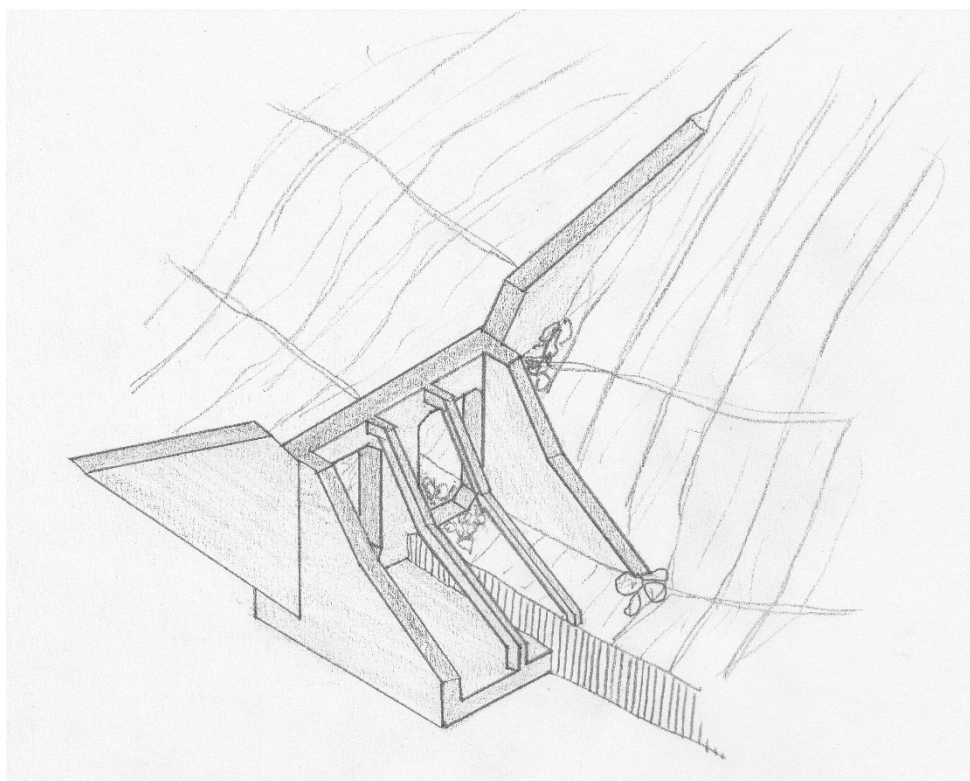


Slika 36: Oblikovanje stebrov in plošč: (A) oblike stebrov (1,2 armiran beton, 3,4 ojačan armiran beton, 5,6,7 jekleni profili); (B) oblike plošč (1 s padcem, 2 enojno zlomljena, 3 dvojno zlomljena); (C) oblikovanje protitočne strani plošč (1 nezaščiten, 2 ravno zaščiten z jekleno pločevino, 3 zaščiten z ukrivljeno jekleno pločevino) (prirejeno po [3])

Plošče so lahko načeloma razporejene na zračni ali vodni strani. Obe stranski plošči se običajno razlikujeta od ostalih razdelilnikov drobirskega toka (slika 36 B). To opravičuje drugačna funkcija. Obe zunanji plošči (podpora rešetke, bočni steni podslapja) omejujeta pretočno območje ob straneh in podpirata stranske brežine. Plošče v strugi so oblikovane kompleksnejše, saj zaustavljajo drobirski tok ali splavljajo plavje gorvodno od objekta, da zmanjšajo nevarnost zamašitve. Plošče se uporabljajo v različnih vrstah objektov (slika 35 in 37). Na plošče razporejene na vodni strani, lahko namestimo rešetko ali nosilce, za namen filtriranja oz. prebiranja (slika 38).



Slika 37: Masovno aktivni objekt; razbremenilna pregrada z nosilci iz stebrov in plošč (uravnalna pregrada) (povzeto po Suda, 2007)



Slika 38: Masovno aktivni objekt; pregrada z velikimi odprtinami, stenami, ploščami in nosilci (uravnalna pregrada) (povzeto po Suda, 2007)

3.11.2 Vektorsko aktivni objekti

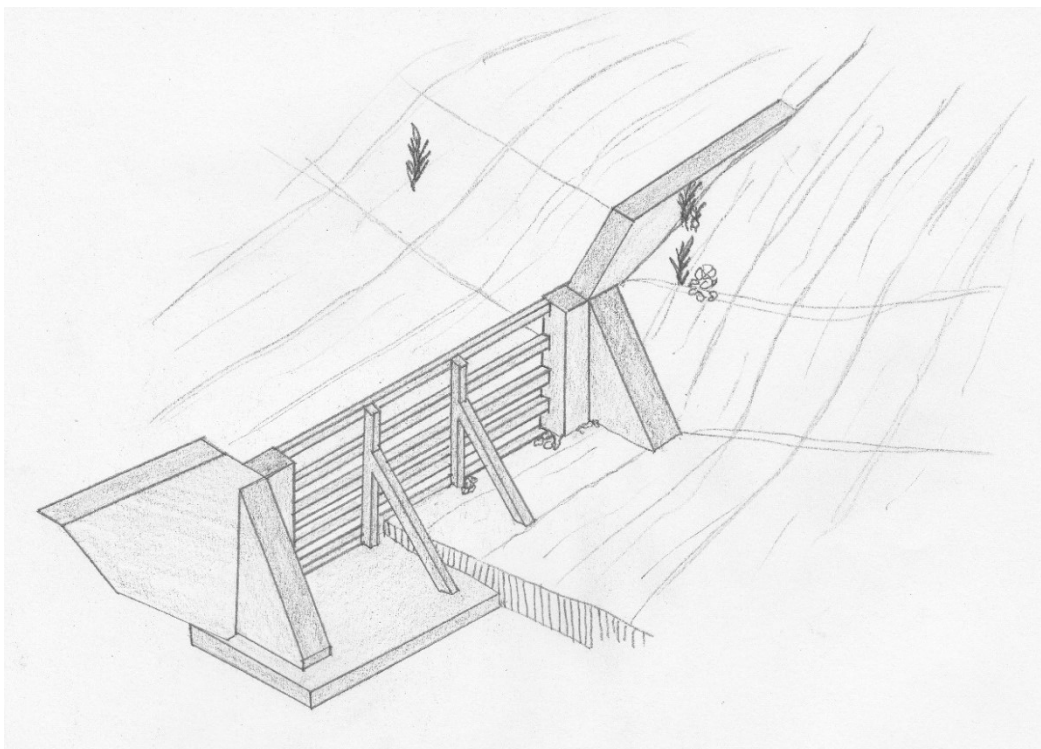
Vektorsko aktivni objekti vključujejo nosilne konstrukcije sestavljene iz relativno ozkih gradbenih elementov, v katerih se generirajo predvsem natezne in tlačne sile. Odvisno od upogibne togosti komponent lahko razdelimo sisteme na toge (rešetkasta pregrada) in upogibljive (mrežna pregrada).

3.11.2.1 Rešetkaste pregrade

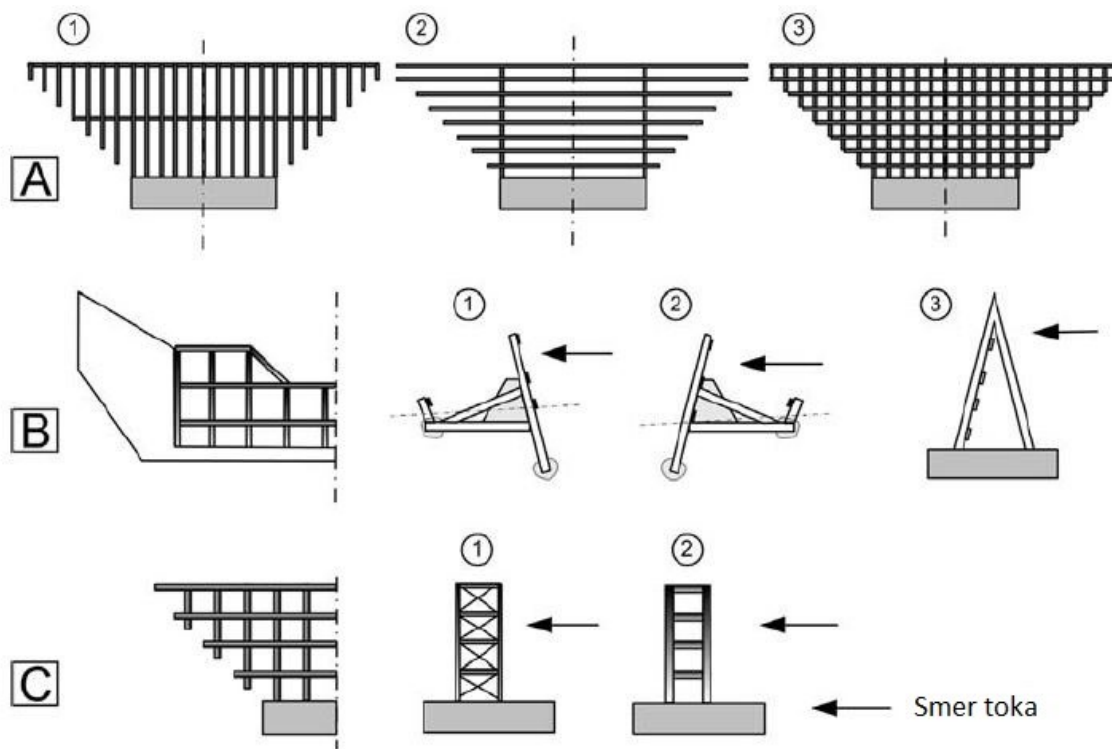
Rešetkaste pregrade so sestavljene iz togih delov. Načeloma se razlikujejo med ravnimi (enoplastno) in prostorskimi (večplastno) rešetkastimi pregradami. Ravne rešetkaste pregrade nosijo tudi del obremenitve preko ukrivljenja. Prehod prostorskih sistemov zagotavljajo odprtine ravnega sistema (slika 39). Prostorski nosilni sistemi so lahko zgrajeni iz paličja s prečkami ali iz kvadratnega paličja (okvirna struktura).

Ravni sistemi so lahko temeljeni v kamnino preko točkovnih temeljev in sider. Krila pregrade se zasidrajo v zemljino, preko katerih se prenaša obremenitev v tla. Primer odprte ploščate rešetkaste pregrade je prikazan na Sliki 39. Za prečke se večinoma uporabljajo nosilce iz jeklenih profilov oz. redko lesene nosilce [35].

Ravne odprte sisteme uporabljamo, ko imamo večjo širino doline (slika 40 B). Ravna rešetkasta struktura mora biti podprta bodisi z masivnimi stebri ali oporniki. Oporniki so lahko nameščeni na zgornji ali spodnji strani. Navpični steber so lahko postavi tudi v obliki trikotnega nosilnega ogrodja (slika 40 B3). V tem primeru mora tlačni opornik prenesti silo čez dodatni temelj v strugo potoka. Na navpičnem stebru ležeči nosilci so oblikovani tako, da se jih lahko odstrani, za potrebe dostopa težke mehanizacije in čiščenja struge.



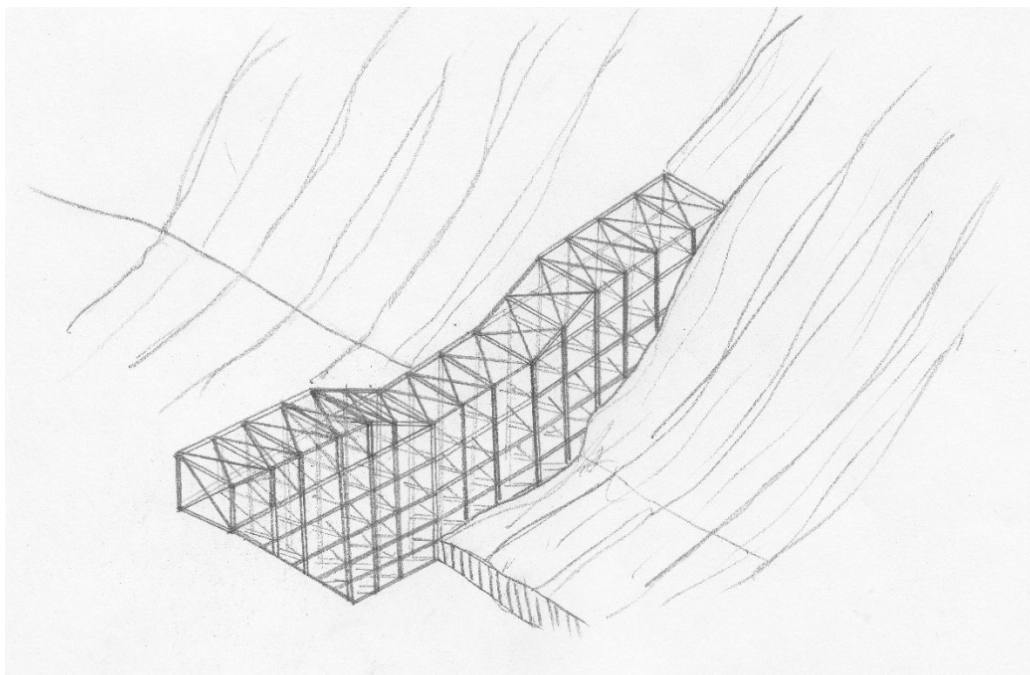
Slika 39: Vektorsko aktivna struktura; podprta ravna rešetkasta pregrada z masivnimi krili (povzeto po Suda, 2007)



Slika 40: Rešetkaste pregrade: (A) raven (urejen) sistem (1 vertikalna rešetka, 2 horizontalna rešetka, 3 mrežasta rešetka); (B) podprt ravninski sistem (1 podprt na zračni strani, 2,3 podprt na vodni strani); (C) prostorski sistemi (1 paličje z diagonalnimi prečkami, 2 prostorsko paličje) (prirejeno po [3])

Prostorske rešetkaste pregrade so sestavljene iz paličja z diagonalnimi prečkami ali prostorskega paličja, ki so sidrana v tla in v stranska pobočja (slika 40 C). Pri paličju s prečkami je ojačitev samo v ravninah, ki niso pravokotne na smer toka. Odprtine prečno na os hudournika ostanejo tako proste diagonalnih palic, da tok skozi ni moten. V večini primerov so posamezni elementi sestavljeni iz jeklenih profilov v dolžini prostih polj. Ta pregrada je razdeljena na majhne dele in po želji razširljiva. S povečanjem proste pregradne dolžine povečamo enote ležečega in stoječega paličja. V vozliščih so posamezni elementi povezani z vozliščnimi ploščami in vijaki. Razdalje med vodoravnim paličjem so po *Kronfellner-Kraus* [35] od spodaj navzgor vedno večje in obratno sorazmerno obremenitvam, ki narašča od zgoraj navzdol. S tem načinom gradnje se doseže, da je spodnje območje najprej zasuto s plavinami, kar poveča stabilnost pregrade. Zgornje območje ostane dlje prosto za plavje in grobe plavine. Po celotni širini pregrade so navpične palice enako razmaknjene. Tak način gradnje zmanjšuje število različnih elementov konstrukcije.

Kljub temu, da je pregrada v celotnem prečnem prerezu prepustna, se v zemljinah izvede pretočna sekcija, da bi zagotovili koncentracijo prelivanja preko pregrade na določeni del struge hudournika (slika 41). Na skalni podlagi pa lahko pri tem tipu pregrade tudi opustimo izgradnjo kril in prelivne sekcije. Način sidranja prostorskega paličja je odvisen od vrste in nosilnosti tal. V kamnini lahko uporabimo točkovne temelje ali sidra, če je nosilnost prenizka, se gradijo masivna krila [35].



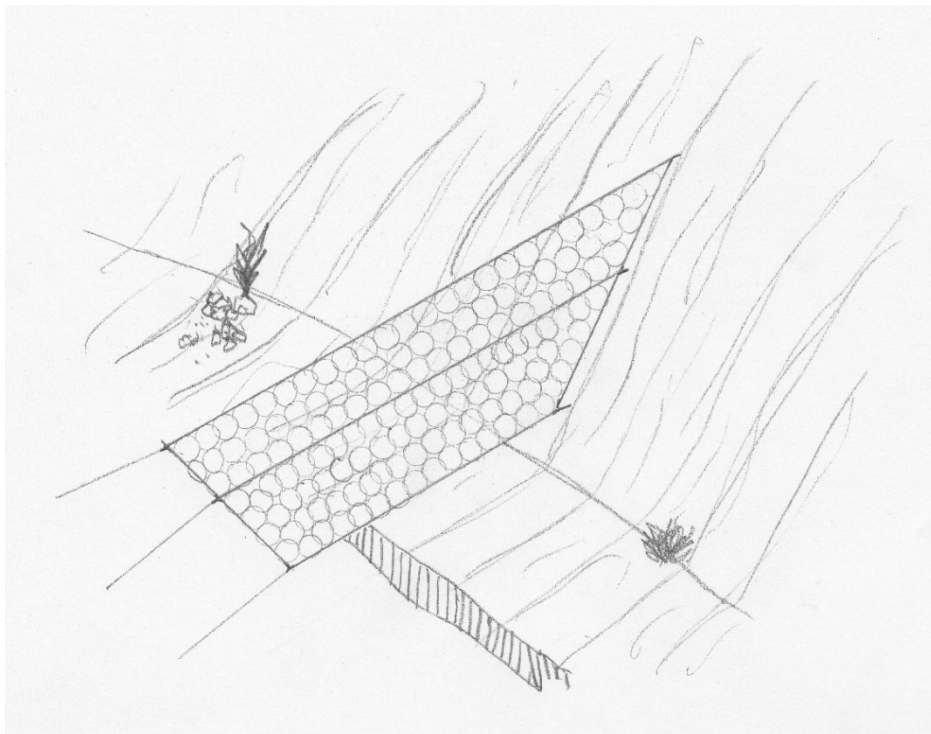
Slika 41: Prostorska konstrukcija; prostorska rešetkasta pregrada (toga) iz paličja (povzeto po Suda, 2007)

3.11.2.2 Mrežne pregrade

V nasprotju z rešetkastim pregradam so nosilni elementi mrežne pregrade upogibljivi. Tako lahko absorbirajo le natezne sile. Hübl [25] definira mrežno pregrado kot pregrado, ki je bodisi po celi dolžini ali vsaj v srednjem delu fleksibilna, satju podobna sestava elementov (slika 42). Prej so se mrežne pregrade postavljale samo za začasne namene, že nekaj let pa se v hudourniških strugah z naraščim uspehom uporablja kot filter plavja in kot fleksibilna pregrada za drobirski tok.

Po Kronfellner-Kraus [35] naj bo sprednja stran mrežne pregrade zgrajena navpično tako, da se izogibamo delovanja zaplavljanja vode in plavin na sprednji strani. Ker je ta vrsta pregrade popolnoma prepustna, je varovanje podslapja posebno pomembno. Varovanje podslapja je prav tako izvedeno z mrežno konstrukcijo. Gradnja mrežnih pregrad je lahko bodisi v obliki "zaves" (viseče montažne mreže) ali v obliki "zložljivih žepov" (z okvirji in sidrnimi jeklenicami stoječe škatlaste mreže). Plavine, ki ležijo pod mrežo, samodejno podpirajo konstrukcijo in povečujejo njeno stabilnost [35].

Te pregrade imajo pomanjkljivost, da je zelo težavno vzdrževanje mreže, tolmana in preliva ter izgradnja krone pregrade [36]. Na brežine lahko negativno vpliva, v smeri doline konveksna napetost vrvi, zaplavljanje pregrade. Poleg tega je pri dimenzioniranju potrebno upoštevati, da vedno obstaja nevarnost rjavenja jeklenic. Posebne mrežne oblike so obročne mreže ali "omega" (prepletene) mreže, za večjo kapaciteto so mreže sestavljene iz jeklenic.



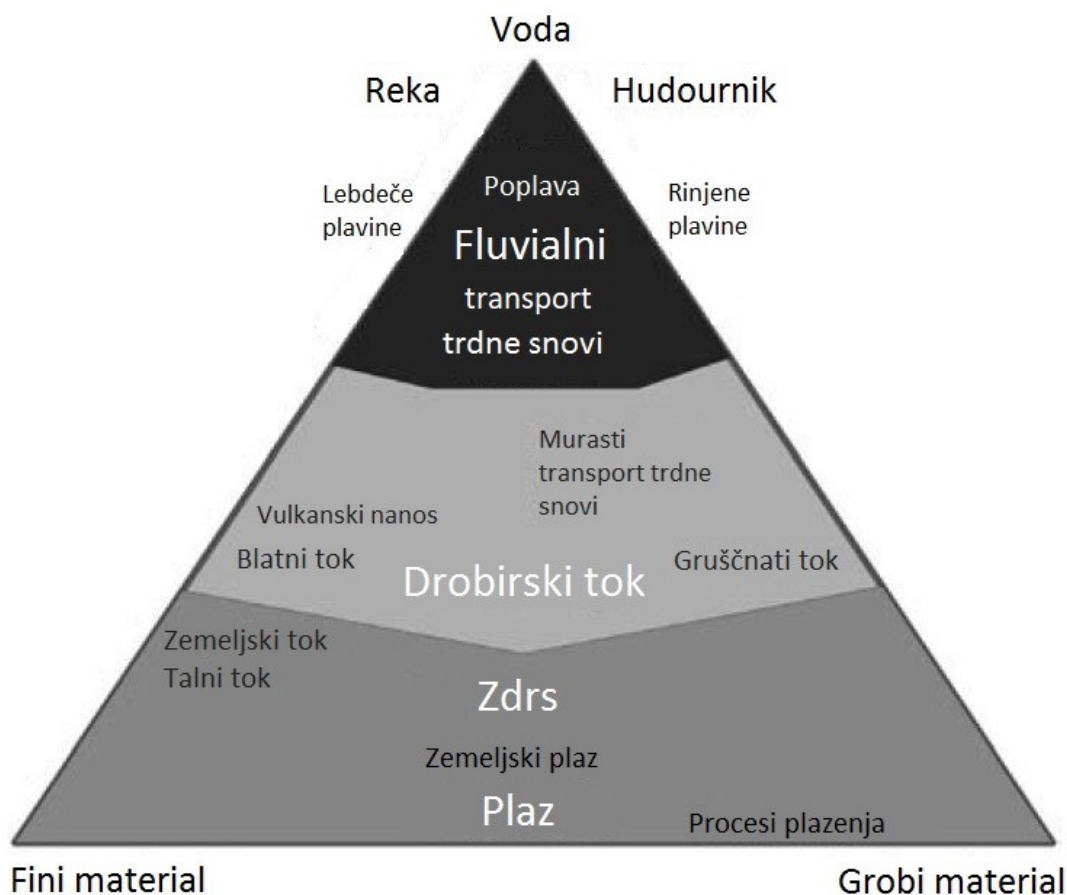
Slika 42: Vektorsko aktivna struktura; upogibljiva mrežna struktura (povzeto po Suda, 2007)

4 NAČRTOVALSKE IN RAČUNSKE OSNOVE

Dogodki v hudournikih lahko ustvarijo velike količine trdnih snovi. V zelo kratkem času se na območju hudourniške doline odloži nekaj sto do nekaj tisoč kubičnih metrov trdnih snovi (plavine, plavje). Ker pa so takšni dogodki redki in se večinoma dogajajo zelo lokalno, je te transportne procese težko meriti z merilno tehniko.

V procesih premeščanja v hudournikih lahko razlikujemo fluvialne in drobirske procese glede na njihove značilnosti. Prvi vključujejo poplavni in fluvialni transport trdne snovi, drugi pa vključujejo murasti transport trdne snovi in gruščnati tok [22]. Druge oblike premeščanja materiala so padajoči (skalni podor, padajoče kamenje, kamninski plaz) in drsni (pobočni zdrs, zemeljski tok, zemeljski plaz). Te procesi niso del hudourniških procesov v pravem smislu.

Trdne snovi različnih velikosti (fini in grobi material) in voda so vključene v postopke premestitve fluvialnega transporta in drobirskih tokov (slika 43). Prostornina transportnega medija in na drugi strani volumen premeščenih trdnih snovi se lahko štejeta kot mejna pogoja. Govorimo o mejnem transportu, če transportna zmogljivost omejuje odstranjevanje trdnih snovi. Če je oskrba s trdnimi snovmi majhna, transportna zmogljivost v času trajanja dogodka ni izčrpana.



Slika 43: Pregled sistematike vrst premestitev in njihove sestave na povirjih hudournikov (prirejeno po [3])

Odtok čiste vode s seboj nosi zanemarljive količine trdnih snovi. Poplavni odtok trdne snovi v glavnem prenaša v obliki suspendiranih trdnih snovi, transport materiala je v primerjavi z vodnim odtokom manjšega pomena.

Za fluvialni transport trdnih snovi je značilna prisotnost trdnih snovi, suspendiranih snovi in plavin blizu dna struge. Medtem ko se suspendirane snovi v primeru prelivanja razmeroma homogeno porazdeljene v pretočnem profilu, se obremenitev s plavinami pomakne proti dnu struge. Prostornina koncentracije trdne snovi doseže vrednost do 20%. Hitrost premeščanja plavin je odvisna od turbulentnosti vodnega toka, obravnava se kot newtonsko tekočino.

Drobirski transport trdnih delcev obsega odtok z veliko koncentracijo trdnih snovi. Trdne snovi se porazdelijo po celotnem prerezu, ne glede na velikost zrn. Večje frakcije se gibljejo približno s hitrostjo vode. Tak transport lahko doseže volumensko koncentracijo trdne snovi med 20 in 40%. Obnašanje toka lahko približamo newtonskim tekočinam.

Gruščnat tok je počasi do hitro odtekanje suspenzije vode, trdnih snovi in plavja. Tok plavin je lahko sestavljen iz več tokov, ki sledijo že oblikovani globinski liniji in imajo značilno obliko gibanja in odlaganja. Premeščene trdne snovi se porazdelijo po celotnem prerezu, ne glede na velikost zrn. Koncentracija trdnih snovi v takem toku je med 40 in 70%. Obnašanje toka pa je obnašanje nenewtonske tekočine.

4.1 Ocena pretoka plavin

Pojav premeščanja trdnih delcev v hudourniških povirjih je vsaj desetletje področje raziskovanja različnih strok. Načrtovalci hudourniških varovalnih ukrepov, geologi, geografi, morfologi in hidravlični inženirji poskušajo, skozi vključevanje preteklih izkušenj in s pomočjo numerično-matematičnih simulacij, kakovostno opisati in količinsko opredeliti proces odlaganja [50]. V zadnjih letih se razvijajo formule in algoritmi reševanja za realističen izračun procesa premeščanja trdnih delcev (erozija, transport in odlaganje). Poleg pravilne obravnave procesa in izbire modela simulacije je bistvena izbira potrebnih vhodnih parametrov izračuna. Kakovost teh vrednosti vsekakor vpliva na zanesljivost rezultatov. Upoštevati je treba, da z naraščanjem natančnosti čas za izračun močno naraste. Če položaj naloge presega razumni okvir, je upravičena uporaba enostavnejših pristopov iz izkušenj in empirike. Rezultati izračunov se po vsakem dodatnem pristopu preverjajo glede verjetnosti.

V literaturi najdemo različna priporočila za oceno pretoka plavin. Smernicam je skupno, da je poleg primernih terenskih posnetkov, po možnosti narejenih s pomočjo geologov, potrebno zbrane podatke o premestitvenih procesih primerno interpretirati.

V okviru določanja pretoka plavin se po celotni dolžini struge zviša potencialno premeščanje trdnih delcev (potencial trdnih delcev iz struge, brežin in pobočij), pa tudi količina trdnih delcev. Vsak izvor plavin se lahko razvrsti v pet možnih razredov, ki karakterizirajo masne premike in verjetnost premeščanja [47].

Razred 1A:

Proces aktivnih plitvih tal po brežini, enostavno premeščanje.

Razred 1B:

Proces aktivnih globokih tal po brežini, samo pri nekaterih scenarijih premeščanja (visoko namočenje).

Razred 2:

Staro, plitvo in neaktivno masovno gibanje, zmerno hitro premeščanje.

Razred 3:

Staro, globoko in neaktivno masovno gibanje, pogojno premeščanje (po možnosti samo prednja površina).

Razred 4:

Pokrov grobega razsutega materiala brežine (preperel material, drobir, ledeniške, rečne ali ledeniško-rečne odladnine). Pojav ni viden brez prepoznavanja nagnjenosti k površinski eroziji in plazenju tal, saj se premeščanje pojavi pod posebnimi pogoji.

Vsi zbrani podatki so lahko upoštevani za naslednje interpretacije in ocene v tako imenovanem pasu erozijskega sproščanja [47], kjer so skupaj vključeni vsi pomembni podatki o žariščih vzdolž struge.

Erozijsko sproščanje moramo kasneje, ob upoštevanju transportne zmogljivosti pripisane procesom premeščanja, prenesti na dejanski volumen pri dogodku premeščanja in odlaganja. Ta količina se imenuje pretok plavin. Po dogodkih lahko, iz primerjave med erodiranjem in odlaganjem volumna plavin, dobimo bilanco plavin in določimo pretok premeščanja v vsakem prerezu. Če uporabimo pretoke plavin po dolžini hudournikov, dobimo tako imenovani pretočni diagram plavin. Na območju z bolj razširjeno erozijo krivulja diagrama narašča. Krivulja upada na delu kjer poteka odlaganje plavin. Na delu kjer je krivulja vodoravna, gre za odsek premeščanja ali prikrita erozije. Pretočni diagram plavin tako zagotavlja dober pregled nad razvojem pretoka trdih delcev znotraj struge. S pomočjo teh diagramov lahko ocenimo učinek plavin glede na ukrep in izberemo primerno lokacijo za izvedbo ukrepa [24]. Drug način ocenjevanja pretoka plavin je predlagal *Hampel* [20]. Ker naplavni stožec tako rekoč shranjuje zgodovino hudournikov (procesov in pretokov), lahko iz padca stožca in srednjega premera zrnja določimo premeščanje znotraj dogodka.

4.2 Ocena pretoka drobirskega toka

Drobirsko premeščanje vključuje volumne (magnitudo) ob dogodkih premeščanja mešanice vode in trdih delcev. Empirični pristopi ocenjevanja murastih tokov navadno vsebujejo enostavno določene parametre prispevne površine. Omogočajo ocenjevanje bodisi zgornje meje vrednosti bodisi srednje vrednosti možnih murastih ali drobirskih tokov. Razpršeno premeščanje lahko vrednotimo preko formul iz preglednice 4.

Preglednica 4: Enostavne empirične enačbe za približno oceno obremenitve hudourniškega dogodka s plavinami in trdimi snovmi (sestavljeno po [50])

Enačba	Vir
$M = K \cdot A_c \cdot 100 \cdot J_c$	<i>Kronfellner-Kraus</i>
$M = 27000 \cdot A_c^{0,78}$	<i>Zeller, Rickenmann</i>
$M_a = 150 \cdot A_c \cdot (100 \cdot J_f - 3)^{2,3}$	<i>Hampel</i>
$M = L_c \cdot (110 - 250 \cdot J_f - 3)$	<i>Rickenmann/Zimmermann</i>
$M_a = 13600 \cdot A_c^{0,61}$	<i>Takei</i>
$M_a = 29100 \cdot A_c^{0,67}$	<i>D'Agostino et al.</i>
$M_a = 70 \cdot A_c \cdot J_c^{1,28} \cdot J_G$	<i>D'Agostino/Marchi</i>

M	največji premik ob dogodku [m^3]
M_a	srednji premik ob dogodku [m^3]
A_c	prispevna površina [km^2]
J_c	srednji padec struge [-]
J_f	srednji padec stožca [-]
L_c	dolžina aktivne struge [m]
K	hudourniški faktor [-]
J_G	geološki indeks [-]

5 HIDRAVLIČNA ZASNOVA VAROVALNIH OBJEKTOV

Hidravlična zasnova varovalnih objektov vključuje dimenzioniranje profilov in odprtih zgradb za zahtevne pretočne količine na časovno enoto, skozi vodno in trdno snov, kakor tudi zadrževalnih prostorov glede kapacitete zadrževanja. Dimenzioniranje pretočne in zadrževalne zmogljivosti zadrževalnega prostora je odvisno od pretočnih količin, količine trdnih delcev in pretoka plavin.

5.1 Dimenzioniranje pretokov v strugi

5.1.1 Analiza rinjenih plavin v strugi

5.1.1.1 Fluvialni transport trdnih delcev

V hudournikih se redko pojavijo poplavni dogodki s smo "čisto" vodo. Transport plavin in drugi trdi delci (plavja, suspendiranih snovi, mulja) so trdna komponenta hidravličnega računa prereza struge. Transport sedimentov je v hudournikih povezan z odtokom, ki je zelo spremenljiv: upoštevano je premeščanje plavin, stik z dnom struge (prekrivna plast), kakor tudi pretočnost za transport sedimentov (drobirski tokovi).

Pri fluvialnem transportu trdnih delcev se trdni delci v vodi kotalijo, drsijo in skačejo nad dnom struge. Skozi izpiranje dna struge in odlaganja grobih delcev se ustvari prekrivna plast, ki je bolj odporna proti vlečni sili toka (tlakovanje). Tako se ustvarijo strukture dna struge (pragovi, stopnje, erozijski tolmoni), ki predstavljajo značilnosti naravnega dna struge hudournikov [56].

Če poteka transport sedimentov z višjo koncentracijo, se hitrost toka spremeni v odvisnosti od toka "čiste" vode [49].

Fluvialni transport trdnih delcev ni nadzorovan, vendar je podvržen močnim nihanjem ("pulzacije"), vrh transporta se pojavi med dvema fazama brez dogodkov. Korelacija med količino odtoka in transportom trdnih delcev ni v vsaki fazi linije odtoka enako močna. "Pulzacije" transporta med visokovodnimi dogodki v hudournikih pripišemo tudi hidravlični nestabilnosti in prekinjajočem (občasnem) mehanizmu premeščanja (npr. spontano drsenje nasipa brežine, odprtje prekrivnega sloja z nadaljevanjem erozije talnega prereza).

V hudournikih lahko razlikujemo med naslednjimi vrstami transporta:

- a) transport preko neokrnjenega prekrivnega sloja (tlakovanega dna struge),
- b) transport preko prekrivnega sloja z izmenjavo sedimentov (aktivni vrhnji sloj),
- c) transport po porušenem oz. prelomljenem prekrivnem sloju (s stalno izmenjavo med rinjenimi plavinami in plavinami v dnu struge, erozija dna).

Transport plavin sprva poteka po meji upora (začetek premeščanja). Na začetku je dosežen transport po vrsti a), odvisno od velikosti frakcije zrn rinjenih plavin, se spremeni v vrsto c), neselektivno masno (odvisno od velikosti zrn) premeščanje (erozija dna). V gorskih potokih je transport plavin na splošno odvisen od sedimentov in povodja, kjer se kopičijo sedimenti.

Drug pomemben dejavnik za dimenzioniranje odtoka s fluvialnim transportom plavin v hudournikih je konstantno spreminjanje pretočnega upora med visokovodnimi dogodki. Na

začetku visokovodnega dogodka določajo pretočni upor grobo hrapavi elementi v dnu struge. Z zapolnitvijo prostorov med grobimi zrn z drobnimi plavinami se hrapavost in posledično upornost zmanjšuje ter povečuje premeščanje plavin. Kot rezultat hudournik zgladi dno struge in poveča premestitveno zmogljivost. Z zmanjševanjem prodonosnosti se na dnu ponovno poveča spiranje (odplavljanje, erodiranje) drobnega materiala, ki vodi do povečanja hrapavosti dna.

Začetek premeščanja plavin (začetek transporta) je vsakič, ko se zaradi naraščanja vlečne napetosti prvo zrno z dna struge razbremeni in premesti. Za modeliranje premeščanja plavin je ta dejavnik brez dimenzijski *Shields-ov* faktorja θ_c bistvenega pomena (tudi: dimenzija strižne napetosti dna struge). Ta dejavnik je odvisen od strižne napetosti τ , premera zrn d , padca struge I in gostote sedimenta ρ_s ter vode ρ_w . Glavna enačba za premeščanje plavin temelji na tej zasnovi [55].

Strižna napetost je rezultat enačbe:

$$\tau = \rho \times g \times h \times I_E$$

Shields [55] določa za hidravlično grobo dno struge konstantno vrednost za $\theta_c = 0,05$. Po *Bezzola* [5] je zaradi vpliva oblike zrnj upoštevan razpon med 0,02 in 0,65. Za strme struge s padcem nad 2% in z grobimi plavinami v dnu (gorski potoki) uporabi *Bathurst* [2] naslednjo enačbo za faktor, ki glede na padec zmanjšuje napad na dno (erozijo):

$$\theta_c = \frac{\tau}{g \times d \times (\rho_g - \rho_w)} = \frac{h \times I_E}{d \times \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} - 1\right)}$$

τ strižna napetost [N/m²]

g težnostni pospešek [m/s²]

d premer zrn [m]

ρ_s gostota sedimenta (plavin) [kg/m³]

ρ_w gostota vode [kg/m³]

I_E padec energijske črte (gladina vode pri stacionarnih pogojih) [-]

Naslednja enačba, ki opredeljuje začetek transporta plavin z varnostnim faktorjem (brezdimenzijski) in alternativno odstrani kritičen odtok q_s po *Rickenmann/Brauner* [50].

Pri izbiri ustrezne enačbe je za vse gradnje površinskega pomena. Kot zgornji robni pogoj za začetek transporta lahko uporabljamo po *Whittaker/Jäggi* [59], in za spodnji robni pogoj po *Bathurst* [12].

$$q_c = 0,257 \times \sqrt{\frac{\rho_g - \rho_w}{\rho_w}} \times \sqrt{g \times d_{65}^3 \times I^{-7/6}}$$

$$(0,02 < I < 0,09)$$

$$q_c = 0,15 \times I^{-7/6} \times \sqrt{g \times d_{50}^3}$$

$$(0,05 < I < 0,25)$$

q_c specifični kritični pretok (za 1 m širinski meter struge) [m³/s m]

I_{SO} padec dna struge [-]

Za nadaljnjo uporabo modela premeščanja plavin v okviru tega poglavja je uporabljena enačba po *Rickenmann-u* [48]:

$$q_c = 0,065 \times \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} - 1 \right)^{1,67} \times g^{0,5} \times d_{50}^{1,5} \times I_{SO}^{-1,12}$$

q_c specifični kritični pretok (za 1 m širinski meter struge) [$\text{m}^3/\text{s m}$]

I_{SO} padec dna struge [-]

Največji problem uporabe te enačbe za hudournike je v začetku premeščanja plavin, najpomembnejša je porazdelitev zrn (prekrivne plasti) in reprezentativen premer zrnja, ker niti metodologija analize plavin niti izbira lokacije vzorčenja ne prinašata zadovoljivih rezultatov. Zlasti težko je zasnovano določanje reprezentativnega premera zrna d_m , d_{90} , d_{50} , d_{30} .

Drugi dejavniki, ki vplivajo na uporabnost v laboratoriju razvite enačbe za premeščanje plavin v hudournikih, so strogo omejeni:

- spreminjanje razmer in procesov premeščanje (rečni, drobirski),
- močno spreminjajoče razmere v dnu struge: nastajanje krovnega sloja, hrapavost,
- neenakomeren začetek premeščanja plavin,
- pulzirajoče premeščanje plavin, negotovost pri določanju koncentracije plavin,
- velike razlike med sestavo plavin v premeščanju in odloženih plavin v dnu struge.

V literaturi je veliko napisanega o enačbah za premeščanje plavin [44, 54, 63]. Transportne enačbe različnih oblik lahko standardiziramo s *Shields-ovim* in *Einstein-ovim* faktorjem. *Einstein-ov faktor* φ je brezdimenzijska specifična stopnja premeščanja plavin, ki se določi po enačbi:

$$\varphi = \frac{q_s}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \times g \times d^3}}$$

q_s specifična stopnja transporta plavin [$\text{m}^3/\text{s m}$]

Preoblikovanje enačbe, da dobimo specifično stopnjo premeščanja plavin q_s :

$$q_s = \varphi \times \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \times g \times d^3}$$

Danes se največ uporablja tiste enačbe za premeščanje, ki so posebej razvite za strme struge in za določanje največje premestitvene zmogljivosti.

Za strme hudournike se lahko uporabijo enačbe po *Rickenmann-u* [48]:

$$q_s = \frac{12,6}{(\rho_g/\rho_w - 1)^{1,6}} \times \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \times (q - q_c) \times I^2$$

q_s specifična stopnja transporta plavin [$\text{m}^3/\text{s m}$]

d_{90} premer zrnja: 90% zrnastostne krivulje [m]

d_{30} premer zrnja: 30% zrnastostne krivulje [m]

q specifičen pretok (čiste) vode na širinski meter struge [$\text{m}^3/\text{s m}$]

Enačba velja za hudournike s padcem struge med $5 < I < 20$ %.

Na osnovi kritične strižne napetosti lahko transport rinjenih plavin za strme struge izračunamo po enačbi *Smart/Jäggi*:

$$q_g = \frac{4}{\rho_g/\rho_w - 1} \times \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} \times q \times I^{1,6} \times \left(1 - \frac{\theta_c \times (\rho_g/\rho_w - 1) \times d_m}{h_{g+w} \times I}\right)$$

h_{g+w} globina toka pri transportu rinjenih plavin [m]

d_m geometrična sredina zrnastostne krivulje (d_{64}) [m]

Enačba, ki velja za območje naklona med $0,2 < I < 20$ %, pri čemer mora biti konstanta θ_c 0,05 in d_{90}/d_{30} (stopnja neenakosti) < 10 . Iz te predpostavke nastane poenostavljena oblika enačbe:

$$q_g = 2,1 \times q \times I^{0,6} \times \left(I - \frac{d_m}{12,1 \times h_{g+w}}\right)$$

Enačbe po *Smart* in *Jäggi* ali *Rickenmann* temeljijo na nizu laboratorijskih podatkov, v seriji modelnih poskusov razvitih v VAW (ETH-Zürich). *Palt* je podprl te podatke s podatki iz narave, natančno iz pogorja Karakorum, in odkril dve enačbi za transport plavin, prejetih iz oblikovnega faktorja izgube $(k_{st}/k_r)^2$. V teh enačbah lahko pri stopnjevanju transporta zmanjšamo vpliv hrapavosti oblike dna struge ali povečamo odpornost proti vlečni sili. *Palt* navaja kot razlog razpad krovne sloja in uničenje oblike dna struge.

$$\varphi = 10041 \times \left(\left(\frac{k_{st}}{k_r}\right)^2 \times \theta\right)^{5,25} \quad \left(\left(\frac{k_{st}}{k_r}\right)^2 \times \theta\right) < 0,22$$

za

$$0,2 < I_{SO} < 12,4 \text{ \%}: \left(\frac{k_{st}}{k_r}\right) = 0,1 \times I_{SO}^{-0,36}$$

ali

$$\varphi = 29,57 \times \left(\left(\frac{k_{st}}{k_r}\right)^2 \times \theta\right)^{1,42} \quad \left(\left(\frac{k_{st}}{k_r}\right)^2 \times \theta\right) > 0,22$$

za

$$5 < I_{SO} < 20 \text{ \%}: \left(\frac{k_{st}}{k_r}\right) = 0,13 \times I_{SO}^{-0,28} \times \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{0,21}$$

k_r koeficient hrapavosti po *Palt*-u.

5.1.1.2 Drobirski transport plavin

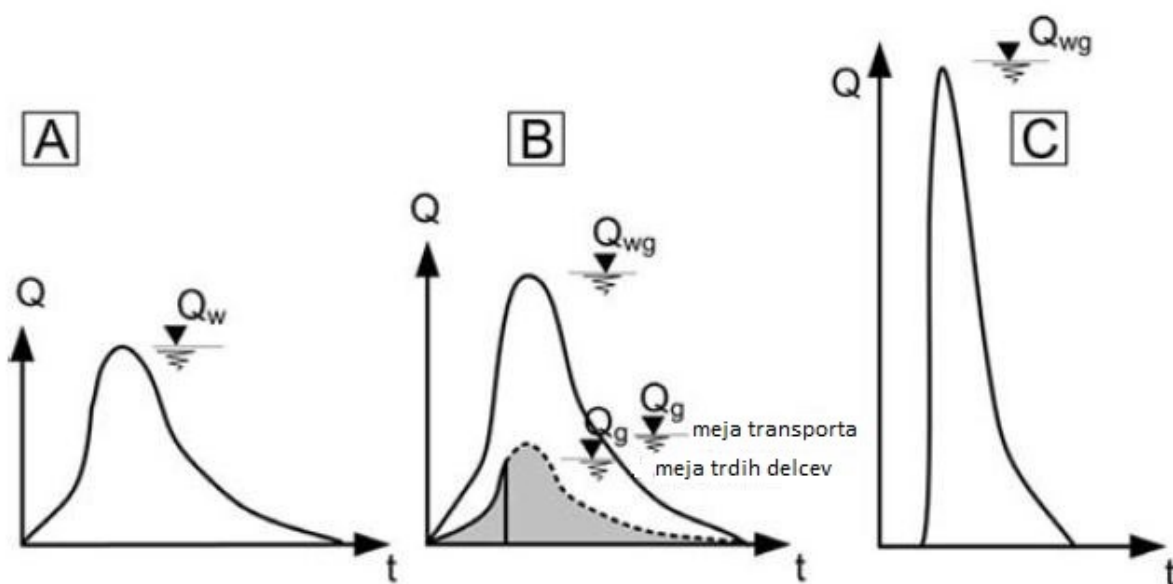
Pri transportu plavin v obliki drobirskega toka gre za pomembne spremembe lastnosti transportnega procesa. V ospredju so naslednji dejavniki:

- viskoznost in turbulenca transportnega medija,
- razpršene sile zaradi trkov večjih kosov,
- strižna sila matrice (fini delci in voda).

Glede na prevlado različnih reoloških značilnosti je potrebno razlikovati med blatnim tokom (brez grobih komponent) in zrnatim drobirskim tokom (grobe komponente v fino zrnati matrici).

Medtem, ko je pri blatnem toku pomembna viskoznost in turbulenca, prevladuje v zrnatem drobirskem toku vpliv razpršenih sil večjih komponent in viskoznost matrice. Murast transport trdih delcev je v strugi lahko zelo sunkovit, zaradi utekočinjenja večjih kosov dna struge ali pojavljanja preboja zamašitve (porušitev pregrade).

Različni procesi premeščanja dajejo tipične oblike hidrograma odtoka (slika 44) [53]. Prikazujejo rečni in murasti transport trdih delcev podobnih poplavnih dimenzij, medtem, ko je drobirski tok približek trikotni krivulji obremenitve z zelo strmim vzponom. Največji odtok je dosežen zgolj za kratek čas (čelo drobirskega toka), zatem se odtok postopno zmanjšuje (telo in rep drobirskega toka). Poleg tega je pri drobirskih tokovih potrebno upoštevati, da je premeščanje trdih delcev lahko deljeno na več različnih izvorov drobirja, pri čemer se največji odtok zmanjša, trajanje dogodka pa podaljša. Drobirski tok se premika večinoma neodvisno od izračunanega poteka visokovodnega dogodka.



Slika 44: Vrste pretokov mešanice vode in trdih delcev: (A) poplavne vode; (B) transport trdnih snovi; (C) drobirski tok (po [21])

Le nekaj hidravličnih modelov je primernih za izračun transporta plavin v strmi strugi (> 10 %) in murastega toka trdih delcev. Zato se približno lahko šteje "čista" voda Q_w z dodatki, kot navaja nemški standard DIN19 663 [13]. Z upoštevanjem zrnastostne krivulje rinjenih plavin lahko ocenimo volumsko koncentracijo c_v odtočnega dogodka na različnih lokacijah struge. Za volumsko koncentracijo trdih delcev velja:

$$c_v = \frac{V_G}{V_W + V_G}$$

V_G pretok plavin [m^3/s]

V_W pretok vode [m^3/s]

Iz tega lahko izpeljemo faktor (količinski faktor BF), da povečanje odtoka "čiste" vode poveča tudi transport plavin.

$$\text{BF} = 1 + \frac{c_v}{(1 - c_v)}$$

Dimenzije odtoka zmesi izračunamo po enačbi:

$$Q_{wg} = Q_w \times BF$$

Drobirski tok je zelo kratek dogodek t_{wg} pri precej višjem obsegu pretoka kot pri poplavah t_w , zato moramo upoštevati oceno največjega pretoka trajanja dogodka. S tem povečamo največji odtok s faktorjem 100. Največja možna interval za največji odtok Q_{wg} iz mešanice vode in trdih delcev ne poenostavlja odločitev načrtovalcev, vendar odraža variabilnost odziva povirja. Prisotne analize so odkrile dogodke, ki jim lahko omejimo interval navedenih dodatkov (faktor intenzivnosti IF).

$$Q_{wg} = Q_w \times IF$$

Preglednica 5: Dodatek "čisti" vodi pri določanju največjega odtoka mešanice vode in trdih delcev (po Hübl [21])

Proces	C_v [-]	t_{wg}/t_w [-]	IF [-]
Poplava	0,00 - 0,05	1,00	1,00 - 1,05
Rečni transport trdih delcev	0,05 - 0,20	0,90 - 1,00	1,05 - 1,40
Murasti transport trdih delcev	0,20 - 0,40	0,50 - 0,90	1,40 - 3,50
Drobirski tok	0,40 - 0,80	0,05 - 0,50	3,50 - 100,00

V hudournikih s srednjim naklonom dna struge nad 18 %, lahko pričakujem pomanjkanje stabilizacije dna struge, predvsem ob murastem transportu. Z enačbami za račun transporta plavin po *Smart/Jäggi* [56] kot tudi *Rickenmann* [48] lahko za strme struge in visoko odtočno intenziteto določimo koncentracije trdih delcev, ki so tipične za procese transporta trdih delcev. Na hudourniškem odseku z visoko hrapavostjo dna struge (močno strukturirano dno) in odtokom blizu začetka premeščanja, enačbe močno precenjujejo stopnjo transporta murastih procesov.

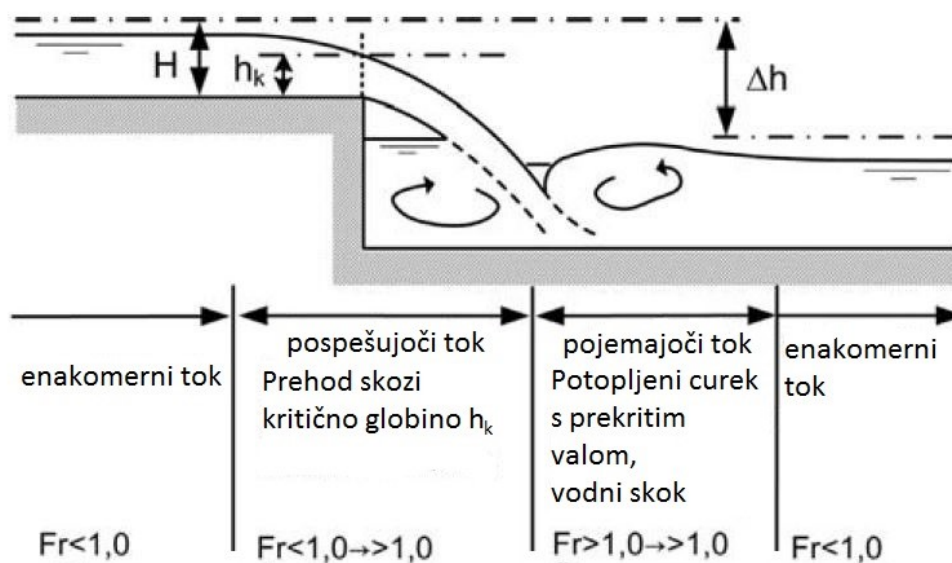
Uporaba hidravlično-sedimentoloških numeričnih simulacijskih modelov za območje drobirski tokov je v inženirski praksi že dobro napredovala. Uporabljene modele na hudournikih je pred sklicevanjem, potrebno kritično pregledati. Pregled z v praksi običajnimi simulacijskimi modeli, kaže da je njihova uporaba v hudournikih možna z nekaj pridržki. Doslej najpogosteje uporabljeni simulacijski modeli za hudournike so MORMO, FLUMEN, HEC-RAS in FLO-2D.

5.2 Hidravlično dimenzioniranje prečnih objektov

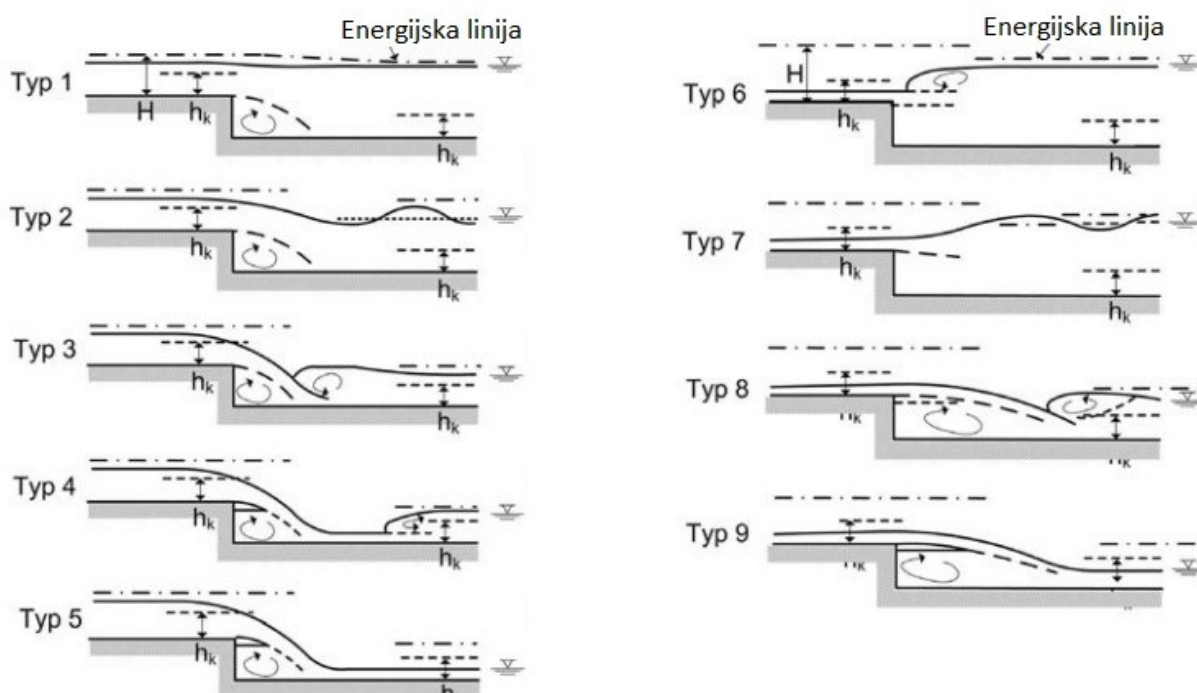
5.2.1 Dimenzioniranje preliva

Odtok preko prečnih objektov lahko poteka kot popolni ali nepopolni preliv. Popolni preliv je, ko vpliv zgornje vode in s tem količina vode ne vplivata na spodnjo vodo. Za razliko je nepopolni preliv, ko zgornja voda in količina vode prelite preko prečnega objekta vplivata na spodnjo vodo [54].

Odtok preko pregradnega objekta po navadi poteka kot popolni preliv (slika 45). Pritok iz gorvodnega območja poteka enotno, dokler se gladina vode ne spusti (kritična pretočna globina h_k) kjer prihaja do konstantnega prehoda iz mirnega do deročega toka. Curek preko prelivne sekcije pada v podslapje, tam se upočasni in sledi prehajanje iz deročega v mirni tok. Prehod je diskontinuiran v obliki hidravličnega skoka; oblikuje se val. Pod vodnim skokom se spet oblikuje mirni tok.



Slika 45: Popolni preliv preko prečnega objekta (po [62])



Slika 46: Tipi padanja vode preko prečnih objektov (po [62])

Pri gradnji hudourniških prečnih objektov je vrsta preliva odvisna od višine padca ΔH in obnašanja toka dotoka (mirni ali deroči tok).

Pretok se je lahko določi pri popolnem prelivu po enačbi *Weisbach*, kjer upoštevamo hitrost prelivanja:

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times b_m \times \sqrt{2 \times g} \left[\left(h_g + \frac{v^2}{2 \times g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v^2}{2 \times g} \right)^{3/2} \right]$$

Hitrost prelivanja se lahko zanemari, z uporabo enačbe po *Poleni*:

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times b_m \times \sqrt{2 \times g} \times h_g^{3/2}$$

- h_g višina profila prelivne sekcije (izenačena z energetsko višino h_E) [m]
 v hitrost prelivanja [m/s]
 μ koeficient preliva: za široke, ostre pregradne krone = 0,55 [-] [6]
 b_m srednja širina prelivne sekcije v višini $1/3 \cdot H_A$ [m]
 g gravitacijska konstanta [m/s²]

Za izbiro širine prelivne sekcije je treba upoštevati, da zvišanje dna struge bistveno razširi strugo gorvodno, kot v neoviranem stanju, ali širino dna v dolvodnem območju pregrade. Krčenje mirnega toka dotoka naj poteka v prelivni sekciji čim nižje.

Po drugi strani pride do raztezanja vodnega curka v prelivu, tako da naj bo širina podslapja pregrade večja kot širina prelivne sekcije b_A . Pri manjših širinah lahko curek preliva v podslapju pregrade deluje na pobočja doline, zato je potrebno podslapje zavarovati proti eroziji. Kot vodilo za določitev faktorja oblikovanja širine prelivne sekcije in dna struge v podslapju velja [6] (minimalna vrednost):

$$b_A = (0,8 \div 0,9) \times b_s$$

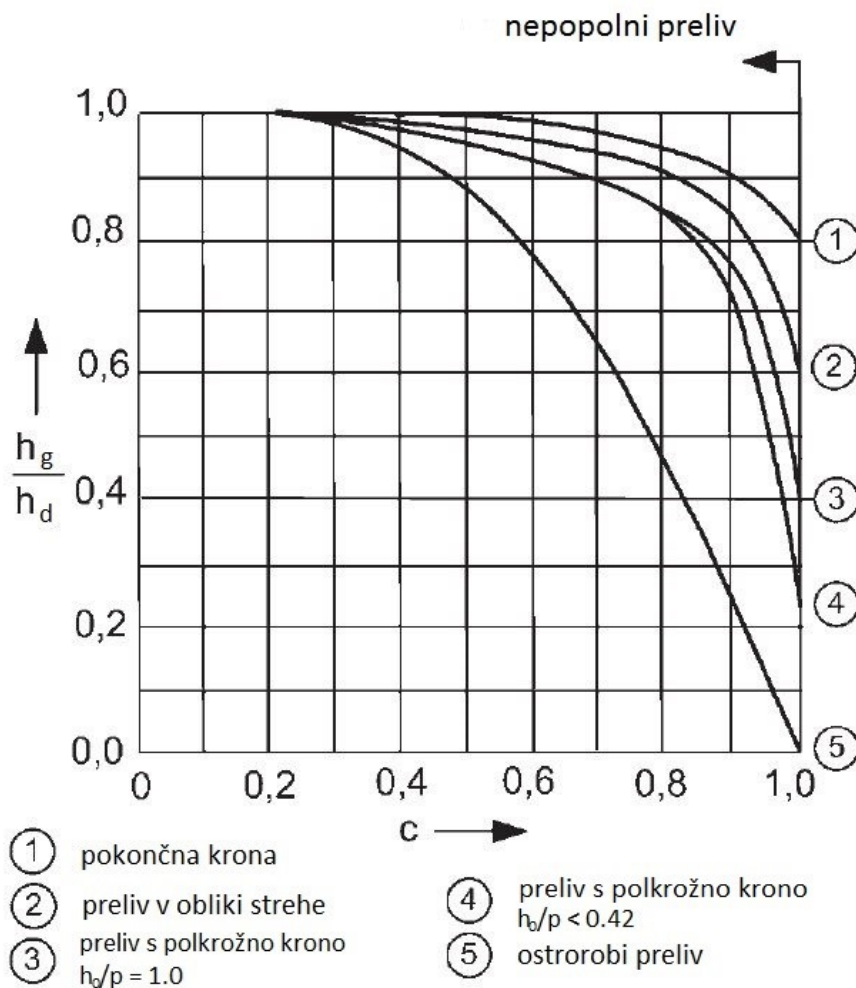
b_A širina prelivne sekcije na robu [m]

b_s širina dna struge v podslapju pregrade [m]

Ocena zmogljivosti pretoka pri nepopolnem prelivu se računa po enačbi:

$$Q = c \times \frac{2}{3} \times \mu \times \sqrt{2 \times g} \times b \times h_g^{3/2}$$

Preliv je nepopolni pri $c < 1,0$. Koeficient c dobimo iz nomograma po Rössert (slika 47) in je odvisen od oblike jezua, kakor tudi od razmerja globine odtoka gorvodno h_g in dolvodno h_d [51].

Slika 47: Nepopolni preliv: določanje koeficienta c (po [51])

Ker prelivni niso oblikovani samo vertikalno, se pojavlja kroženje (vrtinčenje) vode (krovni in talni val). Če je podslapje dovolj širše od preliva pregrade, se oblikuje stranski val, ki povzroči, da tok ob brežini teče nazaj.

V naravi se praviloma ne pojavlja konstanten pretok, tako da je potrebno pričakovati večkratne spremembe vrste prelivanja ob visokovodnem valu. To variabilnost je pri dimenzioniranju preliva in umirjevalnega bazena (podslapja, tolmunov) treba upoštevati.

Odvisno od vrste prečnega objekta, curek lahko prosto pada ali pa se polno preliva [62]. Prelivajoč curek preliva ima lahko sesalni učinek, kar je lahko vzrok za kavitacijske poškodbe na objektu. Zato je velikega pomena, da je spodnji del prelivnega curka dobro prezračen. Drugače bo prelivni curek nestabilen in pri istem pretoku niha naprej - nazaj.

Pretvorba energije prelivnega curka je bolj popolna, saj je več odtočnih pogojev podobnih tipu preliva št. 3 (popoln preliv s potopljenim curkom). Zato je iz hidravličnega vidika gradnja prostih in globokih pregradnih tolmunov prednost. Ker je nastajanje prostih tolmunov iz vidika stabilnosti prečnih objektov redko sprejemljivo, se v podslapju pregrade pogosto uredi umirjevalni bazen z umetno vdolbino (ugreznjeno in urjeno dno struge) ali pa pojav omejimo z izgradnjo pragu (podporna pregrada) v podslapju.

Večina enačb za preliv predpostavlja, da je hitrost dotoka zelo nizka in da dno struge gorvodno leži nižje kot prelivni rob. Ta primer se pojavi v hudourniških gradnjah, čeprav samo v nepoškodovanem stanju prečnih objektov. Hitrost dotoka bistveno vpliva na dolžino curka in

posledično na lokacijo tolmana. V hudourniških gradnjah je najpogostejši primer (zgornji nivo, nagnjeno dno), da zapolnitev prečnega objekta povzroči deroči tok v območju prelivnega roba (popolni preliv) ali dolvodno zajezev (valovit ali nepopolni preliv) [62].

Preglednica 6: Vrste prelivov po sliki 46 (po [62])

Tip	Opis		
Tip 1	nepopolni preliv	$\Delta h < 1/3 H$	Dotok do preliva močno vpliva dolvodno: "vzvratna zajezev".
Tip 2	valovit preliv	$1/3 H < \Delta h < H$	Dotok do preliva vpliva dolvodno.
Tip 3	popolni preliv s pokritim potopljenim curkom	$\Delta h > 2 H$	Dotok v območju $h < \Delta h < 2h$ še vedno lažje vpliva. Za večje vrednosti Δh vpliv ni več zaznan.
Tip 4	popolni preliv z nepokritim potopljenim curkom	posebna oblika tipa 3	
Tip 5-7	posebne oblike		Prehod iz izpusta v korito.
Tip 8-9	popolni preliv z deročim dotokom	podobno tipu 3	Prehod iz izpusta v korito.

5.2.2 Dimenzioniranje podslapja in pregradnih tolmunov

Tolmun je posledica spremembe toka, ko se odtok preliva preko pregrade (pragu). V tolmunu se pojavlja nezvezna sprememba toka od mirnega do deročega toka (vodni skok). Nestalnost odtoka lahko med visokovodnim dogodkom pri prostem nastajanju tolmana privede do močnih sprememb morfologije tolmana (različne lokacije padanja curka preliva, različne oblike tolmunov).

Za prosto nastajanje tolmunov je erodibilnost dna struge bistvenega pomena. Za dno hudournika pogosto velja širok spekter zrnivosti sedimenta, od velikih blokov (delno koluvalna pobočja) do finega peska. Bistveno je, ali gre za razsut ali koheziven material. Občasno se pojavljajo tudi skale drugačnih vrst kamnin, katerim je treba drugače oceniti erodibilnost. (Podrobnosti Zeller [62]).

V preteklosti so številne poskuse za empirično modeliranje tolmunov izvajali pretežno z nevezanimi plavinami (določitev globine tolmana). Razviti modeli (Koutoulas [33] ali VAW Böll [6]) so znatno odvisni od sestave sedimentov tal. V praksi je določanje splošne veljavne krivulje zrnavostne sestave z razumnim rezultatom komaj mogoče, saj je poleg zrnavostne sestave prekrivnega sloja pomembna tudi porazdelitev zrn osnovnega sloja do največje globine tolmana. Zato v praksi globine tolmana ne računamo, ampak iz preteklih izkušenj ocenimo vrednost.

Problem pojavljanja tolmunov se rešuje z varnostnimi ukrepi. Za načrtovanje varnostnega ukrepa (umirjevalni bazen, prag) je obvezno poznavanje največje dolžine učinka tolmana. Enako pomembna je širina umirjevalnega bazena v povezavi z razvojem stranskih valov (vrtincev).

Za načrtovanje širine umirjevalnega bazena v območju podporne pregrade se v praksi predlaga 1,5-kratna širina dna v območju prelivne sekcije [13]. Za dimenzioniranje dolžine umirjevalnega bazena L_T se v praksi uporablja več empirično razvitih enačb. Enačba po

Angerholzer-ju upošteva hitrost dotoka, zato se jo uporablja za zaplavljenе pregrade z nagnjenim dnom:

$$L_T = (v_0 \times \sqrt{2 \times g \times h}) \times \sqrt{\frac{\Delta H}{g}} + h$$

ΔH prepadna višina [m]

h višina toka v prelivni sekciji [m]

v_0 dotočna hitrost [m/s]

Enačba po *Angerholzer*-ju se v praksi uporablja kot minimalna vrednost za dolžino umirjevalnega bazena. Enačbo po *Müller*-ju pa temelji, nasprotno, na najnižji hitrosti dotoka (zaježitev) in uporablja:

$$L_T = 4 \times \Delta H^{1/2} \times h^{3/2}$$

5.2.3 Pretok skozi pregradne odprtine

Načrtovanje pretoka skozi pregradne odprtine je naslednje pomembno vprašanje hidravličnega dimenzioniranja prečnih objektov v hudournikih. Hidravlično dimenzioniranje odprtin se izvede z omejitvami, da je odprtina prosta. Zaradi zmanjšanja površine odprtine zapolnjene s trdimi delci (odkladninam) ali popolnoma zaprte odprtine (zaplavljanje), izračun izgubi svoj pomen. Trend v hidravličnem dimenzioniranju pregradnih odprtin je uporaba minimalne vrednosti.

Pretok skozi odprtine temelji na pravilu prostega pada. Za ta primer je konstanten pretok Q po naslednji enačbi določen, ko je hitrost dotoka v_0 majhna [51]:

$$Q = \alpha \times A \times \sqrt{2 \times g \times h_0}$$

α količina pretoka z upoštevanjem zožitve curka, trenja in višine pretočne odprtine

Iz te osnovne enačbe dobimo pretok iz katerekoli odprtine s površino odprtine A :

$$Q = \alpha \times A \times \sqrt{2 \times g \times \left(h + \frac{v_0^2}{2 \times g} \right)}$$

h višina med gladino in težiščno točko odprtine [m]

v_0 dotočna hitrost [m/s]

Za hidravlično dimenzioniranje gorvodno zaprtih pregradnih odprtin, *Leys* pri zaježitvi (dotočna hitrost $v_0 = 0$) uporabi enačbo:

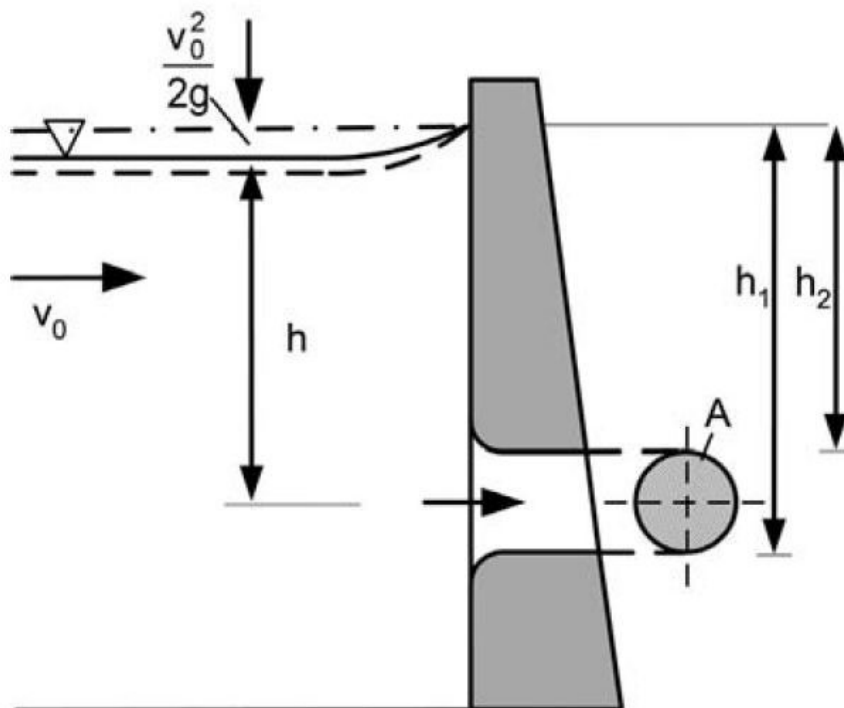
Za odprtine s pravokotnim prerezom:

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times b \times \sqrt{2 \times g} \times (h_1^{3/2} - h_2^{3/2})$$

Za odprtine z okroglim prerezom:

$$Q = \mu \times b^2 \times \sqrt{2 \times g} \times \sqrt{\frac{(h_1 + h_2)}{2}}$$

- b širina (premer) odprtine [m]
 μ koeficient pretoka (0,65-0,7)
 h_1 višina od spodnjega roba odprtine do gladine vode [m]
 h_2 višina od zgornjega roba odprtine do gladine vode [m]



Slika 48: Prost iztok iz odprtine (prirejeno po [51])

5.2.4 Dimenzioniranje zaustavitvenega prostora (kapaciteta zadrževanja) za pretok trdih delcev

Zadrževalna zmogljivost zaustavitvenega prostora (zaplavni prostor) hudourniške pregrade mora ustrezati količini trdih delcev, ki jih je med dogodkom potrebno zadržati. Za več med seboj povezanih zaustavitvenih prostorov se določi zmožnosti zadrževanja s seštevanjem. Poleg tega je za načrtovanje zaustavitvenega prostora ključno, katero količina trdih delcev lahko spustimo skozi pregrado. To je odvisno od prehodnosti pregrade.

Določanje prostornine zadrževalnega prostora se običajno določa na osnovi (digitalnega) modela terena, v katerega je dodana pregrada, ki omejuje spodnji del območja. Za predhodno načrtovanje (npr. v okviru različic študij za izbiro primerne lokacije pregrade) lahko grobo določimo prostornino tudi iz geodetskih prečnih profilov, v katerih je črta zaplavljanja, preden je bil zaplavek odstranjen iz vzdolžnega prereza.

Začetna točka zaplavne linije v vzdolžnem prerezu je na robu na vodni strani prelivne sekcije. V vzdolžnih prerezih je potrebno vrisati prvotno dno hudournika in zaplavno linijo, ki se uporablja z zaplavnim kotom.

Naklon zaplavne linije (zaplavni kot) je pri popolnem zaustavljanju odvisen od vrste procesa premeščanja in sestava plavin, vključno z deležem vode. Za določanje zaplavnih kotov se priporoča referenčne vrednosti (preglednica 7).

Preglednica 7: Priporočen padec zaplavljanja rinjenih plavin za načrtovanje zadrževalnega prostora hudourniških pregrad (merjeno v smeri osi potoka) (prirejeno po [3])

Možni transportni procesi	Sestava sedimentov	Priporočen padec zaplavljanja
Visoka voda	Suspendirana snov in drobnozrnate plavine	0 %
Rečni transport trdih delcev (sedimentov)	Drobnozrnate plavine (prodno-peščene)	0-5 %
	Grobozrnate plavine (kamni in bloki)	10-15 %
Drobirski transport trdih delcev (grobozrnati drobir)	Grobe do zelo drobne plavine	5-15 %
Blatni tok (drobnozrnati drobir)	Blato in drobne plavine	0-5 %
Grobozrnati drobirski tok z drobnimi frakcijami	Grobe plavine z drobnozrnatimi polnilnimi frakcijami	10-15 %
Zrnati drobirski tok brez drobnih frakcij (meliščni drobirski tok)	Samo grobe komponente (kamenje in bloki) brez drobnih primesi	15-25 %

Pri določanju ustreznega padca zaplavka (zaplavni kot) je potrebno upoštevati, da procese premeščanja in zrnastostno sestavo sedimentov pogosto prepoznamo z negotovostjo. V dvomih je vedno priporočena nižja vrednost (preglednica 7).

Razpoložljivi zaustavitveni prostor [m^3] se za načrtovanje pretoka trdih delcev primerja s preteklimi dogodki. Količina trdih delcev se skozi pregrado premika brez zastojev in je lahko neškodljiv transport. To količino je od zahtevane prostornine potrebno odšteti. Vendar je zmanjšanje dovoljeno le, ko lahko izključimo zajezev pregradnih odprtin. To ne moramo sprejeti z zadostno varnostjo, saj je za načrtovanje zaplavnega prostora potrebno določiti pretok ob dogodku.

Naslednji dejavnik je prost zadrževalni prostor za dimenzioniran dogodek. Zato je potrebno redno čiščenje ali pa omogočiti samo-praznjenje zaplavnega prostora. Ker moramo volumen zagotavljati, ohranjanje pa ni v celotnem obsegu izpolnjeno ali pa je zadrževalni prostor zapolnjen od predhodnih dogodkov, se iz varnostnih razlogov pri načrtovanju prostornine zadrževanja, dogodek poveča za 30% (*faktor predhodnega zaplavljanja*).

Dimenzioniranje zadrževanja za visoke vode je odvisno od razmerja odlaganja in odnašanja materiala, lahko pa se izvede jezersko zadrževanje. Več o tem se najde pri Rössert [51].

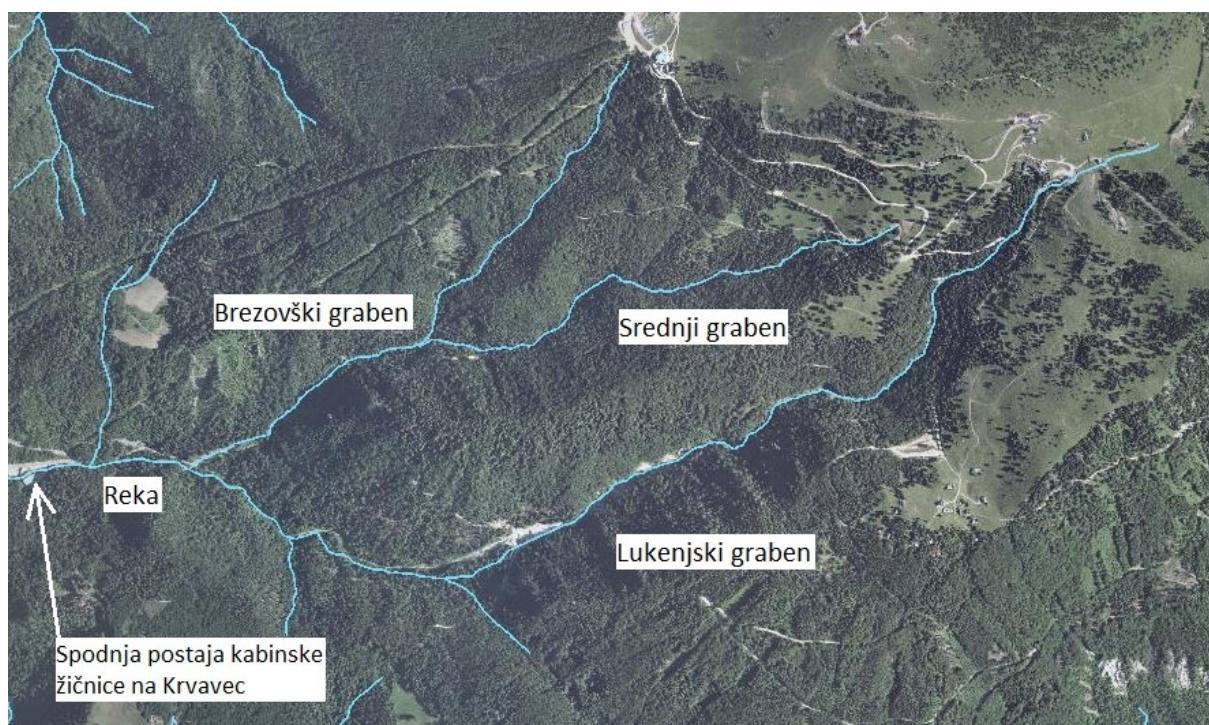
6 PRIMER NAČRTOVANJA UKREPA NA IZBRANEM HUDOURNIKU

6.1 Hidrološka analiza Brezovškega in Lukenjskega grabna v hudourniškem območju potoka Reka

Hidrologija obravnavanega območja je analizirana kot prikaz uporabe metod. Vsi vhodni podatki so demonstrativni in so v čim boljši meri približek realnemu stanju.

6.1.1 Topografska analiza prispevnega območja

Brezovški in Lukenjski graben tvorita zaledje potoka Reka, ki teče pod spodnjo postajo kabinske žičnice na Krvavec. Krvavec je gora, ki leži na severnem robu ljubljanske kotline, v Kamniško-Savinjskih Alpah. Zaradi svoje izpostavljene lege in nadmorske višine (1850m), je pogosto v središču različnih vremenskih vplivov, tako iz severa (Kamniško-Savinjskih Alp) kot tudi iz juga (Ljubljanske kotline). To območje je znano po hitrih vremenskih spremembah, ki pogosto prinašajo večje količine padavin v kratkem času na majhni površini. Zaradi strmih nestabilnih pobočij in obilnih padavin, sta Brezovški in Lukenjski greben dva aktivna hudournika.



Slika 49: Digitalni ortofoto posnetek obravnavanega območja (vir: ATLAS VODA)

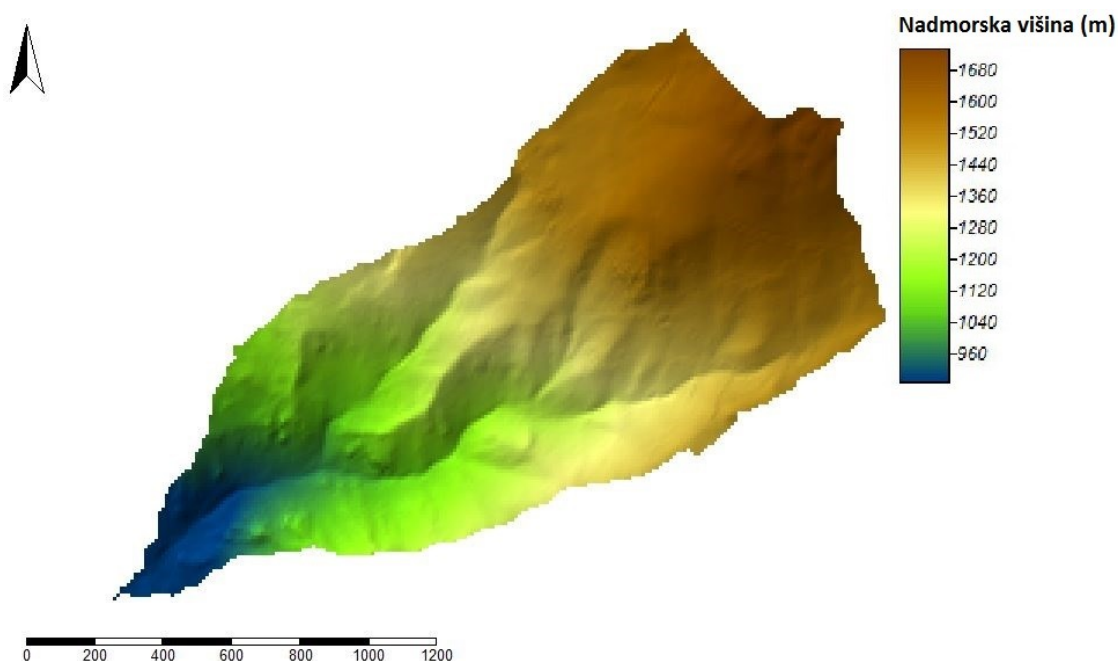
Vhodne podatke za analizo površinskega odtoka sem pripravil s pomočjo GIS orodja SAGA. Topografske karakteristike prispevnih površin Brezovškega in Lukenjskega grabna sem določil na podlagi analize javno dostopnih podatkov LiDAR Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO), in sicer kot digitalni model reliefa (DMR).

Za spodnjo mejo prispevnih območij obeh grabnov sem izbral lokacijo, kjer se strugi združita v potok Reka, približno 500 m nad postajo kabinske žičnice.

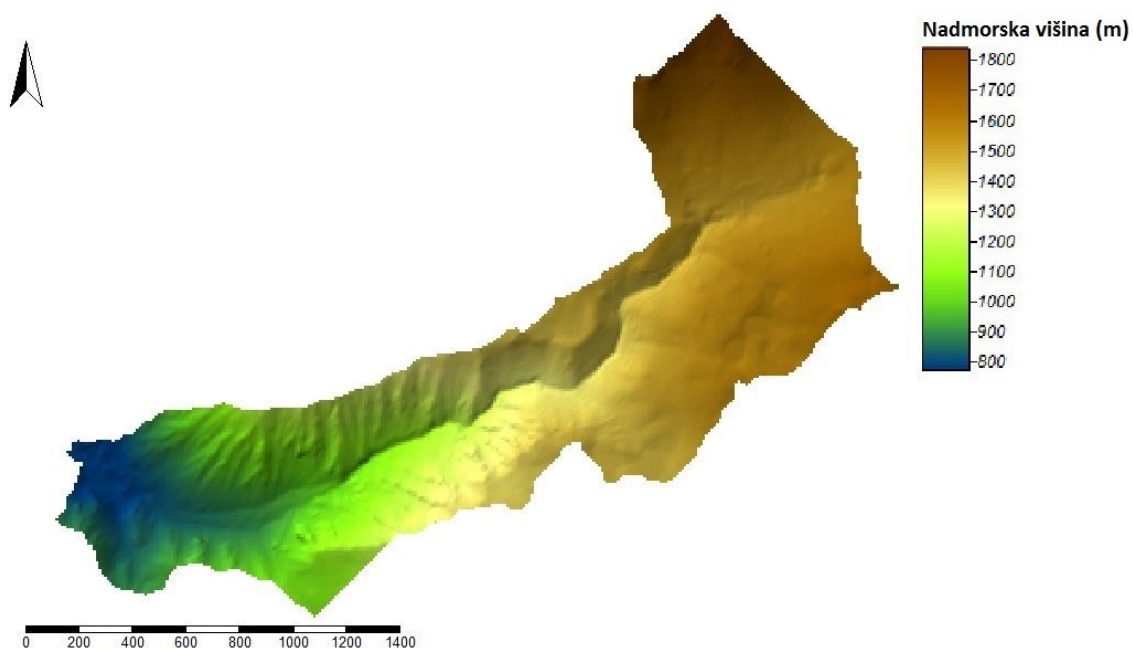
DMR posamezne prispevne površine je prikazan na sliki 50 in 51. Prispevna površina Lukenjskega grabna je nekoliko večja od Brezovškega. Hidravlična dolžina povodja Lukenjskega grabna je daljša od Brezovškega, povprečen naklon terena pa je skoraj enak pri obeh prispevnih površinah (preglednica 8).

Preglednica 8: Topografske značilnosti prispevnih območij

Prispevno območje	Površina	Povprečni naklon terena	Hidravlična dolžina povodja
Brezovski graben	1,80 km ²	56,8 %	3,3 km
Lukenjski graben	2,31 km ²	55,4 %	4,2 km



Slika 50: DMR prispevne površine Brezovškega grabna



Slika 51: DMR prispevne površine Lukenjskega grabna

6.1.1.1 Raba tal in pokrovnost prispevnih površin

Za modeliranje površinskega odтока je potrebno določiti odtočni koeficient (CN) na podlagi rabe tal in pedološke sestave območja. Vrste rabe tal in njihove površine so bile določene s pomočjo vektorske digitalne karte poligonske oblike CORINE Land Cover (CLC). Deleži posamezne vrste rabe tal na prispevni površini vsakega grabna so prikazane na preglednici 9 in 10. Večino pripevne površine obeh grabnov pokriva gozd, 16% območij pa travnik.

Preglednica 9: Deleži rabe tal na prispevni površini Brezovski graben

Raba tal	Površina [m ²]	Površina [km ²]	Odstotek [%]
Gozd	1502762	1,50	83,56
Travnik	295564	0,30	16,44
Skupaj	1798326	1,80	100,00

Preglednica 10: Deleži rabe tal na prispevni površini Lukenjski graben

Raba tal	Površina [m ²]	Površina [km ²]	Odstotek [%]
Gozd	1940018	1,94	83,99
Travnik	369889	0,37	16,01
Skupaj	2309907	2,31	100,00

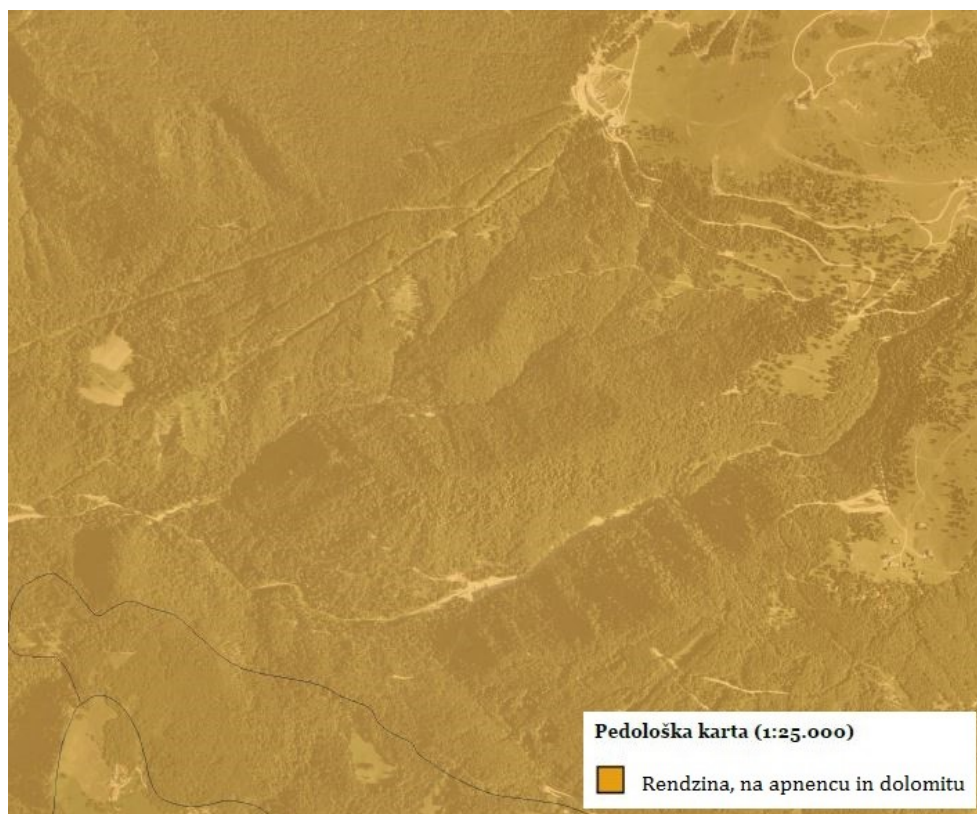
Iz pedološke in geološke karte območja je razvidno, da celotno površino prekriva rendzina na apnencu in dolomitu (slika 52 in 53). Na podlagi tega sem določil hidrološke pogoje in odtočni potencial ter iz preglednice 11 odčital koeficient CN za posamezno rabo tal. Koeficient CN za posamezno prispevno površino sem določil iz odstotka rabe tal (preglednica 12). Višji kot je odtočni koeficient večji bo odtok površinskih voda iz območja.

Preglednica 11: Koeficient CN glede na rabo tal

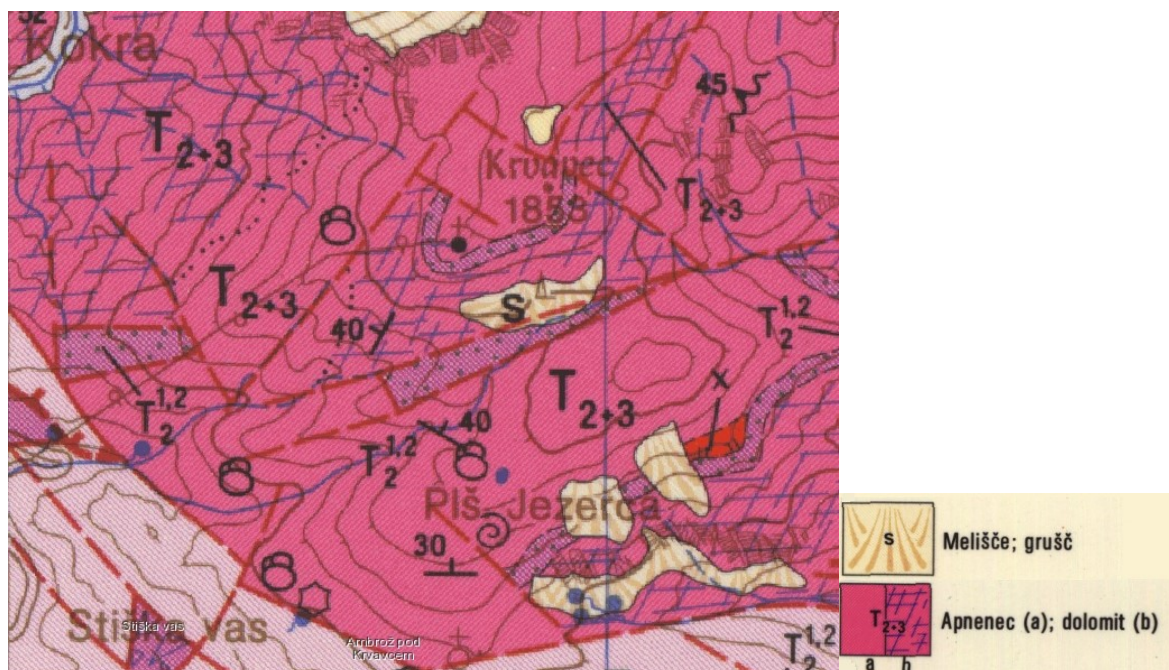
Raba tal	Hidrol. pogoji	Vrednosti CN glede na odtočni potencial			
		A	B	C	D
Pašnik, prerija	slabi	68	79	86	89
	povprečni	49	69	79	84
	dobri	39	61	74	80
Travnik, košen	-	30	58	71	78
Gmicevje	slabi	48	67	77	83
	povprečni	35	56	70	77
	dobri	30	48	65	73
Gozd v kombinaciji s travo (plantaže, sadovnjaki)	slabi	57	73	82	86
	povprečni	43	65	76	82
	dobri	32	58	72	79
Gozd	slabi	45	66	77	83
	povprečni	36	60	73	79
	dobri	30	55	70	77
Kmetija s poslopjem, podeželsko cesto in okoliškimi parcelami	-	59	74	82	86

Preglednica 12: Izračunane vrednosti odtočnega koeficienta CN za posamezno prispevno površino

Prispevna površina	Odtočni koeficient (CN)
Brezovški graben	68,1
Lukenjski graben	68,1



Slika 52: Pedološka karta (vir: Atlas okolja)



Slika 53: Geološka karta (vir: Geološki zavod Slovenije)

6.1.2 Modeliranje površinskega odtoka visokih voda

Modeliranje površinskega odtoka visokih voda sem izvedel v programu HEC-HMS po parametrični metodi SCS (Soil Conservation Service). Izračun padavinskih izgub po tej metodi temelji na klasifikaciji različnih vrst zemljin glede na njihovo prepustnost. Lastnosti zemljine so opisane s koeficientom CN, ki zajema vplive pedologije, rabe tal in predhodne vlažnosti tal. Za izračun površinskega odtoka iz prispevnih površin sem uporabil metodo enotnega hidrograma SCS, ki prav tako kot model padavinskih izgub pri izračunu upošteva koeficient CN in topografske značilnosti terena prispevne površine.

Parameter SCS hidrograma enote je T_p oz. čas zakasnitve:

$$T_p = L^{0.8} \cdot \frac{(S_r + 25.4)^{0.7}}{28.14 \cdot \sqrt{Y}}$$

T_p je čas od težišča histograma efektivnih padavin do vrha enotnega hidrograma v urah, L je hidravlična dolžina povodja v kilometrih, Y predstavlja naklon povodja v odstotkih, parameter S_r pa je zadrževalna zmogljivost povodja (mm). Izračunamo jo po enačbi:

$$S_r = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad [\text{mm}]$$

Preglednica 13: Izračunane vrednosti časov zakasnitve (T_p) za posamezne prispevne površine

Prispevna površina	L [km]	Y [%]	CN	S_r [mm]	T_p [h]	T_p [min]
Brezovski graben	3,3	56,8	68,1	118,98	0,40	23,88
Lukenjski graben	4,2	55,4	68,1	118,98	0,49	29,33

6.1.2.1 Padavine

Osnovni vhodni podatek meteorološkega dela hidrološkega modela je podatek o količini padavin in trajanju padavinskega dogodka. Uporabil sem podatke, ki so na podlagi zgodovinskega vzorca že preračunane za posamezne povratne dobe in so bile v meteorološki model vnesene kot sintetične padavine z določeno povratno dobo. Najbližji padavinski postaja obravnavanem območju sta Zgornje Jezersko in Kamniška Bistrica, a ker so vrednosti ekstremnih padavin na postaji Kamniška Bistrica višje (s tem sem z izračuni na varni strani), sem za podatek o padavinah vzel vrednosti iz te postaje (preglednica 14). Upošteval sem padavine s povratno dobo 100 let in 25 let ter s tem v hidrološkem modelu določil površinski odtok iz prispevnega območja s povratno dobo 100 let (Q_{100}) in 25 let (Q_{25}). Za razporeditev padavin znotraj dogodka sem uporabil metodo Frequency Storm, ki določa razporeditev padavin na osnovi pogostosti pojava (z določeno povratno dobo). Predpostavil sem 24 urno trajanje padavinskega dogodka, da sem z izračunom na varni strani.

Preglednica 14: Višina ekstremnih padavin za povratne dobe, za postajo Kamniška Bistrica (vir: ARSO)

Postaja: KAMNIŠKA BISTRICA
Obdobje: 1977 - 2012

Višina padavin (mm)

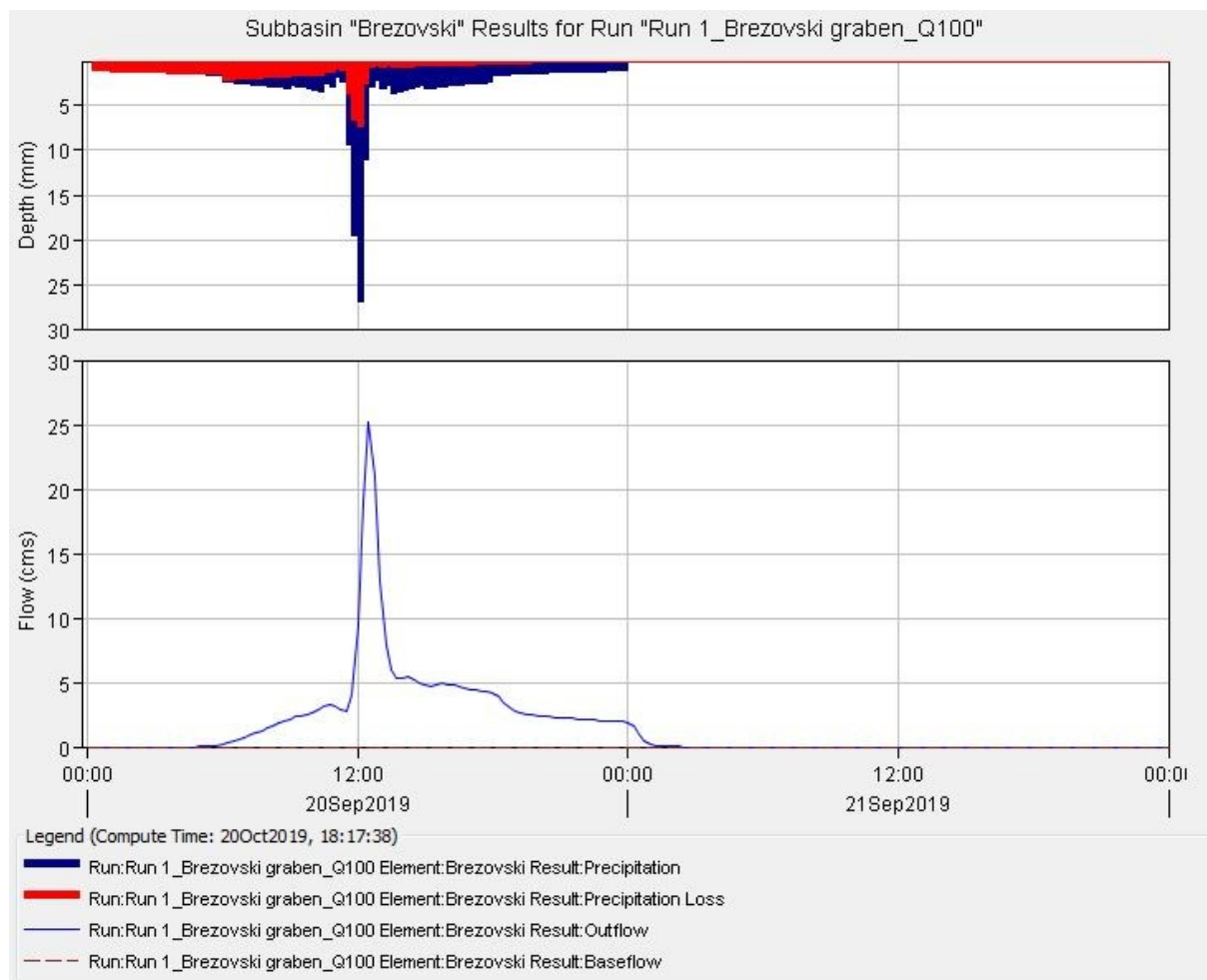
trajanje padavin	POVRATNA DOBA						
	2 leti	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let
5 min	8	11	13	15	17	19	21 mm
10 min	12	16	19	22	24	27	30 mm
15 min	15	21	24	28	31	35	39 mm
20 min	18	24	29	34	38	42	48 mm
30 min	21	30	35	42	48	53	60 mm
45 min	24	35	42	50	57	63	72 mm
60 min	28	38	45	54	60	67	75 mm
90 min	34	44	51	60	66	72	81 mm
120 min	38	48	55	63	70	76	84 mm
180 min	45	57	64	74	81	87	97 mm
240 min	52	66	75	86	94	103	114 mm
300 min	59	75	85	97	107	116	128 mm
360 min	66	82	92	105	115	124	137 mm
540 min	80	101	116	133	147	160	177 mm
720 min	91	117	134	156	172	188	209 mm
900 min	101	130	149	174	192	210	234 mm
1080 min	108	139	159	185	204	224	249 mm
1440 min	119	153	177	206	227	249	277 mm

6.1.2.2 Rezultati

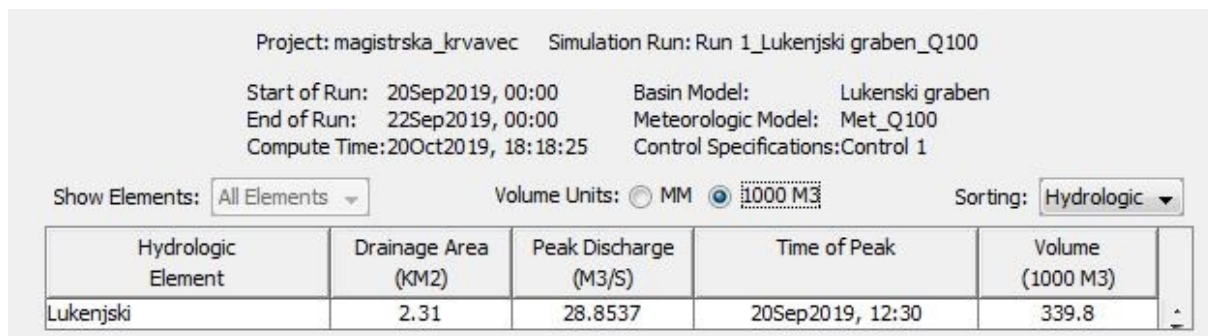
Rezultati hidrološkega modela so hidrogrami odtoka iz prispevnih površin, ki predstavljajo pretok v odvisnosti od časa v vodotoku (slike 55, 57, 59 in 62). Izračunan maksimalni pretok Q_{100} iz prispevne površine Brezovškega grabna znaša $25,2 \text{ m}^3/\text{s}$, celotna prostornina odtoka pa 264900 m^3 vode (slika 54). Izračunan maksimalni pretok Q_{100} iz prispevne površine Lukenjskega grabna znaša $28,9 \text{ m}^3/\text{s}$, celotna prostornina odtoka pa 339800 m^3 vode (slika 56).

Project: magistrska_krvavec Simulation Run: Run 1_Brezovski graben_Q100				
Start of Run: 20Sep2019, 00:00		Basin Model: Brezovski graben		
End of Run: 22Sep2019, 00:00		Meteorologic Model: Met_Q100		
Compute Time: 20Oct2019, 18:17:38		Control Specifications: Control 1		
Show Elements:	All Elements	Volume Units:	MM ☒ 1000 M3	Sorting: Hydrologic
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Brezovski	1.8	25.1787	20Sep2019, 12:30	264.9

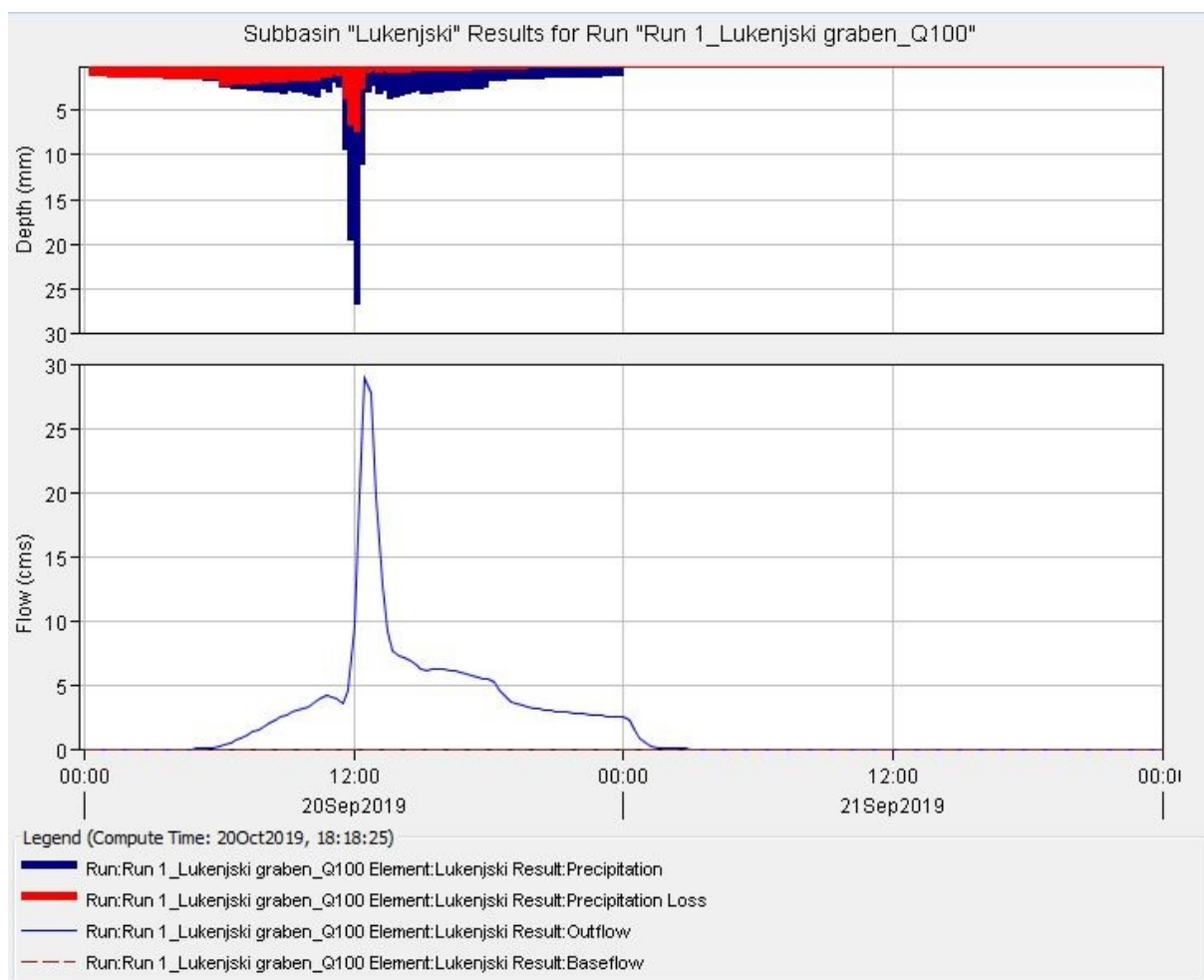
Slika 54: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Brezovski graben pri Q_{100}



Slika 55: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q_{100}) iz prispevne površine Brezovškega grabna

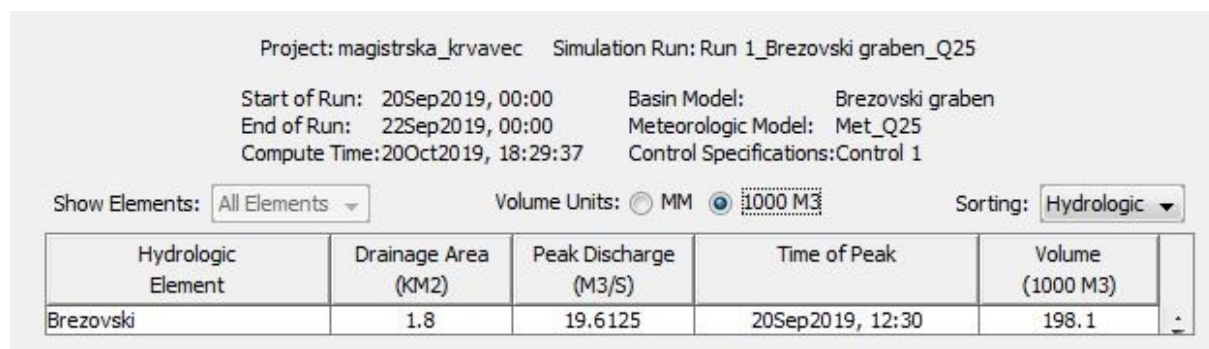


Slika 56: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Lukenjski graben pri Q_{100}

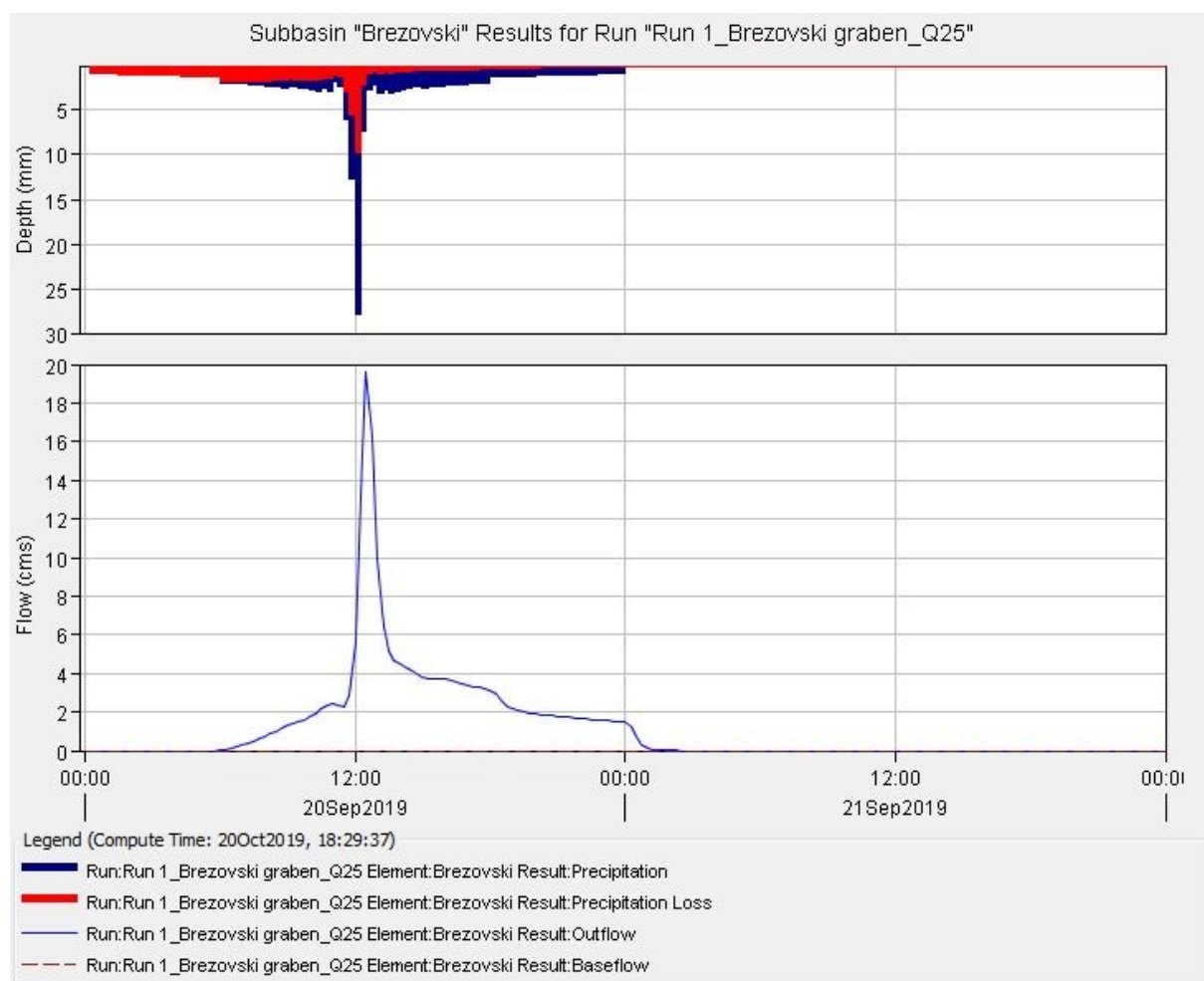


Slika 57: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q_{100}) iz prispevne površine Lukenjskega grabna

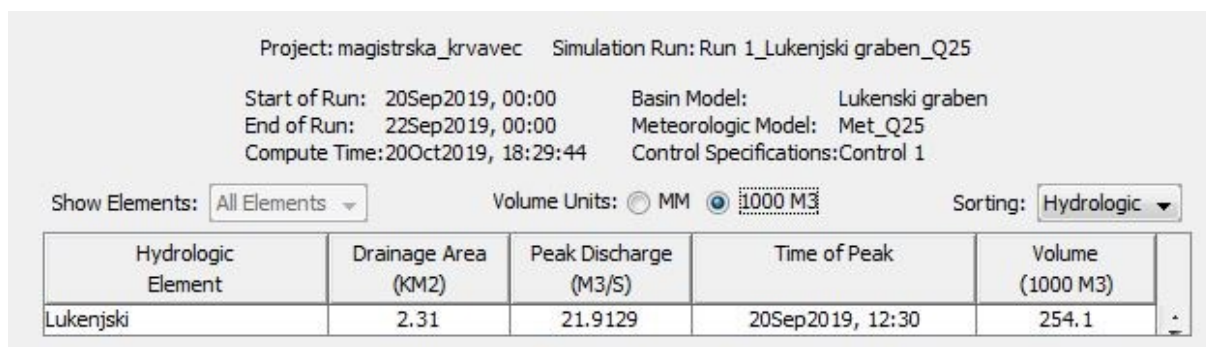
Za potrebe dimenzioniranja odprtine pregrade sem izračunal tudi 25 letne pretoke (Q_{25}) za obe prispevni površini. Izračunan 25-letni pretok Q_{25} iz prispevne površine Brezovškega grabna znaša $19,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 58), Lukenjskega grabna pa $21,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 60).



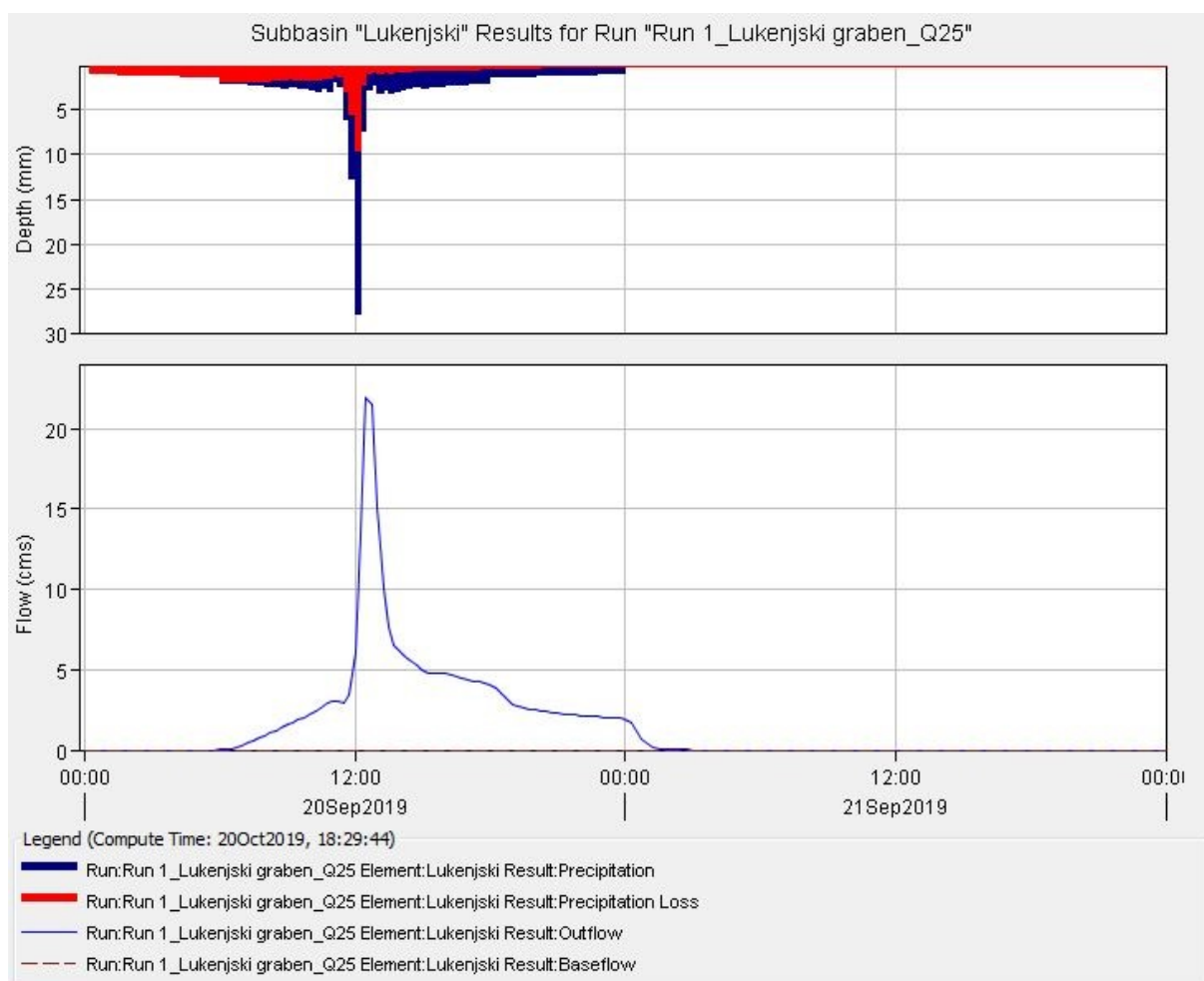
Slika 58: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Brezovski graben pri Q₂₅



Slika 59: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q₂₅) iz prispevne površine Brezovskega grabna



Slika 60: Izpis hidrološkega modela s ključnimi rezultati za Lukenjski graben pri Q₂₅



Slika 61: Hidrogram padavin in maksimalnega površinskega odtoka (Q₂₅) iz prispevne površine Lukenjski grabna

6.1.3 Ocena količine drobirskega toka

Različni avtorji so razvili empirične modele za oceno obremenitve naplavin v hudournikih ob ekstremnih dogodkih. Vsi te modeli imajo skupno to, da so razviti in prilagojeni določenim regijam. Modele je zelo težko premakniti na druga področja, saj ni priporočil o nastavitvah parametrov za druga območja.

Zeller (Rickenmann) [4]

Model po (Zeller, 1985) ima poleg izbirnega koeficienta še en spremenljiv parameter. Ta metoda je najpogostejša za ocenjevanje te preiskave. Osnovni podatki so v veliki meri izpeljani iz meritev eksperimentalnega območja hudournika Alptal (Švica) (prispevno območje veliko 0,75 km²), ki ga upravlja EAFV (Zvezni inštitut za gozdarske raziskave), ali danes WSL (Švicarski zvezni inštitut za gozdne, snežne in krajinske raziskave).

$$M = K \cdot A_c^{0,78}$$

M največji premik ob dogodku [m³]

K hudourniški faktor [-]

A_c prispevna površina [km²]

Hudourniški faktor *Zeller* podaja v območju med 17.000 in 27.000. $K = 27000$, določen po *Rickenmann*-u.

$M = 42.705 \text{ m}^3$ (Brezovski graben)

$M = 51.878 \text{ m}^3$ (Lukenjski graben)

Kronfellner-Kraus [4]

Na podlagi analiz, ki jih je opravil (Kronfellner-Kraus, 1982) na večjih trdih delcih v avstrijski alpski regiji, bi bila lahko povezava med velikostjo prispevnega območja (kot merilo možnih poplavnih obremenitev) in erozijskimi oziroma transportnimi potmi s prevladujočimi razmerji padcev. Koeficient/faktor K , ki določa "hudourniško" učinkovitost hudournika, je odvisen od velikosti prispevne površine. Ta model je bil načeloma izpeljan za ekstremne obremenitve hudournikov s trdimi delci.

$$M = K \cdot A_c \cdot 100 \cdot J_c$$

M največji premik ob dogodku [m³]

K hudourniški faktor [-]

A_c prispevna površina [km²]

J_c srednji padec struge [-]

Obstaja več predlogov za določitev koeficienta K :

"Nizke vrednosti K (približno 500) veljajo za velike, očiščene in dobro prekrите prispevne površine, visoke vrednosti K (okrog 1500) za strma, majhna in srednja vodozbirna območja z obsežnimi erozijskimi žarišči ter nizko ali ranljivim varovanjem tal." (Kronfellner-Kraus, 1982)

Naprej je priporočljiv računski pristop, ki določa K na podlagi velikosti prispevne površine (Kronfellner-Kraus, 1982):

$$K = 1750/e^{0,018 \cdot A_c}$$

Za obe prispevni površini sem izbral hudourniški faktor 1500, saj sta območji strmi, majhni in neočiščeni z obsežnimi erozijskimi žarišči.

$$M = 96.231 \text{ m}^3 \quad (\text{Brezovski graben})$$

$$M = 102.659 \text{ m}^3 \quad (\text{Lukenjski graben})$$

D'Agostino [11]

Metoda namenjena oceni razmerja med drobirskim tokom in morfološkimi ter geološkimi značilnostmi. Analiza je bila izdelana na vzorcih hudournikov, ki ležijo v italijanskih regijah Trentino in Bolzano. Velikost teh prispevnih površin znaša med 0,08 – 82,6 km².

$$M_a = 7 \cdot A_c \cdot J_c^{1,28} \cdot J_G$$

M_a srednji premik ob dogodku [m³]

A_c prispevna površina [km²]

J_c srednji padec struge [-]

J_G geološki indeks [-]

Poleg velikosti prispevne površine in povprečnega naklona glavne struge, D'Agostino vključuje še brezdimenzijski geološki indeks, ki upošteva erodibilnost litologije, ki napaja kanalsko omrežje.

Preglednica 15: Določanje geološkega indeksa

Geologija	Geološki indeks J_G [-]
Kvartarni nanosi (morene, prod, plazovi)	5
Metamorfoza filita in skrilavca	4
Klastične zemljine (lapor, peščenjak)	3
Vulkanske kamnine (bazalt, breča, preperete vulkanske kamnine)	2
Dolomit in apnenčaste kamnine	1
Masivne magmatske in metamorfne skale	0

$$M_a = 52.259 \text{ m}^3 \quad (\text{Brezovski graben})$$

$$M_a = 53.563 \text{ m}^3 \quad (\text{Lukenjski graben})$$

6.2 Dimenzioniranje pregrade

6.2.1 Dimenzioniranje preliva

Preliv pregrade sem dimenzioniral na pretok s 100-letno povratno dobo (Q_{100}), ki znaša 54,03 m³/s. Ker je potrebno upoštevati še varnostno nadvišanje, sem za račun dimenzij uporabil pretok 60 m³/s. Iz enačbe za račun pretoka po *Poleni*-ju, v kateri sem uporabil koeficient preliva (μ) 0,55 (za široke in ostre krone), sem določil širino preliva 5,5 m in višino 2,6 m. Stranici preliva sta v naklonu 1:1.5, krila pregrade pa so predvidena v naklonu 1:10.

6.2.2 Dimenzioniranje odprtine

Odprtina pregrade se dimenzionira na dva načina. Prvi način je glede na hidravliko odprtine, ki mora biti primerno dimenzionirana na pričakovane pretoke. Drug način pa je glede na pričakovano maksimalno velikost zrn plavin.

Hidravlično dimenzioniranje

Splošno priporočilo je, da odprtina prevaja Q_{20} , za lažje računanje in dodatno varnost pa sem se odločil, da dimenzioniram na Q_{25} . Z dodatno varnostjo so zajete tudi izgube, ki se pojavljajo zaradi pretoka plavin.

Za dimenzioniranje odprtine oz. izračun pretočnosti je bila uporabljena enačba *Zollinger, 1983*:

$$Q = \frac{2}{3} \times \mu \times b \times \sqrt{2 \times g} \times (h_1^{3/2} - h_2^{3/2})$$

b širina (premer) odprtine [m]

μ koeficient pretoka (0,65-0,7)

h_1 višina od spodnjega roba odprtine do gladine vode [m]

h_2 višina od zgornjega roba odprtine do gladine vode [m]

Predvidena je reža po celotni višini pregrade. Na podlagi podatkov iz terena in predvidenega volumna zadrževanja je določena višina pregrade 5 m. Za prevajanje maksimalnega pretoka (Q_{25}) je bila na podlagi znane višine določena potrebna širina reže, ki znaša 1 m.

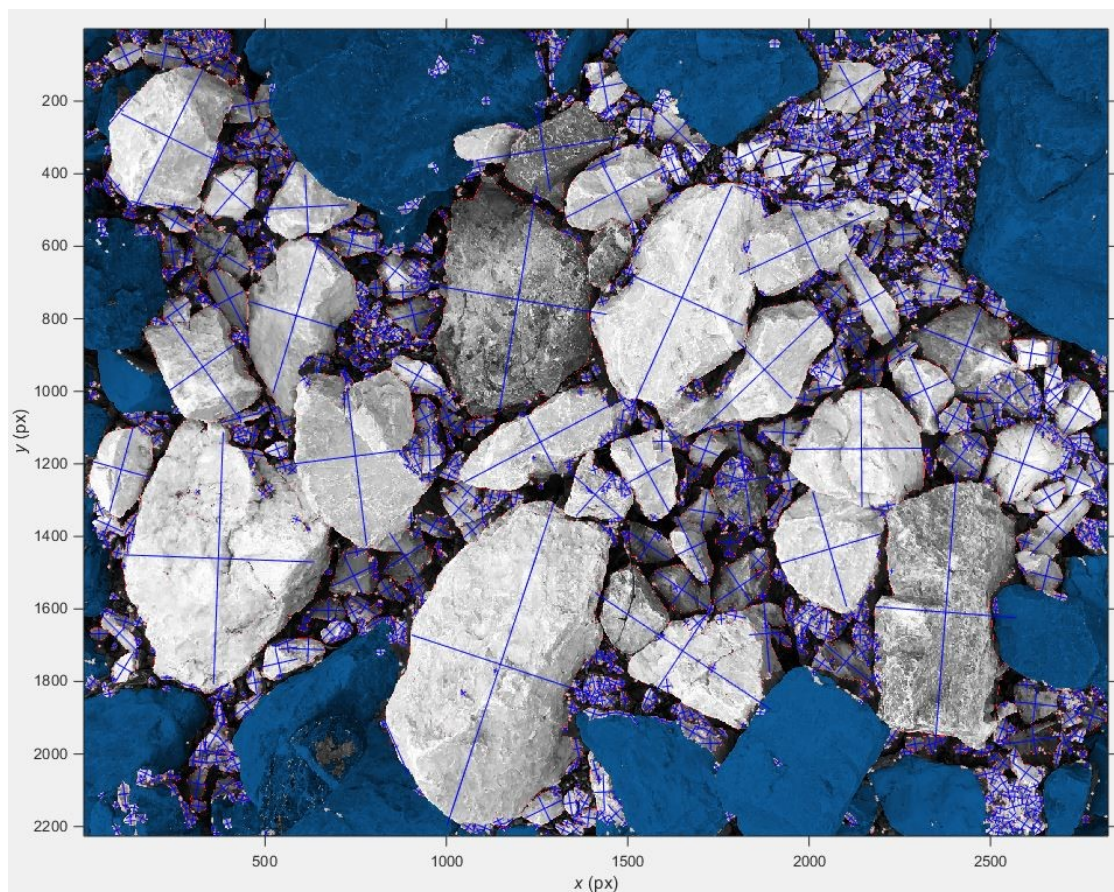
Dimenzioniranje glede na velikost zrn v zaledju

Za potrebe načrtovanja je bilo potrebno določiti zrnastostno krivuljo potencialno nevarnega materiala, katero sem določil s programom BASEGRAIN. Program BASEGRAIN teče v programskem orodju MATLAB in omogoča določanje zrnastostne sestave na podlagi fotografije, ki mora biti iz ptičje perspektive in z elementom, na podlagi katerega pri obdelavi slike lahko določimo merilo. Za potrebe analize je bila uporabljena fotografija (slika 62) odloženega materiala na območju obstoječe pregrade, ki bo tvoril zaplavek predvidene pregrade.

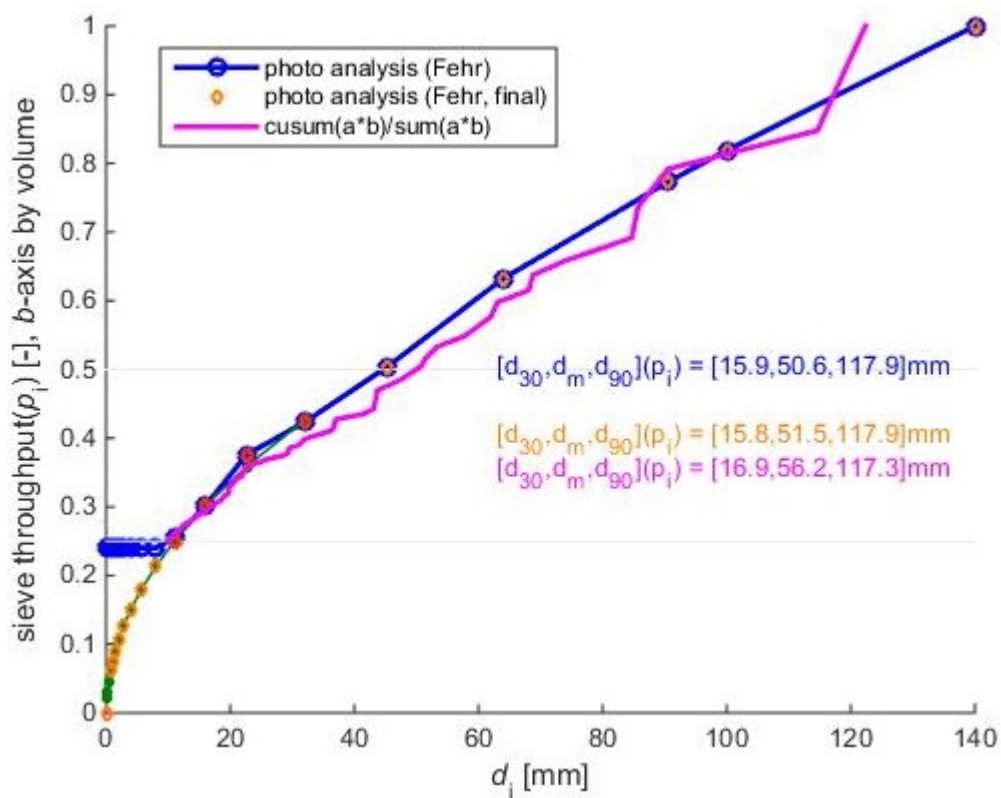
Na podlagi vnesene fotografije testnega območja BASEGRAIN določi zrnastostno krivuljo (slika 64) po metodi Fehr (1987). Za odčitek je izbrana modra krivulja. Velikost srednjega zrna (d_m) je 50,6 mm, velikost zrna pri 30% presejku je 15,9 mm in 117,9 mm pri 90% presejku (d_{90}).



Slika 62: Fotografija naplavin uporabljena za določanje reprezentativnega vzorca



Slika 63: Obdelava fotografije v programu BASEGRAIN



Slika 64: Zrnovostna krivulja narejena s programom BASEGRAIN



Slika 65: Material, ki ni dosegel zaplavne pregrade ob dogodku 2018 (Lukenjski graben)

V analizi so bila upoštevana zrna materiala, ki je trenutno odločen na območju predvidene zaplavne pregrade. To je material, ki se je odlagal po čiščenju naplavin, ki so se odložile med dogodkom maja 2018. Na sliki 65 je prikazan material, ki ob dogodku 2018 ni dosegel obstoječe zaplavne pregrade in bo ob naslednjem večjem hudourniškem dogodku aktiviran. Na sliki 66, ki je bila posneta maja 2018, po dogodku, so vidni nanosi v obliki masnega toka, ki so zasuli spodnjo postajo žičnice na Krvavec ter cesto in parkirišče. Med večjo količino odloženega materiala (zemljina, grušč, skalnati bloki, debla in korenine), ki se je transportiral iz zaledja, so tudi relativno velike frakcije kamnin (večji skalnati bloki).



Slika 66: Akumulacija materiala okoli postaje žičnice po hudourniškem dogodku 30.5.2018 (foto: PGD Cerklje na Gorenjskem)

Iz zgornjih fotografij je razvidno, da je material, ki se je transportiral ob dogodku maja 2018 bolj grobozrnat, kot material, ki se proži in transportira sedaj.

Dogodek maja 2018 je bil posledica res ekstremnih padavin, zato je taka situacija pričakovana tudi v prihodnje. Poleg tega je aktivnih kar nekaj erozijskih območij, ki bi prožila ob večjih količinah padavin.

Kot vodilo za minimalno širino reže daje Leys trojni premer velikosti zrna. Ker je po zrnnavostni krivulji maksimalna velikost zrna 140 mm in vemo, da je maksimalno zrno ob ekstremnih dogodkih vsaj še enkrat večje, sem za dimenzioniranje uporabil zrno velikosti 300 mm, kar po Leys-u določi minimalno širino reže 0,9 m.

Obe metodi, hidravlično dimenzioniranje kot tudi metoda dimenzioniranja glede na velikost zrna, dajeta podoben rezultat, zato sem se odločil, da uporabim širino reže predvidene pregrade 1 m.

6.2.3 Dimenzioniranje podslapja

Dolvodno od pregrade je predvidena ureditev podslapja, katerega dolžino sem izračunal po enačbi Angerholzer:

$$L_T = (v_0 \times \sqrt{2 \times g \times h}) \times \sqrt{\frac{\Delta H}{g}} + h$$

ΔH prepadna višina [m]

h višina toka v prelivni sekciji [m]

v_0 dotočna hitrost [m/s]

Hitrost dotoka je izračunana na podlagi znanega pretoka Q_{100} in površine prelivne sekcije, in znaša 2,25 m/s. Prepadna višina je enaka višini pregrade (5 m). Višina toka v prelivni sekciji

je 2,6 m, kolikor je tudi višina prelivne sekcije. Iz enačbe tako dobimo dolžino podslapja 14,1 m.

Za načrtovanje širine podslapja oz. umirjevalnega bazena v območju podporne pregrade ali pragu se v praksi predlaga 1,5-kratna širina dna prelivne sekcije, kar pomeni, da je predvidena širina 8,25 m.

6.3 Opis predlaganih rešitev

Vsi parametri pregrade, opisani v nadaljevanju, so izračunani in s tem določeni, ostale karakteristike pregrade (debelina pregrade, krila in temelj) bi bilo potrebno določiti z ustreznimi analizami, ki pa niso predmet tega magistrskega dela.

V Prilogi (G.1, G.2 in G.3) so prikazani vsi sestavni deli pregrade.

6.3.1 Zaplavna pregrada

Zaradi dostopnosti lokacije je predvidena režasta pregrada, ki ob manjših pretokih omogoča pretok vode in sedimentov. Odprtina je dimenzionirana, da pregrada zadrži večja zrna. Za tako vrsto pregrade sem se odločil, da bi omogočil transport drobnih plavin (s tem je zmanjšan vpliv pregrade na povečanje erozije dolvodno), kot tudi samočistilno sposobnost pregrade.

Pregrada je v celoti iz armiranega betona. Lice AB zidu je obloženo s kamnom v betonu.

Na sredini je reža širine 1,0 m in višine 5,0 m, kar je tudi višina same pregrade. Višina pregrade je bila izbrana na podlagi topografskih lastnosti in volumna zadrževalnega prostora. V primeru, da bi želeli zadržati ves volumen drobirskega toka (izračunan v poglavju 6.1.3), bi bila potrebna višja pregrada. Ker pa je predvidena režasta pregrada se del drobirskega toka odteče skozi režo pregrade, zato je lahko volumen zadrževanja manjši.

Prelivno polje širine 5,50 m je trapezne oblike z naklonom stranic 1:1,5. Širina preliva AB zidu na vrhu (2,60 m nad robom preliva) znaša 13,30 m. Preliv je obložen s 30 cm debelo kamnito zložbo v betonu. Kota preliva skupaj z oblogo je na 690,00 m.n.v.

Temelj ima na zračni strani peto, ki preprečuje spodkopavanje pregrade, na vodni strani pa je temelj podaljšan. V primeru nevarnosti proti zdrs se na robu temelja izvede zob, ki preprečuje zdrs pregrade. Temelj pregrade je na koti 684,70 m.n.v, med brežinami na gorvodni in dolvodni strani se peta temelja tlakuje s 30 cm debelo oblogo iz kamna v betonu.

Odprtina oz. reža se po potrebi zavaruje pred obrusom z oblogo iz kovanega železa, ki se vgradi v opaž še med gradnjo, da so plošče poravnane z zidom.

6.3.2 Zadrževalni bazen

Brežine zadrževalnega prostora so oblikovane med naklonom 1:1 in 1:1,5. Dno se oblikuje v naklonu, tako da se naklon proti zaplavni pregradi zmanjšuje. Širina dna je od 13,30 m pri zaplavni pregradi do 60,90 m na golvodnem delu, preden se strugi ločita. Predviden volumen praznega zadrževalnega bazena 5 m visoke pregrade je 31.000 m³. Glede na izračune, bi bil potreben večji volumen zadrževalnega bazena, toda zaradi utesnjenih koridorjev to ni mogoče izvesti. V primeru, da bi želeli povečati volumen zadrževalnega bazena, bi bilo potrebno izvesti višjo pregrado.

6.3.3 Podslapje

Dolvodno od predvidene zaplavne pregrade se zavaruje dno in brežine s kamnito zložbo v betonu, v dolžini 14,6 m. Višina zavarovanja je 3,5 m, zavarovanje se naveže na krila dolvodnega armirano-betonskega talnega pragu, ki služi kot zaključni prag podslapja nove pregrade. Širina preliva zaključnega pragu je 8,3 m, višina preliva je 3,6 m, v naklonu $n = 1:1,2$. Kota preliva je 685,00 m.n.v.

7 ZAKLJUČEK

Varstvo pred naravnimi nevarnostmi je interdisciplinarna naloga in zahteva visoko stopnjo strokovnega znanja vseh sodelujočih strokovnjakov. Pri načrtovanju varovalnih sistemov je še posebej pomembno, da pravilno ocenimo značilnosti hudourniškega območja. Kljub modelom za določanje obremenitev, opisanim v tem magistrskem delu, je učinek večinoma neznan in ga mora v konkretnih primerih določiti strokovnjak. Najpomembnejši pojav je drobirski tok, glede na katerega bodo v prihodnosti še vedno potrebne raziskave.

Pri urejanju hudournikov in erozijskih območij je še zlasti pomembno, da se stalno zavedamo, da urejemo hudournike in erozijska območja kompleksno, torej z gozdno-kulturnimi, tehničnimi, biotehničnimi in pravno-družbenimi ukrepi. Če želimo na teh območjih gospodariti na ekološki osnovi, na naravi čim bolj prilagojen način, je potrebno celovito načrtovati vse vrste ukrepov in jih potem postopno izvajati, spremljati njihove učinke ter jih po potrebi dopolnjevati. Za to so potrebni redni pregledi ureditvenih in spremljanje kritičnih odsekov. Pri urejanju hudournikov so najpomembnejša redna vzdrževalna dela na strugah, kjer sproti saniramo vse poškodbe in utrjujemo vse šibke dele potokov. Pri tem nam je v pomoč hudourniška nadzorna služba, ki sistematično pregleduje območja. Pri tem uporabljamo take tipe zavarovanj, ki so čimbolj prilagojeni okolici.

Delo strokovnega inženirja se ne konča z oddajo načrta. Potrebno je stalno okolju prilagojeno reševanje problemov med samo operativno izvedbo del ter spremljanje uspešnosti ukrepanja. Stalen nadzor in dopolnjevanje izvedenih ukrepov naj bi prispevala k čimbolj celovitim sonaravnim rešitvam. Smotrno urejanje hudournikov in erozijskih območij zahteva tudi stalna in zadostna (ustrezna, primerno visoka) finančna sredstva.

S finančnimi zmožnostmi države oz. lokalnih skupnosti (občin) ni mogoče popolnoma urediti hudourniških strug. Škode ob izrednih nalivih se bodo še pojavljale, jih pa lahko znatno zmanjšamo, predvsem s premišljeno urbanizacijo na hudourniških območjih, z zakonodajo, ki ne bo samo zahtevala reda pri gospodarjenju s kmetijskimi in gozdnimi površinami, ampak tudi omogočala takojšnje kaznovanje tistih, ki se tega ne bodo držali. Take kršitve obravnava pristojna inšpekcijska služba. Škodam se bomo izognili le z rednim vzdrževanjem naravnih strug, preprečevanjem erozije v hudourniških zaledjih ter s krajšimi regulacijami v naseljih.

V Sloveniji se še ni oblikoval in sprejel nacionalni standard za gradnjo, načrtovanje in vzdrževanje varovalnih objektov na področju hudourništva. Standarde iz tujine (npr. avstrijske) bi lahko uporabili vsaj kot strokovno priporočilo, če bi ta standard prevedli v slovenski strokovni jezik.

Urejanje hudournikov kot strokovna dejavnost na področju gradbene stroke se tesno prepleta z gozdarstvom, kar je tradicija v hudourništvu, saj je velik del prispevnih površin hudournikov v Sloveniji prekrit z gozdom. V preteklosti so področje hudourništva strokovno pokrivali predvsem gozdarski inženirji. Z nastankom nove izobraževalne smeri vodarstva in komunalnega inženirstva leta 1998 na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo na Univerzi v Ljubljani, se to področje spreminja. Danes to področje urejajo inženirji vodarstva, saj je žal gradbenih inženirjev hidrotehnike vse manj. V praksi urejanja hudournikov bi morali obe stroki, tako vodarstvo kot tudi gozdarstvo, bolje sodelovati. Za celovito reševanje in preprečevanje katastrofalnih dogodkov niso dovolj le ukrepi v sami strugi hudournika. Potrebno je tudi urejanje povirnih (gozdnatih) delov. Pri hudourniških vodotokih je predvsem pomembno čiščenje zalednih gozdov, kjer se kopiči podrti drevje, katero lahko že ob manjših dogodkih vpliva negativno.

Priporočila in enačbe iz avstrijske strokovne monografije (Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J., Miklau, F. R. 2009. *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren*), sem poskusil uporabiti na realnem primeru. S podatki pridobljenimi na terenu je lahko strokovna monografija v pomoč načrtovalcu pri izbiri tipa prečnega objekta. Pri izbiri prečnega objekta pa se seveda ne smemo zanašati le na priporočila, saj je veliko različnih dejavnikov odvisnih od same lokacije in lastnosti obravnavanega območja. Pri izbiri so nam v veliko pomoč pretekli dogodki, na podlagi katerih lahko določimo splošen vzorec delovanja hudournika. Za to je bistvenega pomena spremljanje stanja hudournikov in arhiviranje popisa hudourniških dogodkov. Še vedno pa je največji problem pridobivanje meteoroloških podatkov na takih območjih, saj so hudourniška območja majhna in na njih ni spremljanja padavin. Ta problem rešujemo z empiričnimi enačbami, katerih avtorji so jih napisali iz izkušenj in meritev na določenih hudournikih po svetu. Zato je naloga načrtovalca, da smotrno izbere enačbo za račun pretoka plavin in vode, ki bo dala čim bolj verodostojne rezultate. Res pa je, da je izbira najprimernejše enačbe odvisna od izkušenj načrtovalca, zato se načrtovalci pogosto specializirajo na določena območja, ki so po lastnostih porečja med seboj dokaj podobna.

V mojem primeru so rezultati pretoka plavin in njihov celoten volumen, ki bi se lahko sprožil ob hudourniškem dogodku, dokaj veliki. Glede na ocene geologov so rezultati nekaterih enačb tudi 10-kratnik. Zaradi različnih spremenljivk dogodki niso nikoli enaki, lahko pa so podobni. Zato stremimo k tem, da poskusimo določiti največjo vrednost znotraj povprečja. Seveda pa pri dimenzioniranju prečnih objektov ni pomembno le kakšen dogodek izberemo za referenčni, ampak tudi lastnosti lokacije, kjer bo objekt stal in pa finančne zmožnosti.

Objekt sem poskusil zasnovati tako, da bo najbolj optimalen, toda brez finančnega dela. Po končani zasnovi sem ugotovil, da je predviden objekt, ki naj bi stal na isti lokaciji, dokaj podoben mojemu. Sama pregrada je enakega tipa in podobnih dimenzij, razlika je le v volumnih zadrževalnih prostorov. V mojem primeru je zadrževalni prostor dosti večji, kot je predviden v izvedbenem projektu. Razlog za to je, da sem poskusil, glede na lastnosti terena, omogočiti čim večjo kapaciteto zadrževanja, saj sem po empiričnih enačbah dobil dokaj velike količine plavin, ki dosežejo zadrževalni prostor.

Iz izkušenj, ki sem jih pridobil v praksi in tekom pisanja tega magistrskega dela, sem ugotovil, da je za načrtovanje skoraj nujno potrebno sodelovanje več strokovnjakov različnih strok. Monografija je uporabna kot vodilo in usmeritve k izbiri tipa objekta in načrtovanja. Pri načrtovanju priporočam modeliranje z različnimi programi, kateri se počasi nadgrajujejo in omogočajo upoštevanje večjega števila spremenljivk, ki vplivajo na obnašanje vode in plavin. Kljub temu pa modeliranje premeščanja plavin še vedno za korak ali dva zaostaja za modeliranjem toka vode.

VIRI

- [1] Agostini, R., Bizzarri A., Masetti, M., Papetti, A. Flexible gabion and Reno mattress structures in river and stream training works. Bologna: Officine Maccaferri.
- [2] Bathurst, J. C., Graf W. H., Cao H. H. 1982. Initiation of Sediment Transport in Steep Channels with Coarse Bed Material. In: EUROMECH 156 (ed.), Mechanics of Sediment Transport: 207–213.
- [3] Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J., Miklau, F. R. 2009. Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Berlin, Wilhelm Ernest & Sohn: 211 str.
- [4] Bertschi, W., Hunziker, G., Kienholz, H. 2008. Empirische Modelle zur Geschiebefrachtabeschätzung. Interpraevent, Conference Proceedings, 1: 261-269.
- [5] Bezzola, G. R. 2002. Fließwiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 173.
- [6] Böll, A. 1997. Wildbach- und Hangverbau. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Nr. 343. Birmersdorf.
- [7] Böll, A., Gerber, W., Graf, F., Rickli, C. 1999. Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Rensenverbau. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmersdorf.
- [8] Czerny, F. 1971 Wildbachsperrren aus Beton und Stahlbeton – eine Studie über deren Belastung, Konstruktion, Berechnung und Bemessung. Wien: VÖZ.
- [9] Czerny, F. 1965. Die dreiseitig gelagerte Rechteckplatte. In: Stahlbau und Baustatik. Wien, New York: 220–241.
- [10] Czerny, F. 1998. Wildbachsperrren aus Beton und Stahlbeton, Sonderheft Zement Beton. Wien.
- [11] D'Agostino, V., Marchi, L. 2000. Debris Flow Magnitude in the Eastern Italian Alps: Data Collection and Analysis. Physics and Chemistry of the Earth Part c Solar Terrestrial & Planetary Science. December 2001, 9: 657-663.
- [12] DIN 1054. 2005-01. Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Berlin.
- [13] DIN 19663. 1985-06. Wildbachverbauung, Begriffe – Planung und Bau. Berlin.
- [14] Drobir, H. 2002. Skriptum Talsperren, TU Wien.
- [15] Eidgenössisches Amt für Straßen- und Flussbau. 1973. Dimensionierung von Wildbachsperrren aus Beton und Stahlbeton. Bern.
- [16] Florineth, F. 2004. Pflanzen statt Beton – Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Berlin.
- [17] Gotthalmseder, P. 1998. Bautypen der Geschiebebewirtschaftung. Wildbach- und Lawinenverbau 136: 81–102.

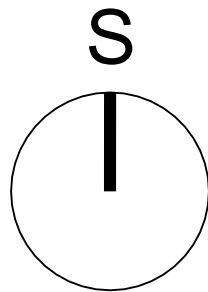
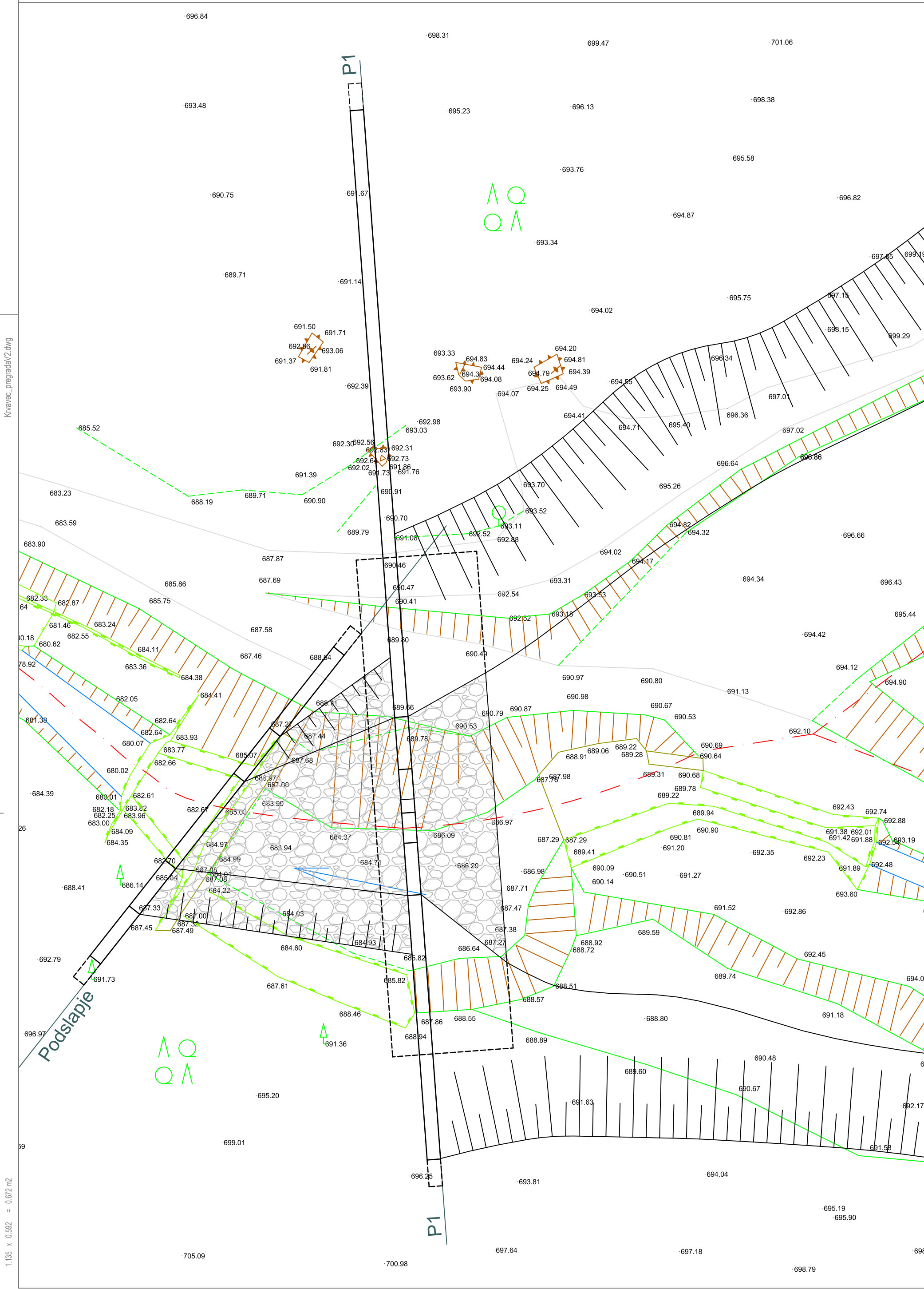
- [18] Hampel, R. 1960. Bruchversuch an einer Bogensperre der Wildbachverbauung. Österreichische Wasserwirtschaft 12 8/9: 187.
- [19] Hampel, R. 1974. Die Wirkung von Wildbachsperren. Wildbach- und Lawinenverbau 1: 1–79.
- [20] Hampel, R. 1990. Formelsammlung und Rechenschema für Wasser und Geschiebe in Wildbächen. Wildbach- und Lawinenverbau 114: 167–175.
- [21] Hübl, J. 2006. Studienunterlagen Wildbachverbauung, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien.
- [22] Hübl, J. 2007. Ereignisdokumentation in Wildbächen – Systematik und mögliche Ergebnisse. Wiener Mitteilungen: 69–84.
- [23] Hübl, H., Fiebiger, G. 2005. Debris-flow mitigation measures; Jakob, Hungr (Eds.): Debris flow Hazards and Related Phenomena. Praxis Books in Geophysical Sciences; Springer: 445–487.
- [24] Hübl, J., Fuchs, S., Agner, P. 2007. Optimierung der Gefahrenzonenplanung: Weiterentwicklung der Methoden der Gefahrenzonenplanung; IAN Report 90; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien, im Auftrag des BMLFUW, Wien.
- [25] Hübl, J., Holzinger, G., Wehrmann, H. 2003. Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbächen: Klassifikation von Wildbachsperren, WLS Report 50 Band 2. Im Auftrag des BMLFUW, Wien (unveröffentlicht). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- [26] Hübl, J., Holzinger, G., Wehrmann, H. 2003. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VC7a. Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstlichen Ingenieurwesen: 85 str.
- [27] Jenni, M., Reiterer, A. 2002. Bewirtschaftung von Murbächen durch Absturzbauwerke.
- [28] Jesenovec, S. 1995. Poguba razigranosti: 110 let organiziranega hudourničarstva na Slovenskem: 1884-1994. Ljubljana, PUH – Podjetje za urejanje hudournikov: 276 str.
- [29] Jörgensen. 1938. Betrachtungen über den Entwurf von Gewölbestaumauern mit veränderlichem Mittelpunkt. Deutsche Wasserwirtschaft 2.
- [30] Kettl W. 1973. Sortierwerke im Pongau: Theorie, Erfahrungen; Wildbach- und Lawinenverbau.
- [31] Kettl, W. 1984. Vom Verbaungsziel zur Bautypenentwicklung – Wildbachverbauung im Umbruch. Wildbach- und Lawinenverbau, Sonderheft: 61–98.
- [32] Kirnbauer, R. 2003. Mathematische Modelle zur Berechnung des Niederschlag-Abflussprozesses (NA-Modelle); Kompendium zu ETAlpErosion, Transport in alpinen Systemen. Hrsg. Projektteam ETAlp (BMLFUW).
- [33] Koutoulas D. 1971. Bemerkungen zur Hydraulik des Sperrenkolks. Mitteilung der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 102: 173–196.

- [34] Krimpelstätter L. 1998. Ausgestaltung von Rostauflagen bei Sortierwerken. Wildbach- und Lawinenverbau 136: 107–111. Wildbach- und Lawinenverbau 148: 11–19.
- [35] Kronfellner-Kraus, G. 1970. Über offene Wildbachsperrren. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 88: 7–76.
- [36] Kronfellner-Kraus, G. 1998. Deformierbare Wildbachsperrren aus Stahl, In: Festschrift Friedrich Czerny. Veröffentlichungen des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau, BOKU Wien 37.
- [37] Leys, E. 1968. Zum Bau der Gewölbesperrren in der Wildbachverbauung. Österreichische Wasserwirtschaft 11/12: 243.
- [38] Leys E. 1973. Das Geschiebe und das Wildholz als Bemessungswert für die Öffnungsweite bei den Entleerungsbauwerken in der Wildbachverbauung. Mitteilung der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien. 102: 317–333.
- [39] Leys E. 1976. Die technischen und wirtschaftlichen Grundlagen in der Wildbachverbauung der großdoligen und der kronenoffenen Bauweise. Dissertation an der Universität für Bodenkultur. Wien.
- [40] Loat R. Meier. 2003. Wörterbuch Hochwasserschutz; Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Bern.
- [41] Mikoš, M. 2008. Osnove hudourništva, skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 52 str.
- [42] Mikoš, M. 2009. Osnove hudourništva – varstvo pred hudourniki in zemeljskimi plazovi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 217 str.
- [43] Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov – skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 182 str.
- [44] Molin, G. 1988. Die Halbkreisringplatte. In: Beton- und Stahlbetonbau, S. 85–88. Berlin: Ernst & Sohn.
- [45] ONR 24 800: Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffsbestimmungen und Klassifizierungen. Österreichisches Normungsinstitut. Ausgabe: 2009-02-01.
- [46] Pasche, E. 2007. Skript Wasserbau – WS 2006/07, TU Hamburg-Hamburg.
- [47] Projektteam ETAlp. 2003. Erosion, Transport in alpinen Systemen, Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. Projektbericht, Hrsg. BMLFUW, Wien.
- [48] Rickenmann D. 1990. Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich: 103.
- [49] Rickenmann D. 1996. Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Wasser, Energie, Luft, 88 (11/12): 298–304.
- [50] Rickenmann, D., Brauner, M. Ansätze zur Abschätzung des Geschiebetransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen; Kompendium zum Projekt ETALP, BMLFUW, Wien.
- [51] Rössert, R. 1984. Hydraulik im Wasserbau, 6. izdaja. Oldenbourg.

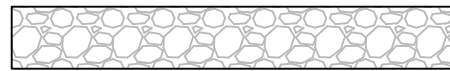
- [52] Rudolf-Miklau, F. 2001. Untersuchungen an kohäsionslosen Sedimenten in kalkalpinen Wildbächen der Steiermark (sterreich). Dissertation, Universität für Bodenkultur. Wien.
- [53] Rudolf-Miklau, F.; Ellmer, A.; Gruber, H. et al. 2006. Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation: Teilbericht der Wildbach- und Lawinenverbauung. Hrsg.: Bundesministerium für Landund Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.
- [54] Schmidt, M. 1982. Hydraulik. In: Bretschneider H., Lecher K., Schmidt M. (Hrsg.), Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Hamburg, Berlin: Paul Parey: 185–235.
- [55] Shields, A. 1936. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau, Berlin 26.
- [56] Smart G., Jäggi M. 1983. Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 103.
- [57] Wasserbautenförderungsgesetz. 1985. BGBl. 148/1985, Österreich.
- [58] Wehrmann, H. 2000. Vergleichende Betrachtung von Wildbachverbauungssystemen im Pinzgau. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur. Wien.
- [59] Whittaker, J. G., Jäggi, N. 1986. Blockschwellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 68.
- [60] Wartmann, S., Kästli, A., Roth, A. 2004. Schutz gegen Murgang mit flexiblen RingnetzBarrieren, Geobrug Schutzsysteme, Romanshorn.
- [61] Zalokar, M. 2015. Prečni objekti na hudournikih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Zalokar): 68 str.
- [62] Zeller, J. 1971. Bemerkungen zur Hydraulik des Sperrenkolks. Mitteilung der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 102: 197–218.
- [63] Zeller, J. 1985. Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. Wasser, Energie, Luft 77 (7/8): 246–251.

PRILOGE:

- G.1 Ureditvena in višinska situacija
- G.2 Prečna profila pregrade in podslapja
- G.3 Vzdolžni profil pregrade in podslapja



LEGENDA:



Kamnita zložba v betonu



Konture zgradb (novo)



Os



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za arhitekturo
in geodézijo

Predmet:
Magistrsko delo

Naslov projekta:
Klasifikacija hudourniških pregrad s primerom uporabe

Faza:
Idejna zasnova

Vrsta risbe:
Ureditvena in višinska situacija

Izdelał:
Rok Indihar

Mentor:
prof. dr. Matjaž Mikoš

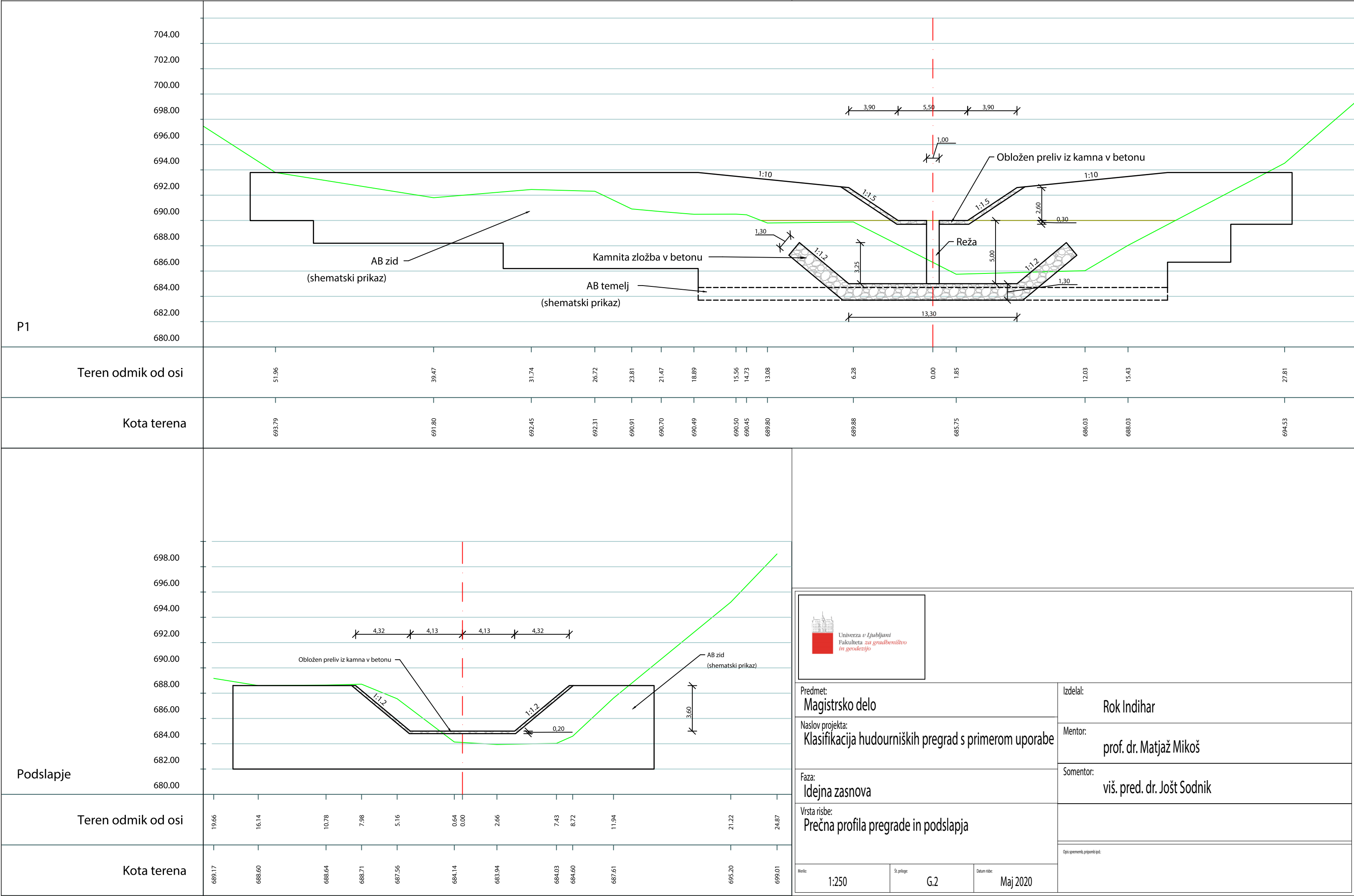
Somentor:
viš. pred. dr. Jošt Sodnik

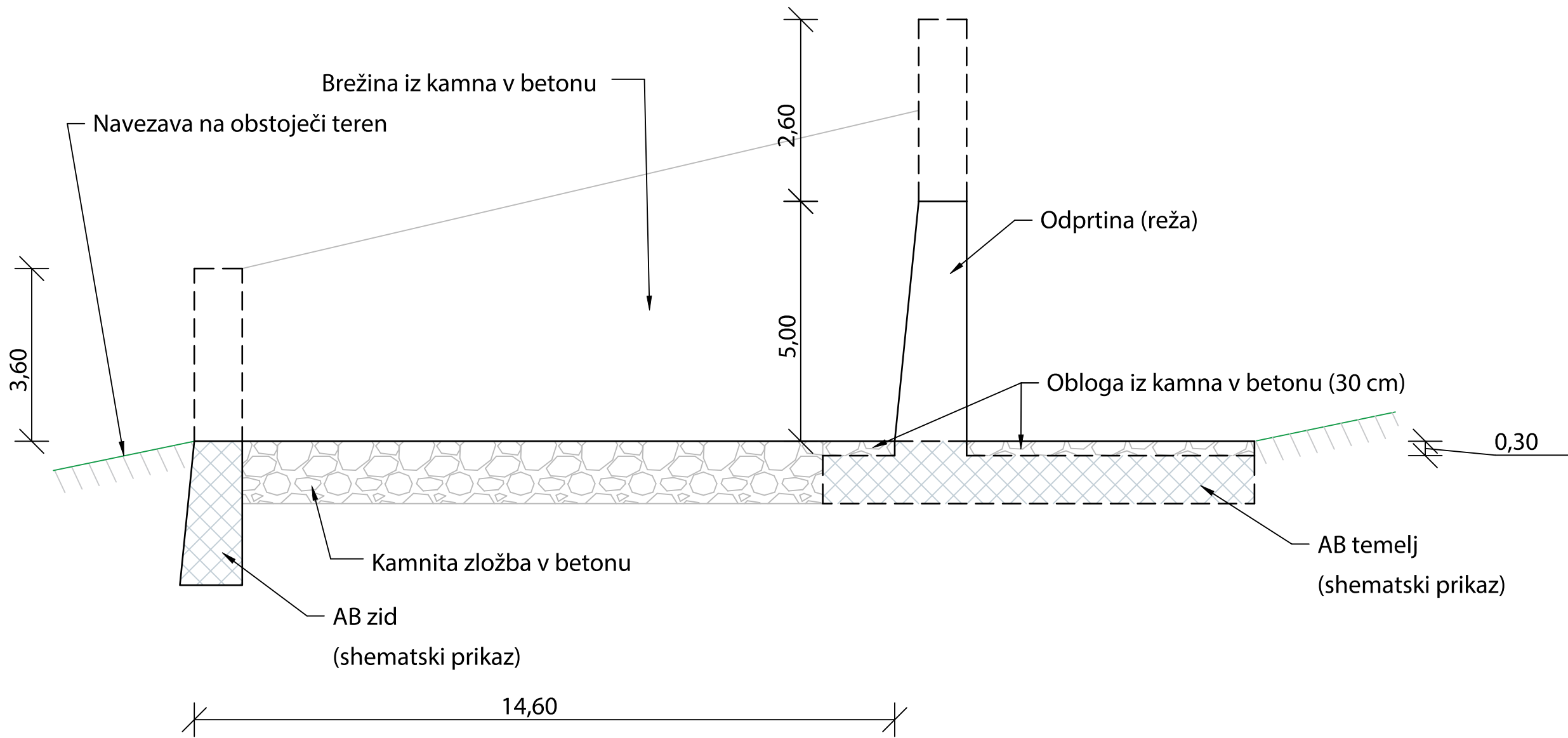
Opis sprememb, pripomb ipd.:

Merilo: 1:250

Št. priloge: G.1

Datum risbe: Maj 2020





Predmet: Magistrsko delo			Izdela:	Rok Indihar
Naslov projekta: Klasifikacija hudourniških pregrad s primerom uporabe			Mentor:	prof. dr. Matjaž Mikoš
Faza: Idejna zasnova			Somentor:	viš. pred. dr. Jošt Sodnik
Vrsta risbe: Vzdolžni profil pregrade in podslapja			Opis sprememb, pripomb ipd:	
Merilo: 1:100	Št. prilog:	G.3		
Datum risbe:			Maj 2020	