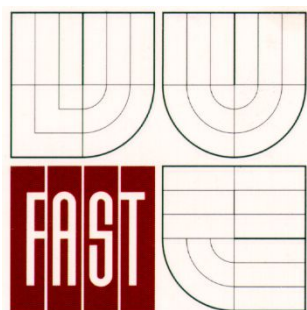




PROGRAM KMH 1.0
MANUÁL

**VYUŽITÍ SPOLEHLIVOSTNÍCH METOD PŘI
TECHNICKOBEZPEČNOSTNÍM DOHLEDU NAD
VODNÍMI DÍLY S OHLEDEM NA JEJICH
BEZPEČNOST V OBDOBÍ GLOBÁLNÍCH
KLIMATICKÝCH ZMĚN**

ÚKOL Č.: TA04020670

OBSAH

OBSAH	2
Identifikační údaje.....	3
1. KMH 1.0.....	4
2. Ovládání programu	5
2.1 Menu „Soubor“	5
2.2 Kontrolní povodňová vlna	5
2.3 Batygrafické čáry	6
2.4 Měrná křivka odpadního koryta	7
2.5 Odtok	8
2.6 Jednoduché manipulace	11
2.7 Nastavení výpočtu	11
3. Teoretický manuál	12
3.1 Matematický popis	12
3.2 Počáteční podmínky	13
3.3 Numerické řešení.....	13
3.3.1 Batygrafická křivka – čára zatopených ploch	13
3.3.2 Batygrafická křivka – čára zatopených objemů	14

IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název úkolu: PROGRAM KMH 1.0, MANUÁL

Zhotovitel: Ústav vodních staveb, FAST VUT v Brně
Veveří 95, 602 00 Brno

Vedoucí ústavu: Prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

Číslo a název projektu: TA04020670 Využití spolehlivostních metod při technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly s ohledem na jejich bezpečnost v období globálních klimatických změn

Jméno řešitele: prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

Další účastník projektu: VODNÍ DÍLA - TBD, a.s.

Jméno řešitele: Ing. Vít Rainer

Zodpovědný řešitel: Doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.

1. KMH 1.0

Programový produkt (software) KMH 1.0 řeší určení kontrolní maximální hladiny (KMH). Je vytvořen na základě numerického řešení bilanční rovnice přítoku, odtoku a akumulace vody v nádrži.

Software vznikl v roce 2015 v rámci řešení projektu sponzorovaného Technologickou agenturou České Republiky (TAČR) číslo TA04020670 "*Využití spolehlivostních metod při technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly s ohledem na jejich bezpečnost v období globálních klimatických změn*" na základě potřeby stanovení vodních stavů nad a pod vodním dílem a z nich plynoucích zatížení umožňujících aplikaci spolehlivostních metod v procesu hodnocení stability vodního díla.

Software v sobě zahrnuje interaktivní editaci vstupních dat a vlastní výpočet. Zadávání vstupních dat je řešeno vestavěným editorem, který umožňuje uložení a načtení vstupních dat.

Software je spustitelný na operačním systému Windows v 64-bitovém prostředí a je tvořen následujícími soubory:

- KMH.exe – spustitelný soubor,
- priklad.txt – vstupní data pro výpočet vzorového příkladu,
- KMH_manual.pdf – tento manuál,
- LICENCE_freeVUT.pdf – znění obecné licence umožňující nekomerční využití programu.

Software je distribuován pod obecnou licenci Freeware VUT, která umožňuje použití **pro nekomerční účely zdarma**. Komerční využití softwaru je podmíněno uzavřením zvláštní smlouvy s poskytovatelem (VUT v Brně, FAST, ÚVST), licenční poplatek činí 30 tis. Kč za jednu licenci. V případě zájmu o získání licence pro komerční použití kontaktujte sekretariát Ústavu vodních staveb, případně přímo autora:

Sekretariát:	Autor programu:
pí. Elena Prokopová Vysoké učení technické v Brně Fakulta stavební, Ústav vodních staveb Veveří 95 602 00 Brno Tel: +420 541 147 751 Fax: +420 541 147 752 e-mail: prokopova.e@fce.vutbr.cz	doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D. Vysoké učení technické v Brně Fakulta stavební, Ústav vodních staveb Veveří 95 602 00 Brno Tel: +420 541 147 759 Fax: +420 541 147 752 e-mail: jandora.j@fce.vutbr.cz

2. OVLÁDÁNÍ PROGRAMU

Program KMH 1.0 sestává z menu "*Soubor*", ve kterém jsou položky pro načtení a uložení vstupních dat a dále položka pro ukončení programu, a 8 tabulových listů. Prvních 5 listů obsahuje interaktivní editor pro zadávání vstupních dat:

- „*Kontrolní povodňová vlna*“,
- „*Batygrafické čáry*“,
- „*Odtok*“,
- „*Měrná křivka odp. koryta*“,
- „*Jednoduché manipulace*“

a 3 tabulové listy jsou pro:

- nastavení výpočtu (list „*Nastavení výpočtu*“),
- „*Graf*“ – zjednodušené zobrazení výsledku řešení,
- chybová hlášení – „*Chybová hlášení*“.

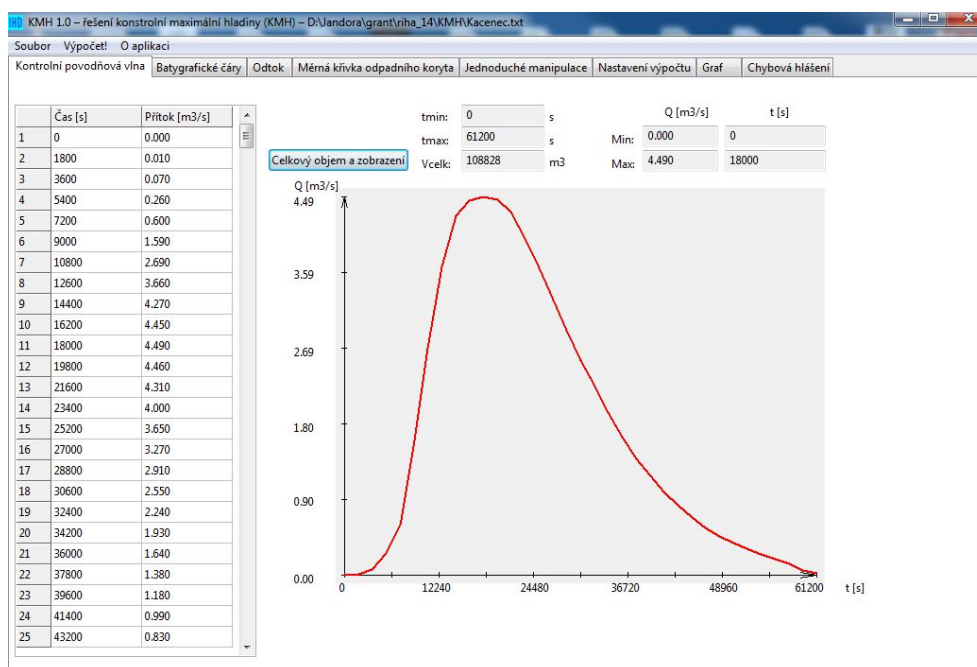
2.1 Menu „*Soubor*“

Menu „*Soubor*“ obsahuje následující položky:

- | | |
|--------------------------|--|
| - „ <i>Nový</i> “ | - umožní zadat prázdný projekt (vymažou se všechna vstupní data), |
| - „ <i>Otevřít</i> “ | - pomocí této položky je uživateli umožněno načíst soubor se vstupními daty pro program KMH 1.0. Vstupní soubor je textový a lze jej editovat při dodržení jeho struktury, |
| - „ <i>Uložit</i> “ | - uloží vstupní data v požadované struktuře, |
| - „ <i>Uložit jako</i> “ | - uloží vstupní data v požadované struktuře pod zadaným jménem souboru, |
| - „ <i>Konec</i> “ | - ukončení programu KMH 1.0. |

2.2 *Kontrolní povodňová vlna*

V tabulovém listu „*Kontrolní povodňová vlna*“ (Obr. 1) je nutné zadat časovou závislost kontrolní povodňové vlny do nádrže. První číslo v tabulce je čas v s a druhé hodnota přítoku v m³/s. Do výpočtu lze přítok zadat pomocí lineární interpolace.



Obr. 1 Program KMH 1.0 – tabulový list „Kontrolní povodňová vlna“

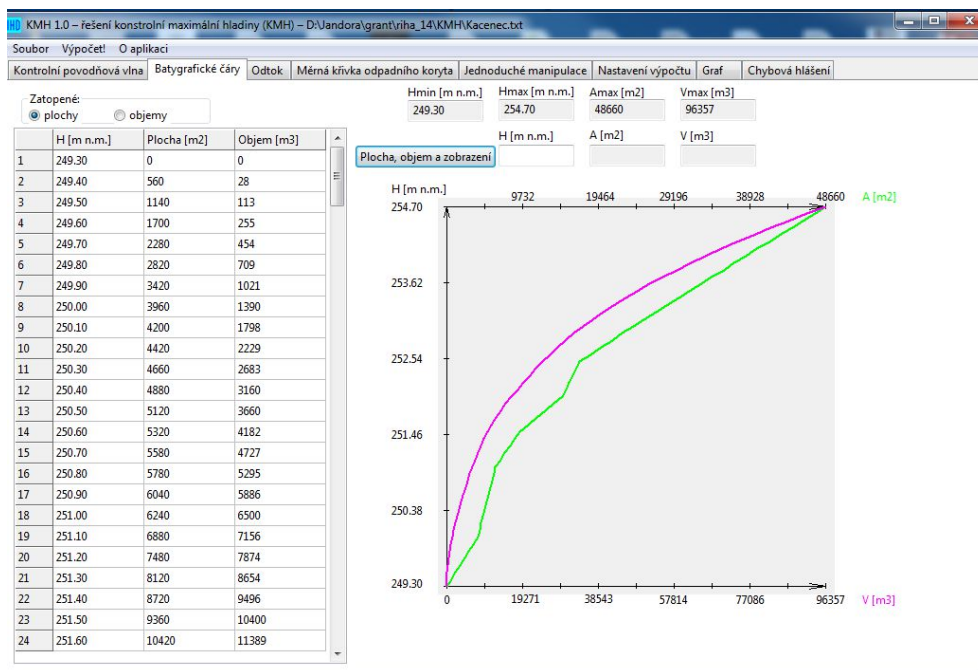
V případě záporně zadaného přítoku, nebude umožněno spuštění výpočtu.

2.3 Batygrafické čáry

V tabulovém listu „Batygrafické čáry“ (Obr. 2) je nutné zadat **batygrafickou čáru** jako:

- závislost polohy hladiny (výška ke zvolené srovnávací rovině) a jí odpovídající plošný obsah povrchu hladiny,
- nebo závislost polohy hladiny (výška ke zvolené srovnávací rovině) a jí odpovídajícímu objemu vody v nádrži.

Poloha hladiny a jí přiřazené plochy, nebo objemy je nutné zadávat ve vzestupném pořadí. Do výpočtu lze vybranou batygrafickou křivku (čáru zatopených ploch nebo čáru zatopených objemů) zadat pomocí lineární interpolace.



Obr. 2 Program KMH 1.0 – tabulový list „Batygrafická čára“

V případě zadání záporné plochy, nebo objemu, se výpočet nespustí. Výpočet je možné provádět do maximálního rozdílu mezi kótou dna nádrže a korunou hráze 120 m.

2.4 Měrná křivka odpadního koryta

V tabulovém listu „Měrná křivka odp. koryta“ (Obr. 3) lze zadat:

- měrnou křivku odpadního koryta (MKOK) a dále pak vybrat, zda-li tato křivka bude použita pro výpočet spodní(ch) výpustí. Poloha hladiny vody v odpadním korytě H_d se interpoluje z této zadané tabulky, přičemž průtok se bere od vybraných a ve výpočtu použitých spodních výpustí, přelivů a vlastních měrných křivek.

	H [m n.m.]	Q [m3/s]
1	249.00	0.000
2	249.50	5.000
3	250.00	30.000
4	251.00	40.000
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		

2.5 Odtok

V tabulovém listu „Odtok“ (Obr. 4) se vyplní základní parametry bočního nebo čelního přelivu – Obr. 5), spodních výpustí (Obr. 6) a vlastní měrné křivky. Je umožněno zadat pro:

- „Boční (čelní) přeliv(y)“:
 - kótu přelivu – $K(P)$,
 - šířku přelivu – b ,
 - počet zúžení – n ,
 - součinitel závislosti tvaru pilíře na boční zúžení – ξ ,(výše uvedené proměnné – $K(P)$, b , n a ξ jsou společné pro „Konstantní m “, „Smetanu“, „Rehbocka“ a „Obdélník $m = f(h/t)$ “)

- **Konstantní m** (konstantní součinitel přepadu):
 - součinitel přepadu pro obdélníkovou část přelivu – m ,
 - součinitel přepadu pro trojúhelníkovou část přelivu – m_s ,
 - sklony svahů přelivu – s (uvažuje se symetrický profil),

Pro výpočet přepadového množství pak platí (zanedbává se vliv přítokové rychlosti):

$$Q_p = m b_0 \sqrt{2g} h^{3/2} + m_s s \sqrt{2g} h^{5/2}, \quad (2)$$

kde m je součinitel přepadu pro obdélníkovou část přelivu, m_s součinitel přepadu pro trojúhelníkovou část přelivu (uvažuje se osově symetrický profil), b_0 je účinná šířka přelivu:

$$b_0 = b - 0,1 n \xi h, \quad (3)$$

b je šířka přelivu [m], n je počet zúžení, ξ je součinitel závislosti tvaru pilíře na boční zúžení, s je sklon svahů přelivu, h přepadová výška.

- **Smetana** (proudnicová přelivná plocha podle akademika Smetany):
 - návrhovou přepadovou výšku h_n .

Pro výpočet součinitele přepadu pak platí:

$$m = 0,499 \left(0,63 + 0,37 \sqrt{\frac{h}{h_n}} \right), \quad (4)$$

kde h je přepadová výška (pro $h > h_n$ je uvažovaný hodnotou $m = 0,499$). Pro výpočet přepadového množství platí:

$$Q_p = m b_0 \sqrt{2g} h^{3/2}, \quad (5)$$

kde m je součinitel přepadu pro Smetanovu přelivnou plochu, b_0 je účinná šířka přelivu:

$$b_0 = b - 0,1 n \xi h, \quad (3)$$

b je šířka přelivu [m], n je počet zúžení, ξ je součinitel závislosti tvaru pilíře na boční zúžení, h přepadová výška.

- **Rehbock** (přelivná plocha se zaoblenou korunou):
 - poloměr zaoblení r
 - a výšku přelivu nade dnem nádrže s_1 .

Pro výpočet součinitele přepadu pak platí:

$$m = \frac{2}{3} \left[0,312 + 0,09 \frac{h}{s_1} + \sqrt{0,3 - 0,01 * \left(5 - \frac{h}{r} \right)^2} \right], \quad (6)$$

který platí pro $s_1 \geq r > 0,02$ m a pro poměr $\frac{h}{r} \leq \left(6 - \frac{20 r}{s_1 + 3 r} \right)$. Pokud bude uvedený poměr

překročen, součinitel přepadu se snižuje (zde uvažováno na hodnotu 0,942 $m_{\max}$ ($m_{\max}$ je maximální hodnota součinitele přepadu pro limitní hodnotu výše uvedeného poměru).

Pro výpočet přepadového množství platí:

$$Q_p = m b_0 \sqrt{2g} h^{3/2}, \quad (5)$$

kde m je součinitel přepadu pro přelivnou plochu se zaoblenou korunou, b_0 je účinná šířka přelivu:

$$b_0 = b - 0,1 n \xi h, \quad (3)$$

b je šířka přelivu [m], n je počet zúžení, ξ je součinitel závislosti tvaru pilíře na boční zúžení, h přepadová výška.

- **Obdélník** $m = f(h/t)$ (přeliv obdélníkového příčného profilu s proměnnou hodnotou součinitele přepadu v závislosti na poměru přepadové výšky a tloušťky přelivu v podélném směru):
 - tloušťka přelivu t .

Součinitel přepadu se interpoluje podle následující tabulky 1.

Tab. 1

h/t	$\leq 0,1$	0,33	0,5	1	1,5	2	≥ 20
m	0,3	0,32	0,33	0,37	0,41	0,42	0,45

Pro výpočet přepadového množství platí:

$$Q_p = m b_0 \sqrt{2g} h^{3/2}, \quad (5)$$

kde m je součinitel přepadu pro přelivnou plochu se zaoblenou korunou, b_0 je účinná šířka přelivu:

$$b_0 = b - 0,1 n \xi h, \quad (3)$$

b je šířka přelivu [m], n je počet zúžení, ξ je součinitel závislosti tvaru pilíře na boční zúžení, h přepadová výška.

- „Spodní výpust(i)“:

- kótu osy potrubí na výtoku spodní(ch) výpust(i) – $K(SV)$,
- počet spodních výpustí stejných hydraulických parametrů – n ,
- součinitel výtoku – μ („ my “),
- průtočnou plochu na výtoku – S .

Průtok spodní výpustí lze určit vzorcem pro výtok nádrže potrubím (zanedbává se vliv přítokové rychlosti):

$$Q_{sv} = n \mu S \sqrt{2 g h_{sv}}, \quad (7)$$

kde n je počet výpustí, μ je součinitel výtoku spodní výpusti, S plošný obsah výtokové plochy na konci potrubí spodní výpusti, h_{sv} výška hladiny v nádrži nad osou výtoku spodní výpusti (nebo polohy hladiny vody v odpadním korytě).

- „Vlastní měrnou(é) křivku(y)“: - závislost odtoku na hladině vody v nádrži.

Tlačítkem „Měrné křivky“ je možné dopočítat tabulku s měrnou(ými) křivkou(ami) a při zadání polohy hladiny v nádrži průtoky přelivy, výpustmi a vlastní měrnou křivkou.

KMH 1.0 – řešení kontrolní maximální hladiny (KMH) – D:\Jandora\grant\viha_14\KMH\Kacenecl.txt

Soubor

Výpočet!

O aplikaci

Kontrolní povodňová vlna

Bathygrafické čáry

Odtok

Měrná křivka odpadního koryta

Jednoduché manipulace

Nastavení výpočtu

Graf

Chybová hlášení

Boční (čelní) přeliv(y) – K(P) [m n.n.m.]:

	K(P)	m [l]	ms [l]	b [m]	s [l]	n [l]	ksi [l]	hn [m]	r [m]	sl [m]	t [m]
1BP	253.10	0.400	0.350	5.00	2.0	2	0.70	1.50	0.30	0.50	0.50
2BP	253.10	0.400	0.350	5.00	2.0	2	0.70	1.50	0.30	0.50	0.50

Spodní výpust(i) – K(SV) [m n.n.m.]:

	K(SV)	n [l]	my [l]	S [m2]
1SV	249.40	1	0.600	0.500
2SV	249.00	1	0.550	0.300

Do výpočtu a do měrných křivek:

☒ 1. boční (čelní) přeliv (1BP)

☐ 2. boční (čelní) přeliv (2BP)

☒ 1. spodní výpust(i) (1SV)

☒ 2. spodní výpust(i) (2SV)

☐ 1. vlastní měrná křivka (1VMK)

☐ 2. vlastní měrná křivka (2VMK)

☐ 3. vlastní měrná křivka (3VMK)

Měrné křivky

H = 253.40

m n.n.m.

Q(1BP) [m3/s]

1.220

Q(2BP) [m3/s]

Q(1SV) [m3/s]

2.622

Q(2SV) [m3/s]

1.442

Q(1VMK) [m3/s]

Q(2VMK) [m3/s]

Q(3VMK) [m3/s]

Q(celk.) [m3/s]

5.284

A0 [m2]

-

k0 [m]

-

Hd [m n.n.m.]

249.51

1BP:

☐ Konstantní m

☐ Smetana

☐ Rehbock

☒ Obdélník – m = f(h/t)

2BP:

☐ Konstantní m

☐ Smetana

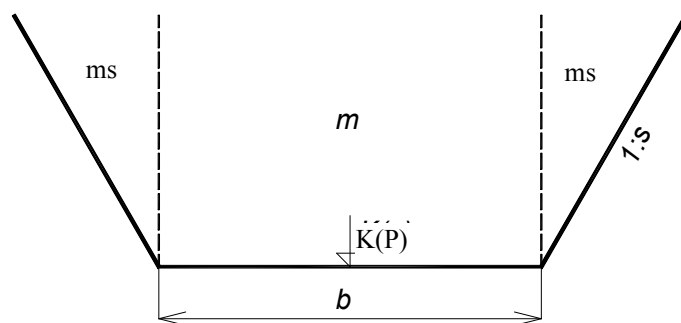
☐ Rehbock

☒ Obdélník – m = f(h/t)

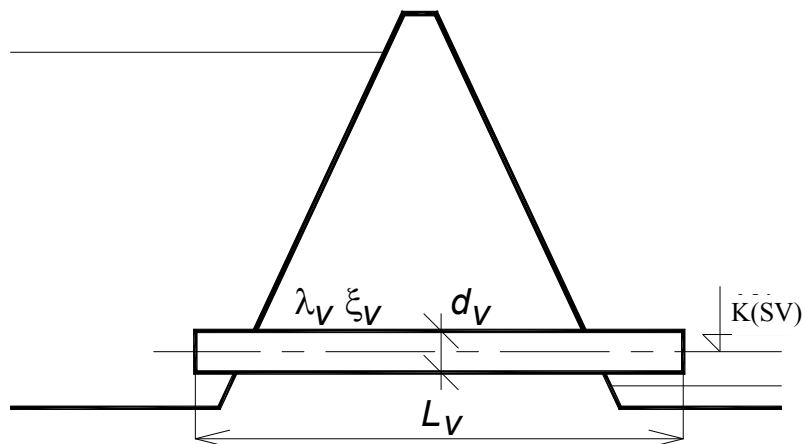
Měrné křivky bočního (čelního) přelivu, spodní výpusti a VMK – H [m n.n.m.], Q [m3/s]:

	H	Q(1BP)	Q(2BP)	Q(1SV)	Q(2SV)	Q(1VMK)	Q(2VMK)	Q(3VMK)	Q(celk.)
1	249.30	0.000		0.000	0.000				0.000
2	249.36	0.000		0.000	0.000				0.000
3	249.42	0.000		0.188	0.463				0.000
4	249.48	0.000		0.376	0.486				0.000
5	249.54	0.000		0.497	0.512				0.000
6	249.60	0.000		0.594	0.537				0.000
7	249.66	0.000		0.678	0.562				0.000
8	249.72	0.000		0.752	0.587				0.000
9	249.78	0.000		0.819	0.611				0.000
10	249.83	0.000		0.871	0.630				0.000
11	249.89	0.000		0.930	0.652				0.000
12	249.95	0.000		0.985	0.674				0.000
13	250.01	0.000		1.038	0.696				0.000
14	250.07	0.000		1.088	0.716				0.000
15	250.13	0.000		1.135	0.737				0.000
16	250.19	0.000		1.181	0.757				0.000
17	250.25	0.000		1.225	0.776				0.000
18	250.31	0.000		1.267	0.795				0.000
19	250.37	0.000		1.309	0.813				0.000
20	250.43	0.000		1.348	0.832				0.000
21	250.49	0.000		1.387	0.849				0.000
22	250.55	0.000		1.425	0.867				0.000

Obr. 4 Program KMH 1.0 – tabulový list „Odtok“



Obr. 5 Schéma čelního (bočního) přelivu



Obr. 6 Schéma spodní výpusti

2.6 Jednoduché manipulace

V tomto listu „Jednoduché manipulace“ lze zjednodušeně zadat, že přítok bude roven odtoku, a to buď v závislosti na čase, nebo v závislosti na poloze hladiny v nádrži.

2.7 Nastavení výpočtu

V tabulovém listu „Nastavení výpočtu“ (Obr. 7) se zadají následující údaje:

- počáteční hladina (hladina v nádrži na počátku výpočtu) – „Počáteční kóta hladiny v nádrži:“,
- počáteční hladina v odpadním korytě (hladina v odpadním korytě na počátku výpočtu), počítá-li se s vlivem polohy hladiny v odpadním korytě – „Poč. kóta hlad.v odpadním korytě:“,
- počátek výpočtu v s – „Od času:“,
- konec výpočtu v s – „Po čas:“,
- „Ukládání po:“ – frekvence ukládání výstupních veličin (uložení výsledků po x sekundách),
- jména výstupního souboru – „Výstupní soubor:“,

vlastní výpočet stisknutím „Výpočet!“. Spočítané hodnoty se uloží do výstupního souboru. Výstupní soubor je textový a lze ho např. načíst do MS Excel, kde lze provést zobrazení hydraulických veličin.

KMH 1.0 – řešení kontrolní maximální hladiny (KMh) – D:\andora\grant\viha_14\KMh\Kacenec.txt

Soubor Výpočet! O aplikaci

Kontrolní povodňová vlna Batygrafické čáry Odtok Měrná křivka odpadního koryta Jednoduché manipulace Nastavení výpočtu Graf Chybová hlášení

Čas [s]	Hladina [m n.m.]	Přítok [m3/s]	Odtok [m3/s]	Spodní [m3/s]	Boční [m3/s]	Vlastní MK [m3/s]	Porušení [m3/s]
600	250.000	0.003	0.003	0.003	0.000	0.000	
903	250.000	0.005	0.005	0.005	0.000	0.000	
1206	250.000	0.007	0.007	0.007	0.000	0.000	
1509	250.000	0.008	0.008	0.008	0.000	0.000	
1812	250.000	0.010	0.010	0.010	0.000	0.000	
2115	250.000	0.021	0.021	0.021	0.000	0.000	
2418	250.000	0.031	0.031	0.031	0.000	0.000	
2721	250.000	0.041	0.041	0.041	0.000	0.000	
3024	250.000	0.051	0.051	0.051	0.000	0.000	
3327	250.000	0.061	0.061	0.061	0.000	0.000	
3630	250.000	0.073	0.073	0.073	0.000	0.000	
3933	250.000	0.105	0.105	0.105	0.000	0.000	
4236	250.000	0.137	0.137	0.137	0.000	0.000	
4539	250.000	0.169	0.169	0.169	0.000	0.000	
4842	250.000	0.201	0.201	0.201	0.000	0.000	
5145	250.000	0.233	0.233	0.233	0.000	0.000	
5448	250.000	0.269	0.269	0.269	0.000	0.000	
5751	250.000	0.326	0.326	0.326	0.000	0.000	

Počáteční kóta hladiny v nádrži: 250.000 m n.m.
 Poč. kóta hlad. v odpadním korytě: 249.000 m n.m.

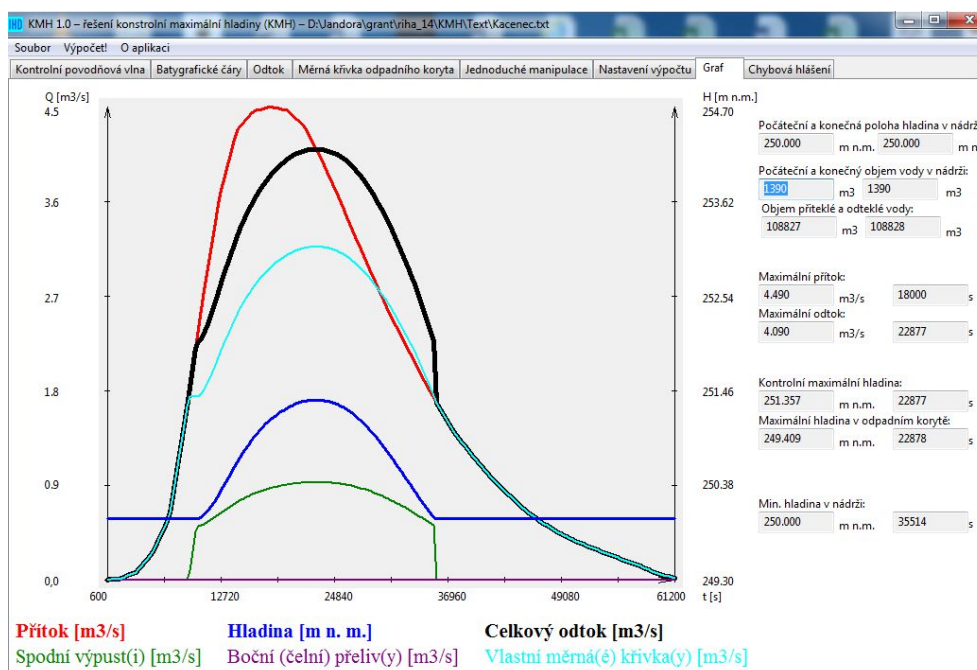
Začátek výpočtu (od času): 600 s
 Konec výpočtu (po čas): 61200 s
 Ukládání po: 60 s

Do výstupního souboru:
☒ 1BP (součinitel přepadu, účinná šířka, přepadová výška)
☒ 2BP (součinitel přepadu, účinná šířka, přepadová výška)
☒ tlačnou výšku u 1SV
☒ tlačnou výšku u 2SV

☒ průtok pro výpočet hladiny v odpadním korytě
☒ hladinu v odpadním korytě

Výstupní soubor: vystup.txt

Obr. 7 Program KMh 1.0 – tabulový list „Nastavení výpočtu“



Obr. 8 Program KMh 1.0 – tabulový list „Graf“

3. TEORETICKÝ MANUÁL

3.1 Matematický popis

Problém je formulován jako 1D počáteční, přičemž proudící médium je voda. Neznámou funkcí je:

$H(t)$ - úroveň hladiny v nádrži měřená od srovnávací roviny [m].

K určení neznámé funkce $H(t)$ je k dispozici rovnice vyjadřující okamžitou změnu objemu nádrže jako funkci přítoku do nádrže Q_{in} a odtoku z nádrže Q_{out} :

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} . \quad (8)$$

Pro prizmatický tvar nádrže platí:

$$V(t) = A_s H(t),$$

kde A_s je plošný obsah paralelního řezu s hladinou v nádrži. (1) pak nabývá tvaru:

$$A_s \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} . \quad (9)$$

(8) a (9) vycházejí ze zákona zachování hmotnosti, kde Q_{in} je přítok do nádrže, Q_{out} je odtok vody čelním(i) (bočním(i)) přelivem(y) – Q_p , spodní(mi) výpustí(mi) – Q_{sv} a vlastní(mi) měrnou(ými) křivkou(ami) – Q_{vmk} :

$$Q_{out} = Q_p + Q_{sv} + Q_{vmk} . \quad (10)$$

3.2 Počáteční podmínky

Příslušná počáteční podmínka daného počátečního problému (8), příp. (9) je:

$$H(t = 0) = H_0 . \quad (11)$$

3.3 Numerické řešení

Pro přibližnou numerickou integraci rovnic (8) až (11) byla zvolena jednokroková metoda. Označme Δt časový krok, diskrétní čas $t_n = t_0 + n \Delta t$, $n = 1, 2, \dots$

Časový krok Δt je nastaven na 1 s.

3.3.1 Batygrafická křivka – čára zatopených ploch

Pro $n = 1$ platí:

$$A_s(H_0) \frac{H(t_1) - H(t_0)}{\Delta t} = Q_{in}(t_0) - Q_{out}(t_0) , \quad (12)$$

odtud:

$$H(t_1) = \frac{\Delta t}{A_s(H(t_0))} [Q_{in}(t_0) - Q_{out}(t_0)] + H(t_0) , \quad (13)$$

kde

$$Q_{out}(t_0) = Q_p(t_0) + Q_{sv}(t_0) + Q_{vmk}(t_0) , \quad (14)$$

Pro $n = i$ platí:

$$H(t_i) = \frac{\Delta t}{A_s(H(t_{i-1}))} [Q_{in}(t_{i-1}) - Q_{out}(t_{i-1})] + H(t_{i-1}) , \quad (15)$$

kde

$$Q_{out}(t_{i-1}) = Q_p(t_{i-1}) + Q_{sv}(t_{i-1}) + Q_{vmk}(t_{i-1}) , \quad (16)$$

3.3.2 Batygrafická křivka – čára zatopených objemů

Pro $n = 1$ platí:

$$\frac{V(t_1) - V(t_0)}{\Delta t} = Q_{in}(t_0) - Q_{out}(t_0), \quad (17)$$

odtud:

$$V(t_1) = \Delta t [Q_{in}(t_0) - Q_{out}(t_0)] + V(t_0), \quad (18)$$

kde

$$h(t_1) = f(V(t_1)) \quad (19)$$

$$Q_{out}(t_0) = Q_p(t_0) + Q_{sv}(t_0) + Q_{vmk}(t_0), \quad (14)$$

Pro $n = i$ platí:

$$V(t_i) = \Delta t [Q_{in}(t_{i-1}) - Q_{out}(t_{i-1})] + V(t_{i-1}), \quad (20)$$

kde

$$h(t_i) = f(V(t_i)) \quad (21)$$

$$Q_{out}(t_{i-1}) = Q_p(t_{i-1}) + Q_{sv}(t_{i-1}) + Q_{vmk}(t_{i-1}). \quad (16)$$