

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE VODARSTVO IN
OKOLJSKO INŽENIRSTVO**

Kandidat/-ka:

MATIC ZAKOTNIK

ZAPADLI IN PLAVNI LES V VODOTOKIH

WOODY DEBRIS AND DRIFTWOOD IN STREAMS

Mentor/-ica:

prof. dr. Matjaž Mikoš

Somentor/-ica:

doc. dr. Simon Rusjan

Član komisije:

Predsednik komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 551.4:624.1(043.3)
Avtor: Matic Zakotnik
Mentor: prof. dr. Matjaž Mikoš
Somentor: doc. dr. Simon Rusjan
Naslov: Zapadli in plavni les v vodotokih
Tip dokumenta: magistrsko delo
Obseg in oprema: 97 str., 24 pregl., 64 sl., 48 en., 5 pril.
Ključne besede: plavje, lesno plavje, rečna morfologija, zaježba, nastanek tolmunov, poplavna varnost, rečna erozija, urejanje hudournikov, hudourništvo

Izvilleček

V magistrskem delu smo obravnavali problematiko zapadlega in plavnega lesa v vodotokih in obvodnem prostoru ter njegov vpliv na naravne procese. Najpogosteje se lesno plavje preučuje z vidika sovplivanja na poplavno ogroženost, v novejšem času pa se raziskuje tudi geomorfološke in ekološke vplive na vodotoke. Problematika plavnega lesa je izpostavljena v vodotokih z gozdnim zaledjem in na območjih erozijskih žarišč. Zaradi zapadlega in plavnega lesa v vodotoku se spreminjajo pretočne razmere, povečata se poplavna ogroženost in odlaganje sedimentov, pojavlja se nenadzorovano širjenje struge, dvigne se nivoleta dna, prihaja do zamašitev premostitev in prepustov ter posledično do njihovih poškodb in rušitve, zmanjšuje se uporabna prostornina zadrževalnikov in akumulacij hidroelektrarn ...

Upravljanje s plavnim lesom temelji na poznavanju vzrokov nastanka, virov, dinamike, količine, premeščanja in odlaganja. Za izračun dinamike se uporabljajo empirične enačbe, razvite z laboratorijskimi poskusi in nadgrajene z opazovanji v naravi. Tveganja zaradi zapadlega in plavnega lesa v vodotokih preventivno zmanjšamo s skladno namensko rabo prostora, z ustreznim gospodarjenjem z gozdovi, s pravilnim umeščanjem in dimenzioniranjem javne infrastrukture, ozaveščanjem javnosti ter z gradnjo zadrževalnih objektov, preusmerjanjem in odstranjevanjem plavnega lesa. Plavni les ima tudi nekatere ekološke funkcije (ugoden vpliv na stabilnost struge zaradi zmanjševanja hitrosti in strižnih sil vode, nastajanje tolmunov), kar izboljšuje razmere za vodne in obvodne organizme.

Ugotavljamo, da je potrebno ob vse pogostejših vremenskih ujmah problematiko plavnega in zapadlega lesa enakovredno uvrstiti v upravljanje vodotokov. Za zmanjševanje ogroženosti zaradi lesnega plavja sta potrebna interdisciplinarni pristop in sodelovanje pri poglobljanju znanja, načrtovalskih in izvedbenih aktivnostih.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 551.4:624.1(043.3)
Author: Matic Zakotnik
Supervisor: Prof. Matjaž Mikoš, Ph.D.
Cosupervisor: Assist. Prof. Simon Rusjan, Ph.D
Title: Woody debris and driftwood in streams
Document type: Master thesis
Scope and tools: 97 p., 24 tab., 64 fig., 48 eq., 5 ann.
Keywords: floating debris, woody debris, river morphology, backwater, forming stream pool, flood control, channel scour, torrent control, torrent engineering

Abstract

The master's thesis deals with the issue of woody debris and driftwood in streams and riparian areas and their effect on natural processes. Floating woody debris is commonly studied in terms of its effect on the flood risk while recent studies also cover the geomorphological and ecological impacts of driftwood on streams. Driftwood is a serious issue in streams in forested lands or erosion hotspots. Woody debris and driftwood in streams lead to changes in the streamflow, increase the flood risk and accumulation of sediment, cause uncontrolled widening of stream channels, raise stream bed levels and jam bridging structures and culverts, eventually damaging and destroying them and causing reductions in useful capacity of reservoirs and hydroelectric plants' accumulation pools. Driftwood management is based on profound understanding and knowledge of driftwood causes, sources, dynamics, quantities, transfers and deposition. Driftwood dynamics is calculated using empirical equations, which are developed on the basis of laboratory tests and upgraded with nature observations. The risk of woody debris and driftwood can be mitigated by harmonised land use, appropriate forest management, proper siting and dimensioning of public infrastructure, awareness-raising, construction of detention structures, diversion and removal of driftwood. Driftwood debris has certain ecological functions (favourable impact on the stability of the stream bed due to reduction of flow speed and shear forces of water, formation of stream pools), which improves the conditions for aquatic and riparian organisms. It has been established that in the light of increasing frequency of natural disasters the issue of woody debris and driftwood needs to be included in the scope of water source management. Reduction of the drift risk will require an interdisciplinary approach and cooperation in the acquisition of knowledge as well as with regard to planning and implementation activities.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Mikošu in somentorju doc. dr. Simonu Rusjanu.

Zahvaljujem se tudi družini za podporo in spodbujanje v času študija.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	I
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	II
ZAHVALA	III
KAZALO SLIK.....	VII
KAZALO PREGLEDNIC.....	IX
TERMINOLOŠKI SLOVAR	X
1 UVOD	1
2 ZAPADLI IN PLAVNI LES	4
2.1 Splošno	4
2.2 Klasifikacija lesnega plavja	5
3 NARAVNE DANOSTI.....	7
3.1 Geološka zgradba	7
3.2 Relief	7
3.2.1 Nadmorska višina	8
3.2.2 Naklon	8
3.2.3 Ekspozicija površja	8
3.3 Podnebje	9
3.3.1 Padavine	9
3.3.2 Vetrovi	10
3.3.3 Temperatura	10
3.3.4 Osončenost	10
3.4 Gozd	10
3.5 Vodotoki	13
3.6 Erozijski in hudourniški procesi	14
4 ZAPADLI IN PLAVNI LES V VODOTOKIH.....	17
4.1 Ekološki pomen lesnega plavja.....	17
4.2 Morfološke spremembe v vodotoku zaradi zapadlega in plavnega lesa	18
4.2.1 Odlaganje rečnih sedimentov	19
4.2.2 Širina struge	20
4.2.3 Stabilnost struge.....	21
4.2.4 Tlorisni potek struge	23
4.2.5 Nastanek stopenj in tolmunov.....	24
4.3 Sprememba hidravlike v vodotoku zaradi zapadlega in plavnega lesa.....	28
5 DINAMIKA PLAVNEGA LESA V VODOTOKIH	35
5.1 Količina lesnega plavja	37

5.2	Vir lesnega plavja med poplavami	40
5.3	Transport plavnega lesa	41
5.3.1	Začetek premeščanja plavnega lesa	43
5.3.2	Hitrost plavnega lesa	43
5.3.3	Dolžina plavnega lesa	44
5.3.4	Drobljenje plavnega lesa	44
5.3.5	Začetek odlaganja plavnega lesa	44
6	PROBLEMATIKA ZAPADLEGA IN PLAVNEGA LESA V VODOTOKIH	46
6.1	Odlaganje lesnega plavja	46
6.2	Zvišanje dna struge	47
6.3	Nastanek akumulacije	47
6.4	Zamašitev	48
6.5	Nevarnost plavnega lesa za prometno infrastrukturo	49
6.6	Nevarnost plavnega lesa za hidroelektrarne	51
6.7	Nevarnost plavnega lesa za ljudi – rekreativce	52
7	SISTEMSKI OKVIR UPRAVLJAJNJA Z ZAPADLIM IN PLAVNIM LESOM V VODOTOKIH	54
7.1	Zakonodaja	54
7.1.1	Zakon o vodah	54
7.1.2	Pravilnik o vrstah in obsegu nalog obveznih državnih gospodarskih javnih služb urejanja voda	55
7.1.3	Zakon o gozdovih	56
7.1.4	Pravilnik o izvajanju sečnje, ravnanju s sečnimi ostanki, spravilu in zlaganju gozdnih lesnih sortimentov	56
7.2	Upravljanje s plavnim lesom na akumulacijah hidroelektrarn	57
7.3	Upravljanje s plavnim lesom na območju mostnih konstrukcij	60
7.4	Ukrepi za zmanjševanje količine plavnega lesa	62
7.4.1	Odstranitev lesnega plavja	65
7.4.2	Zadrževanje plavnega lesa	66
7.4.2.1	Jeklene mreže in jekleni kabli	66
7.4.2.2	Jeklene grablje	67
7.4.2.3	Jeklene rešetke	68
7.4.2.4	Prebiralne pregrade	69
7.4.2.5	Zadrževanje lesnega plavja z jeklenimi rešetkami ob brežinah	71
7.4.2.6	Zadrževanje lesnega plavja z jeklenimi rešetkami v strugi vodotoka	72
7.4.2.7	Zadrževanje lesnega plavja pred prelivom pregrade	72

7.4.2.8	Obvodni kanal z grabljami.....	73
8	SMERNICE ZA OBRAVNAVO PROBLEMATIKE ZAPADLEGA IN PLAVNEGA LESA V VODOTOKIH V SLOVENIJI	75
9	OCENA KOLIČINE ODPLAVLJENEGA LESA IZ HUDOURNIŠKEGA OBMOČJA.....	78
9.1	Opis metode računanja.....	78
9.2	Sklepne ugotovitve	82
9.3	Prikaz rezultatov	82
10	ZAKLJUČEK	84
	VIRI.....	86
	PRILOGE.....	97
	Priloga A: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka	A1
	Priloga B: Hidrogrami odtoka.....	B1
	Priloga C: Količina zapadlega lesa v hudourniškem območju	C1
	Priloga D: Delež odplavljenega lesa	D1
	Priloga E: Primerjava možne količine plavnega lesa in naravnega prirastka lesa	E1

KAZALO SLIK

Slika 1: Zapadlo drevo preko Pišnice	5
Slika 2: Prikaz porazdelitve lesnega plavja glede na mesto nahajanja	6
Slika 3: Prikaz deleža gozda v Sloveniji	11
Slika 4: Zapadli les v strugi hudournika nad Čadrgom.....	13
Slika 5: Prikaz hidrografske mreže Slovenije	14
Slika 6: Opozorilna karta erozije	15
Slika 7: Drobirski tok z drevesnimi debli čez železniško progo Jesenice – Nova Gorica – Sežana v Soteski.....	16
Slika 8: Odloženo lesno plavje na sotočju razvejanih strug Soče	19
Slika 9: Odloženo lesno plavje na Lepenci je preusmerilo matico toka na nasprotno brežino, ki se je zaradi tega začela erodirati	21
Slika 10: Zaradi bočne erozije je padlo drevo v Lepenco	22
Slika 11: Na prodišču Save Dolinke na Tabrah odložen plavni les, ki ob večjih pretokih del vode preusmeri v stranski rokav struge.....	23
Slika 12: Shematski prikaz erozijskega tolmana zaradi zapadlega lesa	24
Slika 13: Zaustavljen plavni les za skalnatimi ovirami na Soči v Zgornji Trenti	25
Slika 14: Za odloženim plavnim lesom v Velikih koritih Soče ob povečanih vodotokih nastane zajezev	26
Slika 15: Prikaz različne oblikovanosti stopenj v vodotokih	27
Slika 16: Nastanek vodnega skoka in vrtinčenja pri prelivanju čez stopnjo.....	28
Slika 17: Režimi toka	29
Slika 18: Shematski prikaz izračuna dinamike plavnega lesa.....	35
Slika 19: Shematski prikaz izračuna količine plavnega lesa	37
Slika 20: Stanje po snežnem plazu	41
Slika 21: Kopičenje plavnega lesa za skalnatimi ovirami v Pišnici	47
Slika 22: S plavnim lesom zamašen cevni prepust v Ižakovcih pred vtokom v reko Muro	49
Slika 23: Odložen plavni les ob mostnem oporniku (v strugi) na Soči pri Kršovcu.	50
Slika 24: Zaustavljanje plavnega lesa ob mostnem oporniku	51
Slika 25: Lesna preproga na Idrijci ob poplavih 2007	52
Slika 26: Ostanki lesa po izvedbi gozdne vlake in opravljeni sečnji v dolini Kokre.....	56
Slika 27: Ostanki sečnje ob vodotoku	57
Slika 28: Zapadli les pod mostno konstrukcijo v Kokri pred sotočjem s Savo	61
Slika 29: Oblika mostne ograje, ki preprečuje zaustavljanje plavnega lesa na mostovih	62
Slika 30: Shematski prikaz pregrad	63
Slika 31: Zapadlo drevo je zaustavilo plavajoče deblo	65
Slika 32: Jeklenice za zadrževanje plavnega lesa.....	67
Slika 33: Jeklina mreža za zadrževanje plavnega lesa	67
Slika 34: Jeklina mreža in jeklene grablje za zadrževanje plavnega lesa	67
Slika 35: Jeklene grablje V-oblike	68
Slika 36: Jeklene grablje Λ -oblike	68
Slika 37: Jeklene grablje na pregradi na sotočju Štajnpoha in Danjarske grape v Podroštu pri Zalem Logu	69
Slika 38: Jeklene rešetke za zadrževanje plavnega lesa.....	69
Slika 39: Načini postavitve jeklenih rešetak.....	69
Slika 40: Zapolnjena pregrada na Suhem potoku v Zapoudnem – Zadnji Trenti.....	70
Slika 41: Kamnita prebiralna pregrada	71

Slika 42: Betonska prebiralna pregrada z jekleno mrežo	71
Slika 43: Disipacijska pregrada, zapolnjena s plavnim lesom	71
Slika 44: Avstrijski tip prebiralne pregrade	71
Slika 45: Jeklena rešetka ob brežini	72
Slika 46: Modelna raziskava jeklenih rešetak v vodotoku	72
Slika 47: Posebna konstrukcija za zadrževanje plavnega lesa pred prelivom pregrade	73
Slika 48: Jeklene rešetke pred prelivom pregrade	73
Slika 49: Obvodni kanal z jeklenimi grabljami na reki Sihl za zadrževanje plavnega lesa	74
Slika 50: Shema celostne obravnave zapadlega in plavnega lesa v vodotokih	77
Slika 51: Prikaz dolžine in širine na pravokotniku ter polosi na elipsi	79
Slika 52: Prikaz stekanja vode po povodju.	80
Slika 53: Prikaz V_{les}/F_w za pravokotnika.	81
Slika 54: Prikaz V_{les}/F_w za elipsi.	81
Slika 55: Določitev enačbe za izračun količine plavnega lesa za elipso 2.	82
Slika A.1: Kritični čas za območje v obliki pravokotnika	A2
Slika A.2: Kritični čas za območje v obliki elipse.	A3
Slika B.1: Hidrogram odtoka za območje v obliki pravokotnika	B2
Slika B.2: Hidrogram odtoka za območje v obliki elipse	B3
Slika C.1: Količina plavnega lesa za območje v obliki pravokotnika.	C3
Slika C.2: Količina plavnega lesa za območje v obliki elipse.	C3
Slika D.1: Delež odplavljenega lesa za območje v obliki pravokotnika.	D2
Slika D.2: Delež odplavljenega lesa za območje v obliki elipse.	D3
Slika E.1: Primerjava količine plavnega lesa in naravnega prirastka.	E1

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Količina lesa v Švici	38
Preglednica 2: Prikaz količine plavnega lesa po državah Evrope.	38
Preglednica 3: Verjetnost transporta lesnega plavja	43
Preglednica 4: Način vnosa plavnega lesa.....	62
Preglednica 5: Zaščitni ukrepi	64
Preglednica 6: Odtok s povodja.	78
Preglednica 7: Določevanje razmerja h/b.....	79
Preglednica 8: Hitrosti vode na površini in v strugi.	80
Preglednica 9: Hitrosti vode v hudourniku.	80
Preglednica A.1: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).....	A1
Preglednica A.2: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).....	A1
Preglednica A.3: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).....	A2
Preglednica B.1: Hidrogram odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).....	B1
Preglednica B.2: Hidrogram odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).....	B1
Preglednica B.3: Hidrogram odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).....	B2
Preglednica C.1: Količina zapadlega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).....	C1
Preglednica C.2: Količina zapadlega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).....	C1
Preglednica C.3: Količina zapadlega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).....	C2
Preglednica D.1: Delež odplavljenega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).....	D1
Preglednica D.2: Delež odplavljenega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).....	D1
Preglednica D.3: Delež odplavljenega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).....	D2
Preglednica E.1: $V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}}$ ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).....	E1
Preglednica E.2: $V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}}$ ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).....	E2
Preglednica E.3: $V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}}$ ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).....	E2

TERMINOLOŠKI SLOVAR

Lesna preproga – zelo gost, na vodni gladini plavajoč sloj plavnega lesa v obliki preproge, najpogosteje se tvori na akumulacijah hidroelektrarn iz manjših lesnih ostankov.

Lesni ostanki – padla drevesa in veje zaradi poškodb, naravnih ujm, bolezni, škodljivcev ali starosti; tudi les, ki ostane na brežinah vodotoka po končani sečnji in delih v gozdu ali infrastrukturi.

Lesno plavje – vsi oleseneli deli dreves, ki zaradi sprememb in procesov v naravi ležijo na brežinah strug vodotokov in se v času povečanih pretokov premeščajo po vodotoku.

Plavje – plavajoči, lebdeči ali delno potopljeni organski in drugi plavajoči delci, npr. debla, vejevje, listje, odpadki, delci sedimenta.

Plavni les – ves lesni material (debla, veje, korenine ...), ki se v času visokih voda premešča po vodotoku.

Stopnja – nekaj 10 cm visoki naravni prag ali umetni prečni objekt, ki stabilizira nivoletno dna vodotoka (rečne struge).

Tolmun – poglobljeni del rečne struge pod stopnjo, kjer prihaja do vrtinčenja vodnega toka.

Veliko lesno plavje – drevesna debla, veje, korenine ... s premerom nad 10 cm in dolžine, večje od 50 ali 100 cm (ang. large woody debris).

Zajezba – dvig vodne gladine nad običajno; najpogosteje nastane zaradi mostne konstrukcije ali druge ovire v strugi vodotoka – stopnje, odloženih naplavin, zapadlega lesa, zamašitve zaradi plavnega lesa ...

Zapadli les – les, ki se že pred pojavom visokih voda nahaja v sami strugi vodotoka ali se je v času prejšnje poplave zaustavil v strugi. Zapadli les so najpogosteje poškodovana drevesa, odmrla les, ostanki sečnje, skladiščen les.

1 UVOD

Vodotoke in obvodni prostor oblikujejo številni dinamični procesi, ki se spreminjajo od povirnih, mnogokrat gorskih območij, preko prehodnega do ravninskega dela. Med dejavnike, ki vplivajo na dinamiko vodotoka, lahko prištevamo naravne danosti in naravne procese, kot so geološka podlaga, pokrovnost tal, podnebje in izjemni vremenski dogodki ter z njimi povezana erozija in premeščanje rečnih sedimentov ter dinamika tekočih voda. Procesni vplivajo na morfologijo, poplavno varnost, erozijsko nevarnost, obrežno vegetacijo ... vodotoka in pribrežnih zemljišč. Procesni so največkrat medsebojno soodvisni in prepleteni. Vpliv na navedene naravne procese v vodotokih imata tudi zapadli in plavni les.

Prva spoznanja o vplivih zapadlega in plavnega lesa v vodotokih na rečno hidravliko, dinamiko, morfološke spremembe v vodotokih in ekosisteme so se začela pojavljati v drugi polovici 20. stoletja. Problematika zapadlega in plavnega lesa je prisotna na območjih, na katerih imajo vodotoki bolj hudourniški značaj in so območja porasla z gozdni sestoji. Zaradi podnebnih sprememb se povečuje število vremenskih nevšečnosti, kot so menjavanje obdobji suš in velika intenziteta padavin, posledica katerih so povečani površinski odtoki, ki erodirajo brežine in skupaj z zemljino odnašajo podrto, polomljeno in/ali obviselo ter začasno odloženo drevje (debla, vejevje in/ali korenine). Zaradi tega so vodotoki obremenjeni s povečanim transportom sedimentov in plavnega lesa. Največ težav in morfoloških sprememb v vodotokih povzroča plavje predvsem v višje ležečih območjih pod višino gozdne meje. Najbolj je problematiki lesnega plavja izpostavljen z gozdom pokrit gorski svet – alpske države Švica, Avstrija, Nemčija (Bavarska), Slovenija, Francija, severna Italija (Tirolska), zunaj Evrope pa Japonska, Združene države Amerike in Kanada (Comiti in sod., 2016).

Poleg negativnih vplivov plavni in zapadli les v vodotokih pozitivno vplivata na zmanjšanje poplavne in erozijske ogroženosti, saj povečujeta stabilnost in hrapavost struge vodotokov ter posledično zmanjšujeta hitrost pretoka in delovanje strižnih sil. Z ustvarjanjem stopenj in prelivanja vode čez njih ustvarjata ugodne življenjske habitate za vodne in obvodne organizme.

Večina raziskav in študij ter analiz o vplivu lesenih plavin na vodotoke v gorskih območjih, konstrukcije (premostitve, hidrotehnični objekti ...) in okolje je bilo opravljenih v zahodni Evropi, v alpskih državah. Tematika je dobro raziskana tudi v Severni Ameriki, v Južni Ameriki pa so bile posamezne študije opravljene v Argentini, Čilu in Kostariki. V Afriki in Aziji je problematika lesnih plavin zaenkrat slabo raziskana, z izjemo Japonske, kjer so se ukvarjali predvsem z vplivi lesnega plavja v akumulacijah hidroelektrarn, in Tajvana, kjer so raziskovali povezavo med plavnim lesom in tajfuni. V Oceaniji so se ukvarjali predvsem s proučevanjem ekoloških in morfoloških vplivov plavja na vodotoke (Comiti in sod., 2016).

Problematika plavnega in zapadlega lesa v Sloveniji ni dovolj raziskana. Večinoma je obravnavana v diplomskih in magistrskih nalogah biotehniške fakultete študijske smeri gozdarstvo. V zadnjih desetletjih se zaradi pogostih naravnih ujm problematiki zapadlega in plavnega lesa posveča nekoliko več pozornosti. Problematika plavnega lesa so obravnavali tudi v številnih evropskih meddržavnih projektih na področju varovanja pred škodljivim delovanjem voda, ukrepanja v primeru naravnih nesreč ..., v katerih so sodelovali slovenski partnerji, sodeluje pa tudi naša država (npr. SedAlp, DraMurCi).

Med naravne dogodke, ki povečujejo škodljivo delovanje voda, lahko uvrstimo »navadne« in hudourniške poplave, zemeljske in snežne plazove, podore, blatne in drobirske tokove, žled, sušo, vetrolom ... Večina jih je povezanih z vremenskimi dogodki, predvsem tistimi skrajnimi, ki se ne pojavljajo pogosto, npr. visoka intenziteta padavin, močni vetrovi ...

Ker se pogostost poplavnih dogodkov v zadnjih desetletjih zelo povečuje in povzroča veliko škodo, je evropski parlament leta 2007 sprejel Direktivo o obvladovanju poplavne ogroženosti. Direktiva predvideva ukrepe za zmanjšanje verjetnosti poplav in njihovih posledic. Predvideva tudi izdelavo kart poplavne ogroženosti in načrtov obvladovanja ogroženosti. Na kartah morajo biti prikazane škodljive posledice poplav z določeno povratno dobo (10, 100 in 500 let), ki je odvisna od števila prebivalcev in gospodarske dejavnosti območja, upošteva pa se tudi vire onesnaženja in tokove z veliko vsebnostjo sedimentov in naplavin (Direktiva o obvladovanju ..., 2007).

V hidravličnih študijah, ki se najpogosteje izdelujejo za prikaz poplavne nevarnosti in preverjanje ustreznosti protipoplavnih ukrepov, se pri modeliranju velikokrat upošteva le »čisto« vodo brez plavin, ki jih ta nosi s seboj. Tako se za izračun upošteva le pretok, ki teče skozi prečni profil struge vodotoka, plavin, lesnega plavja, zapadlega lesa, raznih drugih odpadkov pa ne. V novejšem času se ob izdelavah poplavnih scenarijev občasno že upošteva zamašitev in zagostitev mostnih opornikov z lesnim plavjem. Za izračune uporabljeni računalniški programi (npr. HEC-RAS, MIKE) plavni les v vodotoku obravnavajo kot razširitev mostnega opornika in predpostavljajo, da les plava na vodni gladini (Kogoj, 2011; DraMurCi, 2012).

Zaradi premeščanja plavin in posledično njihovega odlaganja se lahko zviša niveleta dna vodotoka in povečata obseg poplavljenega območja ter škoda zaradi poplav. Tako se je v preteklih poplavah (npr. Železniki 2007) izkazalo, da so se zaradi plavja in predmetov, ki jih je vodotok na svoji poti odnašal, ustvarjale zaježitve na mostnih opornikih in prepustih. Zaradi tega so nastale zaježitve, ki ob poružitvi še dodatno povečajo vodni val, njegovo intenziteto in hitrost (Kobold, 2008).

Vodotoke, predvsem gorske na gozdnatih območjih, je potrebno obravnavati kompleksno, tako na načrtovalski, tj. planski in izvedbeni (preventivni), kakor tudi na operativni ravni (vzdrževanje) in »interventni« (ukrepanje v primeru naravnih nesreč). Obravnava je velikokrat interdisciplinarna, s sodelovanjem različnih strokovnjakov (hidrologi, gradbeni inženirji, gozdarji, krajinski arhitekti, ribiči, naravovarstveniki, varuhi kulturne dediščine ...).

V alpski regiji so potekali in še potekajo številni projekti s področja upravljanja z vodami, proizvodnje vodne energije, ohranjanja vodnih ekosistemov ... Tako so alpske države (Avstrija, Italija, Slovenija in Švica) sodelovale v projektu SedAlp, ki se je ukvarjal tudi s problematiko plavnega lesa v vodotokih. S programom upravljanja s plavinami v porečju alpskih rek se je poskušalo zagotoviti in razviti (SedAlp, 2014):

- celostno upravljanje plavin v alpskih porečjih, zmanjšanje tveganj, ki jih povzroča premeščanje plavin in plavja, izboljšanje rečnih ekosistemov, zmanjševanje vplivov hidroenergetskih objektov na vodotoke,
- ustrezna orodja za napovedovanje in opozarjanje na plavine ter leseno plavje v vodotokih skupaj s priporočili za omilitev tveganj in zaščito prebivalstva,
- izboljšanje ukrepov za blažitev tveganj in ukrepanje.

V magistrskem delu smo na začetku pregledali problematiko zapadlega in plavnega lesa v vodotokih na podlagi razpoložljive literature. Problematika je največkrat obravnavana z vidika zmanjšanja poplavne varnosti, v novejšem času se upošteva tudi geomorfološki in ekološki vpliv na vodotoke. Želeli smo celovito pregledati vse dejavnike, ki vplivajo na spremembe v vodotoku zaradi zapadlega in plavnega lesa. Za upravljanje s plavnim lesom je pomembno vedeti, kakšne so količine lesa, kakšna je njegova dinamika, kakšni so načini transporta, mesta odlaganja in kakšne so posledice oz. spremembe v vodotoku. Prisotnost plavnega in zapadlega lesa v vodotoku pogosto vpliva na povečevanje poplavnega tveganja. V nekaterih primerih pa lesno plavje ugodno vpliva na stabilnost brežin in dna vodotokov, saj zmanjšuje povprečni naklon, hitrosti vode in strižne sile. V zadnjem delu magistrskega dela so predstavljeni tudi omilitveni ukrepi za zmanjšanje ali preprečitev poplavne nevarnosti. Na koncu je prikazan še teoretični primer izračuna količine plavnega lesa.

2 ZAPADLI IN PLAVNI LES

2.1 Splošno

Pod pojmom plavni in zapadli les lahko štejemo vse oblike lesnega materiala, ki se nahaja v gozdu in se je že ali pa se ob visokih vodah premesti v vodotok. Za zapadli in plavni les se lahko uporablja tudi skupni izraz veliko lesno plavje. Izraz izhaja iz angleškega pomena besedne zveze »large woody debris« (LWD). Med veliko lesno plavje uvrščamo drevesna debla, veje in korenine, ki v premeru merijo več kot 10 cm (Wohl, 2000). Nekateri raziskovalci za velike lesene kose podajajo še dolžino, in sicer med 0,5 in 1 m (Braudrick in sod., 1997).

Z opredelitvijo v Zakonu o vodah (ZV, 2002) plavje obsega organske in druge plavajoče predmete, kot so debla, vejevje, listi, odpadki in podobno. Če izhajamo iz zgornje definicije, bi lahko kot pojem lesno plavje opredelili vse oblike lesnega materiala, ki se nahajajo v vodotoku zaradi različnih vplivov. Ob povečanem vodostaju ali pretoku se lesno plavje zaradi večje vlečne sile premešča po sami strugi.

V praksi se uporablja tudi izraz plavni les. Pojem plavni les se uporablja tudi za les, ki so ga nekoč plavili za potrebe jamskega lesa v rudniku živega srebra v Idriji (Klavže na Idriji). Lesno plavje so vsi oleseni deli dreves, ki zaradi sprememb in procesov v naravi (letni časi, vremenske razmere, naravne nesreče, veter, bočna erozija ...) ležijo na brežinah vodotokov in se zaradi sile težnosti skotalijo v ali ob vodotok. Če leseni deli ležijo na brežini, jih lahko ob poplavih ali povečanem površinskem odtoku sile vode povlečejo v strugo.

Zapadli les je les, ki se že pred pojavom visokih voda nahaja v sami strugi vodotoka. V strugi se nahaja od prejšnjega poplavnega dogodka, ko se je zaradi umika visokih voda zaustavil na nekem mestu v vodotoku. Zapadli les so tako odmrli drevesa, ostanki posekanega drevja po gozdnem spravilu in skladiščeni les (hlodi, skladovnice drv). Med zapadli les lahko prištevamo tudi drevesa, poškodovana v času naravne nesreče, ki so zaradi nagiba brežine padla v samo strugo. Plavni les pa je lesni material, ki se v času visokih voda transportira po vodotoku. Ob visokih vodah lahko vlečna sila vode začne plaviti tudi zapadli les, kadar sila trenja med podlago in lesom postane premajhna. Visoka voda lahko začne odplavljati tudi brežine in tako se v vodotoku znajdejo tudi spodkopana obrežna drevesa skupaj s krošnjo in koreninskim sistemom. Ko začne visoka voda upadati, se zmanjšata vlečna sila in pretočna hitrost, zato se začne plavni les odlagati na mestih razširitve struge, na ožinah, v zunanjih zavojih, na prečnih in vzdolžnih obrežnih zavarovanjih, jezovih, pregradah, ob mostnih konstrukcijah (oporniki, stranska krila ...), prepustih. Takrat se les zaustavi in postane zapadli les v strugi vodotoka.

Začetki poglobljenega proučevanja vloge zapadlega in plavnega lesa v vodotokih na rečno dinamiko in spremembe v vodotokih segajo v drugo polovico 20. stoletja. Prve raziskave o vplivu rečne vegetacije na rečno morfologijo je leta 1967 v ZDA opravil Zimmerman s sodelavci. Med leti 1971 in 1973 so bile objavljene prve raziskave o količini lesa in vplivu na vodotoke. Med leti 1976 in 1979 sta Swanson in Keller razvila različne metode za opazovanje in vrednotenje vpliva zapadlega in plavnega lesa v vodotokih (Villanueva in Stoffel, 2017).



Slika 1: Zapadlo drevo preko Pišnice (Zakotnik, julij 2017).

Zapadli les preko struge ali v sami strugi spremeni rečno morfologijo vodotoka, saj se ustvarjajo stopnje, za katerimi se zadržujejo rečni sedimenti. Posledično se vodotoku spremenita niveleta dna in prečni presek struge, zmanjšata se povprečni naklon in povprečna hitrost vodnega toka. Hitrost vode se med stopnjami zmanjša, čez prelive v tolmun pa nekoliko poveča. Pod stopnjami se ustvarijo tolmini, ki v ekosistemu vodotoka predstavljajo življenjske habitate za vodne in obvodne organizme. S pojavom stopenj v vodotoku se gorvodno poveča gladina vode, ki lahko ob visokih vodah poplavi višje ležeča območja ob vodotoku, zato je treba tehtati med naravovarstvenim in protipoplavnim (za)varovanjem vodotoka oz. okolice. V preteklosti se je obrežja vodotokov redno vzdrževalo na način, da so se odstranila samo poškodovana in odmrla drevesa, tako da so bili ukrepi bolj selektivni. Nato se je zaradi pomanjkanja finančnih sredstev redno vzdrževanje obrežne vegetacije oz. prebiralno gospodarjenje z obvodnimi gozdovi opustilo. Po večkratnih opozorilih, da plavni les povečuje poplavno tveganje ob visokih vodah, se največkrat opravi sečnja celotnega obrežnega pasu vodotoka, ki pa z večih vidikov ni ustrezna. Z odstranitvijo celotnega obrežnega vegetativnega pasu se res poveča pretočnost vodotoka in zmanjša količina plavnega lesa, poveča pa se površinski odtok in spiranje zemljine z razgaljenih brežin. Z odstranitvijo se uniči tudi življenjski habitat številnih živalskih in rastlinskih vrst v obvodnem prostoru. Na golih brežinah se lahko neovirano razrastejo invazivne tujerodne rastlinske vrste (npr. japonski dresnik, zlata rozga). Odstranjevanje posameznih dreves je dražje, otežen je dostop, potrebno je več ročnega dela, zato se stopnjuje tudi nevarnost nesreč in poškodb delavcev.

2.2 Klasifikacija lesnega plavja

Plavni in zapadli les lahko razdelimo na več načinov. V tuji literaturi zasledimo razdelitev glede na velikost plavja (Bradley s sodelavci, 2005) in glede na mesto nahajanja plavja (Rickli, 2009). V slovenski literaturi je plavje klasificirano glede na način vnosa v vodotok (Papež, 2011).

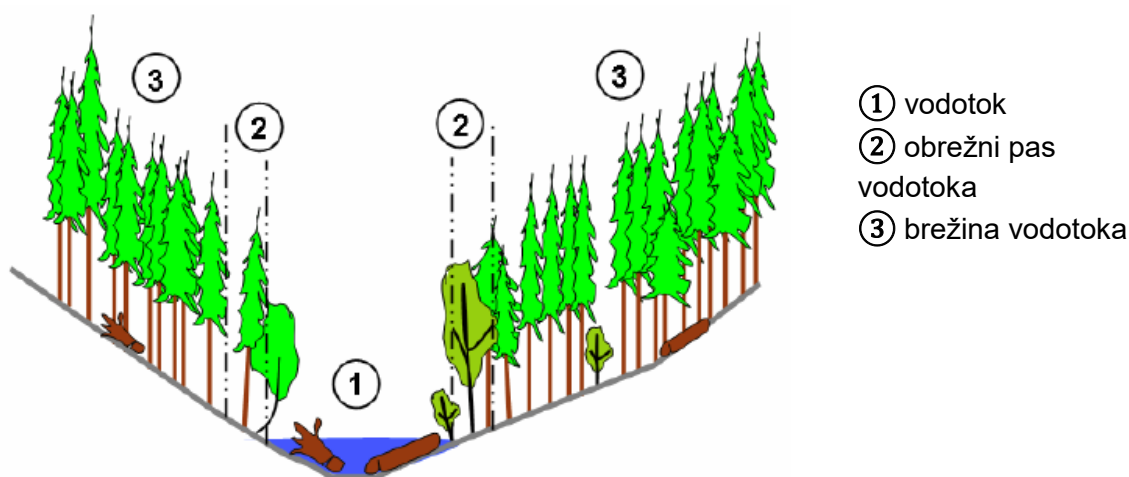
Rečni plavni les glede na velikost razdelimo v tri razrede (Bradley in sod., 2005):

- manjše lesno plavje: manjše veje, listje, iglice ...,
- srednje veliko lesno plavje: večje veje, tanjša debla ...,
- veliko lesno plavje: debla, štori s koreninami, celotna drevesa ...

Plavine se v vodotoku pojavijo na različne načine. Pojav manjših plavin je povezan z letnimi časi, vetrom in silo težnosti. Srednje velike in večje plavine dotekajo iz manjših neurejenih pritokov zaradi erozije brežin in hudourniškega delovanja.

Razdelitev glede na mesto nahajanja lesnega plavja (Rickli, 2009):

- v sami strugi vodotoka,
- v obrežnem pasu vodotoka,
- na brežinah vodotoka.



Slika 2: Prikaz porazdelitve lesnega plavja glede na mesto nahajanja (prirejeno po Rickli, 2009).

Lesno plavje se v vodotoke vključuje preko trajnih in občasnih procesov. Trajni procesi so posledica naravnih procesov odmiranja lesne biomase, dotok lesnega plavja je majhen, a stalen. Občasni vnosi so kratkotrajni, a z izdatnejšimi količinami lesnega plavja, ki je posledica naravnih nesreč (žledolomi, hudourniške ujme, gozdni požari, udari strel, vetrolomi, snegolomi, izbruhi bolezni in napadi škodljivcev – podlubnikov, poplave ...). Količina plavja je odvisna tudi od erozijskih pojavov in procesov na brežinah vodotoka ter gospodarjenja z gozdovi.

Glede na način vnosa v vodotok je podrobnejša klasifikacija lesnega plavja (Papež, 2011) sledeča:

- les, ki se že nahaja v strugi (les, ki se je odložil v strugo ob snežnem plazju, vetrolomu, zaradi gospodarjenja z gozdom, poškodb zaradi škodljivcev),
- les, ki je v strugo prišel zaradi plazenja brežin in erozijskih procesov,
- les, ki je v strugo prišel zaradi bočne ali globinske hudourniške erozije,
- les, ki je v strugo prišel s pobočij nad vodotokom zaradi zemeljskih plazov,
- različni lesni proizvodi, ki izvirajo iz izkoriščanja gozda,
- obdelani, gospodarski les, če je neprimerno skladiščen.

3 NARAVNE DANOSTI

Za obravnavo dejavnikov, ki vplivajo na količino plavnega lesa v vodotokih, je potrebno poznati naravne danosti okolja. Danosti, ki vplivajo na dotok plavnega lesa v vodotoke, so relief, geološka zgradba, podnebje (tudi vremenske razmere), vodotoki in površinski pokrov (poraslost z vegetacijo). Dve tretjini ozemlja Slovenije pokriva gozd. Prav tako je tudi hidrografska mreža Slovenije zelo razvejana. Večina zaledij vodotokov sovпада s površinskim gozdnim pokrovom. Večina povirnih delov vodotokov izvira v območju, ki ga prekriva gozd. Tudi velik del varovalnih pasov vodotokov je obdanih z gozdom. Izpostavljenost eroziji v Sloveniji je zmerna. Predvsem severozahodni in severni del Slovenije ležita na višji nadmorski višini z večjimi nakloni brežin, kjer je povečano erozijsko delovanje v povezavi s povečanimi količinami padavin. Medsebojna prepletenost gozda, vodotokov in erozije ima velik vpliv na količino lesnega plavja v vodotokih.

3.1 Geološka zgradba

Z razpadanjem kamnin zaradi različnih dejavnikov (litološke in strukturne značilnosti ter trdnost hribine, temperaturna nihanja, padavine ...) počasi nastaja rodovitna prst, ki omogoča razmere za razvoj vegetacije. Geološka zgradba je pomembna za odkrivanje potencialnih žarišč erozijskih procesov.

Na območju Julijskih Alp se nahajajo triadni apnenci s posameznimi zakraselimi planotami in ledeniško izoblikovanimi dolinami. Zgradba Kamniško-Savinjskih Alp je podobna Julijskim. Karavanke, ki so del Karnijskih Alp, so v notranjosti grajene iz starejših kamnin, bogatih z rudami, obdaja pa jih apnenec. Iz najstarejših kamnin sta grajena tudi Kozjak in Pohorje, med katerima teče reka Drava. Dinarski in kraški svet Slovenije sta grajena iz apnenca in dolomita, kjer se zaradi delovanja voda pojavljajo kraški pojavi. Od Tržaškega zaliva se proti notranjosti menjajo plasti fliša, peščenjaka in skladi apnenca (Robič in Hrovat, 1986; Javornik, 1997; Fridl, J., 1998).

Pri geološki zgradbi je pomembno poznati tudi tektoniko posameznih geoloških plasti. Ob potresu se v visokogorju pojavljajo skalni podori, krušenje in podori kamnitih sten. S poružitvijo sten se v dolino premestijo večje količine drobirja in tudi gozdnih dreves, ki jih vodotoki ob višjih vodah začnejo premeščati dolvodno.

3.2 Relief

Slovenija leži na prehodu med Beneško-Furlansko in Panonsko nižino, na stiku Alp in Dinarskega gorstva ter ob kotanji Jadranskega morja. Tako se medsebojno izmenjujejo gorati, hriboviti in gričevnati teren s posameznimi ravninskimi kotlinami in aluvialnimi dolinami. Gorski svet sestavljajo Alpe, Predalpsko hribovje in Dinarsko gorstvo. Alpski svet zavzema približno 42 % ozemlja, sredozemski približno 9 %, dinarski okoli 28 % in panonski svet 21 % (Enciklopedija Slovenije, 1997). V reliefno izoblikovanost s svojim delovanjem v zadnjih stoletjih močno posega tudi človek s terasastimi obdelovalnimi površinami, poselitvijo in gradnjo infrastrukture v pobočjih, gospodarjenjem z gozdovi, rudarjenjem (ugrezanje tal) ...

Alpski svet sestavljajo vzhodni del Južnih Apneniških Alp (Julijske Alpe, Kamniško-Savinjske Alpe), od centralnih Alp so na severu Kozjak in Pohorje, Karnijske Alpe in Karavanke. Pred

alpskimi gorovji se nahaja nižje predalpsko hribovje, vmes pa se nahajajo naplavininske kotline (Ljubljanska, Celjska). Višji deli gorovij so zaradi neprepustnih kamnin položnejši in porasli z vegetacijo.

Tipi reliefa, ki so izoblikovali površje Slovenije, so kraški, ledeniški, abrazijski in rečno-denundacijski. Kraški relief se pojavlja v dinarskem in alpskem svetu oz. na območjih iz apnencev in dolomitov, manjša območja s kraškim reliefom pa so še v predalpskem svetu. Kraški tip reliefa izoblikuje značilne kraške pojave (jame, vrtače, uvale, kraška polja), pojavlja se tudi intenzivno kemično raztapljanje kamnin. Abrazijski tip reliefa se pojavlja le ob slovenski obali, zanj so značilni visoki prepadni klifi. Ledeniški tip reliefa se pojavlja predvsem v gorskem svetu, kjer so ledeniki v preteklih ledenih dobah zapolnili rečne doline in jih ob taljenju počasi preoblikovali. Ledeniške doline so pogosto zelo ozke, obdane s strmimi in krušljivimi pobočji z malo rodovitne prsti, v kateri bi lahko uspevala vegetacija oz. gozd, ki bi stabiliziral brežine. V primeru, da se gozd ne obnavlja, lahko brežine zaradi lastne teže vegetacije začnejo plazeti proti dolinam z vodotoki. Rečno-denundacijski tip reliefa se pojavlja na območjih z neprepustnimi kamninami. V bolj hribovitem svetu se izoblikujejo ozke doline, kotline in soteske. Na gričevnatih območjih vodotoki pogosto erozijsko izoblikujejo novo strugo v starejših naplavinah. Ob vrezovanju v trdne kamnine je bil odstranjen del starejših nanosov, ki se kasneje ob zadostni saturaciji z vodo razvijejo v usade in plazove. V visokogorju podobno nastajajo podori. Na naplavininskih ravninah vodotoki večkrat ciklično zasujejo in na novo izoblikujejo svojo strugo (Robič in Hrovat, 1986; Javornik, 1997; Fridl, J., 1998).

3.2.1 Nadmorska višina

Nadmorska višina vpliva na veliko naravnih dejavnikov, kot je količina padavin, poraščenost z vegetacijo, vrsto vegetacije, moč vetra, poselitvijo, kmetijstvom in živinorejo ... Povprečna nadmorska višina Slovenije, izračunana na podlagi stometrskega digitalnega reliefa Slovenije (Geografski atlas Slovenije, 1998), je 557 m. Višja območja Slovenije se nahajajo na severu, najvišja so na severozahodu. Najnižja nadmorska višina je na jugozahodu, v obmorskem pasu in na vzhodu, kjer se začne Panonska kotlina. Nadmorska višina se od severa proti jugu zmanjšuje proti kotlinam z vmesnimi zvišanji zaradi predalpskih in dinarskih hribov.

3.2.2 Naklon

Naklon narašča z višanjem nadmorske višine. Povprečni naklon v Sloveniji je 13 °, izračunan na podlagi stometrskega digitalnega reliefa Slovenije (Fridl, J., 1998). Z višanjem naklona narašča tudi delež gozda, a ta pri visokih naklonih začne upadati. Poselitev določenih območij je tudi odvisna od naklona – položnejši svet je gosteje poseljen kot strmejši. Največje naklone v Sloveniji najdemo v visokogorju (pogojeni tudi z mlado apneniško podlago), nato se ti zmanjšujejo od predalpskega, dinarskega in sredozemskega sveta proti panonski ravnici. Visoki nakloni so tudi na območjih posameznih kraških planot in hribov in v osrednem delu Slovenije, ki se strmo spuščajo proti dolinam.

3.2.3 Ekspozicija površja

Ekspozicijo območja najpogosteje uporabljamo za določevanje osončenosti. Določa se z vrednostjo kota med severom in smerjo gledanja od višje proti nižji nadmorski višini. Dobljene vrednosti se izražajo v smeri urinega kazalca z azimutom od 0 do 360 °. Največkrat

izražamo ekspozicijo površja kar po straneh neba. Ekspozicija vpliva na količino prejetega sončnega obsevanja – na prisojnih legah ga območje prejme več, kot na osojnih legah. Ekspozicija vpliva na številne dejavnike od poselitve, kmetijstva, vrste gozda ... Z naraščanjem naklonov se spreminja tudi ekspozicija območja in njen vpliv na različne dejavnosti. V Sloveniji je največ južnih leg, najmanj pa severozahodnih leg. Najbolj z gozdom porasle so severne in severovzhodne lege, najmanj pa južne. Delež gozda se večja od južnih proti severnim legam.

3.3 Podnebje

Območje Slovenije leži na stiku Apeninskega in Balkanskega polotoka, kjer se gorska veriga Alp začne spuščati proti nižinam, in sicer proti Padski in Panonski nižini. Zato na območju Slovenije prevladujejo velike višinske razlike in nakloni površja, ki vplivajo na erozijsko dejavnost. Zaradi lege na območju prehoda sredozemskega v celinsko podnebje oz. v gorsko na višjih legah prihaja do stika različnih zračnih mas. Vlažne in tople zračne mase iznad morja ter celinske zračne mase na drugi strani povzročajo nastanek pogostih padavin in ujm (nevihte, strele, poplave ...). Podnebje v Sloveniji lahko grobo razdelimo v tri tipe. Večina države ima zmerno celinsko podnebje, na jugozahodu submediteransko, v višjih legah pa gorsko podnebje (Robič in Hrovat, 1986; Javornik, 1997; Fridl, J., 1998).

3.3.1 Padavine

Slovenija spada med bolj namočene predele na svetu, povprečna letna količina padavin znaša okoli 1.570 mm (Geografski atlas Slovenije, 1998). Količina padavin je posledica lege na prehodu sredozemskega v celinsko podnebje ter samega reliefa. Vlažne in tople zračne mase iz Sredozemlja trčijo ob orografske ovire (Alpe, predalpska hribovja, dinarsko hribovje). Na najvišjih območjih pade preko 4.000 mm padavin, količina pa se v smeri od severozahoda proti severovzhodu in jugozahodu zmanjšuje. Najmanj padavin je v Panonski nižini (Prekmurje) in obalnem pasu Slovenije. Za Slovenijo je značilno, da so padavine prostorsko različno razporejene, količina padavin z oddaljenostjo od morja upada od jugozahoda proti severovzhodu. Sicer so padavine čez celo leto razporejene dokaj enakomerno, razen na jugozahodu in severovzhodu države, ki sta pod vplivom sredozemskega oz. celinskega podnebja. Višek padavin se v večjem delu Slovenije – predvsem v alpskem, primorskem in dinarskem svetu – pojavlja jeseni (oktober, november), manjši viški nastopijo začetek poletja (junij), najbolj skromni z dežnimi padavinami so prvi trije meseci leta in poletna meseca (julij, avgust). Padavine s podnebnimi spremembami postajajo manj enakomerno porazdeljene preko leta, pojavljajo se daljša obdobja suše in intenzivnejše padavine v kratkih časovnih obdobjih. Ob močnejših nalivih, ko lahko pade celomesečna količina padavin v zelo kratkem časovnem intervalu, se pojavijo poplave skupaj z zemeljskimi plazovi, ki v vodotoke prinašajo plavni les in sedimente. Pas, kjer se pojavljajo močne poletne nevihte z mesečnimi in urnimi viški padavinami, sega od Posočja preko centralne Slovenije do Prekmurja. Padavine pomembno vplivajo na zalogo vode v vodotokih in tleh, kmetijstvo, proizvodnjo električne energije ... Pri padavinah je pomembna njihova prostorska in časovna razporeditev ter intenziteta, ki so odvisne od geografske širine in razgibanosti območja. Pri intenziteti je pomembno poznati količino in trajanje padavin. Problematične so tudi močnejše kratkotrajne padavine po daljšem padavinskem obdobju, saj še dodatno razmočijo zemljine in povzročajo zdrse brežin.

3.3.2 Vetrovi

Ker leži Slovenija v zmernih geografskih širinah, prevladujejo vetrovi zahodnih smeri. Nastanek vetrov je povezan s prehodi ciklonov, ob poslabšanju vremena pihajo jugozahodni vetrovi, ob prehodu hladne fronte oz. po prehodu ciklona se pojavijo vetrovi severnih smeri. Poleg vetrov, ki nastanejo zaradi prehoda ciklonov na nekaterih območjih Slovenije, pihajo tudi lokalni vetrovi, ki so odvisni od temperaturnega nihanja med posameznimi deli dneva. Močnejši sunki vetra in vrtinci, ki nastanejo ob mešanju ciklonskih zračnih mas, povzročajo škodo v gozdovih, na stavbah in v prometu. Sunki vetra lomijo veje na drevesih, v zimskem času gradijo snežne zamete, poškodujejo strehe, ovirajo promet ... Vetrolom močno poškoduje gozdne sestoje, podrti debla se zaradi gravitacije skotalijo proti vodotokom, kjer jih visoka voda začne premeščati kot plavni les.

3.3.3 Temperatura

Temperatura zraka je odvisna od letnega časa, dela dneva, vodnih teles, lege, naklona, ekspozicije, nadmorske višine območja, količine prejetega sončnega obsevanja, stopnje urbaniziranosti ... Nanjo vplivajo tudi vetrovi, vegetacija in snežna odeja, ki znižajo vrednosti temperature. Za Slovenijo je značilen velik razpon temperatur zaradi različnih podnebnih tipov. Najvišje temperature izmerimo v poletnih mesecih, najnižje pa v prvih dveh mesecih leta. To je posledica lege Slovenije v zmernem celinskem podnebju. V visokogorju so zaradi višje nadmorske višine temperature nižje kot v dolinah, prisotna so tudi večja dnevna temperaturna nihanja. Zimske temperature pod lediščem vplivajo na razpad kamnin, ki se v deževnejših obdobjih in ob taljenju snega začnejo krušiti in drseti.

3.3.4 Osončenost

Osončenost oz. sončno obsevanje je pogojeno z geografsko lego območja (ekspozicijo površja) ter njegovima nadmorsko višino in naklonom. Različno so obsevane tudi senčne in sončne lege. Zaradi razgibanosti reliefa se v Sloveniji osončenost zelo spreminja že na manjših razdaljah. Osončenost skupaj z ostalimi dejavniki vpliva na razvoj vegetacije in poselitev. Na bolj osončenih območjih je več poselitve, prav tako pa so ugodnejše razmere za gozd kot na senčnih legah.

Na višjih nadmorskih višinah s strmejšimi nakloni in slabšo sestavo tal prihaja do erozijskih procesov, ki ogrožajo stabilnost območja. Erozijski procesi na ozemlju Slovenije so pogojeni z reliefno in geološko razgibanostjo, s klimatskimi razmerami in z gospodarjenjem z gozdovi.

3.4 Gozd

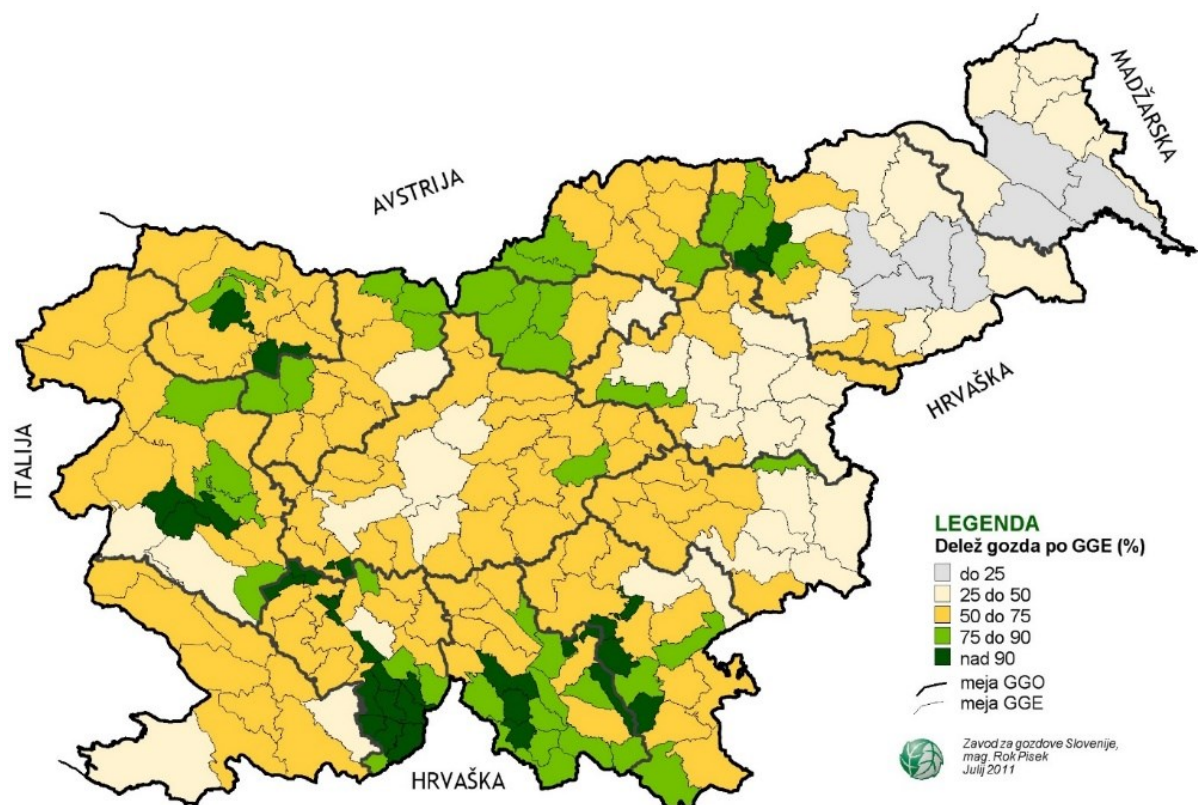
Površina gozdov se v Sloveniji v zadnjih desetletjih povečuje. Po podatkih Zavoda za gozdove znaša približno 60 % celotnega ozemlja Republike Slovenije (ZGS, 2017).

Povečevanje gozdnatosti v Sloveniji je posledica opuščanja kmetijske rabe in odseljevanja prebivalcev z gorskih in hribovitih ter oddaljenih predelov zaradi težjih življenjskih razmer. S selitvijo se je zmanjšal obseg obdelovalnih površin, na katere se je sčasoma začel širiti gozd. Zaradi opuščanja čiščenja gozdne podrasti pa se gozdovi tudi vse bolj zaraščajo. Površine v zaraščanju in z gozdnim pokrovom so vse večje, hkrati pa so prepuščene naravni sukcesiji. Širjenje gozdov ima po eni strani pozitivne učinke na stabilizacijo eroziji podvrženih

območjim, po drugi strani pa se zaraščajočih površin še ne neguje, redči ali prebira (sestojno usmerjanje), zato so izpostavljene boleznim, škodljivcem, poškodbam. Poškodovana in odmrla drevesa končajo na brežinah, marsikatero pa v vodotokih kot plavni les.

Zaradi višje ekonomske učinkovitosti se v gozdovih za odvoz lesnih sortimentov gradijo številne gozdne prometnice, ki posegajo v gozdni prostor. S sečnjo in spravilom lesa se spreminjajo odtočne razmere. Taka območja postanejo vse bolj izpostavljena vodni, snežni in vetrni eroziji ter lahko predstavljajo potencialno erozijsko žarišče. Zaradi povečanega izkoriščanja gozdov in želje po čim večjem dobičku se je v preteklosti posekane gozdove nadomeščalo z drugimi, hitreje rastočimi in gospodarsko bolj donosnimi vrstami. Vrste, ki nadomeščajo naravno sestavo in pestrost gozdnih združb, so manj odporne proti vremenskim ujmam in zmanjšujejo stabilnost tal. Podobno se dogaja na območjih, na katerih so bili iz sanacijskih ali sanitarnih razlogov opravljeni goloseki kot posledica velike poškodovanosti gozdnih sestojev zaradi naravnih ujm (vetrolomi, snežni plazovi, žledolomi, požari ...), izbruhov bolezni ali napadov škodljivcev (podlubniki).

Posledice zaraščanja kmetijskih površin in večja gozdnatost v kombinaciji z izjemnimi vremenskimi pojavi močno vplivajo na količino zapadlega in plavnega lesa v vodotokih. Količina lesnega plavja se povečuje tudi s staranjem gozdnih sestojev.



Slika 3: Prikaz deleža gozda v Sloveniji (ZGS, 2011).

Problematično je opuščanje odstranjevanja mrtvega lesa iz gozda. Poškodovana in odmrla drevesa omogočajo nov življenjski prostor in tudi možnost razvoja gozdnih škodljivcev (lubadar/podlubnik), predstavljajo pa tudi nevarnost spreminjanja pretočnih razmer v vodotoku. K takemu stanju prispeva tudi opuščanje gospodarskega izkoriščanja gozdov na težje dostopnih predelih oz. neizvajanje ukrepov za okrepitev varovalne funkcije gozdov. Slednje se pogosto dogaja v hudourniških in povirnih delih povodja. Taka območja so za

novejšo gozdno mehanizacijo težje dostopna, nakloni brežin so zelo strmi, zato je potrebno veliko ročnega dela pri sečnji in spravilu lesa, težja pa je tudi sečnja posameznih dreves v območju večje gozdnatosti, kar predstavlja manjšo ekonomsko donosnost.

Pri gozdnogospodarskem načrtovanju je treba poznati medsebojno povezanost erozijskih pojavov, gozda in gospodarjenja z njim ter vodotokov. V preteklosti je bilo na erozijsko izpostavljenih brežinah, območjih golosekov, plazov, v povirnih delih hudournikov izvedena uspešna sanacija in zavarovanje z biotehničnimi ukrepi. Zaradi različnih vzrokov (financiranje, dostopnost ...) se take ureditve niso redno ali v zadostnem obsegu vzdrževale (Papež, 2011). Na erozijsko izpostavljenih brežinah se za sanacijo erodiranih površin ob vodotokih mnogokrat uporablja biotehnične ukrepe, kot so vrbovi popleti, vrbovi potaknjenci, vrbove ščetke, lesene kašte s potaknjenci, žičnati gabioni s potaknjenci ... Po uspešni izvedbi zavarovanja erodirane brežine se zaradi pomanjkanja finančnih sredstev za redno vzdrževanje vegetacije opusti redno vzdrževanje. Potrebno je odstranjevati prekomerno zarast, odstraniti poškodovane, dotrajane ali mrtve dele in jih nadomestiti z novimi. Sčasoma sonaravni ukrep omogoči rast večjih dreves, kar zaradi večje obremenitve plazljivih brežin ni ravno zaželeno. Prav tako se drevesa postarajo in odebelijo, prihaja do odmiranja in poškodb vegetacije, ki na koncu kot »mrtev« les konča na bregovih vodotokov. Visoke vode ga odnesejo dolvodno, kjer skupaj z ostalimi plavinami povzroča morfološke spremembe in tudi škodo v vodotokih ter na objektih.

Gozdovi v Sloveniji so podvrženi podnebnim spremembam (globalno in lokalno), onesnaženju ozračja, širjenju urbanizacije in gospodarske infrastrukture (prometnice, energetske in telekomunikacijske vodi), prekomernemu izkoriščanju in povečanju deleža divjadi. Našteti dejavniki vplivajo na spremembe vrstne sestave, fragmentacijo gozda, preoblikovanje gozdnega roba, slabitev in postopno propadanje gozdov.

Pokrovnost tal ob vodotokih vpliva na vodni režim. Gozdne združbe ob vodotokih so se prilagodile na specifične razmere (vodostaj, talna voda, količina padavin ...) in izoblikovale svoj lastni vodni režim. Zaradi tega se ob zamenjavi drevesnih vrst vodni režim rastišča spremeni. Sami gozdni sestoji močno vplivajo na naravne ekosisteme. Vegetacija gozda lahko prestreže večino ali del padavin, ki padejo na območje, zmanjšuje površinski odtok, ima protierozijsko funkcijo, varuje brežine nad vodotoki, mlajša drevesa zaustavljajo odmrle drevesa, upočasnijo ali zaustavljajo snežne in zemeljske plazove, preprečuje premeščanje plavin, varuje infrastrukturo pred padajočim kamenjem in okruški ... Gozdovi omogočajo naravni življenjski prostor številnim organizmom, vplivajo na kroženje vode, blažijo klimatske spremembe ... Predstavljajo tudi pomemben okoljski dejavnik, saj vplivajo na zadrževanje vode, zmanjšanje moči vetra, nižanje temperature poletja. Slabitev in staranje gozdov pospešujeta erozijske procese. Prav tako posek gozdnih dreves zmanjša poraslost površja, zmanjša hrapavost, poveča hitrost in koncentracijo površinskega odtoka z območja, ki pospešuje spiranje zemljišč. Sečnja gozdnih dreves pomeni postopen propad njihovega koreninskega sistema. Z izgubo koreninske prepletenosti se zmanjšuje tudi odpornost grmovnega in zeliščnega sloja, kar stopnjuje površinsko odvodnjo padavinskih voda ter sčasoma vodi k povečani erodibilnosti tal in brežin.

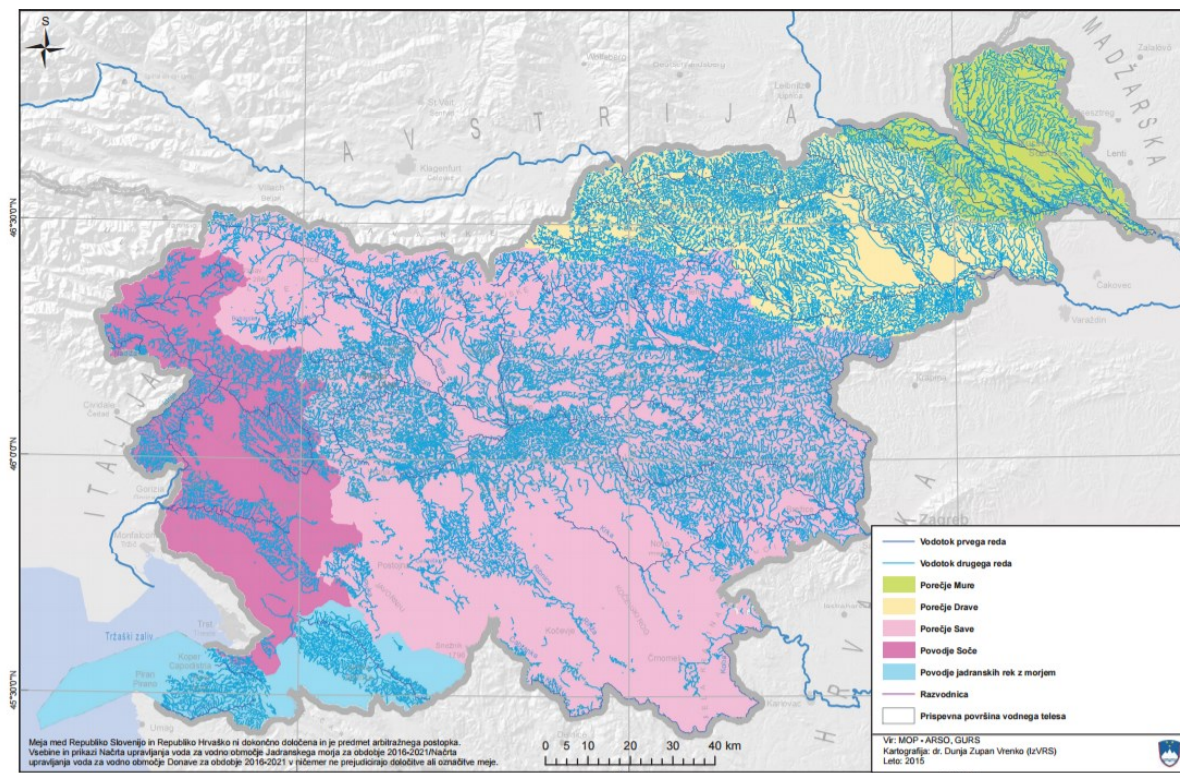


Slika 4: Zapadli les v strugi hudournika nad Čadrgom (Zakotnik, marec 2015).

Gozdovi ob vodnih telesih imajo pomembno varovalno funkcijo, a je potrebno upoštevati tudi ravnovesje med varovalno funkcijo (neposeganje v naravno sukcesijo) in tveganji za porušitev brežin. Pri upravljanju z gozdovi se upošteva različna širina obvodnega pasu. Na bolj strmih brežinah in pri vegetaciji s plitvimi koreninami naj bo ta čim širši glede na dane možnosti, upoštevati pa je potrebno tudi globino rodovitnih tal. Zaradi preprečevanja erozije se teži k čim enakomernjši stalni pokrovnosti tal z vegetacijo na celotnem vodozbirnem območju vodotoka. Pri gospodarjenju z gozdovi se na brežinah ob vodotokih odstranjujejo nestabilna, odmrta in starejša drevesa, sečnja se opravlja tako, da debla padajo stran od same struge, prav tako je treba odstraniti vse lesne ostanke. Sečnja se opravlja selektivno (krepitev vitalnosti obrežne vegetacije), na bregovih pa se ne dopušča visokih lesnih zalog.

3.5 Vodotoki

Hidrografska mreža Slovenije obsega več kot 25.000 km strug vodotokov in preko 8.000 km hudournikov (Mikoš, 1995), ki se v večini primerov zelo prepleta z gozdovi. Območja z razvejano mrežo vodotokov in porasla z gozdom v Sloveniji mnogokrat predstavljajo sestavne dele območij varstva narave in ekološko pomembnih območij (območja Natura 2000), mnoga pa so opredeljena kot zavarovana območja (naravni parki), naravne vrednote ali naravni spomeniki. Prisotnost plavnega in zapadlega lesa spreminja rečno dinamiko in morfologijo vodotokov ter vpliva na transport sedimentov. Les v vodotoku ima lahko dvojno funkcijo, in sicer zagotavlja stabilnost in vpliva na spremembo morfologije.

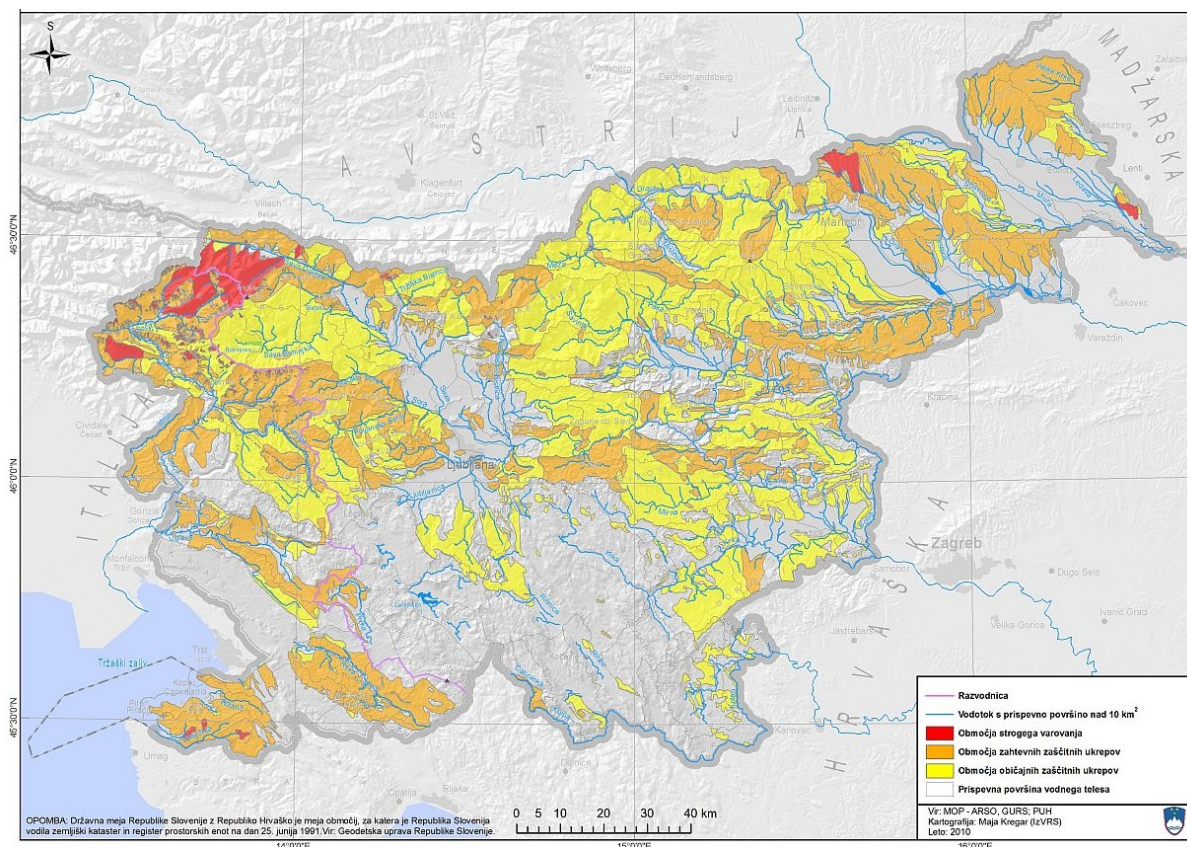


Slika 5: Prikaz hidrografske mreže Slovenije (MOP, 2015).

3.6 Erozijski in hudourniški procesi

Ozemlje Republike Slovenije je erozijsko izpostavljeno, dobrih 40 % ozemlja je erozijsko ogroženih. Približno eno četrtno ozemlja Slovenije predstavljajo hudourniška območja (Mikoš, 1995). Med hudourniške procese poleg hudourniških poplav uvrščamo še odnašanje, premeščanje in odlaganje plavin, na gozdnatih območjih pa se premešča in odlaga tudi lesno plavje. Hudourniški procesi so nenadni, z veliko intenzivnostjo, imajo veliko rušilno moč in so zelo hitri. Ko se začnejo ti procesi, zaradi svoje hitrosti in moči premeščajo naplavine in lesno plavje. Z vidika zagotavljanja preventivne varnosti pred delovanjem hudournikov je treba pri gospodarjenju z gozdovi upoštevati ravnovesje med sprostitvijo sedimentov zaradi golosekov ali manjše poraslosti območja na eni strani ter večjo količino lesnega plavja v vodotokih na drugi strani.

Naravne danosti (relief, geološka zgradba, podnebje, poraščenost z vegetacijo, vodotoki) in antropogene dejavnosti – raba prostora (poselitve, infrastruktura) in dejavnosti (kmetijstvo, gozdarstvo, površinski kopi, rekreacija (smučišča, vodne aktivnosti)) močno vplivajo na sprožilne dejavnike za povečanje tveganja za erozijo in zemeljske plazove. Ti v strugo vodotoka prinašajo zemljino, sneg in na svoji poti odnašajo debela dreves, ki predstavljajo lesno plavje.



Slika 6: Opozorilna karta erozije (MOP, 2010).

Na pojav erozije vplivajo tudi naravne danosti, ki jih lahko uvrstimo v pet skupin (Mikoš, 1995): podnebje, oblikovitost površja, sestava tal, gozd in vode. Pri podnebjem so najpomembnejše padavine in njihova razporeditev, predvsem v prostoru in času. Pomembna je tudi mikroklima posameznega območja – temperaturna nihanja, osončenost in smeri vetra. Predvsem slednji vplivata na rast gozda in v daljšem časovnem obdobju na dotok lesnega plavja v vodotoke. Za dotok plavja v vodotoke je pomembna tudi oblikovitost površja, in sicer nagib, orientacija ter hrapavost površin. V zvezi z nagibom je pomembna tudi nadmorska višina, ker sta od nje odvisni vrsta in ukoreninjenost vegetacije. Pri sestavi kamnin je pomembno njihovo preperevanje in možnost ukoreninjanja vegetacije. Pokrovnost tal ima vpliv na vodni režim in erozijo. Pomembna je za protierozijsko zaščito in preprečevanje spiranja rodovitnih prsti. V primeru, da se vegetacija, ki je bila zasajena z namenom protierozijske zaščite, preveč razraste in postara, preobremeni podlago na strmih preperelih brežinah. Ob obilnejših padavinah se lahko odkruši del brežine in se splazi v strugo vodotoka. Lahko pa se slabše ukoreninjeno ali delno nagnjeno drevo zaradi spodjedanja brežine, snegoloma, vetroloma ali pa prevelike teže ali velikosti za brežino dokončno prevrne in se skupaj s koreninskim spletom skotali v strugo vodotoka.



Slika 7: Drobirski tok z drevesnimi debli čez železniško progo Jesenice – Nova Gorica – Sežana v Soteski (Fotoarhiv JZ TNP, 2007).

4 ZAPADLI IN PLAVNI LES V VODOTOKIH

Po končani zadnji mali ledeni dobi v Evropi konec 19. stoletja se začne povečevati obseg gozdnatosti, zato se ob poplavah poveča tudi delež plavnega lesa v vodotokih. Kljub tendenci zgoščanja ostaja delež gozdnatosti nizek vse do konca 1. svetovne vojne (Comiti in sod., 2016). Prve raziskave in študije o vplivu lesnega plavja na morfologijo in ekologijo vodotokov so se začele izvajati konec 70. let 20. stoletja. Raziskave so se sprva osredotočale na slabo poseljena območja v gorskem svetu. V Evropi in na Japonskem se je po letu 1980 raziskovanje o vplivu lesnega plavja usmerilo k preprečevanju in zmanjševanju obsega naravnih nesreč, ki so povezane s prisotnostjo plavja.

Pri obravnavi problematike lesnega plavja se pojavita dva pristopa (Comiti in sod., 2016):

- vpliv plavja na geomorfološke in ekološke spremembe v vodotokih,
- vpliv plavja na zmanjšanje poplavne varnosti.

Prvi pristop je bolj pogost v severni Ameriki (Združene države Amerike, Kanada), drug pristop pa na evropski celini in na Japonskem.

V Švici se po avgustovskih poplavah 1978 pojavijo prva poročila o vplivu lesnega plavja na varnost konstrukcije pregrad. Na hidroelektrarni Palagnedra (ob švicarsko-italijanski meji) je ob pretoku $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ količina plavnega lesa znašala preko 25.000 m^3 , plavje je zamašilo prelivna polja in povzročilo nekontroliran pretok vode in plavja preko pregrade, zaradi česar je bila pregrada močno ogrožena (Comiti in sod., 2016). Večina plavnega lesa, ki se premešča v času poplav, je »svež« les, odmrli les predstavlja zgolj eno desetino. Tako se za Švico navaja 10 do 12 % delež odmrlega plavnega lesa (Comiti in sod., 2016). Odmrli les največkrat leži v sami strugi oz. v nekaj metrskem obrežnem pasu vodotoka.

4.1 Ekološki pomen lesnega plavja

Kot posledica kopičenja plavnega lesa ob brežinah in zapadlega lesa se v vodotokih ustvarjajo tolmini, ki predstavljajo življenjski prostor za mnoge vodne in obvodne organizme. V tolminih prihaja do povečanega odlaganja in nadaljnje razgradnje hranil, saj se tu razkrajajo odpadlo listje in iglice dreves, trohniijo tudi leseni ostanki, poginuli organizmi ..., kar zagotavlja zadostno količino organskih hranil za razvoj organizmov. Lesno plavje se razkrajja zaradi obrusa z lebdečimi plavinami in prisotnosti mikroorganizmov. Tako je lesno plavje v vodotokih z večjo abrazijo pomembnejši vir organskih hranil kakor odpadlo listje in iglice (Ward, 1986).

Večji delež finih lesenih ostankov je v tolminih vodotokov prisoten v času povečanega pretoka, saj se takrat poveča delež lebdečih plavin, ki brusijo lesno plavje. Razkroj lesa v vodotoku je odvisen predvsem od spremenljivosti vlažnostnih razmer, v manjši meri pa od količine kisika. Spremenljivost vlažnosti in kisika preko leta zelo niha. Če je vodotok bogat z organskimi hranili (fosfor, dušik), se v tolminih lažje razvijejo alge, ki ta hranila porabljajo. V prehranjevalni verigi alge postanejo vir hrane za višje razvite organizme.

Tolmini predstavljajo življenjski prostor, vir hrane, zatočišče pred plenilci, možnost razvoja in drstenja za številne organizme, predvsem vretenčarje (ribe, dvoživke) in makroinvertebrate (vodni nevretenčarji). Stopnje v vodotoku omogočajo lažje prehode rib gorvodno – naravni ribji prehodi. Zaradi ustvarjanja stopenj se voda, ki teče preko zapadlega lesa, dobro ozrači.

Tako je tudi v bolj sušnih mesecih dovolj kisika, ki ga porabljajo organizmi. Ob tolmunih se talne vlažnostne razmere v obrežnem pasu manj spreminjajo, zato se na njem razvije vegetacija, ki jim take razmere ustrezajo. Na območjih tolmunov vegetacija lahko za rast porablja tudi hranila in kisik.

Plavni in zapadli les vplivata na zmanjšanje pretočnih hitrosti, zaradi nastanka tolmunov se upočasni prehajanje poplavnih valov, poveča se lokalno shranjevanje sedimentov in organskih hranil, poveča se samočistilna sposobnost vodotokov. Zaradi dviga vode za zapadlim lesom se dviguje gladina podtalnice.

4.2 Morfološke spremembe v vodotoku zaradi zapadlega in plavnega lesa

Zapadli in plavni les skupaj z naravnimi danostmi vplivata tudi na morfologijo vodotokov.

Na morfološke spremembe v vodotokih vplivajo različni dejavniki: topografija terena, količina odtoka, transport sedimentov, naklon brežin, globina korita, geološka zgradba, poraslost z vegetacijo in prisotnost lesnega plavja v vodotoku. Vodotoke lahko po Charltonu obravnavamo kot odprte sisteme, kjer se količine materiala ves čas spreminjajo. Sistem je odprt, kadar se material in energija izmenjujeta z okolico. Glede na opredelitev lahko določimo različne količine v sistemu (Charlton, 2008):

- vhodne količine,
- izhodne količine,
- zaloge.

Med vhodne količine lahko v rečnih sistemih štejemo vodo, sedimente in biološke snovi, ki so preko podnebnih, erozijskih in bioloških procesov vnesene v vodotoke. Izhodni količini sta voda in transportirani sedimenti, ki se na iztoku odlagajo v oceane in jezera. Med zaloge uvrščamo vodo, ki se lahko nahaja v naravnih ali umetnih jezerih ter v podtalnici, sedimente, ki se do pojava naslednje visoke vode začasno odložijo na poplavnih ravninah, na prodiščih, v jezerih, vodotokih in hranila, ki krožijo v vodotoku. Energijo v sistem vnašajo podnebni procesi, ki zagotavljajo zadostno količino vode za delovanje sistema.

Širina struge vpliva na premestitveno zmogljivost vodotoka. Zadostna širina struge zagotavlja ustrezno pretočno zmogljivost vodotoka. Korita rek se nenehno spreminjajo in premikajo, ker se stalno spreminjajo razmerja med erozijsko močjo in odpornostjo dna oz. brežin. Z erozijskim delovanjem na dno oz. brežine se sproščajo sedimenti, ki se transportirajo po vodotoku in se nato dolvodno odložijo. V strmejših vodotokih ovire iz skal in plavnega lesa lahko povzročajo velike morfološke spremembe v strugi. Tako se premakne glavna os struge proti nasprotni brežini, ustvarijo se vzporedne oz. nadomestne struge, stranski rokavi, pojavlja se poglobljane dna in erodiranje brežin.

Stopničenje vodotoka z zapadlim lesom in posledičnim odlaganjem sedimentov povzroča spremembo globine, širine in naklona struge vodotoka. Za odloženim plavjem se začno kopičiti deli sedimentov in manjših plavin, zviša se niveleta dna. Širina struge se na območju zaježitve poveča, prav tako gladina. Spremeni se tudi naklon med posameznimi stopnjami. Pod mestom prelivanja čez oviro se pojavlja spodjedanje dna in ustvari se tolmun.

Zapadli les v vodotokih povzroča oz. stopnjuje morfološke spremembe vodotokov, zaradi upočasnitve vodnega toka in povečane hrapavosti se poveča odlaganje sedimentov, zaradi

odlaganja lesa se spreminjata širina in tlorsni potek vodotoka, povečanje hrapavosti pa vpliva tudi na stabilnost same posteljice vodotoka.

4.2.1 Odlaganje rečnih sedimentov

Zapadli in plavni les imata pri transportu sedimentov omejeno vlogo. Večji vpliv na premeščanje ima odložen oz. zapadli les, medtem ko plavni les v gibanju nima skoraj nobenega vpliva. Na odlaganje sedimentov v vodotoku vpliva predvsem zmanjšanje hitrosti vode (Lisle, 1986). Sedimenti se odlagajo tudi ob ovirah v strugi vodotoka. Hitrost vode se spreminja tudi zaradi tlorsnega in niveletnega poteka struge. Sedimenti se najpogosteje odlagajo tam, kjer se hitrost vode in strižne sile tako znižajo, da niso več sposobne premeščati sedimentov. Odloženi plavni les namreč poveča makro hrapavost v vodotoku in tako zmanjša strižne sile, ki bi lahko spodjedale dno in brežine.

Lesno plavje in zapadli les v strugi vodotoka povzročajo dvig gladine gorvodno, razširitev struge in zmanjšanje hitrosti, zato se začnejo sedimenti kopičiti. Transport sedimentov zmanjšujeta tudi obrežna vegetacija in protierozijska zaščita brežin (Keller in Swanson, 1979). S staranjem, razkrojem, obrusom ... lesnega plavja se poveča pretok skozi zgostitve. Prihaja do povečanja vrtinčenja in spodjedanja dna, kar ponovno sproži transport sedimentov.



Slika 8: Odloženo lesno plavje na sotočju razvejanih strug Soče (Zakotnik, november 2012).

Nastajanje prodišč je povezano z odlaganjem sedimentov. S pojavom prodišč v vodotokih prihaja do nastanka stranskih rokavov in strug. Pomembno vlogo pri tem ima tudi odložen plavni les, ki zmanjšuje transport sedimentov in povečuje odlaganje, kar vodi v nastanek novih prodišč. Prodišča v ravninskih in dolinskih odsekih vplivajo na tlorsno obliko vodotoka.

Prodišča so prevladujoča oblika dna v prodonosnih rekah. Tako se plavni les odlaga na stalnih prodiščih na notranji strani zavojev, na sotočjih, na izmeničnih prodiščih, ki se pojavljajo na daljših ravnih odsekih in v širših razvejanih vodotokih na sredinskih prodiščih. Nastanek prodišč je povezan tudi z nastankom erozijskih tolmunov. V preteklosti se je pri regulacijah vodotokov želelo doseči čim večjo prevodnost in čim manjšo možnost naplavljanja. Danes je nastanek prodišč, na katerih se lahko odlaga plavni les, hkrati pa omogoča življenjski prostor vodnim in obvodnim organizmom, zaželen. Pretehtati je treba med tveganji poplav in biološkimi koristmi.

V ožjih in strmejših vodotokih – razen če so v njih ovire, kjer bi se lahko odlagal plavni les – lesno plavje nima večjega vpliva na transport sedimentov, saj ni možnosti za ustvarjanje prodišč, na katerih bi se les kopičil in prispeval k odlaganju sedimentov. V širših vodotokih se pojavljajo prodišča, na katerih se lahko odlaga tudi lesno plavje (Lassettre in Harris, 2001). Vodotoki s prodišči omogočajo odlaganje plavnega lesa in njegovo kopičenje, posledično se povečuje odlaganje sedimentov. Na obsežnejših prodiščih, še posebej takrat, ko so daljša časovna obdobja med posameznimi visokimi vodami, se nakopičeni les sčasoma začne razgrajevati, kar omogoča obnovo obrežja ter razvoj pionirske obvodne vegetacije (Abbe in Montgomery, 1996).

V vodotokih z manjšim padcem in večjo širino ima zapadli les manjši vpliv na transport in odlaganje sedimentov, saj so hitrosti in strižne sile manjše zaradi vpliva naklona. Sedimenti se v takih vodotokih odložijo samo začasno, do časa nastopa visokih voda, ki so jih sposobne premeščati dolvodno.

Bilby in Ward sta leta 1989 opravila raziskave o deležu lesa, ki vpliva na odlaganje sedimentov. Ugotovila sta, da se delež lesa, ki vpliva na odlaganje sedimentov, zmanjšuje s širino vodotoka. Tako je pri kanalih, ožjih od 7 m, delež največji, in sicer ima vpliv na kopičenje sedimentov 40 % zapadlega lesa. V vodotokih s širino med 7 in 10 m delež pade na 30 %, v vodotokih, širših od 10 m, pa je delež vpliva le še 20 %. Ugotavljala sta tudi smer plavnega lesa. V vodotokih, ožjih od 7 metrov, je približno 40 % debel usmerjenih pravokotno na smer toka, v širših strugah pa je bil enak delež debel vzporeden s smerjo toka (Bilby in Ward, 1989).

Ovire, sestavljene iz plavnega lesa, imajo v vodotoku pomembno vlogo pri skladiščenju in transportiranju sedimentov (Nakamura in Swanson, 1993). Po odstranitvi plavnega lesa iz vodotoka se poveča transport sedimentov in zmanjša hrapavost struge.

4.2.2 Širina struge

Širina struge vodotoka je pogojena s pretočno globino. Dokler se ta toliko ne zmanjša, da se dno struge ne znižuje več, ker posteljica onemogoča globinsko erozijo zaradi stabilne podlage, se lahko vodotok širi. Slednje velja za vodotoke, ki tečejo v aluvialnih naplavinah in pri oblikovanju struge sodelujejo samo rinjene plavine (Mikoš, 2007).

Lesno plavje, odloženo v ali neposredno ob vodotok, lahko lokalno razširi strugo. Z razširitvijo struge se znižajo pretočne hitrosti, zmanjša se transport sedimentov, pri enakem pretoku se zniža gladina. Večje količine lesnega plavja v vodotoku zmanjšajo energijo vodnega toka. Zmanjšanje energije zaradi lesnega plavja je bolj izrazito v vodotokih s

strmejšim naklonom. Zaradi odlaganja sedimentov in posledičnega dviga nivelete dna se zmanjša povprečni naklon vodotoka (Keller in Swanson, 1979).

Zaradi odloženega ali zapadlega lesa v vodotoku se matica toka preusmeri proti sosednji brežini. Če je brežina manj stabilna, jo tok erodira in tako se struga razširi (Bisson in sod., 1987). Raziskave, ki so bile opravljene v zahodnem delu Združenih držav Amerike na vodotokih, ki se izlivajo v Tihi ocean, so pokazale, da se lahko struga zaradi prisotnosti lesnega plavja v vodotoku razširi za 50 do 100 % povprečne obstoječe širine vodotoka oz. se oblikuje stopnjasta niveleta (Keller in Swanson, 1979).



Slika 9: Odloženo lesno plavje na Lepenci je preusmerilo matico toka na nasprotno brežino, ki se je zaradi tega začela erodirati (Zakotnik, maj 2017).

Na širino struge vpliva količina lesnega plavja v vodotoku. Večja količina plavja v vodotokih s položnim do srednje velikim naklonom ima vpliv na morfologijo struge in brežin, posamezni kosi pa le na odlaganje sedimentov (Hogan in sod., 1998).

V strmejših vodotokih ima lesno plavje manjši vpliv na širjenje vodotoka, saj se v takih strugah nahaja veliko večjih skal in balvanov, mednje in nanje pa se odlaga lesno plavje. Tako odloženo plavje nima posebne vloge pri transportu sedimentov, še manj pa pri širjenju vodotoka. Med ovire zagozdeno plavje in nakopičeni material lahko zaustavljata pretok vode ter jo preusmerita v novo nastajajočo strugo.

4.2.3 Stabilnost struge

Lesno plavje vpliva pozitivno na stabilnost struge, saj s precejanjem vode skozi zgostitve plavja zmanjša energijo vode. Med prodišči in odloženim plavjem se pojavljajo lokalne turbulence (vrtinci), ki lahko lokalno spodjedajo in poglobljajo dno struge. Pri nizkih naklonih

vodotoka obstoječi zapadli les, ustavljen prečno na smer toka, ustvari stopnjo. Če je več zaporednih padlih debel, lahko pride do stopničenja daljšega odseka vodotoka. Med stopnjami se zato zmanjša transport sedimentov, prihaja do odlaganja sedimentov, poveča se hrapavost dna, zmanjšajo se hitrost vode in strižne sile, ki bi lahko erodirale brežino in poglobljale dno (Heede, 1985).

Stopničenje vodotoka, kot posledica odloženega plavja, ima zelo pomembno funkcijo pri zagotavljanju stabilnosti dna in brežin vodotoka. Plavje, ki je odloženo ob brežinah, preprečuje škodno delovanje na manj stabilne brežine. Zaradi odlaganja sedimentov se poveča hrapavost, zato se zmanjša moč erodiranja dna. Če pride do zmanjšanja ali odstranitve lesnih plavin v vodotokih, lahko to povzroči ali stopnjuje destabilizacijo vodotoka.

V širših naplavinških vodotokih imajo večje skale in balvani, v kombinaciji z lesnim plavjem, ugoden vpliv na stabilnost vodotoka. V počasi tekočih vodotokih se ob ovirah pojavljajo manjši vrtinci, ki zmanjšajo posamezne lokalne strižne sile, ki se pojavljajo v vodotoku zaradi različne morfologije struge. Z zmanjšanjem lokalnih strižnih napetosti se poveča stabilnost dna struge (Smith in sod., 1993).

Na stabilnost struge vpliva tudi vegetacija na brežinah, ob njih in na prodiščih, saj koreninski sistem vegetacije utrdi odložene sedimente. Na izboljšanje razmer za rast vegetacije ob vodotokih pozitivno vpliva tudi lesno plavje, ki se odloži ob brežinah in na oblikovana prodišča. Lesno plavje v začetku povečuje možnost odlaganja in stabilizacije sedimentov, kasneje pa začne počasi propadati in se razkrajati. Odmrta biomasa plavja omogoča organska hranila za rast pionirskih vrst vegetacije, ki se kasneje razvije v stabilnejše vegetacijske sestoje. Brežine z izboljšano prekoreninjenostjo postanejo manj erozijsko izpostavljene. Matica toka pa se preusmeri proti sredini. Odloženi sedimenti utrjujejo glavno strugo, v katero se sčasoma preusmerijo vodni tokovi.



Slika 10: Zaradi bočne erozije je padlo drevo v Lepenco (Fotoarhiv JZ TNP, 2004).

Seveda lahko zapadli in odložen plavni les bistveno poslabšata stabilnost vodotokov. Problematično je preusmerjanje matice toka proti nasprotni brežini, kjer se lahko pojavi obrežna erozija, ki vodi do splazenja brežine v vodotok in poplavljanja ali odlaganja sedimentov v širšem obvodnem pasu. V času visokih voda plavni les udarja v brežine in konstrukcije (vzdolžne in prečne), kar vodi do sprememb in poškodb. Trki vplivajo na stabilnost brežin, kar pogosto vodi do splazenja materiala skupaj z vegetacijo v vodotok.

4.2.4 Tlorisni potek struge

Vodotoke glede na njihov tlorisni potek lahko razdelimo na ravne, meandrirajoče in razvejane struge (Mikoš, 2007). Ravne struge so največkrat posledica preteklih reguliranj in kanaliziranj vodotokov. V naravi se taki odseki pojavljajo na stabilnih območjih, kjer je majhna verjetnost globinske in bočne erozije. Ravni odseki se izoblikujejo na območjih, kjer voda teče preko kamninskih pragov, ki preprečujejo globinsko erozijo, in ob erozijsko bolj odpornih brežinah. Na tlorisni potek podobno kot kamninski pragovi vpliva tudi zapadli les, ki se odloži bolj ali manj pravokotno na smer toka. Za njim se začnejo kopičiti odloženi sedimenti, ki stabilizirajo dno. Odložen plavni les ob brežinah zmanjšuje delovanje strižnih sil, zato je vegetacija manj poškodovana, koreninski sistem in prepletenost pa omogočata boljšo protierozijsko zaščito brežin.



Slika 11: Na prodišču Save Dolinke na Tabrah odložen plavni les, ki ob večjih pretokih del vode preusmeri v stranski rokav struge (Zakotnik, maj 2017).

Struge z zavoji oz. meandri se pojavljajo v vodotokih z nižjim naklonom in manjšimi hitrostmi vode. Meandrirajoče struge se nahajajo na območjih, kjer so brežine manj erozijsko odporne na delovanje strižnih sil vode v zunanjih zavojih. Odložen plavni les ob brežinah lahko še dodatno prispeva k nastanku zavojev, saj se matica toka preusmeri k nasprotni brežini. V širokih naplavinjskih rekah se meandri ustvarjajo med izmenjujočimi se prodišči. Na njih se v času višjih voda zaustavlja in odlaga plavni les, ki se medsebojno začne prepletati ter ustvarjati manj prehodne ovire. S tem se tokovi preusmerjajo proti sredini oz. k nasprotni

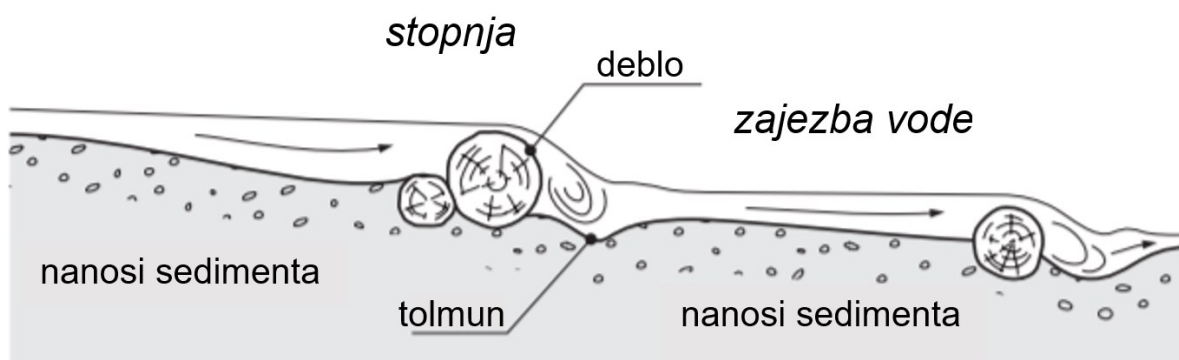
brežini vodotoka. Preusmeritev toka vpliva na povečano možnost ustvarjanja zavojev na vodotokih.

V primeru, da se vodotok razdeli v več glavnih strug in vsaka prevaja določeno količino skupnega pretoka, je to razvejana struga. Pojavlja se tako v povirnih kot v nižinskih delih vodotoka. V prodonosnih rekah nastanejo številna prodišča zaradi odlaganja sedimentov, nizki in srednje veliki pretoki se tako začasno delijo in se nato spet združujejo v enotno strugo. Na prodiščih odložen plavni les poveča možnost razvejanosti struge. Ob lesu se odlagajo sedimenti, večja količina in prepletenost plavin pa predstavljata večjo oviro toku vode, tako da se slednji preusmeri drugam. Ob visokih vodah se tako lahko tvorijo otoki, mimo katerih teče voda in ustvarja dodatne struge.

Odlaganje sedimenta v rečnih koritih vpliva tudi na tlorisni potek vodotoka. Les v vodotokih lahko poleg odlaganja sedimentov vpliva tudi na matico toka v strugi. Odložen les ob bregovih lahko deluje kot jezica. Matico toka odrine proti sredini ali proti nasprotni brežini in povzroči spodjedanje le-te. Z novim dotokom sedimentov se stopnjuje bočno erozijsko delovanje in spodjedanje brežin (Nakamura in Swanson, 1993).

4.2.5 Nastanek stopenj in tolmunov

Naravne pragove oz. stopnje v vodotokih najpogosteje ustvarja zapadli les, ki zaradi različnih vzrokov (veter, sneg, preperevanje, erozija ...) pade v strugo. Ob vodotokih, poraslih z gozdom, sta glavna gradnika stopenj zapadli in plavni les. Vplivata tudi na smer toka in hrapavost ter transport sedimentov. Ker se zapadli les v vodotokih ob pretežnem pojavljanju visokih voda lahko zadrži dolgo časa (30 do 50 let), se tudi stopnje ohranijo dolgo časa in tako brez človekovih posegov stabilizirajo niveleto dna. Če so v strugi prisotni večji kamni ali skale, se med transportom po vodotoku mednje lahko ujame plavni les, ki začne oblikovati prag oz. stopnjo. Pogostejše se pojavljajo v vodotokih z večjim naklonom, njihovi gradniki pa so večji kamni ali skale in leseni ostanki, ki se med transportom plavnega lesa zaustavijo ob oviri.



Slika 12: Shematski prikaz erozijskega tolmana zaradi zapadlega lesa (povzeto po Lange in Bezzola, 2006).

V položnejših vodotokih je zapadli les glavni gradnik stopenj, pod katerimi se ustvarjajo tolmini (Abbe in Montgomery, 1996). Na zahodni obali ZDA je približno 20 do 80 % tolmunov posledica odloženega lesnega plavja (Lisle, 1986). V strmejših in ožjih vodotokih ima delež lesnega plavja večji vpliv na nastanek stopenj, kakor pa v toku prisotne ovire (kamni, skale, balvani) (Bilby in Ward, 1989; Keller in Swanson, 1979). V ožjih in strmejših vodotokih je večja verjetnost, da bodo debela v strugi ležala pravokotno na smer toka in tako omogočala

razvoj stopenj ter tolmunov. V širših in položnejših vodotokih so posamezna debela razporejena bolj diagonalno na smer toka, zato je verjetnost za nastanek stopenj manjša. Tolmuni se lahko ustvarijo, ker tok vode teče skozi ožine med posameznimi debli in ustvarja vrtince, ki spodjedajo dno. V tolmunih prihaja do menjavanja grobih in finejših sedimentov (Chin, 2002, citirano po Pribyla in sod., 2016). Iz tolmunov se sedimenti v obdobju višjih voda večkrat letno transportirajo dolvodno.

Debla, ki padejo ali se ustavijo v vodotoku pravokotno na smer toka, so glavni gradniki stopenj in tolmunov (Bilby in Bisson, 1998). V tolmunih se shranjujejo večje količine sedimenta, ki se v času visokih voda transportirajo dolvodno. Ko se preko zapadlega lesa preliva voda, se ustvarjajo vrtinci in turbulenca, ki dolvodno povzročajo poglobljanje dna struge in sproščanje sedimentov. Keller in Swanson ugotovita (1979), da se v vodotokih na zahodni obali Združenih držav Amerike zaradi prisotnosti lesnega plavja povprečni naklon zmernih in strmejših vodotokov lahko zmanjša za 30 do 80 % (Keller in Swanson, 1979).



Slika 13: Zaustavljen plavni les za skalnatimi ovirami na Soči v Zgornji Trenti (Zakotnik, julij 2017).

Prisotnost zapadlega lesa ima manjšo vlogo na nastanek erozijskih tolmunov v širših vodotokih, saj pomen lesnega plavja na nastanek tolmunov s širino vodotoka upada (Bilby in Ward, 1991). V položnejših vodotokih z nakloni med 0,01 in 0,05 %, je povezava med zapadlim lesom in tolmini zelo velika, v položnejših pa se zmanjša. Tako imajo v položnejših vodotokih večji vpliv na nastanek tolmunov hidravlični dejavniki kot lesno plavje (Montgomery, 1995). V širokih vodotokih se večina odloženih lesnih plavin nahaja ob bregovih in prodiščih, zato skoraj ne vplivajo na tvorbo stopenj preko celotne struge. Lahko pa se tvorijo manjši tolmini ob bregovih, saj na mestih odloženega plavja prihaja do odlaganja sedimentov.



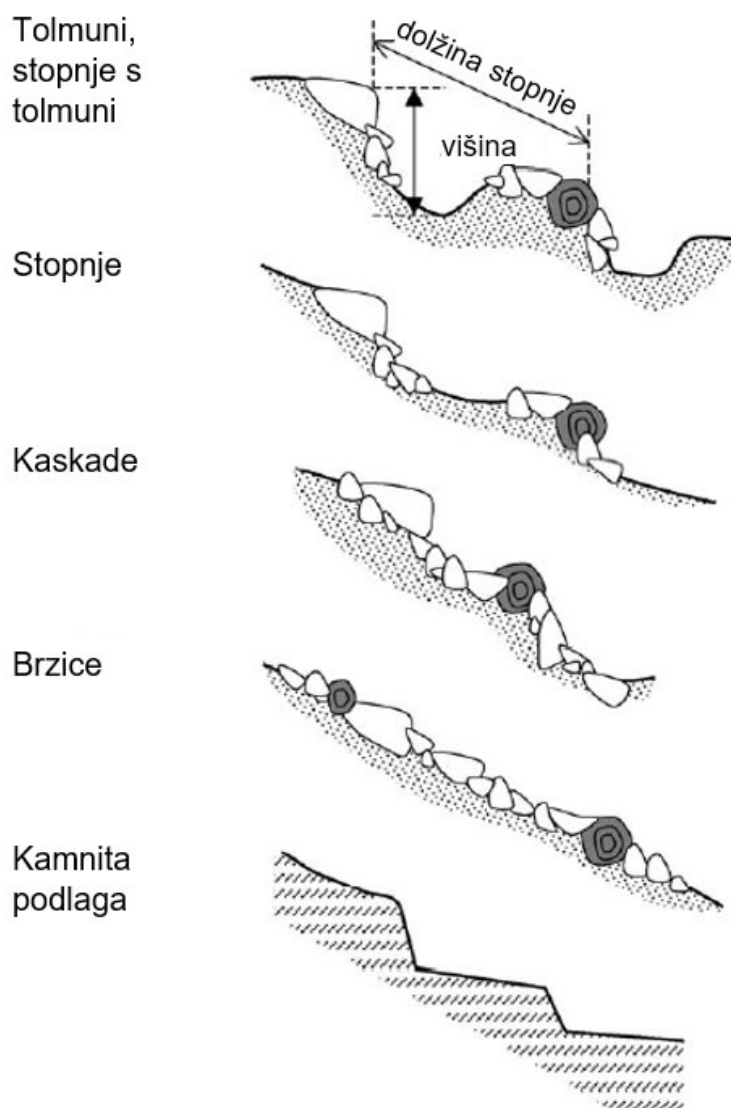
Slika 14: Za odloženim plavnim lesom v Velikih koritih Soče ob povečanih vodotokih nastane zajezev (Zakotnik, maj 2017).

Na ustvarjanje naravnih stopenj vpliva lesno plavje, daljše od 1 m in premera vsaj 10 cm (Wohl, 2000). Geometrija stopnje s tolmunom je pogojena z višino stopnje in dolžino do naslednje stopnje. Višina stopenj je odvisna od velikosti sedimenta oz. premera plavnega lesa, ki se premeščajo po vodotoku. Višina se povečuje v odvisnosti od velikosti sedimenta, a pri zelo velikih sedimentih se začne spet zmanjševati. Razdalja med stopnjami je zelo različna, meri od nekaj deset centimetrov do nekaj metrov, odvisna je od geološke podlage, količine transportiranega sedimenta, naklona podnebja in dinamike vodotoka. V vodotokih z večjim naklonom so razdalje med posameznimi stopnjami manjše kot v položnejših vodotokih, kjer so posledično tudi tolmini daljši.

V strmih vodotokih se stopnje najpogosteje tvorijo z zaustavljanjem premeščajočih plavin ob in na večjih kamnih, ki predstavljajo oviro. Stopnje se najpogosteje tvorijo pod antidinami. Ko se začnejo odlagati večji sedimenti, sčasoma omogočijo odlaganje plavnega lesa, ki skupaj z njimi začne tvoriti stopnje. Polovica vseh stopenj v naravnih vodotokih nastane, ko se med premeščanjem plavin in plavja to ujame med že obstoječe ovire. Četrtnina jih nastane pod antidinami, 20 % je posledica porušitve gorvodnih stopenj, 5 % stopenj pa nastane zaradi lokalnih poškodb dna zaradi erozije (Church in Zimmerman, 2007).

Stopnje se lahko porušijo zaradi posledic povečanja hitrosti vode in spodjedanja dna pod prelivom. Porušitev nastopi tudi v primeru plazov in drobirskega toka, saj se poškodujejo.

V nižje ležečih vodotokih je tok vode laminaren in omogoča lažje tvorjenje stopenj. V vodotokih s strmejšim naklonom se v odvisnosti od geološke zgradbe mnogokrat tvorijo kaskade.



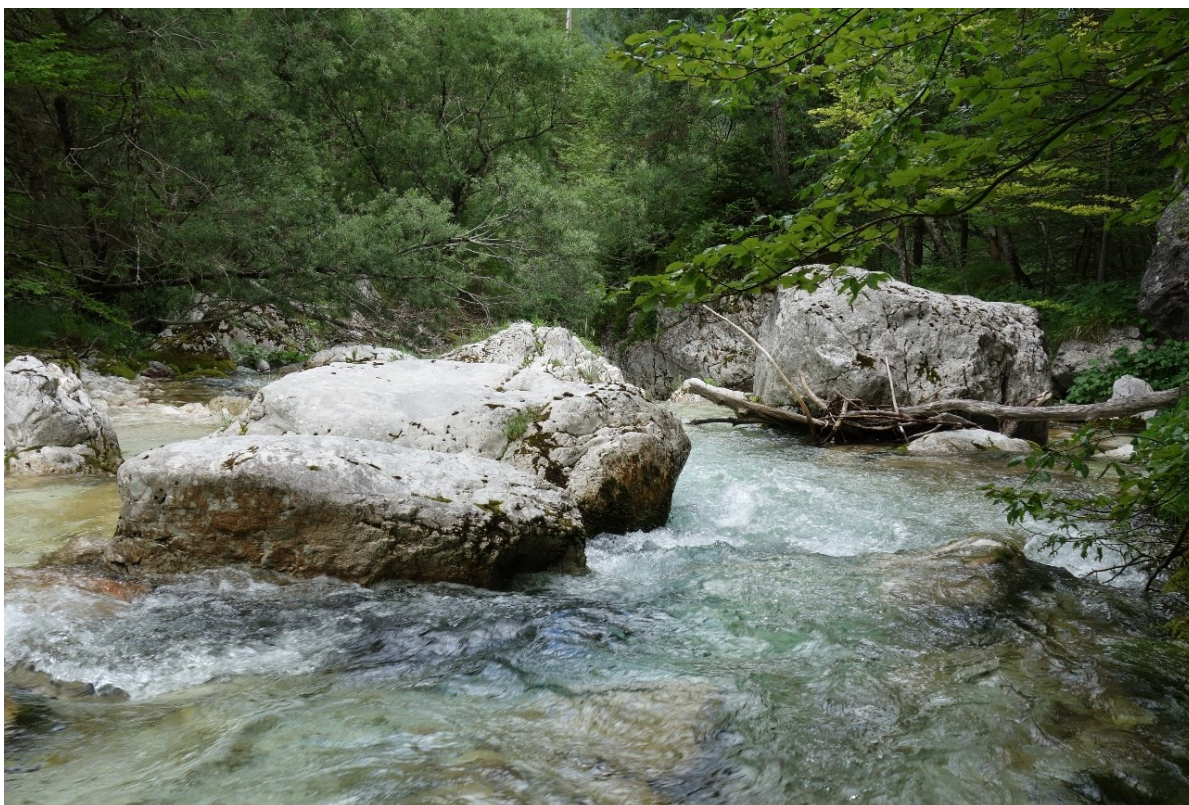
Slika 15: Prikaz različne oblikovanosti stopenj v vodotokih (Gomi in sod., 2003).

V gorskih vodotokih so prisotni sezonsko pogojeni visoki pretoki (spomladansko taljenje snega in jesenska deževja ter posamezni nevihtni dogodki), zato so podvrženi erozijskemu delovanju. S tvorjenjem stopenj iz zapadlega lesa ali zaustavitvijo plavnega lesa med večje kamne se gorskim vodotokom močno poveča hrapavost, ki vpliva na zmanjšanje erozijske izpostavljenosti.

Za stopnjami iz zapadlega lesa se skladišči 10- do 15-krat več sedimentov, kot v običajnih vodotokih (Faustini in Jones, 2003). V vodotokih, po katerih se premešča malo sedimentov, je zapadli in odloženi plavni les edini vir hrapavosti. Če je stabilno odložen, lahko zadrži večje količine sedimenta. V bolj gramoznih rekah ima plavni les manjši vpliv na hrapavost, zato jo samo nekoliko poveča. Zapadli in plavni les, ki se dobro prilegata na večje kamne, oblikujeta zelo stabilne stopnje, ki lahko na dolgi rok shranjujejo večje količine sedimentov. Stopnje, grajene iz zapadlega lesa in kamnov, so odpornejše na delovanje vodnih sil, saj so manj toge od samih kamnov.

4.3 Sprememba hidravlike v vodotoku zaradi zapadlega in plavnega lesa

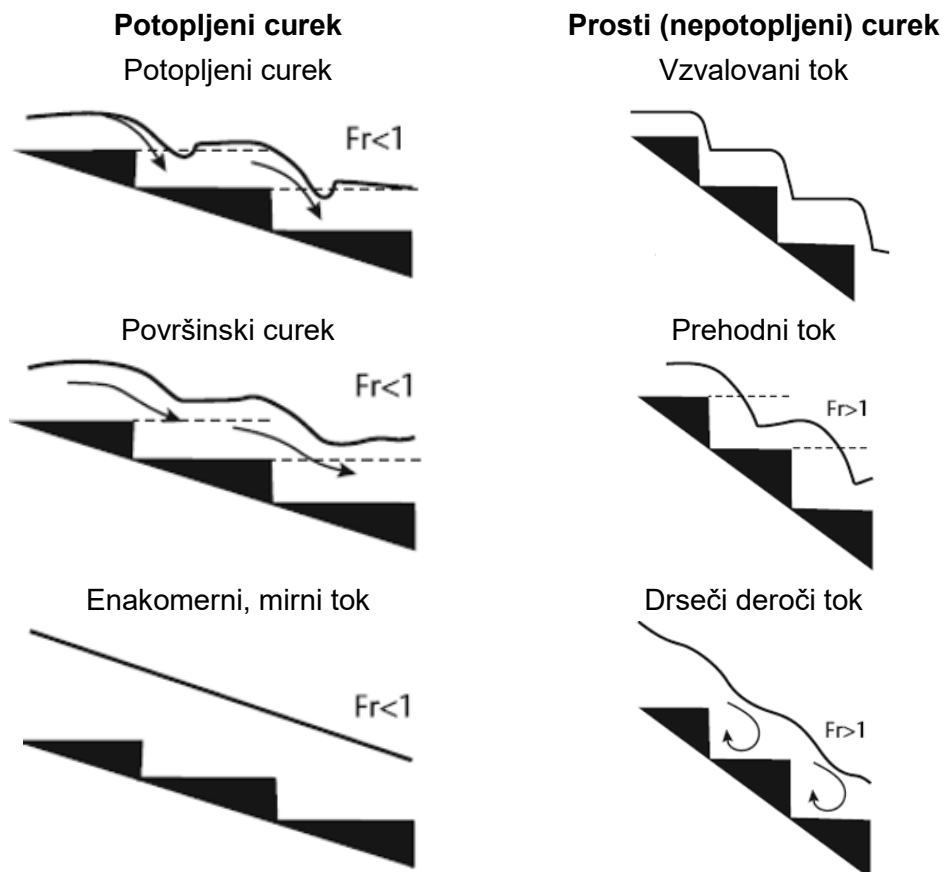
Na prelivu čez stopnjo se zaradi povečanja hitrosti toka pojavi veliko nihanje Froudovega števila, ki niha med kritičnim ($Fr = 1$) in deročim tokom ($Fr > 1$). Režim toka je odvisen od naklona in hrapavosti. Vodotoki z blažjim naklonom imajo povečini mirni tok, tisti s strmejšimi pa imajo velikokrat deroči tok. Oscilacije med deročim in mirnim tokom zagotavljajo stabilnost posteljice dna. Na prehodu iz potopljenega v prosti tok prihaja do izrazitih hidravličnih in morfoloških sprememb. Približno 20 do 40 % upora toka v vodotokih z ovirami prispeva hrapavost zrn (Curch in Zimmermann, 2007). Kritični ali deroči tok ob potopitvi v dolvodni tolmun, vodni skok ali vrtinec med kamni zaradi zmanjšanja hitrosti postane miren. Izguba energije v mirnem in deročem je poglavitni vzrok odpornosti proti toku.



Slika 16: Nastanek vodnega skoka in vrtinčenja pri prelivanju čez stopnjo (Zakotnik, julij 2017).

Hidravlične stopnje so najpogostejši disipacijski objekti v vodotokih. V nižinskih delih vodotokov gradimo pragove za zagotavljanje poplave varnosti, ki so nekaj 10 cm visoki umetni prečni objekti. Pragovi so namenjeni za stabilizacijo nivelete dna struge, gorvodno se zmanjša naklon vodotoka, pri pretakanju čez stopnjo pa se zmanjšajo hitrosti, strižne sile in energija vodnega toka. Stopnje na vodotok vplivajo pozitivno, saj se zmanjša nevarnost erodiranja brežin in posteljice, prepreči se tudi nekontrolirano širjenje struge, več zaporednih stopenj zagotavlja dolgoročnojšo stabilnost, izboljšajo se tudi hidravlične in ekološke lastnosti vodotoka. Prag pri nizkih do srednje velikih pretokih ustvari lokalno zaježbo, pri visokih vodah pa omogoča nemoten pretok. Pod pragom se pojavi erozijski tolmun, izpodjedeni material pa se odloži v dolvodnem tolmunu naslednjega praga.

V odvisnosti od naklona, režima toka in velikosti pretoka se pri prelivanju čez zaporedne stopnje zaradi različnega obnašanja gladine ustvarjajo različni tipi skokov.



Slika 17: Režimi toka (povzeto po Church in Zimmermann, 2007).

Disipacija energije vodnega toka je odvisna od višinske razlike med niveleto dna in višino stopnje oz. naklona ter količine vsrkanega zraka. Z večjo količino vsrkanega zraka se zmanjša problem kavitacije, ki lahko na betonskih stopnjah povzroča poškodbe. V zelo strmih vodotokih se večji del pretočne energije disipira pri prelivanju čez stopnje zaradi pojavljanja turbulenc.

Naklon stopenj lahko poenostavljeno izračunamo iz razmerja višine in dolžine stopnje:

$$S = H_s / L_s \quad (1)$$

Kjer pomeni:

S – kritični naklon (–),

H_s – višina stopnje (m),

L_s – dolžina do naslednje stopnje oz. dolžina tolmana (m).

Če je tok kritičen oz. na meji med deročim in mirnim, torej je $Fr = 1$, potem lahko izračunamo kritični naklon stopenj (Church in Zimmermann, 2007):

$$S_c \approx g \cdot n^2 / d_c^{1/3} \quad (2)$$

Kjer pomeni:

S_c – kritični naklon stopnje (–),

d_c – kritična globina toka (–),

n – Manningov koeficient hrapavosti (–).

Ob visokih vodah se pri prelivanju čez stopnje pojavljajo turbulence, ki zmanjšajo vodno energijo. Delež disipacije energije je odvisen od naklona in višine stopnje. Kadar se turbulence zaradi nizkega pretoka pojavljajo ob dnu, je disipacija energija manjša in prihaja do spodjedanja posteljice vodotoka. Disipacija energije je zelo neenakomerna, pred stopnjo je navidezna energijska črta vzporedna z dnem, tik pred prelivanjem se nekoliko zviša zaradi zmanjšanja gladine, takrat se poveča tudi hitrost vode. Ko je pri prelivanju v hidravličnem skoku dosežen turbulentni zavoj, se energijska črta zniža. Po hidravličnem skoku je energijska črta spet vodoravna, hitrost vode pa je najnižja. Stopnje najbolje disipirajo energijo v času nizkih do srednje velikih pretokov. Pri disipaciji prihaja zaradi znižanja višine do izgub potencialne energije, zaradi hrapavosti pa se zmanjša kinetična energija. Klasična energijska enačba se lahko uporabi za izračun disipacije energije skozi zaporedje stopenj ob upoštevanju delne potopitve hidravličnega skoka. Izgubo energije tako lahko izračunamo po energijski enačbi (Wilcox in sod., 2011):

$$\left[H_{zg} + d_{zg} + \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right)_{zg} \right] = \left[H_{sp} + d_{sp} + \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right)_{sp} \right] + h_L \quad (3)$$

Kjer pomeni:

H – višina dna (m),

d – globina vode oz. pretočna globina (m),

$\frac{v^2}{2g}$ – člen kinetične energije (m),

h_L – izguba energije oz. razlika med dvema energijskima nivojema (m),

α – koeficient, ki upošteva spremembo hitrosti na posameznem odseku. Če je zelo podoben za gorvodni in dolvodni odsek, se ga pri izračunu h_L lahko zanemari.

Indeks zg predstavlja gorvodni odsek, sp pa dolvodni odsek.

Če v energijski enačbi zamenjamo indeksa za gorvodni in dolvodni odsek in ju nadomestimo s stopnjo in tolmunom ob upoštevanju potopitve vodnega skoka, lahko enačbo zapišemo tudi kot (Wilcox in sod., 2011):

$$E_{stopnja} = H + H_s = h_d + d_{tolmun} = E_{tolmun} + h_L \quad (4)$$

Kjer pomeni:

$E_{stopnja}$ – izguba energije na stopnjo (m),

H – specifična energija (m), $H = \frac{v^2}{2g} + d$,

H_s – višina stopnje (m), $H_s = H_{stop} - H_{tolmun}$,

h_d – višina potopitve vodnega skoka (m),

d_{tolmun} – gladina vode v tolmunu (m),

E_{tolmun} – energijska črta tolmuna (m),

h_L – izguba energije oz. razlika med dvema energijskima nivojema (m).

Iz enačbe lahko izračunamo izgubo energije pri toku čez stopnjo (Wilcox in sod., 2011):

$$h_L = E_{stopnja} - E_{tolmun} \quad (5)$$

Disipacijo energije vodnega skoka pa lahko izračunamo tudi kot časovni odvod izgube energije (Juvan, 1991):

$$\frac{d\Delta E}{dt} = \frac{dm \cdot g \cdot \Delta H}{dt} = \frac{dV}{dt} \cdot g \cdot \Delta H = Q \cdot \gamma \cdot \Delta H \quad (6)$$

Kjer pomeni:

ΔE – sprememba energije (m),

t – čas (s),

m – masa (kg),

ΔH – sprememba višine (m),

Q – pretok (m^3/s),

γ – specifična teža (kN/m^3),

g – gravitacijski pospešek (m/s^2).

Ker stopnje oz. stopničasti preliv zelo dobro zmanjšujejo energijo vode pri prelivanju, se jih gradi tudi na prelivnih objektih zadrževalnikov hidroelektrarn. Pri modeliranju takih stopenj je potrebno upoštevati številne pojave, ki nastajajo pri prelivanju, kot so vrtnčenje in cirkulacija ob vogalih stopnic, kavitacija, negativne tlake ob vertikalnih ploskvah, pozitivne tlake zaradi stika z vodoravnimi ploskvami, statične in dinamične tlake ...

Na stabilnost stopenj vpliva dotok premeščajočih sedimentov. Povečan dotok zmanjša stabilnost dna, ker se zaradi upočasnenega toka vode zmanjša hrapavost. Tolmuni med posameznimi stopnjami so takoj po prehodu iz višje stopnje zapolnjeni z bolj grobimi delci sedimenta, proti naslednji, dolvodni stopnji, pa se odlagajo finejši delci, ki zmanjšajo hrapavost.

S stopnjami se dokaj enostavno stabilizira vodotoka z večjimi nakloni. Zaradi gradnje se morfologija ne spreminja. Z umetno gradnjo stopenj se v vodotoku poskuša ustvariti čim bolj naravno stanje, ki zagotavlja ustrezno stopnjo zaščite. Naravno stopničenje je posledica naravne dinamike, ki se nagiba k stabilnosti vodotoka. Pri prelivanju čez stopnje se pojavljajo 2-D in 3-D tokovi. Zaradi natančnejših preračunov hitrosti v 3-D tokovih je potrebno izmeriti hitrosti vode v treh različnih smereh (npr. hitrost na različnih globinah, hitrost na prelivu, hitrost smereh ...). Zaradi poenostavitve se za računanje hitrosti preko stopenj uporablja brezdimenzijska strižna hitrost, logaritemska razporeditev hitrosti ali merjene napetosti ob dnu po Reynoldsovi porazdelitvi. Najenostavnejša je uporaba brezdimenzijske strižne hitrosti, ki upošteva naklon in geometrijo vodotoka (Wilcox in sod., 2011):

$$u^* = \sqrt{g \cdot R \cdot S} \quad (7)$$

Kjer pomeni:

u^* – strižna hitrost (—),

R – hidravlični radij (m),

S – naklon vodotoka (—),

g – gravitacijski pospešek (m/s^2).

Za izračun hitrosti med posameznimi stopnjami se uporabi brezdimenzijska hitrost, za katero je potrebno za vsako izmerjeno hitrost izračunati hidravlični radij (Wilcox in sod., 2011):

$$v^* = \frac{U}{u^*} = \frac{U}{\sqrt{g \cdot R \cdot S}} \quad (8)$$

Kjer pomeni:

v^* – brezdimenzijska hitrost (–),
 U – hitrost toka na prelivu (m/s),
 R – hidravlični radij (m),
 S – naklon (–),
 g – gravitacijski pospešek (m/s²).

Ker za take izračune potrebujemo veliko izmerjenih podatkov (pretoki, geometrija, naklon), so različni avtorji poskušali razviti enačbe za izračun hitrosti čez stopnje, ki so jih preizkušali na modelnih raziskavah. Egashira in Ashida sta tako razvila enačbo za izračun hitrosti tokov, ki tečejo čez stopnje. Prednost enačbe je v tem, da ne zanemari izgube energije zaradi turbulenc in trenja ob brežinah, saj upošteva odpornost osnovnega materiala med posameznimi stopnjami, dodatnim uporom zaradi vdolbin in oddaljenosti od brežin, ob predpostavkah, da je tok odvisen od višine in dolžine stopnje. Enačba za določitev hitrosti toka vode čez stopnje je (Nitsche, 2012):

$$v_{EA} = \sqrt{\frac{8 \cdot L_S}{2,5 \cdot H_S(f_{add} - f_0) + f_0 \cdot L_S}} \cdot \sqrt{g \cdot S \cdot h} \quad (9)$$

Kjer pomeni:

v_{EA} – hitrost vode čez stopnjo (m/s),
 L_S – razdalja med posameznimi stopnjami (m),
 H_S – višina stopnje (m),
 f_{add} – dodatna odpornost stopnje (–),
 f_0 – odpornost materiala (–),
 S – naklon vodotoka (m/m),
 h – globina vode (m),
 g – gravitacijski pospešek (m/s²).

Hitrost lahko izračunamo s pomočjo Manningove enačba (Comiti in sod. 2007):

$$u = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{S} \quad (10)$$

Kjer pomeni:

u – srednja hitrost (m/s),
 n – koeficient hrapavosti (–),
 R – hidravlični radij (m),
 S – naklon (–).

Manningov koeficient hrapavosti (Comiti in sod. 2007):

$$n \approx 0,035 \cdot D^{1/6} \quad (11)$$

Kjer pomeni:

n – koeficient hrapavosti (–),
 D – srednje zrno plavin (–).

Z uporabo Stricklerjeve enačbe lahko izračunamo kritični naklon (Church in Zimmermann, 2007):

$$S_c = g (1,23 \cdot 10^{-3}) \cdot \left(\frac{D}{d_c}\right)^{1/3} \quad (12)$$

Kjer pomeni:

S_c – kritični naklon stopnje (–),

d_c – kritična globina toka (–).

Faktor trenja po Darcy-Weissbachu se izračuna po enačbi (Comiti in sod. 2007):

$$ff = \frac{8 \cdot g \cdot S \cdot R_h}{v^2} \quad (13)$$

Kjer pomeni:

ff – faktor trenja (–),

S – naklon vodotoka (–),

R_h – hidravlični radij (m).

Prilagojeno enačbo za izračun trenja za vodotoke s stopnjami za naklone med 0,02 in 0,098 sta na podlagi laboratorijskih poskusov leta 2003 objavila Aberle in Smart (Comiti in sod. 2007):

$$\sqrt{\frac{8}{ff}} = 0,91 \cdot \frac{d}{S} \quad (14)$$

Kjer pomeni:

d – srednja globina pretoka (m).

Za vodotoke s pravokotnim prerezom je enačba (Comiti in sod. 2007):

$$v = 0,96 \cdot g^{0,2} \cdot S^{0,2} \cdot q^{0,6} \cdot s^{-0,4} \quad (15)$$

Kjer pomeni:

d – srednja globina toka (m),

q – pretok (m^2/s),

s – koeficient hrapavosti (–).

Zelo podobno enačbo za izračun hitrosti vode v vodotokih s stopnjami z nakloni med 0,03 in 0,04 je že leta 1990 objavil Rickenman. Namesto hrapavosti je uporabil določen odstotek večjega zrna, večjih od merodajnega (Comiti in sod. 2007):

$$v = 1,3 \cdot g^{0,2} \cdot S^{0,2} \cdot q^{0,6} \cdot D_{90}^{-0,4} \quad (16)$$

Kjer pomeni:

D_{90} – velikost zrn, kjer je 90 % zrn manjših od največjega zrna (m).

Mawell in Papanicolau sta za vodotoke z nakloni med 0,03 in 0,07 razvila enačbo (Comiti in sod. 2007):

$$\sqrt{\frac{8}{ff}} = -3,73 \cdot \log\left(\frac{H \cdot D_{84}}{L \cdot d}\right) \quad (17)$$

Kjer pomeni:

D_{84} – 84 % zrn manjših od največjega zrna (m),

H – višina stopnje (m),

L – dolžina stopnje (m).

Lee in Ferguson sta za vodotoke z nakloni med 0,03 in 0,18 na podlagi terenskih meritev z redčenjem soli razvila enačbo (Comiti in sod. 2007):

$$\sqrt{\frac{8}{ff}} = 4,19 \cdot \left(\frac{R_h}{D_{84}}\right)^{1,8} \quad (18)$$

Kjer pomeni:

D_{84} – 84 % vseh zrn posteljice, večjih od merodajnega zrna (m),

R_h – hidravlični radij (m).

5 DINAMIKA PLAVNEGA LESA V VODOTOKIH

Dinamika transporta plavja je slabo raziskana, bistveno več je študij ter raziskav o morfoloških in ekoloških vplivih na vodotoke, transportu sedimentov, pojavnosti tolmunov, erozijskih dejavnikov ... Pri dinamiki plavnega lesa je potrebno opredeliti glavne procese, ki vplivajo na količino lesnega plavja v vodotokih. Na dinamiko premeščanja plavnega lesa najbolj vpliva zaporedje poplavnih dogodkov v povezavi s pretokom in morebitnim erozijskim delovanjem, ki lahko v strugo prispevata nove količine plavja. Dinamika plavja je tako odvisna od vhodnih spremenljivk (podnebje, poraslost z gozdom, morfologija, geologija ...) in vhodnih procesov (zemeljski in snežni plazovi, drobirski tokovi, erozija ...).

Izračun dinamike lesnega plavja temelji na podobnih izračunih kot izračun premeščanja sedimentov v vodotokih. Enačbo za količino plavja glede na enoto dolžine vodotoka Δx v časovnem intervalu Δt sta zapisala Benda in Sias (Benda in Sias, 2003):

$$\Delta S_c = [L_i - L_d + \frac{Q_i}{\Delta x} - \frac{Q_0}{\Delta x} - D] \Delta t \quad (19)$$

Kjer pomeni:

ΔS_c – količina odloženega plavja na enoto dolžine vodotoka, enota količina na enoto dolžine (m^3/m),

L_i – količina lesa, ki se lahko sprostí zaradi erozije, enota količina na enoto dolžine (m^3/m),

L_d – količina odloženega lesnega plavja na brežinah, enota količina na enoto dolžine (m^3/m),

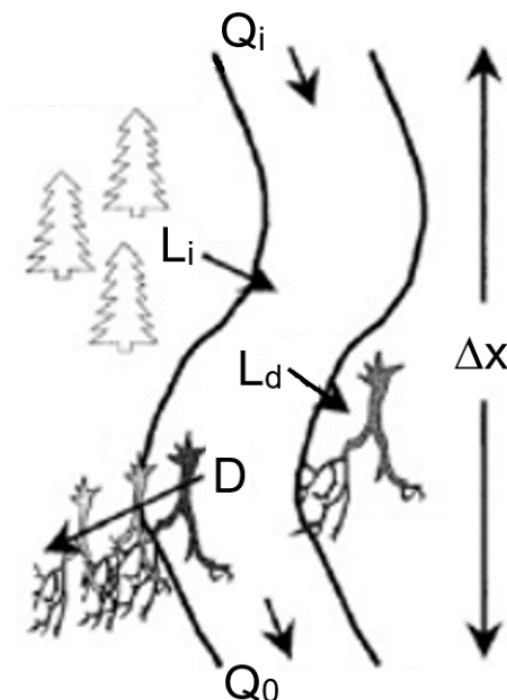
Q_i – dotok lesnega plavja na začetku odseka, enota količina na časovno enoto (m^3/s),

Q_0 – iztok lesnega plavja na koncu odseka, enota količina na časovno enoto (m^3/s),

D – količina odmrlega lesa, enota količina na časovno enoto (m^3/s),

Δx – dolžina obravnavanega odseka (m),

Δt – časovni interval (s).



Slika 18: Shematski prikaz izračuna dinamike plavnega lesa (prirejeno po Comiti in sod., 2016).

Zgornja enačba velja za daljša časovna obdobja (vsaj desetletje in več), saj upošteva količino odmrlega lesa. Proces odmiranja lesa je dolgotrajnejši, povzročajo pa ga bolezni, naravne ujme in staranje gozda. Za določevanje količine lesnega plavja med poplavami se zgornja enačba prilagodi, tako da je časovni interval nekaj ur za vodotoke in nekaj dni za večje akumulacije. Enačba se glasi:

$$Q_0 = Q_i + L_i \cdot \Delta x - L_d \cdot \Delta x \pm \frac{\Delta S_c}{\Delta t} \quad (20)$$

Kjer pomeni:

Q_0 – iztok lesnega plavja na koncu odseka, enota količina na časovno enoto (m^3/s),
 Q_i – dotok lesnega plavja na začetku odseka, enota količina na časovno enoto (m^3/s),
 L_i – količina lesa, ki se lahko sprosti zaradi erozije, enota količina na enoto dolžine (m^3/s),
 Δx – dolžina obravnavanega odseka (m),
 L_d – količina odloženega lesnega plavja na brežinah, enota količina na enoto dolžine (m^3/s),
 D – količina odmrlega lesa, enota količina na časovno enoto (m^3/s),
 ΔS_c – količina odloženega plavja na enoto dolžine vodotoka, enota količina na enoto dolžine (m^3/m),
 Δt – časovni interval (s).

Ob predpostavki, da se na odseku vodotoka ne odloži skoraj nič lesnega plavja, je količina odloženega plavja $\Delta S_c \sim 0$. To predpostavko se lahko uporabi za območja pod gozdno mejo, za akumulacije, jezera, sotočja in pritoke, ki niso bili izpostavljeni vremenskim ujmam. Tako se enačbo poenostavi in zapiše:

$$Q_0 = Q_i + L_i \cdot \Delta x - L_d \cdot \Delta x \quad (21)$$

Kjer pomeni:

Q_0 – iztok lesnega plavja na koncu odseka, enota količina na časovno enoto (m^3/s),
 Q_i – dotok lesnega plavja na začetku odseka, enota količina na časovno enoto (m^3/s),
 L_i – količina lesa, ki se lahko sprosti zaradi erozije, enota količina na enoto dolžine (m^3/s),
 L_d – količina odloženega lesnega plavja na brežinah, enota količina na enoto dolžine (m^3/s),
 Δx – dolžina obravnavanega odseka (m).

Enačbo pretokov plavja se pretvori za obravnavani odsek Δx v časovnem intervalu Δt v volumenske količine:

$$V_{0,ds} = V_{i,us} + V_{i,L} - V_{d,L} \quad (22)$$

Kjer pomeni:

$V_{0,ds}$ – prostornina plavja na koncu odseka, enota m^3 ,
 $V_{i,us}$ – prostornina plavja, ki priteka v odsek, enota m^3 ,
 $V_{i,L}$ – prostornina plavja iz stranskih pritokov, enota m^3 ,
 $V_{d,L}$ – prostornina odloženega plavja med poplavo, enota m^3 .

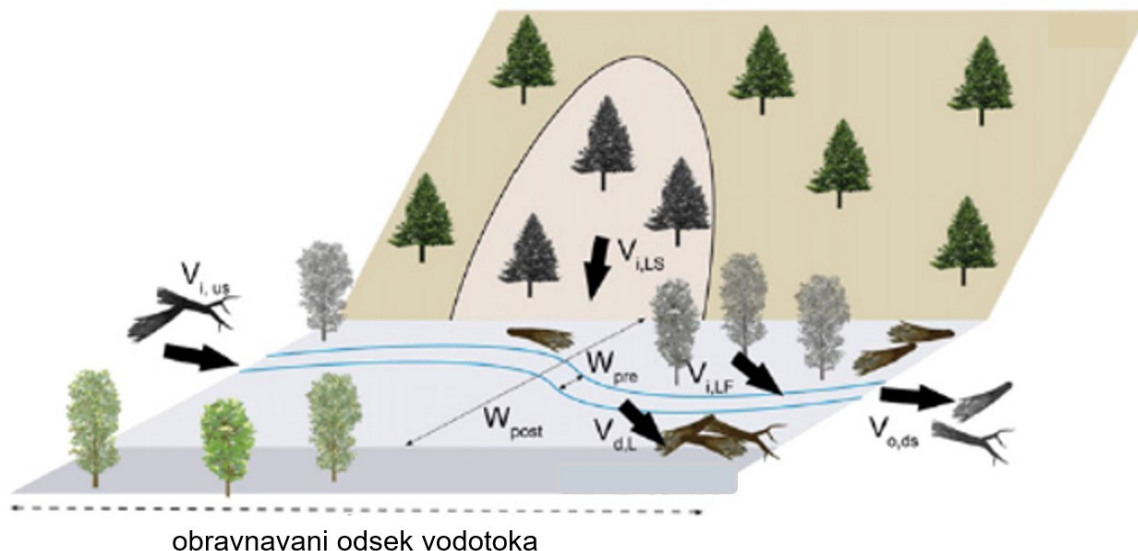
Če se razčleni prostornina plavja iz stranskih pritokov $V_{i,L}$, je ta seštevek plavja zaradi erozijskih pojavov na brežinah in plavja, ki ga odnaša s poplavnih ravnic. Zapis enačbe je:

$$V_{0,ds} = V_{i,us} + V_{i,LS} + V_{i,LF} - V_{d,L} \quad (23)$$

Kjer pomeni:

$V_{i,LS}$ – količina plavja zaradi erozije (m^3),

$V_{i,LF}$ – prostornina odloženega plavja s poplavne ravnice (m^3).



Slika 19: Shematski prikaz izračuna količine plavnega lesa (prirejeno po Comiti in sod., 2016).

Za izračun količine odloženega plavja je treba poznati vhodne podatke. To sta količina pritekačnega plavja iz gorvodnih območij in količina padavin na povodju.

5.1 Količina lesnega plavja

Količina samega dotoka lesnega plavja v vodotokih je odvisna od več dejavnikov. Poznati je potrebno lastnosti prispevnega območja in samega vodotoka. Zelo pomembni so poraslost z vegetacijo, naklon in erozivnost brežin, višina poplavnih voda, plazenje območja, prepletenost s poselitvijo in infrastrukturo, gospodarjenje z gozdovi, vplivi vremenskih nevšečnosti (žled, sneg, veter, suša, gozdni požari, udari strel ...), starost gozda, sprožanje kamenja, pojav zemeljskih in snežnih plazov ... Količina lesnega plavja v vodotokih je zelo odvisna od poraslosti brežin. Lampreht v svojem diplomskem delu tako ugotavlja, da je na odsekih struge reke Meže z obojestransko gozdno vegetacijo približno trikrat več plavja, kot na odsekih, ki so porasli le po eni brežini oz. šestkrat več, če primerjamo odseke, ki so skoraj brez vegetacije (Lampreht, 2016).

Pri določevanju količine plavnega lesa je cilj čim natančneje oceniti, kakšna je potencialna količina lesnega plavja, ki predstavlja nevarnost za vodotok in naseljena območja v zaledju. Empirične ocene mnogokrat precenijo količino plavja, ki se v času visokih voda premešča po vodotoku. Zelo pomembno je vedeti, kakšna sta velikost in obseg plavja, ki se transportira po strugi. Z vidika načrtovanja ustreznih ukrepov je treba evidentirati in preveriti potencialna kritična mesta, na katerih se lahko odlaga plavje in stopnjuje poplavno nevarnost.

Zaradi padavin se na nestabilnih pobočjih lahko začnejo pojavljati erozijska žarišča. S sprožitvijo erozijskih žarišč navzdol po brežini zdrsi poleg nestabilne zemljinske mase in dela hribine tudi vsa živa in mrtva vegetacija. Tako so v strugo vodotoka poleg splazene zemljine vnešena lesna debla s korenskim sistemom, podrta drevesa, veje, grmovje, razni odpadki. Ob visokih vodah lesene dele odplavi dolvodno po strugi, kar lahko povzroča zamašitev prepustov in dvig nivelete dna.

Količino plavnega lesa podajamo na različne načine, in sicer kot prostornino lesa na površinsko enoto (m^3/ha , m^3/km^2) ali pa prostornino lesa na dolžinsko enoto (m^3/m , $\text{m}^3/100 \text{ m}$, m^3/km). Številne novejšje študije upoštevajo porazdelitev lesnega plavja vzdolž vodotoka in območja, ki prispevajo največ plavnega lesa (izvor vnosa). Upoštevajo pa tudi stabilizacijsko vlogo obrežne vegetacije in stabilnost brežin. Poenostavljeno je mogoče potencial lesnega plavja prikazati s številom dreves, ki se lahko transportirajo po vodotoku.

Nekaj vzporednic, kakšne so potencialne količine lesa v slovenskih gozdovih, je mogoče ugotoviti na podlagi raziskave, opravljene v Švici med letoma 2004 in 2006. V raziskavi so opravili pregled potencialnih količin lesa v gozdovih na posameznih območjih države. Raziskava, ki sta jo leta 2009 objavila Brändli in Abegg, tako za različna območja poda količino lesa, ki se lahko pojavi v vodotokih.

Preglednica 1: Količina lesa v Švici (Brändli in Abegg, 2009).

Območje	Količina lesa [m^3/ha]
Jura	9-11
Alpe	18-24
Južne Alpe	16

Verjetnost pojavljanja plavnega lesa v vodotokih je pogojena z različnimi dejavniki. Ti dejavniki so pobočna erozija, plazovi, blatni in drobirski tokovi, vetrolomi, snegolomi in lavinski/snežni plazovi. Raziskava, ki je v Švici zajela 10 gozdnih območij, je pokazala, da je kar ena tretjina vsega lesa v vodotokih posledica pobočne erozije, vetrolomov, snegolomov in plazov. V Švici znaša količina plavnega lesa brez zapadlega lesa med 260 do 430 m^3/ha , kjer se pri izračunu upoštevata geografska lega in nadmorska višina (Schmocker in sod., 2016). Za različne evropske države avtorji posameznih raziskav in študij podajajo naslednje vrednosti.

Preglednica 2: Prikaz količine plavnega lesa po državah Evrope (povzeto po Schmocker in sod., 2016).

Avtor	Količina	Država
Kail, 2005	0,15 – 206 $\text{m}^3/100 \text{ m}$	Avstrija, Nemčija, Švica
Kaczka, 2003	1,6 – 8,5 $\text{m}^3/100 \text{ m}$	Nemčija*, Poljska
WSL, 2006	147 – 627 m^3/ha	Švica**

Opombe: * vzhodni del Nemčije; ** 10 gorskih vodotokov.

Količino plavnega in zapadlega lesa v vodotokih je težko natančno oceniti. Najpogosteje se jo računa z enostavnimi empiričnimi enačbami. Za natančnejše podatke so potrebne podrobne študije in raziskave preteklih dogodkov, natančno opazovanje stanja gozda in dogajanja v vodotokih ter na brežinah vodotokov. Empirične ocene količine plavnega lesa temeljijo na površini gozda, vrsti gozda, dolžini vodotoka, ki prečka gozdna območja, transporta sedimentov, odtoka voda s prispevnega območja. Večina empiričnih ocen je preizkušenih na fizičnem modelu v laboratoriju. Za natančnejšo oceno količin plavja se uporablja posnetke aerofotogrametrije, LIDAR-ja ali podatke s terena. V raziskovalnih projektih o problematiki plavnega lesa in upravljanju z njim, ki potekajo v Švici, so z namenom, da bi ugotovili količino plavnega lesa v vodotokih, ob njih namestili video kamere. Posnetke računalniško obdela polavtomatski algoritem, ki izmeri dolžino in premer posameznih kosov plavja, s katerim nato izračuna volumen lesa, za izračun pa predpostavi

valj (Villanueva in sod., 2016). Količino plavnega lesa po nekem poplavnem dogodku se lahko približno oceni tudi z analizo posnetkov prič, ki so jih posneli z mobilnimi telefoni in jih naložili na splet.

V Sloveniji je bilo v okviru evropskega projekta SedAlp na hudourniku Kuzlovec v Polhograjskem hribovju izvedeno terestrično lasersko skeniranje struge za potrebe izdelave digitalnega modela reliefa (DMR), ki se ga je uporabilo za matematično modeliranje toka vode. Izdelala sta se dva modela reliefa, z debli in brez. Prvi omogoča umerjanje modela in kasnejšo primerjavo hidravličnih sprememb, ki nastanejo zaradi debel v vodotoku. Debla so se ročno poiskala v oblaku točk, izmeril se jim je premer in dolžina. Na podlagi meritev so se debla matematično modelirala z valji, nato pa generirala v oblake točk, ki so jih vključili v oblak reliefnih točk (Grigillo in sod., 2014).

Pomembna je tudi frekvenca pojavljanja plavnega lesa in zanesljivost napovedi o možnosti pojava visokih voda. Količino plavnega lesa v vodotoku je težko oceniti zaradi naključnosti, saj se pojavlja nov dotok plavja, pretočne razmere se spreminjajo med poplavo, spreminja se tudi intenziteta padavin. Empirične enačbe nam dajo samo približen rezultat oz. oceno, a zahtevajo manj časa in podatkov za izračun. Rickenmann je na podlagi opazovanj poplav v Švici, ZDA in na Japonskem predstavil empirične enačbe za oceno količine plavnega lesa. Empirična enačba za izračun količine plavnega lesa (Rickenmann, 1997):

$$V_L = 4 \cdot V_W^{2/5} \quad (24)$$

Kjer pomeni:

V_L – količina lesnega plavja (m^3) in poroznostjo $a = 0,5$,

V_W – količina poplavnega vala (m^3).

Rickenmann podaja še drugo empirično enačbo za izračun količine lesa, ta pa velja za hudournike z veliko hrapavostjo (Rickenmann, 1997):

$$V_L = 45 \cdot A^{2/3} \quad (25)$$

Kjer pomeni:

V_L – količina lesnega plavja (m^3) in poroznostjo $a = 0,5$,

A – površina povodja (km^2).

Ob upoštevanju območja poraslega z gozdom Rickenmann zapiše empirični enačbi, ki podata nekoliko natančnejšo oceno o količini lesnega plavja (Rickenmann, 1997):

$$V_{LP} = 90 \cdot A_F, \text{ za } A_F < 100 \text{ km}^2 \quad (26)$$

$$V_{LP} = 40 \cdot L_F^2, \text{ za } L_F < 20 \text{ km} \quad (27)$$

Kjer pomeni:

V_{LP} – količina lesnega plavja (m^3),

A_F – površina gozda v povodju (km^2),

L_F – dolžina vodotoka, ki prečka gozd (km).

Na Japonskem je Uchiogi s sodelavci ugotovil povezavo med količino lesnega plavja in premeščenim sedimentom in določil empirično enačbo (Uchiogi in sod., 1996):

$$V_L = 0,02 \cdot F \quad (28)$$

Kjer pomeni:

V_L – količina lesnega plavja (m^3),

F – volumen premeščenih sedimentov (m^3).

Na količino lesnega plavja vpliva tudi vrsta gozda (Uchiogi, 1996):

$$\text{– za iglasti gozd:} \quad V_L = (\text{od } 10 \text{ do } 1000) \cdot A_F \quad (29)$$

$$\text{– za listnati gozd:} \quad V_L = (\text{od } 10 \text{ do } 100) \cdot A_F \quad (30)$$

Kjer pomeni:

V_L – količina lesnega plavja (m^3),

A_F – površina gozda v povodju (km^2).

Enačbo (28) za izračun količine plavnega lesa v odvisnosti od količine premeščenih sedimentov je bolj smiselno zapisati kot:

$$V_L = \beta \cdot V_{sed,tran} \quad (31)$$

Kjer pomeni:

β – razmerje med prostornino lesnega plavja in količino premeščenih sedimentov

$V_{sed,tran}$ – prostornina premeščenih sedimentov (m^3).

Vrednosti β so določene na podlagi raziskav in študij:

- za majhna porečja $< 1 km^2$: $0,2 < \beta < 0,3$ (Bezzola in sod., 2004),
- po poplavih 2005 v Švici: $0,02 < \beta < 0,17$ (Schmocker in Weitbrecht, 2013).

Večina empiričnih enačb je bila razvita na podlagi opazovanj poplavnih dogodkov v gorskih oz. hudourniških vodotokih z manjšimi povodji. Praviloma enačbe vsebujejo le podatke o povodju (površina, dolžina), pretokih in odtoku. Zaradi tega so ocenjene skupne količine lesnega plavja večkrat večje od dejanskih. Zapadli les je v vodotoku posledica enkratnih dogodkov, povezanih z vremenom (žled, snegolom, udari strele ...) ali z izbruhi bolezni in napadi škodljivcev (podlubnik).

5.2 Vir lesnega plavja med poplavami

Pri določevanju količine plavnega lesa v vodotoku je treba poznati njegov izvor in dinamiko. Podatke najlažje pridobimo z ogledom na terenu, z aerofoto snemanji, LIDAR posnetki ..., ki so opravljeni neposredno po poplavih.

V strmih in povirnih delih na količino lesnega plavja najbolj vplivajo plazovi in drobirski tokovi, a ker so brežine manj porasle, prispevajo majhen delež k celotni količini plavnega lesa. Večji delež plavnega lesa zagotavlja bočna erozija vodotokov v srednjem in spodnjem delu

vodotokov, ki potekajo v gozdnem prostoru. Krajši ko je interval padavin, manj lesnega plavja se sprostí v vodotoke. Na količino vpliva tudi urejenost vodotoka (ustrezno gospodarjenje z gozdom, utrjenost brežin s inženirsko tehničnimi ali sonaravnimi ureditvami, širina struge, tlorsni potek zavojev). Potrebno je tudi poznati značilnosti manjših hudourniških vodotokov, ki so mnogokrat velik vir lesnega plavja. Za transport je zelo pomembno razmerje med širino in globino vodotoka. Transport plavnega lesa je odvisen od vzgona debel (Braudrick in Grant, 2000).



Slika 20: Stanje po snežnem plazu (arhiv JZ TNP, 2006).

5.3 Transport plavnega lesa

Premik oz. transport plavja je funkcija med kotom debel in vodnim tokom, gostoto vode in plavja, višine in hitrosti vode, premera debel ter širine struge (Braudrick in Grant, 2001). Premik je odvisen od ovir v toku in prereza struge (Bocchiola in sod., 2006). Začetek premeščanja lesnega plavja je odvisen od dimenzij debel, količine debel, globine vode, hitrosti toka in morfologije vodotoka (Braudrick in Grant, 2000; Bocchiola in sod., 2006). Večina plavnega lesa ni popolnoma vzporedna z smerjo toka, samo 3 % plavja je vzporednega s tokom (D'Agostino in sod., 2000). Plavni les, ki se premešča po sredini toka, ima večjo verjetnost spremembe lege v prečno kot plavje, ki se premešča v bližini brežin vodotoka (Degetto in Righetti, 2004).

Braudrick in Grant sta leta 2001 v študiji o transportu in odlaganju lesnega plavja opisala tri režime premika plavja glede na njegovo gostoto v vodnem toku (Braudrick in Grant, 2001):

- popolnoma zgoščen transport,
- delno zgoščen premik,
- prost transport.

Plavni les se v vodotokih premešča na različne načine, in sicer s kotaljenjem, drsenjem po podlagi in plutjem. Transport lesnih plavin je odvisen od morfologije vodotoka (širine struge, tlorisnega poteka struge, hrapavosti dna), pretoka, višine gladine, dolžine in debeline debel, smeri toka, kota, pod katerim se premešča deblo, gostote debel, trenja (ali so debela z vejami in s koreninskim sistemom ali brez). Za transport je pomembno tudi razmerje med obsegom in debelino debela. Raziskave in študije so pokazale, da je ob začetku visokih voda transport plavja za 20 do 30 % manjši (Rickli, 2009).

Srednje velike in večje plavine potujejo posamično zaradi turbulenc v vodi, a se lahko medsebojno prepletejo in ustvarijo lesen čep (Tyler, 2011). Plavni les na brežini ali ob robu struge je stabilnejši, kadar je vzporeden s smerjo toka, kot pa zapadli les ali plavni les, ki se premešča pod pravim kotom glede na tok (Braudrick in Grant, 2000).

Transport plavnega lesa je odvisen tudi od hrapavosti dna. Načine transporta v odvisnosti od sile trenja je opisal Rimböck in jih razdelil v tri skupine (Rimböck, 2003):

- plavljenje pri minimalni globini vode,
- plavljenje lesa, ko je sila trenja manjša od vlečne sile vode,
- plavljenje, ko je vlečna sila vode večja od trenja.

Odvisnost transporta od višine gladine vode in zunanega premera debel so na fizičnem modelu preizkušali na švicarskem zveznem inštitutu za tehnologijo (ETH) v Zürichu. V Laboratoriju za hidravliko, hidrologijo in glaciologijo (WAV) so zgradili model s prosto gladino, širine 7 m in naklonom 7 %. Opazovali so začetek transporta plavja, in sicer debel z ali brez vej. Začetek transporta je tako odvisen od zunanega premera debela, gladkosti debela in višine gladine vode. Rezultate iz fizičnega modela je mogoče zapisati (Lange in Bezzola, 2006):

- za gladka debela: $h > 1 \div 1,2 \cdot D$,
- za debela z vejami: $h > 1,2 \div 1,5 \cdot D$,
- za debela z vejami in koreninami: $h > 1,7 \cdot D$.

Kjer je:

D – zunanji premer debela (m),

h – višina vode (m).

Za premik lesnega plavja je potrebna zadostna višina vode h, premik je tako odvisen od Froudovega števila Fr in premera debela d v m (Braudrick in Grant, 2000):

$$h > Fr \cdot D \quad (32)$$

Lange in Bezzola podajata tudi enačbo o potrebni globini vode za začetek transporta plavja (Lange in Bezzola, 2006):

$$h > \frac{D}{2} \quad (33)$$

V akumulacijah ali globljih rekah prihaja do pojava potopitve celotnega drevesa s koreninskim sistemom in krošnjo na dno. Ob taki oviri se pojavljajo turbulence in vrtinci, kopičiti pa se lahko začnejo manjše naplavine.

Lesno plavje močno vpliva na funkcionalnost varovalnih objektov in pretočne razmere v strugi. Pri poplavih v preteklosti, npr. v Železnikih leta 2007, se je pokazalo, da je škoda zaradi poplav še večja zaradi velike količine lesnega plavja, ki je zamašilo odprtine premostitvenih objektov in zmanjšalo pretočno sposobnost. Med transportom se velikost lesnega plavja zmanjšuje, povečuje pa se število lesenih kosov, ker prihaja do lomljenja vej, večja debela se raztreščijo.

Preglednica 3: Verjetnost transporta lesnega plavja (povzeto po Rickli, 2009).

mesto	proces		verjetnost transporta
	med poplavo	v času do naslednje poplave	
v strugi vodotoka	/	/	zelo velika
v obrežnem pasu	E, (P, D)	V, S, (E)	srednja
na brežini vodotoka	P, D	P, D, L, V	majhna

Kjer pomeni:

E – pobočna erozija

P – plazenje

D – blatni/drobirski tok

V – vetrolom

S – snegolom

L – snežni plaz

5.3.1 Začetek premeščanja plavnega lesa

Začetek premeščanja plavja je povezan s povečanjem pretoka in premera debla. Večina lesa ob vodotoku se začne premeščati takoj, ko nastopijo visoke vode, in traja tudi, ko te začnejo upadati. Transport plavja je odvisen predvsem od Froudovega števila Fr , ki se ga izračuna po enačbi:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (34)$$

Kjer pomeni:

v – povprečna hitrost vodnega toka (m/s),

g – gravitacijski pospešek (m/s²),

h – pretočna globina (m).

Za premeščanje lesnega plavja mora biti globina vode približno enaka premeru debla – najbolj odebeljen del debla. Braudrick in Grant ugotavljata, da je za začetek transporta plavnega lesa potrebna zadostna višina vodne gladine v odvisnosti od premera debla d . Tako je za vrednost $Fr = 0,75$ zahtevana globina najmanj $h = 0,75 \cdot d$. Če so vrednosti Froudovega števila večje, je tudi globina vode višja, npr. pri vrednosti $Fr = 0,75$ je minimalna gladina za premeščanje $h = 1,25 \cdot d$ (Braudrick in Grant, 2000). Diehl pa ocenjuje, da mora biti za premeščanje plavnega lesa globina vode približno 3 do 5 % dolžine merodajnega debla (Diehl, 1997; citirano po Kogoj, 2011).

5.3.2 Hitrost plavnega lesa

Povprečne hitrosti plavnega lesa so ugotavljali z metodo sledenja delcev in s pregledom posnetkov kamer. Ugotovljeno je bilo, da so hitrosti plavnega lesa približno enake hitrosti vode na gladini vodotoka (Degetto in Righetti, 2004) in torej višje od povprečnih hitrosti vode v posamezni vertikali (ob predpostavki logaritične porazdelitve pretočnih hitrosti vode v njej).

5.3.3 Dolžina plavnega lesa

Kadar so dolžine debel v plavnem lesu približno enakega velikostnega reda kot širina vodotoka, prihaja do povečanja možnosti kopičenja lesnega plavja. Najdaljša debela se ne premeščajo v smeri vodnega toka, temveč se postavijo prečno na smer toka ter tvorijo pragove v širših vodotokih. Največja dolžina premeščajočih debel je enaka višini dreves ob vodotoku. Velikokrat se za določevanje dolžine plavnega lesa uporabi kar povprečno dolžino vseh debel. Spodaj so zapisane različne enačbe za izračun dolžine plavnega lesa (Uchiogi, 1996):

$$L_{\max, \text{LWD}} = L_{\text{StandTrees}}, \text{ če je } L_{\text{StandTrees}}^* < \eta \quad (35)$$

$$L_{\max, \text{LWD}} = \eta \cdot W, \text{ če je } L_{\text{StandTrees}}^* > \eta \quad (36)$$

$$L_{\text{StandTrees}}^* = \frac{L_{\text{StandTrees}}}{W} \quad (37)$$

Kjer pomeni:

$L_{\max, \text{LWD}}$ – največja dolžina plavnega lesa (m),

$L_{\text{StandTrees}}$ – višina dreves ob vodotoku (m),

$L_{\text{StandTrees}}^*$ – brezdimenzijska višina dreves (–),

W – širina vodotoka (m),

η – brezdimenzijska dolžina praga (–).

Brezdimenzijsko dolžino praga η so določili na podlagi opravljenih poskusov v fizičnih modelih. Vrednosti dolžine praga sta na podlagi preizkusov za drobni tok določila Nowakowski in Wohl (povzeto po Piton in Recking, 2015):

- za gorske vodotoke: $1,30 < \eta < 1,67$; za gorske vodotoke, kjer so dolžine plavnega lesa daljše od širine vodotoka,
- če je širina vodotoka manjša od dolžine plavnega lesa: $\eta \approx 1$.

5.3.4 Drobljenje plavnega lesa

Med transportom se debela začnejo lomiti na manjše delce. Drevesnim deblom s koreninskim sistemom in krošnjami se ob visokih vodah že po nekaj sto metrih premeščanja po vodotoku začnejo zaradi trenja in zatikanja ob ovire lomiti oz. odpadati veje in korenine. Daljša gola debela se med nadaljnjim transportom zaradi trkov ob ovire začnejo lomiti na manjše kose. Dolžine plavnega lesa so sprva nekoliko večje, sčasoma pa se začnejo zmanjševati. Debelejša debela se razcepijo na manjše kose s trki ob ovirah. Debelina plavnega lesa se med premeščanjem nekoliko zmanjša tudi zaradi obrusa in abrazije. Proces in intenziteta zmanjševanja dolžin in premera plavnega lesa sta odvisna od naklona, hrapavosti, dolžine in časa transporta, višine visoke vode, prav tako pa tudi od gostote in količine debel v vodotoku ter zarasti ob njem. Hitrost drobljenja večjega plavnega lesa na manjše kose je največja ob pojavu visoke vode in ob začetku premeščanja, nato pa začne upadati.

5.3.5 Začetek odlaganja plavnega lesa

Začetek odlaganja je pogojen z upadom gladine vode. Zollinger ocenjuje, da se odlaganje lesnega plavja začne, ko je premer približno enak globini vode (Zollinger, 1983). Med

premeščanjem se odlomljene korenine in veje zaradi hidravlično neugodne oblike začnejo zaustavljati ob ovirah – manjših kamnih. Sprva se zaustavijo posamezni kosi plavja, med katere se kmalu začnejo odlagati manjši kosi premeščajočega se plavnega lesa. Delež odloženega plavja se začne povečevati in tvoriti motnjo v vodotoku, nastane lahko tudi manjša akumulacija za njo. Ta se ob povečanem pretoku lahko poruši in odplavi odloženo lesno plavje.

6 PROBLEMATIKA ZAPADLEGA IN PLAVNEGA LESA V VODOTOKIH

V dokumentaciji o naravnih nesrečah oz. terenskih priporočilih programa PLANALP so opisane različne nevarnosti, povezane s premeščanjem in odlaganjem lesnega plavja.

Za določitev ocene nevarnosti je treba določiti potencialna nevarna mesta v vodotokih, kjer lahko prihaja do kopičenja lesa, in izvor lesa. Verjetnost kopičenja lesnega plavja se povečuje zaradi dolžine posameznih kosov plavnega lesa, zmanjšuje pa se z zmanjšanjem Froudovega števila (Bocchiola in sod., 2008). Pri oceni tveganja je treba presoditi, kakšni so kratkoročni in dolgoročni učinki plavnega lesa v vodotoku – ali predstavljajo večjo korist ali tveganje za vodotok. Nevarnost je verjetnost, da se bo dogodek z določeno intenzivnostjo zgodil v nekem časovnem obdobju. Tveganje je verjetnost, da se bo škoda pojavila zaradi nevarnosti. V preteklosti je klasični inženirski pristop izhajal iz ocene nevarnosti in tveganj za stabilnost in varnost konstrukcij v vodotoku. Novejši pristop temelji na oceni trenutnega stanja, kjer se objektivno ocenijo prednosti in tveganja, ki jih predstavlja plavni les. Tveganja je z raznovrstnimi ukrepi za zadrževanje, odstranjevanje ali (pre)usmerjanje mogoče omiliti do take mere, da skoraj ne predstavljajo več nevarnosti.

Približno eno desetino vsega plavnega lesa v vodotokih predstavlja odmrli les. Največjo nevarnost predstavlja »sveži« les, to so debla s celimi krošnjami in koreninami. Ta pogosto obvisijo ali pa se zataknejo ob obrežno vegetacijo, zapolnijo mostne odprtine in prepuste ali se zagostijo ob mostne opornike, povzročajo kopičenje plavja in dvig gladine ali nastanek akumulacij, ki se lahko porušijo. Poplave v kombinaciji z velikimi količinami lesnega plavja se pojavljajo v času visokih intenzitet padavin z daljšimi povratnimi dobami (50 do 100 let). V širokih naplavinških vodotokih plavni les ne povzroča nevšečnosti, saj zaradi širine reke le-ta prevaja velike količine plavja, prav tako je manjša verjetnost zaustavljanja plavja pred mostnimi odprtinami.

Za zavedanje nevarnosti plavnega in zapadlega lesa je potrebna celostna obravnava problematike. Poznavanje kompleksnosti omogoča oblikovanje predloga ustreznih zaščitnih ukrepov in priporočil za ravnanje s plavnim lesom. Tako celostna obravnava plavja predvideva (Plana, 2016):

- poplavni potencial in pojavnost plavnega lesa v vodotoku,
- transport in odlaganje plavnega lesa v vodotoku,
- zaustavljanje plavnega lesa ob oz. na ovirah v vodotoku.

Predvsem je pomembno zavedanje problematike plavnega lesa in ukrepanje ob poplavnih dogodkih. Pomembno je poznati, kakšne so količine, način premeščanja, mesta odlaganja, dinamika plavnega lesa in nevarnosti za posamezna območja infrastrukture in stavb.

Predvideti je potrebno tudi območja in načine odstranjevanja plavja med ali po posameznih poplavnih dogodkih ter opredeliti čas izvajanja. Glede na stopnjo nevarnosti se odstranjevanje plavja načrtuje med samim dogodkom ali po njem, v času odpravljanja škode.

6.1 Odlaganje lesnega plavja

Ob visokih vodah se po strugah vodotokov premeščajo sedimenti in lesno plavje, sestavljeno iz posameznih vej in/ali celih drevesnih debel. To se največkrat odlaga v kupih ob skrajnih robovih ali zunaj struge vodotoka. Na odlaganje lesnega plavja ob vodotokih vpliva obrežna vegetacija in vegetacija na rečnih prodiščih, saj predstavlja oviro, ki v času visokih voda

vpliva na dinamiko transporta plavnega lesa (povečanje hrapavosti, zmanjšanje hitrost in strižnih sil). Ob visokih vodah se poleg lesnega plavja na brežine, na mestih zožitev ali sprememb prečnega profila strug ... začnejo odlagati tudi ostali sedimenti (večji kamni, pesek, blato, skale ...). Nevarnost, ki jo predstavljajo tako odloženi kupi plavja, še posebej skupaj s sedimenti, so možnost zaježitve vodotoka, dviganje dna struge ter zamažitve premostitvenih objektov in prepustov.



Slika 21: Kopičenje plavnega lesa za skalnatimi ovirami v Pišnici (Zakotnik, julij 2017).

6.2 Zvišanje dna struge

Zapadli les preko struge vodotoka zaustavlja vodni tok. Posledično se zmanjšuje vlečna sila, zato se začnejo sedimenti ob taki oviri odlagati in ustvarjati naravni prag. Sčasoma se začne niveleta dna gorvodno od take ovire dvigati, če ni pravočasno odstranjena. Gladina vode gorvodno naraste in lahko na mestih, kjer so brežine ali nasipi nižji, prelije strugo, mostne odprtine in prepusti pa izgubijo del svetle višine, ki je potrebna v primerih prevajanja ekstremno visokih voda.

6.3 Nastanek akumulacije

Zgoščevanje plavnega lesa se začne, ko ta med svojo potjo naleti na oviro v vodotoku (npr. mostni opornik, zožitev, pregrade, jezovi, jeklene grablje ali rešetke, ki jih postavljamo z namenom zadrževanja plavja). Najprej se zaustavijo posamezna večja debela, ki se premeščajo nekoliko pod kotom pred postavljenimi grabljami, med debela se začnejo zaklinjati manjši kosi plavja. Plavni les se začne medsebojno prepletati, proste odprtine med njim se začnejo zmanjševati – zmanjša se poroznost, zato naraste gladina vode gorvodno od nakopičenega plavnega lesa. Posledično se zmanjša hitrost vode, pretok, zmanjša se

Froudovo število in poveča se odlaganje sedimentov. Plavni les ne potone več prečno ob oviri proti dnu, ampak začne tvoriti plavajočo lesno preprogo.

Plavni les, ki se med poplavami premešča po vodotoku, najpogosteje sestavljajo odpadlo listje, veje in debla, slednja so lahko s krošnjami in koreninami. Med plavni les se prišteva še les antropogenega izvora (npr. drva, hlodovina, gradbeni les, lesene premostitvene konstrukcije), ki ga voda na svoji poti doseže in odnese s seboj. Pri premeščanju plavnega lesa je pomembno zavedanje, da višjo stopnjo nevarnosti predstavlja več debel, posebej če se začnejo medsebojno prepletati in zaustavljati pretok vode. Glede na vse dejavnike lahko vnos in transport plavnega lesa opišemo kot naključen proces, zato je količino plavnega lesa zelo težko oceniti. Velik vpliv na dvig gladine gorvodno od odloženega ali zaustavljenega plavnega lesa ima poroznost med posameznimi kosi plavja. Vrednosti poroznosti lesnega plavja se pri zgostitvah izračunajo po enačbi:

$$a = \frac{V_S}{V_L} \quad (38)$$

Kjer pomeni:

a – poroznost, brez enote (–),

V_L – prostornina zgoščenega lesa (m^3),

V_S – prostornina zaklinjenega lesa (m^3).

Poroznosti lesnega plavja pri zgostitvah pred mostnimi odprtini in v akumulacijah v času poplav se izračuna s sledečo enačbo (Lange in Bezzola, 2006):

$$a = \frac{V_L - V_S}{V_L} \quad (39)$$

Vrednosti poroznosti a pred mostnimi odprtini in v akumulacijah se tako gibljejo med 0,5 in 0,8 (Lange in Bezzola, 2006).

6.4 Zamašitev

Odloženo lesno plavje, ki je običajno medsebojno zagozdено oz. prepleteno, lahko popolnoma ali delno zamaši strugo. Zamašitve struge vodotoka nastajajo najpogosteje na mestu naravne zožitve prereza struge, na sotočjih, na mestih odlaganja zemeljskega ali snežnega plaz in predvsem ob infrastrukturnih objektih (premostitve, cevni prepusti, prečni objekti ...). Ustvari se naravna zaježitev vodotoka. Vodotok lahko tako zapreko obteče, spremeni potek svoje struge in posledično poplavi območja, ki navadno niso poplavno ogrožena, prav tako lahko poveča tveganje za erozijske pojave. Pri pojavljanju visokih voda obstaja nevarnost porušitve bregov na mestu nastale akumulacije in nastanek poplavnega vala.

Čep iz lesnega plavja običajno prevaja določen pretok skozi plavje brez nevarnosti porušitve. Ko za njim nivo vode naraste in so sile prevelike, da bi jih čep zdržal, se le-ta poruši. Nastane poplavni val, ki potuje dolvodno in povzroči ogromno škodo. S seboj odnaša lesno plavje, sedimente, poruši manj stabilne brežine, erodira dno struge, poškoduje prečne vodnogospodarske objekte, premostitve, javno gospodarsko infrastrukturo ... V primeru, da je višina vode za akumulacijo iz lesnega plavja dovolj velika, da se začne prelivati čez zunanji rob brežine, si vodotok ustvari novo strugo. Voda, ki teče po novi strugi, erodira brežine in dno, poplavlja okolico, se nenadzorovano razliva ... Z erodiranih brežin se v

vodotoke sproščajo dodatni sedimenti in vegetacija, kar še dodatno poslabša situacijo v času poplav. Višina zajeze je lahko le nekaj centimetrov, ob večjih pretokih (Q_{100}) pa ta lahko znaša tudi nekaj deset centimetrov. Na sotočju reke Meže in Mislinje je tako po hidravličnih študijah gorvodno od sotočja in zaradi zaustavljenega plavnega lesa ob mostnem oporniku dvig gladine pri Q_{10} 9 cm, pri Q_{100} pa 40 cm (Kogoj, 2011; DraMurCi, 2012).

Na podlagi rezultatov projekta Interreg IIIA Slovenija-Avstrija 2000-2006 – Gozd in voda (Fajon, 2007) priporočajo, da se ob vodotokih ohranja oz. vzdržuje stopničasto sestojno zgradbo mlajše, vitalnejše vegetacije. Predvsem nad hudourniki je treba odstraniti mrtvo biomaso, nestabilno vegetacijo, preprečevati je treba tudi kopičenje lesne zaloge (podrta drevesa, skladovnice drv ...). Pri odstranjevanju vegetacije ob vodotokih je treba biti pozoren na to, da drevesa padajo stran od same struge, vse ostanke sečnje pa je treba sproti odstraniti.

6.5 Nevarnost plavnega lesa za prometno infrastrukturo

Plavni in zapadli les predstavlja veliko nevarnost za javno gospodarsko infrastrukturo (cestno in železniško omrežje, akumulacije hidroelektrarn, daljnovode, elektronske komunikacije). Tako kot povsod so nevarnosti in koristi lesnega plavja odvisne od količine le-tega ter ali plavje miruje ali se premešča. Lesno plavje na brežini odkloni smer toka na nasprotno brežino, ki jo lahko erodira in povzroča poškodbe infrastrukture, ki je umeščena na njej. Zaradi dviga gladine vode se pojavlja spodjedanje cestnih brežin in železniških nasipov ob vodotoku, ob katastrofalnih vodah tudi spodjedanje zgornjega ustroja cest ali železniškega omrežja. Ob večjih prometnih obremenitvah infrastrukture kasneje prihaja do večjih posedkov in udorov na omrežju. Zaradi zdrsov brežine postane promet oviran ali celo prekinjen. Zaradi kopičenja lesnega plavja ob mostnih opornikih se pojavlja dolvodna erozija, ki lahko ogrozi stabilnost mostu ali krilnih zidov. Plavni les med premeščanjem ogroža tudi plovila na vodotoku. Ko trči vanje, jim spremeni smer ali pa jih tako poškoduje, da niso več v plovnem stanju ali pa jim grozi potopitev.



Slika 22: S plavnim lesom zamašen cevni prepust v Ižakovcih pred vtokom v reko Muro (Zakotnik, april 2017).

Če plavni les v cevni prepust ali pod mostno odprtino vteka skoraj vzporedno s tokom in brežino, se gola debela brez večjih težav prevajajo skozi odprtino. Če pa debela v odprtino dotekajo pod kotom, se lahko zadevajo v rob konstrukcije, se zagozdijo in tako obstanejo ter ovirajo pretok preostalega plavja, ki se začne kopičiti za oviro.



Slika 23: Odložen plavni les ob mostnem oporniku (v strugi) na Soči pri Kršovcu (Zakotnik, maj 2017).

Pri mostnih konstrukcijah je problematična gradnja opornikov v strugi, razpetina med posameznimi polji (širina med posameznimi stebri) in svetla višina. Ob opornikih se sčasoma začne nabirati lesno plavje, ki ob visokih vodah še dodatno zmanjšuje pretok. Če so v vodotoku v času poplav večje količine plavja, se to ob mostnih opornikih začne še dodatno odlagati in zaustavljati. Zaustavljen plavni les se tu združuje v različne oblike (stožec, piramido, kvadrat oz. pravokotnik). Količina plavja se sčasoma začne povečevati, debela z vejami povzročajo kopičenje plavja v višino, to dodatno stopnjuje še mostna ograja s cestnimi svetilkami in komunalni vodi, pritrjenimi pod voziščno konstrukcijo.

Veliko težav povzročajo plavajoča debela, ki jih vodni tok kotali, saj je kot med tokom in debeli skoraj pravokoten. Kotaleča debela se zaustavijo med mostnimi polji, kjer je njihova razpetina premajhna, da bi šla skozi. Ko se zaustavi prvo deblo, se začne zaustavljati tudi ostali plavni les, ki ga s seboj nosijo visoke vode. Kljub temu da je razpetina med oporniki dovolj široka, da ne zaustavlja plavnega lesa, se lahko zaradi nakopičenega lesa ob opornikih to začne zaustavljati in tvoriti zamašitev mostne odprtine. Gladinačasne akumulacije vode gorvodno se zelo poveča. Nastajati začnejo gorvodni poplavni valovi za zaježbo, naraščati začnejo tlačne sile na akumulacijo iz plavja, kar v najslabšem primeru poškoduje ali poruši mostne opornike ali mostno konstrukcijo z vsemi elementi.



Slika 24: Zaustavljanje plavnega lesa ob mostnem oporniku (Zakotnik, december 2012).

Debel brez vej, ki se premeščajo med poplavo, je zelo malo. Pogosto gre za gozdnogospodarski les, ki je bil začasno skladiščen v bližini vodotokov ali poplavnem območju. V vodotokih največkrat obtičijo odmrli drevesa skupaj z vejami. V času poplav se zaradi spodjedanja in plazenja brežin v vodotoku začnejo transportirati drevesa s krošnjami in koreninami. Debla z vejami in koreninami zaradi premeščanja po dnu in brežinah struge povzročajo erozijo. Predstavljajo oviro, ki prestreže manjši plavni les. Nevarnost se močno poveča, ko se deblo zaradi svojih razsežnosti in razvejanosti zaustavi pred mostno odprtino ali pa se v njej zagozdi.

6.6 Nevarnost plavnega lesa za hidroelektrarne

Prisotnost lesnega plavja vpliva na obratovanje vodnih elektrarn. Večje količine lesnega plavja zmanjšujejo koristno prostornino akumulacije. Dokler plavje ne potone na dno, se zbira kot preproga na zadrževalniku in predstavlja nevarnost v primeru prelivanja čez prelivna polja. Les potone na dno akumulacije po približno šestih mesecih. Lesno plavje se lahko zagozdi med posameznimi odprtinami prelivnih polj, poškoduje zapornice na prelivu. Ob prelivanju vode skupaj s plavjem v podslapje in umirjevalni bazen udarja v betonsko pregrado in zapornične objekte, ki se zato poškodujejo.



Slika 25: Lesna preproga na Idrijci ob poplavih 2007
(Vir: <http://www.24ur.com/novice/slovenija/prihaja-nov-val-neurij.html>).

6.7 Nevarnost plavnega lesa za ljudi – rekreativce

Za ljudi, ki iščejo oddih in športne aktivnosti v naravi ob in v vodi, predstavljata zapadli in plavni les tveganje. Zapadli les omogoča nastanek večjih tolmunov, v katerih se ponuja možnost plavanja, soteskanja, kajakaštva, supanja, ribolova ... Z zmanjšanjem hitrosti vode, upočasnitvijo toka, dvigom gladine, ki se v toplejšem delu leta primerno ogreje, postanejo tolmini za odloženim plavjem priljubljena rekreacijska območja. Na drugi strani pa odložen plavni les v tolmunih plavalce ovira pri plavanju, ob njem se lahko poškodujejo. Zaradi več zaporednih manjših tolmunov se pojavljajo brzice, ki ovirajo plavanje, kajakašem, ki so manj izkušeni, pa povzročajo težave (potopitev, prevrnitev, zagozditev).

Wohl s sodelavci opisuje dejavnike, ki vplivajo na varnost rekreativcev v in ob vodotokih (Wohl in sod., 2016):

- dostop: vstopno ali izstopno mesto na vodotoku je lažje ali težje dostopno. Če je lažje dostopno, prihaja več ljudi; če je težje dostopno, prihaja manj ljudi, a so ti boljši poznavalci razmer v vodotoku;
- lastnosti območja: naklon in širina vodotoka. Večji ko je naklon, višja je hitrost vode in premeščanja plavnega lesa. Odložen plavni les zmanjšuje hitrost vode, manjša možnost utopitve;
- predvidevanje: kakšni so zavoji, koliko jih je, kakšne ovire se lahko pojavijo za njim. V zavojih se odlaga plavni les, ki je slabše viden od daleč, če so brežine porasle z vegetacijo, zato se v hitrejših vodotokih lahko plavalci, soteskarji, raftarji ali kajakaši poškodujejo;
- predznanje: izkušeni vodni rekreativci se lažje spopadajo z ovirami v toku (odložen plavni les) in predvidijo nadaljnje ukrepanje zaradi plavja;

- kje se nahaja plavni les: plavni les tik pod gladino predstavlja največjo nevarnost za supe, kajake in rafte, ker je vidno slabše zaznaven. Američan Whitewater priporoča, da se za kajake zagotovi 1 m, za rafte pa 1,8 m proste gladine (po Wohl in sod., 2016). Nevarnost za rečna plovila predstavlja zaustavljeni les v pokončni legi;
- ovire v vodi: odložen plavni les na brežinah vodotoka, ki je občasno zalit z vodo, predstavlja nevarnost poškodb (ureznine, zvini, zlomi) za plavalce, ker je slabo viden;
- ovire ob vodi: včasih se za stabilizacijo brežin pred erozijo uporablja posamezna drevesa s krošnjo, ki se jih z jeklenico pričvrsti na brežino. Jeklenica je med vegetacijo slabo vidna, plavalci se ob dostopu v reko lahko čeznjo spotaknejo in se poškodujejo. Nevarnost za pohodnike predstavlja na poplavnih ravninah odložen plavni les, ki se je tam odložil po koncu visokih voda in nato ovira prost prehod po pešpoteh.

7 SISTEMSKI OKVIR UPRAVLJAJNJA Z ZAPADLIM IN PLAVNIM LESOM V VODOTOKIH

S pojavljanjem lesnega plavja v vodotokih na območju Slovenije se stroka ukvarja že od začetkov organiziranega in sistematičnega urejanja hudournikov in hudourniških območij. Prvi zakon, ki je urejal tudi problematiko, povezano z lesnim plavjem, je bil sprejet novembra 1922. V zakonu, s katerim so bile začasno izdane gozdnopolijske in vodnopolicijske odredbe za področje pokrajinske uprave za Slovenijo, je v posebnem poglavju opredeljeno gozdno gospodarjenje ob vodotokih, in sicer sekanje, spravljjanje ter zlaganje lesa v okolišu hudournika. Prepoveduje tudi spravljjanje lesa v dolino po vodotokih, saj bi lahko le-ta obležal v strugi.

7.1 Zakonodaja

Z zapadlim in plavnim lesom v vodotokih ali v njegovem zaledju se danes ukvarjata področji vodarstva in gozdarstva. Področje je sistemsko urejeno z Zakonom o vodah (ZV, 2002) in Zakonom o gozdovih (ZG, 1993), za obravnavano tematiko pa sta pomembna tudi podzakonska predpisa. To sta Pravilnik o vrstah in obsegu nalog obveznih državnih gospodarskih javnih služb urejanja voda (Pravilnik o vrstah ..., 2006) in Pravilnik o izvajanju sečnje, ravnanju s sečnimi ostanki, spravlilu in zlaganju gozdnih lesnih sortimentov (Pravilnik o izvajanju ..., 1994).

7.1.1 Zakon o vodah

Upravljanje z vodami, vodnimi in priobalnimi zemljišči v Republiki Sloveniji ureja Zakon o vodah (ZV, 2002). Urejanje voda tako obsega:

- skrb za ohranjanje in uravnavanje vodnih količin,
- varstvo pred škodljivim delovanjem voda,
- ustrezno vzdrževanje vodnih in priobalnih zemljišč,
- skrb za ugodno hidromorfološko stanje vodnega režima.

V nadaljevanju so opisani členi ZV, ki neposredno in posredno obravnavajo problematiko, povezano z lesnim plavjem. Tako je v 7. členu ZV v 29. točki opredeljen pojem plavje, ki obsega vse organske in druge plavajoče predmete, kot so debla, vejevje, listje, odpadki in podobno.

V 50. členu ZV v tretji alineji so podrobneje opisana pravila ravnanja imetnikov vodne pravice. Imetnik vodne pravice je dolžan redno odstranjevati plavje in odvezovati naplavine na delu vodotoka, na katerega vpliva izvajanje njegove vodne pravice v skladu s predpisi in na način ter v obsegu, določenim v vodnem dovoljenju ali koncesiji. Prednostno je treba zagotoviti redno odstranjevanje naplavin in plavin na prodnih zadrževalnikih. Imetnik vodne pravice je dolžan izvajati obveznosti na lastne stroške.

Skladno z določili 84. člena ZV so na vodnem in priobalnem zemljišču prepovedane dejavnosti in posegi v prostor, ki bi lahko:

- ogrožali stabilnost vodnih ali priobalnih zemljišč,
- zmanjševali varnost pred škodljivim delovanjem voda,
- ovirali normalen pretok vode, plavin in plavja,
- onemogočili obstoj in razmnoževanje vodnih in obvodnih organizmov.

V praksi je izpostavljena predvsem gradnja gozdnih prometnic, saj z neizvedenim ali neustreznim odvodnjavanjem lahko povzroči erodibilne procese in posledično plazenje brežine v vodotok. Pri gradnji in načrtovanju gozdnih cest in vlak se je treba pri trasiranju izogibati prečkanju hudourniških jarkov s cevniimi prepusti ali samo z urejenim dostopom čez samo strugo. Pri sečnji je potrebno paziti, da se podrta drevesa in ostanki čim prej odstranijo iz bližine struge, saj ob visokih vodah onemogočajo nemoten pretok, sila vode pa jih lahko odplavi dolvodno, kjer lahko povzročijo škodo v vodotoku in na vodni infrastrukturi. Načrtovanje in gradnja gozdnih prometnic je opisana tudi v Zakonu o gozdovih (ZG).

V 95. členu ZV so določene naloge države v zvezi z izrednimi ukrepi, ki nastopijo v času raznih vremenskih ujm oz. povečani stopnji ogroženosti zaradi škodljivega delovanja voda. Takrat država kot obvezno gospodarsko javno službo izvaja izredne ukrepe z namenom preprečevanja še večje škode, ki jo povzročajo visoke vode. Med izredne ukrepe spada tudi odstranjevanje plavja za zagotavljanje pretočnosti struge. Izredni ukrepi med in po naravni nesreči zaradi škodljivega delovanja voda so zapisani v 96.a členu ZV.

Redno vzdrževanje vodnih in priobalnih zemljišč je določeno z 98. členom ZV, v katerem so zapisane naloge javne službe. Te naloge so:

- utrjevanje bregov in dna površinskih voda ter morske obale,
- skrb za pretočnost struge tekočih voda in odstranjevanje prekomerno odloženih naplavin,
- košnja in odstranjevanje prekomerne zarasti na bregovih,
- odstranjevanje plavja, odpadkov in drugih opuščenih ali odvrženih predmetov in snovi iz površinskih voda in z vodnih ter priobalnih zemljišč v upravljanju ministrstva (Ministrstvo za okolje in prostor (MOP) oz. Direkcija Republike Slovenije za vode),
- čiščenje gladine površinskih voda in preprečevanje onesnaženja vodnih in priobalnih zemljišč.

Za zagotavljanje ustrezne pretočne sposobnosti vodotokov je potrebna redna košnja, odstranjevanje naplavin in plavja. Odstranjeno plavje, odpadke in druge opuščene ali odvržene predmete in snovi iz površinskih voda skladno z določili 99. člena ZV izvajalec javne službe odda izvajalcu javne službe ravnanja s komunalnimi odpadki. Stroške odstranitve plavin krije Ministrstvo za okolje in prostor. Lastnik ali posestnik priobalnega zemljišča je dolžan po 100. členu ZV zagotavljati košnjo, odstranjevati prekomerno zarast na bregovih, plavje, odpadke ...

7.1.2 Pravilnik o vrstah in obsegu nalog obveznih državnih gospodarskih javnih služb urejanja voda

V 17. členu Pravilnika o vrstah in obsegu nalog obveznih državnih gospodarskih javnih služb urejanja voda so navedene naloge obvezne državne gospodarske javne službe v času povečane stopnje ogroženosti. Takrat je predviden povečan nadzor nad vodno infrastrukturo, kopičenjem plavja in plavin, zdrsi brežin, delovanjem vode na vodne objekte in spremljanje poškodb na njih. Vodna in priobalna zemljišča morajo biti vzdrževana tako, da je zagotovljena ustrezna pretočnost v vodotoku, tako na naravnih kot urejenih odsekih, zagotovljena mora biti stabilnost vodnega režima in brežin, zagotoviti je potrebno varstvo vodnih in priobalnih zemljišč pred onesnaženjem zaradi plavja in odpadkov (Pravilnik o vrstah ..., 2006).

7.1.3 Zakon o gozdovih

Zakon o gozdovih (ZG, 1993) obravnava gospodarjenje z gozdovi (raba, izkoriščanje in razpolaganje z gozdovi), funkcije gozda, gradnjo in vzdrževanje gozdne infrastrukture. V ZG je predpisana gradnja in vzdrževanje gozdnih prometnic na način, da se ne povečuje erozijska dejavnost ali se sproži plazenje brežine. Skladno z določili ZG je potrebno sanirati vse posledice poškodb tal takoj po končanem spravilu ali prevozu lesa. Pri gradnji gozdnih prometnic in spravilu lesa je potrebno zagotoviti nemoten odtok visokih voda. V 3. členu so opisane ekološke, socialne in proizvodne funkcije gozdov. Med ekološke funkcije spadajo varovanje gozdnih zemljišč, ohranjanje biotske raznovrstnosti, klimatska in hidrološka funkcija. Med sociološke funkcije pa spadajo rekreacijska, turistična, raziskovalna, obrambna, funkcija varovanja naravnih in kulturnih vrednot. Pridobivanje gozdnih dobrin, lesnoproizvodna in lovnogospodarska funkcija, so proizvodne funkcije gozda.



Slika 26: Ostanki lesa po izvedbi gozdne vlake in opravljeni sečnji v dolini Kokre (Zakotnik, december 2016).

7.1.4 Pravilnik o izvajanju sečnje, ravnanju s sečnimi ostanki, spravilu in zlaganju gozdnih lesnih sortimentov

Zagotavljanje ustreznega ravnanja z lesnim plavjem je najbolj natančno opredeljeno v Pravilniku o izvajanju sečnje, ravnanju s sečnimi ostanki, spravilu in zlaganju gozdnih lesnih sortimentov (Pravilnik o izvajanju ..., 1994). Pravilnik predpisuje preventivno ukrepanje pred škodljivim delovanjem voda in preprečevanjem nezaželenega vnosa lesnega plavja v vodotoke. Skladno z določili 6. člena se sečnja izvaja tako, da se čim manj poškodujejo sosednja drevesa, gozdna infrastruktura, obrežja vodotokov in režim odvodnjavanja. Z istim členom pravilnika je prepovedano tudi puščanje obviselih ali na pol podrtih dreves v gozdovih.

V 7. členu je predpisan tak način spravljanja lesnih sortimentov, da se ne poslabša režim odtoka voda. Po končanem spravilu je zato potrebno vzpostaviti čim ugodnejši režim odtoka voda. Določila člena vsebujejo tudi prepoved spravljanja lesnih gozdnih sortimentov po strugi hudournikov ali njihovih pobočjih.

V 8. členu je navedena prepoved zlaganja in puščanja gozdnih lesnih sortimentov v strugah vodotokov ali ob njih. Z določili 9. člena je prepovedan izkop panjev posekanih ali kako drugače podrtih dreves v strminah v območju vodotokov. Kako mora biti urejeno sečišče po končani sečnji, je predpisano v 10. členu. Urejeno sečišče pomeni, da so odpravljene poškodbe na gozdnih tleh in odstranjeni vsi sečni ostanki iz strug vodotokov najkasneje v roku dveh mesecev.



Slika 27: Ostanki sečnje ob vodotoku (Fotoarhiv JZ TNP, 2006).

7.2 Upravljanje s plavnim lesom na akumulacijah hidroelektrarn

Pri obratovanju hidroelektrarn je treba, glede na vrsto hidroelektrarne (pretočna, vršna), vrsto jezua, zaporničnih odprtin, načina obratovanja ..., poznati nevarnosti lesnega plavja. Načini zadrževanja plavnega lesa, ki vpliva na obratovanje hidroelektrarn, so (Schmocker in sod., 2016):

- zadrževanje v prispevnem območju,
- transport plavja čez prelivna polja,
- zadrževanje v akumulaciji hidroelektrarn.

Za zadrževanje plavnega lesa v prispevnem območju (nad začetkom akumulacije) je treba zagotoviti stabilne brežine ob samem vodotoku in ob akumulaciji. Gozdne sestoje je

potrebno vzdrževati, tj. ustrezno pomlajevati in odstranjevati stara, poškodovana, odmrla, nestabilna drevesa. Pripravi se oceno stanja gozda, načrt pomlajevanja in sečnje potencialno nevarnih dreves. V hudourniških pritokih je priporočljiva izgradnja tehničnih ovir za prestrazanje lesnega plavja.

Da bo zagotovljen nemoten transport plavnega lesa preko prelivov, je treba pri načrtovanju ustrezno oceniti velikost plavja, ki se transportira skupaj z vodo preko prelivnega polja. Prav tako se oceni dolžino posameznih debel, da ta nemoteno prehajajo skozi polje in se ne zagozdijo. Če so debela v akumulaciji vzporedno s prelivom, obstaja večja verjetnost, da se zaustavi in preprečuje nemoten pretok. Problem je tudi padanje debel preko preliva in njihovo udarjanje v konstrukcijo pregrade, ki se zaradi tega hitreje poškoduje. Kadar se predvidi transport plavja preko preliva, se na robu prelivnih polj zgradi posebno konstrukcijo, ki v funkciji razbijača preusmeri debela nekoliko stran od same pregrade. Odločitev, da se plavni les preliva preko pregrade, je pogojena z razmerami dolvodno. Urejena morata biti ustrezno podslapje in umirjevalni bazen. Pomemben je tudi tlorsni potek struge dolvodno, prodišča, naklon, topografija, ožine ..., da ne prihaja do odlaganja in zaustavljanja plavja in povečevanja poplavne škode. Vsi prečni objekti morajo biti dimenzionirani tako, da se plavje ne zaustavlja. Če bi transport plavja preko prelivov preveč ogrožal dolvodna območja in konstrukcijo pregrade, je treba plavje zadrževati v povirnih delih oz. ga odstranjevati iz akumulacije.

Tretji način je zadrževanje plavja v akumulaciji. Plavni les se zadržuje na vodni gladini okoli pol leta in oblikuje neko vrsto lesne plavajoče preproge. Plavje se z gladine odstranjuje s posebnimi stroji z brežine ali plavajočega splava. Plavajoča preproga se največkrat tvori v bližini prelivnih polj ali vtoka v jaškasti preliv. Za zaščito prelivov v času velikih voda, ko se iz gorvodnih območij premešča velika količina lesnega plavja, se lahko preko zadrževalnika namesti posebna plavajoča zavesa, ki zadržuje plavni les.

Odstranjeno lesno plavje iz akumulacije in vodotokov se naloži na tovarnjake ter odpelje na ustrezno deponijo. Les se lahko zmelje in uporabi za zastirko, predelavo v gnojilo, posušen les se lahko predela v sekance in uporablja za ogrevanje z biomaso.

Evropske države imajo različne predpise glede dimenzioniranja prelivnih polj. V Švici je tako predpisana dolžina 10 m, če konstrukcija omogoča take razpone. Z raziskavami so ugotovili, da večina lesnega plavja v nižinskih in širokih vodotokih razpade na kose, manjše od 10 m. Pod prelivnimi polji mora biti tudi umirjevalni bazen globine vsaj 1,5 m in z ustreznim dostopom, ki omogoča čiščenje. Študiji, ki sta bili opravljeni leta 1994 in 2004, priporočata naslednje svetle širine L_p in višine H_b prelivnih polj (Godtland, 1994 in BFE, 2004, povzeto po Schmocker in sod., 2016):

$$L_p \geq 0,8 \cdot H_t \quad (40)$$

$$H_b \geq 0,15 \cdot H_t \text{ za } L_p > 1,1 \cdot H_t \quad (41)$$

$$H_b \geq 0,20 \cdot H_t \text{ za } L_p \leq 1,1 \cdot H_t \quad (42)$$

Kjer pomeni:

L_p – svetla širina prelivnega polja (m),

H_b – svetla višina prelivnega polja (m),

H_t – višina obrežnih dreves (m).

V vsakem primeru pa mora biti najmanjša svetla višina $H_{b,min}$ med 1,5 in 2,0 m. Višino dreves H_t se oceni z opazovanji na terenu ali Lidar posnetki, ali pa se po poplavnih dogodkih izmeri posamezne dolžine odloženega lesnega plavja, kar je nato merodajno za dimenzioniranje prelivov na prihodnje poplavne dogodke.

V Franciji je svetla širina prelivnih polj L_p odvisna od nadmorske višine z , in sicer (Francoski komite za pregrade in zadrževalnike, Schmocker in sod., 2016):

- če je nadmorska višina $z \geq 600$ m n. m., potem je $L_p \geq 15$ m,
- če je nadmorska višina $600 \text{ m n. m.} < z \leq 1800 \text{ m n. m.}$, potem $L_p \geq 20,5 - \frac{11 \cdot z}{1200}$,
- če je nadmorska višina $z > 1800$ m n. m., potem je $L_p \geq 4$ m.

Višina med gladino vode in mostno konstrukcijo f je odvisna od prelivne višine jezu h_u :

- za $h_u < 2$ m je $f < 2$ m,
- za $h_u > 2$ m je $f < 1,5$ m.

V Avstriji ni predpisanih dimenzij, so pa glede na pretekle poplavne dogodke izoblikovana priporočila za svetlo širino prelivnih polj (Schmocker in sod., 2016):

- $L_p < 20$ m, brez nevarnosti do potencialno nevarno,
- $L_p = 15$ m, dopustno,
- $L_p < 15$ m, konstrukcija je ranljiva.

Nemčija za dimenzioniranje prelivnih polj na pregradnih konstrukcijah nima nobenih predpisov in priporočil.

Po italijanskih predpisih mora biti prelivno polje zasnovano tako, da je zagotovljen nemoten pretok plavja čez preliv. Glede na število prelivnih polj n mora biti zagotovljena ustrezna višina med gladino in konstrukcijo nad prelivom f v akumulacijah, ki imajo nadzorovane regulirane zapornice (Schmocker in sod., 2016):

- za nasute, zemeljske pregrade: $f \geq 0,5 \cdot n$,
- za betonske pregrade: $f \geq 0,2 \cdot n$.

Če je akumulacija s prostim prelivanjem, brez regulacije, je potrebno predvideno svetlo višino prelivnega polja povečati (Schmocker in sod., 2016):

- za 20 %, če je $L_p \geq 12$ m,
- za 50 %, če je $L_p < 12$ m.

Če je akumulacija namenjena poplavni varnosti in je regulirana, je potrebno predvideno svetlo višino prelivnega polja povečati (Schmocker in sod., 2016):

- za 30 %, če je $L_p \geq 12$ m,
- za 50 %, če je $L_p < 12$ m.

V akumulacijah je približno od 20 do 30 % prostornine zapolnjene s plavnim lesom.

Verjetnost zaježitve prelivnih polj zadrževalnikov je odvisna od dolžine, gostote, števila in

obsega plavnega lesa ter širine prelivnega polja. Hartlieb podaja empirično enačbo verjetnosti zaježitve (Hartlieb, 2015):

$$P = \left(\frac{L}{W} - 0,96\right) \cdot 0,73 \quad (43)$$

Kjer pomeni:

P – verjetnost zaježitve (–),

L – dolžina debel (m),

W – širina preliva (m).

Na prelivih zadrževalnikov lahko vplive plavnega lesa na konstrukcijo zmanjšamo z ustrezno širino prelivnih polj, oblikovanjem stebrov, ustrezno zaščito vseh izpostavljenih postrojenj.

7.3 Upravljanje s plavnim lesom na območju mostnih konstrukcij

Ob poplavnih dogodkih visoka voda s seboj nosi plavni les in ostale plavine (počitniške prikolice, cisterne za gorivo, avtomobile ...), ki se pogosto zaustavijo ob mostnih opornikih ali pa pod mostno odprtino. Ta mora biti ustrezno oblikovana in dimenzionirana, da se zmanjša verjetnost zaustavljanja. Pri načrtovanju je potrebno upoštevati varnostno nadvišanje svetle višine mostne konstrukcije zaradi varnosti ob pojavu višjih pretokov, kot so merodajni v nekem časovnem obdobju, in zaradi lesnega plavja. Za koliko je potrebno nadvišati višino, je odvisno od tega, kakšni so izračunani povratni pretoki in kakšne količine plavnega lesa se premeščajo ob poplavnih dogodkih. Največkrat so višine nadvišanja določene s predpisom, lahko pa se jih izračuna po različnih enačbah ali pa se jih določi glede na pretekle izkušnje. Višine, določene s predpisi, se v večini evropskih držav gibljejo med 0,5 in 1 m. Pogosto se za izračun uporablja spodnja enačba:

$$f = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (44)$$

Kjer pomeni:

f – višina med vodno gladino in konstrukcijo (m),

v – hitrost vode (m/s),

g – gravitacijski pospešek (m/s²).

Ob upoštevanju povprečne globine toka in Froudovega števila se varnostno nadvišanje izračuna (KOHS, 2013):

$$f = 0,17 \cdot Fr^{1/3} \cdot h_m \quad (45)$$

Kjer pomeni:

f – višina med vodno gladino in konstrukcijo (m),

Fr – Froudovo število (–),

h_m – povprečna globina toka (m).

Mnoge države izdajo tudi priporočila, kakšna naj bodo nadvišanja. V Švici so priporočila za nadvišanje sledeča (KOHS, 2013):

- pod mostovi: najmanj 1 m,
- za potoke: med 0,5 in 1 m,
- za reke: med 0,8 in 1 m,
- za hudournike: med 1,5 in 2,5 m.

Pri računanju varnostne višine je potrebno upoštevati še veter, valovanje, plavni les, led, plazove, erozijsko sproščanje sedimentov, prečne tokove, oblikovanost in število mostnih opornikov.

Težavam s plavnim lesom pod mostnimi konstrukcijami se lahko izognemo z gorvodnim zadrževanjem ali oblikovanjem ločnih mostnih konstrukcij. Na hudourniških vodotokih so v Švici zgradili premične jeklene mostove, ki jih ob napovedanih visokih vodah, ki s seboj nosijo veliko lesnega plavja, zvišajo na ustrezno višino. Cestni promet čez most je takrat začasno prekinjen, škoda, ki bi nastala zaradi zamašitve s plavnim lesom, pa je minimalna ali je sploh ni.



Slika 28: Zapadli les pod mostno konstrukcijo v Kokri pred sotočjem s Savo (Zakotnik, januar 2017).

Mostne konstrukcije so ob visokih vodah izpostavljene predvsem udarcem plavnega lesa in zaustavljanja lesa na mostnih opornikih. Da bi preprečili zaustavljanje plavja ob mostnih opornikih, se pred vtokom vodotoka pod most zgradijo posebne usmerjevalne rešetke, ki les preusmerijo stran od ovire. Pri dimenzioniranju je potrebno upoštevati ustrezno razpetino polj konstrukcije. Polja naj bodo približno enake širine kot povprečna dolžina premeščenih debel. V ZDA se za oceno potrebne razpetine med posameznimi oporniki za vodotoke širine med 12 in 60 m uporablja naslednja enačba (Kogoj, 2011):

$$L_d = 9 + \frac{B_{up}}{4} \quad (46)$$

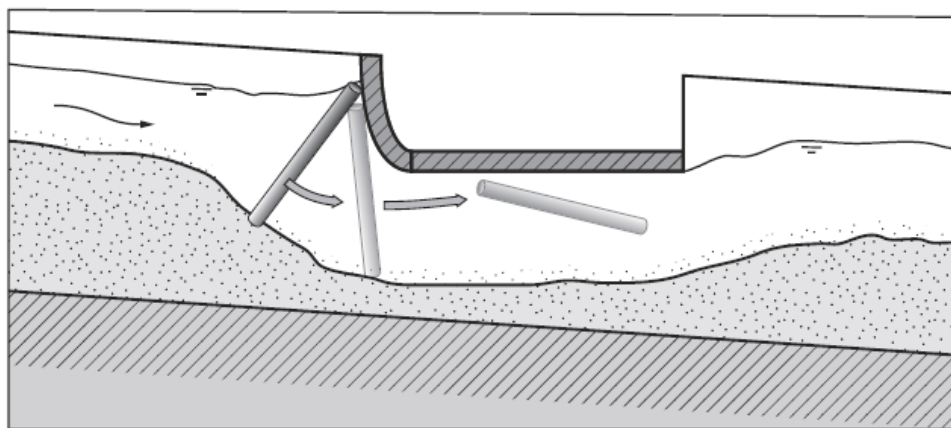
Kjer pomeni:

L_d – projektna dolžina debla (m),

B_{up} – širina struge gorvodno od mostne konstrukcije (m).

Projektna dolžina debla L_d je pričakovana dimenzija lesnega plavja in ni nujno tudi zadostna razdalja med posameznimi oporniki. Lahko pa služi za dobro oceno, ali se bo plavje zaustavljalo ob opornikih ali ne. Enačbo se pogosto uporablja pri oceni verjetnosti zamašitve mostnih odprtih pri izdelavi hidravličnih študij.

Mostna ograja naj bo oblikovana tako, da ne omogoča zatikanja vej plavnega lesa vanjo (glej sliko). Infrastrukturne vode je treba speljati v zaprtih kanalih znotraj mostne konstrukcije, da se izognemo zatikanju plavja ob pritrdene ali obešene cevi pod konstrukcijo. Ustrezna mora biti tudi varnostna višina mostne konstrukcije (npr. dimenzioniranje na 100-letne poplavne vode in varnostni dvig zaradi plavnega lesa).



Slika 29: Oblika mostne ograje, ki preprečuje zaustavljanje plavnega lesa na mostovih (Lange in Bezzola, 2006).

7.4 Ukrepi za zmanjševanje količine plavnega lesa

Z zmanjševanjem količine plavja v vodotokih se poskuša zmanjšati poplavno škodo, zmanjšati sile na prečne konstrukcije v vodotokih, povečati pretočno zmogljivost vodotoka ... Količino plavljenega lesa v vodotoku je mogoče zmanjšati z zadrževanjem in odstranjevanjem lesa, lahko pa se z različnimi ukrepi zagotovi, da les ne pride v vodotoke. Glede na različne načine in vzroke vnosa plavnega lesa v vodotok so tudi ukrepi za zmanjševanje količine plavja različni.

Preglednica 4: Način vnosa plavnega lesa (povzeto po Rickli, 2009).

Način, vzrok vnosa	Ukrep/zastavljeni cilj
Plavni les v vodotoku	Odstranitev ali zaustavljanje lesnega plavja
Pobočna erozija	Ostranitev nestabilnih dreves
Plazenje, drobni tokovi	Sajenje dreves za stabilizacijo, pomlajevanje dreves
Vetrolom, snegolom	Sajenje odpornejših vrst dreves
Snežni plazovi	Pogozdovanje vrzeli v gozdu

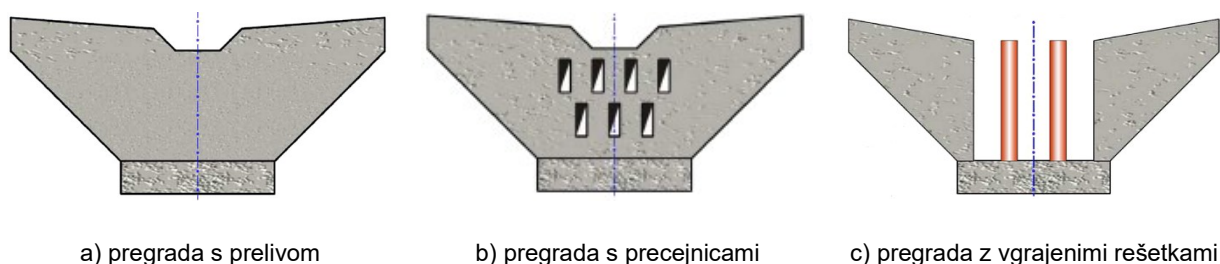
Ukrepe, s katerim se to doseže, razvrščamo na tehnične, administrativne, načrtovalske, organizacijske in vzdrževalne.

Med tehnične ukrepe za zadrževanje ali preusmerjanje lesnega plavja sodijo:

- gradnja zaplavnih pregrad,
- gradnja rešetak ali grabelj na zaplavni pregradi,
- gradnja rešetak ali grabelj v struge v obliki črke V, Λ ali pravokotno na strugo,
- zadrževanje plavja v akumulacijah in njegovo odstranjevanje,
- plavajoče mreže na akumulacijah,
- usmerjevalniki plavja pred prečnimi konstrukcijami,
- zadrževanje naplavin na zunanjih krivinah,

- ustvarjanje umetnega vrtinca ob konstrukciji, ki prepreči akumulacijo lesnega plavja,
- gradnja zaščitne mreže pred cevni prepusti,
- gradnja posebnih zadrževalnikov plavja na prelivnih poljih pregrad,
- ustrezno dimenzioniranje prelivnih polj in tolmana pod njimi,
- ustrezno dimenzioniranje svetle višine mostnih konstrukcij,
- izbira ustrezne oblike mostnega opornika in krilnih zidov,
- projektiranje mostnih konstrukcij z elementi, ki ne povzročajo dodatnega zadrževanja plavnega lesa pod konstrukcijo (mostna ograja, integriranje komunalnih vodov v mostno konstrukcijo).

V času poplavnih voda se po vodotoku premeščajo velike količine sedimentov, večji kamni, plavni les, tudi odplavljena prevozna sredstva (avtomobili, cisterne za shranjevanje plina ali kurilnega olja). Za zadrževanje sedimentov se gradijo ustalitvene pregrade, ki stabilizirajo dno in nivo leto struge. V vodotokih, po katerih se premeščajo večje količine plavnega lesa, se lahko pregrada kombinira še z vgradnjo jeklenih grabelj, ki les zadržujejo v zaplavnem prostoru. Od druge polovice 19. stoletja je razvoj ustalitvenih pregrad sledil konceptu »klasičnih« pregrad s prelivom, po letu 1970 se pojavljajo pregrade s prelivom in precejnicami, po letu 1980 pa se začnejo pojavljati betonske pregrade z vgrajenimi rešetkami na prelivu (Piton in Recking, 2015).



Slika 30: Shematski prikaz pregrad (Piton in Recking, 2015).

Med administrativne ukrepe lahko uvrščamo:

- ustrezno zakonodajo in predpise,
- inšpekcijski nadzor,
- izdelavo kart poplavne nevarnosti in tveganj,
- načrt ravnanja v izrednih razmerah,
- redno in zadostno financiranje vzdrževanja,
- izobraževanje in usposabljanje.

Med vzdrževalne ukrepe se izpostavi:

- redne preglede gozdov spomladi in po izrednih dogodkih,
- odstranjevanje nestabilnih in podrtih dreves,
- nadomeščanje manjkajoče vegetacije.

Za načrtovanje je ključno sodelovanje vseh pomembnejših sektorjev pri načrtovanju.

Vključevanje deležnikov mora biti vsebinsko in formalizirano. Občinski prostorski načrti in občinski podrobni prostorski načrti morajo upoštevati strokovne podlage in smernice nosilcev urejanja prostora (glede na predmet obravnave – vodarstvo, gozdarstvo, javna gospodarska infrastruktura, varstvo narave). Prav tako je pomembno, da se sektorski načrti

(gozdnogospodarski načrti, načrti upravljanja voda, načrti poselitve, zasnova javne gospodarske infrastrukture ...) usklajeni s prostorskimi načrti. Zaradi celovite vsebinske in prostorske obravnave je smiselno merilo dvigniti na regionalno/pokrajinsko raven.

Načrtovalski ukrepi so:

- sprejemanje prostorskih razvojnih odločitev, ki ne posegajo v vodotoke,
- opredelitev novih stavbnih zemljišč zunaj varstvenih ukrepov, za obstoječe pa se ukrepe predvidi,
- širitev poselitve mora biti usmerjena tako, da ni izpostavljena škodnemu delovanju poplavnih voda,
- z gradnjo prometne in ostale javne gospodarske infrastrukture naj se čim manj posega v vodna in priobalna zemljišča.

Tradicionalne tehnike zmanjševanja nevarnosti lesnega plavja so redno odstranjevanje odmrlega lesa iz vodotokov in sečnja potencialno nevarnih dreves na razširitvah. Odmrli les pri nizkih in srednjih pretokih ne predstavlja tveganja, ampak velik ekološki potencial, ki je največkrat večji od tveganja. Poskrbeti je treba za zmanjšanje ranljivosti in poškodb mostnih konstrukcij in akumulacij hidroenergetskih objektov z ustreznim načrtovanjem in dimenzioniranjem. Poznati je potrebno tudi medsebojno povezanost premeščanja sedimentov in plavnega lesa.

Preglednica 5: Zaščitni ukrepi (povzeto po Rudolf-Miklau in Hübl, 2010).

Zaščitni ukrep	Cilj zaščite	Mesto uporabe
Gospodarjenje z gozdovi	Stabilni gozdni sestoji, odstranitev lesnih ostankov	Strma hudourniška porečja, obrežni gozdovi
Sonaravni ukrepi	Stabilizacija brežin z vegetacijo	Brežine, erozijska območja, plitvi plazovi
Inženirsko-tehnični ukrepi	Zadrževanje plavja nad naselji	Hudourniki, povirni deli
Upravljanje z lesnim plavjem	Zadrževanje in odstranjevanje plavja (sečnja, akumulacije...)	Celotno povodje
Vzdrževanje vodotokov	Odstranjevanje mrtvega lesa, nega vegetacije na brežinah	Celoten vodotok
Pregled vodotoka	Ocena stanja	Celotno porečje
Izboljšanje pretočnih razmer	Odstranitev ovir, povečanje presekov odprtih, hidravlične izboljšave	Premostitve, cevni prepusti, struga vodotoka
Administrativni ukrepi	Izvajanje predpisov s področja varstva pred naravnimi nesrečami, zagotovitev denarnih sredstev za vzdrževanje	Območja urbanizacije, industrije, infrastrukture
(Ne)strukturni ukrepi	Karte poplavne nevarnosti in tveganj, načrt ukrepanja v izrednih razmerah, zagotovitev razlivnih površin	Prostorski in sektorski načrti
Upravljanje v času kriznih razmer	Odstranjevanje plavja na ožinah, premostitvah, prepustih	Premostitve, prepusti

Pri zagotavljanju poplavne varnosti so pomembne pretekle izkušnje in primeri dobre prakse. Po preteklih poplavnih dogodkih se preuči vzroke za nastanek poplav. Največ škode v

urbaniziranih območjih (npr. Železniki leta 2007) je zato posledica naravnih danosti (umestitev poselitve in infrastrukture v dolinsko dno) ter neustrezne gradnje (neustrezne mostne odprtine, premajhni prepusti, ozko kanalizirani vodotoki ...), kjer prihaja do zaustavljanja lesnega plavja, za katerim nastaja akumulacija.

Po poplavah je treba oceniti količino plavnega lesa z namenom pridobitve relevantnih podatkov za bolj natančno oceno prihodnjih podobnih dogodkov in načrtovanja potrebnih ukrepov. Tako ocena nevarnosti lesnega plavja za potencialne poplave v prihodnosti vsebuje podatke o odmrlem lesu ob vodotoku in količinah odloženega plavnega lesa v prispevnem območju.

7.4.1 Odstranitev lesnega plavja

Lesno plavje je treba obravnavati kot stalno nevarnost, pretehtati je treba med njegovimi koristmi in tveganji. Pri odstranitvi lesnega plavja iz vodotokov je smiselno ovrednotiti njegove pozitivne in negativne vplive na okolje in okolico. Z odstranitvijo plavja se zmanjša biotska pestrost, saj se uničijo stopnje, pod katerimi so se ustvarili tolmini in kotanje. Z izginjanjem tolminov se zmanjša življenjski prostor, zmanjša se pestrost živalskih vrst ... Če so stopnje v vodotoku dalj časa, pomeni odstranitev večjo ekološko škodo. Če pa je lesnega plavja veliko in se količina postopoma še povečuje, narašča poplavna nevarnost, zato je škoda manjša, če se plavje odstrani.

Z odstranitvijo lesnega plavja v vodotoku se poveča tudi varnost vodnih površin za izvajanje rekreacijskih dejavnosti na vodi in ob vodotokih, ki se lahko poškodujejo zaradi njegovega vpliva. A se z odstranitvijo poveča hitrost vode, tok postane bolj deroč in nevarnejši za plavanje, raftanje, kajakaštvo, soteskanje ... Na infrastrukturne objekte in nepremičnine ima odstranitev lesnega plavja ugoden vpliv. Zmanjša se verjetnost poplavljanja in boljše so možnosti za odpravljanje poškodb, ki jih povzroči plavni les (prelivanje kril pregrad, poškodbe zaradi trkov plavja v konstrukcije...).



Slika 31: Zapadlo drevo je zaustavilo plavajoče deblo (Zakotnik, september 2017).

Obravnava lesnega plavja ni enoznačna. Na erozijsko izpostavljenih območjih odložen plavni les pripomore k stabilizaciji struge, v dolvodnih območjih pa mnogokrat povečuje poplavno ogroženost (Wohl in sod., 2016). V zadnjem času se pojavlja nov pristop k odstranjevanju plavnega lesa iz vodotokov, ki temelji na ohranjanju čim naravnejših vodnih ekosistemov. Iz vodotokov se tako odstranjujejo le količinski presežki in daljši ostanki plavnega lesa, ki bi lahko vplivali na poplavno varnost.

Zapadli in plavni les predstavljata veliko tveganje predvsem v primeru visokih voda. Večina plavnega lesa so manjši kosi lesa – posamezne veje, ki ne predstavljajo večje poplavne nevarnosti, kadar se zagozdijo pred premajhnimi cevni prepusti. Največji problem in nevarnost predstavlja večji plavni les, ki se med poplavami transportira po vodotoku. Najmanjši vpliv ima plavje, ko pluje vzporedno s strugo. Plavje med transportom spremeni smer premeščanja zaradi vrtincev, ki nastajajo na mestih zožitev. Tako ne pluje več vzporedno s tokom in brežinami, ampak nekoliko pod kotom, zato se lahko ustavi, zagozdi ali začasno uklešči med vegetacijo na brežini, pri vtoku pod mostnimi konstrukcijami in cevni prepusti, potem ko se zadane v rob odprtine. Ko se prvi kosi lesnega plavja zagozdijo na določenem mestu, tvorijo dodatno oviro, ki povzroča zaustavljanje plavnega lesa v vodotoku. Za zgoščenim plavjem nastanejo večje akumulacije, v katerih se začne gladina vode nenadzorovano višati, kar lahko privede do poplavljanja gorvodnega območja.

Odstranitev večjih zapadlih dreves iz vodotoka poveča možnost transporta lesnega plavja manjših dimenzij. Le-to se ob visokih vodah transportira dolvodno in povzroča zamašitve manjših prepustov. S popolno odstranitvijo plavnega lesa iz vodotoka se zelo zmanjša hrapavost, povečajo pa se strižne sile, ki lahko erodirajo dno in brežine struge. Ker se z odstranitvijo lesnega plavja spremenijo hidravlične razmere v vodotoku, se pojavi vprašanje stabilnosti potencialnih erozijskih žarišč na brežinah vodotokov. Povečanje strižnih sil in hitrosti vode vpliva na spodjedanje in odnašanje brežin.

7.4.2 Zadrževanje plavnega lesa

Odločitev o izbiri tipa zadrževanja je odvisna od tega, kakšna je količina plavnega lesa v vodotoku. Pretehtati je treba, ali to povečuje škodni potencial ter ali bomo prestregli vse plavje ali le del. Poznati je treba reliefno izoblikovanost, naklon, potencialno količino plavja, geološko zgradbo, hrapavost ... V nadaljevanju so predstavljene posamezne vrste tehničnih ureditev za zadrževanje plavnega lesa.

7.4.2.1 Jeklene mreže in jekleni kabli

V novejšem času se za prestrezanje plavnega lesa postavijo posebne jeklene mreže, podobno kot za zaustavljanje in zaščito krušljivih skalnatih brežin. Jeklene statične mreže se priporočajo za vodotoke do širine 15 m in nagibe do 5 %. Količina plavnega lesa v vodotoku ne sme presegati 20 m³ na tekoči meter (Rimböck, 2004). Približno prostornino zadrževanja plavja se izračuna kot razmerje med količino zadržanega sedimenta in širino vodotoka.



Slika 32: Jeklenice za zadrževanje plavnega lesa (Dywidag-Systems International, 2017).

Mrežna pregrada se z lesom zapolni od spodaj navzgor, preproga plavnega lesa se tvori vzporedno s prelivom. Dinamične obremenitve na mrežo so majhne, še posebej v primerjavi z nevarnostjo ob porušitvi odloženega plavja. Poroznost med plavjem je dovolj visoka, da še prepušča vodo in povzroča manjši dvig gladine gorvodno (Geobrugg, 2017). Jeklene mreže se lahko kombinira tudi z jeklenimi grabljami. Jeklenice se napelje eno nad drugo v celotni širini vodotoka, njihovo delovanje je podobno jeklenim mrežam.



Slika 33: Jeklana mreža za zadrževanje plavnega lesa (Geobrugg, 2017).



Slika 34: Jeklana mreža in jeklene grablje za zadrževanje plavnega lesa (Geobrugg, 2017).

7.4.2.2 Jeklene grablje

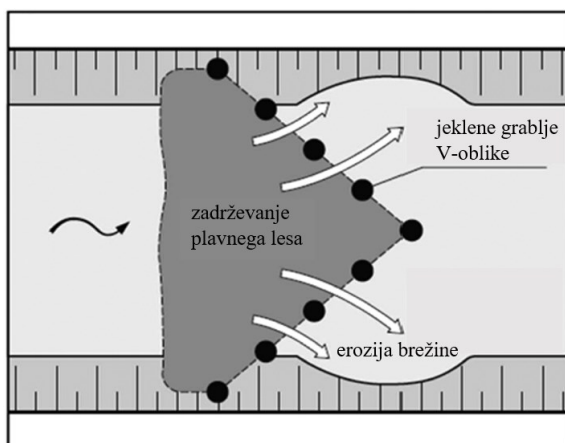
V strugo se lahko vgradi jeklene grablje, ki so medsebojno ustrezno razmaknjene, da omogočajo prestrezanje plavnega lesa in čim manj ovirajo pretok vode. Jeklene grablje morajo biti ustrezne višine, da tudi ob visokih vodah prestrezajo les. Morajo biti dobro temeljene ali zabite v dno struge, da se ob delovanju dinamičnih sil zaradi plavja ne porušijo. Odporne morajo biti tudi na obrus sedimentov. Največkrat se uporabljajo posebni jekleni profili in stare železniške tirnice.

Postavitev jeklenih grabelj v vodotok za zadrževanje plavnega lesa povzroča odlaganje sedimentov in dvig gladine vode gorvodno. Poznamo različne tlorisne izvedbe jeklenih grabelj (Bezzola in sod., 2004):

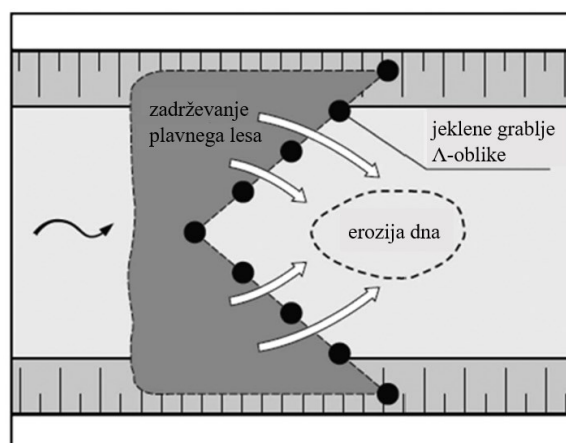
- pravokotno na smer toka,
- v obliki črke V,
- kot narobe obrnjeno črko V oz. Λ .

Pri prečni postavitvi grabelj je zadrževalni prostor največji, a so tudi dvigi gladine gorvodno največji. Pri grabljah oblike V je manjši dvig gladine vode gorvodno, za njimi se v sredini tvori preproga iz plavnega lesa. Dolvodno prelivajoč vodni tok lahko erodira bočni brežini. Pri grabljah Λ oblike se plavni les shranjuje bliže brežinam, prelivajoča voda pa dolvodno izpodjeda dno vodotoka.

Hitrost vode skozi rešetke se mora gibati med 0,8 in 1,0 m/s, da zadržanega plavja ne prelije čez rešetke (Rimböck, 2003). Grablje so primerne za manjše vodotoke, saj za večje ne zadoščajo. Dvig vodne gladine zaradi zadrževanja ali odlaganja plavnega lesa je odvisen od hrapavosti, vrste in količine lesa, pretoka vode in plavja, vrtilišča debel, naklona pobočja, Froudovega števila, dolžine akumulacije, razmika med piloti in oblike rešetak.



Slika 35: Jeklene grablje V-oblike (prirejeno po Piton in Recking, 2015).



Slika 36: Jeklene grablje Λ -oblike (prirejeno po Piton in Recking, 2015).

7.4.2.3 Jeklene rešetke

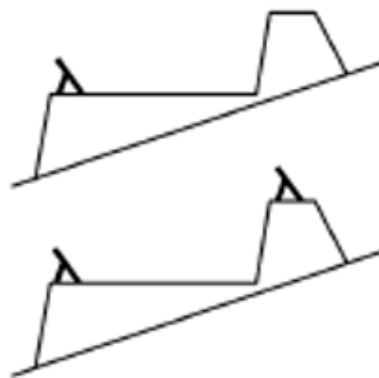
V vodotoku ali na njegovih pritokih, bogatih s plavnim lesom, se postavljajo tudi jeklene rešetke. Tovrstne ureditve se pojavijo v 70-tih letih 20. stoletja. Gradijo se sekcijsko za zadrževanje večjih količin plavnega lesa in večjih sedimentov. Rešetke se postavljajo v preliv pregrade in se ustrezno temeljijo in povežejo med seboj. Jeklene rešetke se postavljajo na prelive ali pa se jih postavlja kot sekundarne zadrževalnike na podslapja pregrad.



Slika 37: Jeklene grablje na pregradi na sotočju Štajnpoha in Danjarske grape v Podroštu pri Zalem Logu (Zakotnik, maj 2016).



Slika 38: Jeklene rešetke za zadrževanje plavnega lesa (Rudolf-Miklau in Hübl, 2010).



Slika 39: Načini postavitve jeklenih rešetk (Piton in Recking, 2015).

7.4.2.4 Prebiralne pregrade

Pri gradnji zaplavnega objekta je pomembna pravilna izbira lokacije, poznati je treba območje, ki ga želimo zaščititi pred škodljivim delovanjem voda. Vedeti je treba, kje v vodotoku lahko prihaja do zastajanja plavja zaradi ožin (naravne, umetne ob mostovih in prepustih). Objekte se umesti na mestih razširitve struge, kjer se upočasni hitrost vode in se začnejo plavine odlagati. Zaželeno je, da je čim bližje pregradi dostopna pot, ki omogoča praznjenje in odvoz plavja ter plavin. Pri dimenzioniranju je treba upoštevati, kakšno prostornino zaplavnega prostora potrebujemo, ter ali bomo zadrževali samo plavine, plavje ali oboje. Pred gradnjo se analizirajo lastnosti hudournika, in sicer velikost prispevnega območja, oblikovanost reliefa, geološka zgradba, strmine, višina, erozijska žarišča.

Za dimenzioniranje so pomembni podatki o prodonosnosti, pričakovanih visokih vodah, gorvodnih vodnogospodarskih ureditvah struge, pokrovnosti tal, razvitosti vegetacije (slojevitost, hrapavost), ocena količine plavnega lesa. Če je prodonosnost majhna, mora pregrada omogočati zadosten dotok voda, da se niveleta vodotoka ne pogloblja. V Sloveniji se za zadrževanje plavja največkrat uporabljajo zaplavne pregrade, v katerih so vgrajene grobe rešetke (npr. sotočje Štajnpoha in Danjarske grape v Podroštu pri Zalem Logu, Pasica nad bolnico Franja). Pregrade ob poplavih uspešno opravljajo svojo nalogo prepuščanja voda in zaustavljanje plavja, če se po vsakih večjih vodah zaplavni prostor sprazni. V Sloveniji se po izgradnji pregrad pogosto nanje pozabi do večjih poplav. Mnoge so popolnoma zapolnjene s plavinami, na rešetkah pa se zagozdi toliko lesa in večjih skal, da se ob visokih vodah pojavi zajezitev.



Slika 40: Zapolnjena pregrada na Suhem potoku v Zapoudnem – Zadnji Trenti (Zakotnik, junij 2011).

Klasičnim betonskim ali kamnitim pregradam so podobne prebiralne pregrade z vgrajenimi jeklenimi grabljami ali rešetkami v vodoravni ali navpični smeri. Prebiralne pregrade so namenjene prepuščanju določene frakcije sedimentov, največkrat so zgrajene za zadrževanje večjih skal in balvanov, obenem pa jih koristimo za zadrževanje plavnega lesa. Podobno kot prebiralne pregrade zadržujejo plavni les tudi disipacijske pregrade, ki so prednostno namenjene zmanjševanju energije drobirskih tokov. Vlogo zadrževanja plavnega lesa imajo tudi pregrade z betonskimi rebri za razbijanje drobirskih tokov. Problem prebiralnih pregrad je, da se plavni les hitro zaklini med rešetke in preprečuje otekanje vode, ki gorvodno začne naraščati, plavni les pa se začne premeščati čez pregrado.



Slika 41: Kamnita prebiralna pregrada (Društvo vodarjev, 2004).



Slika 42: Betonska prebiralna pregrada z jekleno mrežo (SedAlp, 2015).



Slika 43: Disipacijska pregrada, zapolnjena s plavnim lesom (SedAlp, 2015).



Slika 44: Avstrijski tip prebiralne pregrade (Lange in Bezzola, 2006).

Tako imenovana avstrijska pregrada (Slika 44) je poseben tip prebiralne betonske pregrade, ki ima pod prelivnim poljem vgrajene jeklene rešetke ali mrežo v vodoravni ali navpični smeri. Pregrade prepuščajo sedimente, zaustavljajo pa večje skale in balvane ter plavni les (Rudolf-Miklau in Hübl, 2010). Tak tip pregrad je primeren za visokogorske hudourniške vodotoke, saj ob nizkih pretokih ne ovirajo pretoka in premeščanja sedimentov, za njimi se ne pojavlja akumulacija. Ob visokih vodah, ko se v vodotoku pojavijo večje skale in plavni les, se za rešetkami začne odlaganje. Tudi če se pregrada popolnoma zapolni s skalami in plavjem, voda še vedno lahko teče skozi rešetke in preliv.

7.4.2.5 Zadrževanje lesnega plavja z jeklenimi rešetkami ob brežinah

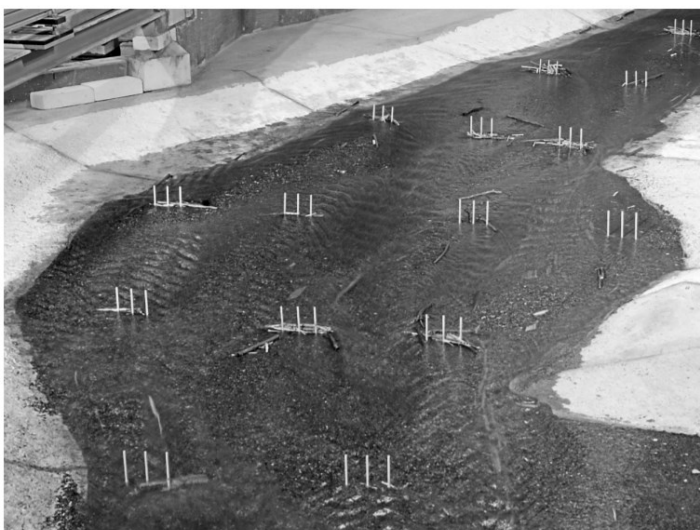
V ožjih vodotokih ob utrjenih brežinah struge se izmenično na obeh bregovih postavijo jeklene konstrukcije, temeljene v dno in sidrane v brežino. S takimi konstrukcijami se predvsem v krivinah prestreza velik del plavnega lesa.



Slika 45: Jeklena rešetka ob brežini (Lange in Bezzola, 2006).

7.4.2.6 Zadrževanje lesnega plavja z jeklenimi rešetkami v strugi vodotoka

V strugi vodotoka se zaporedno postavijo skupine jeklenih rešetak na določeni medsebojni oddaljenosti. Večje kot je število rešetak, večja je verjetnost zadrževanja plavnega lesa.



Slika 46: Modelna raziskava jeklenih rešetak v vodotoku (Lange in Bezzola, 2006).

7.4.2.7 Zadrževanje lesnega plavja pred prelivom pregrade

Za zaščito klasične ustalitvene pregrade pred poškodbami zaradi padajočega lesnega plavja se na gorvodni strani zgradi posebna konstrukcija iz jeklenih rešetak, ki zadržujejo plavni les. Les se nabira za pregrado ob visokih vodah, voda pa lahko nemoteno odteka skozi ali nad rešetkami, zapolnjenimi s plavnim lesom. Lahko se zgradi tudi betonske nosilce, med katere se vgradi jekleno mrežo.



Slika 47: Posebna konstrukcija za zadrževanje plavnega lesa pred prelivom pregrade (Lange in Bezzola, 2006).



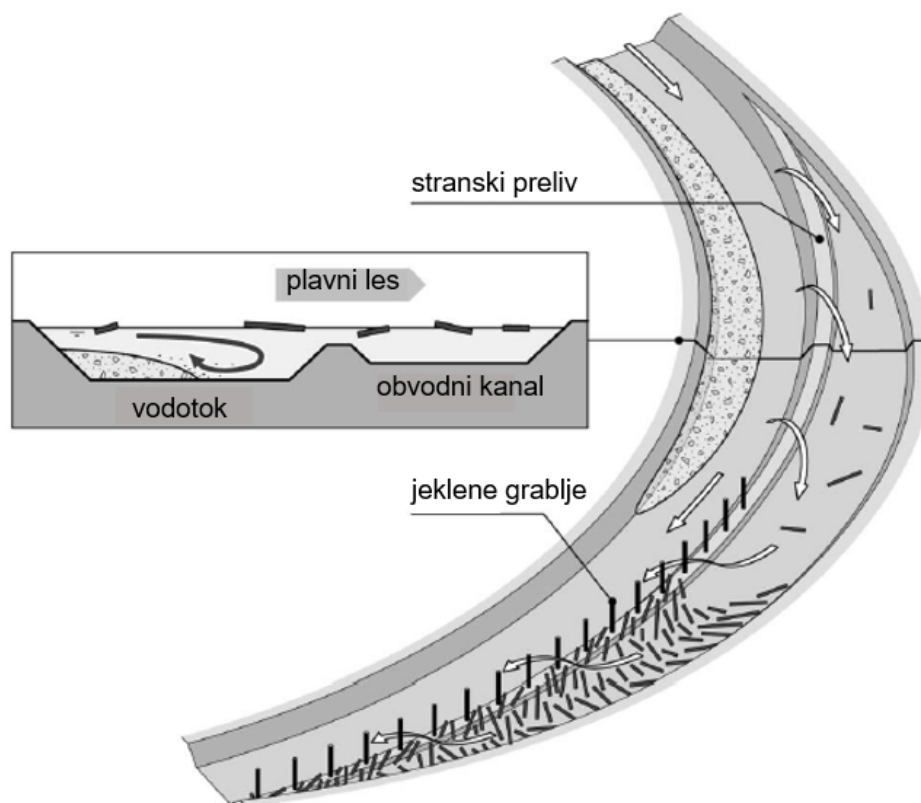
Slika 48: Jeklene rešetke pred prelivom pregrade (SedAlp, 2015).

Z jeklenimi rešetkami pred prelivom preprečimo prelivanje plavnega lesa čez pregrado, če pa se to že zgodi, se les zadrži med rešetkami in prelivom pregrade. Z izgradnjo rešetak pred pregrado se zmanjšajo tudi dinamične sile zaradi plavnega lesa na samo pregrado. Na zaplavnih pregradah, kjer se pričakuje hitrejša zapolnitev zaplavnega prostora, se pred pregrado zgradi ločna konstrukcija z betonskimi stebri, ki zadržujejo plavni les, tako da se ne premešča dolvodno.

7.4.2.8 Obvodni kanal z grabljami

V Švici, na reki Sihl, ki teče vzporedno z Züriškim jezerom in se za njim izliva v reko Limmat, poteka projekt izgradnje zadrževanja plavnega lesa na zunanji krivini za zaščito kantona Zürich pred škodljivim vplivi poplav. Iz manjših stranskih vodotokov je prisoten velik dotok plavja, ki se nato kopiči v reki. Ob poplavih leta 2005 se je mesto Zürich komaj rešilo velike škode zaradi plavnega lesa, zato od leta 2007 potekajo študije in raziskave, kako zadržati in odstraniti čim več plavnega lesa, ki ogroža cesto, železniško progo in poselitev.

Odločili so se za projekt izgradnje obvodnega kanala ob zunanji krivini vodotoka. Med glavno strugo in kanalom je predviden manjši nasip, ki ga voda preliva v času večjih vodostajev. Na iztoku kanala nazaj v glavno strugo so vgrajene jeklene grablje, ki zadržujejo plavni les. Ta se ob visokih vodah premešča na površini vodotoka in se zaradi centripetalne sile v krivini prelije v obvodni kanal. Nasip je na iztoku zelo nizek, kar omogoča normalen transport sedimentov in odtekanje vode. Po koncu poplav se mora zaustavljeni plavni les iz zadrževalnika odstraniti. Lokacijo obvodnega kanala so določili na podlagi količine plavja, primerne krivine in bližine ceste, po kateri je zagotovljen dostop do deponije plavja (AWEL, 2013).



Slika 49: Obvodni kanal z jeklenimi grabljami na reki Sihl za zadrževanje plavnega lesa (prirejeno po Schmocker in sod., 2016).

8 SMERNICE ZA OBRAVNAVO PROBLEMATIKE ZAPADLEGA IN PLAVNEGA LESA V VODOTOKIH V SLOVENIJI

Naloge države

Na podlagi obravnavane problematike zapadlega in plavnega lesa v vodotokih za urejanje tega področja v Sloveniji predlagamo, da se vsebinska tematika enakovredno uvrsti v upravljanje voda. Z zakonom (ZV, 2002 in ZG, 1993) in pravilnikoma (Pravilnik o izvajanju sečnje ..., 1994 in Pravilnik o vrstah ..., 2006) predpisane obveznosti in ravnanja je potrebno tudi izvajati.

Država mora zagotoviti stabilno financiranje, kar pomeni zadosten obseg sredstev in pravočasen sprejem finančnega načrta (v začetku leta). Le tako bo s programom načrtovanih aktivnosti mogoče izvajati preventivne ukrepe, redno vzdrževanje in spremljanje stanja.

Modeliranje in izdelava hidravličnih študij

Pri modeliranju hidravličnih študij za izdelavo kart poplavne nevarnosti bi bilo nujno upoštevati plavni les v vodotokih. Iz podatkov v evidenci bi se tako lahko za modeliranje hidravličnih študij za namene izdelave kart poplavne nevarnosti lažje določilo potencialna mesta zastajanja plavja, pogostost, njegovo velikost in količino. Tako bi dobili bolj realne ocene dviga gladine in mesta prelivanja. Potrebno bi bilo pripraviti poplavne scenarije, ki upoštevajo različne količine plavnega in zapadlega lesa v vodotokih, ter njegov vpliv na potek poplave oz. dvig gladine.

Vzpostavitev informacijskega sistema

Da bi imeli na voljo podatke o lokacijah nahajanja plavnega lesa, njegovem premeru, dolžini, količini, velikosti ..., bi morali določiti vsa potencialna območja s prisotnostjo lesnega plavja v vodotokih in jih kartirati na enak način kot karte erozijske nevarnosti. Karte poplavne nevarnosti bi bilo potrebno dopolniti s podatki o pojavljanju plavnega lesa. Uporabni so tudi historični zapisi in fotografije. Za natančnejšo določitev karte ogroženosti zaradi plavnega lesa bi se na terenu izvajalo popis (predpisan poenoten obrazec) in kartiranje območij pojavljanja, premeščanja in odlaganja plavnega lesa (v obliki dopolnitve vodnega katastra), kjer bi se zabeležilo mesta odlaganja plavnega lesa (naravne ožine, zavoji, sotočja, prodišča, prečni objekti, premostitve), vzroke (naravni ali antropogeni), obseg plavja in škode. Sestavni del popisa bi bila tudi ocena stanja varovalnih objektov ter fotografije in video zapisi. Iz popisov bi se vzpostavila podatkovna zbirka, ki bi dopolnjevala prostorski informacijski sistem. Enotno vodene evidence ter ustrezno ovrednotenje in analiziranje so strokovna podlaga za načrtovanje potrebnih preventivnih ukrepov in izhodišč za usmerjanje razvojnih in varstvenih dejavnosti v povodjih. Za odseke vodotokov, ki so najbolj ogroženi s plavnim lesom, bi lahko pripravili tudi podrobnejši načrt spremljanja stanja.

Monitoring

Preglede vodotokov bi bilo potrebno izvajati redno (določitev periode) ter s pridobljenimi podatki posodabljati in nadgrajevati evidence. Na najbolj ogroženih vodotokih, ki so podvrženi erozijskim in hudourniškim procesom ter v katerih se stalno ali pogosto pojavlja plavni les, naj se pregled izvede vsaj enkrat letno. Obdobne preglede – vsaj na pet let – bi bilo potrebno opraviti na objektih in ureditvah prometne infrastrukture (potencialna verjetnost zamašitve ali poškodb zaradi lesnega plavja), na spremljajočih objektih okoljske in energetske infrastrukture v območju vodotokov. Tovrstne preglede vodotokov so uvedli na avstrijskem Tirolskem, nato pa so jih zaradi učinkovitosti razširili na celotno državo (Papež,

2011). Odseke vodotokov in čas pregledov bi ocenili za to pristojni strokovnjaki (vodarji, gozdarji ...). Preglede stanja na terenu se mora obvezno opraviti po vsakokratnih visokih vodah, še preden se začnejo izvajati interventni ukrepi. Za natančnejše modeliranje hidravličnih študij bi morala evidenca poleg popisov po poplavih vsebovati še hidrometeorološke podatke najbližjega opazovalnega mesta (zadostna gostota opazovalne mreže). Glede na veliko dolžino vodotokov in hudournikov v Sloveniji bi bilo potrebno zaposliti dodatni strokovni kader, ki bi izvajal terenske popise. Alternativa so tudi usposobljeni prostovoljci, vendar se tako povečuje verjetnost pridobitve pomanjkljivih podatkov. Prav tako bi morali po poplavnih dogodkih tudi upravljavci druge infrastrukture ob vodotokih opraviti monitoring vseh svojih objektov in naprav, ki bi lahko bili potencialno ogroženi.

V Sloveniji bi bilo potrebno izvesti dodatne raziskave na terenu, ali razvite empirične enačbe in modeli ustrezajo značilnostim in posebnostim naših vodotokov in hudournikov. Za oceno verodostojnosti empiričnih enačb bi bilo potrebno upoštevati podatke o gozdnih sestojih, starosti in poškodovanosti gozda, gostoti dreves na območju ter reliefnih in stabilnostnih razmerah na pribrežnih zemljiščih.

Informiranje in ozaveščanje

Učinkoviti in najcenejši ukrepi zmanjševanja škode zaradi problematike plavnega in zapadlega lesa v vodotokih so ustrezno informiranje, izobraževanje in ozaveščanje javnosti na različne načine. Za ozaveščanje ljudi je potrebno razviti ustrezna komunikacijska orodja (posveti, delavnice, zloženke, računalniški simulacijski modeli, reševalne vaje ...), ki so prilagojena posameznim ciljnim skupinam:

- javnost (prebivalci naselij ob vodotokih): ozaveščanje in način ukrepanja za zmanjšanje tveganja ter škode,
- lastniki gozdov: ozaveščanje o ustreznem skladiščenju posekanega lesa, skrb lastnikov za odstranjevanje zapadlega drevja iz vodotokov, odstranjevanje poškodovanih dreves ...,
- mladina: ozaveščanje in učenje ukrepanja ob škodnih dogodkih, povezanih s plavnim lesom.

Priporočila za razvoj dejavnosti v vplivnem območju vodotokov

Na vplivnih območjih odsekov vodotokov, kjer je verjetnost pojavljanja plavja velika, bi bilo smiselno sprejeti pravila ravnanja za različne rabe prostora (poselitev, gozdarstvo, kmetijstvo). Še posebej je potrebno izpostaviti usmeritve za umeščanje, združevanje koridorjev, dimenzioniranje za infrastrukturo, ki je zaradi posebnosti objektov in naprav ali prostorskih razmer vezana na trase ob vodotokih (prometna, okoljska in energetska infrastruktura). V odvisnosti od nagiba brežin in geološke zgradbe se naj ne bi puščalo nobenih lesnih ostankov, in sicer v širini vsaj ene drevesne višine. Na bolj strmih pobočjih (40 %) se to razmerje poveča za 1,5 do 2,4 višine (Sobota in sod., 2006).

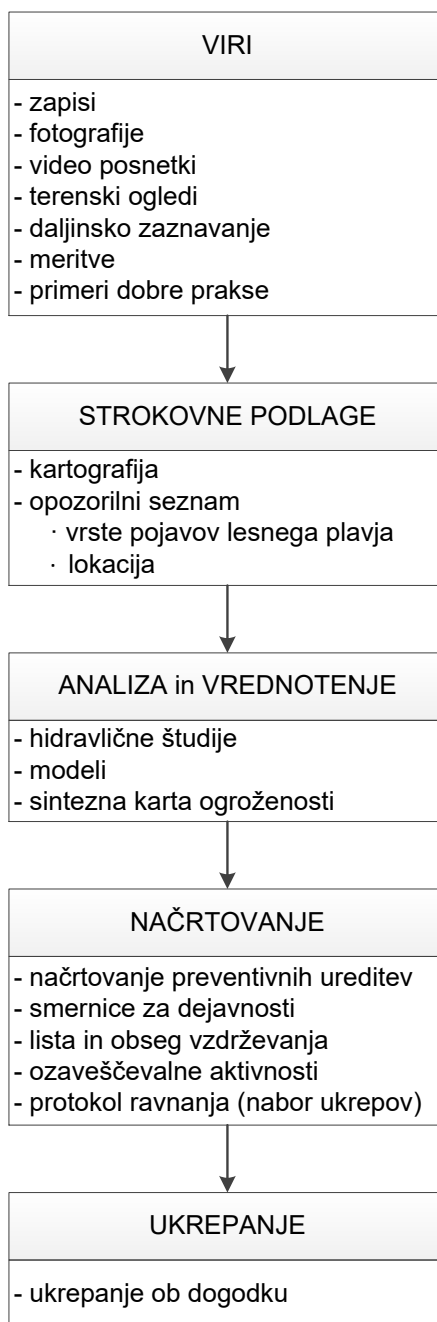
Izobraževanje in strokovno usposabljanje

S problematiko plavnega lesa v vodotokih bi bilo potrebno dodatno izobraziti strokovni kader na področju:

- prostorskega načrtovanja: upoštevanje kompleksnosti razvojnih in varovalnih dejavnosti pri določitvi namenske rabe prostora, opredelitev meril in pogojev za posege,

- projektiranja infrastrukturnih objektov in naprav: ustrezno dimenzioniranje (npr. zadostno nadvišanje mostov in preseki prepustov, ustrezna oblika mostne ograje, namestitvev komunalnih vodov, zadostne razpetine ...), zaščita opreme,
- vodarstva: pravočasno opazovanje sprememb v strugi zaradi pojava plavnega lesa, njihova intenzivnost, s tem povezane spremembe na brežinah ...,
- gozdarstva: ustrezno izvajanje sečnje, prepoznavanje nevarnosti zaradi poškodovanega in podrtega drevja v vodotoku, spodbujanje večnamenskosti gozdov, krepitev varovalne funkcije gozdov ...

Celostna obravnava problematike zapadlega in plavnega lesa v vodotokih je prikazana na spodnjem diagramu.



Slika 50: Shema celostne obravnave zapadlega in plavnega lesa v vodotokih.

9 OCENA KOLIČINE ODPLAVLJENEGA LESA IZ HUDOURNIŠKEGA OBMOČJA

V zadnjem delu magistrskega dela je prikazan teoretični primer izračuna količine plavnega lesa, ki se lahko potencialno sprosti iz območja določene površine. S teoretičnim izračunom smo želeli preveriti, kakšen je vpliv oblike in velikosti povodja na možno količino plavnega lesa v povodju.

9.1 Opis metode računanja

Praktičnost uporabnosti empirične enačbe, ki jo za izračun količine lesnega plavja iz povodja podaja Rickenmann (enačba 24), smo uporabili na dveh različno oblikovanih povodjih z različno površino.

Izbrali smo dve v naravi pojavnici obliki povodja – pravokotnik in elipso. V naravi je pogostejše zastopana oblika elipse oz. je povodje sestavljeno iz večih elips. Velikosti hudourniškega območja so 1, 10 in 100 km². S spodnjo enačbo smo za vsako velikost povodja izračunali maksimalni odtok s povodja ob pojavu visokih voda, ki se pojavijo na več deset let.

$$Q_{\text{vode}} = q \cdot F_w^{3/4} \quad (47)$$

Kjer pomeni:

Q_{vode} – odtok s povodja (m³/s),

q – specifični odtok (m³/s/km²),

F_w – površina hudourniškega območja (km²).

Preglednica 6: Odtok s povodja.

F_w (km ²)	q (m ³ /s/km ²)	Q_{vode} (m ³ /s)
1	12	12,00
10	12	67,48
100	12	379,47

Vrednost specifičnega odtoka q je enaka za obe obliki in vse velikosti povodja zaradi lažje primerjave izračunanih podatkov.

Iz poznanih enačb za površino pravokotnika oz. elipse smo preko razmerja med širino in dolžino določili njuni vrednosti. Površina povodja je za:

- pravokotnik: $F = h \cdot b$,
- elipso: $F = \pi (h \cdot b)$.

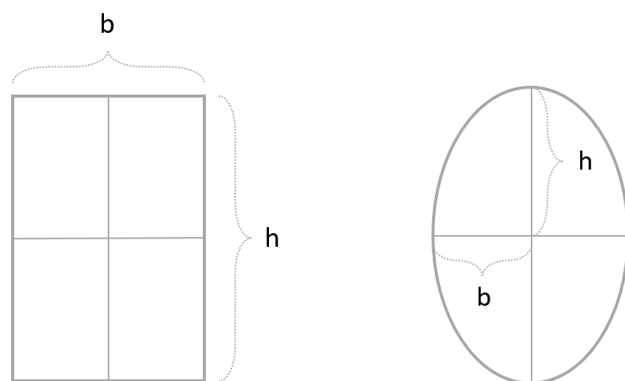
Kjer je:

F – površina (m²),

h – dolžina (m),

b – širina (m).

Pri elipsi sta h in b polosi.



Slika 51: Prikaz dolžine in širine na pravokotniku ter polosi na elipsi.

Iz vrednosti razmerja med dolžino in širino (razmerje h/b) smo z danimi vrednostmi površine izračunali posamezne vrednosti dolžine in širine. Razmerje h/b smo določili v korakih po 0,01 od vrednosti razmerja 0,01 do 10,00. Od vrednosti razmerja 10,00 smo korak povečali na 1,00 do vrednosti razmerja 100,00. Od tu dalje je bil korak 100,00. Pri vrednosti razmerja 1.000,00 se je korak povečal na 1.000,00. Zaključili pa smo pri vrednosti razmerja 10.000.

Preglednica 7: Določevanje razmerja h/b .

razmerje h/b	korak
Od 0,01 do 10,00	0,01
Od 10,00 do 100,00	1,00
Od 100,00 do 1.000,00	100,00
Od 1.000,00 do 10.000,00	1.000,00

Če razmerje med dolžino in širino zapišemo kot $r = h/b$ in iz enačbe izrazimo b , lahko iz znane površine izračunamo dolžino h in širino b :

- pravokotnik:

$$h = \sqrt{F_W \cdot r}$$

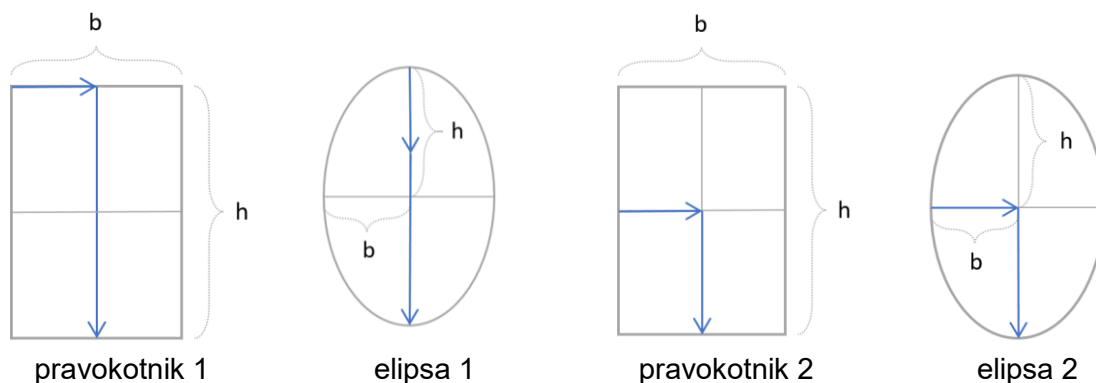
$$b = \sqrt{F_W / r}$$
- elipsa:

$$h = \sqrt{\frac{F_W \cdot r}{\pi}}$$

$$b = \sqrt{\frac{F_W}{r \cdot \pi}}$$

Za izračun količine plavnega lesa po enačbi (24) potrebujemo še hidrogram odtoka V_{odtok} , ki ga izračunamo s pomočjo kritičnega časa t_{krit} in odtoka s povodja Q_{vode} . Kritični čas lahko izračunamo s pomočjo hitrosti in dolžine h oz. širine b . Hitrost odtekanja vode je odvisna od površja, v našem primeru od gozda in hudournika. Pri računanju časa smo predpostavili, da voda teče v strugi po sredini povodja, v strugo pa priteka z leve ali desne polovice lika (glej spodnjo sliko). Pri računanju kritičnega časa smo upoštevali dva primera, in sicer v prvem primeru voda po strugi teče po celotni dolžini lika, vanjo pa se zlivajo površinske vode z desne ali leve polovice (pravokotnik 1), pri elipsi pa smo upoštevali, da voda teče približno po $\frac{2}{3}$ dolžini lika, vanjo pa se na $\frac{1}{3}$ dolžine stekajo površinske vode (elipsa 1). V drugem primeru pa se struga vodotoka oblikuje na sredini lika (pravokotnik 2 in elipsa 2), posledično je dolžina vodotoka samo polovica celotne dolžine lika. Hitrost vode, ki teče po površini skozi gozd, je približno desetkrat manjša od hitrosti vode v vodotoku. Oblika povodja se zaradi

različne vrednosti razmerja med dolžino in širino spreminja. Na začetku je dolžina povodja zelo majhna in se postopoma podaljšuje, posledično pa se zmanjšuje širina. Sprva je oblika povodja »ležeča« – širina b je večja od dolžine h , ko je razmerje stranic enako – kvadrat pri pravokotniku ali krožnica pri elipsi. Nato se začne dolžina povečevati, širina pa zmanjševati – širina b je manjša od dolžine h , liki postajajo »podolgovati«. Brežine hudourniškega območja so v primeru daljše širine položnejše, v primeru krajših širin pa so brežine strmejše.



Slika 52: Prikaz stekanja vode po povodju.

Preglednica 8: Hitrosti vode na površini in v strugi.

$v_{\text{površina}}$ (m/s)	0,1	0,2	0,3	0,4
-----------------------------	-----	-----	-----	-----

Preglednica 9: Hitrosti vode v hudourniku.

v_{struga} (m/s)	2	3	4
---------------------------	---	---	---

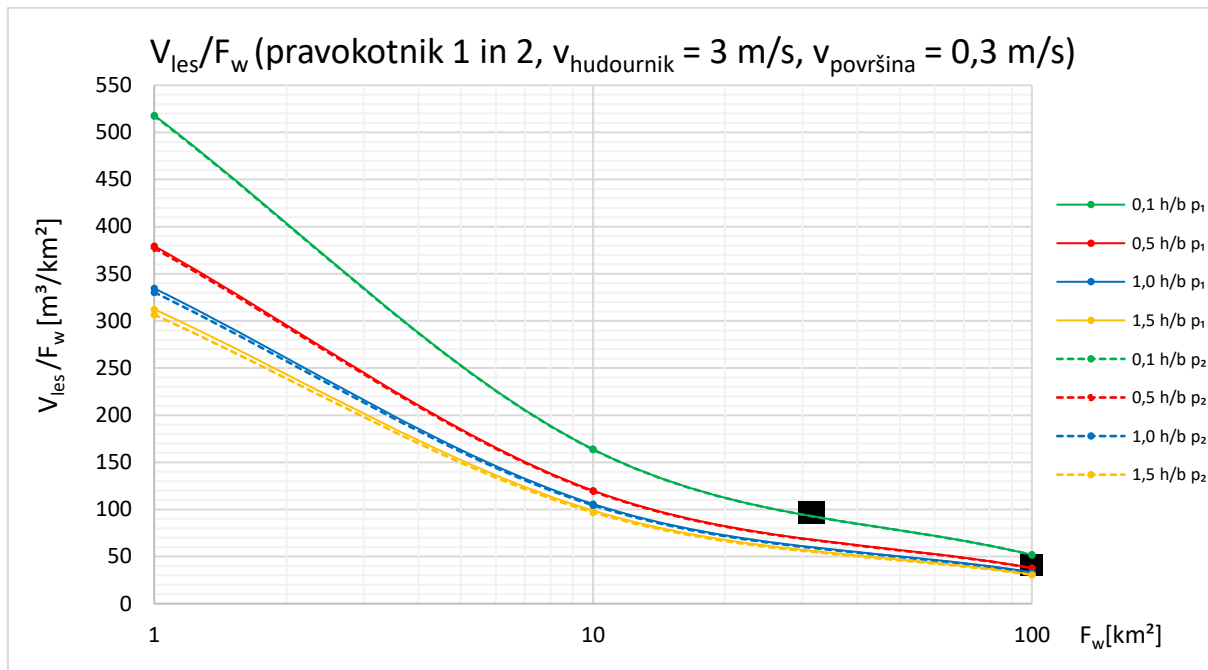
Glede na zgoraj opisana primera stekanja smo kritični čas izračunali tako, da smo sešteli čas, potreben za pretok po strugi in gozdu. Čas smo izračunali iz dolžine oz. širine in hitrosti za posamezno površino. Ko smo dobili čas odtoka, smo lahko izračunali hidrogram odtoka.

$$V_{\text{odtok}} = t_{\text{krit}} \cdot Q_{\text{odtok}} \quad (48)$$

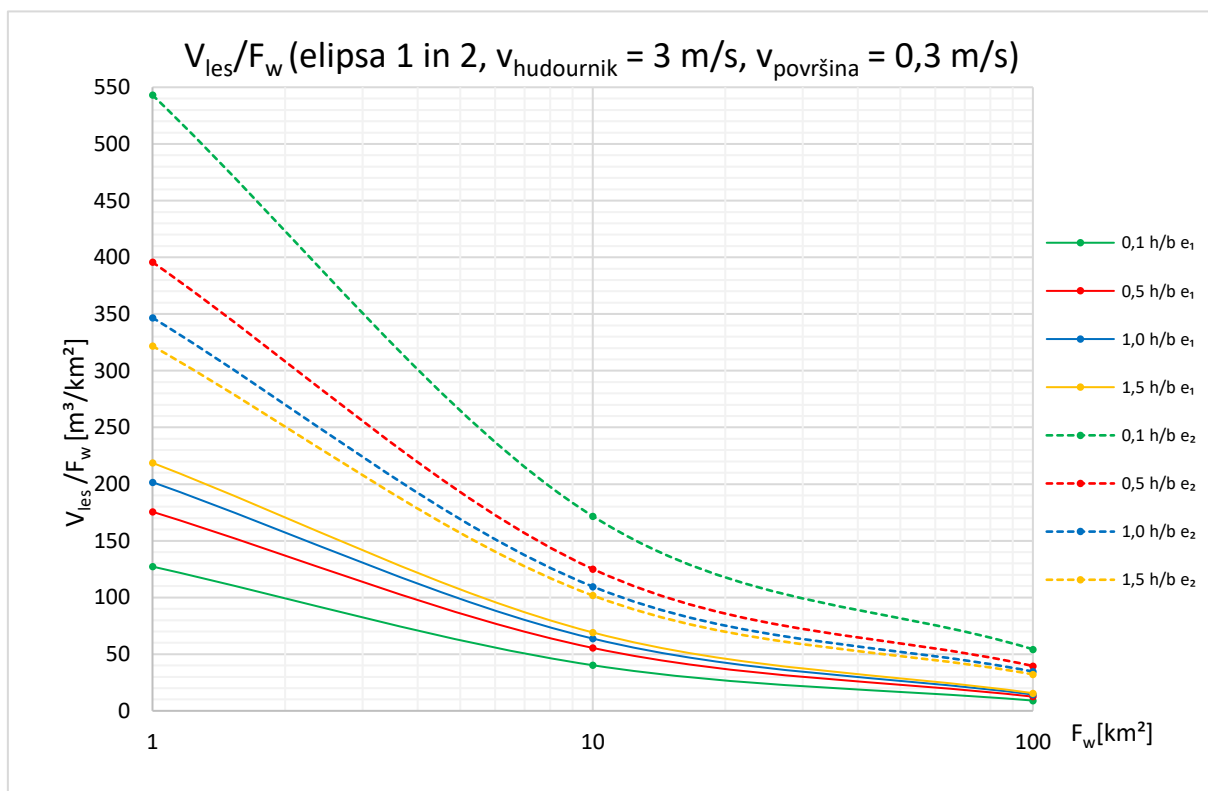
Pri računanju hidrograma (V_{odtok}) odtoka smo predpostavili, da se največji odtok s povodja pojavi približno na polovici kritičnega časa, saj smo teoretični izračun opravili za zelo ekstremne dogodke s povratnimi dobami več deset let. Odtok je odvisen od kritičnega časa in specifičnega odtoka. Ker specifičnega odtoka ne spreminjamo, se vrednosti odtoka spreminjajo le zaradi kritičnega časa. Ker je hidrogram odtoka v neposredni povezavi s kritičnim časom, se vrednosti odtoka s povečevanjem hitrosti vode na površju začnejo zmanjševati. Hitrost vode v hudourniku ima zanemarljiv vpliv na količino odtoka. Ko smo pridobili potrebne podatke, smo izračunali še potencialno količino plavnega lesa v vodotoku po Rickenmannovi enačbi (V_{les}) za različno obliko in velikost povodja v odvisnosti od razmerja med dolžino in širino. Na koncu smo preverili delež potencialnega plavnega lesa V^* v celotnem povodju, ki ga lahko ekstremni vremenski dogodek odplavi. S teoretičnim izračunom smo želeli preveriti, kako na možno količino plavnega lesa v povodju vplivata oblika in velikost povodja.

Količina plavnega lesa v odvisnosti od površine in oblike povodja

Za lažje ocenjevanje količin plavnega lesa v odvisnosti od velikosti hudourniškega območja in njegove oblike smo za srednjo hitrost vode v hudourniku in na površju narisali spodnja grafa.



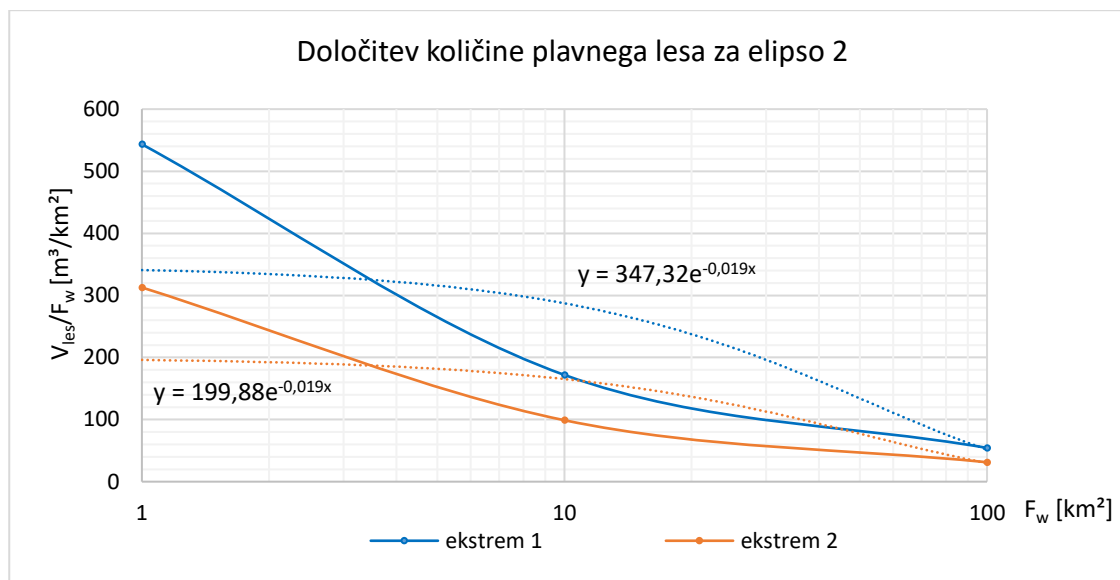
Slika 53: Prikaz V_{les}/F_w za pravokotnika.



Slika 54: Prikaz V_{les}/F_w za elipsi.

Opazimo, da so količine lesa za pravokotnika z različnim načinom stekanja vode pri enaki velikosti hudourniškega območja zelo podobne. Pri elipsah je količina lesnega plavja pri elipsi 2 večja kot pri elipsi 1. Pri primerjavi vrednosti za pravokotnik 2 in elipso 2 lahko ugotovimo, da so vrednosti pri slednji večje. Najmanjše količine lesa so pri elipsi 1.

Iz narisanih ekstremov elipse 2 (ekstrem 1: $V_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$, $v_{\text{površje}} = 0,4 \text{ m/s}$; ekstrem 2: $V_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$, $v_{\text{površje}} = 0,1 \text{ m/s}$) smo poskušali določiti enačbo za izračun količine plavnega lesa v odvisnosti od velikosti.



Slika 55: Določitev enačbe za izračun količine plavnega lesa za elipso 2.

9.2 Sklepne ugotovitve

Na količino lesa v povodju ima največji vpliv velikost povodja, oblika ne igra pomembnejše vloge. Na količino lesa vpliva tudi razmerje med dolžino in širino povodja, ki je v povezavi s preračunom kritičnega časa, ta pa je odvisen od izbranih hitrosti vode v vodotoku in strugi. Količine lesa so po empirični enačbi, tako kot ugotavlja avtor enačbe Rickenmann, prevelike, saj v izračunu ni upoštevan naklon povodja in brežin, stanje gozdnih sestojev, erozijska izpostavljenost ...

Enačba je uporabna za prvo oceno količine plavnega lesa v povodju. Primernejša je za večja povodja, saj v manjših povodjih (npr. s površino 1 km^2) poda prevelike količine plavnega lesa. Enačbo lahko uporabimo za lažje načrtovanje ukrepanja ob ekstremnih dogodkih in dimenzioniranje zadrževalnih ukrepov. Ugotovimo lahko tudi, da voda lahko odnese samo del lesnega prirastka. Ostali del ostane v gozdu, kjer strohni, obleži na nedostopnih brežinah oz. na mestih, kjer ni možnosti premestitve v vodotok. Nekaj prirastka se lahko odplavi skupaj z drobirskimi tokovi. Lesni prirastek, ki ga lahko ekstremen dogodek odnese, se v največji meri zmanjšuje zaradi gospodarjenja z gozdovi.

9.3 Prikaz rezultatov

Za lažji prikaz rezultatov so v prilogi na koncu magistrskega dela podane preglednice za štiri vrednosti razmerja h/b , in sicer 0,1, 0,5, 1,0 in 1,5. Za zgornje štiri vrednosti smo se odločili, ker pri razmerju 0,1 dobimo nekoliko realnejšo obliko povodja, ki je zelo široko in kratko. Pri razmerju 0,5 je oblika povodja že bolj primerljiva z naravnimi oz. realna. Vrednost razmerja

med dolžino in širino 1,0 smo izbrali zaradi enakovrednosti oz. ker sta lika kvadrat ali krog. Od razmerja 1,5 naprej se količina plavnega lesa zelo malo spreminja in počasi začne upadati (pravokotnik 1 in 2 ter elipsa 2), počasi pa narašča pri elipsi 1. Ko dolžina povodja postane veliko večja od širine, se začne količina lesa spet postopoma povečevati, le pri elipsi 1 začne upadati. Ponovna rast količine lesa je odvisna predvsem od spremembe hitrosti vode na površju in različnih razmerjih dolžine in širine.

10 ZAKLJUČEK

Zaradi povečevanja števila nepredvidljivih naravnih dogodkov, ki so mnogokrat posledica podnebnih sprememb, širjenja poselitve in gradnje infrastrukture ob vodotokih, se povečujeta tveganje in škodni potencial, ki ga še dodatno povečujeta zapadli in plavni les v vodotoku. To vpliva na pretočno sposobnost vodotoka, stabilnost brežin in dna, dvig nivelete in gladine, stabilnost mostnih opornikov, zapolnjevanje akumulacij ... Prav tako vpliva na morfološke spremembe v vodotoku. Z odlaganjem in tvorjenjem stopenj se izoblikujejo tolmini, zmanjša se povprečni naklon, poveča se širina struge, spremeni se tlorisni potek struge. A se tudi poveča stabilnost dna zaradi oblikovanja prečnih stopenj in pragov, ki stabilizirajo dno, povečajo se izgube energije vodnega toka, zato ga umirijo.

Poplave, predvsem hudourniške, so največkrat posledica naravnih danosti nekega območja in vremenskega dogajanja, ki s svojo veliko rušilno močjo, nenadnostjo in intenziteto povečujejo škodni potencial. Hudourniške poplave s seboj prinašajo velike količine sedimentov in plavnega lesa. Za zmanjševanje ogroženosti je potrebno izvajati preventivne ukrepe, ki morajo biti medsebojno usklajeni med različnimi sektorji (vodarji, gozdarji, gradbeniki, naravovarstveniki ...). Z ustrezno izbiro vrste in obsega ukrepov se zmanjša ogroženost infrastrukturnih objektov na križanjih z vodotoki, prepreči se nenadzorovano širjenje erozijskih žarišč, omili se nekontrolirano razlivanje vodotokov in tako zmanjša nevarnost. Predvsem je pomembna opredelitev ustrezne rabe prostora, ki omogoča skladno razmerje med razvojnimi in varstvenimi dejavnostmi v vplivnem zaledju vodotokov.

Preventivno celostno upravljanje s tveganji pred naravnimi nesrečami in usklajeno izvajanje preventivnih ukrepov zagotavljata ustrezno stopnjo zaščite. Ukrepi se načrtujejo v sodelovanju različnih deležnikov – od civilne zaščite, gozdarjev, vodarjev, prostorskega načrtovanja, lokalne skupnosti do posameznikov. Med deležniki mora potekati ustrezna komunikacija o vseh vrstah tveganj, ki lahko nastopijo ob poplavnem dogodku. Učinkovita preventiva je tudi ozaveščanje in opozarjanje prebivalstva o možnih posledicah in nevarnosti. Tudi posamezniki lahko zmanjšajo poplavno tveganje (umestitev deponij lesa ali skladovnic drv zunaj pribrežnih zemljišč, odlaganje obrezanega drevja na ustrezna mesta in ne v vodotok, vzpostavitev gozdnega reda ...).

Pri upravljanju problematike plavnega in zapadlega lesa je potrebno medsebojno sodelovanje vodarske in gozdne stroke, priporočljivo pa je tudi sodelovanje prostorskih odločevalcev (načrtovanje poselitve, infrastrukture). V območju križanj cestnih prometnic s hudourniki in vodotoki je potrebno sodelovanje z gradbeniki in prometniki. Skupno sodelovanje deležnikov zagotavlja učinkovito zmanjšanje škode, ki jo povzročata plavni in zapadli les. Pomembno je ustrezno upravljanje z gozdovi in vodotoki skozi daljše časovno obdobje. V Sloveniji se je zaradi pomanjkanja finančnih sredstev spregledalo nujnost ustreznega rednega vzdrževanja obvodnega prostora. Le-ta se prekomerno zarašča. Ob vse pogostejših vremenskih ujmah (žled, težek sneg, vetrolom, udari strel ...) se bo količina plavnega lesa v prihodnosti še povečevala in ogrožala prostor ob vodotokih. Zato je potrebno gozdne sestoje ohranjati čim vitalnejše. Slednje pomeni, da se odstranjuje odmrli, poškodovana in propadla ter potencialno nevarna drevesa, skrbi za njihovo nadomestitev s saditvijo primernih vrst in izvaja negovalne ukrepe. Prekomerno zarast naj se odstranjuje selektivno, saj so gole brežine izpostavljene eroziji. Vsekakor pa je potrebno ohranjati varovalno funkcijo gozda, ki ščiti infrastrukturo pred padajočim kamenjem, preprečuje nadaljnje širjenje erozijskih žarišč in zadržuje odmrli les pred premikom v strugo vodotoka.

Sprejeti morajo biti ustrezni načrtovalski ukrepi, ki zagotavljajo razvoj, obenem pa zagotavljajo ustrezno raven varnosti. Za varovanje dolvodnih območij se v povirnih delih mnogokrat gradijo ustrezne inženirsko-tehnične konstrukcije (različni tipi pregrad in lovilnih grabelj), ki zadržujejo plavni les za manjšo ogroženost dolvodnih, poseljenih območij. Po vremenskem dogodku, ki zapolni zadrževalni prostor, je potrebno pregrado čim prej sprazniti, na kar se mnogokrat pozabi. Za čas poplav pa mora biti tudi vzpostavljen ustrezen protokol odstranjevanja zaustavljenega plavnega lesa – hierarhično morajo biti določena najbolj ogrožena območja (infrastruktura, poselitev, industrijska območja, kmetijska območja ...) in mesta v vodotoku, kjer je mogoče čim bolj varno odstranjevanje plavnega lesa. Pomembno je sprotno vzdrževanje in nadgrajevanje že izvedenih ukrepov za preprečevanje oz. omilitev tveganj. Obstoječe objekte je potrebno nadgrajevati in posodablјati zaradi vse večje intenzitete ujm in posledično povečevanja obremenitev. Najbolj učinkovito varovanje je izvajanje preventivnih ukrepov.

Odstranjevanje zapadlega in plavnega lesa iz vodotokov moramo obravnavati tako z vidika varnosti kot tudi z vidika njegove ekološke funkcije. Odložen plavni les mnogokrat pozitivno vpliva tudi na stabilnost vodotokov, saj zmanjšuje hitrost vodnega toka in strižne sile, ki erodirajo dno in brežine vodotokov. Plavni les v vodotoku upočasnjuje vodni tok, povečuje odlaganje sedimentov in organskih snovi. Posledično se dviguje gladina in zmanjša naklon, kar omogoča vzpostavitev ugodnih življenjskih razmer za mnoge vodne in obvodne organizme.

Kljub zelo naprednemu modeliranju vremenskih napovedi ni mogoče natančno določiti intenzitete bodočih ekstremnih dogodkov. Zato je pri obravnavi scenarijev poplavne nevarnosti potrebno upoštevati najbolj neugodne scenarije (zamašitev mostov s plavnim lesom, morebitna porušitev mostov, porušitev varnostnih nasipov in razlitje vode). V kartah poplavne ogroženosti je tako potrebno upoštevati tudi gorvodna, povečini hudourniška območja, ki ob visokih vodah v vodotoke prinašajo velike količine sedimentov in plavnega lesa, kar znatno vpliva na poplavno varnost dolvodno. Zavedati se je potrebno, da le celovita in interdisciplinarna obravnava vodotokov od izvira dolvodno prinaša željeno stopnjo varnosti, ki se jo zagotavlja z ustreznimi ukrepi.

Večina enačb za izračun količine plavnega lesa, njegove hitrosti, dinamike transporta ..., ki so predstavljene v literaturi, je empiričnih. Razvite so bile na podlagi laboratorijskih poskusov, nato pa preizkušene na naravnih vodotokih, tako da so nekoliko dopolnjene in popravljene. Predvsem enačbe za izračun količine plavnega lesa v vodotoku in hitrosti toka pri prelivanju čez stopnje se v zadnjem času izpopolnjujejo z računalniškim modeliranjem. Zelo dobro oceno količine plavnega lesa se bo s pomočjo naprednejših tehnik, ki so v zadnjem desetletju postale dostopnejše, ugotovilo na podlagi Lidar posnetkov. Ti se bodo obnavljali po vsaki naravni nesreči, s pomočjo računalniških algoritmov pa se bo izračunalo količino plavnega lesa v vodotokih. Za analizo količine plavja so uporabni tudi videoposnetki in fotografije, ki z ustrezno obdelavo predstavljajo pomemben vir načrtovalski stroki.

VIRI

Abbe, T. B., Montgomery, D. R. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers: Research and Management* 12: 210-221.
[doi:10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199603\)12:2<33.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199603)12:2<33.0.CO;2-A)

AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft). 2013. Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat.
http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/wasser/hochwasserschutz/hochwasserschutz_zuerich.html (Pridobljeno 12. 2. 2017.)

Benda, L. E., Sias, J. C. 2003. A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris. *For. Ecol. Manag.* 172, 1: 1-16.
[doi:10.1016/S0378-1127\(01\)00576-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00576-X)

Bezzola, G. R., Sigg, H., and Lange, D. 2004. Schwemmholzrückhalt in der Schweiz = Driftwood retention works in Switzerland. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA/TRIENT. VII: 29-40.
http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2004_3_VII-29.pdf (Pridobljeno 8. 4. 2017.)

Bilby, R. E., Bisson, P. A. 1998. Functioning and distribution of large woody debris. V: R. J. Naiman (ur.), R. E. Bilby (ur.). *River Ecology and Management*. New York: Springer-Verlag: 324-346.
https://www.fs.fed.us/pnw/lwm/aem/docs/bisson/1998_bisson_function_and_distribution_of_lwd.pdf (Pridobljeno 10. 5. 2017.)

Bilby, R. E., Ward, J. W. 1989. Changes in Characteristics and Function of Woody Debris With Increasing Stream Size in Western Washington. *Transactions of the American Fisheries Society* 118: 368-378.
[doi:10.1577/1548-8659\(1989\)118<0368:CICAFO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1989)118<0368:CICAFO>2.3.CO;2)

Bilby, R. E., Ward, J. W. 1991. Characteristics and function of large woody debris in streams draining old growth, clear-cut, and second-growth forests in southwestern Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48, 12: 2499-2508.
[doi:10.1139/f91-291](https://doi.org/10.1139/f91-291)

Bisson, P. A., Bilby, R. E., Bryant, M. D., Dolloff, C. A., Grette, G. B., House, R. A., Murphy, M. L., Koski, K. V., Sedell, J. R. 1987. Large Woody Debris in Forested Streams in the Pacific Northwest: Past, Present, and Future: 143-190.
<http://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/pubs/pdf/pub1316.pdf> (Pridobljeno 20. 5. 2017.)

Bizjak, A., Šantl, S., Bašelj, A., Cunder, M., Skroza, A., Šavli, K. Upravljanje vodnih virov, proizvodnja vodne energije in ohranjanje vodnih ekosistemov v Alpah. Podlage in smernice za snovanje projektov v Območju Alp za obdobje 2014-2020. 2014. Ljubljana, Inštitut za vode Republike Slovenije: 30 str.

Bocchiola, D., Rulli, M.C., Rosso, R. 2006. Flume experiments on wood entrainment in rivers. *Advances in Water Resources* 29, 8: 1182-1195.

[doi:10.1016/j.advwatres.2005.09.006](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.09.006)

Bocchiola, D., Rulli, M. C., Rosso, R. 2008. A flume experiment on the formation of wood jams in rivers. *Water Resources Research* 44, 2: W02408.

[doi:10.1029/2006WR005846](https://doi.org/10.1029/2006WR005846)

Bradley, J.B., Richards, D.L., Bahner, C.D. 2005. Debris Control Structures. Evaluation and Countermeasures. 3. izdaja. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration Report No. FHWA-IF-04-016. Hydraulic Engineering Circular 9: str. 182.

<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/04016/hec09.pdf> (Pridobljeno 20. 5. 2017.)

Brändli, U.B., Abegg, M. 2009. Der Schweizer Wald wird immer natürlicher. *Wald und Holz* 7: 27-29.

http://www.waldwissen.net/wald/naturschutz/monitoring/wsl_lfi3_natuerlichkeit/wsl_lfi3_natuerlichkeit_originalartikel.pdf (Pridobljeno 22. 5. 2017.)

Braudrick, C. A., Grant, G.E., Ishikawa, Y., Ikeda, H. 1997. Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment. *Earth Surface, Processes and Landforms* 22, 7: 669-683.

[doi:10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199707\)22:7<669::AID-ESP740>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199707)22:7<669::AID-ESP740>3.0.CO;2-L)

Braudrick, C. A., Grant, G.E. 2000. When Do Logs Move in Rivers? *Water Resources Research* 36, 2: 571-583.

[doi:10.1029/1999WR900290](https://doi.org/10.1029/1999WR900290)

Braudrick, C. A., Grant, G.E. 2001. Transport and deposition of large woody debris in streams: A flume experiment. *Geomorphology* 41, 4: 263-283.

[doi:10.1016/S0169-555X\(01\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00058-7)

Charlton, R. 2008. Fundamentals of fluvial geomorphology. New York, Routledge: 234 str.

<http://www.univpgri-palembang.ac.id/perpus-fkip/Perpustakaan/Geography/Geografi%20Fisik/Geomorfologi%20Sungai.PDF> (Pridobljeno 2. 6. 2017.)

Church, M., Zimmermann, A. 2007. Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research* 43, W03415: 1-21.

[doi:10.1029/2006WR005037](https://doi.org/10.1029/2006WR005037)

Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E. E., Lenzi M. E. 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology* 340, 1-2: 48-62.

[doi:10.1016/j.jhydrol.2007.03.021](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.021)

Comiti, F., Lucía, A., Rickenmann, D. 2016. Large wood recruitment and transport during large floods: A review. *Geomorphology* 269: 23-39.

[doi:10.1016/j.geomorph.2016.06.016](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.016)

D'Agostino, V., Degetto, M., Righetti, M. 2000. Experimental investigation on open check dam for coarse woody debris control. Dynamics of water and sediments in mountain basins. Quaderni di Idronomia Montana 20: 201-212.

https://www.researchgate.net/publication/258568834_Experimental_investigation_on_open_check_dam_for_coarse_woody_debris_control (Pridobljeno 31. 5. 2017.)

Degetto, M., Righetti, M. 2004. Dynamic of wood transport in torrents. Project INTERPRAEVENT Conference 3. Klagenfurt, Austria. International Research Society INTERPRAEVENT: 73-81.

https://www.researchgate.net/publication/237236983_DYNAMIC_OF_WOOD_TRANSPORT_IN_TORRENTS (Pridobljeno 25. 5. 2017.)

Empfehlungen der Kommission Hochwasserschutz (KOHS). Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen.

https://www.swv.ch/Dokumente/Empfehlungen2C-Richtlinien-28Download-Ordner29/Empfehlungen-Freibord_KOHS.pdf (Pridobljeno 24. 2. 2017.)

Fajon, Š. (ur.). 2007. Gozd in voda: Rezultati projekta Interreg III A. Slovenija – Avstrija 2000-2006. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije in Zavod za gozdove Slovenije: str. 40.

Faustini, J. M., Jones, J. A. 2003. Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon. Geomorphology 51, 1-3: 187-205.

[doi:10.1016/S0169-555X\(02\)00336-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00336-7)

Fridl, J. (ur.), Kladnik, D. (ur.), Orožen Adamič (ur.), Perko D. (ur.). 1998. Geografski atlas Slovenije. Država v prostoru in času. Ljubljana, DZS: str. 74-119.

Fotoarhiv Javni zavod Triglavski narodni park (JZ TNP). Prošnja za posredovanje fotografij. Sodelavci strokovne službe JZ TNP. 1. 8. 2017. Osebna komunikacija.

Gomi, T., Sidle, R. C., Woodsmith, R. D., Bryant, M. D. 2003. Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska. Geomorphology 51, 1-3: 225-242

[doi:10.1016/S0169-555X\(02\)00338-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00338-0)

Grigillo, D., Rusjan, S., Vrečko, A., Džebo, E., Kozmus, K., Urbančič, T., Petrovič, D., Mikoš, M. 2014. Digitalni model reliefa struge hudournika Kuzlovec in matematično modeliranje toka vode. Ljubljana, ZRC SAZU, Geografski inštitut Antona Melika. GIS v Sloveniji. Digitalni prostor 12: 35-42

https://www.researchgate.net/publication/266365110_Digitalni_model_relief_a_struge_hudournika_Kuzlovec_in_matematično_modeliranje_toka_vode (Pridobljeno 9. 10. 2017.)

Haehnel, R. B., Daly, S. F. 2002. Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. Technical Report: ERDC/CRREL TR-02-2. US Army Corps of Engineers: str. 40.

<https://pdfs.semanticscholar.org/b550/544c6a513569f738228fe7a5258065b0d886.pdf> (Pridobljeno 25. 6. 2017.)

Hartlieb, A. 2015. Schwemmholz in Fließgewässern - Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. Bericht 133: Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Technische Universität München. str. 171.
<https://www.wb.bgu.tum.de/fileadmin/w00boi/www/Publikationen/Berichtshefte/Band133.pdf>
(Pridobljeno 27. 5. 2017.)

Heede, B. H. 1985. Interactions between streamside vegetation and stream dynamics. USDA Forest Service, General Technical Report RM-120: 54-58.
https://www.fs.fed.us/rm/pubs_rm/rm_gtr120/rm_gtr120_054_058.pdf (Pridobljeno 31. 5. 2017.)

Hogan, D. L., Bird, S. A., Hassan, M. A. 1998. Spatial and temporal evolution of small coastal gravel-bed streams: The influence of forest management on channel morphology and fish habitats. V: Klingeman, P. C. (ur.), Beschta, R. L. (ur.), Komar, P. D. (ur.), Bradley, J. B. (ur.). Gravel-Bed Rivers in the Environment. Highlands Ranch. Colorado. Water Resources Publications: 365-392.
<https://coast.noaa.gov/czm/pollutioncontrol/media/Technical/D48%20-%20Hogan,%20D.L.,%20S.A.%20Bird,%20and%20M.A.%20Hassan.%201998.%20Spatial%20and%20Temporal%20Evolution%20of%20Small%20Coastal%20Gravel-Bed%20Streams.pdf> (Pridobljeno 6. 6. 2017.)

Javornik, M. (ur.). Enciklopedija Slovenije. 1997. Ljubljana. Mladinska knjiga. Zvezek 11: str. 303-330.

Jesenovec, S. (ur.). 1995. Pogubna razigranost: 110 let organiziranega hudourničarstva na Slovenskem: 1884-1994. Ljubljana. Podjetje za urejanje hudournikov: str. 276.

Juvan, S. 1991. Modeliranje hidravličnih stopenj – pragov s hrptom. Gradb. vestn. 40, 1-2: 41-44.
[file:///C:/Users/Uporabnik/Downloads/1991_01-02-dfsa%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Uporabnik/Downloads/1991_01-02-dfsa%20(2).pdf) (Pridobljeno 17. 7. 2017.)

Kail, J. 2003. Influence of large woody debris on the morphology of six central European streams. Geomorphology 51, 1-3: 207-223.
[doi:10.1016/S0169-555X\(02\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00337-9)

Keller, E. A., Swanson, F. J. 1979. Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. Earth Surface Processes and Landforms 4: 361-380.
<http://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/pubs/pdf/pub565.pdf> (Pridobljeno 22. 5. 2017.)

Kienholz, H., Perret, S., Schmid, F. Dokumentacija o naravnih nesrečah/nevarnih dogodkih. Terenska navodila. Alpski signali 4. 2006. Stalni sekretariat Alpske konvencije: str. 64.

Kobold, M. 2008. Katastrofalne poplave in visoke vode 18. septembra 2007. 2008. Ujma 22: 65-75.
<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2008/065.pdf> (Pridobljeno 22. 12. 2016.)

- Kogoj, M. 2011. Hidravlične razmere zaradi plavja pri premostitvah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer. (samozaložba M. Kogoj): str. 70.
http://drugg.fgg.uni-lj.si/1802/1/GRU_3190_Kogoj.pdf (Pridobljeno 9. 9. 2017.)
- Lamprecht, T. 2016. Vpliv izbranih dejavnikov na količino in razporeditev lesenega plavja v zgornjem toku Meže. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. (samozaložba T. Lamprecht): str. 106.
http://www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/gozdarstvo/vs_lamprecht_tadej.pdf (Pridobljeno 1. 12. 2016.)
- Lange, D., Bezzola, G. R. 2006. Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze. Technischen Hochschule Zürich. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Mitteilung 188: str. 135.
<https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2000-2009/188.pdf> (Pridobljeno 24. 6. 2017.)
- Lassette, N. S., Harris, R. R. 2001. The geomorphic and ecological influence of large woody debris in streams and rivers. University of California. Department of Environmental Science, Policy and Management: str. 69.
http://frap.fire.ca.gov/publications/lwd/LWD_paper.pdf (Pridobljeno 25. 5. 2017.)
- Lisle, T. E. 1986. Stabilization of a gravel channel by large streamside obstructions and bedrock bends, Jacoby Creek, northwestern California. Geological Society of America Bulletin 97: 999-1011.
<https://www.fs.fed.us/psw/publications/lisle/LisleGSAB86.pdf> (Pridobljeno 25. 5. 2017.)
- Maxwell, A. R., Papanicolaou, A. N. 2001. Step-pool morphology in high-gradient streams. International Journal of Sediment Research 16, 3: 380-390.
<http://tpapanicolaou.engr.utk.edu/files/2013/01/step-pool.pdf> (Pridobljeno 22. 8. 2017.)
- Mikoš, M. 1995. Soodvisnost erozijskih pojavov v prostoru. Ljubljana. Gozdarski vestnik 53: 342-351.
- Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotechnica 20/32: str. 323.
ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 22. 8. 2017.)
- Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 207.
- Mikoš, M. 2009. Osnove hudourništva. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 228.
- Mlačnik, J. 2000. Lovljenje in zadrževanje plavljenega lesa na hudournikih. 11. Mišičev vodarski dan 2000: 161-168.
<http://mvd20.com/LETO2000/R24.pdf> (Pridobljeno 29. 11. 2016.)

Montgomery, D. R., Buffington, J. M., Smith, R. D., Schmidt, K. M., Pess, G. 1995. Pool Spacing In Forest Channels. *Water Resources Research* 31, 4: 1097-1105.
http://duff.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/Pool_spacing.pdf (Pridobljeno 25. 5. 2017.)

Nakamura, F., Swanson, F. J. 1993. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms* 18: 43-61.
http://geog.uoregon.edu/amarcus/geog607w09/Readings/Nakamura-Swanson1993_wood-OCR.pdf (Pridobljeno 27. 5. 2017.)

Nickolotsky, A. M. 2005. Step-pool morphology of a wilderness headwater stream of the Buffalo River, Arkansas. *MSU Graduate Theses*. Missouri State University: str. 112.
<http://bearworks.missouristate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3130&context=theses> (Pridobljeno 20. 8. 2017.)

Nitsche, M. 2012. Macro-roughness, flow resistance and sediment transport in steep mountain streams. *Doctoral Thesis*. ETH Zurich: str. 118.
[file:///C:/Users/Uporabnik/Downloads/eth-5970-02%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Uporabnik/Downloads/eth-5970-02%20(1).pdf) (Pridobljeno 7. 7. 2017.)

Papež, J. 2011. Vloga in pomen nadzora nad hudourniškiimi območji ter gospodarjenja z gozdovi na zmanjševanje škodnih učinkov lesenega plavja. 22. Mišičev vodarski dan 2011: 224-229.
<http://mvd20.com/LETO2011/R29.pdf> (Pridobljeno 29. 11. 2016.)

Piton, G., Recking, A. Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II: Woody Debris. *Journal of Hydraulic Engineering* 142, 2: 1-13.
[doi:10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001049)

Plana, I. 2016. Schwemmholz-Studie: Vom Baum bis zur Brücke = L'étude du bois flottant : de l'arbre au pont. *GeoPanorama* 3/2016: 10-15.
https://naturwissenschaften.ch/uuid/9a8a7c56-e02e-59c5-aae2-b13713d1cf64?r=20161005181841_1475651583_ffca139e-2d4c-5f7e-b234-c22619047f1f (Pridobljeno 18. 8. 2017.)

Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2016. 2017. Ljubljana, Zavod za gozdove Republike Slovenije: str. 128.
http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/PDF/LETNA_POROCILA/2016_Porocilo_o_gozdovih.pdf (Pridobljeno 17. 10. 2017.)

Příbyla, Z., Galia, T., Hradecký, J. 2016. Biogeomorphological effects of leaf accumulations in stepped-bed channels: Exploratory study, Moravskoslezské Beskydy Mountains, Czech Republic. *Moravian Geographical Reports* 2016, 24(3):13-23.
[doi:10.1515/mgr-2016-0013](https://doi.org/10.1515/mgr-2016-0013)

Rickenmann, D. 1997. Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser, Energie, luft – Eau, Energie, Air* 89. 5/6: 115-120.
http://www.wsl.ch/fe/walddynamik/projekte/schwemmholzablagerungen/Rickenmann1997_Schwemmholz (Pridobljeno 23. 5. 2017.)

- Rickli, C. 2009. Schwemmholz in Wildbächen. Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN). Herbstkurs 2009: 1-16.
http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/schwemmholzvorkommen/sh_fan2009.pdf (Pridobljeno 29. 12. 2016.)
- Rickli, C., Bucher, H.U. 2006. Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Eidg. Forschungsanstalt WSL: str. 94.
http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/schwemmholzvorkommen/rickli_shber_261007.pdf (Pridobljeno 29. 5. 2017.)
- Rimböck, A. 2004. Design of rope net barriers for woody debris entrapment: Introduction of a design concept. Project. INTERPRAEVENT Conference VII. Klagenfurt, Austria. International Research Society INTERPRAEVENT. Internationales Symposium Interraevent 2004 – Riva/Trient. VII: 265-276.
http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2004_3_VII-265.pdf (Pridobljeno 30. 5. 2017.)
- Robič, F., Horvat, A. 1986. Hudournišтво na Slovenskem. Ljubljana. Podjetje za urejanje hudournikov in Območne vodne skupnosti Drave, Gorenjske, Ljubljanice-Save, Primorske, Savinje-Sotle in Soče: str. 37.
- Rudolf-Miklau, F., Hübl, J. 2010. Managing Risks Related to Drift wood (Woody Debris). Proceedings of the International Conference Interprävent: 868-878.
http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2010_868.pdf (Pridobljeno 30. 5. 2017.)
- Ruiz-Villanueva, V., Badoux, A., Boes, R., Rickenmann, D., Rickli, C., Schalko, I., Schmocker, L., Schwarz, M., Steeb, N., Stoffel, M., Weitbrecht, V. 2016. Large wood research in Swiss watercourses. River flow 2016: proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2016), St. Louis, USA, 11.-14. julij 2016. River Flow 2016: 2307- 2314.
[doi:10.1201/9781315644479-358](https://doi.org/10.1201/9781315644479-358)
- Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M. 2017. Frederick J. Swanson's 1976-1979 papers on the effects of instream wood on fluvial processes and instream wood management. Progress in Physical Geography 41, 1: 124-133.
[doi:10.1177/0309133317692411](https://doi.org/10.1177/0309133317692411)
- Schmocker L., Weitbrecht V. 2013. Driftwood: Risk analysis and engineering measures. Journal of Hydraulic Engineering 139, 7: 683-695.
[doi:10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000728](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000728)

Schmocker, L., Boes, R., Bühlmann, M., Hochstrasser, H., Kolly, J., Lauber, G., Monney-Ueberl, J., Pfister, M., Radogna, R., Stucki, A. 2016. Schwemmholz an Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft 134: 263-274.
https://www.freunde.wb.bgu.tum.de/fileadmin/w00bol/www/Symposium_2016/Beitraege_Wallgau2016/27_-_Schmocker.pdf (Pridobljeno 9. 1. 2017.)

Smith, R. D., R. C. Sidle, P. E. Porter, and J. R. Noel. 1993. Effects of experimental removal of woody debris on the channel morphology of a forest, gravel-bed stream. Journal of Hydrology 152: 153-178.
[doi:10.1016/0022-1694\(93\)90144-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90144-X)

Sobota D. J., Gregory S. V., Van Sickle J. 2006. Riparian tree fall directionality and modeling large wood recruitment to streams. Canadian Journal Forest Research 36(5): 1243–1254.
doi.org/10.1139/x06-022

Tyler, R. N. 2011. River Debris: Causes, Impacts and Mitigation Techniques. Ocean Renewable Power Company. Alaska Center for Energy and Power: str. 33.
<http://acep.uaf.edu/media/53260/Final-Report-Attachment-A.pdf> (Pridobljeno 9. 6. 2017.)

Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., and Ishikawa, Y. 1996. Design methods for wood-debris entrapment = Entwürfe von Auffangstrukturen für Treibholz. Interpraevent International Symposium Garmisch-Partenkirchen. Austria. Interpraevent International Symposium 5: 279–288.
http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/1996_5_279.pdf (Pridobljeno 28. 5. 2017.)

Vosoughifar H. R., Dolatshah, A., Shokouhi, S. K. S., Nezhad, S. R. H. Evaluation of Fluid Flow over Stepped Spillways Using the Finite Volume Method as a Novel Approach = Vrednotenje toka fluida čez stopničasti preliv z novim pristopom po metodi končnih volumnov. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 59, 5: 301-310.
[doi:10.5545/sv-jme.2012.669](https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.669)

Ward, G. M., Aumen, N. G. 1986. Woody debris as a source of fine particulate organic matter in coniferous forest stream ecosystems. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 43: 1635-1642.
[doi:10.1139/f86-202](https://doi.org/10.1139/f86-202)

Wilcox, A. C., Wohl, E., Comiti, F., Mao, L. 2011. Hydraulics, Morphology, and Energy Dissipation in an Alpine Step-pool Channel. Water Resources Research 47, W07514: 1-17.
[doi:10.1029/2010WR010192](https://doi.org/10.1029/2010WR010192)

Wohl, E. 2000. Mountain Rivers. Washington. American Geophysical Union: str. 320.

Wohl, E., Bledsoe, B. P., Fausch, K. D., Kramer, N., Bestgen, K. R., Gooseff, M. N. 2016. Management of Large Wood in Streams. An Overview and Proposed Framework for Hazard Evaluation. Journal of the American Water Resources Association 52: 1752-1688.
[DOI: 10.1111/1752-1688.12388](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12388)

Zollinger, F. 1983. Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz. Doktor Dissertation . Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Nr. 7419: str. 265.
<file:///C:/Users/Uporabnik/Downloads/eth-36357-02.pdf> (Pridobljeno 20. 6. 2017.)

Spletne strani

Spletna stran podjetja Dywidag-Systems International. 2017.
<https://www.dywidag.co.uk/projects/project-details/article/driftwood-cable-barrier-brunswick-italy.html> (Pridobljeno 21. 6. 2017.)

Spletna stran Društva vodarjev. 2004. http://www.drustvo-vodarjev.si/SLIKE/02_NOVICE/05N_01.jpg (Pridobljeno 15. 6. 2017.)

Spletna stran podjetja Geobrugg. 2017.
https://www.geobrugg.com/index.php?suche_ausdruck=driftwood&56_suche_form_suche=1&seite=search_en&navigation=0&kanal=html&system_id=0&com=formular_suche&suche_seite=product_en (Pridobljeno 15. 6. 2017.)

Spletna stran Ministrstva za okolje in prostor (MOP, 2015):
http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/nuv_donava_jadran_2015/1_hidrografska_mreza_porecja_in_povodji.jpg (Pridobljeno 24. 5. 2017.)

Spletna stran Ministrstva za okolje in prostor (MOP, 2010):
http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/nuv_donava_jadran_2015/55_erozijska_obmocja_opozorilna_karta_erozije.jpg (Pridobljeno 24. 5. 2017.)

Spletna stran 24 ur.com:
<http://www.24ur.com/novice/slovenija/prihaja-nov-val-neurij.html> (Pridobljeno 9. 9. 2017.)

Spletna stran projekta SedAlp:
Lenzi, M., Picco, L., Bettella, F. 2015. Sediment Management in alpine basins: integrating sediment continuum, risk mitigation and hydropower (SedAlp). Sediment management (including LW). WP 7: str. 51.
http://www.sedalp.eu/download/dwd/events/11_SedAlp_WP7.pdf (Pridobljeno 6. 6. 2017.)

Spletna stran projekta DraMurCi:
Steinman, F., Müller, M., Novak, G., Rak, G., Kozelj, D., Šantl, S., Prešeren, T. 2012. Katalog poplavnih scenarijev za izlivno območje Meže. UL FGG, VGI, Evropsko teritorialno sodelovanje SI-AT, Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo: str. 39.
http://www.dramurci.eu/dokumenti/25/2/2012/Katalog_poplavnih_scenarijev_porocilo_V3_10_14.pdf (Pridobljeno 8. 9. 2017.)

Spletna stran Zavoda za gozdove Slovenije (ZGS, 2011):
http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/CE/gozdovi_SLO/Karte/Gozdnatost_KO.jpg (Pridobljeno 6. 3. 2017.)

Zakonodaja in predpisi

Direktiva o obvladovanju poplavne ogroženosti.

http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/direktiva_poplavna_ogrozenost.pdf (Pridobljeno 9. 9. 2017.)

Pravilniku o izvajanju sečnje, ravnanju s sečnimi ostanki, spravilu in zlaganju gozdnih lesnih sortimentov (Uradni list RS št. 55/94, 95/04, 110/08, 83/13).

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV2997> (Pridobljeno 29. 11. 2016.)

Pravilnika o vrstah in obsegu nalog obveznih državnih gospodarskih javnih služb urejanja voda (Uradni list RS št. 57/06, 60/16).

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV6505> (Pridobljeno 29. 11. 2016.)

Zakon o gozdovih (Uradni list RS št. 30/93, 67/02, 107/07, 106/10, 63/13, 17/14, 24/14, 77/16).

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO270> (Pridobljeno 29. 11. 2016.)

Zakon o vodah (Uradni list RS št. 67/02).

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1244> (Pridobljeno 12. 12. 2016.)

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGE

Priloga A: Kritični časi stekanja padavinskega odтока

Priloga B: Hidrogrami odтока

Priloga C: Količina zapadlega lesa v hudourniškem območju

Priloga D: Delež odplavljenega lesa

Priloga E: Primerjava možne količine plavnega lesa in naravnega prirastka

Priloga A: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka

V naslednjih preglednicah so podani rezultati kritičnih časov stekanja padavinskega odtoka, izračunanega pri različnih hitrostih vode v hudourniku in na površini ter za tri velikosti in dve obliki hudourniškega območja.

Preglednica A.1: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,44	2,24	1,51	1,14	14,03	7,08	4,77	3,61	44,36	22,40	15,08	11,42	0,1
	2,06	1,08	0,75	0,59	6,52	3,42	2,38	1,86	20,62	10,80	7,53	5,89	0,5
	1,53	0,83	0,60	0,49	4,83	2,64	1,90	1,54	15,28	8,33	6,02	4,86	1,0
	1,30	0,74	0,55	0,45	4,12	2,33	1,73	1,43	13,04	7,37	5,48	4,54	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Pravokotnik 2													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,41	2,22	1,49	1,12	13,96	7,01	4,70	3,54	44,14	22,18	14,86	11,20	0,1
	2,01	1,03	0,70	0,54	6,37	3,26	2,23	1,71	20,13	10,31	7,04	5,40	0,5
	1,46	0,76	0,53	0,42	4,61	2,42	1,68	1,32	14,58	7,64	5,32	4,17	1,0
	1,22	0,65	0,46	0,37	3,86	2,06	1,46	1,17	12,19	6,52	4,63	3,69	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Elipsa 1													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	0,36	0,20	0,14	0,12	1,15	0,63	0,45	0,37	3,63	1,98	1,43	1,16	0,1
	0,81	0,44	0,32	0,26	2,57	1,40	1,01	0,82	8,13	4,43	3,20	2,59	0,5
	1,15	0,63	0,45	0,37	3,63	1,98	1,43	1,16	11,49	6,27	4,53	3,66	1,0
	1,41	0,77	0,55	0,45	4,45	2,43	1,75	1,42	14,08	7,68	5,54	4,48	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Elipsa 2													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,97	2,49	1,67	1,26	15,72	7,89	5,28	3,97	49,72	24,94	16,68	12,55	0,1
	2,25	1,15	0,78	0,59	7,13	3,62	2,45	1,87	22,53	11,45	7,76	5,91	0,5
	1,62	0,84	0,57	0,44	5,12	2,64	1,82	1,40	16,19	8,36	5,75	4,44	1,0
	1,34	0,70	0,49	0,38	4,25	2,23	1,55	1,21	13,44	7,04	4,91	3,84	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica A.2: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,42	2,23	1,49	1,13	13,98	7,04	4,72	3,56	44,21	22,25	14,93	11,27	0,1
	2,03	1,05	0,72	0,56	6,42	3,31	2,28	1,76	20,30	10,48	7,20	5,57	0,5
	1,48	0,79	0,56	0,44	4,68	2,49	1,76	1,39	14,81	7,87	5,56	4,40	1,0
	1,25	0,68	0,49	0,40	3,94	2,15	1,55	1,26	12,47	6,80	4,91	3,97	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Pravokotnik 2													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,41	2,21	1,48	1,11	13,94	6,99	4,68	3,52	44,07	22,11	14,79	11,13	0,1
	2,00	1,01	0,69	0,52	6,31	3,21	2,17	1,66	19,97	10,15	6,87	5,24	0,5
	1,44	0,74	0,51	0,39	4,54	2,34	1,61	1,24	14,35	7,41	5,09	3,94	1,0
	1,19	0,62	0,43	0,34	3,77	1,97	1,37	1,08	11,91	6,24	4,35	3,40	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Elipsa 1													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	0,35	0,19	0,13	0,10	1,11	0,59	0,42	0,33	3,52	1,87	1,32	1,05	0,1
	0,79	0,42	0,30	0,23	2,49	1,32	0,93	0,74	7,88	4,19	2,96	2,34	0,5
	1,11	0,59	0,42	0,33	3,52	1,87	1,32	1,05	11,14	5,92	4,18	3,31	1,0
	1,36	0,73	0,51	0,41	4,32	2,29	1,62	1,28	13,65	7,25	5,12	4,05	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Elipsa 2													
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,97	2,49	1,67	1,26	15,72	7,89	5,28	3,97	49,72	24,94	16,69	12,56	0,1
	2,25	1,15	0,78	0,59	7,13	3,62	2,45	1,87	22,53	11,45	7,76	5,91	0,5
	1,62	0,84	0,57	0,44	5,12	2,64	1,82	1,40	16,19	8,36	5,75	4,44	1,0
	1,34	0,70	0,49	0,38	4,25	2,23	1,55	1,21	13,44	7,04	4,91	3,84	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica A.3: Kritični časi stekanja padavinskega odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,41	2,22	1,49	1,12	13,96	7,01	4,70	3,54	44,14	22,18	14,86	11,20	0,1
	2,01	1,03	0,70	0,54	6,37	3,26	2,23	1,71	20,13	10,31	7,04	5,40	0,5
	1,46	0,76	0,53	0,42	4,61	2,42	1,68	1,32	14,58	7,64	5,32	4,17	1,0
	1,22	0,65	0,46	0,37	3,86	2,06	1,46	1,17	12,19	6,52	4,63	3,69	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,40	2,21	1,47	1,11	13,92	6,98	4,66	3,51	44,03	22,07	14,75	11,09	0,1
	1,99	1,01	0,68	0,52	6,29	3,18	2,15	1,63	19,89	10,07	6,79	5,16	0,5
	1,42	0,73	0,50	0,38	4,50	2,31	1,57	1,21	14,24	7,29	4,98	3,82	1,0
	1,18	0,61	0,42	0,33	3,72	1,93	1,33	1,03	11,77	6,10	4,21	3,26	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

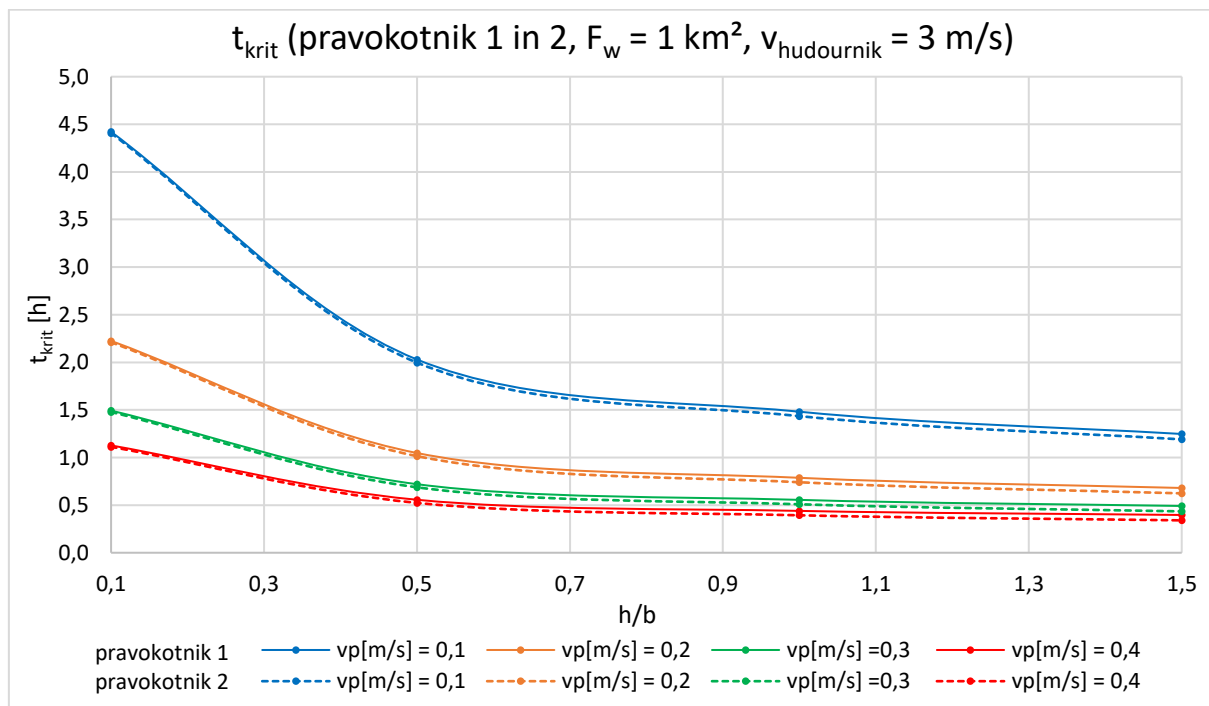
Elipsa 1

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	0,35	0,18	0,13	0,10	1,10	0,57	0,40	0,31	3,47	1,82	1,27	0,99	0,1
	0,78	0,41	0,28	0,22	2,45	1,28	0,90	0,70	7,76	4,06	2,83	2,22	0,5
	1,10	0,57	0,40	0,31	3,47	1,82	1,27	0,99	10,97	5,75	4,01	3,13	1,0
	1,34	0,70	0,49	0,38	4,25	2,23	1,55	1,21	13,44	7,04	4,91	3,84	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

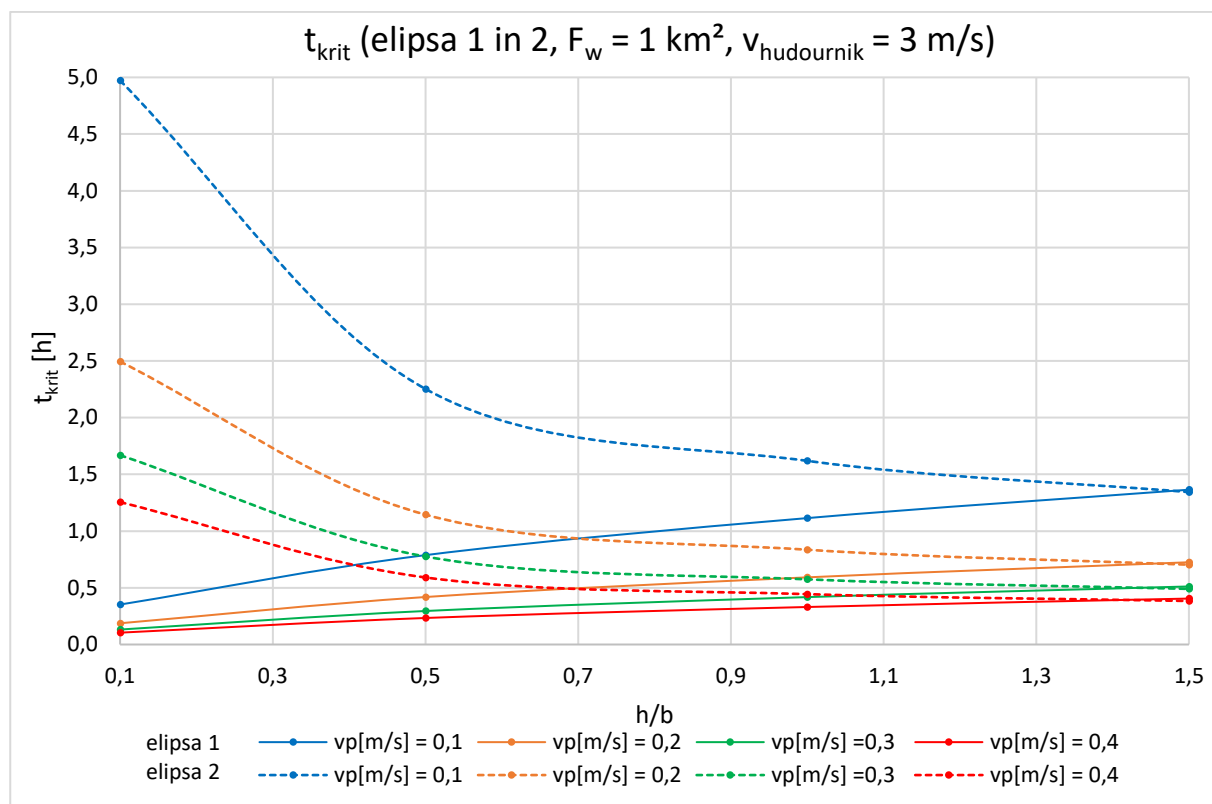
Elipsa 2

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$t_{\text{krit}} \text{ [h]}$	4,97	2,49	1,66	1,25	15,71	7,88	5,26	3,96	49,68	24,90	16,64	12,51	0,1
	2,24	1,14	0,77	0,58	7,10	3,59	2,42	1,84	22,44	11,36	7,66	5,82	0,5
	1,61	0,82	0,56	0,43	5,08	2,60	1,78	1,36	16,06	8,23	5,62	4,31	1,0
	1,33	0,69	0,47	0,37	4,20	2,17	1,50	1,16	13,28	6,88	4,75	3,68	1,5
$V_{\text{površinska}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Iz računov kritičnega časa v zgornjih preglednicah opazimo, da kritični čas s povečevanjem hitrosti vode na površju začne upadati. Hitrost vode v strugi ima zanemarljiv vpliv pri računanju kritičnega časa.



Slika A.1: Kritični čas za območje v obliki pravokotnika.



Slika A.2: Kritični čas za območje v obliki elipse.

Največje vrednosti kritičen čas doseže pri obeh oblikah povodja in obeh načinih stekanja vode za oba pravokotnika in elipso 2 pri razmerju dolžine in širine 0,1. Pri razmerju dolžine in širine 0,5 so časi že približno 2-krat krajši. Ko je oblika povodja kvadratne ali okrogle oblike (razmerje $h/b = 0,5$), je čas približno 3-krat krajši od časov pri razmerju 0,1. Od vrednosti razmerja $h/b = 1,5$ dalje se izračunane vrednosti kritičnega časa počasi ustalijo, izračunani čas pa je manjši od zgornjega razmerja $h/b = 1,5$. Pri elipsi 1 se zaradi drugačnega načina stekanja vode kritični časi z večanjem razmerja med dolžino in širino povečujejo. Kritični časi za povodje s površino 100 km^2 so za približno 10-krat daljši od kritičnih časov s površino 1 km^2 . Kritični časi pri povodju elipsaste oblike (elipsa 2) so daljši, kot pri povodju pravokotne oblike.

Priloga B: Hidrogrami odtoka

V spodnjih preglednicah so podani rezultati hidrogramov odtokov, izračunanih pri različnih hitrostih vode v hudourniku in na površini ter za tri velikosti in dve obliki hudourniškega območja.

Preglednica B.1: Hidrogram odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	191.634	96.766	65.143	49.332	3.407.788	1.720.764	1.158.423	877.252	60.600.000	30.600.000	20.600.000	15.600.000	0,1
	89.095	46.669	32.527	25.456	1.584.366	829.906	578.419	452.676	28.174.457	14.758.049	10.285.913	8.049.845	0,5
	66.000	36.000	26.000	21.000	1.173.664	640.181	462.353	373.439	20.871.033	11.384.200	8.221.922	6.640.783	1,0
	56.338	31.843	23.678	19.596	1.001.852	566.264	421.068	348.470	17.815.723	10.069.757	7.487.768	6.196.773	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	190.685	95.817	64.194	48.383	3.390.918	1.703.894	1.141.553	860.382	60.300.000	30.300.000	20.300.000	15.300.000	0,1
	86.974	44.548	30.406	23.335	1.546.643	792.183	540.696	414.953	27.503.636	14.087.228	9.615.092	7.379.024	0,5
	63.000	33.000	23.000	18.000	1.120.316	586.832	409.004	320.090	19.922.349	10.435.516	7.273.239	5.692.100	1,0
	52.664	28.169	20.004	15.922	936.514	500.926	355.730	283.132	16.653.828	8.907.862	6.325.873	5.034.878	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	15.700	8.564	6.185	4.996	279.195	152.288	109.986	88.835	4.964.868	2.708.110	1.955.857	1.579.731	0,1
	35.107	19.149	13.830	11.170	624.299	340.527	245.936	198.641	11.101.783	6.055.518	4.373.430	3.532.386	0,5
	49.649	27.081	19.559	15.797	882.892	481.578	347.806	280.920	15.700.292	8.563.796	6.184.964	4.995.548	1,0
	60.807	33.167	23.954	19.348	1.081.318	589.810	425.974	344.056	19.228.852	10.488.465	7.575.002	6.118.271	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	215.165	108.118	72.435	54.594	3.826.241	1.922.639	1.288.104	970.837	68.041.264	34.189.889	22.906.097	17.264.201	0,1
	98.140	50.267	34.309	26.330	1.745.200	893.883	610.111	468.224	31.034.530	15.895.735	10.849.470	8.326.337	0,5
	71.088	37.237	25.953	20.311	1.264.141	662.169	461.512	361.183	22.479.964	11.775.219	8.206.971	6.422.847	1,0
	59.425	31.785	22.572	17.966	1.056.742	565.234	401.398	319.480	18.791.833	10.051.446	7.137.983	5.681.252	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica B.2: Hidrogram odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	191.002	96.133	64.510	48.699	3.396.542	1.709.518	1.147.176	866.006	60.400.000	30.400.000	20.400.000	15.400.000	0,1
	87.681	45.255	31.113	24.042	1.559.217	804.757	553.271	427.527	27.727.243	14.310.835	9.838.699	7.602.631	0,5
	64.000	34.000	24.000	19.000	1.138.099	604.615	426.787	337.873	20.238.577	10.751.744	7.589.466	6.008.328	1,0
	53.889	29.394	21.229	17.146	958.293	522.705	377.509	304.911	17.041.127	9.295.160	6.713.171	5.422.177	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	190.369	95.501	63.878	48.067	3.385.295	1.698.271	1.135.929	854.759	60.200.000	30.200.000	20.200.000	15.200.000	0,1
	86.267	43.841	29.698	22.627	1.534.069	779.609	528.122	402.379	27.280.029	13.863.621	9.391.486	7.155.418	0,5
	62.000	32.000	22.000	17.000	1.102.533	569.049	391.221	302.307	19.606.121	10.119.289	6.957.011	5.375.872	1,0
	51.439	26.944	18.779	14.697	914.734	479.146	333.951	261.353	16.266.530	8.520.563	5.938.574	4.647.580	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	15.225	8.088	5.709	4.520	270.735	143.828	101.525	80.374	4.814.418	2.557.659	1.805.407	1.429.280	0,1
	34.043	18.085	12.766	10.107	605.381	321.609	227.018	179.722	10.765.365	5.719.100	4.037.012	3.195.968	0,5
	48.144	25.577	18.054	14.293	856.138	454.823	321.052	254.166	15.224.526	8.088.029	5.709.197	4.519.781	1,0
	58.964	31.325	22.112	17.505	1.048.551	557.043	393.206	311.288	18.646.160	9.905.772	6.992.310	5.535.579	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

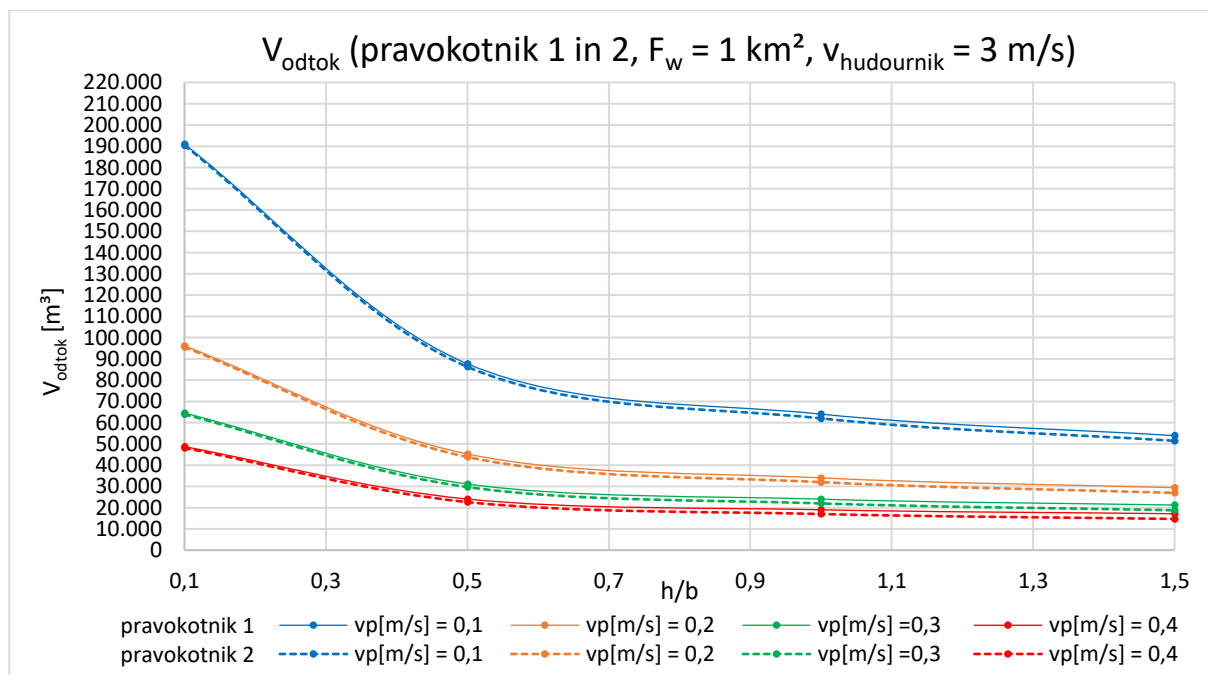
Elipsa 2

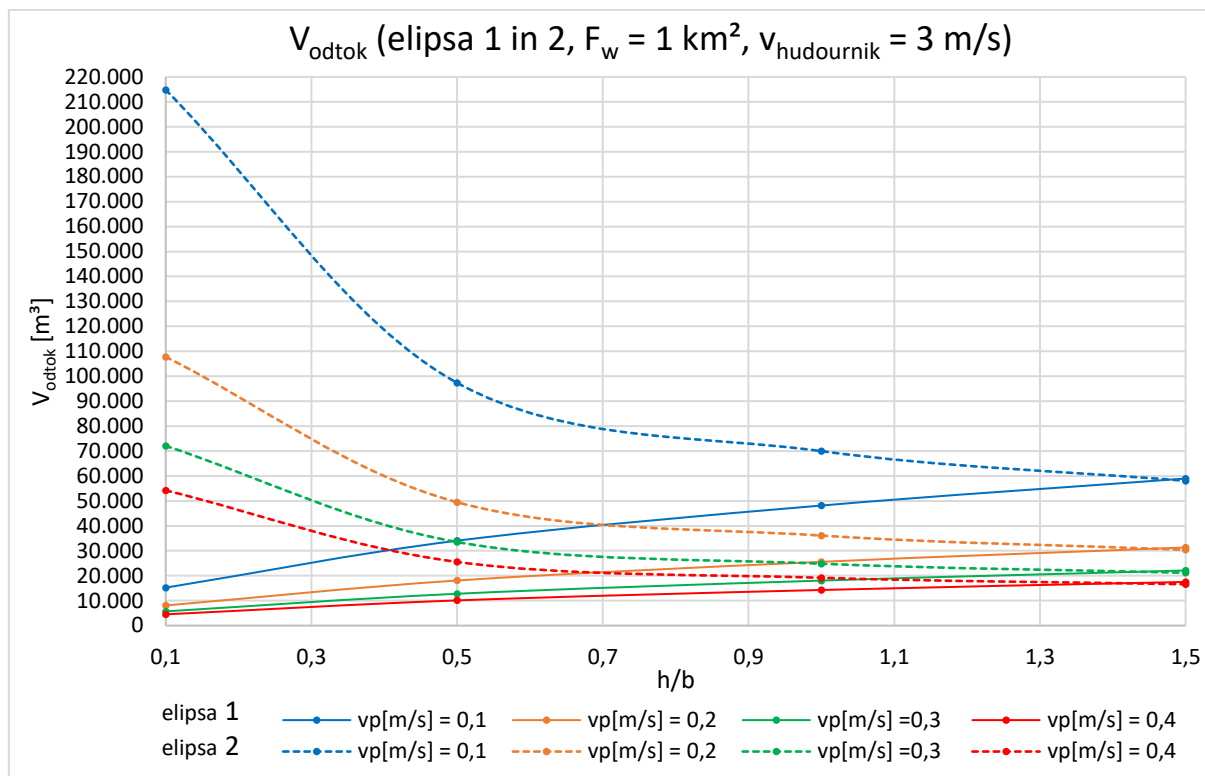
F_w [km ²]	1				10				100				
V_{odtok} [m ³]	214.809	107.761	72.079	54.237	3.819.896	1.916.293	1.281.759	964.492	67.928.426	34.077.051	22.793.259	17.151.363	0,1
	97.342	49.469	33.511	25.532	1.731.011	879.694	595.922	454.036	30.782.217	15.643.422	10.597.157	8.074.024	0,5
	69.960	36.108	24.824	19.182	1.244.076	642.104	441.446	341.117	22.123.139	11.418.394	7.850.146	6.066.022	1,0
	58.043	30.403	21.190	16.584	1.032.167	540.659	376.823	294.905	18.354.814	9.614.426	6.700.964	5.244.232	1,5
$V_{\text{površinska}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica B.3: Hidrogram odtoka ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{odtok}} [\text{m}^3]$	190.685	95.817	64.194	48.383	3.390.918	1.703.894	1.141.553	860.382	60.300.000	30.300.000	20.300.000	15.300.000	0,1
	86.974	44.548	30.406	23.335	1.546.643	792.183	540.696	414.953	27.503.636	14.087.228	9.615.092	7.379.024	0,5
	63.000	33.000	23.000	18.000	1.120.316	586.832	409.004	320.090	19.922.349	10.435.516	7.273.239	5.692.100	1,0
	52.664	28.169	20.004	15.922	936.514	500.926	355.730	283.132	16.653.828	8.907.862	6.325.873	5.034.878	1,5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Pravokotnik 2													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{odtok}} [\text{m}^3]$	190.211	95.343	63.720	47.909	3.382.483	1.695.459	1.133.118	851.947	60.150.000	30.150.000	20.150.000	15.150.000	0,1
	85.913	43.487	29.345	22.274	1.527.782	773.322	521.835	396.092	27.168.226	13.751.818	9.279.682	7.043.614	0,5
	61.500	31.500	21.500	16.500	1.093.642	560.158	382.330	293.416	19.448.008	9.961.175	6.798.897	5.217.758	1,0
	50.827	26.332	18.167	14.085	903.845	468.257	323.061	250.463	16.072.881	8.326.914	5.744.925	4.453.931	1,5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Elipsa 1													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{odtok}} [\text{m}^3]$	14.987	7.850	5.471	4.282	266.504	139.598	97.295	76.144	4.739.193	2.482.434	1.730.181	1.354.055	0,1
	33.511	17.553	12.234	9.575	595.922	312.150	217.559	170.263	10.597.157	5.550.892	3.868.803	3.027.759	0,5
	47.392	24.824	17.302	13.541	842.761	441.446	307.675	240.789	14.986.643	7.850.146	5.471.314	4.281.898	1,0
	58.043	30.403	21.190	16.584	1.032.167	540.659	376.823	294.905	18.354.814	9.614.426	6.700.964	5.244.232	1,5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b
Elipsa 2													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{odtok}} [\text{m}^3]$	214.630	107.583	71.900	54.059	3.816.723	1.913.121	1.278.586	961.319	67.872.007	34.020.632	22.736.840	17.094.944	0,1
	96.943	49.070	33.112	25.133	1.723.917	872.600	588.828	446.941	30.656.060	15.517.265	10.471.000	7.947.867	0,5
	69.395	35.544	24.260	18.618	1.234.043	632.071	431.413	331.085	21.944.727	11.239.982	7.671.734	5.887.610	1,0
	57.352	29.712	20.499	15.893	1.019.879	528.371	364.535	282.617	18.136.304	9.395.917	6.482.454	5.025.723	1,5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Največje vrednosti odtoka so dosežene pri obeh oblikah povodja in obeh načinih stekanja vode pri razmerju dolžine in širine $h/b = 0,1$. Pri razmerju dolžine in širine $h/b = 0,5$ so zaradi odvisnosti od kritičnega časa odtoki že približno 2-krat manjši. Ko je oblika povodja kvadratne ali okrogle oblike (razmerje $h/b = 1,0$), je odtok okoli 3-krat manjši od časov pri najmanjšem razmerju $h/b = 0,1$. Pri vrednosti razmerja $h/b = 1,5$ se odtok sčasoma ustali.

**Slika B.1:** Hidrogram odtoka za območje v obliki pravokotnika.



Slika B.2: Hidrogram odtoka za območje v obliki elipse.

Priloga C: Količina zapadlega lesa v hudourniškem območju

V spodnjih preglednicah so podani rezultati količine lesnega plavja, izračunane pri različnih hitrostih vode v hudourniku in na površini ter za tri velikosti in dve obliki hudourniškega območja.

Preglednica C.1: Količina zapadlega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	518,86	394,77	336,98	301,52	1640,78	1248,39	1065,63	953,48	5188,59	3947,74	3369,82	3015,16	0,1
	381,95	294,90	255,24	231,41	1207,82	932,55	807,16	731,77	3819,46	2948,98	2552,45	2314,06	0,5
	338,75	265,82	233,37	214,26	1071,22	840,58	737,99	677,56	3387,49	2658,16	2333,72	2142,63	1,0
	317,97	253,09	224,80	208,41	1005,50	800,33	710,89	659,06	3179,67	2530,86	2248,02	2084,14	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	517,83	393,22	335,01	299,18	1637,52	1243,47	1059,40	946,10	5178,30	3932,21	3350,10	2991,83	0,1
	378,28	289,46	248,45	223,49	1196,23	915,36	785,67	706,74	3782,82	2894,61	2484,51	2234,91	0,5
	332,50	256,72	222,20	201,45	1051,47	811,83	702,67	637,04	3325,03	2567,23	2222,04	2014,51	1,0
	309,50	240,97	210,14	191,80	978,74	762,03	664,52	606,53	3095,04	2409,74	2101,40	1918,03	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	190,73	149,67	131,40	120,64	603,15	473,29	415,52	381,50	1907,32	1496,67	1314,00	1206,41	0,1
	263,16	206,50	181,30	166,45	832,18	653,01	573,31	526,37	2631,58	2065,00	1812,96	1664,51	0,5
	302,29	237,21	208,25	191,20	955,92	750,11	658,56	604,63	3022,90	2372,06	2082,55	1912,02	1,0
	327,82	257,24	225,85	207,35	1036,67	813,48	714,19	655,71	3278,24	2572,44	2258,46	2073,54	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	543,46	412,69	351,59	313,99	1718,58	1305,03	1111,84	992,93	5434,62	4126,85	3515,93	3139,92	0,1
	397,01	303,79	260,75	234,55	1255,45	960,67	824,56	741,72	3970,07	3037,89	2607,49	2345,53	0,5
	348,96	269,43	233,20	211,42	1103,51	852,02	737,45	668,58	3489,62	2694,31	2332,02	2114,22	1,0
	324,82	252,90	220,54	201,30	1027,18	799,74	697,41	636,56	3248,24	2529,01	2205,41	2012,97	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica C.2: Količina zapadlega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	518,17	393,74	335,67	299,96	1638,61	1245,11	1061,48	948,57	5181,73	3937,40	3356,70	2999,63	0,1
	379,51	291,29	250,75	226,18	1200,11	921,14	792,93	715,23	3795,10	2912,90	2507,47	2261,75	0,5
	334,60	259,81	226,02	205,86	1058,11	821,58	714,73	650,97	3346,05	2598,07	2260,19	2058,55	1,0
	312,36	245,11	215,19	197,57	987,78	775,11	680,50	624,78	3123,63	2451,11	2151,94	1975,74	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	517,49	392,70	334,35	298,40	1636,43	1241,83	1057,31	943,62	5174,86	3927,02	3343,49	2983,99	0,1
	377,05	287,61	246,12	220,76	1192,33	909,52	778,31	698,09	3770,49	2876,14	2461,24	2207,57	0,5
	330,38	253,58	218,29	196,90	1044,76	801,90	690,29	622,64	3303,82	2535,83	2182,88	1968,97	1,0
	306,60	236,73	204,90	185,76	969,57	748,60	647,94	587,42	3066,04	2367,27	2048,96	1857,59	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	188,40	146,28	127,26	115,91	595,77	462,59	402,43	366,53	1883,99	1462,84	1272,59	1159,06	0,1
	259,94	201,83	175,58	159,92	822,00	638,25	555,24	505,71	2599,39	2018,32	1755,84	1599,19	0,5
	298,59	231,84	201,69	183,70	944,23	733,16	637,81	580,91	2985,92	2318,45	2016,93	1836,99	1,0
	323,81	251,43	218,73	199,22	1023,99	795,09	691,68	629,98	3238,14	2514,29	2187,30	1992,16	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V_{les} [m ³]	543,10	412,14	350,90	313,17	1717,44	1303,30	1109,64	990,33	5431,01	4121,40	3508,99	3131,69	0,1
	395,71	301,85	258,31	231,68	1251,35	954,54	816,84	732,65	3957,13	3018,51	2583,07	2316,84	0,5
	346,74	266,14	229,09	206,64	1096,47	841,59	724,45	653,46	3467,36	2661,35	2290,93	2066,43	1,0
	321,78	248,44	215,04	194,95	1017,56	785,65	680,01	616,50	3217,81	2484,44	2150,38	1949,54	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica C.3: Količina zapadlega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V_{\text{les}} \text{ [m}^3\text{]}$	517,83	393,22	335,01	299,18	1637,52	1243,47	1059,40	946,10	5178,30	3932,21	3350,10	2991,83	0,1
	378,28	289,46	248,45	223,49	1196,23	915,36	785,67	706,74	3782,82	2894,61	2484,51	2234,91	0,5
	332,50	256,72	222,20	201,45	1051,47	811,83	702,67	637,04	3325,03	2567,23	2222,04	2014,51	1,0
	309,50	240,97	210,14	191,80	978,74	762,03	664,52	606,53	3095,04	2409,74	2101,40	1918,03	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V_{\text{les}} \text{ [m}^3\text{]}$	517,31	392,44	334,02	298,01	1635,89	1241,01	1056,26	942,38	5173,14	3924,41	3340,18	2980,06	0,1
	376,43	286,68	244,95	219,37	1190,38	906,58	774,59	693,71	3764,30	2866,84	2449,48	2193,70	0,5
	329,31	251,99	216,29	194,56	1041,38	796,86	683,97	615,25	3293,14	2519,91	2162,89	1945,60	1,0
	305,14	234,56	202,20	182,62	964,93	741,74	639,40	577,51	3051,39	2345,60	2021,97	1826,24	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V_{\text{les}} \text{ [m}^3\text{]}$	187,22	144,55	125,11	113,43	592,03	457,10	395,64	358,69	1872,15	1445,48	1251,11	1134,26	0,1
	258,31	199,44	172,62	156,50	816,84	630,67	545,87	494,89	2583,07	1994,37	1726,20	1564,98	0,5
	296,72	229,09	198,29	179,77	938,30	724,45	627,04	568,48	2967,17	2290,93	1982,88	1797,69	1,0
	321,78	248,44	215,04	194,95	1017,56	785,65	680,01	616,50	3217,81	2484,44	2150,38	1949,54	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

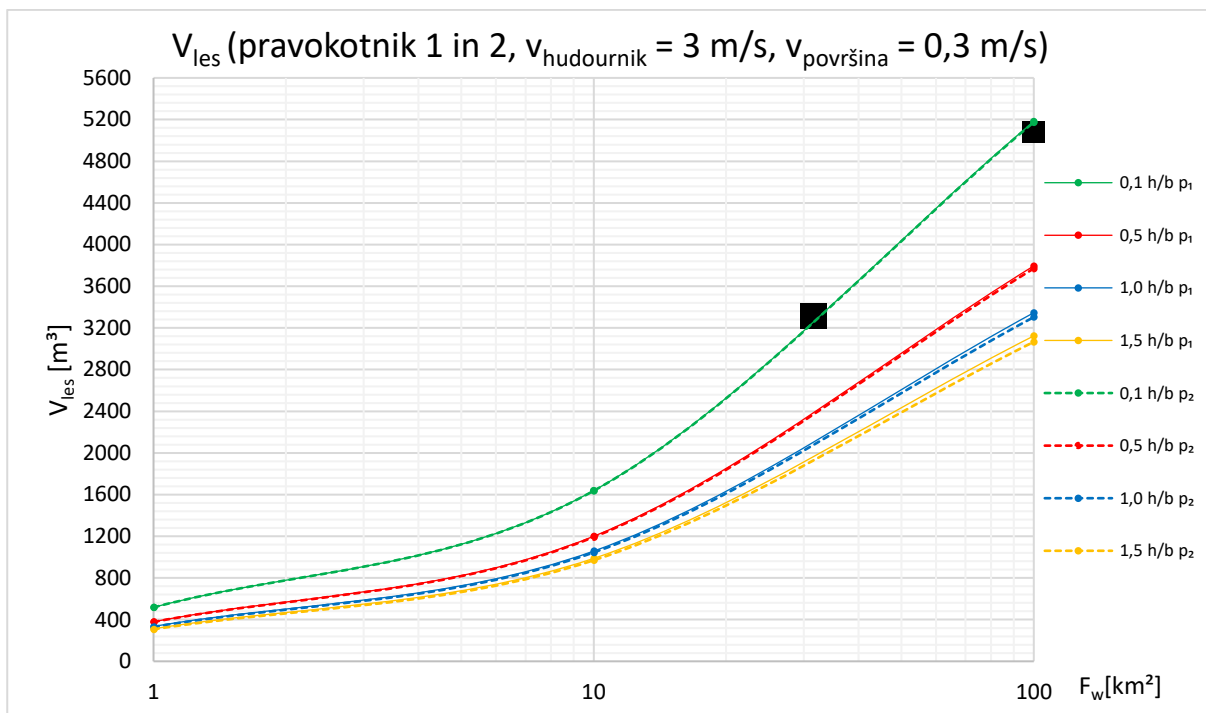
Elipsa 2

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V_{\text{les}} \text{ [m}^3\text{]}$	542,92	411,87	350,55	312,76	1716,87	1302,44	1108,54	989,02	5429,21	4118,67	3505,52	3127,57	0,1
	395,06	300,87	257,07	230,23	1249,30	951,45	812,93	728,05	3950,63	3008,75	2570,72	2302,29	0,5
	345,61	264,46	227,00	204,19	1092,93	836,31	717,82	645,71	3456,15	2644,64	2269,96	2041,91	1,0
	320,24	246,17	212,21	191,66	1012,70	778,46	671,05	606,09	3202,43	2461,70	2122,05	1916,63	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

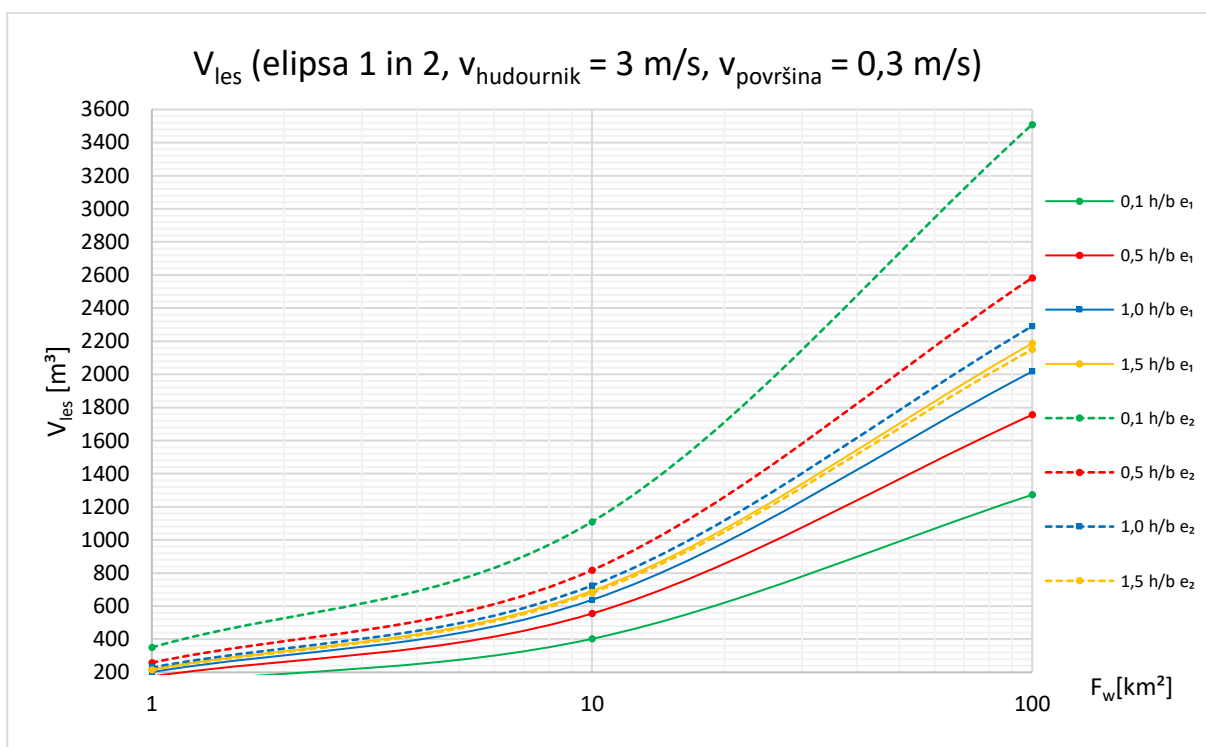
Največje količine lesa so dosežene pri obeh oblikah povodja in obeh načinih stekanja vode pri razmerju dolžine in širine $h/b = 0,1$. Pri razmerju dolžine in širine $h/b = 0,5$ je količina lesa približno za faktor 1,37 manjša, pri elipsi 1 pa 0,77. Ko je oblika povodja kvadratne ali okrogle oblike (razmerje $h/b = 0,5$), se količina lesa pri najmanjšem razmerju $h/b = 0,1$ zmanjša približno za faktor 1,54. Pri vrednosti razmerja $h/b = 1,5$ se količina lesa ustali.

Količina lesnega plavja (V_{les}) je odvisna od hidrograma odtoka. Večji kot je hidrogram odtoka, večja je tudi možna količina lesa, ki bi se ob takem ekstremnem dogodku lahko sprostila s celotnega povodja. Količina je odvisna od površine povodja, specifičnega odtoka in hitrosti vode na površju. Nižja kot je ta hitrost skozi gozd, večja je lahko potencialna količina lesa. Hitrost vode v vodotoku po strugi ima zanemarljiv vpliv na spremembo količine lesa v povodju. Pri primerjavi količine lesa pri povodju z obliko pravokotnika z obema variantama stekanja vode – struga po celotni ali le po polovici dolžine - skoraj ni opaznih razlik. Pri primerjavi elips z različnim načinom stekanja vode so razlike v količini lesa opaznejše. Količina lesa se zaradi spremembe velikosti povodja pri enakem razmerju dolžine in širine ter enakih hitrostih povečuje približno za faktor 3,16.

Na količino lesa vpliva predvsem površina povodja, v manjši meri pa tudi oblika. Različni načini stekanja vode s povodja nimajo velikega vpliva na količino lesnega plavja, vpliv je največji pri elipsi 1. Pri varianti, da se struga vodotoka tvori na sredini dolžine povodja, tako pri pravokotni in elipsasti obliki, so količine lesa manjše. Pri razmerju dolžine in širine 0,1 so razlike med obema možnostma stekanja najmanjše. Nato se razlika počasi veča, največja pa je, ko razmerje med dolžino in širino doseže $h/b = 1,5$ na primeru spodnjih grafov.



Slika C.1: Količina plavnega lesa za območje v obliki pravokotnika.



Slika C.2: Količina plavnega lesa za območje v obliki elipse

Priloga D: Delež odplavljenega lesa

V spodnjih preglednicah so podani deleži odplavljenega lesnega plavja, izračunani pri različnih hitrostih vode v hudourniku in na površini ter za tri velikosti in dve obliki hudourniškega območja.

Preglednica D.1: Delež odplavljenega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	0,27	0,41	0,52	0,61	0,05	0,07	0,09	0,11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,43	0,63	0,78	0,91	0,08	0,11	0,14	0,16	0,01	0,02	0,02	0,03	0,5
	0,51	0,74	0,90	1,02	0,09	0,13	0,16	0,18	0,02	0,02	0,03	0,03	1,0
	0,56	0,79	0,95	1,06	0,10	0,14	0,17	0,19	0,02	0,03	0,03	0,03	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	0,27	0,41	0,52	0,62	0,05	0,07	0,09	0,11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,43	0,65	0,82	0,96	0,08	0,12	0,15	0,17	0,01	0,02	0,03	0,03	0,5
	0,53	0,78	0,97	1,12	0,09	0,14	0,17	0,20	0,02	0,02	0,03	0,04	1,0
	0,59	0,86	1,05	1,20	0,10	0,15	0,19	0,21	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	1,21	1,75	2,12	2,41	0,22	0,31	0,38	0,43	0,04	0,06	0,17	0,08	0,1
	0,75	1,08	1,31	1,49	0,13	0,19	0,23	0,26	0,02	0,03	0,04	0,05	0,5
	0,61	0,88	1,06	1,21	0,11	0,16	0,19	0,22	0,02	0,03	0,03	0,04	1,0
	0,54	0,78	0,94	1,07	0,10	0,14	0,17	0,19	0,02	0,02	0,03	0,03	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	0,25	0,38	0,49	0,58	0,04	0,07	0,09	0,10	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,40	0,60	0,76	0,89	0,07	0,11	0,14	0,16	0,01	0,02	0,02	0,03	0,5
	0,49	0,72	0,90	1,04	0,09	0,13	0,16	0,19	0,02	0,02	0,03	0,03	1,0
	0,55	0,80	0,98	1,12	0,10	0,14	0,17	0,20	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica D.2: Delež odplavljenega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 3 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	0,27	0,41	0,52	0,62	0,05	0,07	0,09	0,11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,43	0,64	0,81	0,94	0,08	0,11	0,14	0,17	0,01	0,02	0,03	0,03	0,5
	0,52	0,76	0,94	1,08	0,09	0,14	0,17	0,19	0,02	0,02	0,03	0,03	1,0
	0,58	0,83	1,01	1,15	0,10	0,15	0,18	0,20	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	0,27	0,41	0,52	0,62	0,05	0,07	0,09	0,11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,44	0,66	0,83	0,98	0,08	0,12	0,15	0,17	0,01	0,02	0,03	0,03	0,5
	0,53	0,79	0,99	1,16	0,09	0,14	0,18	0,21	0,02	0,03	0,03	0,04	1,0
	0,60	0,88	1,09	1,26	0,11	0,16	0,19	0,22	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	1,24	1,81	2,23	2,56	0,22	0,32	0,40	0,46	0,04	0,06	0,07	0,08	0,1
	0,76	1,12	1,38	1,58	0,14	0,20	0,24	0,28	0,02	0,04	0,04	0,05	0,5
	0,62	0,91	1,12	1,29	0,11	0,16	0,20	0,23	0,02	0,03	0,04	0,04	1,0
	0,55	0,80	0,99	1,14	0,10	0,14	0,18	0,20	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

F_w [km ²]	1				10				100				
V^* [%]	0,25	0,38	0,49	0,58	0,04	0,07	0,09	0,10	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,41	0,61	0,77	0,91	0,07	0,11	0,14	0,16	0,01	0,02	0,02	0,03	0,5
	0,50	0,74	0,92	1,08	0,09	0,13	0,16	0,19	0,02	0,02	0,03	0,03	1,0
	0,55	0,82	1,01	1,18	0,10	0,15	0,18	0,21	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}}$ [m/s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica D.3: Delež odplavljenega lesa ($v_{\text{hudournik}} = 4 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V^*[\%]$	0,27	0,41	0,52	0,62	0,05	0,07	0,09	0,11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,43	0,65	0,82	0,96	0,08	0,12	0,15	0,17	0,01	0,02	0,03	0,03	0,5
	0,53	0,78	0,97	1,12	0,09	0,14	0,17	0,20	0,02	0,02	0,03	0,04	1,0
	0,59	0,86	1,05	1,20	0,10	0,15	0,19	0,21	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V^*[\%]$	0,27	0,41	0,52	0,62	0,05	0,07	0,09	0,11	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,44	0,66	0,83	0,98	0,08	0,12	0,15	0,18	0,01	0,02	0,03	0,03	0,5
	0,54	0,80	1,01	1,18	0,10	0,14	0,18	0,21	0,02	0,03	0,03	0,04	1,0
	0,60	0,89	1,11	1,30	0,11	0,16	0,20	0,23	0,02	0,03	0,04	0,04	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

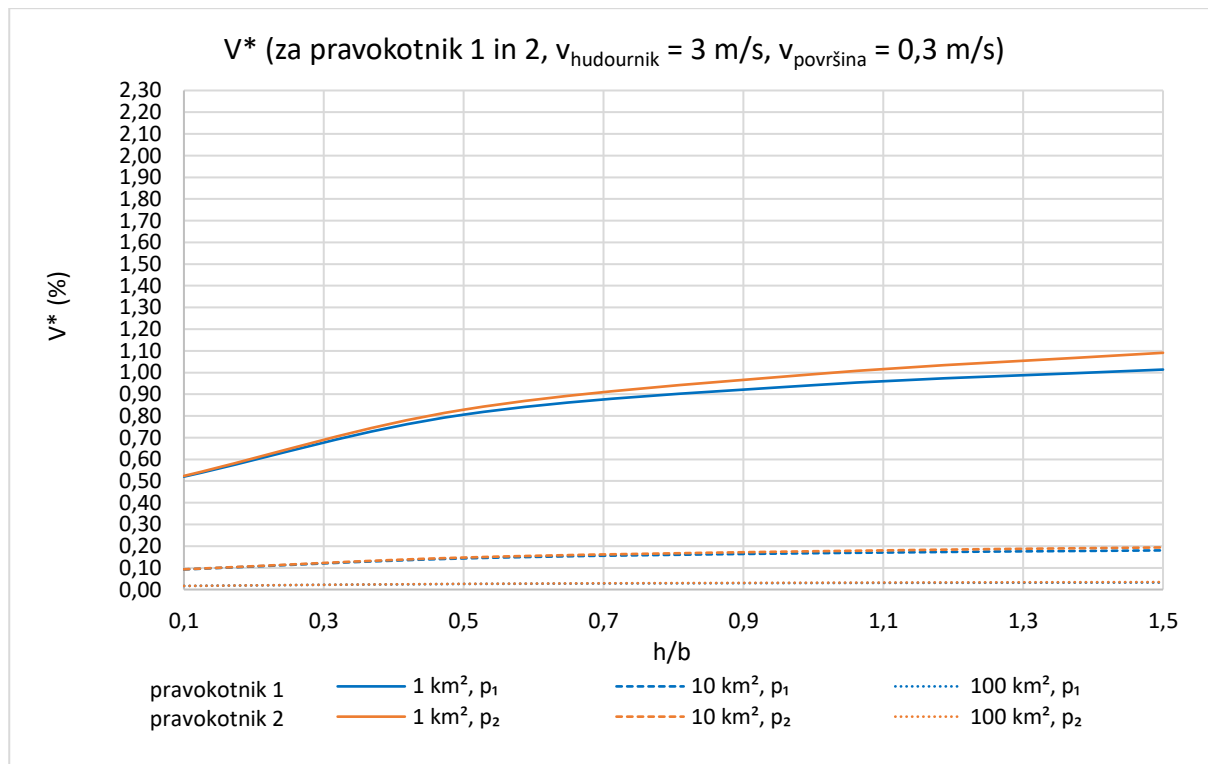
Elipsa 1

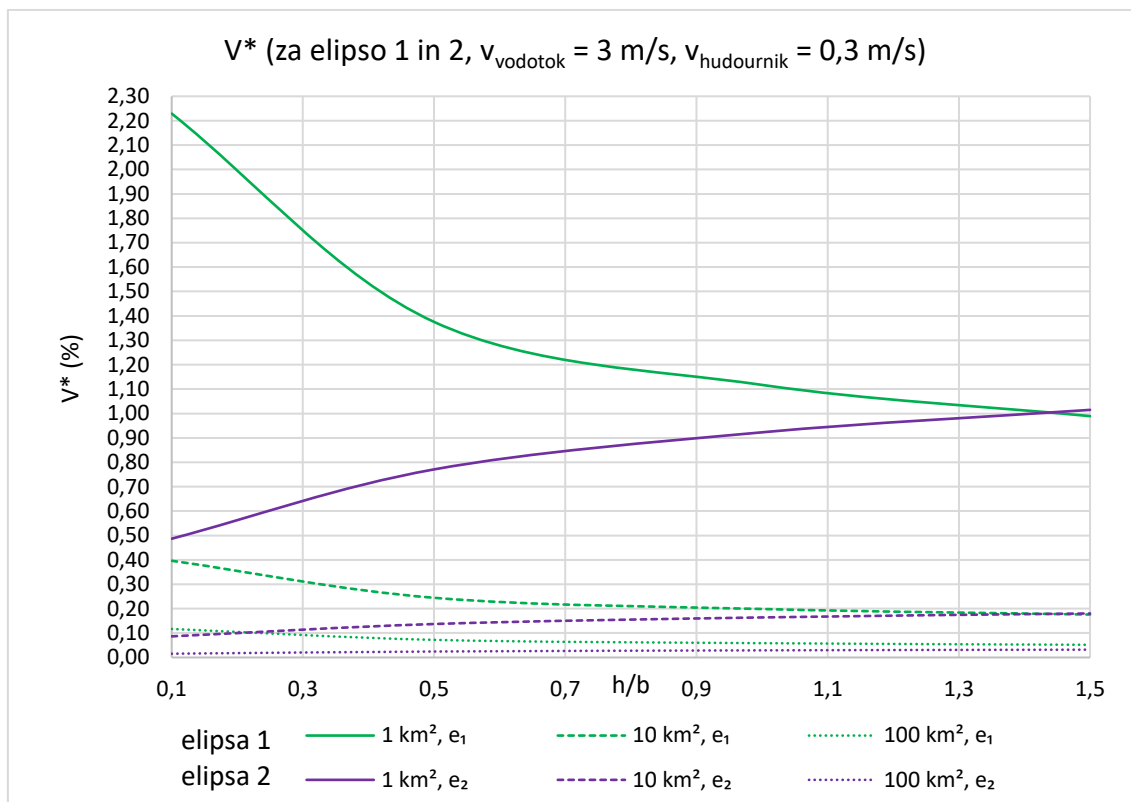
$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V^*[\%]$	1,25	1,84	2,29	2,65	0,22	0,33	0,41	0,47	0,04	0,06	0,07	0,08	0,1
	0,77	1,14	1,41	1,63	0,14	0,20	0,25	0,29	0,02	0,04	0,04	0,05	0,5
	0,63	0,92	1,15	1,33	0,11	0,16	0,20	0,24	0,02	0,03	0,04	0,04	1,0
	0,55	0,82	1,01	1,18	0,10	0,15	0,18	0,21	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

$F_w \text{ [km}^2\text{]}$	1				10				100				
$V^*[\%]$	0,25	0,38	0,49	0,58	0,04	0,07	0,09	0,10	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1
	0,41	0,61	0,78	0,92	0,07	0,11	0,14	0,16	0,01	0,02	0,02	0,03	0,5
	0,50	0,74	0,94	1,10	0,09	0,13	0,17	0,20	0,02	0,02	0,03	0,03	1,0
	0,56	0,83	1,04	1,21	0,10	0,15	0,18	0,21	0,02	0,03	0,03	0,04	1,5
$V_{\text{površina}} \text{ [m/s]}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Deleža lesa V^* , ki ga lahko ekstremni dogodek odplavi s hudourniškega območja, smo izračunali tako, da smo količino lesa delili s hidrogramom odtoka. V spodnjih grafih je prikaz deleža odplavljenega lesa pri različnih razmerjih h/b in površinah hudourniškega območja.


Slika D.1: Delež odplavljenega lesa za območje v obliki pravokotnika.

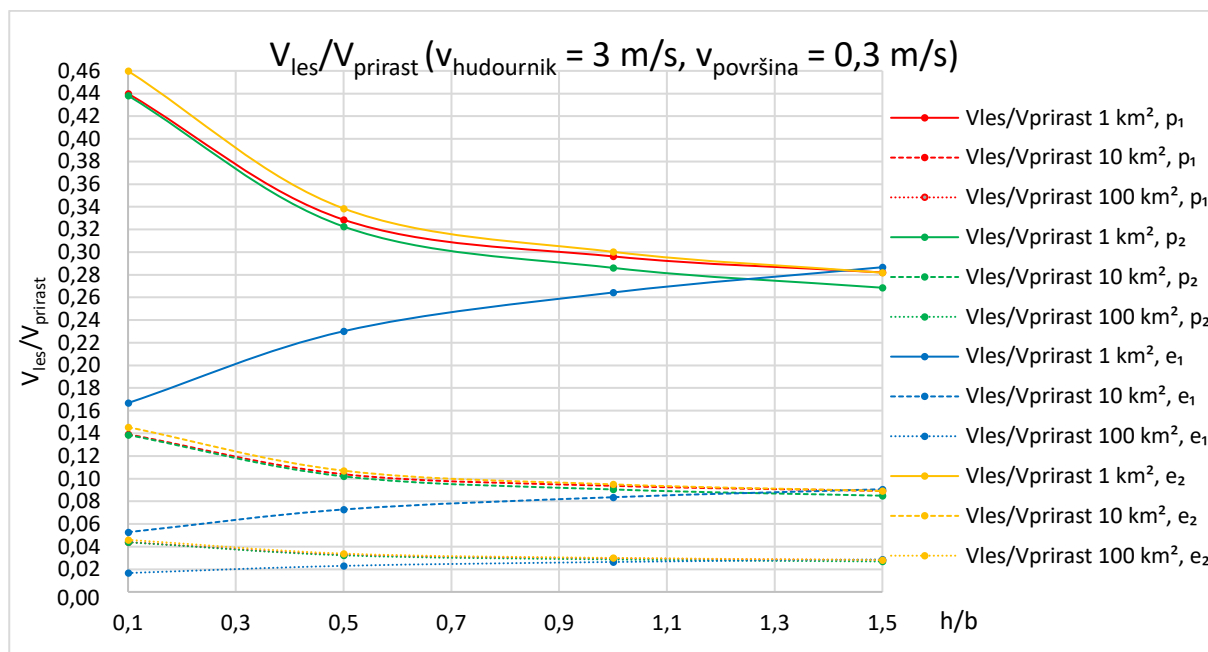


Slika D.2: Delež odplavljenega lesa za območje v obliki elipse.

Razlike v deležu V^* med pravokotnikoma z različnim načinom stakanja so zelo majhne. Ob primerjavi pravokotnika 2 in elipse 2 opazimo, da je delež pri elipsi manjši. Delež odplavljenega lesa je največji pri elipsi 1. Delež odplavljenega lesa s povečanjem hitrosti na površini začne naraščati. Skok deleža odplavljenega lesa je najbolj viden pri najmanjši površini. Najvišje vrednosti nastopajo pri majhni površini pri elipsi 1 in večji vrednosti razmerja med dolžino in širino. Vrednosti V^* pri površinah 10 in 100 km² so zelo majhne (nekaj ‰).

Priloga E: Primerjava možne količine plavnega lesa in naravnega prirastka lesa

Nazadnje smo pregledali uporabnost enačbe za Slovenijo in kakšen delež predstavlja po Rickenmannovi empirični enačbi izračunana količina plavnega lesa v primerjavi z naravnim prirastkom lesa v gozdovih v Sloveniji. Po podatkih Zavoda za gozdove za leto 2016 je bil lesni prirastek 7,63 m³/ha (Poročilo o gozdovih, 2016). V spodnjih grafih je prikazano, kolikšen je delež količine lesa iz preračunov empirične enačbe in lesnim prirastkom v gozdovih.



Slika E.1: Primerjava količine plavnega lesa in naravnega prirastka.

Preglednica E.1: $V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}} (v_{\text{hudournik}} = 2 \text{ m/s})$.

Pravokotnik 1													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}} [\text{m}^3/\text{ha}]$	0.68	0.52	0.44	0.40	0.22	0.16	0.14	0.12	0.07	0.05	0.04	0.04	0.1
	0.50	0.39	0.33	0.30	0.16	0.12	0.11	0.10	0.05	0.04	0.03	0.03	0.5
	0.44	0.35	0.31	0.28	0.14	0.11	0.10	0.09	0.04	0.03	0.03	0.03	1.0
	0.42	0.33	0.29	0.27	0.13	0.10	0.09	0.09	0.04	0.03	0.03	0.03	1.5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	h/b
Pravokotnik 2													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}} [\text{m}^3/\text{ha}]$	0.68	0.52	0.44	0.39	0.21	0.16	0.14	0.12	0.07	0.05	0.04	0.04	0.1
	0.50	0.38	0.33	0.29	0.16	0.12	0.10	0.09	0.05	0.04	0.03	0.03	0.5
	0.44	0.34	0.29	0.26	0.14	0.11	0.09	0.08	0.04	0.03	0.03	0.03	1.0
	0.41	0.32	0.28	0.25	0.13	0.10	0.09	0.08	0.04	0.03	0.03	0.03	1.5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	h/b
Elipsa 1													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}} [\text{m}^3/\text{ha}]$	0.25	0.20	0.17	0.16	0.08	0.06	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1
	0.34	0.27	0.24	0.22	0.11	0.09	0.08	0.07	0.03	0.03	0.02	0.02	0.5
	0.40	0.31	0.27	0.25	0.13	0.10	0.09	0.08	0.04	0.03	0.03	0.03	1.0
	0.43	0.34	0.30	0.27	0.14	0.11	0.09	0.09	0.04	0.03	0.03	0.03	1.5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	h/b
Elipsa 2													
$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{\text{les}}/V_{\text{prirastek}} [\text{m}^3/\text{ha}]$	0.71	0.54	0.46	0.41	0.23	0.17	0.15	0.13	0.07	0.05	0.05	0.04	0.1
	0.52	0.40	0.34	0.31	0.16	0.13	0.11	0.10	0.05	0.04	0.03	0.03	0.5
	0.46	0.35	0.31	0.28	0.14	0.11	0.10	0.09	0.05	0.04	0.03	0.03	1.0
	0.43	0.33	0.29	0.26	0.13	0.10	0.09	0.08	0.04	0.03	0.03	0.03	1.5
$V_{\text{površina}} [\text{m/s}]$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	h/b

Preglednica E.2: $V_{les}/V_{prirastek}$ ($v_{hudournik} = 3 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,68	0,52	0,44	0,39	0,21	0,16	0,14	0,12	0,07	0,05	0,04	0,04	0,1
	0,50	0,38	0,33	0,30	0,16	0,12	0,10	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03	0,5
	0,44	0,34	0,30	0,27	0,14	0,11	0,09	0,09	0,04	0,03	0,03	0,03	1,0
	0,41	0,32	0,28	0,26	0,13	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,68	0,51	0,44	0,39	0,21	0,16	0,14	0,12	0,07	0,05	0,04	0,04	0,1
	0,49	0,38	0,32	0,29	0,16	0,12	0,10	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03	0,5
	0,43	0,33	0,29	0,26	0,14	0,11	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,0
	0,40	0,31	0,27	0,24	0,13	0,10	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,25	0,19	0,17	0,15	0,08	0,06	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,1
	0,34	0,26	0,23	0,21	0,11	0,08	0,07	0,07	0,03	0,03	0,02	0,02	0,5
	0,39	0,30	0,26	0,24	0,12	0,10	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	1,0
	0,42	0,33	0,29	0,26	0,13	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,71	0,54	0,46	0,41	0,23	0,17	0,15	0,13	0,07	0,05	0,05	0,04	0,1
	0,52	0,40	0,34	0,30	0,16	0,13	0,11	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	0,5
	0,45	0,35	0,30	0,27	0,14	0,11	0,09	0,09	0,05	0,03	0,03	0,03	1,0
	0,42	0,33	0,28	0,26	0,13	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Preglednica E.3: $V_{les}/V_{prirastek}$ ($v_{hudournik} = 4 \text{ m/s}$).

Pravokotnik 1

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,68	0,52	0,44	0,39	0,21	0,16	0,14	0,12	0,07	0,05	0,04	0,04	0,1
	0,50	0,38	0,33	0,29	0,16	0,12	0,10	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03	0,5
	0,44	0,34	0,29	0,26	0,14	0,11	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,0
	0,41	0,32	0,28	0,25	0,13	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Pravokotnik 2

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,68	0,51	0,44	0,39	0,21	0,16	0,14	0,12	0,07	0,05	0,04	0,04	0,1
	0,49	0,38	0,32	0,29	0,16	0,12	0,10	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03	0,5
	0,43	0,33	0,28	0,25	0,14	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,0
	0,40	0,31	0,27	0,24	0,13	0,10	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 1

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,25	0,19	0,16	0,15	0,08	0,06	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,1
	0,34	0,26	0,23	0,21	0,11	0,08	0,07	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	0,5
	0,39	0,30	0,26	0,24	0,12	0,09	0,08	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	1,0
	0,42	0,33	0,28	0,26	0,13	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Elipsa 2

$F_w [\text{km}^2]$	1				10				100				
$V_{les}/V_{prirastek} [l]$	0,71	0,54	0,46	0,41	0,23	0,17	0,15	0,13	0,07	0,05	0,05	0,04	0,1
	0,52	0,39	0,34	0,30	0,16	0,12	0,11	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	0,5
	0,45	0,35	0,30	0,27	0,14	0,11	0,09	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03	1,0
	0,42	0,32	0,28	0,25	0,13	0,10	0,09	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	1,5
$V_{površina} [\text{m/s}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	h/b

Želeli smo preveriti, kakšen delež lesnega prirastka gozdov bi ekstremni dogodek lahko odplavil. Iz zgornjih preglednic lahko vidimo, da je količina lesa, izračunana po empirični enačbi, ki jo podaja Rickenmann, manjša od letnega lesnega prirastka. Največje razmerje med izračunano količino lesa in lesnim prirastkom je pri najmanjši velikosti povodja, nato pa začne z večanjem razmerja med dolžino in širino padati. S povečevanjem površinske hitrosti

vode se začne zmanjševati tudi razmerje med izračunano količino lesa in prirastkom. Z večanjem velikosti povodja se zelo hitro zmanjša tudi razmerje med izračunano količino lesa in prirastkom. Način stekanja vode v povodju na razmerje med količino lesa in prirastkom nima skoraj nobenega vpliva. Tudi oblika povodja nima znatnejšega vpliva na to razmerje. Ugotovimo, da je količina izračunanega plavnega lesa bistveno manjša od lesnega prirastka, kar pomeni, da lahko ekstremni dogodek odplavi smo del letnega lesnega prirastka iz gozdnatega povodja.