



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

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MILOSLAV TAUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV TUHOVČÁK, CSc.

BRNO 2017

ABSTRAKT

Předložená disertační práce se věnuje multikriteriálnímu hodnocení technického stavu vodovodů. V rámci práce je provedena rešerše současného stavu poznání v oblasti hodnocení technického stavu vodovodů a v oblasti metod multikriteriální optimalizace. Na základě rešerše byl proveden návrh jednotné metodiky hodnocení technického stavu a jejích 7 modulů. V rámci disertační práce jsou řešeny moduly pro hodnocení čerpacích stanic, vodovodních sítí a vodovodních řadů. Výstupem navržené metodiky hodnocení technického stavu je zařazení hodnoceného objektu do kategorie technického stavu. Navržená metodika byla testována na reálných objektech a prokázala schopnost věrného popisu technického stavu objektu.

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.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

KEY WORDS

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

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně, dne 6. 3. 2017

.....

podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	9
3	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	10
3.1	HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ	10
3.1.1	<i>Definice hodnocení technického stavu</i>	10
3.1.2	<i>Faktory ovlivňující technický stav vodovodů</i>	12
3.1.3	<i>Typy výstupních informací z hodnocení technického stavu</i>	13
3.1.4	<i>Publikované metody nepřímého hodnocení technického stavu</i>	15
3.1.5	<i>Legislativní požadavky v České a Slovenské republice</i>	29
3.2	MULTIKRITERIÁLNÍ OPTIMALIZACE	34
3.2.1	<i>Metody multikriteriálního programování</i>	38
3.2.2	<i>Metody multikriteriálního hodnocení variant</i>	45
3.2.3	<i>Metody stanovení vah</i>	54
3.2.4	<i>Využití metod multikriteriální optimalizace ve vodárenství</i>	57
3.3	STÁVAJÍCÍ PRAXE VODÁRENSKÝCH SPOLEČNOSTÍ V ČESKÉ REPUBLICE.....	64
3.3.1	<i>Dotazníkové šetření 2013</i>	64
3.3.2	<i>Metodika Pražské vodohospodářské společnosti, a.s.</i>	69
3.4	SHRNUTÍ.....	72
4	NÁVRH METODIKY HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ	74
4.1	JEDNOTNÁ METODIKA HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ	74
4.1.1	<i>Popis navržené metodiky</i>	74
4.1.2	<i>Výpočetní algoritmus metodiky</i>	77
4.1.3	<i>Technické ukazatele a faktory</i>	81
4.1.4	<i>Stanovení relativních vah částí, ukazatelů a faktorů</i>	81
4.1.5	<i>Výstupní informace a její význam</i>	82
4.2	MODULY JEDNOTNÉ METODIKY	84
4.2.1	<i>Modul TEAP – čerpací stanice</i>	84
4.2.2	<i>Modul TEAN – vodovodní síť</i>	95
4.2.3	<i>Modul TEAS – vodovodní řad</i>	103
4.3	TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉ METODIKY	108
4.3.1	<i>Testování pomocí náhodných a extrémních hodnot</i>	109
4.3.2	<i>Testování na fiktivním vodovodu</i>	109
4.4	WEBOVÁ APLIKACE TEA WATER.....	110
5	PŘÍPADOVÉ STUDIE	113
5.1	TEAP – ČERPACÍ STANICE	113

5.1.1	ČS1-BOR.....	113
5.1.2	ČS2-HRAD.....	117
5.1.3	ČS3-SAL.....	120
5.2	TEAN – VODOVODNÍ SÍTĚ	125
5.2.1	TP1-SL	125
5.2.2	TP2-BOR.....	127
5.2.3	TP 3 – L10.1.....	128
5.3	TEAS – VODOVODNÍ ŘADY	130
5.3.1	Řad S1	130
5.3.2	Řad S2	131
5.3.3	Řad S3	132
6	ZÁVĚR.....	134
7	BIBLIOGRAFIE	138
8	VLASTNÍ PUBLIKACE.....	144
	SEZNAM TABULEK	146
	SEZNAM OBRÁZKŮ	148
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	150
	SUMMARY	152

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, přiváděcí 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 – přiváděcí 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 blízkém 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

Základním předpokladem udržitelného stavu vodárenské infrastruktury je plánovaná kontinuální obnova této infrastruktury. 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, přivodní řady surové vody, úpravný 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.

Stárnutí vodárenské infrastruktury je celosvětovým problémem. Odhaduje se [4], že v průběhu následujících 20 let bude třeba investovat do vodovodních sítí v USA 77 mld. amerických dolarů. A dále, že v následujících 15 letech bude třeba do vodovodních sítí na území Kanady investovat 12,5 mld. amerických dolarů ročně. Dále se uvádí [5], že 59 % kanadských vodovodních systémů vyžaduje opravy a 43 % těchto systémů je v neakceptovatelném stavu. V České republice je třeba ročně vložit do obnovy vodárenské infrastruktury zhruba 16 miliard korun, ale objem financí skutečně investovaných do obnovy je zhruba poloviční [6]. Poznání technického stavu vodovodů je klíčové pro predikci výkonnosti vodovodů a optimalizaci údržby a obnovy. V běžné praxi se používá pouze praktických zkušeností k posouzení stavu vodovodů, protože neexistuje žádná standardizovaná hodnotící stupnice, kterou lze použít k měření technického stavu vodovodů [4]. Efektivní vyhodnocení technického stavu vyžaduje nasazení množství specializovaných pracovníků, spolehlivé databáze, podstatné množství času a vybavení. Proto je výhodné provést nejprve rychlé efektivní hodnocení technického stavu a poté se rozhodnout, zda je nutné další detailnější posouzení [7].

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“ [8]. Hodnocení technického stavu je pak „proces měření fyzického stavu prvků systému využívající objektivní a subjektivní kritéria. Proces by měl uvažovat bezpečnostní a strukturální integritu, kapacitnost, kvalitu služeb, úlohu v systému, stáří atd.“ [7]. Podle jiné definice je hodnocení technického stavu „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“ [9].

K provedení hodnocení technického stavu mohou vést různé motivy. Těmto motivům nebo účelu provedení hodnocení je třeba samotné hodnocení přizpůsobit. Tabulka 3.1 shrnuje hlavní motivy pro provedení hodnocení technického stavu.

Tabulka 3.1 Motiv pro provedení hodnocení technického stavu, zdroj [10]

Motiv	Zaměření hodnocení technického stavu
Posouzení plánů financování obnovy	Poskytnutí dat pro stanovení rozpočtu a/nebo odůvodnění odkladu investic
Priority investičních programů	Cílové priority výdajů na obnovu
Stanovení přiměřeného zásahu	Stanovení úrovně potřebné obnovy
Zákonné požadavky	Dodržení zákonných nebo finančních hlášení
Soudní šetření	Analýza poruch a znalecké posudky

Jako klíčové body postupu při provádění hodnocení technického stavu jsou uváděny [11]:

- identifikace kritických prvků systému;
- volba vhodné metody hodnocení technického stavu;
- přezkoumání původních výkresů a historických záznamů o inspekcích a důležitých opravách a údržbě;
- inspekce a ohodnocení stavu;
- kvantifikace technického stavu;
- určení potřeby a postupů údržby;
- stanovení harmonogramu nápravných akcí a příštího posouzení stavu.

Tento postup je však použitelný spíše pro přímé metody hodnocení. Hodnocení technického stavu ve smyslu, jakým bude využito v disertační práci, je spíše 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 [9]:

- **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 [9], mohou poskytnout cenné informace. Tyto informace však nemohou být jediným podkladem pro rozhodování.

Vedle nepřímého hodnocení může být prováděno také přímé hodnocení technického stavu. Sem patří metody zahrnující vizuální inspekci, destruktivní a nedestruktivní testování, apod.

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 [12]. Kleiner a Rajani [13] 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.

Best Practices [14] třídí faktory, které přispívají k deterioraci na:

- **fyzické faktory** – trubní materiál, tloušťka stěny, rok uložení, profil, typ spojů, zatížení tahem, vnější a vnitřní ochrana potrubí, styk odlišných kovů, rok výroby potrubí a výrobní proces;
- **environmentální faktory** – půdní typ, půdní vlhkost, přítomnost podzemní vody, podnebí, umístění potrubí ve vozovce, zásypový materiál, trubní lože, podzemní poruchy, bludné proudy, seismická aktivita, způsob pokládky;
- **provozní faktory** – tlak vody, úniky vody, kvalita vody, rychlost proudění, provoz a údržba.

Dle způsobu stanovení faktory spadají do jedné nebo více z následujících kategorií, které publikoval Marlow [2]:

- **vizuální faktory** – posuzované přímo zrakem hodnotitele;
- **subjektivní faktory** – posuzované nepřímo na základě úsudku hodnotitele;
- **měřitelné faktory** – mohou být přímo změřeny nebo vyhodnoceny na základě sledovaných dat.

Řadu kritérií hodnocení technického stavu uvádí Marlow [2]. Nedá se však říci, že pro dva vodovodní systémy nabývající stejných hodnot uvedených faktorů probíhají degradační procesy zcela shodně. Procesy deteriorace vodovodních systémů nejsou ani rovnoměrné ani totožné. Liší se v závislosti na různých nejistých faktorech, které mohou způsobit odlišnosti technického stavu, a proto jsou procesy deteriorace pro různé vodovodní sítě různé [15].

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]. Vzhledem k plánovanému směřování tohoto výzkumu je tato kapitola zaměřena na známkování/bodování technického stavu. Jak uvádí Marlow [2], stanovení pravděpodobnosti poruchy nebo zbytkové životnosti může být obtížné a těžko vzájemně srovnatelné. Často je dosažitelnější stanovení prahových hodnot technického stavu a výkonnosti, kdy již musí dojít k určitému zásahu, a posouzení zda daný prvek systému dosáhl této prahové hodnoty. 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).

Jako příklad známkování/kategorizace technického stavu uveďme stupnici používanou pro kanalizační řady v USA [2]:

- **známka 1:** stav jako nový;
- **známka 2:** počáteční známky deteriorace;
- **známka 3:** uspokojivý stav (pokud se řad nenachází v rizikové oblasti);

- **známka 4:** špatný stav, brzy bude třeba provést opatření (zvláště v rizikové oblasti);
- **známka 5:** nutný okamžitý zásah.

Jinou stupnicí pro numerické a slovní hodnocení technického stavu vodovodních řadů včetně příslušné akce navrhují Al-Barqawi a Zayed [4]. Obrázek 3.1 zachycuje grafické znázornění navržené stupnice. Tabulka 3.2 představuje popis jednotlivých navržených kategorií.



Obrázek 3.1 Grafické znázornění měřítka technického stavu podle Al-Barqawi a Zayed, zdroj [4]

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].

Tabulka 3.2 Numerické a slovní hodnocení technického stavu vodovodních řadů, zdroj [4]

Měřitko	Slovní hodnocení stavu	Kritéria	Akce
9 - 10	Výborný	Nově či nedávno instalováno.	Žádná akce není vyžadována.
8 - 9	Velmi dobrý	Stav jako nový bez známek koroze či deteriorace.	Znovu posoudit za 15 let.
6 – 8	Dobrý	Vnější a vnitřní ochrana zachována, zbývající tloušťka stěny více než 90 % původní.	Znovu posoudit za 10 let. Zařadit do plánu katodické ochrany během příštích 5 – 10 let.
4 – 6	Průměrný	Objevuje se poškození vnitřní a/nebo vnější ochrany. Zbývající tloušťka stěny více než 75 % původní.	Znovu posoudit za 3 - 5 let. Zařadit do plánu renovací během příštích 5 – 10 let.
3 – 4	Špatný	Významné známky vnitřní nebo vnější koroze. Nevyhnutelný kolaps. Chybějící vnitřní nebo vnější ochrana. Úniky vody. Zbývající tloušťka stěny 50 - 75 % původní.	Zařadit do plánu renovací nebo obnovy během příštích 5 – 10 let.
< 3	Kritický	Těžká vnitřní nebo vnější koroze. Zřejmý kolaps. Velké trhliny/díry. Zbývající tloušťka stěny < 50 % původní. Poruchovost >3.	Doporučena okamžitá oprava nebo obnova.

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. 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 v rámci technických norem.

Strategické plánování obnovy

Byla vyvinuta řada podpůrných nástrojů pro plánování investic, údržby a obnovy vodovodního potrubí založené na nepřímých ukazatelích. Tabulka 3.3 shrnuje tyto nástroje. Uvedené nástroje jsou však převážně zaměřeny na stanovení objemů obnovy, uvažují pouze vodovodní řady a neumožňují hodnocení všech prvků vodovodního systému.

Tabulka 3.3 Podpůrné nástroje strategického plánování vodovodů [2]

Nástroj	Zaměření	Potřebná data	Komerzializace	Integrace
CARE-W	úroveň služeb, stanovení rozpočtu, náklady za dobu životnosti, plánování obnovy	závisí na použitém modelu	ne, několik aplikací v evropských městech	ne, samostatný nástroj
FailNet – Stat	model předpovědi poruch vodovodního potrubí	nutné dobré informace o majetku a poruchách	ne, pouze výzkumné aplikace v Evropě	ne, samostatný nástroj
KANEW	strategický nástroj určující délku vodovodních řadů k obnově nebo opravě každý rok	žádoucí dobré informace o majetku a poruchách	ano, základní verze dostupná u AwwaRF	ne, samostatný nástroj
PARMS Planning	dlouhodobé plánování obnovy založené na křivkách poruchovosti stanovených z provozních dat	nutné dobré informace o majetku a poruchách	ano, používaný řadou australských provozovatelů	ne, samostatný nástroj
PARMS Priority	podpora rozhodování o obnově		ano, používaný řadou australských provozovatelů	ne, samostatný nástroj
PiReP/PiReM	podpora rozhodování o sanaci		ne, ve vývoji s plánovaným komerčním vydáním	ne, samostatný nástroj
UtilNets	rozhodovací systém založený na spolehlivosti pro řízení údržby vodovodních řadů		ne, ve fázi prototypu	ne, samostatný nástroj
WARP	dlouhodobé plánování pomocí křivek poruchovosti		ano, plánované vydání v roce 2006	ne, samostatný nástroj

Jímací objekty

V rámci konferencí Voda Zlín 2012 a Voda Zlín 2014 byl prezentován příspěvek zaměřený na hodnocení stavu objektů na jímání podzemní vody [16], [17]. Autoři zde prezentují metodiku hodnocení technického stavu jímacích objektů prostřednictvím hodnotících formulářů pro zdroje surové podzemní vody. Autoři navrhli pro každý typ jímacího objektu (jímací zářez, štola, studna, vrt) samostatný formulář. Vyhodnocování těchto formulářů je prováděno metodou TOPSIS, která je založena na principu minimalizace vzdálenosti od ideální varianty. Jak autoři uvádí, účelem formulářů je upozornit na stav objektů, doporučit určité chování a usnadnit a zpřehlednit rozhodovací proces.

Navržený postup se skládá z výběru hodnotících kritérií, následně je třeba stanovit váhy jednotlivých kritérií. Tím je vyjádřeno, jak velkým ohrožením pro jímací objekt se může stát dané kritérium. Po vyplnění hodnotících formulářů je provedeno jejich vyhodnocení. Zde je zvolena metoda TOPSIS založená na minimalizaci vzdálenosti od ideální varianty. Ideální varianta je taková varianta, pro kterou kritéria dosahují nejlepších hodnot. Jak autoři dále uvádí, jednotlivé položky jsou transformovány mezi 5 základních hodnotících kritérií, pro která je provedena samotná analýza:

- A – Stavebně - technologické zabezpečení (vstup, žebřík, podesta);
- B – Vydutnost;
- C – Stavební část (stěny, strop, dno, větrací otvory);
- D – Strojně - technologická část (čerpadlo, armatury, elektroinstalace);
- E – Významnost (nahraditelnost zdroje, dočasná a dlouhodobá).

Hodnocení se zaměřuje pouze na provozní hledisko a na ukazatele, které jsou snadno zjištěitelné a měřitelné. Posouzení nezahrnuje hledisko biologické, bakteriologické ani hydrogeologické. Tabulka 3.4 a Tabulka 3.5 představují ukázkou hodnocení dvou vybraných kritérií.

Tabulka 3.4 Ukázkou hodnocení ukazatele pro vstup do vrtu [16]

Položka č.	Popis položky	Rozložení bodů pro váhy	Hodnocený ukazatel	Body
1a	Poklop vstupní a nad zhlavím vrtu	10	Poklop ve výborném stavu nebo nový, plní zcela svoji funkci	0
			Poklop částečně poškozený stále ho však lze využívat (uzamknout, otevřít atd.)	5
			Poklop chybí, je silně poškozen, neplní vůbec svoji funkci, ohrožuje bezpečnost práce.	10

Tabulka 3.5 Ukázka hodnocení ukazatele pro specifickou vydatnost [16]

Položka č.	Popis položky	Rozložení bodů pro váhy	Hodnocený ukazatel	Body
2a	Specifická vydatnost	30	Specifická vydatnost je stejná jako na počátku, odpovídá potřebě	0
			Specifická vydatnost se snížila o 10 - 20 % z původní hodnoty, při stejné potřebě	15
			Specifická vydatnost se snížila o více jak 10 - 20 % z původní hodnoty, při stejné potřebě	30

Při budoucím návrhu metodiky hodnocení technického stavu jímacích objektů je vhodné zvážit použití vizuální prohlídky vnitřního prostoru vrtu. Pro vyhodnocení stavu vystrojení vrtů a studní by pravděpodobně mohla být využita prohlídka CCTV kamerou. Na trhu jsou pro tento účel dostupné kamerové systémy pro průzkum studní a vrtů využívající CCTV kamery [18]. Obrázek 3.2 zobrazuje vybavení kamerového systému a samotnou kameru. Obrázek 3.3 představuje snímky pořízené při kamerovém průzkumu vrtů.



Obrázek 3.2 Zařízení ke kamerovému průzkumu vrtů a studní [18]



Obrázek 3.3 Snímky výstroje vrtu z kamerového záznamu [18]

Úpravny vody

Rahman a Zayed [7] vyvinuli model hodnocení technického stavu vybraných prvků úpraven pitné vody využívající metod AHP (Analytical Hierarchy Proces - analytický hierarchický proces) a MAUT (Multiattribute Utility Theory - axiomatická teorie kardinálního užitku). Byly navrženy dvě samostatné sady hodnotících parametrů odděleně pro nádrže a pro čerpadla. Parametry byly rozděleny do 4 skupin a uspořádány do hierarchické struktury o dvou úrovních. Parametry hodnocení technického stavu nádrží byly rozděleny do kategorií:

- **A – Fyzické faktory (fáze návrhu a výstavby):**
 - A1 Návrhová hlediska,
 - A2 Druh materiálu,
 - A3 Velikost a kapacita,
 - A4 Kontrola kvality stavebních prací;
- **B – Fyzické faktory (provozní fáze):**
 - B1 Stáří prvku,
 - B2 Koroze,
 - B3 Ochranná vrstva/ nátěr,
 - B4 Trhliny a kazy;
- **C – Environmentální faktory:**
 - C1 Druh půdy,
 - C2 Kvalita surové vody (pH, zákal, atd.),
 - C3 Vibrace (včetně zemětřesení),
 - C4 Povětrnostní podmínky;
- **D – Provozní faktory:**
 - D1 Dávkování chemikálií,
 - D2 Provozní praxe a údržba,
 - D3 Zkušenosti provozovatele a obsluhy,
 - D4 Kontrolní systém.

Další skupina představuje navržené parametry hodnocení technického stavu čerpadel na úpravně pitné vody:

- **A – Elektro-mechanické faktory:**
 - A1 Typ čerpadla,
 - A2 Výkon,

- A3 Způsob spouštění čerpadel (softstart,...),
- A4 Průtok;
- **B – Fyzické faktory (provozní fáze):**
 - B1 Stáří prvku,
 - B2 Koroze,
 - B3 Ochranná vrstva/ nátěr,
 - B4 Praskliny;
- **C – Environmentální faktory:**
 - C1 Kvalita surové vody (pH, zákal, atd.),
 - C2 Vibrace (včetně zemětřesení),
 - C3 Teplota;
- **D – Provozní faktory:**
 - D1 Dávkování chemikálií,
 - D2 Provozní praxe a údržba,
 - D3 Zkušenosti provozovatele a obsluhy,
 - D4 Doba provozu za den,
 - D5 Kontrolní systém.

Relativní váhy jednotlivých parametrů byly získány na základě informací od vybraných odborníků, kteří parametrům přiřadili bodové ohodnocení od 1 do 9 podle jejich důležitosti. Metodou AHP pak bylo provedeno stanovení relativních vah parametrů, které byly aplikovány ve váženém součtu všech parametrů. Tímto váženým součtem byl stanoven celkový index technického stavu nádrže nebo čerpadla, který nabývá hodnot 1 až 10. Výsledky studie ukázaly, že žádný z parametrů se nezdá být dominantním.

Tabulka 3.6 Parametry komponent úpravny pitné vody (nádrže) [7]

Kategorie	Parametr	Popis
A Fyzické faktory (fáze návrhu a výstavby)	A1 Návrhová hlediska	Přihlídnutí k odolnosti, typu spojů, apod. významně přispívá k technickému stavu během životnosti.
	A2 Druh materiálu	Druh a kvalita použitých materiálů a zařízení.
	A3 Velikost a kapacita	Velikost a kapacita může ovlivnit stav v průběhu času.
	A4 Kontrola kvality stavebních prací	Úroveň kontroly kvality během stavebních prací ovlivní budoucí stav.
B Fyzické faktory (provozní fáze)	B1 Stáří prvku	Stav se zhoršuje během času, aktuální věk může být důležitým parametrem.
	B2 Koroze	Přítomnost koroze a její intenzita je významným indikátorem současného stavu.

	B3 Ochranná vrstva/ nátěr	Kvalita ochrany povrchu ovlivňuje stav komponent.
	B4 Trhliny a kazy	Přítomnost trhlin a kazů (velikost a umístění) je důležitým indikátorem současného stavu.
C Environ- mentální faktory	C1 Druh půdy	Druhem půdy se řídí výběr způsobu založení. Také kyselost, zásaditost a přítomnost škodlivých látek působí na součásti v kontaktu s půdou.
	C2 Kvalita surové vody (pH, zákal, atd.)	Surová voda z kvalitnějšího zdroje vyžaduje nižší stupeň úpravy a má menší negativní vliv na komponenty.
	C3 Vibrace (včetně zemětřesení)	Vibrace pocházející z jakéhokoliv zdroje ovlivní stav dotčených komponent.
	C4 Povětrnostní podmínky	Sezónní fluktuace teplot může způsobit efekt zmrazování-rozmrazování a tepelné rozpínání.
D Provozní faktory	D1 Dávkování chemikálií	Druhy chemikálií a jejich dávkování ovlivňuje stav komponent.
	D2 Provozní praxe a údržba	Odchyly od standardní provozní a údržbové praxe urychlují proces deteriorace.
	D3 Zkušenosti provozovatele a obsluhy	Vlivy mnoha dalších parametrů závislosí na vzdělání a zkušenostech provozovatele.
	D4 Kontrolní systém	Vadný kontrolní systém může způsobit náhlé nebo postupné poškození komponent.

Tabulka 3.7 Parametry komponent úpravny pitné vody (čerpadla) [7]

Kategorie	Parametr	Popis
A Elektrome- chanické faktory	A1 Typ čerpadla	Typ čerpadel může být jedno z nejdůležitějších hledisek hodnocení technického stavu.
	A2 Výkon	Výkon jednotlivých čerpadel může být jedním z parametrů hodnocení technického stavu.
	A3 Možnosti spuštění	Měkký start je obecně preferovanější než konvenční metody vzhledem k životnosti čerpadla.
	A4 Průtok	Průtok dodávaný čerpadlem může souviset s jeho technickým stavem.
B Fyzické faktory (provozní fáze)	B1 Stáří prvku	Stav čerpadel se zhoršuje během času.
	B2 Koroze	Přítomnost koroze a její intenzita je významným indikátorem současného stavu.
	B3 Ochranná vrstva/ nátěr	Kvalita ochrany povrchu ovlivňuje stav čerpadla.
	B4 Trhliny	Přítomnost trhlin (velikost a umístění) je důležitým indikátorem současného stavu čerpadla.
C Environ- mentální faktory	C1 Kvalita surové vody (pH, zákal, atd.)	Zhoršená kvalita surové vody je zvláště škodlivá pro čerpadla surové vody.
	C2 Vibrace (včetně zemětřesení)	Nepředpokládané vibrace pocházející z jakéhokoliv zdroje (včetně čerpadla samotného) ovlivní stav čerpadel.
	C3 Teplota	Sezónní kolísání teplot a teploty v důsledku přehřátí mohou ovlivnit stav čerpadla.

D Provozní faktory	D1 Dávkování chemikálií	Druhy chemikálií a jejich dávkování ovlivňuje stav komponent.
	D2 Provozní praxe a údržba	Odchytky od standardní provozní a údržbové praxe urychlují proces deteriorace.
	D3 Zkušenosti provozovatele a obsluhy	Vlivy mnoha dalších parametrů závisí na vzdělání a zkušenostech vedoucího provozu.
	D4 Doba provozu za den	Jako mnoho jiných strojů jsou i čerpadla navržena na určitý počet provozních hodin. Průměrná denní doba provozu by měla mít vliv na stav provozovaného čerpadla.
	D5 Kontrolní systém	Vadný kontrolní systém může způsobit náhlé nebo postupné poškození komponent. Mnoho vedoucích úpraven vody uvedlo, že manuální řídicí systémy jsou více náchylné na lidské chyby a nedbalost obsluhy.

Čerpací stanice

Metodiku hodnocení technického stavu vodovodních řadů, vodojemů a čerpacích stanic s využitím metody FMEA prezentuje Tuhovčák [19]. Hodnocení jednotlivých uvedených prvků vodovodních systémů dle této metodiky je uvedeno v příslušných podkapitolách. 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. Na základě hodnot technických ukazatelů je provedeno zatřídění posuzovaných prvků sítě do jednotlivých kategorií. Tuhovčák [19] uvádí následující kategorie:

- **K1 (velmi dobrá)** – optimální stav příslušného ukazatele, nevyžaduje žádná opatření vedoucí ke změnám hodnot tohoto ukazatele;
- **K2 (dobrá)** – nízká míra rizika příslušného TU a rovněž nevyžaduje žádná zásadní opatření;
- **K3 (průměrná)** – jedná se o průměrné hodnoty příslušného TU, které nevyžadují okamžitá řešení;
- **K4 (kritická)** – kritické hodnoty příslušného ukazatele. Měla by být realizována případně plánována opatření na řešení tohoto stavu;
- **K5 (nevyhovující)** – nežádoucí stav, který vyžaduje dle možnosti provozovatele okamžité řešení, které povede k dosažení lepších hodnot příslušného ukazatele.

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;

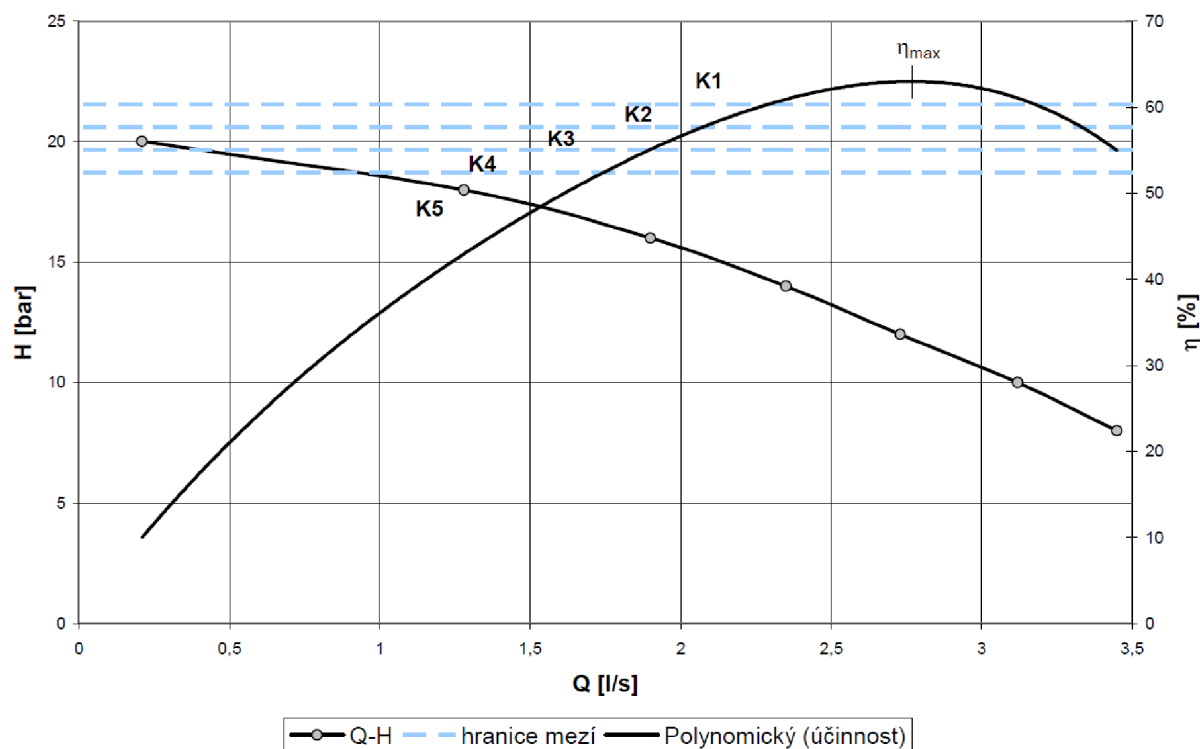
TU_i je hodnota v rozmezí 1 pro hodnocení K1 až 5 pro hodnocení K5 dle hodnocení příslušného TU;

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 – Opotřebením čerpadla;
- TU4 – Účinnost čerpadla;
- TU5 – Doba čerpaní;
- TU6 – Stáří trubního materiálu;
- TU7 – Pracovní bod čerpadla;
- TU8 – Stáří armatur;
- TU9 – Řízení čerpadel.

Obrázek 3.4 znázorňuje příklad rozložení mezí pro ukazatel TU4 – Účinnost čerpadla. Hodnocení ukazatele je založeno na ověření účinnosti jednotlivých čerpadel. Kategorie jsou vyjádřeny procenty z účinnosti čerpadla udávané výrobcem.



Obrázek 3.4 Rozložení mezí pro ukazatel TU 4 – Účinnost čerpadla [19]

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 [20] uvádí, náklady na čerpačí 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. Pro energetický audit jsou použity následující parametry a ukazatele:

- průtok;
- tlak;
- spotřeba el. energie za 1 hodinu;
- doba měření;
- doba chodu čerpadla;
- celková spotřeba el. energie;
- celkové přečerpané množství;
- cena za kWh;
- doba měření;
- vytíženost čerpadla;
- spotřeba el. energie za 1 hodinu chodu;
- spotřeba el. energie za měřené dny;
- cena za měřené dny provozu;
- průměrná spotřeba za 1 den;
- průměrná cena za 1 den;
- úspora za každý den provozu;
- úspora za 1 rok provozu.

Vodojemy

Stejný princip jako pro hodnocení čerpacích stanic metodou FMEA [19] je použit při hodnocení technického stavu vodojemů, jež navrhl v rámci své diplomové práce Šebesta [21]. Součástí jeho práce bylo zpracování softwarové aplikace pro hodnocení technického stavu vodojemů TAWAT.xls (Technical Audit of Water Tanks) v programu MS Excel. Vstupní data se zde zapisují do listu identifikačních údajů (IU), ze kterého jsou poté převzaty, nebo vypočteny jednotlivé technické ukazatele. Technické ukazatele jsou rozděleny do následujících skupin:

- TU – celkový stav vodojemu:
 - P – provozní ukazatele;
 - T – technické ukazatele:
 - TA – technické ukazatele stavu akumulacních nádrží;
 - TM – technické ukazatele stavu armaturní komory.

Nejprve jsou aplikací TAWAT vyžadovány tzv. identifikační údaje, které slouží jako zdrojová data pro vlastní výpočet nebo vyjádření provozních ukazatelů. Provozní ukazatele mají interpretovat provozní stavy ve vodojemu, které mohou ovlivnit dodávku vody do spotřebiště, ztráty vody a náklady na provoz vodojemu. Tabulka 3.8 shrnuje navržené provozní ukazatele aplikace TAWAT.

Tabulka 3.8 Provozní ukazatele vodojemu, TAWAT [21]

Ozn.	Název	Jednotky
P ₁	Provozní zásoba vodojemu ku Q_{\max}	%
P ₂	Maximální doba zdržení při Q_{\min}	hod
P ₃	Doba zásobení při požáru	hod
P ₄	Minimální doba zásobení při poruše	hod
P ₅	Průměrná doba zásobení při poruše	hod
P ₆	Posouzení max. tlaku v nejnižším bodu v síti	MPa
P ₇	Posouzení min. tlaku v nejvyšším bodu v síti	MPa
P ₈	Posouzení min. tlaku v nejvzdál. bobě sítě	MPa
P ₉	Celková zásoba vodojemu ku Q_{\max}	%
P ₁₀	Minimální doba zdržení	hod
P ₁₁	Minimální hodinový odtok ku Q_{pr}	%

Technické ukazatele jsou navrženy za účelem prezentace a ohodnocení technického stavu stavebních částí vodojemu. V rámci tohoto hodnocení může být doložena i fotodokumentace

a případně vyjádření statika nebo jiných odborníků na jednotlivé stavební části. Navržené technické ukazatele představuje Tabulka 3.9.

Tabulka 3.9 Technické ukazatele vodojemu, TAWAT [21]

Technické ukazatele stavu akumulčních nádrží (TA)		Technické ukazatele stavu armaturní komory (TM)	
Ozn.	Název	Ozn.	Název
TA ₁	Stav stropní k-ce	TM ₁	Stav vnitřní k-ce stěn
TA ₂	Stav stěnových k-cí	TM ₂	Stav vnější k-ce stěn
TA ₃	Stav dna	TM ₃	Stav stropní k-ce
TA ₄	Stav střešní k-ce	TM ₄	Stav podlahy
TA ₅	Stav potrubí	TM ₅	Stav střešní k-ce
TA ₆	Stav odvětrání	TM ₆	Stav potrubí a armatur
TA ₇	Stav bezpečnostního přepadu	TM ₇	Stav prostupů k-cí
TA ₈	Stav vstupu do akumulční nádrže	TM ₈	Stav zámečnických výrobků
TA ₉	Stav žebříku v akumulční nádrži	TM ₉	Stav odvětrání
TA ₁₀	Stav kalové jímky	TM ₁₀	Zabezpečení proti neoprávněnému vniku

V rámci uvedené diplomové práce byla navržená softwarová aplikace testována na řadě vodojemů. Jak uvádí Šebesta [21]: „Rozšířením uvedené metodiky o další ukazatele je možné komplexně hodnotit všechny druhy vodojemů. Další součástí metodiky a programu jako jejího výstupu by měla být zvláštní kapitola hodnocení kvality akumulované vody, její chemismus, rozbor stěrů ze stěn akumulční nádrže, posouzení pravděpodobnosti vzniku „mrtvých koutů“ a s tím související vypracování hydraulických modelů v součinnosti přítoku a odtoku.“

Vodovodní 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 [19]. 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 okrsky. Na základě rozsahu a dostupnosti potřebných podkladů se volí navržené technické ukazatele, na základě kterých se hodnotí uvedené prvky systému. Autoři navrhují následující technické 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 Štíchová [22]. Jak uvádí, dle této metody bylo zpracováno 41 návrhů plánu financování obnovy pro smluvní partnery společnosti VAK Jižní Čechy. Vzhledem k uváděné časové náročnosti byla navržena multikriteriální metoda použita pouze pro 15 nejvýznamnějších smluvních partnerů. Pro menší obce byl použit zjednodušený postup spočívající v monokriteriálním hodnocení na základě procenta opotřebení spočteného jako podíl stáří a teoretické životnosti.

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. Tabulka 3.10 zobrazuje hranice kategorií pro jednotlivé ukazatele. Kritéria multikriteriální analýzy pro objekty byla navržena: stáří objektu a technický stav z pohledu provozovatele. Způsob stanovení celkového hodnocení technického stavu podle všech kritérií není v příspěvku prezentován.

Tabulka 3.10 Kritéria hodnocení vodovodních sítí dle VAKJČ [22]

Bodové hodnocení míry rizika	1 (nízké riziko)	2	3	4	5 (vysoké riziko)
Průměr potrubí	do 80 mm	do 100 mm	do 150 mm	do 200 mm	nad 200 mm
% teoretické životnosti	do 20 %	20 – 40 %	40 – 60 %	60 – 80 %	nad 80 %
Hydrostatický tlak	do 30 m v.sl.	30 – 40 m v.sl.	40 – 50 m v.sl.	50 – 60 m v. sl.	nad 60 m v.sl.
Kolísání tlaku	do 5 m v.sl.	5 – 10 m v.sl.	10 – 15 m v.sl.	15 – 20 m v.sl.	nad 20 m v.sl.
Ztráty vody	do 10 %	10 – 20 %	20 – 30 %	30 – 40 %	nad 40 %
Trubní spoj	zámek, násuv do integrovaného těsnění EM	klasický svár na tupo, elektrosvár	dvojitě násuvné hrdlo s vkládaným těsněním	hrdlo a příruby z klasických materiálů	hrdlo s dodatečně vkládaným gumovým těsněním
Počet poruch na 100 km za rok	do 15	15 – 25	25 – 35	35 – 45	nad 45
Dopravní zatížení	mimo zástavbu	běžný provoz	zásobování	hlavní průtah obcí	TIR, vlak, MHD, dálnice
Náporová voda	žádná podzemní voda	blízkost toku, studny	křížení vodoteče nebo zvodně	těsný souběh s vodotečí	zátopové nebo jímací území

Al-Barqawi a Zayed zpracovali model hodnocení technického stavu vodovodních řadů založený na metodě AHP [4] a také model umělých neuronových sítí ANN [15], aby později tyto metody spojili a představili model hodnocení technického stavu využívající metod AHP i ANN [5]. U těchto modelů byla využita navržená stupnice hodnocení včetně příslušných doporučených akcí, viz výše Tabulka 3.2 a Obrázek 3.1. Pro modely byly navrženy hodnotící ukazatele zahrnující fyzické, environmentální i provozní ukazatele. Popis těchto ukazatelů zobrazuje Tabulka 3.11.

Tabulka 3.11 Ukazatele technického stavu podle Al-Barqawi a Zayed [5]

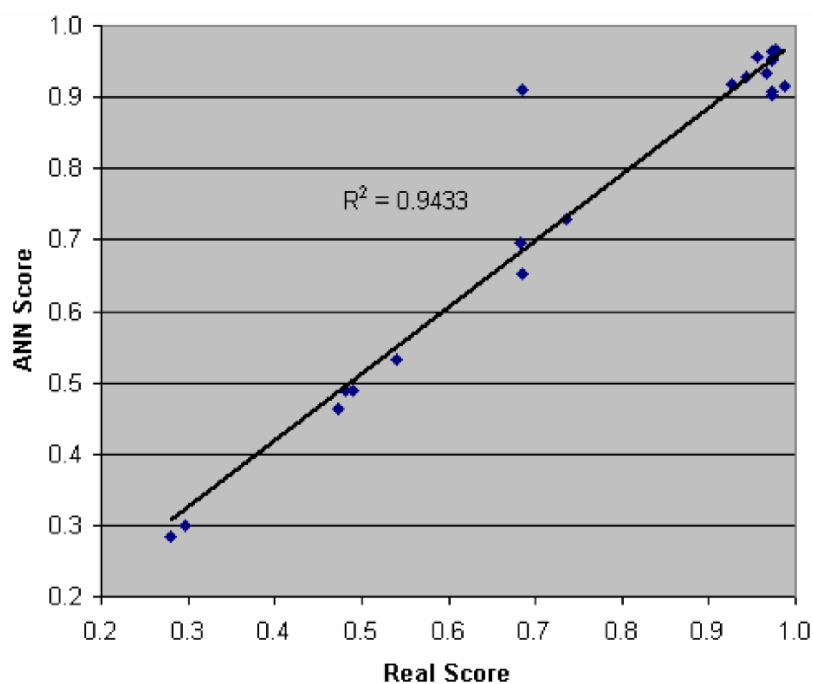
Číslo ukazatele	Ukazatel	Popis ukazatele
1	Půdní druh	Jíl, písek, drcené kamenivo, atd.
2	Typ dopravy, komunikace	Průměrný denní provoz je: vysoký, střední, nízký. Typ komunikace je: místní, rychlostní, okresní, dálnice
3	Typ zásobování	Obytné, komerční, průmyslové, přiváděcí řad
4	Hladina podzemní vody	HPV je vysoká, střední, nízká
5	Průměr potrubí	Vnitřní průměr potrubí
6	Trubní materiál	např. šedá litina, tvárná litina, ocel, azbestocement, beton, PVC
7	Stáří potrubí	Stáří položeného potrubí

8	Poruchovost	Počet poruch/km/rok
9	Koeficient C	Hazen-Williamsův koeficient drsnosti
10	Katodická ochrana	Katodická ochrana je nebo není aplikována
11	Provozní tlak	Provozní pracovní tlak

Další aplikaci neuronových sítí pro hodnocení technického stavu vodovodních řadů provedl Geem [23]. Navržené hodnotící ukazatele byly následující:

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

Ukazatele, které nenabývaly binárních hodnot (0 nebo 1), byly normalizovány. Uvedené ukazatele tvořily vstupní vrstvu neuronové sítě, přičemž výstupní vrstvou byla jedna proměnná reprezentující celkový stav potrubí. Model byl testován na vodovodních potrubích v Jižní Koreji. Výstupy ANN modelu byly srovnány se skutečným stavem daného potrubí. Tento skutečný stav byl určen na základě ukazatelů: vnější koroze, prasklina, díra, vnitřní koroze, H-W koeficient drsnosti C. Každému z těchto pěti ukazatelů byla přiřazena stejná váha (0,2). Obrázek 3.5 představuje vztah skutečného stavu a hodnocení provedeného ANN modelem. Zdá se, že navržený model dobře reprezentuje skutečný stav hodnoceného potrubí.



Obrázek 3.5 Srovnání skutečného hodnocení a hodnocení modelem ANN [23]

U.S. EPA [24] 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

Legislativní rámec dané problematiky v České a Slovenské republice shrnuje Míka [25]. Základní právní dokument v oblasti vodovodů a kanalizací v ČR – zákon č. 274/2001 Sb. O vodovodech a kanalizacích [1] – ukládá vlastníkovvi vodovodu povinnost zpracovat a realizovat plán financování obnovy vodovodů. Požadavky na tyto plány financování obnovy jsou pak uvedeny ve vyhlášce č. 428/2001 Sb. [26]. 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. Pokyny pro vyplnění formuláře jsou dány pouze takto: *„Vlastník si podle vlastního uvážení stanoví hodnotu procenta opotřebení pro jednotlivé skupiny vybraných údajů majetkové evidence popřípadě položky. Určení opotřebení za větší celky se provede váženým průměrem podle aktuální hodnoty. Způsob stanovení procent opotřebení se popíše v komentáři podle bodu 8. Procento je vyjádřením stavu, lze jej odvodit i z délky životnosti podle §30 a 31 zákona č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů, ve znění pozdějších předpisů, s přihlédnutím k dalším aspektům – například zatížení provozem, povrchy, nebo použité materiály. Vyhodnocení je možné vyjádřit i jako výsledek Impairmentu“* [26].

Tabulka 3.12 Tabulka plánu financování obnovy vodovodů a kanalizací [26]

Č.j.:

Razítko vlastníka a podpis statutárního zástupce:

Datum schválení:

Poř. č.	Majetek podle skupin pro vybrané údaje majetkové evidence	Hodnota majetku v reprodukční pořizovací ceně jako součet všech příslušných položek uvedených ve vybraných údajích majetkové evidence (VÚME) v mil.Kč na 2 desetinná místa	Vyhodnocení stavu majetku vyjádřené v % opotřebení	Teoretická doba akumulace Finančních prostředků v počtu roků	Délka potrubí v roce schválení plánu v km	Finanční prostředky zajišťované na obnovu* vodovodů a kanalizací v mil. Kč na 2 desetinná místa					
						2011	2012	2013	2014	2015	2016-2020
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	Vodovody příváděcí řady					+					
3	+ rozvodná vodovodní síť					++					
4	Úpravny vody				0	+					
5	+ zdroje bez úpravy					++					
6	Kanalizace, příváděcí					+					
7	stoky+ stoková síť					++					
8	Čistírny odpadních vod				0	+					
9						++					
10	Vodovody celkem										
11	Kanalizace celkem										
12	CELKEM										
13	Celkem řádky 2, 4, 6, 8					+					
14	Celkem řádky 3, 5, 7, 9					++					

* Obnova viz § 2 odst. 9 zákona č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu, ve znění pozdějších předpisů.

+ Finanční prostředky získané z vodného a stočného; v komentáři vlastník popíše zdroje této hodnoty (nájemné, odpisy účetní, opravy, popř. prostředky účelově určené pro obnovu tímto plánem).

++ Finanční prostředky ostatní - jedná se o jiné než získané z vodného a stočného; v komentáři vlastník popíše způsob členění a stanovení této hodnoty (např. dotace, zdroje z příjmů obcí, úvěry atd.).

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. Současný seznam technických auditorů obsahuje 9 osob, z nichž 3 osoby dosud zpracovali 9 technických auditů dle zákona o vodovodech a kanalizacích.

Technický audit vodovodu nebo kanalizace má podle vyhlášky č. 428/2001 Sb. obsahovat z následujícího výčtu pouze části věcně příslušné podle zadání:

- úvod (zadání auditu);
- výchozí podklady (např. údaje provozní evidence, cenové kalkulace, smlouvy týkající se provozu);
- specifikace majetku podle majetkové evidence;
- provozní údaje;

1. popis výroby a její vyhodnocení;
2. zhodnocení zajištění jakosti vyráběné pitné vody a vypouštěné odpadní vody;
3. rozbor nákladů a cenových kalkulací;
4. personální vyhodnocení (počet a zařazení zaměstnanců);
5. popis a vyhodnocení smluvních vztahů;

e) analýza současného stavu

1. srovnávací;
2. úvahovou;

f) závěry v oblastech

1. péče o infrastrukturní majetek a jeho provozuschopnost;
2. provozování (výroba a vztah k odběratelům);
3. ekonomie a ceny;
4. smluvní vztahy;

g) návrh opatření pro

1. vlastníka vodovodu nebo kanalizace;
2. obce;
3. provozovatele;
4. vodoprávní úřad;
5. ministerstvo.

Zákon [1] ani vyhláška [26] však dále nespecifikuje jakou metodou či podle jakých pravidel technický audit provádět. Jak uvádí Míka [25], 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. [27], 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 prvé 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“ [27].

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 [28]. 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. [29].

Plán obnovy vodovodů se podle vyhlášky [29] stanovuje pro objekty a zařízení tvořící funkční celek. Těmito objekty a zařízeními jsou podle vyhlášky:

- a) jímací objekty podzemních vodárenských zdrojů;
- b) čerpací stanice:
 1. stavební objekty (např. nádrže, budovy);
 2. technologické vybavení (např. stroje, zařízení);
- c) úpravny vody:
 1. stavební objekty (např. nádrže, budovy);
 2. technologické vybavení (např. stroje, zařízení);
- d) vodojemy:
 1. stavební objekty (např. nádrže, budovy);
 2. technologické vybavení (např. stroje, zařízení);
- e) příváděcí řady;
- f) rozvodné řady včetně přípojek ve vlastnictví vlastníka veřejného vodovodu;
- g) ostatní stavební objekty;
- h) ostatní technologická zařízení.

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.

Hodnocení se provádí tak, že objekty a zařízení jsou v každém z uvedených ukazatelů zaříděny do jedné ze 4 kategorií. Těmto kategoriím jsou přiřazeny body od 1 (nejlepší) do 4 (nejhorší). Podle součinu bodů všech ukazatelů je daný objekt zařazen do výsledné kategorie. Zařídění majetku do kategorií míry opotřebení dle vyhlášky [29] představuje Tabulka 3.13.

Tabulka 3.13 Kategorie míry opotřebení objektů a zařízení, zdroj [29]

Kategorie míry opotřebení	Popis prioritizácie (naliehavosti) obnovy	Rozsah hodnôt miery opotrebenia majetku pre príslušnú kategóriu
MOM – 1. kategória	Vyhovujúca hodnota miery opotrebovania majetku, ktorá nevyžaduje žiadne opatrenia v rámci obnovy.	1 – 16 ale žiadny ukazovateľ, okrem veku, nesmie byť zaradený do T4
MOM – 2. kategória	Vyhovujúca hodnota, ktorá nevyžaduje žiadne opatrenia v rámci obnovy (potenciálne treba uvažovať s obnovou).	17 – 36 ale žiadny ukazovateľ, okrem veku, nesmie byť zaradený do T4
MOM – 3. kategória	Kritické hodnoty, ktoré vyžadujú realizáciu opatrení na riešenie existujúceho stavu (treba plánovať obnovu).	37 – 144
MOM – 4. kategória	Nežiaduci stav existujúceho majetku, ktorý vyžaduje obnovu prioritne, nakoľko sú ohrozené jeho základné funkcie a predstavuje zvýšené riziko.	145 – 256

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 vlastníkovvi 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 spojitych 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.

Definice

Proces, při kterém je systematicky a současně optimalizován soubor účelových funkcí, je nazýván multikriteriální optimalizace (MO) či vektorová optimalizace [30]. Matematický model obecné úlohy vícekriteriálního programování s p účelovými funkcemi, m omezujícími podmínkami a n proměnnými formuluje takto:

Hledáme extrémy p účelových (či kritériálních) 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 $x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$.

Jak uvádí Brožová et al. [31], lze provést funkcionální vyjádření za pomoci vektorů:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) \rightarrow \min$$

$$\mathbf{x} \in X = \{\mathbf{x} \in R^n / \mathbf{G}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b}\},$$

kde:

X je prostor přípustných řešení;

\mathbf{x} je vektor proměnných;

\mathbf{F} je vektor kritériálních funkcí;

\mathbf{G} je vektor levých stran omezujících podmínek

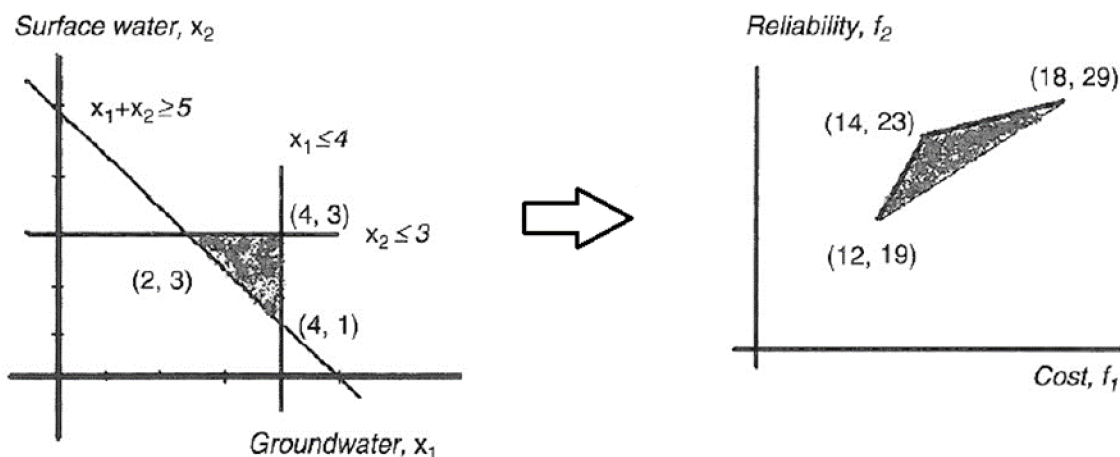
\mathbf{B} je vektor pravých stran omezujících podmínek, který je nulový v případě, že hodnoty \mathbf{b} převedeme na levou stranu omezujících podmínek.

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 [31]:

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

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

Omezující podmínky (OP) mohou být ve tvaru rovnosti i nerovnosti. OP vytvářejí prostor přípustných řešení X , který je definován jako množina $\{\mathbf{x} | g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m\}$. Z vektorů prostoru přípustných řešení jsou vypočítávány hodnoty účelových funkcí, které vytvářejí prostor kritériálních funkcí Z tvořený množinou $\{\mathbf{F}(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in X\}$. Obrázek 3.6 zobrazuje X a Z pro jednoduchý příklad optimalizace dvou-kritériálního problému s lineárními omezujícími podmínkami a účelovými funkcemi.



Obrázek 3.6 Prostor přípustných řešení X a prostor kriteriálních funkcí Z na příkladu dvoukriteriální lineární optimalizace [32]

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 $\mathbf{x}^* \in X$ je Pareto optimální, když neexistuje další bod $\mathbf{x} \in X$ takový, že $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$ a $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$ pro alespoň jednu účelovou funkci“ [30]. 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.

Podobným konceptem je efektivnost. Efektivní a neefektivní body jsou definovány následovně [30]: „Bod $\mathbf{x}^* \in X$ je efektivní, když neexistuje další bod $\mathbf{x} \in X$ takový, že $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$ a $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$ pro alespoň jednu účelovou funkci. Jinak je \mathbf{x}^* neefektivní. Množina efektivních bodů se nazývá efektivní plocha.“

Třetí obdobný princip se nazývá dominovanost. Definují se nedominované a dominované body [30]: „Vektor kriteriálních funkcí $\mathbf{F}(\mathbf{x}^*) \in Z$ je nedominovaný, když neexistuje další vektor $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \in Z$ takový, že $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$ a $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$ pro alespoň jednu účelovou funkci. Jinak je $\mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$ dominovaný.“

Je patrné, že všechny uvedené definice jsou si navzájem velmi podobné. V praktických aplikacích nezáleží na tom, který princip použijeme, a lze tyto principy považovat za shodné [31].

Kompromisní řešení

Alternativním přístupem k Pareto optimalitě je myšlenka kompromisního řešení, kde je řešení představováno jediným bodem. Tento přístup spočívá v minimalizaci rozdílu mezi potenciálně optimálním bodem a utopickým bodem (či ideálním bodem) definovaným takto [30]: *Bod* $F^\circ \in Z^k$ *je utopický bod, pokud pro všechna* $i = 1, 2, \dots, k$ *platí* $F^\circ_i = \text{minimum}\{F_i(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in X\}$. Utopický bod je obecně nedosažitelný a nejlepším řešením je bod, který leží co nejbližší utopickému bodu. Toto řešení se nazývá kompromisní a je Pareto optimální. Nejbližší řešení lze nalézt například minimalizací Euklidovské vzdálenosti $N(\mathbf{x})$ od utopického bodu, definované takto:

$$N(\mathbf{x}) = |\mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}^\circ| = \left\{ \sum_1^k [F_i(\mathbf{x}) - F^\circ_i]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Při sčítání hodnot účelových funkcí je však velmi vhodné, aby tyto funkce byly bezrozměrné. Toho lze dosáhnout transformací účelových funkcí. Marler [30] uvádí několik transformací. První z nich:

$$F_i^{trans}(x) = \frac{F_i(x)}{|F_i^{max}|} \quad (3)$$

vede na bezrozměrnou účelovou funkci, předpokladem je $F_i^{max} \neq 0$. F_i^{max} může být definováno jako maximální z hodnot F_i v Pareto optimálních bodech, které minimalizují jednotlivé účelové funkce. Také lze F_i^{max} stanovit jako absolutní maximum $F_i(\mathbf{x})$ nebo jeho inženýrský odhad. Další transformace uvedené v [30] jsou založeny na podobném principu, do výpočtu navíc vstupují ještě hodnoty účelové funkce v utopickém bodě, viz [30].

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 [31]:

- 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 [31]:

- 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.

Preference poukazují na mínění rozhodovatele o bodech v prostoru kritériálních funkcí. U metod využívajících a posteriori informace o preferencích jsou preference aplikovány přímo na množinu potenciálních řešení. Naopak při použití a priori metod je třeba kvantifikovat preference před tím, než je známa množina potenciálních řešení. V tomto případě je termín preference používán ve spojení s relativní důležitostí účelových funkcí. [30]

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.

3.2.1 Metody multikriteriálního programování

Skalarizační metody s a priori informací o preferencích

Jak uvádí Fiala [33], metody s a priori informací o preferencích využívají dostupné informace před vlastním výpočtem kompromisního řešení a převádějí tak multikriteriální úlohu na řešení jedné případně několika monokriteriálních úloh. Preference mohou být vyjádřeny ve formě cílů nebo relativní důležitosti jednotlivých kritérií. Většina následujících metod obsahuje parametry, což jsou například koeficienty, exponenty, atd. Všechny metody v této kapitole jsou prezentovány dle Marlera [30].

Nejběžnější skalarizační metodou je metoda globálního kritéria, kdy jsou všechny účelové (kritériální) funkce shrnuty do jediné funkce. Globálním kritériem může být jakákoli matematická skalarizační funkce bez vztahu k preferencím. V případě váženého globálního kritéria se jedná o typ funkce užitku, ve které jsou parametry funkce využity k modelování

preferencí rozhodovatele. Nejobecnější funkce užitku vyjádřená v nejjednodušší formě jako vážený exponenciální součet má následující tvary:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i [F_i(\mathbf{x})]^p, \quad F_i(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall i, \quad (4)$$

$$U = \sum_{i=1}^k [w_i F_i(\mathbf{x})]^p, \quad F_i(\mathbf{x}) > 0 \quad \forall i. \quad (5)$$

Rozšířením těchto vztahů jsou následující varianty:

$$U = \left\{ \sum_{i=1}^k w_i [F_i(\mathbf{x}) - F_i^0]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (6)$$

$$U = \left\{ \sum_{i=1}^k w_i^p [F_i(\mathbf{x}) - F_i^0]^p \right\}^{\frac{1}{p}}. \quad (7)$$

V těchto vztazích je \mathbf{w} vektor vah zvolený tak, že $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ a $\mathbf{w} > \mathbf{0}$. Obecně je relativními hodnotami vah vyjadřována relativní důležitost účelových funkcí. Sumační argumenty v rozšířených variantách uvedených funkcí užitku lze vnímat dvěma způsoby. Buďto jako transformaci původních účelových funkcí, nebo jako součásti vzdálenostní funkce, která minimalizuje vzdálenost mezi řešením a utopickým bodem v prostoru účelových funkcí. Řešení těchto vztahů je závislé na hodnotě exponentu p . Obecně je hodnota p úměrná důrazu kladenému na minimalizaci účelové funkce s největším rozdílem mezi $F_i(\mathbf{x})$ a F_i^0 . Vliv volby p na výsledné řešení je popsán v literatuře [30]. Zvýšení parametru p může vést k lepšímu postihnutí kompletní Pareto optimální množiny.

Pokud zvolíme parametr $p=1$, jedná se o váhovou sumační metoda, kde funkce užitku je vyjádřena vztahem:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i F_i(\mathbf{x}). \quad (8)$$

Pokud jsou všechny váhy kladné, pak minimalizací této funkce získáme Pareto optimální řešení, přestože uvedená formulace neobsahuje potřebné podmínky pro naplnění Pareto optimality. Je velmi nevhodné, aby váhy kritérií byly voleny intuitivně a libovolně. Z toho důvodu existuje řada metod a přístupů pro stanovení vah kritérií. Druhým problémem této metody je to, že je nemožné postihnout body v nekonvexní části Pareto plochy v prostoru kritériálních funkcí. Nekonvexní Pareto plochy jsou však málo obvyklé. Posledním

problémem metody je, že konzistentní a soustavné měnění vah nemusí vyústit v rovnoměrné rozdělení Pareto optimálních bodů a přesný kompletní popis Pareto optimální množiny.

Existuje celá řada dalších metod popsanych v literatuře, např.:

- lexikografická metoda;
- váhová min-max metoda (váhová Tchebycheffova metoda);
- exponenciální vážené kritérium;
- vážená součinnová metoda;
- cílové programování;
- převod účelových funkcí na omezující podmínky;
- fyzické programování.

Skalarizační metody s a posteriori informací o preferencích

V některých případech může být stanovení preferencí obtížné a je proto vhodné umožnit výběr řešení z Pareto optimální množiny. Jak uvádí Marler [30], není pak třeba stanovit, které kritérium je důležitější, ale jen které řešení je nejlákavější. Toto lze provést v rámci prostoru přípustných řešení nebo i v prostoru kritériálních funkcí, konečné řešení lze zvolit na základě hodnot účelové funkce nebo na základě hodnot proměnných. K tomu je však třeba zobrazit řešení ve formě grafu či tabulky. Grafická prezentace je omezena na třídímní prostor a už i trojrozměrné zobrazení Pareto plochy může být nejasné. I v případě tabelárního výpisu řešení je výběr konečného řešení nepříjemným úkolem v případě většího počtu kritérií, proměnných nebo bodů řešení. Vzhledem k tomu se následující metody hodí nejlépe pro problémy s relativně malým počtem kritérií.

Řadíme sem např. následující metody:

- fyzické programování;
- metoda NBI (Normal Boundary Intersection);
- metoda NC (Normal Constraint).

Skalarizační metody bez informace o preferencích

V některých případech nejsme schopni korektně formulovat naše preference. Následující kapitola se tedy věnuje metodám, které nevyžadují informaci o preferencích. Většina metod představuje zjednodušené metody s a priori informací o preferencích s vyloučením parametrů metody. Základní přístupy jsou dva: exponenciální součet a součin účelových funkcí. Většina

ostatních přístupů nevyžadujících informací o preferencích představují variace těchto dvou skalarizačních formulací [30]. Patří sem např.:

- metody globálního kritéria (TOPSIS, metoda sumace kritérií, min-max metoda);
- Nashova metoda (Nash arbitration);
- Raova metoda.

Evoluční algoritmy

Jak uvádí Ehrgott [34], myšlenka využití technik založených na principu přirozeného výběru pro řešení problémů sahá až do 30. let 20. století. Nejdříve však v 60. letech byly vyvinuty tři hlavní techniky na tomto principu: genetické algoritmy, evoluční strategie a evoluční programování. Tyto techniky jsou dnes souhrnně označovány jako evoluční algoritmy. Evoluční algoritmy mohou být obzvláště žádoucí pro řešení multikriteriálních optimalizačních problémů, protože pracují současně s celou množinou potenciálních řešení, což umožňuje najít několik bodů Pareto optimální množiny při jediném spuštění algoritmu. Evoluční algoritmy nejsou citlivé na tvar či spojitost Pareto plochy, což může být problémem pro metody matematického programování.

Jak Marler [30] uvádí, evoluční algoritmy volně napodobují biologickou evoluci a jsou založeny na Darwinově teorii přirozeného výběru. Vyskytuje se zde proto názvosloví z oblasti mikrobiologie a napodobují se genetické operace. Skupina potenciálních řešení představuje populaci a jedna algoritmičká iterace se nazývá generací. Přístup spočívá v tom, že na počáteční náhodně generovanou populaci jsou aplikovány tři základní operace: reprodukce, křížení a mutace. Selektce představuje výběr vektorů ze současné generace pro použití v následující generaci. Zda bude návrh vybrán záleží na jeho ohodnocení podle určité předem stanovené hodnotící funkce. V tomto bodě je nejsnazší implementovat koncept Pareto optimality. Když je stanovena nová generace, proběhne proces křížení. Při křížení jsou kombinovány dva různé vektory a jejich potomci se stávají novými členy populace. Další operací je mutace, kdy je provedena náhodná změna části vektoru.

Od publikování práce J.D. Schaffera „Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms“ v roce 1985 je patrný nárůst zájmu o aplikaci evolučních algoritmů pro řešení multikriteriálních optimalizačních problémů, jak uvádí Zhou et al. [35]. Dále uvádí, že na téma evoluční multikriteriální optimalizace bylo do ledna roku 2011 publikováno více než 5600 publikací, přičemž 67 % z nich bylo publikováno v posledních 8 letech.

Hlavním problémem návrhu multikriteriálního evolučního algoritmu (MOEA) je samotná kostra algoritmu. Dle současné literatury [35] je nejpoužívanější kostra algoritmu ve výzkumu i aplikacích víceméně stejná jako u algoritmu NSGA-II. Jak uvádí Deb et al. [36], NSGA II je rychlý elitistický evoluční algoritmus. Zahrnuje koncept nedominovanosti a to tak, že populaci zařídí do několika sad. První sada je zcela nedominovaná v současné populaci a všechna potenciální řešení, která obsahuje, dostanou nejlepší hodnocení: 1. Druhá sada je dominována pouze prvky první sady a všechny prvky druhé sady dostávají hodnocení 2 a tak dále, dokud nejsou ohodnoceni všichni jedinci v populaci. Při selekci jsou pak vybírání jedinci turnajovým výběrem. Vybráni jsou jedinci, kteří mají nižší ohodnocení nebo větší vzdálenost od sousedních jedinců, čímž je vyloučena konvergence k lokálnímu extrému. Poté proběhne křížení a mutace a nová generace je opět rozřazena dle dominovanosti a ohodnocena. Elitismus spočívá v tom, že nedominovaná řešení jsou uchovávána již od první populace.

Literatura [35] uvádí například několik dalších možných variací multikriteriálních evolučních algoritmů:

- MOEA založené na dekompozici – MOEA/D;
- preferenční MOEA;
- indikátorové MOEA;
- hybridní MOEA;
- memetické MOEA, např. [37];
- koevoluční MOEA.

Multikriteriální optimalizace za nejistoty

Podle mnoha výzkumníků je skutečnou výzvou multikriteriální optimalizace zahrnutí nejistoty vstupních dat, jak uvádí Zarghami [32]. V oblasti vodního hospodářství a životního prostředí se setkáváme s nejistotami vyvstávajícími ze dvou zdrojů: *náhodná nebo pravděpodobnostní nejistota* související environmentálními, ekonomickými a technickými daty; a *fuzzy nejistota* související se subjektivním úsudkem a charakteristikou rozhodovatele. Přehled literatury zabývající se různými typy nejistot a jejich řešením uvádí ve svých studiích například Sahinidis [38] a Stewart [39]. Je samozřejmě možné uvažovat i kombinaci obou typů nejistot – pravděpodobnostní a fuzzy nejistoty. V současných studiích je těmto úlohám věnována vzrůstající pozornost, viz mimo jiné např. Abdelaziz et al. [40].

V oboru vodního hospodářství se často setkáváme s hodnotami, které nemohou být předpovězeny s jistotou. Veličiny jako např. spotřeba vody, ceny energií, srážky, vypouštění odpadních vod a další se nazývají náhodné nebo pravděpodobnostní veličiny [32]. Předpokládejme, že prostor přípustných řešení je deterministický a pouze kritéria závisí na náhodných parametrech, které tvoří náhodný vektor ξ . Problém lze formulovat:

$$f_k(x, \xi) \rightarrow \max \\ \text{pro } x \in X.$$

Ekonomická literatura uvádí, že loterie náhodného výsledku $f_k(x, \xi)$ je ekvivalentní lineární kombinaci její očekávané hodnoty a rozptylu

$$E[f_k(x, \xi)] - \beta_k \text{Var}[f_k(x, \xi)] \quad (9)$$

kde β_k představuje zvolenou míru přijatelného rizika [32]. Pokud je $\beta_k = 0$, uvažujeme pouze očekávanou hodnotu a zcela ignorujeme riziko charakterizované rozptylem. Vztah (9) se nazývá jistotní ekvivalent.

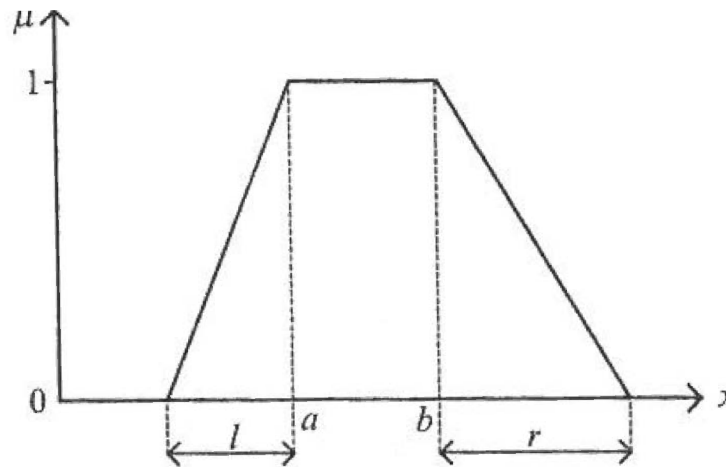
Ve spojitém případě se můžeme setkat s nejistými hodnotami jak v účelových funkcích, tak v omezujících podmínkách. Pokud jsou náhodné prvky obsaženy pouze v účelových funkcích, můžeme stanovit jejich jistotní ekvivalenty a poté je možné tento již deterministický problém řešit běžnými metodami. Pokud se vyskytuje náhodnost v omezujících podmínkách, existuje možnost, že budou porušeny. Literatura týkající se stochastického programování zmiňuje dvě hlavní metody pro uvažování porušení omezujících podmínek, jak uvádí Zarghami [32]:

- v závislosti na míře porušení jsou zavedeny útlumové funkce a přidány k jedné či více účelovým funkcím, nebo jsou přidány jako další účelové funkce;
- pro každou omezující podmínku nebo skupinu omezujících podmínek jsou stanoveny pravděpodobnostní hladiny. Omezující podmínky jsou poté nahrazeny požadavkem, že mají být uspokojeny dosažením pravděpodobností větších nebo rovných daným tolerancím.

V některých případech se používá kombinace těchto dvou přístupů.

V definici většiny praktických problémů jsou lidské úsudky často vágní. Fuzzy množiny (mlhavé množiny) jsou možností, jak vyjádřit a nakládat s daty, která nejsou precizní. Princip fuzzy metod popisuje Zarghami [32]. Uvažujme neprázdnou množinu X . Mlhavá množina A v množině X je dána funkcí příslušnosti $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$, kde hodnota $\mu_A(x)$ je míra příslušnosti elementu x množině A . Míra toho, že hodnota x patří do množiny A nebo B je rovna maximu jednotlivých funkcí příslušnosti. Míra toho, že hodnota x náleží současně množině A i B je rovna minimu jednotlivých funkcí příslušnosti. Existuje mnoho variant tvaru funkce

příslušnosti vhodných pro různé aplikace. Trapézové (lichoběžníkové) mlhavé číslo je definováno jako funkce příslušnosti s tolerančním intervalem $[a, b]$, levou šířkou l a pravou šířkou r , jak je patrné z . Pokud $a = b$, stává se z něj trojúhelníkové mlhavé číslo.



Obrázek 3.7 Lichoběžníkové mlhavé číslo $\mu=(a, b, l, r)$ [32]

Pro řešení spojitých optimalizačních úloh s fuzzy veličinami existuje řada metod. Většina z těchto metod nerozlišuje mezi účelovými funkcemi a omezujícími podmínkami. Nejjednodušší metodou je hledání průniku funkcí příslušnosti všech účelových funkcí $\{\mu_{G_1}(x), \mu_{G_2}(x), \dots\}$ a všech omezujících podmínek $\{\mu_{C_1}(x), \mu_{C_2}(x), \dots\}$ a řešením je pak hodnota x , která maximalizuje funkci příslušnosti průniku $\mu_D(x)$:

$$\text{Maximalizovat } \mu_D(x) = \text{Maximalizovat } \min\{\mu_{G_1}(x), \mu_{G_2}(x), \dots, \mu_{C_1}(x), \mu_{C_2}(x), \dots\}. \quad (10)$$

Další informace z oblasti fuzzy multikriteriální optimalizace uvádí např. Ehrgott [34].

Zarghami [32] uvádí jednoduchý příklad použití fuzzy přístupu. Veličina x představuje hloubku vody v nádrži, která kolísá od 0 do 10 m a je reprezentována funkcí příslušnosti

$$\mu_{C_1}(x) \begin{cases} 0,25x & \text{pro } 0 \leq x < 4 \\ 1 & \text{pro } 4 \leq x < 6 \\ 2,5 - 0,25x & \text{pro } 6 \leq x \leq 10 \end{cases} \quad (11)$$

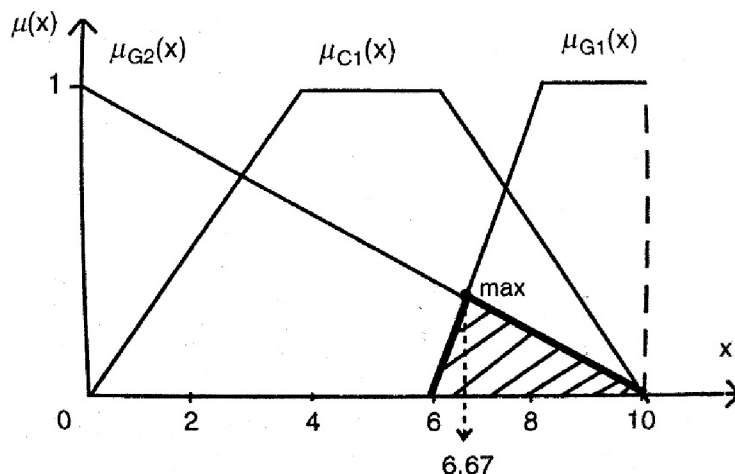
Optimální hloubka vody závisí na dvou kritériích. Prvním kritériem je rekreační potenciál nádrže, který se zvyšuje s hloubkou vody, daný funkcí příslušnosti

$$\mu_{G_1}(x) \begin{cases} 0 & \text{pro } x < 6 \\ -3 + 0,5x & \text{pro } 6 \leq x < 8 \\ 1 & \text{pro } 8 \leq x \leq 10 \end{cases} \quad (12)$$

Naopak vyšší hloubka vody je méně preferována kvůli možným povodním, tím je dáno druhé kritérium

$$\mu_{G2}(x) = 1 - 0,1x, \quad \text{pro } 0 \leq x \leq 10 \quad (13)$$

K nalezení optimální hloubky vody byly funkce příslušnosti omezující podmínky a kritérií zobrazeny do grafu na Obrázek 3.8.



Obrázek 3.8 K příkladu stanovení optimální hladiny [32]

Průnik těchto funkcí, který je definován minimálními hodnotami pro všechna x, je zobrazen na obrázku tlustou plnou čarou, která má rovnici

$$\mu_D(x) \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq 6 \\ -3 + 0,5x & \text{pro } 6 < x < 20/3 \\ 1 - 0,1x & \text{pro } 20/3 < x \leq 10 \end{cases} \quad (14)$$

Optimálním řešením je pak $x = 20/3 \approx 6,67$ maximalizující tuto funkci.

3.2.2 Metody multikriteriálního hodnocení variant

V případě diskrétních problémů s konečným počtem řešení hovoříme o multikriteriálním hodnocení variant. Jak uvádí Fiala [33], v tomto případě je problém zadán explicitně seznamem variant $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ a seznamem kritérií $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ a hodnocením variant podle jednotlivých kritérií ve tvaru tzv. kritériální matice Y:

$$Y = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & \dots & f_n \\ a_1 & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ a_2 & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_m & y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{matrix} \quad (15)$$

Kritéria lze rozdělit na kritéria kvantitativní a kritéria kvalitativní [31]. Hodnoty kvantitativních kritérií tvoří objektivně měřitelné údaje. Naopak kvalitativní kritéria není možné objektivně vyjádřit a velmi často jsou subjektivně odhadována. Jednotlivá kritéria mohou být maximalizační nebo minimalizační. Nejlepší varianty podle maximalizačního kritéria mají nejvyšší hodnoty tohoto kritéria. Naopak nejlepší varianty podle minimalizačního kritéria mají nejnižší hodnoty tohoto kritéria. Jak uvádí Brožová [31], často je výhodné pracovat s maticí, která má všechna kritéria stejné povahy. Obvykle tomu tak na začátku úlohy nebývá, proto je možné transformovat kritéria minimalizační na kritéria maximalizační. Autorka uvádí dva možné způsoby:

- vynásobení celého sloupce kritériální matice hodnotou -1, transformace $y'_{ij} = -y_{ij}$;
- výpočet hodnot, které udávají zlepšení oproti nejhorší kritériální hodnotě, transformace $y'_{ij} = y_{ij} - \max_i(y_{ij})$.

První způsob je vždy matematicky korektní, interpretace kritéria po transformaci však může být nejasná (např. maximalizace záporné ceny výrobku). Druhý způsob je jednoduchý pro interpretaci. Jeho použití však není vždy možné, protože může dojít k výraznému zkreslení vstupní informace a tím k ovlivnění výsledku analýzy.

Úlohy multikriteriální analýzy variant dělíme na tři základní typy úloh podle toho, co je požadovaným cílem řešení [31]:

- výběr jedné nejlepší varianty;
- uspořádání množiny variant;
- rozdělení množiny variant na dobré a špatné.

Existuje nevelký počet specializovaných metod, jednotlivé typy úloh lze řešit vhodným použitím či úpravou dostupných metod. Úlohy lze rozdělit také podle informace o preferencích jednotlivých kritérií a variant. Preference kritérií představuje důležitost jednotlivých kritérií – některému kritériu můžeme přikládat větší důraz, jinému menší. Existují tři základní přístupy, jak vyjádřit preference kritérií [33]:

- aspirační úrovně kritérií;
- ordinální informace o kritériích;
- kardinální informace o kritériích.

Aspirační úrovně kritérií jsou hodnoty, kterých by alespoň měla dosáhnout hodnocená varianta v jednotlivých kritériích. Varianty dosahující alespoň požadované aspirační úrovně

jsou akceptovatelné, jinak se varianty nazývají neakceptovatelné. Náročností požadované aspirační úrovně jednotlivých kritérií lze nepřímo vyjádřit preferenci kritérií. *Ordinální informace o kritériích* znamená jejich uspořádání od nejdůležitějšího po nejméně důležité. *Kardinální informace o kritériích* představuje kvantitativní informaci v podobě vah kritérií. Váha kritéria vyjadřuje jeho relativní důležitost vůči ostatním kritériím. Váha kritéria zpravidla nabývá hodnot od 0 do 1 a součet vah všech kritérií je roven 1. Pro stanovení vah kritérií existuje řada metod (např. metoda pořadí, bodovací metoda, metoda párového srovnávání, Saatyho metoda), viz příslušná literatura [31], [33] a další.

Při řešení problému nás může zajímat několik speciálních variant. *Nedominovaná varianta* (také efektivní nebo Paretovská) je taková, ke které neexistuje v množině variant jiná varianta, lépe hodnocená alespoň podle jednoho kritéria a ne hůře podle ostatních kritérií; množina nedominovaných variant se značí A_N [33]. *Ideální varianta* je hypotetická nebo reálná varianta, která dosahuje ve všech kritériích současně nejlepší možné hodnoty [31]. *Bazální varianta* je hypotetická nebo reálná varianta, která má nejhorší hodnocení podle všech kritérií [31]. *Kompromisní varianta* je jediná nedominovaná varianta doporučená jako řešení problému [31].

I v případě variant rozlišujeme různé typy informace. Podle hodnocení variant podle jednotlivých kritérií rozlišujeme ordinální a kardinální informace. *Ordinální informace* vyjadřuje, že známe pouze pořadí dané varianty podle jednotlivých kritérií. To znamená, že víme, která varianta je lepší podle jednotlivých kritérií, ale nevíme o kolik. *Kardinální informace* vyjadřuje skutečné hodnoty, kterých dosáhly jednotlivé varianty při hodnocení podle jednotlivých kritérií [33].

Metody nevyžadující informaci o preferenci kritérií

Pokud nejsou známy preference kritérií, je použitelná *bodovací metoda* nebo *metoda pořadí*. Obě metody mají podobný princip, popsany dle Brožové [31] následovně. Nejprve je každá varianta ohodnocena podle každého kritéria číslem b_{ij} . V případě metody pořadí toto hodnocení volíme 1 až m , přičemž m je nejlepší hodnocení a odpovídá počtu variant. Při bodovací metodě použijeme pro jednotlivá kritéria vždy stejnou stupnici 1 až 10 tak, že 10 je nejlepší ohodnocení. Poté je vypočteno celkové ohodnocení b_i každé varianty jako součet dílčích hodnot b_{ij} . Jako kompromisní varianta je vybrána varianta, která dosahuje maximálního celkového ohodnocení b_i . Tento postup je možné rozšířit o váhy kritérií a čísla b_{ij} se pak vypočítají jako vážené součty. Metoda pořadí využívá a poskytuje pouze ordinální

informaci, pokud známe kardinální ohodnocení variant, ztrácíme tak informaci. Nevýhodou bodovací metody může být zbytečné zatížení zadavatele v podobě nutnosti přebodovat známé kardinální informace.

Metody s aspiračními úrovněmi

Následující metody vychází ze znalosti aspiračních hodnot kritérií, což jsou hodnoty podle jednotlivých kritérií, kterých by měly varianty alespoň dosahovat.

Konjunktivní a disjunktivní metoda

Metodu definuje mimo jiné např. Brožová [31]. Podle zvolených aspiračních úrovní kritérií určíme množinu akceptovatelných variant tak, že připustíme:

- v případě konjunktivní metody pouze varianty, které splňují všechny aspirační úrovně:
 $M = \{a_i | y_{ij} \geq z_j \text{ pro všechna } j = 1, \dots, n\}$;
- v případě disjunktivní metody připustíme varianty, které splňují alespoň jeden požadavek: $M = \{a_i | y_{ij} \geq z_j \text{ pro alespoň jedno } j = 1, \dots, n\}$.

Prísností (náročností) požadavků ovlivníme velikost množiny akceptovatelných variant. Pokud chceme, můžeme zvolit tak náročné požadavky na kritéria, že množina akceptovatelných řešení bude tvořena jedinou variantou. Metodu je možné použít také pro filtraci a zmenšení počtu variant před výpočtem některou z metod využívající kardinální informace. Lze také určit hodnoty aspiračních úrovní podle požadovaného počtu akceptovatelných variant, viz Fiala [33].

Metoda PRIAM

Metoda PRIAM (PRogramme utilisant l'Intelligence Artificielle en Multicrete, Levine a Pomerol [41]) je založena na heuristickém prohledávání množiny variant tak, aby bylo nalezeno jediné nedominované řešení, jak uvádí Brožová [31] a dále popisuje princip metody. Každá varianta a_j je zobrazena vektorem kriteriálních hodnot $\vec{y}_j \in Y$. Označme $z^{(s)}$ aspirační úrovně kritérií a $\delta z^{(s)}$ změny aspiračních úrovní v kroku s . Rozhodovatel navrhne aspirační úrovně kritérií $z^{(s)} = (z_1^{(s)}, z_2^{(s)}, \dots, z_n^{(s)})$. Hledáme varianty, pro jejichž kriteriální hodnoty platí $\vec{y}_j \geq z^{(s)}$. Počet variant splňující tento vztah udává číslo d . Vzhledem k hodnotě d rozhodovatel mění aspirační úrovně kritérií pro krok $s+1$ takto: $z^{(s+1)} = z^{(s)} + \delta z^{(s)}$. Heuristická informace pro změny aspiračních úrovní je číslo d , které udává počet

akceptovatelných variant. Pokud $d > 1$, může rozhodovatel zpřísnit aspirační úroveň, aby zmenšil počet akceptovatelných variant. Pokud $d = 1$, je nalezena nedominovaná varianta. A pokud $d = 0$, neexistuje žádná akceptovatelná varianta a hledá se nejbližší varianta k zadaným aspiračním úrovním řešením úlohy: $\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^*} |y_i^{(s)} - y_{ij}| \rightarrow \min \quad a_j \in A$, kde y_i^* , $i=1, 2, \dots, n$ jsou ideální kritériální hodnoty.

Metody s ordinální informací

Metody využívající ordinální informaci o kritériích a/nebo variantách vyžadují zadání pořadí důležitosti kritérií a pořadí variant podle jednotlivých kritérií. Následující metody se řadí mezi nejpoužívanější v této kategorii metod [31].

Lexikografická metoda

Jak uvádí Fiala [33], metoda patří mezi jednoduché postupy. Postupně se hodnotí varianty podle jednotlivých kritérií v pořadí jejich důležitosti. Nevýhodou je, že se přitom současně nepřihlíží k dosaženým hodnotám podle dalších kritérií. Metoda vybírá z množiny variant kritéria, která dosahují maximální hodnoty podle nejvýznamnějšího kritéria. Z těchto vybraných kritérií dále vybírá ta kritéria, která dosahují maximální hodnoty podle druhého nejvýznamnějšího kritéria a tak dále, dokud není množina vybraných kritérií jednoprvková, nebo dokud neprojdeme všechna kritéria a vybraná podmnožina obsahuje více variant, ze kterých následně vybereme podle nějakého dodatečného kritéria kompromisní variantu.

Metoda ORESTE

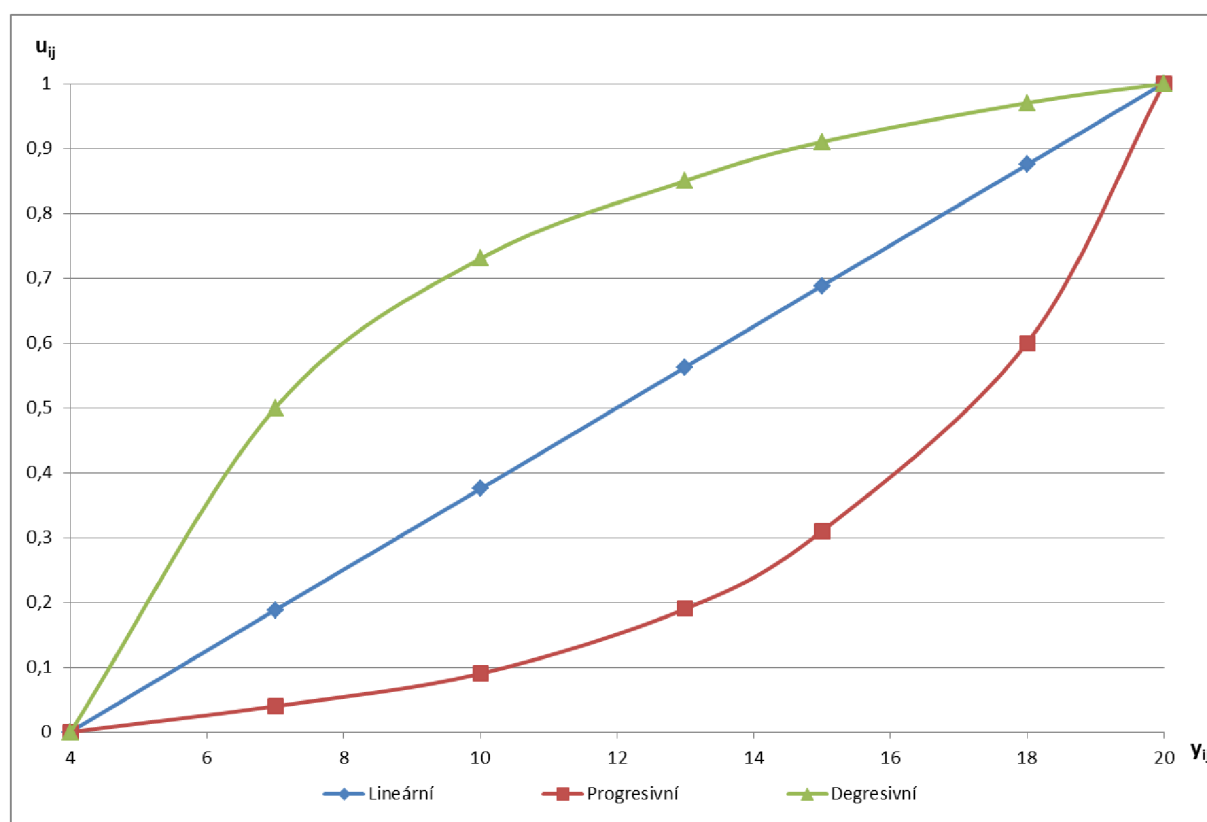
Metoda vyžaduje jako vstup pouze ordinální informaci o kritériích a variantách. Od rozhodovatele je požadováno úplné kvaziuspořádání kritérií a úplné kvaziuspořádání variant podle jednotlivých kritérií, tj. je přípustná indiference kritérií i variant, jak uvádí Brožová [31]. V první části této metody je určena vzdálenost každé varianty podle každého kritéria od fiktivního počátku. Pořadová čísla fiktivní varianty a fiktivního kritéria jsou 0. Poté jsou varianty uspořádány podle určitých pravidel. Druhá část metody spočívá v preferenční analýze, kdy pro každou dvojici variant je možno provést test na zjištění preference, indiference nebo nesrovnatelnosti variant. Metodu blíže popisuje např. [31], [33].

Metody s kardinální informací

Metod, které vyžadují znalost kardinální informace o kritériích v podobě vah kritérií a o variantách v podobě kriteriální matice s kardinálními hodnotami, jak uvádí Brožová [31], je celá řada. Uveďme tři vybrané metody.

Metody založené na výpočtu hodnot funkce užítku

Opět dle BROŽOVÉ [31]. Maximalizace užítku předpokládá možnost vyčíslení užítku, který by každá varianta při realizaci přinesla na škále od 0 do 1. Celkový užitek zde představuje hodnotu agregovaného kritéria, podle kterého dojde k seřazení variant. Před stanovením celkového užítku, který realizace varianty přinese, je nejprve však nutné stanovit pro každé kritérium dílčí funkce užítku. Kardinální hodnocení variant podle všech kritérií je třeba nahradit hodnotami dílčí funkce užítku $u_{ij} = u_j(y_{ij})$; $j = 1, 2, \dots, n$; $u_{ij} \in \langle 0, 1 \rangle$, kde $u_j(y_{ij})$ je funkční závislost mezi hodnotami v původní kriteriální matici a hodnotami dílčí funkce užítku. Rozlišujeme tři základní typy dílčí funkce užítku: lineární, progresivní a degresivní. Obrázek 3.9 ukazuje, jak volbou typu dílčí funkce užítku volíme vztah mezi kriteriálními hodnotami a jejich užitek.



Obrázek 3.9 Příklad lineární, progresivní a degresivní dílčí funkce užítku [31]

Metoda váženého součtu

Jak uvádí Fiala [33], metoda váženého součtu vychází také z principu maximalizace užítku s tím zjednodušením, že předpokládá pouze lineární funkci užítku. Metoda spočívá ve vytvoření normalizované kriteriální matice $R = (r_{ij})$, jejíž prvky získáme z kriteriální matice $Y = (y_{ij})$ pomocí transformačního vztahu

$$r_{ij} = \frac{y_{ij} - D_j}{H_j - D_j} \quad (16)$$

kde:

D_j představuje hodnotu bazální varianty;

H_j hodnotu ideální varianty.

Tato matice představuje matici hodnot užítku z i -té varianty podle j -tého kritéria. Pokud použijeme aditivní tvar funkce užítku, užitek varianty a_i je roven

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^n v_j r_{ij} \quad (17)$$

Varianty seřadíme sestupně podle hodnot $u(a_i)$ a potřebný počet variant s nejvyššími hodnotami užítku považujeme za řešení problému.

Metoda AHP

Metoda AHP (Analytic Hierarchy Process) je dle Fialy [33] jednoduchou a účinnou metodou pro stanovení priorit v hierarchických multikriteriálních systémech. Tato metoda vychází z posloupnosti párových srovnání vhodně stanovených částí systému. Řešení má tři kroky. Nejprve je vytvořena hierarchická struktura cílů, kritérií a rozhodovacích variant v několika různých úrovních s rostoucí prioritou až po vrcholovou úroveň. V každé úrovni jsou obsaženy části s podobnými vlastnostmi, což umožňuje srovnání. Poté se v každé úrovni hierarchie provádí párové srovnání částí systému Saatyho metodou kvantitativního párového srovnávání. Postupuje se od vrcholové úrovně dolů a vytváří se matice párových srovnání, na jejímž základě je odhadován vektor vah jednotlivých částí. Nakonec se kombinují odhadnuté váhy jednotlivých částí systému za účelem získání agregovaných vah variant a je možné uspořádat varianty podle agregovaných vah nebo zvolit jako řešení variantu s největší agregovanou vahou. Typická jednoduchá úloha má tři úrovně: 1. cíl vyhodnocování, 2. kritéria vyhodnocování, 3. posuzované varianty.

Podrobné informace o metodě je možné čerpat od samotného autora metody, jímž je Thomas L. Saaty [42] či z mnohých dalších publikací.

Metody založené na minimalizaci vzdálenosti od ideální varianty

Dalším výpočetním principem je minimalizace vzdálenosti od ideální varianty. Ideální varianta, jak bylo uvedeno výše, je reálná častěji spíše hypotetická varianta, která ve všech kritériích dosahuje současně nejlepších možných hodnot. Metody této kategorie pak vybírají jako kompromisní variantu tu variantu, která je podle určité metriky nejbližší k ideální variantě. Jednou z těchto metod je i metoda TOPSIS.

Metoda TOPSIS

Jak uvádí Brožová [31], metoda posuzuje varianty z hlediska jejich vzdálenosti od ideální a od bazální varianty. Jsou vyžadovány váhy jednotlivých kritérií a kardinální hodnocení variant podle těchto kritérií. Nejprve je třeba převést všechna kritéria na maximalizační podle vztahu $y'_{ij} = -y_{ij}$, druhý výše uvedený vztah $y'_{ij} = y_{ij} - \max_i(y_{ij})$ nelze použít. Proveďte se konstrukce normalizované kritériální matice $R=(r_{ij})$ podle vztahu

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}} \quad (18)$$

Následně se vypočte normalizovaná vážená kritériální matice $W=(w_{ij})$ dle vztahu $w_{ij} = v_j r_{ij}$. Dále se určí a ohodnotí ideální a bazální varianta a vypočte se vzdálenost jednotlivých variant od bazální d_i^- a od ideální varianty d_i^+ . Nakonec se vypočítají relativní ukazatele vzdáleností jednotlivých variant od bazální varianty $c_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-)$. Tyto ukazatele nabývají hodnot od 0 do 1, přičemž $c_i = 0$ nabývá bazální varianta a $c_i = 1$ ideální varianta. Varianty seřadíme sestupně dle c_i a potřebný počet variant považujeme za řešení problému. Pro bližší popis metody viz např. Brožová [31] a Fiala [33].

Metody založené na vyhodnocování preferenční relace

Metody založené na vyhodnocování podle preferenční relace jsou dle Fialy [33] významnou skupinou metod. Jak dále uvádí, metody založené na konstrukci preferenční relace vychází z relací (vztah preference, indiference, nesrovnatelnost) mezi dvojicemi variant vzhledem k jednotlivým kritériím a pomocí agregačních procedur získávají párové relace mezi dvojicemi variant z hlediska všech kritérií. Na principu preferenční relace je založena řada metod, k nejznámějším patří metoda AGREPREF, třída metod ELECTRE, třída metod PROMETHEE, metoda MAPPAC. Pro seznámení s principem metod byly vybrány pro tuto kapitolu metody ELECTRE a PROMETHEE.

Metoda ELECTRE

Do třídy metod ELECTRE patří metody ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS, ELECTRE TRI. Prvotní a nejjednodušší metodou je ELECTRE I, která poslouží nyní pro pochopení principu.

Jak uvádí Brožová [31], cílem metody ELECTRE I je rozdělit množinu všech variant na dvě indifferenční třídy, na efektivní a neefektivní varianty. Použití metody předpokládá znalost kritériální matice, vektoru normalizovaných vah a stanovení dvou prahových hodnot – prahu preference a dispreference. Pro každou dvojici variant a_i , a_j je sestavena množina C_{ij} , která obsahuje indexy kritérií, z jejichž hlediska je varianta a_i hodnocena alespoň tak dobře jako varianta a_j . A dále množina D_{ij} , která obsahuje indexy zbývajících kritérií, tedy těch, podle kterých je a_i horší než a_j . Následně se určí pro každou dvojici variant číslo c_{ij} představující součet vah těch kritérií, podle nichž je varianta a_i hodnocena alespoň tak dobře jako varianta a_j . Dál se pro každou dvojici určí číslo d_{ij} , které se nazývá stupeň dispreference. Po zadání prahové hodnoty preference c^* a prahové hodnoty dispreference d^* je určena celková preference mezi dvojicí variant. Za efektivní varianty jsou považovány ty, ke kterým vzhledem k celkové preferenční relaci neexistuje žádná preferující varianta a samy jsou preferovány alespoň před jednou variantou. Podrobněji viz např. Fiala [33], Belton [43] a Ehrgott [34].

Metoda PROMETHEE

Do této třídy patří opět několik metod: PROMETHEE I, PROMETHEE II, PROMETHEE V, PROMETHEE VI, PROMETHEE GDSS. Základem metody PROMETHEE je, jak uvádí BROŽOVÁ [31], párové srovnání variant postupně z hlediska všech kritérií. Prvním krokem je určení koeficientů, které vyjadřují intenzitu preference jedné varianty před druhou pro každé kritérium. Tato intenzita závisí na rozdílu kritériálních hodnot d_j . Pro maximalizační kritérium platí, že čím větší je tento rozdíl, tím je intenzita preference větší. Intenzitu preferencí při hodnocení dvou variant z hlediska všech kritérií vyjadřuje funkce $Q(d_j)$. Metoda PROMETHEE nabízí 6 základních typů preferenčních funkcí Q . Poté, co je provedena pro každou dvojici variant kvantifikace intenzity preferencí na základě zvolených preferenčních funkcí, je pro každou dvojici vypočten globální preferenční index zahrnující váhy kritérií. Výslednou informací metody je úplné uspořádání variant podle klesajícího čistého toku v matici globálních preferenčních indexů o rozměrech $m \times m$,

kde m je počet variant. Podrobněji např. Brožová [31], Fiala [33], případně více informací poskytuje Belton [43], Ehrgott [34] a další.

Hodnocení variant za nejistoty

Pravděpodobnostní metody

Nejistoty lze do řešení diskrétních problémů zahrnout obdobně jako v případě spojitém, viz kapitola 3.2.1. V tomto případě se provede výpočet jistotních ekvivalentů pro všechna hodnocení variant podle všech kritérií. Vznikne tím nová kritériální matice, která již může být řešena běžnými diskrétními metodami, jak uvádí Zarghami [32].

Fuzzy metody

Pokud srovnáváme alternativy bez specifických hodnot, obvykle se použije fuzzy čísel. Pro aplikaci fuzzy parametrů při řešení diskrétních problémů je třeba provést následující tři kroky: nejprve se definují vhodné fuzzy funkce příslušnosti pro váhy kritérií a pro hodnocení variant v jednotlivých kritériích. Poté se provedou fuzzy aritmetické operace pro stanovení celkového fuzzy ohodnocení variant, např. vážený součet. Nakonec se varianty porovnají podle celkových fuzzy čísel s pomocí speciálních přístupů. [32]

Velmi jednoduchý příklad použití uvádí Zarghami [32], komplexní přehled diskrétních fuzzy metod uvádí Chen a Hwang [44].

3.2.3 Metody stanovení vah

Metody vícekritériálního rozhodování vyžadují informaci o relativní důležitosti jednotlivých kritérií. V následujícím textu jsou prezentovány metody stanovení vah dle Fialy [33]. Relativní důležitost kritérií můžeme vyjádřit za pomoci vektoru vah kritérií, neboli

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_k), \sum_{i=1}^k v_i = 1, v_i \geq 0. \quad (19)$$

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 konstruují tak odhady vah.

Metoda pořadí

Tato metoda vyžaduje pouze ordinální informaci. Kritéria se stanovují dle důležitosti. Uspořádaným kritériím jsou přiřazeny body $k, k-1, \dots, 1$. Nejdůležitější kritérium má přiřazeno

číslo k (počet kritérií), druhé nejdůležitější má $k-1$, až nejméně důležité je označeno jako 1. Obecně tedy je i -tému kritériu přiřazeno číslo b_i . Jeho váha se vypočítá podle následujícího vzorce

$$v_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^k b_i}, i = 1, 2, \dots, k \quad (20)$$

Součtem čísel ve jmenovateli je součtem prvních k přirozených čísel

$$\sum_{i=1}^k b_i = \frac{k(k-1)}{2} \quad (21)$$

Metoda bodovací

V této metodě se předpokládá, že je rozhodovatel schopen kvantitativně ohodnotit důležitost kritérií. Rozhodovatel musí pro zvolenou bodovací stupnici ohodnotit i -té kritérium hodnotou b_i ležící v dané stupnici (např. $b_i \in 0, 100$). S důležitostí kritéria, roste i jeho bodové ohodnocení. Rozhodovatel však může volit nejen celá čísla z dané stupnice, ale může přiřadit i stejnou hodnotu více kritériím. I přesto, že tato metoda vyžaduje od rozhodovatele kvantitativní ohodnocení kritérií umožňuje diferencovanější vyjádření subjektivních preferencí než metoda pořadí. Výpočet vah se provádí podle stejného vzorce jako u metody pořadí.

Metoda párového srovnávání kritérií

Tato metoda využívá pouze informaci, které ze dvou kritérií je při párovém srovnání důležitější. Rozhodovatel tak postupně srovnává každá dvě kritéria mezi sebou. Počet srovnání je tedy

$$N = \binom{k}{2} = \frac{k(k-1)}{2} \quad (22)$$

Tato srovnání se mohou provádět v tzv. Fullerově trojúhelníku. Kritéria se pevně očíslojí pořadovými čísly 1, 2, ..., k . Rozhodovateli se předloží trojúhelníkové schéma, jehož dvojřádky tvoří dvojice pořadových čísel, která jsou uspořádána tak, že každá dvojice kritérií se vyskytne právě jedenkrát.

Rozhodovatel zakroužkováním označí u každé dvojice u každé dvojice to kritérium, které považuje za důležitější. Počet zakroužkování i -tého kritéria se označuje n_i . Váha i -tého kritéria se vypočte podle vzorce

$$v_i = \frac{n_i}{N}, i = 1, 2, \dots, k. \quad (23)$$

Hlavní výhodou této metody je její jednoduchost na požadované informace od rozhodovatele. Také je možné po úpravách připustit i situace, že některá kritéria mají stejnou důležitost či jsou nesrovnatelná. V případě, kdy je žádoucí vyloučit nulové váhy, zvyšuje se v případě potřeby každý počet zakroužkovaných čísel o jedničku a musí se odpovídajícím způsobem zvýšit i hodnota jmenovatele ve vzorci.

Metoda kvantitativního párového srovnání kritérií

Tato metoda při vytváření párových srovnání $S = (s_{ij})$, $i, j = 1, 2, \dots, k$, často používá stupnice 1, 2, ..., 9 a reciproké hodnoty. Prvky matice s_{ij} jsou prezentovány jako odhady podílu vah i -tého a j -tého kritéria, nazývaného také jako Saatyho matice

$$s_{ij} \cong \frac{v_i}{v_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, k. \quad (24)$$

Pro prvky této matice platí:

- $s_{ii} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, k;$
- $s_{ij} = 1/s_{ji} \quad i, j = 1, 2, \dots, k.$

Všechny prvky by měly být stejného řádu, existuje i odpovídající vhodná verbální stupnice:

- 1 – rovnocenná kritéria i a j ;
- 3 – slabě preferované kritérium i před j ;
- 5 – silně preferované kritérium i před j ;
- 7 – velmi silně preferované kritérium i před j ;
- 9 – absolutně preferované kritérium i před j .

Ostatní hodnoty (2, 4, 6, 8), vyjadřují mezistupně. Prvky matice S jako odhady podílu vah nejsou většinou přesně konzistentní, tudíž neplatí $s_{hj} = s_{hi}s_{ij}$ pro všechna $h, i, j = 1, 2, \dots, k$.

V případě sestavení matice $V = (v_{ij})$, jejichž prvky by byly skutečné podíly vah, platilo by pro prvky této matice $v_{hj} = v_{hi}v_{ij}$ pro všechna $h, i, j = 1, 2, \dots, k$

$$v_{ij} = \frac{v_i}{v_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, k. \quad (25)$$

Za podmínky, že matice S se má od matice V minimálně lišit můžeme odhadnout váhy v_i . Minimální rozdílnost je možné interpretovat ve smyslu minimalizace součtu čtverců rozdílů stejnohlých prvků obou matic.

Metoda geometrického průměru

Tato metoda určuje odhady minimalizací kvadratické formy

$$F = \sum_i \sum_{j>i} (\ln s_{ij} - (\ln v_i - \ln v_j))^2 \rightarrow \min \quad (26)$$

za podmínky

$$\sum_{i=1}^k v_i = 1, v_i \geq 0. \quad (27)$$

Normalizovaný geometrický průměr řádků matice s je řešením úlohy a to takto:

$$v_i = \frac{[\prod_{j=1}^k s_{ij}]^{1/k}}{\sum_{i=1}^k [\prod_{j=1}^k s_{ij}]^{1/k}}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (28)$$

V případě splnění níže uvedeného testu, je považována matice S za uspokojivě konzistentní, kde σ^2 je odhadem rozptylu, jakožto přirozeného měřítka konzistence matice S :

$\sigma^2 < 0,1$ pro $k = 3$;

$\sigma^2 < 0,2$ pro $k = 4, 5, 6, 7$;

$\sigma^2 < 0,3$ pro $k > 7$.

Platí, že $\sigma^2 = F/d$, kde F je hodnota kvadratické formy a d je počet nezávislých srovnání minus počet lineárně nezávislých váhových parametrů a to takto:

$$d = \frac{k(k-1)}{2} - (k-1) = \frac{(k-1)(k-2)}{2} \quad (29)$$

Je možno zpřesňovat odhady za pomoci interaktivního postupu a zlepšit jejich konzistenci. Předloženy jsou rozhodovateli společně prvky matice s_{ij} a vypočtené podíly v_i/v_j k porovnání a úpravě prvků s_{ij} , na jejichž základě se vypočtou nové odhady vah.

3.2.4 Využití metod multikriteriální optimalizace ve vodárenství

Výběr lokality pro vybudování vodovodní sítě

Aplikaci multikriteriální analýzy na problém týkající se spíše rozvojových zemí popisují ve své studii Danielle C. Morais a Adiel T. Almeida [45].

Rozvojové oblasti se potýkají s otázkou, jak provést rozhodnutí, které město je nejvhodnější pro investici dostupných prostředků. K takovým oblastem patří i severovýchodní část Brazílie. Jedná se o nejchudší region, kde obyvatelé žijí na semiaridních půdách a potýkají se

se suchem. Není zde neobvyklý výskyt nemocí souvisejících s nedostatkem hygieny a čisté pitné vody. Místní úřady jsou povinny hlásit pouze výskyt cholery, tyfové horečky a hepatitidy. Další nemoci, jako jsou gastroenteritida, hlísty a infekční průjem, jsou úřady ignorovány a počet nakažených je neznámý.

Tato studie se zabývá několika městy brazilského státu Pernambuco. Pro osm okresů tohoto státu byly zpracovány plány zásobování pitnou vodou, ale realizovat lze kvůli omezeným finančním zdrojům pouze jeden z nich. Je tedy nutné vybrat okres, který v daném okamžiku potřebuje pomoc nejvíce. Jednotlivé varianty multikriteriální analýzy tvoří tedy projekty pro vybudování zásobování pitnou vodou osmi okresů státu Pernambuco: Alianca (A1), Moreno (A2), Ouricuri (A3), Pasira (A4), Pocado (A5), Porto de Galinhas (A6), Toritama (A7), Tindade (A8). Pro všechny uvedené okresy jsou již navrženy projekty včetně kalkulace nákladů na realizaci.

Na základě konzultací dotčených úřadů, organizací a zájmových skupin bylo stanoveno několik faktorů a jim odpovídajících kritérií, které považují za nejdůležitější pro ohodnocení jednotlivých alternativ:

- ekonomický faktor: **Náklady na investici (Cr1)**;
- sociální faktor: **Počet obyvatel, pro které je projekt přínosem (Cr2)**;
- environmentální faktor: **Kvalita života (Cr3)**;
- politický faktor: **Cestovní ruch v daném městě (Cr4)**.

Pro tato kritéria byl stanoven způsob, jakým budou jednotlivé varianty ohodnoceny, a následně bylo provedeno hodnocení variant podle těchto kritérií. Dále byly stanoveny váhy kritérií tak, že největší důraz je kladen na cenu projektu (váha 0,30), stejnou důležitost mají kritéria populace a cestovní ruch (váha 0,25) a nejméně preferovaným kritériem je kvalita života (0,20).

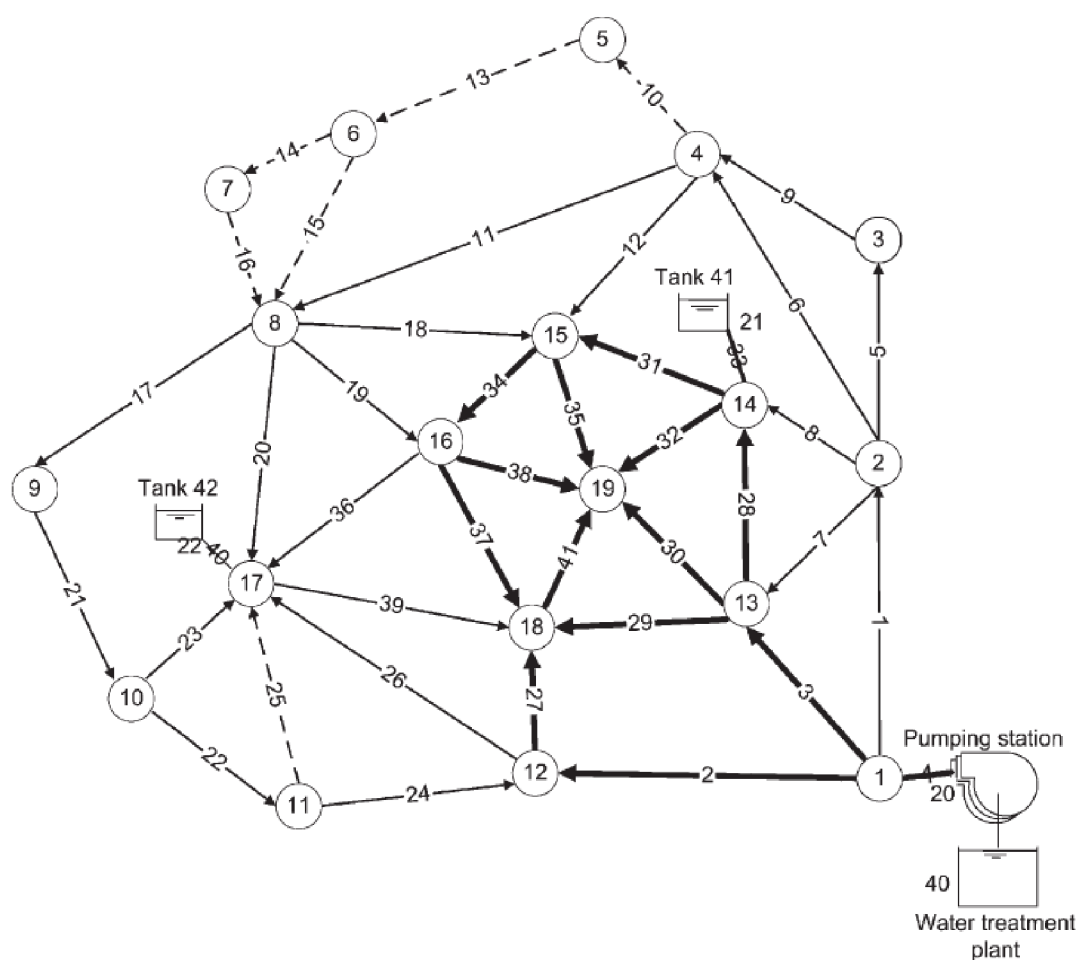
Pro řešení tohoto problému byla zvolena metoda ELECTRE I, posledním vstupem tedy bylo stanovení prahových hodnot preference a dispreference a výpočet stupňů preference a dispreference pro každou dvojici variant.

Jako nejvíce vyhovující místo pro zřízení vodovodu byla s využitím metody ELECTRE I stanovena varianta A2 Moreno. Ukázalo se, že tento postup výběru lokality pro zřízení systému zásobování pitnou vodou při omezených finančních zdrojích může být užitečný. Použití této metody namísto intuitivních úsudků činí rozhodovací proces explicitnější, racionálnější a efektivnější.

Návrh a provoz vodovodní sítě: celkové náklady versus spolehlivost versus kvalita vody

Nový přístup k návrhu rozšířené obnovy vodovodní sítě s využitím evolučních algoritmů prezentuje ve své studii Farmani et al. [46]. Samotné využití evolučních algoritmů v zásobování pitnou vodou má však již určitou historii, kterou autoři studie v krátkosti popisují. Následující odstavce velmi stručně popisují danou metodu, pro bližší seznámení je čtenář odkázán na originální dokument.

Autoři aplikovali metodu evoluční multikriteriální optimalizace pro optimální návrh a provoz vodovodní sítě hypotetického města Anytown. Vodovod Anytown sestavil Walski et al. [47] v roce 1987 jako benchmark pro srovnávání a testování síťového optimalizačního software a poprvé byl řešen v rámci workshopu Battle of the Network Models. Obrázek 3.10 představuje schéma této sítě. Cílem problému je určit ekonomicky nejefektivnější návrh posílení stávající vodovodní sítě pro zabezpečení předpokládané potřeby vody s ohledem na náklady na čerpání vody a investiční náklady.



Obrázek 3.10 Vodovodní síť hypotetického města Anytown [46]

Navržený postup pracuje s osmi proměnnými. *Průměr potrubí* jsou celočíselné hodnoty od 0 do 10, kterým jsou přiřazeny konkrétní vybrané světlosti. *Stav potrubí* nabývá také celočíselných hodnot. Hodnota 0 znamená ponechání současného potrubí, hodnota 1 značí čištění a vyvložkování, hodnota 2 zdvojení stávajícího potrubí. *Počet běžících čerpadel* může nabývat hodnot 0, 1, 2 nebo 3, což odpovídá počtu pracujících čerpadel v každé hodině. Do všech 16 uzlů, které nejsou připojeny na vodojem, je možné umístit nový vodojem. *Umístění vodojemu* je pak opět celočíselná proměnná nabývající hodnot od 1 do 16. *Průměr nádrže vodojemu* jsou reálná čísla od 25 do 100, jednotkou je stopa (1 stopa = cca 0,3 m). *Maximální hladina vodojemu* je reálná proměnná v rozmezí 200 až 250 stop. *Minimální hladina za běžného dne* může nabývat reálných hodnot od 180 do 240 stop. *Vzdálenost dna nádrže vodojemu od min. hladiny za běžného dne* nabývá hodnot od 0 do 25 stop.

Cílem úlohy je maximalizace spolehlivosti, minimalizace energetických nákladů a splnění standardů kvality vody, což zde představuje minimalizace zdržení vody v distribuční síti a ve vodojemech.

Kontrola výsledků prokázala, že tato metoda je schopna nalézt charakteristiky Pareto povrchu pro celkové náklady, stáří vody a index odolnosti systému. Výsledkem současné optimalizace problému zahrnujícího celkové náklady, kvalitu vody a spolehlivost jako účelové funkce a návrhové a provozní parametry jako proměnné je kvalitní řešení sítí. Optimalizace návrhu a provozu vodovodní sítě hypotetického města Anytown vyústila ve vodovodní síť s vysokou spolehlivostí a kvalitou vody. V porovnání s metodami, které tuto síť řešili pomocí optimalizace dvou kritérií, je tohoto zlepšení dosaženo bez dodatečných nákladů.

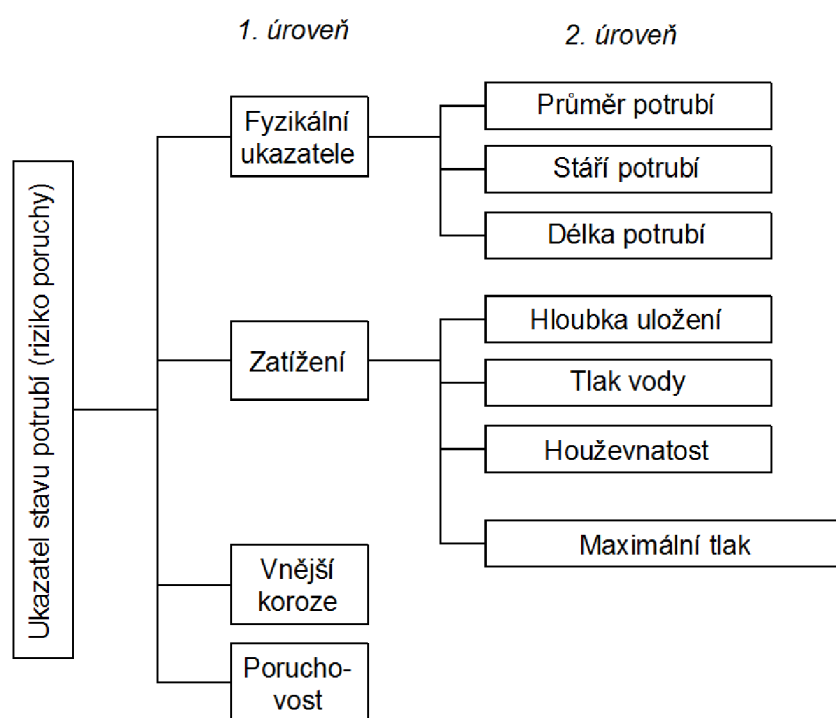
Fuzzy model hodnocení technického stavu vodovodního potrubí

Na hodnocení technického stavu vodovodů lze nahlížet jako na multikriteriální problém. Zhou [48] představuje nový model hodnocení technického stavu potrubí, využívající fuzzy PROMETHEE II.

Vznik poruch potrubí je ovlivněn řadou faktorů, např. zatížení na povrchu, trubní materiál, půdní koroze, stáří potrubí, kvalita pokládky, délka potrubí, půdní podmínky, historie poruchovosti atd. Dostupná data vodárenských společností obvykle zahrnují průměr potrubí, stáří potrubí, trubní materiál, délku potrubí a databázi poruch. Obrázek 3.11 představuje model hodnocení stavu potrubí. Dva ukazatele první úrovně jsou agregovanými ukazateli z druhé úrovně. Ukazatel vnější koroze je dán kombinací půdní koroze a odolnosti trubního materiálu vůči korozi. Váhy jednotlivých ukazatelů představují jejich relativní důležitost

vzhledem k ostatním ukazatelům. Váhy ukazatelů jsou zde generovány metodou AHP. Metodou PROMETHEE je poté provedeno úplné uspořádání variant.

Postup byl testován pouze na jednoduchém teoretickém příkladu zahrnujícím 10 trubních úseků. Výhodou uvedeného přístupu je to, že pracuje s daty, která jsou pro vodárenské společnosti obvykle dostupná. Výhodou je také, že metoda PROMETHEE vyžaduje jen minimum vstupních parametrů. Výhodou je rovněž znalost čistého toku, který je v rámci metody PROMETHEE vypočten. Na základě čistého toku lze posoudit, do jaké míry jsou varianty se sousedícím pořadím závislé na změně vah ukazatelů. Pokud sousedící varianty nemají malý rozdíl v čistém toku, není jejich ohodnocení tolik závislé na vahách.



Obrázek 3.11 Ukazatele první a druhé úrovně

Integrovaný AHP/ANN model pro hodnocení veřejných vodovodů

Komplexnější studii na předchozí téma vypracovali Al-Barqawi a Zayed [5]. Studie představuje vývoj modelu pro hodnocení technického stavu vodovodních sítí, který hodnotí udržitelnost pomocí integrace analytického hierarchického procesu (AHP) a umělých neuronových sítí (ANN).

Model zahrnuje tři hodnotící ukazatele: fyzikální, environmentální a provozní ukazatel, které mají celkem 11 dílčích ukazatelů. Tabulka 3.14 shrnuje uvažované dílčí ukazatele: trubní materiál, profil potrubí, stáří potrubí, poruchovost, Hazen-Williamsův koeficient drsnosti C, provozní tlak, katodická ochrana, hladina podzemní vody, typ půdy, typ povrchu a typ

dopravy. Relativní váhy ukazatelů a dílčích ukazatelů jsou stanoveny metodou AHP a následně je ohodnocen technický stav vodovodních řadů a vložen do ANN za účelem předpovídání budoucího stavu vodovodních řadů a vytvoření křivek úpadku.

Důvody pro vytvoření modelu využívajícího integraci analytického hierarchického procesu a umělých neuronových sítí jsou následující:

- metoda AHP počítá pouze současný stav potrubí s ohledem na přiřazené ukazatele bez jakékoliv analýzy;
- metoda AHP není schopna pracovat s nekompletními či chybějícími datovými body;
- po ohodnocení stavu metodou AHP je trénována ANN na dostupném souboru dat, což řeší nekompletní či chybějící data pomocí schopnosti ANN rozpoznávání vzorů;
- ANN je použita pro modelování tendencí a zhoršování stavu vodovodních řadů;
- ANN je flexibilní v přidávání nových datových bodů a zdokonalení analýzy dat.

Tabulka 3.14 Popis uvažovaných dílčích ukazatelů [5]

Číslo ukazatele	Ukazatel	Popis
1	Půdní typ	Jíl, písek, bahno, drcené kamenivo, atd.
2	Typ dopravy/komunikace	Průměrný denní provoz je vysoký, střední nebo nízký; typ komunikace je místní, primární, sekundární nebo dálnice
3	Typ zásobování	Zásobování obytných, komerčních, průmyslových oblastí, nebo přiváděcí řad
4	Hladina podzemní vody	Hladina podzemní vody je hodnocena jako vysoká, střední, nebo nízká
5	Průměr potrubí	Vnitřní průměr potrubí
6	Trubní materiál	Např. šedá litina, tvárná litina, ocel, azbestocement, PVC
7	Stáří potrubí	Stáří uloženého potrubí
8	Poruchovost	Počet poruch na km potrubí za rok
9	C faktor	Hazen-Williamsův koeficient drsnosti C
10	Katodická ochrana	Katodická ochrana je aplikována či není
11	Provozní tlak	Provozní pracovní tlak

Obě použité techniky (jak AHP, tak ANN) jsou nezbytné pro cíle prezentovaného výzkumu: metoda AHP kvantifikuje vliv subjektivních ukazatelů za účelem ohodnocení stavu vodovodních řadů, ANN jsou schopny rozpoznávat vzory, analyzovat data a generovat modely zhoršování stavu hodnocených řadů.

Na základě vyvinutého integrovaného AHP/ANN modelu byla provedena citlivostní analýza, aby byla otestována citlivost modelu na změny vstupních dat. Tato citlivostní analýza generuje výkonnostní modely a křivky. Tyto křivky ukazují na polynomickou závislost třetího stupně mezi ohodnocením technického stavu a stářím potrubí. Tabulka 3.15 stanovuje doporučené akce odpovídající výslednému ohodnocení.

Tabulka 3.15 Číselné a slovní hodnocení technického stavu vodovodních řadů [5]

Ohodnocení	Slovní hodnocení	Kritéria	Akce
9 - 10	Výborný	Nové či nedávno instalované.	Není vyžadována žádná akce.
8 - 9	Velmi dobrý	Nový stav bez známek koroze či opotřebení.	Znovu posoudit za 15 let.
6 - 8	Dobrý	Vnitřní a vnější ochrana neporušená. Zbývající tloušťka stěny více než 90 % původní tloušťky.	Znovu posoudit za 10 let. Zařadit do programu katodické ochrany během příštích 5 – 10 let.
4 - 6	Průměrný	Zaznamenáno poškození vnější a/nebo vnitřní ochrany. Zbývající tloušťka stěny více než 75 % původní.	Znovu posoudit za 3 - 5 let. Naplánovat vyvločkování a sanaci během příštích 5 – 10 let.
3 - 4	Špatný	Významné známky vnitřní nebo vnější koroze. Nevyhnutelný kolaps. Chybějící vnitřní nebo vnější ochrana. Úniky vody. Zbývající tloušťka stěny 50 - 75 % původní.	Naplánovat sanaci nebo obnovu během příštích 3 – 5 let.
0 - 3	Kritický	Silná vnější nebo vnitřní koroze. Evidentní kolaps. Velké trhliny, díry. Zbývající tloušťka stěny < 50 % původní tloušťky. Poruchovost > 3 pp/km/rok během posledních 5 let.	Okamžitá oprava nebo obnova.

Prezentovaný integrovaný AHP/ANN model může být využit pro prioritizaci sanace vodovodních řadů. Výsledky ukázaly, že největší vliv na ohodnocení technického stavu má stáří vodovodního řadu, následováno druhem trubního materiálu a poruchovostí. Naopak nejmenší vliv na výsledné ohodnocení měl typ zásobování. Na základě vyvinutého AHP/ANN modelu byla vytvořena internetová aplikace CR-Predictor pro hodnocení technického stavu vodovodů. Uvedený model a aplikace umožňují snížit vynaložené prostředky a čas na inspekci stávajících vodovodních řadů. Přestože neeliminují zcela vliv subjektivního úsudku, jsou tyto nástroje komplexnější než předcházející predikční metody.

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. Cílem bylo zjistit, do jaké míry se široké spektrum provozních společností věnuje plánování obnovy a hodnocení technického stavu vodovodních sítí a jaké k tomuto účelu používá metody. Přestože obnova vodovodů dle zákona č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích spadá do kompetencí vlastníka vodovodu, byl předpoklad, že provozovatel má lepší přístup k potřebným informacím a že uvedené činnosti provádí v pověření vlastníka vodovodu, např. na základě provozní smlouvy. Dotazník obsahoval celkem 13 otázek. První čtyři otázky byly zaměřeny na běžnou firemní praxi týkající se plánování obnovy vodovodů. Další otázky pak byly věnovány hodnocení technického stavu vodovodů. Tabulka 3.16 představuje soubor otázek a možných odpovědí provedeného dotazníkového šetření. Dotazník byl rozeslán odpovědným pracovníkům 50 provozních společností vodovodů a kanalizací, které byly uvedeny na seznamu prvních 50 provozovatelů podle množství fakturované vody v roce 2010 [49]. Těchto 50 provozovatelů představovalo 90 % dodávky celkového množství fakturované vody v ČR [49].

Tabulka 3.16 Obsah provedeného dotazníkového výzkumu

Otázka	Možné odpovědi
1. Plány obnovy vodovodů jsou ve vaší společnosti zpracovávány:	<input type="checkbox"/> pro vlastníka vodárenské infrastruktury; <input type="checkbox"/> pro vlastní potřebu; <input type="checkbox"/> jiné: _____ .
2. Je ve vaší společnosti oddělení/pracovník zabývající se plánováním obnovy vodovodních sítí?	<input type="checkbox"/> Ano a zabývá se pouze touto činností. <input type="checkbox"/> Ano a zabývá se i jinými činnostmi. <input type="checkbox"/> Ne.
3. Pro vodovodní síť vaší společnosti jsou zpracovávány:	<input type="checkbox"/> plány financování obnovy dle zákona o vodovodech a kanalizacích; <input type="checkbox"/> dlouhodobé plány obnovy (na 10 – 20 let); <input type="checkbox"/> střednědobé plány obnovy (na 3 – 5 let); <input type="checkbox"/> krátkodobé plány obnovy (roční plány).
4. Plán obnovy je vhodné založit na vyhodnocení technického stavu vodovodní sítě. Provádíte hodnocení technického stavu jednotlivých prvků vodovodních sítí?	<input type="checkbox"/> Ano. <input type="checkbox"/> Ne (dotazník dále nevyplňujte).
5. Jak často provádíte vyhodnocení technického stavu vodovodů?	<input type="checkbox"/> 1x za 10 a více let. <input type="checkbox"/> 1x za 5 -10 let. <input type="checkbox"/> 1x za 1- 5 let. <input type="checkbox"/> 1x za rok. <input type="checkbox"/> Jiné: _____ .
6. Používá vaše společnost interní metodiku hodnocení technického stavu vodovodů?	<input type="checkbox"/> Ano. <input type="checkbox"/> Ne. Využíváme metodiku, software či služby jiné společnosti. Uveďte, prosím, o co se jedná: ____ ____ .

7. Používaná metodika je založena na principu:	<input type="checkbox"/> bodové hodnocení; <input type="checkbox"/> multikriteriální hodnocení; <input type="checkbox"/> jiné:_____ .
8. Jaká používáte hodnotící kritéria pro jímací objekty?	<input type="checkbox"/> Uved'te.
9. Jaká používáte hodnotící kritéria pro úpravny vody?	<input type="checkbox"/> Uved'te.
10. Jaká používáte hodnotící kritéria pro čerpací stanice?	<input type="checkbox"/> Uved'te.
11. Jaká používáte hodnotící kritéria pro vodojemy?	<input type="checkbox"/> Uved'te.
12. Jaká používáte hodnotící kritéria pro příváděcí řady?	<input type="checkbox"/> Uved'te.
13. Jaká používáte hodnotící kritéria pro rozvodné sítě?	<input type="checkbox"/> Uved'te.

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.

Ukázalo se, že 59 % provozovatelů zpracovává plány obnovy pro vlastníka vodovodu, přibližně 30 % pro vlastní potřebu a zbývajících 11 % pro vlastní potřebu i pro vlastníka.

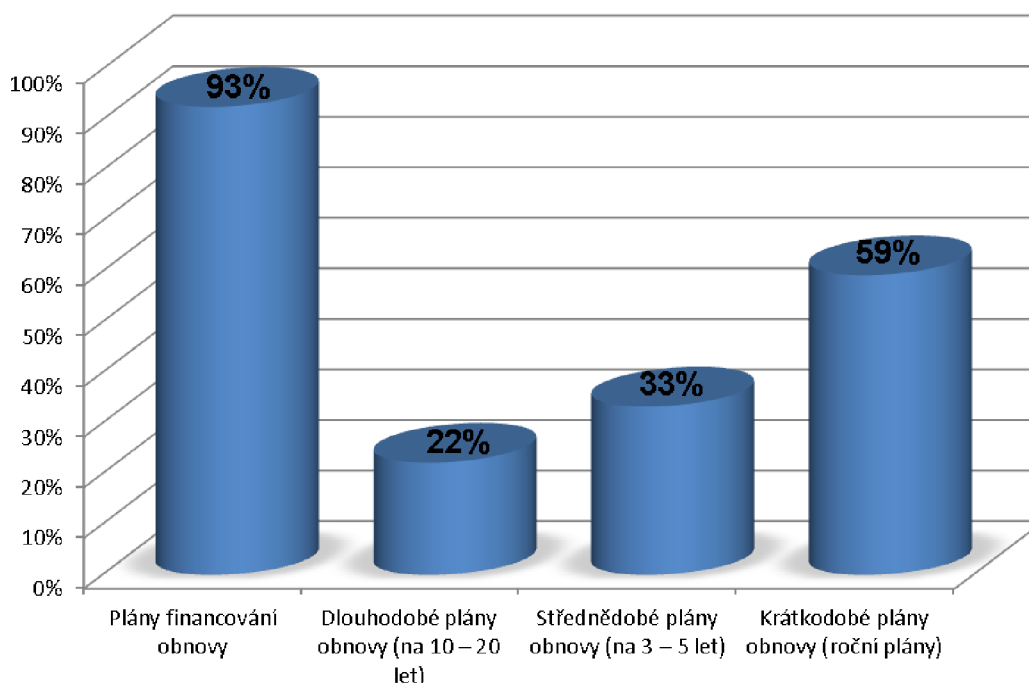


Obrázek 3.12 Účel zpracování plánů obnovy dle dotazníkového šetření

V otázce vyčlenění zvláštního pracovníka zaměřeného na plánování obnovy vodovodních sítí téměř 93 % provozovatelů uvádí, že takového pracovníka má, ale jeho náplň práce tvoří i jiné činnosti. Zbývajících 7 % nemá žádného pracovníka zabývajícího se plánováním obnovy vodovodů.

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

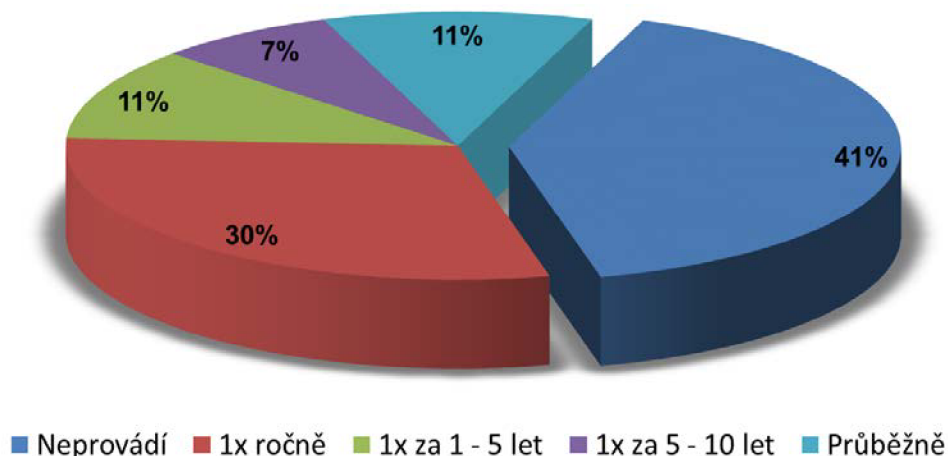
a jen 22 % společností má stanovené dlouhodobé koncepce obnovy v podobě dlouhodobých plánů obnovy. Obrázek 3.13 zachycuje v grafu jaký podíl dotázaných společností má zpracovány jednotlivé plány obnovy. Otázka měla více možných odpovědí, proto je součet větší než 100 %.



Obrázek 3.13 Procento společností, které mají zpracovány jednotlivé plány obnovy

Zajímavé je, že plány financování obnovy se dle zákona č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích zpracovávají nejméně na dobu 10 kalendářních let [1] a přitom pouze 22 % společností má zpracovány dlouhodobé plány obnovy vodovodů. Nabízí se otázka, na jak kvalitním základě mohou být postaveny plány financování obnovy zbývajících 78 % provozovatelů.

Více než polovina dotázaných provozovatelů (59 %) provádí hodnocení technického stavu vodovodů. 30 % provozovatelů pak provádí hodnocení každoročně, 11 % jednou za 1 až 5 let, 7 % jednou za 5 až 10 let a 11 % uvedlo, že provádí hodnocení průběžně dle potřeby. Obrázek 3.14 představuje četnost provádění hodnocení technického stavu u respondentů.



Obrázek 3.14 Četnost provádění hodnocení technického stavu vodovodů dle dotazníkového šetření

Ze společností, které provádějí hodnocení technického stavu, využívají téměř všechny společnosti vlastní interní metodiku, která je založena na principu multikriteriálního hodnocení. Množství ukazatelů hodnocení technického stavu používaných dotázanými vodárenskými společnostmi pro hodnocení jednotlivých prvků systémů zásobování pitnou vodou se liší. Jako ukazatele hodnocení technického stavu **jímacích objektů** surové vody dotázaní uvádějí následující ukazatele:

- technický stav stavebních konstrukcí;
- technický stav technologických součástí;
- stáří;
- životnost;
- poruchovost;
- vydatnost;
- znečištění;
- BOZP.

Pro hodnocení technického stavu **úpraven vody** respondenti uvádí ukazatele:

- technický stav stavebních konstrukcí;
- technický stav technologických součástí;
- stáří;
- BOZP;
- legislativní stav;
- účinnost úpravy;
- kapacita;
- kvalita upravované vody;
- poruchovost;
- technologická dostatečnost.

Hodnocení technického stavu **čerpacích stanic** provádí dotázaní na základě ukazatelů:

- technický stav stavebních konstrukcí;
- technický stav technologických součástí;
- stáří;
- spotřeba energií;
- poruchovost.

Hodnocení **vodojemů** respondenti zakládají na některých ze souhrnu ukazatelů:

- technický stav stavebních konstrukcí;
- technický stav technologických součástí;
- stáří;
- kapacita akumulace;
- pevnost povrchu ve styku s vodou;
- kvalita vody;
- vodotěsnost.

A dále pro hodnocení **přiváděcích řadů** uvádějí ukazatele:

- poruchovost;
- stáří;
- kvalita vody;
- poloha;
- trubní materiál;
- ztráty;
- inkrusty;
- armatury;
- tlakové poměry;
- dopravní zatížení;
- důležitost;
- doba dožití;
- vliv hladiny podzemní vody;
- trubní spoje;
- obtížnost provádění oprav;
- koroze.

Víceméně shodné ukazatele uvádí také pro hodnocení technického stavu **zásobovacích řadů**:

- stáří;
- trubní materiál;
- spoje trub;
- poruchovost;
- kvalita vody;
- armatury;
- inkrusty;
- dimenze;
- tlakové poměry;
- počet zásobovaných obyvatel;
- vliv hladiny podzemní vody;
- koordinace s obnovou ostatních inženýrských sítí v ulici;
- úniky vody;
- významnost;
- opravní zatížení;
- ztráty vody.

Provedený dotazníkový průzkum mezi 50 největšími vodárenskými společnostmi potvrdil, že různé společnosti přistupují k plánování obnovy a hodnocení technického stavu odlišně. Některé společnosti nemají kromě povinných plánů financování obnovy zpracovány žádné další plány obnovy vodovodů. Jiné naopak zpracovávají dlouhodobé, střednědobé i krátkodobé plány obnovy vodovodů. Rovněž v míře hodnocení technického stavu jsou značné rozdíly mezi jednotlivými společnostmi. Celých 41 % společností technický stav nevyhodnocuje vůbec, u zbývajících společností se liší množství používaných ukazatelů technického stavu. Lze tedy říct, že vodárenskými společnostmi je praktikováno hodnocení

technického stavu v extrémech od žádného hodnocení technického stavu až po propracované metodiky hodnocení technického stavu.

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). Metodiku prezentoval na semináři „Nástroje pro podporu provozování a investiční výstavby vodovodů“ v Praze dne 26. 3. 2013 Ing. Dušan Trtil z PVS [50].

SIP definuje pro střednědobý horizont 5 let věcné a finanční potřeby na rekonstrukce a dostavbu jednotlivých systémů vodohospodářské infrastruktury ve správě PVS. Ze SIP vycházejí roční investiční plány (RIP) s přihlédnutím k aktuálnímu stavu potřeb a momentální naléhavosti požadavků. Návrhy na vklad do SIP se následně posuzují a v případě obnovy vodovodní sítě se provádí hodnocení stavu úseku vodovodního řadu.

Úsek vodovodního řadu 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. Tabulka 3.17 a Tabulka 3.18 zobrazují ukázkou vyplněného hodnotícího formuláře vodovodního řadu na ulici Londýnská v Praze.

Tabulka 3.17 Hodnocení stavu úseku vodovodního řadu - část 1 [50]

Pražské vodovody a kanalizace, a.s.				B		
Zásobní systém						
<u>Hodnocení stavu úseku vodovodního řadu</u>						
podle poruchovosti, úniků, stáří a koroze						
Podklad pro plánování investic			Nedostatek			
Koordinační vazba s			kapacity			
TSK hl. m. Prahy			tlaku			
			ano ne ano ne			
Evidenční údaje :						
Druh vodovodního řadu		Evid. číslo hodnocení		01/017/10		
		Stupeň priority		2		
Hlavní řad (přítok do pásma)		Číslo zásobního pásma		144		
Rozváděcí řad		Název zásobního pásma		ČS Flora pro Vinohrady a Žižkov		
Identifikační údaje vodovodního řadu :						
Městská část	P2, Vinohrady		Délka úseku [m]	123		
Název ulice	Londýnská		Dimenze DN [mm]	125		
Vlastník	HMP		Materiál	litina		
Kriteria ovlivňující zařazení akce do plánu						
položka č.	Hodnocený ukazatel			Body	Vážené body	Zdroj informace
1	Poruchy	váha 20	Celkový počet poruch s únikem vody na 1 km sítě za 1 rok ve sledovaném období (5 let).			Centr. dispeč.
			10 a více	10		
			4 až 9	7		
			1 až 3	3	60	
			bez poruch	0		
2	Armatury	váha 10	Celkový počet nefunkčních armatur na 1 km délky sítě ke dni zpracování			Provoz sítě
			31 a více	10		
			21 až 30	7	70	
			11 až 20	3		
			0 až 10	0		
3	Únik vody	váha 20	Průměr. únik vody v zásob. pásmu nebo distriktu na km skut.délky v posledním roce [l/sec]			Útvar podpory výroby
			více než 0,5	10		
			0,41 - 0,5	7		
			0,26 - 0,4	5	100	
			0,11 - 0,25	2		
			0 - 0,1	0		

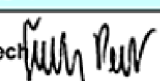
Tabulka 3.18 Hodnocení stavu úseku vodovodního řádu - část 2 [50]

4	Inkrustace potrubí (podle výřezu)	váha 5	Stupeň inkrustace potrubí		Provoz sítě	
			Inkrustace přesahuje 40% DN	10		
			Inkrustace přesahuje 30% DN	8	40	
			Inkrustace přesahuje 20% DN	6		
			Počínající inkrustace do 10% DN	3		
			Potrubí bez inkrustace	0		
5	Koroze potrubí	váha 5	Koroze jako příčina poruchy >50% počtu poruch	10	50	Centr. dispeč.
			Koroze jako příčina poruchy 25 - 50% počtu poruch	5		
			Koroze jako příčina poruchy <25% počtu poruch	0		
6	Stáří vodovodu z litinových trub	váha 20	nad 80 let	10	200	Odd. techn. dokum.
			61 - 80 let	6		
			41 - 60 let	4		
			21 - 40 let	2		
			do 20 let	0		
7	Distribuční význam	váha 10	Řad DN >400 mm	10		Provoz sítě
			Řad DN 200 - 400 mm	7		
			Řad DN <200 mm	3	30	
			Připojky	0		
8	Obtížnost provádění oprav	váha 10	Řad uložen v tramvajovém tělese	10		Provoz sítě
			Krytí potrubí větší jak 3 m	10		
			Atypický DN potrubí	10		
			Obtížné prostorové uspořádání inženýrských sítí	10		
			Obtížně přístupný terén	10		
			Majetkové poměry k pozemku komplikují opravy	10		
			Nezokruhovaná síť - vyřazení celého řádu při opravě	10		
Váhy celkem		100	Vážené body celkem		550	
Dosažitelný počet vážených bodů :					1 000	

Koordinační vazby na stavby jiných investorů a správců :

Koordinace se stavbou TSK	<input checked="" type="checkbox"/>	TÚ
Koordinace se stavbou OMI	<input type="checkbox"/>	
Koordinace se stavbou IDS	<input type="checkbox"/>	
Koordinace se stavbou ostatních cizích investorů	<input type="checkbox"/>	
Koordinace v rámci sdružení investorů	<input type="checkbox"/>	
Koordinace s kanalizační stavbou	<input type="checkbox"/>	
Název koordinační stavby : stavba TSK HI. m. Prahy - Londýnská, č.akce 681		

Případná zvýšená poruchovost přípojek vody bude navrhovatelem komentována v poznámce.

Org. jednotka :	Datum :	Počet příloh :	Jméno, podpis :
Provoz Sítě - oblast 1	15.10.2010	0	Bc. Petr Čech 

Poznámka : V rámci obnovy vodovodního řádu je žádoucí obnovit rovněž veřejné části vodovodních přípojek.

3.4 SHRnutí

Stárnutí vodárenské infrastruktury je celosvětovým problémem. Poznání technického stavu vodovodů je klíčové pro predikci výkonnosti vodovodů a optimalizaci údržby a obnovy. V běžné praxi se často používá pouze praktických zkušeností k posouzení stavu vodovodů, protože neexistuje žádná standardizovaná hodnotící stupnice, kterou lze použít k měření technického stavu vodovodů a jejich jednotlivých částí.

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.

V České republice je značné množství drobných vlastníků a provozovatelů vodovodů a kanalizací. Dle údajů majetkové evidence bylo v ČR v roce 2014 6270 vlastníků a 2571 provozovatelů vodárenské infrastruktury [3]. Přitom pouhých 50 provozovatelů dodává 90 % fakturované pitné vody [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.

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. Některé společnosti nemají kromě povinných plánů financování obnovy zpracovány žádné další plány obnovy vodovodů. Jiné naopak zpracovávají dlouhodobé, střednědobé i krátkodobé plány obnovy vodovodů. Rovněž v hodnocení technického stavu jsou značné rozdíly mezi jednotlivými společnostmi. 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. Lze tedy říct, že vodárenskými společnostmi je praktikováno hodnocení technického stavu v extrémech od neprovádění hodnocení technického stavu až po pokročilé metodiky hodnocení 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

V případě hodnocení technického stavu prvků veřejných vodovodů, se jedná o multikriteriální hodnocení variant. Nesnažíme se však o hledání jediné optimální varianty (prvku), ale o kvantifikaci technického stavu všech prvků. Na základě analýzy současných poznatků v oblasti hodnocení technického stavu byla po konzultacích se školitelem zvolena metoda multikriteriálního hodnocení s využitím metody relativních vah a váženého součtu.

Navržená metodika hodnocení technického stavu vychází z nejběžnější metody – metody váženého součtu. Jiné metody mohou sice poskytnout lepší výsledky, nicméně vzhledem k určité subjektivitě a nejistotě hodnocených dat nemusí být tento přínos zásadně významný.

Stanovení vah bylo prozatím provedeno odborným odhadem. Lze uvažovat případně o využití sofistikovanějších metod stanovení vah, např. stanovení vah na základě dat od více odborníků s využitím procesu AHP, obdobně jako Al-Barqawi a Zayed [5]. Navrženou metodiku otestoval pomocí citlivostní analýzy Sucháček [51]. Závěry z tohoto testování jsou uvedeny v kapitole 4.1.4.

4.1 JEDNOTNÁ METODIKA HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU VODOVODŮ

Navržená metodika je metodou nepřímého hodnocení technického stavu na základě navržených ukazatelů. Jedná se o screeningový nástroj, určený k předběžnému posouzení technického stavu. Je uvažována jako součást asset managementu (správy majetku), jako jeden z jeho pomocných nástrojů.

4.1.1 Popis navržené metodiky

Navržená metodika vychází z metodiky zpracované na Ústavu vodního hospodářství obcí, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně, publikované Tuhovčák et al. [19]. Návrh jednotného konceptu metodiky hodnocení technického stavu prvků vodovodů byl proveden úpravou a rozšířením této metodiky tak, aby byla jednotná metodika univerzálně použitelná pro všechny typy vodárenských objektů.

Metodika, kterou prezentuje Tuhovčák et al. [19], využívala metodu FMEA. 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. Na základě hodnot technických ukazatelů je provedeno zařazení posuzovaných prvků sítě do jednotlivých kategorií. Tuhovčák et al. [19] uvádí následující kategorie:

- **K1 (velmi dobrá)** – optimální stav příslušného ukazatele, nevyžaduje žádná opatření vedoucí ke změnám hodnot tohoto ukazatele;
- **K2 (dobrá)** – nízká míra rizika příslušného TU a rovněž nevyžaduje žádná zásadní opatření;
- **K3 (průměrná)** – jedná se o průměrné hodnoty příslušného TU, které nevyžadují okamžitá řešení;
- **K4 (kritická)** – kritické hodnoty příslušného ukazatele. Měla by být realizována případně plánována opatření na řešení tohoto stavu;
- **K5 (nevyhovující)** – nežádoucí stav, který vyžaduje dle možnosti provozovatele okamžité řešení, které povede k dosažení lepších hodnot příslušného ukazatele.

Ohodnocení daného prvku podle určitého technického ukazatele je provedeno na základě tabelovaných mezí jednotlivých ukazatelů. Pro každý jednotlivý ukazatel je navržena tabulka s vymezením mezí jednotlivých kategorií. Je možné také stanovit souhrnné hodnocení (TS) technického stavu daného prvku na základě váženého součtu dle vztahu

$$TS = \sum_{i=1}^n TU_i W_i \quad (30)$$

kde

n je celkový počet použitých ukazatelů;

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

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

Navržená jednotná metodika přebírá koncept multikriteriálního hodnocení na základě ukazatelů agregovaných metodou váženého součtu do výsledného hodnocení v podobě zařazení objektu do jedné z pěti kategorií technického stavu. Uvedený přístup byl rozšířen o další 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:

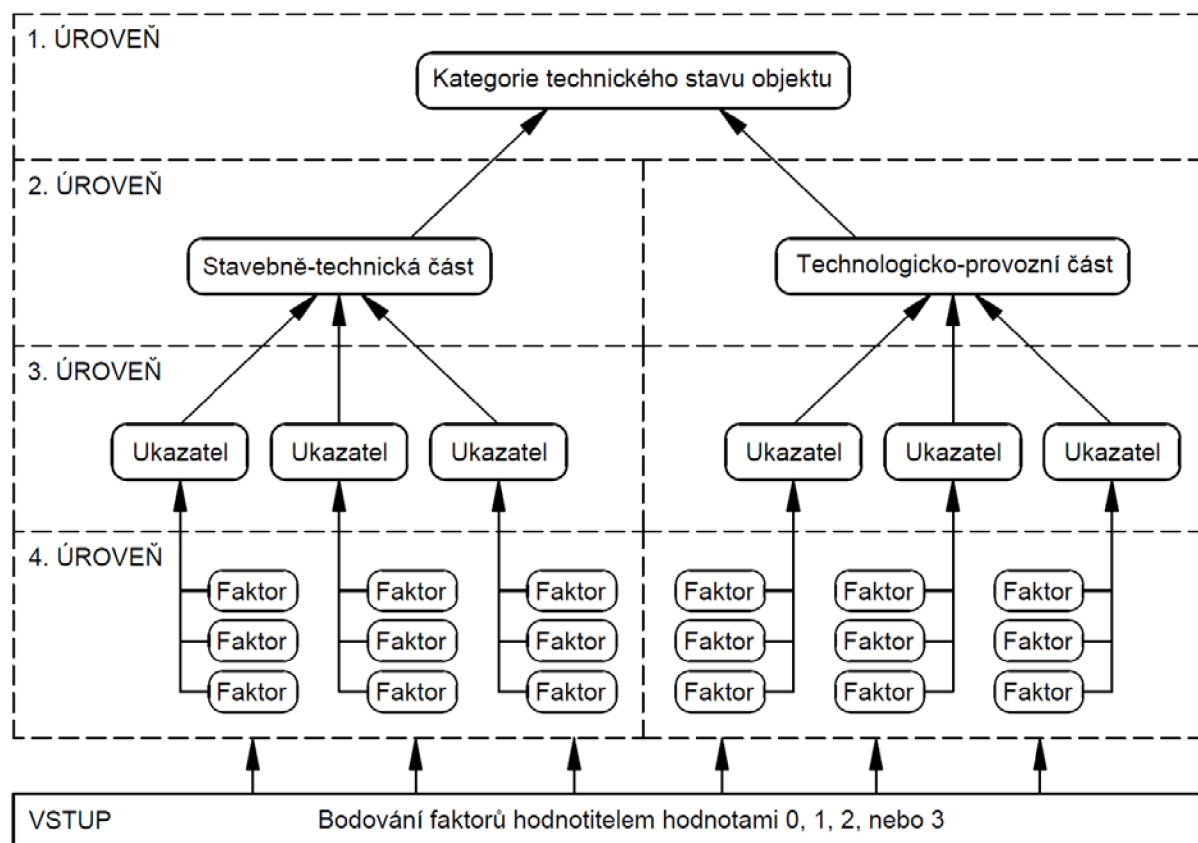
- **1. úroveň – Výsledné hodnocení:** Agregací obou částí objektu je vypočtena výsledná kategorie technického stavu objektu.
- **2. úroveň – Části objektu:** Některé vodárenské objekty se vyznačují značnou komplexností (např. vodojemy nebo čerpací stanice). Z charakteristiky těchto objektů plyne logické 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. Pro každý faktor je navržena hodnotící tabulka. Dle hodnoty, kterou faktor nabývá, přiřadí uživatel bodové hodnocení faktoru 1, 2, nebo 3. Pokud není faktor hodnocen (např. pokud není dostatek informací, nebo se u daného objektu nevyskytuje) 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.

Výsledkem hodnocení je zařazení ukazatelů, částí objektu a celkově celého objektu do kategorie technického stavu A, B, C, D, nebo E. Výstupní informace navržené metodiky je blíže specifikována v kapitole 4.1.5.

Doporučený postup hodnocení technického stavu objektů vodovodních systému podle navržené metodiky je následující:

1. volba objektu k posouzení;
2. shromáždění informací a dat pro stanovení či výpočet hodnot faktorů;
3. obodování faktorů dle hodnotících tabulek na základě hodnot, které nabývají;
4. výpočet kategorií technického stavu jednotlivých ukazatelů, následně částí objektu a nakonec výpočet celkové kategorie technického stavu celého objektu;
5. návrh případných opatření, zařazení do plánu obnovy;
6. stanovení termínu příštího posouzení.



Obrázek 4.1 Navržená struktura metodiky

4.1.2 Výpočetní algoritmus metodiky

Navržená jednotná metodika hodnocení technického stavu prvků veřejných vodovodů je multikriteriálním hodnocením variant. Jelikož známe předem stanovené váhy jednotlivých kritérií (faktorů), jedná se o multikriteriální hodnocení variant s kardinální informací o preferenci kritérií.

Řešení tohoto problému lze provést pomocí metod založených na výpočtu hodnotu funkce užitku. Maximalizace užitku předpokládá možnost vyčíslení užitku, který každá varianta přináší na škále od 0 do 1. Celkový užitek zde představuje hodnotu agregovaného kritéria, podle kterého dojde k seřazení variant. Před stanovením celkového užitku, který realizace varianty přinese, je nejprve však nutné stanovit pro každé kritérium dílčí funkce užitku. Navržená metodika využívá nejběžnější funkci užitku – metodu váženého součtu. Jak uvádí Fiala [33], metoda váženého součtu vychází z principu maximalizace užitku s tím zjednodušením, že předpokládá pouze lineární funkci užitku. Pokud použijeme aditivní tvar funkce užitku, užitek varianty a_i je roven

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^n v_j r_{ij} \quad (31)$$

Varianty seřadíme sestupně podle hodnot $u(a_i)$ a potřebný počet variant s nejvyššími hodnotami užítka považujeme za řešení problému.

Jiné metody mohou sice poskytnout lepší výsledky, nicméně vzhledem k určité subjektivitě a nejistotě hodnocených dat nemusí být tento přínos zásadně významný.

Hodnocení jednotlivých 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. Každý jednotlivý faktor má navrženou svou vlastní hodnotící stupnici. Tyto stupnice jsou prezentovány níže v rámci jednotlivých modulů metodiky v kapitole 4.2.

- **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

$$S_{in} = \frac{\sum_{j=1}^r F_{inj} W_{inj}}{\sum_{j=1}^r W_{inj}} \quad (32)$$

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. Části prvku, které této hodnoty nedosáhnout nejsou hodnoceny. 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 jednotlivé části prvku. Hodnota skóre části S_i se vypočte ze skóre příslušných technických ukazatelů

$$S_i = \frac{\sum_{n=1}^p (S_{in} W_{in})}{\sum_{j=1}^p W_{in}}, \quad (33)$$

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 hodnoceného prvku ze skóre dílčích částí tohoto prvku. Všechny tyto části mají přiřazenu váhu v rozmezí 0 až 1. Součet vah všech částí prvku je roven 1. Posoudí se, zda má prvek ohodnoceny části tak, aby součet vah byl minimálně 0,5. Prvky, které této hodnoty nedosáhnout, nejsou hodnoceny a přiřadí se jim kategorie N. Výsledné skóre S_c se vypočte dle vztahu

$$S_c = \frac{\sum_{i=S}^T S_i W_i}{\sum_{i=S}^T W_i} \quad (34)$$

kde:

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

W_i je váha části;

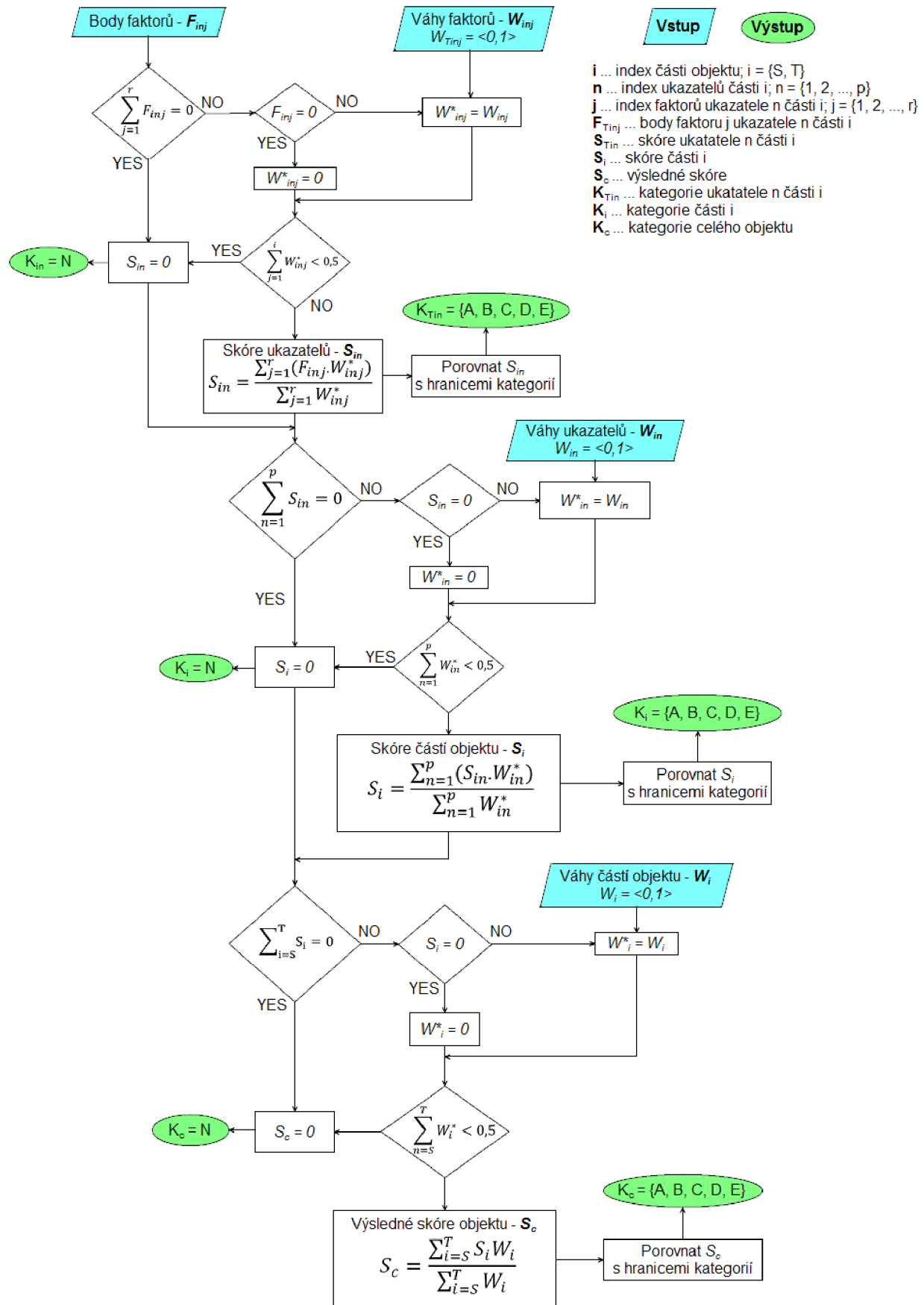
S_i je skóre dílčí části.

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.

Obrázek 4.2 představuje výpočetní algoritmus navržené jednotné metodiky hodnocení technického stavu.

Algoritmus výpočtu

Legenda:



Obrázek 4.2 Algoritmus výpočtu hodnocení

4.1.3 Technické ukazatele a faktory

Hodnocení technického stavu pomocí navržené metodiky je založeno na technických faktorech. Většina navržených faktorů jsou tzv. dedukčními faktory, tzn. že se u nich předpokládá vliv na deterioraci vodovodů. Kromě dedukčních faktorů se navrhuje i faktory provozní, neboť samotný provoz může ovlivňovat technický stav objektu a naopak.

Pojem ukazatel má v rámci navržené metodiky pouze funkci kategorie faktorů a jeho hodnocení se vypočítává z bodových hodnot faktorů, přidělených hodnotitelem. Ukazatele tedy nejsou bodovány hodnotitelem přímo.

Obecně lze navrhnout libovolný počet ukazatelů a faktorů. Návrh záleží na účelu hodnocení technického stavu. Účelem navržené metodiky je vytvořit pomocný podklad pro plánování obnovy vodovodů a dále také sběr informací o hodnocených objektech v takové míře, aby bylo zřejmé, která část objektu je problémová a na co se zaměřit při případném následném podrobném stavebnětechnickém průzkumu objektu.

Faktory jednotlivých modulů byly navrženy dle doporučených skupin publikovaných v literatuře, viz kapitolu 3.1.2.

Pro každý faktor je třeba definovat způsoby jeho stanovení, vstupní data, fyzikální rozměr a způsob prezentace. Struktura ukazatelů a faktorů navržená v rámci metodiky je prezentována u jednotlivých modulů v kapitole 4.2.

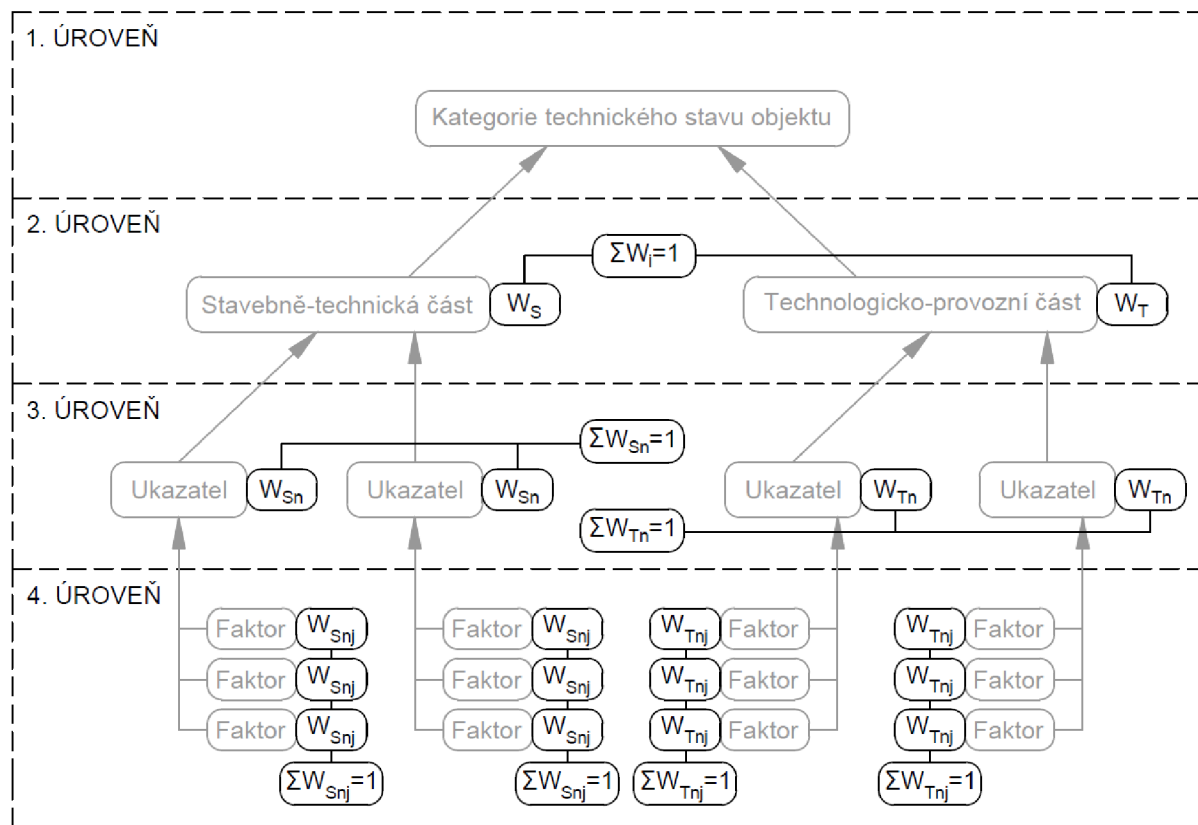
4.1.4 Stanovení relativních vah částí, ukazatelů a faktorů

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. Obrázek 4.3 představuje využití principu relativních vah v rámci navržené metodiky. Součet vah faktorů jednoho ukazatele musí být roven 1,0. Stejně součet vah ukazatelů jedné části musí být roven 1,0. A dále součet vah obou částí musí být roven 1,0.

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. Navržené hodnoty relativních vah jsou prezentovány v rámci jednotlivých modulů metodiky v kapitole 4.2. Během testování navržené metodiky bylo zjištěno, že multikriteriální hodnocení technického stavu je značně závislé na nastavení

relativních vah. Vzhledem k omezenému rozsahu disertační práce bylo podrobné řešení problematiky nastavení hodnot vah ponecháno k dalšímu výzkumu.

Váhy si také může nastavit každý uživatel metodiky dle svého uvážení. Poté však nejsou výsledky dosažené při různém nastavení vah vzájemně srovnatelné.



Obrázek 4.3 Schéma využití vah v navržené metodice

4.1.5 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 [19], Marlow [2], Al-Barqawi a Zayed [4].

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 příštích 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.

Samotná výsledná kategorie technického stavu hodnoceného objektu nepředstavuje dostatečnou informaci pro rozhodování. Známkovací (kategorizační) hodnocení bylo navrženo jako screeningový nástroj a pro podporu rozhodování a prioritizace je tedy třeba dalších informací, jako jsou analýzy rizik, nákladů a provozních souvislostí [16]. V praxi se stává, že k rozhodování jsou použita samotná známková hodnocení, přičemž toto hodnocení má být teprve prvním krokem komplexního hodnocení [16]. Použití známkovacích systémů nad jejich původní zamýšlené využití jako počátečního screeningového nástroje by mohlo být pochopitelné vzhledem k úsilí vynaloženému k jejich návrhu a aplikaci, ale je třeba zvážit dopady tohoto postupu [16].

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.

Dle současné legislativy je vyžadováno při zpracování plánů financování obnovy uvádět procento opotřebenosti vodárenského majetku. Procento opotřebenosti majetku by mohlo být stanoveno pomocí této navržené metodiky hodnocení technického stavu. Stačí každé kategorii technického stavu *A, B, C, D, E* přiřadit určitou hodnotu procenta opotřebenosti. Nicméně by bylo vhodné tuto otázku podrobit hlubšímu zkoumání. Z tohoto důvodu není procento opotřebenosti v rámci prezentované metodiky řešeno. Aplikace TEA Water (kapitola 4.4), která z navržené metodiky vychází, díky svému dalšímu vývoji již procento opotřebenosti zahrnuje.

4.2 MODULY JEDNOTNÉ METODIKY

Aby bylo možné obsáhnout hodnocení technického stavu celých vodovodních systémů, 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** – úpravy 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 pak nutné navrhnout vlastní strukturu hodnotících kritérií - ukazatelů a faktorů, včetně 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 této disertační práce.

4.2.1 Modul TEAP – čerpací stanice

Modul TEAP byl vyvinut jako první z modulů a současně na něm vznikala navržená jednotná metodika. 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 v rámci Inovačního vouchera představovala připomínkování navržené metodiky a dále zpřístupnění objektů a poskytnutí dat pro testování navržené metodiky na reálných objektech.

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 stavebně-technickou část čerpací stanice jsou to ukazatele:

- ST1 – Stav stavebních konstrukcí ČS;
- ST2 – Stav akumulční nádrže;
- ST3 – Prostředí na ČS.

Pro technologicko-provozní část čerpací stanice byly navrženy čtyři ukazatele:

- TP1 – Stav čerpacích jednotek;
- TP2 – Pracovní charakteristiky čerpadel;
- TP3 – Stav technologické části (mimo čerpadel);
- TP4 – Protirázová ochrana.

Pro jednotlivé ukazatele byly navrženy příslušné faktory, pomocí kterých tyto 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.

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

ST - Stavebně technická část

ST 1 – Stav stavební části

Ukazatel slouží k ohodnocení stavební části, která může mít vliv zejména na technologickou část a bezpečnost obsluhy. Pomocí faktorů se posuzuje stav střešních, stropních a stěnových konstrukcí, podlah, výplní stavebních otvorů a zámečnických prvků, jako jsou např. žebříky a zábradlí.

F1 - Stav střešní konstrukce

Střešní konstrukce se posoudí na základě viditelného poškození a opotřebení střešního pláště a na základě známek netěsnosti pláště (pronikání srážkové vody) na stropě pod tímto pláštěm. Jedná se o vizuální faktor.

0	Nehodnoceno.
1	Stav jako nový. Střešní konstrukce bez závad, nebo jen drobné poruchy. Objekt nejvíe žádné známky zatékání.
2	Střešní konstrukce je funkčně bez problémů. Závady důsledkem stáří materiálů.
3	Nevyhovující stav. Střešní konstrukcí zatéká, statické porušení konstrukce (vlivem stáří materiálu, větru, lidskou činností ...)

F2 - Stav výplní stavebních otvorů

Posuzuje se stav oken a dveří podle viditelných porušení a netěsností.

0	Nehodnoceno.
1	Okna i dveře jsou bez závad a plní svou funkci.
2	Funkčně bez problémů. Závady důsledkem stáří materiálů.
3	Okna či dveře neplní zcela svou funkci. Závady umožňující vniknutí škůdců nebo neoprávněných osob.

F3 - Stav podlah

Posuzuje se stav podlah podle viditelných známek porušení.

0	Nehodnoceno.
1	Podlaha správně vyspádovaná, voda odtéká do kanálků, netvoří se kaluže.
2	Místy narušený povrch nášlapné vrstvy, nosná k-ce s drobnými prasklinami nemající vliv na f-ci k-ce.
3	Kanálky ucpané, voda neodtéká, praskliny v podlaze, porušení statiky (propadání...).

F4 - Stav stěn

Posuzuje se stav stěn podle viditelných známek porušení.

0	Nehodnoceno.
1	Povrchová úprava a nosná konstrukce bez závad.
2	Místy opadávající omítka, prasklé nebo odlupující se obklady (nátěr), nosná k-ce s drobnými prasklinami nemající vliv na f-ci k-ce.
3	Povrchové úpravy ve špatném stavu, na nosné konstrukci se objevují větší praskliny, nosná konstrukce vykazuje známky statického porušení.

F5 - Stav stropní konstrukce

Posuzuje se stav nosné stropní konstrukce podle viditelných známek porušení.

0	Nehodnoceno.
1	Povrchová úprava a nosná k-ce bez závad. Vyskytují se plísňe, drobné narušení povrchů úprav, nosná k-ce bez problémů.
2	Místy opadávající omítka, nosná k-ce s drobnými prasklinami nemající vliv na funkci k-ce.
3	Povrchové úpravy ve špatném stavu, větší praskliny nebo odpadávání materiálu na nosné k-ci, známky statického porušení, např. obnažená rezavá výztuž.

F6 - Stav zámečnických prvků

Posuzuje se stav žebříků, zábradlí, roštů atd. podle viditelných porušení, zejména s ohledem na bezpečnost pracovníků obsluhy.

0	Nehodnoceno.
1	Bez závad, bezproblémová funkčnost.
2	Funkčně bez významných problémů, ale zvýšená koroze může způsobit menší poranění obsluhy při zdolávání žebříků, držení se zábradlí,...
3	Značná koroze prvků a jejich uvolnění, může hrozit pád nebo propad obsluhy do nižšího patra či jiné vážné zranění.

ST 2 – Stav akumulční nádrže

Technický stav akumulční nádrže může nepříznivě ovlivnit kvalitu vody a provoz čerpací stanice. Hodnotí se stav konstrukcí, vstupu do nádrže, potrubí v nádrži a odvětrání.

F1 - Stav dna a kalové jímky

Posuzuje se stav kalové jímky podle viditelných známek porušení a zanesení jímky sedimenty.

0	Nehodnoceno.
1	K-ce bez prasklin, dno správně vyspádováno, bez sedimentů. Sedimenty nebo poruchy povrchu jen ojediněle, vlásečnicové praskliny.
2	Zjevná degradace krycího povrchu nátěru, viditelné praskliny do 2 mm.
3	Krycí vrstva nosné k-ce ve špatném stavu, praskliny nad 2 mm. Obnažená výztuž, opadávající beton, zjevné statické poruchy, ztráty přímo v nádrži. Zanesená kalová jímka.

F2 - Stav stěn

Posuzuje se stav stěn podle viditelných známek porušení.

0	Nehodnoceno.
1	K-ce bez prasklin, inkrusty a poruchy omítky či nátěru jen ojediněle, vlásečnicové praskliny.
2	Zjevná degradace krycího povrchu nosné k-ce, viditelné praskliny do 2 mm.
3	Viditelné prorýsování výztuže nebo odpadávání materiálu v její blízkosti, praskliny nad 2 mm, obnažená výztuž, odpadávající beton, statické poruchy, průsaky okolní zeminy.

F3 - Stav vstupních prvků nádrže

Posuzuje se stav vstupu do nádrže podle viditelných známek porušení s ohledem na bezpečnost pracovníků obsluhy a vniknutí nežádoucích látek a živočichů do nádrže.

0	Nehodnoceno.
1	Vstup opatřen dvířky/poklopem s dostatečným prostorem pro obsluhu. Prvek lze otevřít, je nepoškozený a těsní. Výskyt koroze.
2	Netěsní, materiál prorezlý skrz, materiál vstupního prostoru zvětrává a padá do nádrže.
3	Nebezpečí propadu obsluhy pochůznými poklopy, dvířka nelze pro korozi zavřít/otevřít, absence poklopu/dvířek.

F4 - Stav potrubí

Posuzuje se stav potrubí podle viditelných známek porušení, stáří a provozní historie.

0	Nehodnoceno.
1	Chráněno povrch. úpravou, závady estetického rázu, místy odlupující nátěr nebo koroze.
2	Funkčně bez problémů, závady důsledkem stáří materiálů, koroze.
3	Značná koroze, funkční problémy, zanesení rží, zmenšený profil, netěsnosti.

F5 - Stav střešní konstrukce

Akumulace může být stavebně samostatný objekt. Střešní konstrukce se posoudí na základě viditelného poškození a opotřebení střešního pláště a na základě známek netěsnosti pláště (pronikání srážkové vody) na stropě pod tímto pláštěm. Pokud nemá akumulace vlastní stavební objekt, doporučujeme tento ukazatel nehodnotit.

0	Nehodnoceno.
1	Stav jako nový. Střešní konstrukce bez závad, nebo jen drobné poruchy. Objekt nejeví žádné známky zatékání.
2	Střešní konstrukce je funkčně bez problémů. Závady důsledkem stáří materiálů.
3	Nevyhovující stav. Střešní konstrukcí zatéká, statické porušení konstrukce (vlivem stáří materiálu, větru, lidskou činností ...)

F6 - Stav stropní konstrukce

Posuzuje se stav nosné stropní konstrukce podle viditelných známek porušení.

0	Nehodnoceno.
1	K-ce bez prasklin, inkrusty a poruchy omítky či nátěru jen ojediněle, vlásečnicové praskliny.
2	Zjevná degradace krycího povrchu nosné k-ce, viditelné praskliny do 2 mm.
3	Viditelné prorýsování výztuže nebo odpadávání materiálu v její blízkosti, praskliny nad 2 mm, obnažená výztuž, odpadávající beton, statické poruchy, průsaky krycí zeminy.

F7 - Stav odvětrání

Posoudí se stav funkčnosti odvětrání akumulární komory a zejména bezpečnost proti vniknutí nežádoucích látek a živočichů.

0	Nehodnoceno.
1	Funkční nucené nebo přirozené větrání.
2	Přirozené odvětrání pouze vstupem do akumulární nádrže. Nedostatečná filtrace vzduchu.
3	Bez odvětrání, nefunkční odvětrání.

ST 3 – Prostředí na ČS

Nevhodné prostředí na ČS může přispívat ke zhoršování stavu technologie a stavebního objektu, případně hrozí nebezpečí vniknutí nepovolaných osob nebo ohrožení bezpečnosti práce.

F1 - Stav zabezpečení objektu

Podle úrovně a stavu zabezpečení objektu se přiřadí hodnocení.

0	Nehodnoceno.
1	Objekt oplocen se zakončením ostatným drátem, bezpečnostní zámek na vstupu do objektu, vybaven detektory pohybu se signalizací vstupu do objektu na displejink..
2	Objekt neoplocen, se signalizací vstupu do objektu.
3	Objekt neoplocen nebo oplocení vykazuje známky výrazného poškození, snadno překonatelné, bez signalizace vstupu do objektu.

F2 - Stav odvětrání

Posoudí se stav funkčnosti odvětrání objektu a zejména bezpečnost proti vniknutí nežádoucích látek a živočichů.

0	Nehodnoceno.
1	Zcela funkční nucené nebo přirozené větrání.
2	Nedostatečná filtrace vzduchu.
3	Bez odvětrání, nefunkční odvětrání.

F3 - Stav topení

Posoudí se stav teploty objektu zejména s ohledem na bezpečnost provozu.

0	Nehodnoceno.
1	Objekt je temperován na dostatečnou teplotu. Charakter objektu zaručuje nepoklesnutí teploty v objektu pod bod mrazu.
2	Stav topení neodpovídá současným nárokům, ale nezpůsobuje zásadní provozní problémy.
3	Hrozí promrzání objektu a poškození zařízení.

F4 - Zvedací zařízení

Podle vybavenosti zvedacím zařízením se přiřadí hodnocení faktoru.

0	Nehodnoceno.
1	V čerpací stanici se nachází zvedací zařízení a je plně funkční.
2	V čerpací stanici se nachází místo pro ukotvení zvedacího zařízení, ovšem samotné zvedací zařízení se musí dovézt.
3	V čerpací stanici se nenachází zvedací zařízení ani možnost pro ukotvení mobilního zařízení.

F5 - Způsob osvětlení

Podle typu osvětlení objektu se přiřadí hodnocení faktoru.

0	Nehodnoceno.
1	Úsporné zářivky, pouze umělé osvětlení, není přístup denního světla, vyhovuje potřebám provozu.
2	Stav osvětlení neodpovídá současným nárokům, ale nezpůsobuje zásadní provozní problémy.
3	Nadměrné osvětlení denním světlem. Nedostatečné umělé osvětlení.

TP - Technologicko-provozní část

TP1 – Stav čerpacích jednotek

Ukazatel má za cíl ohodnotit stav čerpadel na základě indikátorů, které mohou poukazovat na zhoršený technický stav či k němu přispívat. Hodnotí se stáří osazeným čerpadel, jejich náročnost údržby a míra poruchovosti. Dále se posuzují znaky, které mohou znamenat špatný technický stav či závadu. Těmito znaky je například nadměrná hlučnost, vibrace, průsak vody ucpávkami.

F1 - Stáří čerpacích jednotek

Čerpadlům se přiřadí hodnocení podle jejich stáří. Pokud mají čerpadla různé stáří, uvažuje se nejstarší.

0	Nehodnoceno.
1	do 7 let
2	8 - 20 let
3	více než 20 let

F2 - Znaky opotřebení čerpadel

Opotřebení čerpadel se často projevuje určitými znaky, např. hlukem, vibracemi. Ohodnocení tohoto ukazatele vyžaduje od hodnotitele jisté zkušenosti s provozem čerpadel.

0	Nehodnoceno.
1	Netěsnosti, hluk, vibrace, teplota ložisek v normálu.
2	Podezření na zvýšené netěsnosti, hluk, vibrace nebo teplotu ložisek.
3	Nadměrné netěsnosti, hluk, vibrace nebo teplota ložisek.

F3 - Poruchovost čerpacích jednotek

Do počtu poruch se započítají veškeré mechanické poruchy na čerpadle a příslušném motoru. Uvažuje se nejhorší z osazených čerpadel.

0	Nehodnoceno.
1	Průměrný počet poruch za rok: maximálně 2.
2	Průměrný počet poruch za rok: 3 - 5.
3	Průměrný počet poruch za rok: 6 a více

F4 - Četnost a náročnost údržby

Čerpadla ve špatném technickém stavu mohou vykazovat zvýšené nároky na údržbu.

0	Nehodnoceno.
1	Nízká četnost a nízká náročnost údržby.
2	Nízká četnost a vysoká náročnost údržby nebo vysoká četnost a nízká náročnost údržby.
3	Vysoká četnost a vysoká náročnost údržby.

F5 - Uložení a ukotvení čerpadel

Posoudí se ukotvení čerpadel a stav podstavce nebo betonového bloku.

0	Nehodnoceno.
1	Ukotvení je vyhovující - pevné, bez známek porušení, nejhůře povrchová koroze.
2	Vady způsobené stářím materiálu bez zásadního vlivu na funkci.
3	Podezření na porušení ukotvení. Hlubková koroze prvků ukotvení. Nevyhovující ukotvení.

TP2 – Pracovní charakteristiky čerpadel

Čerpadlo, jako energeticky náročné zařízení, vyžaduje také posouzení provozních podmínek a spotřeby elektrické energie.

F1 - Průměrná denní doba chodu

Stanoví se průměrná denní doba chodu čerpadla a přiřadí se dle ní bodové hodnocení. Čerpadla s dobou chodu pod 8 hodin za den jsou značně předimenzovaná.

0	Nehodnoceno.
1	Doba chodu je větší než 12 hodin.
2	Doba chodu je 8 až 12 hodin.
3	Doba chodu je menší než 8 hodin.

F2 - Trend měrné spotřeby el. energie

Pro stanovení faktoru je třeba dlouhodobé měření spotřeby elektrické energie čerpadel a přečerpaného množství vody. Poté se vypočte měrná spotřeba energie v $kWh.m^{-3}$ a porovná se měsíční, čtvrtletní, pololetní nebo meziroční vývoj.

0	Nehodnoceno.
1	Měrná spotřeba elektrické energie má setrvalou tendenci.
2	Měrná spotřeba elektrické energie výrazněji kolísá.
3	Měrná spotřeba elektrické energie dlouhodobě roste - opotřebením čerpadel, inkrustace výtlačku. Měrná spotřeba elektrické energie náhle vzrostla při nezměněných provozních podmínkách – možný vznik poruchy.

F3 - Poloha pracovního bodu

Posoudí se poloha pracovního bodu čerpadel.

0	Nehodnoceno.
1	Je k dispozici Q-H křivka čerpadla, současný pracovní bod leží na Q-H křivce výrobce.
2	Není k dispozici QH křivka čerpadla, parametry pracovního bodu jsou stanoveny měřeními.
3	Parametry pracovního bodu nejsou k dispozici.

F4 - Účinnost čerpadel

Pokud je k dispozici měření účinnosti čerpadla, provede se posouzení její hodnoty.

0	Nehodnoceno.
1	je k dispozici křivka účinnosti čerpadla, provedeno měření účinnosti čerpadla, účinnost při pracovním bodu je větší než 0,60
2	je k dispozici křivka účinnosti čerpadla, provedeno měření účinnosti čerpadla, účinnost při pracovním bodu je větší než 0,40 a menší než 0,60
3	účinnost nelze stanovit, účinnost čerpadla je menší než 0,40

F5 - Efektivita instalovaného příkonu

Provede se výpočet ukazatele $e = P_i / P_{opt}$,

kde:

P_i je instalovaný příkon;

P_{opt} je optimální příkon nového čerpadla vypočtený dle vztahu $P_{opt} = (\rho \cdot Q \cdot H \cdot g) / \eta$.

0	Nehodnoceno.
1	Hodnota $e \in <1; 0,66>$
2	Hodnota $e \in (0,66; 0,33)$
3	Hodnota $e < 0,33$

TP3 – Stav technologické části (mimo čerpadel)

Posoudit je třeba kromě čerpadel i další prvky technologické části ČS jako je potrubí, armatury, měřicí prvky, řídicí prvky a elektroinstalace.

F1 - Stav uzavíracích a dalších armatur

Prověří se stav a funkčnost šoupat, klapek, vzdušníků atd. Nefunkčnost těchto armatur má výrazný vliv na provoz čerpací stanice, omezuje možnosti provozní manipulace.

0	Nehodnoceno.
1	Zařízení jsou plně funkční, bez závad.
2	Zařízení vykazují běžné opotřebení vlivem stáří.
3	Zařízení má nadměrné opotřebení nebo omezenou funkčnost.

F2 - Stav měřících prvků

Prověří a vyhodnotí se stav provozní průtokoměrů a vodoměrů.

0	Nehodnoceno.
1	ČS plně osazena měřeními, průtoky na výtlačku, měření tlaku, měřicí prvky nejsou starší 5 let, zařízení jsou plně funkční, bez závad, pravidelně cejchované.
2	ČS je vybavena měřeními průtoků a tlaků, měřicí prvky jsou starší 5 let, nejsou zásadní požadavky na doplnění měření
3	Měření na čerpací stanici je nevyhovující, neodpovídá současným požadavkům provozu, chybí měření některých veličin

F3 - Způsob a stav řízení čerpadel

Posoudí se zda systém řízení vyhovuje provozním potřebám a zda je řídicí systém opotřeбенý nebo zastaralý.

0	Nehodnoceno.
1	Řízení čerpadel plně funkční, plně vyhovuje provozním potřebám., automatické + ruční + ovládání z dispečinku.
2	Současný způsob naplňuje provozní potřeby, jiný způsob by však mohl být přínosný. Zařízení vykazuje běžné opotřebení vlivem stáří.
3	Současný způsob nevyhovuje provozním potřebám. Zařízení má nadměrné opotřebení nebo omezenou funkčnost.

F4 - Stav elektroinstalace

Posoudí se stav a případná zastaralost elektroinstalace, dále se posoudí vhodnost sjednaného příkonu el. přípojky.

0	Nehodnoceno.
1	Zařízení jsou plně funkční, bez závad.
2	Zařízení vykazují běžné opotřebení vlivem stáří, neodpovídá však současným podmínkám, kapacita přípojky je předimenzována.
3	Zařízení je zastaralé, má nadměrné opotřebení, elektropřípojka je výrazně předimenzována,

F5 - Stav potrubí v ČS

V neposlední řadě se vyhodnotí stav trubního vstrojení čerpací stanice.

0	Nehodnoceno.
1	Chráněno povrch. úpravou, závady estetického rázu, místy odlupující nátěr nebo koroze.
2	Funkčně bez problémů, závady důsledkem stáří materiálů, koroze.
3	Značná koroze, funkční problémy, zanesení rzi, zmenšený profil, netěsnosti.

TP4 – Protirázová ochrana

Protirázová ochrana je důležitým prvkem čerpací stanice. Posoudí se způsob a stav protirázové ochrany.

F1 - Způsob protirázové ochrany

Posoudí se vhodnost způsobu stávající protirázové ochrany.

0	Nehodnoceno.
1	Na ČS je instalován prvek protirázové ochrany - funkční tlaková nádoba nebo tlakový redukční ventil.
2	Protirázová ochrana je zajištěna pouze soft startérem.
3	Bez protirázové ochrany. Stávající protirázová ochrana je nevyhovující.

F2 - Vznik a tlumení rázů

Pokud existují dostupná data, vyhodnotí se zda dochází ke vzniku a tlumení rázů.

0	Nehodnoceno.
1	Na ČS nedochází ke vzniku rázů ani při náběhu nebo vypnutí čerpadel, nárůst tlaků je zanedbatelný, nejsou evidovány žádné vážné provozní problémy
2	Na ČS dochází ke vzniku vodního rázu, vodní rázy jsou však dostatečně tlumeny stávající protirázovou ochranou
3	Na ČS dochází ke vzniku vodního rázu, vodní rázy nejsou dostatečně tlumeny stávající protirázovou ochranou

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.

Pro stavebně-technickou část vodovodní sítě jsou to ukazatele:

- ST1 – Průměrné stáří trubního materiálu;
- ST2 – Stav armatur na síti;
- ST3 – Stav armaturních šachet.

Pro technologicko-provozní část vodovodní sítě byly navrženy čtyři ukazatele:

- TP1 – Poruchovost řadů;
- TP2 – Ztráty vody;
- TP3 – Kvalita vody v síti;
- TP4 – Tlakové poměry v pásmu.

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
ST - Stavebně technická část	0,40
ST1 - Průměrné stáří trubního materiálu	0,50
F1 - Stáří potrubí dle trubního materiálu	0,75
F2 - Inkrustace potrubí	0,25
ST2 - Stav armatur na síti	0,40
F1 - Uzavírací armatury	0,50
F2 - Hydranty	0,35
F3 - Ostatní armatury	0,15
ST3 - Stav armaturních šachet	0,10
F1 - Stav armaturních šachet	1,0

Část / ukazatel / faktor	Váha
TP - Technologicko-provozní část	0,60
TP1 - Poruchovost řadů	0,40
F1 - Průměrná roční poruchovost vodovodních řadů [pp/km/rok]	0,50
F2 - Dynamika poruch	0,50
TP2 - Ztráty vody	0,25
F1 - Procento vody nefakturované	0,30
F2 - Jednotkový únik vody nefakturované (JUVNF)	0,30
F3 - Minimální noční odběry	0,20
F4 - Ekonomický index ztrát (EIZ)	0,20
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

ST - Stavebně technická část

ST1 - Průměrné stáří trubního materiálu

Stáří trubního materiálu je významným indikátorem. Pro potřeby modulu je možné průměrné stáří vypočítat jako vážený průměr, kde vahou je délka úseku. Případně je možné stanovit průměrné stáří sítě odhadem.

F1 - Stáří potrubí dle trubního materiálu

Vyhodnocení faktoru je možné provést dvěma způsoby: výpočtem z délek řadů v jednotlivých kategoriích nebo odhadem průměrného stáří.

Pro výpočet průměrného stáří je navrženo rozdělit vodovodní síť dle následující tabulky a určit délky řadů v jednotlivých kategoriích stáří.

Bod	LT	TLT	OC	Nerez	PE	PVC	Jiný
1	0-60	0-70	0-40	0-80	0-40	0-30	0-30
2	61-90	71-100	41-60	81-110	41-60	31-50	31-45
3	> 90	> 100	> 60	> 110	>60	>50	> 45

Následně se sečte celková délka řadů v kategoriích bodového hodnocení 1, 2 a 3 a provede se vážený součet. Výsledná bodová hodnota se zaokrouhlí na celé číslo.

Bod	LT	TLT	OC	Nerez	PE	PVC	Jiný	CELKEM
1	km	km	km	km	km	km	km	suma
2	km	km	km	km	km	km	km	suma
3	km	km	km	km	km	km	km	suma
								vážený součet

Pokud není dostupný dostatek údajů pro výpočet, lze provést jednoduché stanovení průměrného stáří odborným odhadem:

0	Nehodnoceno.
1	< 40
2	40 - 70
3	> 70

F2 - Inkrustace potrubí

Pokud jsou dostupné výřezy potrubí, zajištěné například při opravách, lze odhadovat zainkrustovanost vodovodní sítě.

0	Nehodnoceno.
1	Kovová potrubí jsou bez výrazných inkrustací, většina řadů po rekonstrukci resp. vnitřní sanaci
2	Kovová potrubí s inkrustací odpovídající stáří.
3	Převažují zainkrustované potrubí, omezena hydraulická kapacita sítě

ST2 - Stav armatur na síti

Posoudí se stav armatur na síti. Nefunkčnost armatur výrazně omezuje možnosti provozní manipulace na síti.

F1 - Uzavírací armatury

V rámci faktoru se orientačně ohodnotí stav uzavíracích armatur dle jejich stáří.

0	Nehodnoceno.
1	Armatury převážně mladší 10 let, pravidelně kontrolované a udržované.
2	Armatury převážně mladší 20 let, pravidelně kontrolované a udržované, většinou funkční.
3	Armatury převážně starší 20 let, značná část nefunkčních, špatný technický stav.

F2 – Hydranty

Obdobně jako v předchozím faktoru se ohodnotí stav hydrantů.

0	Nehodnoceno.
1	Armatury převážně mladší 10 let, pravidelně kontrolované a udržované.
2	Armatury převážně mladší 20 let, pravidelně kontrolované a udržované, většinou funkční.
3	Armatury převážně starší 20 let, značná část nefunkčních, špatný technický stav.

F3 - Ostatní armatury

Pokud se na síti nachází další jiné typy armatur, provede se také jejich ohodnocení.

0	Nehodnoceno.
1	Armatury převážně mladší 10 let, pravidelně kontrolované a udržované.
2	Armatury převážně mladší 20 let, pravidelně kontrolované a udržované, většinou funkční.
3	Armatury převážně starší 20 let, značná část nefunkčních, špatný technický stav.

ST3 - Stav armaturních šachet

F1 - Stav armaturních šachet

Provede se ohodnocení průměrného technického stavu vodovodních armaturních šachet.

0	Nehodnoceno.
1	Šachty převážně ve stáří do 20 let, v dobrém technickém stavu, bez viditelného porušení.
2	Šachty převážně ve stáří do 40 let, technický stav odpovídá stáří.
3	Šachty převážně ve stáří nad 40 let, ve špatném technickém stavu, s viditelným porušením stavební konstrukce.

TP - Technologicko-provozní část

TP1 - Poruchovost řadů

Vysoká poruchovost může poukazovat na špatný technický stav vodovodní sítě. Obvykle bývá hodnocena jen průměrná roční poruchovost, cenným údajem však je i vývoj dynamiky poruch v delším časovém období. K tomu je však nutné mít k dispozici rozsáhlou databázi poruch zaznamenaných na hodnocené vodovodní síti.

F1 - Průměrná roční poruchovost vodovodních řadů [pp/km/rok]

Z dostupných dat se provede výpočet průměrné roční poruchovosti a následně se dle navržené hodnotící stupnice přiřadí bodové ohodnocení.

0	Nehodnoceno.
1	< 0,3 pp/km/rok
2	0,3 - 0,7 pp/km/rok
3	> 0,7 pp/km/rok

F2 - Dynamika poruch

Pokud je dostupný dostatek údajů, vyhodnotí se meziroční změny průměrné poruchovosti.

0	Nehodnoceno.
1	Poruchovost má stabilní nebo klesající tendenci.
2	Poruchovost má přibližně stagnující nebo mírně rostoucí tendenci.
3	Poruchovost má výrazně rostoucí tendenci.

TP2 - Ztráty vody

Nadměrné ztráty dopravované vody jsou také významným ukazatelem špatného technického stavu sítě. Navržené faktory umožňují posouzení ztrát vody provést jedním či více ukazateli ztrát: procento vody nefakturované, jednotkový únik vody nefakturované nebo ekonomický index ztrát.

F1 - Procento vody nefakturované

Provede se výpočet procenta vody nefakturované VNF dle vztahu

$$VNF = \frac{VNF_{CELK}}{VVR} \cdot 100 \quad [\%] \quad (35)$$

kde:

VNF_{CELK} je voda nefakturovaná celkem;

VVR je voda vyrobená k realizaci [52].

Dle navržené hodnotící tabulky se podle hodnoty VNF přiřadí bodové hodnocení faktoru.

0	Nehodnoceno.
1	< 12
2	12-20
3	> 20

F2 - Jednotkový únik vody nefakturované (JUVNF)

Objem vody nefakturované unikající z km přepočtené délky se vypočte dle vztahu

$$JUVNF = \frac{VNF_{CELK}}{L_{PREP}} \quad [m^3/km/rok] \quad (36)$$

$$L_{PREP} = K_i \cdot D_i \quad [km] \quad (37)$$

$$K_i = \frac{DN_i}{DN_{150}} \quad K_{PRIPOJKY} = 0,17 \quad (38)$$

kde:

L_{PREP} je přepočtená délka sítě [km] na jednotný profil DN 150;

L_i je skutečná délka sítě;

K_i je koeficient pro přepočet délky řadů;

$K_{PŘIPOJKY}$ je koeficient pro přepočet délky přípojek [52].

0	Nehodnoceno.
1	< 3000
2	3000 - 7000
3	> 7000

F3 - Minimální noční odběry

Provede se zjednodušeně porovnání naměřeného minimálního nočního průtoku s hodnotou průměrné denní spotřeby vody. Noční průtok mezi 2. a 4. hodinou ranní obvykle dosahuje 0,8 až 1,5 % průměrné denní spotřeby vody.

0	Nehodnoceno.
1	$Q_{\min} \leq 1,0 \cdot Q_d$
2	$Q_{\min} < 1,5 \% \text{ z } Q_d$
3	$Q_{\min} \geq 1,5 \% \text{ z } Q_d$

F4 - Ekonomický index ztrát (EIZ)

Ekonomický index ztrát je součinem ekonomického indexu EI a indexu ztrát IZ

$$EIZ = EI \cdot IZ \quad (39)$$

kde EI – ekonomický index ztrát nabývá hodnot:

- **EI = 1,5:** voda pro posuzovaný systém je upravována dvoustupňovou úpravou vody a čerpána min. na výšku přesahující 50 m v. sl.;
- **EI = 1,0:** voda pro posuzovaný systém je upravována dvoustupňovou úpravou vody, ale dopravována do systému gravitačně; nebo voda pro požadovaný systém vyžaduje pouze dezinfekci, resp. jednoduchou úpravu, ale musí být do systému čerpána;
- **EI = 0,5:** voda pro posuzovaný systém vyžaduje pouze dezinfekci resp. jednoduchou úpravu a je do systému dopravována gravitačně [52].

IZ – index ztrát se stanoví dle vztahu

$$IZ = \frac{JUVNF}{3200} \quad (40)$$

kde JUVNF představuje výše uvedený jednotkový únik vody nefakturované [52].

Po výpočtu hodnoty EIZ se stanoví bodové hodnocení faktoru dle následující stupnice.

0	Nehodnoceno.
1	< 0,8
2	0,8 - 1,3
3	> 1,3

TP3 - Kvalita vody v síti

Některé trubní materiály mohou za určitých podmínek negativně ovlivnit kvalitu dopravované vody. Navrhuje se posouzení zastoupení trubních materiálů, kvality dopravované vody a výskytu inkrustací v potrubí.

F1 - Doba zdržení vody v síti [hod]

Výpočtem nebo odborným odhadem se stanoví průměrná doba zdržení vody v síti. Dle navržené tabulky se přiřadí bodové hodnocení faktoru.

0	Nehodnoceno.
1	< 36
2	36 - 72
3	> 72

F2 – Inkrustace

Posoudí se průměrná zainkrustovanost potrubí hodnocené vodovodní sítě.

0	Nehodnoceno.
1	Potrubí je převážně bez inkrustací
2	Převažuje kovové potrubí s inkrustací odpovídající stáří.
3	Převažuje zainkrustované potrubí s výrazným vlivem na kvalitu vody.

F3 - Vliv trubních materiálů

Dle trubního materiálu zastoupeného v hodnocené vodovodní síti se přiřadí bodové ohodnocení faktoru.

0	Nehodnoceno.
1	Převážně zastoupen materiál potrubí GGG, PE nebo PVC.
2	Převážně zastoupen materiál potrubí LT nebo OC po sanaci vnitřního povrchu.
3	Převážně zastoupen materiál potrubí LT nebo OC bez sanace vnitřního povrchu.

F4 - Kvalita dopravované vody

Dle kvality a korozivních vlastností dopravované vody se přiřadí bodové hodnocení.

0	Nehodnoceno.
1	Dopravovaná voda bez korozivního účinku, podporující tvorbu ochranné vrstvy na potrubí.
2	Dopravovaná voda běžné kvality.
3	Dopravovaná voda se zvýšeným korozivním účinkem, např. hladová voda, vysoký obsah chloru atd.

TP4 - Tlakové poměry v pásnu

Příliš vysoký nebo kolísající tlak v síti může nepříznivě ovlivnit stav potrubí. Navržené faktory posuzují maximální hydrostatický tlak, průměrný hydrodynamický tlak a kolísání hydrodynamického tlaku.

F1 - Maximální hydrostatický tlak [m v.sl.]

Vyhodnotí se maximální hydrostatický tlak dosahovaný v nejnižším místě hodnocené vodovodní sítě.

0	Nehodnoceno
1	< 50
2	50 - 60
3	> 60

F2 - Průměrný hydrodynamický tlak [m v.sl.]

Posoudí se hodnota průměrného hydrodynamického tlaku dosahovaný v nejnižším místě hodnocené vodovodní sítě.

0	Nehodnoceno.
1	< 45
2	45 - 55
3	> 55

F3 - Kolísání hydrodynamického tlaku [m v.sl.]

Stanoví se rozdíl maximálního hydrodynamického a minimálního hydrodynamického tlaku během jednoho extrémního dne. Dle hodnoty rozdílu v m v.sl. se přiřadí bodové ohodnocení faktoru.

0	Nehodnoceno.
1	< 10
2	10 - 20
3	> 20

4.2.3 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. Pro stavebně-technickou část vodovodní sítě jsou to ukazatele:

- ST1 – Staří a stav vodovodního řadu;
- ST2 – Stavebně technické provedení řadu;
- ST3 – Protikorozní ochrana řadu.

Pro technologicko-provozní část vodovodní sítě byly navrženy čtyři ukazatele:

- TP1 – Poruchovost řadu;
- TP2 – Významnost řadu v pásmu;
- TP3 – Tlakové poměry na řadu;
- TP4 – Provozní ukazatel.

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 - Staří 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 - Protikorozní ochrana řadu	0,10	F1 - Maximální hydrostatický tlak [m v.sl.]	0,40
F1 - Vnější protikorozní ochrana	0,50	F2 - Průměrný hydrodynamický tlak [m v.sl.]	0,40
F2 - Vnitřní protikorozní 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

ST - Stavebně technická část

ST1 - Staří a stav vodovodního řadu

Řešený vodovodní řad se ohodnotí dle stáří, stáří a stavu armatur a inkrustace potrubí.

F1 - Stáří potrubí dle trubního materiálu

Dle trubního materiálu a stáří hodnoceného vodovodního řadu se přiřadí bodové hodnocení faktoru dle následující tabulky.

	LT	TLT	OC	GRP	PE	PVC	Jiný
1	0-60	0-70	0-40	0-35	0-40	0-30	0-30
2	61-90	71-100	41-60	36-50	41-60	31-50	31-45
3	> 90	> 100	> 60	>50	>60	>50	> 45

F2 - Stáří a stav armatur

Pokud se na hodnoceném úseku řadu nachází nějaká vodovodní armatura provede se ohodnocení stavu dle následující tabulky.

0	Nehodnoceno.
1	Armatury převážně mladší 5 let, pravidelně kontrolované a funkční
2	Armatury převážně mladší 20 let, pravidelně kontrolované a většinou funkční
3	Armatury převážně starší 20 let, špatný technický stav.

F3 - Inkrustace potrubí

Pokud jsou dostupné výřezy potrubí, zajištěné například při opravách, vyhodnotí se zainkrustovanost hodnoceného řadu.

0	Nehodnoceno.
1	Potrubí je bez inkrustací, průtočný profil není omezen.
2	Kovová potrubí s inkrustací odpovídající stáří, nedochází k výraznému omezení průtočného profilu.
3	Silně zainkrustované kovové potrubí, průtočný profil potrubí je omezen.

ST2 - Stavebně technické provedení řadu

F1 - Krytí potrubí

Pokud je známa hloubka uložení hodnoceného řadu porovná se hodnota krytí potrubí s navrženou hodnotící tabulkou.

0	Nehodnoceno.
1	Krytí je větší než požaduje norma a zároveň menší než 2,5 m .
2	Krytí je v rozmezí 2,51 - 3,5 m.
3	Krytí je menší než požaduje norma, nebo větší než 3,5 m.

F2 - Dopravní zatížení

Provede se orientační vyhodnocení zatížení potrubí dopravou na povrchu.

0	Nehodnoceno.
1	Bez dopravního zatížení, většinou extravilán nebo místní komunikace s nízkým provozem.
2	Intravilán, převažuje nezpevněný povrch, částečně místní komunikace se silným provozem.
3	Výrazný podíl uložení v komunikaci s významným dopravním zatížením, značný podíl nákladní dopravy.

F3 - Koordinace s ostatními sítěmi

Vyhodnotí se souběh a křížení s ostatními sítěmi, zejména s ohledem na nebezpečí poškození hodnoceného vodovodního řadu při provádění výkopových prací na ostatních sítích.

0	Nehodnoceno.
1	Není souběh s ostatními sítěmi, malý počet křížení s ostatními sítěmi.
2	Část trasy v souběhu s ostatními sítěmi, časté křížení.
3	Značná část trasy v souběhu s jinými sítěmi, nedodržené min. vzdálenosti, častá křížení.

ST3 - Protikorozi ochrana řadu

F1 - Vnější protikorozi ochrana

Pokud je známa vnější protikorozi ochrana potrubí, ohodnotí se dle následující tabulky.

0	Nehodnoceno.
1	Potrubí z nekorozivních materiálů, kovové potrubí chráněné aktivní protikorozi ochranou.
2	Kovové potrubí pouze se starší pasivní protikorozi ochranou.
3	Kovové potrubí dlouhodobě bez aktivní i pasivní protikorozi ochrany.

F2 - Vnitřní protikorozi ochrana

Pokud je známa vnitřní protikorozi ochrana potrubí, ohodnotí se dle následující tabulky.

0	Nehodnoceno.
1	Potrubí z nekorozivních materiálů. Potrubí opatřené vnitřní protikorozi ochranou - cementace, epoxidace, či jiná výstelka.
2	Potrubí s provedenou sanací vnitřního povrchu před více než 10 lety.
3	Potrubí s chybějící, nebo porušenou vnitřní protikorozi ochranou.

TP - Technologicko-provozní část

TP1 - Poruchovost řadu

F1 - Průměrná roční poruchovost [pp/km/rok]

Z dostupných dat se provede výpočet průměrné roční poruchovosti a následně se dle navržené hodnotící stupnice přiřadí bodové ohodnocení.

0	Nehodnoceno
1	< 0,3
2	0,3 - 0,7
3	> 0,7

F2 - Vývoj dynamiky poruch

Pokud je dostupný dostatek údajů, vyhodnotí se meziroční změny průměrné poruchovosti.

0	Nehodnoceno.
1	Řad byl rekonstruován a vykazuje pokles poruchovosti.
2	Poruchovost má přibližně stagnující tendenci.
3	Řad vykazuje rostoucí četnost poruch.

TP2 - Významnost řadu v pásmu

F1 - Významnost řadu

Dle topologie řadu, jeho polohy a funkce v rámci sítě, se obduje významnost hodnoceného vodovodního řadu.

0	Nehodnoceno
1	Koncový větvový řad malého profilu
2	Rozvodný řad
3	Hlavní rozvodný řad významného profilu

F2 - Počet napojených obyvatel

Významnost řadu lze posoudit také dle počtu obyvatel, kteří jsou napojeni na hodnocený řad.

0	Nehodnoceno
1	< 100
2	100 až 500
3	> 500

F3 - Napojení citlivých odběratelů

Body se faktoru přiřadí dle typu odběratelů zásobovaných prostřednictvím hodnoceného vodovodního řadu.

0	Nehodnoceno.
1	Napojeny zejména domácnosti a nevýznamní ostatní odběratelé.
2	Napojeny významní ostatní odběratelé, průmyslové objekty.
3	Napojen strategicky významný odběratel - nemocnice, státní instituce.

TP3 - Tlakové poměry na řadu

F1 - Maximální hydrostatický tlak [m v.sl.]

Vyhodnotí se maximální hydrostatický tlak dosahovaný v nejnižším místě hodnoceného vodovodního řadu.

0	Nehodnoceno
1	< 50
2	50 - 70
3	> 70

F2 - Průměrný hydrodynamický tlak [m v.sl.]

Posoudí se hodnota průměrného hydrodynamického tlaku dosahovaného v nejnižším místě hodnoceného vodovodního řadu.

0	Nehodnoceno
1	< 45
2	45 - 60
3	> 60

F3 - Kolísání hydrodynamického tlaku [m v.sl.]

Stanoví se rozdíl maximálního hydrodynamického a minimálního hydrodynamického tlaku během jednoho extrémního dne. Dle hodnoty rozdílu v m v.sl. se přiřadí bodové ohodnocení faktoru.

0	Nehodnoceno
1	< 10
2	10 - 20
3	> 20

TP4 – Provozní ukazatel

F1 - Jmenovitý profil potrubí

Vodovodní řady o malém profilu statisticky vykazují vyšší poruchovost. Proveďte se přiřazení bodového hodnocení faktoru dle jmenovitého profilu řadu.

0	Nehodnoceno
1	DN ≥ 300
2	150 < DN < 300
3	DN ≤ 150

F2 - Vliv na kvalitu vody

Materiál vodovodního řadu může mít negativní vliv na kvalitu dopravované vody. Dle materiálu hodnoceného řadu se určí bodové hodnocení faktoru dle následující tabulky.

0	Nehodnoceno.
1	Materiál potrubí GGG, PE nebo PVC.
2	Materiál potrubí LT nebo OC po sanaci vnitřního povrchu.
3	Materiál potrubí LT nebo OC bez sanace vnitřního povrchu. Koncový úsek s velmi malou rychlostí proudění vody.

F3 - Hustota přípojek

Pro ohodnocení faktoru se provede výpočet počtu přípojek na 1 km řadu jako počet přípojek na hodnoceném řadu dělený délkou hodnoceného úseku v kilometrech.

0	Nehodnoceno.
1	Cca do 50 přípojek na 1 km řadu - např. sídlištní zástavba.
2	Cca od 51 do 100 přípojek na 1 km řadu - kombinovaná zástavba.
3	Nad 101 přípojek na 1 km řadu - např. řadová zástavba.

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

První testování spočívalo v naplnění výpočetních souborů jednotlivých modulů extrémními pozitivními bodovými hodnotami faktoru (hodnota 1), poté extrémními negativními hodnotami (hodnota 3) a průměrnými hodnotami (hodnota 2). Dále bylo testováno chování při různém počtu nehodnocených faktorů (bodová hodnota 0) a při nahodilých hodnotách faktorů.

Závěry z testování jsou následující:

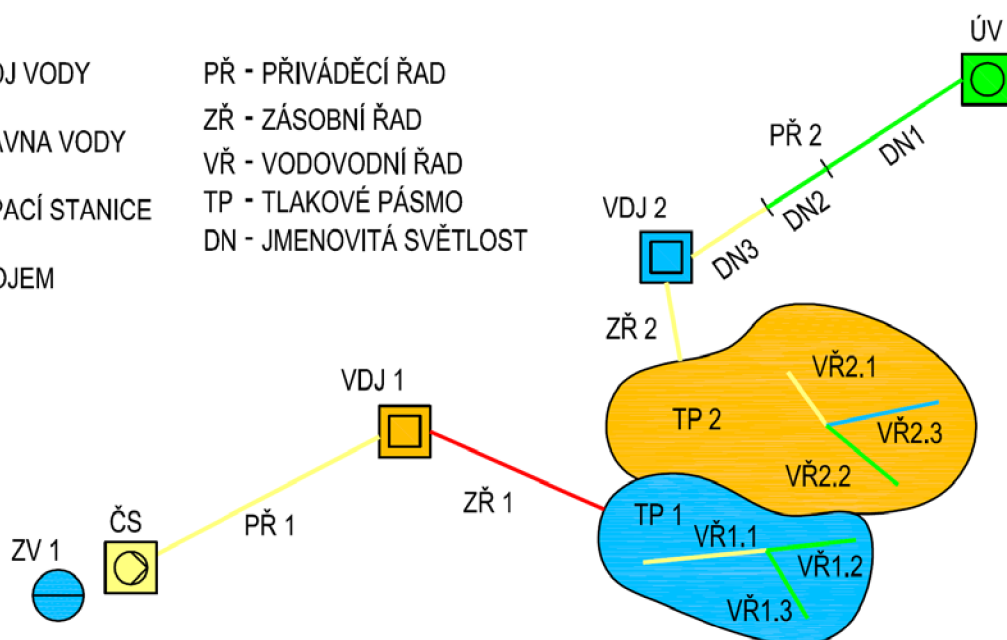
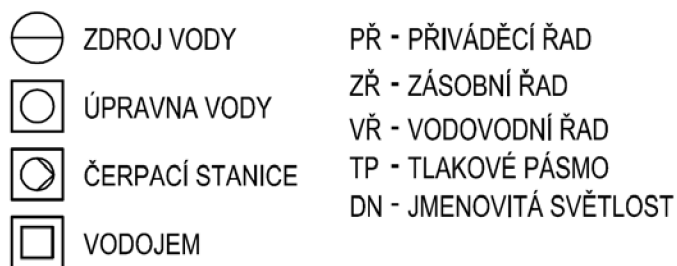
- byl prokázán značný vliv relativních vah ukazatelů a faktorů, proto byla v rámci navržené metodiky zachováno využití metody váženého součtu, která je jednoduchá a nevyžaduje speciální software a postupy;
- byly opraveny drobné chyby ve výpočtu.

Navrženou metodiku otestoval pomocí citlivostní analýzy Ing. Sucháček a výsledky publikoval na konferenci JUNIORSTAV 2016 [51]. 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 navrženou metodikou. Na tomto navrženém fiktivním vodovodu pak proběhlo testování modulů TEAP, TEAN a TEAS. Obrázek 4.4 představuje schéma tohoto navrženého fiktivního vodovodu.

LEGENDA:



Obrázek 4.4 Schéma fiktivního vodovodu

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.

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.

Webová aplikace TEA Water (Technical Audit of Water Distribution Systems) pro hodnocení technického stavu veřejných vodovodů je vyvíjena v rámci projektů řešených na Ústavu vodního hospodářství obcí. Webová aplikace není řešena v rámci disertační práce, ale je založena na navržené jednotné metodice. Rovněž navržené moduly TEAP, TEAN a TEAS byly do aplikace převzaty.

Jako forma aplikace byla zvolena webová aplikace. Pracovní prostředí aplikace je tedy dostupné z libovolného internetového prohlížeče. Z toho plyne minimální softwarová a hardwarová náročnost na počítač. Uživatel ale pro použití aplikace potřebuje internetové připojení.

Pro možnost používání aplikace se uživatel nejdříve musí zaregistrovat. Po získání přihlašovacích údajů se může uživatel pod svým účtem a heslem přihlásit. Aplikace je projektově orientována. Uživatel si vytvoří projekt, ve kterém vyplní detaily o projektu. Poté může v aktivním projektu vytvářet nové objekty v jednotlivých modulech, provádět hodnocení a procházet výsledky hodnocení. Uživatelům lze nastavit práva přístupu k jednotlivým projektům různým uživatelům. Aplikace umožňuje vkládat a připojovat k hodnocení jednotlivých ukazatelů dokumenty různých formátů (DOC, PDF, JPG). Obrázek 4.5 představuje uživatelské rozhraní aplikace, kde probíhá hodnocení faktoru F1 ukazatele ST1.

Obrázek 4.6 zachycuje celkové hodnocení technického stavu vybrané čerpací stanice. Je zobrazena výsledná kategorie technického stavu objektu („C“), procento opotřebení (46-55 %) a hodnocení jednotlivých částí a ukazatelů objektu. Výsledek je možné exportovat do souboru formátu DOC. Je také možné zobrazit detailní výpis, který obsahuje navíc hodnocení všech faktorů i ukazatelů.

Pro potřeby Plánů financování obnovy (PFO) vyžadovaných po vlastníci vodárenské infrastruktury zákonem [1] bylo do aplikace doplněno vyjádření technického stavu ve formě procenta opotřebení.

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

TEA Water Technický audit vodovodů **AKTIVNÍ PROJEKT: FV_2015_TEAA_TEAP [121] - Auditor uživatel: taus.m**

Projekty

- Seznam projektů
- Nový projekt
- Souhrnné výsledky

Aktivní Projekt

- Detail projektu
- Objekty
- Uživatelé projektu
- Ukazatele a faktory

Uživatel

- Změna údajů
- Odhlásit se

Aplikace

- Správa rolí
- Správa uživatelů
- Správa ukazatelů
- Katalog společností

Seznam objektů | Základní údaje | **Audit: Stavebně-technický** | Audit: Technologicko-provozní

Výsledek auditu

Hodnocení objektu: FV-CS 5

Ukazatel

ST1: Stav stavebních konstrukcí ČS [ok]
ST2: Stav akumulační nádrže [ok]
ST3: Prostředí na ČS [ok]

Faktor ukazatele

F1: Stav střešní konstrukce [ok]
F2: Stav výplně stavebních otvorů [ok]
F3: Stav podlah [ok]
F4: Stav stěn [ok]
F5: Stav stropní konstrukce [ok]
F6: Stav zámečnických prvků [ok]

Hodnocení faktoru

Nehodnoceno

Stav jako nový. Střešní konstrukce bez závad, nebo jen drobné poruchy. Objekt nejeví žádné známky zatékání.

Střešní konstrukce je funkčně bez problémů. Závady důsledkem stáří materiálů.

Nevyhovující stav. Střešní konstrukcí zatěká, statické porušení konstrukce (vlivem stáří materiálu, větru, lidskou činností ...)

Poznámka:

Soubory

Soubor nevybrán

Nápověda

Vyberte téma nápovědy:

- Vytvoření projektu DB
- Oprava projektu
- Nastavení práv k projektu
- Objekty projektu

Přehled

Projekt: FV_2015_TEAA_TEAP
Objekty: 6 |

Kategorie	Číslo
A	2
B	1
C	2
D	1
F	0
N	0

Obrázek 4.5 TEA Water - hodnocení faktorů

TEA Water Technický audit vodovodů **AKTIVNÍ PROJEKT: FV_2015_TEAA_TEAP [121] - Auditor uživatel: taus.m**

Projekty

- Seznam projektů
- Nový projekt
- Souhrnné výsledky

Aktivní Projekt

- Detail projektu
- Objekty
- Uživatelé projektu
- Ukazatele a faktory

Uživatel

- Změna údajů
- Odhlásit se

Aplikace

- Správa rolí
- Správa uživatelů
- Správa ukazatelů
- Katalog společností

Seznam objektů | Základní údaje | **Audit: Stavebně-technický** | Audit: Technologicko-provozní

Výsledek auditu

Projekt: FV_2015_TEAA_TEAP

Objekt: FV-CS 5

C [46-55%] CELKOVÉ HODNOCENÍ

F	ST: STAVEBNĚ-TECHNICKÁ ČÁST (TEAP)	0,35
S	ST1 STAV STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ ČS	0,4
N	ST2 STAV AKUMULAČNÍ NÁDRŽE	0,4
S	ST3 PROSTŘEDÍ NA ČS	0,2
B	TP: TECHNOLOGICKO-PROVOZNÍ ČÁST (TEAP)	0,65
1	TP1 STAV ČERPAČÍCH JEDNOTEK	0,3
2	TP2 PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY ČERPADEL	0,25
N	TP3 STAV TECHNOLOGICKÉ ČÁSTI (MIMO ČERPADEL)	0,25
N	TP4 PROTIRÁZOVÁ OCHRANA	0,2

Detailní zobrazení

Nápověda

Vyberte téma nápovědy:

- Vytvoření projektu DB
- Oprava projektu
- Nastavení práv k projektu
- Objekty projektu

Přehled

Projekt: FV_2015_TEAA_TEAP
Objekty: 6 |

Kategorie	Číslo
A	2
B	1
C	2
D	1
F	0
N	0

Obrázek 4.6 TEA Water – ukázka celkového hodnocení čerpačích stanic

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;
- 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, na kterých bylo provedeno testování navržené metodiky. 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;
- ČS3-SAL.

5.1.1 ČS1-BOR

Čerpací stanice je součástí vodovodu zásobujícího 2250 obyvatel. Podzemní voda je bez úpravy čerpána dvěma čerpacími stanice ze dvou podzemních zdrojů vody do vodojemu, který zásobuje celé spotřebiště. Součástí stavebního objektu ČS 1 je soustava studen a akumulací nádrží o objemu 50 m³. Čerpací stanice zajišťuje dopravu vody z akumulací nádrže přes přívadecí řad do vodojemu. Základní údaje o čerpací stanici jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 5.1 Základní údaje o ČS1-BOR

Rok zprovoznění	1984
Zařazení/funkce	hlavní ČS
Čerpané množství Q	7 l.s ⁻¹

Dopravní výška H	55 m
Instalovaný příkon ČS	49 kW
Způsob řízení provozu čerpadel	automatické, ruční, dispečink
Roční spotřeba el. energie	42 248 kW
Roční přečerpávané množství vody	23 752 m ³
Roční doba provozu čerpadel	1 034 hod
Průměrná denní doba provozu	2,8 hod
Počet čerpadel	3 (všechny stejné)
Řazení čerpadel	1 + 2
Typ čerpadla	horizontální
Rok osazení	1984
Výrobce čerpadla	Sigma Hranice
Typové označení čerpadla	VN – 2/4 135 – D – FE
Příkon čerpadla	10 kW

Při osobní obhlídce objektu působila čerpací stanice i její areál udržovaným dojmem. Stav a vybavení objektu odpovídalo stáří. Na následujících fotografiích je zachycen venkovní pohled na stavební objekt ČS a technologické vstrojení.



Obrázek 5.1 Pohled na budovu ČS1-BOR



Obrázek 5.2 Technologické vstrojení ČS1-BOR



Obrázek 5.3 Pohled na potrubí z akumulace ČS1-BOR

Z hlediska stavební části byl objekt vyhodnocen kategorií „*B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření*“. Toto hodnocení odpovídá reálnému stavu objektu.

V rámci technologicko provozní části však byla čerpací stanice ohodnocena kategorií „*C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení*“. Vzhledem k hodnocení ukazatelů TP1 a TP2 by byla více odpovídající kategorie „*D – špatný stav, naplánovat opatření*“. Osazená čerpadla jsou zastaralá, se zvýšeným průtokem vody přes ucpávky, dochází ke korozi upevňovacích šroubů. Na druhou stranu čerpadla nevykazují časté poruchy ani nevyžadují častou nebo náročnou údržbu. Čerpadla jsou ale vzhledem k současné spotřebě vody značně předimenzovaná, jsou v chodu průměrně dvakrát denně po dobu 1 až 1,5 hodiny. Lze také sledovat zvyšující se měrnou spotřebu elektrické energie a nízkou efektivitu instalovaného příkonu.

Celkově byla čerpací stanice ČS1-BOR zařazena do kategorie technického stavu „*B – dobrý stav, nevyžadující opatření*“. Přesto je však třeba věnovat pozornost nevyhovujícím čerpacím jednotkám a v nejbližší době zvažovat jejich výměnu. Tabulka 5.2 shrnuje hodnocení objektu a jednotlivých ukazatelů čerpací stanice.

Tabulka 5.2 Souhrn výsledného hodnocení ČS1-BOR

TEAP: ČS1-BOR		
<i>Hodnocení</i>	<i>Objekt, část</i>	<i>Váha</i>
B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,35
B	ST1 - Stav stavebních konstrukcí ČS	0,40
A	ST2 - Stav akumulární nádrže	0,40
B	ST3 - Prostředí na ČS	0,20
C	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,65
C	TP1 - Stav čerpacích jednotek	0,30
D	TP2 - Pracovní charakteristiky čerpadel	0,25
B	TP3 - Stav technologické části (mimo čerpadel)	0,25
A	TP4 - Protirázová ochrana	0,20

5.1.2 ČS2-HRAD

Čerpací stanice má sání přímo z hlavního zásobního řadu DN 200 a potrubím DN 250 je voda dopravována do vodojemu. Čerpací stanice není vybavena akumulací. Zvláštností této čerpací stanice je značná dopravní výška. Na čerpací stanici byla provedena rekonstrukce trubního vystrojení, čerpadla však byla ponechána původní. Základní údaje o čerpací stanici jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 5.3 Základní údaje o ČS2-HRAD

Rok zprovoznění	1987
Zařazení/funkce	přečerpávací
Čerpané množství Q	16,6 l/s
Dopravní výška H	220 m
Instalovaný příkon ČS	95 kW
Způsob řízení provozu čerpadel	automatické, ruční, dispečink
Roční spotřeba el. energie	118 000 kW
Roční přečerpávané množství vody	198 933 m ³
Roční doba provozu čerpadel	-
Průměrná denní doba provozu	6 hod
Počet čerpadel	2
Řazení čerpadel	1+1
Typ čerpadla	horizontální
Rok osazení	1997
Výrobce čerpadla	Sigma Lutín
Typové označení čerpadla	160 CVN
Příkon čerpadla	75 kW

Při osobní obhlídce objektu působila čerpací stanice i její areál udržovaným dojmem. Stav a vybavení objektu odpovídalo stáří. Na první pohled však zaujala zkorodovaná čerpadla s protékajícími ucpávkami.

Na následujících fotografiích je zachycen venkovní pohled na stavební objekt ČS a technologické vystrojení.



Obrázek 5.4 Pohled na budovu ČS2-HRAD



Obrázek 5.5 Technologické vybavení ČS2-HRAD



Obrázek 5.6 Detail spoje motor-čerpadlo na čerpací stanici ČS2-HRAD

Z hlediska stavebně technického stavu byla čerpací stanice ČS2-HRAD zařazena do kategorie „*B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření*“. Toto hodnocení koresponduje s reálným stavem objektu. Drobné nedostatky jsou ve stavu podlahy a způsobu odvětrání objektu. Na podlaze se tvoří kaluže, nejsou provedeny odtokové kanálky. Voda pravděpodobně odtéká přes poklapy do kanálů pro uložení potrubí. Odvětrání ČS je řešeno otevřením oken bez filtrace vzduchu, může tak dojít i ke vniknutí větších obratlovců. Bylo by vhodné osazení oken sítěmi proti hmyzu.

V rámci technologicko provozní části byla čerpací stanice ohodnocena kategorií „*C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení*“. Osazená čerpadla jsou však ve špatném stavu, v hodnocení ukazatelů TP1 a TP2 byla ČS zařazena do kategorie „*D – špatný stav, naplánovat opatření*“. Byl pozorován subjektivně nadměrný průtok vody přes ucpávky. Údržba ucpávek je častá a problematická. Dle informací provozu při dotažení ucpávek dochází k jejich přehřívání. Uložení čerpadel na betonových blocích je přes ocelové profily, upevňovací prvky vykazují pokročilou korozi. Průměrná denní doba chodu čerpadel je poměrně krátká, odhadem z grafu 6 hodin denně.

Celkově byla čerpací stanice ČS2-HRAD zařazena do kategorie technického stavu „*C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení*“. Přesto je však třeba věnovat pozornost

nevyhovujícím čerpacím jednotkám a v nejbližší době zvažovat jejich výměnu. Tabulka 5.4 shrnuje hodnocení objektu a jednotlivých ukazatelů čerpací stanice.

Tabulka 5.4 Souhrn výsledného hodnocení ČS2-HRAD

TEAP: ČS2-HRAD		
<i>Hodnocení</i>	<i>Objekt, část</i>	<i>Váha</i>
C	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,35
B	ST1 - Stav stavebních konstrukcí ČS	0,40
N	ST2 - Stav akumulární nádrže	0,40
A	ST3 - Prostředí na ČS	0,20
C	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,65
D	TP1 - Stav čerpacích jednotek	0,30
D	TP2 - Pracovní charakteristiky čerpadel	0,25
A	TP3 - Stav technologické části (mimo čerpadel)	0,25
C	TP 4 - Protirázová ochrana	0,20

5.1.3 ČS3-SAL

Čerpací stanice je zásobena gravitačním přítokem DN 100 z VDJ I. Přítok je ovládán plovákovým uzávěrem v akumulární komoře. Výtlač z ČS3-SAL zásobuje věžový vodojem VDJ II. Základní údaje o hodnocení čerpací stanice jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 5.5 Základní údaje o ČS3-SAL

Rok zprovoznění	1996
Zařazení/funkce	přečerpávací
Čerpané množství Q	1,5 l/s
Dopravní výška H	70 m
Instalovaný příkon ČS	16 kW
Způsob řízení provozu čerpadel	automatické, ruční, dispečink
Roční spotřeba el. energie	20 000 kW
Roční přečerpávané množství vody	12 099 m ³
Průměrná denní doba provozu	15 hod
Počet čerpadel	2
Řazení čerpadel	1+1
Typ čerpadla	horizontální
Rok osazení	1996
Výrobce čerpadla	Sigma Hranice
Typové označení čerpadla	32 CVX -6 - LG -100
Příkon čerpadla	3 kW

Při osobní obhlídce objektu nepůsobila čerpací stanice příliš udržovaným dojmem. Na podlaze se nacházely nečistoty a mrtvý hmyz. Vstupní poklop do akumulace 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 5.7 Pohled na budovu ČS3-SAL



Obrázek 5.8 Technologické vstrojení ČS3-SAL



Obrázek 5.9 Detail jednoho z čerpadel 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 nevyspádanou podlahu strojovny, kde stojí několik cm vody. Značná koroze vnitřní strany poklopu do akumulární nádrže, opad kusů rzi do nádrže. Konstrukční uspořádání poklopu umožňuje spad nečistot z podlahy do nádrže při otevřeném poklopu. Nedostatečná filtrace vzduchu přes hrubé mřížky a tím způsobená přítomnost značného množství hmyzu v ČS – pavouků a létajícího hmyzu.

Technologicko provozní část čerpací stanice byla ohodnocena kategorií „C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení“. Průměrná denní doba chodu čerpadel je přiměřená, odhadem 15 hodin denně. Čerpadla a trubní vystrojení jsou však zastaralá. Objevují se problémy s ucpávkami. Problematická údržba a zvýšený průtok vody přes ucpávky. Ukotvení čerpadel k podlaze přes ocelové profily je značně zkorodované, materiál se odlupuje. Ocelové potrubí opatřené nátěrem koroduje. Na výtlacích obou čerpadel jsou rozbité manometry. Měření průtoku je na společném výtlaku bez přenosu na dispečink.

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 5.6 shrnuje hodnocení objektu a jednotlivých ukazatelů čerpací stanice.

Tabulka 5.6 Souhrn výsledného hodnocení ČS3-SAL

TEAP: ČS3-SAL		
Hodnocení	Objekt, část	Váha
C	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,35
B	ST1 - Stav stavebních konstrukcí ČS	0,40
1	F1 - Stav střešní konstrukce	0,20
1	F2 - Stav výplní stavebních otvorů	0,20
3	F3 - Stav podlah	0,15
1	F4 - Stav stěn	0,15
0	F5 - Stav stropní konstrukce	0,15
1	F6 - Stav zámečnických prvků	0,15
N	ST2 - Stav akumulární nádrže	0,40
0	F1 - Stav dna a kalové jímky	0,20
1	F2 - Stav stěn	0,20

2	<i>F3 - Stav vstupních prvků nádrže</i>	0,15
0	<i>F4 - Stav potrubí</i>	0,15
1	<i>F5 - Stav střešní konstrukce</i>	0,10
0	<i>F6 - Stav stropní konstrukce</i>	0,10
0	<i>F7 - Stav odvětrání</i>	0,10
B	ST3 - Prostředí na ČS	0,20
1	<i>F1 - Stav zabezpečení objektu</i>	0,30
2	<i>F2 - Stav odvětrání</i>	0,20
1	<i>F3 - Stav topení</i>	0,20
2	<i>F4 - Zvedací zařízení</i>	0,20
1	<i>F5 - Způsob osvětlení</i>	0,10
C	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,65
C	TP1 - Stav čerpacích jednotek	0,30
2	<i>F1 - Stáří čerpacích jednotek</i>	0,35
3	<i>F2 - Znaky opotřebení čerpadel</i>	0,20
2	<i>F3 - Poruchovost čerpacích jednotek</i>	0,15
2	<i>F4 - Četnost a náročnost údržby</i>	0,15
2	<i>F5 - Uložení a ukotvení čerpadel</i>	0,15
C	TP2 - Pracovní charakteristiky čerpadel	0,25
1	<i>F1 - Průměrná denní doba chodu čerpadel</i>	0,20
0	<i>F2 - Trend měrné spotřeby el. energie</i>	0,20
3	<i>F3 - Poloha pracovního bodu</i>	0,20
0	<i>F4 - Účinnost čerpadel</i>	0,20
2	<i>F5 - Efektivita instalovaného příkonu ČS</i>	0,20
C	TP3 - Stav technologické části (mimo čerpadel)	0,25
2	<i>F1 - Stav uzavíracích a dalších armatur</i>	0,30
3	<i>F2 - Stav měřících prvků</i>	0,30
2	<i>F3 - Způsob a stav řízení čerpadel</i>	0,15
1	<i>F4 - Stav elektroinstalace</i>	0,15
1	<i>F5 - Stav potrubí v ČS</i>	0,10
C	TP4 - Protirázová ochrana	0,20
2	<i>F1 - Způsob protirázové ochrany</i>	0,60
0	<i>F2 - Vznik rázů</i>	0,40

5.2 TEAN – VODOVODNÍ SÍŤ

V rámci spolupráce s vodárenskými společnostmi proběhlo testování modulu TEAN navržené metodiky 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 následujících podkapitolách je prezentováno hodnocení tří vybraných vodovodních sítí (tlakových pásem), publikovaných anonymně pod označením:

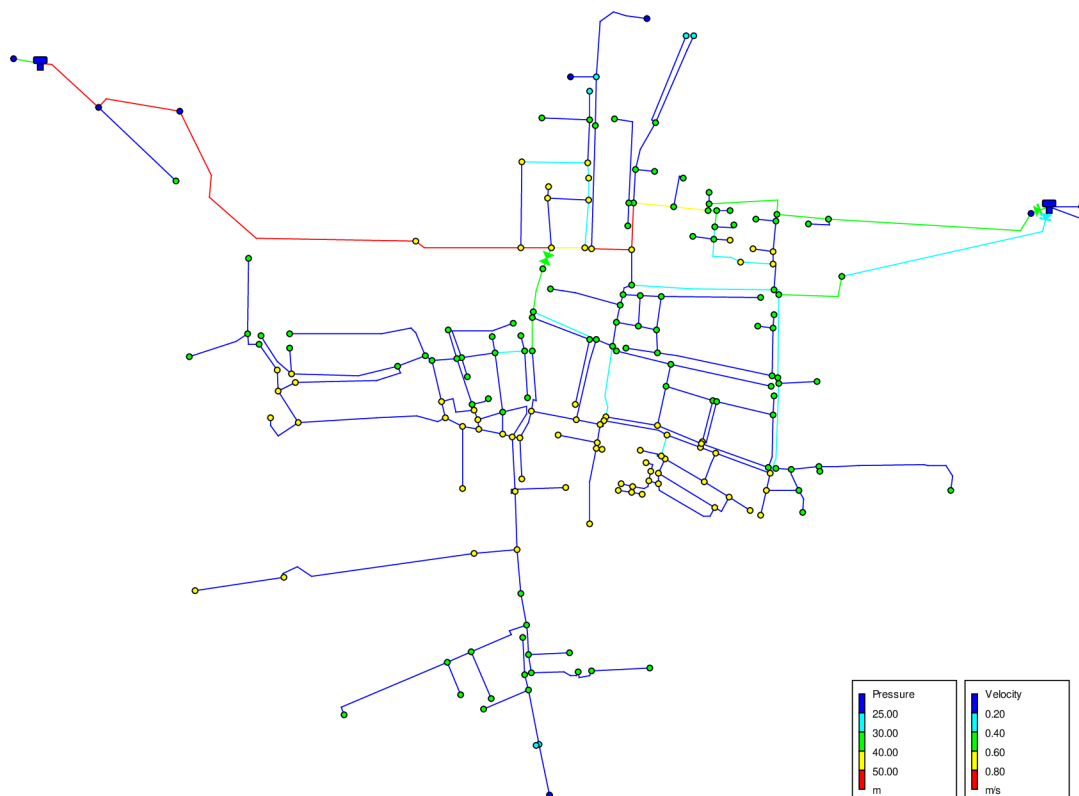
- TP1-SL;
- TP2-BOR;
- TP3-L10.1.

5.2.1 TP1-SL

V rámci testování navržené metodiky byla hodnocena vodovodní síť města s 6500 obyvateli. V obci se nachází několik průmyslových zón, není zde však přítomen průmysl s významnou spotřebou procesní vody. Do řešené vodovodní sítě je pitná voda dodávána ze skupinového vodovodu, který využívá povrchový zdroj vody s dvoustupňovou úpravou. Vodovodní síť města byla budována od roku 1931. Nachází se zde stále několik původních úseků z šedé litiny. Zastoupení trubních materiálů, stejně jako stáří potrubí je velmi rozmanité. Největší zastoupení má litina (38 %), PVC (32 %) a azbestocement (15 %). Délka vodovodní řadů je 28,5 km. Obrázek 5.10 představuje schéma hodnocené vodovodní sítě.

Z hlediska stavebně technického stavu byla vodovodní síť TP1-SL zařazena do kategorie „*B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření*“. Průměrné stáří dle trubního materiálu stanovené výpočtem je velmi dobré, hodnocení zhoršují starší šoupata a hydranty, které občas způsobují provozní problémy.

Dle technologicko provozních ukazatelů byla síť ohodnocena kategorií „*B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření*“. Průměrná poruchovost vypočtená z dostupných dat dosahuje hodnoty 0,47 pp/km/rok, vývoj poruch se meziročně v čase nijak významně nezhoršuje. Ukazatele ztráty vody dosahují výborných hodnot. Procento vody nefakturované bylo stanoveno 10,6 %, hodnota JUVNF byla vypočtena 1480 m³/km/rok. Mírně nepříznivé jsou tlakové poměry, maximální hydrostatický tlak přesahuje 60 m v.sl., průměrný hydrodynamický tlak je cca 50 m v.sl.



Obrázek 5.10 Schéma hodnocené vodovodní sítě TP1-SL

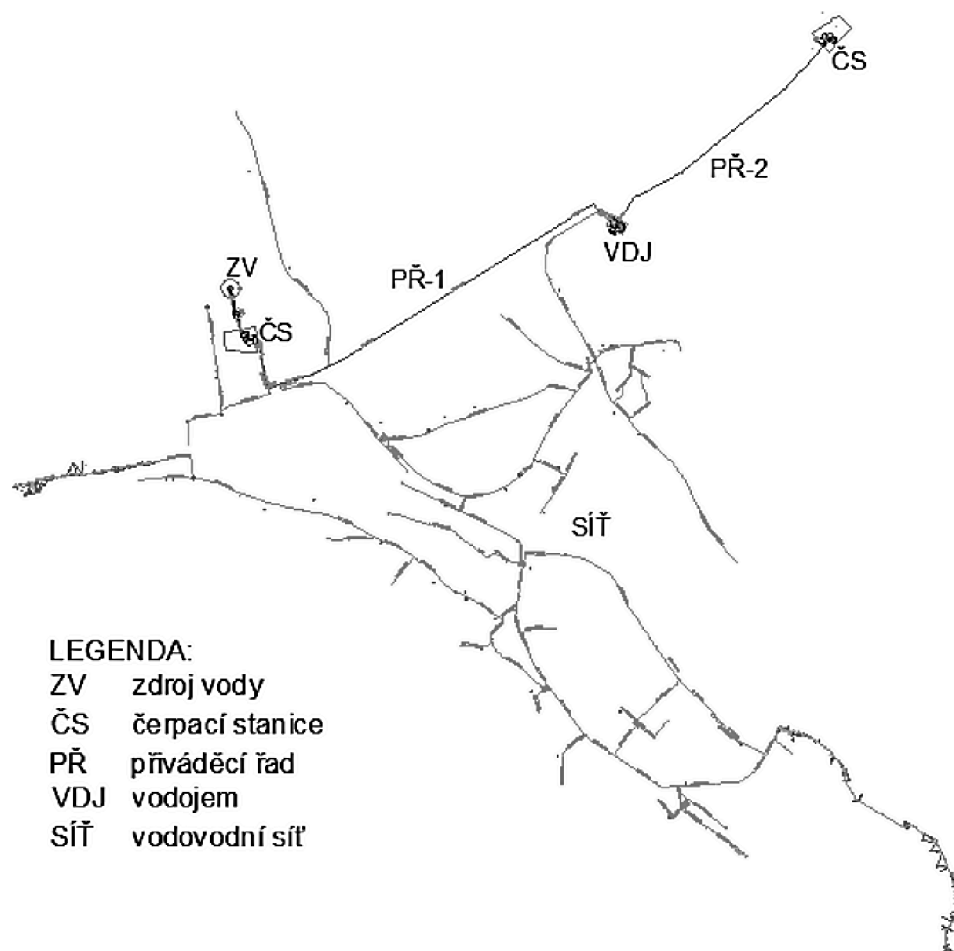
Celkově byla hodnocená síť TP1-SL zařazena do kategorie technického stavu „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Tabulka 5.7 shrnuje hodnocení sítě a jednotlivých ukazatelů.

Tabulka 5.7 Souhrn výsledného hodnocení TP1-SL

TEAN: TP1-SL		
Hodnocení	Objekt, část	Váha
B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,40
A	ST1 - Průměrné stáří trubního materiálu	0,50
C	ST2 - Stav armatur na síti	0,40
A	ST3 - Stav armaturních šachet	0,10
B	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,60
B	TP1 - Poruchovost řadů	0,40
A	TP2 - Ztráty vody	0,25
B	TP3 - Kvalita vody v síti	0,25
C	TP4 - Tlakové poměry v pásmu	0,10

5.2.2 TP2-BOR

Další z hodnocených vodovodních sítí zásobuje pitnou vodou obec s cca 2250 obyvateli. Vodovodní síť je zásobena gravitačně z jednoho vodojemu. Vodovodní síť byla vybudována v roce 1985 a dále rozšířena v roce 1996. Délka vodovodní řadů je 10,2 km. Trubní materiál je ve 100 % tvořen PVC potrubím. Obrázek 5.11 představuje schéma hodnocené vodovodní sítě.



Obrázek 5.11 Schéma hodnocené vodovodní sítě TP2-BOR

Na základě stavebně technických ukazatelů byla vodovodní síť TP2-BOR zařazena do kategorie „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Průměrné stáří dle trubního materiálu, stanovené výpočtem, bylo v době hodnocení dobré.

Dle technologicko provozních ukazatelů byla síť ohodnocena kategorií „A – výborný stav“. Dlouhodobá průměrná poruchovost vypočtená z dostupných dat dosahuje velmi dobré hodnoty 0,26 pp/km/rok, vývoj poruch se meziročně v čase nezhoršuje. Ukazatele ztráty vody dosahují výborných hodnot. Procento vody nefakturované bylo stanoveno 11,8 %, hodnota JUVNF byla vypočtena 530 m³/km/ro, EIZ 0,16. Obdobně jako u předchozí hodnocené sítě

jsou mírně nepříznivé tlakové poměry, maximální hydrostatický tlak se pohybuje okolo hodnoty 60 m v.sl., průměrný hydrodynamický tlak je 50,1 m v.sl.

Celkově byla hodnocená síť TP2-BOR zařazena do kategorie technického stavu „*B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření*“. Tabulka 5.8 shrnuje hodnocení sítě včetně jednotlivých ukazatelů.

Tabulka 5.8 Souhrn výsledného hodnocení TP2-BOR

TEAN: TP2-BOR		
<i>Hodnocení</i>	<i>Objekt, část</i>	<i>Váha</i>
B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,40
B	ST1 - Průměrné stáří trubního materiálu	0,50
C	ST2 - Stav armatur na síti	0,40
A	ST3 - Stav armaturních šachet	0,10
A	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,60
A	TP1 - Poruchovost řadů	0,40
A	TP2 - Ztráty vody	0,25
A	TP3 - Kvalita vody v síti	0,25
C	TP4 - Tlakové poměry v pásmu	0,10

5.2.3 TP 3 – 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 5.12 představuje schéma hodnocené vodovodní sítě.

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. Uzavírací armatury jsou převážně mladší 10 let, provozovatel sítě uvádí, že více než 80 % uzavíracích armatur plní svojí funkci. Armatury jsou minimálně jednou za dva roky kontrolovány.

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.).



Obrázek 5.12 Schéma hodnocené vodovodní sítě TP3-L10.1

Celkově byla hodnocená síť TP3-L10.1 zařazena do kategorie technického stavu „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Tabulka 5.9 shrnuje hodnocení sítě včetně jednotlivých ukazatelů a faktorů.

Tabulka 5.9 Souhrn výsledného hodnocení TP3-L10.1

TEAN: TP3-L10.1		
Hodnocení	Objekt, část	Váha
B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
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 vodovodních řadů	0,50
1	F2 – Dynamika poruch	0,50
B	TP2 - Ztráty vody	0,25
1	F1 – Procento vody nefakturované	0,30
0	F2 – Jednotkový únik vody nefakturované (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 následujících podkapitolách je prezentováno hodnocení tří vybraných řadů s označením:

- S1;
- S2;
- S3.

5.3.1 Řad S1

Hodnocený řad S1 je tvořen litinovým potrubím DN 150 délky 468 m. Řad byl vybudován v roce 1960. Jedná se o důležitý páteřní řad. Označení provozovatele je řad „1“, identifikační číslo úseku 1174, 1175 a 1177. Z dostupných záznamů poruch byla vypočtena průměrná roční poruchovost 1,2 pp/km/rok. Dle hydraulického modelu dosahuje maximální hydrostatický tlak 48 m v.sl. a hydrodynamický tlak 45 m v.sl.

Na základě stavebně technických ukazatelů byl řad S1 zařazen do kategorie „*B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření*“.

Dle technologicko provozních ukazatelů byla síť ohodnocena kategorií „*C – průměrný stav, nevyžadující okamžitá řešení*“.

Celkově byl hodnocený řad S1 zařazen do kategorie technického stavu „C – průměrný stav, nevyžadující okamžité řešení“. Tabulka 5.10 shrnuje hodnocení řadu včetně jednotlivých ukazatelů.

Tabulka 5.10 Souhrn výsledného hodnocení řadu S1

TEAS: S1		
<i>Hodnocení</i>	<i>Objekt, část</i>	<i>Váha</i>
C	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,50
B	ST1 - Staří a stav vodovodního řadu	0,50
N	ST2 - Stavebně technické provedení řadu	0,40
N	ST3 - Protikorozní ochrana řadu	0,10
C	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,50
D	TP1 - Poruchovost řadu	0,30
D	TP2 - Významnost řadu v pásmu	0,30
A	TP3 - Tlakové poměry na řadu	0,20
C	TP4 - Provozní ukazatel	0,20

5.3.2 Řad S2

Hodnocený řad S2 je tvořen potrubím PVC DN 100 délky 138 m. Řad byl vybudován v roce 1985. Jedná se o méně významný řad zásobující jednu ulici rodinných domů. Označení provozovatele je řad „4-2“, identifikační číslo úseku 942. V dostupných záznamech poruch nebyla evidována žádná porucha. Dle hydraulického modelu dosahuje maximální hydrostatický tlak 55 m v.sl. a hydrodynamický tlak 45 m v.sl.

Na základě stavebně technických ukazatelů byl řad S2 zařazen do kategorie „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“.

Dle technologicko provozních ukazatelů byl řad ohodnocen kategorií „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“.

Celkově byl hodnocený řad S2 zařazen do kategorie technického stavu „B – dobrý stav, nevyžadující žádná opatření“. Tabulka 5.11 shrnuje hodnocení řadu včetně jednotlivých ukazatelů.

Tabulka 5.11 Souhrn výsledného hodnocení řadu S2

TEAS: S2		
<i>Hodnocení</i>	<i>Objekt, část</i>	<i>Váha</i>
B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
B	ST - Stavebně technické ukazatele	0,50
B	ST1 - Staří a stav vodovodního řadu	0,50
A	ST2 - Stavebně technické provedení řadu	0,40
A	ST3 - Protikorozi ochrana řadu	0,10
B	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,50
A	TP1 - Poruchovost řadu	0,30
A	TP2 - Významnost řadu v pásmu	0,30
B	TP3 - Tlakové poměry na řadu	0,20
C	TP4 - Provozní ukazatel	0,20

5.3.3 Řad 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 5.12 shrnuje hodnocení řadu včetně jednotlivých ukazatelů a faktorů.

Tabulka 5.12 Souhrn výsledného hodnocení řadu S3

TEAS: S3		
<i>Hodnocení</i>	<i>Objekt, část</i>	<i>Váha</i>
B	CELKOVÉ HODNOCENÍ	
A	ST - Stavebně technické ukazatele	0,50
B	ST1 - Staří a stav vodovodního řadu	0,50
1	F1 - Stáří potrubí dle trubního materiálu	0,60
2	F2 - Stáří a stav armatur	0,30

1	F3 - Inkrustace potrubí	0,10
A	ST2 - Stavebně technické provedení řadu	0,40
1	F1 – Krytí potrubí	0,40
1	F2 – Dopravní zatížení	0,30
0	F3 – Koordinace s ostatními sítěmi	0,30
A	ST3 - Protikoroziční ochrana řadu	0,10
1	F1 – Vnější protikoroziční ochrana	0,50
1	F2 – Vnitřní protikoroziční ochrana	0,50
C	TP - Technologicko provozní ukazatele	0,50
B	TP1 - Poruchovost řadu	0,30
3	F1 - Průměrná roční poruchovost [pp/km/rok]	0,70
0	F2 - Vývoj dynamiky poruch	0,30
B	TP2 - Významnost řadu v pásmu	0,30
2	F1 - Významnost řadu	0,40
2	F2 - Počet napojených obyvatel	0,30
1	F3 - Napojení citlivých odběratelů	0,30
B	TP3 - Tlakové poměry na řadu	0,20
2	F1 - Jmenovitý profil potrubí	0,40
1	F2 - Vliv na kvalitu vody	0,40
1	F3 - Hustota přípojek	0,20
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, úpravný 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 – úpravný 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-technickém průzkumu.
- Je vhodné provádět hodnocení technického stavu jednoduchou, rychlou a efektivní multikriteriální metodou. Přestože tyto metody nejsou schopny poskytnout spolehlivost potřebnou pro jednoznačné rozhodnutí o obnově konkrétních částí systému, vedou k vytipování a určení kritických prvků a částí posuzovaných systémů.
- 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 proto vhodné, aby hodnocení prováděl zkušený odborník a aby hodnocení všech 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 BIBLIOGRAFIE

- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] BARÁK, František. Výhledy českého vodárenství po roce 2015. *SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací*. 2012, **21**(4), 1-3.
- [7] 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.
- [8] IPWEA, . *The International Infrastructure Management Manual*. New Zealand: NAMS Group, 2006.
- [9] 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.
- [10] MARLOW, David a Stewart BURN. Effective use of condition assessment within asset management. *Journal AWWA*. American Water Works Association, 2008, **100**(1), 54-63.

- [11] BRITISH COLUMBIA GUIDELINE, . *Comprehensive drinking water source to tap assessment guidelines*. British Columbia Guideline, 2005.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] NRC, . *Deterioration and inspection of water distribution systems*. Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, 2003.
- [15] 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.
- [16] ČIHÁKOVÁ, I., K. SLAVÍČKOVÁ, B. JEŽKOVÁ a F. HORKÝ. Rizika při zásobování pitnou vodou od zdroje ke spotřebiteli: Hodnocení stavu objektů na jímání podzemní vody. In: *Voda Zlín 2012: sborník příspěvků konference*. Zlín: Moravská vodárenská, a.s., 2012, s. 133-137. ISBN 978-80-260-1468-3.
- [17] SLAVÍČKOVÁ, Kateřina a Blanka JEŽKOVÁ. Metodika hodnocení stavu objektů pro jímání podzemní vody s využitím vícekriteriální analýzy. In: *Voda Zlín 2014*. Zlín: Moravská vodárenská, a.s., 2014, s. 181-186. ISBN 978-80-905716-0-0.
- [18] Prohlídka vrtů TV kamerou. *Lidařik, s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.lidarik.cz/sluzby/prohlidka-vrtu-tv-kamerou.htm>
- [19] 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.
- [20] 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>

- [21] ŠEBESTA, Miroslav. *Metodika hodnocení technického stavu vodárenských distribučních systémů*. Brno, 2006. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
- [22] ŠTÍCHOVÁ, Olga. Plán financování a realizace obnovy vodovodů a kanalizací – příklad postupu zpracování ve VaK Jižní Čechy, a. s. *Sovak: časopis oboru vodovodů a kanalizací*. 2007, **16**(12), 12-15. ISSN 1210–3039.
- [23] 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)
- [24] 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.
- [25] MÍKA, Petr. *Metodika hodnocení technického stavu vodovodních přiváděcích 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.
- [26] 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.
- [27] BRZÁK, Miloš. *Technický auditor zapsaný v Seznamu technických auditorů vodovodů a kanalizací MZe: osobní sdělení, 20. 11. 2012*. b.r.
- [28] SLOVENSKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 442/2002 Z. z. Zákon o verejných vodovodoch a verejných kanalizáciách a o zmene a doplnení zákona č. 276/2001 Z. z. o regulácii v sieťových odvetviach. In: *Zbierka zákonov Slovenskej republiky*. b.r.
- [29] 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.
- [30] 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>
- [31] BROŽOVÁ, Helena, Milan HOUŠKA a Tomáš ŠUBRT. *Modely pro vícekriteriální rozhodování*. Vyd. 1. Praha: Credit, 2003. ISBN 80-213-1019-7.
- [32] ZARGHAMI, Mahdi a Ferenc SZIDAROVSKY. *Multicriteria analysis: applications to water and environment management*. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-17936-5.
- [33] FIALA, Petr. *Modely a metody rozhodování*. 2., přeprac. vyd. V Praze: Oeconomica, 2008. ISBN 978-80-245-1345-4.
- [34] 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.
- [35] ZHOU, Aimin, Bo-Yang QU, Hui LI, Shi-Zheng ZHAO, Ponnuthurai SUGANTHAN a Qingfu ZHANG. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. In: *Swarm and Evolutionary Computation*. 2011, **1**(1), s. 32-49. DOI: 10.1016/j.swevo.2011.03.001. ISSN 22106502. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210650211000058>
- [36] DEB, K., A. PRATAP, S. AGARWAL a T. MEYARIVAN. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002, **6**(2), 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017. ISSN 1089778x. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=996017>
- [37] ONWUBOLU, Godfrey a B. BABU. *New optimization techniques in engineering*. New York: Springer, 2004. ISBN 35-402-0167-X.
- [38] SAHINIDIS, Nikolaos. Optimization under uncertainty: state-of-the-art and

- opportunities. *Computers*. 2004, **28**(6-7), 971-983. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.017. ISSN 00981354. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098135403002369>
- [39] STEWART, Theodor. Dealing with Uncertainties in MCDA. In: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer-Verlag, 2005, s. 445. DOI: 10.1007/0-387-23081-5_11. ISBN 0-387-23067-X. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/0-387-23081-5_11
- [40] ABDELAZIZ, F, L ENNEIFAR a JM MARTEL. A multiobjective fuzzy stochastic program for water resources optimization: the case of lake management: the case of lake management. *Infor-Information Systems and Operational Research*. Ottawa: INFOR Journal, 1971-, 2004, **42**(3), 201-216. ISSN 03155986.
- [41] LEVINE, P. a J.-Ch. POMEROL. Priam, an interactive program for choosing among multiple attribute alternatives. *European Journal of Operational Research*. 1986, **25**(2), 272-280. DOI: 10.1016/0377-2217(86)90091-3. ISSN 03772217. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0377221786900913>
- [42] SAATY, Thomas. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. London: McGraw-Hill International Book Co., 1980. ISBN 00-705-4371-2.
- [43] BELTON, Valerie. a Theodor STEWART. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 07-923-7505-X.
- [44] CHEN, Shu-Jen., C. HWANG a Frank HWANG. *Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications*. New York: Springer-Verlag, 1992. ISBN 03-875-4998-6.
- [45] MORAIS, DC a AT ALMEIDA. Water supply system decision making using multicriteria analysis. *Water SA*. 2007, **32**(2), -. DOI: 10.4314/wsa.v32i2.5247. ISSN 0378-4738. Dostupné také z: <http://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/5247>
- [46] FARMANI, Raziye, Godfrey WALTERS a Dragan SAVIC. Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality. *Journal of Hydroinformatics*. 2006, **8**(3), 165-179. ISSN 1464-7141. Dostupné také z:

<http://jh.iwaponline.com/cgi/doi/10.2166/hydro.2006.019>

- [47] WALSKI, T.M., E.D. BRILL, J. GESSLER et al. Battle of the network models: epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*. 1987, **113**(2), 191-203.
- [48] ZHOU, Yi, Kala VAIRAVAMOORTHY a Frank GRIMSHAW. Development of a Fuzzy Based Pipe Condition Assessment Model Using PROMETHEE. *World Environmental and Water Resources Congress 2009*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009, , 1-10. DOI: 10.1061/41036(342)485. ISBN 978-0-7844-1036-3. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036\(342\)485](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036(342)485)
- [49] *Vodovody a kanalizace ČR 2010*. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky, 2011. ISBN 978-80-7434-004-8.
- [50] 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].
- [51] 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.
- [52] TUHOVČÁK, Ladislav, Pavel ADLER a Tomáš KUČERA. *Vybrané statě z vodárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2008.

8 VLASTNÍ PUBLIKACE

TUHOVČÁK, L.; KUČERA, T.; SUCHÁČEK, T.; TAUŠ, M. *Metodika hodnocení technického stavu vodárenské infrastruktury*. Vodárenské pohledy. Bratislava, Slovenská republika: Asociácia vodárenských spoločností, 2016. s. 22-22. ISSN: 1336-6467.

TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M.; SUCHÁČEK, T. Preliminary technical assessment of water distribution networks. *Czech Journal of Civil Engineering*, 2015, vol. 2015, no. 2, p. 129-134. ISSN: 2336-7148.d

TUHOVČÁK, L.; SUCHÁČEK, T.; TAUŠ, M. Metodika hodnocení technického stavu vodárenské infrastruktury. *SOVAK*, 2015, roč. 24, č. 12, s. 26-29. ISSN: 1210-3039.

SUCHÁČEK, T.; TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M. Energetický audit vodárenských systémů. *Vodovod. info*, 2015, roč. 2015, č. 11, s. 1-4. ISSN: 1804-7157.

TUHOVČÁK, L.; KUČERA, T.; TAUŠ, M. Technical Audit of Water Supply Systems. In *Water Management and Hydraulic Engineering 2015. WATER MANAGEMENT AND HYDRAULIC ENGINEERING*. 1. Brno: Institut of Water Structures, FCE, BUT, 2015. p. 245-253. ISBN: 978-80-214-5230- 5. ISSN: 2410-5910.

TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M.; KUČERA, T. The Assessment of the Technical Condition of the Water Distribution Systems. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 2014, no. 89, p. 1420-1427. ISSN: 1877-7058.

TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M.; KUČERA, T. *The Assessment Of The Technical Condition Of The Water Distribution Systems*. WDSA 2014 - Water Distribution Systems Analysis. 1. Bari, IT: Technical University of Bari, 2014. p. 60-60.

TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M.; MÍKA, P. Indirect condition assessment of water mains. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 2014, no. 70, p. 1669-1678. ISSN: 1877-7058.

CUESTA CORDOBA, G.; TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M. Using artificial neural network models to assess water quality in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 2014, no. 70, p. 399-408. ISSN: 1877-7058.

TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M.; MARČÍK, M. Technický audit čerpacích stanic pitné vody. In *Voda Zlín 2014*. 1. Zlín: Moravská vodárenská, a.s., 2014. s. 117-120. ISBN: 978-80-905716-0- 0.

TAUŠ, M. Multikriteriální optimalizace a její využití ve vodárenství. In *JUNIORSTAV 2014*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 283-289. ISBN: 978-80-214-4851- 3.

TAUŠ, M. Metodika hodnocení technického stavu čerpacích stanic pitné vody. In *JUNIORSTAV 2014*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 282-286. ISBN: 978-80-214-4851- 3.

TUHOVČÁK, L.; MENŠÍK, M.; TAUŠ, M. *Nabídka poskytnutí znalostí pro Vodovody a kanalizace Zlín - Prototyp softwarové aplikace TAPS*. Brno: Ústav vodního hospodářství obcí,

2013. s. 1-3.

TUHOVČÁK, L.; KUČERA, T.; TAUŠ, M. *Hodnocení technického stavu veřejných vodovodů*. Provoz vodovodů a kanalizací. 1. Líbeznice: Medim, spol. s r.o., 2013. s. 61-63. ISBN: 978-80-87140-33- 8.

TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M.; VEČEŘA, M. *Technický a energetický audit vodárenských čerpacích stanic*. VODA 2013. 1. Brno: Tribun EU, 2013. s. 69-72. ISBN: 978-80-263-0506-4.

CUESTA CORDOBA, G.; TUHOVČÁK, L.; HAŠKA, L.; VIŠČOR, P.; TAUŠ, M. Modelování koncentrace chloru ve vodovodní síti. *SOVAK*, 2013, roč. 22, č. 6, s. 24-27. ISSN: 1210-3039.

TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M. *Hodnocení technického stavu vodovodů*. VODA ZLÍN 2013. 1. Olomouc: Moravská vodárenská, a.s., 2013. s. 19-26. ISBN: 978-80-260-3739- 2.

TAUŠ, M. *Hodnocení technického stavu systémů zásobování pitnou vodou*. JUNIORSTAV 2013. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2013. s. 320-331. ISBN: 978-80-214-4670- 0.

CUESTA CORDOBA, G.; TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M. Model umělých neuronových sítí pro predikci koncentrace chloru ve vodovodní síti. *Vodní hospodářství*, 2013, roč. 63, č. 1, s. 12-14. ISSN: 1211-0760.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Motivy pro provedení hodnocení technického stavu, zdroj [10]	11
Tabulka 3.2 Numerické a slovní hodnocení technického stavu vodovodních řadů, zdroj [4].	14
Tabulka 3.3 Podpůrné nástroje strategického plánování vodovodů [2]	15
Tabulka 3.4 Ukázka hodnocení ukazatele pro vstup do vrtu [16].....	16
Tabulka 3.5 Ukázka hodnocení ukazatele pro specifickou vydatnost [16].....	17
Tabulka 3.6 Parametry komponent úpravny pitné vody (nádrže) [7]	19
Tabulka 3.7 Parametry komponent úpravny pitné vody (čerpadla) [7]	20
Tabulka 3.8 Provozní ukazatele vodojemu, TAWAT [21]	24
Tabulka 3.9 Technické ukazatele vodojemu, TAWAT [21].....	25
Tabulka 3.10 Kritéria hodnocení vodovodních sítí dle VAKJČ [22]	27
Tabulka 3.11 Ukazatele technického stavu podle Al-Barqawi a Zayed [5].....	27
Tabulka 3.12 Tabulka plánu financování obnovy vodovodů a kanalizací [26]	30
Tabulka 3.13 Kategorie míry opotřebení objektů a zařízení, zdroj [29].....	33
Tabulka 3.14 Popis uvažovaných dílčích ukazatelů [5].....	62
Tabulka 3.15 Číselné a slovní hodnocení technického stavu vodovodních řadů [5]	63
Tabulka 3.16 Obsah provedeného dotazníkového výzkumu	64
Tabulka 3.17 Hodnocení stavu úseku vodovodního řadu - část 1 [50]	70
Tabulka 3.18 Hodnocení stavu úseku vodovodního řadu - část 2 [50]	71
Tabulka 4.1 Hranice kategorií technického stavu	78
Tabulka 4.2 Kategorie technického stavu	83
Tabulka 4.3 Navržená struktura modulu TAPS a váhy.....	85
Tabulka 4.4 Navržená struktura modulu TEAN a váhy.....	96
Tabulka 4.5 Navržená struktura modulu TEAS a váhy	103
Tabulka 5.1 Základní údaje o ČS1-BOR	113
Tabulka 5.2 Souhrn výsledného hodnocení ČS1-BOR.....	116

Tabulka 5.3 Základní údaje o ČS2-HRAD	117
Tabulka 5.4 Souhrn výsledného hodnocení ČS2-HRAD	120
Tabulka 5.5 Základní údaje o ČS3-SAL	120
Tabulka 5.6 Souhrn výsledného hodnocení ČS3-SAL.....	123
Tabulka 5.7 Souhrn výsledného hodnocení TP1-SL.....	126
Tabulka 5.8 Souhrn výsledného hodnocení TP2-BOR	128
Tabulka 5.9 Souhrn výsledného hodnocení TP3-L10.1	129
Tabulka 5.10 Souhrn výsledného hodnocení řadu S1	131
Tabulka 5.11 Souhrn výsledného hodnocení řadu S2	132
Tabulka 5.12 Souhrn výsledného hodnocení řadu S3	132

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3.1 Grafické znázornění měřítka technického stavu podle Al-Barqawi a Zayed, zdroj [4]	14
Obrázek 3.2 Zařízení ke kamerovému průzkumu vrtů a studní [18]	17
Obrázek 3.3 Snímky výstroje vrtu z kamerového záznamu [18]	17
Obrázek 3.4 Rozložení mezí pro ukazatel TU 4 – Účinnost čerpadla [19].....	23
Obrázek 3.5 Srovnání skutečného hodnocení a hodnocení modelem ANN [23].....	28
Obrázek 3.6 Prostor přípustných řešení X a prostor kritériálních funkcí Z na příkladu dvoukriteriální lineární optimalizace [32].....	36
Obrázek 3.7 Lichoběžníkové mlhavé číslo $\mu=(a, b, l, r)$ [32]	44
Obrázek 3.8 K příkladu stanovení optimální hladiny [32].....	45
Obrázek 3.9 Příklad lineární, progresivní a regresivní dílčí funkce užítku [31]	50
Obrázek 3.10 Vodovodní síť hypotetického města Anytown [46]	59
Obrázek 3.11 Ukazatele první a druhé úrovně	61
Obrázek 3.12 Účel zpracování plánů obnovy dle dotazníkového šetření	65
Obrázek 3.13 Procento společností, které mají zpracovány jednotlivé plány obnovy.....	66
Obrázek 3.14 Četnost provádění hodnocení technického stavu vodovodů dle dotazníkového šetření	67
Obrázek 4.1 Navržená struktura metodiky.....	77
Obrázek 4.2 Algoritmus výpočtu hodnocení.....	80
Obrázek 4.3 Schéma využití vah v navržené metodice.....	82
Obrázek 4.4 Schéma fiktivního vodovodu	110
Obrázek 4.5 TEA Water - hodnocení faktorů	112
Obrázek 4.6 TEA Water – ukázka celkového hodnocení čerpací stanice.....	112
Obrázek 5.1 Pohled na budovu ČS1-BOR	114
Obrázek 5.2 Technologické vystrojení ČS1-BOR	115

Obrázek 5.3 Pohled na potrubí z akumulace ČS1-BOR	115
Obrázek 5.4 Pohled na budovu ČS2-HRAD	118
Obrázek 5.5 Technologické vyzstrojení ČS2-HRAD	118
Obrázek 5.6 Detail spoje motor-čerpadlo na čerpací stanici ČS2-HRAD	119
Obrázek 5.7 Pohled na budovu ČS3-SAL.....	121
Obrázek 5.8 Technologické vyzstrojení ČS3-SAL.....	122
Obrázek 5.9 Detail jednoho z čerpadel ČS3-SAL.....	122
Obrázek 5.10 Schéma hodnocené vodovodní sítě TP1-SL	126
Obrázek 5.11 Schéma hodnocené vodovodní sítě TP2-BOR	127
Obrázek 5.12 Schéma hodnocené vodovodní sítě TP3-L10.1	129

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

- AC ... trubní materiál – azbestocement
AHP ... analytický hierarchický proces
ANN ... Artificial Neural Network, umělá neuronová síť
bm ... metr běžný
BOZP ... Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
CCTV ... Closed Circuit Television, uzavřený televizní okruh
ČR ... Česká republika
ČS ... čerpací stanice
DN ... jmenovitá světlost potrubí
EI ... ekonomický index
EIZ ... ekonomický index ztrát
FMEA ... Failure Mode and Effects Analysis, analýza možného výskytu a vlivu vad
GG ... trubní materiál – šedá litina
GGG ... trubní materiál – tvárná litina
GIS ... geografický informační systém
HDPE ... trubní materiál – vysokohustotní polyetylen
HDS ... hlavní distribuční systém (vodovod)
IZ ... index ztrát
JUVNF ... jednotkový únik vody nefakturované [m³/km/rok]
LT ... trubní materiál – šedá litina
MO ... multikriteriální optimalizace
OC ... trubní materiál – ocel
OP ... okrajové podmínky
PE ... trubní materiál – polyetylen
PFO ... plán financování obnovy
PRV ... tlakově redukční ventil
PVC ... trubní materiál – polyvinylchlorid
PVK ... Pražské vodovody a kanalizace, a.s.
PVS ... Pražská vodohospodářská společnost a.s.
RIP ... roční investiční plán
RS ... rozvodná vodovodní síť
SIP ... střednědobý investiční plán

SR ... Slovenská republika

SV ... skupinový vodovod

TEAA ... modul navržené metodiky pro hodnocení vodojemů

TEAM ... modul navržené metodiky pro hodnocení příváděcích řadů

TEAN ... modul navržené metodiky pro hodnocení vodovodních sítí

TEAP ... modul navržené metodiky pro hodnocení čerpacích stanic

TEAR ... modul navržené metodiky pro hodnocení jímacích objektů

TEAS ... modul navržené metodiky pro hodnocení vodovodních řadů

TEAT ... modul navržené metodiky pro hodnocení úpraven vody

TLT ... tvárná litina

TP ... tlakové pásmo

TS ... technický stav

TU ... technický ukazatel

U.S. EPA ... United States Environmental Protection Agency

USA ... Spojené státy americké

ÚV ... úpravna vody

VDJ ... vodojem

VFC ... voda fakturovaná celkem [m³/rok]

VNF ... procento vody nefakturované [%]

VNF_{celk} ... voda nefakturovaná celkem

VNFP ... voda nefakturovaná na přípojku [l/přípojku/den]

VVR ... voda vyrobená k realizaci [m³/rok]

SUMMARY

This dissertation focuses on multi objective condition assessment of water supply. As part of the work is carried out of the present state of knowledge in the field of evaluation of technical condition of water supply and in the methods of multi objective optimization. Based on the research, proposal of an uniform methodology for evaluation of the technical condition and its modules was made.

Within the dissertation thesis, the uniform methodology for condition assessment of water supply systems based on multi-criteria approach was proposed. It proposed a total of 7 modules for individual objects of water infrastructure: TEAR - intakes, TEAT - water treatment, TEAM – transmission mains, TEAA - water tanks, TEAP - pumping station, TEAN - water network, TEAS – pipe sections. For each module it is necessary to define a set of indicators, factors and their evaluation tables and relative weights. In the context of the thesis we were dealt modules TEAP, TEAN and TEAS. Other modules were addressed at the Institute of Municipal Water Management in cooperation with the author of the dissertation. The proposed methodology uses the weighted sum method for aggregating evaluation. Input data are point values of each factor entered by the user. The output of the proposed methodology of condition assessment is evaluated object classification in the category of technical state of A, B, C, D, or E, which corresponds to the recommended action.

Based on the testing, we can say that the proposed methodology is able to interpret technical condition of evaluated objects, uncover critical points and sort the evaluated objects in the order of technical state specified categories. The downside may be some difficulty obtaining and processing the input data and a certain degree of subjectivity of the evaluation.