



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

MULTIKRITERIÁLNÍ HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VYBRANÝCH ČÁSTÍ VODOVODŮ

MULTI-OBJECTIVE CONDITION ASSESSMENT OF SELECTED PARTS OF WATER DISTRIBUTION
SYSTEMS

ZKRÁCENÁ VERZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. MILOSLAV TAUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV TUHOVČÁK, CSc.

BRNO 2017

KLÍČOVÁ SLOVA

vodovod, hodnocení technického stavu, asset management, deteriorace, bodování technického stavu

KEY WORDS

water distribution system, condition assessment, asset management, deterioration, condition rating

NÁZEV PRACOVÍŠTĚ, NA KTERÉM JE ULOŽEN RUKOPIS DISERTAČNÍ PRÁCE

Ústav vodního hospodářství obcí
Fakulta stavební
Vysoké učení technické v Brně
Žižkova 17
602 00 Brno

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DISERTAČNÍ PRÁCE

TAUŠ, Miloslav. *Multikriteriální hodnocení technického stavu vybraných částí vodovodů*. Brno, 2016. 152 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	6
3	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	7
3.1	HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ	7
3.2	MULTIKRITERIÁLNÍ OPTIMALIZACE	12
3.3	STÁVAJÍCÍ PRAXE VODÁRENSKÝCH SPOLEČNOSTÍ V ČESKÉ REPUBLICE.....	15
3.4	SHRnutí.....	16
4	NÁVRH METODIKY HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ	17
4.1	JEDNOTNÁ METODIKA HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ	17
4.2	MODULY JEDNOTNÉ METODIKY	22
4.3	TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉ METODIKY	24
4.4	WEBOVÁ APLIKACE TEA WATER.....	25
5	PŘÍPADOVÉ STUDIE	26
5.1	TEAP – ČERPACÍ STANICE	26
5.2	TEAN – VODOVODNÍ SÍŤ	27
5.3	TEAS – VODOVODNÍ ŘADY	29
6	ZÁVĚR.....	30
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	33
	ŽIVOTOPIS	35
	ABSTRACT	36

1 ÚVOD

Stárnutí vodárenské infrastruktury a zhoršování jejích fyzických a technických vlastností, tzv. deteriorace, je přirozeným jevem. Z toho vyplývá potřeba kontinuální plánované obnovy této infrastruktury. Vzhledem k tomu, že finanční prostředky pro obnovu infrastruktury jsou většinou poměrně omezené, je nezbytné zaměřit se na důkladné plánování obnovy a tím i na efektivní využití těchto omezených finančních prostředků.

Pro podporu plánování obnovy vodovodních sítí je k dispozici řada metod a počítačových programů, které se ale povětšinou snaží odhadnout budoucí vývoj stavu sítě a jsou zaměřeny pouze na plánování obnovy a výběr sanačních technologií pro vodovodní potrubí. Vodovodní sítě jsou ale komplexními systémy, tvořenými minimálně několika z následujících prvků: jímací objekty surové vody, přívodní řady surové vody, úpravny vody, čerpací stanice, vodojemy, příváděcí řady pitné vody, rozvodné řady a další. Nejen u potrubí ale i u těchto dalších objektů je potřebné dokumentovat a evidovat jejich technický stav.

Legislativa České republiky sice hodnocení technického stavu vodárenské infrastruktury nevyžaduje, ale vyžaduje zpracování a plnění plánu financování obnovy [1], který je založen na stanovení procenta opotřebení. Způsob, jakým bude stanoveno procento opotřebení, je pouze doporučen a spíše ponechán na vlastníkovu infrastruktury. V zahraničí bývá také vyžadováno hlášení technického stavu vodárenské infrastruktury (např. Anglie, Skotsko, Wales), jednotná metodika hodnocení však ani zde není stanovena [2].

Specifickou situací v České republice je značné množství drobných vlastníků a provozovatelů vodovodů a kanalizací. Dle údajů majetkové evidence bylo v ČR v roce 2014 celkem 6270 vlastníků a 2571 provozovatelů vodárenské infrastruktury [3]. Kromě několika nejvýznamnějších vodárenských společností zde tedy působí značné množství malých společností, u kterých je možné předpokládat nedostatek finančních a personálních zdrojů pro provádění hodnocení technického stavu. Zde může nalézt uplatnění jednotná metodika hodnocení technického stavu vodovodů, která je zpracována v rámci předložené doktorské disertační práce.

Navržená metodika je metodou nepřímého hodnocení technického stavu na základě navržených ukazatelů. Jedná se o screeningový nástroj, určený k předběžnému posouzení technického stavu. Navržená metodika má 4 úrovně: výsledné hodnocení, části objektu, technické ukazatele a faktory. Pro každý faktor je navržena hodnotící tabulka. Dle hodnoty, kterou faktor nabývá, přiřadí uživatel bodové hodnocení faktoru. Postupně od nejnižší úrovně je prováděna agregace hodnocení pomocí metody váženého součtu. Navržená metodika má takovou strukturu, aby bylo možné odhalit problémové místo každého objektu přes jednotlivé části objektu, ukazatele až k jednotlivým faktorům. Při hodnocení technického stavu tak dochází ke sběru cenných dat. Výsledná kategorie objektu je tak užitečným vodítkem a lze ji využít pro třídění objektů dle jejich technického stavu, vždy ale musí být přístupna také celá informace o hodnocení až k jednotlivým faktorům.

Je navrženo celkem 7 modulů metodiky: TEAR – jímací objekty, TEAT – úpravny vody, TEAM – příváděcí řady, TEAA – vodojemy, TEAP – čerpací stanice, TEAN – vodovodní sítě, TEAS – vodovodní řady. Pro každý modul je třeba definovat soubor ukazatelů, faktorů a jejich

hodnotících tabulek a relativních vah. Váhy pro účely navržené metodiky byly stanoveny přímou metodou, tedy přímým odhadem vah.

Výsledkem hodnocení je zařazení ukazatelů, částí objektu a celkově celého objektu do kategorie technického stavu A, B, C, D, nebo E, které odpovídá doporučená akce. Navržená metodika umožní např. benchmarking technického stavu vodovodů, umožní založení plánu financování obnovy na technickém stavu blízském realitě a přispěje k účelnějšímu využití omezených finančních prostředků určených na obnovu vodárenské infrastruktury.

Struktura disertační práce je následující. V kapitole 2 jsou definovány vytyčené cíle disertační práce. Analýza současného stavu problematiky hodnocení technického stavu vodovodů a multikriteriální optimalizace je provedena v kapitole 3. V kapitole 4 je prezentována navržená jednotná metodika hodnocení technického stavu vodovodů a její dílčí moduly. Navržená metodika byla testována na reálných vodárenských objektech, vybrané hodnocené objekty jsou prezentovány v kapitole 5. Kapitola 6 shrnuje dosažené výsledky a doporučení pro další vývoj.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je návrh a ověření metodiky hodnocení technického stavu vodovodů se zaměřením na čerpací stanice, vodovodní řady a vodovodní síť.

Cílem je na základě provedené analýzy současného stavu problematiky, shrnutí východisek a doporučení pro hodnocení technického stavu, provést návrh jednotné metodiky a hodnotících kritérií pro jednotlivé řešené prvky vodovodu, způsob stanovení a evaluace jednotlivých kritérií. Dále bude metodika ověřena na konkrétních vodovodech a bude zpracována softwarová aplikace pro její využívání v praxi.

Zpracování disertační práce bylo rozděleno do následujících dílčích cílů:

- **Zpracování kritické rešerše současného stavu problematiky:** Cílem je zpracování podrobné rešerše, stanovení a vysvětlení pojmů, termínů a zhodnocení dosavadních poznatků převážně zahraniční odborné literatury.
- **Návrh jednotné metodiky:** Bude proveden návrh jednotné metodiky, která je společná pro všechny hodnocené prvky vodovodu. Návrh bude vycházet z rešerše současného stavu problematiky a z prací dosud publikovaných na Ústavu vodního hospodářství obcí.
- **Návrh hodnotících kritérií:** Na základě zpracované rešerše a poznatků z odborné praxe bude proveden návrh hodnotících kritérií pro jednotlivé řešené prvky vodovodu. Pro jednotlivá kritéria je třeba navrhnout jejich rozměr a způsob stanovení.
- **Ověření na případových studiích:** Navržená metodika pro hodnocení jednotlivých řešených prvků vodovodů bude ověřena na reálných vodovodech. Cílem je ověřit dostupnost dat pro navržená kritéria a schopnost metodiky vystihnout reálný technický stav prvku.
- **Zpracování softwarové aplikace:** Pro jednotlivé řešené prvky vodovodu budou zpracovány sešity aplikace MS Excel umožňující hodnocení těchto prvků dle navržených kritérií. Dále bude na základě těchto sešitů programátorem zpracována webová aplikace pro hodnocení technického stavu jednotlivých prvků vodovodů.

3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

3.1 HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ

Existuje řada metod a počítačových programů pro podporu plánování obnovy vodovodních sítí. Tyto prostředky, snažící se většinou odhadnout budoucí vývoj stavu sítě, jsou však zaměřeny pouze na plánování obnovy a výběr sanačních technologií pro vodovodní potrubí. Systémy zásobování pitnou vodou se však v žádném případě nesestávají pouze z vodovodního potrubí. Jedná se vždy o komplexní systém tvořený minimálně několika z následujících prvků: jímací objekty surové vody, přívodní řady surové vody, úpravny vody, čerpací stanice, vodojemy, přiváděcí řady pitné vody, rozvodné řady a další. V zájmu každého vlastníka vodovodu by měla být znalost technického stavu systému, který vlastní. Tyto informace lze pak využít například při rozhodování o investičních akcích a při plánování obnovy vodovodů.

3.1.1 Definice hodnocení technického stavu

Hodnocení technického stavu je důležitou součástí „asset managementu“ z hlediska kvantifikace a určení výkonnosti infrastrukturního majetku. Asset managementem se rozumí *„kombinace manažerských, finančních, ekonomických, inženýrských a dalších praktik aplikovaných na fyzická aktiva (fyzický majetek) za účelem maximalizace hodnoty odvozené za celý životní cyklus při zachování přijatelné úrovně služeb vzhledem k zákazníkům, veřejnosti a životnímu prostředí a za přijatelné míry rizika“* [4]. Hodnocení technického stavu je *„shromáždění dat a informací prostřednictvím přímých a/nebo nepřímých metod následované analýzou těchto dat a informací za účelem určení současného a/nebo budoucího stavebního a hydraulického stavu a kvality vody“* [5].

Hodnocení technického stavu ve smyslu, jakým bude využito v disertační práci, je nepřímým **předběžným hodnocením** jednotlivých částí posuzovaného systému. Účelem předběžného posouzení je především identifikace kritických prvků a částí systému na základě kvantifikace technického stavu.

Při nepřímém hodnocení technického stavu jsou využívána následující data [5]:

- **historická data** (např. stáří potrubí, výrobce, zkušenosti s různými trubními materiály);
- **environmentální data** (např. půdní podmínky, hladina podzemní vody, zatížení na povrchu);
- **provozní data** (např. průtok, záznamy oprav a údržby).

Přestože nepřímé metody nejsou schopny poskytnout dostatečnou detailnost a spolehlivost potřebnou pro jednoznačné rozhodování o opravách a obnově prvků systému s vysokými následky poruchy [5], mohou poskytnout cenné informace.

3.1.2 Faktory ovlivňující technický stav vodovodů

Míra poruchovosti a deteriorace vodovodů je ovlivňována mnoha faktory. Tyto faktory zahrnují provozní, environmentální a fyzické charakteristiky [6]. Kleiner a Rajani [7] rozdělují faktory způsobující deterioraci vodovodních řadů na:

- **statické faktory** – neměnné v čase (např. trubní materiál, průměr potrubí, tloušťka stěny, půdní vlastnosti, způsob pokládky);
- **dynamické faktory** – vztahující se k prostředí působícímu na potrubí (např. stáří, půdní vlastnosti, teplota půdy a vody, vlhkost, elektrický odpor, dynamické zatížení);
- **provozní faktory** – např. míra obnovy, katodická ochrana, tlak vody.

Řadu kritérií hodnocení technického stavu uvádí Marlow [2]. Nedá se však říct, že pro dva vodovodní systémy nabývající stejných hodnot uvedených faktorů probíhají degradační procesy shodně. Liší se v závislosti na nejistých faktorech, které mohou způsobit odlišnosti technického stavu, proto jsou procesy deteriorace pro různé vodovodní sítě různé [8].

3.1.3 Typy výstupních informací z hodnocení technického stavu

Výstup analýzy hodnocení technického stavu může mít různé formy. Může se jednat například o inženýrské výpočty, určení pravděpodobnosti poruchy, stanovení zbytkové životnosti, známkování (bodování) stavu a/nebo výkonnosti [2]. Jak uvádí Marlow [2], stanovení pravděpodobnosti poruchy nebo zbytkové životnosti může být obtížné a těžko vzájemně srovnatelné. Z hlediska známkování technického stavu Marlow [2] rozlišuje:

- **známkování technického stavu** (přidělené na základě vizuální inspekce podle definovaného popisu každé známky);
- **známkování výkonnosti** (kategorizuje schopnost prvku fungovat v souladu s požadavky provozovatele na základě provozních informací, opět přidělené na základě předem stanoveného popisu každé známky).

Známkovací (kategorizační) hodnocení sice poskytuje užitečné souhrnné informace, ale dochází tím k podstatné ztrátě informací [2]. Toto hodnocení bylo navrženo jako screeningový nástroj, což znamená, že pro podporu rozhodování a prioritizace je třeba dalších informací, jako jsou analýzy rizik, nákladů a provozních souvislostí [2]. V praxi se stává, že k rozhodování jsou použita samotná známková hodnocení, přičemž toto hodnocení má být teprve prvním krokem komplexního hodnocení [2]. Použití známkovacích systémů nad jejich původní zamýšlené využití jako počátečního screeningového nástroje je pochopitelné vzhledem k úsilí vynaloženému při jejich návrhu a aplikaci, ale je třeba zvážit dopady této praxe na schopnost optimalizace kapitálových a provozních výdajů společnosti [2].

3.1.4 Publikované metody nepřímého hodnocení technického stavu

Následující kapitola shrnuje dostupné informace zahraniční odborné literatury v problematice hodnocení technického stavu jednotlivých prvků vodovodů.

Ve zkrácené verzi disertační práce jsou prezentovány pouze informace, vztahující se k navrhovaným modulům – čerpací stanice, vodovodní sítě a vodovodní řady.

Čerpací stanice

Metodiku hodnocení technického stavu vodovodních řadů, vodojemů a čerpacích stanic s využitím metody FMEA prezentuje Tuhovčák [9]. Metoda FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) je metodou analýzy spolehlivosti, která umožňuje určení poruch s významnými důsledky ovlivňujícími funkci systému a jeho prvků. Pro hodnocení vodovodů metodou FMEA

je třeba stanovit technické ukazatele (TU) pro jednotlivé subsystémy zásobování pitnou vodou. Pro každý ukazatel se definují způsoby jeho stanovení, vstupní data, fyzikální rozměr a způsob prezentace. Ohodnocení daného prvku podle určitého technického ukazatele je provedeno na základě tabelovaných mezí jednotlivých ukazatelů. Pro každý jednotlivý ukazatel je navržena tabulka s vymezením hranic jednotlivých kategorií. Je možné také stanovit souhrnné hodnocení (TS) technického stavu daného prvku na základě váženého součtu dle vztahu

$$TS = \sum_{i=1}^n TU_i W_i \quad (1)$$

kde:

n je celkový počet použitých ukazatelů;

TU_i je hodnota v rozmezí 1 pro hodnocení K1 až 5 pro hodnocení K5 dle hodnocení příslušného TU;

W_i je váha přiřazená příslušnému ukazateli, přičemž suma vah jednotlivých ukazatelů je rovna 1.

Pro hodnocení technického stavu čerpacích stanic autoři navrhli následující ukazatele:

- TU1 – Stáří stavebního objektu;
- TU2 – Posouzení stavu objektu;
- TU3 – Opotřeбенí čerpadla;
- TU4 – Účinnost čerpadla;
- TU5 – Doba čerpaní;
- TU6 – Stáří trubního materiálu;
- TU7 – Pracovní bod čerpadla;
- TU8 – Stáří armatur;
- TU9 – Řízení čerpadel.

V otázce hodnocení čerpadel je možné obrátit se také na výrobce či dodavatele čerpadel. Např. společnost GRUNDFOS s.r.o. nabízí provedení energetického a technického auditu čerpadla. Jak společnost GRUNDFOS [10] uvádí, náklady na čerpací techniku za dobu její životnosti jsou až z 85 % tvořeny náklady na elektrickou energii. Technický audit čerpadla dle sestává z prohlídky měřeného čerpadla a navazujícího hydraulického okruhu, instalace měřidel, vlastního měření a návrhu nového řešení čerpadla.

Vodovodní sítě a řady

Ukazuje se, že největší snaha byla v řešené problematice věnována hodnocení vodovodních řadů. Metodiku hodnocení technického stavu vodovodních sítí založenou na metodě FMEA uvádí Tuhovčák [9]. Jak uvádí, při hodnocení vodovodních řadů je vhodné vyčlenit a samostatně hodnotit hlavní distribuční systém (HDS) a rozvodnou síť (RS). U velkých vodárenských systémů pak doporučuje rozdělení RS na menší prvky, např. samostatné vodovody, tlaková pásma, měřicí okruhy. Na základě rozsahu a dostupnosti potřebných podkladů se volí navržené technické ukazatele, kterými se hodnotí uvedené prvky systému. Autoři navrhuji následující ukazatele hodnocení technického stavu vodovodních řadů.

Pro hodnocení technického stavu HDS:

- TU 1 - stáří trubního materiálu vodovodního řadu;
- TU 2 - hydraulická kapacita;
- TU 3 - vliv na kvalitu vody;
- TU 4 - protirázová ochrana řadu;

Pro hodnocení technického stavu RS:

- TU 5 - stáří trubního materiálu vodovodní sítě;
- TU 6 - poruchovost vodovodních řadů;
- TU 7 - ztráty vody;
- TU 8 - tlakové poměry;
- TU 9 - vliv na kvalitu vody.

Pro uvedené ukazatele byly navrženy tabulky, které vymezují jednotlivé kategorie K1 až K5. Je možné stanovit souhrnné hodnocení technického stavu TS posuzované části distribučního systému podle vztahu (1).

Jako reakci na novelu zákona č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích [1], která zavedla povinnost mít od roku 2008 zpracovány plány financování obnovy, vypracovala společnost Vodovody a kanalizace Jižní Čechy, a. s. metodu multikriteriálního rizikového hodnocení technického stavu majetku. Tuto metodu prezentuje Štíhová [11]. Pro multikriteriální analýzu stavu vodovodní sítě byla navržena následující kritéria: průměr a materiál potrubí, hydrostatický tlak a jeho kolísání, ztráty vody v potrubí, použité trubní spoje, počet poruch zaznamenaných v uplynulých 5 letech, dopravní zatížení potrubí a zatížení podzemní vodou. Kritéria multikriteriální analýzy pro objekty byla navržena: stáří objektu a technický stav z pohledu provozovatele. Způsob stanovení celkového hodnocení technického stavu z jednotlivých kritérií není v příspěvku prezentován.

Al-Barqawi a Zayed zpracovali model hodnocení technického stavu vodovodních řadů založený na metodě AHP [12] a také model umělých neuronových sítí ANN [8], aby později tyto metody spojili a představili model hodnocení technického stavu využívající metod AHP i ANN [13]. Pro modely byly navrženy hodnotící ukazatele zahrnující fyzické, environmentální i provozní ukazatele.

Další aplikaci neuronových sítí pro hodnocení technického stavu vodovodních řadů provedl Geem [14]. Navržené hodnotící ukazatele byly následující:

- | | |
|----------------------------|--|
| • trubní materiál; | • způsob uložení; |
| • průměr potrubí; | • druh půdy; |
| • provozní tlak; | • stáří potrubí; |
| • vnitřní ochrana potrubí; | • hloubka uložení; |
| • vnější ochrana potrubí; | • počet jízdnic pruhů komunikace nad potrubím. |
| • katodická ochrana; | |

Uvedené ukazatele tvořily vstupní vrstvu neuronové sítě, přičemž výstupní vrstvou byla jedna proměnná reprezentující celkový stav potrubí.

U.S. EPA [15] uvádí řadu dedukčních ukazatelů pro vodovodní potrubí, které poukazují na potenciální přítomnost procesů způsobujících deterioraci potrubí ovšem bez znalosti, zda se tyto procesy skutečně realizovali. Ukazatele jsou rozděleny podle jednotlivých trubních materiálů, následující uvedené ukazatele se vyskytují nejčastěji:

- trubní materiál, rok výroby a původ trub, výrobní a montážní postupy;

- typ trubních spojů;
- kvalita vody;
- tlak vody (provozní tlak, velikost a frekvence kolísání tlaku);
- zatížení na povrchu;
- hladina podzemní vody;
- typ půdy/obsypu či zásypu;
- katodická ochrana;
- bludné proudy a další.

3.1.5 Legislativní požadavky v České a Slovenské republice

Plán financování obnovy

Základní právní dokument v oblasti vodovodů a kanalizací v ČR – zákon č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích [1] – ukládá vlastníkovu vodovodu povinnost zpracovat a realizovat plán financování obnovy vodovodů. Požadavky na tyto plány financování obnovy jsou pak uvedeny ve vyhlášce č. 428/2001 Sb. [16]. Příloha č. 18 této vyhlášky uvádí vzorový formulář plánu financování obnovy. Formulář je založen na procentu opotřebení majetku. Není však dána žádná metodika či postup stanovení procenta opotřebení a je ponecháno na vlastním uvážení vlastníka.

Technický audit

Dále podle zákona č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích [1] může Ministerstvo zemědělství vyhlásit provedení technického auditu. Podle tohoto zákona je technický audit vodovodů a kanalizací definován jako: „*specializovaná odborná činnost sloužící ke kontrole technického stavu vodovodů a kanalizací, oprávněnosti vynaložených provozních nákladů, jakož i pořizovacích nákladů a nákladů navrhovaného rozvoje vodovodů a kanalizací*“ [1].

Technický audit dle tohoto zákona může vykonávat pouze osoba zapsaná v seznamu technických auditorů, která je technicky způsobilá, má vysokoškolské vzdělání se zaměřením na obor vodovodů a kanalizací a praxi v tomto oboru nejméně 10 let.

Zákon [1] ani vyhláška [16] však dále nespecifikuje jakou metodou či podle jakých pravidel technický audit provádět. Jak uvádí Míka [17], je tedy možné, že se pohledy na vyhodnocení technického stavu budou lišit v závislosti na výběru auditora.

Z pohledu řešeného tématu je zajímavá část technického auditu „**e) analýza současného stavu**“ – srovnávací nebo úvahová. Srovnávací analýza v tomto případě znamená porovnání hodnoceného vodovodního systému s jiným podobným systémem. Předmětem porovnání pak mohou být např. dosahované ztráty vody. Úvahová analýza pak spočívá v posouzení systému na základě skutečností, které signalizují technický stav vodovodu, s využitím odborných zkušeností technického auditora. Jak uvedl technický auditor pan Ing. Miloš Brzák, CSc. [18], přestože se rozsah technického auditu vždy řídí dle konkrétního případu, je analýza současného stavu takřka vždy jeho součástí. „*Protože však je technický audit takřka vždy záležitostí poměrně obsahově rozsáhlou, nelze v rámci analýzy přímo hodnotit stav vodovodní sítě, ale v obecnější rovině posoudit skutečnosti, které signalizují, v jakém technickém stavu se konkrétní síť nachází. Po zavedení povinnosti zpracovávat tzv. plán financování obnovy, je*

v první řadě sledováno, zda má vlastník zpracovánu např. kritickou analýzu vodovodní sítě jako podklad pro zpracování tohoto plánu. Lze také posoudit, jaké procento obnovy ročně jednotliví vlastníci zajišťují, resp. s jakými ročními objemy obnovy počítají. Protože ve většině již prováděných auditů se posuzuje zejména výše cen vodného, lze také v rozboru kalkulací cen pro vodné zjistit, s jakými ročními objemy oprav kalkulace počítá a zejména, jaké skutečné objemy prací byly v jednotlivých letech provedeny“ [18].

Legislativa Slovenské republiky

Ve Slovenské republice je základním právním předpisem upravujícím odvětví vodovodů a kanalizací zákon č. 442/2002 Z.z. o veřejných vodovodech a veřejných kanalizacích [19]. Z hlediska řešeného tématu tento zákon ukládá vlastníkově veřejného vodovodu povinnost vypracovat plán obnovy vodovodu nejméně na 10 let. Obsah a postup tvorby plánů obnovy stanovuje vyhláška č. 262/2010 Z.z. [20].

Základní podmínkou pro zařazení objektů a zařízení do plánu obnovy je posouzení technického stavu podle následujících ukazatelů: stáří; poruchovost; stav využití kapacity; soulad s platnou právní úpravou a s požadavky určenými v povolení pro vodní stavby.

Shrnutí legislativních požadavků

Právní předpisy České republiky sice ukládají povinnost zpracovat a realizovat plán financování obnovy vodovodů a kanalizací, jedná se však pouze o plán finančních prostředků určených na obnovu stanovený na základě procenta opotřebení majetku. Legislativa už dále neuvádí postup pro stanovení procenta opotřebení a ponechává na vlastníkově vodovodu, jakým způsobem jej stanoví. Naopak legislativa slovenské republiky stanovuje jednoduchý postup ohodnocení technického stavu objektů a zařízení na základě vybraných ukazatelů a kritérium, podle kterého se jednotlivé objekty zařadí do plánu obnovy.

Hodnocení technického stavu vodovodů je právně podloženo také v některých dalších zahraničních zemích. Například vodárenské společnosti ve Skotsku mají povinnost každoročně podávat zprávu o stavu svého majetku ve formě, kolik procent sítě spadá do té které kategorie hodnocení technického stavu. Obdobně je tomu v Anglii a Walesu, kde je tato zpráva vyžadována každých 5 let. Ovšem ani v jedné z těchto tří zemí není stanovena jednotná metodika, jakou má být hodnocení technického stavu provedeno [2].

3.2 MULTIKRITERIÁLNÍ OPTIMALIZACE

Často se setkáváme s potřebou optimalizace procesů nebo posouzení možných variant na základě více kritérií. V případě spojitých proměnných se úloha nazývá multikriteriální programování. Pokud je množina variant dána explicitně seznamem variant ohodnocených podle jednotlivých kritérií (účelových funkcí), jedná se o multikriteriální hodnocení variant. V oboru vodárenství se může jednat například o tyto úlohy:

- optimalizace zásobování spotřebiště z více zdrojů;
- optimalizace čerpání;
- optimalizace návrhu vodovodní sítě;
- výběr zdroje vody;
- výběr úseků sítě k obnově;
- výběr technologie;
- a mnohé další.

Přestože v některých případech nelze subjektivní úsudek zcela vyloučit, použití metod multikriteriální optimalizace namísto pouhých intuitivních úsudků činí rozhodovací proces explicitnější, racionálnější a efektivnější.

3.2.1 Definice MO

Proces, při kterém je systematicky a současně optimalizován soubor účelových funkcí, je nazýván multikriteriální optimalizace (MO) či vektorová optimalizace [21]. Matematický model obecné úlohy vícekriteriálního programování s p účelovými funkcemi, m omezujícími podmínkami a n proměnnými formuluje takto:

Hledáme extrémy p účelových (či kriteriálních) funkcí:

$$F_1(x) \rightarrow \min$$

$$F_2(x) \rightarrow \max$$

...

$$F_p(x) \rightarrow \min$$

za m omezujících podmínek

$$g_1(x) \leq 0$$

$$g_2(x) \leq 0$$

...

$$g_m(x) \leq 0$$

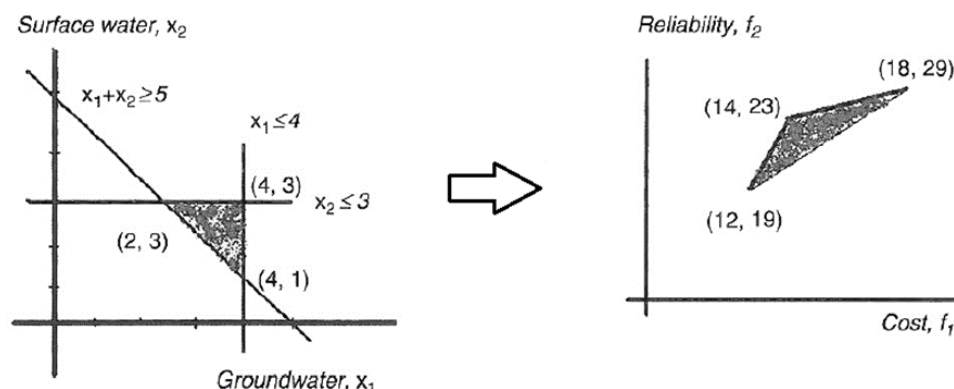
pro n neznámých $x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$.

Obecně mají účelové funkce různé požadavky extrémů - v jedné úloze se vyskytují minimalizační i maximalizační účelové funkce. Pro účelové funkce je v tomto textu uvažován požadavek minimalizace, neboť maximalizační kritéria lze upravit na minimalizační s využitím jednoduchých úprav plynoucích z ekvivalence extrémů. K nejjednodušším úpravám se řadí následující [22]:

$$f(x) \rightarrow \max \text{ je ekvivalentní } \bar{f}(x) = -f(x) \rightarrow \min,$$

$$f(x) \rightarrow \max \text{ je ekvivalentní } \bar{f}(x) = \frac{1}{f(x)} \rightarrow \min.$$

Omezující podmínky (OP) mohou být ve tvaru rovnosti i nerovnosti. OP vytvářejí prostor přípustných řešení X , který je definován jako množina $\{x | g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m\}$. Z vektorů prostoru přípustných řešení jsou vypočítávány hodnoty účelových funkcí, které vytvářejí prostor kriteriálních funkcí Z tvořený množinou $\{F(x) | x \in X\}$. Obrázek 3.1 zobrazuje X a Z pro jednoduchý příklad optimalizace dvou-kriteriálního problému s lineárními omezujícími podmínkami a účelovými funkcemi.



Obrázek 3.1 Prostor přípustných řešení X a prostor kriteriálních funkcí Z [23]

3.2.2 Pareto optimalita, efektivnost a dominovanost

Na rozdíl od monokriteriálních problémů neexistuje při multikriteriální optimalizaci jediné globální řešení. Zpravidla je třeba určit množinu bodů, které vyhovují předem stanovenému optimu. Tyto optimální body lze určit na základě definice Pareto optimality: „Bod $x^* \in X$ je Pareto optimální, když neexistuje další bod $x \in X$ takový, že $F(x) \leq F(x^*)$ a $F_i(x) < F_i(x^*)$ pro alespoň jednu účelovou funkci“ [21]. Tedy bod je Pareto optimální, pokud neexistuje jiný bod, který zlepší alespoň jednu účelovou funkci bez zhoršení ostatních účelových funkcí. Všechny Pareto optimální body leží na hranici prostoru kriteriálních funkcí Z a tvoří tzv. Pareto plochu, v prostoru přípustných řešení tvoří tyto body tzv. Pareto množinu.

3.2.3 Rozdělení úloh MO

V případě, že je při MO požadováno jediné kompromisní řešení, které je tedy kompromisem mezi protichůdnými kritérii, je třeba definovat preference těchto kritérií. Informace o preferenci kritérií mohou být v různé formě [22]:

- nominální informace – jsou definovány cílové hodnoty kritérií;
- ordinální informace – dáno uspořádání kritérií od nejdůležitějšího po nejméně důležité;
- kardinální informace – dány váhy kritérií ohodnocujících jejich relativní důležitost;
- nebo nemusí být zadány vůbec.

V posledním případě, kdy nejsou známy preference kritérií, je cílem MO charakteristika a přesný popis Pareto množiny (množiny nedominovaných řešení). Primárně se metody MO dělí podle toho, kdy do výpočtu preference vstupují [22]:

- metody s preferenční informací a priori;
- metody s preferenční informací a posteriori;
- metody s postupným zpřesňováním preferenční informace;
- metody s kombinovaným způsobem zadáváním preferenční informace.

Podle informací o množině variant a množině kritérií lze úlohy MO rozdělit na multikriteriální hodnocení variant a multikriteriální programování. Multikriteriální programování je spojitým případem MO. Speciálním případem spojitě MO je lineární programování, při kterém všechny účelové funkce a všechny omezující podmínky mají lineární charakter. Multikriteriální hodnocení variant je diskrétním případem MO, kde množina variant je dána explicitně seznamem variant ohodnocených podle jednotlivých kritérií.

Metody multikriteriální optimalizace jsou shrnuty a prezentovány v rámci plné verze disertační práce.

3.2.4 Metody stanovení vah

Metody vícekritériálního rozhodování vyžadují informaci o relativní důležitosti jednotlivých kritérií. Relativní důležitost kritérií můžeme vyjádřit za pomoci vektoru vah kritérií, neboli

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_k), \sum_{i=1}^k v_i = 1, v_i \geq 0. \quad (2)$$

S důležitostí kritéria roste i jeho váha. Z důvodu obtížnosti získat od rozhodovatele přímo hodnoty vah se využívají níže uvedené metody. Tyto metody fungují na základě jednodušších

subjektivních informací poskytnutých rozhodovatelem a konstruuji tak odhady vah. V rámci plného textu disertační práce jsou prezentovány metody: metoda pořadí, metoda bodovací, metoda párového srovnávání kritérií, metoda kvantitativního párového srovnání kritérií a metoda geometrického průměru.

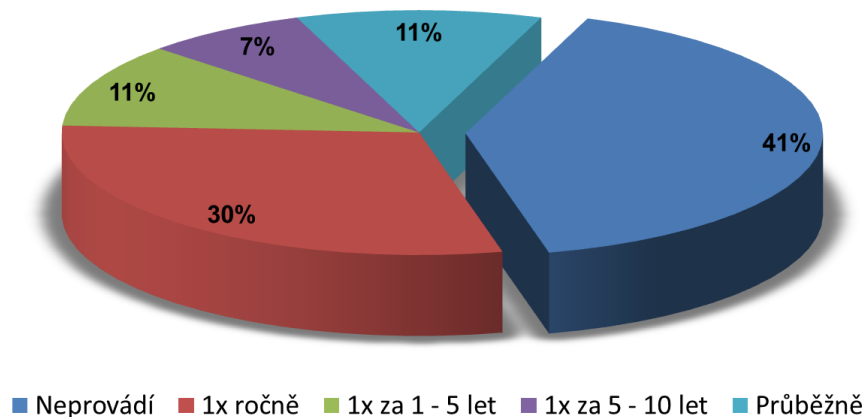
3.3 STÁVAJÍCÍ PRAXE VODÁRENSKÝCH SPOLEČNOSTÍ V ČESKÉ REPUBLICE

3.3.1 Dotazníkové šetření 2013

Na konci roku 2013 bylo autorem disertační práce provedeno dotazníkové šetření mezi vybranými provozovateli vodovodů a kanalizací. Dotazník byl rozeslán odpovědným pracovníkům prvních 50 provozovatelů podle množství fakturované vody v roce 2010 [24]. Z celkového počtu 50 rozeslaných žádostí bylo během 6 týdnů zasláno zpět 27 vyplněných dotazníků (54 %), mezi které patřily také odpovědi od některých z největších vodárenských společností v ČR.

Téměř všichni dotázaní (93 %) uvedli, že mají zpracovány plány financování obnovy. Horší situace však je v případě plánů obnovy. Pouze 59 % má zpracovány krátkodobé roční plány obnovy, ještě méně vodárenských společností (33 %) disponuje střednědobými plány obnovy a jen 22 % společností má stanovené dlouhodobé koncepce obnovy v podobě dlouhodobých plánů obnovy. Více než polovina dotázaných provozovatelů (59 %) provádí hodnocení technického stavu vodovodů. Obrázek 3.2 představuje četnost provádění hodnocení technického stavu u respondentů.

Ze společností, které provádějí hodnocení technického stavu, využívají téměř všechny společnosti vlastní interní metodiku, která je založena na principu multikriteriálního hodnocení.



Obrázek 3.2 Četnost provádění hodnocení technického stavu vodovodů dle dotazníkového šetření

3.3.2 Metodika Pražské vodohospodářské společnosti, a.s.

Pražská vodohospodářská společnost, a.s. (PVS) má zpracovávánu a využívá metodiku zařazování obnovy vodovodní sítě do střednědobého investičního plánu (SIP) [25]. SIP definuje pro střednědobý horizont 5 let věcné a finanční potřeby na rekonstrukce a dostavbu jednotlivých systému vodohospodářské infrastruktury ve správě PVS. Návrhy na vklad do SIP se následně posuzují a v případě obnovy vodovodní sítě se provádí hodnocení stavu úseku vodovodního řádu. Úsek vodovodního řádu se hodnotí na základě 8 ukazatelů:

- celkový počet poruch s únikem vody na 1 km sítě za 1 rok;
- celkový počet nefunkčních armatur na 1 km délky sítě;
- průměrný únik vody v zásobním pásmu na km skutečné délky v posledním roce (l/s);
- stupeň inkrustace potrubí;
- koroze potrubí;
- stáří potrubí;
- distribuční význam;
- obtížnost provádění oprav.

Každý ukazatel má přiřazenu relativní váhu a je hodnocen 0 až 10 body dle stanovených hodnotících tabulek. Váženým součtem hodnocení jednotlivých ukazatelů se vypočítává výsledné bodové skóre, na základě kterého je přiřazena výsledná kategorie řadu A, B, C, D, nebo E.

3.4 SHRnutí

Dosud nebyl publikován model hodnocení technického stavu systému zásobování pitnou vodou jako celku. Bylo však publikováno několik studií věnujících se hodnocení technického stavu vybraných prvků vodovodů. Problematika nepřímého hodnocení technického stavu vodovodů není zpracována ani v rámci technických norem. Byla vyvinuta řada podpůrných nástrojů pro plánování investic, údržby a obnovy vodovodního potrubí založené na nepřímých ukazatelích. Tyto nástroje jsou však povětšinou zaměřeny na stanovení objemů obnovy, uvažují pouze vodovodní řady a neumožňují hodnocení všech prvků vodovodního systému. Pro některé typy objektů vodovodních sítí bylo publikováno několik málo metodik hodnocení technického stavu. Nejvíce pozornosti bylo věnováno hodnocení technického stavu vodovodních řadů.

Legislativní rámec České republiky hodnocení technického stavu vodárenské infrastruktury nevyžaduje. Vyžaduje zpracování a plnění plánu financování obnovy, který je založen na stanovení procenta opotřebení. Způsob, jakým bude stanoveno procento opotřebení, je ponechán na vlastníkově infrastruktury. V zahraničí bývá také vyžadováno hlášení technického stavu vodárenské infrastruktury (např. Anglie, Skotsko, Wales), jednotná metodika hodnocení však ani zde není stanovena. Zato legislativa slovenské republiky stanovuje jednoduchý postup ohodnocení technického stavu objektů a zařízení na základě vybraných ukazatelů a kritérium, podle kterého se jednotlivé objekty zařadí do plánu obnovy.

Provedený dotazníkový průzkum mezi 27 z 50 největších vodárenských společností v ČR potvrdil, že různé společnosti přistupují k plánování obnovy a hodnocení technického stavu různě. Celých 41 % společností dotázaných a vyhodnocených z dotazníku technický stav nevyhodnocuje vůbec, u zbývajících společností se liší nejen periodicita hodnocení technického stavu, ale i množství používaných ukazatelů technického stavu.

Potvrdilo se, že jednotná metodika hodnocení technického stavu vodovodů, která je zpracována v rámci doktorské disertační práce, může nalézt uplatnění. Taková metodika umožní např. benchmarking technického stavu vodovodů, umožní založení plánu financování obnovy na technickém stavu blízkém realitě a v neposlední řadě umožní účelné využití omezených finančních prostředků určených na obnovu vodárenské infrastruktury.

4 NÁVRH METODIKY HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ

Na základě analýzy současných poznatků v oblasti hodnocení technického stavu byla pro návrh metodiky po konzultacích se školitelem zvolena metoda multikriteriálního hodnocení s využitím metody relativních vah a váženého součtu.

4.1 JEDNOTNÁ METODIKA HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ

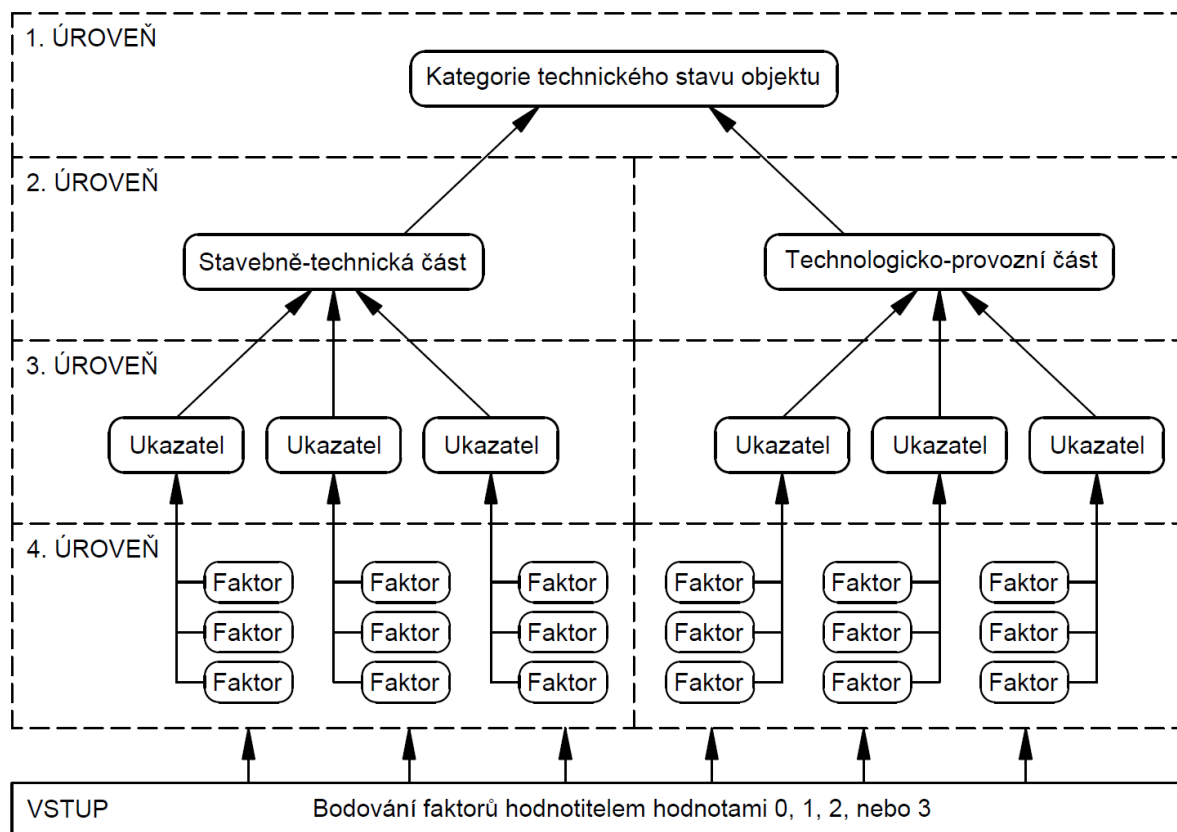
Navržená metodika je metodou nepřímého hodnocení technického stavu. Jedná se o screeningový nástroj, určený k předběžnému posouzení technického stavu.

4.1.1 Popis navržené metodiky

Navržená metodika vychází z metodiky zpracované na Ústavu vodního hospodářství obcí, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně, publikoval Tuhovčák et al. [9]. Návrh metodiky byl proveden úpravou a rozšířením této metodiky tak, aby byla jednotná metodika univerzálně použitelná pro všechny typy vodárenských objektů. Navržená metodika přebírá koncept multikriteriálního hodnocení. Uvedený přístup byl rozšířen o dvě úrovně – části objektu a faktory. Byla také navržena řada logických podmínek výpočtu, které jsou blíže popsány v následující kapitole 4.1.2. Navržená metodika má 4 úrovně:

- **1. úroveň – Výsledné hodnocení:** Agregací obou částí objektu je vypočtena výsledná kategorie technického stavu objektu.
- **2. úroveň – Části objektu:** Na základě charakteristiky některých objektů (např. vodojemy nebo čerpací stanice) plyne rozdělení na stavebně-technickou část a technologicko-provozní část, které jsou hodnoceny samostatně na základě navržených ukazatelů. Oběma částem je přiřazena relativní váha.
- **3. úroveň – Technické ukazatele:** Kategorie obou částí objektu je vypočtena agregací ukazatelů. Každému ukazateli je přiřazena relativní váha.
- **4. úroveň – Faktory:** Technické ukazatele nehodnotí uživatel přímo, ale pro jejich přesnější ohodnocení slouží navržené faktory jednotlivých ukazatelů. Dle hodnoty, kterou faktor nabývá, se přiřadí bodové hodnocení 1, 2, nebo 3. Pokud není faktor hodnocen přiřadí se mu hodnota 0. Jednotlivé faktory mají přiřazenu svou relativní váhu vůči ostatním faktorům ukazatele. Agregace je prováděna postupně od nejnižší úrovně pomocí metody váženého součtu.

Obrázek 4.1 znázorňuje navrženou 4 úroňovou strukturu metodiky.



Obrázek 4.1 Navržená struktura metodiky

4.1.2 Výpočetní algoritmus metodiky

Hodnocení prvků vodovodů dle navržené metodiky je prováděno v následujících krocích:

- **1. krok – Bodování faktorů hodnotitelem:**

Jednotlivým faktorům hodnotitel přiřadí bodové hodnocení F_{inj} na základě navržené hodnotící stupnice. Faktorům přiřazuje hodnotitel bodové skóre 0, 1, 2 nebo 3, kde 0 znamená vyřazení faktoru z hodnocení, 1 je nejlepší a 3 nejhorší stav.

- **2. krok – Výpočet skóre technických ukazatelů příslušných částí prvku:**

Následně se posoudí, zda má každý ukazatel obodováno tolik faktorů, aby součet jejich vah byl minimálně 0,5. Ukazatele, které této hodnoty nedosáhnout nejsou hodnoceny. Skóre ukazatele S_{in} je nastaveno 0 a kategorie ukazatele je přiřazena N (nehodnoceno). U ostatních ukazatelů se pak vypočítává skóre ukazatele S_{in} dle vztahu

$$S_{in} = \frac{\sum_{j=1}^r F_{inj} W_{inj}}{\sum_{j=1}^r W_{inj}} \quad (3)$$

kde:

S_{in} je skóre n-tého ukazatele i-té části prvku;

r je počet faktorů příslušného ukazatele;

F_{inj} je bodové skóre j-tého faktoru n-tého ukazatele i-té části prvku;

W_{inj} je váha příslušného faktoru.

Na základě skóre ukazatelů S_{in} jsou poté určeny výsledné kategorie jednotlivých ukazatelů porovnáním s navrženou tabulkou hranic kategorií. Tabulka 4.1 zobrazuje navržené rozdělení kategorií technického stavu dle vypočteného skóre.

Tabulka 4.1 Hranice kategorií technického stavu

Hranice kategorií:	N	A	B	C	D	E
Skóre:	$S = 0$	$1,00 \leq S \leq 1,25$	$1,25 < S \leq 1,75$	$1,75 < S \leq 2,25$	$2,25 < S \leq 2,75$	$2,75 < S \leq 3,00$

• **3. krok – Výpočet skóre částí prvku:**

Dále se posoudí, zda má každá část prvku ohodnoceno tolik ukazatelů, aby součet jejich vah byl minimálně 0,5. Část, která této hodnoty nedosáhne není hodnocena. Skóre části S_i je nastaveno 0 a kategorie části je přiřazena N (nehodnoceno). Poté je proveden výpočet skóre a stanovení kategorie technického stavu pro zbývající část. Hodnota skóre části S_i se vypočte ze skóre příslušných technických ukazatelů

$$S_i = \frac{\sum_{n=1}^p (S_{in} W_{in})}{\sum_{j=1}^p W_{in}}, \quad (4)$$

kde:

S_{in} je skóre n-tého technického ukazatele i-té části prvku;

p je počet ukazatelů příslušné části;

W_{in} je váha příslušného ukazatele.

Pokud není některý ukazatel části hodnocen ($S_{in}=0$), neuvažuje se ve výpočtu. Na základě skóre je poté určena porovnáním s navrženou tabulkou hranic kategorií výsledná kategorie části prvku vodovodu.

• **4. krok – Výpočet skóre celého prvku vodovodu:**

V nejvyšší úrovni se vypočítává výsledné skóre technického stavu celého prvku. Posoudí se, zda jsou ohodnoceny části tak, aby součet vah byl minimálně 0,5. Prvky, které této hodnoty nedosáhnou, nejsou hodnoceny. Výsledné skóre S_c se vypočte dle vztahu

$$S_c = \frac{\sum_{i=S}^T S_i W_i}{\sum_{i=S}^T W_i} \quad (5)$$

kde:

i je dílčích část prvku vodovodu $i=\{S, T\}$;

W_i je váha části;

S_i je skóre dílčí části.

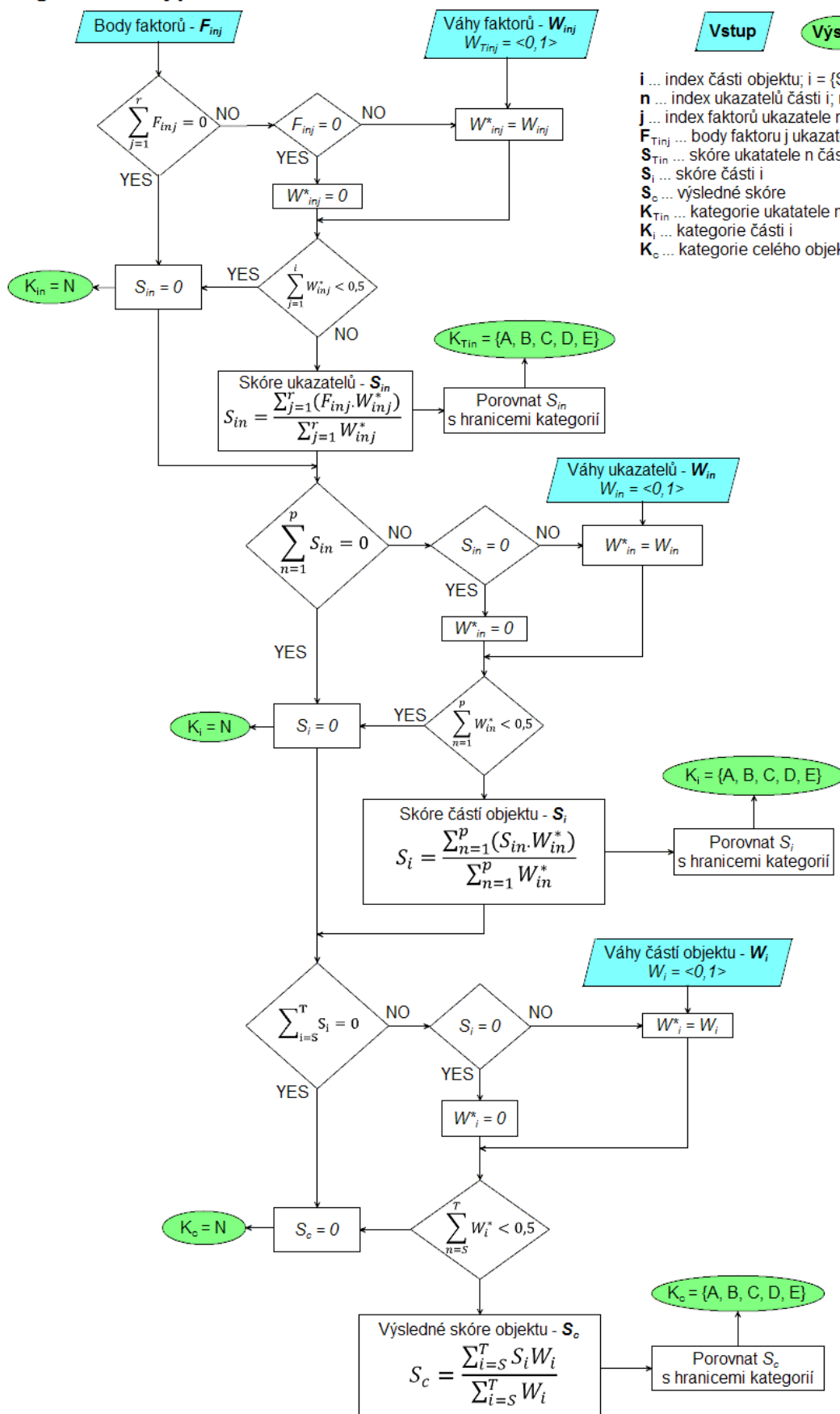
Pokud není některá část hodnocena ($S_i=0$), neuvažuje se ve výpočtu. Na základě skóre je poté určena porovnáním s navrženou tabulkou hranic kategorií výsledná kategorie prvku vodovodu.

Algoritmus výpočtu

Legenda:

Vstup **Výstup**

i ... index části objektu; $i = \{S, T\}$
 n ... index ukazatelů části i ; $n = \{1, 2, \dots, p\}$
 j ... index faktorů ukazatele n části i ; $j = \{1, 2, \dots, r\}$
 F_{Tinj} ... body faktorů j ukazatele n části i
 S_{Tin} ... skóre ukazatele n části i
 S_i ... skóre části i
 S_c ... výsledné skóre
 K_{Tin} ... kategorie ukazatele n části i
 K_i ... kategorie části i
 K_c ... kategorie celého objektu



Obrázek 4.2 Algoritmus výpočtu hodnocení

4.1.3 Stanovení relativních vah částí, ukazatelů a faktorů

Váhy představují informaci o relativní důležitosti jednotlivých kritérií. Pro všechny části objektu, ukazatele i faktory navržené metodiky je třeba v rámci jednotlivých modulů metodiky stanovit jejich relativní váhy. Váhy pro účely navržené metodiky byly stanoveny přímou metodou, tedy přímým odhadem vah. Nastavení vah proběhlo ve spolupráci se školitelem a pracovníky spolupracujících vodárenských podniků.

4.1.4 Výstupní informace a její význam

Výstupní informací navržené metodiky je zařazení hodnoceného objektu do jedné z pěti kategorií technického stavu *A*, *B*, *C*, *D*, nebo *E*. Případně do kategorie *N*, pokud není k hodnocení objektu dostupný dostatek informací. Vedle celkového hodnocení objektu se vypočítává také hodnocení částí objektu a jednotlivých ukazatelů, rovněž na škále *A* až *E*. Samotný způsob výpočtu skóre a následného přiřazení kategorie technického stavu je popsán výše v kapitole 4.1.2.

Tabulka 4.2 zachycuje navržené kategorie technického stavu objektů včetně slovního hodnocení technického stavu, popisu technického stavu a doporučené akce. Tabulka 4.2 se přiměřeně aplikuje na hodnocení částí objektu a ukazatelů. Návrh kategorií technického stavu byl proveden na základě stupnic, které publikoval Tuhovčák [9], Marlow [2], Al-Barqawi a Zayed [12].

Tabulka 4.2 Kategorie technického stavu

Kategorie technického stavu	Slovní hodnocení stavu	Popis technického stavu	Doporučená akce
A	Výborný	Jedná se o optimální stav, který nevyžaduje žádná opatření vedoucí ke zlepšení. Jde o stav nových nebo nedávno zhotovených objektů.	Žádná akce není vyžadována. Znovu posoudit za 15 let.
B	Dobrý	Do této kategorie spadají objekty ve velmi dobrém stavu, u kterých se začínají projevovat počáteční známky deteriorace. Rovněž nevyžadují žádná opatření.	Žádná akce není vyžadována. Znovu posoudit za 10 let.
C	Průměrný	Objekt v uspokojivém stavu. Nevyžaduje okamžité řešení, je vhodné objekt zařadit do dlouhodobého plánu obnovy.	Znovu posoudit za 5 let. Zařadit do plánu obnovy během 20 let.
D	Špatný	Objekt ve špatném stavu, u kterého se významně projevují známky deteriorace. Měla by být plánována, nebo i realizována opatření na řešení tohoto stavu.	Zařadit do plánu obnovy během příštích 5 – 10 let.
E	Kritický	Nežádoucí stav, který vyžaduje dle možnosti provozovatele okamžité řešení, které povede ke zlepšení stavu.	Doporučen okamžitý zásah.
N	Nehodnocen	Pro hodnocení není dostupný dostatek informací, hodnocení nelze provést.	Zajistit chybějící informace. Poté znovu posoudit.

Dle současné legislativy je vyžadováno při zpracování plánů financování obnovy uvádět procento opotřebení vodárenského majetku. Aplikace TEA Water (kapitola 4.4), která z navržené metodiky vychází, díky svému dalšímu vývoji již procento opotřebení zahrnuje.

4.2 MODULY JEDNOTNÉ METODIKY

V rámci disertační práce bylo navrženo rozdělení metodiky na jednotlivé moduly dle obvyklé struktury vodovodních systémů. Je navrženo následujících 7 modulů:

- **TEAR** – jímací objekty (**TE**chnical **A**udit of water **R**esources);
- **TEAT** – úpravny vody (**TE**chnical **A**udit of water **T**reatment plant);
- **TEAM** – příváděcí řady (**TE**chnical **A**udit of water **M**ains);
- **TEAA** – vodojemy (**TE**chnical **A**udit of **A**ccumulation tanks);
- **TEAP** – čerpací stanice (**TE**chnical **A**udit of **P**umping stations);
- **TEAN** – vodovodní sítě (**TE**chnical **A**udit of water **N**etwork);
- **TEAS** – vodovodní řady (**TE**chnical **A**udit of water **S**ections).

Jednotlivé moduly využívají navrženou jednotnou metodiku hodnocení technického stavu. Pro každý modul je nutné navrhnout vlastní strukturu ukazatelů a faktorů, včetně jejich relativních vah. V rámci disertační práce byly navrženy moduly TEAP, TEAN, TEAS. Zbývající moduly jsou koordinovaně řešeny na Ústavu vodního hospodářství obcí, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně ve spolupráci s autorem disertační práce.

4.2.1 Modul TEAP – čerpací stanice

Modul TEAP byl vyvinut jako první z modulů. Modul byl vyvíjen za podpory Inovačního vouchery Zlínského kraje ve spolupráci se společností Vodovody a kanalizace Zlín, a.s. a také společností Moravská vodárenská, a.s., která je provozovatelem vodovodů v majetku VAK Zlín. Spolupráce těchto společností představovala připomínkování navržené metodiky a dále zpřístupnění objektů a poskytnutí dat pro testování navržené metodiky na reálných objektech.

Tabulka 4.3 Navržená struktura modulu TAPS a váhy

Část / ukazatel / faktor	Váha	Část / ukazatel / faktor	Váha
ST - Stavebně technická část	0,35	TP - Technologicko-provozní část	0,65
ST1 - Stav stavebních konstrukcí ČS	0,40	TP1 - Stav čerpacích jednotek	0,30
F1 - Stav střešní konstrukce	0,20	F1 - Stáří čerpacích jednotek	0,35
F2 - Stav výplní stavebních otvorů	0,20	F2 - Znamy opotřebení čerpadel	0,20
F3 - Stav podlah	0,15	F3 - Poruchovost čerpacích jednotek	0,15
F4 - Stav stěn	0,15	F4 - Četnost a náročnost údržby	0,15
F5 - Stav stropní konstrukce	0,15	F5 - Uložení a ukotvení čerpadel	0,15
F6 - Stav zámečnických prvků	0,15	TP2 - Pracovní charakteristiky čerpadel	0,25
ST2 - Stav akumulční nádrže	0,40	F1 - Průměrná denní doba chodu	0,20
F1 - Stav dna a kalové jímky	0,20	F2 - Trend měrné spotřeby el. energie	0,20
F2 - Stav stěn	0,20	F3 - Poloha pracovního bodu	0,20
F3 - Stav vstupních prvků nádrže	0,15	F4 - Účinnost čerpadel	0,20
F4 - Stav potrubí	0,15	F5 - Efektivita instalovaného příkonu	0,20
F5 - Stav střešní konstrukce	0,10	TP3 - Stav technologické části (mimo čerpadel)	0,25
F6 - Stav stropní konstrukce	0,10	F1 - Stav uzavíracích a dalších armatur	0,30
F7 - Stav odvětrání	0,10	F2 - Stav měřících prvků	0,30
ST3 - Prostředí na ČS	0,20	F3 - Způsob a stav řízení čerpadel	0,15
F1 - Stav zabezpečení objektu	0,30	F4 - Stav elektroinstalace	0,15
F2 - Stav odvětrání	0,20	F5 - Stav potrubí v ČS	0,10
F3 - Stav topení	0,20	TP4 - Protirázová ochrana	0,20
F4 - Zvedací zařízení	0,20	F1 - Způsob protirázové ochrany	0,60
F5 - Způsob osvětlení	0,10	F2 - Vznik a tlumení rázů	0,40

Z charakteru objektu vodárenské čerpací stanice vyplývá rozdělení modulu TAPS na stavebně-technickou a technologicko-provozní část objektu. Pro každou část byly navrženy ukazatele. Pro jednotlivé ukazatele byly navrženy příslušné faktory, pomocí nichž ukazatele hodnotíme. Ve spolupráci s vybranými vodárenskými společnostmi proběhlo nastavení vah obou částí ČS, ukazatelů a faktorů. Tabulka 4.3 zachycuje navrženou strukturu ukazatelů a faktorů.

Definice jednotlivých navržených faktorů a jejich navržené hodnotící tabulky jsou prezentovány v plné verzi disertační práce.

4.2.2 Modul TEAN – vodovodní síť

Modul TEAN je navržen k hodnocení technického stavu jednotlivých tlakových pásem či měřicích okrsků. Také v případě modulu TEAN bylo dodrženo rozdělení modulu na stavebně-technickou a technologicko-provozní část objektu. Pro každou část byly navrženy ukazatele. Navržené ukazatele představují nejvýznamnější indikátory, ze kterých je možné usuzovat na technický stav dané vodovodní sítě. Jednotlivé faktory těchto ukazatelů pak slouží pro popis a ohodnocení ukazatelů. Tabulka 4.4 představuje navrženou strukturu ukazatelů a faktorů modulu TEAN.

Tabulka 4.4 Navržená struktura modulu TEAN a váhy

Část / ukazatel / faktor	Váha	Část / ukazatel / faktor	Váha
ST - Stavebně technická část	0,40	TP - Technologicko-provozní část	0,60
ST1 - Průměrné stáří trubního materiálu	0,50	TP1 - Poruchovost řadů	0,40
F1 - Stáří potrubí dle trubního materiálu	0,75	F1 - Průměrná roční poruchovost vodovodních řadů [pp/km/rok]	0,50
F2 - Inkrustace potrubí	0,25	F2 - Dynamika poruch	0,50
ST2 - Stav armatur na síti	0,40	TP2 - Ztráty vody	0,25
F1 - Uzavírací armatury	0,50	F1 - Procento vody nefakturované	0,30
F2 - Hydranty	0,35	F2 - Jednotkový únik vody nefakturované (JUVNF)	0,30
F3 - Ostatní armatury	0,15	F3 - Minimální noční odběry	0,20
ST3 - Stav armaturních šachet	0,10	F4 - Ekonomický index ztrát (EIZ)	0,20
F1 - Stav armaturních šachet	1,0	TP3 - Kvalita vody v síti	0,25
		F1 - Doba zdržení vody v síti [hod]	0,30
		F2 - Inkrustace	0,30
		F3 - Vliv trubních materiálů	0,15
		F4 - Kvalita dopravované vody	0,15
		TP4 - Tlakové poměry v pásmu	0,10
		F1 - Maximální hydrostatický tlak [m v.sl.]	0,40
		F2 - Průměrný hydrodynamický tlak [m v.sl.]	0,30
		F3 - Kolísání hydrodynamického tlaku [m v.sl.]	0,30

Definice jednotlivých navržených faktorů a jejich navržené hodnotící tabulky jsou prezentovány v plné verzi disertační práce.

4.2.1 Modul TEAS – vodovodní řad

Modul TEAS je navržen k hodnocení technického stavu jednotlivých úseků potrubí vodovodních řadů. Hodnocený úsek by měl být z jednoho druhu trubního materiálu, stejného

stáří a stejného DN. Také v případě modulu TEAS bylo dodrženo rozdělení modulu na stavebně-technickou a technologicko-provozní část objektu. Pro každou část byly navrženy ukazatele. Navržené ukazatele představují nejvýznamnější indikátory, ze kterých je možné usuzovat na technický stav daného řadu. Jednotlivé faktory těchto ukazatelů pak slouží pro popis a ohodnocení ukazatelů. Tabulka 4.5 představuje navrženou strukturu ukazatelů a faktorů modulu TEAS.

Tabulka 4.5 Navržená struktura modulu TEAS a váhy

Část / ukazatel / faktor	Váha	Část / ukazatel / faktor	Váha
ST - Stavebně technická část	0,50	TP - Technologicko-provozní část	0,50
ST1 - Stáří a stav vodovodního řadu	0,50	TP1 - Poruchovost řadu	0,30
F1 - Stáří potrubí dle trubního materiálu	0,60	F1 - Průměrná roční poruchovost [pp/km/rok]	0,70
F2 - Stáří a stav armatur	0,30	F2 - Vývoj dynamiky poruch	0,30
F3 - Inkrustace potrubí	0,10	TP2 - Významnost řadu v pásmu	0,30
ST2 - Stavebně technické provedení řadu	0,40	F1 - Významnost řadu	0,40
F1 - Krytí potrubí	0,40	F2 - Počet napojených obyvatel	0,30
F2 - Dopravní zatížení	0,30	F3 - Napojení citlivých odběratelů	0,30
F3 - Koordinace s ostatními sítěmi	0,30	TP3 - Tlakové poměry na řadu	0,20
ST3 - Protikoroze ochrana řadu	0,10	F1 - Maximální hydrostatický tlak [m v.sl.]	0,40
F1 - Vnější protikoroze ochrana	0,50	F2 - Průměrný hydrodynamický tlak [m v.sl.]	0,40
F2 - Vnitřní protikoroze ochrana	0,50	F3 - Kolísání hydrodynamického tlaku [m v.sl.]	0,20
		TP4 – Provozní ukazatel	0,20
		F1 - Jmenovitý profil potrubí	0,40
		F2 - Vliv na kvalitu vody	0,40
		F3 - Hustota přípojek	0,20

Definice jednotlivých navržených faktorů a jejich navržené hodnotící tabulky jsou prezentovány v plné verzi disertační práce.

4.3 TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉ METODIKY

Současně s návrhem jednotlivých modulů proběhlo zpracování výpočetních souborů aplikace Microsoft Excel pro moduly TEAP, TEAN a TEAS. Tyto soubory sloužily k testování modulů na náhodných datech, na fiktivním vodovodu a v závěru na reálných prvcích vodovodů. Finální verze, které jsou přílohou disertační práce umožňují plnohodnotné hodnocení technického stavu jednotlivých prvků.

Testování modulů bylo provedeno autorem disertační práce ve spolupráci se studenty Ústavu vodního hospodářství obcí – Ing. Tomášem Sucháčkem, Ing. Filipem Krupou a Ing. Pavlem Konečným.

4.3.1 Testování pomocí náhodných a extrémních hodnot

Prvotní testování spočívalo v naplnění výpočetních souborů jednotlivých modulů extrémními bodovými hodnotami faktorů, dále bylo testováno chování při různém počtu nehodnocených faktorů (bodová hodnota 0) a při nahodilých hodnotách faktorů. Závěry z testování jsou následující:

- byl prokázán značný vliv vah ukazatelů a faktorů, proto bylo v rámci navržené metodiky zachováno využití metody váženého součtu, která je jednoduchá a nevyžaduje speciální software a postupy;

- byly opraveny drobné chyby ve výpočtu.

Navrženou metodiku otestoval pomocí citlivostní analýzy Ing. Sucháček a výsledky publikoval na konferenci JUNIORSTAV 2016 [26]. Z testování vyplynulo, že i změna bodování jediného faktoru může změnit výslednou kategorii hodnoceného objektu. Dále vyplynulo, že až 2/3 výsledných hodnocení vypočtených z náhodných vstupů s rovnoměrným rozdělením se pohybují ve středních kategoriích. Z těchto důvodů bylo navrženo zvětšit počet kategorií technického stavu na kategorie A+, A, A-, B+, B, B-, C+, C, C-, D+, D, D-, E+, E, E-. Dále bylo upraveno nastavení vah s výraznějším rozdílem mezi váhami. Tyto úpravy nejsou zahrnuty v disertační práci, byly však zapracovány do webové aplikace TEA Water.

4.3.2 Testování na fiktivním vodovodu

Pro testování metodiky byl navržen fiktivní vodovod, kde je spotřebiště rozděleno na dvě tlaková pásma. Do každého pásma je voda přiváděna zásobním řadem z vlastního vodojemu. Do jednoho vodojemu je voda čerpána z podzemního zdroje, do druhého vodojemu voda přitéká gravitačně z úpravny vody. Každému objektu byly předem nastaveny vlastnosti, potřebné pro hodnocení technického stavu navrženo metodikou. Na tomto navrženém fiktivním vodovodu pak proběhlo testování modulů TEAP, TEAN a TEAS.

Závěry z testování jsou následující:

- výsledky dosažené metodikou mají přibližně normální rozdělení, což odpovídá vodovodu, kde je průběžně investováno do obnovy, můžou se samozřejmě vyskytnout vodovody, kde byla zanedbána obnova, i ty by měla metodika odhalit;
- aby nedocházelo k hodnocení jen např. na základě jednoho málo významného faktoru (faktoru s nízkou relativní vahou) byla do výpočtu doplněna podmínka „minimálně 50 % vah“, tzn. že hodnocení ukazatele se vypočte, jen pokud je uživatelem obodováno tolik faktorů, aby součet jejich vah byl minimálně 0,5. Obdobně je podmínka aplikována při výpočtu hodnocení části objektu a celkového hodnocení objektu.
- prokázalo se, že metodika je uživatelsky přívětivá, hodnocení je rychlé a srozumitelné;
- stejně tak výstupní informace v podobě kategorie technického stavu A, B, C, D, E je srozumitelná a dobře vzájemně porovnatelná.

Další testování navržené metodiky pro vybrané moduly bylo realizováno v rámci případových studií na reálných objektech vodárenské infrastruktury.

4.4 WEBOVÁ APLIKACE TEA WATER

Webová aplikace TEA Water (Technical and Energy Audit) je rozhraním, které umožňuje hodnocení objektů vodovodních sítí pomocí navržené jednotné metodiky hodnocení technického stavu. Aplikace TEA Water běží na webové adrese <http://tea.fce.vutbr.cz>, v době psaní disertační práce je aplikace rozpracována a stále probíhá vývoj a testování. Předpokládá se uvolnění aplikace pro komerční použití.

5 PŘÍPADOVÉ STUDIE

Ve spolupráci s vodárenskými společnostmi byla navržená metodika testována na reálných objektech vodárenské infrastruktury. V rámci modulů řešených v disertační práci bylo provedeno testování: 10 čerpacích stanic, 5 vodovodních sítí a 15 vodovodních řadů.

Vybrané hodnocené objekty jsou anonymně prezentovány v následujících podkapitolách. Testovací listy v aplikaci MS Excel následujících prezentovaných objektů jsou uloženy na CD přiloženém k disertační práci.

5.1 TEAP – ČERPACÍ STANICE

Ve spolupráci s vybranými provozovateli vodárenské infrastruktury byly vybrány čerpací stanice k hodnocení. Nejprve proběhl sběr informací z dispečinku a archivu provozovatelů a následně byly provedeny obhlídky vybraných čerpacích stanic in situ, při kterých byla pořízena fotodokumentace a vyplněny připravené hodnotící dotazníky. V disertační práci je prezentováno hodnocení tří vybraných čerpacích stanic, publikovaných anonymně pod označením: ČS1-BOR, ČS2-HRAD a ČS3-SAL.

V této kapitole je ukázka hodnocení čerpací stanice ČS3-SAL. Čerpací stanice je zásobena gravitačním přítokem DN 100 z VDJ I. Přítok je ovládán plovákovým uzávěrem v akumulární komoře. Výtlak z ČS3-SAL zásobuje věžový vodojem VDJ II.

Při osobní obhlídce objektu nepůsobila čerpací stanice příliš udržovaným dojmem. Na podlaze se nacházely nečistoty a mrtvý hmyz. Vstupní poklop do akumulární byl značně zkorodovaný. Na podlaze armaturní komory stála vrstva vody. Stavební část objektu byla jinak bez větších problémů, zato trubní vystrojení a čerpací jednotky jsou ve špatném stavu, vhodné na výměnu. Na následujících fotografiích je zachycen venkovní pohled na stavební objekt ČS a technologické vystrojení.



Obrázek 5.1 Pohled na budovu ČS3-SAL



Obrázek 5.2 Technologické vystrojení ČS3-SAL

Z hlediska stavebně technického stavu byla čerpací stanice ČS3-SAL zařazena do kategorie „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Ze stavebního hlediska lze vytknout nevyspávanou podlahu strojovny. Koroze poklopu do akumulární nádrže, opad kusů rzi do nádrže. Nedostatečná filtrace vzduchu a tím způsobená přítomnost hmyzu v ČS. Technologicko-provozní část čerpací stanice byla ohodnocena kategorií „C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení“. Průměrná denní doba chodu čerpadel je přiměřená, odhadem

15 hod.den⁻¹. Čerpadla a trubní vystrojení jsou zastaralá. Ukotvení čerpadel je značně zkorodované, materiál se odlupuje. Ocelové potrubí opatřené nátěrem koroduje. Celkově byla čerpací stanice ČS3-SAL zařazena do kategorie technického stavu „C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení“, je však vhodné naplánovat výměnu čerpadel, trubního vystrojení a armatur. Tabulka 5.1 shrnuje hodnocení objektu a ukazatelů čerpací stanice.

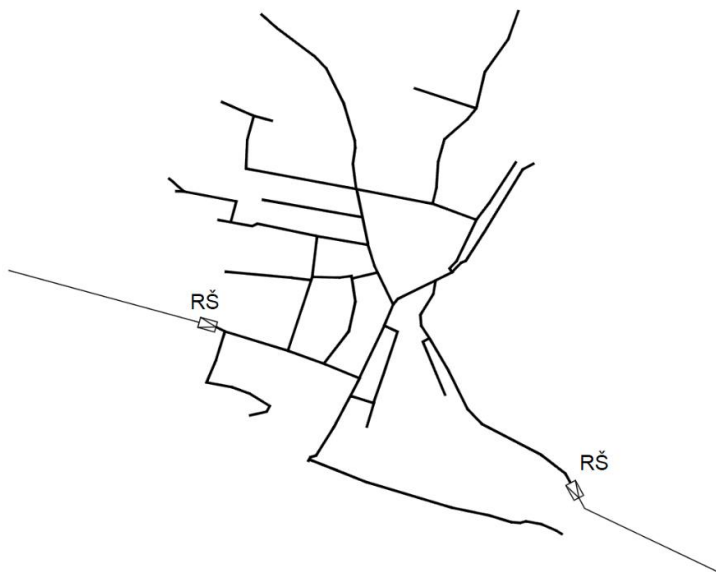
Tabulka 5.1 Souhrn výsledného hodnocení ČS3-SAL

C	CELKOVÉ HODNOCENÍ	Váha	C	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,65
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,35	C	TP1 - Stav čerpacích jednotek	0,30
B	ST1 - Stav stavebních konstrukcí ČS	0,40	2	F1 - Stáří čerpacích jednotek	0,35
1	F1 - Stav střešní konstrukce	0,20	3	F2 - Znaky opotřebení čerpadel	0,20
1	F2 - Stav výplní stavebních otvorů	0,20	2	F3 - Poruchovost čerpacích jednotek	0,15
3	F3 - Stav podlah	0,15	2	F4 - Četnost a náročnost údržby	0,15
1	F4 - Stav stěn	0,15	2	F5 - Uložení a ukotvení čerpadel	0,15
0	F5 - Stav stropní konstrukce	0,15	C	TP2 - Pracovní charakteristiky čerpadel	0,25
1	F6 - Stav zámečnických prvků	0,15	1	F1 - Průměrná denní doba chodu čerpadel	0,20
N	ST2 - Stav akumulční nádrže	0,40	0	F2 - Trend měrné spotřeby el. energie	0,20
0	F1 - Stav dna a kalové jímky	0,20	3	F3 - Poloha pracovního bodu	0,20
1	F2 - Stav stěn	0,20	0	F4 - Účinnost čerpadel	0,20
2	F3 - Stav vstupních prvků nádrže	0,15	2	F5 - Efektivita instalovaného příkonu	0,20
0	F4 - Stav potrubí	0,15	C	TP3 - Stav technol. části (mimo čerpadel)	0,25
1	F5 - Stav střešní konstrukce	0,10	2	F1 - Stav uzavíracích a dalších armatur	0,30
0	F6 - Stav stropní konstrukce	0,10	3	F2 - Stav měřících prvků	0,30
0	F7 - Stav odvětrání	0,10	2	F3 - Způsob a stav řízení čerpadel	0,15
B	ST3 - Prostředí na ČS	0,20	1	F4 - Stav elektroinstalace	0,15
1	F1 - Stav zabezpečení objektu	0,30	1	F5 - Stav potrubí v ČS	0,10
2	F2 - Stav odvětrání	0,20	C	TP4 - Protirázová ochrana	0,20
1	F3 - Stav topení	0,20	2	F1 - Způsob protirázové ochrany	0,60
2	F4 - Zvedací zařízení	0,20	0	F2 - Vznik rázů	0,40
1	F5 - Způsob osvětlení	0,10			

5.2 TEAN – VODOVODNÍ SÍŤ

V rámci spolupráce s vodárenskými společnostmi proběhlo testování modulu TEAN na vybraných vodovodech. Na základě poskytnutých podkladů a údajů proběhlo jejich zpracování a byly vyplněny připravené hodnotící dotazníky. Tlakové poměry byly stanoveny hydraulickým modelem v programu EPANET 2.0. V disertační práci je prezentováno hodnocení tří vybraných vodovodních sítí (tlakových pásem), publikovaných anonymně pod označením: TP1-SL, TP2-BOR a TP3-L10.1.

V této kapitole je prezentována ukázka hodnocení tlakového pásma TP3-L10.1. Hodnocené tlakové pásmo TP3-L10.1 zásobuje pitnou vodou přibližně 1900 obyvatel. Typická zástavba je tvořena rodinnými domy. Tlakové pásmo je ohraničeno dvěma redukčními ventily, jedná se o prostřední tlakové pásmo. Délka vodovodních řadů je 6,32 km. Většina vodovodní sítě je tvořena potrubím z šedé litiny, téměř 80 %. Obrázek 5.3 představuje schéma hodnocené vodovodní sítě.



Obrázek 5.3 Schéma hodnocené vodovodní sítě TP3-L10.1

Na základě stavebně technických ukazatelů byla vodovodní síť TP3-L10.1 zařazena do kategorie „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Odborným odhadem bylo stanoveno, že průměrné stáří potrubí je nižší než 40 let. Dle technologicko provozních ukazatelů byla síť ohodnocena kategorií „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Průměrná roční poruchovost se pohybuje v rozmezí 0,3 - 0,7 pp/km/rok. Z dostupných dat je patrné, že vývoj poruch v tlakovém pásmu má klesající tendenci. Maximální hydrostatický tlak v pásmu je výrazně vyšší než 60 m v.sl. (až 80 m v. sl.).

Celkově byla hodnocená síť TP3-L10.1 zařazena do kategorie technického stavu „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Tabulka 5.2 shrnuje hodnocení sítě včetně jednotlivých ukazatelů a faktorů.

Tabulka 5.2 Souhrn výsledného hodnocení TP3-L10.1

B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	Váha
B	ST – Stavebně-technické ukazatele	0,40
A	ST1 - Průměrné stáří trubního materiálu	0,50
1	F1 – Stáří potrubí dle trubního materiálu	0,75
2	F2 – Inkrustace potrubí	0,25
C	ST2 - Stav armatur na síti	0,40
2	F1 – Uzavírací armatury	0,50
2	F2 – Hydranty	0,35
2	F3 – Ostatní armatury	0,15
C	ST3 - Stav armaturních šachet	0,10
2	F1 – Stav armaturních šachet	1,00
B	TP – Technologicko-provozní ukazatele	0,60
B	TP1 - Poruchovost řadů	0,40
2	F1 – Průměrná roční poruchovost	0,50
1	F2 – Dynamika poruch	0,50
B	TP2 - Ztráty vody	0,25
1	F1 – Procento vody nefakturované	0,30
0	F2 – JUVNF	0,30
2	F3 – Minimální noční odběry	0,20
0	F4 – Ekonomický index ztrát (EIZ)	0,20
C	TP3 - Kvalita vody v síti	0,25
2	F1 – Doba zdržení vody v síti	0,30
2	F2 – Inkrustace	0,30
3	F3 – Vliv trubních materiálů	0,30
2	F4 – Kvalita dopravované vody	0,30
D	TP4 - Tlakové poměry v pásmu	0,10
3	F1 – Maximální hydrostatický tlak	0,40
3	F2 – Průměrný hydrodynamický tlak	0,30
1	F3 – Kolísání hydrodynamického tlaku	0,30

5.3 TEAS – VODOVODNÍ ŘADY

Testování modulu TEAS proběhlo na reálných vodovodních řadech, které jsou součástí vodovodní sítě TP1-SL uvedené výše. V disertační práci je prezentováno hodnocení tří vybraných řadů s označením: S1, S2 a S3. V této kapitole je prezentováno hodnocení řadu S3.

Hodnocený řad S3 je tvořen lineárním polyethylenovým potrubím DN 100 délky 157 m. Řad byl vybudován v roce 1980. Jedná se o důležitý páteřní řad. Označení provozovatele je řad „7-3“, identifikační číslo úseku 963. Z dostupných záznamů poruch byla vypočtena průměrná roční poruchovost 5,5 pp/km/rok. Dle hydraulického modelu dosahuje maximální hydrostatický tlak 58 m v.sl. a hydrodynamický tlak 45 m v.sl.

Na základě stavebně technických ukazatelů byl řad S3 zařazen do kategorie „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“.

Dle technologicko provozních ukazatelů byl řad S3 ohodnocena kategorií „A – výborný stav“.

Celkově byl hodnocený řad S3 zařazen do kategorie technického stavu „C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení“. Tabulka 5.3 shrnuje hodnocení řadu včetně jednotlivých ukazatelů a faktorů.

Tabulka 5.3 Souhrn výsledného hodnocení řadu S3

B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	Váha	C	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,50
A	ST - Stavebně technické ukazatele	0,50	B	TP1 - Poruchovost řadu	0,30
B	ST1 - Staří a stav vodovodního řadu	0,50	3	F1 - Průměrná roční poruchovost	0,70
1	F1 - Stáří potrubí dle trubního materiálu	0,60	0	F2 - Vývoj dynamiky poruch	0,30
2	F2 - Stáří a stav armatur	0,30	B	TP2 - Významnost řadu v pásmu	0,30
1	F3 - Inkrustace potrubí	0,10	2	F1 - Významnost řadu	0,40
A	ST2 - Stavebně technické provedení řadu	0,40	2	F2 - Počet napojených obyvatel	0,30
1	F1 – Krytí potrubí	0,40	1	F3 - Napojení citlivých odběratelů	0,30
1	F2 – Dopravní zatížení	0,30	B	TP3 - Tlakové poměry na řadu	0,20
0	F3 – Koordinace s ostatními sítěmi	0,30	2	F1 - Jmenovitý profil potrubí	0,40
A	ST3 - Protikoroze ochrana řadu	0,10	1	F2 - Vliv na kvalitu vody	0,40
1	F1 – Vnější protikoroze ochrana	0,50	1	F3 - Hustota přípojek	0,20
1	F2 – Vnitřní protikoroze ochrana	0,50	C	TP4 - Provozní ukazatel	0,20
			3	F1 - Jmenovitý profil potrubí	0,40
			1	F2 - Vliv na kvalitu vody	0,40
			1	F3 - Hustota přípojek	0,20

6 ZÁVĚR

Řešená disertační práce vzešla zejména z následujících aktuálních potřeb. Přestože je pro podporu plánování obnovy vodovodních sítí k dispozici několik metod a počítačových programů, většinou se pouze snaží odhadnout budoucí vývoj stavu sítě a jsou zaměřeny na plánování obnovy a výběr sanačních technologií pro vodovodní potrubí. Nejen u potrubí ale i u dalších objektů, jako jsou jímací objekty surové vody, přívodní řady surové vody, úpravny vody, čerpací stanice a vodojemy, je však potřebné dokumentovat a evidovat jejich technický stav. Dále byla zavedena legislativní povinnost zjišťovat technický stav vodárenské infrastruktury (míra opotřebení pro potřeby plánů financování obnovy - PFO), ale není stanovena jednotná závazná metodika, kterou by mělo být hodnocení technického stavu jednotlivých částí veřejných vodovodů prováděno. V neposlední řadě, v České republice působí vedle několika velkých vodárenských společností také řada malých společností, u kterých je možné předpokládat nedostatek finančních prostředků a kvalifikovaných pracovníků pro vlastní provádění hodnocení technického stavu. Zde by měla pomoci navržená metodika hodnocení technického stavu veřejných vodovodů.

V rámci předložené disertační práce byla navržena jednotná metodika hodnocení technického stavu vodovodů založená na multikriteriálním přístupu. Je navrženo celkem 7 modulů metodiky pro jednotlivé objekty vodárenské infrastruktury: TEAR – jímací objekty, TEAT – úpravny vody, TEAM – příváděcí řady, TEAA – vodojemy, TEAP – čerpací stanice, TEAN – vodovodní sítě, TEAS – vodovodní řady. Pro každý modul je třeba definovat soubor ukazatelů, faktorů a jejich hodnotících tabulek a relativních vah. V rámci disertační práce byly řešeny moduly TEAP, TEAN a TEAS. Ostatní moduly byly řešeny na Ústavu vodního hospodářství obcí ve spolupráci s autorem disertační práce. Navržená metodika využívá pro agregaci hodnocení metodu váženého součtu. Vstupními daty jsou bodové hodnoty jednotlivých faktorů zadávané uživatelem. Následně se bodové skóre agreguje přes technické ukazatele, části objektu až do výsledného skóre. Na jednotlivých úrovních je přiřazována kategorie technického stavu dle nastavených hranic. Výsledné hodnocení objektu je kategoriemi technického stavu A, B, C, D, nebo E, kterým odpovídá doporučená akce.

Na základě provedeného testování lze říct, že navržená metodika je schopná interpretovat technický stav hodnocených objektů, odhalit kritická místa a seřadit hodnocené objekty v pořadí podle stanovené kategorie technického stavu. Nevýhodou může být určitá náročnost získání a zpracování vstupních dat a v omezené míře určitá subjektivita hodnocení.

Zhodnocení cílů disertační práce

Lze konstatovat, že všechny vytyčené cíle, které byly stanoveny v úvodu práce, byly splněny. Splnění jednotlivých dílčích cílů hodnotí autor práce následovně:

- **Zpracování kritické rešerše současného stavu problematiky:** V rámci kapitoly 3 byla prezentována rešerše současného stavu problematiky hodnocení technického stavu vodovodů a metod multikriteriální optimalizace, byly zde vysvětleny související pojmy a termíny a zhodnoceny dosavadní poznatky převážně ze zahraniční odborné literatury.

- **Návrh jednotné metodiky:** Navržená jednotná metodika hodnocení technického stavu vodovodů je prezentována v kapitole 4. Návrh dle zadání vycházel z rešerše současného stavu problematiky a z prací dosud publikovaných na Ústavu vodního hospodářství obcí.
- **Návrh hodnotících kritérií:** Na základě zpracované rešerše a poznatků z odborné praxe byl proveden návrh struktury ukazatelů, faktorů a jejich hodnotících tabulek pro jednotlivé řešené prvky vodovodu. Je navrženo celkem 7 modulů metodiky: TEAR – jímací objekty, TEAT – úpravny vody, TEAM – příváděcí řady, TEAA – vodojemy, TEAP – čerpací stanice, TEAN – vodovodní sítě, TEAS – vodovodní řady. Dle doporučení školitele a členů komise státní doktorské zkoušky byla disertační práce zaměřena na tři vybrané moduly TEAP, TEAN a TEAS, přičemž ostatní moduly byly řešeny na Ústavu vodního hospodářství obcí ve spolupráci s autorem disertační práce. Navržená kritéria tří řešených modulů jsou prezentována v kapitole 4.2.
- **Ověření na případových studiích:** Navržená metodika pro hodnocení jednotlivých řešených prvků vodovodů byla testována jak na fiktivních datech, tak na reálných vodovodech. Ve spolupráci s vodárenskými společnostmi bylo v rámci modulů řešených v disertační práci provedeno testování 10 čerpacích stanic, 5 vodovodních sítí a 15 vodovodních řadů. Vybrané hodnocené objekty jsou prezentovány v kapitole 5.
- **Zpracování softwarové aplikace:** Pro všechny moduly metodiky řešené v rámci disertační práce byly zpracovány sešity aplikace MS Excel umožňující hodnocení těchto prvků dle navržených kritérií. Na základě těchto sešitů a výpočetního algoritmu (kap. 4.1.2) proběhlo ve spolupráci s programátorem zpracování webové aplikace pro hodnocení technického stavu jednotlivých prvků vodovodů, která je v současné době dostupná na adrese <http://tea.fce.vutbr.cz>.

Přínosy disertační práce a doporučení pro další vývoj

Z disertační práce vyplývá několik doporučení pro využití metod hodnocení technického stavu a metod multikriteriální optimalizace pro hodnocení technického stavu ve vodárenství:

- Potvrdilo se, že je výhodné provést nejprve screeningové hodnocení technického stavu a poté rozhodnout o dalším detailnějším posouzení, např. stavebně-technickým průzkumu.
- Kategorizační souhrnné hodnocení sice představuje užitečnou informaci, ale pokud se zaměříme pouze na výslednou kategorii technického stavu dochází tím k podstatné ztrátě informací. Je tedy nezbytné umožnit přístup k celému hodnocení včetně faktorů, ne jen k výsledné kategorii hodnocení objektu.
- Nelze se vyhnout určité míře subjektivity hodnocení. Je vhodné, aby hodnocení prováděl zkušený odborník a aby hodnocení objektů v rámci jednoho provozovatele nebo vlastníka bylo prováděno jednou osobou.
- Výsledek hodnocení technického stavu je značně závislý na nastavených faktorech, hodnotících stupnicích, relativních vahách a hranicích kategorií technického stavu. Z tohoto důvodu bylo v rámci disertační práce upuštěno od využití sofistikovanějších metod multikriteriální optimalizace a byla aplikována základní metoda – metoda váženého součtu.

- Použité kategorizační hodnocení technického stavu bylo navrženo jako screeningový nástroj. Pro podporu rozhodování o investicích do obnovy vodovodů je tedy třeba dalších informací, jako jsou analýzy rizik, nákladů a provozních souvislostí.

Pro další vývoj v této oblasti je možné zaměřit se na následující problémy:

- Hodnocení technického stavu multikriteriální metodou je značně závislé na nastavení relativních vah. V rámci dalšího vývoje je vhodné zaměřit se na analýzu a volbu metody stanovení relativních vah.
- Předběžný screening technického stavu má být pouze jedním z nástrojů správy majetku (asset managementu). Je tedy nutné provázat tento nástroj s dalšími nástroji asset managementu, jako jsou riziková analýza, výpočty nákladovosti a nákladové efektivnosti, atd.
- Dalším možným krokem vývoje je navázání metodiky hodnocení technického stavu na interní informační a GIS systémy provozovatele nebo vlastníka vodárenské infrastruktury.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 274/2001 Sb.: o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). In: *Sbírka zákonů České republiky*. b.r.
- [2] MARLOW, David, Simon HEART, Stewart BURN a Antony URQUHART. *Condition Assessment Strategies and Protocols for Water and Wastewater Utility Assets*. Water Environmental Research Foundation (WERF), 2007.
- [3] *Vodovody a kanalizace ČR 2014*. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky, 2015. ISBN 978-80-7434-264-6.
- [4] IPWEA, . *The International Infrastructure Management Manual*. New Zealand: NAMS Group, 2006.
- [5] U.S. EPA, . *Innovation and Research for Water Infrastructure for the 21st Century*. U.S. Environmental Protection Agency, 2007. ISBN EPA/600/X-09/003.
- [6] RAJANI, Balvant a Yehuda KLEINER. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban Water*. 2001, **3**(3), 151-164. DOI: 10.1016/S1462-0758(01)00032-2. ISSN 14620758.
- [7] KLEINER, Yehuda a Balvant RAJANI. Forecasting Variations and Trends in Water-Main Breaks. *Journal of Infrastructure Systems*. 2002, **8**(4), 122-131. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2002)8:4(122). ISSN 1076-0342.
- [8] AL-BARQAWI, Hassan a Tarek ZAYED. Condition Rating Model for Underground Infrastructure Sustainable Water Mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006, **20**(2), 126-135. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:2(126). ISSN 0887-3828.
- [9] TUHOVČÁK, L., T. KUČERA, M. SVOBODA a M. ŠEBESTA. Technický audit vodárenských distribučních systémů. In: *Voda Zlín 2007: sborník příspěvků konference*. Zlín: Zlínská vodárenská, a. s., 2007, s. 173-179. ISBN 978-80-239-8740-9.
- [10] GRUNDFOS SALES CZECHIA AND SLOVAKIA S.R.O., . Energetický a technický audit čerpadel. In: *TZB-info* [online]. 2006 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3678-energeticky-a-technicky-audit-cerpadel>
- [11] ŠTÍCHOVÁ, Olga. Plán financování a realizace obnovy vodovodů a kanalizací – příklad postupu zpracování ve VaK Jižní Čechy, a. s. *Slovak: časopis oboru vodovodů a kanalizací*. 2007, **16**(12), 12-15. ISSN 1210-3039.
- [12] AL-BARQAWI, Hassan a Tarek ZAYED. Assessment Model of Water Main Conditions. In: *Pipelines 2006*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2006, s. 1-8. DOI: 10.1061/40854(211)27. ISBN 978-0-7844-0854-4.
- [13] AL-BARQAWI, Hassan a Tarek ZAYED. Infrastructure Management: Integrated AHP/ANN Model to Evaluate Municipal Water Mains' Performance. *Journal of Infrastructure Systems*. 2008, **14**(4), 305-318. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:4(305). ISSN 1076-0342.
- [14] GEEM, Zong, Chung-Li TSENG, Juhwan KIM a Cheolho BAE. Trenchless Water Pipe Condition Assessment Using Artificial Neural Network. In: *Pipelines 2007*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2007, s. 1-9. DOI: 10.1061/40934(252)26. ISBN 978-0-7844-0934-3. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40934\(252\)26](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40934(252)26)

- [15] LIU, Z., Y. KLEINER, B. RAJANI, L. WANG a W. CONDIT. *Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2012.
- [16] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). In: *Sbírka zákonů České republiky*. b.r.
- [17] MÍKA, Petr. *Metodika hodnocení technického stavu vodovodních příváděcích řadů. Bakalářská práce*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
- [18] BRZÁK, Miloš. *Technický auditor zapsaný v Seznamu technických auditorů vodovodů a kanalizací MZe: osobní sdělení, 20. 11. 2012*. b.r.
- [19] SLOVENSKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 442/2002 Z. z. Zákon o veřejných vodovodech a veřejných kanalizacích a o změně a doplnění zákona č. 276/2001 Z. z. o regulácii v sieťových odvetviach. In: *Zbierka zákonov Slovenskej republiky*. b.r.
- [20] SLOVENSKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 262/2010 Z. z. Vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovuje obsah plánu obnovy verejného vodovodu, plánu obnovy verejnej kanalizácie a postup pri ich vypracúvaní. In: *Zbierka zákonov Slovenskej republiky*. b.r.
- [21] MARLER, R.T. a J.S. ARORA. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2004, **26**(6), s. 369-395. DOI: 10.1007/s00158-003-0368-6. ISSN 1615-147x. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00158-003-0368-6>
- [22] BROŽOVÁ, Helena, Milan HOUŠKA a Tomáš ŠUBRT. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Vyd. 1. Praha: Credit, 2003. ISBN 80-213-1019-7.
- [23] ZARGHAMI, Mahdi a Ferenc SZIDAROVSKY. *Multicriteria analysis: applications to water and environment management*. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-17936-5.
- [24] *Vodovody a kanalizace ČR 2010*. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky, 2011. ISBN 978-80-7434-004-8.
- [25] TRTIL, Dušan. Metodika zařazování obnovy vodovodní sítě do střednědobého investičního plánu. In: *Nástroje pro podporu provozování a investiční výstavby vodovodů* [online]. Praha: Asociace pro vodu ČR (CzWA), 2013 [cit. 2016-10-10].
- [26] SUCHÁČEK, Tomáš a Ladislav TUHOVČÁK. Citlivostní analýza metodiky předběžného hodnocení technického stavu vodárenské infrastruktury. In: *JUNIORSTAV 2016*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016, s. 236-243. ISBN 978-80-214-5311-1.
- [27] RAHMAN, Sarker a Tarek ZAYED. Condition Assessment of Water Treatment Plant Components. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2009, **23**(4), 276-287. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000011. ISSN 0887-3828.
- [28] EHRGOTT, Matthias a Xavier GANDIBLEUX. *Multiple criteria optimization: state of the art annotated bibliographic surveys*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. International series in operations research, 52. ISBN 14-020-7128-0.
- [29] ONWUBOLU, Godfrey a B. BABU. *New optimization techniques in engineering*. New York: Springer, 2004. ISBN 35-402-0167-X.

ŽIVOTOPIS

Jméno: Miloslav Tauš

Datum narození: 24. 2. 1987

Adresa: Minátky 659/11A, 682 01 Vyškov

Telefon: 724 448 934

Email: m.taus@seznam.cz

Vzdělání

- 2012 – 2017** **Ph.D. studium – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební**
Téma studia: Multikriteriální hodnocení technického stavu vodovodů
- 2006 – 2012** **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební**
Obor: Vodní hospodářství a vodní stavby
- 2002 – 2006** **Gymnázium Vyškov**

Pracovní zkušenosti

- od 02/2014** **VH atelier, spol. s r.o.**
Projektová a inženýrská společnost v oboru vodního hospodářství
Samostatný projektant (od 11/2015)
 - zpracování projektové dokumentace novostaveb a rekonstrukcí vodovodů a kanalizací
 - vedení pracovní skupiny**Pomocný projektant (02/2014 – 10/2015)**
 - zpracovávání dílčích částí projektové dokumentace
- 2008 – 2011** **TRASKO, a.s.**
Dodavatel staveb v oblasti TZB, inženýrských sítí a dopravních staveb
Asistent stavbyvedoucího
 - realizace staveb vodovodů a kanalizací
 - vedení pracovní skupiny, koordinace práce

ABSTRACT

The topic of the thesis is multi objective condition assessment of water supply systems. The state of the art of condition assessment of water supply systems and the state of the art of multi objective optimization methods are presented within the thesis. Based on these recherches, the uniform methodology of condition assessment of water supply systems and its 7 modules was designed. The thesis deals with the selected modules to condition assessment of water pumping stations, water networks and pipe sections. The output of the methodology is the assignment of a category of the technical condition to the rated object. The proposed methodology was tested on real water facilities and proves the ability of a fair presentation of the technical condition of the object.