



Akademie věd
České republiky

Příloha B

Teze disertace
k získání vědeckého titulu "doktor věd"
ve skupině věd "Technické vědy"

Hodnocení bezpečnosti a poruch hydrotechnických staveb s využitím rizikové analýzy

Komise pro obhajoby doktorských disertací v oboru
„Aplikovaná a teoretická mechanika“

Jméno uchazeče: Jaromír Říha

Pracoviště uchazeče: Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební

Místo a datum: Brno, 25. 11. 2024

OBSAH

1.	ÚVOD, MOTIVACE	3
2.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE, VĚDECKÉ PŘÍNOSY	4
2.1	CÍL PRÁCE	4
2.2	PŘÍSPĚVEK K VĚDECKÉMU SMĚRU	4
3.	HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI HYDROTECHNICKÝCH STAVEB 5	
3.1	POSOUZENÍ PODLE STUPNĚ BEZPEČNOSTI	6
3.2	POSOUZENÍ METODOU PODLE MEZNÍCH STAVŮ	6
3.3	POUŽITÍ PRO HODNOCENÍ HYDROTECHNICKÝCH STAVEB	8
3.4	DISKUZE	9
4.	METODIKA A NÁSTROJE RIZIKOVÉ ANALÝZY	10
4.1	VYMEZENÍ POJMU RIZIKA	10
4.2	PŘEDMĚT A CÍLE RIZIKOVÉ ANALÝZY HYDROTECHNICKÝCH STAVEB	11
4.3	KONCEPČNÍ PŘÍSTUPY	12
4.4	KVALITATIVNÍ ANALÝZA	13
4.5	SEMIKVANTITATIVNÍ ANALÝZA	15
4.6	KVANTITATIVNÍ ANALÝZA	21
4.6.1	Riziko v materiální sféře	21
4.6.2	Riziko vzniku ztrát na životech a zdraví obyvatel	25
4.6.3	Přijatelné riziko	27
4.6.4	Analýza ALARP	28
4.7	ROZŠÍŘENÁ ANALÝZA RIZIKA	29
5.	ZÁVĚR	30
6.	SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	32
6.1	LITERATURA CITOVANÁ V TEZÍCH	32
6.2	CITOVANÉ TECHNICKÉ NORMY	34
6.3	METODICKÉ POKYNY, SMĚRNICE A DALŠÍ PODKLADY	34
6.4	SOUPIS SOUVISEJÍCÍCH PRACÍ AUTORA	35
7.	RESUMÉ	38

1. ÚVOD, MOTIVACE

Pod pojmem "hydrotechnické stavby" se rozumí stavby související s vodními toky. Jde o jezy, přehrady, vodní elektrárny, vodní cesty včetně souvisejících objektů, ochranné hráze, apod. Zvláštní skupinou těchto staveb jsou tzv. "určená vodní díla" vymezená vyhláškou č. 471/2001 Sb. o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly (VD). Jde o díla ke vzdouvání nebo zadržování vody. Jejich porušením může vzniknout povodňová vlna (tzv. zvláštní povodeň), která může mít při postupu údolím pod hrází či územím za hrází katastrofické následky.

Druhy poruch hydrotechnických staveb a okolnosti jejich vzniku byly zpracovávány řadou autorů zabývajících se návrhem, výstavbou a provozem vodních děl. Výsledky těchto prací často vedly k postupnému přehodnocení předpisů vztahujících se k bezpečnosti a provozu těchto děl. Diskuzi vyvolává metodika posuzování, kdy "tradičním" postupem je posuzování podle stupně bezpečnosti, současné předpisy reflektují výstižnější postup využívající podmínek mezního stavu.

Prvořadým úkolem vlastníků hydrotechnických staveb je zajistit jejich vysokou bezpečnost a spolehlivost. Přitom je zřejmé, že absolutní jistotu, že nedojde k poruše díla, nelze prakticky zajistit. Zvyšování bezpečnosti nových i existujících děl je obvykle možné pouze za cenu značných nákladů. Přitom užítky z VD řádově převažují nad škodami způsobenými jejich poruchami. Snahou je nalézt objektivní kritéria pro stanovení optimální bezpečnosti a spolehlivosti těchto staveb. Pro řešení této problematiky jsou v posledních dekádách preferovány metody rizikové analýzy založené na klasifikaci zasaženého území a objektů, na metodách matematického modelování, teorii pravděpodobnosti a na hodnocení dopadů a odpovídajících škod.

Světové trendy směřují ke snižování rizika z existence technických děl, hydrotechnické stavby nevyjímaje. Vyplývá to z obecné neochoty společnosti přijímat „nedobrovolná“ společenská rizika spojená s katastrofickými událostmi. Ukazuje se, že problematika hodnocení povodňových rizik je, zejména v zemích Evropské unie, vysoce rozpracovaná a implementovaná v praxi. Systematické a komplexní využití rizikové analýzy záplavových území přirozených povodní je zavedeno v souladu s požadavky evropské směrnice [A]. Hodnocení poruch, bezpečnosti a rizika hydrotechnických staveb je celosvětově stále aktuální. V řadě zemí je hodnocení bezpečnosti hydrotechnických staveb s využitím rizikové analýzy zapracováno do národních předpisů, např. [CFBR, 2015], [Guidelines, 2023].

V České republice (ČR) při hodnocení bezpečnosti a spolehlivosti hydrotechnických staveb převažují tradiční metody hodnocení pomocí stupně bezpečnosti popř. metodou dílčích součinitelů [ČSN EN 1997], [Říha, Špano, 2016a,b]. Formalizované postupy rizikové analýzy a rizikového managementu jsou v našich podmínkách využívány pouze ojediněle a spíše výjimečně. Předkládaná práce se zaměřuje na využití metod rizikové analýzy při hodnocení poruch a bezpečnosti hydrotechnických staveb. V práci jsou stručně zmíněny tradiční metody používané pro posuzování bezpečnosti těchto staveb a rozpracovány metody pro jejich hodnocení pomocí rizikové analýzy.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE, VĚDECKÉ PŘÍNOSY

2.1 Cíl práce

Cílem práce je představit a analyzovat možné způsoby využití metod rizikové analýzy (RA) v hydrotechnice. Snahou je nalézt a ověřit vhodné nástroje pro hodnocení bezpečnosti hydrotechnických staveb soudobými metodami rizikové analýzy. Jde jak o kvalitativní hodnocení, tak o metody semikvantitativní a kvantitativní. Vybrané metody analýzy rizik jsou podrobněji rozpracovány pro řešení konkrétních praktických úloh hodnocení bezpečnosti vodních děl.

2.2 Příspěvek k vědeckému směru

Předkládaná práce vychází z více než dvacetileté vědeckovýzkumné a odborné činnosti autora a jeho týmu v oblasti bezpečnosti a spolehlivosti hydrotechnických staveb a prosazování a aplikování rizikové analýzy v hydrotechnice. Základními souhrnnými pracemi zabývajícími se rizikovou analýzou záplavových území a přehrad jsou [Říha a kol. 2005, 2008]. Souběžně byly publikovány práce, které měly za cíl popularizovat a zavádět principy rizikové analýzy do vodohospodářské praxe [Drbal a kol. 2005, 2008], [Dráb, Říha 2010]. Významnými výstupy vědeckovýzkumné práce autora z období do roku 2012 jsou:

- Participace na vypracování metodik [D] pro posuzování protipovodňových opatření navržených do II. etapy programu „prevence před povodněmi“. Tato metodika byla vypracována ve spolupráci s kolektivem pracovníků ČVUT v Praze. Vycházela z postupů vícekritériální optimalizace založené na rizikové analýze záplavového území. V roce 2014 byly navržené postupy modifikovány pro hodnocení rekonstrukcí vodních děl přehradního typu [E]. Výsledky výzkumných prací byly kolektivem pracovníků systematicky publikovány [Drbal a kol., 2005, 2008], [Fošumpaur a kol., 2007], [Dráb, Říha, 2008, 2010], [Duchan a kol., 2020].
- Významná participace na implementaci Směrnice evropského parlamentu a rady 2007/60/ES [A] vypracované ve spolupráci s ČVUT a VÚV T.G.M. [Drbal 2008, 2011], která byla v roce 2012 završena metodikou [C] a její aktualizací.
- Vypracování hodnotících zpráv [Říha, 2024] pro Evropskou komisi o implementaci Směrnice 2007/60/ES [A].

Následovaly práce zabývající se dílčími problémy bezpečnosti a spolehlivosti hrázových systémů, jako je modelování porušení hrází v důsledku přelítí [Jandora, Říha, 2008a,b], [Alhasan a kol., 2015, 2016], [Duchan a kol., 2019], [Říha, Kotaška, 2019], [Říha a kol., 2020b] a vnitřní eroze [Petrula a kol., 2018], [Říha a kol., 2020a], [Petrula, Říha, 2022], [Říha, Petrula, 2023]. Ztráty na lidských životech v důsledku zaplavení území byly řešeny v práci [Brázdová, Říha, 2014]. Multikritériální přístup zahrnující rizikovou analýzu obsahuje studie [Duchan a kol., 2022]. Výsledky výzkumů byly také aplikovány v řadě technických studií.

3. HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI HYDROTECHNICKÝCH STAVEB

Bezpečnost a spolehlivost vodních děl se tradičně posuzuje podle stupně bezpečnosti nebo postupem podle mezních stavů (metoda dílčích součinitelů).

Zavedení stupně bezpečnosti sleduje kompenzaci nejistot vstupujících do výpočtu. Přitom v našich, ale i v zahraničních předpisech, nejsou často požadované stupně bezpečnosti vázány na očekávané nejistoty, ale na vybrané zatěžovací stavy. Nevýhodou postupu je nemožnost diferenciací nejistot jednotlivých vstupních parametrů na straně zatížení a odolnosti. Zahrnout vybrané nejistoty do hodnocení umožňuje zavedení tzv. plovoucích stupňů bezpečnosti [Kreuzer, Leger, 2013].

V metodě podle mezních stavů jsou jednotlivým faktorům přiřazeny dílčí součinitele spolehlivosti zahrnující nejistoty příslušných vstupů.

Hodnocení se provádí pro mezní stavy odpovídající jednotlivým scénářům porušení. U hydrotechnických staveb jsou definovány s ohledem na specifika konkrétního díla a způsob jeho porušení (tab. 3.1) [Říha, Špano a kol., 2016b].

Tab. 3.1 Přehled typů porušení určených vodních děl a jejich částí

Typ poruchy *)		Detail typu poruchy	Následek
Usmýknutí	G	Smyková plocha konstrukcí, po základové spáře, podloží konstrukce,	Vytvoření smykové plochy a posun části vodního díla.
		- na svahu nádrže, zdrže.	Sesuv, přelití hráze
Překlopení	G	Překlopení konstrukce či její části.	Ztráta stability.
Nadzvednutí	G	Nadzvednutí konstrukce.	Usmýknutí konstrukce.
Prolomení	G/L	Prolomení v důsledku vzlaku.	Vnitřní eroze, překlopení.
Filtrační deformace	G	Souvislá průsaková cesta.	Propad konstrukce.
	L	Sufoze/ztekucení, eroze.	Lokální výnos materiálu.
Povrchová eroze	G	Dlouhodobé přelévání.	Úplná destrukce.
	L	Krátkodobé přelévání nízké intenzity.	Místní porušení hráze.
Překročení pevnosti	L	Překročení pevnosti materiálu vzdouvací konstrukce/podloží.	Vznik trhlin.
Nepřípustná přetvoření	P	Vzájemné posuny částí konstrukce, konstrukce a podloží.	Porušení těsnících prvků, zvýšené průsaky.
Nadměrný průsak	P	Nadměrné průsaky tělesem hráze, podloží či okolo funkčních objektů.	Nemožnost napustit nádrž.
Porucha funkčních objektů	P	Ucpání či nefunkčnost spodních výpustí, bezpečnostního přelivu (led, plávi, sedimenty).	Přelití, zvláštní povodeň, omezení manipulace.
Degradace materiálů konstrukce.	P	Degradace betonů, zdiva, pláště, těsnění spár, zatékání do tělesa hráze.	Obnažení výztuže, změna vlastností materiálů.
Degradace podloží	P	Filtrační deformace v podloží, degradace injekční clony.	Zvyšování vzlaků na konstrukci, filtrační def.

*) G – globální, L – lokální, P - ztráta použitelnosti

3.1 *Posouzení podle stupně bezpečnosti*

Kvantifikátorem bezpečnosti je v tomto případě stupeň bezpečnosti:

$$SF = \frac{R_k}{E_k}, \quad (3.1)$$

kde R_k je charakteristická hodnota odolnosti a E_k je charakteristická hodnota účinku zatížení (kapitola 3.2). V některých případech lze na základě bilance účinků zatížení vyjádřit stupeň bezpečnosti přímo (explicitně), mnohdy vede bilance účinků zatížení na nepřímé (implicitní) vyjádření. Stupeň bezpečnosti je pak obvykle chápán jako rezerva odolnosti vůči stavu mezní rovnováhy. Obecně platí, že konstrukce je spolehlivá, pokud je $SF > 1$. Nejistoty ve vstupních veličinách a další rezervy jsou vyjádřeny požadavkem na mezní hodnotu SF definovanou v příslušných normách pro konkrétní konstrukci a zatěžovací stavy [Říha, Špano a kol., 2016b].

3.2 *Posouzení metodou podle mezních stavů*

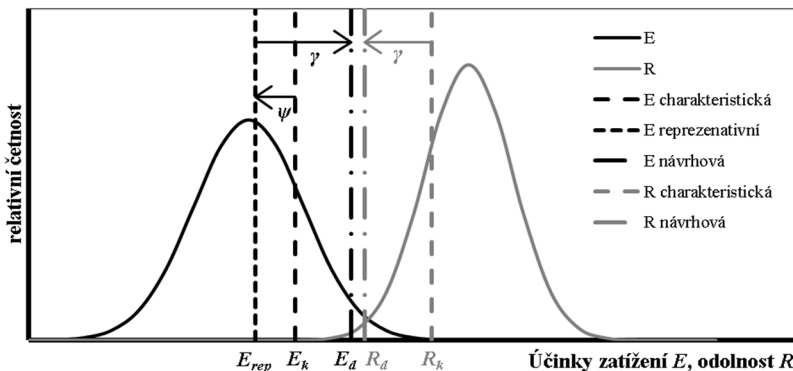
Postup hodnocení bezpečnosti podle mezních stavů patří dle [Votruba, Heřman, 1993] k tzv. „pravděpodobnostním metodám“ 1. úrovně. Při návrhu konstrukcí podle mezních stavů doporučuje ČSN EN 1990 použití metody dílčích součinitelů, alternativně za použití plně pravděpodobnostních metod hodnocení spolehlivosti konstrukcí. Cílem je dosažení společensky únosné pravděpodobnosti ztráty únosnosti navrhované konstrukce. Stanovit pravděpodobnost ztráty únosnosti však ve většině případů není jednoduché, mnohdy není ani možné. U hydrotechnických staveb není tento postup dosud běžně používán.

Principem metody dílčích součinitelů je zohlednění nejistot vstupních veličin s využitím tzv. dílčích součinitelů spolehlivosti. Stanovení účinku zatížení i únosnosti vyžaduje aplikaci modelu konstrukce a modelu zatížení. Vstupy se předpokládají v podobě reprezentativních hodnot zatížení a charakteristických hodnot (dolní index k) vlastností materiálů a geometrických údajů, které lze získat za pomoci norem, laboratorními zkouškami, měřením in-situ, apod. Aplikací dílčích součinitelů spolehlivosti se charakteristické hodnoty převedou na hodnoty návrhové (dolní index d). Obecným principem je posílení vlivu účinků zatížení a oslabení odolnosti konstrukce. Pokud je návrhová odolnost konstrukce větší nebo rovna návrhovému zatížení, lze prohlásit, že pravděpodobnost ztráty stability konstrukce je společensky únosná. Nelze ale stanovit pravděpodobnost poruchy, což je omezení metody především u významných konstrukcí. Princip metody je naznačen na obr. 3.1, přehled vstupů a typů dílčích součinitelů je uveden na obr. 3.2.

Hodnoty dílčích součinitelů spolehlivosti γ doporučují normy pro konkrétní kombinace zatížení, vyšetřované mezní stavy a návrhové přístupy. Přehled doporučených součinitelů je uveden v práci [Říha, Špano a kol., 2016b].

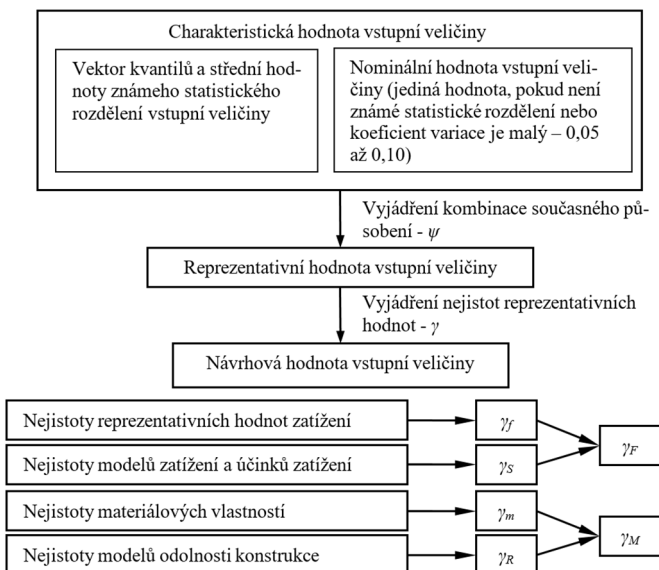
Vlastní výpočet spolehlivosti je deterministický pro každý mezní stav. ČSN EN 1990 rozlišuje dvě hlavní skupiny mezních stavů:

- mezní stavy únosnosti (mají vazbu na únosnost konstrukce),
- mezní stavy použitelnosti (vazba na funkci konstrukce za běžného užívání).



Obr. 3.1 Princip metody dílčích součinitelů

Hranice mezi skupinami mezních stavů nejsou ostré a okolnosti klasifikace mezního stavu se dohodnou pro konkrétní projekt zúčastněnými stranami. Vymezení jednotlivých mezních stavů uvádí ČSN EN 1990.



Obr. 3.2 Přehled vstupů a dílčích součinitelů spolehlivosti dle ČSN EN 1990

Použití metody dílčích součinitelů se omezuje na ověřování mezních stavů u konstrukcí, které jsou vystaveny statickému zatížení včetně případů, kdy jsou dynamické účinky stanoveny pomocí ekvivalentních kvazistatických zatížení a dynamických součinitelů, včetně zatížení větrem a dopravou. Obecné tvary podmínky pro posouzení konstrukce metodou dílčích součinitelů jsou pro posouzení MS únosnosti EQU, UPL (ztráta rovnováhy tuhého tělesa):

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab} , \quad (3.2)$$

pro posouzení mezního stavu únosnosti STR, GEO, HYD (vnitřní porucha, rozhodující je pevnost materiálu):

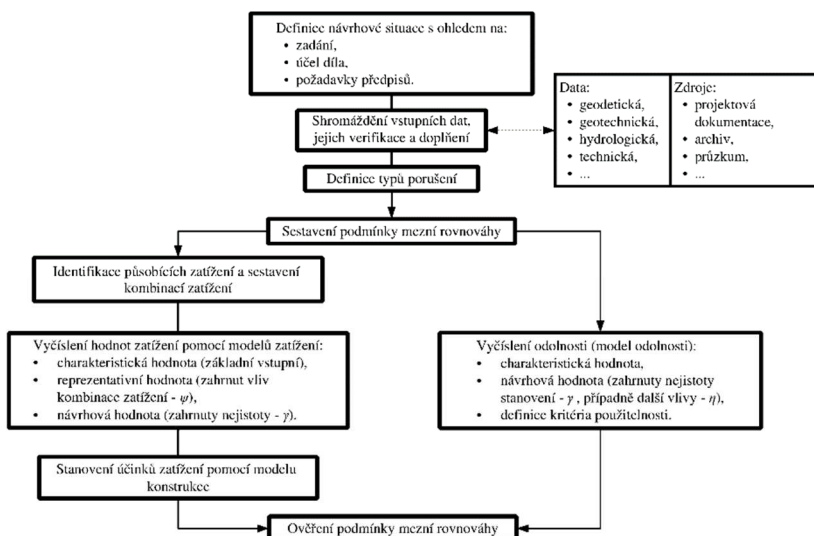
$$E_d \leq R_d , \quad (3.3)$$

pro posouzení mezního stavu použitelnosti:

$$E_d \leq C_d , \quad (3.4)$$

kde $E_{d,dst}$ je návrhová hodnota účinku destabilizujících zatížení, $E_{d,stab}$ je návrhová hodnota účinku stabilizujících zatížení, E_d je návrhová hodnota účinku zatížení, R_d je návrhová hodnota příslušné únosnosti a C_d je kritérium použitelnosti.

Obecný postup při posuzování spolehlivosti určených vodních děl metodou mezních stavů je uveden na obr. 3.3 [Říha, Špano a kol., 2016b].



Obr. 3.3 Postup při posuzování spolehlivosti určených vodních děl metodou podle mezních stavů

3.3 Použití pro hodnocení hydrotechnických staveb

Práce [Říha, Špano a kol., 2016b] rozpracovává oba výše uvedené přístupy pro hodnocení bezpečnosti konstrukcí hydrotechnických staveb pro následující způsoby porušení:

- usmýknutí,
- překlopení,
- nadzvednutí,
- filtrační deformace,
 - sufoze - vnější, vnitřní, kontaktní,

- kontaktní rozmývání,
- eroze - vnější, kontaktní,
- zpětná eroze a vznik privilegované průsakové cesty,
- povrchová eroze,
- překročení pevnosti materiálu,
- nepřipustná přetvoření,
- degradace materiálů hráze, podloží.

U plošně rozsáhlejších hydrotechnických staveb, jako jsou např. ochranné hráze, se při prostorových analýzách a interpretaci výsledků posouzení stále častěji uplatňují soudobé metody analýzy a zobrazení využívající geografické informační systémy (GIS) [Julínek a kol. 2020].

3.4 Diskuze

Jak v případě posouzení pomocí stupně bezpečnosti, tak pomocí metody podle mezních stavů s využitím dílčích součinitelů spolehlivosti, vstupují do hodnocení charakteristické hodnoty odolnosti a účinku zatížení odvozené z charakteristických hodnot vlastností materiálů, geometrických údajů apod.

V prvním případě jsou související nejistoty souhrnně zahrnuty v hodnotě stupně bezpečnosti. Jeho mezní hodnota není pro řadu způsobů porušení hydrotechnických staveb (např. filtrační deformace, povrchová eroze, atd.) v příslušných předpisech specifikována, její stanovení lze provést pouze "expertním odhadem" na základě inženýrského citu. Lze konstatovat, že takto stanovená hodnota mezního stupně bezpečnosti může na jedné straně vést k malé spolehlivosti posuzované konstrukce, na druhé straně k jejímu nepřiměřenému předimenzování.

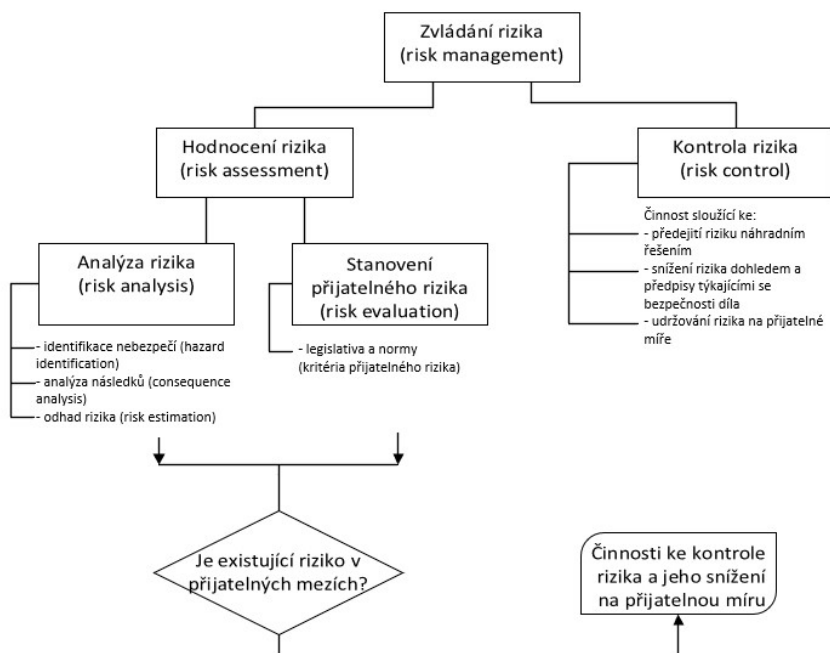
V případě posouzení podle mezních stavů se nejistoty váží k jednotlivým vstupním veličinám prostřednictvím dílčích součinitelů spolehlivosti. Jejich hodnoty jsou v řadě případů doporučeny technickými normami (např. ČSN EN 1997), příručkami [Frank et al., 2004], [Bond a kol., 2013], [Říha, Špano a kol., 2016b], popř. je lze stanovit pravděpodobnostním vyhodnocením laboratorních nebo polních měření [Petrula a kol., 2018].

Hlubší pohled zohledňující míru bezpečnosti hydrotechnických staveb, popř. jejich objektů ve vazbě na pravděpodobnost porušení a dopady vyvolané porušením může poskytnout riziková analýza doplněná analýzou nákladů a užitků. Tato analýza umožní také optimalizaci případných opatření na zvýšení bezpečnosti díla.

4. METODIKA A NÁSTROJE RIZIKOVÉ ANALÝZY

4.1 Vymezení pojmu rizika

Pojem rizika v obecné rovině je široký. I v případě hydrotechnických staveb a povodňové problematiky může být riziko definováno různými způsoby. Nejčastěji je riziko vyjádřeno "pravděpodobností výskytu nežádoucího jevu", který má za důsledek nepříznivé účinky na životy, zdraví, majetek nebo životní prostředí. Riziko je pak sprážením nebezpečí, zranitelnosti a expozice. Základní operace rizikového inženýrství jsou na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Schéma zvládání rizika

Riziko může být obecně definováno jako n -tice vektorů [Tichý 1994, 1996]:

$$RI_i \equiv (Sc_i, P_i, C_i), i = 1, \dots, n, \quad (4.1)$$

kde Sc_i je i -tý scénář nebezpečí, P_i je pravděpodobnost výskytu i -tého scénáře nebezpečí a C_i jsou odpovídající následky (dopady, ztráta, škoda) vyjádřené ve vhodných jednotkách. Všechny tyto veličiny bývají časově závislé, neboť jak scénář nebezpečí, tak pravděpodobnost jeho výskytu a dopady se mohou v čase měnit. Riziko RI_i vyplývající z realizace i -tého scénáře nebezpečí lze určit ze vztahu:

$$RI_i = P_i \cdot C_i \quad (4.2)$$

Celkové riziko RI z realizace n statisticky nezávislých diskrétních scénářů nebezpečí je možné určit ze vztahu:

$$RI = \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i \quad (4.3)$$

Riziko RI , resp. RI_i se vztahuje k referenční době, pro kterou byly stanoveny hodnoty pravděpodobnosti P_i a následků C_i . Referenční dobou může být např. doba životnosti objektů hydrotechnických staveb či objektů v záplavovém území.

Pokud lze vyjádřit spojitě rozdělení následků nepříznivé události (povodňové události, apod.) a její pravděpodobnosti, je možné riziko definovat následovně:

$$RI(\mathbf{D}) = \int_0^{\infty} C(u|\mathbf{D}) \cdot g(u) \cdot du \quad (4.4)$$

kde $RI(\mathbf{D})$ je riziko, $C(u|\mathbf{D})$ je "spojitá" funkce následků, u je kvantifikátor události závislý na vektoru opatření a rozhodnutí $\mathbf{D}$ (stavební úpravy, manipulace na díle, evakuace), který ovlivňuje následky extrémní události. $g(u)$ je hustota pravděpodobnosti výskytu události (scénáře nebezpečí) s následky $C(u|\mathbf{D})$. Rovnice (4.4) vyjadřuje střední (očekávanou) hodnotu rizika v podobě roční škody.

Jiným přístupem je semikvantitativní hodnocení rizika, např. postupy FMEA/FMECA popsanými v kapitole 4.5. Formální vztah (4.1) je převeden na kvantifikaci rizika součtem, popř. součinem bodového hodnocení pravděpodobnosti BP_i a následků BC_i :

$$RI_i = BP_i + BC_i \quad (4.5a)$$

$$RI_i = BP_i \cdot BC_i \quad (4.5b)$$

Celkové riziko RI z realizace n statisticky nezávislých scénářů nebezpečí je možné určit ze vztahů:

$$RI = \sum_{i=1}^n (BP_i + BC_i) , \quad (4.6a)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n BP_i BC_i \quad (4.6b)$$

K vyjádření rizika se pak používá verbální klasifikace s využitím tzv. „tříd rizika“. Třídy rizika odpovídají vždy četnosti výskytu nepříznivé události (poruchy díla, vzniku povodně) a verbálně vyjádřenými potenciálními škodami na životech a zdraví lidí, na postiženém majetku, resp. na životním prostředí. Třídy rizika jsou obvykle graficky zobrazeny prostřednictvím „matic rizika“.

4.2 Předmět a cíle rizikové analýzy hydrotechnických staveb

Riziko z existence hydrotechnických staveb odpovídá dopadům na vlastním vodním díle a v území pod ním. Základním úkolem je zajistit vysokou bezpečnost a spolehlivost těchto vodních děl a tak chránit obyvatelstvo a majetek před účinky poruchy díla při vědomí, že absolutní bezpečnost nelze prakticky zajistit, a to ani při vynaložení značných nákladů. Tyto úvahy vyústily v posledním období k provádění rizikové analýzy přehrad a obdobných hydrotechnických staveb. Cílem rizikové analýzy (RA) je odpovědět na tyto základní otázky:

- Co se stane, jestliže nastane porucha hydrotechnické stavby?
- S jakou pravděpodobností se může stavba porušit?
- Jaké mohou být následky poruchy?

- Jaké vysoké je riziko?
- Je riziko v přijatelných mezích?

Odpovědi na tyto otázky lze hledat systematickým postupem znázorněným na obr. 4.1. Ve smyslu definice rizika je snahou zabezpečit pro všechna vodní díla stejnou míru rizika. Tento proces se nazývá zvládání (management) rizika.

Riziko z existence hydrotechnických staveb ve smyslu úplné poruchy vzdouvací konstrukce je obecně možno redukovat snížením pravděpodobnosti vzniku poruchy a/nebo omezením rozsahu zvláštní povodně a odpovídajícím snížením dopadů (škod). Toho lze docílit např. změnou manipulace na VD, stavebními úpravami na díle, např. zvýšením kapacity a spolehlivosti výpustí a bezpečnostních objektů nebo organizačními opatřeními v ohroženém území (evakuační plány, varovné systémy).

4.3 **Koncepční přístupy**

Koncepce rizikové analýzy hydrotechnických staveb vychází z následujících východisek:

- Vstupní podklady o vodních dílech a jejich dostupnost jsou výchozím kritériem, které určuje rozsah, hloubku a vypovídací schopnost analýz.
- Určujícími faktory, které ovlivňují kvalitu analýz jsou nástroje použité pro simulaci jevů a provozních stavů vodního díla. Jde o modelování srážkoodtokových dějů, vodohospodářské řešení nádrží, hydraulické řešení funkčních zařízení díla, modelování průsakových poměrů v tělese a podloží vzdouvací stavby, vyhodnocení výsledků technickobezpečnostního dohledu (TBD), apod.).
- Při pravděpodobnostním hodnocení příčinných událostí lze využít statistického modelování [Zhu a kol., 2020], přímého vyjádření pravděpodobnosti z relativní četnosti daného jevu nebo expertních odhadů.
- Metody stanovení potenciálních škod vycházejí z expertních odhadů verifikovaných s pomocí odhadů skutečných škod způsobených při historických povodních a poruchách [Říha a kol. 2005], [Drbal a kol. 2008].

Analýzu rizika lze členit na kvalitativní, semikvantitativní a kvantitativní.

Kvalitativní analýza spočívá v identifikaci možných scénářů nebezpečí, které představují potenciální události mající za následek škody.

Kvantitativní analýza spočívá ve vyčíslení očekávané pravděpodobnosti a následků potenciálních scénářů nebezpečí (poruch). Při kvantifikaci dílčího rizika používáme jako kvantifikátor pravděpodobnost vzniku škody v rámci jednotlivého scénáře nebezpečí, viz např. rovnice (4.2).

Semikvantitativní analýza představuje mezistupeň mezi kvalitativní a kvantitativní analýzou. Výsledkem semikvantitativního hodnocení je relativní výše rizika (kritičnost) vyjádřená např. pomocí barevné škály nebo číselné stupnice.

Pro určení rizika se používá řada nástrojů. Jde o multidisciplinární problematiku, kdy se řešení účastní odborníci z oborů vodního hospodářství, stavebnictví, matematici, ekonomové, sociologové a další.

4.4 Kvalitativní analýza

Kvalitativní analýza slouží k vymezení zájmového území, k definování vnitřních a vnějších vazeb a k sestavení co možná úplného výčtu prvků systému, určení jejich zranitelnosti a sestavení scénářů nebezpečí. Na základě výsledků této analýzy jsou určeny typy nebezpečí a současně i prvky systému, kterým je zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost. Kvalitativní analýza využívá následujících postupů a nástrojů:

- Sestavení kontrolních seznamů prvků systému a scénářů nebezpečí.
- Sestavení diagramů prvků systému.
- Analýza
 - druhů poruch a následků FMEA (Failure Modes and Effect Analysis),
 - pomocí stromů událostí ETA (Event Tree Analysis),
 - pomocí stromů poruch FTA (Fault Tree Analysis).

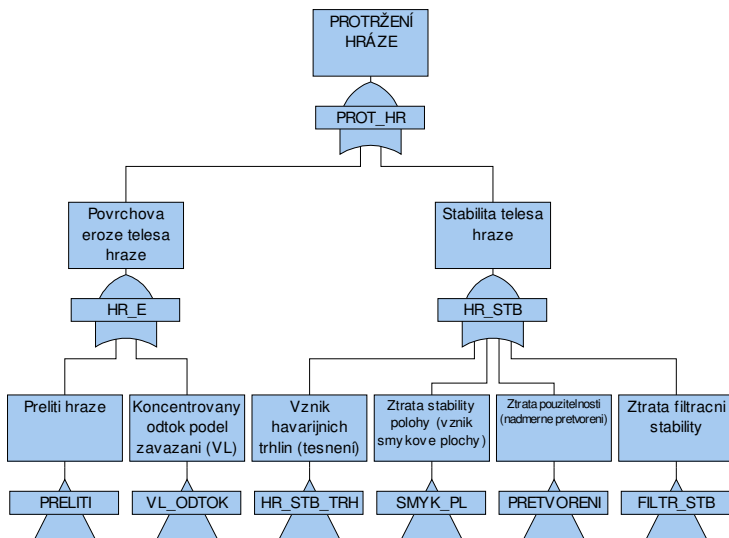
Při kvalitativní analýze ještě není proveden odhad pravděpodobnosti jednotlivých scénářů nebezpečí ani odpovídající dopady.

Struktura kontrolního seznamu, jeho podrobnost a rozlišovací úroveň jsou dány jak typem hodnocené konstrukce či díla, tak účelem rizikové analýzy.

Diagramy prvků systému vyjadřují hierarchii a vzájemnou vazbu prvků systému. Diagramy znázorňují logickou vazbu mezi jednotlivými úrovněmi hodnocení a logický sled vazeb. Příkladem je diagram prvků sestavený za účelem hledání příčin degradace asfaltobetonového pláště horní nádrže VD Dlouhé stráně (obr. 4.2).

Analýza pomocí stromu událostí (ETA) je deduktivní metodou, která umožňuje analyzovat možné stavy systému či konstrukce. Cílem je identifikovat nefunkční prvky, v důsledku jejichž nefunkčnosti se vygeneruje předem definovaný stav systému. Analyzují se jen definované druhy poruch systému, např. porušení ochranné hráze, atd. Analýza je založena na binární logice, kdy se předpokládá, že k určité události na úrovni prvku buď došlo nebo nedošlo. Konečným výsledkem analýzy je seznam možných stavů systému odpovídajících iniciujícím událostem. Tou může být příchod povodně s danou pravděpodobností překročení průtoku.

Analýza pomocí stromu poruch (FTA) je induktivní metoda používaná k analýze předem definovaných druhů poruch. Metoda identifikuje prvky, jejichž porucha by vyvolala definovaný druh poruchy systému [Říha a kol. 2008]. Na obr. 4.3 je příklad zjednodušeného stromu poruch, jehož základní struktura byla sestavena obecně pro různé varianty možných mechanismů vedoucích k poruše hráze.



Obr. 4.3 Příklad stromu poruch pro koncovou událost "protržení hráze"

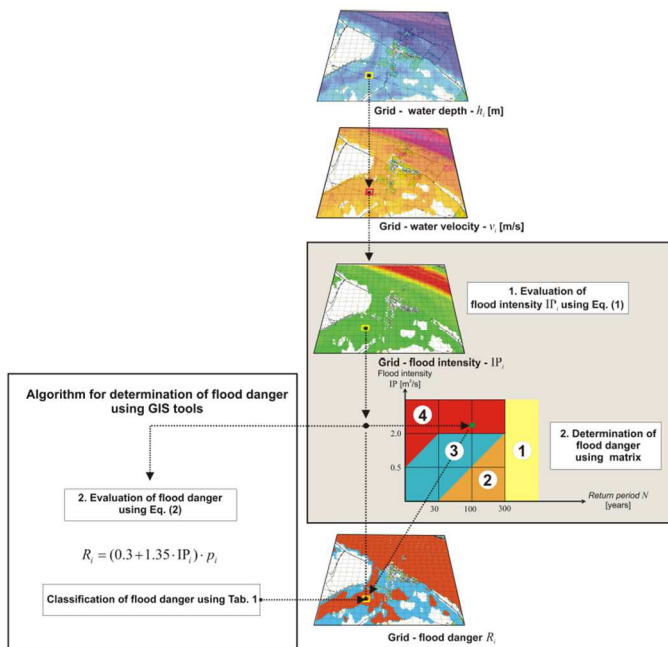
4.5 Semikvantitativní analýza

Při semikvantitativním hodnocení se dopady a pravděpodobnosti nebezpečné události vyjádří bodovým hodnocením se slovním komentářem. Riziko je vyjádřeno tzv. kritičností vycházející ze zvolené stupnice bodového hodnocení.

Semikvantitativního hodnocení se v ČR používá při tvorbě map ohrožení a rizika v rámci implementace Směrnice evropského parlamentu a rady 2007/60/ES [A]. Postup byl publikován v metodice [C] pro implementaci uvedené směrnice a také v [Dráb, Říha, 2010]. Při hodnocení se využívá matice ohrožení, pomocí níž se s využitím barevné škály vyjadřuje na mapovém podkladu míra ohrožení. Mapa rizika vznikne překrytím map ohrožení s objekty v záplavovém území (obr. 4.4).

Při semikvantitativním hodnocení rizika lze rovněž použít postup FMEA doplněný analýzou FMECA [Říha, 2007]. Lze doporučit následující postup:

- Systém, resp. konstrukce se rozdělí na jednotlivé prvky, pro každý prvek se vytvoří seznam možných druhů poruch a jejich následků.
- Bodově se ohodnotí pravděpodobnosti poruchy pro jednotlivé prvky.
- Bodově se ohodnotí dopady poruch jednotlivých prvků.
- Provede se analýza úplnosti a spolehlivosti podkladů pro hodnocení.
- Provede se hodnocení kritičnosti jednotlivých prvků systému.
- Provede se agregace dílčích hodnocení pro jednotlivé prvky, třídy a skupiny dopadů, pro varianty nápravných opatření či pro celé vodní dílo či jeho část.



Obr. 4.4 Postup tvorby map ohrožení a rizika [Dráb, Říha, 2010]

Postup FMEA/FMECA byl použit při analýze rozsahu opravy plášťového těsnění horní nádrže VD Dlouhé stráně postiženého bodovými poruchami (obr. 4.5). Předmětem zjednodušené rozhodovací analýzy byly následující varianty technického řešení opravy AB pláště:

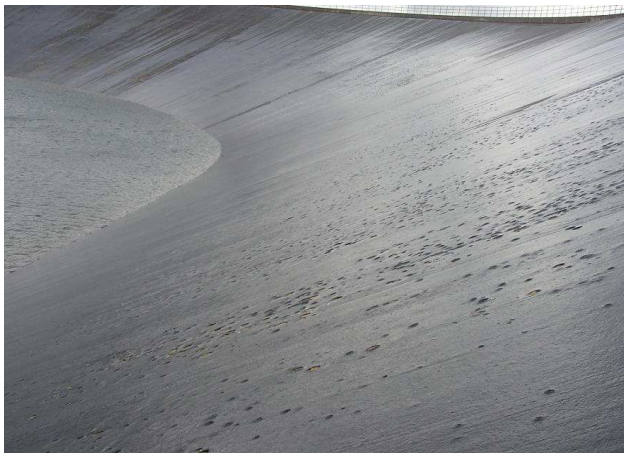
- Varianta 0 – ponechání stávajícího stavu bez opravy.
- Varianta 1 – oprava AB pláště na celém svahu.
- Varianta 2 – oprava AB pláště pouze v zóně největšího poškození.

V případě VD Dlouhé stráně byl posuzován jediný prvek systému - návodní plášťové těsnění hráze horní nádrže přečerpávací vodní elektrárny. Kromě „klasických“ poruch těsnicího prvku byly do kontrolních seznamů začleněny i vybrané kritické provozní aspekty (např. environmentální) a technickoorganizační faktory (problémy při výstavbě a instalaci těsnicího prvku).

Byly definovány následující tři druhy dopadů:

- a) Hmotné škody.
- b) Provozní důsledky.
- c) Vliv na bezpečnost díla.

Bodové hodnocení dopadů v pětibodové škále je pro jednotlivé druhy dopadů spolu verbálním hodnocením uvedeno v tab. 4.1.



Obr. 4.5 Poškozené plášťové těsnění horní nádrže VD Dlouhé stráně

Tab. 4.1 Verbální hodnocení dopadů potenciálních poruch

Následky nebezpečí	Bodové hodnocení	Hmotné škody - do dovršení doby životnosti včetně provozních nákladů	Provozní dopady	Ohrožení bezpečnosti díla
VELMI VYSOKÉ (VV)	5	Rozsáhlá destrukce tělesa hráze, úplná rekonstrukce AB pláště, extrémní náklady na rekonstrukci	Střední doba odstávky v důsledku revizí a sanací v řádu stovek dnů	Možné katastrofické důsledky, možné poškození díla, ochromeny významné funkce
VYSOKÉ (V)	4	Porušení AB pláště na velké ploše, lokální porušení tělesa hráze, vysoké náklady na rekonstrukci	Střední doba odstávky v důsledku revizí a sanací do 100 dnů	Vznik kritické provozní situace, nouzová opatření, vazba na varovné systémy, apod.
STŘEDNÍ (S)	3	Rozsáhlejší porušení pláště bez destrukce hráze, středně vysoké náklady	Střední doba odstávky, sanace do 30 dnů	Mírné překročení mezních průsaků, deformací
NÍZKÉ (N)	2	Nízké poškození místně sanovatelné, lze hradit v rámci provozních nákladů	Střední doba odstávky do 10 dnů	Výrazné zvýšení hodnot průsaků, deformací v rámci TBD.
VELMI NÍZKÉ (VN)	1	Zanedbatelné škody a náklady	Drobné odstávky do 3 dnů	Bezpečnost díla prakticky nehrožena

Bodové hodnocení pravděpodobnosti následků poruchy doprovází verbální popis s uvedením orientační četnosti výskytu dopadů. Verbální popis (tab. 4.2) vychází z doby technické životnosti plášťových těsnění [Říha, Špano, 2022].

Tab. 4.2 Verbální a bodové hodnocení pravděpodobnosti vzniku poruchy

Pravděpodobnost výskytu příslušné poruchy	Bodové hodnocení
Nepravděpodobný jev, četnost výskytu jednou za více než 30 let	1
Nízká pravděpodobnost, jev možný, výskyt jednou za 20 až 30 let	2
Střední pravděpodobnost, jev s občasným výskytem jednou za 10 až 20 let	3
Vysoká pravděpodobnost, opakovaný výskyt, četnost jednou za 5 až 10 let	4
Očekávaná porucha, často opakovaný jev, četnost výskytu do 5 let	5

Hodnocení rizika (kritičnosti) bylo provedeno pro jednotlivé analyzované varianty. Označení variant je ve sloupci „A“ tabulky 4.3.

Tab. 4.3 Příklad výřezu tabulky pro bodové hodnocení FMECA

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Varianta	Scénář nebezpečí - porucha	Důsledky poruchy	Pravděpodobnost BP	Následky BC		Hodnocení rizika			
				Hmotné škody	Provozní dopady	Ohrožení bezpečnosti	Hmotné škody	Provozní dopady	Ohrožení bezpečnosti
0	Konstrukční porušení								
	Trhliny								
	Porušení v místě změny materiálu (konstrukce) a tvaru hráze	Zvýšení průsaků, vyplavování materiálu hráze, ohrožení bezpečnosti hráze	2	3	2	1	5	4	3
	Porušení podél napojení na korunu hráze, injekční štolu, funkční objekty	Zvýšení průsaků, vyplavování materiálu hráze, ohrožení bezpečnosti hráze	3	3	2	6	6	5	9

Ve sloupci B jsou vymezeny scénáře nebezpečí ve vazbě na potenciální poruchu, sloupec C obsahuje stručný popis dopadů příslušné poruchy. Sloupec D obsahuje bodové hodnocení pravděpodobnosti vzniku poruchy. Ty jsou hodnoceny pro tři třídy dopadů (sloupce E až G). Vyhodnocení se ve smyslu vztahů (4.5a) a (4.6a) provede součtem bodového hodnocení pravděpodobnosti BP a následků BC, součty odpovídající kritičnosti jsou zaznamenány ve sloupcích H až J.

Dílčí riziko pro daný scénář nebezpečí (dílčí poruchu) a příslušnou skupinu následků je uvedeno ve sloupcích H až J tabulky 4.3. Stanovení dílčího rizika RI_{ij} se provede podle následujícího vztahu analogického se vztahem (4.5a):

$$RI_{ij} = BP_i + BC_{ij}, \quad (4.7)$$

kde RI_{ij} je dílčí riziko z i -té poruchy v j -tém následku, BP_i je bodové hodnocení pravděpodobnosti vzniku i -té poruchy a BC_{ij} je bodové hodnocení j -tého následku

v důsledku *i*-té poruchy. Pro rychlou orientaci je v tab. 4.4 je kritičnost vyjádřena také barvou indikující kritičnost.

Tab. 4.4 Matice kritičnosti

	Kritičnost	Následky <i>BC</i>				
		5 (VV)	4 (V)	3 (S)	2 (N)	1 (VN)
Pravděpo- dobnost <i>BP</i>	5 (VV)	10	9	8	7	6
	4 (V)	9	8	7	6	5
	3 (S)	8	7	6	5	4
	2 (N)	7	6	5	4	3
	1 (VN)	6	5	4	3	2

Celkové riziko (kritičnost) pro danou návrhovou variantu získané sumací přes *m* scénářů nebezpečí (poruchy) a 3 skupiny dopadů se vypočte dle vztahu:

$$RI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n=3} RI_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n=3} (BP_i + BC_{ij}) \tag{4.8}$$

Vyhodnocení uvedených vztahů se provede tabulkovými operacemi, celkové kritičnosti pro hodnocené varianty jsou v tab. 4.5. Nejvýhodnější je varianta 1 (oprava AB pláště na celém svahu) s nejnižším počtem bodů, tj. nejnižší kritičností.

Tab. 4.5 Souhrnné hodnocení variant metodou FMECA

Varianta	0	1	2
Bodové hodnocení	260	210	235

Semikvantitativní hodnocení bylo použito také pro stanovení příčiny bodových poruch vyskytujících se ve značném počtu (více než 30 000) na horní nádrži VD Dlouhé stráně (obr. 4.6). Pravděpodobná příčina byla hodnocena pomocí škály, která přiřazuje pravděpodobnosti na základě verbálně vyjádřených deskriptorů (tab. 4.6). Poměrně komplikovaný strom poruch je uveden spolu s jeho detailem na obr. 4.6.

Tab. 4.6 Verbální popis pro přiřazení pravděpodobností

Deskriptor jevu	Pravděpodobnost
Zcela jistý	1,00
Prakticky jistý	0,99
Velmi pravděpodobný	0,90
Pravděpodobný	0,70
Neutrální, možný	0,50
Málo pravděpodobný	0,30
Velmi málo pravděpodobný	0,10
Prakticky nemožný	0,01
Zcela vyloučený	0,00

4.6 Kvantitativní analýza

Scénáře nebezpečí identifikované v rámci kvalitativní analýzy lze analyzovat kvantitativně. Kvantitativní analýza zahrnuje vyčíslení pravděpodobnosti poruchy a dopadů. Riziko se obvykle vyjadřuje očekávanými ročními dopady, tj. roční škodou na majetku nebo na životech lidí. Analýzy se mohou provádět s využitím stromů událostí, popř. stromů poruch. Dopady poruchy představují vyjádření škod:

- v materiální sféře,
- na životech a zdraví lidí.

Z důvodů obtížné slučitelnosti uvedených skupin škod a vzhledem k morálním zábranám při monetárním vyjádření ceny lidského života se riziková analýza obvykle provádí pro obě oblasti dopadů odděleně. Při posuzování přijatelného rizika v oblasti ztrát na životech se nicméně finančním úvahám nelze vyhnout.

Kvantitativní riziková analýza obvykle zahrnuje:

- kvalitativní analýzu (kapitola 4.4),
- pravděpodobnostní analýzu scénářů nebezpečí,
- odhad dopadů (následků, škod) odpovídajících jednotlivým poruchám,
- odhad rizika,
- posouzení přijatelnosti rizika a efektivnosti opatření pro snížení rizika.

4.6.1 Riziko v materiální sféře

Hodnocení rizika v materiální sféře se provádí obvykle vyjádřením roční finanční újmy. Ve smyslu vztahu (4.3) se průměrné riziko na jeden rok vyjádří:

$$RI_R = E(C) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i \quad (4.9)$$

kde $RI_R = E(C)$ je průměrné roční riziko z porušení hydrotechnické stavby (zaplavení) vyjádřené v peněžních jednotkách, C_i je výše škody při i -tém scénáři nebezpečí vyjádřená v odpovídajících peněžních jednotkách, P_i je roční pravděpodobnost realizace i -tého scénáře nebezpečí, n je počet scénářů nebezpečí.

Scénáře nebezpečí se mohou analyzovat nad stromy událostí, resp. stromy poruch, jednotlivé větve stromů se podrobí pravděpodobnostnímu rozboru (např. nad obr. 4.3). Při analýze se obvykle využívá metod statistického modelování, podrobnější popis metod, jako jsou Monte Carlo, Latin Hypercube Sampling, Response Surface Sampling a dalších je nad rámec této práce, je uveden v dostupné literatuře [Loh, 1996], [Bonate, 2004], [Pinsky, Karlin, 2010], [Feng et al., 2020] a další. Pravděpodobnost poruchy díla se pak stanoví jako relativní četnost ze vztahu:

$$P_i = \frac{N_{Pi}}{N_{Si}}, \quad (4.10)$$

kde N_{Pi} je počet realizací i -tého scénáře nebezpečí vedoucích k poruše, N_{Si} je celkový počet simulací dle kombinací pseudonáhodných veličin vstupujících do řešení v i -tém scénáři nebezpečí. V případě, že scénář nebezpečí i vychází z povodňového

průtoku známé doby opakování N_i , který například způsobí přelití a může prorazit hráz VD, je možné stanovit roční pravděpodobnost takové poruchy ze vztahu:

$$P_i = 1 - e^{-1/N_i} \quad (4.11)$$

nebo pro velká N_i (> 5) pomocí přibližného vztahu:

$$P_i \approx \frac{1}{N_i} . \quad (4.12)$$

Součástí rizikové analýzy bývá často hodnocení efektivnosti opatření na zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti přehrady (snížení rizika) metodou nákladů a užitků. Tento postup umožní posouzení „rentability“ zamýšlených opatření. Riziková analýza je pak v rámci managementu rizika doplněna o následující kroky:

- Vymezení variant opatření.
- Vyčíslení nákladů pro jednotlivé varianty opatření.
- Odhad škod v důsledku poruchy pro jednotlivé scénáře nebezpečí.
- Hodnocení výhodnosti jednotlivých variant analýzou nákladů a užitků.

Stanovení roční očekávané škody RI_R a celkové škody RI_S (kapitalizované riziko) je možné provést buď podle vztahu (4.3) nebo v případě spojitě vyjádřené škody následujícím postupem [D], [Říha a kol. 2005]:

$$RI_R = \int_{Q_A}^{Q_B} C(Q) \cdot u(Q) \cdot dQ , \quad (4.13)$$

kde RI_R je průměrné roční ekonomické povodňové riziko, $C(Q)$ je škoda při průtoku Q [m^3/s], $u(Q)$ je hustota pravděpodobnosti ročních kulminačních průtoků, Q_A je průtok, od kterého začíná docházet ke škodám, Q_B je extrémní průtok, při kterém je pravděpodobnost vzniku škod již blízká nule (např. pro $N \gg 10\,000$ roků). Škoda $C(Q)$ představuje součet škod přes všechny kategorie zasažených objektů :

$$C(Q) = \sum_{j=1}^{PK} C_j(Q) \quad (4.14)$$

kde PK je počet kategorií, resp. typů zasažených objektů či ploch. Škody $C(Q)$ vázané na průtok Q lze pro variantu stávajícího stavu a návrh na zvýšení bezpečnosti vztáhnout k pravděpodobnosti jeho překročení, popř. k době jeho opakování N . Pro vyčíslení vztahu (4.13) se použije numerická integrace.

Pro další hodnocení je třeba stanovit současnou hodnotu rizika RI_S . Přitom se používá diskontní přístup:

$$RI_S = RI_R \cdot \frac{1 - (1 + DS)^{-T_0}}{DS} , \quad (4.15)$$

kde DS je diskontní sazba a T_0 je délka hodnoceného období v letech. Diskontní sazba DS vyjadřuje časovou hodnotu peněžních prostředků. U projektů ve vodním hospodářství doporučovala USACE [2016] diskontní sazbu 7 %, Česká národní banka uvádí pro rok 2024 DS hodnotami od 3,5 do 5,25 % [CNB, 2024]). Délka hodnoceného období T_0 se odvíjí od technické životnosti VD. Při hodnocení děl s dlouhou dobou životnosti na 100 let se délka hodnoceného období nezohledňuje:

$$RI_S = \frac{RI_R}{DS} \quad (4.16)$$

V rámci analýzy nákladů a účinků se pomocí vhodně zvolených ukazatelů porovná výše škody s náklady na realizaci opatření, jejich opravy a údržbu. Vhodnými ukazateli jsou [Dráb, Říha, 2010]:

- Poměrový ukazatel efektivnosti EF_P vyjadřuje poměrnou ekonomickou efektivnost investice vložené do snížení rizika. V čitateli je snížení současné hodnoty rizika RI_S v důsledku realizace opatření, ve jmenovateli je hodnota celkových investičních nákladů opatření:

$$EF_P = \frac{RI_{S_PRED} - RI_{S_PO}}{I} \quad (4.17)$$

kde RI_{S_RED} je současná hodnota rizika (např. v [Kč]) před realizací opatření, RI_{S_PO} po realizaci opatření. I jsou investiční náklady na realizaci opatření. Pokud ukazatel nabývá hodnot větších než 1, jde o rentabilní investici.

- Ukazatel absolutní efektivnosti EF_A vyjadřuje efektivnost investice v absolutních ekonomických jednotkách. Jeho hodnota je dána vztahem:

$$EF_A = (RI_{S_PRED} - RI_{S_PO}) - I \quad (4.18)$$

Kladné hodnoty ukazatele svědčí o ekonomické rentabilitě realizace opatření. Ukazatel slouží pro porovnání účinku opatření se stejnou poměrnou efektivitou EF_P . Jeho význam se projeví u velkých investic.

- Doba návratnosti T_n slouží k porovnání návratnosti jednotlivých opatření podle domácích a zahraničních zkušeností. Je nástrojem pro objektivní posouzení akcí v mezinárodním kontextu. Je ji možné stanovit ze vztahu:

$$T_n = \frac{I}{RI_{R_PRED} - RI_{R_PO}} \quad (4.19)$$

kde RI_{R_PRED} a RI_{R_PO} značí roční riziko před a po realizaci opatření.

Při vlastním řešení se použije tento postup:

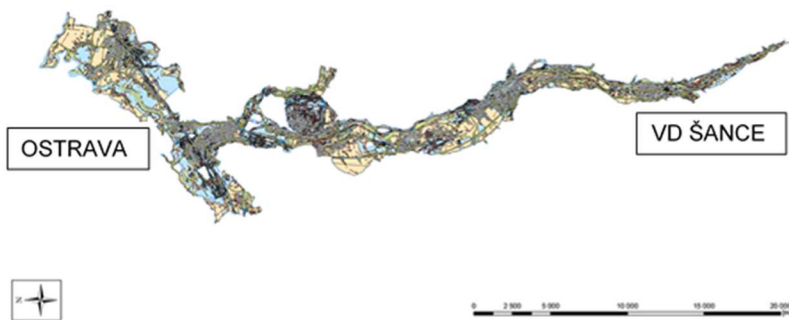
- Stanovení rizika se provádí pouze pro scénáře nebezpečí ovlivněné daným opatřením.
- Pro jednotlivé scénáře nebezpečí se odhadne pravděpodobnost výskytu. Např. pro porušení hráze přelítím nebo pro opatření na ochranu před přirozenými povodněmi lze uvažovat s pravděpodobností kulminačního průtoku s dobou opakování N .
- Modelovým výpočtem se pro jednotlivé scénáře nebezpečí odvodí průběh vzniklé povodně (přirozené, zvláštní) a charakteristiky jejího průchodu územím.
- Z charakteristik průchodu povodně se přes tzv. ztrátové křivky odvodí výše přímých škod v daném území.

Kvantitativní analýza doplněná analýzou nákladů a užitků byla použita při analýze návrhu rekonstrukce bezpečnostního přelivu na vodním díle Šance v povodí Odry. Povodně v roce 1997 ukázaly na jeho nedostatečnou kapacitu. Oprávněnost jeho nákladné rekonstrukce byla potvrzena kvantitativní rizikovou analýzou s vyčíslením výše definovaných ukazatelů efektivity.

Rozloha území ohroženého zaplavením v důsledku protržení přehradní hráze je na území ČR cca 126,6 km² (obr. 4.7). Investiční náklady na provedení rekonstrukce byly odhadnuty na 420 mil. Kč. Modelový výpočet protržení tělesa hráze a průchodu zvláštní povodně územím pod hrází [Hydroexpert, 1998].

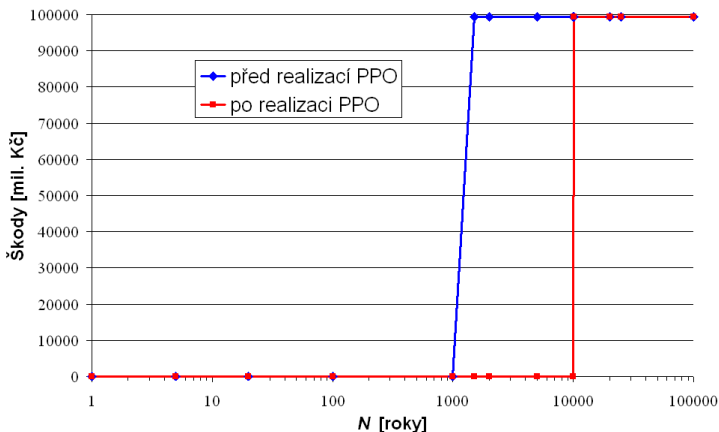
Škoda způsobená průlomovou vlnou byla stanovena s využitím ztrátových křivek [C]. Pokud hloubka vody přesáhla 3 m a rychlost proudu byla větší než 5 m/s, uvažovalo se úplné zničení zasažených objektů. Celková materiální škoda byla stanovena částkou cca 99,288 mld. Kč. Při řešení byly přijaty tyto předpoklady:

- protržení přehrady původně odpovídala doba opakování $N = 2000$ let, ta korespondovala s kapacitou původního bezpečnostního přelivu,
- byl sledován jediný scénář nebezpečí, kterým je protržení přehrady jejím přelitím, výsledky TBD nenaznačují možnost jiného způsobu porušení,
- škody na vodním díle a pod ním by nastaly od průtoku odpovídajícího době opakování $N = 1000$ let, škody se zvětšují lineárně od nuly při $N = 1000$ let až po celkové odvozené škody cca 99,3 mld. Kč při protržení přehrady ($N = 2000$ let)
- kapacita rekonstruovaného přelivu odpovídá $N = 10000$ let,
- pravděpodobnost poruchy byla stanovena podle vztahu (4.12).



Obr. 4.7 Rozsah záplavy vyvolané zvláštní povodní při protržení hráze VD Šance

Závislost $C(N)$ povodňových škod na době opakování kulminačního průtoku je uvedena na obr. 4.8.



Obr. 4.8 Závislost škod na době opakování kulminačního průtoku

Pomocí vztahů (4.16) až (4.19) byly stanoveny hodnoty ekonomických hodnotících ukazatelů (tab. 4.7). Analýza nákladů a užitků prokázala vysokou rentabilitu zamýšlené rekonstrukce VD s návratností investice za cca 6 let.

Tab. 4.7 Výsledná hodnocení ve sledovaných ukazatelích

	Před realizací	Po realizaci	jednotky
Prům. roční riziko (RI_R)	80,632	8,887	[mil.Kč/rok]
Diskontní sazba (DS)	3%	3%	
Kapitalizované riziko (RI_s)	2687,722	296,222	[mil.Kč]
Náklady (I)	0	420,00	[mil.Kč]
Poměrová efektivnost (EF_P)	5,694		[-]
Absolutní efektivnost (EF_A)	1971,500		[mil.Kč]
Doba návratnosti (T_n)	6		[roků]

4.6.2 Riziko vzniku ztrát na životech a zdraví obyvatel

Riziková analýza v této oblasti obsahuje řešení následujících kroků:

- odhad počtu ohrožených obyvatel (PAR - Population At Risk),
- odhad počtu obětí na životech (LOL - Loss Of Life),
- posouzení přijatelnosti ztrát na životech s využitím F - N diagramů,
- analýza ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

Počet ohrožených životů PAR povodňovou vlnou se odvozuje z rozmístění zástavby a z míry osídlení území. Je třeba provést analýzu dvou skupin problémů:

- Určení parametrů průběhu povodňové vlny v území se provádí postupy uvedenými např. ve studiích [Říha, Kotaška, 2019], [Říha a kol. 2020b].
- Odvození počtu obyvatel v postiženém území, tj. stanovení celkového počtu obyvatel vyskytujících se trvale i dočasně v zasaženém území.

Při odhadu ztrát na lidských životech LOL , resp. ročního očekávaného počtu obětí $E(LOL)$ se zohlední nebezpečí představované povodní a jejími charakteristikami (hloubka a rychlost vody), počet ohrožených obyvatel (PAR), včasnost varování a způsob jeho přijetí a připravenost společnosti (fungování integrovaného záchranného systému, apod.).

Pro odhad počtu ztrát na lidských životech LOL byla vytvořena řada modelů [Jonkman a kol. 2008], [Yazdani a kol., 2023]. Na základě dat ze skutečných povodňových epizod byl navržen následující vztah [Brázdová, Říha, 2014]:

$$LOL = 0,075 \cdot D^{0,384} \cdot (P + 2)^{-3,207} \cdot (W + 2)^{-1,017}, \quad (4.20)$$

LOL je počet obětí při dané povodni, D materiální škody při daném scénáři povodně v [USD], P a W bodová hodnocení skupin faktorů pro povodňový scénář ve škále v intervalu $(-1, 1)$ stanovená dle postupu uvedeného v [Brázdová, Říha, 2014].

Riziko je vyjádřeno průměrným ročním počtem obětí v dané lokalitě:

$$RI_{OR} = E(LOL) = \int_0^{\infty} LOL \cdot dF(LOL) \quad (4.21)$$

kde RI_{OR} značí průměrné roční společenské riziko vyjádřené počtem obětí LOL , např. dle vztahu (4.20), $F(LOL)$ je distribuční funkce škody LOL . Pro řešení se využije čára překročení škod na lidských životech $G(LOL) = 1 - F(LOL)$:

$$RI_{OR} = E(LOL) = - \int_0^{\infty} LOL \cdot dG(LOL). \quad (4.22)$$

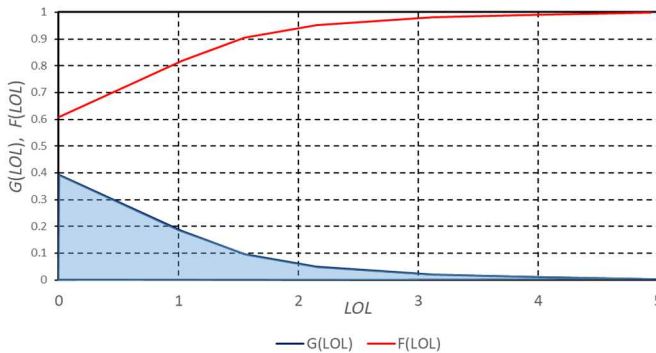
Předpokládejme, že existuje inverzní funkce G^{-1} k funkci překročení $G(LOL)$:

$$LOL = G^{-1}(p) \quad \text{pro všechna } p \in <0,1>. \quad (4.23)$$

Dosazením vztahů (4.22) a (4.23) do (4.21) se po transformaci obdrží vztah:

$$RI_{OR} = E(LOL) = \int_0^1 G^{-1}(p) \cdot dp, \quad (4.24)$$

Vztah (4.24) vyjadřuje plochu pod křivkou $G^{-1}(LOL)$ na obrázku 4.8, která představuje roční očekávanou (průměrnou) škodu vyjádřenou v počtech obětí za rok.



Obr. 4.8 Čára překročení a distribuční funkce obětí na životech

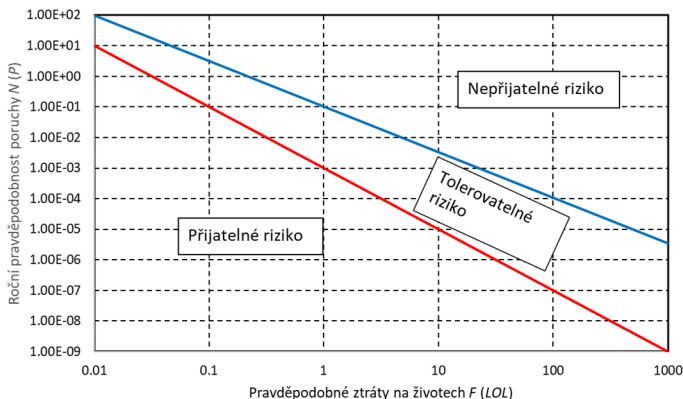
Vazbu na dobu opakování je možné vyjádřit vztahy (4.11), popř. (4.12). Výpočet určitých integrálů ve výše uvedených vztazích se provede numericky.

4.6.3 Přijatelné riziko

F - N diagramy byly vyvinuty jako kritérium pro stanovení přijatelného a tolerovatelného rizika [Rettemeier a kol., 2000]. Jsou grafickým znázorněním vztahu mezi roční pravděpodobností vyjádřenou četností F poruchy díla (frequency) a počtem obětí na životech N . Konstrukce F - N křivek vychází z filozofie stejného přijatelného rizika ($F \cdot N = \text{konst.}$) pro jednotlivé scénáře nebezpečí. V dalším textu bude systematicky používáno značení G namísto F (četnost) a LOL namísto N pro ztráty na životech. U diagramů je typické rozdělení do tří zón:

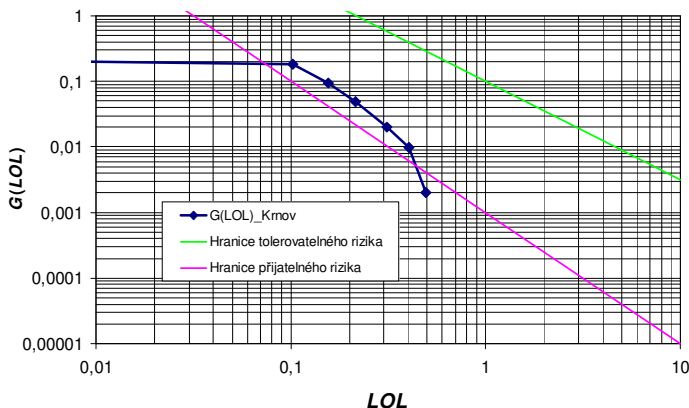
- Přijatelné riziko představuje míru, kterou je společnost připravena přijmout, nevyžadují se dodatečná opatření ke snížení rizika, ani další analýzy.
- Tolerovatelné riziko je dohodnutá míra rizika stanovená za účelem zajištění určitých výnosů (zisků). Pokud je další snižování rizika obtížné, popř. finančně náročné, je třeba provést některou z analýz, např. ALARP, kterou se hodnotí úroveň, na niž je ještě "rozumné" riziko snížit [Říha a kol. 2008].
- Nepřijatelné riziko - pokud se dostane riziko do této oblasti, je nutné provést opatření pro jeho snížení. Analýza ALARP se neprovádí.

V rámci výzkumu [Drbal a kol., 2011] byly pro ČR doporučeny F - N křivky dle obr. 4.9. Četnost G a ztráty na životech LOL se vynesou do F - N grafu a posoudí se, ve které zóně se dílčí riziko nachází.



Obr. 4.9 Kritérium přijatelného rizika pro ČR [Drbal a kol. 2011]

Pro lokalitu Krnov na řece Opavě byl proveden výpočet rizika ze ztráty lidských životů při povodních. Funkce $G(LOL)$ byla vynesena do F - N grafu na obr. 4.10, do nějž byly zaneseny meze dle obr. 4.9. Je zřejmé, že povodně s dobami opakování 5 až 100 let nevyhovují z hlediska přijatelnosti ztrát na lidských životech požadavkům na přijatelné riziko a je třeba realizovat odpovídající nápravná opatření. Ta mimo jiné spočívají ve vybudování vodního díla Nové Heřminovy.



Obr. 4.10 $F-N$ ($G - LOL$) závislost pro lokalitu Krnov

4.6.4 Analýza ALARP

Při analýze ALARP je snahou snížit riziko na tak nízkou úroveň, jak je to rozumně dosažitelné. Pojem „rozumně dosažitelné“ představuje zvážení rizika vůči problémům, času a financím potřebným na jeho snížení a kontrolu, a to i v souvislosti s riziky přijímanými v jiných oblastech lidské činnosti. ALARP pak určuje úroveň, na jaké budou rizika snižována a dále kontrolována. Doporučuje se následující:

- v oblasti tolerovatelného rizika by měla být aplikována analýza ALARP,
- je-li riziko průkazně v netolerovatelné zóně, ALARP se neprovádí,
- analýza ALARP by měla být vždy provedena pro očekávaný počet obětí $LOL > 100$.

Očekávaný roční počet obětí $E(LOL)$ na životech se stanoví ze vztahu (4.24). Označme $E_{PRED}(LOL)$ a $E_{PO}(LOL)$ očekávaný roční počet obětí na životech před a po provedení opatření snižujících riziko ztrát na lidských životech. Průměrné náklady na jeden zachráněný život $CSSL$ v [Kč/osobu] se pak stanoví ze vztahu [GUIDELINES, 2023]:

$$CSSL = DS \cdot \frac{I - (RI_{s_PRED} - RI_{s_PO})}{E_{PRED}(LOL) - E_{PO}(LOL)}, \quad (4.25)$$

kde použité veličiny odpovídají značení dle kapitoly 4.6.1 a 4.6.2. Veličina $CSSL$ slouží jako srovnávací kritérium pro návrh opatření ke snížení rizika. V praxi se vzájemně srovnávají jednotlivá vodní díla, popř. varianty opatření týkající se konkrétního posuzovaného díla. Zásadní otázkou je stanovení „rozumné“ mezní hodnoty $CSSL_{MAX}$. Významným faktorem je vyspělost civilizace a životní úroveň obyvatelstva v hodnoceném regionu. Pro vytvoření představy slouží několik příkladů (po přepočtu na Kč a rok 2024):

- [HSE 2001] doporučuje $CSSL_{MAX} = 36$ mil. Kč/osobu pro silniční provoz.
- [DEFRA 2002] pro silniční provoz doporučuje $CSSL_{MAX} = 29$ mil. Kč/osobu.

- [HSE 2001] doporučuje železniční provoz $CSSL_{MAX} = 340$ až 500 mil. Kč/osobu).
- Podle metodiky výpočtu ztrát z dopravní nehodovosti na pozemních komunikacích v ČR odpovídá $CSSL_{MAX} = 27$ mil. Kč/osobu.

Je patrné, že výši $CSSL_{MAX}$ významně ovlivňuje kupní síla jednotlivých zemí. Při praktickém hodnocení se v případě rizika v tolerovatelné zóně mohou vzájemně srovnávat $CSSL$ pro jednotlivé lokality vystavené povodním, hydrotechnické stavby v rámci portfolia vlastníků, varianty opatření týkající se jednoho konkrétního posuzovaného vodního díla, apod. Pokud je $CSSL < CSSL_{MAX}$, je "rozumné" vynaložit náklady na další snížení rizika, v opačném případě není zájmem společnost riziko dále snižovat.

4.7 Rozšířená analýza rizika

Rizikovou analýzu a následné hodnocení analýzou nákladů a užitků je účelné provádět komplexně se zahrnutím potenciálních ztrát na lidských životech a se započtením provozních nákladů [F], [Julínek a kol., 2022].

Poměrový ukazatel efektivnosti vyjádřený vztahem (4.17) pak nabude tvaru:

$$EF_P = \frac{RI_{R,0} - RI_{R,V} + PN_0 - PN_V + CSSL \cdot (RI_{OR,0} - RI_{OR,V})}{I \cdot DS} [-], \quad (4.27)$$

kde $RI_{R,0}$, resp. $RI_{R,V}$ jsou průměrné roční povodňové riziko z materiálních škod pro referenční – nultou variantu "0" (např. stávající stav), resp. hodnocenou variantu "V" představující investici I . Analogicky $RI_{OR,0}$, resp. $RI_{OR,V}$ a PN_0 , resp. PN_V jsou průměrné roční povodňové riziko ze ztráty na životech a průměrné roční provozní náklady pro referenční, resp. hodnocenou variantu. I jsou celkové náklady na realizaci hodnocené varianty (provedení změny v systému), $CSSL$ vyjadřuje náklady na záchranu lidského života (kapitola 4.6.4), DS je diskontní sazba.

Absolutní efektivnost PPO vyjadřuje efektivnost vynaložených nákladů v absolutních ekonomických jednotkách za celou dobu očekávané provozuschopnosti (životnosti) díla:

$$AE_P = \frac{RI_{R,0} - RI_{R,V} + PN_0 - PN_V + CSSL \cdot (RI_{OR,0} - RI_{OR,V})}{DS} - I [\text{Kč}]. \quad (4.28)$$

Základní obecnou podmínkou rentability ze socioekonomického pohledu je splnění podmínek:

$$EF_P > 1; AE_P > 0. \quad (4.29)$$

Tento postup byl použit pro hodnocení variant uspořádání hrázových systémů v povodí řeky Moravy se zohledněním možnosti odstranění nepotřebných historických úseků ochranných hrází v majetku správce toku [Duchan a kol., 2022].

5. ZÁVĚR

Analýza rizika představuje efektivní nástroj pro hodnocení bezpečnosti a spolehlivosti hydrotechnických staveb. Vývoj a použití rizikové analýzy ve vodním hospodářství a posuzování vodních děl podmiňuje dostupnost úplných a spolehlivých podkladů o hodnocené lokalitě, resp. vodním díle.

Za hlavní přínos vědecké práce disertanta v uplynulých 20 letech lze považovat rozpracování metodiky pro využití metod rizikové analýzy v hydrotechnice a řešení řady dílčích úloh souvisejících s aplikacemi pro konkrétní hydrotechnické stavby.

V období cca do roku 2010, zejména ve vazbě na povodňové události v letech 1997 a 2002 a na navazující předpisy Evropské komise, byly vytvořeny předpoklady pro sestavení metodických pokynů pro implementaci rizikové analýzy v oblasti ochrany před přirozenými povodněmi. Šlo o vymezení jednotné terminologie a teoretických základů rizikové analýzy se zaměřením na protipovodňovou problematiku, realizaci řady ověřujících případových studií a následně o implementaci evropských předpisů do praxe protipovodňové ochrany ČR.

Paralelně byla studována problematika rizikové analýzy hydrotechnických staveb, především přehrad. V období 2008 až 2024 byla rozpracována řada dílčích úloh souvisejících s prováděním rizikové analýzy hydrotechnických staveb. Šlo o následující problémové okruhy:

- modelování porušení vzdouvacích staveb v důsledku přelítí, studium odolnosti zemních materiálů při jejich přelítí, odvození hydrogramu průlomové vlny v profilu hráze,
- problematika vnitřní eroze zemin, studium ztekucení nesoudržných zemin při jejich vysakování v podhráží, studium erodibility písků a procesu zpětné eroze při vytváření privilegované průsakové cesty,
- hodnocení dopadů v oblasti ztráty lidských životů při povodních,
- prostorové vyjádření nebezpečí v důsledku průsaků pod hydrotechnickými stavbami prostředky matematického modelování a GIS,
- rozšíření tradičního přístupu rizikové analýzy agregací dopadů v materiální sféře, ztráty lidských životů a provozních dopadů.

Lze konstatovat, že problematika hodnocení bezpečnosti, spolehlivosti a rizika spojeného s existencí hydrotechnických staveb je široká, a to zejména vzhledem k unikátnosti jednotlivých staveb. Ta je dána morfologickými, geologickými, hydrologickými a dalšími podmínkami lokality, typem zvolené konstrukce (např. betonová, zemní) a také účelem daného díla. Postupy rizikové analýzy je tak třeba volit a modifikovat s ohledem na uvedené faktory a také ve vazbě na dostupné podklady, jejich podrobnost a spolehlivost.

Další výzkum, i s ohledem na aktuální požadavky praxe, by se měl zaměřit na řešení následujících problémů:

- Řešení partikulárních problémů rizikové analýzy jednotlivých typů vodních děl, u nichž je třeba provést:
 - sestavení ucelených seznamů scénářů nebezpečí,
 - návrh postupů pro odhad pravděpodobnosti výskytu jednotlivých scénářů nebezpečí.
- Analýza rizika z porušení hydrotechnických staveb z důvodu iniciace a vývoje vnitřní erozi v zeminách je dosud málo propracovaná. Porušení vnitřní erozí přitom např. u přehrad představuje cca 45 až 50 % všech fatálních poruch.
- Hydrotechnické stavby jsou často prvky kritické infrastruktury. V této souvislosti je třeba zabývat se riziky souvisejícími s násilným porušením vzdouvacích staveb (válečný stav, terorismus, vandalismus).
- V souvislosti s probíhající klimatickou změnou a očekávaným častějším výskytem extrémních hydrologických jevů bude třeba diskutovat oprávněnost použití současných metod pro stanovení pravděpodobnosti výskytu povodňových situací.

6. SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

6.1 Literatura citovaná v tezích

- ALHASAN, Z., JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2015. Study of Dam Break Due to Overtopping of Four Small Dams in the Czech Republic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, Vol. 63, No 3, p. 717 - 729.
- ALHASAN, Z., JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2016. Comparison of specific sediment transport rates obtained from empirical formulae and dam breaching experiments, *Environ Fluid Mech*, DOI 10.1007/s10652-016-9463-2.
- BONATE, P. L. 2001. A Brief Introduction to Monte Carlo Simulation. *Clin Pharmacokinet* 2001; 40 (1): 15-22.
- BOND, A., SCHUPPENER, B., SCARPELLI, G., ORR, T. 2013. Eurocode 7: Geotechnical Design Worked examples. JRC, Luxembourg, 2013, 172 s.
- BRÁZDOVÁ, M., ŘÍHA, J. 2014. A Simple Model for the Estimation of the Number of Fatalities Due to Floods in Central Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1663–1676. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1663-2014>.
- CFBR, 2015. Recommendations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, CFBR, Octobre 2015, 132 s.
- CNB. 2024. Vývoj diskontní sazby. <https://www.cnb.cz/cs/casto-kladene-dotazy/Jak-se-vyvijela-diskontni-sazba-CNB/>.
- DEFRA. 2002. Reservoir Safety – Floods and Reservoir Safety Integration. <http://www.defra.gov.uk/environment/water/rs/riskassess.htm>.
- DRÁB, A., ŘÍHA, J. 2008. Riziková analýza záplavových území v procesu územního plánování - aplikace na území města Brna. *Urbanismus a územní rozvoj*, roč. XI, č. 2/2008, s. 25-33.
- DRÁB, A., ŘÍHA, J. 2010. The implementation of flood risk directive in the CR. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1977–1987, 2010 www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/1977/2010/ doi:10.5194/nhess-10-1977-2010.
- DRBAL, K. a kol. 2005. Výzkumný úkol VaV/650/5/02 „Návrh metodiky stanovení povodňových rizik a škod v záplavovém území a její ověření v povodí Labe“, VÚV T.G.M. Brno.
- DRBAL, K. a kol. 2008. Metodika stanovení povodňových rizik a škod v záplavovém území, VÚV T.G.M. pobočka Brno, MŽP ČR.
- DRBAL, K. a kol. 2011. Mapy rizik vyplývající z povodňového nebezpečí v ČR. Závěrečná zpráva. Brno, FAST VUT.
- DUCHAN, D., PETRULA, L., ŘÍHA, J. 2019. Numerical analysis for the dam break of the Choltický dam. In: *Sborník příspěvků z 18. Mezinárodní konference technické kontroly hrází*. 10. 9. 2019. Varšava: Instytut meteorologii i Gospodarki Wodnej.
- DUCHAN, D., DRÁB, A., ŘÍHA, J. 2020. Flood Protection in the Czech Republic. In: *Springer Water*, pp. 175-199.
- DUCHAN, D., JULÍNEK, T., ŘÍHA, J. 2022. Multicriterial analysis used for the optimisation of dike system management. *J. Flood risk manag*, 2022, 15 p., e12829,
- FENG, Z. K., NIU, W. J., JIANG, Z. Q. et al. 2020. Monthly operation optimization of cascade hydropower reservoirs with dynamic programming and latin hypercube sampling for dimensionality reduction. *Water resour manag*. 34, 2029–2041 (2020).
- FOŠUMPAUR, P., ŘÍHA, J., SATRAPA, L., VANÍČEK, J. 2007. Činnost strategického experta v rámci „Projektu prevence před povodněmi“, *Vodní hospodářství*, 4/2007, s. 114 - 118.

- FRANK, R., BAUDUIN, C., DRISCOLL, R., KAVVADAS, M., OVESEN, N. K., ORR, T., SCHUPPENER, B. 2004. Designers' Guide to EN1997-1 Euro-code 7: Geotechnical Design- General Rules, Thomas Telford, 2004, 232 s.
- GUIDELINES. 2023. Guidelines on Safety Assessments for Referable Dams. Department of Regional Development Manufacturing and Water, Queensland, 58 s.
- HSE. 2001. Reducing Risk, Protecting People, HSE decision making process, HSE, 2001, 78 p.
- HYDROEXPERT. 1998. VD Šance. Studie kritických provozních situací. Hydroexpert spol. sr.o. Praha.
- JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2008a. The Failure of Embankment Dams Due to Overtopping, monograph. VUTUM, 168 p.
- JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2008b. Stanovení území ohroženého zvláštní povodní. *Urbanismus a územní rozvoj*, roč. XI, č. 2/2008, str. 34 - 42.
- JONKMAN, S. N., VRIJLING, J. K., VROUWENVELDER, A. C. W. M. 2008. Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. *Nat Hazards* (2008) 46:353–389.
- JULÍNEK, T., DUCHAN, D., ŘÍHA, J. 2020. Mapping of uplift hazard due to rising groundwater level during floods. *J. Flood risk manag.*, 2020, e12601. [wileyonlinelibrary.com/journal/jfr3](https://www.wileyonlinelibrary.com/journal/jfr3), 13 p., jfr3.12601
- KREUZER, H., LÉGER, P. 2013. The Adjustable Factor of Safety: A Reliability-Based Approach to Assess the Factor of Safety for Concrete Dams. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Issue I, S. 1-24.
- LOH, W. L. 1996. On Latin hypercube sampling. *Ann. Statist.* 24(5): 2058-2080. DOI: 10.1214/aos/1069362310.
- PETRULA, L., HALA, M., ŘÍHA, J. 2018. Uncertainty in Determining the Critical Hydraulic Gradient of Uniform Glass Beads. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 81-90. ISBN: 978-3-319-99423-9.
- PETRULA, L., ŘÍHA, J. 2022. A new small-scale experimental device for testing backward erosion piping. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70(3), s. 376-384.
- PINSKY, M., KARLIN, S. 2010. An introduction to stochastic modeling. 4th edition. Academic Press. London. 563 p.
- RETTEMEIER, K., FALKENHAGEN, B., KÖNGETER, J. 2001. Risk assessment – new trends in Germany. *CIGB*, Q76.
- ŘÍHA, J. a kol. 2005. Riziková analýza záplavových území, *Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT Brno*, Sešit 7, CERM, 286 s.
- ŘÍHA, J. 2007. The Use of Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA) for Dam Risk Assessment. *75 th ICOLD Annual Meeting and Symposium „Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams“*, St. Petersburg, 24-29 June 2007.
- ŘÍHA, J. a kol. 2008. Úvod do rizikové analýzy přehrad. *Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT Brno*, Sešit 11, CERM, 2008, 355 s.
- ŘÍHA, J., ŠPANO, M. 2016a. Hodnocení bezpečnosti určených vodních děl metodou dílčích součinitelů, *Vodní hospodářství*, 2016, Vol. 66, 7, s. 1-6.
- ŘÍHA, J., ŠPANO, M. a kol. 2016b. Hodnocení bezpečnosti určených vodních děl metodou mezních stavů. *Certifikovaná metodika OSSVHSP MZe č. j. 15612/2016-MZE-15112*. VUT FAST v Brně, 2016, 154 s.
- ŘÍHA, J., KOTAŠKA, S. 2019. Přehled metod modelování porušení zemních hrází. *Vodní hospodářství*, 2019, roč. 69, č. 11/2019, s. 2-10.

- ŘÍHA, J., PETRULA, L., HALA, M. 2020a. Statistical analysis of experimentally determined critical hydraulic gradients for heave. *Géotechnique Letters*, 10(2). E-ISSN: 2045-2543.
- ŘÍHA, J., KOTAŠKA, S., PETRULA, L. 2020b. Dam Break Modeling in a Cascade of Small Earthen Dams: Case Study of the Čížina River in the Czech Republic. *Water* 2020, 12, 2309.
- ŘÍHA, J., PETRULA, L. 2023. Experimental Research on Backward Erosion Piping Progression. *Water* 2023, 15, 2749.
- ŘÍHA, J., ŠPANO, M. a kol. 2022. Asfaltobetonová plášťová těsnění hydrotechnických staveb. Navrhování, provádění, provozování a opravy. *Certifikovaná metodika OSSVHSP MZe -45554/2022-15112*. VUT FAST v Brně, 132 s.
- ŘÍHA, J. 2024. Assessment of the 2nd Flood Hazards and Risk Maps (FHRMs) for CZ and SK and 2nd Flood Risk Management Plans (FRMPs) for CZ under the Floods Directive. Millieu, Brussels, Belgium.
- TICHÝ, M. 1994, 1996. Rizikové inženýrství. 1 - Riziko a jeho odhad. Stavební obzor 9/94, 2 – Identifikace nebezpečí. *Stavební obzor* 9/95, 3 – Pravděpodobnost vzniku nepříznivé události. *Stavební obzor* 1/96.
- USACE. 2016. Discount Rates in the Economic Evaluation of U.S. Army Corps of Engineers Projects, CRS Report R44594, 41 p.
- VOTRUBA, L., HERMAN, J. a kol. 1993. Spolehlivost vodohospodářských děl. *Česká matice technická*, Praha. 488 s.
- YAZDANI, M., GENCARELLI, C. N., SALVATI, P., MOLINARI, D. 2023. An empirical flood fatality model for Italy using random forest algorithm. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 98, 104110, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023>.
- ZHU, Y., NIU, X., WANG, J., GU C., SUN, Q., LI, B., HUANG, L. 2020. A Risk Assessment Model for Dam Combining the Probabilistic and the Nonprobabilistic Methods. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2020, Article ID 9518369, 12 p.

6.2 Citované technické normy

- ČSN EN 1990 ed. 2 (73 0002) Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.
- ČSN EN 1997 (73 1000) Eurokód 7. Navrhování geotechnických konstrukcí.

6.3 Metodické pokyny, směrnice a další podklady

- [A] Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, European Parliament, Council, 2007. Směrnice evropského parlamentu a rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik.
- [B] Smernica pre kategorizáciu vodných stavieb a zoznam odborne spôsobilých osôb pre výkon TBD v posobnosti Ministerstva podohospodárstva Slovenskej Republiky. Vestník Ministerstva podohospodárstva Slovenskej Republiky, Ročník XXXV, Čiastka 11, 7.5.2003..
- [C] Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. MŽP, 2019, 91 s.
- [D] Metodika pro posuzování protipovodňových opatření navržených do II. etapy programu „prevence před povodněmi“, MZe, Praha, červen 2005.
- [E] Metodika pro posuzování protipovodňových opatření navržených do III. etapy programu „prevence před povodněmi“, MZe, Praha, červenec 2014.
- [F] Metodická podpora managementu hrázových systémů. Certifikovaná metodika č. 03/2021 vydaná OSSVH MZe, 2021, 57 s.

6.4 **Soupis souvisejících prací autora**

Soupis souvisejících prací autora je vázán k jednotlivým řešeným problémovým okruhům. Práce citované v databázích WOS a Scopus jsou vyznačeny silně.

Analýza poruch hydrotechnických staveb

KADERÁBKOVÁ, J., GOLÍK, P., ŘÍHA, J. 2005. Historické povodně a poruchy ochranných hrází v povodí řeky Moravy, *Vodní hospodářství*, 10/2005, s. 285 - 287.

KOTAŠKA, S., ŘÍHA, J. 2023. Dam Incidents and Failures – Cases in the Czech Republic. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2023, roč. 31, č. 1, s. 22-33. ISSN: 1338-3973. (WOS)

Bezpečnost a spolehlivost hydrotechnických staveb

ŘÍHA, J. Safety problems of small embankment dams in the Czech Republic. *Acta hydrotechnica* 26/44 (2013), Ljubljana. ISSN 1581-0267.

ŘÍHA, J., ŠPANO, M. a kol. 2016. Hodnocení bezpečnosti určených vodních děl metodou mezních stavů. *Certifikovaná metodika OSSVHSP MZe č. j. 15612/2016-MZE-15112*. VUT FAST v Brně, 2016, 154 s.

ŘÍHA, J., ŠPANO, M. 2017. Practical consequences of dam safety re-assessment in the Czech Republic, *The International Journal of HydroPower & Dams*, ISSN 1352-2523, Aqua-Media International Ltd, Wallington. Surrey, SM6 6AN, UK. Vol. 24, Issue 3, 2017, pp 31-35.

VRUBEL, J., ŘÍHA, J. 2017. Discussion on the Safety Factors of Slopes Recommended for Small Dams, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, ISSN 1211-8516, Mendel University Press, Brno, 2017, pp 569 - 576. (WOS-neindexované, Scopus)

ŠPANO, M., ŘÍHA, J.: Modelling hazards impacting the flow regime in the Hranice Karst due to the proposed Skalička Dam, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* Volume 24, issue 11/ NHESS, 24, 3683–3701. (WOS, Scopus)

Ochrana před povodněmi

DRÁB, A., ŘÍHA, J. 2008. Riziková analýza záplavových území v procesu územního plánování - aplikace na území města Brna. *Urbanismus a územní rozvoj*, roč. XI, č. 2/2008, s. 25-33.

DUCHAN, D., DRÁB, A., ŘÍHA, J. 2020. Flood Protection in the Czech Republic. In: *Springer Water*, pp.175-199. DOI 10.1007/978-3-030-18363-9_8. (WOS, Scopus)

Souhrnné práce k problematice rizikové analýzy v hydrotechnice

ŘÍHA, J. a kol. 2005. Riziková analýza záplavových území, *Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT Brno*, Monografie, Sešit 7, CERM, 286 s.

ŘÍHA, J. a kol. 2008. Úvod do rizikové analýzy přehrad. *Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT Brno*, Monografie, Sešit 11, CERM, 355 s.

DRÁB, A., ŘÍHA, J. 2010. The implementation of flood risk directive in the CR. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1977–1987, 2010 www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/1977/2010/ doi:10.5194/nhess-10-1977-2010. (WOS, Scopus)

Modelování porušení vzdouvacích staveb v důsledku přelití

ŘÍHA, J., DANĚČEK, J. 2000. Matematické modelování porušení sypaných hrází v důsledku přelití, *Vodohospodářský časopis (J.Hydról.Hydromech.)*, 48, 2000, 3, 165 - 179.

JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2008. The Failure of Embankment Dams due to Overtopping, *VUTIU*M, Monografie, 168 p.

- PAŘÍLKOVÁ, J., ŘÍHA, J., ZACHOVAL, Z. 2012. The Influence of Roughness on the Discharge Coefficient of a Broad-crested Weir. *J. Hydrol. Hydromech.*, 60(2), 2012, 2, pp. 101-114. (WOS, Scopus)
- ALHASAN, Z., JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2015. Study of Dam Break Due to Overtopping of Four Small Dams in the Czech Republic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, Vol. 63, No 3, p. 717 - 729. (WOS - neindexované, Scopus)
- ŘÍHA, J., ZACHOVAL, Z. 2014. Discharge Coefficient of a Trapezoidal Broad-Crested Side Weir for Low Approach Froude Numbers. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, Vol. 140, No. 8, August 2014, 06014013. (WOS, Scopus)
- ALHASAN, Z., JANDORA, J., ŘÍHA, J. 2016. Comparison of specific sediment transport rates obtained from empirical formulae and dam breaching experiments, *Environ Fluid Mech*, DOI 10.1007/s10652-016-9463-2. (WOS, Scopus)
- ALHASAN, Z., DUCHAN, D., ŘÍHA, J. 2019. Influence of surface lining type on the probability of dike breaching due to overtopping. *J Flood Risk Management*. e12534. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12534>. (WOS, Scopus)
- ŘÍHA, J., DUCHAN, D., ZACHOVAL, Z., ERPICUM, S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M., DEWALS, B. 2019. Performance of a shallow-water model for simulating flow over trapezoidal broad-crested weirs. *J. Hydrol. Hydromech.*, 67, 2019, 4, 322–328. (WOS, Scopus)
- ŘÍHA, J., KOTAŠKA, S. 2019. Přehled metod modelování porušení zemních hrází. *Vodní hospodářství*, 2019, roč. 69, č. 11/2019, s. 2-10. ISSN: 1211-0760.
- ŠPANO, M., BORNSCHEIN, A., POHL, R., ŘÍHA, J., SCHUTTRUMPF, H. 2022. Wave run-ups and overtopping affected by oblique wave approaches and currents. *Slovak Journal of Civil Engineering*, Volume 30, Issue2, Page 12-21, DOI10.2478/sjce-2022-0010. (WOS)

Problematika porušení v důsledku filtrační deformace zemin

- ŘÍHA, J., ŠVANCARA, J. 2006. The failure of the Mostiště embankment dam. In: *Proceedings of the Conference of the British Dam Society: Improvements in Reservoir Construction, Operation and Maintenance*, pp. 391–403. (WOS - neindexované, Scopus)
- ŘÍHA, J., JANDORA, J. 2015. Pressure conditions in the hole erosion test. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 52, Issue: 1, p. 114-119, January 2015. (WOS, Scopus)
- PETRULA, L., HALA, M., ŘÍHA, J. 2018. Uncertainty in Determining the Critical Hydraulic Gradient of Uniform Glass Beads. In: *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG IE 26th Annual Meeting 2018*. Cham: Springer, s. 81-90. ISBN: 978-3-319-99423-9. (Scopus)
- GHAFOORI, Y., VIDMAR, A., ŘÍHA, J., KRYŽANOWSKI, A. 2020. A Review of Measurement Calibration and Interpretation for Seepage Monitoring by Optical Fiber Distributed Temperature Sensors. *SENSORS*, roč. 20, č. 19, s. 1-23. ISSN: 1424-8220. (WOS, Scopus)
- PETRULA, L., ŘÍHA, J. 2022. A new small-scale experimental device for testing backward erosion piping. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70(3), s. 376-384. ISSN: 0042-790X. DOI: <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0023>. (WOS, Scopus)

ŘÍHA, J., PETRULA, L. 2023. Experimental Research on Backward Erosion Piping Progression. *Water*. Volume 15, Issue 15, Article number 2749. <https://doi.org/10.3390/w15152749>. (WOS, Scopus)

Hodnocení dopadů v oblasti ztráty lidských životů při povodních

BRÁZDOVÁ, M., ŘÍHA, J. 2014. A Simple Model for the Estimation of the Number of Fatalities Due to Floods in Central Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1663–1676. <https://doi.org/10.5194/NHESS-14-1663-2014>. (WOS, Scopus)

Semikvantitativní hodnocení metodami FMEA/FMECA

ŘÍHA, J. 2007. The Use of Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMECA) for Dam Risk Assessment. 75 th ICOLD Annual Meeting and Symposium „Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams“, St. Petersburg.

Interpretace výsledků, prostorové vyjádření nebezpečí

JULÍNEK, T., DUCHAN, D., ŘÍHA, J. 2020. Mapping of uplift hazard due to rising groundwater level during floods. *J. Flood risk manag.*, 2020, e12601. [wileyonlinelibrary.com/journal/jfr3](https://doi.org/10.1111/jfr3.12601), 13 p. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12601>. (WOS, Scopus)

ŘÍHA, J., JULÍNEK, T., DUCHAN, D. 2023. Quantification of Groundwater Hazards Related to Fluvial Floods via Groundwater Flow Modelling: A Review. *Water*, 2023, roč. 15, č. 6, s. 1-23. ISSN: 2073-4441. (WOS, Scopus)

Riziková analýza s agregací jednotlivých dopadů

ŘÍHA, J. a kol. Metodická podpora managementu hrázových systémů. Certifikovaná metodika č. 03/2021 vydaná OSSVH MZe, 2021, 57 s.

DUCHAN, D., JULÍNEK, T., ŘÍHA, J. 2022. Multicriterial analysis used for the optimisation of dike system management. *J. Flood risk manag*, 2022, 15 p., e12829, DOI: 10.1111/jfr3.12829. (WOS, Scopus)

7. RESUMÉ

The dissertation *The Assessment of Safety and Failures of Hydraulic Structures Using Risk Analysis* gives a comprehensive summary of the research carried out in the field of safety and risk analysis of natural and dam-break floods by the applicant and/or under the applicant's supervision.

In the period until 2010, especially in connection with the flood events in 1997 and 2002 and the subsequent regulations of the European Commission, the prerequisites were created for the compilation of guidelines for the implementation of risk analysis in the field of protection against natural floods. It involved the theoretical foundations of risk analysis and the implementation of a number of verifying case studies, and subsequently the implementation of European directive [A] into the practice of flood protection in the Czech Republic.

In parallel, risk analysis of hydraulic structures, especially dams, was studied. In the period from 2008 to 2024, a number of partial tasks related to the implementation of risk analysis at water retaining structures was elaborated. These include:

- modelling dam failure due to overtopping and piping, study of the resistance of earth materials subject to flow, derivation of the dam break hydrograph,
- internal erosion in soils, the study of the erodibility of sands and the process of backward erosion piping in embankments and their foundations,
- assessment of impacts in the area of loss of human life during floods,
- spatial analysis of hazard due to flooding and seepage using GIS,
- developing methodology for combining risk in the material sphere, loss of human life and operational impacts.

The main aim of the dissertation is to show how the methods of risk analysis can be applied in hydraulic engineering in flood protection and safety assessment of water retaining structures.

The dissertation consists of two main parts. After short introduction the first part (Chapter 3 of this thesis) is giving a description of "traditional" methods for the safety assessment of hydraulic structures based on safety factor and on the limit state concept used in conjunction with a partial factor method. Even if these methods are incorporated into existing technical standards, in case of hydraulic structures there are several failure modes for which guidance (recommended safety factors, partial reliability factors) is missing. During the research of applicants team the certified guidance was developed to cover this gap.

The second, more comprehensive part (Chapter 4 of this thesis), summarizes methods of risk analysis focused on the material losses and losses of human lives. Three conceptual steps in the risk analysis, namely qualitative, semiquantitative and quantitative approaches are described. The theoretical analysis is completed by practical examples by which author demonstrates applicability of individual methods.