

Metode izračuna pronosa nanosa u rijeci Dravi

Kos, Tea

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:778856>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

TEA KOS

**METODE IZRAČUNA PRONOSA NANOSA U RIJECI
DRAVI**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2023.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 25. 09. 2023. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 11. 09. 2023.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Sauja Kovač

Članovi povjerenstva

- 1) Doc. dr. sc. Davorina Oskorus
- 2) Dr. sc. Karlo Leskovan
- 3) Prof. dr. sc. Sauja Kovač
- 4) Doc. dr. sc. Douko Brionović

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

TEA KOS

METODE IZRAČUNA PRONOSA NANOSA U RIJECI DRAVI

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:
TEA KOS
Tea Kos

MENTOR:
DOC. DR. SC.
DIJANA OSKORUŠ

VARAŽDIN, 2023.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

METODE IZRAČUNA PRONOSA NANOSA U RIJECI DRAVI

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Dijane Oskoruš**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 11. 9. 2023.

TEA KOS

(Ime i prezime)

Tea Kos

(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

METODE IZRAČUNA PRONOSA NANOSA U RIJECI DRAVI

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 6.9.2023

DOC.DR.SC. DIJANA OSKORUŠ
(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

IME I PREZIME AUTORA: Tea Kos

NASLOV RADA: Metode izračuna pronosa nanosa u rijeci Dravi

Transport riječnog nanosa ima vitalnu ulogu u oblikovanju riječne morfologije, te utječe na različite obrasce tečenja i stvara raznolike ekosustave duž riječnog toka. Najvažniji čimbenici koji utječu na transport nanosa su: brzina toka, veličina i sastav nanosa, oblik i hrapavost riječnog korita te sama količina nanosa u uzvodnim dijelovima sliva i prisutnost prepreka i promjena u riječnom toku. Rijeka Drava svojim tokom kroz srednju i jugoistočnu Europu prenosi velike količine suspendiranog i koritiformirajućeg (vučenog) nanosa. U ovom radu pobliže su objašnjene hidrološke, geološke i hidrogeološke karakteristike rijeke Drave, vrste i važnost nanosa u rijeci te je dan pregled metoda za izračun pronosa suspendiranog nanosa unjoj. U radu su analizirani podaci s četiri hidrološke postaje na rijeci Dravi, a to su: Varaždin, Donja Dubrava, Botovo i Terezino Polje. Prikazano je višegodišnje kretanje vodostaja, protoka i pronosa suspendiranog nanosa te njihova povezanost s klimatskim (količinom oborina) i antropogenim (gradnja hidroelektrana) čimbenicima. Prikazane su metode za izračun pronosa nanosa na primjeru rijeke Drave, a metode su: izračun koncentracije suspendiranog nanosa na temelju diskretnih uzoraka vode, izračun srednje profilske koncentracije i određivanje koeficijenta korekcije za dnevne diskretne uzorke, izračun dnevnog, mjesečnog i godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa za mjernu postaju Botovo, definiranje krivulje nanosa na mjernim postajama na Dravi, trendovi promjena u režimu pronosa suspendiranog nanosa u zavisnosti od antropogenih i klimatskih utjecaja te opis metoda proračuna vučenog nanosa primjerom izračuna po Einstein - Brown metodi.

KLJUČNE RIJEČI: suspendirani nanos, koritiformirajući (vučeni) nanos, koncentracija i pronos nanosa

ABSTRACT

NAME AND SURNAME of the AUTHOR: Tea Kos

TITLE: Methods for calculating sediment transport in the Drava River

River sediment transport plays a vital role in shaping river morphology, and it also influences different flow patterns and creates diverse ecosystems along the river course. The most important factors affecting sediment transport are: flow speed, size and composition of sediment, shape and roughness of the river bed, and the amount of sediment in the upstream parts of the basin as well as the presence of obstacles and changes in the river flow. The Drava River transports large amounts of suspended and bed load in its flow through Central and South - Eastern Europe. In this paper the hydrological, geological and hydrogeological characteristics of the Drava River and the types and importance of sediment in the River are explained, and an overview of methods for calculating suspended sediment transport in it are given. In the paper, data from four hydrological stations on the Drava River were analyzed, and they are : Varaždin, Donja Dubrava, Botovo and Terezino Polje. The long-term distribution of water level, flow and sediment transport and their connection with climatic (precipitation) and anthropogenic (hydroelectric power plant construction) factors are presented. The methods of suspended sediment transport calculations are shown on the example of the Drava River, and they include: calculation of the concentration of suspended sediment based on discrete water samples, calculation of the average profile concentration and determination of the correction coefficient for daily discrete samples, calculation of daily, monthly and annual sediment transport for the measuring station Botovo, definition of the sediment curve at the measuring stations on the Drava River, trends of changes in the sediment transport regime depending on anthropogenic and climatic influences as well as the description of the bed load transport calculation methods with an example of calculation based on Einstein – Brown method.

KEYWORDS: suspended sediment, bed load, sediment concentration and transport

SADRŽAJ

| | |
|--|--------------|
| POPIS SLIKA..... | |
| POPIS TABLICA..... | |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. RIJEKA DRAVA..... | 4 |
| 2.1. GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE..... | 4 |
| 2.2. HIDROMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE..... | 5 |
| 2.3. HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE..... | 8 |
| 2.3.1. Mjerne postaje..... | 9 |
| 2.3.2. Vodostaj..... | 15 |
| 2.3.3. Protok..... | 19 |
| 3. VRSTE NANOSA..... | 22 |
| 3.1. SUSPENDIRANI NANOS..... | 24 |
| 3.2. KORITOFORMIRAJUĆI NANOS..... | 26 |
| 4. METODOLOGIJA PRORAČUNA NANOSA U RIJEKAMA..... | 27 |
| 4.1. IZRAČUN KONCENTRACIJE SUSPENDIRANOG NANOSA..... | 27 |
| 4.1.1. Na temelju diskretnih uzoraka vode..... | 27 |
| 4.1.2. Na temelju kontinuiranog mjerenja mutnoće..... | 30 |
| 4.2. IZRAČUN SREDNJE PROFILSKE KONCENTRACIJE I ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA KOREKCIJE ZA DNEVNE DISKRETNE UZORKE..... | 31 |
| 4.3. IZRAČUN DNEVNOG, MJESEČNOG I GODIŠNJEG PRONOSA SUSPENDIRANOG NANOSA ZA MJERNU POSTAJU BOTOVO NA DRAVI..... | 34 |
| 4.4. KRIVLJE PRONOSA SUSPENIRANOG NANOSA NA MJERNIM POSTAJAMA NA DRAVI..... | 36 |
| 4.5. TRENDOVI PROMJENA U REŽIMU PRONOSA NANOSA U ZAVISNOSTI OD ANTROPOGENIH I KLIMATSKIH UTJECAJA..... | 39 |
| 4.6. GRANULOMETRIJSKI SASTAV RIJEČNOG NANOSA..... | 41 |
| 4.6.1. Granulometrijski sastav suspendiranog nanosa..... | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 4.6.2. Granulometrijski sastav koritiformirajućeg nanosa | 44 |
| 4.7. METODE PRORAČUNA VUČENOG NANOSA | 48 |
| 4.7.1. Pristup zasnovan na kritičnom naprezanju | 49 |
| 4.7.2. Pristup zasnovan na kritičnoj brzini..... | 50 |
| 4.7.3. Energetski pristup | 52 |
| 4.7.4. Pristup zasnovan na koncentraciji nanosa | 52 |
| 4.7.5. Stohastički pristup..... | 53 |
| 4.7.6. Izračun pronosa vučenog nanosa po Einstein – Brown formuli za mjernu postaju Drava – Botovo..... | 54 |
| 5. REZULTATI I DISKUSIJA | 58 |
| 6. ZAKLJUČAK | 63 |
| 7. LITERATURA..... | 65 |

POPIS SLIKA

Slika 1. Sliv rijeke Drave na teritoriju Italije, Austrije, Slovenije, Mađarske i Hrvatske [3]

Slika 2. Geološke cjeline sliva Drave (unutar crvenog kruga): 1. Austroalpski pokrovni sustav s malim djelom okna Visokih Tura 2. Južnoalpski pokrovni sustav 3. Panonski bazen [7]

Slika 3. Podjela srednjeg i donjeg toka rijeke Drave s obzirom na hidromorfološke karakteristike [8]

Slika 4. Prikaz regionalnog parka Mura - Drava [9]

Slika 5. Rijeka Drava u Hrvatskoj s vodomjernim postajama i podjelom na tri dionice [2]

Slika 6. Mjerna postaja Varaždin

Slika 7. Mjerna postaja Donja Dubrava [19]

Slika 8. Mjerna postaja Botovo

Slika 9. Mjerna postaja Terezino Polje

Slika 10. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernoj postaji Varaždin u razdoblju od 1961. do 2020. sa trendovima

Slika 11. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernoj postaji Donja Dubrava u razdoblju od 1985. do 2020. sa trendovima

Slika 12. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernoj postaji Botovo u razdoblju od 1967. do 2020. sa trendovima

Slika 13. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernoj postaji Terezino Polje u razdoblju od 1990. do 2020. sa trendovima

Slika 14. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] za mjernu postaju Varaždin u razdoblju od 1961. do 1981. sa trendovima

Slika 15. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] za mjernu postaju Donja Dubrava u razdoblju od 1985. do 2020. sa trendovima

Slika 16. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] na mjernoj postaji Botovo u razdoblju od 1967. do 2020. sa trendovima

Slika 17. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] na mjernoj postaji Terezino Polje u razdoblju od 1990. do 2020. sa trendovima

Slika 18. Podjela toka rijeke u 3 zone: 1. zona nastanka nanosa, 2. zona transporta nanosa i 3. zona taloženja nanosa [24]

Slika 19. Uzorkovanje vode za analizu suspendiranog nanosa [31]

Slika 20. Laboratorijska obrada dnevnika uzoraka filter papira s mjernih postaja, sušenje uzoraka u laboratoriju DHMZ-a [31]

Slika 21. Optički senzor za mjerenje mutnoće

Slika 22. Metoda mjerenja profilske koncentracije u mjernim vertikalama

Slika 23. Profilsko mjerenje po vertikalama na mjernoj postaji Drava - Botovo 10.7.2020.

Slika 24. Shematski prikaz načina mjerenja ADCP - om i uzimanje uzoraka po vertikali [34]

Slika 25. Raspodjela koncentracije suspendiranog nanosa [mg/l] u profilu hidrološke postaje Drava – Botovo 10.7.2020.

Slika 26. Korelacija između srednje profilske koncentracije suspendiranog nanosa i površinske koncentracije iz jedne točke uz obalu za razdoblje mjerenja 1987. - 2020. na HP Drava – Botovo

Slika 27. Korelacija između trenutnog pronosa suspendiranog nanosa P [kg/s] i protoka Q [m³/s] za razdoblje mjerenja 1968. – 2019. HP Drava – Botovo

Slika 28. Godišnji pronos nanosa na mjernim postajama Varaždin, Donja Dubrava, Botovo i Terezino Polje od 1967. do 2020.

Slika 29. Shematski prikaz postupka suhog sisanja nekoherentnog tla [37]

Slika 30. Uzorkovanje za granulometrijsku analizu suspendiranog nanosa [34]

Slika 31. Postupak areometriranje

Slika 32. Postupak granulometrijske analize zrna nanosa većih od 0,063 mm: A) Četvrtanje uzorka B) ispiranje uzorka C) Tresilica za sisanje uzorka

Slika 33. Rezultati sisanja koritoformirajućeg nanosa na lijevoj obali (L.O.), u sredini korita (SR.) i desnoj obali (D.O.) na lokaciji Drava - Botovo 6.11.2020.

Slika 34. Granulometrijska krivulja koritoformirajućeg nanosa na lokaciji Drava - Botovo 6.11.2020.

Slika 35. Pregled dnevnih protoka za HP Drava – Varaždin u razdoblju 2019. - 2020.

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja te ekstremi na mjernoj postaji Varaždin [19]

Tablica 2. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja i ekstremi na mjernoj postaji Donja Dubrava [19]

Tablica 3. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja i ekstremi na mjernoj postaji Botovo [19]

Tablica 4. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja i ekstremi na mjernoj postaji Terezino Polje [19]

Tablica 5. Prikaz podataka i izračun dnevnih koncentracije suspendiranog nanosa (crveno) na temelju diskretnog uzorka vode, na mjernoj postaji Drava - Botovo u siječnju 2019. godine

Tablica 6. Dnevni (narančasto), mjesečni (plavo) i godišnji (zeleno) pronos nanosa [t] za 2019. godinu na mjernoj postaji Drava - Botovo

Tablica 7. Razdoblje i način mjerenja vučenog nanosa na mjernim postajama na Dravi [33]

Tablica 8. Vrijednosti koeficijenta ϕ [41]

1. UVOD

Rijeka Drava je jedna od značajnijih europskih rijeka koja izvire u Italiji te teče dužinom od 730 km kroz Austriju, Mađarsku, Sloveniju i Hrvatsku, gdje se 19 km nizvodno od Osijeka ulijeva u Dunav (Slika 1.) [1]. Jedna je od najvažnijih rijeka kontinentalne Hrvatske zbog velike ekološke vrijednosti koja je u sukobu s gospodarskim potencijalom u hidroenergiji, riječnoj plovidbi i navodnjavanju [2]. Donji dio toka rijeke Drave većim dijelom čini državnu granicu između Hrvatske i Mađarske, a glavni pritok rijeci Dravi je rijeka Mura. Na tok Drave pretežno utječu alpski uvjeti u izvorištu, točnije protok i pronos sedimenta. Goleme naslage šljunka dominiraju u kotlinama Graza i Klagenfurta i opet se pojavljuju nizvodno u Sloveniji gdje su se akumulirale duž podnožja šireći se nizvodno sve do ušća Mure kod Legrada. Na tom području rijeka ima jak planinski (alpski) karakter što se očituje u većoj brzini (> 2 m/s) i energiji toka te znatnom povećanju protoka nakon topljenja snijega. Reljef Donje Drave većinom se sastoji od nizina s kvartarnim sedimentima i lesnim terasnim sustavima. Tok djelomično slijedi geološke linije uz visoke obale u Mađarskoj, dok u donjem toku, u kojem dominiraju pijesci i muljevi, obale su mnogo niže. Iz tog razloga donju Dravu je nekada karakteriziralo snažno bočno pomicanje korita i meandriranje u prirodnim uvjetima. Gornji tok i dijelovi srednjeg toka u Austriji, Sloveniji i Hrvatskoj ima veliki hidroenergetski potencijal te se koristi za proizvodnju električne energije [3]. Na cijelom toku Drave ukupno je izgrađena 21 hidroelektrana, od toga 9 ih se nalazi u Austriji, 8 u Sloveniji te 3 u Hrvatskoj [4]. Hidroelektrane značajno utječu na bilancu nanosa kao i na dugoročni hidromorfološki režim cijelog donjeg toka [3].

Cilj ovog rada je pobliže objasniti hidrološke, geološke i hidrogeološke karakteristike rijeke Drave, objasniti vrste i važnost nanosa u rijeci te na kraju dati pregled i primjenu metoda za izračun pronos nanosa u rijeci Dravi.



Slika 1. Sliv rijeke Drave na teritoriju Italije, Austrije, Slovenije, Mađarske i Hrvatske [3]

Poznavanje režima riječnog nanosa temelji se na postupcima terenskih mjerenja i uzorkovanja, te naknadnih laboratorijskih standardnih analiza putem kojih se dobiju veličine poput: koncentracije suspendiranog nanosa u vodi (g/m^3 , mg/l), količine vučenog nanosa koji se pokreće po dnu (t/s , t/dan) te granulometrijski sastav suspendiranog nanosa i nanosa s dna i obala.

Na temelju redovitog mjerenja nanosa u praksi je potrebno definirati režim pronosa nanosa za različite uvjete tečenja, odnosno definirati ovisnosti između pojedinih hidroloških veličina i trenutne koncentracije nanosa kao i njegovog trenutnog pronosa za svaku mjernu lokaciju te takve odnose prikazati tzv. „krivuljama nanosa“ [5].

U ovom diplomskom radu biti će prikazane neke od metoda za izračun pronosa nanosa na primjeru rijeke Drave:

1. Izračun koncentracije suspendiranog nanosa na temelju diskretnih uzoraka vode
2. Izračun srednje profilske koncentracije i određivanje koeficijenta korekcije za dnevne diskretne uzorke
3. Izračun dnevnog, mjesečnog i godišnjeg pronosa nanosa za određenu mjernu postaju na Dravi
4. Definirati krivulje nanosa na mjernim postajama na Dravi

5. Trendovi promjena u režimu pronosa nanosa u zavisnosti od antropogenih i klimatskih utjecaja
6. Opisati metode izračuna pronosa vučenog nanosa i izabrati jednu za primjer

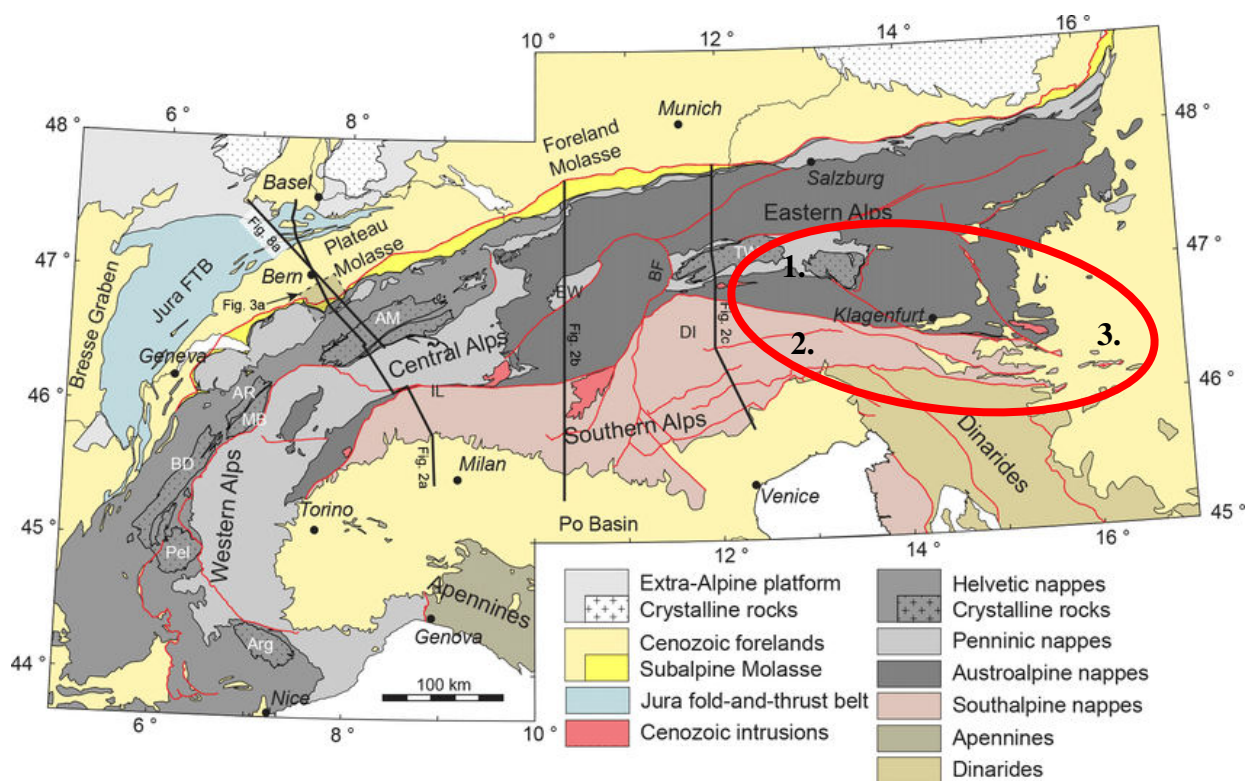
2. RIJEKA DRAVA

2.1. GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE

Sliv Drave sastoji se od tri velike geološke cjeline Istočnih Alpa i njihovog jugoistočnog prednjeg dijela što prikazuje Slika 2. [6]:

1. Austroalpski pokrovni sustav (s malim dijelom okna Visokih Tura),
2. Južnoalpski pokrovni sustav (s istočnim Dolomitima) i
3. Jugozapadni rub Panonskog (Karpatskog) bazena.

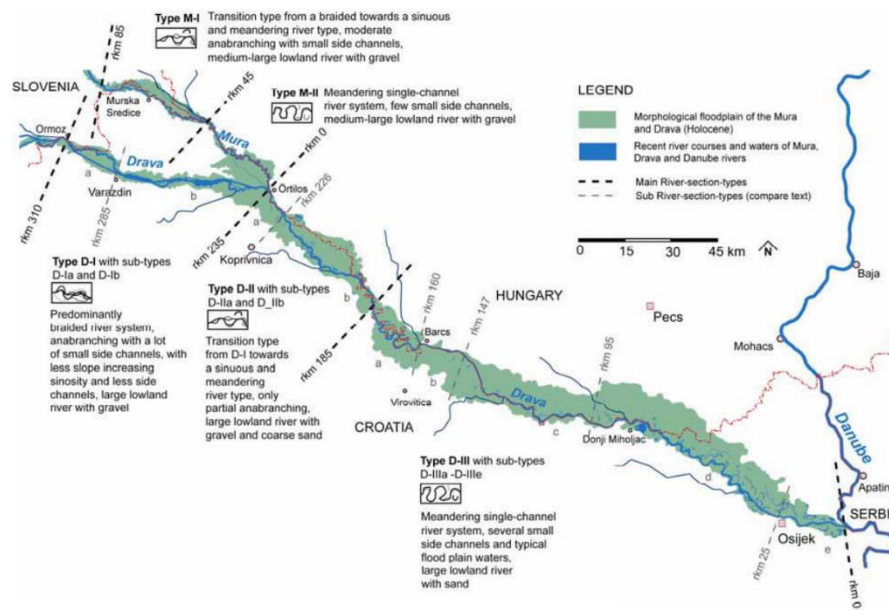
Alpska orogeneza započela je u kredi potaknuta pomicanjem litosfernih ploča, pomicanjem Afričke ploče i njezinih mikro ploča prema sjeveru. Tektonsko kretanje ploča također je bilo kontrolirano otvaranjem i zatvaranjem dva oceana: Neotetisa i Piemontsko – Peninskog oceana. Od trijasa do srednje jure Neotetis se protezao od istoka prema zapadu, a Piemontsko - Peninski ocean postojao je od srednje jure do kasne krede i razvijao se paralelno s otvaranjem Atlantskog oceana. Orogeneza se odvija i danas na istočnom djelu planinskog luka, iako manjim intenzitetom nego u Zapadnim i Središnjim Alpama. Uočeni su ogromni horizontalni pomaci u obliku rasjeda s klizištem, koji kontroliraju cjelokupni uzorak odvodnje (npr. u dolini Gail, Austrija [6]). Prema starosti stijene Istočnih Alpa sežu od metamorfiziranih paleozoika (npr. Turski prozor, Austrija) do kasnoholocenskih naplavina donje Drave (npr. u Kopačkom ritu u Hrvatskoj). Prisutna je velika varijabilnost stijena s obzirom na otpornost na eroziju i trošenje što je pridonijelo znatnim nakupinama sedimenta u dolinama i planinskim predjelima. Ove stijene su najmlađe geološke formacije, a vrše veliku kontrolu nad hidromorfologijom rijeka u slivu Drave. Najspektakularniji reljefni oblici su visokogorski glacijalni i kraški sklopovi, dolomitne litice i vrhovi, zemljane piramide, duboke gudure, izražena klizišta, uski klanci s vodopadima i špilje u vapnencu. U nizinskom dijelu postoje prerazvijeni odsječeni meandri i usječene litice [6].



Slika 2. Geološke cjeline sliva Drave (unutar crvenog kruga):
 1. Austroalpski pokrovni sustav s malim djelom okna Visokih Tura
 2. Južnoalpski pokrovni sustav
 3. Panonski bazen [7]

2.2. HIDROMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE

Srednja i donja Drava mogu se podijeliti u tri glavna dijela s obzirom na hidromorfološke karakteristike (Slika 3.). Gornji tok, dio je srednje Drave, napušta alpsko podnožje i akumulira mnogo šljunka u ravnici. Rijeku karakterizira isprepleteni tok (eng. braided flow), višekanalni sustav s mnogo vijugavih bočnih tokova i velikom raznolikošću dinamičnih staništa kao što su sprudovi i otoci između šetajućih korita [8]. Nakon ušća Mure kod Legrada, donji tok rijeke počinje s prijelazom od vijugave do meandrirajuće velike nizinske rijeke. Rijeka ima veliku do vrlo veliku poplavnu nizinu, veličine do 15 km [8], koja je ograničena različitim sustavima terasa. Na nekim dijelovima rijeka izravno dodiruje terasu gradeći impresivne strme obale do 35 m širine [8].



Slika 3. Podjela srednjeg i donjeg toka rijeke Drave s obzirom na hidromorfološke karakteristike [8]

Drugi tip se može promatrati kao prijelazni tip rijeke koja postupno smanjuje pad i stupanj grananja u rukavce i prelazi u tok koji sve više vijuga i sadrži bogatu raznolikost riječnog krajolika. 2011. godine na tom području proglašen je regionalni park Mura – Drava jer to područje predstavlja jedan od posljednjih doprirodnih nizinskih tokova u Europi sa naglašenom biološkom i krajobraznom raznolikošću (Slika 4.) [9].

Treći i najduži riječni tok pripada meandrirajućim i jako meandrirajućim velikim pjeskovitim nizinskim rijekama. Uočava se tipičan niz pojedinačnih sprudova sa strmim obalama i plićacima u prijelaznom dijelu između lančanih meandra. Javlja se veliki broj mrtvih rukavaca i tipičnih nizinskih naplavnih ravnica [8], a cijelo je područje redovito potopljeno dugotrajnim poplavama, posebice na mjestima koja su sve bliže ušću u Dunav, gradeći jedan od najvećih močvarnih i poplavnih kompleksa uz cijeli Dunav, Kopački rit.



Slika 4. Prikaz regionalnog parka Mura - Drava [9]

Na donju Dravu utječe rad uzvodnih hidroelektrana u Austriji, Sloveniji i Hrvatskoj, različiti regulacijski radovi na rijeci (stabilizacija obale, skraćivanje toka, presijecanje starih meandara), kao i gubitak poplavnih područja izgradnjom nasipa. Međutim, Drava u tom dijelu još uvijek zadržava gotovo sve značajke izvornog obalnog krajolika, a cijeli je tok proglašen rezervatom biosfere koji sadrži dva Ramsarska područja (prema Ramsarskoj konvenciji) i jedan obalni nacionalni park (Kopački rit) [3], što naglašava ekološku važnost riječnog koridora.

Rijeke Mura, Drava i Dunav pokrivaju značajan dio europskog zelenog pojasa čineći dinamičnu i međusobno povezanu životnu liniju u srednjoj Europi. To područje je 2021. godine postalo prvi UNESCO-ov rezervat biosfere na svijetu kao model regije za povezivanje očuvanja prirode i održivog razvoja. Na području “Mura – Drava - Dunav” koristi se koncept prekograničnog rezervata biosfere kako bi se održala biološka raznolikost i ekosustavi te kako bi se promicao prirodni gospodarski razvoj lokalnih zajednica ovog ruralnog kraja [10,11].

2.3. HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE

Rijeka Drava je po hidrološkom režimu tipična glacijalna rijeka s najvišim vodostajima koji se javljaju krajem proljeća i ljeti (svibanj, lipanj i srpanj), a najnižim tijekom zimskog razdoblja (siječanj i veljača). Tijekom povijesti na rijeci Dravi su izgrađeni mnogi hidrotehnički objekti koji su uzrokovali promjene u njezinom hidrološkom režimu. Tijekom 20. stoljeća bilježi se povećanje količina padalina u zimskom periodu i temperature zraka tijekom cijele godine [12], a porast ovisi o području djela sliva rijeke Drave gdje se vrše mjerenja. Temperatura zraka u Alpama (gornji tok rijeke Drave) u 20. stoljeću porasla je za 2 °C [13], a količina padalina zimi povećala se za oko 30 % (ovisno o djelu sliva) [12]. U zimskom periodu javlja se sve više padalina u obliku kiše i manje dana sa snijegom uslijed povećanja temperature zraka.

Na hrvatskom dijelu rijeke Drave, na temelju analiza, uočene su [14–18] posljedice promjena hidrološkog režima zbog oba ova faktora. Hrvatski dio rijeke Drave može se podijeliti u tri dionice (Slika 5.) prema različitom riječnom režimu [2]:

- A. uzvodni dio koji ovisi o konstrukciji brana
- B. srednji dio zahvaćen pritokama
- C. donji dio pod utjecajem rukavca rijeke Dunav



Slika 5. Rijeka Drava u Hrvatskoj s vodomjernim postajama i podjelom na tri dionice [2]

Na uzvodnoj dionici (A) izgrađene su tri višenamjenske akumulacije, koje su dio sustava hidroelektrana: HE Varaždin (1975.), HE Čakovec (1982.) i HE Donja Dubrava (1989.). Srednji dio (B) je pod utjecajem pritoka i njihovih slivova. Donji dio (C) je pod utjecajem rukavca rijeke Dunav koji ima značajan utjecaj na visoke vodostaje. Zbog toga je ova dionica ugrožena poplavama i Drave i Dunava, no utjecaj visokih vodostaja rijeke Drave znatno je oslabio nakon izgradnje brana i regulacije dotoka s uzvodnog dijela.

2.3.1. Mjerne postaje

Hidrološke mjerne postaje koje će se analizirati su: Varaždin, Donja Dubrava, Botovo i Terezino Polje.

Mjerna postaja Varaždin (Slika 6.) započela je s radom 1. 1. 1821. godine i pripada skupini najstarijih hidroloških postaja koje su uspostavljene još za vrijeme Austro-Ugarske Monarhije. Ova postaja ima kontinuirani zapis vodostaja i sustav daljinske dojava podataka u skoro realnom vremenu. Nalazi se na desnoj obali Drave, uzvodno od mosta Varaždin - Čakovec, neposredno nakon spajanja starog korita Drave i odvodnog kanala HE Varaždin. Kota „0“ vodostaja iznosi 166,063 m n/m i nije se mijenjala u cijelom razdoblju mjerenja [19]. Mjerenja koja se provode na toj mjernoj postaji prikazuje Tablica 1.



Slika 6. Mjerna postaja Varaždin

Tablica 1. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja te ekstremi na mjernoj postaji Varaždin [19]

| VRSTA MJERENJA | GODINE MJERENJA | EKSTREMI | |
|----------------------|--------------------|--|--------------------------------------|
| | | MIN. | MAX. |
| VODOSTAJ | 1900. - 2023. | 9.12.1978. -106 cm | 5.9.1965. 424 cm |
| PROTOK | 1957. - 1981. | 25.12.1977. 22,13 m ³ /s | 21.8.1966. 2842 m ³ /s |
| TEMPERATURA | 1954. – 2023. | 2. 1. 1954. 0,0 °C | 21.7.1964. 27,0 °C |
| KONCENTRACIJA | 1967. – 1984. | 6. 12. 1975. 0,020 g/m ³ | 10.9.1967. 496 g/m ³ |
| PRONOS | 1967. – 1981. | 6.12.1975. 0,430 t | 26.9.1973. 45164 t |

Mjerna postaja Donja Dubrava (Slika 7.) započela je s radom 28.12.1977. godine i pripada tipu postaje s automatskom dojavom vodostaja u skoro realnom vremenu. Ovo je ujedno i prva hidrološka postaja na rijeci Dravi u Hrvatskoj na kojoj se mjeri protok. Nalazi se na lijevoj obali Drave, neposredno nakon spajanja starog korita Drave i odvodnog kanala iz HE Donja Dubrava. Kota „0“ vodostaja iznosi 129,700 m n/m i nije se mijenjala u cijelom razdoblju mjerenja [19]. Mjerenja koja se provode na ovoj mjernoj postaji prikazuje Tablica 2.

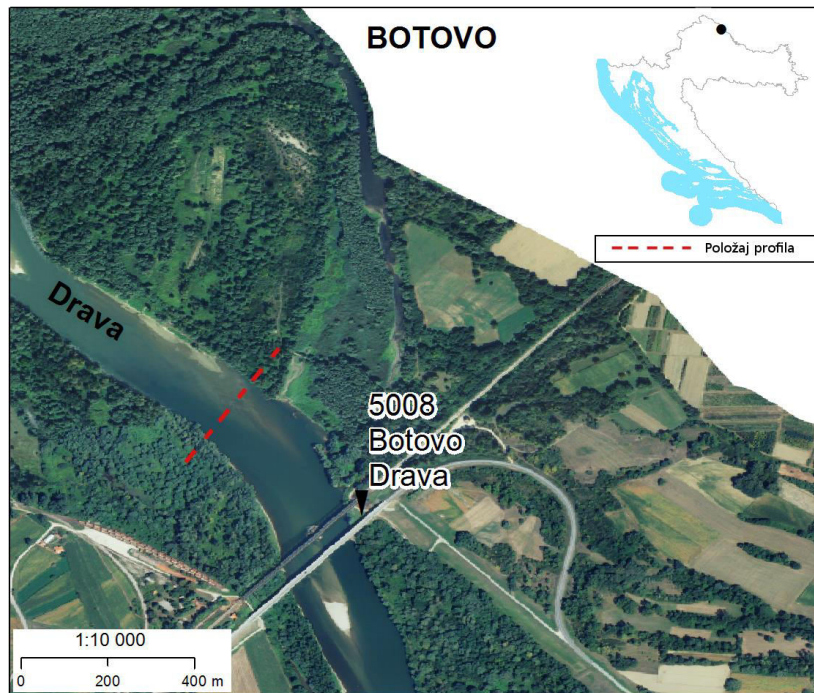


Slika 7. Mjerna postaja Donja Dubrava [19]

Tablica 2. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja i ekstremi na mjernoj postaji Donja Dubrava [19]

| VRSTA MJERENJA | GODINE MJERENJA | EKSTREMI | |
|----------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | | MIN. | MAX. |
| VODOSTAJ | 1978. – 2023. | 20.4.2003. -218 cm | 5.7.1989. 418 cm |
| PROTOK | 1978. – 2023. | 31.8.2002. 19,10 m ³ /s | 7.11.2012. 2061 m ³ /s |
| TEMPERATURA | 1986. – 2021. | 30.1.1987. 0,1 °C | 25.7.2015. 26,6 °C |
| KONCENTRACIJA | 1985. – 1990. | 9.12.1989. 0,160 g/m ³ | 9.11.1986. 340 g/m ³ |
| PRONOS | 1985. – 1990. | 9.12.1989. 1,091 t | 28.6.1986. 6253 t |

Mjerna postaja Botovo (Slika 8.), isto kao i Donja Dubrava, pripada tipu postaje s automatskom dojavom vodostaja u skoro realnom vremenu. Započela je s radom 1.1.1873. godine i pripada u skupinu najstarijih hidroloških postaja u sklopu državne mreže koje su uspostavljene još za vrijeme Austro-Ugarske Monarhije. Nalazi se na lijevoj obali Drave uzvodno od željezničkog mosta pruge Koprivnica – Mađarska. Kota „0“ vodostaja iznosi 121,550 m n/m i nije se mijenjala u cijelom razdoblju mjerenja [19]. Tablica 3. prikazuje mjerenja koja se provode na toj mjernoj postaji.

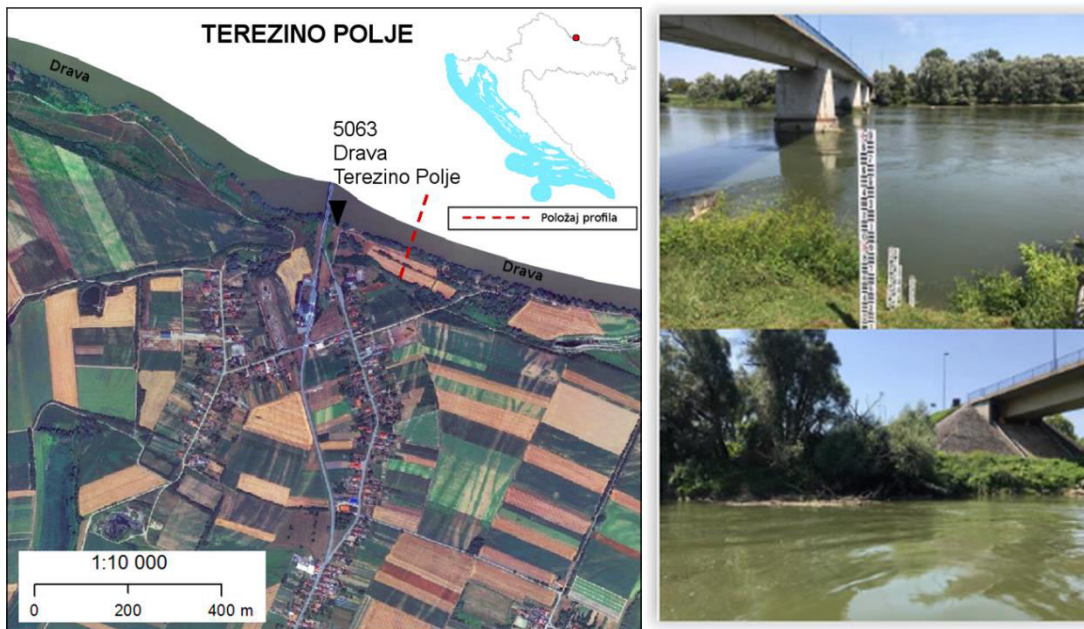


Slika 8. Mjerna postaja Botovo

Tablica 3. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja i ekstremi na mjernoj postaji Botovo [19]

| VRSTA MJERENJA | GODINE MJERENJA | EKSTREMI | |
|----------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| | | MIN. | MAX. |
| VODOSTAJ | 1926. – 2023. | 16.9.2014. 577 cm | 6.1.1940. - 200 cm |
| PROTOK | 1926. – 1943. 1946. – 2023. | 25.12.2001. 72,69 m ³ /s | 18.7.1972. 2652 m ³ /s |
| TEMPERATURA | 1969. – 1989. 1991. – 2023. | 1.1.1969. 0,0 °C | 15.8.1988. 26,5 °C |
| KONCENTRACIJA | 1967. – 2023. | 2.4.2020. 0,020 g/m ³ | 23.8.2005. 701,0 g/m ³ |
| PRONOS | 1967. – 2023. | 15.1.2012. 0,544 t | 23.8.2005. 66216 t |

Zadnja analizirana mjerna postaja je Terezino Polje (Slika 9.) koja je započela s radom 1.1.1872. te također pripada u skupinu najstarijih hidroloških postaja u sklopu državne mreže koje su uspostavljene još za vrijeme Austro-Ugarske. Postaja se nalazi na desnoj obali Drave, s nizvodne strane cestovnog mosta Terezino Polje - Barcs na kojem je i međudržavni granični prijelaz između Republike Hrvatske i Republike Mađarske. Postaja ima kontinuirani zapis vodostaja s daljinskom dojavom podataka u skoro realnom vremenu. Kota „0“ vodostaja iznosi 100,671 m n/m i nije se mijenjala u cijelom razdoblju mjerenja [19]. Podaci o vrstama mjerenja i godinama njihove provedbe, uključujući ekstremne događaje za vrijeme mjerenja prikazuje Tablica 4.



Slika 9. Mjerna postaja Terezino Polje

Tablica 4. Vrste mjerenja, godine provedbe tih mjerenja i ekstremi na mjernoj postaji Terezino Polje [19]

| VRSTA MJERENJA | GODINE MJERENJA | EKSTREMI | |
|----------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | MIN. | MAX. |
| VODOSTAJ | 1925. – 1940. 1942. – 1943. 1946. – 2023. | 4.1.2016. -374 cm | 19.7.1972. 403 cm |
| PROTOK | 1961. – 2023. | 21.1.2002. 110,8 m ³ /s | 19.7.1972. 2889 m ³ /s |
| TEMPERATURA | 1969. – 1989. 1992. – 1996. 1998. – 2023. | 1.1.1969. 0,0 °C | 25.7.2015. 27,0 °C |
| KONCENTRACIJA | 1990. – 2023. | 8.3.2020. 0,000 g/m ³ | 28.10.1993. 694,0 g/m ³ |
| PRONOS | 1990. – 2023. | 11.3.2015. 0,000 t | 28.10.1993. 126221 t |

2.3.2. Vodostaj

Maksimalni, minimalni i srednji (prosječni) godišnji vodostaji prikazani su za četiri hidrološke mjerne postaje: Varaždin (Slika 10.), Donja Dubrava (Slika 11.), Botovo (Slika 12.) i Terezino Polje (Slika 13.).

Na postaji Varaždin maksimalni godišnji vodostaji imaju negativni trend, dok minimalni i prosječni pokazuju pozitivni trend. To se može objasniti utjecajem uzvodnih akumulacija i radom hidroelektrana u Sloveniji koje smanjuju odnosno zadržavaju maksimalne protoke u akumulacijama. Na smanjenje maksimalnih godišnjih vodostaja utječu i klimatske promjene, odnosno smanjenje prosječnih godišnjih oborina na slivu, sve manje količine snijega i kiše na uzvodnim dijelovima sliva u Austriji i Sloveniji. Na prvom grafu (Slika 10.) vidljivo je da nakon 1982. godine (žuta linija)

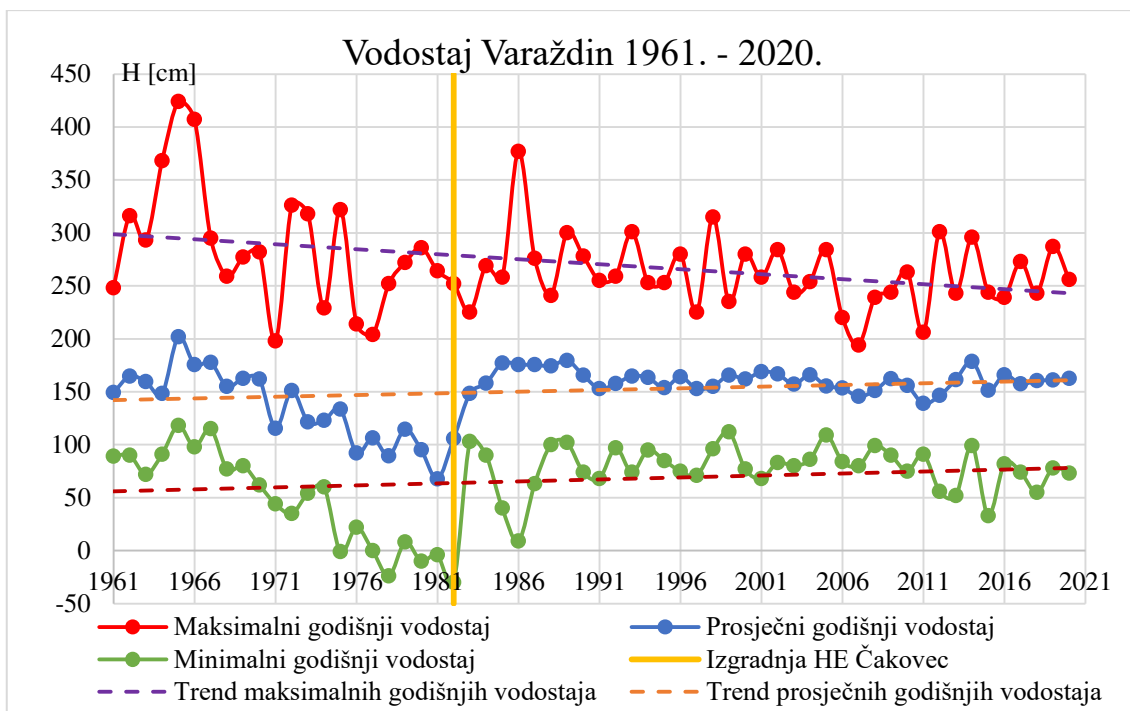
vodostaji postaju ujednačeniji što je rezultat izgradnje akumulacije Čakovec i stvaranja uspora.

Na postaji Donja Dubrava zabilježeni su negativni trendovi maksimalnih, minimalnih i prosječnih godišnjih vodostaja. Razlog tome je što se voda zadržava u uzvodnim akumulacijama HE Varaždin, HE Čakovec i HE Donja Dubrava te se nizvodno kroz korito Drave ispušta samo kontrolirani protok koji je posljedica rada hidroelektrana te režim vodostaja tijekom godine ovisi o tim protocima. Značajan utjecaj ima izgradnja HE Donja Dubrava 1989. godine čime vodostaji postaju ujednačeniji što prikazuje Slika 11.. Također dolazi do procesa produbljivanja riječnog korita na cijelom donjem dijelu rijeke Drave nizvodno od ušća rijeke Mure kod Legrada. Radi se o općem i dugotrajnom procesu, koji je većinom uzrokovan izgradnjom triju hrvatskih akumulacija, odnosno brana koje zadržavaju i sprječavaju pronos nanosa nizvodno [18].

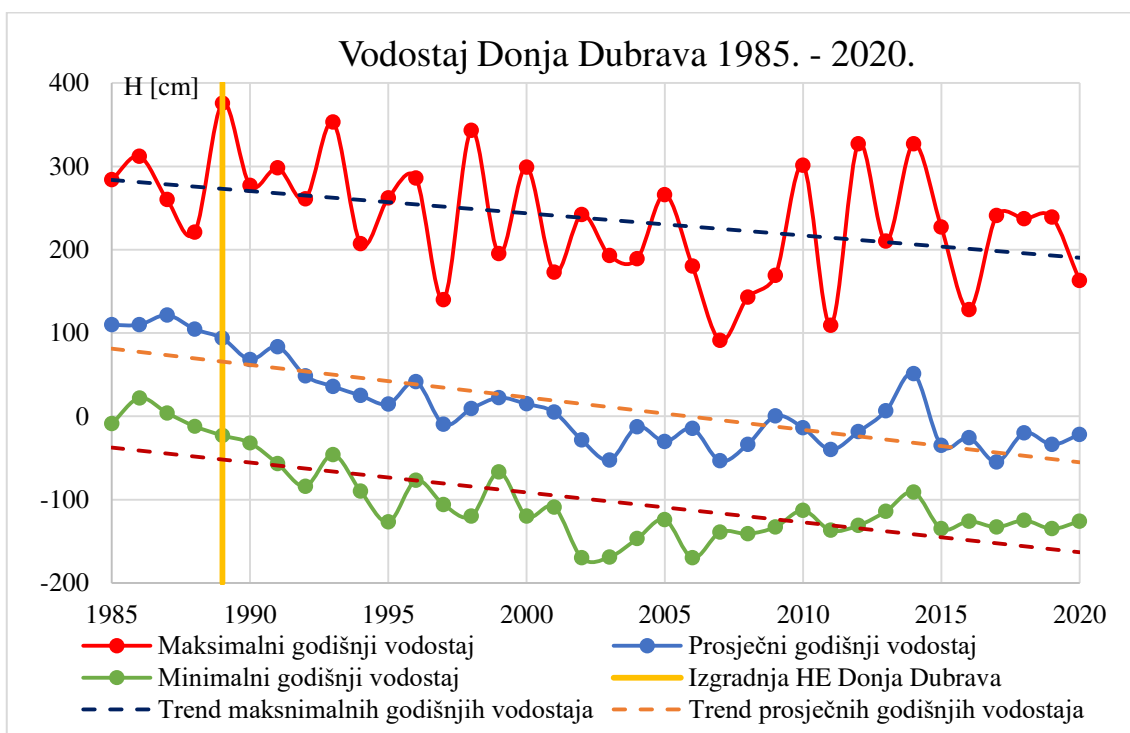
Velike oscilacije vodostaja tijekom dana vezane su uz režim rada hidroelektrana na Dravi i mogu imati značajnije negativne posljedice na ekološki sustav, upravljanje vodama, korištenje voda, režim nanosa i posebno na kvalitetu vode [2].

Na mjernoj postaji Botovo, javljaju se pozitivni trendovi maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih vodostaja. Vodostaji nakon 1989. godine su ujednačeniji zbog izgradnje HE Donja Dubrava što prikazuje Slika 12., iako promjene u vodostajima se događaju već i oko 1982. nakon izgradnje HE Čakovec.

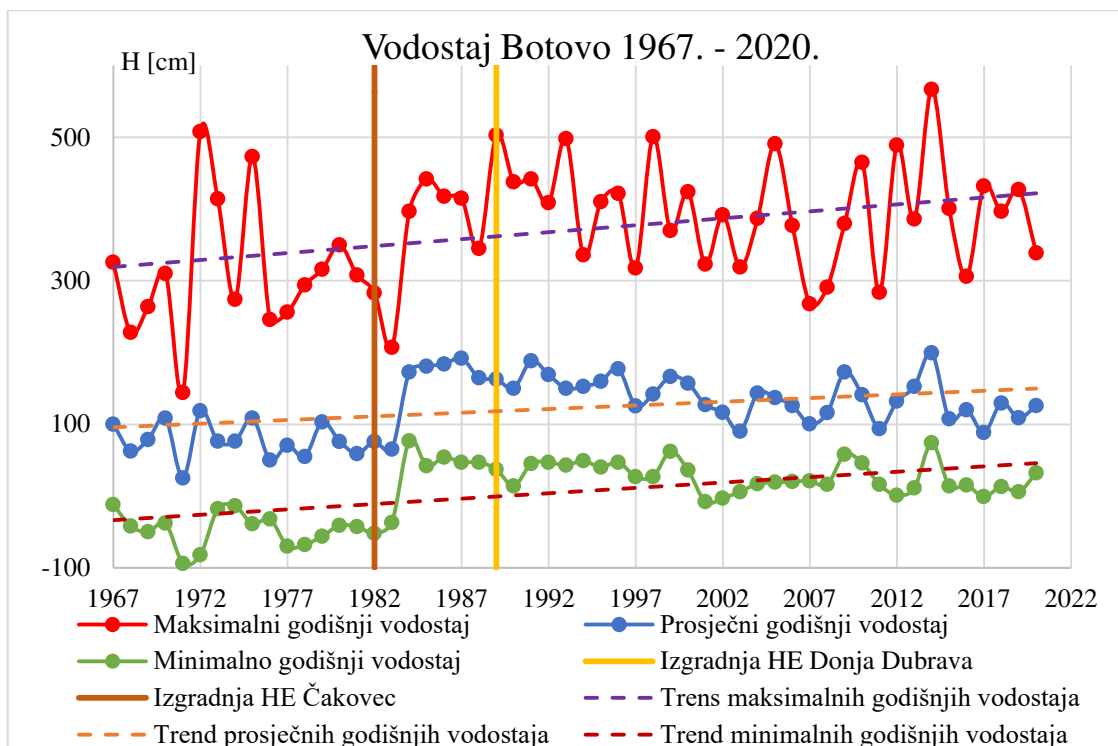
Na mjernoj postaji Terezino Polje svi trendovi vodostaja su negativni, a utjecaj rada hidroelektrana zbog udaljenosti se ne osjeća u tako velikoj mjeri kao na Botovu.



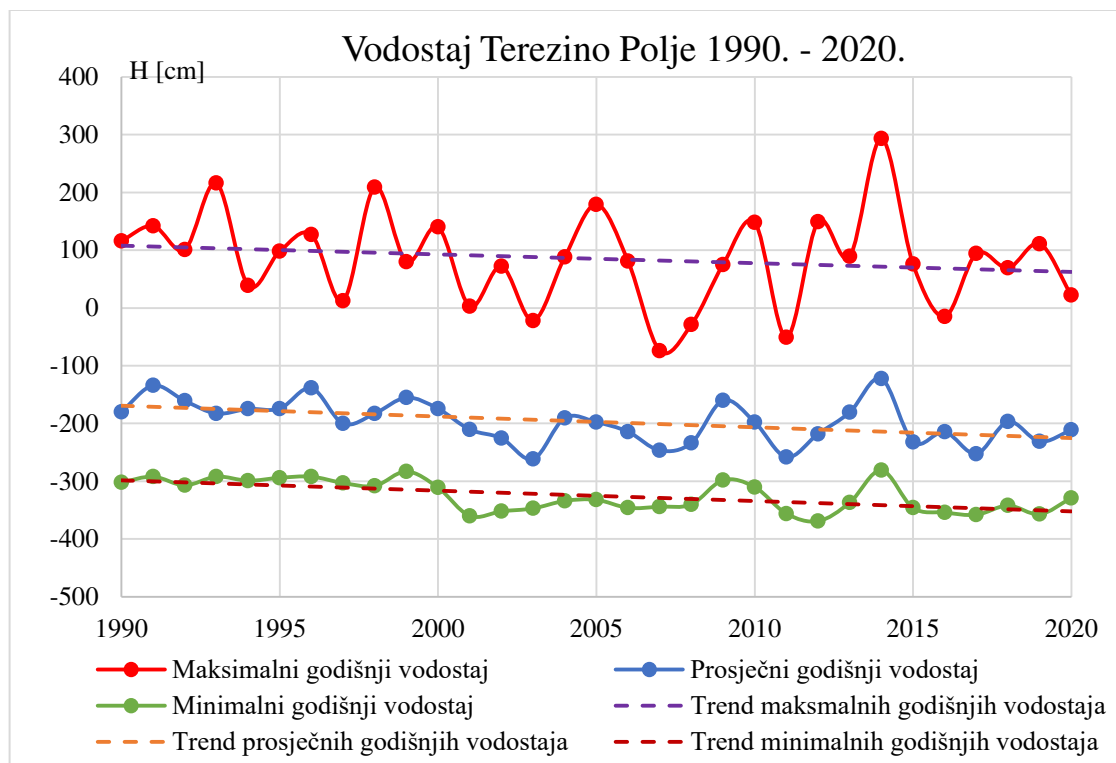
Slika 10. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernei postaji Varaždin u razdoblju od 1961. do 2020. sa trendovima



Slika 11. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernei postaji Donja Dubrava u razdoblju od 1985. do 2020. sa trendovima



Slika 12. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernoj postaji Botovo u razdoblju od 1967. do 2020. sa trendovima



Slika 13. Maksimalni, prosječni i minimalni godišnji vodostaji na mjernoj postaji Terezino Polje u razdoblju od 1990. do 2020. sa trendovima

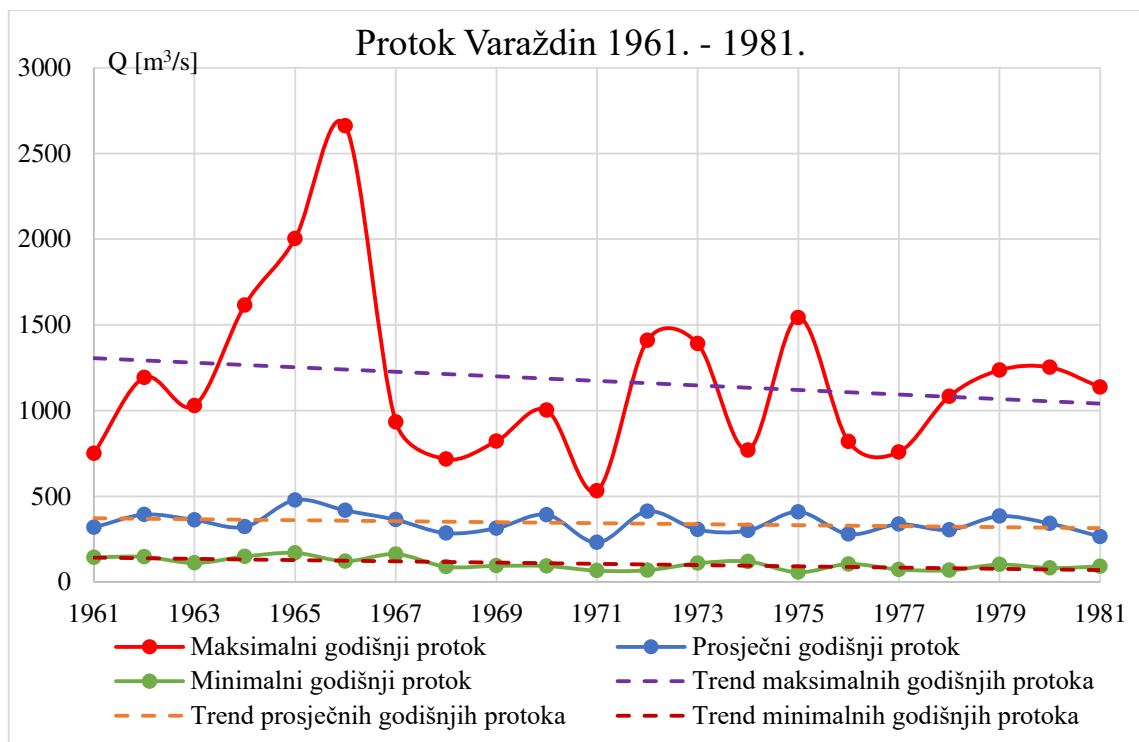
2.3.3. Protok

Analiza protoka provedena je za četiri hidrološke postaje: Varaždin (Slika 14.), Donja Dubrava (Slika 15.), Botovo (Slika 16.) i Terezino Polje (Slika 17.).

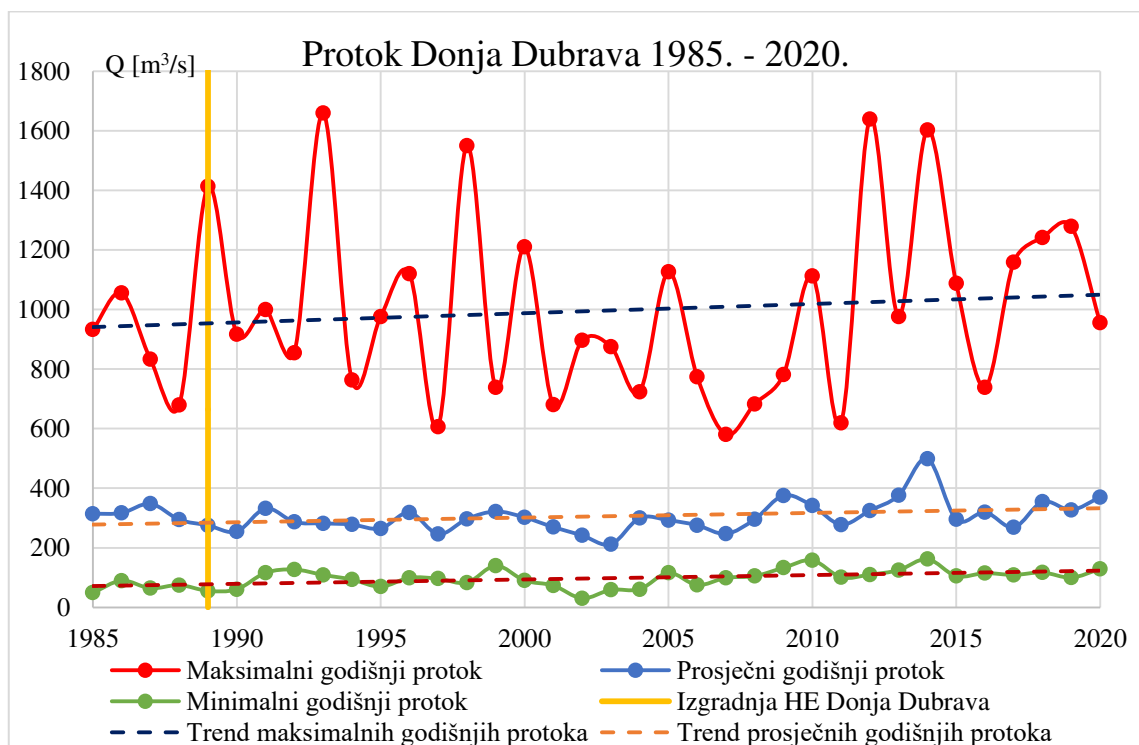
Na postaji Varaždin od 1981., kada je izgrađena akumulacija za HE Čakovec, protoci se zbog uspora više ne mjere [2]. Na mjernim postajama Varaždin i Botovo uočava se smanjenje srednjih (prosječnih) godišnjih protoka, dok na mjernim postajama Donja Dubrava i Terezino Polje vidi se blagi porast srednjih godišnjih protoka. Razlog smanjenja srednjih godišnjih protoka može se objasniti antropogenim utjecajem na hidrološki režim rijeke Drave. Promjene u protočnom režimu, ponajprije kod srednjih i minimalnih protoka na svim hidrološkim postajama mogu se povezati s početkom rada triju akumulacija velikih hrvatskih HE i posljednje slovenske HE Zlatoličje (1968. godine), koja se nalazi uzvodno od HE Varaždin. Isparavanje iz tri hrvatske akumulacije u prosjeku iznosi $1\text{ m}^3/\text{s}$, a gubici vode iz odvodnih kanala u prosjeku su manji od $1\text{ m}^3/\text{s}$ [18].

Također došlo je i do promjene u zemljišnom pokrovu koje su uzrokovale promjene u površinskoj drenaži u manjim podslivovima rijeke Drave u Hrvatskoj i Mađarskoj [3].

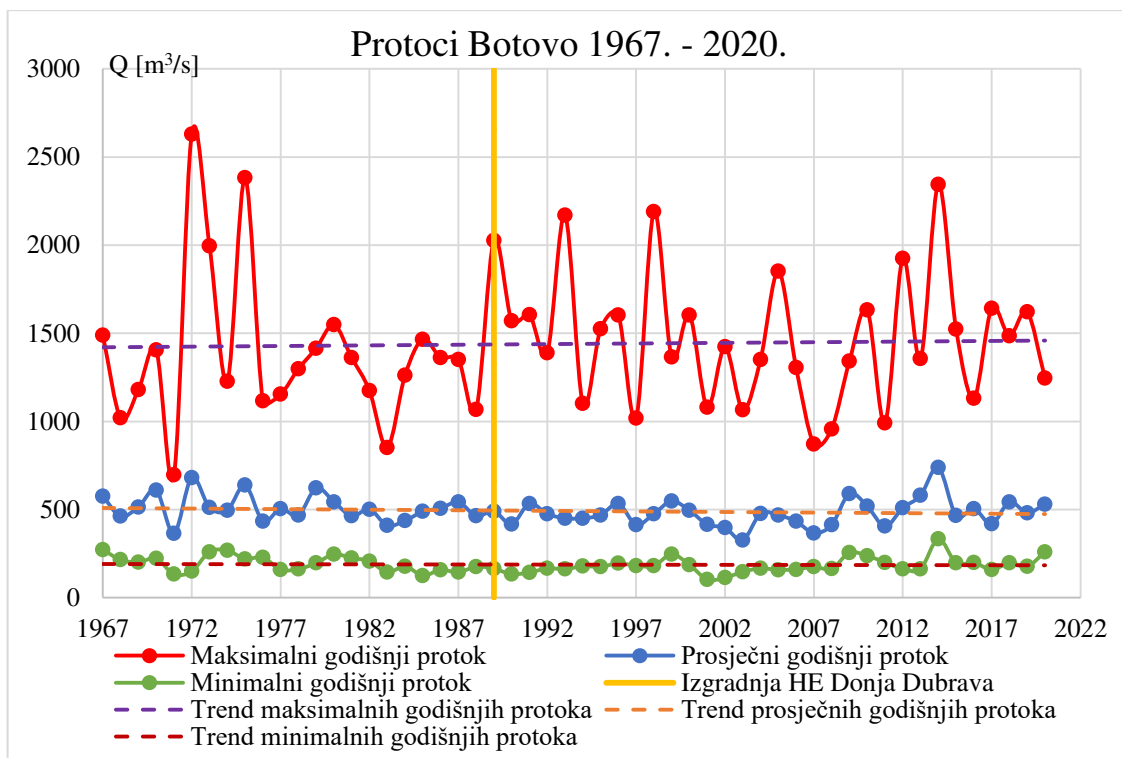
Ne smije se zanemariti ni utjecaj klimatskih promjena, pogotovo utjecaj snijega i njegov doprinos ukupnom protoku. Naime, od ranih 1970-ih broj dana sa snježnim pokrivačem kao i njegova debljina na uzvodnom dijelu sliva koji pripada Austriji i Sloveniji, ali i u kontinentalnoj Hrvatskoj, je znatno smanjen [20].



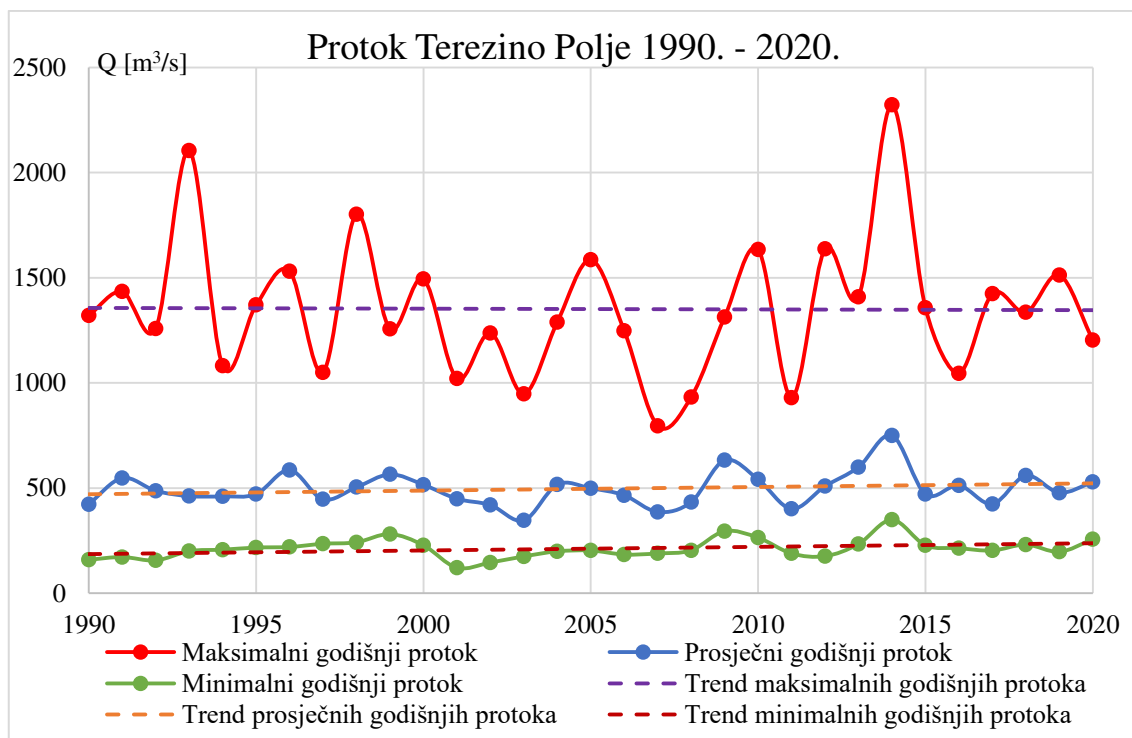
Slika 14. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] za mjernu postaju Varaždin u razdoblju od 1961. do 1981. sa trendovima



Slika 15. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] za mjernu postaju Donja Dubrava u razdoblju od 1985. do 2020. sa trendovima



Slika 16. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] na mjernoj postaji Botovo u razdoblju od 1967. do 2020. sa trendovima



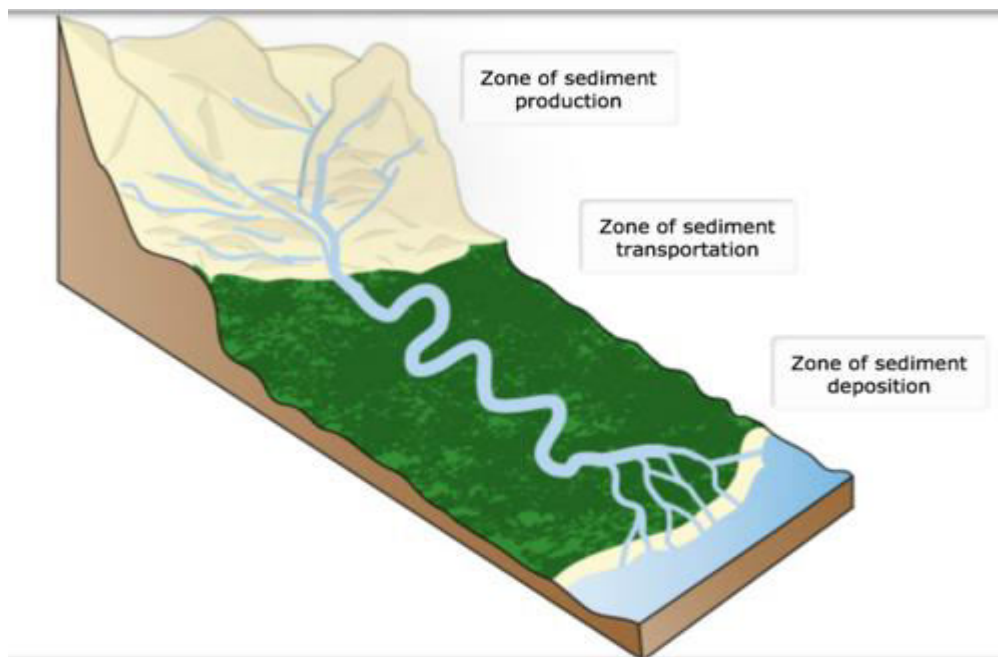
Slika 17. Grafički prikaz maksimalnih, prosječnih i minimalnih godišnjih protoka Q [m^3/s] na mjernoj postaji Terezino Polje u razdoblju od 1990. do 2020. sa trendovima

3. VRSTE NANOSA

Procesi erozije, dugoročno gledano, uklanjaju sediment s površine kopna, a riječna mreža transportira proizvode erozije iz pojedinačnih slivnih bazena nizvodno u glavno korito i u konačnici prema ušću. Konceptualno, sliv se može podijeliti u tri zone (Slika 18.) [21]:

- a. zona erozije ili produkcije sedimenta (strma izvorna zona koja ima veliku energiju toka i erozijsku snagu),
- b. transportnu zonu (kroz koju se sediment više ili manje premješta bez neto dobitka ili gubitka)
- c. zona taloženja.

Promjene u veličini zrna sedimenta događaju se longitudinalno, kako se sediment kaskadno kreće nizvodno, odražavajući promjene energije toka i učinke trošenja i abrazije [22]. Tako se i na rijeci Dravi mogu identificirati tipični riječni morfološki procesi poput armiranja na uzvodnom dijelu i erozije riječnog korita nizvodno od akumulacija [23].



Slika 18. Podjela toka rijeke u 3 zone: 1. zona nastanka nanosa, 2. zona transporta nanosa i 3. zona taloženja nanosa [24]

Prema sastavu nanos se može podijeliti na organski (lisnata i drvena materija), anorganski (petrografski sastav) i kemijski (utjecaj otpadnih voda poput kanalizacije i procjednih voda s poljoprivrednih zemljišta, ostaci različitih kemijskih procesa u industriji, građevinarstvu, rudarstvu). Anorganski nanos najčešće nastaje pod utjecajem oborina koje izazivaju eroziju na slivu, i to površinskom i dubinskom erozijom. Površinska erozija nastaje djelovanjem površinskog otjecanja koje ispire čestice tla i putem vode ih donosi u vodotoke te tako nastaje lebdeći (suspendirani) nanos. Do dubinske erozije dolazi uslijed djelovanja jakog površinskog otjecanja, kada nastaju bujice i vododerine, i tada uglavnom nastaje vučeni nanos [25].

Prema načinu pronosa nanos se dijeli na: suspendirani (lebdeći) nanos i vučeni nanos. Suspendirani (lebdeći) nanos je nanos koji ostaje u suspenziji tijekom nekog vremena u tekućoj vodi bez taloženja ili dodira s koritom [25]. Suspendirani nanos se može podijeliti na 2 komponente: koritiformirajući i tranzitni. Koritiformirajući nanos se povremeno taloži, a povremeno pokreće u mješavini s vodom, a tranzitni se ne taloži uopće [26].

Vučeni nanos je prema definicijama koritiformirajući [26]. Sastoji od krupnijih čestica pijeska, šljunka, mulja, komada stijena koje vučna sila toka vode vuče po dnu korita [25]. Opće je prihvaćeno da će količina suspendiranog nanosa u nekom vodotoku biti mnogo veće od koritiformirajućeg. Odnos je općenito unutar granica 85 – 99% za suspendirani i 1 – 15% za koritiformirajući. Točni omjeri ovisit će o transportnoj snazi rijeke, hidrološkom režimu, geološkoj građi sliva i antropogenim djelatnostima (poljoprivreda, industrija, visokogradnja, regulacija rijeke, itd.) [27].

Granica između suspendiranog i vučenog nanosa određuje se pomoću Froud – ovog broja (1). Ako je Froud – ov broj manji od 19 radi se o suspendiranom nanosu, a ako je veći od 19 onda se radi o vučenom nanosu.

$$F_r^2 = \frac{v^2}{g \cdot d} \quad (1)$$

Gdje je:

Fr – Froudeov broj,

v – brzina toka vode [m/s],

g – gravitacija [m/s²],

d – promjer zrna [mm].

Ova podjela se ne može smatrati fiksnom jer je granična krupnoća zrna između ova dva tipa nanosa promjenjiva duž toka i vremenu jer ovisi o brzini toka, geološkoj građi sliva, transportnoj snazi toka koji se također mijenjaju ovisno o vremenu i mjestu toka.

Nanos se u riječnom toku može kretati povlačenjem ili kotrljanjem po koritu (koritoformirajući), skakutanjem (saltacijom), u suspendiranom stanju (suspendirani nanos) te preko površine toka uslijed površinske napetosti vode (flotacija). Ako je opterećenje toka manje od transportnog kapaciteta toka, koritoformirajući nanos je uključen u kretanje i dolazi do pokretanja nanosa i erozije dna i obala. Kada opterećenje toka nanosom premaši transportni kapacitet, dolazi do taloženja pokretnog nanosa. Samo u slučaju kada je opterećenje toka nanosom u ravnoteži sa transportnim kapacitetom, u vodotoku se uspostavlja dinamička ravnoteža između procesa suspenzije i taloženja [28].

3.1. SUSPENDIRANI NANOS

Suspendirani nanos u otvorenom vodotoku rezultat je erozije tla i transporta unutar slivnog područja, a posebno u samom koritu rijeke. Sediment nastaje trošenjem izloženih stijena i kretanjem rastresitog materijala nizbrdo, sa ili bez pomoći toka kopnene vode [18]. Suspendirani nanos rijeke sastoji se prvenstveno od sitnijih frakcija: pijeska, gline, praha i mulja [27]. U isto vrijeme on prenosi nutrijente, služi kao stanište biljnim i životinjskim organizmima, prenosi organske materijale, mikroorganizme, sjemenke, razne kemijske elemente i spojeve, opasne onečišćivače, itd. [11]. Poznato je da se kohezivni suspendirani sediment prenosi primarno kao flokulirani materijal, a flokule predstavljaju složenu matricu mikrobnih zajednica, organskih čestica,

anorganskih čestica (npr. glina i muljeva) i značajnih međuflokalnih prostora (pora), koji omogućuju zadržavanje ili protok vode. Flokule značajno utječu na promjenu hidrodinamike sastavnih čestica na način da modificiraju njihove efektivne veličine, oblike, gustoće i poroznosti, što dalje utječe na transport sedimenta i povezanih onečišćivača [29]. Količina suspendiranog sedimenta rijeke odražavat će procese denudacije koji se odvijaju u uzvodnom slivu, a točnije [27]:

- a. izvor materijala: npr. potječe li od površinske erozije, kretanja masa, erozije vododerine ili erozije korita i obala vodotoka
- b. stupanj produkcije sedimenta koji je u funkciji količine oborina te fizičkih osobina sliva kao što su: vrsta i sastav tla, topografija sliva, gustoća i vrsta vegetacijskog pokrova i način obrade zemljišta.

Izvori materijala koji se prenosi u suspenziji i procesi koji rezultiraju transport nanosa postaju sve više pod utjecajem ljudskih aktivnosti, kao što su: poljoprivreda, industrija, rudarstvo i urbanizacija. Urbana područja postala su posebno značajni uzroci kontaminacije nanosa s prometnicama i produkcije otpadnih voda i njihovih ispusta bez prethodnih tretmana u vodotoke.

Početak analize suspendiranog nanosa je određivanje njegove koncentracije koja se provodi na više načina [27]:

- prikupljanjem referentnih uzoraka vode uzorkivačima – metoda filtracije,
- određivanje koncentracije sedimenta gravimetrijski ili optičkim metodama,
- izravnim mjerenjem količine materijala dopremljenog u rijeku erozijom kanala i povezanim izvorima,
- mjerenjem količine taloženog sedimenta u jezerima, retencijskim rezervoarima, deltama, estuarijima i obalnim područjima

Postoji direktna veza između koncentracije suspendiranog nanosa i protoka, pri čemu se koncentracije nanosa povećanja s većim protokom. Uz pretpostavku da je povećanje protoka uzrokovano oborinama ili topljenjem snijega, javljaju se veće brzine toka koje imaju sposobnost erozije tla i transporta veće krupnoće i količine nanosa. Posljedica toga je povećanje opskrbe rijeka nanosom. Sastav veličine čestica suspendiranog nanosa i sadržaj organske tvari pod snažnim je utjecajem sastava veličine čestica izvornog

materijala, koji varira ovisno o vrsti (npr. površinski sloj tla, materijal s obale kanala, resuspendirani sloj, itd.) [22].

3.2. KORITOFORMIRAJUĆI NANOS

Koritoformirajući nanos transportira se koritom rijeke kotrljanjem, klizanjem ili poskakivanjem. Kod jačeg turbulentnog toka, sitnije frakcije se mogu trenutno podići s dna i pokrenuti nizvodno u suspenziji. Upravo zbog ove raznolikost transportnih mehanizama otežava se kvantificiranje nanosa kao koritoformirajućeg [27]. Brzina transporta prvenstveno je kontrolirana protokom vode [22]. Količina transportiranog koritoformirajućeg nanosa prvenstveno ovisi o prirodnim čimbenicima, kao što su geologija, morfologija i geometrija riječnog korita, te o antropogenim aktivnostima. Jedan od glavnih problema koji proizlazi iz mjerenja pronosa ovog nanosa je činjenica da je u prirodnim uvjetima, kretanje koritoformirajućeg nanosa vrlo nestabilan proces kako duž toka tako i tijekom vremena te se mogu očekivati varijacije u rezultatima mjerenja veće i od 50% [30].

Vrijednosti koritoformirajućeg nanosa često su pod značajnim utjecajem subjektivnih čimbenika, ovisno o korištenoj metodi i provedenoj analizi. Za kvantitativno mjerenje koritoformirajućeg nanosa koriste se mnoge metode. Među najčešće korištenim pristupima su:

- povremeni ili trajno postavljeni „hvatači“ po cijelom presjeku vodotoka koji, ovisno o lokaciji, mogu privremeno biti raspoređeni na različitim mjestima u riječnom koritu,
- izravna mjerenja kretanja čestica pomoću tragača ili markera, uključujući oslikano kamenje, fluorescentni pijesak, magnetski materijal, radioaktivni materijal, magnetske detektore itd.,
- izravna mjerenja intenziteta transporta pijeska, akustični i magnetski uređaji,
- sedimentacija u jezerima i deltama praćenjem promjena oblika dna, kao što su valovi i dine [27].

Informacije o transportu koritoformirajućeg nanosa vrlo su korisne za procjenu stupnja erozije u koritu, za opisivanje dinamike pronosa sedimenta i za procjenu

geomorfološkog učinka transporta sedimenta. Ove informacije mogu biti vrlo vrijedne kao podloge kod projektiranja i izgradnje hidrotehničkih objekata [22].

4. METODOLOGIJA PRORAČUNA NANOSA U RIJEKAMA

U Republici Hrvatskoj monitoring nanosa provodi Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ), Sektor za hidrologiju. Prati se pronos suspendiranog nanosa i granulometrijski sastav suspendiranog nanosa i nanosa s dna na nekim lokacijama [31]. Do 1990 - tih godina, na nekim kritičnim lokacijama vršila su se i povremena mjerenja vučenog nanosa koji se kreće po dnu, ali se ta mjerenja trenutno više ne provode.

4.1. IZRAČUN KONCENTRACIJE SUSPENDIRANOG NANOSA

4.1.1. Na temelju diskretnih uzoraka vode

Koncentracija suspendiranog nanosa predstavlja masu suspendiranog nanosa u jedinici volumena vode te se najčešće izražava u kg/m^3 ili g/l . U Republici Hrvatskoj svakodnevno se uzimaju uzorci u suradnji s motriteljskom službom na hidrološkim postajama [31], a za pojašnjenje metode koriste se podaci s mjerne postaje Drava - Botovo. Podatke prilikom uzrokovanja, laboratorijske analize i krajnji izračun prikazuje Tablica 5..

Motritelj jednom dnevno uzima uzorak vode i preljeva ga preko filter papira gustoće $0,45 \mu\text{m}$ (Slika 19.). Filter papir, koji se koristi za filtriranje uzoraka, je tipa "Munktell" 100/N, promjera 320 mm, gustoće 85 g/m^2 . Na kraju mjeseca se upotrijebljeni filteri šalju u DHMZ na laboratorijsku analizu standardnom metodom ISO 4365:2005. Ta metoda uključuje sušenje uzorka na $105 \text{ }^\circ\text{C}$, hlađenje i na kraju vaganje (Slika 20.) [31]. Koncentracija suspendiranog nanosa u g/m^3 dobije se na osnovi razlike između praznog i punog filter papira prema izrazu (2).

$$K = \frac{ft(\text{procijeđen}) - ft(\text{čist})}{\text{količina uzorka}} \cdot 1000 \quad (2)$$

Gdje je:

ft (procijeđen) – masa filter papira nakon procjeđivanja uzorka [g]

ft (čist) – masa čistog filter papira prije upotrebe [g]

Cijela jednačina se množi sa 1000 kako bi krajnji rezultat bio u g/m^3 što je objašnjeno u dimenzionalnoj analizi (3).

$$\frac{g}{l} = \frac{g}{dm^3} \frac{1000 dm^3}{m^3} = \frac{g}{m^3} \cdot 1000 \quad (3)$$

Dobiveni podatak se smatra dnevnom vrijednošću koncentracije suspendiranog nanosa na određenoj mjernoj lokaciji. Na osnovi tih dnevnih koncentracija suspendiranog nanosa proračunavaju se dnevne, mjesečne i godišnje količine pronosa suspendiranog nanosa na nekom mjernom profilu [31].



Slika 19. Uzorkovanje vode za analizu suspendiranog nanosa [31]



Slika 20. Laboratorijska obrada dnevnik uzoraka filter papira s mjernih postaja, sušenje uzoraka u laboratoriju DHMZ-a [31]

Tablica 5. Prikaz podataka i izračun dnevnih koncentracije suspendiranog nanosa (crveno) na temelju diskretnog uzorka vode, na mjernejoj postaji Drava - Botovo u siječnju 2019. godine

| MJESEČNI IZVJEŠTAJ MOTRENJA SUSPENDIRANOG NANOSA | | | | | | | | | | Vodotok | DRAVA |
|---|-------|---------------|---------------------|--------------|-----------|-----------------|---------|--------------|---------|-----------------------|--------|
| | | | | | | | | | | Vodokaz | BOTOVO |
| Godina: 2019. Mjesec: SIJEČANJ | | | | | | | | | | Profil | 5008 |
| Datum | Sat | Vodostaj (cm) | Količina uzorka (l) | Broj filtera | Boja vode | Prirodne pojave | ft/čist | ft/procjeden | g (g/l) | K (g/m ³) | |
| 1.1. | 10,00 | 46 | 5 | 4722 -8 | siva | vedro | 6,8520 | 6,8633 | 0,0113 | 2,26 | |
| 2.1. | 12,10 | 42 | 5 | 4723 -8 | siva | oblačno | 6,6305 | 6,6378 | 0,0073 | 1,46 | |
| 3.1. | 14,00 | 48 | 5 | 4724 -8 | siva | oblačno | 6,5939 | 6,6011 | 0,0072 | 1,44 | |
| 4.1. | 8,40 | 18 | 5 | 4725 -8 | siva | oblačno | 6,8064 | 6,8067 | 0,0003 | 0,06 | |
| 5.1. | 13,10 | 54 | 5 | 4726 -8 | siva | snijeg | 6,6068 | 6,6203 | 0,0135 | 2,70 | |
| 6.1. | 10,40 | 32 | 5 | 4727 -8 | siva | oblačno | 6,5491 | 6,5603 | 0,0112 | 2,24 | |
| 7.1. | 11,10 | 52 | 5 | 4728 -8 | siva | oblačno | 6,6506 | 6,6629 | 0,0123 | 2,46 | |
| 8.1. | 14,20 | 26 | 5 | 4729 -8 | siva | oblačno | 6,6783 | 6,6836 | 0,0053 | 1,06 | |
| 9.1. | 8,10 | 18 | 5 | 4730 -8 | siva | oblačno | 6,6181 | 6,6190 | 0,0009 | 0,18 | |
| 10.1. | 8,40 | 32 | 5 | 4731 -8 | siva | oblačno | 6,5855 | 6,5948 | 0,0093 | 1,86 | |
| 11.1. | 9,20 | 22 | 5 | 4732 -8 | siva | vedro | 6,4155 | 6,4288 | 0,0133 | 2,66 | |
| 12.1. | 11,20 | 24 | 5 | 4733 -8 | siva | oblačno | 6,6123 | 6,6160 | 0,0037 | 0,74 | |
| 13.1. | 10,20 | 22 | 5 | 4734 -8 | siva | oblačno | 6,5462 | 6,5528 | 0,0066 | 1,32 | |
| 14.1. | 11,15 | 14 | 5 | 4735 -8 | siva | vedro | 6,4392 | 6,4484 | 0,0092 | 1,84 | |
| 15.1. | 8,10 | 14 | 5 | 4736 -8 | siva | vedro | 6,7867 | 6,7968 | 0,0101 | 2,02 | |
| 16.1. | 10,10 | 16 | 5 | 4737 -8 | siva | vedro | 6,4995 | 6,5124 | 0,0129 | 2,58 | |
| 17.1. | 9,10 | 16 | 5 | 4738 -8 | siva | vedro | 6,4636 | 6,4769 | 0,0133 | 2,66 | |
| 18.1. | 9,20 | 14 | 5 | 4739 -8 | siva | kiša, snijeg | 6,7457 | 6,7610 | 0,0153 | 3,06 | |
| 19.1. | 11,20 | 26 | 5 | 4740 -8 | siva | oblačno | 6,5477 | 6,5564 | 0,0087 | 1,74 | |
| 20.1. | 15,10 | 16 | 5 | 4741 -8 | siva | oblačno | 6,5969 | 6,6179 | 0,0210 | 4,20 | |
| 21.1. | 8,40 | 24 | 5 | 4742 -8 | siva | oblačno | 6,4722 | 6,4869 | 0,0147 | 2,94 | |
| 22.1. | 9,20 | 34 | 5 | 4743 -8 | siva | oblačno | 6,5097 | 6,5131 | 0,0034 | 0,68 | |
| 23.1. | 9,30 | 40 | 5 | 4744 -8 | siva | oblačno | 6,7519 | 6,7596 | 0,0077 | 1,54 | |
| 24.1. | 11,10 | 14 | 5 | 4745 -8 | siva | snijeg | 6,5049 | 6,5072 | 0,0023 | 0,46 | |
| 25.1. | 8,40 | 18 | 5 | 4746 -8 | siva | oblačno | 6,4376 | 6,4479 | 0,0103 | 2,06 | |
| 26.1. | 8,30 | 16 | 5 | 4747 -8 | siva | oblačno | 6,7594 | 6,7665 | 0,0071 | 1,42 | |
| 27.1. | 8,40 | 6 | 5 | 4748 -8 | siva | vedro | 6,4430 | 6,4529 | 0,0099 | 1,98 | |
| 28.1. | 8,05 | 10 | 5 | 4749 -8 | siva | kiša | 6,4709 | 6,4756 | 0,0047 | 0,94 | |
| 29.1. | 9,20 | 12 | 5 | 4750 -8 | siva | oblačno | 6,6500 | 6,6548 | 0,0048 | 0,96 | |
| 30.1. | 8,15 | 14 | 5 | 4751 -8 | siva | oblačno | 6,4572 | 6,4642 | 0,0070 | 1,40 | |
| 31.1. | 9,10 | 46 | 5 | 4752 -8 | siva | oblačno | 6,4725 | 6,4811 | 0,0086 | 1,72 | |

Nedostatak ove metode je vremenska pristranost jer koncentracija suspendiranog nanosa u nekom vremenskom terminu kada se uzima uzroka ne može opisati stvarnu 24 – satnu raspodjelu. Poznato je da vrijednost koncentracije suspendiranog nanosa može varirati, ovisno o propagaciji ili recesiji vodnog vala, i do desetak puta [32]. Još jedan od nedostataka je da se uzorkovanje najčešće provodi uz obalu što najčešće ne može biti mjerodavni pokazatelj koncentracije suspendirane tvari u sredini vodotoka [33]. Ovaj postupak se može sa točnošću primjenjivati na manjim vodotocima koje karakteriziraju velike koncentracije nanosa i izrazita turbulencija, te je raspodjela nanosa u svim točkama poprečnog profila poprilično ujednačena. Na velikim rijekama poput Drave, gdje se javlja veliki gradijenti koncentracija nanosa po dubini i širini toka i gdje su te koncentracije vrlo male i ovise o nizu promjenjivih čimbenika u vremenu, ne može se očekivati dobra jednoznačna ovisnost između koncentracije u jednoj točki poprečnog profila i ukupnog pronosa nanosa odnosno prosječne koncentracije za cijeli profil riječnog toka [34]. To je razlog zbog provođenja mjerenja srednje profilske koncentracije.

4.1.2. Na temelju kontinuiranog mjerenja mutnoće

Na mjerodavnoj točki u protočnom profilu postavljaju se optički senzori za mutnoću (Slika 21.) kako bi se ona kontinuirano mjerila. Iz trenutnih vrijednosti mutnoće, čija mjerna jedinica je NTU, i izmjerenih dnevnih koncentracija suspendiranog nanosa (mg/l) možemo dobiti korelacijski odnos pomoću kojeg se u realnom vremenu može pratiti koncentracija suspendiranog nanosa u nekom vodotoku [33].

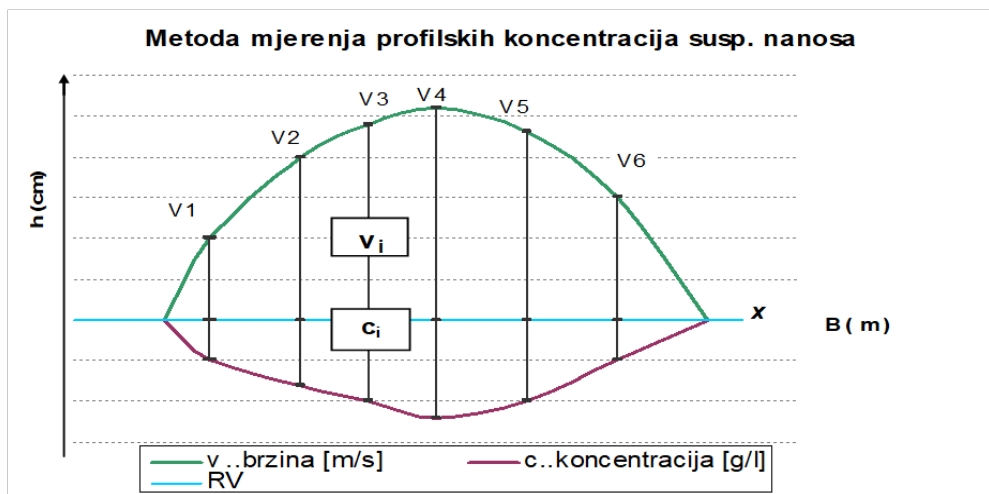
Za vrijeme velikih vodnih valova optički senzori daju precizniju vremensku raspodjelu koncentracija suspendiranog nanosa u vodotoku što je bitno jer maksimalne koncentracije u vrhu vodnih valova odstupaju nekoliko desetaka puta od prosječnih dnevnih vrijednosti. Također je moguće pomoću senzora uvesti uzorkovanje u realnom vremenu sa automatskom dojavom trenutnih koncentracija suspendiranog nanosa [34].



Slika 21. Optički senzor za mjerenje mutnoće

4.2. IZRAČUN SREDNJE PROFILSKE KONCENTRACIJE I ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA KOREKCIJE ZA DNEVNE DISKRETNE UZORKE

U prošlosti su se profilska mjerenja provodila u mjernim vertikalama kako bi se prikupio određen niz podataka za utvrđivanje srednje profilske koncentracije nanosa i trenutne količine pronosa nanosa u nekom mjernom profilu (kg/s). U poznatom poprečnom profilu, odredilo se najčešće šest vertikalala i uzorci vode su se uzimali u jednoj (površina), dvije (površina i sredina dubine) ili tri točke (površina, sredina dubine i pri dnu) po dubini svake vertikale. Broj točaka uzorkovanja po dubini vertikale određuje se na temelju zatečenih hidroloških i sigurnosnih uvjeta na terenu. U praksi najčešće se uzima uzorke s površine vodotoka te na nekoj srednjoj dubini (ovisno o dubini na vertikali). Svaki pojedinačni uzorak vode (jedna, dvije ili tri litre, ovisno o broju točaka u kojima se po vertikali provodi uzorkovanje) obrađuje se u laboratoriju, prema standardnoj filtracijskoj metodi ISO 4365:2005, kako bi se u određenoj točki dobile realne vrijednosti koncentracije suspendiranog nanosa (g/l) i brzina toka (Slika 22.).




Slika 22. Metoda mjerenja profilске koncentracije u mjernim vertikalama

Trenutna količina nanosa koji će proći tim protočnim profilom visine h i širine B definira se dvostrukim integralom [32]:

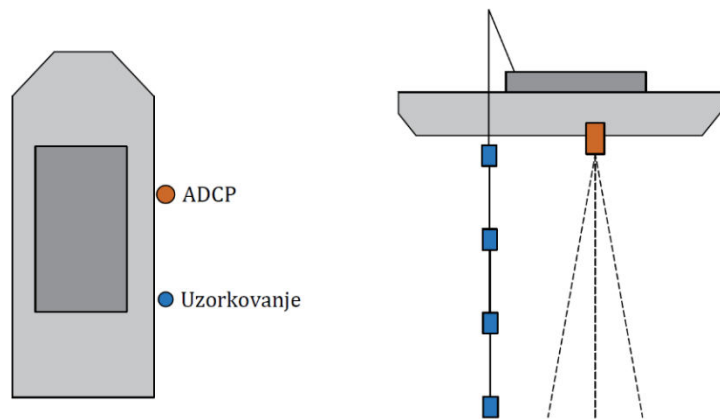
$$P = \int_0^h \int_0^B v \cdot c \, dh \, dx \quad [\text{kg/s}] \quad (4)$$

Rezultate profilskog mjerenja po vertikalama na mjernoj postaji Drava – Botovo prikazuje Slika 23. na kojoj je vidljivo da je uzorkovanje vršeno u 2 točke po vertikali (pri površini i na srednjoj dubini).

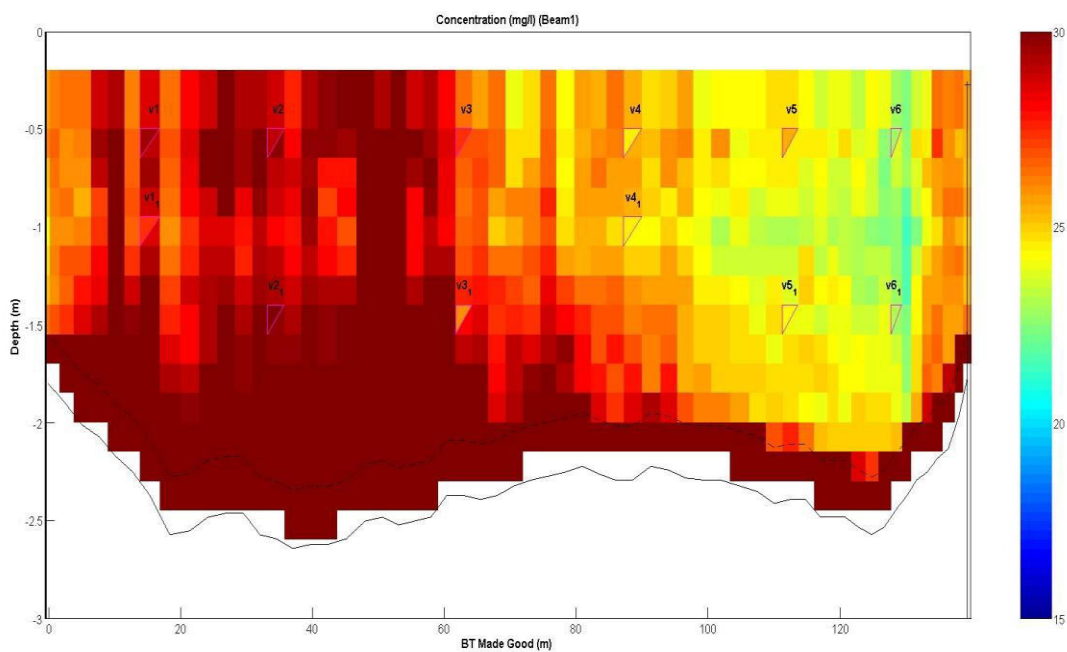
| DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD | | | | | | PR. |  |
|--|----------------|-----------------------|---------------------|--|------------------------|---|---|
| SEKTOR ZA HIDROLOGIJU – ODJEL ZA NANOS I MORFOLOGIJU RIJEČNIH KORITA | | | | | | | |
| Prikaz rezultata profilskih mjerenja suspendiranog nanosa | | | | | | | |
| Vodotok: | Drava | Stanica: | Botovo | Oznaka stanice: | 5008 | Mjerenje vodio: | Kovačiček |
| Datum: | 10.7.2020. | Sat: | 11:12 | Vodostaj [cm]: | 109 | | |
| Tip ADCP: | RG WH | Broj preplova: | 4 | Veličina bina WK/WS [cm]: | 15 | Prazna dubina, WF[cm]: | 5 |
| Širina profila [m]: | 140,70 | Srednja dubina [m]: | 2,32 | Srednja koncentracija nanosa [kg/m ³]: | 0,0273 | | |
| Površina [m ²]: | 325,91 | Srednja brzina [m/s]: | 1,43 | Sekundni pronos nanosa [kg/s]: | 12,80 | Protok [m ³ /s]: | 467,9 |
| VERTIKALA | STACIONAŽA [m] | DUBINA [m] | DUBINA UZIMANJA [m] | KONCENTRACIJA NANOSA ρ [kg / m ³] | BRZINA VODE v [m/s] | JEDINIČNI PRONOS NANOSA α [kg/m ² ·s] | |
| 1 | 14 | 2,19 | 0,5 | 0,0294 | 1,17 | 0,0344 | |
| | 14 | | 1,00 | 0,0274 | 1,17 | 0,0321 | |
| 2 | 37 | 2,55 | 0,5 | 0,0292 | 1,55 | 0,0453 | |
| | 37 | | 1,50 | 0,0319 | 1,55 | 0,0494 | |
| 3 | 62 | 2,39 | 0,5 | 0,0272 | 1,66 | 0,0452 | |
| | 62 | | 1,50 | 0,0260 | 1,66 | 0,0432 | |
| 4 | 87 | 2,27 | 0,5 | 0,0246 | 1,54 | 0,0379 | |
| | 87 | | 1,00 | 0,0245 | 1,54 | 0,0377 | |
| 5 | 113 | 2,37 | 0,5 | 0,0254 | 1,51 | 0,0384 | |
| | 113 | | 1,50 | 0,0242 | 1,51 | 0,0365 | |
| 6 | 129 | 2,50 | 0,5 | 0,0228 | 1,32 | 0,0301 | |
| | 129 | | 1,50 | 0,0229 | 1,32 | 0,0302 | |
| obalni | | | površina | 0,0229 | | | |

Slika 23. Profilsko mjerenje po vertikalama na mjernejoj postaji Drava - Botovo 10.7.2020.

Danas se profilsko mjerenje obavlja korištenjem akustičnog mjeraca trenutnih brzina (ADCP „Acoustic Doppler Current Profiler“). Shematski prikaz profilskog mjerenja po vertikali i ADCP – om prikazuje Slika 24.. Način rada ADCP – a se zasniva na odašiljanju akustičnog signala poznate frekvencije prema stupcu vode. Taj stupac vode, u kojem se jednakom brzinom kreću i čestice nanosa, reflektira signal prema uređaju. Jačina odjeka signala se naziva akustični povratni signal ili intenzitet odbijanja signala. Prigušenje ultrazvučnog signala predstavlja razlika između odaslanog i povratnog signala, a proporcionalno je sastavu i količini čvrstih čestica (nanosa) u vodi. To znači ako je mutnoća, odnosno prisutnost čvrstih čestica veća, i prigušenje će biti veće. Za pretvorbu povratnog signala u stvarnu koncentraciju suspendiranog nanosa u vodi korišteno je svojstvo refleksije signala od mutnoće vode. Na temelju tog svojstva, iz prigušenja ultrazvučnog signala i stvarne koncentracije nanosa iz uzorka vode zahvaćenoj na nekoj poznatoj točki, može se izračunati koncentracija suspendiranog nanosa za bilo koju točku u mjernom profilu, srednja profilska vrijednost ρ [kg/m³] te trenutni pronos nanosa P [kg/s] (Slika 25.) [33].



Slika 24. Shematski prikaz načina mjerenja ADCP - om i uzimanje uzoraka po vertikali [34]



Slika 25. Raspodjela koncentracije suspendiranog nanosa [mg/l] u profilu hidrološke postaje Drava – Botovo 10.7.2020.

4.3. IZRAČUN DNEVNOG, MJESEČNOG I GODIŠNJEG PRONOSA SUSPENDIRANOG NANOSA ZA MJERNU POSTAJU BOTOVO NA DRAVI

U Tablici 5. crvenom bojom označene su dnevne koncentracije suspendiranog nanosa na hidrološkoj postaji Drava - Botovo za siječanj 2019. koje se dobiju uzimanjem diskretnog uzorka vode na mjernoj postaji i naknadnom analizom u laboratoriju DHMZ -a. Budući da je vrlo važno pratiti ukupne količine nanosa koji se vodotokom pronosi u nekom vremenskom razdoblju, proračunava se pronos nanosa i izražava u [t/dan]:

$$P = Q \cdot C \cdot 0,0864 \quad (5)$$

Gdje je:

P - pronos suspendiranog nanosa [t/dan]

Q - protok vode [m^3/s]

C - koncentracija suspendiranog nanosa [g/m^3]

Dimenzionalna analiza:

$$\frac{g}{m^3} \cdot \frac{m^3}{s} = \frac{g}{s} \cdot \frac{10^6}{86400} = \frac{t}{dan} \quad (6)$$

U Tablici 6. prikazan je dnevni, mjesečni i godišnji pronos nanosa koji se računa prema formuli (4), za mjernu postaju Botovo.

Tablica 6. Dnevni (narančasto), mjesečni (plavo) i godišnji (zeleno) pronos nanosa [t] za 2019. godinu na mjernoj postaji Drava - Botovo

| GODIŠNJI IZVJEŠTAJ PRONOSA SUSPENDIRANOG NANOSA | | | | | | | | | | | | Vodotok DRAVA | |
|---|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------------|--|
| | | | | | | | | | | | | Vodokaz BOTOVO | |
| | | | | | | | | | | | | Profil 5008 | |
| Godina: 2019. | | | | | | | | | | | | | |
| | siječanj | veljača | ožujak | travanj | svibanj | lipanj | srpanj | kolovoz | rujan | listopad | studen | prosinac | |
| 1. | 54,10 | 77,20 | 87,50 | 111,00 | 868,00 | 1874,00 | 616,00 | 340,00 | 312,00 | 77,20 | 39,50 | 990,00 | |
| 2. | 33,20 | 71,00 | 71,90 | 80,60 | 782,00 | 1503,00 | 540,00 | 345,00 | 115,00 | 95,20 | 38,70 | 999,00 | |
| 3. | 29,80 | 67,10 | 93,50 | 72,20 | 898,00 | 1347,00 | 546,00 | 475,00 | 150,00 | 130,00 | 4,13 | 480,00 | |
| 4. | 1,29 | 138,00 | 113,00 | 154,00 | 410,00 | 1104,00 | 583,00 | 477,00 | 137,00 | 124,00 | 74,10 | 475,00 | |
| 5. | 57,40 | 284,00 | 121,00 | 241,00 | 471,00 | 1154,00 | 1491,00 | 478,00 | 154,00 | 166,00 | 177,00 | 461,00 | |
| 6. | 45,60 | 212,00 | 147,00 | 269,00 | 534,00 | 1185,00 | 1092,00 | 439,00 | 88,30 | 89,50 | 229,00 | 628,00 | |
| 7. | 56,20 | 132,00 | 158,00 | 268,00 | 587,00 | 1232,00 | 322,00 | 385,00 | 113,00 | 133,00 | 2397,00 | 340,00 | |
| 8. | 22,50 | 84,70 | 151,00 | 243,00 | 478,00 | 1799,00 | 386,00 | 349,00 | 264,00 | 140,00 | 955,00 | 208,00 | |
| 9. | 4,12 | 126,00 | 88,90 | 250,00 | 425,00 | 1734,00 | 602,00 | 348,00 | 1041,00 | 93,20 | 548,00 | 217,00 | |
| 10. | 41,40 | 97,00 | 124,00 | 358,00 | 303,00 | 1371,00 | 438,00 | 205,00 | 1444,00 | 153,00 | 500,00 | 597,00 | |
| 11. | 67,10 | 31,00 | 160,00 | 418,00 | 287,00 | 1338,00 | 426,00 | 150,00 | 1157,00 | 78,70 | 331,00 | 255,00 | |
| 12. | 15,60 | 72,50 | 146,00 | 1863,00 | 146,00 | 1559,00 | 381,00 | 124,00 | 649,00 | 86,00 | 280,00 | 264,00 | |
| 13. | 23,80 | 103,00 | 89,10 | 1750,00 | 1169,00 | 1077,00 | 255,00 | 192,00 | 752,00 | 82,00 | 908,00 | 189,00 | |
| 14. | 31,70 | 115,00 | 134,00 | 1693,00 | 1629,00 | 1556,00 | 196,00 | 224,00 | 333,00 | 49,40 | 1346,00 | 306,00 | |
| 15. | 33,60 | 110,00 | 147,00 | 947,00 | 1359,00 | 2488,00 | 562,00 | 190,00 | 341,00 | 85,30 | 1673,00 | 152,00 | |
| 16. | 52,50 | 101,00 | 134,00 | 360,00 | 1537,00 | 1193,00 | 605,00 | 88,90 | 340,00 | 104,00 | 2078,00 | 366,00 | |
| 17. | 50,10 | 77,60 | 95,80 | 373,00 | 1723,00 | 857,00 | 273,00 | 212,00 | 218,00 | 69,30 | 1476,00 | 86,80 | |
| 18. | 69,00 | 117,00 | 188,00 | 395,00 | 531,00 | 995,00 | 331,00 | 210,00 | 195,00 | 111,00 | 1764,00 | 130,00 | |
| 19. | 37,10 | 129,00 | 194,00 | 263,00 | 446,00 | 1000,00 | 341,00 | 179,00 | 132,00 | 68,50 | 2911,00 | 207,00 | |
| 20. | 82,60 | 48,80 | 191,00 | 284,00 | 524,00 | 1086,00 | 346,00 | 298,00 | 158,00 | 78,50 | 3332,00 | 341,00 | |
| 21. | 69,50 | 71,80 | 184,00 | 307,00 | 342,00 | 973,00 | 279,00 | 216,00 | 75,50 | 119,00 | 3029,00 | 296,00 | |
| 22. | 16,70 | 64,60 | 153,00 | 215,00 | 321,00 | 193,00 | 214,00 | 236,00 | 102,00 | 73,20 | 2891,00 | 360,00 | |
| 23. | 39,70 | 41,30 | 139,00 | 338,00 | 389,00 | 1649,00 | 207,00 | 312,00 | 96,30 | 122,00 | 2459,00 | 4688,00 | |
| 24. | 10,20 | 90,80 | 151,00 | 258,00 | 376,00 | 3576,00 | 327,00 | 233,00 | 84,90 | 111,00 | 2343,00 | 5207,00 | |
| 25. | 49,60 | 89,00 | 73,60 | 443,00 | 629,00 | 4128,00 | 256,00 | 171,00 | 95,90 | 66,80 | 2286,00 | 4117,00 | |
| 26. | 30,40 | 148,00 | 134,00 | 474,00 | 582,00 | 1008,00 | 154,00 | 208,00 | 145,00 | 110,00 | 2328,00 | 3295,00 | |
| 27. | 32,60 | 102,00 | 37,30 | 630,00 | 536,00 | 1223,00 | 236,00 | 206,00 | 156,00 | 82,80 | 1793,00 | 558,00 | |
| 28. | 18,70 | 92,20 | 177,00 | 672,00 | 707,00 | 612,00 | 690,00 | 176,00 | 160,00 | 105,00 | 2026,00 | 512,00 | |
| 29. | 19,70 | | 209,00 | 526,00 | 3362,00 | 545,00 | 836,00 | 338,00 | 167,00 | 81,60 | 921,00 | 224,00 | |
| 30. | 34,40 | | 89,90 | 787,00 | 3753,00 | 840,00 | 1164,00 | 246,00 | 141,00 | 95,40 | 1089,00 | 204,00 | |
| 31. | 47,70 | | 82,40 | | 10768,00 | | 332,00 | 381,00 | | 62,60 | | 271,00 | |
| DAT NP | 4. | 11. | 27. | 3. | 12. | 22. | 26. | 16. | 21. | 14. | 3. | 17. | |
| NP | 1,29 | 31 | 37,30 | 72,2 | 146,00 | 193 | 154,00 | 88,90 | 75,5 | 49,40 | 4,13 | 86,80 | |
| SP | 38,00 | 103 | 131,00 | 502 | 1189,00 | 1407 | 485,00 | 272,00 | 311,00 | 98,2 | 1408,00 | 885 | |
| VP | 82,60 | 284 | 209,00 | 1863,00 | 10768 | 4128,00 | 1491 | 478,00 | 1444,00 | 1218 | 3332 | 5207 | |
| DAT VP | 20. | 5. | 29. | 12. | 31. | 25. | 5. | 5. | 10. | 23. | 20. | 24. | |
| Suma | 1178,00 | 2894 | 4065,00 | 15043 | 36872 | 42199 | 15027 | 8432,00 | 9317 | 3043 | 42226 | 27424 | |
| Godišnje | 207719 | | | | | | | | | | | | |

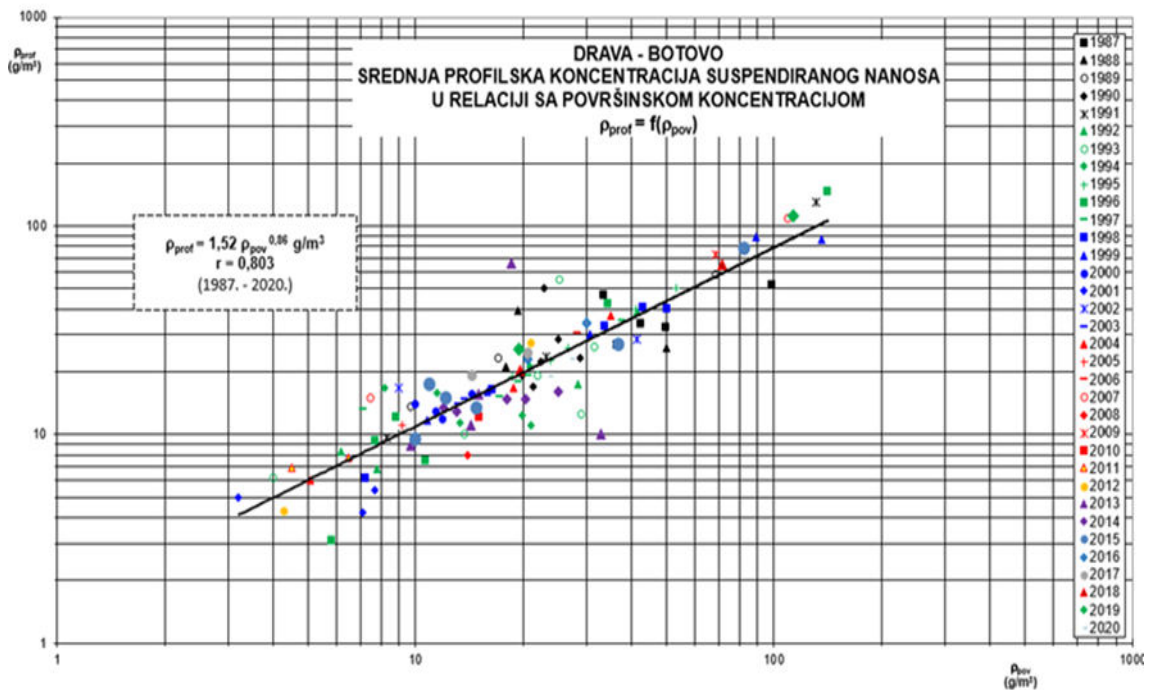
Godišnji pregledi dnevnih vrijednosti koncentracija suspendiranog nanosa kao i pripadajući dnevni pronos nanosa na dvadesetak hidroloških postaja objavljuju se u „Hidrološkim godišnjacima“ te se arhiviraju u DHMZ-u, u bazi hidroloških podataka, HIS2000.

4.4. KRIVLJE PRONOSA SUSPENIRANOG NANOSA NA MJERNIM POSTAJAMA NA DRAVI

Na osnovi pojedinačnih mjerenja za duži niz godina, za svaki mjerni profil zasebno definiraju se korelacijski odnosi:

- korelacijski odnos između srednje profilske koncentracije i vrijednosti iz jedne točke pri površini
- korelacijski odnos između koncentracije C [g/m^3] i protoka Q [m^3/s],
- korelacijski odnos trenutnog pronosa suspendiranog nanosa P [kg/s] i protoka Q [m^3/s],

Zbog lakšeg pristupa, često se dnevni uzorci vode za analizu koncentracije suspendiranog nanosa uzimaju uz obalu. Stoga je važno definirati i koeficijent korekcije koncentracije suspendiranog nanosa iz jedne točke uz obalu, u odnosu na srednju profilsku koncentraciju u nekom mjernom profilu, budući da se zbog dinamike toka srednja profilska koncentracija razlikuje od vrijednosti iz jedne točke (Slika 26.).



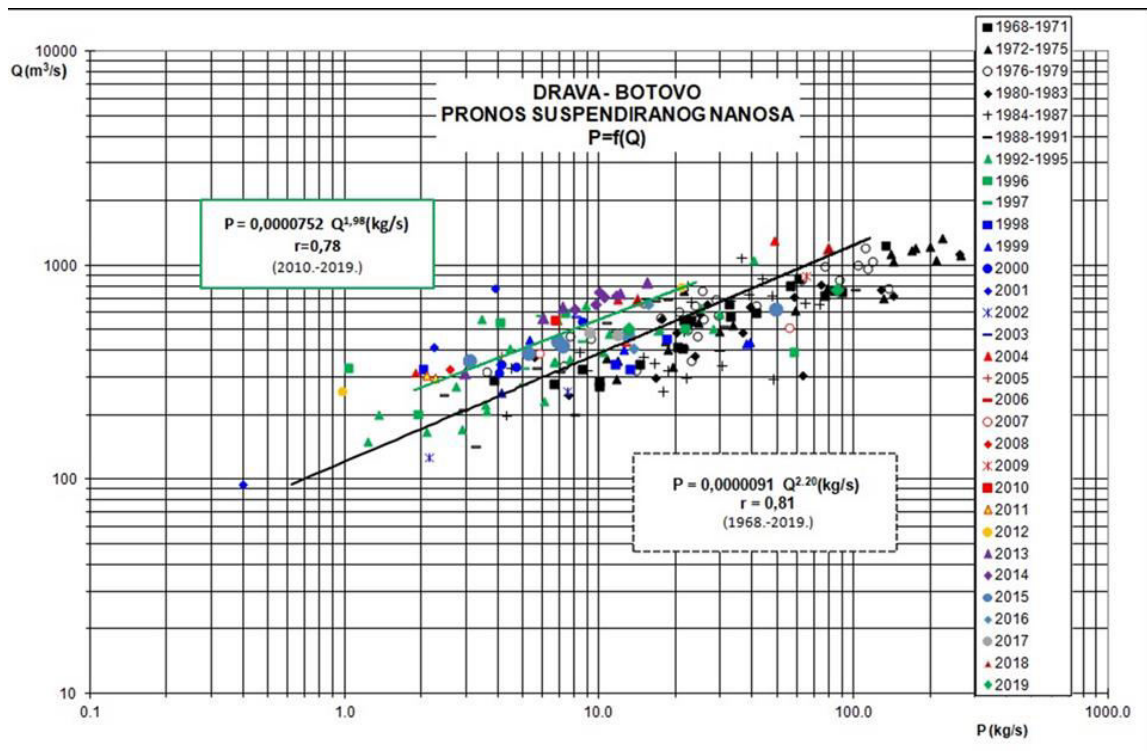
Slika 26. Korelacija između srednje profilske koncentracija suspendiranog nanosa i površinske koncentracije iz jedne točke uz obalu za razdoblje mjerenja 1987. - 2020. na HP Drava – Botovo

Na slici (Slika 26.) prikazana je jednadžba (7) kojom se u praksi određuje srednja profilska koncentracija temeljem umnoška koeficijenta korekcije i dnevne koncentracije iz jedne točke.

$$K_{\text{prof}} = 1,52 K_{\text{pov}}^{0,96} \text{ [g/m}^3\text{]} \quad (7)$$

Vidljivo je da je za HP Drava - Botovo iznos srednje profilske koncentracije (K_{prof}) 1,52 puta veći u odnosu na dnevne vrijednosti koncentracija (K_{pov}) uz obalu te da je njihov odnos skoro linearan. Iz tog odnosa proizlazi da je u profilu Drava - Botovo vrijednost srednje profilske koncentracije oko 50 % veća u odnosu na koncentraciju suspendiranog nanosa iz jedne točke uz obalu.

Na osnovu izmjerenih protoka vode i istovremeno izmjerenih pronosa suspendiranih nanosa konstruira se krivulja pronosa nanosa kao funkcija protoka [34]. Takve krivulje služe za proračun bilance nanosa u nekom vodotoku na osnovi dnevnih, mjesečnih ili godišnjih vrijednosti protoka čak i za razdoblje kada nema mjerenja koncentracije suspendiranog nanosa, ali naravno, pod uvjetom da se ništa bitno u režimu nanosa nije promijenilo na uzvodnom dijelu sliva ili vodotoka. Slika 27. prikazuje grafički prikaz pronosa suspendiranog nanosa u funkciji protoka za hidrološku postaju Drava – Botovo, s obilježenim rezultatima profilskih mjerenja od 1968. do 2015.



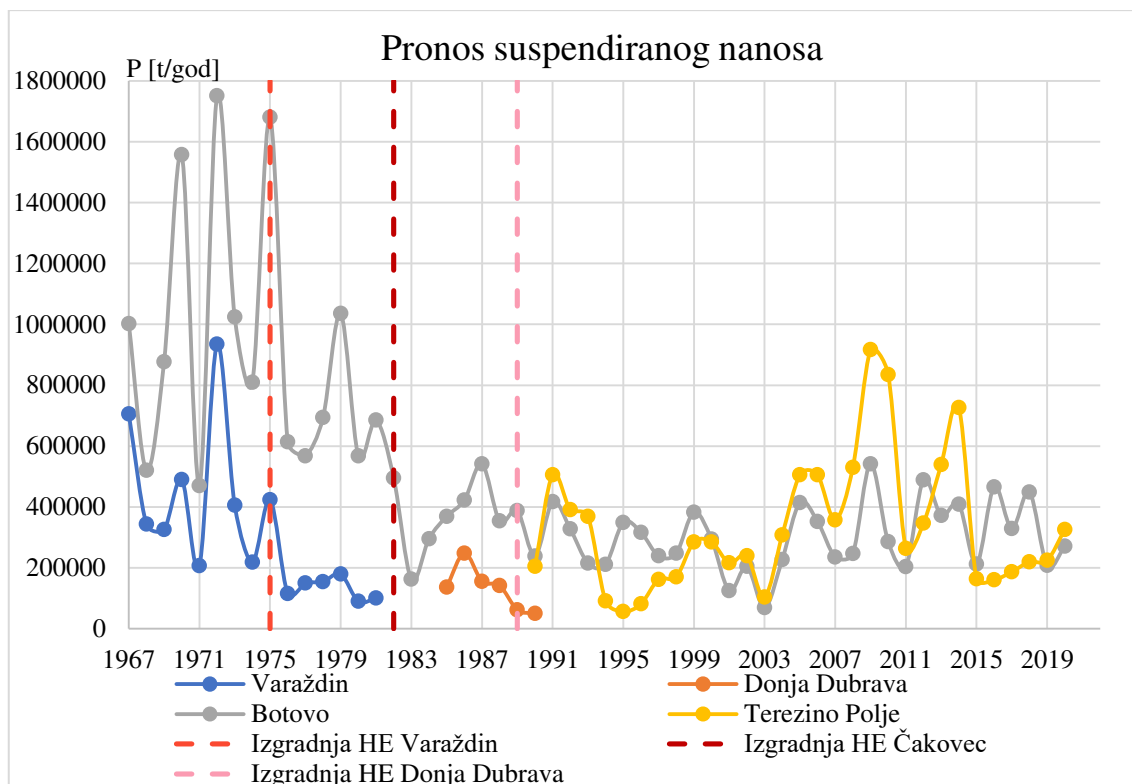
Slika 27. Korelacija između trenutnog pronosa suspendiranog nanosa P [kg/s] i protoka Q [m³/s] za razdoblje mjerena 1968. – 2019. HP Drava – Botovo

Slika 27. prikazuje korelacijski odnos $P - Q$ koji se mijenja tijekom vremena. Na slici je vidljiv jedan korelacijski odnos od 1968. do 2019. i drugi za razdoblje od 2010. do 2019.. Korelacijska veza za razdoblje 1968. – 2019. je puno čvršća jer je rasipanja vrijednosti manje što ukazuje i koeficijent $r = 0,81$, dok je za posljednjih 10 godina $r = 0,78$.

4.5. TREND OVI PROMJENA U REŽIMU PRONOSA NANOSA U ZAVISNOSTI OD ANTROPOGENIH I KLIMATSKIH UTJECAJA

Gornji i srednji tok rijeke Drave (od Spittala an der Drau u Austriji do Donje Dubrave u Hrvatskoj) pregrađen je brojnim hidroelektranama koje usporavaju i zaustavljaju pronos riječnog nanosa. Promjene u smanjenju pronosa i koncentraciji vremenski se mogu povezati s početkom rada hidroelektrana. Utjecaj na pronos također imaju i radovi na izgradnji regulacijskih vodnih građevina, eksploatacija riječnog nanosa te cestogradnja i druge gospodarske potrebe. Slika 28. predočuje da je šezdesetih i sedamdesetih godina povećan pronos nanosa, dok se osamdesetih pronos znatno smanjuje, zbog utjecaja brana i akumulacija na prirodni hidrološki režim. To znači da su manji preljerni protoci preko hidroelektrana, velike vode traju kraće, a posljedica je da se nataloženi dio nanosa zadržava u akumulacijskim jezerima i u starim koritima Drave te se ne prenosi nizvodno.

Slika 28. pokazuje da hidrološka stanica Drava - Botovo bilježi pad pronosa suspendiranog nanosa zbog izgradnje i rada HE Varaždin, HE Čakovec i HE Dubrava te izgradnje dvadesetak hidroelektrana na Muri u Austriji. Pronos nanosa u posljednjih 50 godina na mjernoj postaji Botovo smanjen je na 30 % nekadašnjih količina [35].

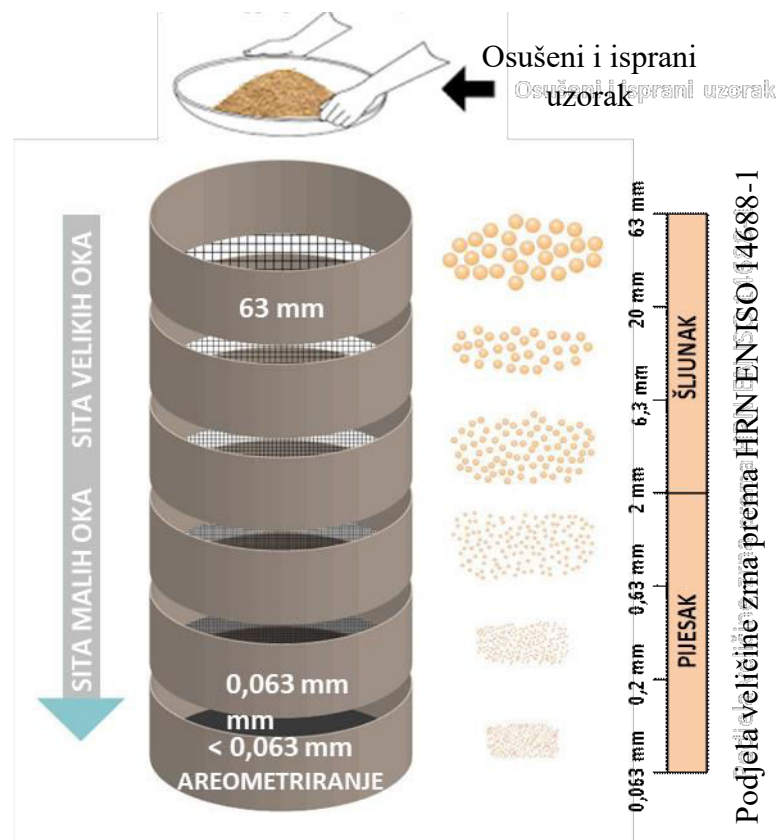


Slika 28. Godišnji pronos nanosa na mjernim postajama Varaždin, Donja Dubrava, Botovo i Terezino Polje od 1967. do 2020.

Izgradnjom HE Varaždin 1975. godine bilježi se značajan pad godišnjeg pronosa nanosa na mjernim postajama Varaždin i Botovo. Drugi veći pad pronosa nanosa se dogodio nakon 1982. godine nakon izgradnje HE Čakovec. Smanjenje pronosa nanosa najbolje prikazuje graf (Slika 28.) za mjernu postaju Botovo (siva boja) jer sadrži najdulje nizove podataka. Vidljivo je da je prije izgradnja hidroelektrana maksimalni godišnji pronos suspendiranog nanosa na Botovu bio skoro 1 800 000 t/god, nakon izgradnje HE Varaždin godišnji pronos suspendiranog nanosa se smanjio na 600 000 do 1 000 000 t/god, a nakon izgradnje HE Čakovec, i nekoliko godina kasnije HE Donja Dubrava, prosječni godišnji pronos se sveo na svega 300 000 t/god. Slične vrijednosti godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa su izmjerene i na HP Drava - Terezino Polje u razdoblju 1990. - 2020.

4.6. GRANULOMETRIJSKI SASTAV RIJEČNOG NANOSA

Granulometrijski sastav prikazuje postotak čestica određene krupnoće u ukupnom uzroku te se prikazuje granulometrijskom krivuljom u polulogaritamskom mjerilu [34]. To je najvažniji pokazatelj riječnog nanosa jer veličina zrnaca nanosa i njihova gustoća variraju, ovisno o krupnoći zrnaca, u granicama koje se mogu približno odrediti. Ovisno o krupnoći zrna, granulometrijski sastav se određuje sijanjem ili aerometriranjem ili pak njihovom kombinacijom. Granulometrijska analiza izvodi se u laboratoriju prema europskoj/nacionalnoj normi HRN EN ISO 17892-4:2016 [36]. Za materijal sa zrnima većim od 0,063 mm ispitivanje se provodi postupkom mokrog ili suhog sijanja uzorka nanosa kroz set sita propisanih otvora (Slika 29.).



Slika 29. Shematski prikaz postupka suhog sijanja nekoherentnog tla [37]

Granulometrijski sastav materijala čije su čestice manje od 0,063 mm određuje se metodom areometriranja (HRN EN ISO 17892-4:2016), odnosno mjerenjem gustoće suspenzije u određenim vremenskim intervalima. Metoda se temelji na Stokes-ovom zakonu (8) kojim se definira brzina padanja zrnaca poznate gustoće u mirnoj tekućini poznate gustoće [36].

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \cdot \eta_t} \cdot D^2 \quad (8)$$

$$v = \frac{H^2}{t} \quad (9)$$

$$D_t = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta_t \cdot H}{(\rho_s - \rho_w) \cdot t}} \quad (10)$$

Gdje je:

v = brzina padanja čestica,

D_t = promjer istaloženih promjer istaloženih čestina nakon vremena,

η_t = viskoznost vode na odre viskoznost vode na određenoj temperaturi (svojstvo materijala),

H = visina padanja čestica,

t = vrijeme,

ρ_s, ρ_w = gustoća čestica i vode.

4.6.1. Granulometrijski sastav suspendiranog nanosa

Granulometrijski sastav suspendiranog nanosa kreće se u rasponu od finih muljevitih čestica do sitnog pijeska, a raspon dimenzija tih čestica je od nekoliko mikrometara do nekoliko desetaka milimetara.

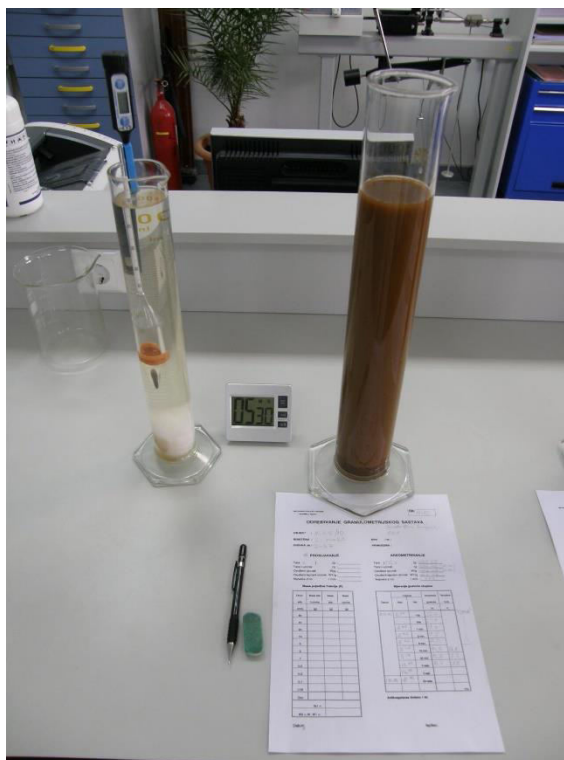
Prije provedbe profilskog mjerenja suspendiranog nanosa, zahvaća se 200 litara uzorka vode po određenim vertikalama na cijelom poprečnom profilu te uzorak miruje u bačvama do dva dana (Slika 30.). Zatim se iz bačve uzima 10 litara vode za laboratorijsku analizu granulometrijskog sastava suspendiranog nanosa.



Slika 30. Uzorkovanje za granulometrijsku analizu suspendiranog nanosa [34]

Granulometrijska analiza se najčešće provodi kombiniranom metodom sijanja i aerometriranja (pipetiranja). U Državnom hidrometeorološkom zavodu radi se metoda pipetiranja po Andreasenu.

Areometriranje (Slika 31.) se provodi na uzorku kojeg dobijemo kao ostatak sijanja, ako je postotak materijala koji je prošao kroz sito otvora 0,063 mm veći od 5 % ukupne mase uzorka. Uzorak se stavlja u posudicu te mu se pomoću pipete dodaje 100 ml disperzivne otopine i dobro se promiješa i prelije u tikvicu koja se zatvara gumenim čepom. Zatvorena tikvica se stavlja u mehaničku miješalicu na 24 sata. Nakon 24 sata miješanja uzorak se prebacuje u sedimentacijski cilindar i dodaje se destilirana voda koja se ugrijala na 25 °C tako da ukupna količina tekućine bude 1000 ml. Sedimentacijski cilindar se zatvara gumenim čepom te se okreće 60 puta gore – dolje da bi se uzorak što više homogenizirao. Cilindar se zatim stavlja u kadu za areometriranje i miče se čep. Zatim se u cilindar stavlja hidrometar i uključuje se štoperica. Za svaku promjenu dubine hidrometra očitava se pripadno vrijeme. Kako se areometriranje temelji na Stokes – ovom zakonu (8) što znači da će veće čestice padati brže, a manje sporije i hidrometar će na početku tonuti brže, a zatim sve sporije [38].



Slika 31. Postupak areometriranje

Rezultati se prikazuju grafički i tablično, kao granulometrijske krivulje gdje se na apscisi nalazi promjer zrna u logaritamskom mjerilu, a na ordinati postotni udio mase čestica manjih od tog promjera.

4.6.2. Granulometrijski sastav koritoformirajućeg nanosa

Kako bi se odredio granulometrijski sastav koritoformirajućeg nanosa, pomoću hvatača („grajfera“) uzima se poremećeni uzorak nanos s dna riječnog korita u tri točke u poprečnom profilu: uz lijevu i desnu obalu te na sredini korita rijeke. Svaki uzorak se laboratorijski određuje metodom sijanja prema normi HRN EN ISO 17892 – 4:2016 i aerometriranja prema normi HRS CEN ISO/TS 17892-4:2004. Svaka granulometrijska analiza započinje vizualnim pregledom te opisom uzorka nanosa. Ako uzorak sadrži organske primjese potrebna je posebna priprema takvih uzoraka za daljnja ispitivanja. Koritoformirajući nanos je najčešće nekoherentan materijal te se za određivanje njegovog granulometrijskog sastava koristi metoda sijanja suhim postupkom prema normi HRN EN ISO 17892-4, točka 5.2 [39]. Ako je na raspolaganju prisutna veća količina uzorka, provodi se metoda četvrtanja kako bi se izdvojila propisana masa za

ispitivanje (Slika 32. a)). Određuju se mase uzorka u vlažnom i suhom stanju te nakon toga se uzorci ispiru vodom kroz sita sa otvorima do 0,063 mm kako bi se odstranile čestice praha i gline (Slika 32. b)). Ako je postotak materijala koji je prošao kroz sito otvora 0,063 mm veći od 5 % ukupne mase uzorka, određuje njihov granulometrijski sastav metodom areometriranja prema normi HRN EN ISO 17892 – 4, točka 5.3 [39]. Kada su uzorci isprani, osušeni i izvagani, pomoću tresilice se prosijavaju kroz set sita normiranih otvora i bilježi se masa materijala koji je ostao na pojedinom situ (Slika 32. c)).



Slika 32. Postupak granulometrijske analize zrna nanosa većih od 0,063 mm:
 A) Četvrtanje uzorka B) ispiranje uzorka C) Tresilica za sisanje uzorka

Na temelju mase materijala koji je ostao na pojedinim sitima dobije se maseni sadržaj pojedinih veličina zrna i njihova međusobna raspodjela u ukupnoj masi uzorka. Ti rezultati se grafički interpretiraju u obliku granulometrijske krivulje u polulogaritmsdkom mjerilu.

Slika 33. prikazuje rezultate prolaznosti kroz sito prilikom sisanja uzroka koritiformirajućeg nanosa na lokaciji Botovo. Na temelju tih podataka nacrtana je granulometrijska krivulja (Slika 34.).

| DRAVA_BOTOVO_6.11.2020. | L.O. | | SR. | | D.O. | |
|-------------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | Promjer zrna [mm] | Prolaznost [%] | Promjer zrna [mm] | Prolaznost [%] | Promjer zrna [mm] | Prolaznost [%] |
| | | | | 92,7 | 100,00 | 75,2 |
| | 45,4 | 100,00 | 31,5 | 73,19 | 31,5 | 83,31 |
| | 20 | 88,80 | 20 | 35,19 | 20 | 63,75 |
| | 10 | 62,41 | 10 | 18,34 | 10 | 34,55 |
| | 5 | 25,08 | 5 | 12,11 | 5 | 12,83 |
| | 2 | 3,63 | 2 | 10,36 | 2 | 6,44 |
| | 1 | 0,39 | 1 | 10,07 | 1 | 5,79 |
| | 0,5 | 0,16 | 0,5 | 4,32 | 0,5 | 4,02 |
| | 0,25 | 0,09 | 0,25 | 0,89 | 0,25 | 0,64 |
| | 0,125 | 0,07 | 0,125 | 0,70 | 0,125 | 0,28 |
| | 0,063 | 0,06 | 0,063 | 0,66 | 0,063 | 0,13 |

Slika 33. Rezultati sijanja koritoformirajućeg nanosa na lijevoj obali (L.O.), u sredini korita (SR.) i desnoj obali (D.O.) na lokaciji Drava - Botovo 6.11.2020.

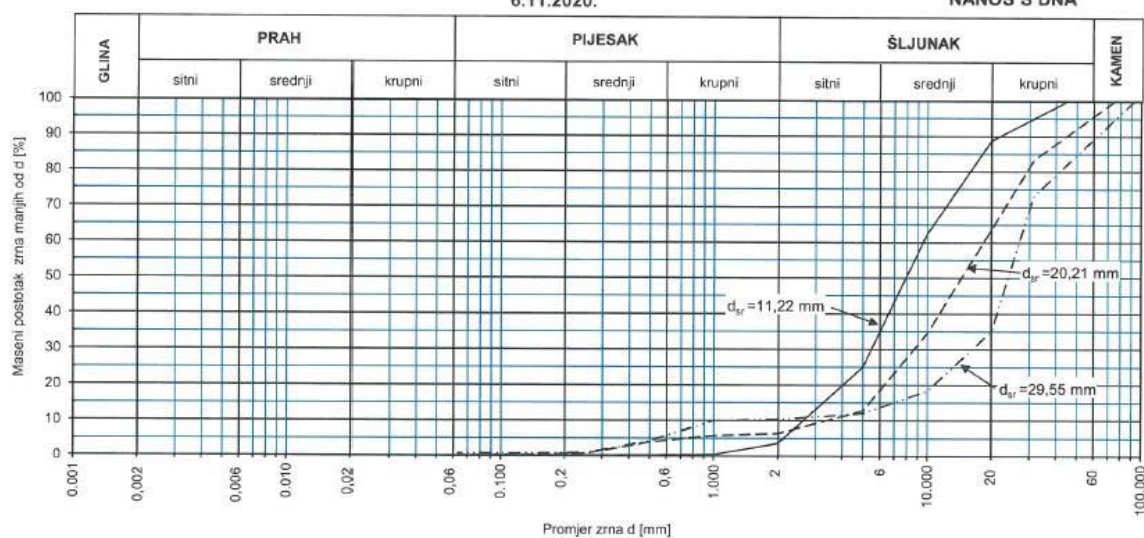


GRANULOMETRIJSKI SASTAV TLA

HRN EN ISO 17892-4

DRAVA - BOTOVO
6.11.2020.

NANOS S DNA



| Oznaka uzorka | Oznaka | KAMEN [%] | ŠLJUNAK [%] | PIJESAK [%] | PRAH [%] | GLINA [%] | Cu | Cc | d ₁₀ | d ₅₀ | d ₉₀ | d _{srednje} | Klasifikacija prema USCS-u | Lab. oznaka uzorka |
|---------------|-----------|-----------|-------------|-------------|----------|-----------|------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|--------------------|
| 1 | — | | 96,4 | 3,6 | 0,1 | | 3,6 | 1,2 | 2,63 | 7,94 | 21,83 | 11,22 | GP | 16-27/20 |
| 2 | — · — · — | 13 | 76,6 | 9,7 | 0,7 | | 27,1 | 9,8 | 0,99 | 23,67 | 61,98 | 29,55 | GP | 17-27/20 |
| 3 | - - - - - | 4,7 | 88,9 | 6,3 | 0,1 | | 5,5 | 1,2 | 3,33 | 14,43 | 44,65 | 20,21 | GW | 18-27/20 |

Odobrio: Doc. dr. sc. Mario Gazdek

Varaždin, srpanj 2021.

M. Gazdek

Slika 34. Granulometrijska krivulja koritoformirajućeg nanosa na lokaciji Drava - Botovo 6.11.2020.

Na temelju granulometrijske analize sva tri uzorka, Slika 33. i Slika 34, vidljivo je da je riječno dno u Dravi kod Botova sastavljeno uglavnom od šljunkovitog materijala (>76 %), uz primjese pijeska (do 10 %) i kamena (do 13 % u sredini i 6 % uz desnu obalu). Prema USCS klasifikaciji radi se o slabo graduiranom šljunku (GP) na sredini korita i uz lijevu obalu te dobro graduiranom šljunku uz desnu obalu (GW).

4.7. METODE PRORAČUNA VUČENOG NANOSA

Vučeni nanos nastaje u gornjem dijelu sliva rijeke Drave, u brdsko – alpskom dijelu gdje se erozijskim procesima formira nanos koji može mirovati ili biti pokretan. Na tom djelu sliva se u klimatološkim uvjetima prikupljaju padaline te se stvaraju vodeni tokovi čija energija je dovoljna za stvaranje i pokretanje nanosa. U nizinskom djelu sliva nanos se taloži u debelim slojevima i formira dolinu s širokim rasponom promjera zrna nanosa od krupnog šljunka, pijeska do sitne prašine. Kontinuirani pronos vučenog nanosa od njegovog nastanka u gornjem djelu sliva pa cijelim putem do Dunava nije moguć zbog izgrađenih više od 100 pregrada i brana [40] u gornjem i srednjem slivu Drave. Poznato je da kroz brane ne prolazi vučeni nanos te se on zadržava blizu mjesta nastanka ili na repovima akumulacija. Vučeni nanos se iz rijeke eksploatira za osiguravanje mjere za smanjenje rizika od poplava te očuvanje razine podzemnih voda. U gornjem djelu sliva vučeni nanos predstavlja problem jer zatrpava akumulacije, dok u srednjem i donjem dijelu sliva (u Hrvatskoj) nedostatak vučenog nanosa uzrokuje erodiranje obale i dna, potkopavanje brane, spuštanje razine podzemnih voda i ukopavanje u tlo [40].

U prošlosti mjerenja vučenog nanosa su se provodila prije izgradnje hidroelektrana na Dravi u kraćim vremenskim razdobljima, kao što je prikazano u Tablici 7.

Tablica 7. Razdoblje i način mjerenja vučenog nanosa na mjernim postajama na Dravi [33]

| MJERNE POSTAJE na Dravi | NAČIN MJERENJA | Broj mjerenja | RAZDOBLJE |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| Donja Dubrava | Karolyevim hvatačem | Povremeno | 1980-1985 |
| Botovo | Karolyevim hvatačem | Povremeno | 1969-1981 |
| Novo Virje | Karolyevim hvatačem | Povremeno | 1978-1987 |
| Terezino Polje (Barcs) | Karolyevim hvatačem | Povremeno | 1968-1975 |
| Donji Miholjac (Dravaszabolcs) | Karolyevim hvatačem | Povremeno | 1964-1975 |

Razlog zašto postoji znatno manje podataka o vučenom nanosu u usporedbi s podacima o pronosu suspendiranog nanosa je činjenica da je pronos i količinu vučenog nanosa na tradicionalan način u prirodnim vodotocima teže mjeriti. Tradicionalni način mjerenja je složen, zahtjeva brojnu terensku ekipu i opremu, a u situacijama velikog protoka mjerenje je izuzetno složeno i opasno. Stoga se trenutno ulažu napori u razvoj novih metoda mjerenja vučenog nanosa s dna.

U nedostatku rezultata novijih mjerenja u hidrotehničkoj praksi se često koriste razne empirijske metode. Empirijske metode za proračun vučenog nanosa temelje se na: parametrima graničnog stanja (kritično naprezanje ili brzina), promatranju energetskih odnosa u riječnom toku, direktnoj procjeni vučenog nanosa u pokretnom sloju te promatranju stohastičke prirode procesa.

Prilikom primjene empirijskih formula preporuča se provjera mogućnosti njihove primjene na određeni vodotok na način da se izvrši nekoliko hidroloških mjerenja pronosa nanosa i da se rezultati mjerenja usporede s rezultatima dobivenim formulama. S obzirom na rezultate mjerenja vrše se promjene vrijednosti određenih parametara u formuli, kako bi se rezultati izračuna uskladili sa rezultatima mjerenja.

4.7.1. Pristup zasnovan na kritičnom naprezanju

Pristup zasnovan na kritičkom naprezanju definira vezu između pronosa vučenog nanosa i efektivnog tangencijalnog naprezanja, odnosno razliku između stvarnog i kritičkog naprezanja ($\tau_o - \tau_{oc}$).

Prvi pokušaj da se pronos nanosa po dnu riječnog toka definira i opiše na temelju kritičnog tangencijalnog naprezanja imao je francuski hidrauličar du Boys. Njegov pristup je usmjerio mnoge istraživače u kasnijim razdobljima.

U današnjoj praksi je najčešće korištena metoda švicarskih istraživača Meyer – Peter – a i Müller – a. Metoda je zasnovana na laboratorijskim ispitivanjima u kanalima širine 0,15 – 2,0 m, dubine toka 0,01 – 1,2 m te nagibom dna u rasponu 0,4 – 20 ‰. U ispitivanjima su korišteni umjetni i prirodni materijali krupnoće 0,4 – 30 mm i gustoće (ρ_s/ρ) 1,25 – 4,0.

Meyer-Peter i Müller-ova formula glasi (11):

$$G = \frac{8}{g \cdot \sqrt{\rho_v}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_n - \rho_v} \cdot (\tau - \tau_0)^{3/2} \cdot b \quad (11)$$

$$\tau = \rho_v \cdot g \cdot R \cdot I \cdot \frac{Q_n}{Q} \cdot \left(\frac{n_r}{n}\right)^{3/2} \quad (12)$$

$$\tau_0 = 0.047 \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g \cdot d_s \quad (13)$$

Gdje je:

ρ_n – specifična gustoća nanosa,

ρ_v – specifična gustoća tekućine,

τ – dopuštena posmična naprezanja [N/mm^2],

τ_0 – dopušteno posmično naprezanje nevezanih čestica [N/mm^2],

R – hidraulički radijus [m],

I – pad linije energije vodotoka,

Q_n – protok dijelom korita kojim se pronosi nanos [m^3/s],

Q – ukupan protok vode [m^3/s],

n – Manning-ov koeficijent hrapavosti,

n_r – Manning-ov koeficijent hrapavosti površine dna bez utjecaja hrapavosti forme dna,

d_s – srednji promjer svake pojedine frakcije nanosa prema prosijavanju na sitima [mm],

b – širina pojasa korita kojim se pronosi nanos [m].

Ova metoda preporučljiva je za rijeke sa krupnim nanosom, koje imaju srednji promjer zrna veći od 2 mm. Za rijeke poput Dunava i Save, velike aluvijalne rijeke sa sitnim pješčanim nanosom, treba koristiti neku drugu metodu [41].

4.7.2. Pristup zasnovan na kritičnoj brzini

Ovaj pristup definira vezu između jediničnog pronosa vučenog nanosa i kinematičkih karakteristika riječnog toka, a najčešće korištena metoda je Gončarov – a. U toj metodi pretpostavka je da je hidrodinamička struktura toka poznata, a prosječna debljina pokretnog sloja, brzina i koncentracija kretanja nanosa izražava se preko kritičke brzine i dvije promjenjive srednje brzine toka. Gončarov – a formula koja se koristi u praksi, a prilagođena je rezultatima eksperimentalnih mjerenja [41], glasi (14):

$$q_{vm} = \rho_s \cdot 2 \cdot (1 + \varphi) \cdot d \cdot v_{cr} \cdot \left(\frac{v_{sr}}{v_{cr}} - 1 \right) \cdot \left[\left(\frac{v_{sr}}{v_{cr}} \right)^3 - 1 \right] \quad (14)$$

Gdje je:

q_{vm} – pronos vučenog nanosa [kg/s/m,]

ρ_s – gustoća nanosa [kg/m³],

φ – vrijednost empirijskog koeficijenta (Tablica 8.),

d – promjer nanosa [mm]

v_{cr} – kritična brzina [m/s] definirana izrazom (9),

v_{sr} – srednja brzina vodotoka [m/s].

Izraz za kritičnu brzinu (15):

$$v_{cr} = 0.535 \cdot \log \left(\frac{8.8 \cdot h}{d_{95}} \right) \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta \cdot d_{50}} \quad (15)$$

Gdje je:

v_{cr} – kritična brzina [m/s],

h – srednja profilska dubina [m],

d_{95} – promjer najvećeg zrna nanosa [mm],

d_{50} – promjer srednjeg zrna nanosa [mm].

Tablica 8. Vrijednosti koeficijenta φ [41]

| $d = d_{50}$ [mm] | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,5 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| φ | 7,30 | 3,25 | 2,09 | 1,67 | 1,42 | 1,25 | 1,15 | 1,02 |

4.7.3. Energetski pristup

Metoda Bagnold - a temelji se na energetskom pristupu izračuna vučenog nanosa tako da uspostavlja vezu između količine vučenog nanosa i energije toka koja je potrebna za održavanje kretanja te količine nanosa. Ta potrebna energija najčešće iznosi oko 10% ukupne energije toka. Bagnold – ov izraz glasi (16):

$$q_{nv} = \tau_o^{3/2} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{oc}}{\tau_o}\right)^{3/2} \quad (16)$$

Gdje je:

q_{nv} – pronos vučenog nanosa [$m^3/s/m$],

τ_{oc} – dopušteno posmično naprezanje [N/mm^2],

τ_o – dopušteno posmično naprezanje nevezanih čestica [N/mm^2].

4.7.4. Pristup zasnovan na koncentraciji nanosa

Metoda van Rijn – a, nizozemskog autora, smatra se najpouzdanijom iz ovog pristupa jer se temelji na eksperimentalnim podacima raznih autora. Postoji više poluempirijskih izvoda raznih autora na temelju ovog pristupa, no rezultati dobiveni njima nisu konzistentni.

Prema Rijn – ovom tumačenju, dominantnu ulogu na kretanje vučenog nanosa ima gravitacijska sila, a na kretanje suspendiranog nanosa sila turbulencije toka. Van Rijn je formulirao jednadžbe kretanja individualnih zrna nanosa, izostavljajući sile turbulencije toka. Rješenjem tih jednadžbi je odredio dužinu i visinu skokova zrna nanosa. Empirijski model je realiziran na temelju eksperimenata sa sitnim šljunkom i pijeskom. Pomoći kamere su snimljene čestice te je autor ustanovio da je prosječna visina skokova čestica nanosa $10 \cdot d_{50}$.

Prosječna koncentracija nanosa u pokretnom sloju ustanovljena je mjerenjem pronosa nanosa, a rezultati mjerenja izraženi su u funkciji hidrauličkih parametara toka i krupnoće zrna.

4.7.5. Stohastički pristup

Stohastički pristup temelji se na vjerojatnosti pokretanja nanosa, a glavni kreatori su Einstein i Velikanov. Pristupom se razmatraju dvije karakteristične vjerojatnosti: P_1 i P_K . P_1 je vjerojatnost da će se neko zrno barem jednom pokrenuti sa dna toka u određenom vremenskom intervalu, a P_K je vjerojatnost da će se zrno u nekom vremenskom periodu (Δt) pokrenuti najmanje k puta, da će napraviti barem k skokova i prijeći put koji nije manji od $k\Delta t$ [41].

Vjerojatnost pokretanja zrna najviše ovisi o fizičkim svojstvima zrna (oblik, težina, krupnoća) i hidrauličkim karakteristikama toka. Zrna nanosa se kreću povremeno, odnosno period kretanja i period mirovanja se izmjenjuju. Na tome možemo primijeniti zakon vjerojatnosti jer skokovi predstavljaju međusobno neovisne događaje.

Izraz za jedinični volumenski pronos (17) se dobije dijeljenjem umnoška ukupnog broja zrna i volumena jednog zrna sa vremenskim intervalom.

$$q_{nv} = \frac{c_3 \cdot d^3}{\Delta t} \cdot \left(\frac{\Delta x \cdot 1}{c_1 \cdot d^2} \cdot \frac{P_1}{1 - P_1} \right) = c_4 \cdot d \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot \frac{P_1}{1 - P_1} \quad (17)$$

Gdje je:

q_{nv} – pronos vučenog nanosa [$m^3/s/m$],

d – promjer zrna [mm],

Δt – vrijeme kretanja zrna [s],

Δx – put koji zrno pređe [m],

c – ukupni broj zrna.

Intenzitet pronosa vučenog nanosa prema Einsteinovoj formuli (18) glasi [25]:

$$\Phi = \frac{G_i}{\rho g} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{g d^3}} \quad (18)$$

a intenzitet toka ψ :

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{I_e R} \quad (19)$$

Gdje je:

G_i – pronos vučenog nanosa [t/s],

ρ – gustoća vode [t/m³],

ρ_s – gustoća vučenog nanosa [t/m³],

d – promjer zrna vučenog nanosa [m]; preporuča se uzimanje d_{35} – promjer zrna 35 % - tne frakcije iz granulometrijske krivulje vučenog nanosa) ako je nanos sitan,

I_e – hidraulički gradijent (nagib linije energije),

R – hidraulički radijus [m]. Za široka korita se može uzeti da je $R = h$, h – srednja dubina u protjecajnom profilu [m].

Empirijske formule za pronos vučenog nanosa poput Schoklitscheve i Meyer – Peterove zasnivaju se samo na pokusima, dok Einsteinova djelomično ima i teorijsku osnovu [25].

4.7.6. Izračun pronosa vučenog nanosa po Einstein – Brown formuli za mjernu postaju Drava – Botovo

Einstein – Brown formula za izračuna pronosa nanosa glasi:

$$\Phi_B = 40 \cdot K \cdot \theta'^3 \quad (20)$$

Gdje je:

Φ_B – pronos vučenog nanosa (bezdimenzijski koeficijent) (21)

$$\Phi_B = \frac{q_B}{d_{50} \sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad (21)$$

q_B – pronos vučenog nanosa [kg/s·m]

s – omjer gustoće sedimenta (ρ_s) i gustoće vode (ρ):

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (22)$$

K – Einstein – ov koeficijent (23)

$$K = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot v^2}{(s-1)gd_{50}^3}} - \sqrt{\frac{36 \cdot v^2}{(s-1)gd_{50}^3}} \quad (23)$$

g – ubrzanje sile teže $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

d_{50} - promjera zrna nanosa od kojeg 50 % mase uzorka ima zrna manjeg promjera (iščitava se iz granulometrijske krivulje)

v - kinematička viskoznost vode

θ' - efektivni Shied - ov parametar (24)

$$\theta' = \frac{\frac{\tau_B'}{\rho}}{(s-1)gd_{50}} \quad (24)$$

τ_B' - efektivno posmično naprezanje (25)

$$\tau_B' = \frac{1}{2} \rho \frac{0,06}{\left(\log \frac{12h}{2,5d_{50}}\right)^2} u^2 \quad (25)$$

h – dubina korita

u – brzina toka

Podaci koji su korišteni za izračun pronosa vučenog nanosa prema Einstein – Brown formuli za mjernu postaju Drava – Botovo su uzeti iz rezultata mjerenja brzina i protoka 10.7.2020, a prikazani su u tablici na Slici 23., dok je promjer zrna iščitavan s granulometrijske krivulje prikazane na Slici 34.:

- Gustoća vode $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Gustoća nanosa $\rho_s = 1300 \text{ kg/m}^3$
- Dubina korita $h = 2,32 \text{ m}$
- Promjera zrna nanosa od kojeg 50 % mase uzorka ima zrna manjeg promjera (iščitava se iz granulometrijske krivulje) $d_{50} = 25 \text{ mm} = 0,025 \text{ m}$
- Kinematička viskoznost vode $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Širina korita na mjernoj postaji Botovo je 135 m
- Brzina toka $u = 1,43 \text{ m/s}$

Prvo se izračuna efektivno posmično naprezanje (26) prema formuli (25).

$$\tau_B' = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot \frac{0,06}{\left(\log \left(\frac{12 \cdot 2,32}{2,5 \cdot 0,025}\right)\right)^2} \cdot 1,43^2 = 8,74 \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (26)$$

Pomoću efektivnog posmičnog naprezanja može se izračunati efektivni Shiel – ov parametar (27) prema formuli (24).

$$\theta' = \frac{\frac{8,74}{1000}}{\left(\frac{1300}{1000} - 1\right) \cdot 9,81 \cdot 0,025} = 0,119 \quad (27)$$

Sljedeći korak je računanje Einsteinovog koeficijenta (28) prema formuli (23).

$$K = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot (10^{-6})^2}{\left(\frac{1300}{1000} - 1\right) \cdot 9,81 \cdot 0,025^3}} - \sqrt{\frac{36 \cdot (10^{-6})^2}{\left(\frac{1300}{1000} - 1\right) \cdot 9,81 \cdot 0,025^3}} \quad (28)$$

$$K = 0,8156$$

Izračunati su svi parametri za pronos nanosa prema Einstein – Brown – ovoj formuli (20) i može se izračunati bezdimenzijska veličina pronosa vučenog nanosa (29).

$$\Phi_B = 40 \cdot 0,8156 \cdot (0,119)^3 = 0,055 \quad (29)$$

Da se dobije količina vučenog nanosa računa se q_B prema formuli (21).

$$q_B = \Phi_B \cdot d \sqrt{(s - 1) \cdot g \cdot d} \quad (30)$$

$$q_B = 0,055 \cdot 0,02955 \sqrt{(1,3 - 1) \cdot 9,81 \cdot 0,02955} = 4,79 \cdot 10^{-4} \text{ [kg/s}\cdot\text{m]} \quad (31)$$

U formuli je za parametar d korišteno d_{SR} koje je iščitano iz tablice ispod granulometrijske krivulje (Slika 34.) i ono za mjernu postaju Botovo iznosi 29,55 mm.

Godišnji pronos vučenog nanosa za mjernu postaju Botovo u 2020. godini prema Einstein – Brown – ovoj formuli je oko 2040 t/god, prema izračunu (32).

$$4,79 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{135}{1000} \cdot 31536000 = 2039,65 \text{ t/god} \quad (32)$$

Dimenzionalna analiza:

$$\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}} \cdot \frac{135 \text{ m [širina korita]}}{1000 \text{ kg}} \cdot 31536000 \text{ s [broj sekundi u godini]} = \frac{\text{t}}{\text{god}} \quad (33)$$

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Analizirani su podataka o protoku, vodostaju i pronosu suspendiranog nanosa na četiri hidrološke postaje na rijeci Dravi: Varaždin, Donja Dubrava, Botovo i Terezino Polje. Svi analizirani parametri su pod utjecajem brojnih radova u koritu rijeke Drave, nasipa i inundacija, radom hidroelektrana izrađenih uzvodno od ušća Mure te sve većom eksploatacijom pijeska i šljunka iz inundacijskih područja i samog korita rijeke.

Hidrološka postaja Botovo korištena je za analizu i diskusiju svih parametara zbog najdužeg vremenskog očitavanja potrebnih parametara (1967. – 2020.).

1982. i 1983. dolazi do povišenja vodostaja na hidrološkoj postaji Botovo u odnosu na prethodne godine, odnosno zasipanje presjeka nanosom, što je najvjerojatnije posljedica izgradnje prokopa i cestovnog mosta na lokaciji koja je neposredno uzvodno od same lokacije hidrološke postaje. Također povišenje vodostaja je i posljedica početka rada HE Čakovec, čiji isti utjecaj je također vidljivo i na hidrološkoj postaji Varaždin gdje je i vidljivo znatno sniženje minimalnih godišnjih vodostaja. Na hidrološkoj postaji Botovo došlo je do produbljivanja dna do 1,5 m na lijevoj strani presjeka, dok je desni dio presjeka zasut nanosom te je vodokaz ostao na suhom i mjerna postaja je morala biti premještena 1984. na desnu obalu, 100 m nizvodno od prethodne lokacije [42]. Nakon 1983. uočava se postupno ujednačavanje vodostaja, odnosno ublažavanje oscilacija između ekstremnih veličina, što se može također povezati sa početkom rada HE

Čakovec, ali i sa tadašnjim sušnim djelom hidrološkog ciklusa. 1990 – tih godina i nadalje, nakon izgradnje HE Dubrava, vidljivo je daljnje smanjenje godišnjih vodostaja, odnosno produbljivanje korita. Također isti utjecaj HE Donja Dubrava je zabilježen i hidrološkoj postaji Donja Dubrava.

Na svim hidrološkim postajama nakon 1968. dolazi do izraženijeg smanjenja minimalnih godišnjih vodostaja što se može povezati sa promjenom izgleda riječnog korita uzrokovano prolaskom velikih voda 1965. i 1966. [42]. Razdoblje od 1967. do 1969. je manje bogato vodom što je vidljivo iz srednjih godišnjih protoka, naime srednji godišnji protok za to razdoblje na hidrološkoj postaji Botovo iznosi oko 520 m³/s, dok je 1965. godine bio za 260 m³/s, a 1966. za 151 m³/s veći od tog prosjeka [42]. Također je tokom 1969. godine završena i izgradnja HE Zlatoličje koja je bila prva derivacijska HE na Dravi te svojim radom pospješuje nizvodnu eroziju korita. Izrazito smanjenje vodostaja na hidrološkoj postaji Terezino Polje je pak pod utjecajem suženog dijela korita, gdje se nalazi i lokacija mjerne postaje, na protok vode, morfološke promjene i pronos nanosa koje se očituju u stalnom produbljivanju korita. Na toj postaji stabilno razdoblje, u smanjenju vodostaja, nastupa nakon početka rada HE Dubrava, nakon 1990.. Može se zaključiti da na trend minimalnih godišnjih vodostaja utječe vodnost razdoblja te rad uzvodnih hidroelektrana.

Na protok utječe rad uzvodnih hidroelektrana, najviše HE Čakovec i HE Dubrava jer one svojim radom popravljaju režim malih voda u periodima manje bogatih vodom koji duže traju. Trend smanjenja ili povećanja minimalnih godišnjih protoka na mjernoj postaji je manji ako je veća udaljenost pojedine hidrološke postaje (Terezino Polje je najudaljenija) od najnižvodnije hidroelektrane u nizu (HE Dubrava). To se može pripisati djelovanju podzemnih voda na površinski režim malih voda i utjecaju prirodnog dotoka s pripadajućeg sliva.

Prema provedenoj analizi, vidljiva je promjena u režimu pronosa suspendiranog nanosa koja se odražava u smanjenju pronosa suspendiranog nanosa koji je vezan uz početak i daljnji rad uzvodnih hidroelektrana na Dravi. Njihov rad je prekinuo prirodni proces pronosa nanosa duž cijelog toka rijeke Drave. Također je i eksploatacija riječnog nanosa, kao i ekstremne hidrološke prilike u slivu, utjecale na promjene u pronosu riječnog nanosa. Godišnja količina pronosa suspendiranog nanosa, na promatranim

hidrološkim postajama, nakon početka rada pojedinih hidroelektrana se smanjuje, zatim postupno raste te se na kraju uspostavlja ravnotežno stanje pronosa nanosa nakon što rijeka Drava uspostavi ravnotežno stanje toka na način da erodira vlastite obale i korito. Šezdesetih i sedamdesetih godina bilježi se povećani pronos nanosa zbog pojava izrazito velikih voda što je vidljivo 1972. godine kada su veliki protoci uzrokovali povećani pronos suspendiranog nanosa na svim hidrološkim postajama. Na postaji Varaždin vidljivo je znatno smanjenje pronosa suspendiranog nanosa 1971. godine što se može objasniti time da je 1971. godina po svojoj vodnosti bila znatno ispod prosjeka te je i pronos nanosa manji. Uz to možemo povezati i početak rada HE Zlatoličje (1969.). Najznačajnije smanjenje pronosa suspendiranog nanosa dogodilo se 1975. kad je sa radom počela HE Varaždin. Na hidrološkoj postaji Botovo situacija je ipak nešto povoljnija jer u ukupnoj količini nanosa koja prolazi kroz presjek, sudjeluje i nanosa koji donosi rijeka Mura. No ipak je i na Botovu primijećeno smanjenje ukupne godišnje količine pronosa suspendiranog nanosa nakon početka rada HE Čakovec i HE Dubrava. Ako se uspoređi prosječni godišnji pronos suspendiranog nanosa kroz presjek toka rijeke Drave u Varaždinu i Botovu u razdoblju od 1967. do 1975. te od 1976. do 1981. vidljivo je da Mura u Dravu donosi najmanje polovicu ukupno izmjerenih količina nanosa na Botovu [42]. Osamdesete godine pripadaju sušnom periodu hidrološkog ciklusa što znači da su manji prelijevni protoci preko brana hidroelektrana, kraće traju te im je i transportna moć manja. To znači da nanos koji se godinama taložio u akumulacijskim jezerima zadržava u starim koritima hidroelektrana. Kako se to sušno razdoblje poklopilo sa početkom rada hidroelektrana Varaždin, Čakovec i Donja Dubrava došlo je do izraženijeg smanjenja pronosa suspendiranog nanosa.

Pronos suspendiranog nanosa za mjernu postaju Drava – Botovo prije izgradnje HE Varaždin 1975. je iznosio i do 1,5 milijuna t/god, nakon 1975., izgradnjom HE Varaždin, pronos pada na 600 000 do milijun t/god. Nakon 1982. i izgradnje HE Čakovec pronos je dalje padao na nešto manje od 500 000 t/god, a isto se nastavilo i nakon izgradnje HE Donja Dubrava 1989. kada pronos pada na 100 000 do 500 000 t/god. Pronos suspendiranog nanosa u 2020. godini je bio oko 270 000 t/god, a pronos koritiformirajućeg nanosa prema Einstein – Brown formuli je bio 2040 t/god.

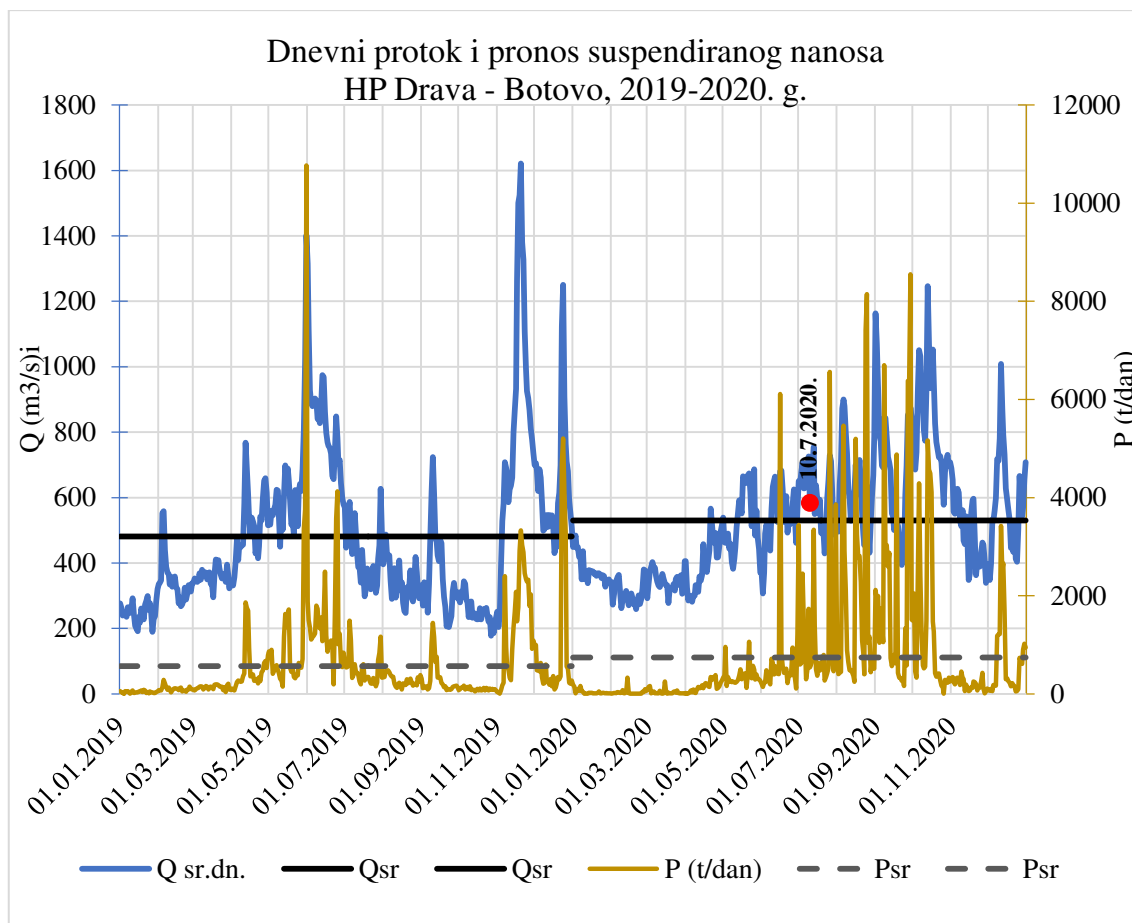
Kako bismo dobili realnu vrijednost godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa za cijeli protjecajni presjek Drave u Botovu, potrebno je godišnji pronos [P_{POV}] (na bazi koncentracije iz diskretnog uzorka vode zahvaćenog uz obalu) pomnožiti sa koeficijentom korekcije $K = 1,52$, prema formuli (34).

$$P = P_{pov} \cdot K \quad (34)$$

Godišnji pronos suspendiranog nanosa iz 2020. godine povećamo za 50 % prema tekstu iz poglavlja o odnosu $K_{PROF} - K_{POV}$.

$$P = 270590 \cdot 1,52 = 411296,8 \text{ t/god} \quad (35)$$

Godišnja količina vučenog nanosa za Botovo iznosi 2040 t/god. Ovaj proračun se temelji na podacima iz mjerenja izvršenog 10.7.2020. godine (Slika 23.), granulometrijske krivulje prikazane na Slici 34. i izračunu po Einstein – Brown fomuli (32).



Slika 35. Pregled dnevnih protoka i pronosa suspendiranog nanosa za HP Drava – Botovo u razdoblju 2019. - 2020.

Iz grafičkog prikaza dnevnih protoka i pronosa suspendiranog nanosa za 2019. i 2020. za hidrološku postaju Drava, Botovo (Slika 35.) vidljivo je da se ove dvije godine vrlo malo razlikuju po vrijednostima srednjih godišnjih protoka, ali postoji različita unutargodišnja raspodjela protoka. 2019. godine bila su tri značajna vodna vala s maksimalnim protokom 31.5. od 1400 m³/s, 20.11. od 1600 m³/s i 24.12. od 1250 m³/s, a koji su za posljedicu imali veliki dnevni pronos nanosa koji je 31.5. iznosio 10768 t/dan. Tijekom 2020. bile su češće oscilacije protoka što za posljedicu ima veće godišnje srednje i ukupne vrijednost pronosa nanosa. Dnevni pronos nanosa je u funkciji protoka, kako se povećava protok povećava se i pronos nanosa. Početkom 2019. godine, do travnja, prevladavaju ispodprosječni protoci te posljedično sa time i manji pronos nanosa oko stotinjak t/dan. U svibnju se javlja prvi veliki vodni val te godine i pronos nanosa raste i javlja se maksimalni pronos pri maksimalnom protoku. Od svibnja do studenog protok se opet smanjuje, a time i pronos nanosa koji pada ispod 2000 t/dan, sa

iznimkom u lipnju gdje je maksimalni pronos bio više od 4000 t/dan, pri maksimalnom protoku od 850 m³/s. U studenom i prosincu dolazi do povećanja protoka, javljaju se dva vodna vala. Prvi vodni val je 20.11. imao maksimalni protok od 1620 m³/s, a maksimalna pronos nanosa je tada bio 3330 t/dan. U prosincu je vodni val imao protok od 1250 m³/s, a maksimalni pronos je bio 5200 t/dan. U 2020. godini situacija je drugačija. Početkom godine, do svibnja, prevladavaju protoci manji od prosjeka, a time je i pronos nanosa ispod prosjeka, manji od 400 t/dan. Od srpnja do kraja listopada javljaju se vrlo velike i česte oscilacije u protoku, a time i u pronosu nanosa. Najveće vrijednosti pronosa se javljaju krajem kolovoza i rujna kada je maksimalni pronos veći od 8 000 t/dan pri protocima većim od 1100 m³/s. U studenom protoci padaju ispod prosjeka, a time i pronos nanosa. Tek u prosincu se javlja povećani dnevni protok od više od 1600 m³/s, a maksimalni dnevni pronos je bio nešto manji od 3500 t/dan.

Odnos godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa u 2020. godini (411296,8 t/god) prema izračunatom pronosu vučenog (2040 t/god) je 99,5 % suspendiranog nanosa i 0,5 % vučenog nanosa. Međutim, ovdje treba naglasiti da je pronos vučenog nanosa računat prema podacima dobivenim pri profilskom mjerenju 10.7.2020., a te su vrijednosti prikazane na Slici 23.. Vrijednosti protoka tada su bile 467,9 m³/s, a srednje brzine toka 1,43 m/s. A podaci za d₅₀ su uzeti iz granulometrijske analize 6.11.2020. prikazane na Slici 34. i njegova vrijednost je iznosila 25 mm.

Vrijednosti pronosa vučenog nanosa ovom metodom bile bi znatno veće da su kojim slučajem bili dostupni podaci profilskih mjerenja pri protocima od 1000 m³/s ili većim jer se u takvim događajima pri većim brzinama toka pokreće znatno veća količina nanosa po dnu korita rijeke, Slika 35.

Veće količine suspendiranog nanosa također se mogu objasniti značajnim doprinosom pritoka, posebno rijeke Mure nakon ušću u Legradu. Rijeka Mura nije toliko regulirana te pronos suspendiranog nanosa nema prepreka i mjesta taloženja poput krupnijeg nanosa s dna na Dravi.

6. ZAKLJUČAK

U slučaju kada ljudske aktivnosti na slivu utječu na količinu ili kvalitetu riječnog nanosa, prema Okvirnoj vodnoj direktivi (OVD) potrebno je upravljanje nanosom uključiti u Plan upravljanja dotičnim riječnim slivovima (RBMP) [43].

2022. godine napravljen je tehnički dokument pod nazivom "Integrirano upravljanje sedimentima – Smjernice i dobre prakse u kontekstu Okvirne Direktive za vode". Taj je dokument izrađen putem okvira za suradnju CIS koji uključuje države članice EU, zemlje EFTA-e i druge dionike, uključujući Europsku komisiju te će pomoći članicama EU u uključivanju integriranog plana upravljanja nanosom u planove upravljanja slivom. Svakako pri tom treba naglasiti važnu činjenicu, a to je da dobar plan upravljanja nanosom na riječnom slivu počinje poznavanjem njegovog trenutnog stanja. Ova spoznaja pak počiva na mjerodavnim podacima koje je potrebno pribaviti.

Izgradnja nasipa i različitih regulacijskih građevina za smanjenje poplavnih područja, uređenja korita te izgradnja hidrotehničkih objekata duž cijelog korita rijeke Drave uveliko su utjecali na njezin vodni režim. Dolazi do promjena u trajanju, amplitudi i frekvenciji poplavnih događaja, sezonskih varijacija protoka, promjena u porastu i padu vodnih valova, razini podzemnih voda i vodostaja. To sve direktno utječe na režim pronosa nanosa.

U ovom diplomskom radu su prikazane neke od metoda koje se koriste za izračun pronosa nanosa na primjeru rijeke Drave. Metode koje su prikazane u radu su: izračun koncentracije suspendiranog nanosa na temelju diskretnih uzoraka vode, izračun srednje profilske koncentracije i određivanje koeficijenta korekcije za dnevne diskretne uzorke, izračun dnevnog, mjesečnog i godišnjeg pronosa nanosa za mjernu postaju Botovo, definiranje krivulje nanosa na mjernim postajama na Dravi, trendovi promjena u režimu pronosa nanosa u zavisnosti od antropogenih i klimatskih utjecaja te opis metoda proračuna vučenog nanosa i izračun godišnje količine vučenog nanosa na mjernoj postaji Drava – Botovo po Einstein – Brown formuli.

U Hrvatskoj se trenutno mjeri samo pronos suspendiranog nanosa prema navedenim metodama. Svaka metoda ima neke nedostatke, tako npr. izračun koncentracije suspendiranog nanosa na temelju diskretnog uzorka vode za glavne nedostatke ima

vremensku i prostornu pristranost. Metoda profilskih mjerenja s akustičnim mjeračem trenutnih brzina (ADCP „*Acoustic Doppler Current Profiler*“) je mnogo jednostavnija i pouzdanija, ali je oprema vrlo skupa i nedostatak je što se ova mjerenja provode periodično, najčešće kod malih i srednjih protoka. Što se pak tiče kontinuiranog mjerenja mutnoće, u tijeku je projekta „Unaprijeđenje negrađevinskih mjera upravljanja rizicima od poplava u Republici Hrvatskoj - VEPAR“ (2019.-2023.) čiji dio aktivnosti je usmjeren na modernizaciju mreže za hidrološko praćenje površinskih voda. Na 21 hidrološkoj postaji se u sklopu državne mreže planira modernizacija monitoringa suspendiranog nanosa tako da se uvede kontinuirano praćenje mutnoće ugradnjom optičkih senzora za mutnoću.

Mjerenja vučenog nanosa se u Hrvatskoj trenutno ne provode, iako se pokazuje potreba za njegovim monitoringom. Razlog ne provođenju mjerenja je taj da je tradicionalni način mjerenja složen, zahtjeva brojnu terensku ekipu i opremu te za vrijeme velikog protoka mjerenje je izuzetno složeno i opasno. Zbog toga je potrebno razviti ili razmotriti novu metodu za mjerenje vučenog nanosa.

Pronos suspendiranog i vučenog nanosa je vrlo važno kontinuirano pratiti kako bi se dobila spoznaja o trenutnoj i budućoj dinamici pronosa nanosa te kako bi se u konačnici moglo optimalno upravljati vodnim područjima prema Okvirnoj direktivi o vodama. Stoga monitoring nanosa u Republici Hrvatskoj zahtijeva modernizaciju i ulaganje u razvoj novih poboljšanih metoda mjerenja kao i naknadne analize tih podataka.

7. LITERATURA

- [1] Bonacci O. The influence of three Croatian hydroelectric power plants operation on the River Drava hydrological and sediment regime. 2008.
- [2] Tadić L, Brleković T. Hydrological characteristics of the Drava river in Croatia. Springer Geography, vol. PartF5, Springer; 2018, p. 79–90. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92816-6_6.
- [3] Schwarz U. Hydromorphology of the lower Drava. Springer Geography, vol. PartF5, Springer; 2018, p. 61–77. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92816-6_5.
- [4] Drava River - In harmony with the environment. Dostupno na: <https://www.dem.si/en/in-harmony-with-the-environment/drava-river/>. Datum pristupa :28.5.2023.
- [5] Graf WH. Hydraulics of sediment transport. 1984.
- [6] Lóczy D. The Drava basin: Geological and geomorphological setting. Springer Geography, vol. PartF5, Springer; 2018, p. 5–25. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92816-6_2.
- [7] Tectonic map of the European Alps and its foreland basins (adapted from. Preuzeto sa: Scientific Diagram. Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/Tectonic-map-of-the-European-Alps-and-its-foreland-basins-adapted-from-Schmid-et-al_fig1_344832252. Datum pristupa: 28.5.2023.
- [8] Pilot Study: Hydromorphological Survey and Mapping of the Drava and Mura Rivers. 2007.
- [9] Javna ustanova za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode Varaždinske županije. Regionalni park Mura - Drava 2023. Dostupno na: <https://priroda-vz.hr/podrucja/regionalni-park-mura-drava/>. Datum pristupa: 4.4.2023.
- [10] The Amazon of Europe: World's First 5-Country Biosphere Reserve n.d.

- [11] Oskoruš D, Kapelj S, Zavrtnik S, Leskovar K. Suspended Sediment Metal and Metalloid Composition in the Danube River Basin, Croatia. *Water (Switzerland)* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/w14213552>.
- [12] Widmann M, Scha C. A principal component and long - term trend analysis od daily precipitation in Switzerland. vol. 17. 1997.
- [13] Isoard S. Regional climate change and adaptation — The Alps facing the challenge of changing water resources n.d.
- [14] Zaninovi K, Gaji C-Capka M. Changes in Components of the Water Balance in the Croatian Lowlands. n.d.
- [15] Pandžić K, Trninić D, Likso T, Bošnjak T. Long-term variations in water balance components for Croatia. *Theor Appl Climatol* 2009;95:39–51. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0366-5>.
- [16] Gajić-Čapka M, C& K. Trend i varijabilnost protoka i klimatskih veličina u slivu rijeke Drave. *Hrvatske Vode : Časopis Za Vodno Gospodarstvo* 2010;18:19–30.
- [17] Bonacci O GD.) Impact Assessment and Adaptation to Climate Change: Hydrology and Water Resources. In: Jelavić V, editor.,) Ministry Of environmental Protection and Physical Planning, Zagreb : 2001, p. 175–89.
- [18] Bonacci O, Oskoruš D. The changes in the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime. *Environ Earth Sci* 2010;59:1661–70. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0148-8>.
- [19] Državni hidrometeorološki zavod. Dostupno na: <https://hidro.dhz.hr/>. Datum pristupa: 18.4.2023.
- [20] Bonacci O;, Brleković T;, Tadić, Lidija. Hidrološki aspekti pojave snijega u Hrvatskoj. n.d.

- [21] Gregory KJ. The fluvial system, S. A. Schumm, New York, Wiley, 1977. No. of Pages: 338. price: £16.50. Earth Surface Processes 1979;4:97–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.3290040121>.
- [22] Sustainable Management of Sediment Resources: Sediment Management at the River Basin Scale Edited by Philip N. Owens. n.d.
- [23] Tamás EA. Sediment transport of the Drava river. Springer Geography, vol. PartF5, Springer; 2018, p. 91–103. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92816-6_7.
- [24] Web stranica. Quizlet 2023.
- [25] Žugaj R. Hidrologija. 2nd ed. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko - geološko - naftni fakultet; 2015.
- [26] Prof.dr.sc. Kuspilić N. Mehanizam pokretanja zrna nanosa. Dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Postupci_zastite_od_voda_Predavanje_04_2.pdf. Datum pristupa:29.4.2023.
- [27] Babiński Z. The relationship between suspended and bed load transport in river channels. vol. 291. IAHS Publ; 2005.
- [28] Shmakova M. Sediment Transport in River Flows: New Approaches and Formulas. In: Pasquali D, editor. Modeling of Sediment Transport, Rijeka: IntechOpen; 2022. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103942>.
- [29] Droppo IG. Rethinking what constitutes suspended sediment. Hydrol Process 2001;15:1551–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.228>.
- [30] Dietrich WE, Gallinati JD. Fluvial geomorphology. In: Slaymaker O (Ed), Field Experiment and Measurement Programs in Geomorphology 1991:169–220.
- [31] Kovačićek N, Oskoruš D. Monitoring nanosa u Republici Hrvatskoj. In: Oskoruš D, Rubinić J, editors. Nanos u vodnim sustavima - Stanje i trendovi, Varaždin: Hrvatsko hidrološko društvo; 2020, p. 109–18.

- [32] Oskoruš D. Doprinos analizi dinamike suspendiranog nanosa srednjega toka rijeke Save. Zagreb: 2015.
- [33] Oskoruš D. Stanje i trendovi u monitoringu nanosa. In: Oskoruš D, Rubinić J, editors. Nanos u vodnim sustavima - Stanje i trendovi, Varaždin: Hrvatsko hidrološko društvo; 2020, p. 165–72.
- [34] Mujkić R. Istraživanje i proračuni režima riječnog nanosa. Zagreb: 2017.
- [35] Lubura Matković T, Vidaković Šutić R. Bilanca riječnog nanosa na Savi i Dravi kao dio projekta Danube sediment. In: Oskoruš D, Rubinić J, editors. Nanos u vodnim sustavima - stanje i trendovi, Varaždin: Hrvatsko hidrološko društvo; 2020, p. 129–42.
- [36] Oskoruš D. Materijali iz kolegija Hidrologija riječnih bazena, Nanos n.d.
- [37] Particle Technology Labs. Dostupno na: <https://particletechlabs.com/>. Datum pristupa: 10.6.2023.
- [38] Materijali za Geotehnički laboratorij
- [39] Štuhec Damir. Određivanje granulometrijskog sastava vučenog riječnog nanosa. In: Oskoruš D, Rubinić J, editors. Nanos u vodnim sustavima - stanje i trendovi, Varaždin: Hrvatsko hidrološko društvo; 2020, p. 185–94.
- [40] Kereša Z. Recentni pronos vučenog nanosa u staroj Dravi uz hidroelektranu Varaždin. In: Oskoruš D, Rubinić J, editors. Nanos u vodnim sustavima - stanje i trendovi, Varaždin: Hrvatsko hidrološko društvo; 2020, p. 97–108.
- [41] Jovanović MB. Regulacija reka: Rečna hidraulika i morfologija. Beograd: Građevinski fakultet u Beogradu; 2008.
- [42] Institut za elektroprivredu. Projekt Danube sediment - okvirna procjena sedimenta rijeke Dunava i većih pritoka. 2019.
- [43] Okvirna direktiva o vodama 2000/60/EC Europskog parlamenta i vijeća. 2000.

