VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

OPTIMALIZACE NÁVRHOVÝCH PARAMETRŮ BEZPEČNOSTNÍHO PŘELIVU
OPTIMIZATION OF SPILLWAY DESIGN PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Šimon Pospíšilík**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. PAVEL MENŠÍK, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Šimon Pospíšilík
Název	Optimalizace návrhových parametrů bezpečnostního přelivu
Vedoucí práce	Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01). Brno: VUT, 2006. 120 s.
2. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. Metodické návody do cvičení. 1. vyd. Brno: VUT, 1987. 67 s.
3. Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. 1. vyd. Brno: VUT, 1986. 165 s.
4. TNV 75 2935 - Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních.
5. ČSN 75 2405. Vodohospodářská řešení vodních nádrží. Praha: Český normalizační institut, 2004.
6. ČSN 75 2340 Navrhování přehrad - Hlavní parametry a vybavení. Praha: Český normalizační institut, 2017.
7. Další odborná literatura dostupná v knihovně nebo na internetu.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Úkolem diplomové práce bude vytvořit programový prostředek, který umožní najít optimální návrhové parametry pevného dvoupolového bezpečnostního přelivu. Prostředek bude vytvořen obecně, a to v budoucnu umožní jeho snadné použití na téměř jakékoliv vodní nádrži. Návrhové parametry přelivu budou popisovat délku jednotlivých polí a jejich vzájemné výškové uspořádání. Parametry budou optimalizovány za cílem snížit maximální hodnotu odtoku vody z nádrže, takže kriteriální funkce bude mít minimalizační tvar. Prostředek bude vytvořen v jazyce R nebo s využitím jiného vhodného programovacího jazyka. Součástí práce bude i ukázka funkčnosti vytvořeného prostředku.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:
1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na vývoj programu sloužícího k nalezení optimálních návrhových parametrů dvoupólového bezpečnostního přelivu. Těmito parametry jsou délky přelivných hran a jejich vzájemné výškové uspořádání. Program je založen na simulaci transformace povodňové vlny při průchodu nádrží. Pro optimalizaci návrhových parametrů dvoupólového bezpečnostního přelivu byla použita metoda využívající multi – gradientní algoritmus.

KLÍČOVÁ SLOVA

Víceúrovňový bezpečnostní přeliv, Simulace, Optimalizace, Generátor náhodných čísel, Multi – gradientní algoritmus.

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the program development. The program is aimed at finding optimal design parameters for a two-pole emergency spillway. These parameters are the lengths of the spillway edges and their relative height arrangement. The program is based on the flood wave transformation simulation. Multi – gradient algorithm was used for optimization design parameters of a two-pole safety spillway.

KEYWORDS

Multi – level spillway, Simulation, Optimization, Random number generator, Multi – gradient algorithm.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Šimon Pospíšilík *Optimalizace návrhových parametrů bezpečnostního přelivu.* Brno, 2019. 89 s., 1s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Optimalizace návrhových parametrů bezpečnostního přelivu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 8. 1. 2019

Bc. Šimon Pospíšilík
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Optimalizace návrhových parametrů bezpečnostního přelivu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 8. 1. 2019

Bc. Šimon Pospíšilík
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Touto formou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Menšíkovi, Ph.D. za rady a odbornou pomoc při jejím vytvoření. Dále bych chtěl poděkovat kantorům vyučujícím na oboru Vodní hospodářství a vodní stavby za cenné informace, které jsem zúročil v této práci. Na závěr bych chtěl poděkovat autorům tutoriálů jazyka C++.

1100011 1101000 1111001 1100010 1100001 1101101 1101001 100000 1110011 1100101
100000 1100011 1101100 1101111 1110110 1100101 1101011 100000 1110101 1100011
1101001 100000 1100001 100000 1110000 1110010 1101111 1100111 1110010 1100001
1101101 100000 1100010 1101100 1100010 1101110 1100101

OBSAH

1. ÚVOD 4
2. CÍL PRÁCE 5
3. DATA 6
3.1. Údaje o nádrži I. 6
3.2. Nádrž II. 8
3.3. Nádrž III. 9
3.4. Porovnání jednotlivých nádrží 11
4. ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY 12
4.1. Hydrologické a morfologické 12
Deterministický charakter vstupních dat 12
Meteorologické a další jevy 12
4.2. Hydraulické 13
Typ a situování přelivu 13
Zanedbání přítokové rychlosti 13
Zanedbání kontrakcí proudu pilíři 14
Zanedbání nedokonalého (zatopeného) přepadu 14
Zanedbání změny přepadového součinitele m 14
Superpoziční princip 15
Zanedbání vlivu morfologie nádrže 15
Zanedbání vlivu spodních výpustí 15
5. PROGRAM 17
5.1. TEORIE 18
Diskrétní bodová simulace kontinuálního procesu 18
Metoda Runge – Kutta 4. řádu 18
Doplnění dat 19
Multi – gradientní optimalizační metoda 20
Generátor náhodných čísel 21
Kongruentní generátor 21
5.2. ALGORITMUS PROGRAMU 23

Popis optimalizačního algoritmu 23
Vstupy 24
Generátor náhodných čísel „RNG“ 25
Simulace transformace povodňové vlny nádrží 26
Filtrace dat 26
Multi – gradientní optimalizace 27
1. Ukončovací podmínka 28
2. Ukončovací podmínka 28
Výstupy 28
Grafické informace 29
6. OVĚŘENÍ NASTAVENÍ PROGRAMU 30
7. VÝSLEDKY 32
7.1. OPTIMALIZACE PRO 3 NEZNÁMÉ 33
7.1.1. NÁDRŽ I. 33
Optimalizace návrhových parametrů nádrže I. na N10 000 34
Optimalizace návrhových parametrů nádrže I. na N1 000 35
Optimalizace návrhových parametrů nádrže I. na N500 36
Optimalizace návrhových parametrů nádrže I. na N100 37
Optimalizace návrhových parametrů nádrže I. na N50 38
7.1.2. NÁDRŽ II. 39
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N10 000 40
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N1 000 41
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N100 42
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N50 43
7.1.3. NÁDRŽ III. 44
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N10 000 45
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N1 000 46
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N500 47
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N100 48
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N50 49
7.2. BEZPEČNOSTNÍ PŘELIVY O JEDNOM POLI 50

7.2.1. NÁDRŽ I. 50
7.2.2. NÁDRŽ II. 53
7.2.3. NÁDRŽ III. 55
7.3. BEZPEČNOSTNÍ PŘELIVY SE DVĚMA POLI 58
7.3.1. NÁDRŽ I. 58
7.3.2. NÁDRŽ II. 62
7.3.3. NÁDRŽ III. 65
7.4. VYHODNOCENÍ 69
7.4.1. NÁDRŽ I. 69
7.4.2. NÁDRŽ II. 73
7.4.3. NÁDRŽ III. 76
8. ZÁVĚR 80
POUŽITÁ LITERATŮRA 81
SEZNAMM TABULEK 82
SEZNAM OBRÁZKŮ 84
SEZNAM POUŽITÝCH ROVNIC 86
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 87
SEZNAM PŘÍLOH 89

1. ÚVOD

Na přelomu tisíciletí došlo k výskytu celé řady povodňových (N-letých) průtoků ve střední Evropě. Konkrétně se jedná o povodně z roku 1996 (Německo, Švýcarsko), roku 1997 (Morava) a roku 2002 (Čechy). V reakci na tyto události došlo k úpravě legislativních požadavků na vodní díla. Zejména se jde o zpřísnění požadovaných hodnot návrhových a kontrolních průtoků na vodní díla. Většinou došlo ke zvýšení hodnoty návrhových a kontrolních průtoků o 1. řád (tj. o 30% až 100%).

Se zavedením výše zmíněných opatření je spojená nutnost nového posouzení již postavených vodních děl v České republice. Tato díla byla navržena a postavena dle dnes již nevyhovujících hydrologických podkladů a zpravidla nesplňují některé na ně kladené požadavky. Zejména se jedná o bezpečné převedení návrhové a kontrolní povodňové vlny.

V minulosti bylo rovněž často přikročeno k použití pohyblivých hradících konstrukcí na bezpečnostních objektech vodních děl. Správnou manipulací s těmito konstrukcemi bylo možno docílit příznivějšího tvaru transformované povodňové vlny. V současnosti dochází k odklonu od používání pohyblivých hradících konstrukcí zejména z ekonomických a provozních důvodů.

Jako možné řešení se jeví použití víceúrovňových bezpečnostních přelivů. Ty na rozdíl od jednoúrovňových bezpečnostních přelivů umožňují lépe ovlivnit transformaci povodňových vln a tím zlepšit transformační účinek příslušných nádrží. Současným příkladem použití víceúrovňového bezpečnostního přelivu v praxi je vodní dílo Šance.

2. CÍL PRÁCE

V rámci diplomové práce bude vytvořen programový prostředek umožňující nalezení optimálních návrhových parametrů víceúrovňových bezpečnostních přelivů. Návrhovými parametry se rozumí délka přelivné hrany a výškové uspořádání jednotlivých polí bezpečnostního přelivu. Tyto parametry budou optimalizovány s cílem maximálního využití transformačního účinku nádrže, tj. minimalizace odtoku vody z nádrže.

Programový prostředek bude určen pro obecné použití při návrhu bezpečnostních přelivů na vodních dílech. Výstupem programu budou předběžně optimalizované návrhové parametry bezpečnostních přelivů. Tyto výstupy následně mohou být použity jako podklad pro přesnější hydraulický návrh bezpečnostních objektů. Předběžně optimalizované návrhové parametry jsou zatíženy chybou vzniklou použitím níže uvedených zjednodušujících předpokladů.

Program bude použit pro simulaci průchodů povodňových vln dané N-letosti pro zadané nádrže. Výstupem programu budou suboptimální návrhové parametry bezpečnostního přelivu. V rámci této práce budou zmíněná data převedena do názorné grafické podoby.

Pro vytvoření programu bude použit programovací jazyk C++. Pro následné zpracování výstupních dat z programu bude použit Microsoft Excel.

3. DATA

V rámci této diplomové práce byly provedeny simulace průchodu povodňových vln na třech vodních dílech. Jako podkladní data charakterizující nádrže byly použity čáry zatopených objemů popisující závislost objemu vody v nádrži na úrovni hladiny vody v nádrži. Jako vstupní hydrologická data byly použity teoretické hydrogramy povodňových vln o dané N-letosti. Pro jednotlivé nádrže byly přiřazeny odpovídající hydrogramy o N-letostech N 50 až N 10 000. Tyto hydrogramy popisují závislost přítoku vody do nádrže na čase.

Pro účely programu byla vstupní data částečně upravena. Úprava dat spočívala ve sjednocení časových jednotek. Původní hydrogramy používaly jako časové jednotky minuty a hodiny. Tyto jednotky byly pro účely programu převedeny na sekundy.

Program byl navržen a testován s daty ve formátu SI, kdy jako desetinný oddělovač byla použita desetinná tečka (.).

3.1. Údaje o nádrži I.

Nádrž I. je nejmenším vodním dílem uvedeným v této diplomové práci z hlediska celkového objemu vody v nádrži, tak maximální hloubky vody v nádrži, jenž je 17.68 m.

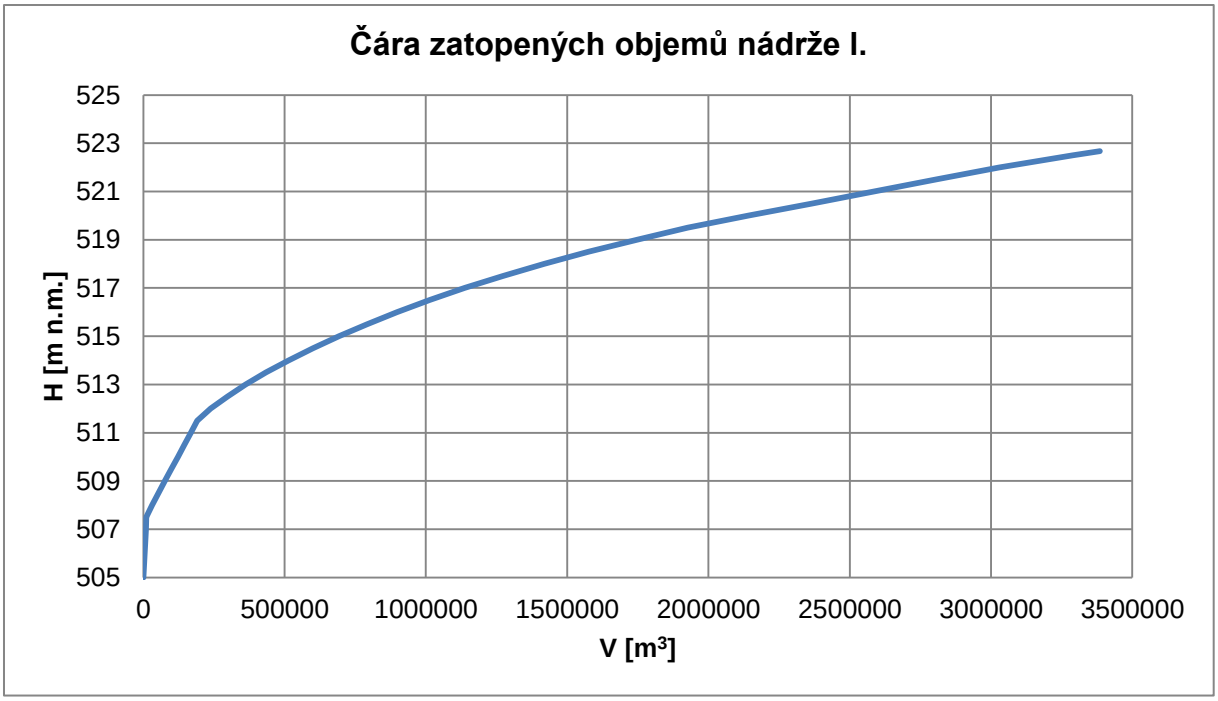
Současně je zatížena nejmenší teoretickou povodňovou vlnou z posuzovaných vodních děl. Teoretická povodňová vlna o N-letosti 10 000 kulminuje v čase 27 hodin od počátku měření. Hodnota příslušného kulminačního průtoku činí 75.0 $m^3.s^{-1}$.

Tab. 1. Technické údaje o nádrži I.

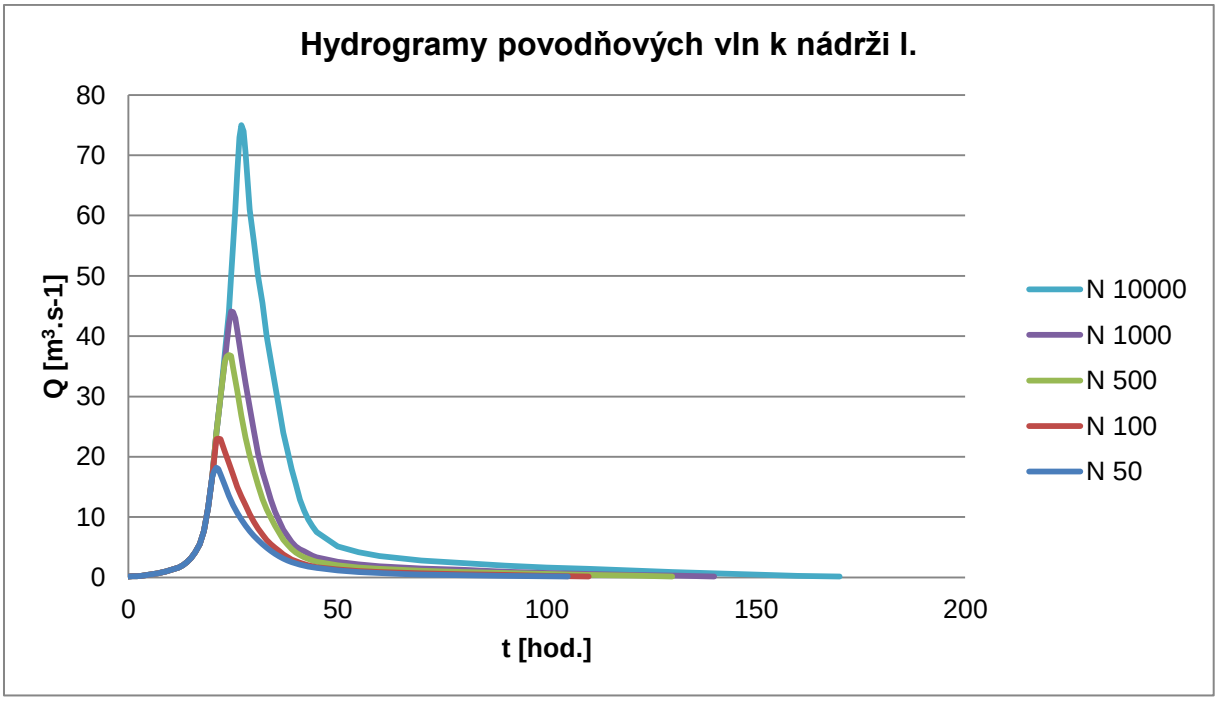
Kóta dna údolí	505.00 m n. m.
Kontrolní maximální hladina	522.68 m n. m.
Celkový objem nádrže	3 385 000 m^3

Tab. 2. Hydrologické údaje k nádrži I.

N-letost	Kulminační průtok Q [$m^3.s^{-1}$]	Doba trvání t [hod.]	Objem povodně W [m^3]
50	18.2	105	940 230
100	23.0	110	1 170 180
500	36.9	130	1 870 398
1 000	44.1	140	2 285 136
10 000	75.0	170	4 200 966



Obr. 1. Graf čáry zatopených objemů nádrže I.



Obr. 2. Hydrogramy povodňových vln k nádrži I.

3.2. Nádrž II.

Nádrž II. se řadí na druhé místo z hlediska celkového objemu nádrže. Tato nádrž je oproti ostatním uvedeným nádržím charakteristická výrazně nižším přírůstkem objemu vody v nádrži k přírůstku hloubky vody. Maximální hloubka vody v nádrži je 40.2 m, čímž se nádrž řadí na první místo z hlediska hloubky vody v nádrži.

Nádrž II. je zatížena druhou největší teoretickou povodňovou vlnou z posuzovaných vodních děl. Tato vlna je charakterizována prudkým nárůstem průtoku, jenž při N-letosti N 10 000 kulminuje v čase 13 hodin od počátku měření. Hodnota příslušného kulminačního průtoku činí 143.0 $m^3.s^{-1}$.

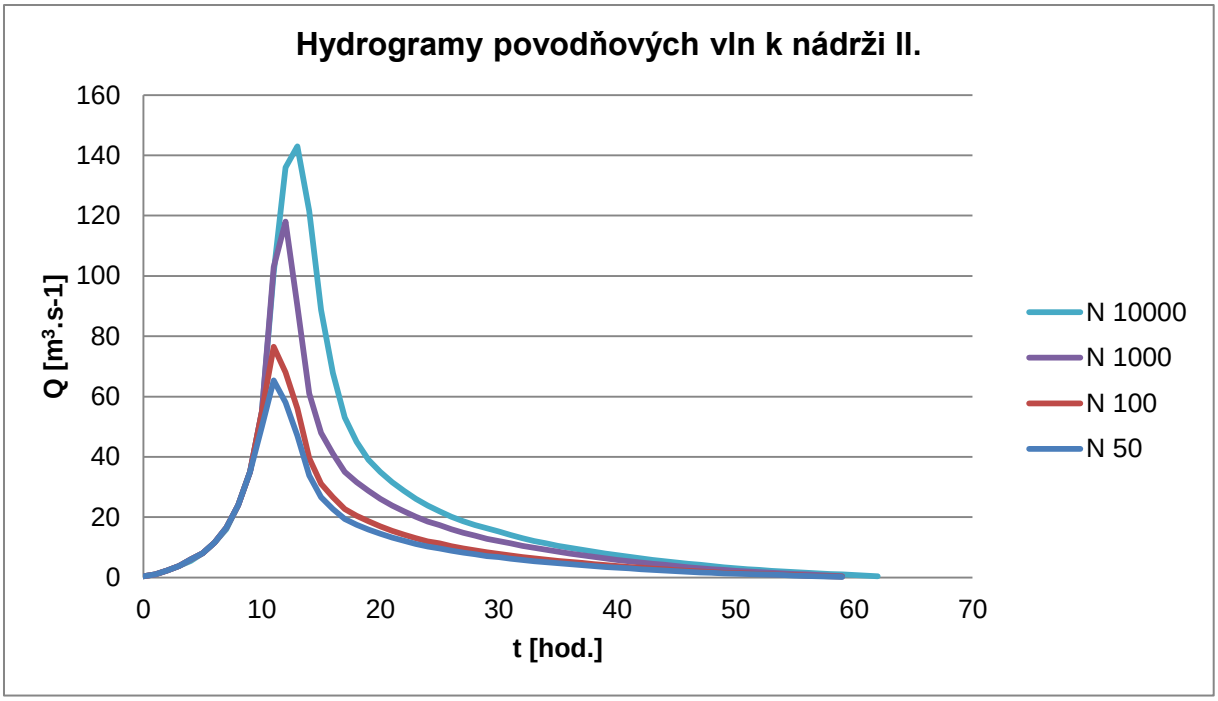
Tab. 3. Technické údaje o nádrži II.

Kóta dna údolí	482.50 m n. m.
Kontrolní maximální hladina	522.70 m n. m.
Celkový objem nádrže	8 155 361 m^3

Tab. 4. Hydrologické údaje k nádrži II.

N-letost	Kulminační průtok Q [$m^3.s^{-1}$]	Doba trvání t [hod.]	Objem povodně W [m^3]
50	65.4	59	2 327 580
100	76.5	59	2 648 322
1 000	118.0	59	3 772 368
10 000	143.0	62	4 976 104

Obr. 3. Graf čáry zatopených objemů nádrže II.



Obr. 4. Hydrogramy povodňových vln k nádrži II.

3.3. Nádrž III.

Nádrž III. je největším z uvedených vodních děl po stránce celkového objemu nádrže. Zároveň se tato nádrž řadí na druhé místo z hlediska maximální hloubky vody v nádrži, která dosahuje hodnoty 31.04 m.

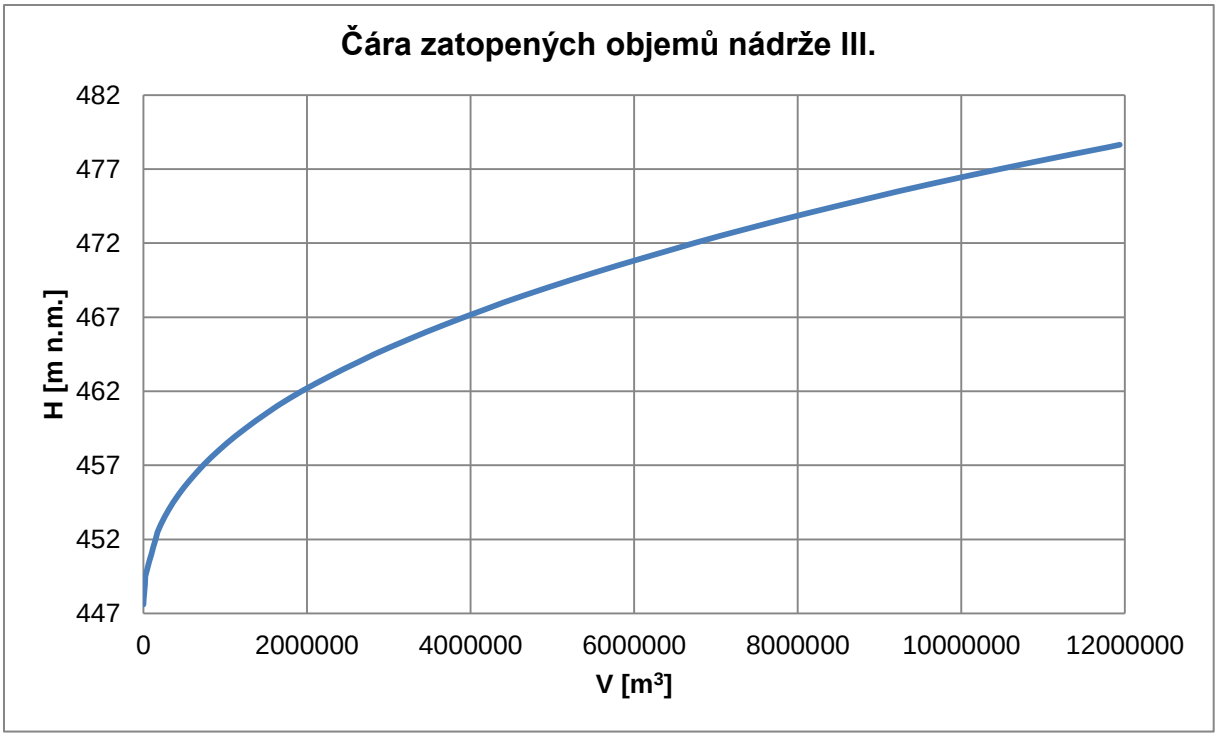
Tato nádrž je rovněž zatížena největší z uvedených teoretických povodňových vln jak po stránce objemu povodňové vlny, tak kulminačního průtoku. Ten narůstá hodnoty 291.0 $m^3.s^{-1}$ při N-letosti N 10 000 v čase 76 hodin od začátku povodně. Na rozdíl od výše uvedených nádrží je průběh teoretické povodňové vlny v prvních 42 hodinách pozvolný. Poté následovaný strmým růstem průtoku až do kulminace.

Tab. 5. Technické údaje o nádrži III.

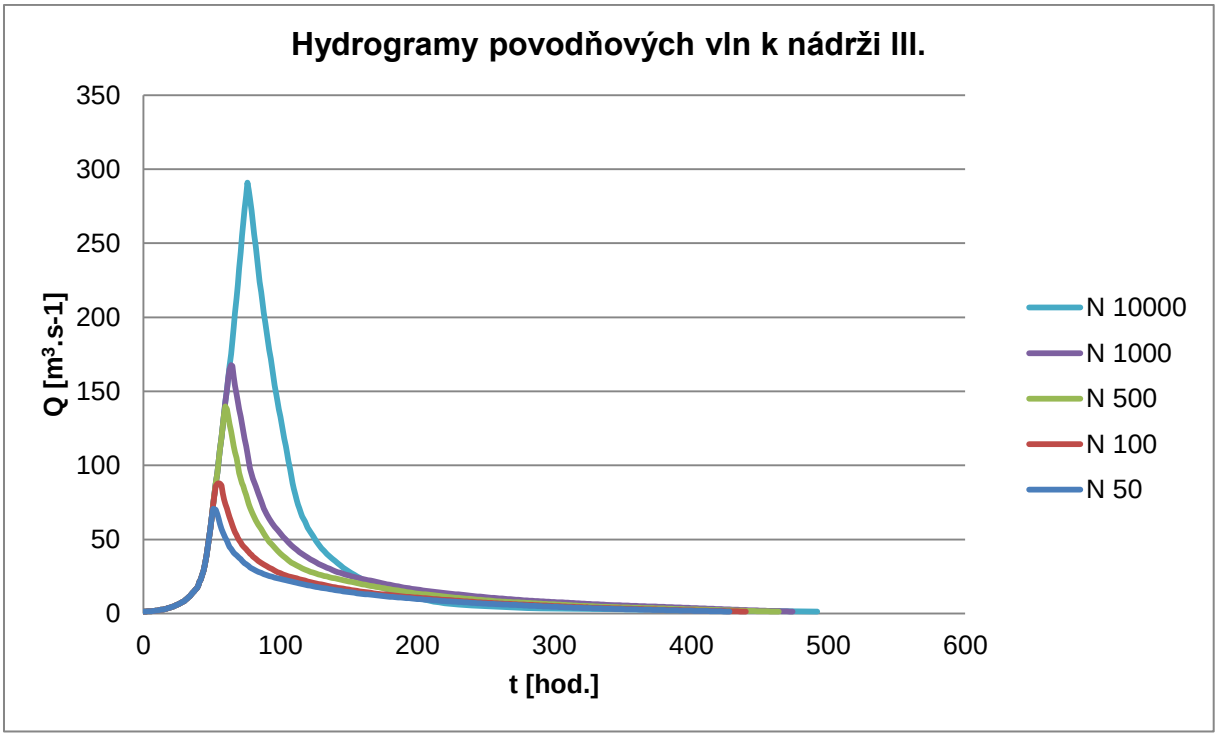
Kóta dna údolí	447.60 m n. m.
Kontrolní maximální hladina	478.64 m n. m.
Celkový objem nádrže	11 937 300 m^3

Tab. 6. Hydrologické údaje k nádrži III.

N-letost	Kulminační průtok Q [$m^3.s^{-1}$]	Doba trvání t [hod.]	Objem povodně W [m^3]
50	70.6	428	18 305 960
100	88.0	440	21 528 411
500	139.8	464	30 419 514
1 000	167.8	474	37 639 746
10 000	291.0	492	53 845 470



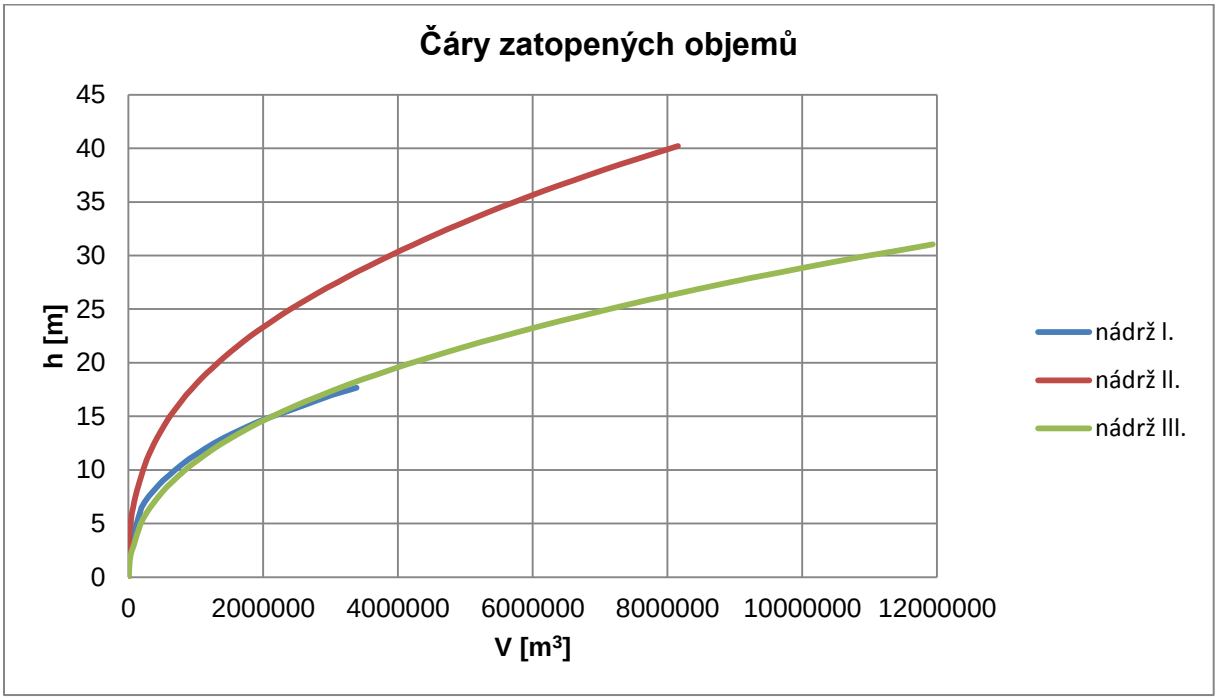
Obr. 5. Graf čáry zatopených objemů nádrže III.



Obr. 6. Hydrogramy povodňových vln k nádrži III.

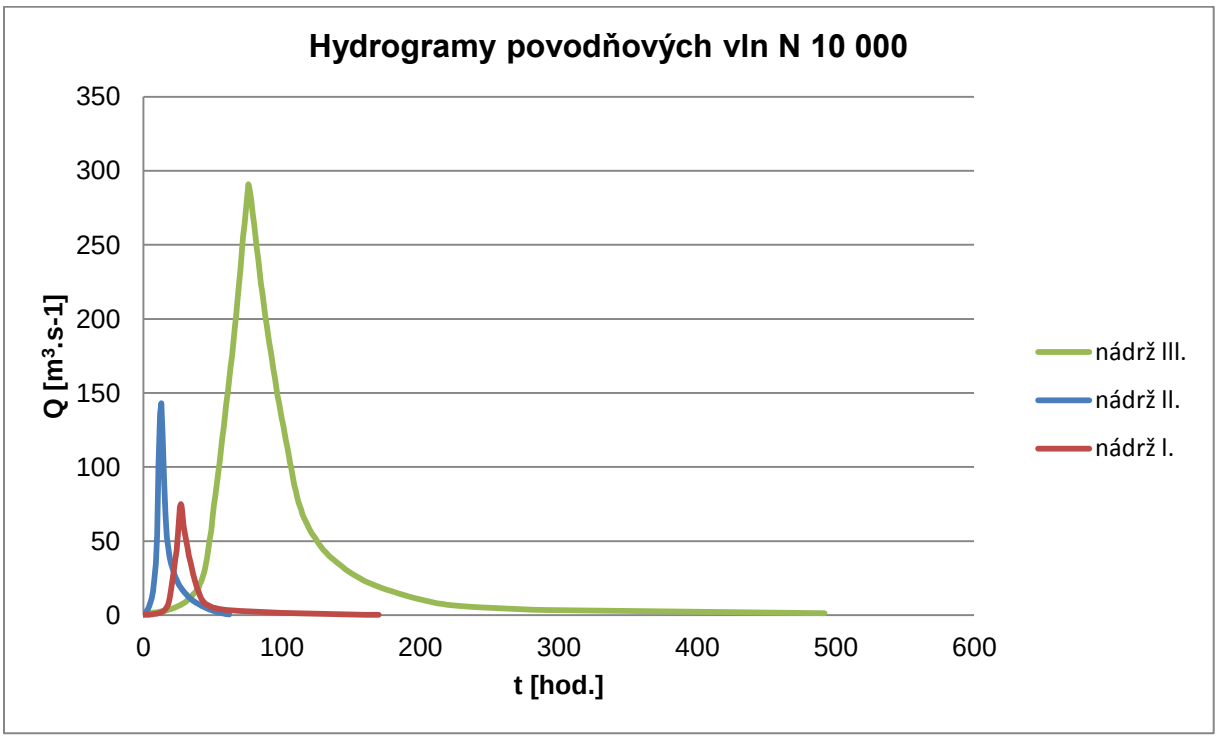
3.4. Porovnání jednotlivých nádrží

Na obr. 7 je vyznačeno porovnání čár zatopených objemů nádrží I, II a III.



Obr. 7. Graf čár zatopených objemů nádrží I, II, III.

Na obr. 8 je vyznačeno porovnání hydrogamů povodňových vln N10 000 příslušných k jednotlivým nádržím I, II a III.



Obr. 8. Hydrogramy povodňových vln N 10 000 nádrží I, II, III.

4. ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY

V rámci této diplomové práce a s ní souvisejícího programu bylo přikročeno k řadě předpokladů. Tyto předpoklady mají za cíl zjednodušení řešené problematiky pro praktické použití. Vzhledem k charakteru vstupních dat, především teoretickým hydrogramům lze považovat vliv použitých zjednodušujících předpokladů za velmi malý, v této práci zanedbatelný.

4.1. Hydrologické a morfologické

Deterministický charakter vstupních dat

V reálné situaci mají jevy popisované v této práci stochastický charakter a jsou tedy zatížena určitou mírou nejistoty.

Především se jedná o teoretické hydrogramy povodňových vln. Ty bývají součástí standartních hydrologických údajů pro N-letosti menší, nebo rovno 100 a je u nich udávána třída přesnosti představující procentuální odchylku od uvedeného stavu. Tyto data jsou poskytovány ČHMU. Hydrogramy N-letostí vyšších jak 100 jsou poskytovány formou hydrologické studie. Zpracováním hydrologické studie může být pověřeno i jiné odborné pracoviště než ČHMU (např. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka). Veškeré hydrologické údaje mají časově omezenou platnost, po jejímž uplynutí je nutné tyto údaje obnovit.

Dalším prvkem zatíženým určitou mírou nejistoty jsou údaje popisující morfologii terénu dané nádrže. V případě nových nádrží nastává riziko nepřesnosti měřených údajů zejména volbou metody zaměření dané oblasti. V případě použití digitálního modelu terénu České republiky 5. generace (DMR 5G) je úplná střední chyba výšky 0.18 m v odkrytém terénu a 0.3 m v zalesněném terénu [1]. Další metodou zaměření terénu je terénní geodetické zaměření. Geodetické zaměření má vyšší míru přesnosti, než metoda laserového leteckého skenování použitá pro tvorbu DMT 5G, ale je časově náročné a cenově nákladné. Kvalita zaměřených údajů klesá s dobou, která uplyne od jejich pořízení. U nových nádrží dojde již při výstavbě k částečné změně morfologie trénu. U již vybudovaných nádrží navíc dochází k dalším změnám způsobených jejich provozem. Jde o zanášení sedimenty, abrazi břehů apod.

Meteorologické a další jevy

Průchod povodňové vlny může být ovlivněn řadou meteorologických jevů. Jde především o ledochod, který může mýt značný vliv na přepadový děj.

Podobný vliv jako ledochod může způsobit spláví unášené povodňovou vlnou z příslušného povodí dané nádrže.

Pro zjednodušení se v této diplomové práci neuvažuje s těmito jevy.

4.2. Hydraulické

Typ a situování přelivu

Na vodních dílech se užívá celá řada typů přelivů s různým umístěním a s tím souvisejícím prouděním. Vzhledem k charakteru a účelu této diplomové práce by rozlišování a simulování proudění na jednotlivých typech přelivů vedlo k řadě problémů při řešení transformace povodňových vln.

Pro účely této práce bylo počítáno s přelivy čelními (směr proudu je kolmý na přelivnou hranu). Tento typ přelivu byl zvolen z důvodu dobré prozkoumanosti a jednoduchosti výpočtu kapacity přelivu dle rovnice (4.0).

$$Q = m \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{1.5} \tag{4.0}$$

Kde, Q … kapacita přelivu,
m … součinitel přepadu,
L … délka přelivné hrany,
h … přepadová výška,
g … tíhové zrychlení.

Zanedbání přítokové rychlosti

Při výpočtu průtoku vody přepadající přes přeliv se běžně počítá s energetickou přepadovou výškou. Tato výška se počítá jako součet přepadové výšky přelivu s přítokovou rychlostní výškou dle rovnice (4.1). Přepadová výška je určena jako rozdíl hladiny vody v nádrži a koruny přepadu. Při měření je nutné tuto výšku odměřit v dostatečné vzdálenosti od přelivné hrany z důvodu snížení hladiny v blízkosti přelivu. Přítoková rychlostní výška se počítá jako součin Coriolisova čísla a kvadrátu přítokové rychlosti poděleným dvojnásobkem tíhového zrychlení.

$$h_0 = h + \frac{\propto \cdot v_0^2}{2g} \tag{4.1}$$

Kde, h_0 … energetická přepadová výška,
h … přepadová výška,
α … Coriolisovo kritérium,
v_0 … přítoková rychlost,
g … tíhové zrychlení.

Vzhledem k obecnosti řešení proudění v této práci není možné určit hodnotu přítokové rychlosti na přeliv. Z tohoto důvodu bylo přikročeno k použití předpokladů velké hloubky vody v blízkosti přelivu. Ze zavedení tohoto předpokladů vyplývá, že přítoková rychlost na přeliv je blízká nule a tudíž i přítoková rychlostní výška je rovna nule. Pro další výpočty v této práci se uvažuje pouze s přepadovou výškou h.

Zanedbání kontrakcí proudu pilíři

Při proudění vody přelivným profilem dochází ke kontrakci vodního proudů vlivem pilířů, jež jsou součástí přelivného objektu. Tyto kontrakce jsou závislé na tvaru pilířů a energetické přepadové výšce. Vliv tvaru pilířů na boční zúžení udává součinitel tvarů pilíře. Účinná šířka přelivu se vypočte jako rozdíl skuteční šířky přelivu a jedné desetiny součinu počtu kontrakcí, součinitelů tvaru pilířů a energetické přepadové výšky dle rovnice (4.2). Součinitel tvaru pilířů je dán tvarem předního zhlaví návodních pilířů a nabývá hodnot od 0.1 po 0.04 (může být i menší).

$$b_0 = b - 0.1 \cdot n \cdot \xi \cdot h_0 \tag{4.2}$$

Kde, b_0 … účinná šířka přelivu,
b … šířka přelivu,
n … počet zúžení,
h_0 … energetická přepadová výška,
ξ … součinitel tvaru pilíře.

V této práci nebyly pro zjednodušení výpočtu zahrnuty kontrakce proudu způsobené tvarem pilířů. Pro výpočet přepadového množství je zaveden předpoklad malého ovlivnění průtoku přepadajícího přes přeliv tvarem pilířů. Z tohoto předpokladu vyplývá nahrazení účinné šířky přelivu jeho skutečnou šířkou.

Zanedbání nedokonalého (zatopeného) přepadu

Nedokonalý (zatopený) přepad nastává obecně v případě, že úroveň hladiny spodní vody dosáhne vyšší výškové úrovně, než je přelivná hrana bezpečnostního objektu a hladina spodní vody negativně ovlivňuje množství přepadající vody. Nedokonalý přepad je spojen z případy vzdutého, nebo vlnovitého vodního skoku. Do výpočtu kapacity přelivu se vliv nedokonalého přepadu zahrnuje pomocí součinitele zatopení.

Problematika nedokonalého přepadu je spjata s návrhem typu a geometrie bezpečnostního objektu. Z tohoto důvodu je zaveden předpoklad, kdy maximální hladina dolní vody pod přelivem je níže, než přelivná hrana. Na základě tohoto předpokladu lze prohlásit přepad za dokonalý (neovlivněný dolní vodou). Tímto řešením se značně zjednodušuje výpočet kapacity přelivu a tím i simulace transformace povodňové vlny nádrží.

Zanedbání změny přepadového součinitele m

Vliv veškerých ztrát energie přepadající vody je do výpočtu zohledněn součinitelem přepadu. Přepadový součinitel je určen pro jednotlivé typy přelivných objektů. Závisí zejména na tvaru přelévané konstrukce, drsnosti jejího povrchu a přepadové výšce vodního paprsku. Při přepadu o malé výšce navíc dochází k vlivu povrchového napětí.

Hodnoty přepadového součinitele jsou především vázány na typ přelévané konstrukce a přepadovou výšku. Zavádění proměnných hodnot přepadového součinitele by zbytečně konkretizovalo a ztěžovalo výpočty nad rámec této práce. Pro praktické použití v této práci je přepadový součinitel udáván jednou neměnnou hodnotou v celém rozsahu přepadové výšky.

Superpoziční princip

Hydraulické proudění v místě napojení dvou úrovní přelivů je málo prozkoumaná a popsaná oblast proudění. K uvedené problematice byl proveden modelový výzkum, jenž je zdokumentován v bakalářské práci: *„Stanovení kapacitní charakteristiky dvouúrovňového pevného přelivu z roku 2016“* [2]. Tato práce dokládá relativně malý vliv prostorového proudění v oblasti navázání jednotlivých úrovní přelivu. Dále je v práci uvedeno, že zmíněný vliv vede k synergickému efektu a tedy k mírnému nárůstu kapacity přelivu.

Pro výpočet celkových průtoků do víceúrovňových přelivů byl použit superpoziční princip, který je postaven na předpokladů vzájemného neovlivnění proudění vody od jednotlivých přepadů. Každá úroveň přelivu je uvažována jako samostatná entita a výsledný průtok je poté sumou průtoků od dílčích přelivů dle rovnice (4.3).

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i \tag{4.3}$$

Kde, Q_i … průtok jednotlivých úrovní přelivu,
n … počet úrovní přelivu.

Zanedbání vlivu morfologie nádrže

Již od přítoku povodňové vlny do nádrže dochází k jisté transformaci vlivem morfologie nádrže. Tento jev je charakteristický rozdílem hladin vody v nádrži po její délce. Zvláště v místě přítoku vody do nádrže a v místě bezpečnostního objektu. Stručně se dá tato skutečnost popsat jako průběh povodňové vlny korytem o velké hloubce a šířce.

V této práci byl zaveden předpoklad zanedbání vlivu morfologie nádrže. Z tohoto předpokladů vyplývá, že hydrogram povodňové vlny není ovlivněn morfologií nádrže a je tedy v nezměněné podobě použitelný při výpočtu transformace povodňové vlny přelivem.

Zanedbání vlivu spodních výpustí

Při převádění povodňových vln se kromě bezpečnostních objektů často používají i spodní výpusti. Kapacita spodní výpusti se vypočte jako proudění hydraulicky krátkým potrubím. Jedná se o součin součinitele výtoku, průtočného průřezu a odmocniny ze součinu dvou tíhových zrychlení a energetického spádu dle rovnice (4.4). V případě zanedbání přítokové rychlosti a rozdílu tlaků na hladině nádrže a výtoku z nádrže se hodnota energetického spádu rovná rozdílu úrovně hladiny vody v nádrži a těžiště

výtokového otvoru (výtok do volna). Součinitel výtoku zjednodušeně udává vliv místních ztrát v potrubí a ztrát po délce potrubí na kapacitu spodní výpusti.

$$Q_v = \mu \cdot S_u \cdot (2 \cdot g \cdot H)^{1.5} \tag{4.4}$$

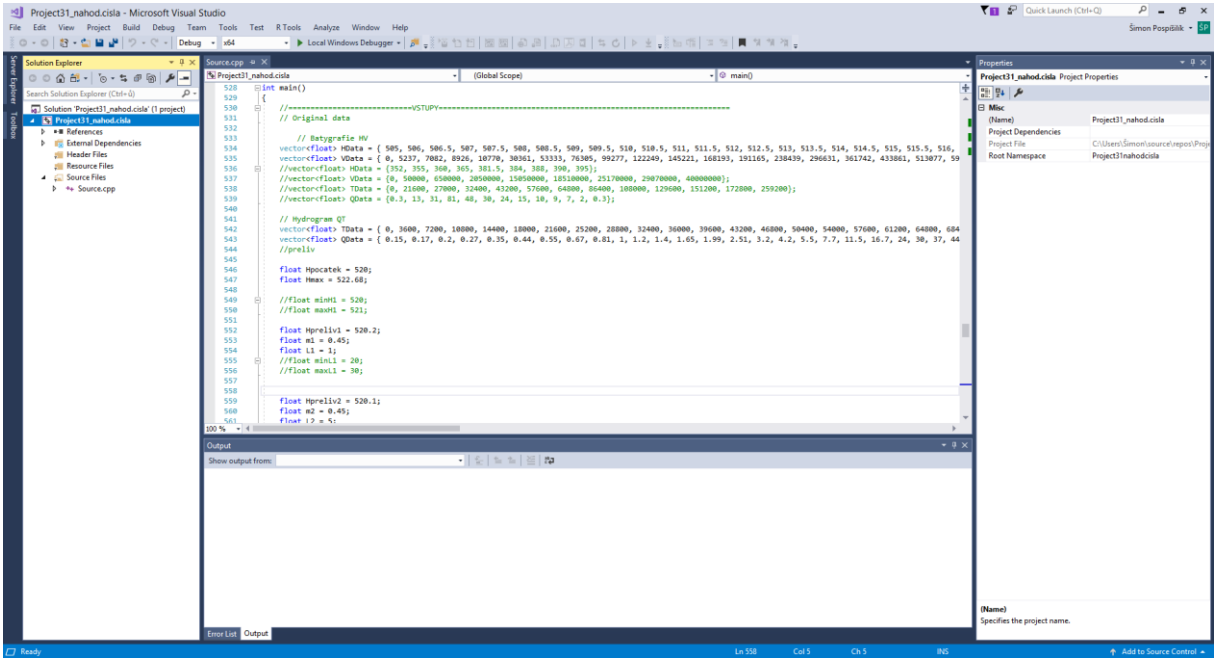
Kde, Q_v … kapacita spodní výpusti,
μ … součinitel výtoku,
S_u … průtočný průřez,
H … energetický spád,
g … tíhové zrychlení.

Využití a manipulace se spodními výpustmi při převádění povodňových vln je uvedena v manipulačním řádu příslušného vodního díla.

Vzhledem k problematice návrhu a manipulace se spodními výpustmi během povodňových stavů bylo přikročeno k zjednodušujícímu předpokladu uzavření spodních výpustí při povodni. Z tohoto předpokladu vyplívá nulový odtok spodními výpustmi při povodni a tedy nulový vliv na odtok převádění bezpečnostním objektem.

5. PROGRAM

Pro optimalizaci návrhových parametrů bezpečnostních přelivů byl vytvořen program simulující transformaci povodňových vln nádrží. Tento program byl vytvořen v programu Visual Studio 2017. Jako programovací jazyk byl zvolen C++, jenž umožňuje rychlejší a méně objemné programy oproti jiným programovacím jazykům. Rozhraní programu Visual Studio 2017 je uvedeno na obr. 9. Program byl navržen a odzkoušen pro výpočty v jednotkách SI.



Obr. 9. Rozhraní programu Visual Studio 2017.

Výstupem z optimalizačního programu jsou soubory CSV, jež je možné převést do programu Microsoft Excel pro další zpracování. První výstupní soubor *„optimalizace.csv“* (obr.10) uvádí výsledné optimalizovaní parametry. Druhý soubor *„simulace.csv“* (obr.11) uvádí průběh simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry.

	A	B	C	D	E
1	Odtok [m3/s]	H preliv 1 [m n.m.]	L1 [m]	H preliv 2 [m n.m.]	L2 [m]
2	26.2242	521.68	13.2	522.68	8.7

Obr. 10. Příklad výstupního souboru „optimalizace.csv“.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
3	Cas t [s]	Odtok [m3/s]	H preliv 1 [m n.m.]	L1 [m]	H preliv 2 [m n.m.]	L2 [m]	Hladina [m n.m.]	Odtok Preliv 1 [m3/s]	Odtok Preliv 2 [m3/s]
4	0	0	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	0	0
5	60	0.000002091	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	0.000002091	0
6	120	0.000012546	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	0.000012546	0
7	180	0.000012546	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	0.000012546	0
8	240	1.63693E-05	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	1.63693E-05	0
9	300	3.54855E-05	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	3.54855E-05	0
10	360	3.54855E-05	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	3.54855E-05	0
11	420	6.02401E-05	521.68	13.2	522.68	8.7	521.68	6.02401E-05	0

Obr. 11. Příklad výstupního souboru „simulace.csv“

5.1. TEORIE

Diskrétní bodová simulace kontinuálního procesu

Kdykoliv se v simulačním modelu vyskytuje jedna, nebo více diferenciálních rovnic, je zřejmé, že stav přinejmenším jednoho procesu ze zainteresovaných se mění kontinuálně (spojitě). Pokud je uváděna také diskrétní změna, můžeme simulační model popsat jako diskrétně – kontinuálního typu [3].

V případě simulace transformace povodňové vlny nádrží se vychází z diferenciální rovnice prvního řádu (5.0), jenž popisuje změnu objemu vody v nádrži jako rozdíl přítoku vody do nádrže a transformovaného odtoku vody z nádrže.

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q(t) - O\big(V(t)\big) \tag{5.0}$$

Kde, $\frac{dV(t)}{dt}$ … změna objemu vody v nádrži,
Q(t) … přítok vody do nádrže,
O(V(t)) … Transformovaný odtok vody z nádrže.

Obecně lze rovnici (5.0) zapsat ve tvaru rovnice (5.1).

$$\frac{dV(t)}{dt} = f\big(t, V(t)\big) \tag{5.1}$$

Metoda Runge – Kutta 4. řádu

Pro řešení výše zmíněné diferenciální rovnice 1. Řádu (5.1) byla použita aproximační metoda Runge – Kutta 4. řádu, která je zatížena chybou $\theta(\Delta t^5)$. Metoda Runge – Kutta 4. řádu je popsána následujícími rovnicemi (5.2) až (5.3).

$$V_1 - V_0 = \frac{K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4}{6} \tag{5.2}$$

Kde, $V_1 - V_0$ … změna objemu vody v nádrži

a hodnoty K_i v obecném tvaru

$$K_1 = \Delta t \cdot f\big(t, V(t)\big)$$

$$K_2 = \Delta t \cdot f\left(t + \Delta t, V(t) + \frac{K_1}{2}\right)$$

$$K_3 = \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, V(t) + \frac{K_2}{2}\right)$$

$$K_2 = \Delta t \cdot f(t + \Delta t, V(t) + K_3).$$

Po převedení obecných rovnic K_i do konkrétního tvaru dostaneme rovnice (5.3).

$$K_1 = \Delta t \cdot \left(Q(t) - O\left(V(t)\right)\right) \tag{5.3}$$

$$K_2 = \Delta t \cdot \left(Q(t + \Delta t) - O\left(V(t) + \frac{K_1}{2}\right)\right)$$

$$K_3 = \Delta t \cdot \left(Q\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - O\left(V(t) + \frac{K_2}{2}\right)\right)$$

$$K_4 = \Delta t \cdot \left(Q(t + \Delta t) - O(V(t) + K_3)\right)$$

Kde, Q_i … přítok vody do nádrže,

O_i … odtok vody z nádrže,

Δt … časový krok,

t … Čas.

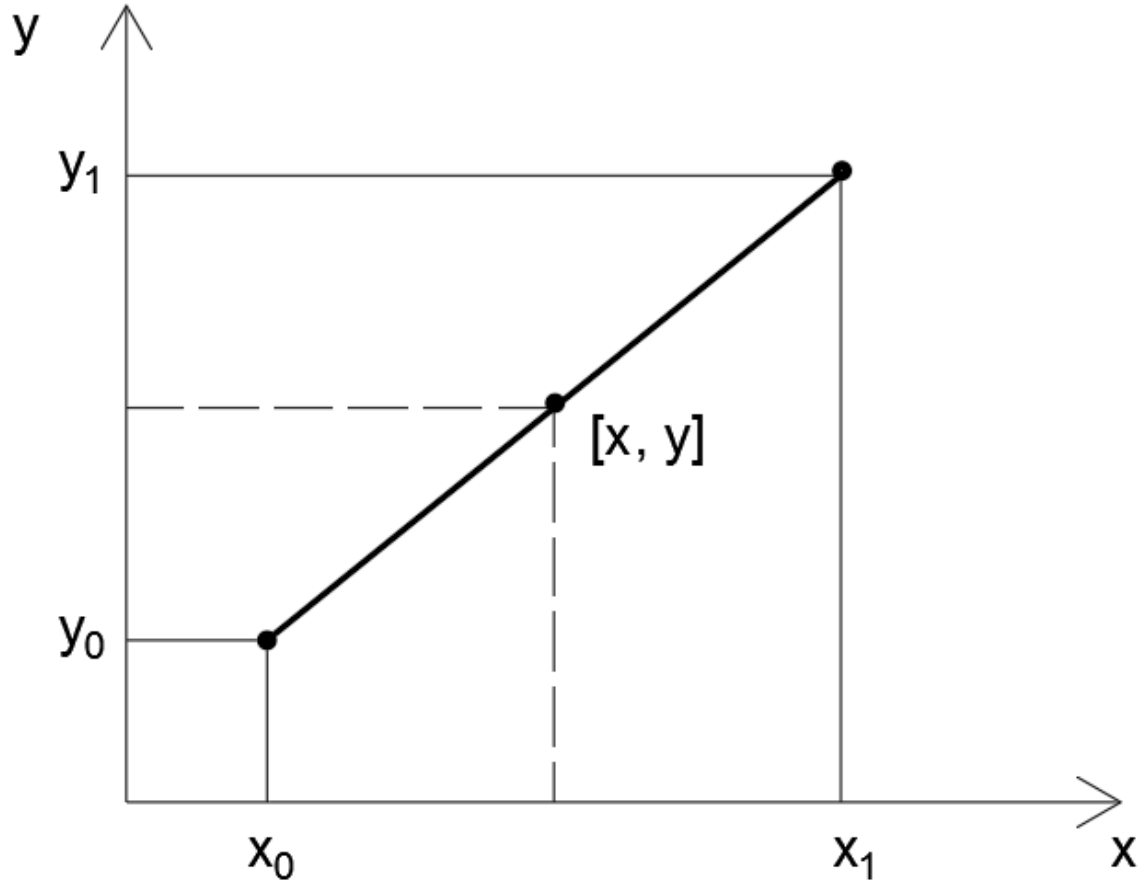
Velikost časového kroku Δt ovlivňuje aproximační chybu v přírůstku $V_1 - V_0$, kdy při malých hodnotách Δt je malá, vede však ke značnému nárůstu nákladů na řešení. Příliš malá hodnota Δt může vést rovněž k zaokrouhlovacím chybám závislým na použitém typu zadávání čísla v programu [3].

Doplnění dat

Pro potřeby praktického použití metody Runge – Kutta je potřeba doplnit (zjemnit) vstupní data, aby odpovídala zvolenému časovému kroku. Toto doplnění vstupních dat se provede pomocí algoritmu využívající lineární interpolaci. Lineární interpolace je metoda využívající dvou bodů o známých souřadnicích ležících na spojité funkci k výpočtu druhé souřadnice mezilehlého bodu dle rovnice (5.4). První souřadnice mezilehlého bodu musí být zadána. Schéma lineární interpolace je uvedeno na obr. 12.

$$y = y_0 + (x - x_0)\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \tag{5.4}$$

Kde, y … hledaná souřadnice hledaného bodu,
x … známá souřadnice hledaného bodu,
x_0 , y_0 … souřadnice předešlého bodu,
X_1 , y_1 … souřadnice následujícího bodu.



Obr. 12. Schéma lineární interpolace

V programu byla lineární interpolace použita pro určení požadovaných hodnot přítoku vody do nádrže z příslušného hydrogramu povodňové vlny o dané N-letosti. Dále byla metoda lineární optimalizace použita k určení hladiny vody v nádrži ze zadané čáry zatopených objemů.

Multi – gradientní optimalizační metoda

V rámci řešení optimalizace návrhových parametrů víceúrovňových bezpečnostních přelivů byla použita optimalizační metoda založená na principu multi – gradientního prohledávání oblasti řešení. Tato metoda využívá kombinaci gradientního vyhledávacího principu a generátoru náhodných čísel. Gradientní vyhledávání probíhá v blízkém okolí zadaného počtu nejlepších řešení. Generátor náhodných čísel je použit jako opatření proti uvíznutí výpočtu řešení v lokálním extrému. Výsledkem metody je nalezení suboptimálního řešení, které se velmi blíží řešení optimálnímu.

Výhodou použité optimalizační metody je její robustnost a jednoduchost, kdy při provedení dostatečného počtu cyklů lze s velkou pravděpodobností nalézt suboptimální řešení. Další výhodou zvolené metody je minimalizace rizika uvíznutí optimalizace v lokálním extrému díky užití generátoru náhodných čísel.

Generátor náhodných čísel

Použitá optimalizační metoda využívá generátoru náhodných čísel. Pomocí tohoto generátoru jsou náhodně voleny hodnoty návrhových parametrů víceúrovňového přelivu. Jelikož klasický deterministický počítač nedokáže generovat čísla čistě náhodná, bylo přikročeno k použití pseudonáhodných čísel. Pseudonáhodná čísla se sice generují předvídatelným způsobem, ale mají charakter náhodného šumu. Jako generátor náhodných čísel byl použit kongruentní generátor generující hodnoty pseudonáhodných čísel v intervalu <0,1). Tyto hodnoty byly poté převedeny do potřebného rozměru ležících ve zvoleném intervalu vstupních návrhových veličin.

Kongruentní generátor

Kongruentní generátor funguje na základě rovnic (5.5) a (5.6).

$$x_0 = Z \tag{5.5}$$

$$x_{n+1} = (A \cdot x_n + C) mod\ M \tag{5.6}$$

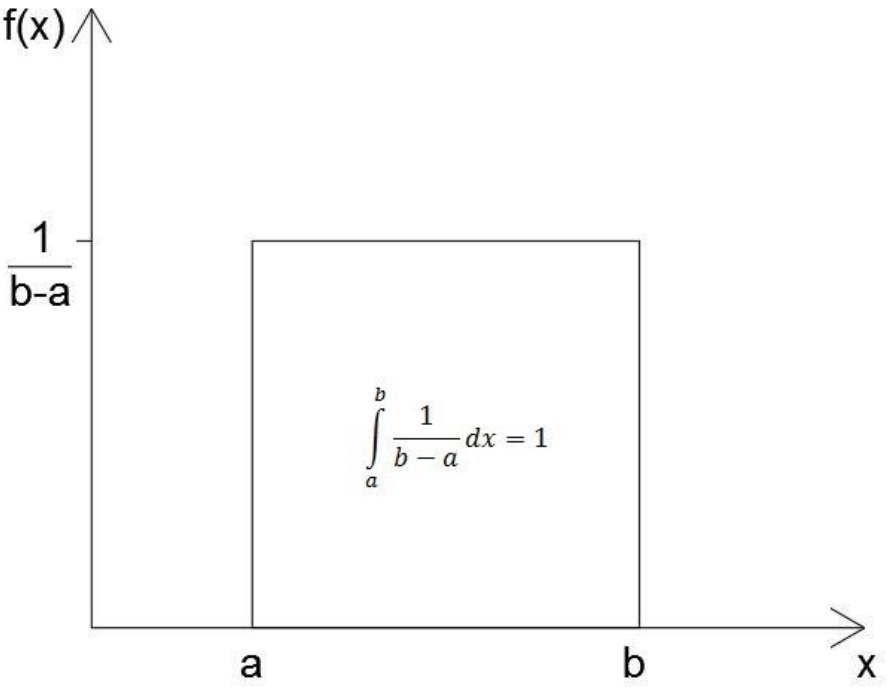
Kde, Z … počáteční zvolená hodnota „seed“,
x_i … pseudonáhodné číslo,
A, C … konstanty,
M … Konstanta „perioda“
$mod\ M$ … zbytek po celočíselném dělení M,

Při volbě hodnot vstupních konstant do generátoru pseudonáhodných čísel je nutná určitá opatrnost, protože při použití nevhodných konstant by mohlo dojít k výskytu souvislostí náhodných čísel. Vhodné hodnoty vstupních konstant do knihovny jazyka C++ jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7. Vstupní hodnoty konstant do generátoru náhodných čísel

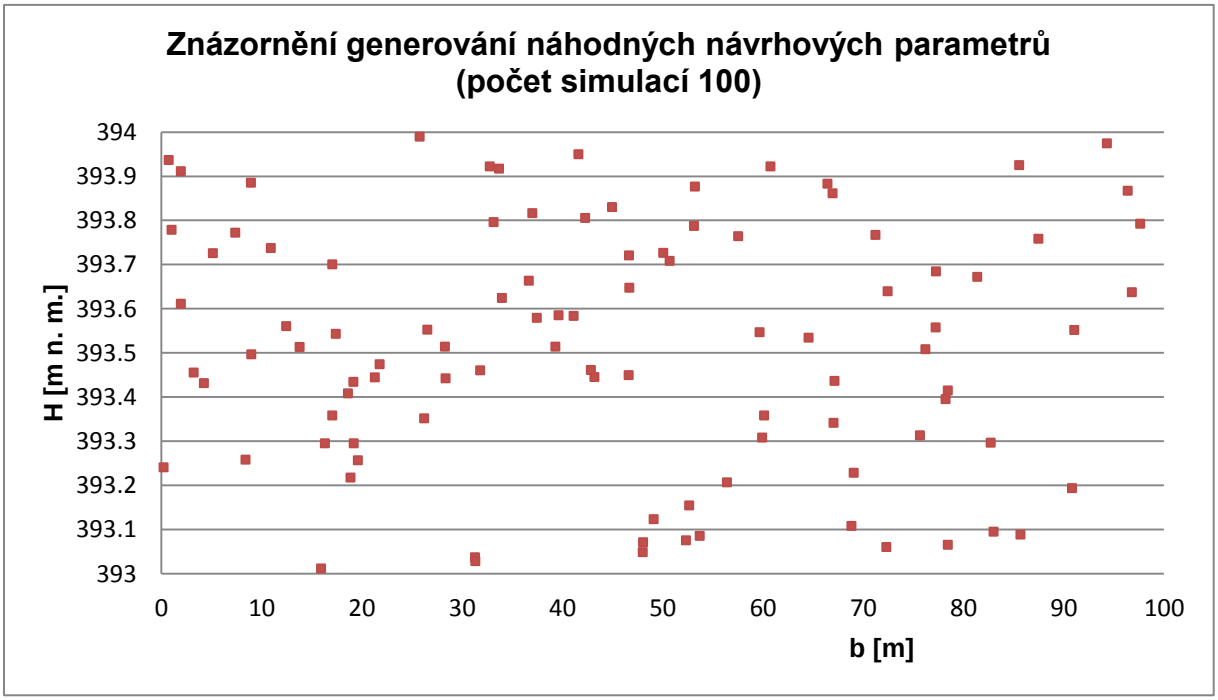
A=	1 103 515 245
C=	12 345
M=	2^{32} = 4 294 967 296

Pravděpodobnost vygenerování pseudonáhodného čísla použitým generátorem je dána rovnoměrným pravděpodobnostním rozložením viz obr. 13.



Obr. 13. Rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti

Příklad rozložení vygenerovaných náhodných hodnot návrhových parametrů bezpečnostního přelivu je uveden na obr. 14.



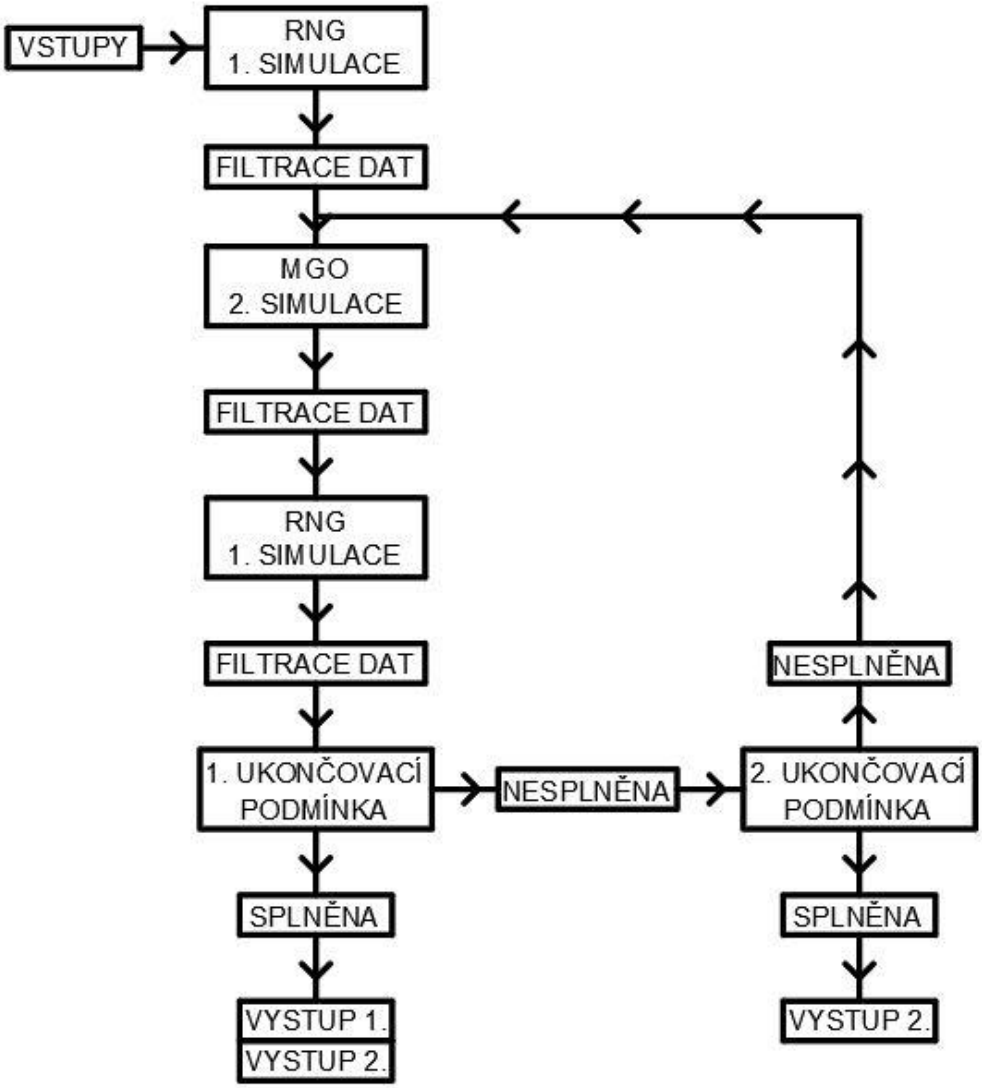
Obr. 14. Znázornění generování náhodných návrhových parametrů (počet simulací 100)

5.2. ALGORITMUS PROGRAMU

Postup algoritmu optimalizace návrhových parametrů použity programu je popsán na obr. 15. V rámci programu je použita simulace transformace povodňové vlny nádrží. Postup simulace je uveden na obr. 16. Cílem optimalizace návrhových parametrů je nalezení minimální hodnoty transformovaného kulminačního odtoku z nádrže.

Popis optimalizačního algoritmu

Nejprve se do programu načtou vstupní data, omezující podmínky a zadá se počáteční stav nádrže na začátku řešení. Poté proběhne první cyklus, ve kterém dojde k výpočtu zadaného počtu simulací transformace povodňové vlny nádrží na základě parametrů vygenerovaných generátorem náhodných čísel *„RNG“*. Následně jsou pomocí filtrace dat vybrány nejúspěšnější simulace, které postupují do části využívající multi – gradientní optimalizaci *„MGO“*. V této části dochází k prohledávání blízkého okolí simulovaných řešení za účelem nalezení vhodnější varianty řešení. Data z „MGO“ procházejí dalším kolem filtrace dat a složí jako omezující předpoklad pro následný cyklus, ve kterém dojde k výpočtu dalších simulací transformace povodňové vlny nádrží na základě parametrů vygenerovaných generátorem náhodných čísel *„RNG“*. Tato data opět procházejí filtrací dat a vstupují do 1. ukončovací podmínky. Tato podmínka porovná shodu filtrovaných dat a v případě splnění provede vypsání a export výstupů do souboru CSV. V případě nesplnění ukončovací podmínky 1. následuje 2. ukončovací podmínka. Druhá ukončovací podmínka zabraňuje vzniku nekonečného optimalizačního cyklu. Při kladném vyhodnocení 2. ukončovací podmínky dojde vypsání a export výstupů do souboru CSV. Při záporném výsledku je přikročeno k opakování optimalizačních cyklů od části využívající multi – gradientní optimalizaci *„MGO“*. Jako vstupy *„MGO“* jsou použity filtrovaná data s 1. ukončovací podmínky.



Obr. 15. Schéma algoritmu optimalizačního programu.

Vstupy

Jako vstupy do optimalizačního programu byly použity následující data:

Čára zatopených objemů,

která popisuje vztah mezi úrovní hladiny vody v nádrži a objemem vody v nádrži. Ve výpočtu je použita pro stanovení počátečního objemu vody v nádrži a dále k určení přepadové výšky při výpočtu přepadového množství na bezpečnostním objektu. Výška vody v nádrži je uváděna v m n. m., objem vody v nádrži je uváděn v m^3.

Teoretický hydrogram povodňové vlny dané N-letosti.

Tento hydrogram popisuje průběh povodňové vlny na přítoku do nádrže. Je charakterizován závislostí přítoku vody na čase. Časové jednotky jsou pro zjednodušení programu uváděny v sekundách, průtoky jsou uváděny v $m^3.s^{-1}$.

Úroveň maximální hladiny.

Jako omezující podmínka je uvedena úroveň maximální hladiny vody v nádrži. Tato podmínka v optimalizačním programu omezuje řešení pouze na simulace, ve kterých nedojde k překročení maximální hladiny (možnost porušení hráze nádrže). Úroveň maximální hladiny vody v nádrži se udává v m n. m.

Úroveň hladiny vody v nádrži v čase t_0.

Na začátku optimalizačního programu je nutné zadat počáteční podmínku řešení. Tato podmínka je v případě řešení transformace povodňové vlny nádrží udávána objemem vody v nádrži na začátku řešení. Jelikož zadávání počátečního objemu vody v nádrži do programu je nepraktické, bylo přikročeno k použití počáteční úrovně hladiny v nádrži odpovídající počátečnímu objemu vody v nádrži. Po zadání počáteční úrovně hladiny vody v nádrži dojde k jejímu přepočtu přes čáru zatopených objemů na hodnotu objemu vody v nádrži.

Rozsah návrhových parametrů pro jednotlivé bezpečnostní přelivy.

Kvalita výsledku optimalizačního modelu nádrže závisí především na velikosti prohledávané oblasti a počtu provedených optimalizačních cyklů.

Pro generování návrhových parametrů pomocí generátoru náhodných čísel je nutné zadat rozsah prohledávané oblasti pomocí minimální a maximální návrhové hodnoty. Generovanými návrhovými parametry jsou délky přelivných hran a výškové umístění jednotlivých úrovní přelivných hran. Minimální a maximální hodnoty délky přelivných hran jsou uváděny v m, minimální a maximální hodnoty výškového umístění přelivných hran jsou uváděny v m n. m.

Rozsah návrhových parametrů musí být volen s přihlédnutím na vliv, který tato data představují pro optimalizaci. Při nevhodné volbě nemusí dojít k nalezení suboptimálního řešení.

Součinitel přepadu pro jednotlivé bezpečnostní přelivy.

Vzhledem k zavedenému předpokladu neměnnosti součinitele přepadu se v simulaci rozlišují pouze součinitele přepadu pro jednotlivé úrovně bezpečnostního přelivu.

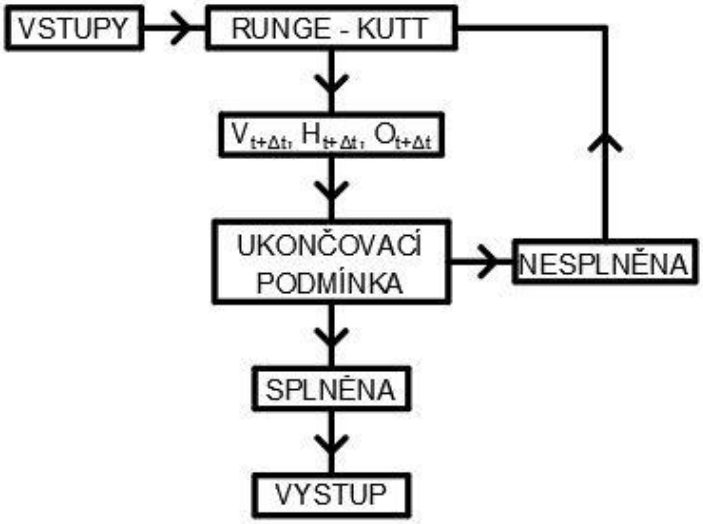
Generátor náhodných čísel „RNG“

Princip generátoru náhodných čísel a jeho vliv na optimalizační program je již uveden v předcházejících kapitolách. Pro doplnění je uvedeno, že pro provádění simulací transformací povodňových vln nádrží je výhodné měnit počáteční hodnotu *Z „seed“*. V případě zachování počáteční hodnoty *Z „seed“* nastává možnost duplikace předešlého řešení optimalizace návrhových parametrů.

Simulace transformace povodňové vlny nádrží

Schéma simulace transformace povodňové vln nádrží je znázorněno na obr. 16. Postup simulace lze popsat následovně. Nejprve se načtou zadané vstupní data. Poté se provede simulace změny objemu vody v nádrži pomocí metody Runge – Kutta pro daný časový krok. Výstupem metody jsou hodnoty objemu vody v nádrži, úroveň hladiny vody v nádrži a odtok vody z nádrže na konci časového kroku. Tyto hodnoty jsou uloženy pod příslušný čas a použity jako vstup do dalšího cyklu, který začíná na konci předešlého časového kroku. Simulace je ukončena splněním ukončovací podmínky, která je dána konce časové řady zadané vstupním hydrogramem.

V rámci optimalizace návrhových parametrů víceúrovňových přelivů bylo přikročeno k použití dalších možností předčasného ukončení probíhající simulace tzv. *„breaku“*. Prvním případem je využití omezující podmínky maximální hladiny, kdy při jejím překročení dojde k ukončení simulace a jejímu znehodnocení pro další použití. Druhým případem je využití maximální hodnoty odtoku. V tomto případě dojde k ukončení simulace a jejímu znehodnocení, když hodnota simulovaného odtoku přesáhne hodnotu maximálního odtoku uvedenou ve filtrovaných datech. Tyto *„breaky“* výrazně urychlují výpočet optimalizace.



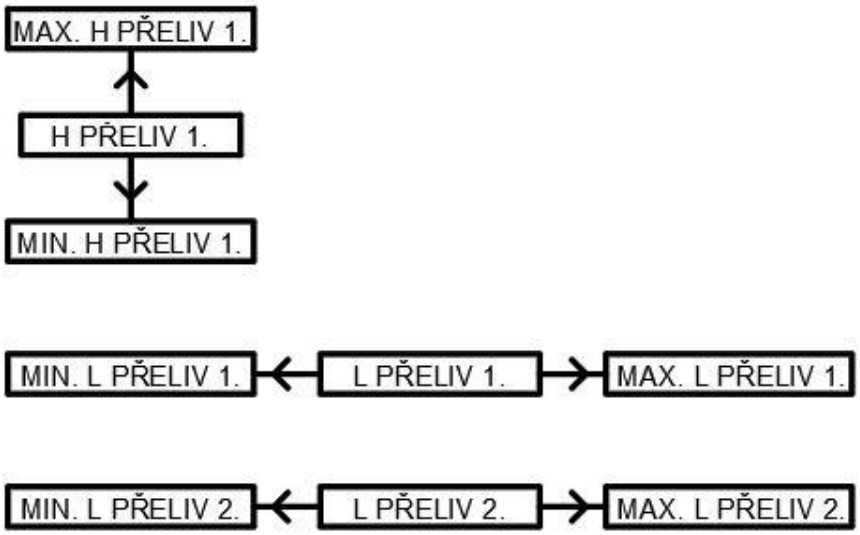
Obr. 16. schéma simulace transformace povodňové vlny nádrží

Filtrace dat

V rámci filtrace dat dojde k prohledání souboru obsahujícího data o průběhu simulací. Data z tohoto souboru jsou podrobena kriteriální podmínce minimálního odtoku, a v případě jejího splnění jsou umístěna do nového výstupního souboru. Pro další filtrace dat je výstupní soubor zdrojem hodnot minimálního odtoku.

Multi – gradientní optimalizace

Jako vstupy do multi – gradientní optimalizace jsou použity výše zmíněná přefiltrovaná data. Tyto data jsou podrobena náhodné změně optimalizovaných parametrů přelivu v zadaném rozsahu znázorněném na obr. 17. Takto upravené návrhové parametry jsou použity k provedení simulací transformace povodňové vlny nádrží. Po provedení každé simulace je výsledek zmíněné simulace porovnán s jí příslušnou hodnotou ze vstupních dat. V případě, že dojde k nalezení lepšího řešení, je toto řešení postoupeno k filtraci dat. V opačném případě dojde k nové náhodné změně vstupních parametrů a cyklus se opakuje.



Obr. 17. Schéma rozptylu změn návrhových parametrů pro MGO.

Možné kombinace změny optimalizovaných návrhových parametrů jsou uvedeny v tab. 8. V této tabulce jsou použity znaky *„ΔL1, ΔH2, ΔL2“,* jenž symbolizují měněný návrhový parametr a symboly *„+, -, o“,* které vystihují druh změny. Konkrétně symbol „+“ znamená zvýšení hodnoty návrhového parametru, symbol „-“ naopak snížení a symbol *„o“* ponechání parametru beze změny.

Tab. 8 Kombinace možné změny návrhových parametrů.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ΔL1	+	-	o	o	o	o	+	-	-	+	+	-	-	+
ΔH2	o	o	+	-	o	o	+	+	-	-	o	o	o	o
ΔL2	o	o	o	o	+	-	o	o	o	o	+	+	-	-

i	15	16	17	18	19	20	21	22
ΔL1	+	+	+	-	-	-	-	+
ΔH2	+	+	-	+	-	-	+	-
ΔL2	+	-	-	-	+	-	+	+

1. Ukončovací podmínka

V rámci této podmínky dochází k porovnání řešení uložených ve výstupním filtrovaném souboru. Pokud nastane přijatelná shoda v těchto datech, je přikročeno k vypsání suboptimálního řešení, jeho exportu a následnému ukončení programu. Pokud přijatelná shoda nenastane, je přikročeno ke 2. ukončovací podmínce.

2. Ukončovací podmínka

Tato podmínka zamezuje nekonečnému cyklování optimalizačního programu. V programu 2. ukončovací podmínka udává maximální počet proběhlých cyklů optimalizace. Pokud je tato podmínka splněna, dojde k vypsání nejlepšího nalezeného řešení, jeho exportu a následnému ukončení programu. Pokud podmínka splněna není, dojde k provedení dalšího cyklu optimalizace.

Výstupy

Výstup 1. je složen ze dvou výstupních CSV souborů *(„optimalizace.csv“, „simulace.csv“)*. K iniciaci výstupu 1. dojde v případě splnění výše uvedené 1. ukončovací podmínky. První výstupní soubor obsahuje výpis suboptimálního nalezeného řešení. Tento výpis udává maximální hodnotu transformovaného odtoku z nádrže a k ní příslušné návrhové parametry. Druhý výstupní soubor obsahuje výpis simulace transformace povodňové vlny nádrží pro nalezené suboptimální řešení.

Výstup 2. je složen ze dvou výstupních CSV souborů *(„Noptimalizace.csv“, „Nsimulace.csv“)*. K iniciaci výstupu 2. dojde v případě splnění výše uvedené 2. ukončovací podmínky. První výstupní soubor obsahuje výpis nejlepšího nalezeného řešení. Tento výpis udává maximální hodnotu transformovaného odtoku z nádrže a k ní příslušné návrhové parametry. Druhý výstupní soubor obsahuje výpis simulace transformace povodňové vlny nádrží pro nalezené řešení. K vypsání výstupu 2. dojde i v případě splnění 1. ukončovací podmínky, kdy jeho obsah duplikuje výstup 1.

Exportované CSV soubory jsou umístěny v adresáři obsahujícím zdrojový kód optimalizačního programu. V případě, že v adresáři figurují CSV soubory se stejným jménem, dojde k jejich přemazání optimalizačním programem.

Grafické informace

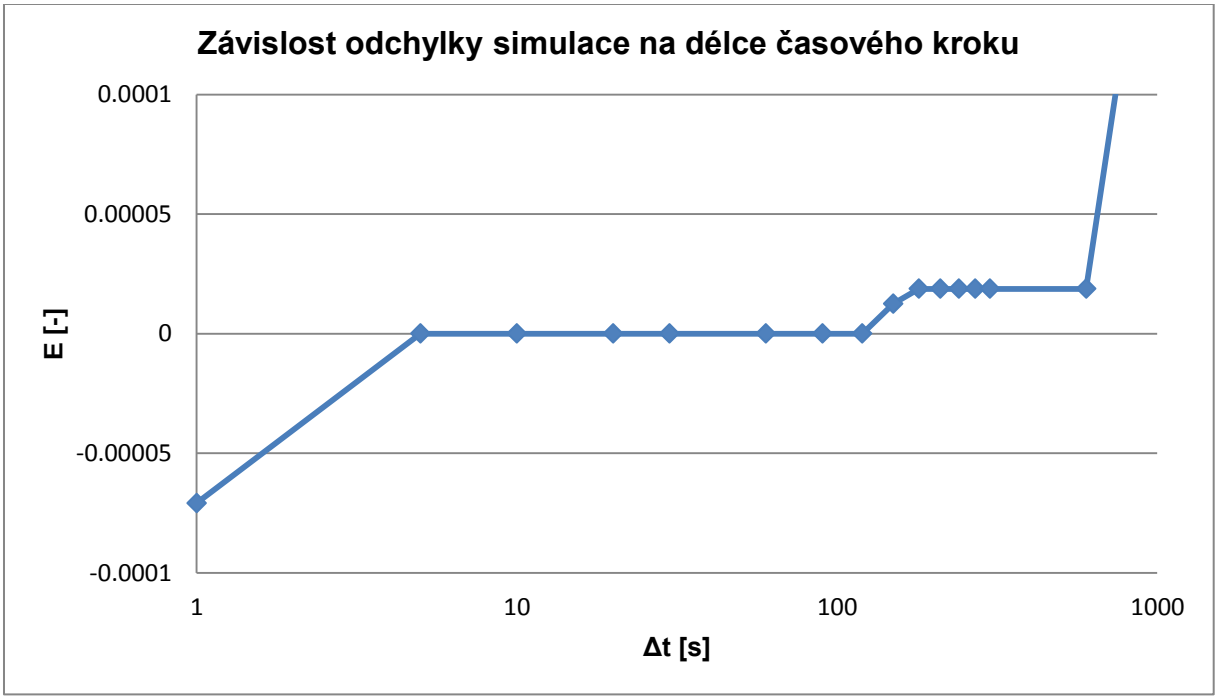
Po spuštění optimalizačního programu dojde k otevření okna programu, do kterého jsou vypisovány informace o průběhu programu viz obr. 18. Těmito informacemi jsou texty upozorňující na omezující podmínky „POZOR“, dále pak výpis nalezených řešení na konci každého cyklu a doprovodné informace.

Obr. 18. Příklad okna optimalizačního programu.

6. OVĚŘENÍ NASTAVENÍ PROGRAMU

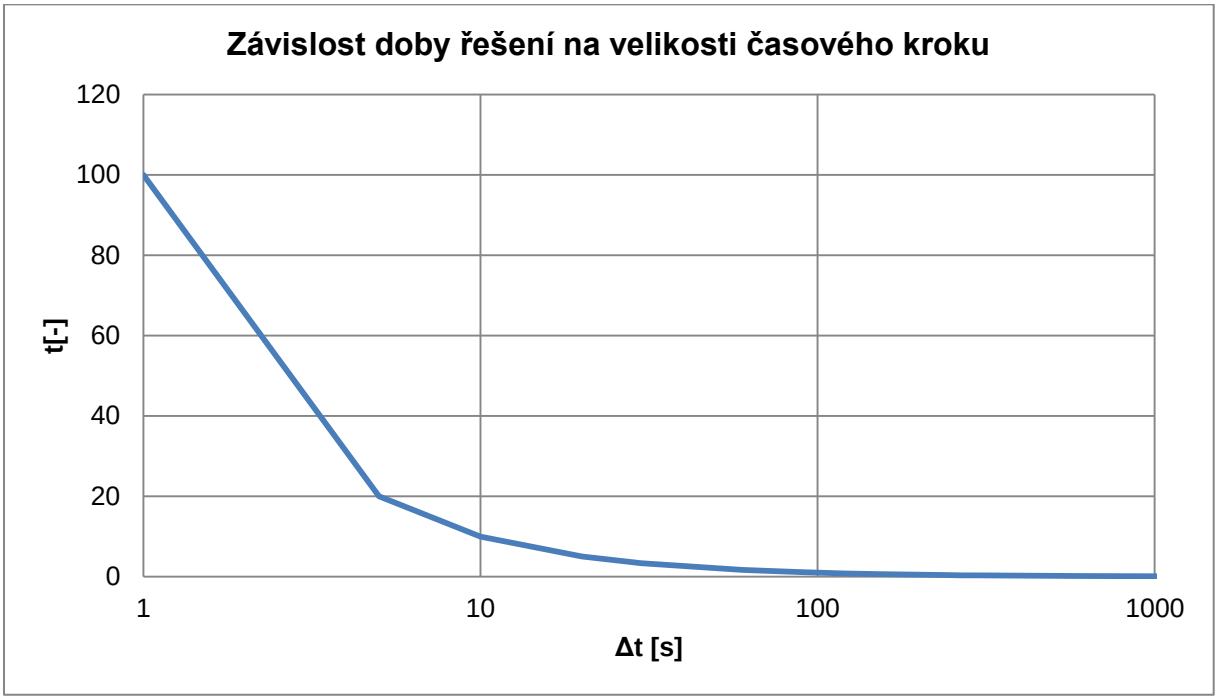
Při volbě časového kroku použitého pro simulaci transformace povodňové vlny nádrží je nutné zohlednit vliv tohoto časového kroku na přednost výsledného řešení simulace. Prakticky mohou vzniknout dva druhy chyby. První druh nastává při zvolení vysoké hodnoty časového kroku. Při této chybě se do výpočtu řešení simulace dostává nepřesnost, která se propaguje přes celou oblast řešení a znehodnocuje výsledná data. Druhá chyba nastává při zvolení příliš malého časového kroku. Nejen, že zvolení malých časových kroků prodlužuje dobu potřebnou na provedení simulace transformace povodňové vlny nádrží, ale navíc může nastat zaokrouhlovací chyba. Vznik zaokrouhlovací chyby je dán použitým formátem čísel v programu. V praxi to znamená, že prostor pro zapsání čísla v programu má omezenou velikost a při výskytu čísla obsahujícího větší počet znaků dojde k zaokrouhlení čísla na potřebnou velikost. Toto zaokrouhlení se provádí odseknutím přebývajících znaků odzadu čísla.

Pro simulaci transformace povodňové vlny nádrží byla provedena jednoduchá citlivostní analýza. Tato analýza se zabývá vztahem délky zvoleného časového kroku pro simulaci a vzniklou odchylkou výstupu simulace. Odchylka výstupu byla stanovena jako bezrozměrné číslo ze vztahu porovnávající hodnoty maximálního transformovaného odtoku vody z nádrže. Vztah mezi odchylkou výstupu ze simulace a zvolenou délkou časového kroku je uveden na obr. 19. Na tomto obrázku je dobře patrný vliv výše zmíněných chyb. Z provedené citlivostní analýzy vyplývá, že pro zamezení vlivu nepřesností na simulaci transformace povodňové vlny nádrží je nutné voli délku časového kroku v rozsahu od 5 do 120 sekund.



Obr. 19. Závislost odchylky simulace na délce časového kroku.

V optimalizačním programu byla pro simulace transformace povodňové vlny nádrží zvolena hodnota časového kroku 60 sekund. Tato hodnota leží vprostřed bezpečného intervalu udávaného ve výše uvedené citlivostní analýze a je tedy na ni vliv uvedených chyb minimální. Hodnota časového kroku 60 sekund byla zvolena i jako kompromis mezi časovými nároky na výpočet simulace a přijatelnou odchylkou (chybou). Příklad závislosti časových nároků na simulaci k délce časového kroku je znázorněn na obr. 20. Tento obrázek potvrzuje již dříve zmíněnou skutečnost neúměrného nárůstu časových nákladů na řešení simulace při zadání malých hodnot časového kroku.



Obr. 20. Závislost doby řešení na velikosti časového kroku.

7. VÝSLEDKY

V této kapitole jsou uvedeny vstupní zadání a výsledky nalezených suboptimálních řešení pro jednotlivé nádrže I, II a III. Tato kapitola je rozdělena na následující 4 podkapitoly.

V první podkapitole 7.1 nazvané *„Optimalizace pro 3 neznámé“* jsou uvedeny výsledky optimalizačních simulací pro jednotlivé nádrže. Cílem těchto simulací bylo nalezení teoreticky nejlepších návrhových parametrů bezpečnostních přelivů pro povodňové vlny dané N-letosti.

Ve druhé podkapitole 7.2 nazvané *„Bezpečnostní přelivy o jednom poli“* byly poznatky získané z předešlé kapitoly použity pro návrh bezpečnostních přelivů. Tyto přelivy byly navrženy s cílem optimálního převedení zvoleného kulminačního průtoku (N 10 000) bez ohledu na povodňové vlny o jiné N-letosti. Pro tyto N-letosti byly provedeny simulace transformace povodňové vlny nádrží přes již navržený přeliv. Výsledky této kapitoly představují podklad porovnání jednoúrovňových a víceúrovňových bezpečnostních přelivů.

Ve třetí podkapitole 7.3 nazvané *„Bezpečnostní přelivy se dvěma poli“* byly provedeny optimalizační simulace návrhových parametrů druhého přelivného pole víceúrovňového bezpečnostního přelivu. Předpokladem pro provedení zmíněných optimalizačních simulací byla znalost návrhových parametrů prvního přelivného pole, jež bylo navrženo na zadaný kulminační průtok při dané úrovni vody v nádrži. Návrhové parametry druhého přelivného pole byly poté získány jako výsledek optimalizačních simulací pro zvolené N-letosti (10 000). Na závěr byly pro takto navržené víceúrovňové přelivy provedeny simulace transformace povodňových vln určených N-letostí.

Ve čtvrté podkapitole 7.4 nazvané *„Vyhodnocení“* jsou uvedena porovnání jednotlivých variant z předcházejících kapitol.

V níže uvedených kapitolách je opakovaně uveden pojem *„transformace“*. Ozřejmění významu tohoto pojmu je uvedeno v následujícím textu a popsáno rovnicí 7.0. Pojem *„transformace“* popisuje transformační účinek nádrže jako procentuální změnu kulminačního přítoku vody do nádrže na transformovaný odtok vody z nádrže.

$$transformace = 100 - \frac{O_{max} * 100}{Q_{max}} \tag{7.0}$$

Kde, O_{max} … maximální transformovaný odtok vody z nádrže,
Q_{max} … maximální (kulminační) přítok vody do nádrže.

7.1. OPTIMALIZACE PRO 3 NEZNÁMÉ

V této kapitole jsou uvedeny výsledky optimalizačních simulací, které byly provedeny s cílem nalezení optimalizovaných návrhový parametrů víceúrovňových bezpečnostních přelivů. Těmito optimalizovanými parametry byly délka přelivné hrany první úrovně bezpečnostního přelivu *„L1“*, výškové umístění druhé výškové úrovně bezpečnostního přelivu *„H2“* a jí příslušná délka přelivné hrany *„L2“*. Možný rozsah optimalizovaných parametrů byl určen pomocí zadání minimálních a maximálních hodnot *„min, max“*.

Optimalizace návrhových parametrů byly provedeny pro jednotlivé povodňové vlny dané N-letosti, kdy na ostatní povodňové vlny jiných N-letostí nebyla brána zřetel. Výsledkem těchto optimalizačních simulací jsou návrhové parametry bezpečnostních přelivů, pro které platí podmínka nalezení minimálního kulminačního odtoku vody z nádrže. V praxi tyto parametry představují teoretické maximální využití retenčního prostou nádrže při převádění zvolené povodňové vlny.

7.1.1. NÁDRŽ I.

V rámci optimalizace návrhových parametrů víceúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže I. došlo k řadě optimalizačních simulací s cílem nalezení optimálních návrhových parametrů přelivu pro jednotlivé povodňové vlny dané N-letosti. Vstupní nastavení optimalizačního programu je uvedeno v tab. 9.

Tab. 9 Vstupní zadané parametry.

N - letost	10 000	1 000	500	100	50
H počáteční [m n. m.]	521.18	521.18	521.18	521.18	521.18
H maximální [m n. m.]	522.68	522.68	522.68	522.68	522.68
Přeliv 1.					
H1 [m n. m.]	521.18	521.18	521.18	521.18	521.18
m1	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
min. L1 [m]	5	5	5	0	0
max. L1 [m]	21	13	11	7	5
Přeliv 2.					
min. H2 [m n. m.]	521.18	521.18	521.18	521.18	521.18
max. H2 [m n. m.]	522.68	522.68	522.68	522.68	522.68
m2	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
min. L2 [m]	5	5	5	0	0
max. L2 [m]	21	13	11	7	5

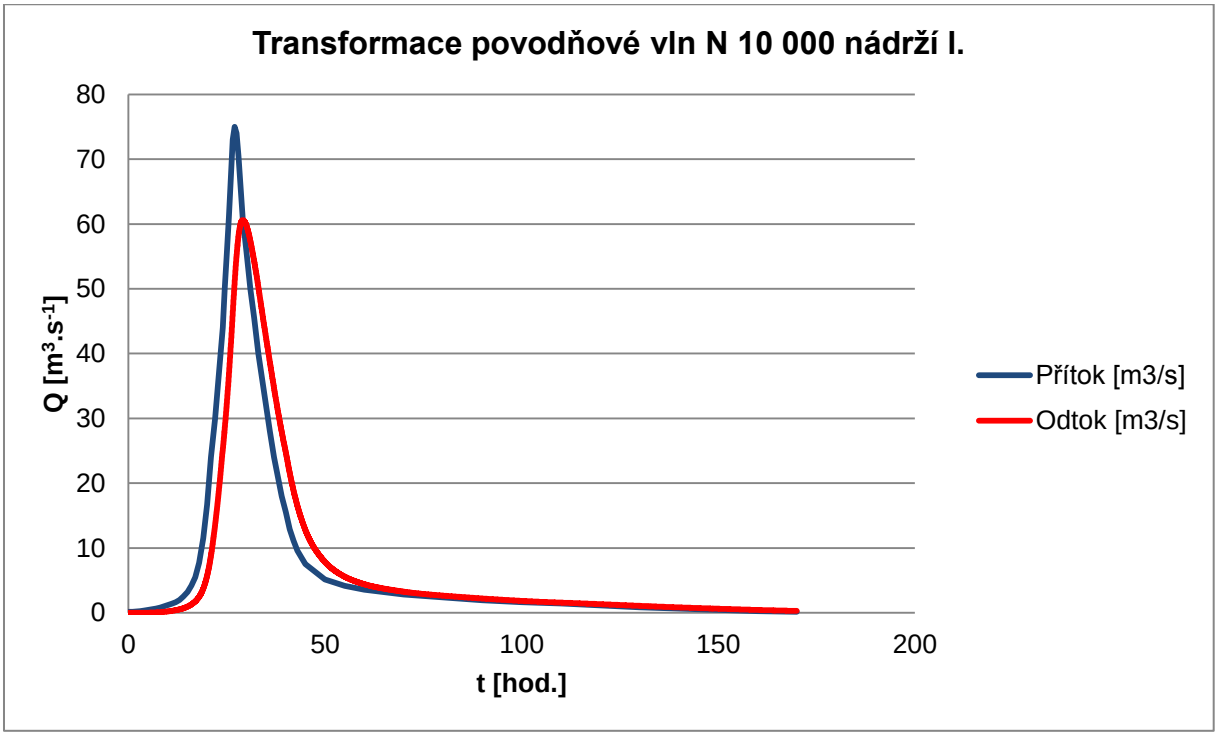
Optimalizace návrhových parametrů nádrže l. na N10 000

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže l. je uveden v tab. 10. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 21.

Tab. 10 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž l., N-letost 10 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
60.596	521.18	11.5	521.19	5.1

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 10 000 nádrží l. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo porovnáním výškových úrovní jednotlivých přelivných hran, kdy výškový rozdíl činní 0,01 m a tudíž je možné jej považovat za prodloužení přelivné úrovně 1.



Obr. 21 Transformace povodňové vln N 10 000 nádrží l.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 10 000 nádrží l. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 75.00 $m^3.s^{-1}$ na 60.60 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Úspěšnost transformace povodňové vlny N10 000 nádrží l.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	70.00
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	60.60
Transformace [%]	19.21
Maximální hladina [m n. m.]	522.68

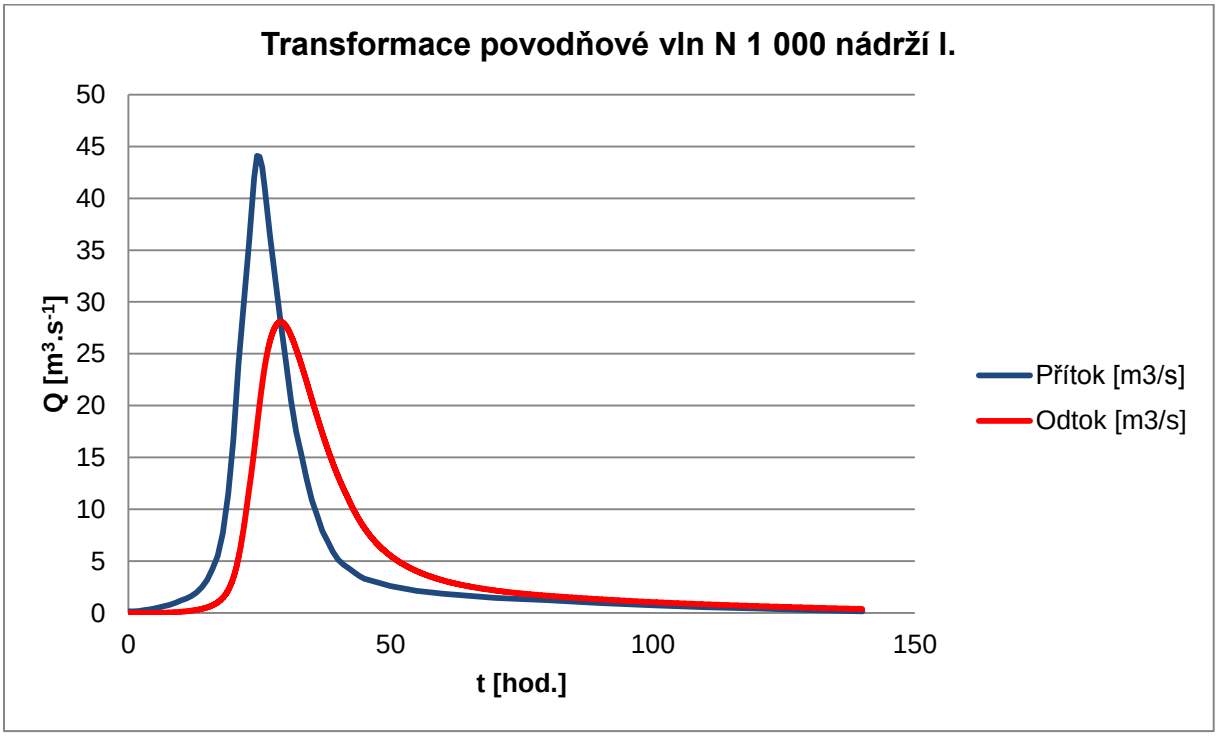
Optimalizace návrhových parametrů nádrže l. na N1 000

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže l. je uveden v tab. 12. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 22.

Tab. 12 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž l., N-letost 1 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
28.092	521.18	7.7	522.65	10.1

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 1 000 nádrží l. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo porovnáním maximálního odtoku přepadajícího přes jednotlivá pole. Zatímco maximální odtok přes přeliv číslo 1. je 28.02 $m^3.s^{-1}$, tak přes přeliv číslo 2. pouze 0.07 $m^3.s^{-1}$ a je možné jej považovat za zanedbatelný.



Obr. 22 Transformace povodňové vln N 1 000 nádrží l.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 1 000 nádrží l. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 44.10 $m^3.s^{-1}$ na 28.09 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Úspěšnost transformace povodňové vlny N1 000 nádrží l.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	44.10
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	28.09
Transformace [%]	36.30
Maximální hladina [m n. m.]	522.68

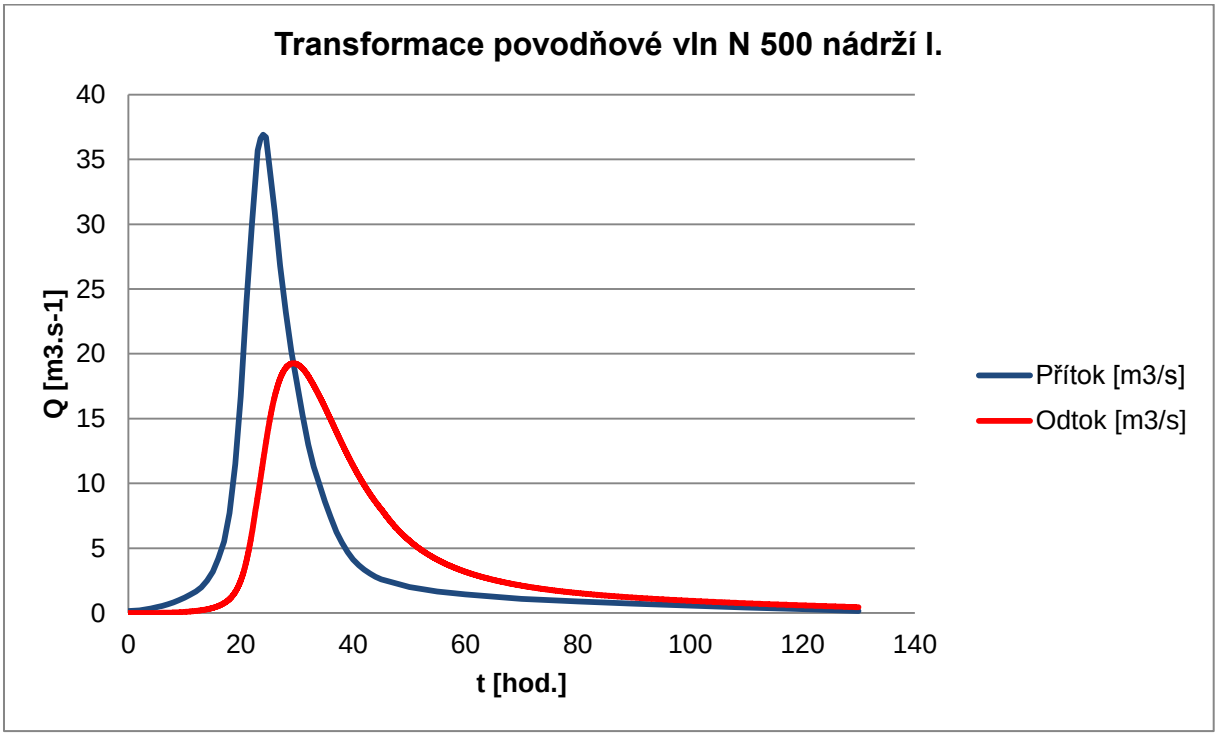
Optimalizace návrhových parametrů nádrže l. na N500

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže l. je uveden v tab. 14. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 23.

Tab. 14 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž l., N-letost 500.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
19.268	521.18	5.3	522.67	6.4

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 500 nádrží l. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo porovnáním maximálního odtoku přepadajícího přes jednotlivá pole. Zatímco maximální odtok přes přeliv číslo 1. je 19.266 $m^3.s^{-1}$, tak přes přeliv číslo 2. pouze 0.002 $m^3.s^{-1}$ a je možné jej považovat za zanedbatelný.



Obr. 23 Transformace povodňové vln N 500 nádrží l.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 500 nádrží l. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 36.90 $m^3.s^{-1}$ na 19.27 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15 Úspěšnost transformace povodňové vlny N500 nádrží l.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	36.90
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	12.27
Transformace [%]	47.78
Maximální hladina [m n. m.]	522.67

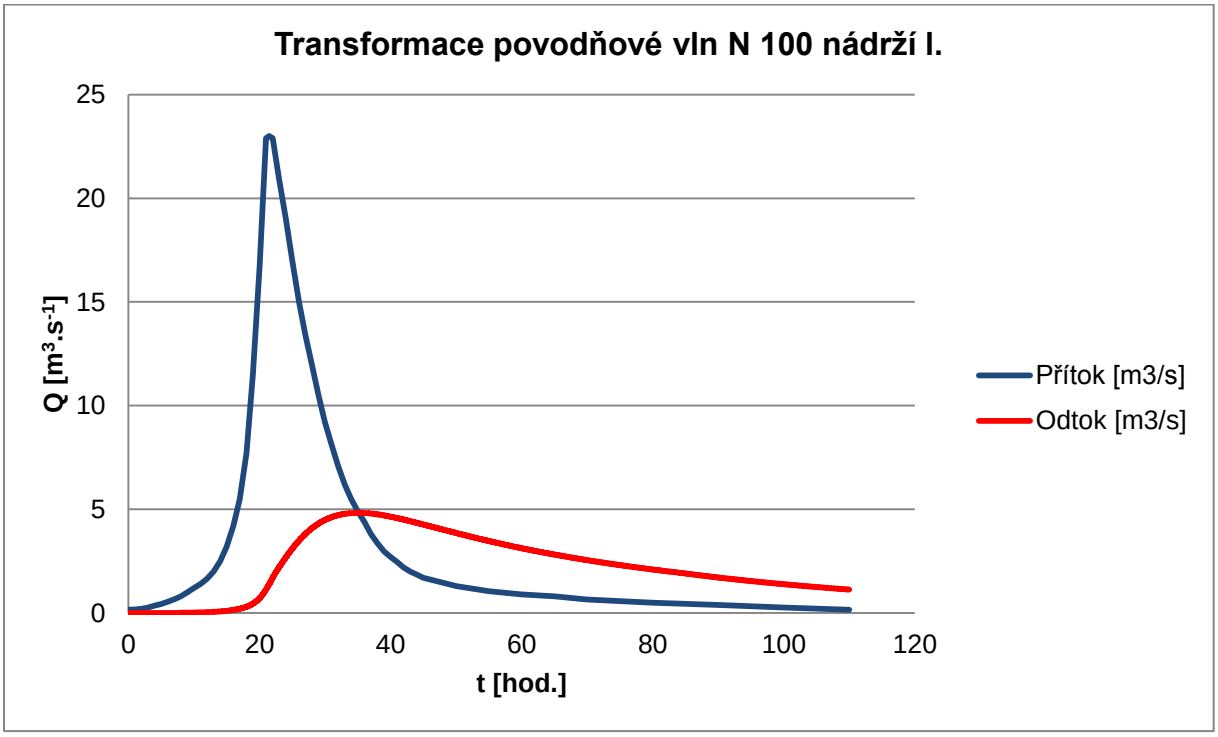
Optimalizace návrhových parametrů nádrže I. na N100

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže I. je uveden v tab. 16. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 24.

Tab. 16 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž I., N-letost 100.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
4.829	521.18	1.3	522.17	0.1

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 100 nádrží I. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo porovnáním maximálního odtoku přepadajícího přes jednotlivá pole. Zatímco maximální odtok přes přeliv číslo 1. je 4.756 $m^3.s^{-1}$, tak přes přeliv číslo 2. pouze 0.07 $m^3.s^{-1}$ a je možné jej považovat za zanedbatelný.



Obr. 24 Transformace povodňové vln N 100 nádrží I.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 100 nádrží I. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 23.00 $m^3.s^{-1}$ na 4.83 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 17.

Tab. 17 Úspěšnost transformace povodňové vlny N100 nádrží I.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	23.00
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	4.83
Transformace [%]	79.00
Maximální hladina [m n. m.]	522.68

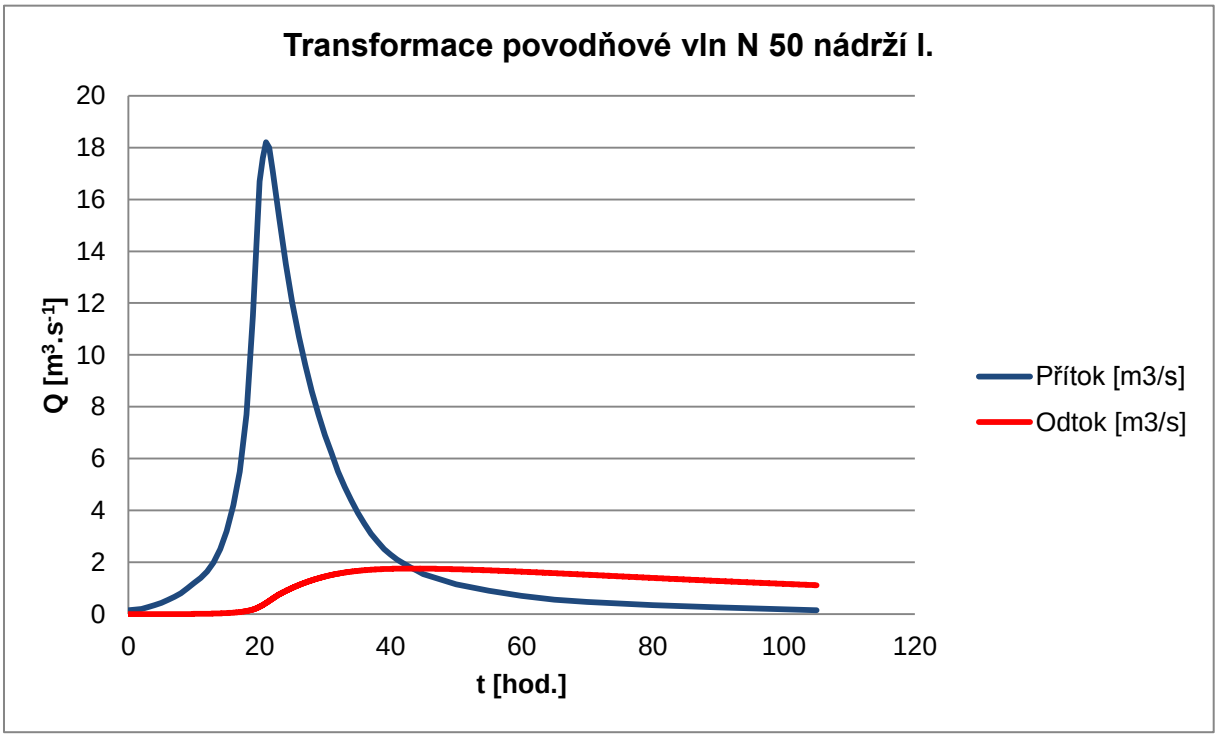
Optimalizace návrhových parametrů nádrže l. na N50

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže l. je uveden v tab. 18. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 25.

Tab. 18 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž l., N-letost 50.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
1.758	521.18	0.5	521.35	0

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 50 nádrží l. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo nulovou hodnotou délky přelivné hrany 2.



Obr. 25 Transformace povodňové vln N 50 nádrží l.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 50 nádrží l. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 18.20 $m^3.s^{-1}$ na 1.76 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 19.

Tab. 19 Úspěšnost transformace povodňové vlny N50 nádrží l.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	18.20
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	1.76
Transformace [%]	90.34
Maximální hladina [m n. m.]	522.64

7.1.2. NÁDRŽ II.

V rámci optimalizace návrhových parametrů víceúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže II. došlo k řadě optimalizačních simulací s cílem nalezení optimálních návrhových parametrů přelivu pro jednotlivé povodňové vlny dané N-letosti. Vstupní nastavení optimalizačního programu je uvedeno v tab. 20.

Tab. 20 Vstupní zadané parametry.

N - letost	10 000	1 000	500	100	50
H počáteční [m n. m.]	521.20	521.20	-	521.20	521.20
H maximální [m n. m.]	522.70	522.70	-	522.70	522.70
Přeliv 1.					
H1 [m n. m.]	521.20	521.20	-	521.20	521.20
m1	0.45	0.45	-	0.45	0.45
min. L1 [m]	20	10	-	7	4
max. L1 [m]	50	33	-	21	19
Přeliv 2.					
min. H2 [m n. m.]	521.20	521.20	-	521.20	521.20
max. H2 [m n. m.]	522.70	522.70	-	522.70	522.70
m2	0.45	0.45	-	0.45	0.45
min. L2 [m]	20	10	-	7	4
max. L2 [m]	50	33	-	21	19

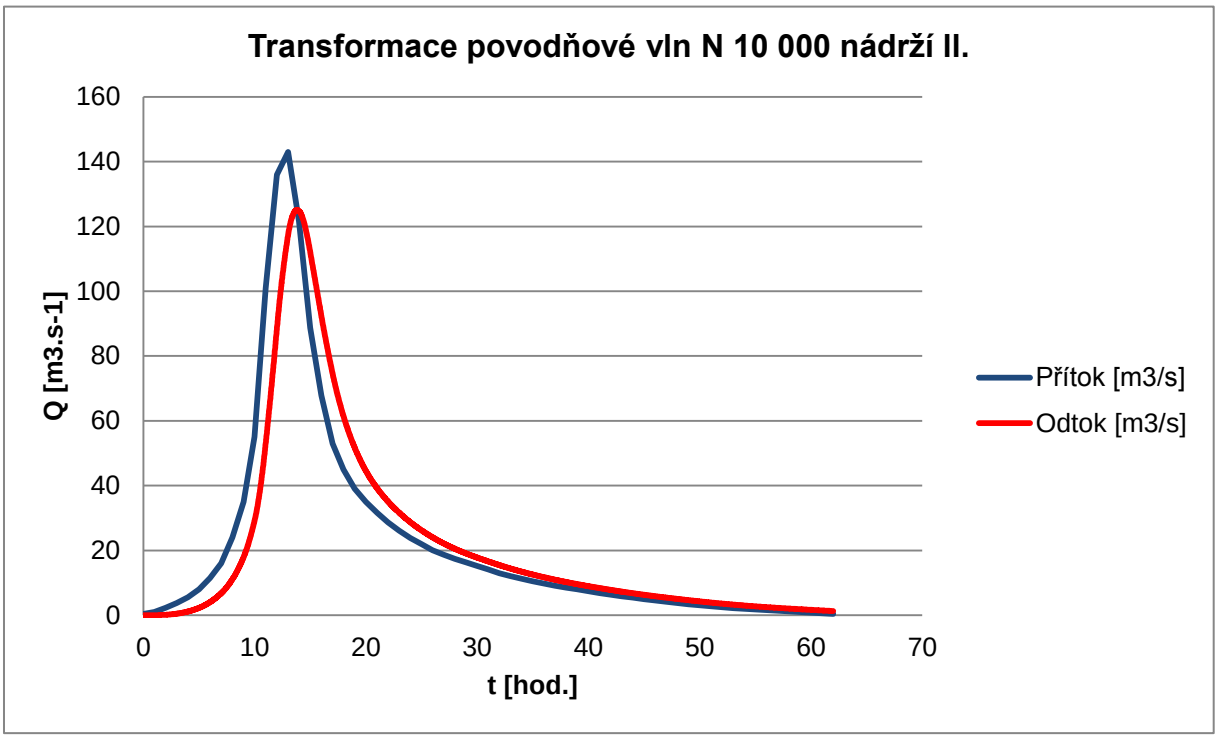
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N10 000

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže II. je uveden v tab. 21. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 26.

Tab. 21 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 10 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
125.076	521.20	34.2	522.70	43.4

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 10 000 nádrží II. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo výškovým umístěním přelivné hrany 2. na hodnotu okrajové podmínky maximální přípustné hladiny. Při tomto výškovém umístění nedochází k přepadu přes 2. přelivnou hranu.



Obr. 26 Transformace povodňové vln N 10 000 nádrží II.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 10 000 nádrží II. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 143.00 $m^3.s^{-1}$ na 125.07 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 22.

Tab. 22 Úspěšnost transformace povodňové vlny N10 000 nádrží II.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	143.00
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	125.07
Transformace [%]	12.53
Maximální hladina [m n. m.]	522.70

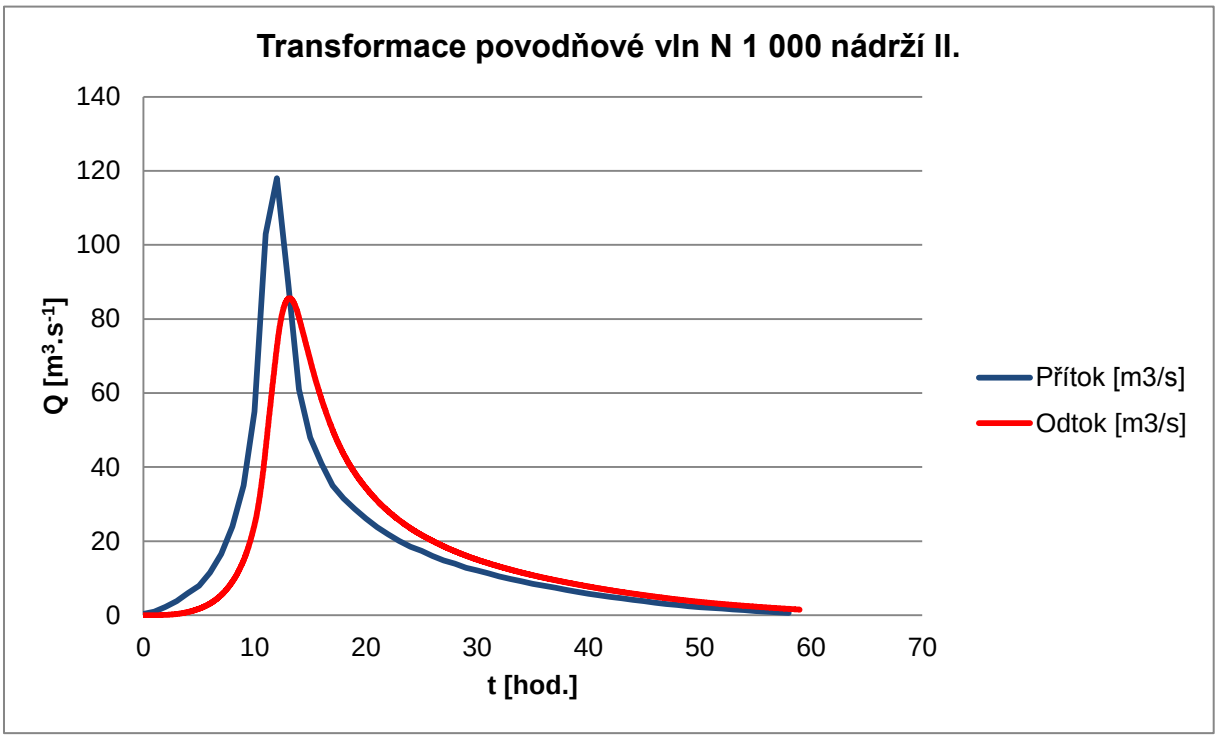
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N1 000

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže II. je uveden v tab. 23. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 27.

Tab. 23 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 1 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
85.609	521.20	23.4	522.70	29.3

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 1 000 nádrží II. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo výškovým umístěním přelivné hrany 2. na hodnotu okrajové podmínky maximální přípustné hladiny. Při tomto výškovém umístění nedochází k přepadu přes 2. přelivnou hranu.



Obr. 27 Transformace povodňové vln N 1 000 nádrží II.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 1 000 nádrží II. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 118.00 $m^3.s^{-1}$ na 85.61 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 24.

Tab. 24 Úspěšnost transformace povodňové vlny N1 000 nádrží II.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	118.00
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	85.61
Transformace [%]	27.45
Maximální hladina [m n. m.]	522.70

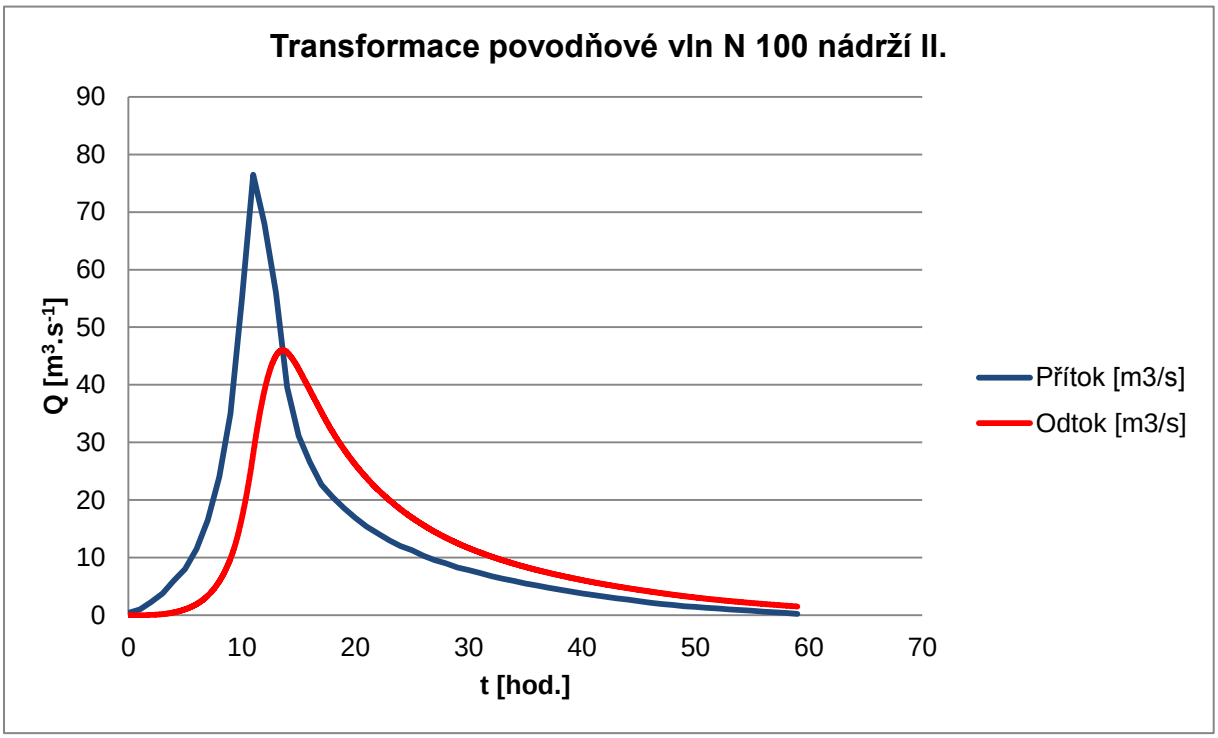
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N100

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže II. je uveden v tab. 25. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 28.

Tab. 25 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 100.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
46.018	521.20	12.6	522.70	7.1

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 100 nádrží II. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo výškovým umístěním přelivné hrany 2. na hodnotu okrajové podmínky maximální přípustné hladiny. Při tomto výškovém umístění nedochází k přepadu přes 2. přelivnou hranu.



Obr. 28 Transformace povodňové vln N 100 nádrží II.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 100 nádrží II. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 76.50 $m^3.s^{-1}$ na 46.02 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 26.

Tab. 26 Úspěšnost transformace povodňové vlny N100 nádrží II.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	76.50
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	46.02
Transformace [%]	39.85
Maximální hladina [m n. m.]	522.70

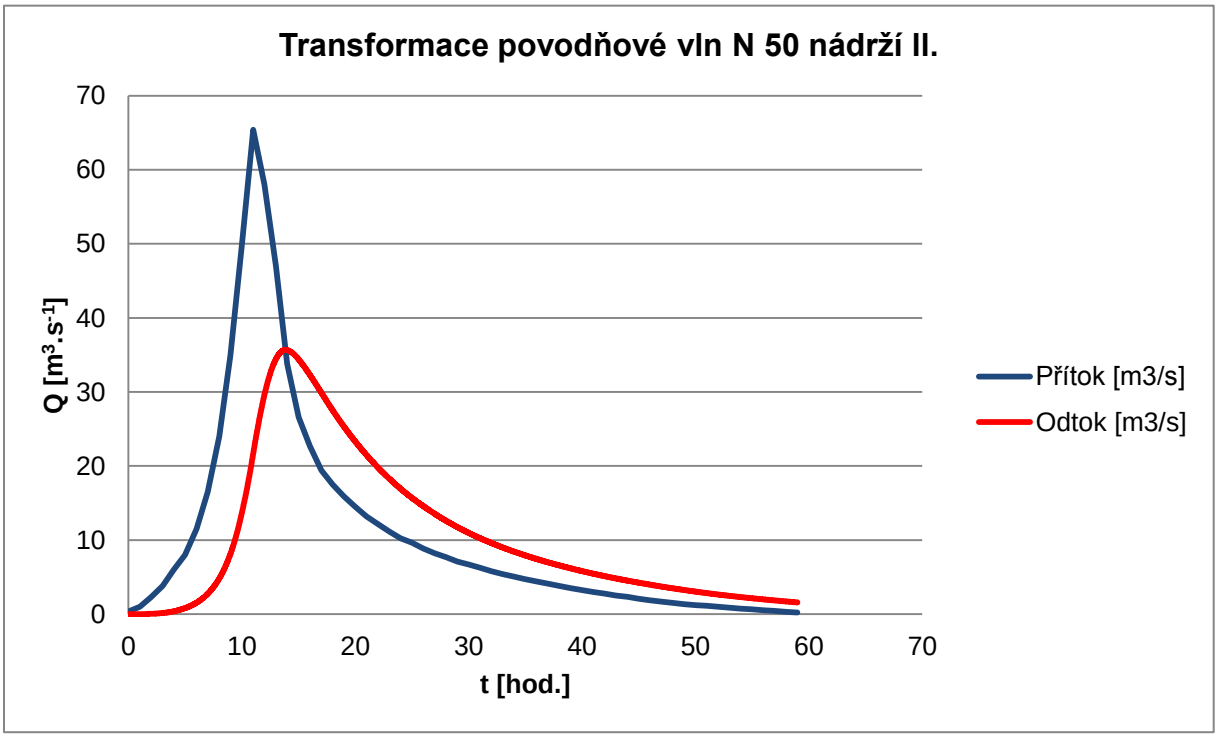
Optimalizace návrhových parametrů nádrže II. na N50

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže II. je uveden v tab. 27. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 29.

Tab. 27 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 50.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
36.689	521.20	9.8	522.70	0

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 50 nádrží II. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo nulovou délkou 2. přelivné hrany.



Obr. 29 Transformace povodňové vln N 50 nádrží II.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 50 nádrží II. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 65.40 $m^3.s^{-1}$ na 35.69 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 28.

Tab. 28 Úspěšnost transformace povodňové vlny N50 nádrží II.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	65.40
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	35.69
Transformace [%]	45.43
Maximální hladina [m n. m.]	522.70

7.1.3. NÁDRŽ III.

V rámci optimalizace návrhových parametrů víceúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže III. došlo k řadě optimalizačních simulací s cílem nalezení optimálních návrhových parametrů přelivu pro jednotlivé povodňové vlny dané N-letosti. Vstupní nastavení optimalizačního programu je uvedeno v tab. 29.

Tab. 29 Vstupní zadané parametry.

N - letost	10 000	1 000	500	100	50
H počáteční [m n. m.]	476.64	476.64	476.64	476.64	476.64
H maximální [m n. m.]	478.64	478.64	478.64	478.64	478.64
Přeliv 1.					
H1 [m n. m.]	476.64	476.64	476.64	476.64	476.64
m1	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
min. L1 [m]	30	20	15	7	5
max. L1 [m]	52	30	25	16	13
Přeliv 2.					
min. H2 [m n. m.]	476.64	476.64	476.64	476.64	476.64
max. H2 [m n. m.]	478.64	478.64	478.64	478.64	478.64
m2	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
min. L2 [m]	10	20	15	7	0
max. L2 [m]	52	30	25	16	13

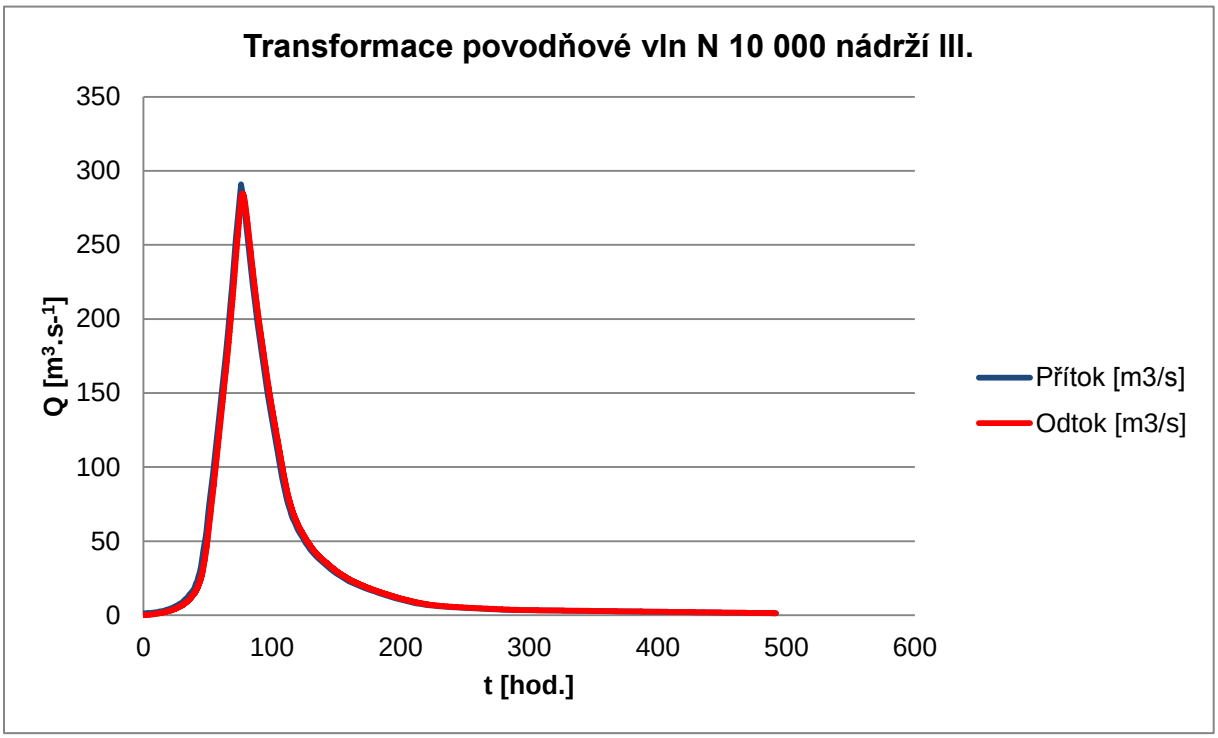
Optimalizace návrhových parametrů nádrže lll. na N10 000

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže lll. je uveden v tab. 30. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 30.

Tab. 30 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž lll., N-letost 10 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
284.648	476.64	44.7	476.69	5.8

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 10 000 nádrží lll. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo minimálním výškovým rozdílem mezi jednotlivými úrovněmi přelivu, kdy lze přelivnou hranu 2. považovat za prodloužení přelivné hrany 1.



Obr. 30 Transformace povodňové vln N 10 000 nádrží lll.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 10 000 nádrží lll. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 291.00 $m^3.s^{-1}$ na 284.65 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 31.

Tab. 31 Úspěšnost transformace povodňové vlny N10 000 nádrží ll.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	291.00
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	284.65
Transformace [%]	2.18
Maximální hladina [m n. m.]	478.64

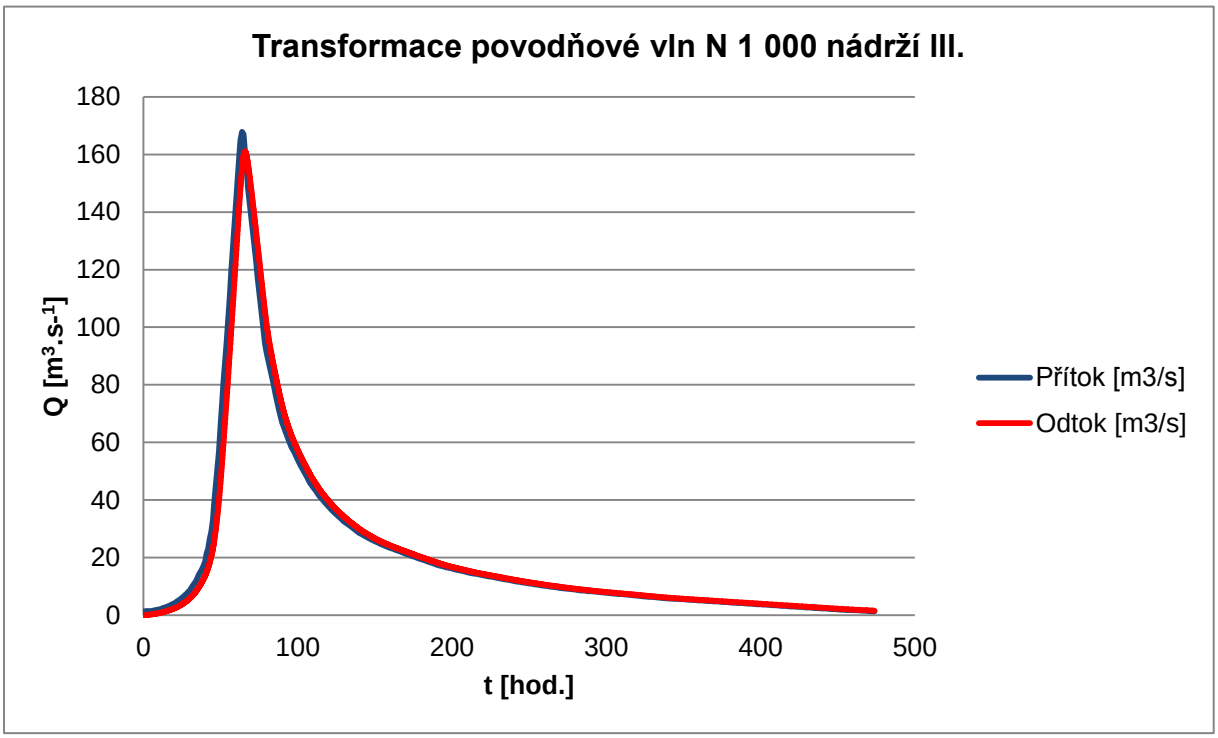
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N1 000

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže III. je uveden v tab. 32. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 31.

Tab. 32 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 1 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
161.074	476.64	28.7	478.64	12.8

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 1 000 nádrží III. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo výškovým umístěním 2. přelivné hrany, která je na úrovni maximální bezpečné hladiny, a tudíž nedochází k přepadu přes tuto úroveň.



Obr. 31 Transformace povodňové vln N 1 000 nádrží III.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 1 000 nádrží III. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 167.80 $m^3.s^{-1}$ na 161.07 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 33.

Tab. 33 Úspěšnost transformace povodňové vlny N1 000 nádrží II.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	167.80
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	161.07
Transformace [%]	4.00
Maximální hladina [m n. m.]	478.64

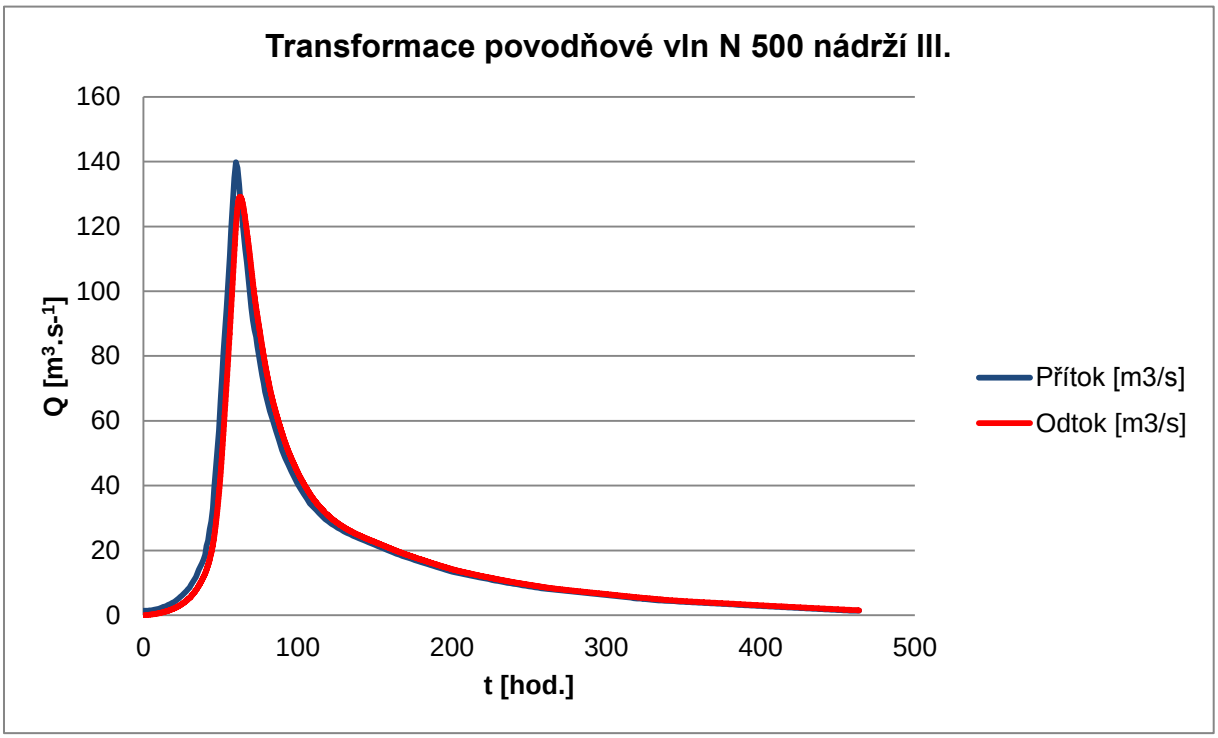
Optimalizace návrhových parametrů nádrže lll. na N500

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže lll. je uveden v tab. 34. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 32.

Tab. 34 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž lll., N-letost 500.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
129.19	476.64	22.8	478.64	5

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 500 nádrží lll. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo výškovým umístěním 2. přelivné hrany, která je na úrovni maximální bezpečné hladiny, a tudíž nedochází k přepadu přes tuto úroveň.



Obr. 32 Transformace povodňové vln N 500 nádrží lll.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 500 nádrží lll. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 139.80 $m^3.s^{-1}$ na 129.19 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 35.

Tab. 35 Úspěšnost transformace povodňové vlny N500 nádrží ll.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	139.80
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	129.19
Transformace [%]	7.59
Maximální hladina [m n. m.]	478.64

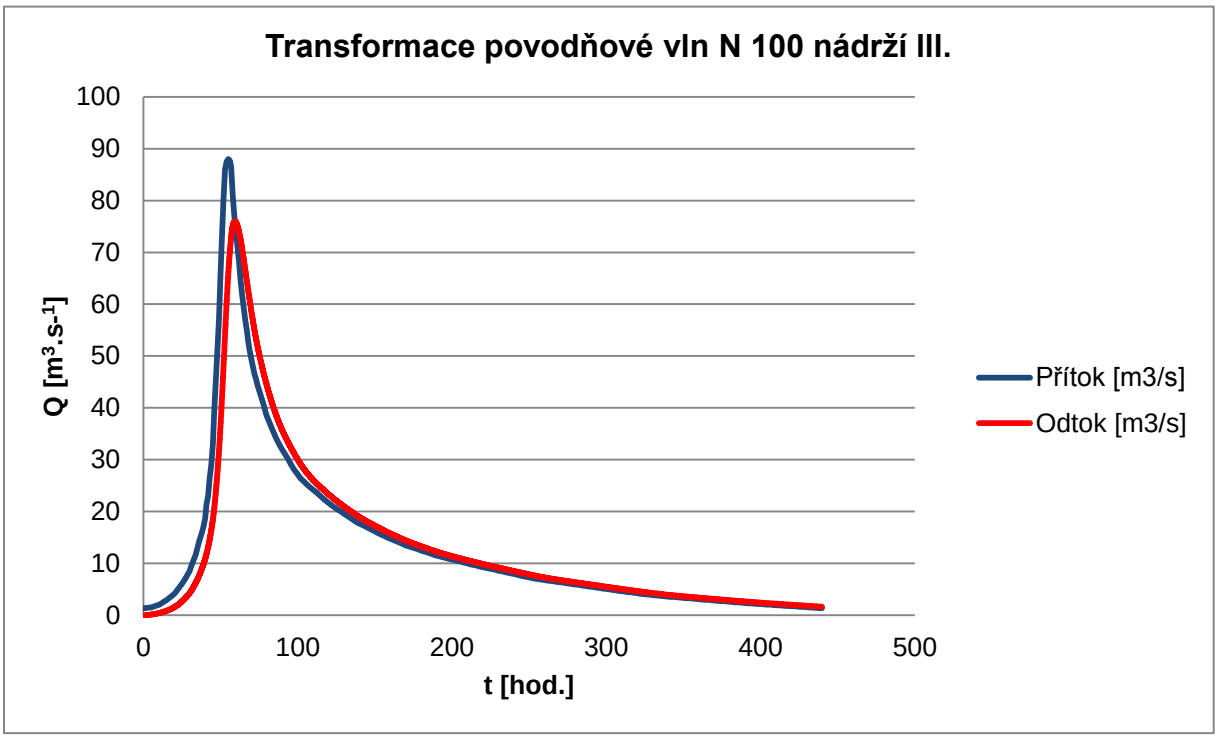
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N100

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže III. je uveden v tab. 36. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 33.

Tab. 36 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 100.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
75.984	476.64	13.4	478.64	13.4

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 100 nádrží III. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo výškovým umístěním 2. přelivné hrany, která je na úrovni maximální bezpečné hladiny, a tudíž nedochází k přepadu přes tuto úroveň.



Obr. 33 Transformace povodňové vln N 100 nádrží III.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 100 nádrží III. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 88.00 $m^3.s^{-1}$ na 75.98 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 37.

Tab. 37 Úspěšnost transformace povodňové vlny N100 nádrží II.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	88.00
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	75.98
Transformace [%]	13.65
Maximální hladina [m n. m.]	478.64

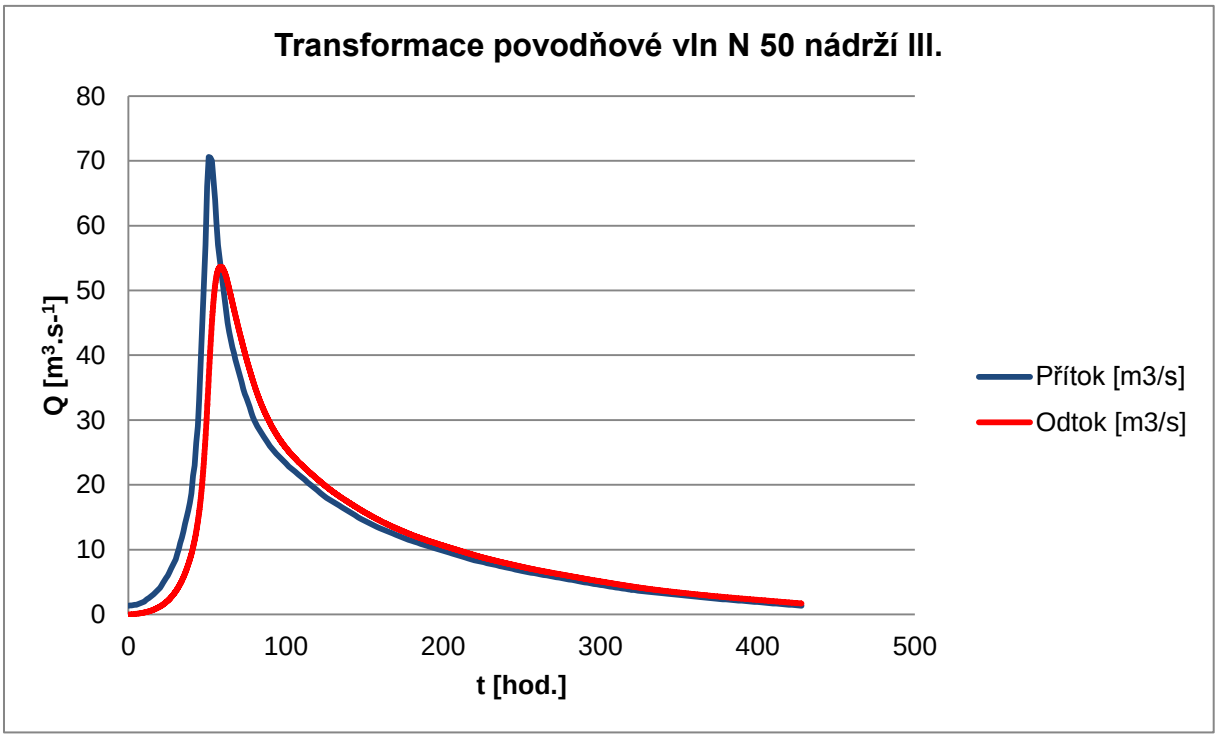
Optimalizace návrhových parametrů nádrže III. na N50

Výstup optimalizace návrhových parametrů nádrže III. je uveden v tab. 38. Simulace transformace povodňové vlny nádrží pro optimalizované parametry je uvedena na obr. 34.

Tab. 38 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 50.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
53.657	476.64	9.5	478.59	1

Z výstupních hodnot vyplývá, že pro transformaci povodňové vlny N-letosti 50 nádrží III. nemá druhá přelivná úroveň význam. Toto tvrzení je podloženo porovnáním maximálního odtoku přepadajícího přes jednotlivá pole. Zatímco maximální odtok přes přeliv číslo 1. je 53.634 $m^3.s^{-1}$, tak přes přeliv číslo 2. pouze 0.023 $m^3.s^{-1}$ a je tedy zanedbatelný.



Obr. 34 Transformace povodňové vln N 50 nádrží III.

V rámci transformace povodňové vlny N-letosti 50 nádrží III. došlo ke snížení kulminačního průtoku povodně ze 70.6 $m^3.s^{-1}$ na 53.66 $m^3.s^{-1}$. Údaje o úspěšnosti transformace povodňové vlny jsou uvedeny v tab. 39.

Tab. 39 Úspěšnost transformace povodňové vlny N50 nádrží II.

Přítok [$m^3.s^{-1}$]	70.60
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	53.66
Transformace [%]	24.00
Maximální hladina [m n. m.]	478.64

7.2. BEZPEČNOSTNÍ PŘELIVY O JEDNOM POLI

V této kapitole byl aplikován trend jednoúrovňového přelivu pozorovaný v předcházející kapitole. Tento trend dokazuje zanedbatelnost druhé výškové úrovně bezpečnostního přelivu pro optimální transformaci povodňové vlny dané N-letosti nádrží. Za použití tohoto poznatku byly navrženy jednoúrovňové bezpečnostní přelivy pro jednotlivé nádrže. Bezpečnostní přelivy byly navrženy s ohledem na optimální převedení povodňových vln s N-letostí 10 000. Návrhové parametry těchto přelivů byly převzaty z předešlých optimalizačních simulací transformace povodňové vlny nádrží. Pro takto navržené bezpečnostní přelivy byly provedeny simulace transformace povodňové vlny nádrží s jinou, než pro návrh použitou N-letostí.

7.2.1. NÁDRŽ I.

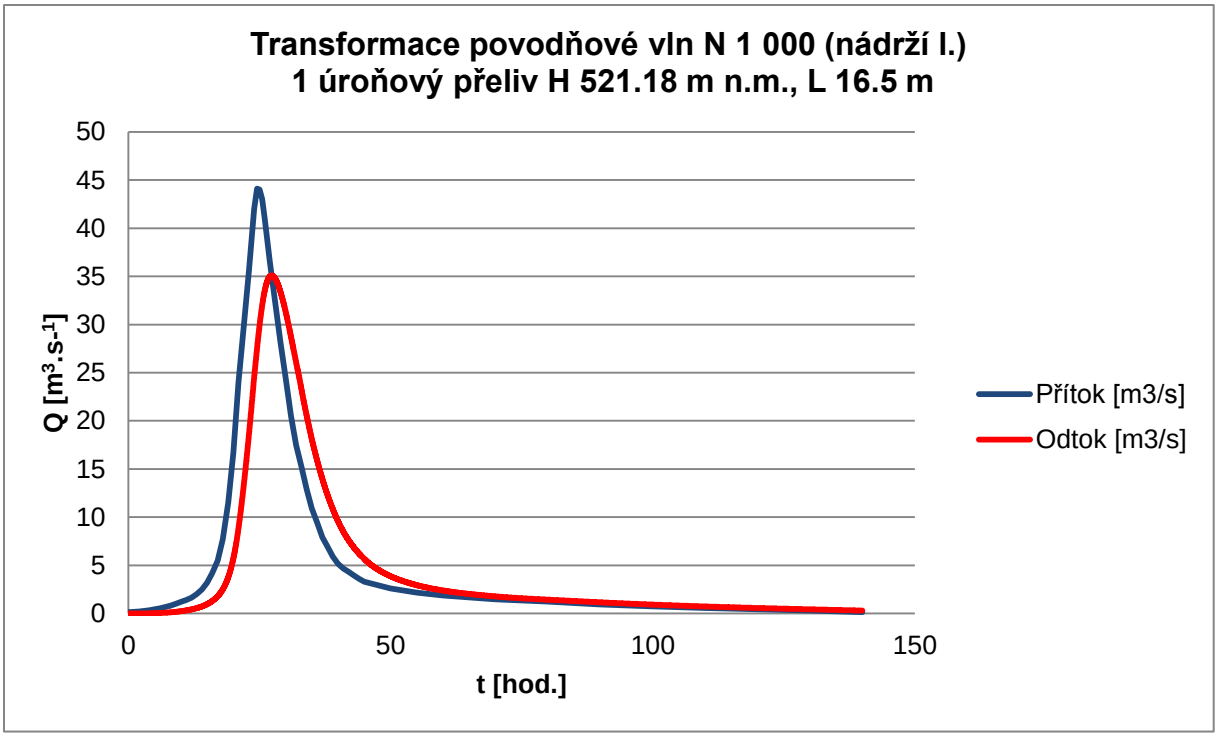
Návrhové parametry bezpečnostního přelivu nádrže I. jsou výškové umístění přelivné hrany *H* a délka přelivné hrany *L*. Hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tab. 40. Pro takto navržený bezpečnostní objekt nádrže I. byly provedeny simulace transformace povodňových vln. Výsledky proběhlých simulací jsou uvedeny v tab. 41 a průběhy jednotlivých simulací na obr. 35 až 38.

Tab. 40 Návrhové parametry jednoúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže I.

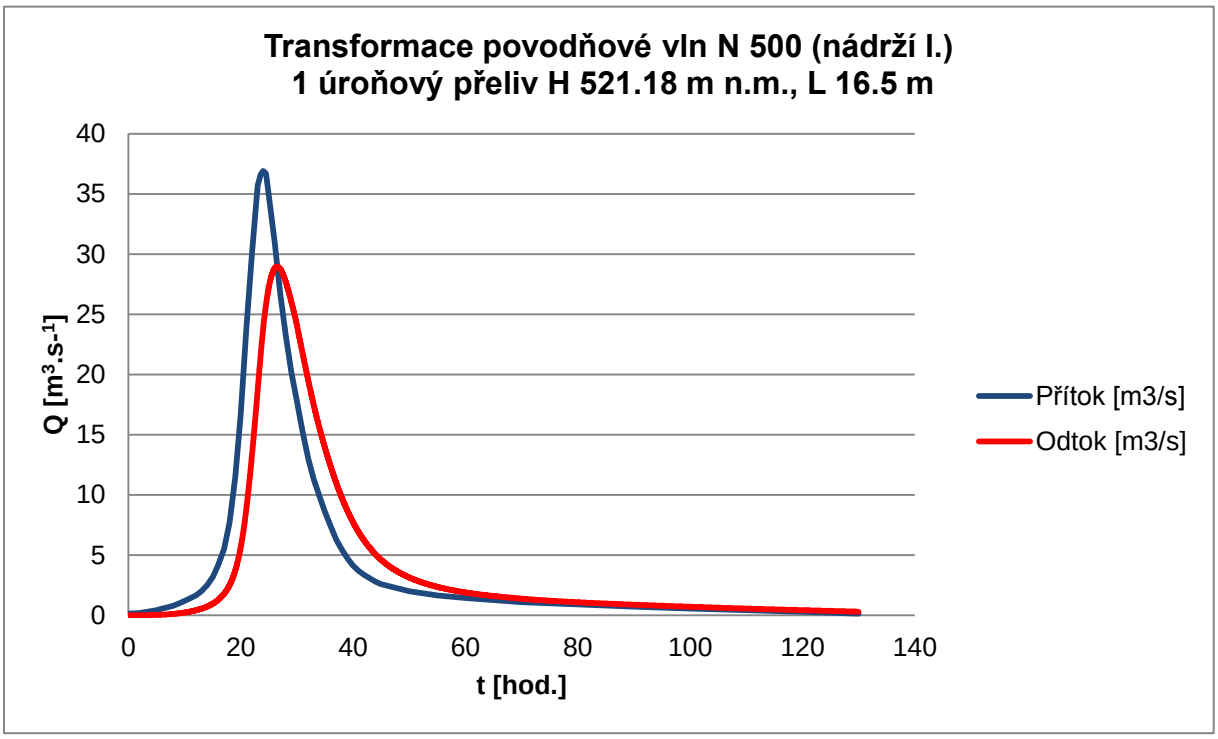
N - letost	10 000
H počáteční [m n. m.]	521.18
H maximální [m n. m.]	522.68
H1 [m n. m.]	521.18
m1	0.45
L1 [m]	16.5

Tab. 41 Výsledky transformací povodňových vln jednoúrovňovým přelivem na nádrži I.

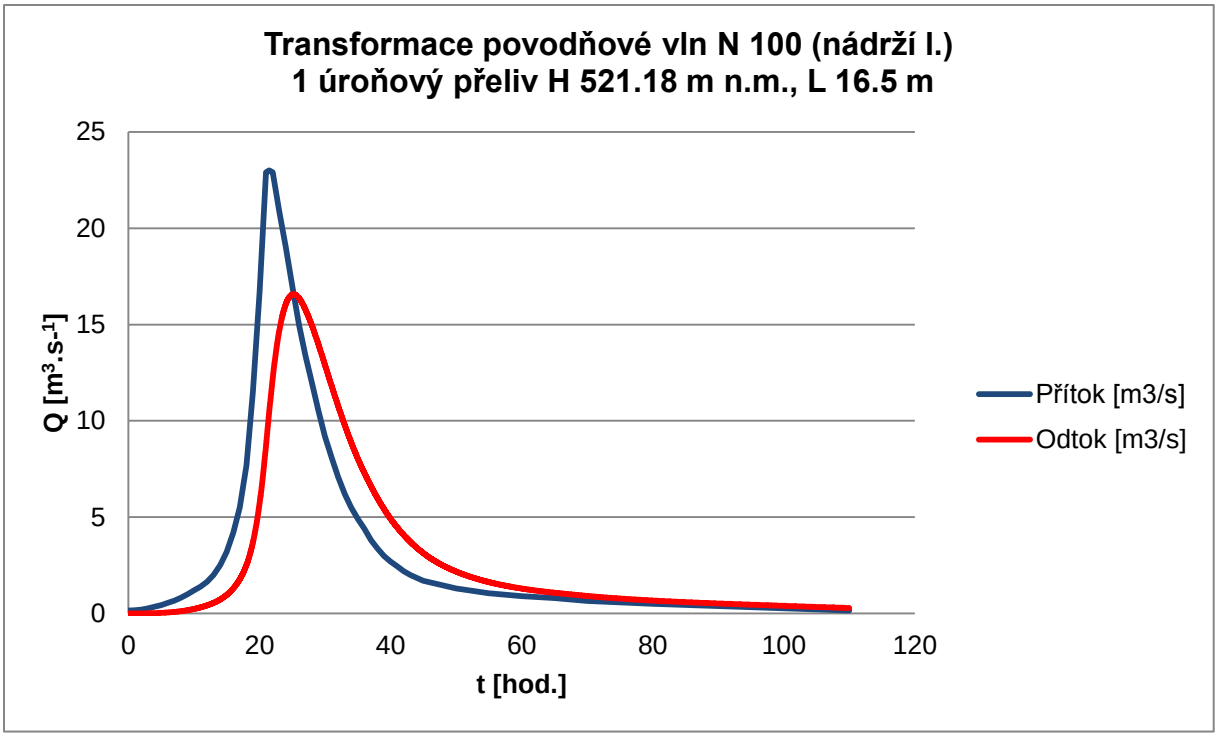
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Přítok [$m^3.s^{-1}$]	75.00	44.10	36.90	23.00	18.20
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	60.60	35.09	28.96	16.57	12.55
Transformace [%]	19.21	20.44	21.51	27.94	31.06
Maximální hladina [m n. m.]	522.68	522.22	522.10	521.81	521.71



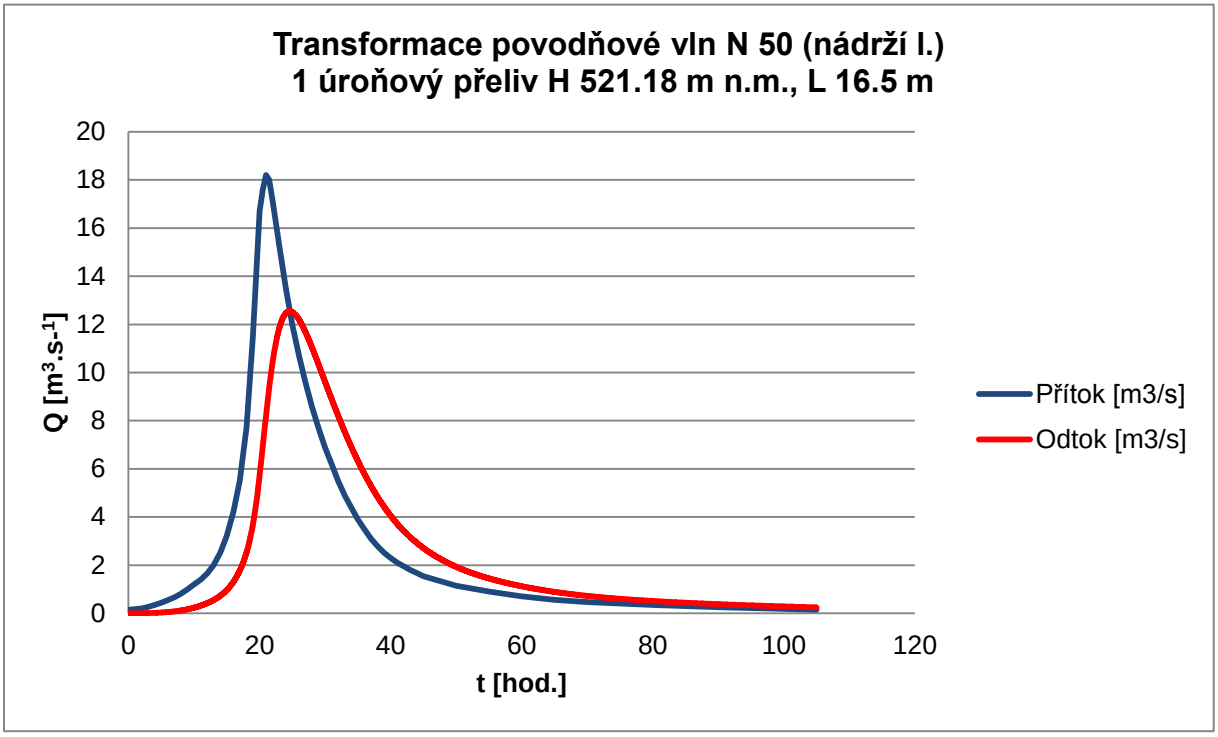
Obr. 35 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží I.)



Obr. 36 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)



Obr. 37 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží I.)



Obr. 38 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží I.)

7.2.2. NÁDRŽ II.

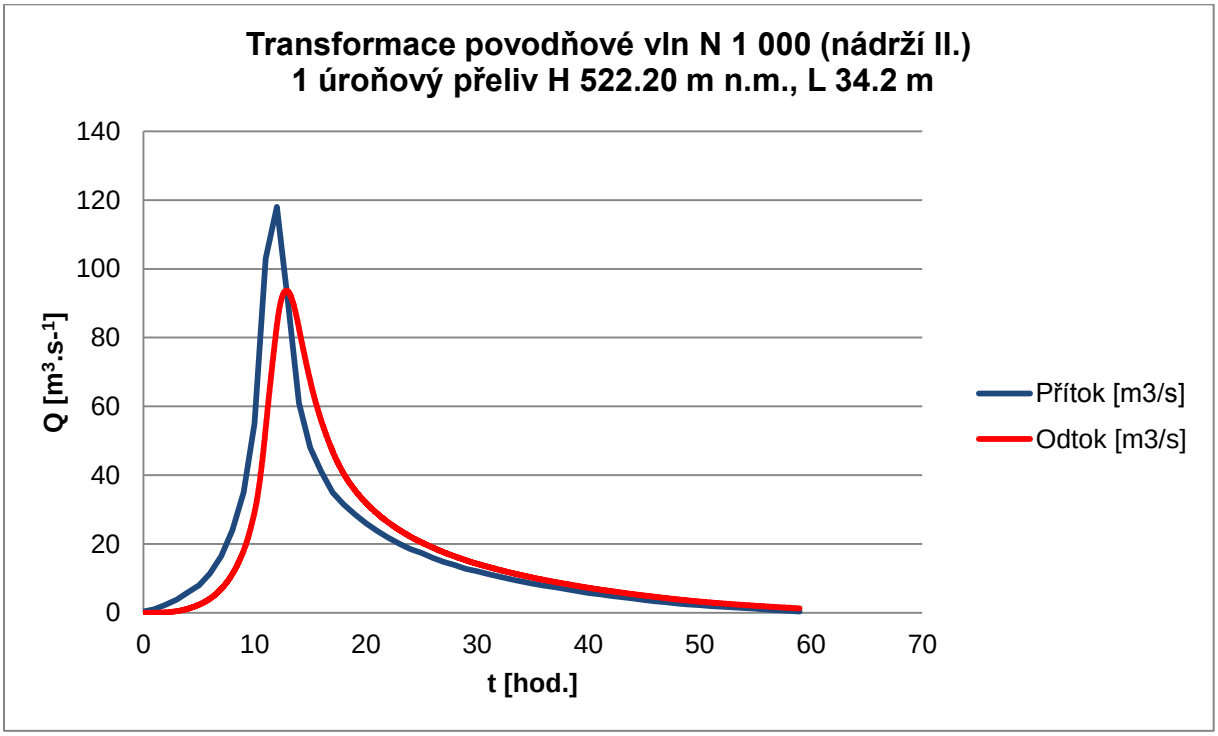
Návrhové parametry bezpečnostního přelivu nádrže II. jsou výškové umístění přelivné hrany *H* a délka přelivné hrany *L*. Hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tab. 42. Pro takto navržený bezpečnostní objekt nádrže II. byly provedeny simulace transformace povodňových vln. Výsledky proběhlých simulací jsou uvedeny v tab. 43 a průběhy jednotlivých simulací na obr. 39 až 41.

Tab. 42 Návrhové parametry jednoúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže II.

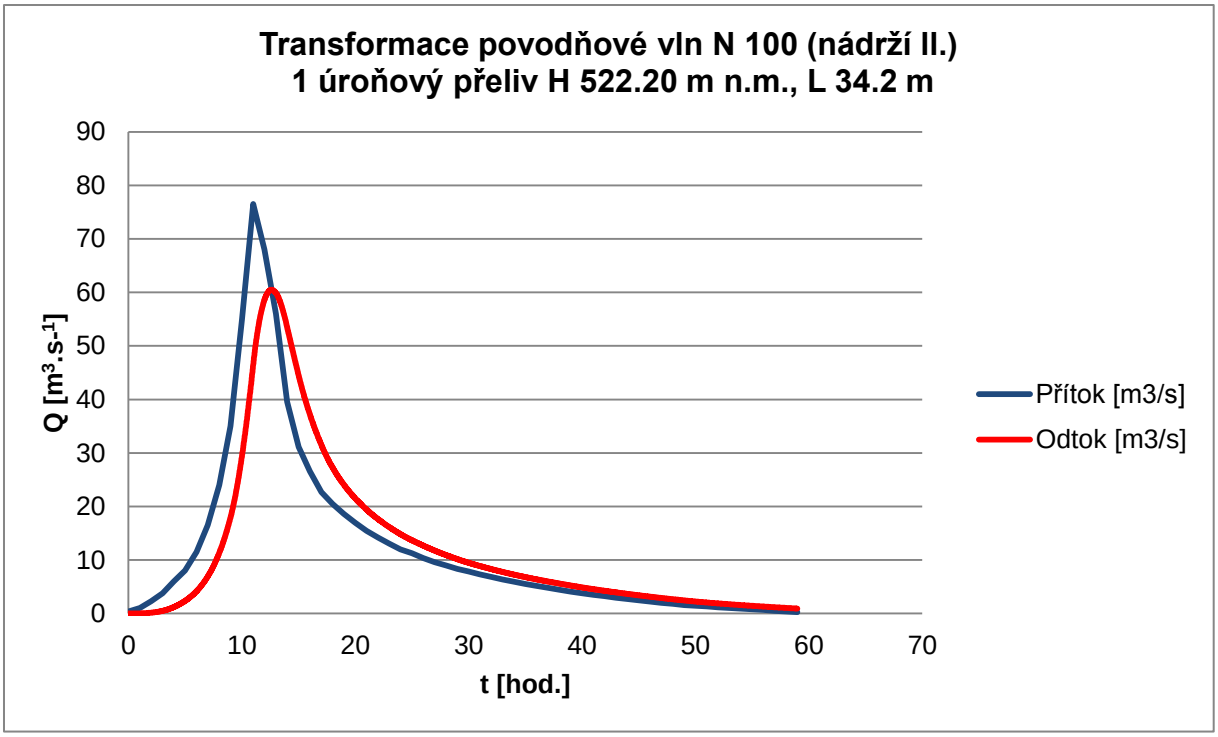
N - letost	10 000
H počáteční [m n. m.]	521.20
H maximální [m n. m.]	522.70
H1 [m n. m.]	521.20
m1	0.45
L1 [m]	34.2

Tab. 43 Výsledky transformací povodňových vln jednoúrovňovým přelivem na nádrži II.

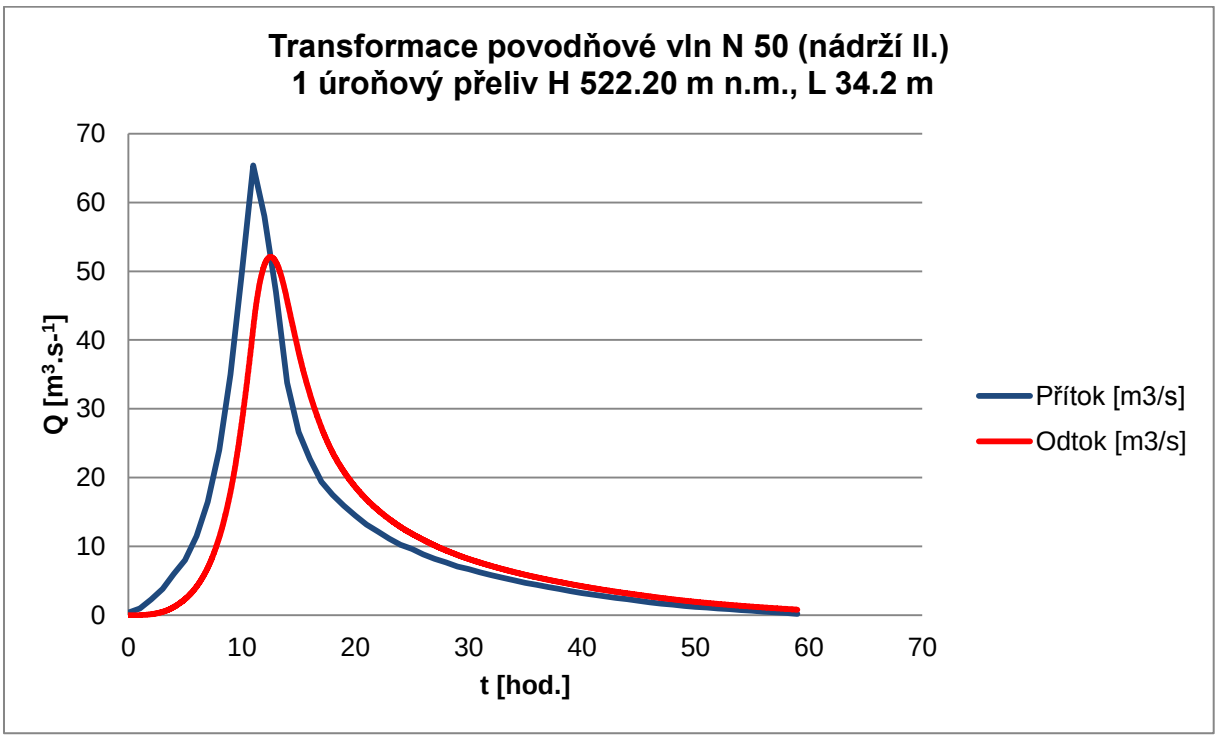
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Přítok [$m^3.s^{-1}$]	143.00	118.00	-	76.50	65.4
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	125.08	93.65	-	60.48	52.08
Transformace [%]	12.53	20.63	-	20.95	20.37
Maximální hladina [m n. m.]	522.70	522.44	-	522.12	522.04



Obr. 39 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží II.)



Obr. 40 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží II.)



Obr. 41 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží II.)

7.2.3. NÁDRŽ III.

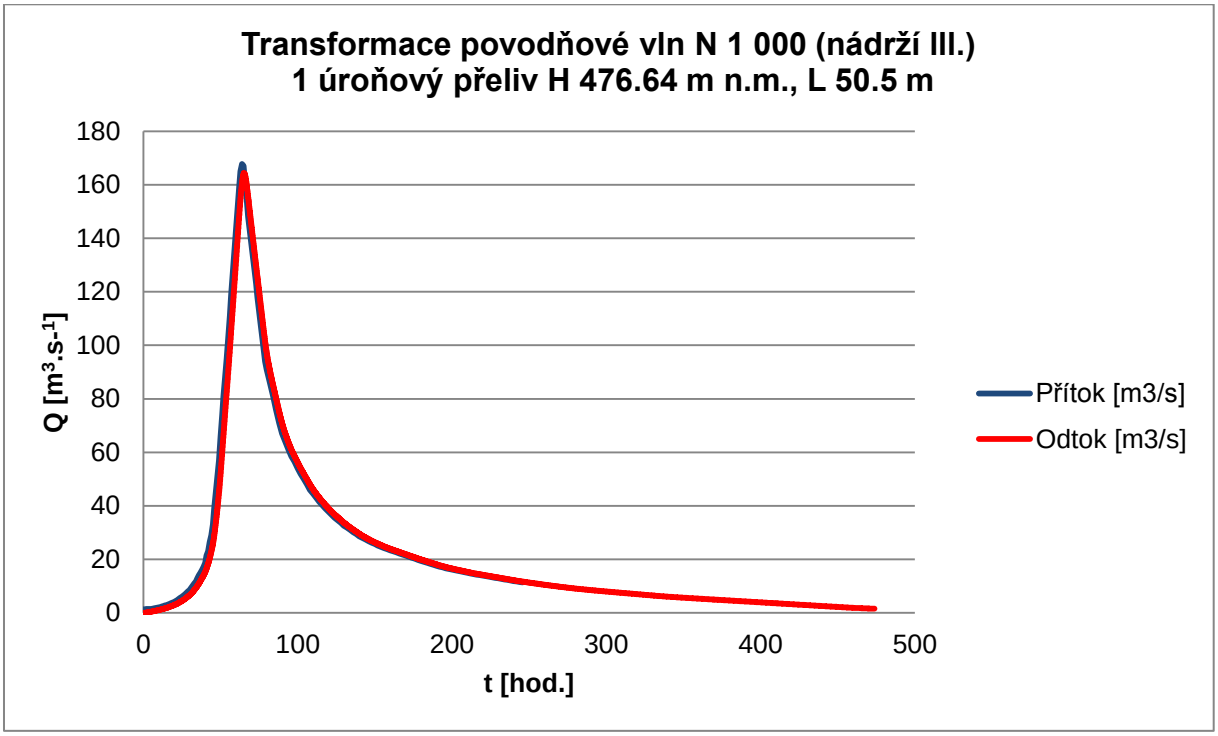
Návrhové parametry bezpečnostního přelivu nádrže III. jsou výškové umístění přelivné hrany *H* a délka přelivné hrany *L*. Hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tab. 44. Pro takto navržený bezpečnostní objekt nádrže III. byly provedeny simulace transformace povodňových vln. Výsledky proběhlých simulací jsou uvedeny v tab. 45 a průběhy jednotlivých simulací na obr. 42 až 45.

Tab. 44 Návrhové parametry jednoúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže III.

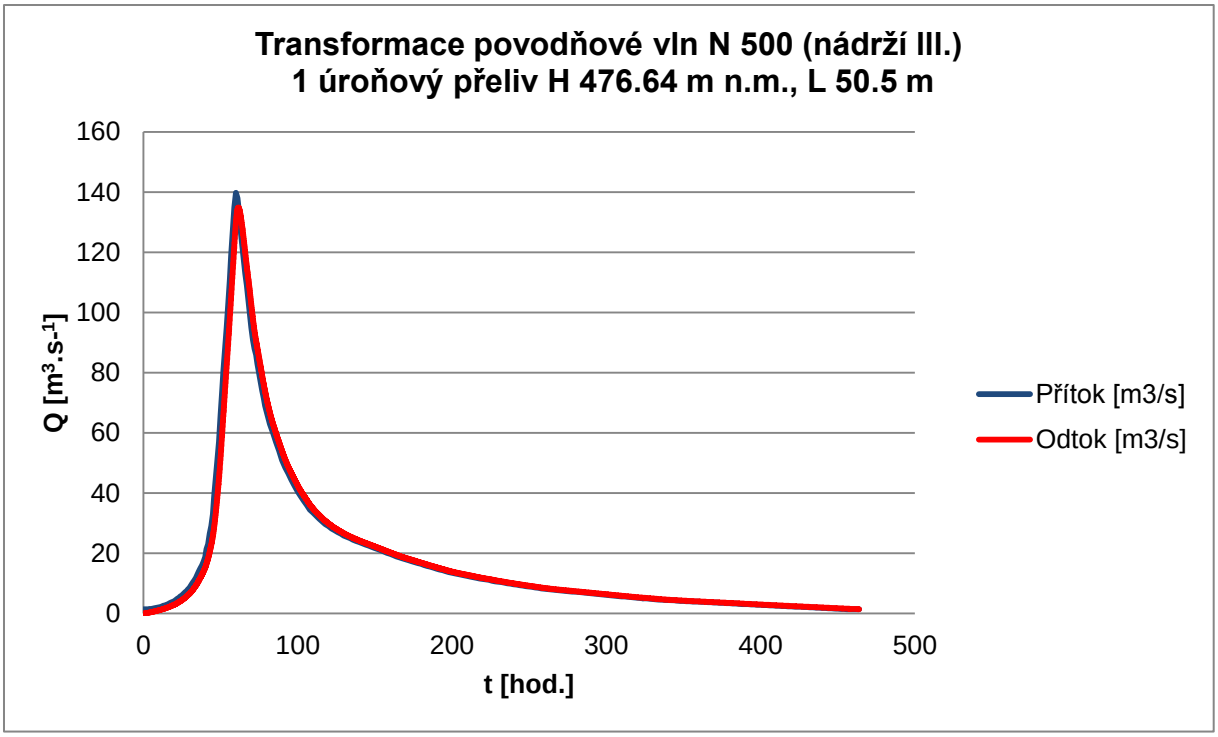
N - letost	10 000
H počáteční [m n. m.]	476.64
H maximální [m n. m.]	478.64
H1 [m n. m.]	476.64
m1	0.45
L1 [m]	50.5

Tab. 45 Výsledky transformací povodňových vln jednoúrovňovým přelivem na nádrži III.

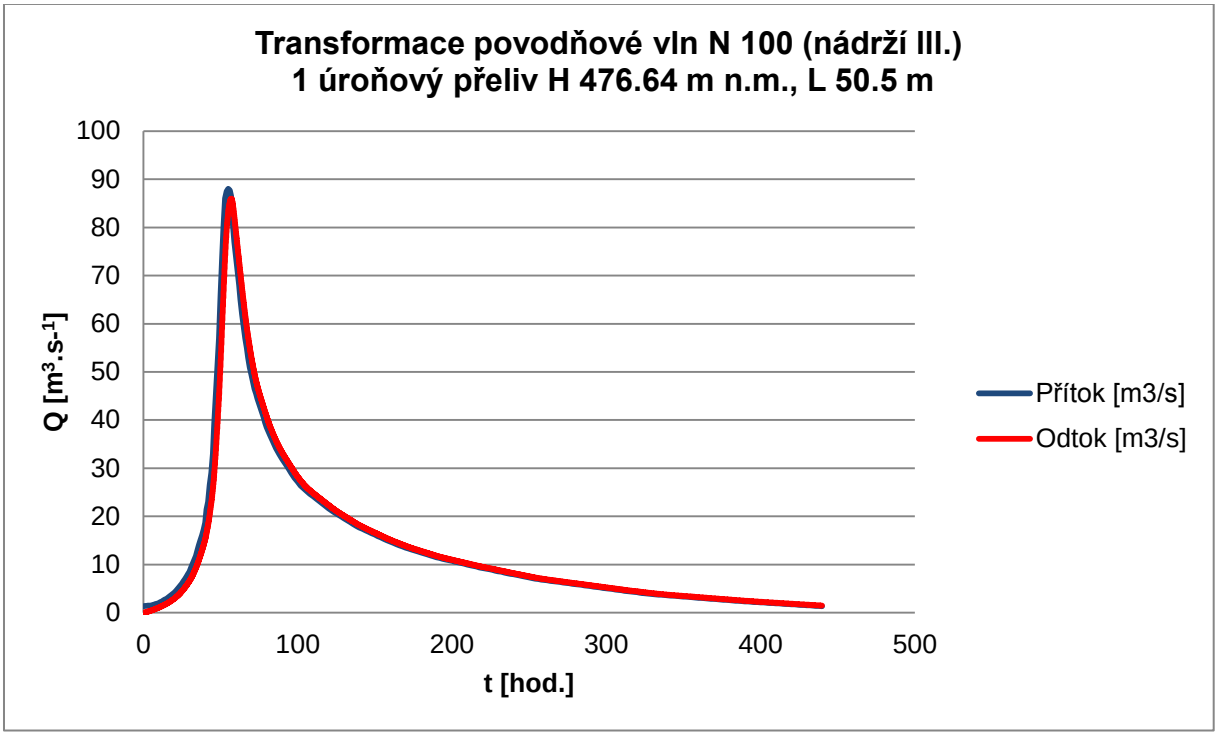
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Přítok [$m^3.s^{-1}$]	291.00	167.80	139.80	88.00	70.6
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	284.65	164.42	134.88	85.92	67.08
Transformace [%]	2.18	2.01	3.52	2.29	4.99
Maximální hladina [m n. m.]	478.64	478.03	477.86	477.54	477.40



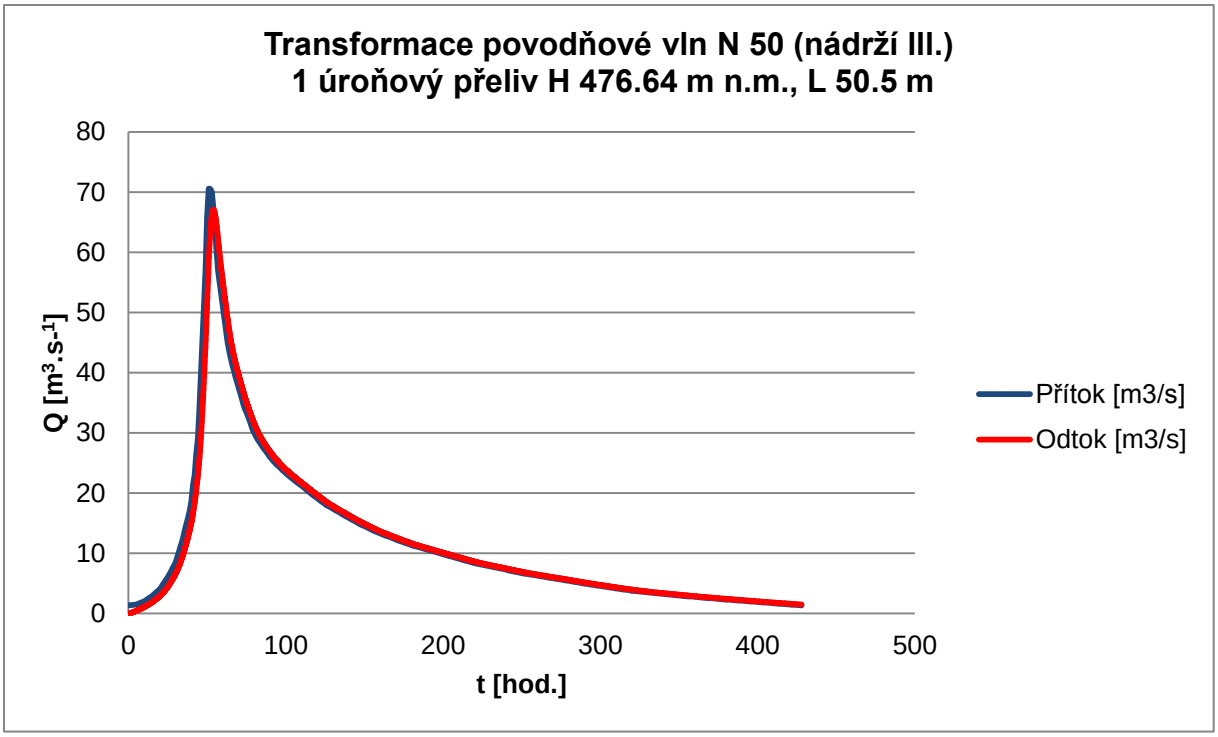
Obr. 42 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží III.)



Obr. 43 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží III.)



Obr. 44 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží III.)



Obr. 45 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží III.)

7.3. BEZPEČNOSTNÍ PŘELIVY SE DVĚMA POLI

V této kapitole jsou uvedené optimalizační simulace návrhových parametrů víceúrovňových bezpečnostních přelivů. Tyto optimalizační simulace byly zaměřeny pouze na optimalizaci délky přelivné hrany druhé výškové úrovně přelivu. Při tomto případu bylo vycházeno z předpokladu, že první úroveň bezpečnostního přelivu slouží k transformaci povodňové vlny na neškodný odtok a druhá výšková úroveň slouží až při překročení kapacity první úrovně přelivu. V rámci návrhu první úrovně bezpečnostního přelivu byly z hodnoty neškodného otoku získány návrhové parametry první úrovně bezpečnostního přelivu. Pro tyto parametry byly poté provedeny optimalizační simulace, jejímž cílem bylo nalézt optimální návrhové parametry druhé úrovně bezpečnostního přelivu pro převedení povodňové vlny se zvolenou N-letostí (N10 000). Poté byly pro takto nalezené parametry provedeny simulace transformace povodňové vlny nádrží o zvolených N-letostech.

7.3.1. NÁDRŽ I.

První úroveň bezpečnostního přelivu na nádrži I. byla navržena na převedení neškodného průtoku, který byl pro tuto nádrž zvolen 23.00 $m^3.s^{-1}$. Návrh byl proveden s předpokladem známé přepadové výšky o hodnotě 1.0 m. Druhá výšková úroveň bezpečnostního přelivu byla posunuta o hodnotu zmíněné přepadové výšky nad úroveň první. Výsledkem optimalizační simulace pro zadanou N-letost byla hodnota délky přelivné hrany druhé úrovně bezpečnostního přelivu. Zadané vstupní parametry jsou uvedeny v tab. 46. Výsledek optimalizační simulace je uveden v tab. 47.

Tab. 46 Návrhové parametry dvouúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže I.

N - letost	10 000
H počáteční [m n. m.]	521.18
H maximální [m n. m.]	522.68
H1 [m n. m.]	521.18
m1	0.45
L1 [m]	11.5
H2 [m n. m.]	521.18
m2	0.45
min. L2 [m]	5
max. L2 [m]	50

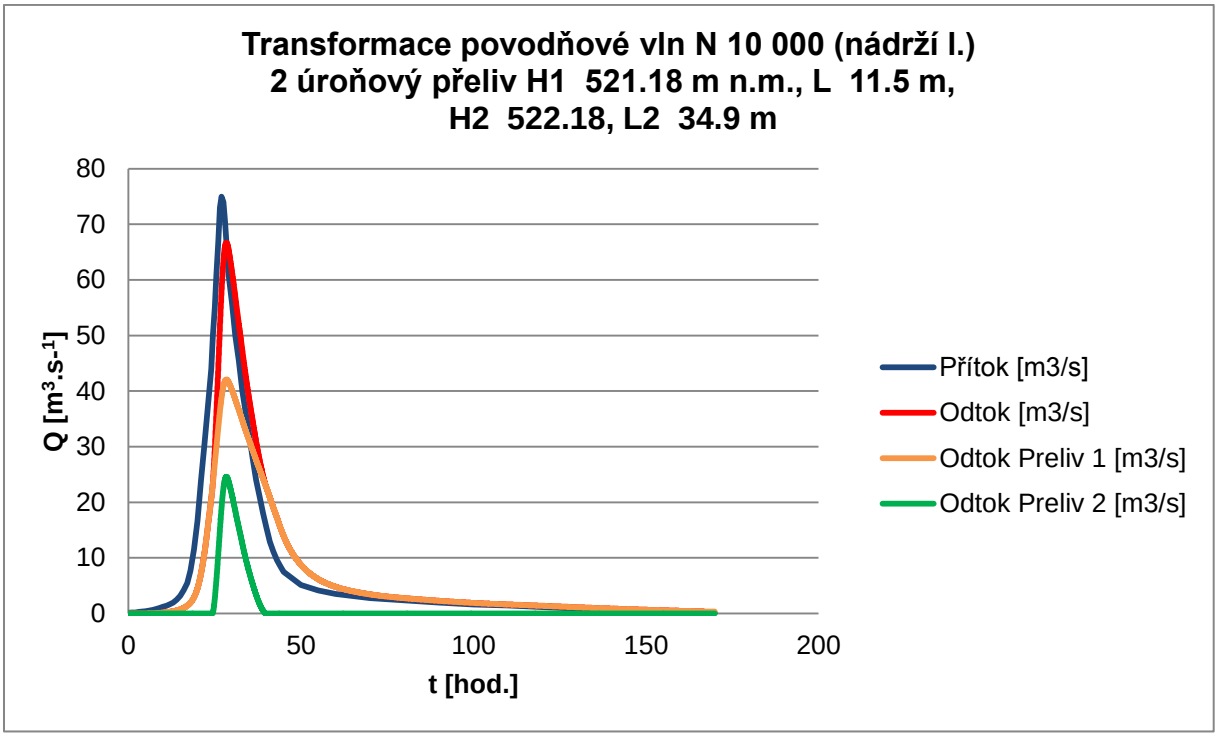
Tab. 47 Výstupní optimalizované parametry pro víceúrovňový přeliv nádrže I., N-letost 10 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2 [m n. m.]	L přeliv 2 [m]
66.695	521.18	11.5	522.18	34.9

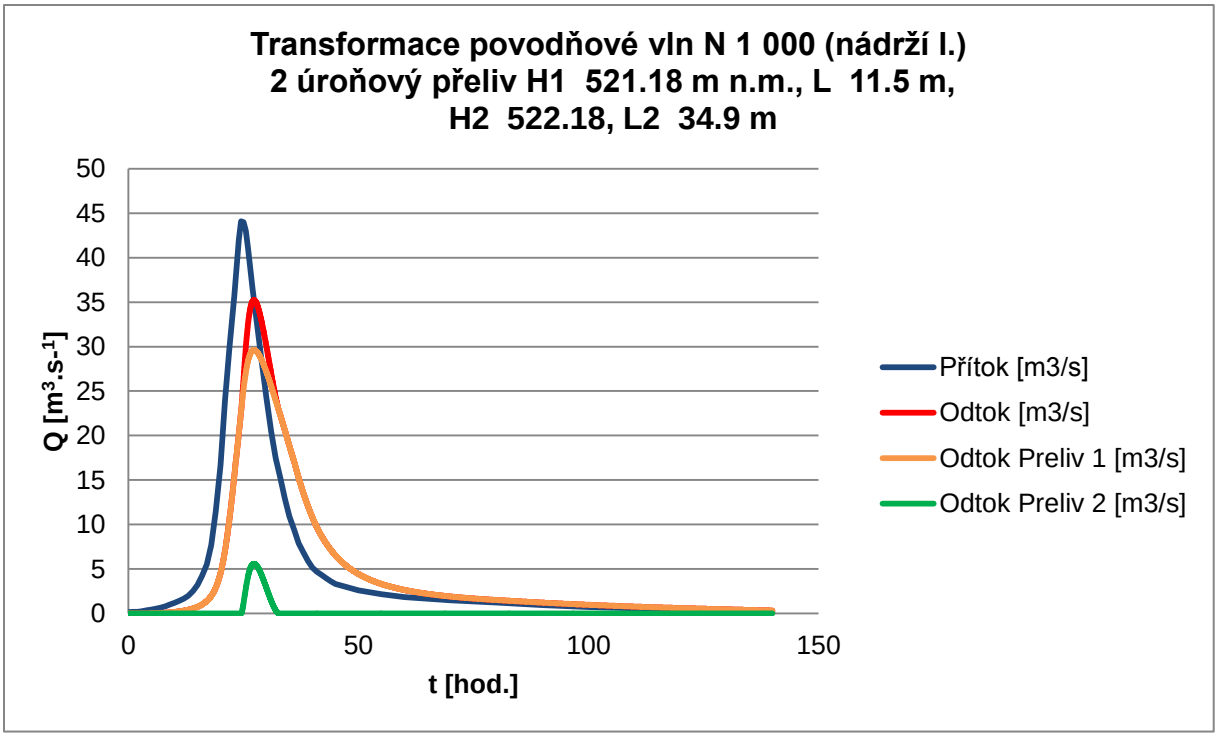
Pro takto navržený víceúrovňový bezpečnostní přeliv byly poté provedeny simulace transformace povodňové vlny nádrží l. Výsledky těchto simulací jsou uvedeny v tab. 48 a na obr. 46 až 50.

Tab. 48 Výsledky transformací povodňových vln víceúrovňovým přelivem na nádrži l.

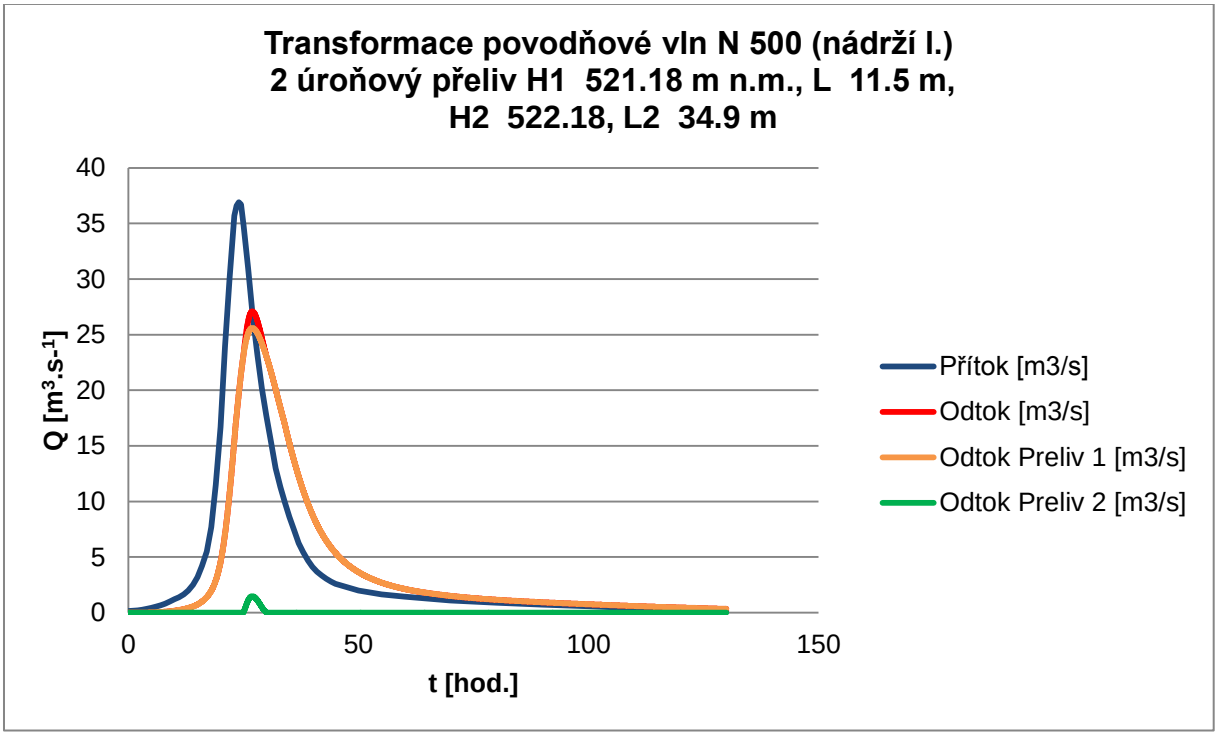
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Přítok [$m^3.s^{-1}$]	75.00	44.10	36.90	23.00	18.20
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	66.70	35.22	27.09	14.97	11.25
Odtok přeliv 1 [$m^3.s^{-1}$]	42.11	29.62	25.61	14.97	11.25
Odtok přeliv 2 [$m^3.s^{-1}$]	24.59	5.60	1.48	0.00	0.00
Transformace [%]	11.07	20.14	26.59	34.90	38.20
Maximální hladina [m n. m.]	522.68	522.37	522.257	521.93	521.80



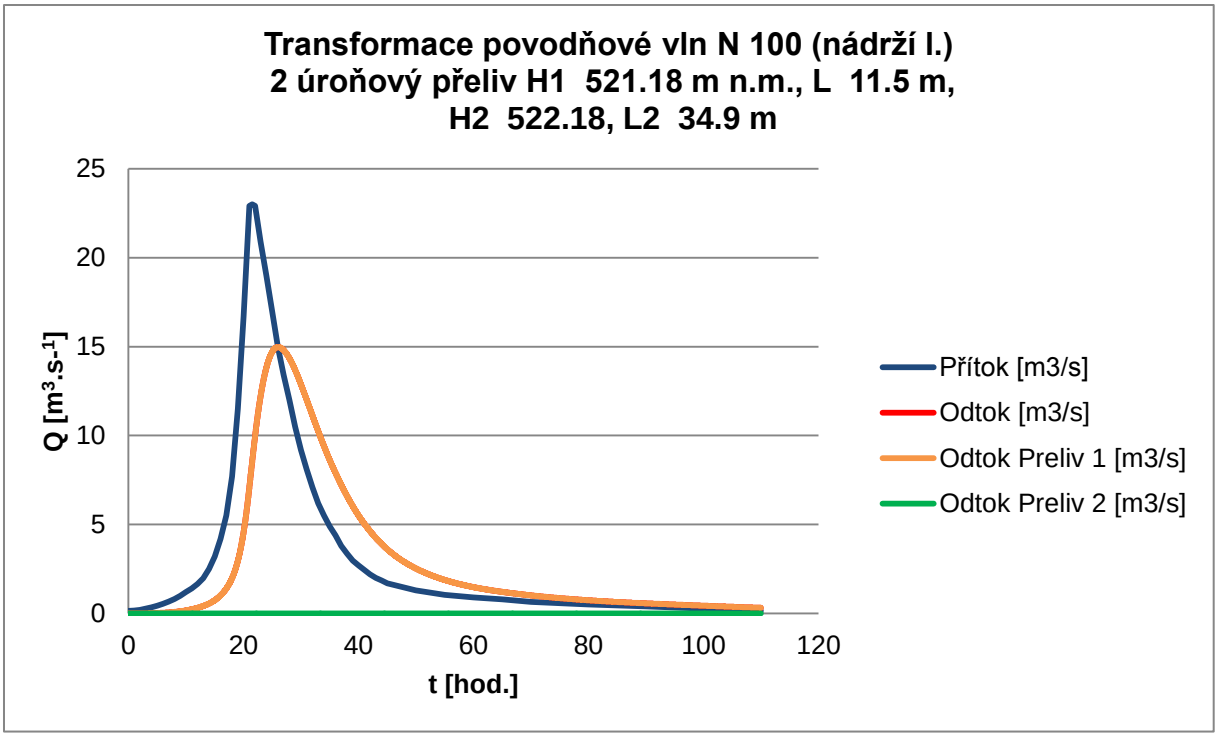
Obr. 46 Transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží l.)



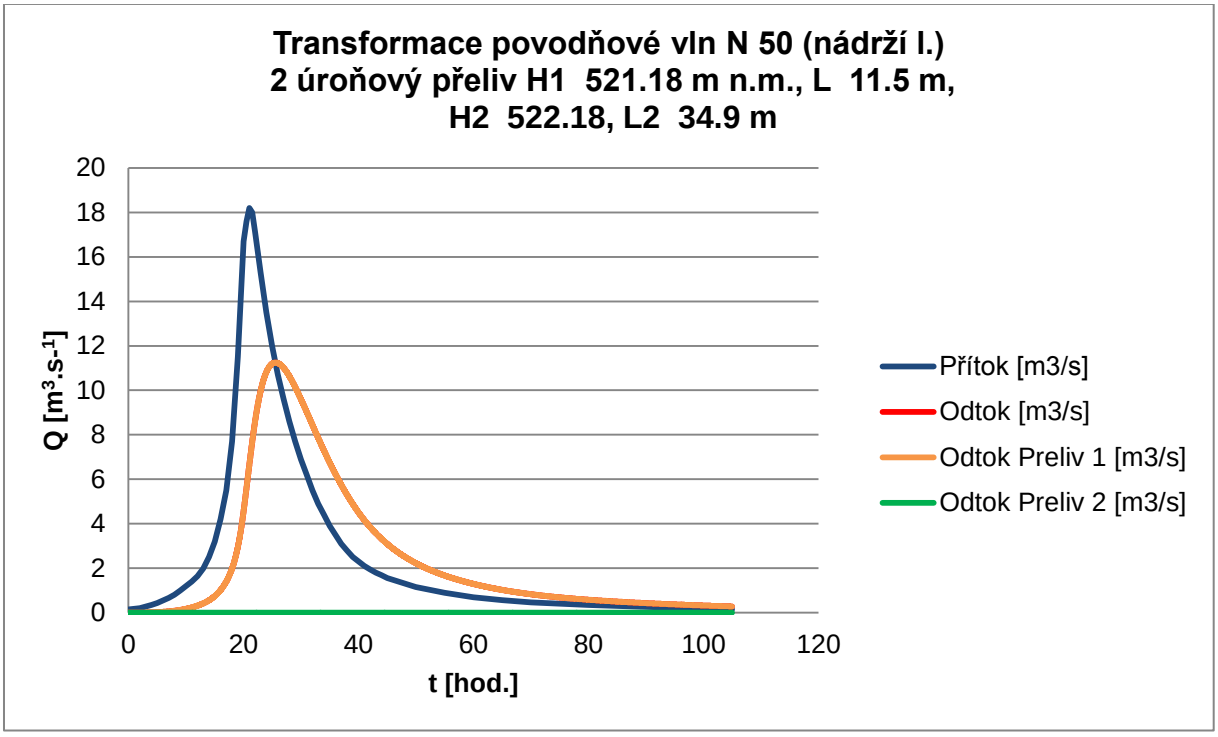
Obr. 47 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží I.)



Obr. 48 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)



Obr. 49 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží I.)



Obr. 50 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží I.)

7.3.2. NÁDRŽ II.

První úroveň bezpečnostního přelivu na nádrži II. byla navržena na převedení neškodného průtoku, který byl pro tuto nádrž zvolen 60.00 $m^3.s^{-1}$. Návrh byl proveden s předpokladem známé přepadové výšky o hodnotě 1.0 m. Druhá výšková úroveň bezpečnostního přelivu byla posunuta o hodnotu zmíněné přepadové výšky nad úroveň první. Výsledkem optimalizační simulace pro zadanou N-letost byla hodnota délky přelivné hrany druhé úrovně bezpečnostního přelivu. Zadané vstupní parametry jsou uvedeny v tab. 49. Výsledek optimalizační simulace je uveden v tab. 50.

Tab. 49 Návrhové parametry dvouúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže II.

N - letost	10 000
H počáteční [m n. m.]	521.20
H maximální [m n. m.]	522.70
H1 [m n. m.]	521.20
m1	0.45
L1 [m]	30
H2 [m n. m.]	522.20
m2	0.45
min. L2 [m]	5
max. L2 [m]	50

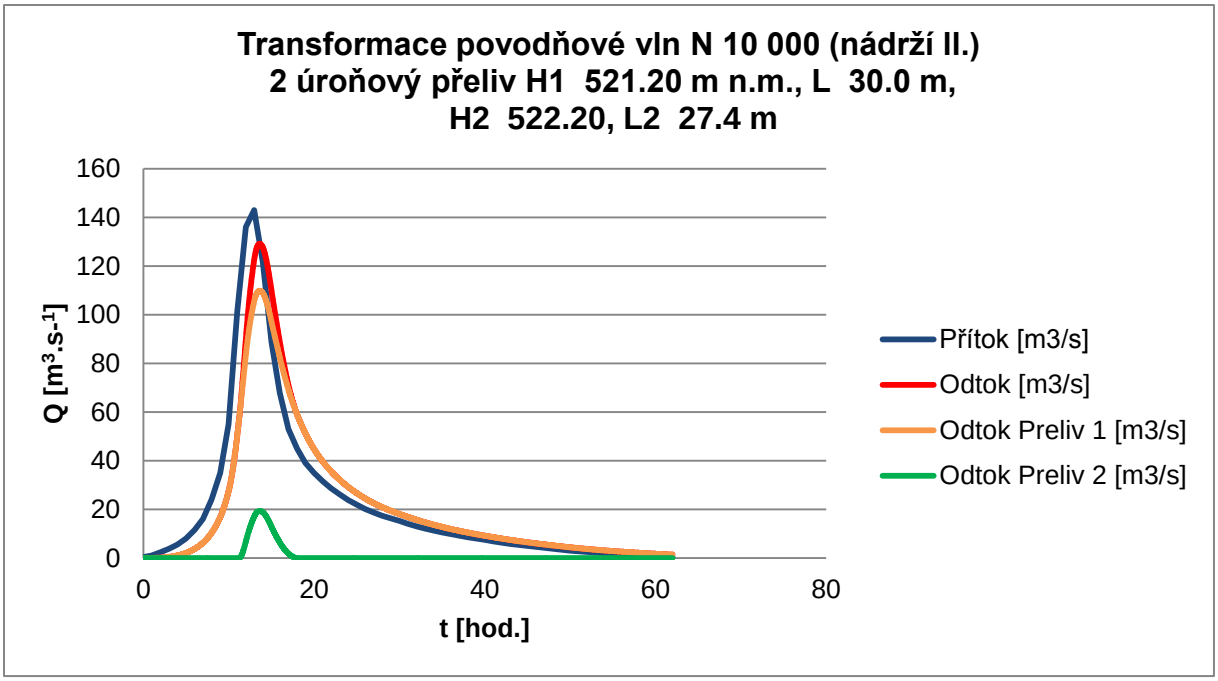
Tab. 50 Výstupní optimalizované parametry pro víceúrovňový přeliv nádrže II., N-letost 10 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2 [m n. m.]	L přeliv 2 [m]
129.158	521.2	30	522.2	27.4

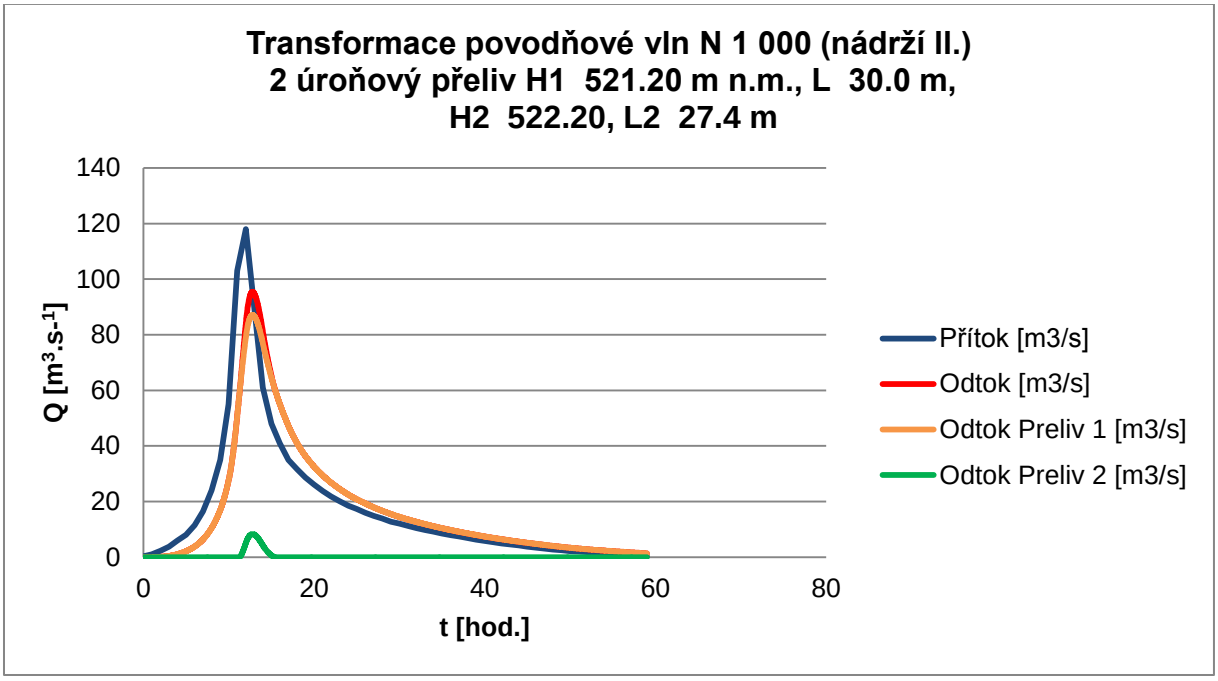
Pro takto navržený víceúrovňový bezpečnostní přeliv byly poté provedeny simulace transformace povodňové vlny nádrží II. Výsledky těchto simulací jsou uvedeny v tab. 51 a na obr. 51 až 54.

Tab. 51 Výsledky transformací povodňových vln víceúrovňovým přelivem na nádrži II.

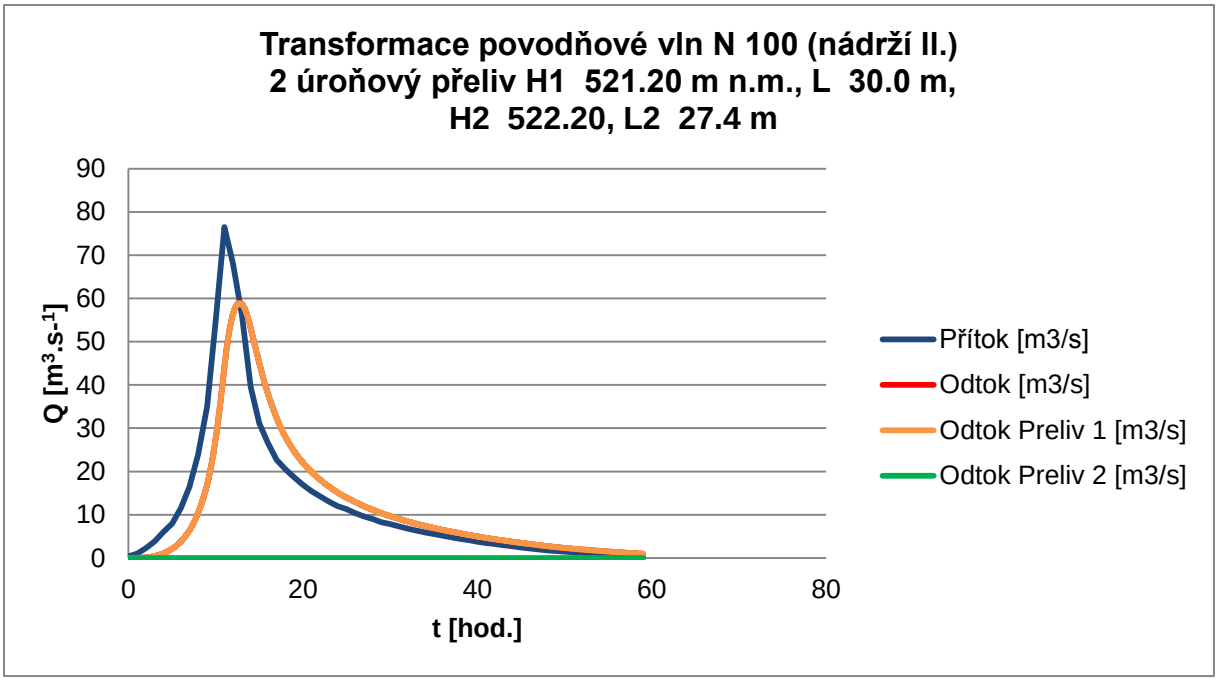
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Přítok [$m^3.s^{-1}$]	143.00	118.00	-	76.50	65.40
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	129.16	95.39	-	58.94	50.72
Odtok přeliv 1 [$m^3.s^{-1}$]	109.85	87.09	-	58.94	50.72
Odtok přeliv 2 [$m^3.s^{-1}$]	19.31	8.30	-	0.00	0.00
Transformace [%]	9.68	19.16	-	22.96	22.46
Maximální hladina [m n. m.]	522.70	522.49	-	522.19	522.10



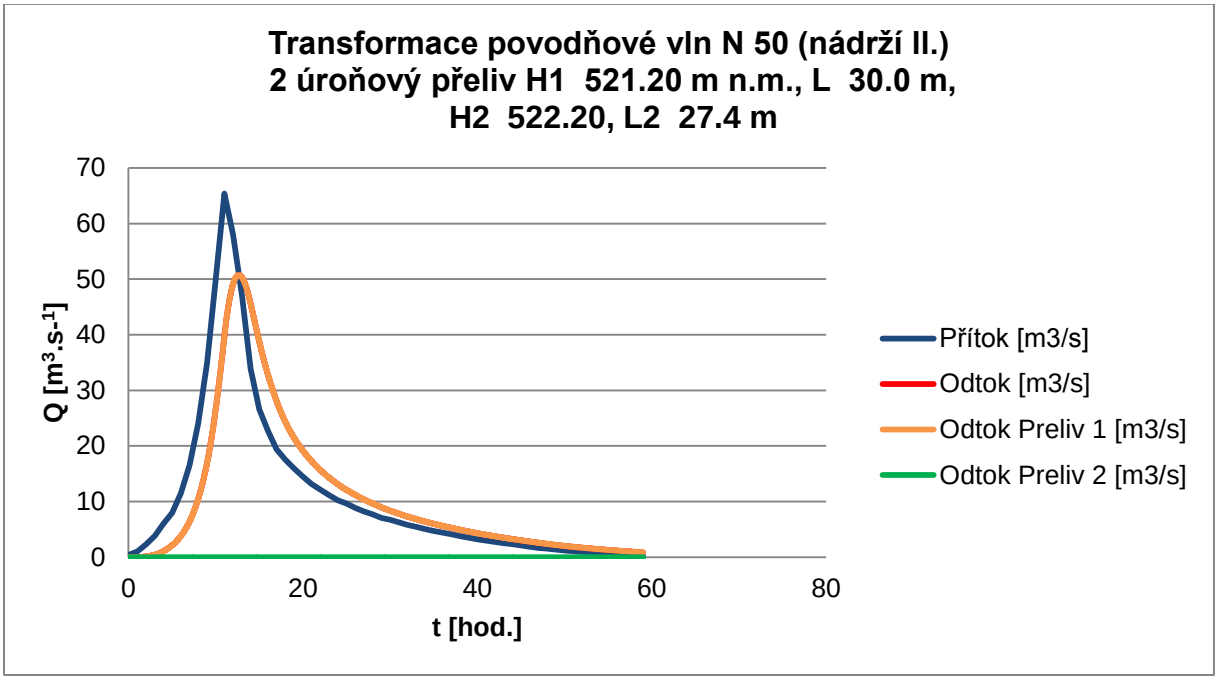
Obr. 51 Transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží II.)



Obr. 52 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží II.)



Obr. 53 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží II.)



Obr. 54 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží II.)

7.3.3. NÁDRŽ III.

První úroveň bezpečnostního přelivu na nádrži III. byla navržena na převedení neškodného průtoku, který byl pro tuto nádrž zvolen 80.00 $m^3.s^{-1}$. Návrh byl proveden s předpokladem známé přepadové výšky o hodnotě 1.0 m. Druhá výšková úroveň bezpečnostního přelivu byla posunuta o hodnotu zmíněné přepadové výšky nad úroveň první. Výsledkem optimalizační simulace pro zadanou N-letost byla hodnota délky přelivné hrany druhé úrovně bezpečnostního přelivu. Zadané vstupní parametry jsou uvedeny v tab. 52. Výsledek optimalizační simulace je uveden v tab. 53.

Tab. 52 Návrhové parametry dvouúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže II.

N - letost	10 000
H počáteční [m n. m.]	476.64
H maximální [m n. m.]	478.64
H1 [m n. m.]	521.20
m1	0.45
L1 [m]	40
H2 [m n. m.]	477.64
m2	0.45
min. L2 [m]	10
max. L2 [m]	60

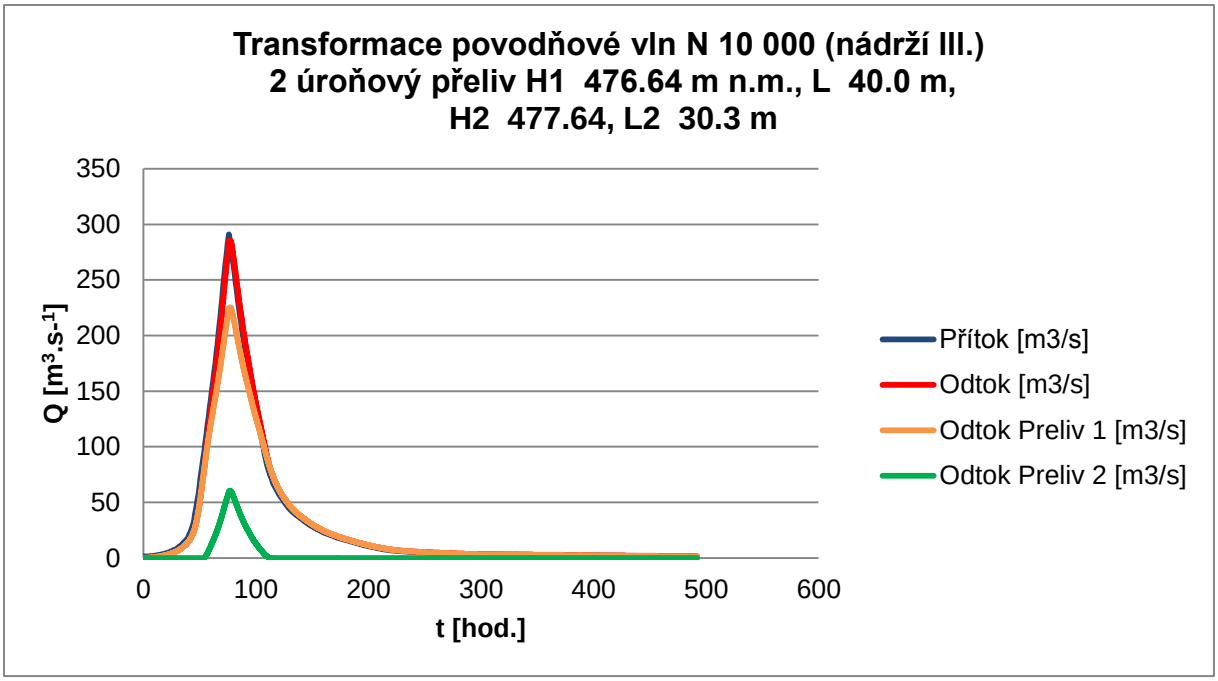
Tab. 53 Výstupní optimalizované parametry pro víceúrovňový přeliv nádrže III., N-letost 10 000.

Odtok [$m^3.s^{-1}$]	H přeliv 1. [m n. m.]	L přeliv 1. [m]	H přeliv 2. [m n. m.]	L přeliv 2. [m]
286.568	476.64	40	477.64	30.3

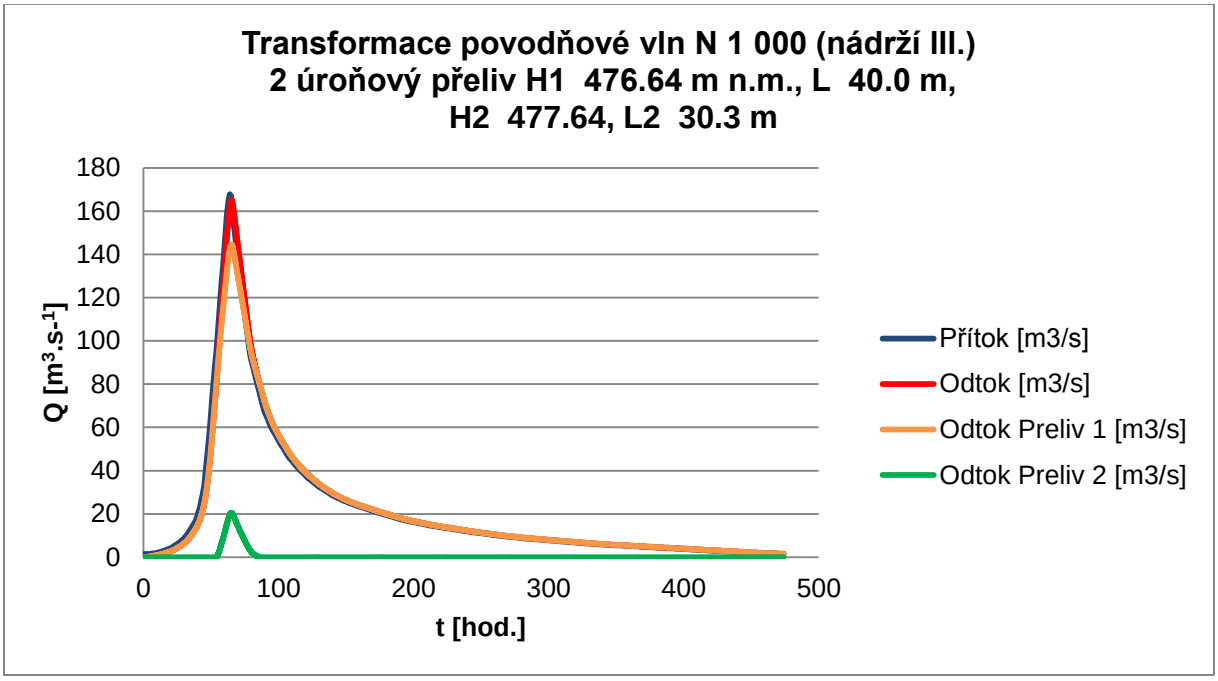
Pro takto navržený víceúrovňový bezpečnostní přeliv byly poté provedeny simulace transformace povodňové vlny nádrží III. Výsledky těchto simulací jsou uvedeny v tab. 54 a na obr. 55 až 59.

Tab. 54 Výsledky transformací povodňových vln víceúrovňovým přelivem na nádrži III.

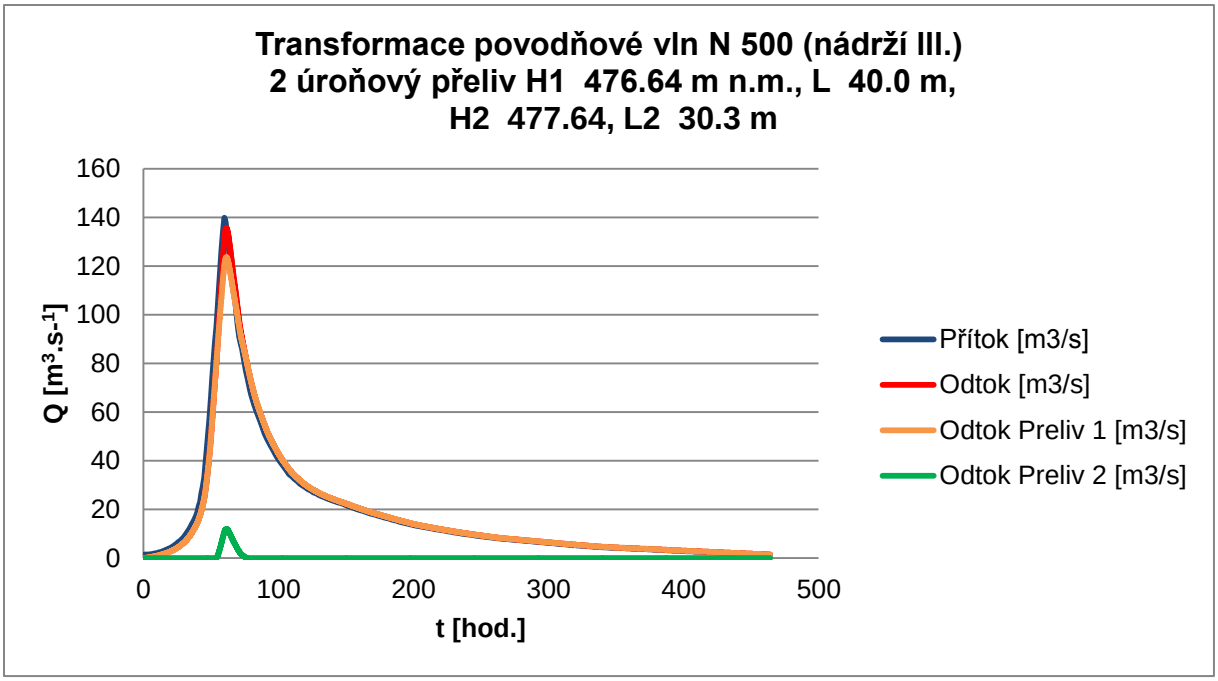
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Přítok [$m^3.s^{-1}$]	291.00	167.80	139.80	88.00	70.60
Odtok [$m^3.s^{-1}$]	285.81	165.18	135.62	85.37	65.98
Odtok přeliv 1 [$m^3.s^{-1}$]	225.45	144.63	123.65	84.84	65.98
Odtok přeliv 2 [$m^3.s^{-1}$]	60.36	20.55	11.97	0.53	0
Transformace [%]	1.78	1.56	2.99	2.99	6.54
Maximální hladina [m n. m.]	478.64	478.13	477.98	477.68	477.52



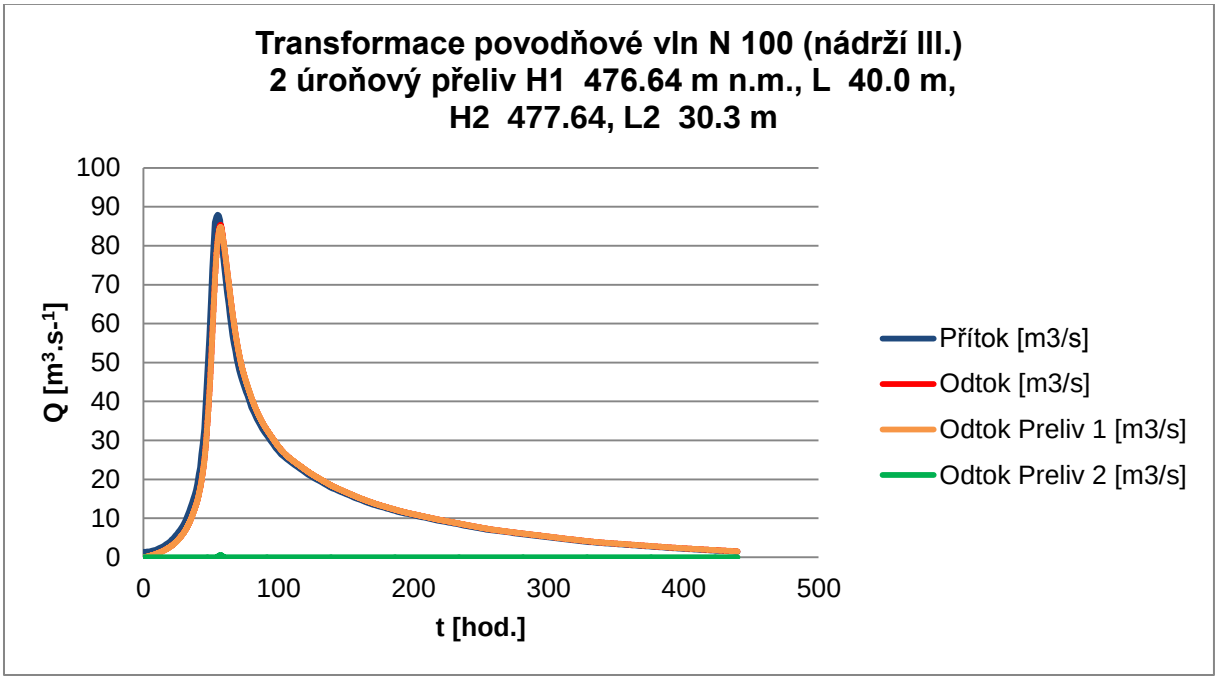
Obr. 55 Transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží III.)



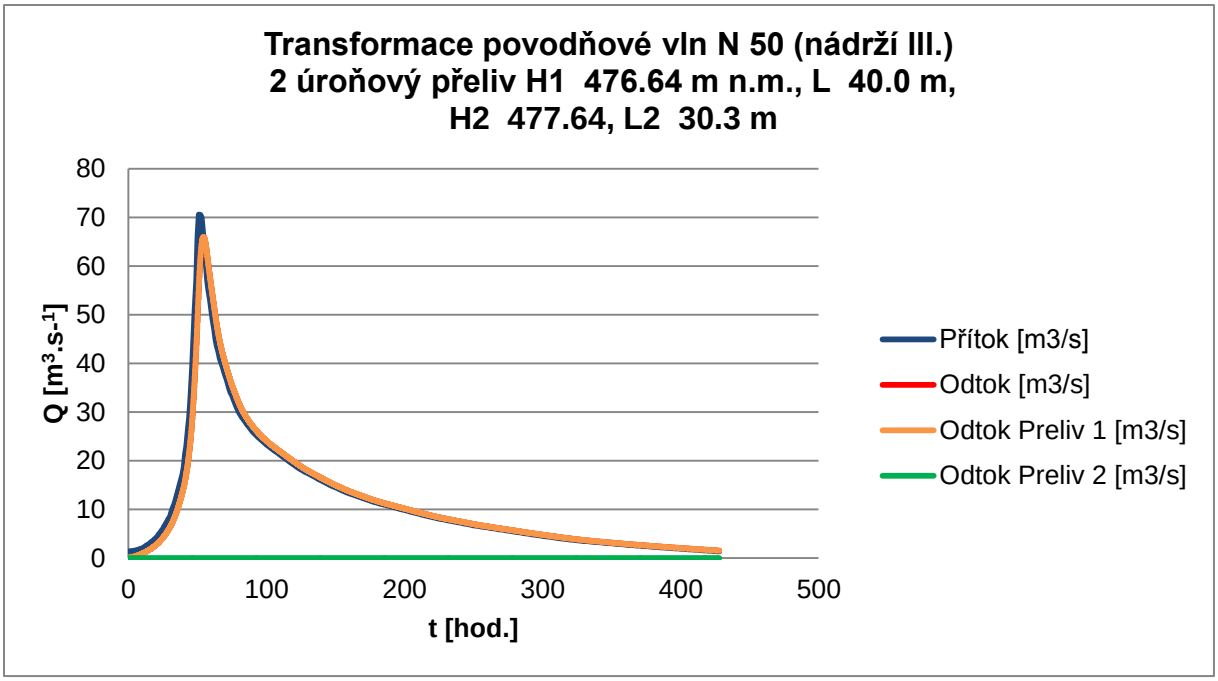
Obr. 56 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží III.)



Obr. 57 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží III.)



Obr. 58 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží III.)



Obr. 59 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží III.)

7.4. VYHODNOCENÍ

V této kapitole je uvedeno vyhodnocení úspěšnost použití víceúrovňových bezpečnostních přelivů na nádržích. Pro kvantifikaci úspěšnosti byla použita veličina *„transformace“*, jež udává procentuální snížení kulminačního přítoku vody do nádrže k transformovanému odtoku vody z nádrže. V rámci porovnání jednotlivých N-letostí byly vždy porovnávány tři veličiny. První veličinou je hodnota teoreticky optimálního odtoku (viz kap. 7.1.). Druhou veličinou je poté hodnota odtoku vody z nádrže přepadajícího přes jednoúrovňový bezpečnostní přeliv (viz kap. 7.2.). Třetí veličinou je hodnota odtoku vody z nádrže přepadajícího přes dvouúrovňový bezpečnostní přeliv (viz kap. 7.3.). Pro doplnění je uvedena hodnota přítoku vody do nádrže.

7.4.1. NÁDRŽ I.

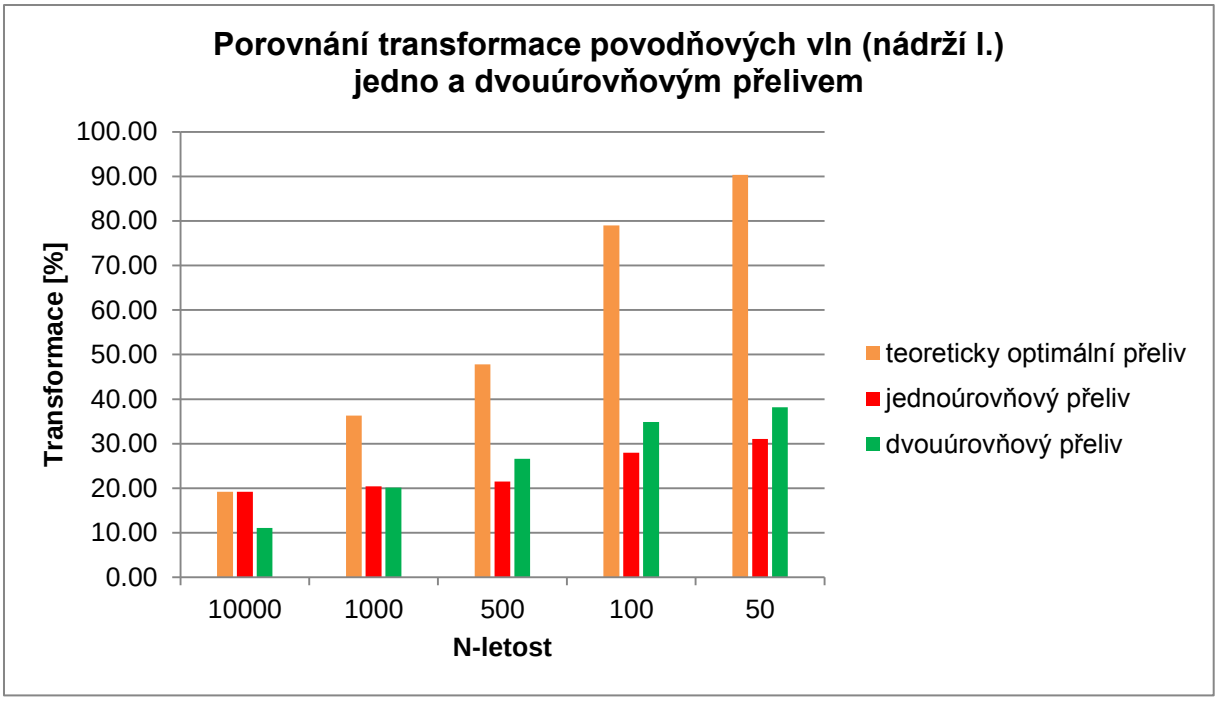
V rámci vyhodnocení úspěšnosti použití víceúrovňového bezpečnostního přelivu na nádrži I. byla zpracována tab. 55 porovnávající jednotlivé typy přelivů. Pro názornost byla tato tab. 55 převedena do podoby sloupcového grafu obr. 60. Jako další doplněk jsou uvedeny průběhy transformací povodňových vln zadaných N-letostí na obr. 61 až 65.

Tab. 55 Úspěšnost transformací povodňových vln na nádrži I.

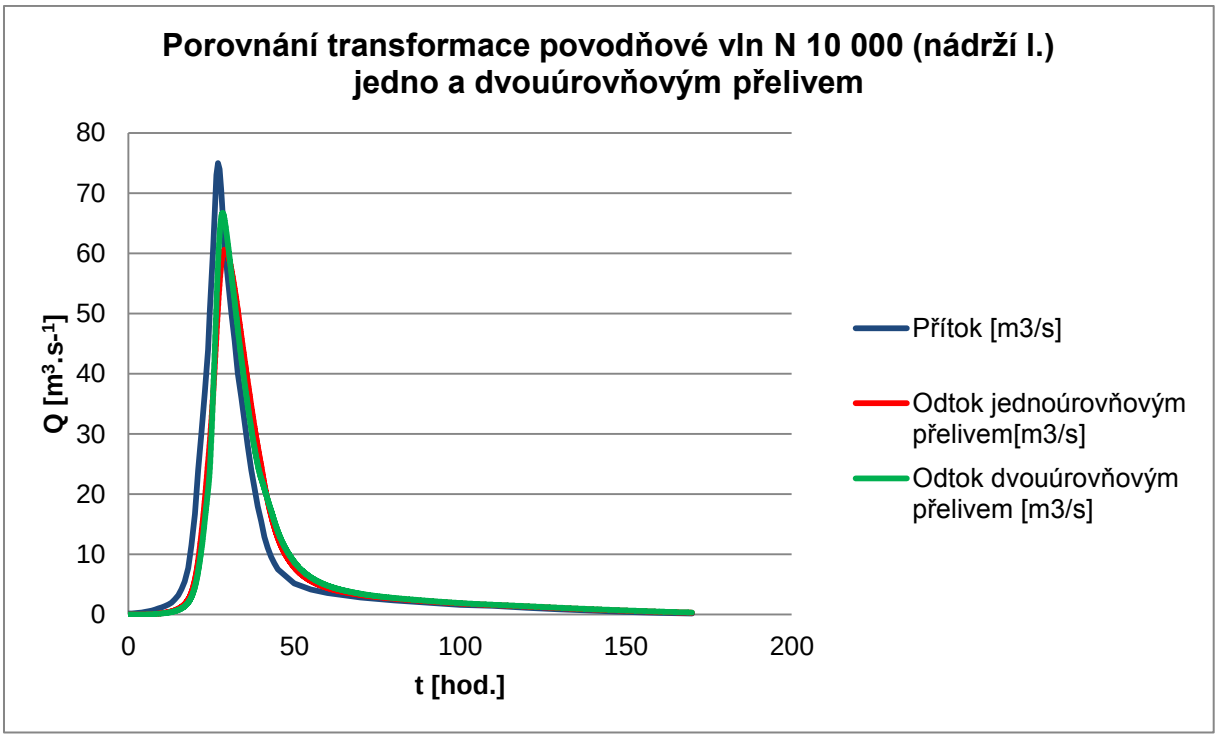
	Transformace [%]				
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Teoreticky optimální přeliv	19.21	36.30	47.78	79.01	90.34
Jednoúrovňový přeliv	19.21	20.44	21.51	27.94	31.06
Dvouúrovňový přeliv	11.07	20.14	26.59	34.90	38.20

V tab. 55 a na obr. 60 lze jasně pozorovat trend využití víceúrovňového bezpečnostního přelivu, kdy pro povodňové vlny s vyšší N-letostí (N 10 000, N1 000) je hodnota *„transformace“* nižší, něž je tomu v případě jednoúrovňového přelivu. Pro povodňové vlny s nižší hodnotou N-letosti naopak dochází k nárůstu hodnoty *„transformace“* až cca o 7 %.

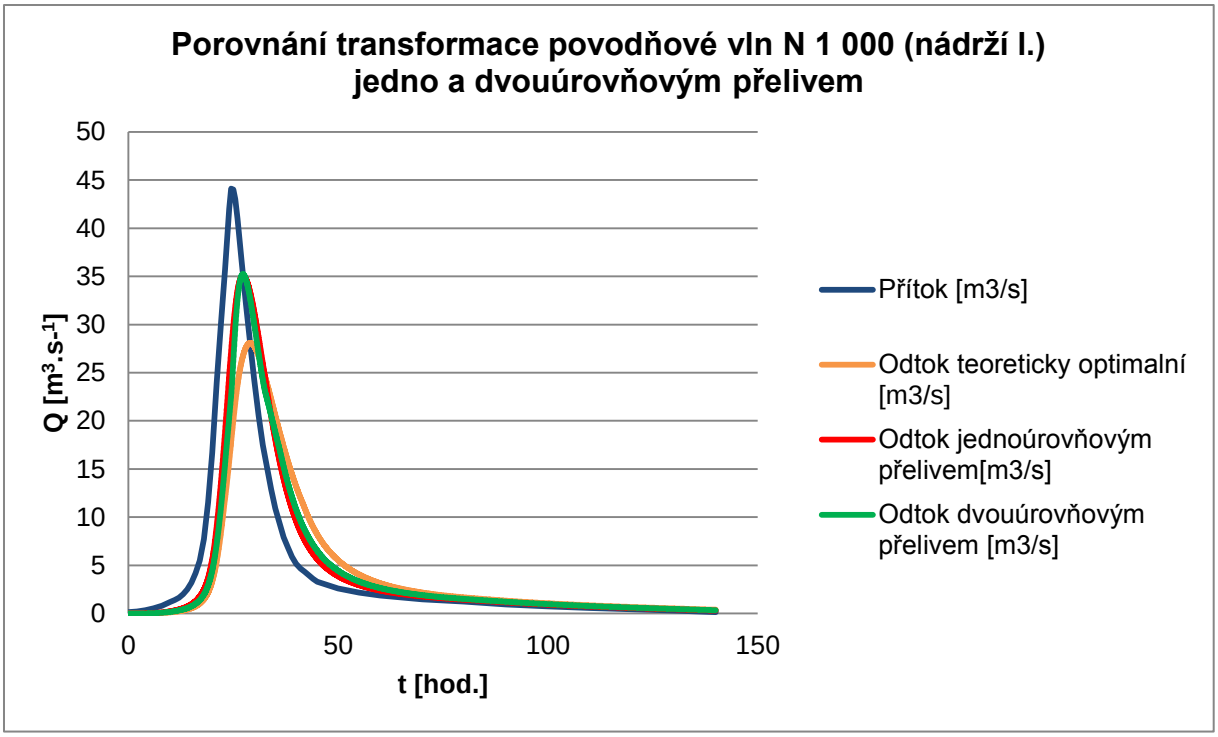
V případě transformace povodňové vlny s N-letostí 10 000 není na obr. 61 uveden průběh teoreticky optimální transformace z důvodu jeho duplicity s průběhem odtoku od jednoúrovňového bezpečnostního přelivu. Tato duplicita nastává vlivem jevu pozorovaného v kap. 7.1., kdy teoreticky optimální návrhové parametry přelivu se rovnají optimálním návrhovým parametrům jednoúrovňového bezpečnostního přelivu.



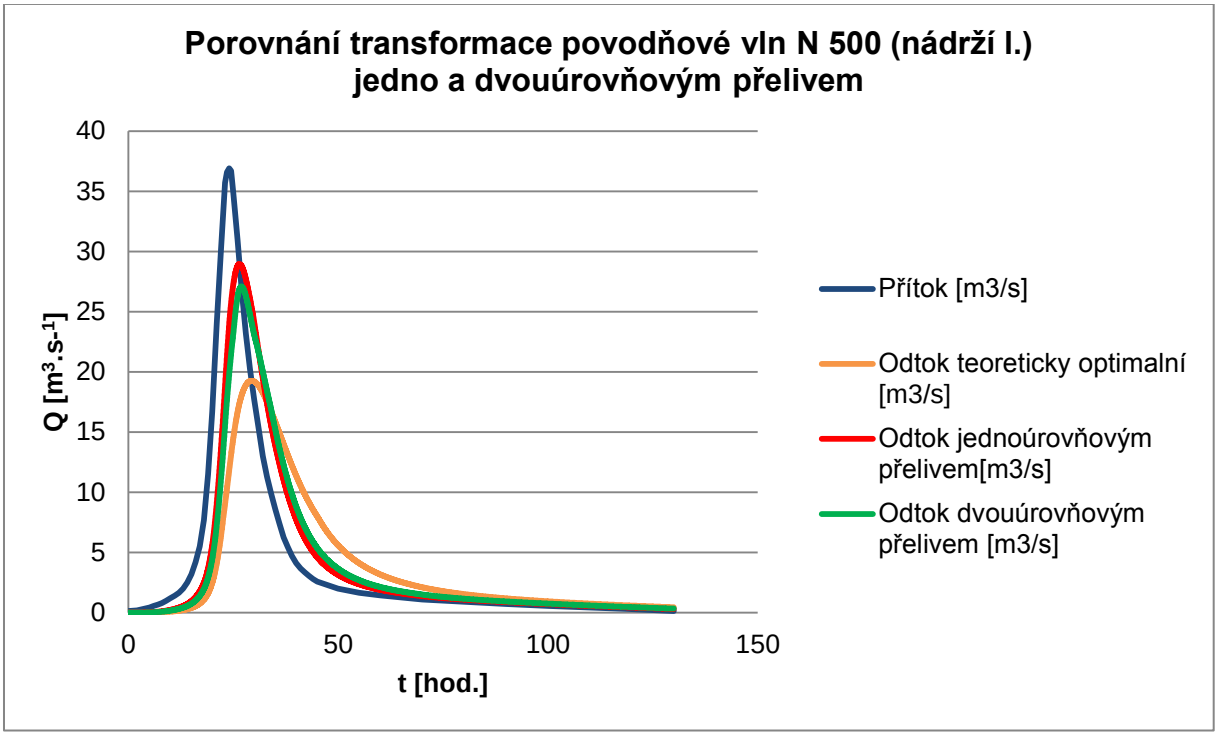
Obr. 60 Porovnání transformace povodňových vln (nádrží I.)



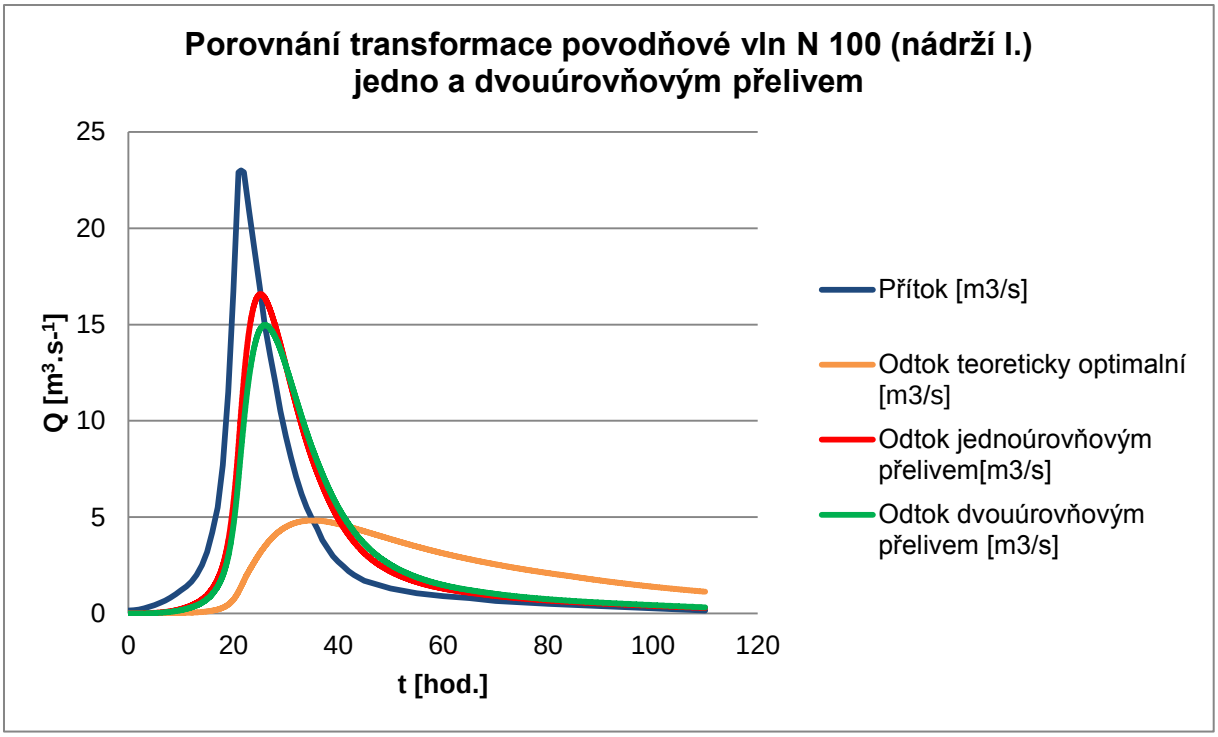
Obr. 61 Porovnání transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží I.)



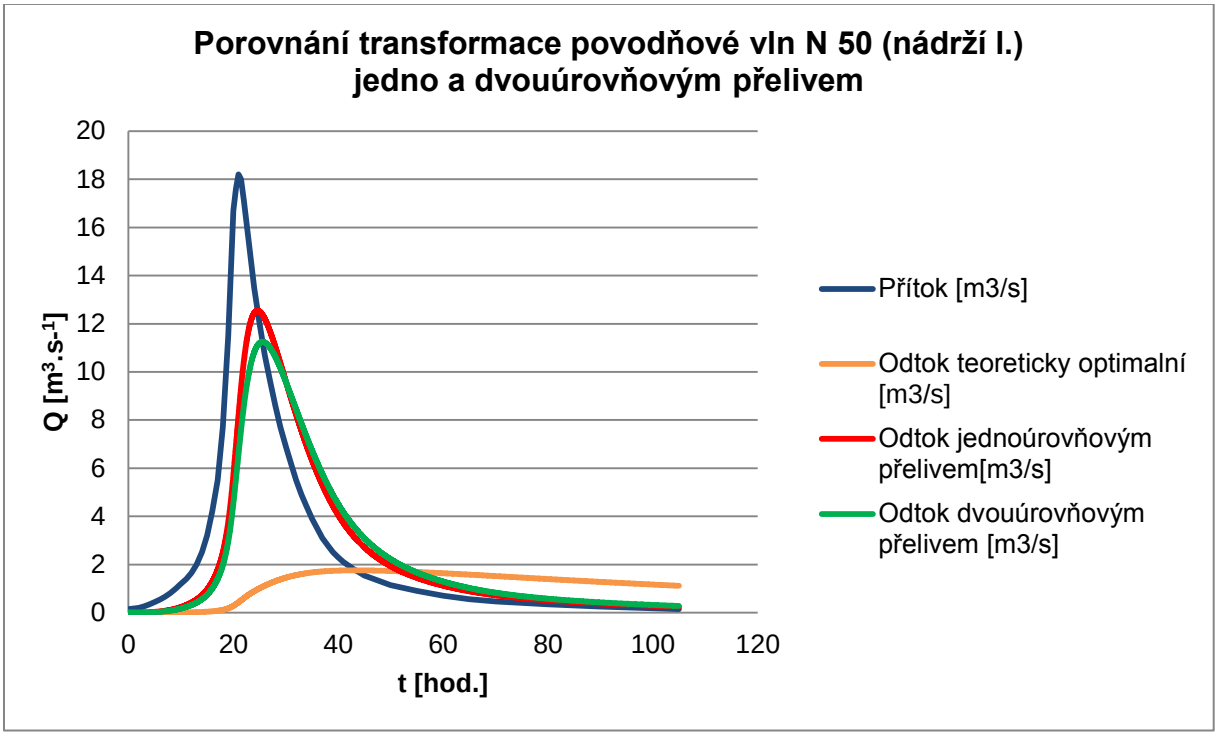
Obr. 62 Porovnání transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží I.)



Obr. 63 Porovnání transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)



Obr. 64 Porovnání transformace povodňové vln N 100 (nádrží I.)



Obr. 65 Porovnání transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)

7.4.2. NÁDRŽ II.

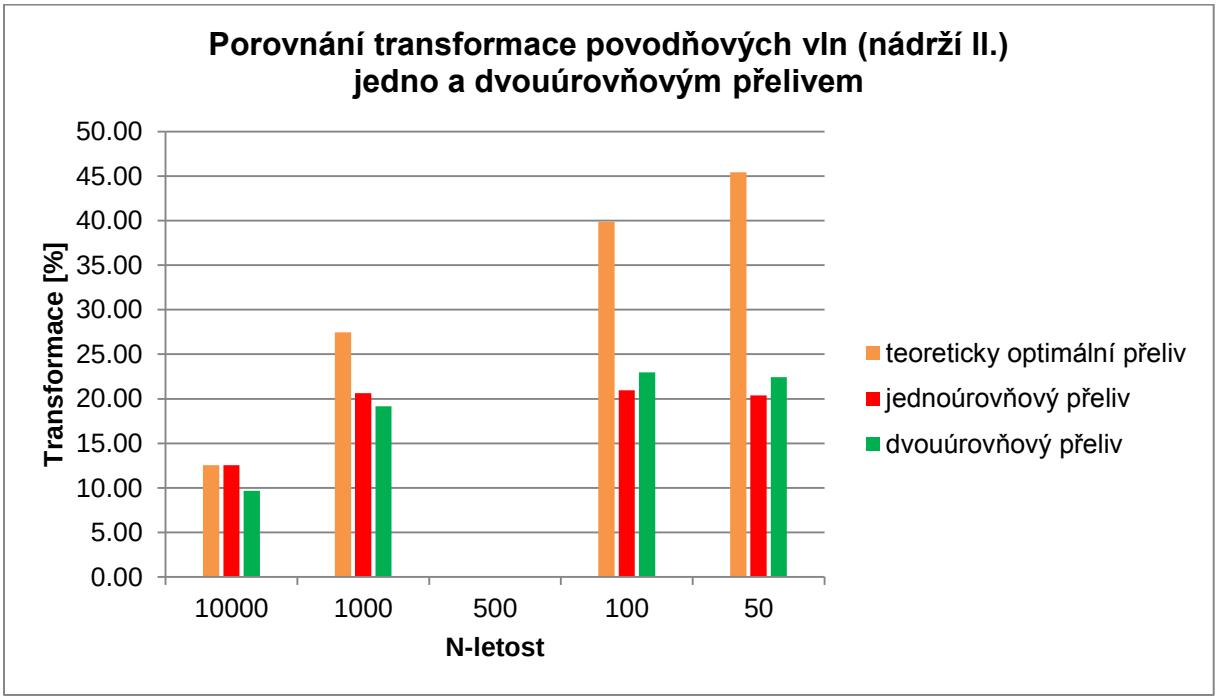
V rámci vyhodnocení úspěšnosti použití víceúrovňového bezpečnostního přelivu na nádrži II. byla zpracována tab. 56 porovnávající jednotlivé typy přelivů. Pro názornost byla tato tab. 56 převedena do podoby sloupcového grafu obr. 66. Jako další doplněk jsou uvedeny průběhy transformací povodňových vln daných N-letostí na obr. 67 až 70.

Tab. 56 Úspěšnost transformací povodňových vln na nádrži II.

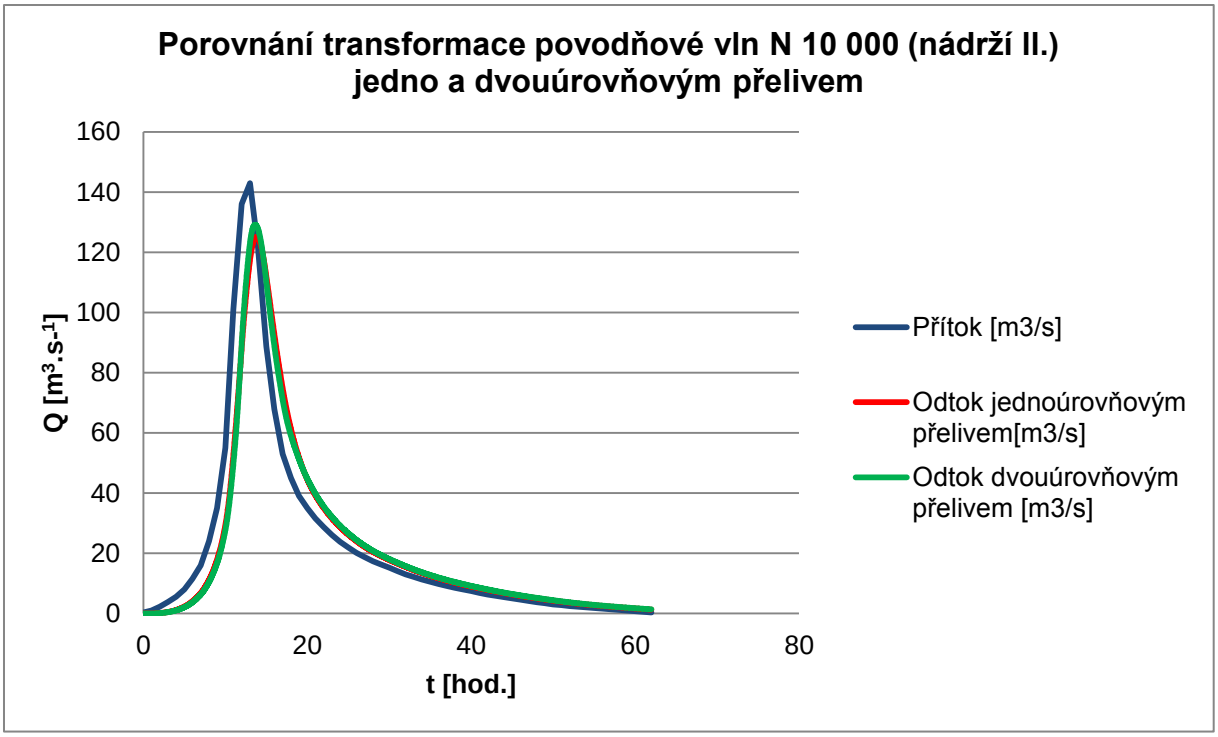
	Transformace [%]				
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Teoreticky optimální přeliv	12.53	27.45	-	39.85	45.43
Jednoúrovňový přeliv	12.53	20.63	-	20.95	20.37
Dvouúrovňový přeliv	9.68	19.16	-	22.96	22.45

V tab. 56 a na obr. 66 lze jasně pozorovat trend využití víceúrovňového bezpečnostního přelivu, kdy pro povodňové vlny s vyšší N-letostí (N 10 000, N1 000) je hodnota *„transformace“* nižší, něž je tomu v případě jednoúrovňového přelivu. Pro povodňové vlny s nižší hodnotou N-letosti naopak dochází k nárůstu hodnoty *„transformace“* cca o 2 %.

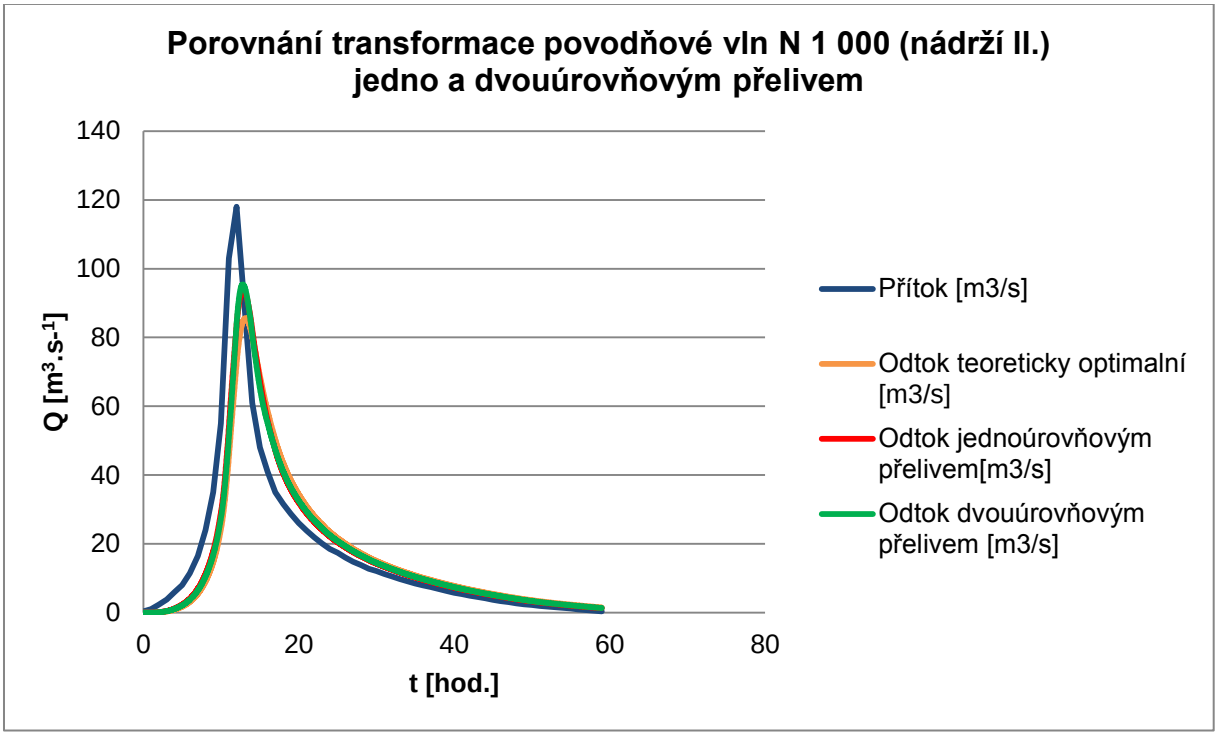
V případě transformace povodňové vlny s N-letostí 10 000 není na obr. 67 uveden průběh teoreticky optimální transformace z důvodu jeho duplicity s průběhem odtoku od jednoúrovňového bezpečnostního přelivu. Tato duplicita nastává vlivem jevu pozorovaného v kap. 7.1., kdy teoreticky optimální návrhové parametry přelivu se rovnají optimálním návrhovým parametrům jednoúrovňového bezpečnostního přelivu.



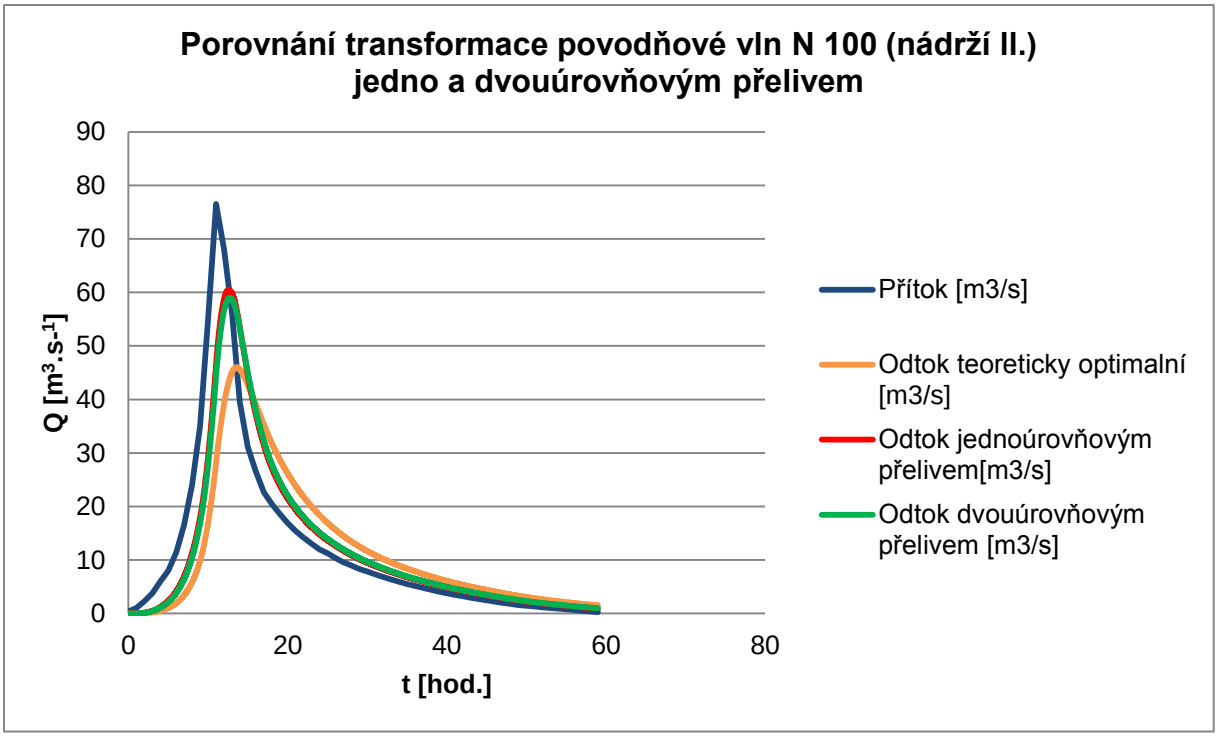
Obr. 66 Porovnání transformace povodňových vln (nádrží II.)



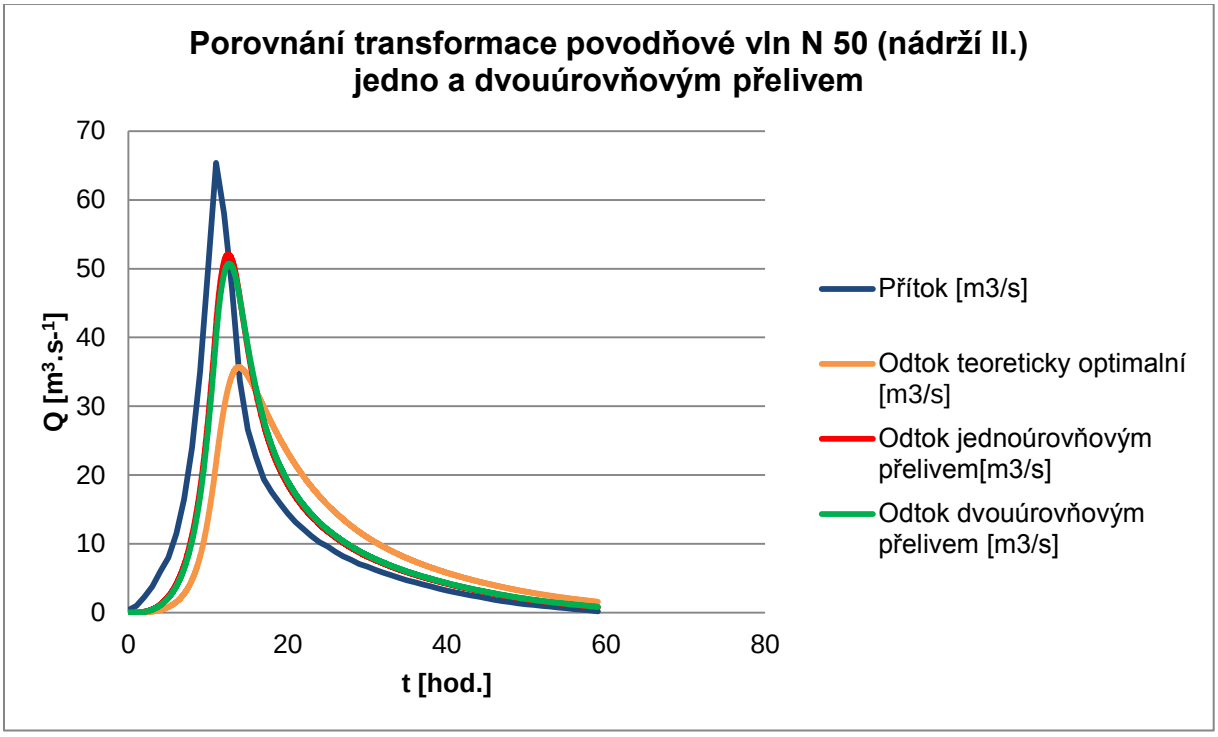
Obr. 67 Porovnání transformace povodňové vln N10 000 (nádrží II.)



Obr. 68 Porovnání transformace povodňové vln N1 000 (nádrží II.)



Obr. 69 Porovnání transformace povodňové vln N100 (nádrží II.)



Obr. 70 Porovnání transformace povodňové vln N50 (nádrží II.)

7.4.3. NÁDRŽ III.

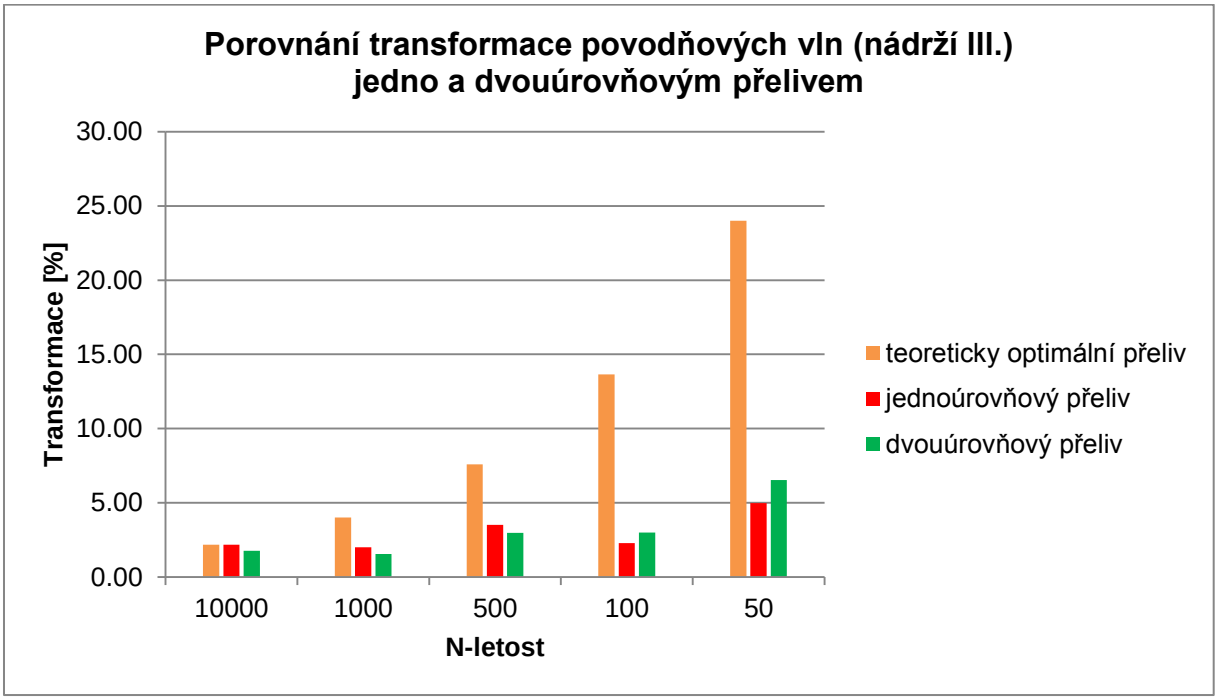
V rámci vyhodnocení úspěšnosti použití víceúrovňového bezpečnostního přelivu na nádrži III. byla zpracována tab. 57 porovnávající jednotlivé typy přelivů. Pro názornost byla tato tab. 57 převedena do podoby sloupcového grafu obr. 71. Jako další doplněk jsou uvedeny průběhy transformací povodňových vln daných N-letostí na obr. 72 až 76.

Tab. 57 Úspěšnost transformací povodňových vln na nádrži III.

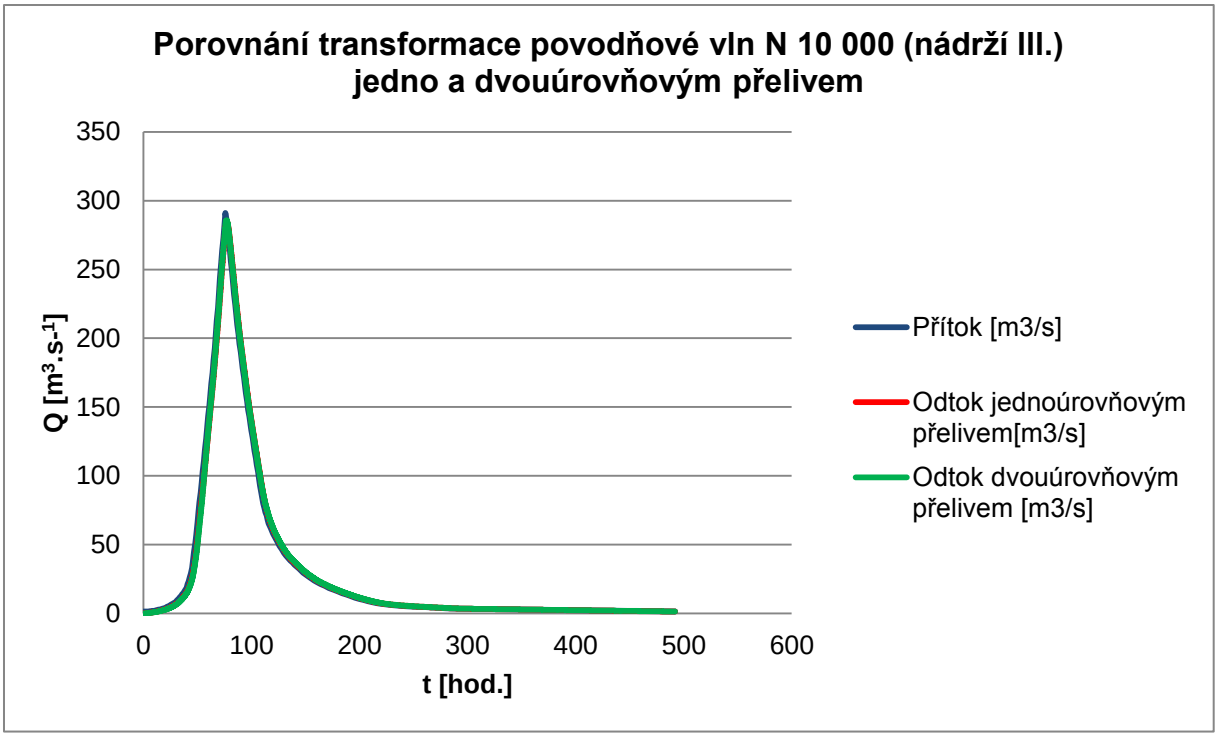
	Transformace [%]				
N - letost	10 000	1 000	500	100	50
Teoreticky optimální přeliv	2.18	4.01	7.59	13.65	24.00
Jednoúrovňový přeliv	2.18	2.01	3.52	2.29	4.99
Dvouúrovňový přeliv	1.78	1.56	2.99	2.99	6.54

Jelikož rozdíly hodnot *„transformace“* mezi jednoúrovňový a víceúrovňovým bezpečnostním přelivem jsou v jednotkách procent, nelze jasně určit vztah mezi uvedenými typy přelivů.

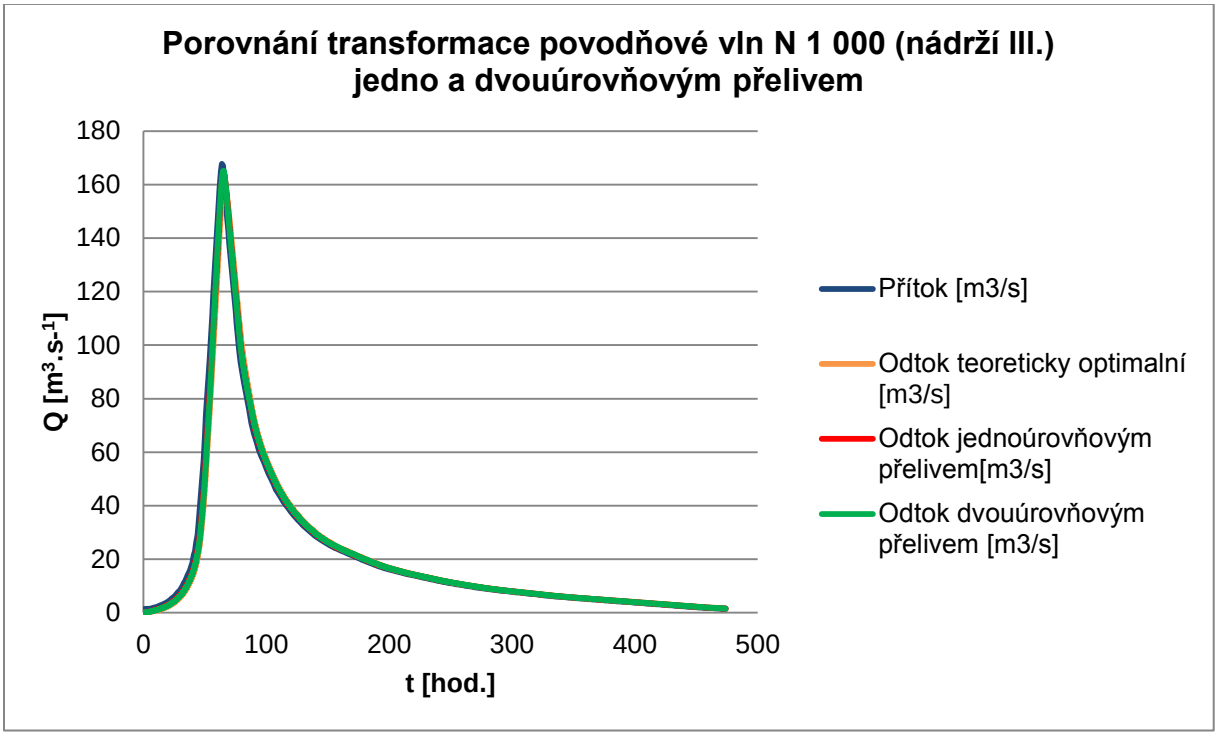
V případě transformace povodňové vlny s N-letostí 10 000 není na obr. 72 uveden průběh teoreticky optimální transformace z důvodu jeho duplicity s průběhem odtoku od jednoúrovňového bezpečnostního přelivu. Tato duplicita nastává vlivem jevu pozorovaného v kap. 7.1., kdy teoreticky optimální návrhové parametry přelivu se rovnají optimálním návrhovým parametrům jednoúrovňového bezpečnostního přelivu.



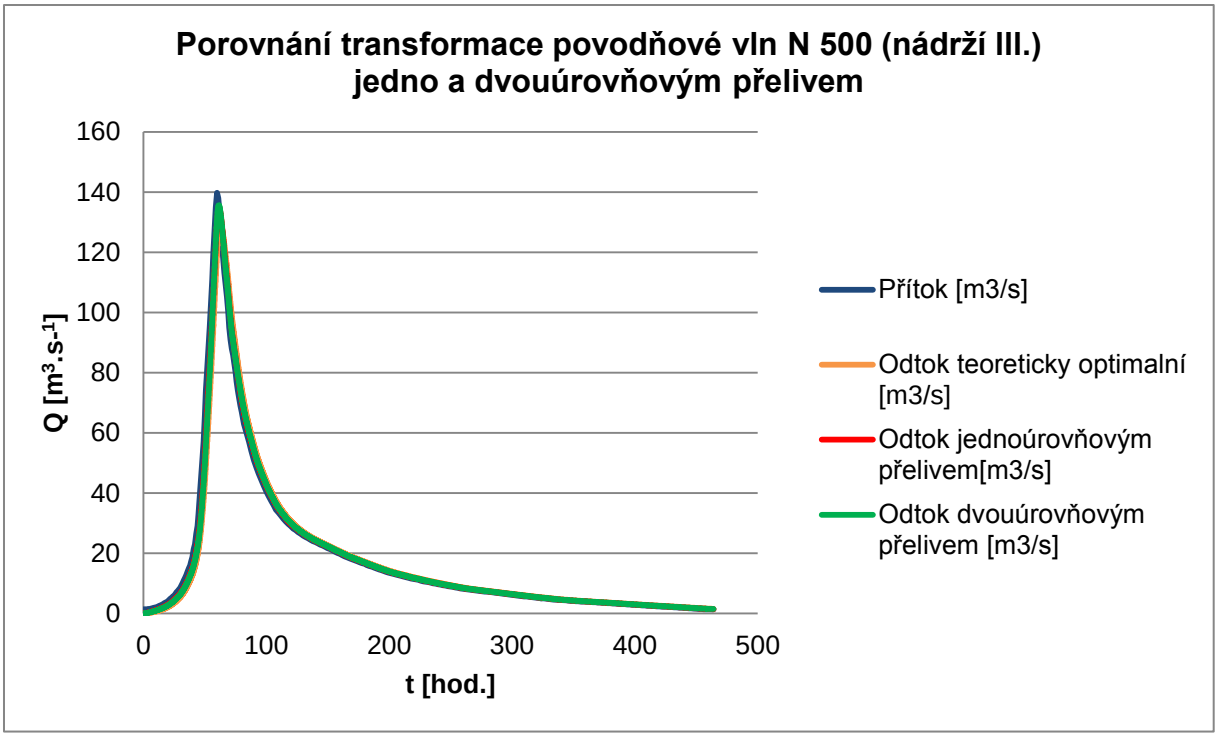
Obr. 71 Porovnání transformace povodňových vln (nádrží III.)



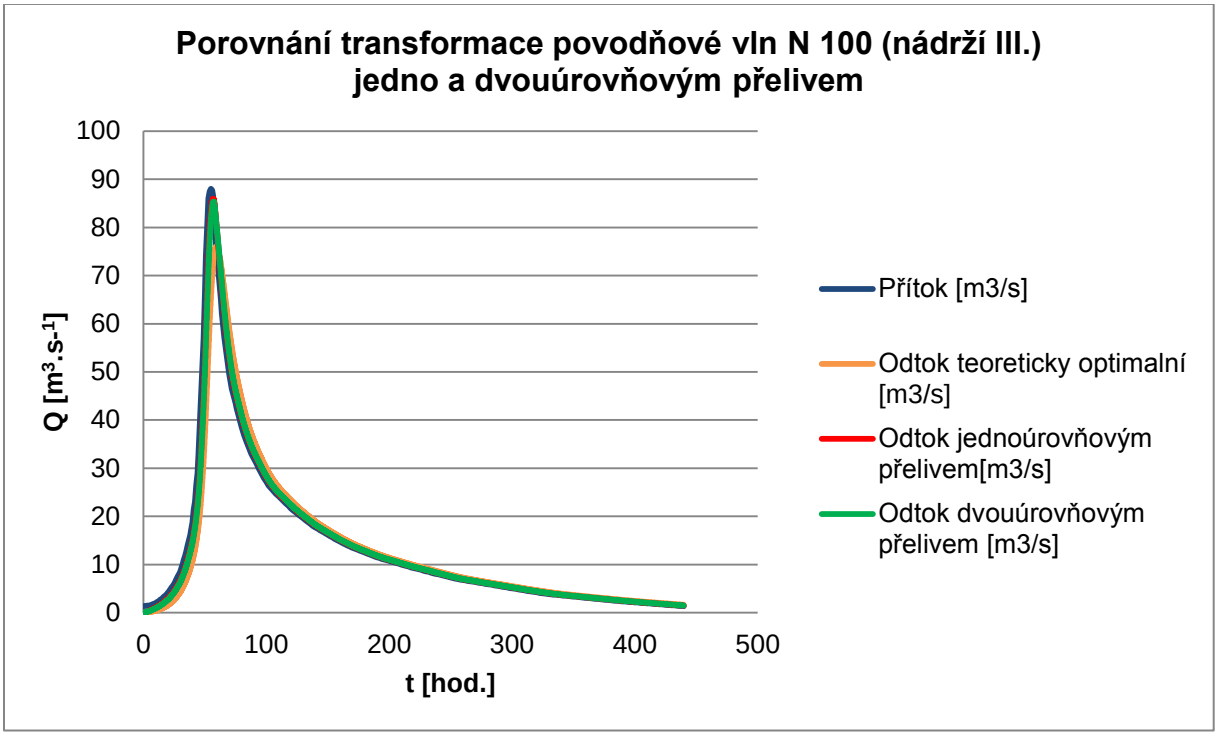
Obr. 72 Porovnání transformace povodňové vln N10 000 (nádrží III.)



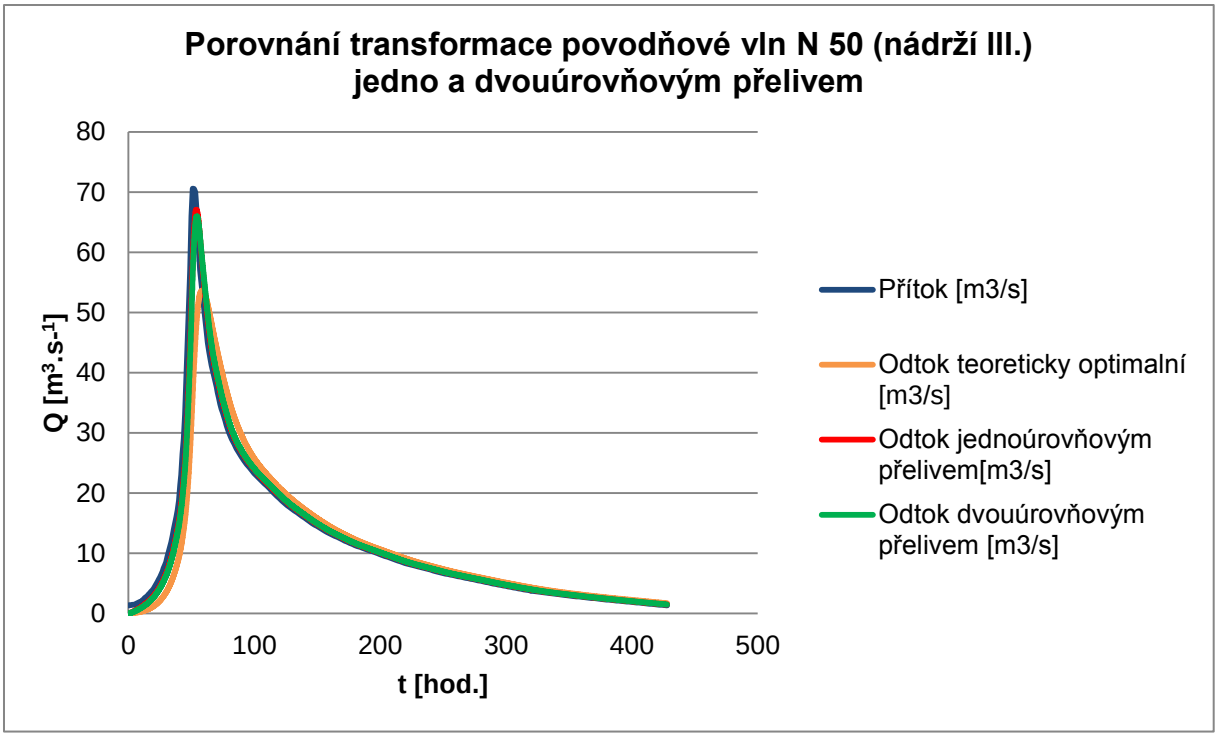
Obr. 73 Porovnání transformace povodňové vln N1 000 (nádrží III.)



Obr. 74 Porovnání transformace povodňové vln N500 (nádrží III.)



Obr. 75 Porovnání transformace povodňové vln N100 (nádrží III.)



Obr. 76 Porovnání transformace povodňové vln N50 (nádrží III.)

8. ZÁVĚR

Z výsledků a porovnání uvedených v kapitole 7. lze vyvodit, že použití víceúrovňových bezpečnostních přelivů na vodních dílech má své opodstatnění v konkrétních případech. Hlavní výhodu víceúrovňového přelivu oproti přelivu jednoúrovňovému lze spatřit v lepším využití transformačního účinku nádrže při průchodu povodňových vln nižších N-letostí. Nevýhodou tohoto řešení je naopak snížení transformačního účinku nádrže při průchodu povodňových vln vyšších N-letostí. Dle údajů uvedených v kapitole 7.4. nastává zlom kladného a negativního vlivu víceúrovňového přelivu na hranici povodňových vln s N-letostí 500 až 1 000. Typickým příkladem jsou simulace transformace povodňové vlny víceúrovňovým přelivem na nádrži I. Simulace transformace povodňové vlny na nádrži II. a nádrži III. od použití víceúrovňového přelivu naopak odrazují, pokud je přihlíženo na rozměrovou stránku velikosti konstrukce přelivu.

Optimalizační program vytvořený v rámci této diplomové práce se osvědčil při hledání optimálních návrhových parametrů bezpečnostních přelivů jak v konfiguraci jedné, nebo více úrovní. Hlavní silnou stránkou programu je možnost optimalizovat až tři návrhové parametry víceúrovňových bezpečnostních přelivů. Slabou stránkou programu je jeho citlivost na vstupní data. Zvláště pak na volbu rozsahu optimalizovaných hodnot.

Další vývoj optimalizačního programu by mohl směřovat k využití jiných vyhledávacích (optimalizačních) algoritmů. Dále pak převedení programu z formy zdrojového kódu do podoby uživatelsky přívětivého rozhraní. Na závěr by optimalizační program mohl být rozšířen o možnost simultánní vícekriteriální analýzy umožňující optimalizační řešení průchodu více, než jedné povodňové vlny.

V Brně dne 8. 1. 2019

Bc. Šimon Pospíšilík
autor práce

POUŽITÁ LITERATŮRA

[1] Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G). *Geoportál ČÚZK* [online]. Český úřad zeměměřický a katastrální: Státní správa zeměměřictví a katastru, 2010, 2010 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz

[2] CHVÁTAL, Petr. Stanovení kapacitní charakteristiky dvouúrovňového pevného přelivu. Brno, 2016. 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

[3] Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01). Brno: VUT, 2006. 120 s.

SEZNAMM TABULEK

Tab. 1. technické údaje o nádrži I. 6
Tab. 2. hydrologické údaje k nádrži I. 6
Tab. 3. technické údaje o nádrži II. 8
Tab. 4. hydrologické údaje k nádrži II. 8
Tab. 5. technické údaje o nádrži III. 9
Tab. 6. hydrologické údaje k nádrži III. 9
Tab. 7. Vstupní hodnoty konstant do generátoru náhodných čísel 21
Tab. 8 Kombinace možné změny návrhových parametrů. 27
Tab. 9 Vstupní zadané parametry. 33
Tab. 10 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž I., N-letost 10 000. 34
Tab. 11 Úspěšnost transformace povodňové vlny N10 000 nádrží I. 34
Tab. 12 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž I., N-letost 1 000. 35
Tab. 13 Úspěšnost transformace povodňové vlny N1 000 nádrží I. 35
Tab. 14 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž I., N-letost 500. 36
Tab. 15 Úspěšnost transformace povodňové vlny N500 nádrží I. 36
Tab. 16 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž I., N-letost 100. 37
Tab. 17 Úspěšnost transformace povodňové vlny N100 nádrží I. 37
Tab. 18 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž I., N-letost 50. 38
Tab. 19 Úspěšnost transformace povodňové vlny N50 nádrží I. 38
Tab. 20 Vstupní zadané parametry. 39
Tab. 21 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 10 000. 40
Tab. 22 Úspěšnost transformace povodňové vlny N10 000 nádrží II. 40
Tab. 23 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 1 000. 41
Tab. 24 Úspěšnost transformace povodňové vlny N1 000 nádrží II. 41
Tab. 25 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 100. 42
Tab. 26 Úspěšnost transformace povodňové vlny N100 nádrží II. 42
Tab. 27 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž II., N-letost 50. 43
Tab. 28 Úspěšnost transformace povodňové vlny N50 nádrží II. 43
Tab. 29 Vstupní zadané parametry. 44
Tab. 30 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 10 000. 45
Tab. 31 Úspěšnost transformace povodňové vlny N10 000 nádrží II. 45
Tab. 32 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 1 000. 46
Tab. 33 Úspěšnost transformace povodňové vlny N1 000 nádrží II. 46
Tab. 34 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 500. 47
Tab. 35 Úspěšnost transformace povodňové vlny N500 nádrží II. 47
Tab. 36 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 100. 48
Tab. 37 Úspěšnost transformace povodňové vlny N100 nádrží II. 48
Tab. 38 Výstupní optimalizované parametry pro nádrž III., N-letost 50. 49
Tab. 39 Úspěšnost transformace povodňové vlny N50 nádrží II. 49
Tab. 40 Návrhové parametry jednoúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže I. 50
Tab. 41 Výsledky transformací povodňových vln jednoúrovňovým přelivem na nádrži I. 50
Tab. 42 Návrhové parametry jednoúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže II. 53
Tab. 43 Výsledky transformací povodňových vln jednoúrovňovým přelivem na nádrži II. 53

Tab. 44 Návrhové parametry jednoúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže III. 55
Tab. 45 Výsledky transformací povodňových vln jednoúrovňovým přelivem na nádrži III. 55
Tab. 46 Návrhové parametry dvouúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže I. 58
Tab. 47 Výstupní optimalizované parametry pro víceúrovňový přeliv nádrže I., N-letost 10 000. .. 58
Tab. 48 Výsledky transformací povodňových vln víceúrovňovým přelivem na nádrži I. 59
Tab. 49 Návrhové parametry dvouúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže II. 62
Tab. 50 Výstupní optimalizované parametry pro víceúrovňový přeliv nádrže II., N-letost 10 000. . 62
Tab. 51 Výsledky transformací povodňových vln víceúrovňovým přelivem na nádrži II. 62
Tab. 52 Návrhové parametry dvouúrovňového bezpečnostního přelivu nádrže II. 65
Tab. 53 Výstupní optimalizované parametry pro víceúrovňový přeliv nádrže III., N-letost 10 000. 65
Tab. 54 Výsledky transformací povodňových vln víceúrovňovým přelivem na nádrži III. 65
Tab. 55 Úspěšnost transformací povodňových vln na nádrži I. 69
Tab. 56 Úspěšnost transformací povodňových vln na nádrži II. 73
Tab. 57 Úspěšnost transformací povodňových vln na nádrži III. 76

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. graf čáry zatopených objemů nádrže I. 7
Obr. 2. hydrogramy povodňových vln k nádrži I. 7
Obr. 3. graf čáry zatopených objemů nádrže II. 8
Obr. 4. hydrogramy povodňových vln k nádrži II....9
Obr. 5. graf čáry zatopených objemů nádrže III....10
Obr. 6. hydrogramy povodňových vln k nádrži III....10
Obr. 7. graf čár zatopených objemů nádrží I, II, III. 11
Obr. 8. hydrogramy povodňových vln N 10 000 nádrží I, II, III. 11
Obr. 9. Rozhraní programu Visual Studio 2017. 17
Obr. 10. Příklad výstupního souboru „optimalizace.csv“. 17
Obr. 11. Příklad výstupního souboru „simulace.csv“ 17
Obr. 12. Schéma lineární interpolace 20
Obr. 13. Rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti 22
Obr. 14. Znázornění generování náhodných návrhových parametrů 22
Obr. 15. schéma algoritmu optimalizačního programu. 24
Obr. 16. schéma simulace transformace povodňové vlny nádrží....26
Obr. 17. Schéma rozptylu změn návrhových parametrů pro MGO. 27
Obr. 18. Příklad okna optimalizačního programu. 29
Obr. 19. Závislost odchylky simulace na délce časového kroku. 30
Obr. 20. Závislost doby řešení na velikosti časového kroku. 31
Obr. 21 Transformace povodňové vln N 10 000 nádrží I. 34
Obr. 22 Transformace povodňové vln N 1 000 nádrží I. 35
Obr. 23 Transformace povodňové vln N 500 nádrží I. 36
Obr. 24 Transformace povodňové vln N 100 nádrží I. 37
Obr. 25 Transformace povodňové vln N 50 nádrží I. 38
Obr. 26 Transformace povodňové vln N 10 000 nádrží II. 40
Obr. 27 Transformace povodňové vln N 1 000 nádrží II. 41
Obr. 28 Transformace povodňové vln N 100 nádrží II. 42
Obr. 29 Transformace povodňové vln N 50 nádrží II. 43
Obr. 30 Transformace povodňové vln N 10 000 nádrží III. 45
Obr. 31 Transformace povodňové vln N 1 000 nádrží III. 46
Obr. 32 Transformace povodňové vln N 500 nádrží III. 47
Obr. 33 Transformace povodňové vln N 100 nádrží III. 48
Obr. 34 Transformace povodňové vln N 50 nádrží III. 49
Obr. 35 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží I.) 51
Obr. 36 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)....51
Obr. 37 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží I.)....52
Obr. 38 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží I.)....52
Obr. 39 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží II.) 53
Obr. 40 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží II.)....54
Obr. 41 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží II.)....54
Obr. 42 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží III.)....55
Obr. 43 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží III.)....56

Obr. 44 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží III.)....56
Obr. 45 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží III.)....57
Obr. 46 Transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží I.)....59
Obr. 47 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží I.)....60
Obr. 48 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)....60
Obr. 49 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží I.)....61
Obr. 50 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží I.)....61
Obr. 51 Transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží II.)....63
Obr. 52 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží II.)....63
Obr. 53 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží II.)....64
Obr. 54 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží II.)....64
Obr. 55 Transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží III.)....66
Obr. 56 Transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží III.)....66
Obr. 57 Transformace povodňové vln N 500 (nádrží III.)....67
Obr. 58 Transformace povodňové vln N 100 (nádrží III.)....67
Obr. 59 Transformace povodňové vln N 50 (nádrží III.)....68
Obr. 60 Porovnání transformace povodňových vln (nádrží I.)....70
Obr. 61 Porovnání transformace povodňové vln N 10 000 (nádrží I.)....70
Obr. 62 Porovnání transformace povodňové vln N 1 000 (nádrží I.)....71
Obr. 63 Porovnání transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)....71
Obr. 64 Porovnání transformace povodňové vln N 100 (nádrží I.)....72
Obr. 65 Porovnání transformace povodňové vln N 500 (nádrží I.)....72
Obr. 66 Porovnání transformace povodňových vln (nádrží II.)....73
Obr. 67 Porovnání transformace povodňové vln N10 000 (nádrží II.)....74
Obr. 68 Porovnání transformace povodňové vln N1 000 (nádrží II.)....74
Obr. 69 Porovnání transformace povodňové vln N100 (nádrží II.)....75
Obr. 70 Porovnání transformace povodňové vln N50 (nádrží II.)....75
Obr. 71 Porovnání transformace povodňových vln (nádrží III.)....76
Obr. 72 Porovnání transformace povodňové vln N10 000 (nádrží III.)....77
Obr. 73 Porovnání transformace povodňové vln N1 000 (nádrží III.)....77
Obr. 74 Porovnání transformace povodňové vln N500 (nádrží III.)....78
Obr. 75 Porovnání transformace povodňové vln N100 (nádrží III.)....78
Obr. 76 Porovnání transformace povodňové vln N50 (nádrží III.)....79

SEZNAM POUŽITÝCH ROVNIC

4.0 Kapacita přelivu
4.1 Energetická přepadová výška
4.2 Účinná šířka přelivu
4.3 Superpoziční princip
4.4 Kapacita spodní výpusti
5.0 Diferenciální rovnice změny objemu vody v nádrži
5.1 Obecná rovnice změny objemu vody v nádrži
5.2 Obecná rovnice změny objemu vody v nádrži dle metody Runge – Kutta
5.3 Konkrétní rovnice změny objemu vody v nádrži dle metody Runge – Kutta
5.4 Lineární interpolace
5.5 Generátor náhodných čísel „seed“
5.6 Generátor náhodných čísel
7.0 Transformace

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CSV	…	Comma-separated values, hodnoty oddělené čárkami
ČHMU	…	Český hydrometeorologický ústav
DMR 5G	…	Digitální model terénu České republiky 5. generace
MGO	…	Multi – gradientní optimalizace
RNG	…	Generátor náhodných čísel
α	…	Coriolisovo kritérium
A	…	konstanta RNG
b	…	šířka přelivu
b_0	…	účinná šířka přelivu
C	…	konstanta RNG
$\Delta L1$	…	posun hodnoty délky přelivné hrany 1
$\Delta L2$	…	posun hodnoty délky přelivné hrany 2
$\Delta H2$	…	posun hodnoty výšky přelivné hrany 2
Δt	…	časový krok
ξ	…	součinitel tvaru pilíře
$\theta(\Delta t^5)$	…	aproximační chyba
g	…	tíhové zrychlení
h	…	přepadová výška
h_0	…	energetická přepadová výška
H	…	energetický spád
H počáteční	…	kóta hladiny vody v nádrži na počátku řešení
H maximální	…	kóta maximální hladiny vody v nádrži
$H1$	…	kóta přelivné hrany 1
$H2$	…	kóta přelivné hrany 2
$m1$	…	součinitel přepadu 1
$m2$	…	součinitel přepadu 2
max. H2	…	maximální hodnota výškového umístění přelivné hrany 2
max. L1	…	maximální hodnota délky přelivné hrany 1
max. L2	…	maximální hodnota délky přelivné hrany 2
min. H2	…	minimální hodnota výškového umístění přelivné hrany 2
min. L1	…	minimální hodnota délky přelivné hrany 1
min. L2	…	minimální hodnota délky přelivné hrany 2
mod M	…	zbytek po celočíselném dělení M
M	…	konstanta „perioda“
n	…	počet zúžení, počet úrovní přelivu,
μ	…	součinitel výtoku
O_i	…	odtok vody z nádrže
$O(V(t))$	…	transformovaný odtok vody z nádrže
O_{max}	…	maximální transformovaný odtok z nádrže
Q	…	kulminační průtok
Q_i	…	přítok vody do nádrže, průtok jednotlivých úrovní přelivu
$Q(t)$	…	přítok vody do nádrže
Q_{max}	…	maximální (kulminační) přítok vody do nádrže

Q_v	...	kapacita spodní výpusti
S_u	...	průtočný průřez
t	...	čas, doba trvání
t_0	...	počáteční čas
v_0	...	přítoková rychlost
V	...	objem vody v nádrži
W	...	objem povodně
x	...	známá souřadnice hledaného bodu
x_0	...	x-ová souřadnice předešlého bodu
x_1	...	x-ová souřadnice následujícího bodu
x_i	...	pseudonáhodné číslo
y	...	hledaná souřadnice hledaného bodu
y_0	...	y-ová souřadnice předešlého bodu
y_1	...	y-ová souřadnice následujícího bodu
Z	...	počáteční zvolená hodnota „seed“

SEZNAM PŘÍLOH

CD Optimalizační program