

Určenie kontrolnej povodňovej vlny na základe jej objemu a tvaru

Anna Liová

Abstract

In this paper a methodology for the construction of design flood waves for the needs of estimating the safety of water structures was proposed. Design waves were processed for the Parná river basin, along the profile of the Horné Orešany reservoir dam. The average hourly discharges in the basin from 1989-2019 were divided into four groups according to seasons - year, spring, summer and winter season. In the individual groups, according to the proposed methodology, the maximum annual and seasonal discharge waves were separated. Subsequent analysis of the separated discharge waves determined their volumes and characteristic shapes of waves in individual groups. The statistical processing of maximum peak discharges determined the T-year, seasonal maximum discharge of flood waves. Then, for a pair of culmination discharge and their associated volumes, a joint distribution of probability was constructed, from which was determined volume with the probability of exceeding or reaching. On the basis of these data, a set of control flood waves was determined.

Key words: design flood wave, separation of discharge waves, the dam Horné Orešany

Anotácia

V príspevku bola spracovaná metodika zostrojenia kontrolných povodňových vln pre potreby posúdenia bezpečnosti vodných stavieb. Pri návrhu bolo spracované obdobie rokov 1989-2019 pre povodie toku Parná po profil koruny priehrady nádrže Horné Orešany.

1 Úvod

Vodné stavby na tokoch sú súčasťou našej spoločnosti a prinášajú jej určité úžitky, ako napríklad zníženie povodňových prietokov, nadlepšenie minimálnych prietokov, zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou, zásobovanie priemyslu a poľnohospodárstva úžitkovou vodou, výroba elektrickej energie, plavba, rybolov či rekreácia. Na druhej strane predstavujú aj nemalé nebezpečenstvo pre územie a obyvateľov žijúcich pod vodnou stavbou. Preto je veľmi dôležitým krokom vodnú stavbu správne navrhnuť a následne počas jej prevádzky správne posudzovať jej bezpečnosť. Jedným z hydrologických podkladov pri návrhu či posudzovaní bezpečnosti vodných stavieb počas

povodňového zaťaženia je kontrolná povodňová vlna, ktorej zostrojenie a správny návrh bude predmetom tohto príspevku. Bezpečnosť priehrad pri povodniach zabezpečuje retenčný priestor nádrže, ktorým sa úplne alebo čiastočne transformujú povodňové prietoky, ako aj bezpečnostný prípad. Ďalším významným krokom je počas prevádzky správne posudzovať bezpečnosť vodnej stavby a to práve počas povodňového zaťaženia, teda je nutné vykonávať jej technicko-bezpečnostný dohľad. Odborný technicko-bezpečnostný dohľad (TBD) nad vodnými stavbami je špecializovaná činnosť, ktorá sa zameriava najmä na zisťovanie technického stavu vodných stavieb. Poškodenie týchto stavieb uvoľnením vzdúvanej alebo zadrživanej vody môže zapríčiniť ohrozenie okolitého územia, života ľudí a majetku. TBD je vykonávaný pozorovaním bezpečnosti a stability vodných stavieb, meraním ich deformácií, ďalej sa sledujú priesaky vôd, hodnotia sa výsledky týchto pozorovaní a meraní a navrhujú sa opatrenia na odstránenie zistených nedostatkov. (Vyhláška č. 119/2016.)

V rámci posudzovania bezpečnosti priehrad počas povodňového zaťaženia požaduje Metodický pokyn (MŽP, 2020), aby bolo každé vodné dielo posúdené na kritické zaťaženie, ktoré reprezentuje kontrolná povodňová vlna. Tá je definovaná ako teoretická prietoková vlna určená kulminačným prietokom so zvolenou pravdepodobnosťou prekročenia, časovým priebehom a objemom s prislúchajúcou pravdepodobnosťou. Posúdeniu bezpečnosti počas povodňového zaťaženia podliehajú priehrady zaradené do I. až IV. kategórie technicko-bezpečnostného dohľadu, ak je ich súčasťou objekt, ktorý prehradzuje údolie toku a vytvára nádrž, cez ktoré preteká povrchový tok, alebo do ktorého sa môže dostať voda z povrchového toku. Podľa kategórií vodných stavieb v závislosti od ohrozenia ľudských životov pri havárii sa určí požadovaná úroveň bezpečnosti pri povodňovom zaťažení. Táto úroveň bezpečnosti je vyjadrená hydrologickými údajmi, okolnosťami, ktoré vplyvajú na bezpečnosť vodných stavieb počas povodňového zaťaženia a predpokladmi a podmienkami prevedenia povodňových prietokov cez vodnú stavbu. Bezpečnosť hrádze, ako aj podložia hrádze a funkčných objektov sa hodnotí pri maximálnom zaťažení vyvolanom prechodom kontrolnej povodňovej vlny. Výstupom hydrologických podkladov je súbor kontrolných vln, ktorého zostrojenie si priblížime v tomto príspevku.

2 Záujmové územie a vstupné dáta

Určenie kontrolnej povodňovej vlny pre posúdenie bezpečnosti vodného diela bolo spracované na vodnej stavbe Horné Orešany, ktorá sa nachádza na toku Parná v rkm 25,00. Podľa výšky škôd, ktoré by nastali náhlym uvoľnením zadrživajúcich a vzdúvaných vôd, je vodná stavba zaradená do II. kategórie vodných stavieb (Vodohospodárska výstavba, š. p., 2019). Pre riešenie tejto práce boli veľmi dôležitými vstupnými údajmi prietoky na toku Parná, ale aj zrážkové úhrny na povodie a taktiež teploty vzduchu.

Údaje o prietokoch boli použité z vodomernej stanice SHMÚ – 5250 Horné Orešany – Parná. Vodomerná stanica sa nachádza na toku Parná, v rkm 26,8, teda nad vodnou nádržou. Vodomerná stanica má plochu povodia 37,86 km². Pred použitím vstupných údajov prešli dáta istou korekciou z dôvodu, že vodomerná stanica sa nachádza nad vodnou nádržou, tým vzniká rozdiel medzi jednotlivými plochami povodia rovný 7,71 km². Konkrétne boli pri návrhu použité hodinové prietoky Q_h [m³.s⁻¹] za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2019 a kulminačné prietoky Q_{kul} [m³.s⁻¹] za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2019.

Údaje o úhrne zrážok na povodie boli použité zo zrážkomernej stanice SHMÚ, Dolné Orešany, a to priemerný denný úhrn zrážok za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2013.

Údaje o teplotách vzduchu boli použité z klimatologickej stanice SHMÚ, Modra-Piesok, a to priemerné denné teploty vzduchu za obdobie 1.11.1988 – 31.12.2013.

3 Metodika

Výber prietokových vln na základe ich výskytu v roku

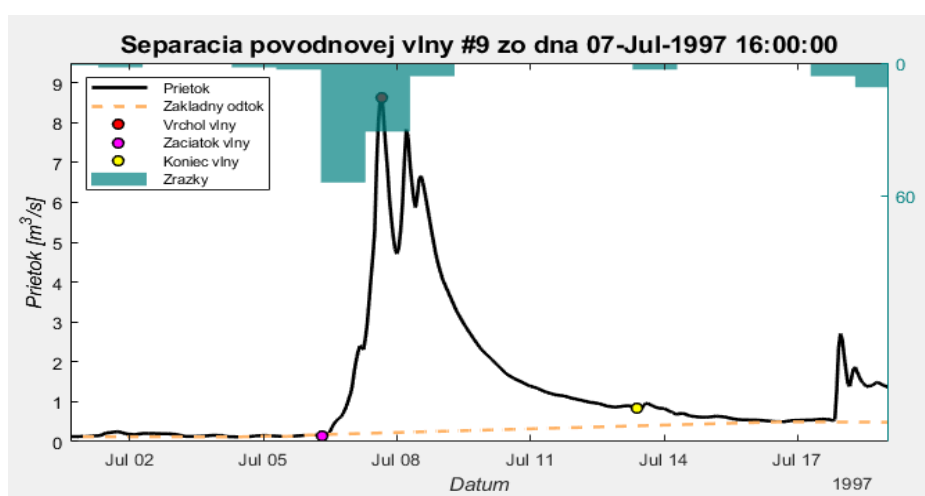
Pre určenie kontrolnej povodňovej vlny bolo potrebné správne určiť objemové a tvarové charakteristiky vybraných prietokových vln. Výskyt jarných prietokových vln býva spojený s topením snehu, prípadne kombináciou topenia snehu a dažďa. Podobná príčina vzniku vln môže nastať aj v zimnom období. Preto majú vlny dlhšie trvanie a väčšie objemy na rozdiel od letných prietokových vln, ktoré vznikajú najčastejšie z búrkových udalostí. Letné sú tvarovo štíhlejšie s kratšou dobou trvania. V skúmanom prietokovom rade sa vlny výrazne líšili nielen trvaním, ale aj tvarom a objemom, preto boli vlny analyzované v štyroch skupinách, a to:

- Maximálne sezónne kulminačné prietoky za obdobie 1989–2019, apríl až máj – jarná sezóna,
- Maximálne sezónne kulminačné prietoky za obdobie 1989–2019, jún až október – letná sezóna,
- Maximálne sezónne kulminačné prietoky za obdobie 1989–2019, november až marec – zimná sezóna.
- Maximálne ročné kulminačné prietoky Q_{kl} za obdobie 1989–2019.

Separácia prietokových vln

Prietokovú vlnu charakterizujeme ako prechodné zväčšenie, kulmináciu a následný pokles prietokov, z čoho vychádza postup, ktorý bol použitý pri separácii jednotlivých povodňových vln. Separácia týchto vln ako aj výpočet základného odtoku boli spracované metódami v programe FloodSep (Valent, 2019). Hlavnou úlohou programu FloodSep je v časovom rade prietokov určiť jednotlivé povodňové udalosti, následne vykonať analýzu ich charakteristík, na základe ktorej je možné zostrojiť povodňovú vlnu. V každom roku bolo potrebné určiť kulminácie z radu hodinových prietokov. V jednotlivých skupinách boli manuálne určené maximálne kulminačné prietoky v danom roku, resp. v danej sezóne. Separácia vln následne prebiehala v nasledujúcich krokoch, a to v každej skupine samostatne:

- 1) Separácia vln metódami, ktoré sú naprogramované v programe FloodSep. Táto separácia bola založená na vyčlenení základného odtoku, pričom začiatok a koniec prietokovej vlny bol určovaný subjektívne.
- 2) Separácia vln metódami, ktoré sú naprogramované v programe FloodSep. K prietokovému radu boli pridané aj údaje o zrážkach a teplote vzduchu, pomocou ktorých bolo možné korektnejšie vyčleniť základný odtok a teda aj začiatok a koniec prietokovej vlny.



Obrázok 1: Príklad separácie prietokovej vlny

Výber reprezentatívneho tvaru vlny

Tvar vlny použitý pri návrhu kontrolnej povodňovej vlny bol určený pomocou metód naprogramovaných v programe FloodSep, v časti programu na to určenej. V prvom kroku boli vyselektované prietokové vlny zjednodušené a zoškálované do intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Zjednodušenie povodňových hydrogramov spočíva v tom, že viacmodálne prietokové hydrogramy sú transformované na jednododálne. Zo súboru zoškálovaných vln je v druhom kroku zostrojený tzv. reprezentatívny hydrogram. Ten je zostrojený zo zoškálovaných hydrogramov centrovaných na polohu kulminácie tak, aby súradnica osi x v tomto bode bola rovná 0. Pri zostrojovaní kontrolných povodňových vln je dôležitý parameter percentil, ktorý ovplyvňuje tvar reprezentatívneho hydrogramu. Bol použitý percentil 50%.

Lokálny odhad N - ročných extrémov prietokov metódou DVWK z dostupných meraní

Kulminačný N-ročný prietok bol získaný štatistickým spracovaním maximálnych kulminačných ročných prietokov ako aj maximálnych kulminačných prietokov v danej sezóne za vybrané obdobie. Odhad týchto hodnôt a s ním súvisiaci výber teoretického rozdelenia pravdepodobnosti a metódy odhadu parametrov teoretického rozdelenia pravdepodobnosti bol uskutočnený podľa metodiky DVWK. N-ročné prietoky pre jednotlivé skupiny odvodené metódou DVWK sú zobrazené v tabuľke 1. Napriek tomu, že metodický pokyn MŽP udáva pre posúdenie pre II. kategóriu vodných stavieb, kam sa radí VN Horné Orešany, 500-ročný, prípadne 1000-ročný prietok, pre potreby tejto práce sme použili prietok s pravdepodobnosťou dosiahnutia alebo prekročenia 0.01, respektíve 100-ročný prietok, ktorý je v tabuľke zvýraznený, a to z dôvodu presnejšieho, spoľahlivejšieho určenia tohto prietoku.

Tabuľka 1: N-ročné prietoky [$m^3 \cdot s^{-1}$]

N [roky]	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1000
jarná sezóna	1.2	2.6	4.0	5.6	6.2	8.2	10.7	13.6	18.2	22.3
letná sezóna	1.8	4.6	8.1	13.7	16.1	26.7	43.7	71.3	135.7	220.5
zimná sezóna	2.5	5.0	6.9	9.0	9.6	11.7	13.7	15.8	18.5	20.6
Q_{kul}	3.9	7.7	11.2	15.4	17.0	22.4	28.8	36.5	48.9	60.2

Objem povodňových vln odvodený analýzou vzťahov medzi kulmináciou a objemami

Pre dvojice kulminačných prietokov a k nim prislúchajúcich objemov bola zostrojená dvojrozmerná združená pravdepodobnosť prekročenia pomocou kopule. Výsledkom je podmienená pravdepodobnosť prekročenia objemu k danému kulminačnému prietoku. Pre potreby tejto práce sme použili k danému prietoku s pravdepodobnosťou prekročenia 0.01 podmienenú pravdepodobnosť prekročenia objemu 0.5, teda strednú, mediánovú vlnu.

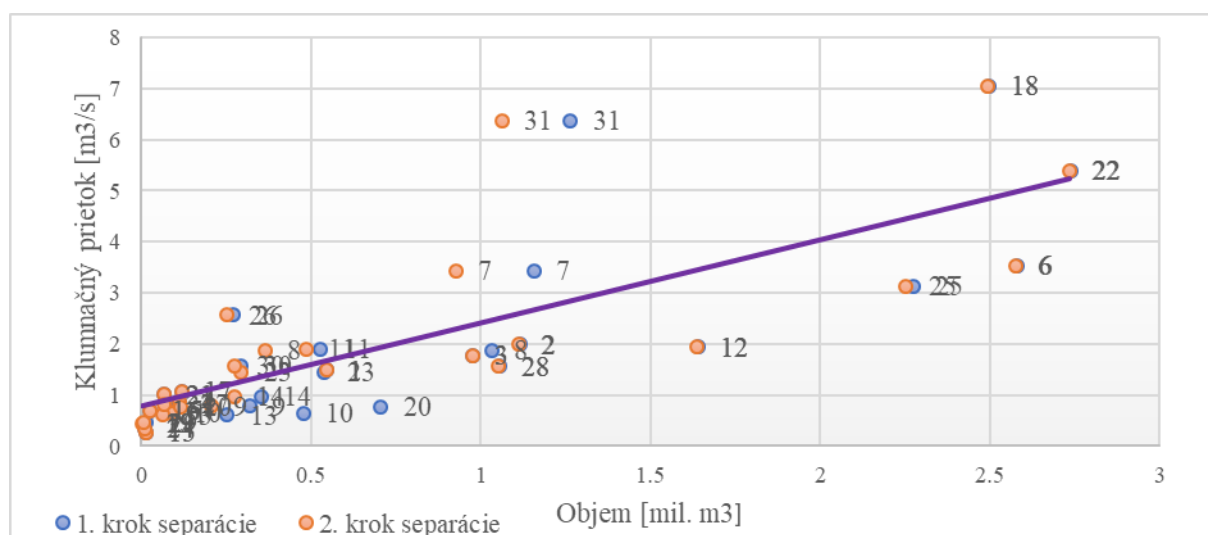
Tabuľka 2: Podmienené objemy k danému 100-ročnému prietoku [$mil. m^3$]

P [-]	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
jarná sezóna	2.117	2.405	2.724	3.110	3.621	4.460	7.207
letná sezóna	2.194	2.271	2.345	2.432	2.525	2.671	3.090
zimná sezóna	6.840	7.109	7.374	7.642	7.958	8.415	9.711
Q_{kul}	2.713	3.253	3.900	4.736	5.944	8.146	17.219

4 Výsledky

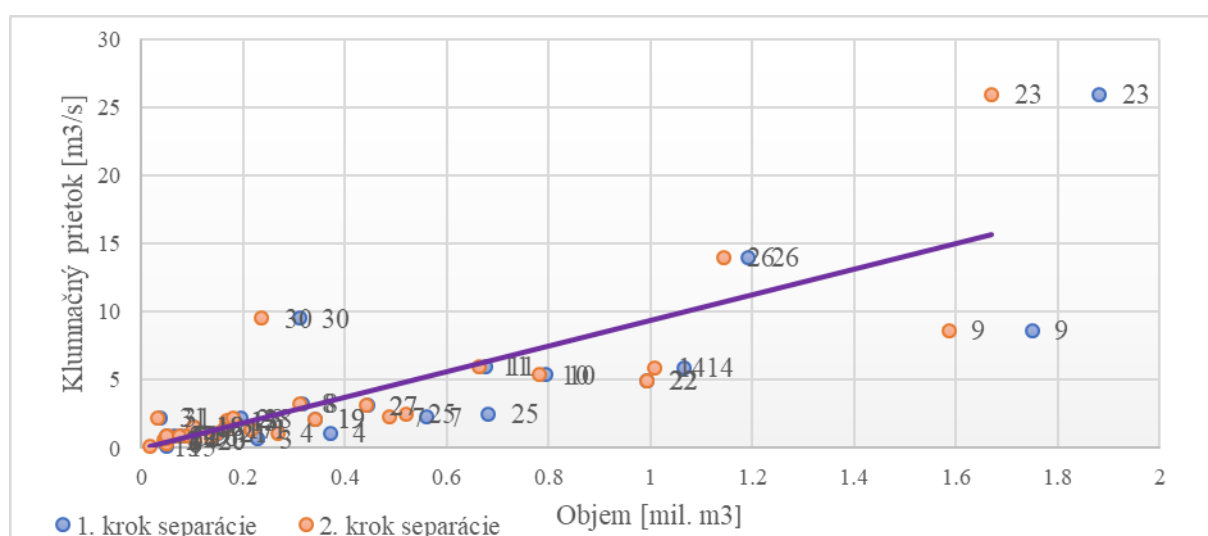
Výsledky separácie prietokových vln

Separácia prietokových vln v jarnej sezóne je zobrazená na obrázku 2. Zobrazuje závislosť medzi objemami a kulminačnými prietokmi. Môžeme vidieť, že pri prvotnej separácii bolo niektorým vlnám predĺžené trvanie a tým bol zväčšený ich objem. Väčšina vln s extrémnejšími hodnotami, či už kulminačného prietoku alebo objemu, dodatočne už nebola upravovaná.



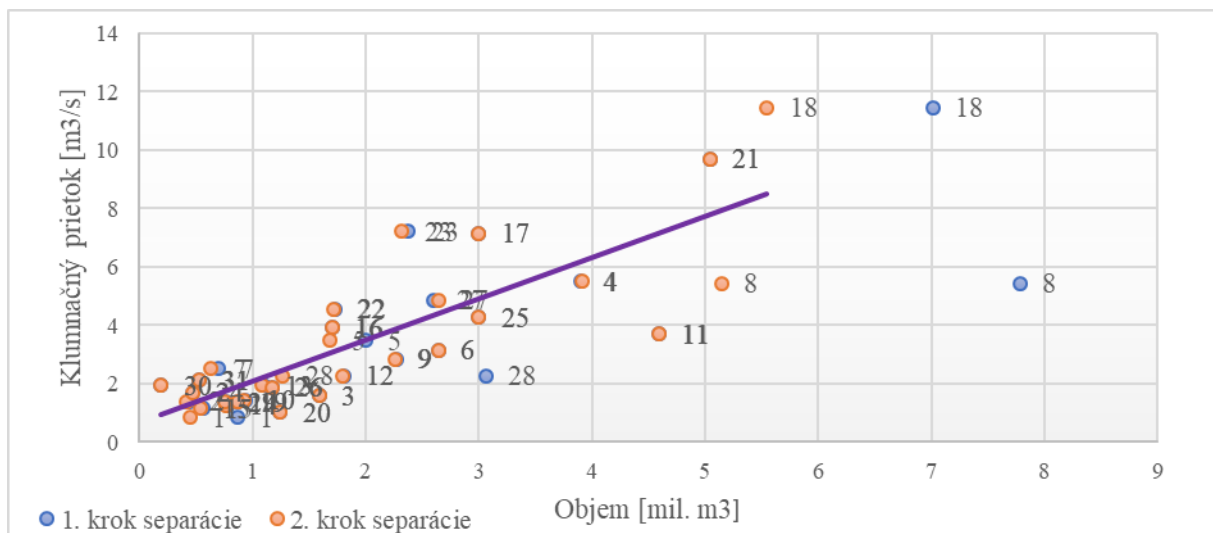
Obrázok 2: Výsledky separácie prietokových vln v jarnej sezóne

Výsledky separácie prietokových vln v letnej sezóne sú zobrazené na obrázku 3, ktorý taktiež zobrazuje závislosť medzi objemami a kulminačnými prietokmi. Pozornosť bola venovaná najmä vlnám, ktoré sa po prvom kroku separácie nachádzali mimo väčšinu odseparovaných vln. V prvom kroku separácie bolo trvanie zostupnej vetvy niektorých vln príliš dlhé – v druhom kroku separácie sme skrátili trvanie zostupnej vetvy a tým aj zmenšili objem prietokových vln.



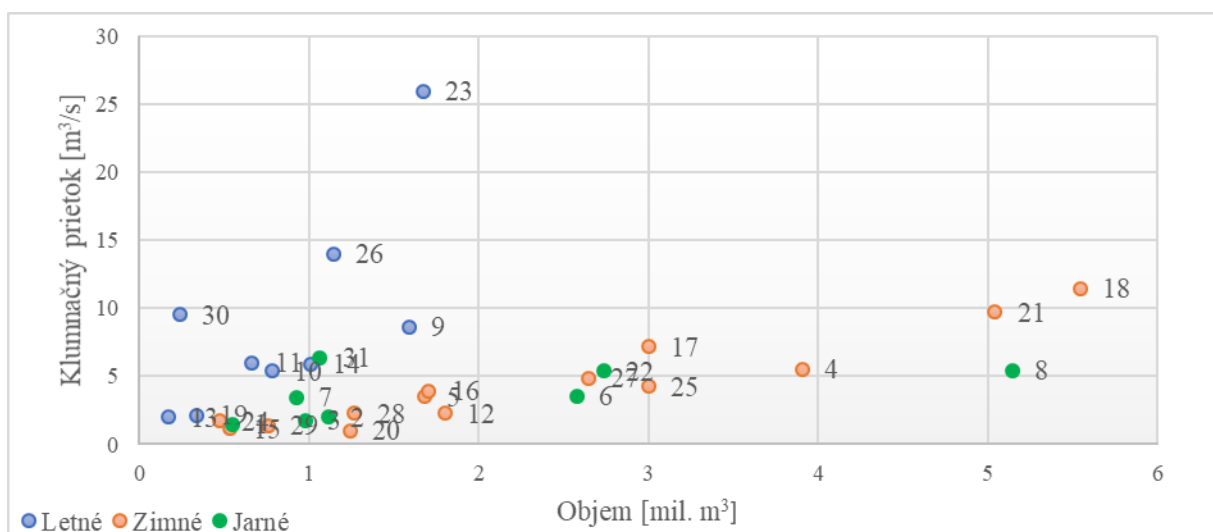
Obrázok 3: Výsledky separácie prietokových vln v letnej sezóne

Výsledky separácie prietokových vln v zimnej sezóne sú zobrazené pomocou obrázku 4, ktorý zobrazuje závislosť medzi objemami a kulmináčnymi prietokmi. Pri určovaní trvania vln s extrémnejšími hodnotami, či už kulmináčného prietoku alebo objemu, boli v prvom kroku pomocou základného odtoku nesprávne určené začiatok a koniec prietokových vln. Po úprave v druhom kroku sa ich objemy zmenšili.



Obrázok 4: Výsledky separácie prietokových vln v zimnej sezóne

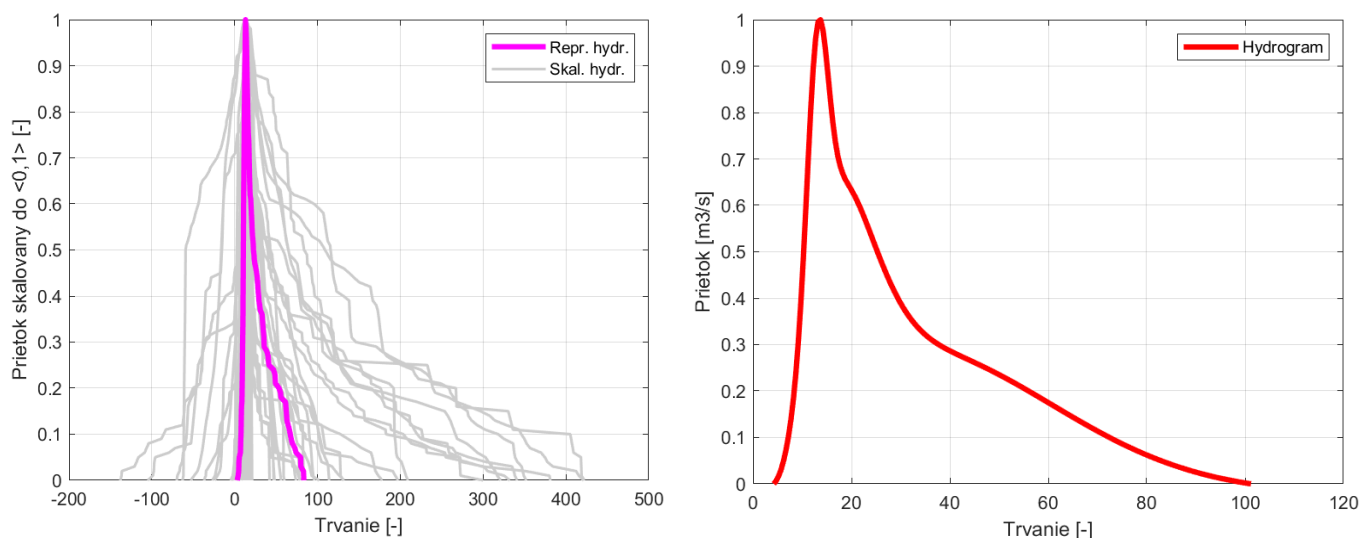
Výsledky separácie prietokových vln v letnej sezóne sú zobrazené pomocou obrázku 5, ktorý zobrazuje závislosť medzi objemami a kulmináčnymi prietokmi. Na spoločnom grafe môžeme vidieť, že rozloženie vln je nehomogénne a pozostáva z viacerých typov vln. Kým zimné a jarné vlny sa radia k vlnám s väčšími objemami a nižšími kulmináčnymi prietokmi, letné vlny vystupujú mimo tento trend a sú charakteristické vyššími prietokmi a menšími objemami, teda aj kratším trvaním. Toto prerozdelenie prietokových vln ukazuje na skutočnosť, že výber vln v jednotlivých sezónach bol vhodným postupom riešenia a malo by sa zohľadniť pri návrhu kontrolnej povodňovej vlny.



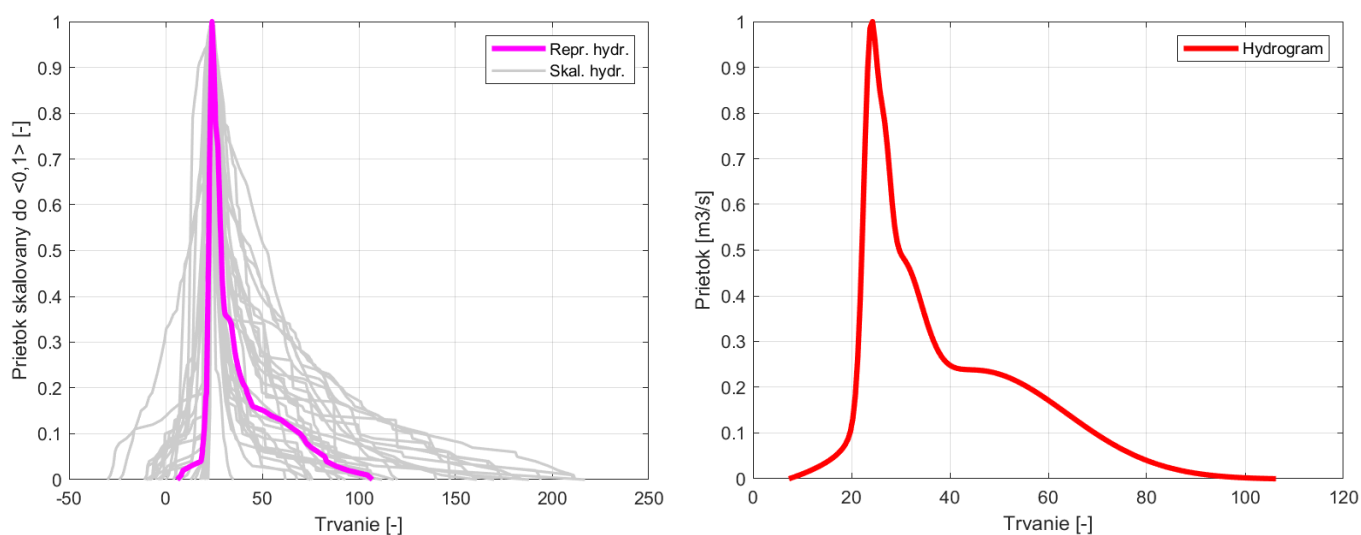
Obrázok 5: Výsledky separácie prietokových vln v skupine ročných kulmináčnych prietokov

Reprezentatívne tvary vln

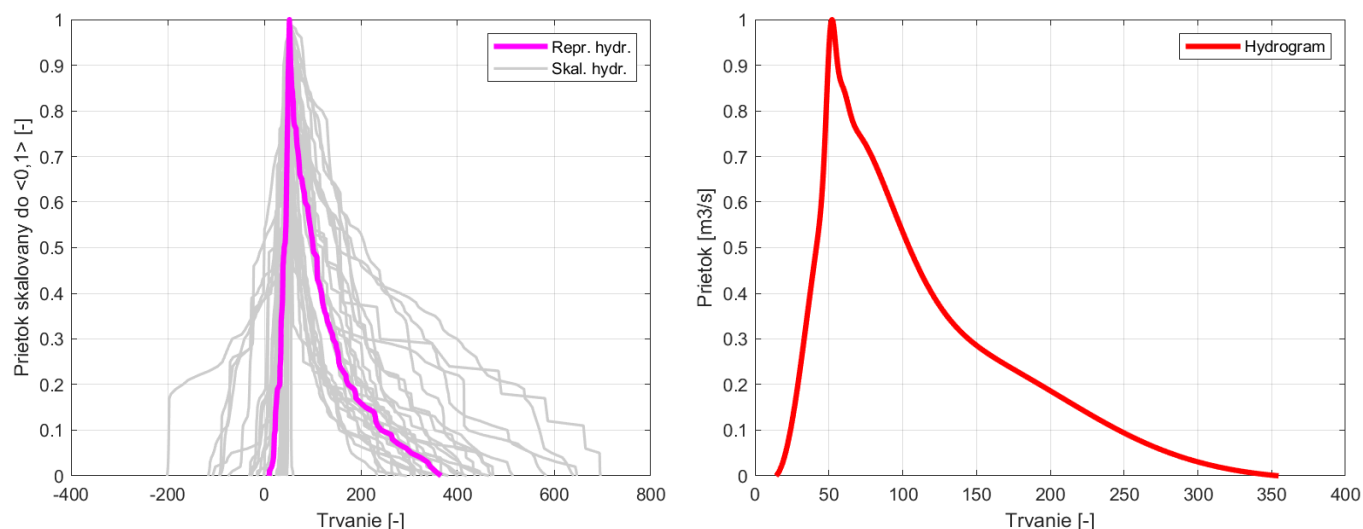
Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej časti príspevku, pre každú skupinu budeme vyberať vlny s hodnotou percentilu 50%. Na obrázkoch 6 až 9 sú zobrazené zaškálované odseparované vlny v jednotlivých skupinách, pričom zvýraznený tvar predstavuje reprezentatívny hydrogram určený pomocou percentilu. V ďalšom kroku je zhotovený vyhladený reprezentatívny hydrogram pomocou Gaussovej zloženej funkcie. Reprezentatívny hydrogram je výstupom z programu Floodsep a definuje tvar návrhovej vlny, ktorý je potrebný pre správne určenie kontrolných povodňových vln.



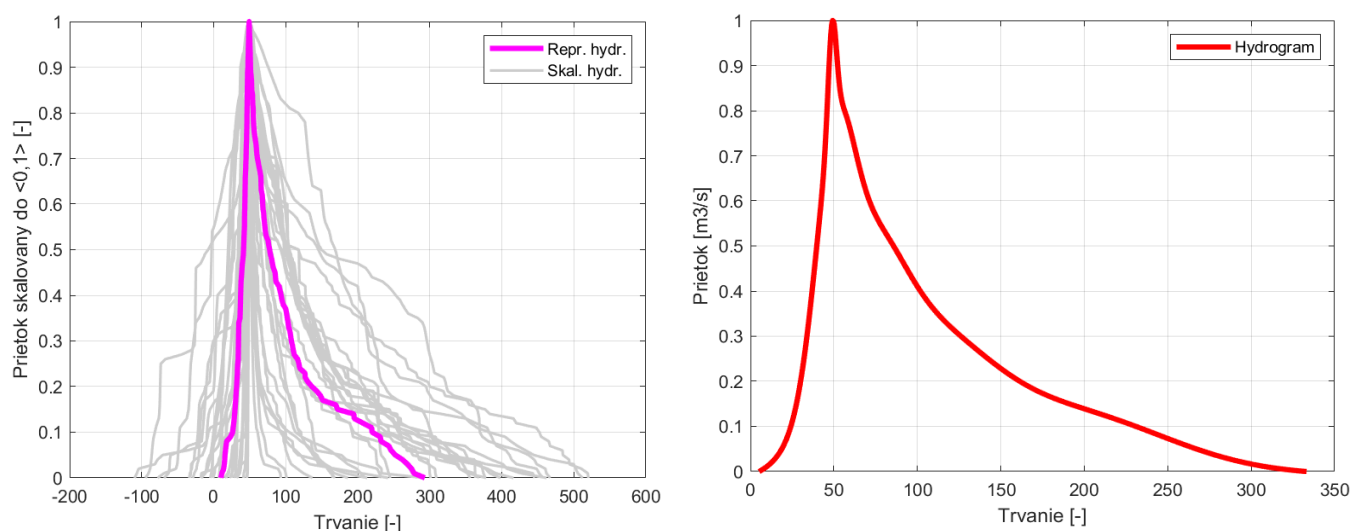
Obrázok 6: Reprezentatívny hydrogram zo zoškálovaných vln (vľavo) a vyhladený reprezentatívny hydrogram pre jarnú sezónu (vpravo)



Obrázok 7: Reprezentatívny hydrogram zo zoškálovaných vln (vľavo) a vyhladený reprezentatívny hydrogram pre letnú sezónu (vpravo)



Obrázok 8: Reprezentatívny hydrogram zo zoškálovaných vln (vľavo) a vyhladený reprezentatívny hydrogram pre zimnú sezónu (vpravo)



Obrázok 9: Reprezentatívny hydrogram zo zoškálovaných vln (vľavo) a vyhladený reprezentatívny hydrogram pre skupinu ročných kulminačných prietokov (vpravo)

Zostrojenie kontrolných povodňových vln

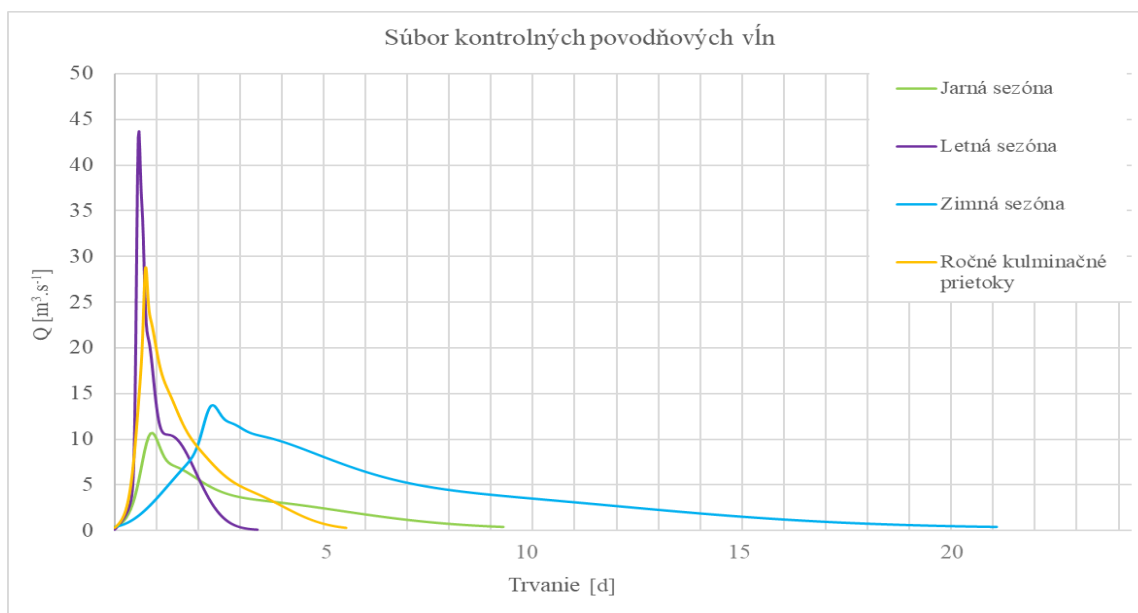
Pri zostrojení kontrolnej povodňovej vlny bolo potrebné poznať hodnoty kulminačného prietoku so zvolenou pravdepodobnosťou prekročenia, k nemu objem s prislúchajúcou pravdepodobnosťou a časový priebeh vlny. Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách, v príspevku boli pri návrhu použité:

- 100-ročný kulminačný prietok, respektíve prietok s pravdepodobnosťou dosiahnutia alebo prekročenia 0.01,
- podmienená pravdepodobnosť prekročenia objemov 0.5
- časový priebeh vlny, ktorý dostaneme priradením podmieneného objemu k tvaru vlny, pričom používame tvary s percentilom 50%.

Pre každú kontrolnú vlnu platí, že z hľadiska požiadaviek metodického pokynu MŽP je homogénna, teda každá vlna je daná kulmináčnym prietokom so zvolenou pravdepodobnosťou prekročenia, prislúchajúcim objemom s prislúchajúcou pravdepodobnosťou a časovým priebehom určeným prislúchajúcim tvarom.

Tabuľka 2: Parametre kontrolných vln

Skupina	Q_{100} [m ³ .s ⁻¹]	V [mil. m ³]	tc [d]
Qmax	28.80	3.253	132.8
Jarná	10.69	2.405	222.9
Letná	43.70	2.271	82.0
Zimná	13.72	7.109	506.0



Obrázok 10: Súbor kontrolných povodňových vln

5 Záver

V príspevku sme sa zaoberali návrhom a zostrojením súboru kontrolných povodňových vln, ktoré predstavujú kritické zaťaženie vodných diel počas povodňového zaťaženia. Návrh týchto kontrolných vln bol realizovaný na základe analýzy vzťahu medzi kulmináciou, objemom a tvarom povodňových vln. Problematika bola spracovaná pre tok Parná po profil hrádze vodnej nádrže Horné Orešany. V nasledujúcej časti stručne zhrnieme zistenia a výsledky. Keďže sa prietokové vlny výrazne líšili v priebehu roka svojím tvarom, bolo nutné analyzovať jednotlivé prietokové vlny v skupinách, a to v skupine ročných kulminačných prietokov a v 3 sezónnych skupinách- jarnej, letnej a zimnej.

Ďalším krokom bola separácia jednotlivých prietokových vln. Pri separácii bolo dôležité pre korektné určenie začiatku a konca jednotlivých prietokových vln zohľadniť klimatické pomery, teda zrážky a teploty vzduchu. Najmä údaje o zrážkových úhrnoch boli nápomocné pri rozhodovaní o trvaní a tvare vzostupných a zostupných vetiev prietokových vln. Údaje o teplotách boli využívané najmä

v zimnom období. Výsledkom separácie bol objem a trvanie jednotlivých prietokových vln, ktoré bolo podstatné poznať pri nasledujúcich analýzach.

Pomocou odseparovaných prietokových vln boli zostrojené reprezentatívne tvary kontrolných vln. Pre zostrojenie kontrolných vln sme použili tvar vlny s percentilom 50% v každej skupine .

Štatistickým spracovaním kulminačných prietokov pre jednotlivé skupiny boli určené N-ročné prietoky pre $N = 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 500, 1000$ rokov. Kontrolná vlna je definovaná kulminačným prietokom so zvolenou pravdepodobnosťou prekročenia, teda bolo nutné vybrať, aký N-ročný prietok bude použitý. Pri riešení bol použitý prietok s pravdepodobnosťou prekročenia 0.01, respektíve 100-ročný prietok. Pre jednotlivé skupiny bol nasledovný – jarná sezóna $10,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, letná sezóna $43,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, zimná sezóna $13,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pre skupinu ročných kulminačných prietokov $28,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vzťahy medzi kulminačnými prietokmi a objemami jednotlivých odseparovaných vln boli analyzované a na základe tejto analýzy bola pre dvojice kulminačných prietokov a k nim prislúchajúcich objemov zostrojená dvojrozmerná združená pravdepodobnosť prekročenia. V príspevku bola použitá podmienenú pravdepodobnosť prekročenia objemu k danému 100-ročnému prietoku 0.5, výsledné objemy použité pri návrhu pre jednotlivé skupiny boli nasledovné : jarná sezóna 2,405 mil. m^3 , letná sezóna 2,271 mil. m^3 , zimná sezóna 7,109 mil. m^3 , skupina ročných kulminačných prietokov 3,253 mil. m^3 . Zostrojený súbor kontrolných vln má presne stanovené charakteristiky, v každej skupine vznikla vlna so 100-ročným prietokom, podmieneným objemom 0,5 a tvarom pre percentil 50%, tým pádom napĺňa požiadavky metodického pokynu.

6 Literatúra

Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, 2020: Metodický pokyn generálneho riaditeľa sekcie vôd Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky k posudzovaniu bezpečnosti priehrad a odkalísk počas povodňového zaťaženia v rámci technicko-bezpečnostného dohľadu. Bratislava, 2020. 13 s.

P. Valent, 2019: FloodSep: užívateľská príručka, SvF STU v Bratislave, 2019

Vodohospodárska výstavba, š. p., 2019. ES o TBD nad VS Horné Orešany za roky 2017-2018. Bratislava, 2019. 64 s.

Vyhláška č 119/2016 Z. z. Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky z 22. februára 2016, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o výkone odborného technicko-bezpečnostného dohľadu nad vodnými stavbami a o výkone technicko-bezpečnostného dozoru