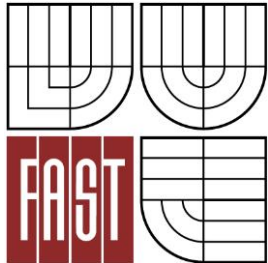




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

VÍCEKRITERIÁLNÍ HODNOCENÍ PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ

MULTICRITERIA ASSESSMENT
FLOOD-PROTECTION MEASURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARIO HALA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROMÍR ŘÍHA, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Mario Hala

Název Vícekriteriální hodnocení protipovodňových opatření

Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2011

Datum odevzdání bakalářské práce 25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

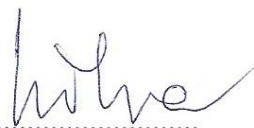
- KUBAL, C. - HAASE, D. - MEYER, V. - SCHEUER, S. 2009. Integrated urban flood risk assessment – adapting a multicriteria approach to a city, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1881-1895, 2009.
- MEYER, V. et al. 2007. GIS-based Multicriteria Analysis as Decision Support in Flood Risk Management. Report T10-07-06. FLOODsite Consortium. <http://www.floodsite.net/>, 2007.
- MEYER, V. - SCHEUER, S. - HAASE, D. 2009. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. Nat. Hazards 48, 17–39, DOI: 10.1007/s11069-008-9244-4, 2009.
- ŘÍHA, J. a kol. 2005. Riziková analýza záplavových území, Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT Brno, Sešit 7, CERM, ISBN 80-7204-404-4. Brno. 2005. p. 286.
- SAATY, T. L. 2008. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. The Analytic Hierarchy/Network Process. Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. VOL. 102 (2), pp. 251–318.
- SCHANZE, J. et al. 2008. CRUE Research Report No I-1: Systematisation, evaluation and context conditions of structural and non-structural measures for flood risk reduction. FLOOD-ERA Joint Report. ERA-NET CRUE. <http://www.crue-eranet.net>, 2008.

Zásady pro vypracování

Předmětem je provedení hodnocení vybraných protipovodňových opatření (PPO) metodami vícekritériální analýzy. Na základě studia domácí a zejména zahraniční literatury budou vybrány vhodné metody vícekritériální analýzy. Ty budou aplikovány na cca 20 PPO a seříděny podle jejich výhodnosti. Součástí práce bude stanovení kritérií pro rozhodování a odvození vah.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací



.....
prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Bibliografická citace

HALA, Mario. *Vícekriteriální hodnocení protipovodňových opatření*. Brno, 2012. 32s., 8s. přílohy. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vyhodnocením protipovodňových opatření, pomocí vícekriteriální analýzy, navržených podniky Povodí Moravy a Odry. Součástí práce je také obecné vyjádření vícekriteriální analýzy a popis jednotlivých kroků.

Abstract

The bachelor thesis is dealing with the flood-protection measures appraisal by multicriteria analysis, proposed by Basin Morava and Odra companies. Part of the work is also common statement of the multicriteria analysis and description of the individual steps.

Klíčová slova

povodeň, kritérium, vícekriteriální analýza, váhy, MAUT, disjunktivní metoda

Key words

flood, criteria, multicriteria analysis, weights, MAUT, disjunctive approach

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. května 2012

.....

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Jaromíru Řihovi, CSc. za jeho odborné připomínky a pomoc při řešení problému v průběhu zpracování práce.

Obsah

1	ÚVOD	3
2	CÍLE A PŘEDMĚT PRÁCE	4
3	OBECNĚ K VÍCEKRITERIÁLNÍ ANALÝZE	5
3.1	Definice problému	5
3.2	Stanovení hodnotících kritérií	6
3.3	Vymezení hodnocených variant	6
3.4	Kvantifikace hodnotících kritérií	7
3.5	Přřazení vah hodnotícím kritériím	8
3.5.1	Hrubé párové porovnání	8
3.5.2	Saatyho metoda	9
3.5.3	Váhy dle významnosti kritérií	11
3.5.4	Vyhodnocení vah kritérií	12
3.6	Stanovení pravidel pro hodnocení	13
3.6.1	Disjunktivní metoda	13
3.6.2	Metoda MAUT	13
3.7	Vyhodnocení pořadí	16
4	Praktická aplikace metody MAUT při prioritizování staveb PPO	17
4.1	Definice problému	17
4.2	Stanovení hodnotících kritérií	17
4.2.1	Definice kritérií	18
4.2.1.1	Ekonomická efektivnost - E_{kon}	18
4.2.1.2	Sociální dopady - S_{oc}	19
4.2.1.3	Environmentální riziko - E_{nv}	19
4.2.1.4	Vhodnost technického a koncepčního řešení vodního díla - T	20

4.2.2	Rozdělení kritérií.....	21
4.2.2.1	Limitující kritéria – Disjunktivní metoda	21
4.2.2.2	Porovnávací kritéria	22
4.3	Vymezení hodnocených variant	23
4.4	Kvantifikace hodnotících kritérií	23
4.5	Přřazení vah hodnotícím kritériím.....	23
4.5.1	Hrubé párové porovnání.....	23
4.5.2	Saatyho metoda	24
4.5.3	Váhy dle významnosti kritérií.....	25
4.5.4	Vyhodnocení vah kritérií	25
4.6	Stanovení pravidel pro vyhodnocení	26
4.6.1	Disjunktivní metoda	26
4.6.2	Metoda MAUT.....	26
4.7	Vyhodnocení pořadí.....	27
5	ZÁVĚR	28
6	ODBORNÁ LITERATURA.....	29
7	VÝPIS POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	30
8	VÝPIS POUŽITÝCH ZKRATEK	31
9	SEZNAM PŘÍLOH.....	32

1 ÚVOD

Mezi obtížně zvladatelné a velmi devastující přírodní katastrofy nejen v naší republice patří povodně. K povodním dochází nejen v České republice, ale i v řadě zemí světa. Mají ničivý dopad jak na obyvatelstvo, tak i na majetek v zaplaveném území. K nejhorším povodním v České republice došlo v červenci 1997, srpnu 2002 a na přelomu března a dubna 2009. Tyto tři povodně si vyžádaly 93 lidské životy a způsobily škody za 142 miliardy Kč. Tyto velké povodně byly ještě doprovázeny menšími povodněmi v letech 1998, 2006 a 2010, které neměly takový ničivý dopad, přesto je v dnešní době řešení otázky protipovodňové ochrany aktuální.

Povodní se rozumí dočasné zaplavení území, které za běžných podmínek není vodou zaplaveno. Přináší povodňové riziko, které označuje kombinace pravděpodobnosti výskytu povodně a možných nepříznivých účinků na lidské zdraví, životní prostředí, kulturní dědictví a hospodářskou činnost, které souvisejí s povodní. V roce 2007 byla vydána směrnice Evropského parlamentu a rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik.

Pro ochranu před povodněmi se začala budovat protipovodňová opatření, která slouží k omezení nebo úplné eliminaci povodňových rizik. Před jejich výstavbou je zapotřebí zhodnotit (zanalyzovat), zda je opatření pro nás výhodné, a má tedy smysl jej vybudovat. Výhody a nevýhody určují různá kritéria a jedná se tedy o vícekritériální analýzu.

2 CÍLE A PŘEDMĚT PRÁCE

Vícekriteriální analýza je způsob porovnání a vyhodnocení více variant, které jsou vyjádřeny různými kritérii. Kritéria slouží jako měřítka pro srovnání a mohou mít různé jednotky. Variantou se v tomto případě může rozumět stavba protipovodňového opatření nebo různý povodňový scénář (N-leté vody). Vícekriteriální analýza se dá řešit více způsoby. Pro tuto práci byly vybrány dvě metody, a to metoda disjunktivní a metoda MAUT.

Disjunktivní metoda je hrubá, ale velmi jednoduchá metoda při vícekriteriálním rozhodování. Velikou výhodou je jednoduchost užití, protože nemusí být určeny váhy pro kritéria. Na druhou stranu je tento postup nevhodný při hledání optimální alternativy. Srovnání mezi vybranými alternativami je tedy nemožné [3].

Metoda MAUT (Multi Attribute Utility Theory) je strukturovaná metodika navržená tak, aby manipulovala s kompromisy mezi více cíly. Výhodou této metody je práce s více druhy jednotek. Jednou z prvních aplikací MAUT byla studie alternativních lokalit pro nové letiště v Mexico City na začátku roku 1970. Mezi faktory, které byly hodnoceny, patřily: náklady, kapacita, přístupová doba na letiště, bezpečnost, sociální problémy a hluk.

Tato práce se skládá ze dvou částí. V první části bude obecně popsána vícekriteriální analýza a ve druhé bude prezentováno její použití na vybraném příkladu.

Hlavním cílem této práce je vyhodnocení 43 protipovodňových opatření (PPO), navržených podniky Povodí Moravy a Odry. V prvním kroku se použije disjunktivní metoda, která z poskytnutých dat vyřadí opatření, které jsou z ekonomického pohledu pro nás nevýhodné, nebo zasahují více do životního prostředí, či z technického hlediska je jejich provedení náročné. Pro ta, která prošla vyřazováním, se použije optimalizace metodou MAUT, které se skládá z normalizace dat a následné vynásobení jednotlivých kritérií příslušnými vahami, které určují důležitost daného kritéria. Po těchto krocích se kritéria variant sečtou a vyhodnotí. Celý výpočet byl nakonfigurován v programu Excel.

3 OBECNĚ K VÍCEKRITERIÁLNÍ ANALÝZE

Důležitým prvkem vícekriteriální analýzy je respektování různých kritérií, která mohou být i protichůdná a mohou ovlivnit výsledný výběr. Předmětem vícekriteriální analýzy je výběr optimální možnosti z variant, které jsou posuzovány. Optimální varianta ale záleží na subjektivním názoru řešitele, protože každý z nás klade důraz na jiné kritérium. Aniž bychom si to uvědomovali, setkáváme se s tímto způsobem úlohy častokrát i v běžném životě

Obecný postup při provádění vícekriteriální analýzy může být proveden z uvedených kroků [3], které budou v následujících kapitolách definovány.

1. Definice problému
2. Stanovení hodnotících kritérií
3. Vymezení hodnocených variant
4. Kvantifikace hodnotících kritérií
5. Přiřazení vah hodnotícím kritériím (pouze MAUT)
6. Stanovení pravidel pro hodnocení
7. Vyhodnocení pořadí, závěrečná doporučení (pouze MAUT)

Tyto kroky jsou společné jak pro disjunktivní metodu, tak i metodu MAUT. Výjimku tvoří 5. krok, ve kterém se udávají váhy jednotlivým kritériím, a 7. krok, ve kterém se vyhodnocuje pořadí variant. Disjunktivní metoda totiž neumožňuje tyto způsoby výpočtů užívat.

3.1 Definice problému

Na začátku použití vícekriteriální analýzy je důležité stanovit a definovat cíle, kterých chceme v projektu dosáhnout. Následně se určí způsob řešení a současně požadavky na potřebná data a jejich rozsah. Rozdělujeme tři základní způsoby užití vícekriteriální analýzy v případě zvládnání povodňových rizik [3]:

- porovnávání a prioritizace lokalit, kde jsou návrhy na umístění protipovodňového opatření (PPO)
- plošné hodnocení rizika posuzovaného území a sestavení souboru map týkající se jednotlivých kritérií,

- pro vybranou lokalitu jsou navrženy různé druhy PPO a je zapotřebí vybrat tu nejvhodnější.

V této práci bude ve 4. kapitole definován a aplikován způsob porovnání a prioritizace lokalit, kde jsou návrhy na umístění PPO.

3.2 Stanovení hodnotících kritérií

Druhým krokem vícekriteriální analýzy je výběr hodnotících kritérií. Pojem kritérium vyjadřuje hledisko při posuzování. Ve vícekriteriální analýze užíváme ta kritéria, jejichž zahrnutím nebo vyloučením může dojít k větším změnám výsledků. V obecném stanovení kritérií nelze vypsát všechna kritéria, a tak jsou vyjádřena podle základního rozdělení:

- kvantitativní (kardinální informace) kritéria mají různé jednotky,
- kvalitativní (ordinální informace) kritéria stanovují pouze, zda je nějaká varianta lepší či horší v daném kritériu než jiná.

Dle publikace [3], by se mělo jednat o tato kritéria:

- ekonomické
- sociální
- environmentální

V souladu se směrnicí [1] by se mělo jednat o souběžné hodnocení rizik těchto kritérií:

- ekonomické riziko
- riziko vyplývající z ohrožení obyvatelstva
- riziko související se zaplavením potenciálních zdrojů havarijního znečištění vody
- riziko vyplývající z ohrožení citlivých objektů (památkově chráněné významné objekty, objekty sociální péče, zdravotnická péče, atd.)

3.3 Vymezení hodnocených variant

Jak je uvedeno v kap. 3.1, lze rozlišit tři základní druhy problémů pro využití vícekriteriální analýzy při práci s povodňovými stavy. Podle způsobu užití se vybírá mezi:

- porovnávání a prioritizace lokalit, kde jsou návrhy na umístění PPO. (Varianta řešení porovnává mezi sebou několik druhů PPO podle různých kritérií a určuje se jejich priorita ve výstavbě.)
- plošné hodnocení rizika posuzovaného území a sestavení souboru map, týkajících se jednotlivých kritérií (Tato varianta řešení posuzuje různé N-leté průtoky a výstupem je soubor map rizik pro různá kritéria.)
- pro vybranou lokalitu jsou navrženy různé druhy PPO a je zapotřebí vybrat tu nejvhodnější (Tato varianta řešení porovnává mezi sebou několik druhů PPO podle různých kritérií a hledá se nejvhodnější řešení.)

Pro názornou ukázkou a vysvětlení principů výpočtů byla vybrána varianta porovnání a prioritizace staveb PPO. Poslouží jako příklad k obecnému vyjádření vícekriteriální analýzy. Posuzovány jsou čtyři blíže neurčené varianty staveb PPO (V_1, V_2, V_3, V_4) s nespécifikovanými kritérii (K_1, K_2, K_3, K_4).

3.4 Kvantifikace hodnotících kritérií

V předchozích kapitolách byly definované varianty a kritéria, podle kterých se posuzuje. V této kapitole jsou varianty a kritéria spojena v celek, který může být vyjádřen tabulkou nebo rastrovým obrázkem. Tabulka 3.1 zobrazuje obecné vyjádření kvantifikace, kde V_k označuje k -tou variantu, K_i i -té kritérium a $u_{k,i}$ porovnání k -té varianty s i -tým kritériem.

Tab. 3.1 Vstupní matice

-	K_1	K_2	K_3	K_4
V_1	$u_{1,1}$	$u_{1,2}$	$u_{1,3}$	$u_{1,4}$
V_2	$u_{2,1}$	$u_{2,2}$	$u_{2,3}$	$u_{2,4}$
V_3	$u_{3,1}$	$u_{3,2}$	$u_{3,3}$	$u_{3,4}$
V_4	$u_{4,1}$	$u_{4,2}$	$u_{4,3}$	$u_{4,4}$

V tabulce 3.2 je příklad matice kritérií K a variant V , které poslouží jako vstupní data, pro názornou ukázkou výpočtů metodou vícekriteriální analýzy

Tab. 3.2 Příklad vstupní matice

-	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
V ₁	3	0,1	1280	10
V ₂	2	0,06	526	7
V ₃	4	0,25	844	3
V ₄	0	0,12	648	8

Výsledkem kvantifikace hodnotících kritérií je tato tabulka, která poslouží jako vstupní matice pro porovnání staveb PPO.

Při řešení způsobem vícekritériální analýzy může dojít k tomu, že jednotlivá kritéria se neshodují v jednotkách. Jedná se tedy o kritéria kvantitativní a kvalitativní (ekonomické-Kč, sociální-obyvatele, environmentální a technické-bodovou škálou).

3.5 Přiřazení vah hodnotícím kritériím

Přiřazení vah jednotlivým hodnotícím kritériím může významně ovlivnit výsledky celkového hodnocení. Z tohoto důvodu patří tato kapitola k nejdůležitějším [3]. Důležitost každého kritéria je vyjádřena vahami, které jsou pro každé kritérium odlišné. Řešitel přiřazující váhu jednotlivým kritériím, má vlastní způsob rozhodování a taktéž vlastní priority, které se následně odrážejí ve výsledcích. Problém s přiřazením vah jednotlivým hodnotícím kritériím lze řešit různými způsoby výpočtu, které nám zajistí rozdílné výsledky vah. V tomto intervalu se snažíme vyčíslit váhu pro jednotlivá kritéria.

3.5.1 Hrubé párové porovnání

Prvním krokem při určení vah jednotlivých kritérií může být hrubé párové porovnání, které poslouží jako základ pro podrobnější Saatyho metodu, která je uvedena v kap. 3.5.2.. Tato metoda je ovlivněna subjektivním názorem pozorovatele a dává přehled o důležitosti jednotlivých kritérií v binárním vyjádření. Při porovnávání dvou kritérií se přiřadí „1“ kritériu, které je z našeho pohledu důležitější, a méně důležitému je přiřazena „0“. Po porovnání se sečtou přiřazené hodnoty a seřazením podle počtu bodů, se určí důležitosti kritérií podle velikosti od nejvyššího s největší důležitostí po nejmenší. V tabulce 3.3 je hodnota h_{ij} binární porovnání i -tého kritéria s j -tým. Při porovnání i -tého kritéria s i -tým není určena žádná hodnota.

Tab. 3.3 Hrubé párové porovnání

-	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	Σ
K ₁	-	h_{12}	h_{13}	h_{14}	$\sum_{j=2}^4 h_1$
K ₂	h_{21}	-	h_{23}	h_{24}	$\sum_{j=1,3,4} h_2$
K ₃	h_{31}	h_{32}	-	h_{34}	$\sum_{j=1,2,4} h_3$
K ₄	h_{41}	h_{42}	h_{43}	-	$\sum_{j=1}^3 h_4$

Výsledkem je součet hodnot i -tých kritérií Σh_i . V následující tabulce 3.4 je příklad hrubého párového porovnání. Porovnávají se postupně kritéria K_1 - K_4 mezi sebou.

Tab. 3.4 Příklad hrubého párového porovnání

-	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	Σ
K ₁	-	1	1	1	3
K ₂	0	-	1	1	2
K ₃	0	0	-	1	1
K ₄	0	0	0	-	0

Po porovnání jednotlivých kritérií je patrné, že kritérium K_1 má ze všech posuzovaných kritérií největší a kritérium K_4 nejmenší důležitost.

3.5.2 Saatyho metoda

Metoda, která byla vytvořena v roce 1980 profesorem Thomasem Saatyem. Jedná se o tzv. metodu kvantitativního párového srovnávání, která využívá hodnotící stupnici. Podle publikace [5] se jedná o devět stupňů důležitosti, kde každý stupeň je slovně definován v tabulce 3.5

Tab. 3.5 Verbální ohodnocení vah [5]

<i>Důležitost</i>	<i>Definice</i>	<i>Vysvětlení</i>
1	rovnocenná kritéria	Dvě činnosti rovnoměrně vedou ke stejnému cíli
2	velmi slabě preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	
3	slabě preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	Zkušenosti a úsudek lehce podporují jednu činnost nad druhou
4	středně preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	
5	silně preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	Zkušenosti a úsudek silně podporují jednu činnost nad druhou
6	silněji preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	
7	velmi silně preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	Činnost je velmi silně upřednostňovaná nad druhou, je to dominance ukázaná v praxi
8	velmi, velmi silně preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	
9	absolutně preferované kritérium <i>i</i> před <i>j</i>	Důkaz stranící jednu činnost nad druhou, je nejvyšším možným stanoviskem tvrzení

Hodnoty párového srovnání se zadávají do tzv. Saatyho matice, kde K_i značí *i*-té kritérium a s_{ij} je prvek matice, který porovnává *i*-té kritérium s *j*-tým kritériem, tak platí:

$$s_{ij} = \frac{1}{s_{ji}} \quad (3.1)$$

Vyjádření Saatyho matice se řídí podle vzorce (3.1). Při porovnávání dvou stejných kritérií, tedy *i*-tého s *i*-tým, je výsledek roven jedné. Následně se vypočítá geometrický průměr G_i jednotlivých kritérií a suma geometrických průměrů ΣG . Podle vzorce (3.2) pak tato hodnota udává váhu kritéria w_i . Obecný způsob vyjádření Saatyho matice je v tabulce 3.6.

$$w_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^4 G_i} \quad (3.2)$$

Tab 3.6 Obecná Saatyho matice

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	G _i	Váhy
K ₁	1	s ₁₂	s ₁₃	s ₁₄	G ₁	w ₁
K ₂	s ₂₁	1	s ₂₃	s ₂₄	G ₂	w ₂
K ₃	s ₃₁	s ₃₂	1	s ₃₄	G ₃	w ₃
K ₄	s ₄₁	s ₄₂	s ₄₃	1	G ₄	w ₄
					ΣG _i	1

Výsledkem jsou váhy všech *i*-tých kritérií w_i , jejichž součet je roven jedné. V následující tabulce (3.7) je použit tento postup na příkladu, jejichž užití vychází z hrubého párového porovnání z tabulky (3.4).

Tab 3.7 Příklad Saatyho matice

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	G _i	Váhy
K ₁	1	3	5	8	3,31	0,59
K ₂	0,3	1	2	4	1,28	0,23
K ₃	0,2	0,5	1	3	0,74	0,13
K ₄	0,1	0,3	0,3	1	0,32	0,06
					5,65	1

3.5.3 Váhy dle významnosti kritérií

Nejjednodušší metoda, u které přiřazujeme číslo v intervalu $\langle 0; 100 \rangle$ (tzv. procentní hodnocení) dle jeho důležitosti, kdy 0 je nejméně důležité a 100 nejdůležitější. Pro vyjádření váhy kritéria je použit vzorec (3.3), kde K_i značí *i*-té kritérium a K_{vi} vyjádření váhy *i*-tého kritéria v procentech.

$$w_i = \frac{K_{wi}}{\sum_{i=1}^4 K_{wi}} \quad (3.3)$$

Podle vzorce (3.3) je hodnota K_{vi} vydělena sumou vah $\sum K_{vi}$ a tato hodnota určuje váhu kritéria. Tato metoda je obecně znázorněna v tabulce (3.8).

Tab. 3.8 Váhy dle významnosti kritérií

Kritéria	Váhy	
	[%]	[-]
K_1	K_{w1}	w_1
K_2	K_{w2}	w_2
K_3	K_{w3}	w_3
K_4	K_{w4}	w_4
	ΣK_{wi}	1

Výstupem jsou váhy w_i , které poslouží pro porovnání a následné určení vah jednotlivých kritérií. V tabulce 3.9 je použit tento postup na příkladu.

Tab. 3.9 Příklad metody vah dle významnosti kritérií

Kritéria	Váhy	
	[%]	[-]
K_1	90	0,50
K_2	50	0,28
K_3	30	0,17
K_4	10	0,06
ΣK_i	180	1

Výsledkem je tabulka 3.9, která poslouží pro orientační přehled o vahách kritérií $K_1 - K_4$.

3.5.4 Vyhodnocení vah kritérií

Při vyhodnocení vah kritérií se může porovnat Saatyho metoda a váhy dle významnosti kritérií. V tabulce 3.10 je obecné vyjádření vyhodnocení, kde K_i vyjadřuje i -té kritérium, $w_{Sa,i}$ váhu i -tého kritéria určené Saatyho metodou, $w_{Va,i}$ váhu i -tého kritéria určené metodou váhy dle významnosti kritérií, w_i váhu i -tého kritéria, která bude použita při následujících výpočtech a Σw_i sumu vah všech kritérií, která se rovná jedné.

Tab. 3.10 Vyhodnocení vah kriterií

Kritéria	Váhy		w_i
	[Sa]	[Va]	[-]
K ₁	$w_{Sa,1}$	$w_{Va,1}$	w_1
K ₂	$w_{Sa,2}$	$w_{Va,2}$	w_2
K ₃	$w_{Sa,3}$	$w_{Va,3}$	w_3
K ₄	$w_{Sa,4}$	$w_{Va,4}$	w_4
		Σw_i	1,00

Tab. 3.11 Př. vyhodnocení vah kriterií

Kritéria	Váhy		w_i
	[Sa]	[Va]	[-]
K ₁	0,59	0,50	0,54
K ₂	0,23	0,28	0,25
K ₃	0,13	0,17	0,15
K ₄	0,06	0,06	0,06
		Σw_i	1,00

Po porovnání hodnot jednotlivých metod se určí výsledná váha w_i , jejíž součet je roven jedné. Výstupem tabulky 3.11 jsou hodnoty vah w_i , které se použijí v kap. 3.6.2.

3.6 Stanovení pravidel pro hodnocení

Stanovením pravidel pro vyhodnocení se rozumí aplikace jedné z dostupných metod výpočtu vícekritériální analýzy. V této práci jsou aplikovány tyto dva způsoby využití:

3.6.1 Disjunktivní metoda

Disjunktivní metoda neboli metoda vylučovací je použita v kap. 4.2.2.1. Jedná se o disjunkci (vyloučení) všech akcí, které nespĺní mezní úroveň v nějakém z vybraných kriterií, které se na začátku výpočtu určí. [3] V poslední době patří mezi nejdůležitější ekonomické kritérium, tedy kolik bude zapotřebí investovat do stavby a jestli bude stavba rentabilní. Druhé kritérium, na které se v dnešní době hledí, je čas, tedy za jak dlouhou dobu bude stavba postavena.

3.6.2 Metoda MAUT

Jednou z výhod metody MAUT je, že lze počítat s různými kritérii, a to bez ohledu na jednotky [3]. Základem této metody je stanovení matice variant a kritérií viz tabulka 3.12.

Tab. 3.12 Matice metody MAUT

-	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
V ₁	$u_{1,1}$	$u_{1,2}$	$u_{1,3}$	$u_{1,4}$
V ₂	$u_{2,1}$	$u_{2,2}$	$u_{2,3}$	$u_{2,4}$
V ₃	$u_{3,1}$	$u_{3,2}$	$u_{3,3}$	$u_{3,4}$
V ₄	$u_{4,1}$	$u_{4,2}$	$u_{4,3}$	$u_{4,4}$
	$u_{1,max}$	$u_{2,max}$	$u_{3,max}$	$u_{4,max}$
	$u_{1,min}$	$u_{2,min}$	$u_{3,min}$	$u_{4,min}$

V tabulce 3.12 je obecné vyjádření matice, kde V značí variantu a K značí kritérium. Hodnota $u_{1,1}$ hodnotí řešenou variantu V₁ s ohledem na kritérium K₁. Po zkompletování celé této matice, se určují hodnoty $u_{1,max}$ a $u_{1,min}$ vyjadřující maximální a minimální hodnotu *i*-tého kritéria ze všech řešených variant.

V tabulce 3.13 je vyjádřen příklad matice metody MAUT s maximálními a minimálními hodnotami kritérií K.

Tab. 3.13 Příklad matice metody MAUT

-	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
V ₁	3	0,1	1280	10
V ₂	2	0,06	526	7
V ₃	4	0,25	844	3
V ₄	0	0,12	648	8
Max.	4	0,25	1280	10
Min.	0	0,06	526	3

V následujícím kroku se použije normalizace, kterou odstraní jednotky a nastaví rozmezí hodnot na <0, 1> dle vzorce (3.4) Tato metoda je aplikovaná v kap. 4.6.2.

$$y_{ki} = \frac{u_{ki} - u_{k,min}}{u_{k,max} - u_{k,min}} \quad (3.4)$$

- $u_{k,min}$ ukazuje minimální hodnotu u_{ki} hodnoceného kritéria *i*
- $u_{k,max}$ ukazuje maximální hodnotu u_{ki} hodnoceného kritéria *i*
- u_{ki} je řešené kritérium *i* při dané variantě *k*

- y_{ki} je optimalizované kritérium i při dané variantě k

V tabulce 3.11 je znázorněna matice normalizace v obecném tvaru, hodnota y_{ki} je vypočítaná dle vzorce (3.4) a v tabulce 3.14 je vyjádřen příklad normalizované matice.

Tab. 3.14. Matice normalizace

-	K_1	K_2	K_3	K_4
V_1	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	$y_{1,4}$
V_2	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,3}$	$y_{2,4}$
V_3	$y_{3,1}$	$y_{3,2}$	$y_{3,3}$	$y_{3,4}$
V_4	$y_{4,1}$	$y_{4,2}$	$y_{4,3}$	$y_{4,4}$

Tab. 3.15 Příklad matice normalizace

-	K_1	K_2	K_3	K_4
V_1	0,75	0,21	1	1
V_2	0,50	0	0	0,57
V_3	1	1	0,42	0
V_4	0	0,32	0,16	0,71

Pro vyhodnocení se do tabulky 3.16 přidají váhy jednotlivých kritérií w_i , které jsou vypsány z tabulky 3.11 a výsledná tabulka pak vypadá následovně:

Tab. 3.16. Výsledná matice

-	K_1	K_2	K_3	K_4	X_i
w_i	w_1	w_2	w_3	w_4	
V_1	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	$y_{1,4}$	X_1
V_2	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,3}$	$y_{2,4}$	X_2
V_3	$y_{3,1}$	$y_{3,2}$	$y_{3,3}$	$y_{3,4}$	X_3
V_4	$y_{4,1}$	$y_{4,2}$	$y_{4,3}$	$y_{4,4}$	X_4

Hodnota X_k se vypočítá dle vzorce (3.5), kde w_i je váha i -tého kritéria a y_{ki} optimalizace kritéria i při dané variantě k .

$$X_k = \sum_{i=1}^4 y_{ki} \times w_i \quad (3.5)$$

Tabulka 3.17 zobrazuje normované hodnoty z tabulky 3.15 a váhy, které byly určeny v tabulce 3.11.

Tab. 3.17 Příklad výsledné matice

-	K_1	K_2	K_3	K_4	X_i
w_i	0,54	0,25	0,15	0,06	
V_1	0,75	0,21	1	1	0,67
V_2	0,50	0	0	0,57	0,30
V_3	1	1	0,42	0	0,85
V_4	0	0,32	0,16	0,71	0,15

Výsledkem jsou hodnoty X_i , které poslouží v následující kapitole jako porovnávací hodnoty při určení priority stavby PPO.

3.7 Vyhodnocení pořadí

Výsledkem vícekritériální analýzy je klasifikace hodnocených variant, dle způsobu řešení. Pro obecný příklad byla použita varianta porovnání a prioritizace lokalit. Výstupem této varianty obecného příkladu je tabulka 3.18.

Tab. 3.18 Vyhodnocení pořadí

V_i	X_i	Pořadí
V_1	0,67	2
V_2	0,30	3
V_3	0,85	1
V_4	0,15	4

Pro vyhodnocení čtyř blíže neurčených variant staveb PPO (V_1, V_2, V_3, V_4) s nespécifikovanými kritérii (K_1, K_2, K_3, K_4) je podle tabulky 3.18 určeno pořadí a v následující kapitole, bude obecné vyjádření použito na reálných objektech.

4 Praktická aplikace metody MAUT při prioritizování staveb PPO

4.1 Definice problému

Cílem projektu je vytřídit a prioritizovat stavby PPO, které byly navrženy v rámci 2. etapy programu Prevence proti povodni na toku řeky Moravy a Odry.

Projekt zahrnuje 43 staveb PPO. Každá ze staveb bude posouzena podle limitů (viz kap. 4.2.1.) na základě Disjunktivní metody a určí se, zdali se bude realizovat. Projekty, které vyhoví v limitních kritériích, budou následovně normalizovány za pomoci metody MAUT. Kritéria staveb PPO se vynásobí odpovídajícími vahami a na konci výpočtové části proběhne vyhodnocení pořadí staveb PPO. V tabulce (4.1) jsou sepsány stavby PPO, které budou posuzovány.

Tab. 4.1 Posuzované stavby PPO

POVODÍ MORAVY	POVODÍ ODRY	
Bečva, Teplice - suchá nádrž	Odra. Ostrava-Přívov, hráz	Úprava Odry, Odry
Morava, Tlumačov PPO	Odra. Ostrava-Hrušov, hráz	Úprava Opavice, Hynčice
Morava, Litovel - obtok	LB Hráz na Vrbické stružce, Bohumín	Úprava Bělé, Písečná
VD Bystřička - rekonstrukce přelivu	Odlehč. rameno na Opavě, Kravaře	Úprava Bílovky, Velké Albrechtice
Morava, Lesnice - ochranná hráz	Odra, Ostrava-Zábřeh, hráz	Úprava Moravice, Břidličná
Morava, Truska - Olšany - ochranná hráz	PB hráz na Odře, PB hráz na Vrbické stružce, Bohumín	Úprava Bílovky, Stará Ves
Třebůvka, Moravičany - hrázování	Odlehčovací rameno na Ščuči, Hrabová	Úprava Lubiny, Košatka
Svitava, Spešov - ochranná hráz	PB Hráz na Opavě, Opava-Vávrovice,	Úprava Husího potoka, Fulnek
Svitava, Blansko, úprava koryta	LB Hráz na Odře, Ostrava-Antošovice,	Úprava Husího potoka, Vlkovice
Morava, Červený Potok - poldr	Hráz na Petrůvce, Petrůvka	Úprava Husího potoka, Dolejší Kunčice
Morava, Olomouc II. etapa	Úprava Hvozdnice, Otice	Úprava v Tichávce, Tichá
Svitava, Letovice - PPO města	Úprava Opavy, Opava	
Morava, Dolní Bohdíkov - hráz LB	Úprava Opavy, Krnov-Kostelec	
Jihlava, Třebíč - PPO II. etapa	Úprava Porubky, Ostrava-Svinov	
Říka, Slavičín - zvýšení kapacity koryta II. etapa	Úprava Ondřejnice, Stará Ves nad Ondřejnicí	
Svratka, Unčín - zvýšení kapacity koryta	Úprava Bělé, Jeseník	

4.2 Stanovení hodnotících kritérií

Podle základního rozdělení určujeme kritéria kvantitativní a kvalitativní, viz kap. 3.2. V této práci byla zvolena tato kritéria:

- Ekonomické kritérium
- Sociální kritérium

a tato kvalitativní kritéria:

- Technická a koncepční řešení vodního díla
- Environmentální dopady

4.2.1 Definice kritérií

V této kapitole jsou definována kritéria, obsažena v projektu 43 staveb PPO. Hodnoty kritérií pro jednotlivé stavby PPO jsou sepsány v příloze 4.1.

4.2.1.1 Ekonomická efektivnost - E_{kon}

Ekonomickou efektivnost v dnešní době považujeme za jeden z nejdůležitějších aspektů při výstavbě PPO. V našem případě nám určuje rentabilitu stavby v rámci škod, které by mohly být způsobeny při povodních. Ekonomickou efektivnost v našem případě rozdělujeme do dvou částí [2]:

- poměrový ukazatel efektivnosti PPO (PU)
- absolutní ukazatel efektivnosti PPO (AU)

Poměrový ukazatel efektivnosti PPO - PU

Ukazuje poměrnou ekonomickou efektivnost investice. Porovnávají se hodnoty rizik, před a po realizaci PPO ku nákladům. V čitateli odečítáme hodnotu kapitalizovaného rizika po realizaci PPO (R_s (s PPO)) od hodnoty rizika před realizací PPO (R_s (bez PPO)), a pak jej dělíme celkovými náklady na realizaci PPO (I). Tato hodnota ukazuje, zda stavba PPO zamezí peněžním ztrátám, které by mohly nastat při povodni. Na příklad: Je-li ukazatel roven 1,5, pak stavba PPO zabrání poškození objektů, jejichž hodnota je jeden a půl násobek investované částky do stavby PPO.

$$PU = \frac{R_s(\text{bez PPO}) - R_s(\text{s PPO})}{I} \quad (4.1)$$

Absolutní ukazatel efektivity PPO - AU

Ukazuje nám efektivnost investice v absolutních ekonomických jednotkách, kde odečítáme celkové náklady na výstavbu PPO (I) a průměrné roční riziko po realizaci PPO od průměrného ročního rizika před realizací PPO.

$$AU = [R_s(\text{bez PPO}) - R_s(\text{s PPO})] - I \quad (4.2)$$

4.2.1.2 Sociální dopady - S_{oc}

Sociální dopady ukazují dvě základní hodnoty, které popisují počet ohrožených obyvatel v dané lokalitě (PAR) a očekávaný počet obětí (LOL), které jsou vyjádřeny postupy [4]. Dlouhodobé průměrné hodnoty $E(PAR)$, $E(LOL)$ vyjádřeny s dobou opakování $N = 5, 20, 100$ a 1000 let.

Pro vyjádření hodnoty $\Delta E(PAR)$ se použije vzorec (4.3), kde $E(PAR)$ bez PPO vyjadřuje očekávaný počet ohrožených obyvatel v době, kdy není postaveno PPO. Hodnota $E(PAR)$ s PPO vyjadřuje očekávaný počet ohrožených obyvatel po postavení PPO. Rozdílem těchto dvou hodnot se získá $\Delta E(PAR)$, které poslouží jako první část sociálního kritéria.

$$\Delta E(PAR) = E(PAR) \text{ bez PPO} - E(PAR) \text{ s PPO} \quad (4.3)$$

Druhé kritérium, vystihující taktéž sociální dopady, se vypočítá dle vzorce (4.4). Hodnota $E(LOL)$ bez PPO určuje očekávaný počet obětí před postavením PPO a $E(LOL)$ s PPO, udává očekávaný počet obětí po postavení PPO

$$\Delta E(LOL) = E(LOL) \text{ bez PPO} - E(LOL) \text{ s PPO} \quad (4.4)$$

4.2.1.3 Environmentální riziko - E_{nv}

Hodnocení environmentálního rizika je ovlivněno subjektivním názorem pozorovatele. Posuzuje se dle jednotlivých aspektů E_{nv} , zohledňujících veškeré dopady, které mohou vzniknout realizací stavby na celé okolní prostředí [2]. Ke každému aspektu je přiřazena váha w_i v intervalu $<0,5; 1>$ dle jeho důležitosti.

$$E_{nv1} - \text{udržování biodiverzity} \quad w_1 = 1$$

$$E_{nv2} - \text{poskytování vodních stanovišť} \quad w_2 = 1$$

$$E_{nv3} - \text{poskytování možnosti rekreace} \quad w_3 = 0,5$$

E_{nv4} – přispívání k estetickému prožitku $w_4 = 0,5$

Jednotlivé aspekty E jsou ohodnoceny podle naplnění kritéria:

Kritérium je naplněno... 1

Kritérium je částečně naplněno... 0

Kritérium nenaplněné... -1

Následně provedeme součet všech ohodnocených aspektů E_{nv} , které jsou vynásobeny svoji váhou, dle vzorce:

$$E_{nv} = \sum_{i=1}^4 w_i E_{nv,i} \quad (4.5)$$

Environmentální riziko E_{nv} dosahuje hodnot v intervalu od $\langle -3; 3 \rangle$ a má své verbální ohodnocení dle Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Verbální hodnocení environmentálního rizika

E_{nv}	Verbální hodnocení
$\langle -3, -2 \rangle$	silně negativní dopad
$\langle -2, -1 \rangle$	spíše negativní dopad
$\langle -1, 1 \rangle$	dopad není významný
$\langle 1, 2 \rangle$	spíše pozitivní dopad
$\langle 2, 3 \rangle$	silně pozitivní dopad

4.2.1.4 Vhodnost technického a koncepčního řešení vodního díla - T

Technické a koncepční řešení se posuzuje dle jednotlivých aspektů, kde se zohledňuje jakým technickým způsobem bude stavba probíhat, jestli nelze použít jiné varianty řešení a jak jsou vhodná atd. [2]. Ke každému aspektu je přiřazena váha w_i v intervalu $\langle 0,5; 1 \rangle$ dle jeho důležitosti:

$T1$ – cíle jsou precizně formulovány a kvantifikovány v souladu s platnými předpisy, zda řešení umožní dosažení cílů řešení - $w_1 = 1$

$T2$ - technické řešení a spolehlivost ochrany před povodněmi odpovídá platným normám, které by měly být považovány za závazné hodnocení úrovně podkladů - $w_2 = 1$

T_3 - technické řešení odpovídá současné úrovni poznání v oboru a způsobu řešení obdobné problematiky ve světě - $w_3 = 0,5$

T_4 - náklady na PPO odpovídají rozsahu plánovaných stavebních prací, popř. studijních prací podle jednotkových cen. - $w_4 = 1$

T_5 - zda splňuje podmínky bezpečnosti. - $w_5 = 0,5$

Jednotlivé aspekty jsou ohodnoceny, podle naplnění kritéria:

Kritérium je naplněno... 1

Kritérium je částečně naplněno... 0

Kritérium nenaplněno... -1

Následně provedeme součet všech ohodnocených aspektů T , které jsou vynásobeny svoji váhou, dle vzorce (4.6)

$$T = \sum_{i=1}^5 w_i T_i \quad (4.6)$$

Technické a koncepční řešení T dosahuje hodnot v intervalu od $\langle -4; 4 \rangle$ a má své verbální ohodnocení dle Tab. 4.3

Tab. 4.3 Verbální hodnocení technického a koncepčního řešení

T	Verbální hodnocení
$\langle -4, -2 \rangle$	nevhodné koncepční a technické řešení, nepodloženo podklady
$(-2, 0)$	málo vhodné řešení, podklady nedostatečného rozsahu
$(0, 2)$	podmíněně vhodné řešení
$\langle 4, 2 \rangle$	vhodné koncepční a technické řešení

4.2.2 Rozdělení kritérií

Kritéria posuzující stavby PPO jsou rozdělena do dvou základních částí:

4.2.2.1 Limitující kritéria – Disjunktivní metoda

Limitující kritéria jsou mezní hodnoty, podle kterých se rozdělují stavby PPO na přípustné a na nepřípustné.

Pro odstranění staveb PPO se použije Disjunktivní metoda neboli metoda vyřazovací, jejíž pomocí se odstraní stavby nespĺňující tato kritéria:

- PU - Poměrový ukazatel ($PU > 1$)
- AU - Absolutní ukazatel ($AU > 0$)
- T - Technické a koncepční řešení ($T > 0$)
- E_{nv} - Environmentální dopady ($E > 0$)

V příloze (4.2) jsou červeně zvýrazněny stavby PPO, které nevyhovely, a v následující tabulce (Tab. 4.4) jsou stavby PPO, které vyhovely limitujícím kritériím, a ty budou v následující kapitole posuzovány.

Tab.4.4 Vybrané stavby PPO

Třebůvka, Moravičany - hrázování	Odra, Ostrava-Hrušov, hráz
Morava, Litovel - obtok	Svitava, Letovice - PPO města
Morava, Olomouc II. etapa	Jihlava, Třebíč - PPO II. etapa
Úprava Opavy, Krnov-Kostelec	Úprava Opavy, Opava km
Úprava Moravice, Břidličná	Úprava Porubky, Ostrava-Svinov km
PB Hráz na Opavě, Opava-Vávrovce	Odlehčovací rameno na Ščučí, Ostrava-Hrabová
Hráz na Petrůvce, Petrůvka u Karviné	LB Hráz na Vrbické stružce, Bohumín stavba č.9
Svratka, Unčín - zvýšení kapacity koryta	Úprava Bílovky, Velké Albrechtice
Morava, Truska - Olšany - ochranná hráz	Úprava Odry, Odry
Morava, Tlumačov PPO	Svitava, Blansko, úprava koryta

4.2.2.2 Porovnávací kritéria

Porovnávací kritéria jsou kritéria, podle kterých budeme určovat u jednotlivých staveb prioritu, a slouží jako základní vstup pro vícekritériální analýzu. Z dostupných informací o projektu vyplývá, že bude hodnoceno celkem 6 kritérií:

- Ekonomické
 - PU - Poměrový ukazatel
 - AU - Absolutní ukazatel
- Sociální
 - PAR - Population at risk (obyvatelstvo v ohrožení)

- *LOL* - Loss of Lives (ztráty na životech)
- Environmentální
- Technické a koncepční řešení

4.3 Vymezení hodnocených variant

Použije se varianta porovnávání a prioritizace lokalit, kde jsou návrhy na umístění PPO. Tato varianta se aplikuje na 20 z obdržných 43 staveb PPO v rámci 2. etapy programu Prevence proti povodni na toku řeky Moravy a Odry.

4.4 Kvantifikace hodnotících kritérií

V této kapitole jsou vybrané varianty, které prošly tříděním pomocí disjunktivní metody, vloženy do tabulky příloha 4.3, kde vytváří vstupní data pro výpočet, který bude probíhat v kapitole 4.6.2

4.5 Přiřazení vah hodnotícím kritériím

Jednotlivým kritériím budou v tomto kroku přiřazeny váhy, které určí důležitost hodnotících kritérií. V kap. 4.2. byla určena pro porovnání tato kritéria:

- Ekonomické ($E_{kon.}$)
- Sociální ($S_{oc.}$)
- Environmentální ($E_{nv.}$)
- Technické a koncepční řešení vodního díla (T)

Pro získání vah byly použity tyto postupy:

4.5.1 Hrubé párové porovnání

Při hrubém párovém porovnání vezmeme každou možnou dvojici kritérií, porovnáme ji a ohodnotíme, buďto 1, když kritérium má větší význam, nebo 0, když má menší. Po ohodnocení sečteme jednotlivé hodnoty daného kritéria a z výsledků vyplývá, které kritérium má větší prioritu.

Tab. 4.5 Hrubé párové porovnání

-	T	E_{nv}	$E_{kon.}$	S_{oc}	Σ
T	-	1	0	0	1
$E_{nv.}$	0	-	0	0	0
$E_{kon.}$	1	1	-	0	2
S_{oc}	1	1	1	-	3

Podle součtu jednotlivých kritérií v tabulce 4.5, je patrné, že největší význam má sociální kritérium a nejmenší environmentální.

4.5.2 Saatyho metoda

Saatyho metoda je citlivější porovnání mezi kritérii, které vychází z párového porovnání. Pro tento výpočet nebyla použita klasická Saatyho tabulka (Tab. 3.5) s hodnotami v intervalu $\langle 1; 9 \rangle$, ale tabulka 4.6, která má pouze 5 stupňů důležitosti. Porovnávají se kritéria i a j a uděluje se jim hodnota v intervalu $\langle 1; 5 \rangle$ a druhá hodnota je dopočítaná dle vzorce (3.1)

Tab. 4.6 Verbální hodnocení Saatyho matice v aplikaci

Hodnota	Definice
1	Stejná váha
2	Mírně důležitější
3	Více důležité
4	Velmi důležité
5	Absolutně dominující

Následně se vypočítá geometrický průměr kritérií G_i a součet všech geometrických průměrů ΣG . V posledním kroku dle vzorce (3.2) se provede normalizace všech geometrických průměrů, kdy G_i vyjadřuje jednotlivou hodnotu váhy kritéria a ΣG sumu všech geometrických průměrů kritérií.

Tab. 4.7 Saatyho matice

-	T	E_{nv}	$E_{kon.}$	S_{oc}	G_i	Váhy
T	1,00	2,22	0,60	0,36	0,832	0,173
$E_{nv.}$	0,45	1,00	0,30	0,23	0,418	0,087
$E_{kon.}$	1,67	3,33	1,00	0,45	1,258	0,262
S_{oc}	2,78	4,44	2,22	1,00	2,288	0,477
				ΣG	4,795	1,000

Výsledky Saatyho matice budou použity v tabulce 4.9 pro výsledné určení vah kritérií.

4.5.3 Váhy dle významnosti kritérií

Při použití této metody se přiřazovaly kritériím hodnoty z intervalu $\langle 0; 100 \rangle$ dle důležitosti. Součtem všech hodnot kritérií se jednotlivá kritéria vydělila. Výsledkem vah kritérií je tabulka (Tab. 4.8) Výsledné váhy se vypočítají dle vzorce (3.3)

Tab. 4.8 Váhy dle významnosti kritérií

Kritéria	Váhy	
	[%]	[-]
T	45	0,191
$E_{nv.}$	20	0,085
$E_{kon.}$	75	0,319
S_{oc}	95	0,404
Σ	235	1

Tento způsob výpočtu určil další hodnoty vah kritérií, které budou posuzovány v tabulce 4.9 pro určení výsledných vah kritérií.

4.5.4 Vyhodnocení vah kritérií

Pro určení vah použijeme porovnání mezi Saatyho metodou a metodou vah dle významnosti kritérií dle tabulky 4.9

Tab. 4.9 Vyhodnocení vah kritérií

Kritéria	Váhy		w_i
	[S_a]	[V_a]	[$-$]
T	0,191	0,173	0,173
$E_{nv.}$	0,085	0,087	0,087
$E_{kon.}$	0,319	0,262	0,262
S_{oc}	0,404	0,477	0,477

V této práci je rozděleno sociální kritérium na *PAR* (Population At Risk) a *LOL* (Loss Of Lives) a ekonomické kritérium se dělí na *AU* (Absolutní ukazatel) a *PU* (Poměrový Ukazatel). Z tohoto důvodu je nutné rozdělit váhy těchto kritérií na dvě části. Ve výsledku jsou váhy určeny dle Tab. (4.10).

Tab. 4.10 Výsledné váhy kritérií

Kritéria		Váhy		
		[$-$]	[$\%$]	[$-$]
T		0,173	100	0,173
$E_{nv.}$		0,087	100	0,087
$E_{kon.}$	AU	0,262	70	0,184
	PU		30	0,079
S_{oc}	PAR	0,477	30	0,143
	LOL		70	0,334

4.6 Stanovení pravidel pro vyhodnocení

V tab. (4.4) jsou vypsány akce PPO, u kterých jsou vyjádřeny hodnoty jednotlivých kritérií. Pro následné vyhodnocení se použijí tyto postupy:

4.6.1 Disjunktivní metoda

- viz. kapitola 4.2.2.1

4.6.2 Metoda MAUT

- zkompletování matice metody MAUT a vyjádření maximálních a minimálních hodnot jednotlivých kritérií K_i ,

- normalizací, která se aplikuje podle vzorce (3.4), se převedou všechna kritéria do intervalu $<0; 1>$. Normalizace je znázorněna v příloze (4.4).
- vynásobení jednotlivých kritérií příslušnými vahami. Znázorněno v příloze (4.5)

4.7 Vyhodnocení pořadí

Pro vyhodnocení pořadí se porovná celkový součet kritérií dané varianty, která byla vynásobena vahami v kapitole (4.6.2.). Seřazením PPO od nejvyšší hodnoty v součtu po nejnižší je docíleno vyhodnocení pořadí, které je znázorněno v Tab. (4.11)

Tab. 4.11 Vyhodnocení pořadí PPO

Název akce	Suma	Pořadí
<i>Třebůvka, Moravičany - hrázování</i>	0,4313	3
<i>Morava, Litovel - obtok</i>	0,8098	1
<i>Morava, Olomouc II. etapa</i>	0,7908	2
<i>Úprava Opavy, Krnov-Kostelec km 73,930-74,300</i>	0,3550	4
<i>Úprava Moravice, Břidličná km 76,854-77,007</i>	0,0515	20
<i>PB Hráz na Opavě, Opava-Vávrovce, km 42,900-43,900</i>	0,2678	14
<i>Hráz na Petrůvce, Petrůvka u Karviné km 2,000-4,600 a 9,900-11,500</i>	0,3259	5
<i>Svratka, Unčín - zvýšení kapacity koryta</i>	0,2694	12
<i>Morava, Truska - Olšany - ochranná hráz</i>	0,1798	19
<i>Morava, Tlumačov PPO</i>	0,2465	16
<i>Odra. Ostrava-Hrušov, hráz 12,700-14,950</i>	0,3065	8
<i>Svitava, Letovice -PPO města</i>	0,1948	18
<i>Jihlava, Třebíč - PPO II. etapa</i>	0,3061	9
<i>Úprava Opavy, Opava km 33,600 - 34,700</i>	0,2704	11
<i>Úprava Porubky, Ostrava-Svinov km 0,900-7,200</i>	0,3196	6
<i>Odlehčovací rameno na Ščučí, Ostrava-Hrabová km 3,977</i>	0,2495	15
<i>LB Hráz na Vrbické stružce, Bohumín stavba č.9 km 0,000-2,000</i>	0,3177	7
<i>Úprava Bílovky, Velké Albrechtice km 6,900-8,600</i>	0,2688	13
<i>Úprava Odry, Odry km 87,000-90,300</i>	0,2398	17
<i>Svitava, Blansko, úprava koryta</i>	0,2913	10

Toto vyhodnocení může být ovlivněno změnami v posuzování vah kritérií. Pro příklad je uveden v příloze 4.6 výpočet, kde se prohodil poměr vah mezi poměrovým ukazatelem *PU* a absolutním ukazatelem *AU*. Zároveň byl prohozen poměr vah mezi ohroženými obyvateli *PAR* a ztrátami na životech *LOL*. Rozdílné hodnoty byly červeně zvýrazněny.

5 ZÁVĚR

V předložené bakalářské práci bylo na základě zajištěných podkladů vypočteno vícekriteriální hodnocení protipovodňových opatření. Řešeným projektem bylo vyhodnocení a prioritizace 43 staveb PPO v rámci druhé etapy programu prevence proti povodni na toku řeky Moravy a Odry.

Jako vstup do této práce posloužila příloha č. 1, kde jsou znázorněny jednotlivé stavby PPO, které tvoří hodnocené varianty, a jednotlivá kritéria. V této práci nebyly ohodnoceny všechny stavby, ale jen ty, které prošly disjunktivní metodou, a proto bylo posuzováno pouze 20 staveb PPO. Výstupem je tabulka č. 4.11, kde je vypočítané hodnocení jednotlivých staveb PPO.

Bakalářská práce byla vypracována na základě skutečných dat a celý výpočet proběhl podle metod vícekriteriální analýzy, ale pro její přesnější výsledky by bylo dobré znovu přezkoumat projekty a jednotlivé výkresy návrhu staveb PPO. Výpočet vícekriteriální analýzy ovlivňují hlavně váhy jednotlivých kritérií. Jakým způsobem ovlivňují pořadí staveb, by se dalo určit za pomoci citlivostní analýzy, která určuje vliv rozdělení vah na pořadí staveb PPO.

Velikou nevýhodou metody MAUT je případ, kdy se do vypočítané matice přidá nová varianta *V*, která oproti ostatním variantám vykazuje výrazně větší ukazatele v některých kritériích. V tomto případě se celý výpočet musí opakovat znovu, ale může dojít k úplným změnám v pořadí. Pomocí metody MAUT se tedy vyhodnotí a stanoví priorita variant, ale jen na základě jejich ukazatelů.

.....

Mario Hala

6 ODBORNÁ LITERATURA

- [1] ES 2007. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23.října 2007 o vyhodnocování a zvládnání povodňových rizik.
- [2] METODIKA. 2005. Metodika pro posuzování protipovodňových opatření navržených do II. etapy programu prevence před povodněmi. ČVUT Praha, 06/2005.
- [3] MEYER, V. et al. 2007. GIS-based Multicriteria Analysis as Decision Support in Flood Risk Management. Report T10-07-06. FLOODsite Consortium. <http://www.floodsite.net/>, 2007.
- [4] ŘÍHA, J. a kol. 2005. Riziková analýza záplavových území, Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT Brno, Sešit 7, CERM, ISBN 80-7204-404-4. Brno. 2005. p. 286.
- [5] SAATY, T. L. 2008. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. The Analytic Hierarchy/Network Process. Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. VOL. 102 (2), pp. 251–318.

7 VÝPIS POUŽITÝCH SYMBOLŮ

AU	absolutní ukazatel
E_{nv}	environmentální kritérium
E_{kon}	ekonomické kritérium
$E(LOL)$ bez PPO	očekávaný počet obětí před postavením PPO
$E(LOL)$ s PPO	očekávaný počet obětí po postavení PPO
$E(PAR)$ bez PPO	očekávaný počet ohrožených obyvatel před postavením PPO
$E(PAR)$ s PPO	očekávaný počet ohrožených obyvatel po postavení PPO
G_i	geometrický průměr i -tého kritéria
h_{ij}	binární porovnání i -tého kritéria s j -tým kritériem
I	celkové náklady na realizaci PPO
K	kritérium
K_i	i -té kritérium
K_{wi}	procentuální váha i -tého kritéria
LOL	loss of lives (ztráty na životech)
PAR	population at risk (obyvatelstvo v ohrožení)
PU	poměrový ukazatel
$R_s(\text{bez PPO})$	hodnota kapitalizovaného rizika před realizací PPO
$R_s(\text{s PPO})$	hodnota kapitalizovaného rizika po realizaci PPO
S_a	Saatyho metoda
S_{oc}	sociální kritérium
s_{ij}	prvek matice, porovnávající i -té kritérium s j -tým kritériem
s_{ji}	prvek matice, porovnávající j -té kritérium s i -tým kritériem
T	technická a koncepční řešení vodního díla
u_{ki}	řešené kritérium i při dané variantě k
$u_{k,max}$	maximální hodnota řešeného kritéria i
$u_{k,min}$	minimální hodnota řešeného kritéria i
V	varianta
V_a	váhy dle významnosti kriterií
w_i	váha i -tého kritéria

$w_{Sa,i}$	váha i -tého kritéria dle Saatyho metody
$w_{Va,i}$	váha i -tého kritéria dle váhy významnosti kritérií
X_k	výsledná váha k -té varianty
$y_{k,i}$	porovnání k -té varianty s i -tým kritériem
ΣG_i	suma geometrických průměrů jednotlivých kritérií
Σh_i	suma binárních hodnocení i -tého kritéria
ΣK_{wi}	suma procentuálních vah všech kritérií
$\Delta E(LOL)$	rozdíl očekávaného počtu mrtvých před a po realizaci stavby PPO
$\Delta E(PAR)$	rozdíl ohrožených obyvatel před a po realizaci stavby PPO

8 VÝPIS POUŽITÝCH ZKRATEK

PPO	protipovodňové opatření
MAUT	multi attribute utility theory

9 SEZNAM PŘÍLOH

TABULKY

T.1 Vstupní matice

T.2 Vyloučení variant staveb PPO disjunktivní metodou

T.3 Posuzované stavby

T.4 Normalizovaná matice

T.5 Normalizovaná matice po vynásobení vahami

T.6 Porovnání dvou variant rozdělení vah