

Numerická metoda pro posouzení efektivity suché nádrže

Martin Dočkal, Karel Vrána¹



Metoda byla zpracována a testována v rámci výzkumného záměru MŠMT ČR VZ 02 CEZ MSM 6840770002 „Revitalizace vodního systému krajiny a měst zatíženého významnými antropogenními změnami“.

Metoda je volně přístupná na těchto webových stránkách, její používání je bezplatné, při jejím použití je nutno citovat zdroj. Použití metody nevyžaduje žádný speciální hardware, výpočet probíhá v prostředí Microsoft Excel za využití maker (při spuštění je třeba makra povolit).

Metoda byla testována na řadě konkrétních lokalit, přesto se mohou vyskytnout případy, pro něž metoda není ošetřena. Uvedení autoři metody budou vděční za jakékoliv připomínky a náměty, které by posloužily ke zkvalitnění metody.

Praha, prosinec 2007

¹ Martin Dočkal, Ing., Ph.D. – dockal@fsv.cvut.cz , Karel Vrána, Doc. Ing., CSc. - vrana@fsv.cvut.cz , ČVUT v Praze, Fakulta stavení, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, Tháškova 7, Praha 6, 16629

Úvod

V poslední době je v řadě regionů přikládán velký význam výstavbě suchých nádrží. Zejména v období po významných povodních v roce 1997 a 2002 spatřovali někteří vodohospodáři nejlepší řešení protipovodňové ochrany v návrhu a výstavbě suchých nádrží (poldrů). Postupem času se ukazuje, že suché nádrže mohou být jedním z prvků protipovodňové ochrany, nikoliv však prvkem jediným a vše řešícím.

Suché nádrže a poldry je možno navrhovat v zásadě buď v horních částech povodí nebo až přímo nad chráněnou lokalitou.

Výhodou prvního způsobu (v horních částech povodí) je možnost zachycení odtoku vody ze srážek prakticky v místě vzniku soustředěného odtoku a dále možnost ovlivnění střetu kulminací z jednotlivých toků v místě jejich soutoku. Nevýhodou tohoto způsobu umístění nádrží je však morfologie území. V horních částech povodí se zpravidla jedná o úzká, sevřená údolí a tok s velkým sklonem dna, takže i poměrně vysoká hráz vytvoří pouze malý záchytný objem. Navíc umístění v horních částech povodí ovlivní odtoky jen z malé části území, a tedy i vliv takové suché nádrže je omezený.

Výhodou druhého způsobu umístění suché nádrže (nad chráněnou lokalitou – zpravidla intravilánem města či obce) je možnost přímého posouzení jejího účinku na redukcii průtoků v chráněné lokalitě a případně i psychologický efekt na obyvatelstvo chráněné lokality (buduje se opatření, které je bude chránit). Na druhé straně je třeba uvážit, že v dolních částech povodí jsou již kulminační průtoky výrazně vyšší než v partiích horních a redukce kulminačního průtoku bude vyžadovat výrazně vyšší záchytný prostor nádrže. Nevýhodou tohoto způsobu umístění suché nádrže je rovněž zvýšení povodňového nebezpečí v případě protržení hráze, kdy na rozdíl od normální povodně může vzniknout tzv. zvláštní povodeň s násobnou hodnotou kulminačního průtoku.

Efektivita suché nádrže

Metoda pro posouzení efektivity (účinnosti) suché nádrže vychází z posouzení poměru záchytného prostoru nádrže a objemu návrhové povodňové vlny se zahrnutím hydraulického řešení odtoku vody výpustným potrubím, případně bezpečnostním přelivem.

Důvodem pro zpracování této metody byla skutečnost, že při rozhodování o typu protipovodňového opatření může být vybrána jako nejvhodnější suchá nádrž v některém profilu buď z důvodu vhodné morfologie území nebo na základě přání investora. V některých případech však je možno k výběru vhodného profilu přistupovat variantně a již v úrovni investičního záměru zvolit variantu nejvhodnější. Vzhledem k tomu, že se může jednat o posouzení většího počtu variantních řešení, vychází metoda pro stanovení efektivity suché nádrže z pokud možno minimálního počtu potřebných vstupních údajů a dále z toho, aby získání těchto vstupních údajů nebylo finančně náročné.

Cílem variantního návrhu suché nádrže je nalézt optimální poměr mezi kulminací přítoku a odtoku vody z nádrže, respektive zajistit, aby kulminační odtok z nádrže nepřevýšil hodnotu neškodného průtoku z hlediska chráněné lokality pod nádrží. Toho je možno dosáhnout buď volbou velikosti záchytného prostoru nebo průměru odpadního potrubí, respektive jejich vzájemnou kombinací.

Výsledkem řešení je možnost výběru nejvhodnější varianty umístění suché nádrže a jejich technických parametrů (výška hráze, průměr a výškové umístění odpadního potrubí, rozměry a výškové umístění bezpečnostního přelivu) a dále získání informací o maximálním odtoku vody pod hrází pro návrhovou povodňovou vlnu příslušné doby opakování.

Výpočtové schéma

Řešení transformačního účinku nádrže vychází ze vztahu

$$Q_p \cdot dt - Q_o \cdot dt = \pm dV, \quad (1)$$

kde Q_p je časový průběh přítoku vody do nádrže ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 Q_o – časový průběh odtoku vody z nádrže ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 t – čas (s)
 V – objem vody (změna - přírůstek nebo úbytek) v záchytném prostoru nádrže (m^3)

Protože časový průběh přítoku do nádrže obecně nelze analyticky vyjádřit, není možno uvedenou diferenciální rovnici řešit přímo. Z toho důvodu je třeba přejít na řešení po časových krocích a rovnici ve tvaru:

$$Q_p \cdot \Delta t - Q_o \cdot \Delta t = \pm \Delta V, \quad (2)$$

kde Q_p je časový průběh přítoku vody do nádrže ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 Q_o – časový průběh odtoku vody z nádrže ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 Δt – časový krok (s)
 V – objem vody (změna - přírůstek nebo úbytek) v záchytném prostoru nádrže (m^3)

Transformace povodňové vlny v retenčním prostoru nádrže je pak řešena s dostatečnou přesností metodou diferencí, kdy kontinuální časový průběh transformace je nahrazen řešením po časových krocích. Délka časového kroku je v metodě zvolena 10 vteřin, čemuž odpovídá i interpolace hodnot přítoků na stejný časový krok. Kratší časový krok by vyústil v neúměrné množství výstupních dat bez dalšího zpřesnění. Prodloužení časového kroku naopak může vést k významnému snížení přesnosti výpočtu a k nestabilitě výpočtu.

Vlastní výpočet transformace probíhá tak, že pro každý časový interval se určí z čáry časového průběhu povodně množství vody, které do nádrže přiteče za dobu časového intervalu. Toto množství vody zvýší hladinu vody v nádrži na úroveň, jejíž hodnotu je možno určit z charakteristických čar nádrže. Tato úroveň hladiny způsobí odtok vody výpustným potrubím, průtok je možno stanovit z konzumční křivky potrubí (pro zvolený profil potrubí). Rozdíl přítoku vody do nádrže a odtoku vody odpadním potrubím od výpusti za zvolený časový interval určuje objem vody v nádrži na počátku dalšího časového intervalu. Tímto způsobem pokračuje výpočet až do odeznění povodně. Do řešení je možno od určité výškové úrovně, odpovídající koruně bezpečnostního přelivu, zahrnout též neřízený odtok vody přes bezpečnostní přeliv. Tento průtok se stanoví z konzumční křivky bezpečnostního přelivu.

Pro výpočet transformace povodňové vlny v retenčním prostoru suché nádrže je třeba mít k dispozici následující podklady:

- charakteristické čáry suché nádrže (čára zatopených objemů)
- časový průběh povodňové vlny
- konzumční křivku odpadního potrubí a bezpečnostního přelivu (resp. parametry zařízení charakterizující tyto křivky)

Konzumční křivka odpadního potrubí

Konzumční křivka odpadního potrubí udává závislost průtoku trubním odpadem na hloubce vody v nádrži. Do výpočtu je zahrnut režim průtoků s volnou hladinou i tlakové proudění v potrubí. Při beztlakovém průtoku je brán v úvahu charakter proudění - podkritický nebo nadkritický v závislosti na sklonu dna potrubí. Hydraulicky se jedná v zásadě o řešení propustku s volnou hladinou. Při stoupání hladiny před vtokem dochází k zahlcení vtoku a posléze k tlakovému proudění, v každém případě však s výtokem neovlivněným dolní vodou.

Postup výpočtu:

- *Určení kritických hodnot potrubí při průtoku s volnou hladinou ($h = 0$ až $h = D$)*

Jsou spočteny hodnoty hloubky, rychlosti, průtoku a sklonu potrubí při kritickém proudění pro zvolené hloubky vody v potrubí h_{kr} , (v_{kr} , Q_{kr} , i_{kr}) a hloubka vody před vtokem do potrubí při těchto podmínkách (h_0) dle vztahu

$$h_0 = \frac{1}{\varphi} \left(h_{kr} + \frac{v_{kr}^2}{2g} \right) \quad (m) \quad (3)$$

kde Q_{kr} je průtok při kritické rychlosti ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 v_{kr} - kritická rychlost vody v potrubí ($m \cdot s^{-1}$)
 h_{kr} - kritická hloubka vody v potrubí (m)
 i_{kr} - sklon potrubí při kritickém proudění (-)
 h_0 - hloubka vody před vtokem (m)
 φ - součinitel tvaru vtoku (-)

Podle převažujícího charakteru vztahu skutečného a kritického sklonu potrubí pro jednotlivé zvolené hloubky je uvažován tomu odpovídající charakter proudění (říční/bystrinné). Součinitel tvaru vtoku závisí na úpravě vtoku do potrubí. Pro běžně používaný ostrý vtok z nádrže do odpadního potrubí (bez hydraulicky vhodného zaoblení) je možno pro tuto fázi výpočtů volit hodnotu $\varphi = 0,84$. Tato hodnota odpovídá běžně používanému ostrohrannému vtoku do potrubí. Pokud by již v rámci investičního záměru byla uvažována hydraulicky vhodná úprava vtoku do potrubí, je možno nalézt odpovídající hodnoty součinitele φ v odborné hydraulické literatuře (např. Vrána – Rybníky a účelové nádrže – příklady).

- *Výpočet konzumční křivky potrubí v oblasti proudění s volnou hladinou ($h = 0$ až $h = D$)*

V případě, že sklon osy potrubí je menší, než sklon kritický (říční proudění v potrubí) je průtok Q počítán ze Chézyho rovnice ve tvaru

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \quad (m^3 \cdot s^{-1}) \quad (4)$$

kde n je Manningův součinitel drsnosti (beton $n = 0,019$, ocel $n = 0,013$, plast $n = 0,011$)
 R - hydraulický poloměr (m), $R = S/O$ (4.1)
 I - sklon potrubí (-)

V případě, že je sklon potrubí větší, než sklon kritický (bystrinné proudění v potrubí) platí pro průtok kritické hodnoty, určené podle zásad uvedených výše (kritické hodnoty).

- Výpočet konzumční křivky potrubí při tlakovém proudění ($h > \beta \cdot D$ $\beta=1/\varphi$)

Průtok Q je počítán ze vztahu

$$Q = S_p \frac{(2gH)^{0,5}}{(1 + \sum \xi_i)^{0,5}} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (5)$$

kde Q je průtok v potrubí ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

β je součinitel tvaru vtoku, pro běžně používaný ostrohranný vtok do odpadního potrubí $\beta = 1,20$

H - výškový rozdíl mezi hladinou vody na vtoku a osou potrubí na výtoku (m)

S_p – plocha potrubí (m^2)

$\sum \xi_i$ - součet součinitelů ztrát

ξ_{vt} - součinitel ztráty vtokem $\xi_{vt} = 0,5$ (5.1)

ξ_{vy} - součinitel ztráty výtokem $\xi_{vy} = 0$ (5.2)

ξ_{ti} - součinitel ztráty třením $\xi_{ti} = \frac{125n^2 l}{D^{4/3}}$ (5.3)

l – délka odpadního potrubí (m)

n – Manningův součinitel drsnosti (viz výše)

D – průměr potrubí (m)

Konzumční křivka bezpečnostního přelivu

Konzumční křivka bezpečnostního přelivu je dána vztahem pro obdélníkový nebo lichoběžníkový tvar.

$$Q = m \cdot b \cdot (2g)^{0,5} \cdot h^{1,5} + 8/15 \cdot \mu \cdot (2g)^{0,5} \cdot (\text{tg } \alpha) \cdot h^{5/2} \quad (6)$$

kde Q je průtok přes korunu bezpečnostního přelivu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), odpovídající přepadové výšce h (m)

m – součinitel přepadu (s dostatečnou přesností lze v této fázi posouzení volit průměrnou hodnotou $m = 0,40$). Program umožňuje zadání libovolné hodnoty součinitele

h – přepadová výška (m), h = nadmořská výška hladiny vody v nádrži – nadmořská výška koruny bezpečnostního přelivu

μ – součinitel zkosení boků přelivu (obvykle volíme průměrnou hodnotou $\mu = 0,62$)
Program však umožňuje zadání libovolné hodnoty součinitele

α – úhel sklonu boků přelivu (od vodorovné osy), v podobě $\text{tg } \alpha$ je klasickým sklonem

Zadávání vstupních údajů

Veškeré vstupní údaje se zadávají v prostředí Microsoft Excel do jednoho společného souboru. Jednotlivým vstupním údajům a dalším činnostem odpovídají jednotlivé listy souboru, které jsou pro přehlednost rozlišeny barevně. Hodnoty je vždy třeba přepsat – nejsou zadány defaultně. Proto je nutné po zadání změn do souboru uložit jej pod jiným názvem.

Na dolní liště jsou uvedena tato označení listů:

- Nádrž (modrá barva) – příprava čáry objemů (charakteristické čáry nádrže)
- Povodeň (fialová barva) – příprava přítokové vlny povodně
- Výpust (žlutá barva) – zpracování konzumční křivky výpusti(i)
- Přeliv (zelená barva) – zpracování konzumční křivky bezpečnostního přelivu

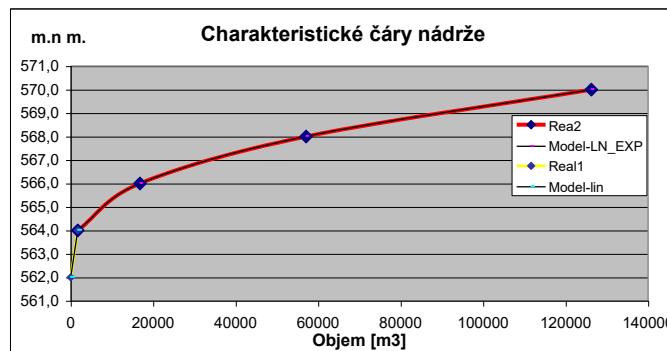
Charakteristické čáry nádrže

Nutnou informací pro posouzení účinnosti suché nádrže, kterou musí mít projektant k dispozici, jsou charakteristické čáry budoucí nádrže, tj. čára zatopených ploch a objemů v závislosti na úrovni hladiny vody v nádrži. Podrobné zaměření nádrže ve fázi výběru a posouzení vhodných hrázových profilů zpravidla není k dispozici, takže je třeba využít např. mapových podkladů nebo digitálního modelu terénu, pokud tyto k dispozici jsou. Dostatečným podkladem pro řešení úlohy může být mapový list v měřítku 1 : 10 000 s krokem vrstevnic 2 m.

Do listu „Nádrž“ se zadávají dvojice hodnot Nadmořská výška hladiny (m n.m.) a Objem (m³) viz Obr.1, a to pro všechny úrovně nadmořských výšek, v nichž byly objemy stanoveny. Nejnižší úroveň je úroveň dna suché nádrže (dno odpadního potrubí výpusti), nejvyšší úroveň nadmořská výška maximální hladiny vody v nádrži nebo koruny hráze. Pro první výpočty je účelné zvolit nejvyšší úroveň dle morfologie terénu a teprve na základě výpočtu maximální hladiny vody v nádrži pro návrhový kulminační průtok určit výškové řešení suché nádrže.

Specifické čáry nádrže

Nadm.v. hladiny	Objem
562	0
564	1732,297
566	16782,317
568	57071,661
570	126252,79



aproximační fce	
A	561,1836446
B	0,293515268
C	0,015102255
D	562
E	0,001155123

Objem	ln(objem)	sqrt(objem)	Nadm.výška hladiny	Vypočtená nadm.v.
1732	7,4572036	41,62087	564,0	564,0010
16782	9,728081	129,5466	566,0	565,9954
57072	10,952063	238,8968	568,0	568,0061
126253	11,746041	355,3207	570,0	569,9974
0				
0				
0				
0				
0				
0				

$$MODEL = A + B * LN(V) + C * V^{0,5}$$

Objem	lineární (objem)	Nadm.výška
0		562,0
1732		564,0010

$$MODEL = D + E * V$$

VÝSLEDEK

Regresní statistika	
Násobné R	1
Hodnota sp	1
Nastavená	65535
Chyba stf. l	0
Pozorování	2

VÝSLEDEK

Regresní statistika	
Násobné R	0,99999835
Hodnota sp	0,9999967
Nastavená	0,9999901
Chyba stf. l	0,00812378
Pozorování	4

ANOVA

	Rozdíl	SS	MS	F	ýznamnost F
Regrese	2	19,999934	9,999967	151524,4	0,001817
Rezidua	1	6,6E-05	6,6E-05		
Celkem	3	20			

ANOVA		Rozdíl	SS
Regrese	1	2,0020339	
Rezidua	0	1,292E-26	
Celkem	1	2,0020339	

	Koeficienty	řba stf. hodř	t stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95,0%	Horní 95,0%	
A	Hranice	561,183645	0,0645144	8698,576	7,32E-05	560,3639	562,00337	560,3639	562,0034
B	Soubor X 1	0,29351527	0,0085946	34,15097	0,018636	0,18431	0,4027201	0,18431	0,40272
C	Soubor X 2	0,01510226	0,0001183	127,6718	0,004986	0,013599	0,0166053	0,013599	0,016605

ANOVA		Koeficienty	řba stf. hodř
D	Hranice	562	0
E	Soubor X 1	0,001155123	0

REZIDUA

Pozorování	Očekávaná Y	Rezidua
1	562	1,137E-13
2	564,0010167	0

Obrázek 1 – ukázka z listu Nádrž

Čára objemů je obecným vztahem, který není vyjádřen žádnou funkcí a je jiný pro každou řešenou nádrž. Autoři metody se pokusili čáru objemů kterékoliv nádrže vyjádřit funkční závislostí. Na základě průběhů čáry objemů pro řadu konkrétních nádržních profilů testovali různé funkční závislosti (logaritmické, exponenciální, polynomické) a došli k závěru, že jako nejvhodnější se pro popis čáry objemů jeví logaritmicko-exponenciální model s proměnnými parametry. Těsnost logaritmicko-exponenciálního vyjádření je vysoká. Pochopitelně je třeba pro každou řešenou nádrž stanovit regresní analýzou parametry vztahu.

Na základě zadaných dvojic hodnot objemů vody V a nadmořské výšky H lze v programu Excel za pomoci regresní analýzy (Nástroje-Analýza dat-Regrese) určit parametry A , B , C logaritmicko-exponenciálního vyjádření ve tvaru:

$$H = A + B * \ln(V) + C * (V)^{0,5} \quad (7)$$

Současně jsou určeny odchylky hodnot reálných a vypočtených (pro kontrolu korelace – na Obr.1 označeno jako Rezidua) a vykreslen graf, v němž jsou vyznačeny bodově vstupní hodnoty a červeně křivka, která aproximuje funkční vztah s vypočtenými parametry. Vzhledem k tomu, že nelze vyjádřit $\ln 0$, je funkční vztah mezi nulovou a nejbližší vyšší hodnotou objemu vyjádřen přímkou, spojující tyto dvě hodnoty. Takto je možné celou čáru zatopených objemů popsat pomocí funkčních vztahů.

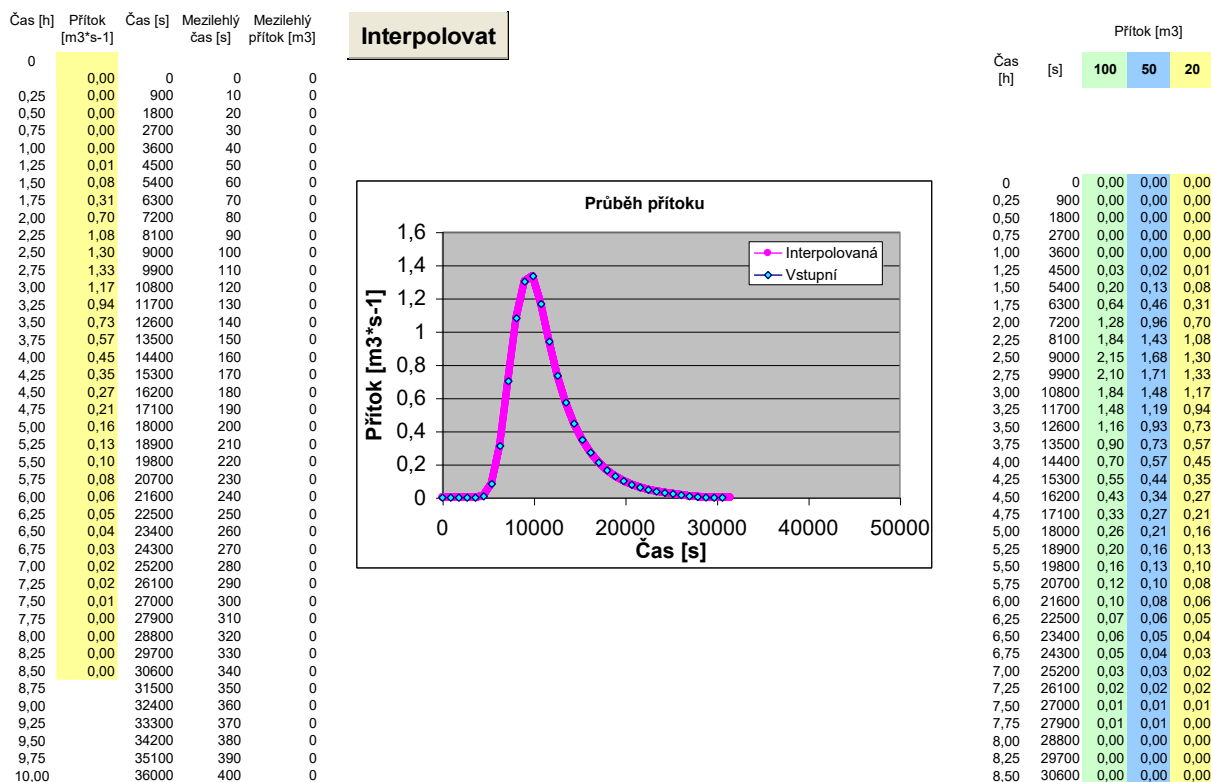
Vypočtené parametry funkce je nutno zkopírovat do políček, umístěných napravo od grafu funkční závislosti (Viz. Obr.1). Vlastní program pro transformaci povodňové vlny pak využívá takto stanoveného funkčního vztahu k určení potřebných hodnot hloubky vody v retenčním prostoru nádrže na základě vypočteného objemu vody. Pokud by uživatel uvážil, že je lépe zvolit jiný než logaritmicko-exponenciální funkční vztah pro popis čáry zatopených objemů, je nutno přepsat rovnice v listu „Výpočet“.

Časový průběh povodňové vlny

Časový průběh povodňové vlny je možno pro hrázový profil získat od ČHMÚ. Pro posouzení efektivity nádrže je však vhodné provést výpočet pro povodňové vlny různé doby opakování (např. PV 100, PV 50 a PV 20). V případě, že se jedná o posouzení vhodnosti několika možných hrázových profilů a výběr optimálního umístění nádrže, násobí se počet potřebných vstupních hodnot, což se pochopitelně projeví ve zvýšení finančních nákladů na projekt. Z tohoto důvodu je pro variantní posouzení několika vhodných hrázových profilů účelné vyžádat pouze pro jeden profil průběh povodňové vlny jedné doby opakování (zpravidla PV 100) a kulminační průtoky dalších potřebných dob opakování (např. Q_{50} a Q_{20}) a přepočtem ploch povodí získat jednak kulminační průtoky pro další možné hrázové profily, jednak tvar povodňových vln dalších potřebných dob opakování.

Vstupní údaje o časovém průběhu přítoku vody do nádrže se zadávají v listu „Povodeň“ manuálně dvojicí odpovídajících si hodnot času (hod) a přítoku na konci tohoto časového intervalu ($m^3 \cdot s^{-1}$) – Viz Obr.2. Délka časového intervalu mezi jednotlivými dvojicemi vstupních hodnot je libovolná, podmínkou však je, aby doba mezi jednotlivými zadávanými časy byla stejná. Na začátku povodňové vlny je někdy doba mezi jednotlivými časy kratší než v sestupné větvi povodně, která je výrazně plošší. Stejně doby mezi zadávanými hodnotami je možno docílit buď vypuštěním mezilehlých hodnot mezi hodnotami se stejným krokem nebo doplnění chybějících hodnot lineární interpolací.

Najednou lze zadat všechny povodňové vlny, které budou v rámci transformace využívány (na obrázku 2 vpravo) a pro výpočet pak pouze překopírovat do sloupce vlevo od grafu tu vlnu, která je pro příslušný výpočet aktuální.



Obrázek 2 – ukázka z listu Povodeň

Po stisknutí tlačítka „Interpolovat“ program automaticky provede interpolaci mezi zadanými hodnotami a zpracuje výpočtový průběh povodňové vlny s konstantním časovým krokem 10 s. Výstupem tohoto kroku je též vykreslení grafu, v němž jsou patrné jednak modré body vstupních hodnot, jednak červená křivka interpolovaných bodů.

Konzumční křivka odpadního potrubí

Konstrukce konzumční křivky odpadního potrubí je standardní hydraulickou úlohou, vycházející ze vztahů a rovnic uvedených výše. Konzumční křivku je třeba zpracovat pro celý možný rozsah hladiny vody v nádrži (po úroveň maximální hladiny nebo po úroveň koruny hráze). V dolní části (prakticky po úroveň stropu odpadního potrubí) se jedná o beztlakový průtok vody potrubím (řešené Chézyho rovnicí), výše se jedná o tlakový průtok vody potrubím (se zahrnutím ztrát třením a místních ztrát). Konzumční křivky odpadního potrubí se pro různé profily odpadního potrubí značně liší. Je třeba vyzkoušet různé varianty výpustí, aby bylo možno při výpočtu transformace povodňové vlny zvolit nejvhodnější profil, případně kombinaci dvou různých potrubí osazených ve stejné výši, či v různých úrovních.

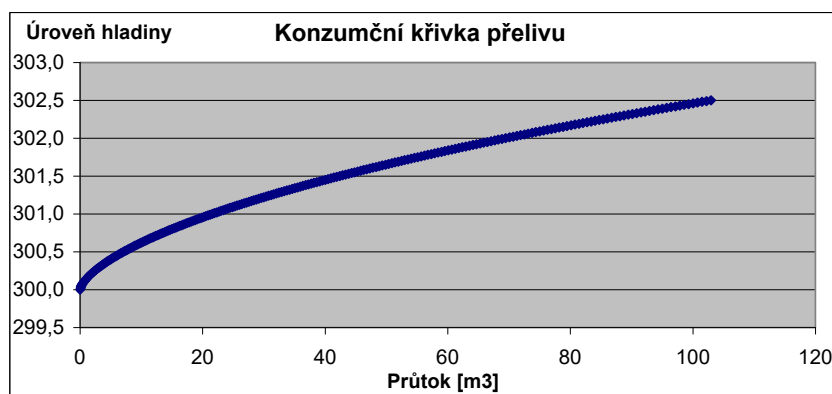
Vstupní údaje se zadávají v listu „Výpust“ (Viz Obr.3) pro každé potrubí zvlášť. Pokud používáme pouze jedno potrubí, zadá se hodnota průměru horního potrubí $D = 0$. Pro každé potrubí se zadávají tyto hodnoty: nadmořská výška dna vtoku do potrubí na návodní straně (m n.m.), průměr potrubí D (m), Manningův drsnostní součinitel n (-), sklon dna potrubí (-). Délka potrubí se vypočítá automaticky. Zadané výchozí hodnoty jsou: sklony svahů hráze - návodní svah 1 : 3, vzdušní svah 1 : 2, průměrná šířka koruny hráze 3,0 m a výška hráze 5,0 m. Pro tuto etapu výpočtů je takto stanovená délka potrubí (pro výpočet ztrát třením po délce) postačující, jinak je možné pro konkrétní známé rozměry hráze hodnotu délky potrubí zadat přesněji.

Vzhledem k tomu, že při prvních úvahách o dispozičním řešení suché nádrže zpravidla není známa nadmořská výška úrovně koruny přelivu, je možno provést transformaci povodňové vlny bez uvažování přelivu s výškou hráze suché nádrže takovou, aby zajistila, že nedojde k přelití hráze. Program pak vyhodnotí úroveň maximální hladiny vody v nádrži při odtoku vody pouze výpustným potrubím. Tuto úroveň maximální hladiny je pak možno využít jako vodítko pro volbu úrovně přelivné hrany bezpečnostního přelivu.

Přeliv nádrže

úroveň přelivu	šířka přelivu	součinitel m	součinitel μ	tg α (sklon břehů)
300,00	10,0	0,42	0,63	2

Hladina ve výšce [m. n m]	Odtok přelivem [m3]
300,00	0,00
300,01	0,02
300,02	0,05
300,03	0,10
300,04	0,15
300,05	0,21
300,06	0,28
300,07	0,35
300,08	0,43
300,09	0,51
300,10	0,60
300,11	0,69
300,12	0,79
300,13	0,89
300,14	1,00
300,15	1,11
300,16	1,22
300,17	1,34
300,18	1,46
300,19	1,59
300,20	1,72
300,21	1,85
300,22	1,99
300,23	2,13
300,24	2,27



Obrázek 4 – ukázka z listu Přeliv

Transformace povodňové vlny v retenčním prostoru nádrže

Výpočet transformace povodňové vlny probíhá v listu označeném na dolní liště „Výpočet“.

Transformace povodňové vlny v retenčním prostoru nádrže je řešena v časovém kroku 10 sec. Vlastní výpočet transformace probíhá tak, že program je propojen s jednotlivými listy a automaticky tam přebírá vstupní údaje nebo údaje vypočtené v jednotlivých postupných krocích.

Podle výše uvedeného algoritmu výpočtu určí výpočetní program pro každý časový krok (10 sec) hodnotu přítoku vody za tento časový krok z listu „Povodeň“. Toto množství vody zvýší hladinu vody v nádrži na úroveň, jejíž hodnotu určuje program automaticky z funkce pro čáru objemů nádrže – list „Nádrž“. Tato úroveň hladiny způsobí odtok vody výpustným potrubím, případně přes korunu přelivu (pokud je hladina výše než přelivná hrana). Průtok odpadním potrubím odpovídající úrovni hladiny vody v nádrži v daném časovém kroku vyhledá program automaticky v konzumční křivce odpadního potrubí – list „Výpust“, případně určí rovněž z konzumční křivky bezpečnostního přelivu – list „Přeliv“. Rozdíl přítoku vody do nádrže a odtoku vody odpadním potrubím od výpusti nebo od přelivu za zvolený časový interval určuje objem vody v nádrži na počátku dalšího časového intervalu. Tímto způsobem pokračuje výpočet až do odeznění povodně.

Výstupy řešení

Výpočet transformace přítoku v suché nádrži stanovuje tyto hodnoty:

- časový interval (s)
- přítok vody do nádrže na začátku časového intervalu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
- objem přítoku za daný časový krok 10 sec (m^3); během Δt uvažujeme konstantní přítok
- objem vody v retenčním prostoru nádrže (m^3); zahrnut je objem vody v nádrži v předcházejícím časovém intervalu a přítok vody do nádrže v řešeném časovém intervalu
- úroveň hladiny vody v retenčním prostoru nádrže pro daný časový krok (m n.m.), odpovídající objemu vody v nádrži
- odtok vody odpadním potrubím výpustí (jedné nebo dvou výpustí) za řešený časový interval (m^3)
- odtok vody přes bezpečnostní přeliv za řešený časový interval (m^3)
- objem nádrže po odtoku vody výpustí a přelivem za řešený časový interval (m^3)
- úroveň hladiny po odtoku vody výpustí a přelivem na konci řešeného časového intervalu (m n.m.)

Výstupem řešení je časová řada a graf průběhu přítoku vody do nádrže a odtoku vody pod hráz, stejně tak jako posouzení efektu nádrže. Tyto výstupy jsou shrnuty do listu „Výsledek“.

Výsledky zahrnují (Viz Obr.6) :

Graficky i tabelárně zpracovaný přítok/odtok

- čáru přítoku (časový průběh povodně) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) jako funkci času (hod) – tenká červená čára
- čáru odtoku ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) jako funkci času (hod) – silná modrá čára

Tabulku s uvedenými extrémními hodnotami:

- ✓ hodnota kulminace přítoku ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
- ✓ hodnota kulminace odtoku ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
- ✓ efekt transformace (%) jako doplněk podílu kulminace odtoku a přítoku do jedné (čím vyšší je efekt nádrže, tím více se sníží odtok z nádrže oproti přítoku)
- ✓ čas dosažení kulminace přítoku a odtoku (hod)
- ✓ úroveň maximální dosažené hladiny (m n.m.)

Využití výsledků výpočtů

Výsledky výpočtu je možno využít pro rozhodovací procesy při úvahách o využití suchých nádrží jako prvku protipovodňové ochrany nebo při rozhodování o technickém řešení suché nádrže. Konkrétně se jedná o tyto možnosti (řazeno od jednodušších úloh ke složitějším):

- dispoziční řešení konkrétní suché nádrže – posouzení efektivity nádrže pro povodňové vlny jednotlivých dob opakování, stanovení optimálního průměru odpadního potrubí pro zajištění nepřekročitelnosti zadaného maximálního odtoku vody pod hrází, posouzení kombinace profilů a výškového umístění dvou odpadních potrubí, návrh výškového umístění koruny bezpečnostního přelivu, spolupráce výpustného zařízení a bezpečnostního přelivu apod.

- posouzení variant umístění jedné suché nádrže na konkrétním toku z hlediska velikosti retenčního prostoru, z hlediska efektivity transformačního účinku,
- variantní řešení umístění více suchých nádrží na jednom toku či více (zpravidla dvou) přítocích – možné kombinace řešení, posouzení efektivity.

Vlastní použití metody vychází nejprve spíše z posouzení variantního umístění nádrží a po výběru vhodné varianty jedné nádrže či kombinace dvou nádrží je možno přistoupit k využití metody dle zásad, uvedených v prvním bodě, tj. k dispozičnímu řešení konkrétní nádrže či dvou nádrží.

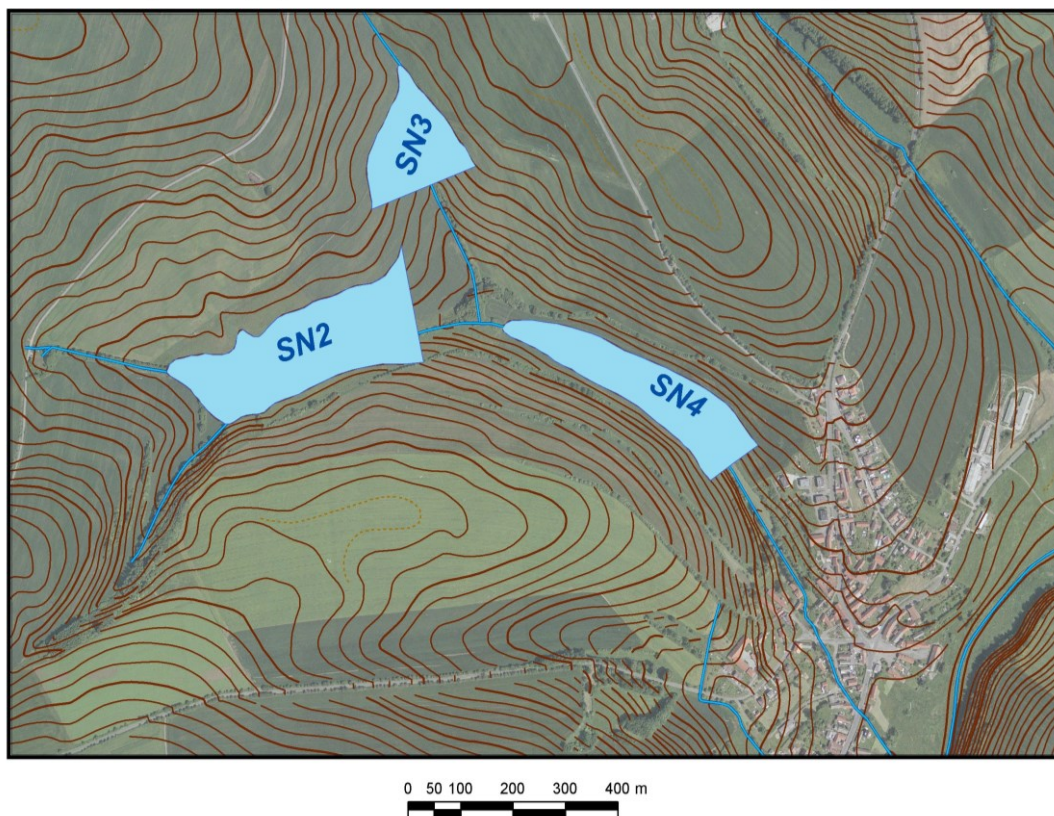
Při posuzování efektu kombinace dvou suchých nádrží umístěných nad sebou je nutno nejprve transformovat přítok nádrží umístěnou výše po toku a výstupní hodnoty odtud použít jako hodnoty vtoku pro spodní nádrž. Ta opět vlnu transformuje a konečné hodnoty průtoku pod hrází tak odpovídají efektu kombinace obou suchých nádrží.

Příklad použití metody pro rozhodovací procesy je uveden v následujícím příkladu.

Příklad výpočtu

Využití metody je možno dokumentovat na konkrétním případě řešení studie odtokových poměrů a protipovodňových opatření pro intravilán obce Nučice (Středočeský kraj, okres Kolín). Ochranu intravilánu bylo rozhodnuto řešit výstavbou jedné, dvou či tří suchých nádrží. Ty mají být situovány ve vhodných lokalitách na tocích, které způsobují v obci povodňové problémy. Umístění nádrží SN2, SN3 a SN4 je patrné z obrázku 5. Obec Nučice se nachází v pravé části obrázku, tj. pod místem suché nádrže SN4.

Konojedský potok - variantní umístění suchých nádrží



Obrázek 5 – Variantní umístění suchých nádrží- situace (PŘÍKLAD)

Z obrázku je zřejmé, že z morfologického hlediska je možné realizovat všechny tři nádrže, a je proto třeba nalézt vhodnou variantu možných kombinací suchých nádrží. V tomto případě posuzované varianty tvoří:

- jedna suchá nádrž SN2
- jedna suchá nádrž SN3
- jedna suchá nádrž SN4
- dvě suché nádrže SN2 a SN3
- dvě suché nádrže SN2 a SN4
- dvě suché nádrže SN3 a SN4

Všechny suché nádrže jsou definovány charakteristickými čarami objemů a pro všechny nádrže byly použity průběhy povodňových vln s dobou opakování 100, 50 a 20 let. Odpadní potrubí bylo voleno jedno, a to jednotného průměru DN 500.

Pro možnost kontroly správného používání výpočetního programu je dále uveden úplný výpočet transformace povodňové vlny PV 100 pro suchou nádrž, označenou ve studii SN2. Suchá nádrž SN2 je navržena na Konojedském potoce nad jeho soutokem s bezejmenným přítokem (viz Obr.5). Rozměry nádrže a podklady pro zpracování charakteristických čar byly odečteny z map 1 : 10 000. Dno nádrže se nachází na kótě 368,5 m n.m., záchytný prostor je shora omezen maximální možnou kótou 376,0 m n.m. Při této hladině je plocha nádrže cca 6,4 ha a záchytný objem cca 186 tis.m³.

Čáru přítoků (hydrogram odtoku) 100leté doby opakování pro profil nádrže udává následující tabulka.

t (hod)	Q _p (m ³ .s ⁻¹)	t (hod)	Q _p (m ³ .s ⁻¹)	t (hod)	Q _p (m ³ .s ⁻¹)
1,25	0,01	3,50	1,40	5,75	0,15
1,50	0,08	3,75	1,09	6,00	0,12
1,75	0,35	4,00	0,85	6,25	0,09
2,00	0,93	4,25	0,66	6,50	0,07
2,25	1,65	4,50	0,52	6,75	0,06
2,50	2,16	4,75	0,40	7,00	0,04
2,75	2,33	5,00	0,31	7,25	0,03
3,00	2,16	5,25	0,25	7,50	0,02
3,25	1,79	5,50	0,19	7,75	0,01

t – čas od počátku povodně (hod)

Q_p – hodnota přítoku v příslušném časovém okamžiku (m³.s⁻¹)

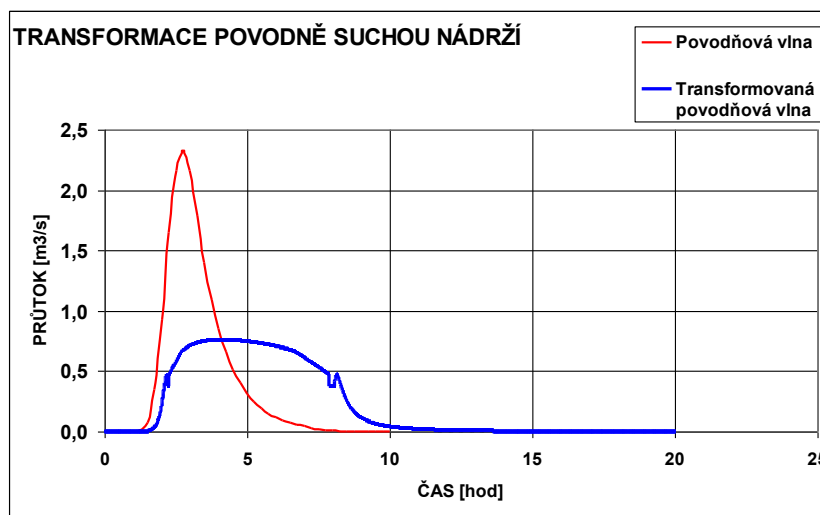
Charakteristické čary nádrže udává následující tabulka.

H (m n.m.)	Plocha (m ²)	ΔObjem (m ³)	Objem (m ³)
368,5	0	0	0
370,0	8 130	4 065	4 065
372,0	18 949	27 079	31 144
374,0	36 187	55 136	86 280
376,0	63 592	99 779	186 059

Konzumční křivku výpustného potrubí udává tabulka:

h (m)	Q _o (m ³ .s ⁻¹)	h (m)	Q _o (m ³ .s ⁻¹)	h (m)	Q _o (m ³ .s ⁻¹)
0,50	0,378	3,00	0,911	5,50	1,209
1,00	0,569	3,50	0,978	6,00	1,260
1,50	0,671	4,00	1,040	6,50	1,310
2,00	0,759	4,50	1,100	7,00	1,357
2,50	0,839	5,00	1,156	7,50	1,403

Graf i tabelární výstup popisující transformaci (pro ukázkou uvedena opět varianta SN2) jsou výsledkem posouzení každé varianty.



SN2 - Konojedský		Q100	
Q _P max [m3]	2,33	T _{Q_P max} [h]	2,75
Q _O max [m3]	0,76	T _{Q_O max} [h]	4,10
Transf efekt [%]	67,15	Max.hladina [m.n m.]	370,53

Obrázek 6 – Výstupy hodnocení efektivity suché nádrže

Z výsledků výpočtů vyplývá, že suchá nádrž SN2 transformuje kulminační průtok $Q_{100} = 2,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{100\text{red}} = 0,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení o cca 67 %), průtok $Q_{50} = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{50\text{red}} = 0,73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení o cca 63 %) a průtok $Q_{20} = 1,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{20\text{red}} = 0,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení o cca 57 %).

Maximální hladina při průchodu Q_{100} bude na úrovni 370,53 m n.m. (největší hloubka vody 2,03 m), při průchodu Q_{50} bude na úrovni 370,34 m n.m. (největší hloubka vody 1,84 m) a při průchodu Q_{20} bude na úrovni 370,10 m n.m. (největší hloubka vody 1,60 m).

Obdobným způsobem byly řešeny další výše uvedené varianty umístění suchých nádrží nebo jejich kombinací. Podrobné řešení těchto dalších variant zde není uvedeno, přehledný výsledek řešení uvádí následující tabulka a text.

Přítok Q _{2N}	Efektivita zvolené varianty nádrže (kombinace nádrží) [%]					
	SN2	SN3	SN4	SN2+SN3	SN2+SN4	SN3+SN4
100	67	24	70	53	74	70
50	63	19	67	50	71	67
20	57	10	61	45	66	61
Objem SN	186tis. m ³	75tis. m ³	140tis. m ³			

Z výpočtů transformací povodňové vlny ve variantách vyplývají následující závěry:

- Suchá nádrž SN2 - transformuje kulminační průtok $Q_{100} = 2,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{100\text{red}} = 0,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 67 %), průtok $Q_{50} = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{50\text{red}} = 0,73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení o cca 63 %) a průtok $Q_{20} = 1,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{20\text{red}} = 0,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 57 %). Maximální hladina při průchodu Q_{100} bude na úrovni 370,53 m n.m. (největší hloubka vody 2,03 m), při průchodu Q_{50} bude na úrovni 370,34 m n.m. (největší hloubka vody 1,84 m) a při průchodu Q_{20} bude na úrovni 370,11 m n.m. (největší hloubka vody 1,60 m). Ochranný efekt této nádrže se projeví v možnosti zabránění střetu kulminací, přicházejících z dílčího povodí Konojedského potoka a jeho přítoku
- Suchá nádrž SN3 - transformuje kulminační průtok $Q_{100} = 0,93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{100\text{red}} = 0,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 76 %), průtok $Q_{50} = 0,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{50\text{red}} = 0,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 81 %) a průtok $Q_{20} = 0,64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{20\text{red}} = 0,57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 90 %). Maximální hladina při průchodu Q_{100} bude na úrovni 375,61 m n.m. (max. hloubka 1,61 m), při průchodu Q_{50} bude na úrovni 375,17 m n.m. (max. hloubka 1,17 m) a při průchodu Q_{20} bude na úrovni 374,74 m n.m. (max. hloubka 0,74 m). Ochranný efekt této nádrže se projeví v možnosti zabránění střetu kulminací, přicházejících z dílčího povodí Konojedského potoka a jeho přítoku
- Suchá nádrž SN4 transformuje kulminační průtok $Q_{100} = 3,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{100\text{red}} = 0,97 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 30 %), průtok $Q_{50} = 2,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{50\text{red}} = 0,93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 33 %) a průtok $Q_{20} = 2,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{20\text{red}} = 0,88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 39 %). Maximální hladina při průchodu Q_{100} bude na úrovni 358,45 m n.m. (největší hloubka vody 3,45 m), při průchodu Q_{50} bude na úrovni 358,16 m n.m. (max. hloubka 3,16 m) a při průchodu Q_{20} bude na úrovni 357,76 m n.m. (max. hloubka 2,76 m). Vzhledem k tomu, že je nádrž umístěna prakticky v uzávěrovém profilu dílčího povodí, propaguje se efekt transf. povodňové vlny přímo do obce Nučice
- Kombinace suché nádrže SN2 a SN3 - Z výsledků výpočtů vyplývá, že suchá nádrž SN2 v kombinaci s nádrží SN3 transformuje kulminační průtok $Q_{100} = 3,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{100\text{red}} = 1,52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 47 %), průtok $Q_{50} = 2,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{50\text{red}} = 1,40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 50 %) a průtok $Q_{20} = 2,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{20\text{red}} = 1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 56 %). Tato kombinace zajišťuje podobný efekt jako transformace povodňové vlny v suché nádrži SN4, avšak se zvýšenými náklady na výstavbu dvou nádrží
- Kombinace suché nádrže SN2 a SN4 - Z výsledků výpočtů vyplývá, že suchá nádrž SN2 v kombinaci se suchou nádrží SN4 transformuje kulminační průtok $Q_{100} = 3,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{100\text{red}} = 1,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 33 %), průtok $Q_{50} = 2,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{50\text{red}} = 1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 36 %) a průtok $Q_{20} = 2,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{20\text{red}} = 0,90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 40 %). Tato kombinace zajišťuje významný efekt transformace povodňové vlny pro uzávěrový profil Konojedského potoka v obci Nučice. Zvýšení efektu transformace povodňové vlny spoluprací obou suchých nádrží však nemůže vyvážit zvýšený náklad na výstavbu
- Kombinace suché nádrže SN3 a SN4 - Z výsledků výpočtů vyplývá, že suchá nádrž SN3 v kombinaci se suchou nádrží SN4 transformuje kulminační průtok $Q_{100} = 3,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{100\text{red}} = 1,49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 46 %), průtok $Q_{50} = 2,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{50\text{red}} = 1,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 49 %) a průtok $Q_{20} = 2,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na odtok $Q_{20\text{red}} = 1,19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (snížení na cca 53 %). Tato kombinace má nižší efekt transformace povodňové vlny pro uzávěrový profil Konojedského potoka v obci Nučice než předcházející kombinace. Zvýšení efektu transformace povodňové vlny spoluprací obou suchých nádrží rovněž nemůže vyvážit zvýšený náklad na výstavbu.

Závěrem je tedy možno konstatovat, že vhodnou variantou je výstavba suché nádrže SN4 na Konojedském potoce nad obcí Nučice pod soutokem Konojedského potoka a jeho přítoku. Transformační účinek nádrže i s ohledem na její objem je značný a investiční náklad přiměřený.

Použitá literatura

KŘIVKA P. : Protipovodňová ochrana – hodnocení variant navržených opatření v uceleném povodí, (2005) doktorská disertační práce, FSV ČVUT Praha

ŠÁLEK J., MIKA Z., TRESOVÁ A.: Rybníky a účelové nádrže (1976), SNTL Praha

VRÁNA K., BERAN J. : Rybníky a účelové nádrže (1998), skriptum, vydavatelství ČVUT, Praha

VRÁNA K. : Rybníky a účelové nádrže (1998) – příklady, skriptum, vydavatelství ČVUT, Praha

Zákon č.254/2001 Sb., o vodách (vodní zákon)

Zákon č.50/1976 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)

Zákon č.114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny

Zákon č.185/2001 Sb., o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly (k zákonu č.254/2001 Sb.)

Metodický pokyn OOV MŽP k výkonu TBD na v.d. IV.kategorie, Věstník MŽP – částka 5, ročník 1998

Metodický pokyn pro navrhování, výstavbu a provoz suchých nádrží (MŽP ČR, odbor ochrany vod, ZP 14/2001)

ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže,

TNV 75 2415 Suché nádrže

TNV 75 2910 – Manipulační řády vodohospodářských děl na vodních tocích

TNV 75 2920 – Provozní řády vodních děl

Poděkování

Článek vznikl jako součást řešení výzkumného záměru MŠMT ČR VZ 02 CEZ MSM 6840770002 „Revitalizace vodního systému krajiny a měst zatíženého významnými antropogenními změnami“.