

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
Ústav vodního hospodářství obcí

**Ing. Pavel Dvořák**

**VLIV PORUCH ROZVÁDĚCÍCH ŘADŮ  
NA SPOLEHLIVOST VODOVODNÍCH SÍTÍ**

**EFFECTS OF FAILURES ON DISTRIBUTION MAINS  
ON THE RELIABILITY OF WATER SYSTEMS**

Zkrácená verze PhD Thesis

Vědní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby  
36-35-9

Školitel: Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Jozef Kriš, PhD.  
Doc. Ing. Petr Šrytr, Csc.  
Ing. Jan Krejčí, Csc.

Datum obhajoby: 25. 4. 2001

ISBN 80-214-1896-6  
ISSN 1213-4198

© Pavel Dvořák 2001

## OBSAH:

<b>1.SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....</b>	<b>5</b>
1.1. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY VE VODOVODNÍCH SÍTÍCH .....	5
1.2. EVIDENCE A VYHODNOCENÍ PORUCH NA VODOVODNÍ SÍTL.....	6
<b>2.CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>7</b>
<b>3.ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>7</b>
3.1. PORUCHY NA VODOVODNÍM POTRUBÍ .....	8
3.2. REGRESNÍ ANALÝZA .....	8
3.2.1. <i>Výpočetní prostředky pro řešení regresní analýzy závislosti poruch         na daném faktoru .....</i>	<i>8</i>
3.3. ANALÝZA PORUCH NA VODOVODNÍCH ŘADECH - VYHODNOCENÍ .....	9
3.4. SPOLEHLIVOST VODOVODNÍCH SÍTÍ.....	11
3.4.1. <i>Okamžitá spolehlivost prvku - úseku vodovodní sítě tlakového pásma         1.6 Barvičova - výpočet významu prvku systému .....</i>	<i>11</i>
3.5. MULTIKRITERIÁLNÍ HODNOCENÍ .....	12
3.5.1. <i>Stanovení dílčího ohodnocení i-tého úseku podle j-tého kritéria.....</i>	<i>13</i>
3.6. ČLENY MULTIKRITERIÁLNÍ FUNKCE .....	14
<b>4.Hlavní výsledky práce .....</b>	<b>15</b>
<b>5.LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
<b>6.ABSTRACT.....</b>	<b>21</b>
<b>7.ŽIVOTOPIS AUTORA.....</b>	<b>23</b>
<b>8.SEZNAM PUBLIKACÍ.....</b>	<b>24</b>
<b>9. PŘÍLOHA 1 .....</b>	<b>25</b>
<b>10. PŘÍLOHA 2 .....</b>	<b>26</b>



# 1. Současný stav řešené problematiky

Disertační práce se zabývá teorií tlakového proudění vody v potrubí, matematickým modelováním tohoto jevu, teorií spolehlivosti vodovodní sítě, regresní analýzy a návrhu multikriteriálního hodnocení.

Na základě výše uvedené teorie práce statisticky vyhodnocuje faktory, které ovlivňují poruchovost jednotlivých úseků (prvků) vodovodní sítě, navrhuje nejdůležitější parametry, které je vhodné v případě vzniku poruchy sledovat, navrhuje optimální způsob hodnocení faktorů ovlivňujících spolehlivost vodovodní sítě a navrhuje multikriteriální funkci, která doporučí pořadí výhodnosti opravy nebo rekonstrukce úseku vodovodního potrubí.

## 1.1. Matematické modelování proudění vody ve vodovodních sítích

Práce pojednává o řešených problémech matematického modelování, účelech a cílech modelování, matematické formulaci problému a sestavení modelu ustáleného tlakového proudění v trubních sítích.

Od počátku 90. let dochází s rozšířením osobních počítačů k významnému posunu v oblasti matematického modelování a výpočtu matematických modelů. Rovněž ve vodním hospodářství se začínají prosazovat výpočetní modely. Matematické modely, umožňující analyzovat hydraulické poměry i v rozsáhlých vodovodních sítích, se postupně stávají součástí komplexních softwarových produktů s vysokým stupněm uživatelského rozhraní.

Pro řešení úloh proudění vody ve vodovodních sítích většinou k modelování postačí použít jednoduché stacionární modely, proto se práce zabývá pouze modelem časově nezávislého proudění. V současné době se začínají prosazovat rovněž speciální matematické modely, sloužící k analýze změn kvality vody. V tomto případě je výpočet založen na řešení transportní rovnice s kinetikou 1. řádu. Podle charakteru vstupních parametrů lze řešit nejen změnu koncentrace chemické látky v čase, ale provést i výpočet stáří vody v systému a procentuelní trasování vody z vybraného vodního zdroje. Další úlohou, kterou je možno řešit pomocí matematického modelování, je transport sedimentu. Výpočet je obvykle zaměřen na šíření suspenze potrubním systémem a používá se např. pro výpočet šíření a usazování zákalu ve vodovodním potrubí.

Modelování proudění vody ve vodovodních sítích slouží k získání potřebných informací o tlakových a průtokových poměrech. Měření přímo na síti sice umožňuje získat přesné informace o průtokových a tlakových poměrech v místě měření, ale k získání těchto údajů pro každý uzel sítě by bylo nutné osadit na tlakovém pásmu velké množství měřících zařízení. To je sice technicky proveditelné, ovšem z ekonomického hlediska stěží realizovatelné.

Tedy, matematický model tlakového pásma vodovodní sítě je nezbytným prostředkem pro zjištění průtokových a tlakových poměrů v síti v případě simulace poruchy. Je důležitý pro výpočet okamžité spolehlivosti vodovodních sítí a pro zjištění tlaku vody v místě poruchy hlavního řadu.

## 1.2. Evidence a vyhodnocení poruch na vodovodní síti

Poruchy byly ve společnosti Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. (dále BVK, a.s.) nejprve zaznamenávány v písemné formě, později byla z těchto záznamů od roku 1973 vytvořena databáze poruch v programu FoxPro. Databáze obsahovala pouze základní informace: (číslo poruchy, datum zahájení a ukončení prací na odstranění poruchy, ulice, číslo domu, typ poruchy, závada a poznámka), proto byla v roce 1993 vytvořena nová databázová aplikace, ve které jsou poruchy rozděleny do následujících typů a kategorií: porucha hlavního řadu, šoupátka, hydrantu, přípojky, armatury přípojky, ostatní a propadliny.

V práci je provedena analýza poruch na potrubí, které jsou v databázi poruch BVK, a.s. označeny jako *poruchy hlavního řadu (PH)*. Pro úplnost je třeba uvést ostatní údaje, které je možno v databázi nalézt: datum a čas nahlášení poruchy, kdo poruchu hlásil, číslo zakázky, místo poruchy, katastrální území, kdo poruchu způsobil, povrch v místě poruchy, kdo opravu zahájil a kdy (datum), hloubka potrubí, ukončení prací (na vodovodní síti), kdo práce ukončil, cena za materiál a údaje o povrchu a jeho opravě. Dále jsou k dispozici celkem 4 poznámky: poznámky z dispečinku, způsob provedení opravy v síti, úprava povrchu a poznámka z údržby sítě, ze kterých jsou zřejmé všechny podrobnosti.

Tato databázová aplikace se používá i v roce 2000, přestože by v nejbližších měsících měla být nahrazena modernějším programem na evidenci poruch, který bude propojen s geografickým informačním systémem.

Analýza poruch slouží ke stanovení priorit rekonstrukcí a oprav úseků vodovodní sítě. Jedním z nejběžnějších způsobů vyhodnocení poruch je zjištění celkového počtu poruch nebo počtu poruch jednoho typu (PH) na jedné ulici. Toto vyhodnocení má dva základní nedostatky:

- 1) není zohledněna délka úseku sítě, na kterém se vyskytly poruchy
- 2) na ulici se může vyskytovat několik úseků vodovodního potrubí jednoho profilu, avšak rozdílného stáří a materiálu, přičemž poruchy nejsou zpravidla rozloženy rovnoměrně

Práce navrhuje takové vyhodnocení poruch, které zohledňuje výše uvedené nedostatky.

## 2. Cíle práce

Tématem práce je posoudit vliv poruch rozváděcích řadů na spolehlivost vodovodních sítí. Proto se práce zabývá studiem a vyhodnocením poruch na vodovodní síti s ohledem nalézt nejdůležitější faktory, které výskyt poruch způsobují.

Složitost této problematiky, náhodnost výskytu poruchy i nejednoznačnost určení faktoru, který poruchu způsobil či nejvíce zapříčinil, výrazně ovlivňuje způsob řešení daného problému. Nalezení vazeb mezi poruchami a jejich příčinami je klíčem k jeho vyřešení. Zkoumání takto složitého problému nutně vyžaduje určitá zjednodušení. Je třeba věnovat pozornost nejdůležitějším faktorům, které jsou nejen dobře měřitelné, ale jejichž závislost na poruchovosti lze zjišťovat pomocí regresní analýzy.

Cílem práce je:

na základě teorie tlakového proudění vody v potrubí, matematického modelování tohoto jevu, teorie spolehlivosti vodovodní sítě, regresní analýzy a vícekritériálního hodnocení

- a) statisticky vyhodnotit nejdůležitější faktory, které ovlivňují poruchovost jednotlivých úseků (prvků) vodovodní sítě,
- b) navrhnout nejdůležitější parametry, které je vhodné v případě vzniku poruchy sledovat,
- c) navrhnout způsob hodnocení faktorů ovlivňujících spolehlivost vodovodní sítě,
- d) vytvořit multikritériální funkci, která doporučí pořadí výhodnosti opravy nebo rekonstrukce úseku vodovodního potrubí.

Je možno předpokládat, že na základě vícekritériálního hodnocení lze vytipovat z hlediska potencionálního vzniku poruchy nejrizikovější úseky, jejichž včasnou výměnou dojde ke snížení poruchovosti a tedy i ke zvýšení spolehlivosti vodovodní sítě.

Výsledky práce lze využít pro racionálnější využití investičních prostředků při plánování rekonstrukcí a oprav vodovodního potrubí.

## 3. Zvolené metody zpracování

Disertační práce se zabývá zejména multikritériálním hodnocením úseku sítě. Je zřejmé, že multikritériální ohodnocení je složitý proces, který je založen na parciálním ohodnocení řady dílčích faktorů. V disertační práci jsou posuzovány tyto dílčí faktory: stáří a materiál úseku sítě, význam úseku v topologické struktuře tlakového pásma vodovodní sítě a zatížení úseku hydrodynamickým tlakem.

### 3.1. Poruchy na vodovodním potrubí

Základním pojmem teorie spolehlivosti je porucha. Na vodovodní síti se vyskytují poruchy různého druhu a z nejrůznějších příčin.

Práce je zaměřena na analýzu poruch na vlastním vodovodním potrubí, které jsou dále nazývány (dle databáze a názvosloví v BVK, a.s.) poruchami hlavního řádu. Zejména je kladen důraz na nalezení nejdůležitějších faktorů, které výskyt poruch ovlivňují.

Pro vyjádření vzájemných vztahů mezi počtem poruch a délkou úseku, na kterém se poruchy vyskytly v daném časovém intervalu, se zavádí pojem „poruchovost“. Poruchovostí rozumíme počet poruch přepočítaný na jednotku délky a časový interval. V práci je poruchovost přepočítána na 100 km vodovodů a rok.

Složitost zvolené problematiky, náhodnost výskytu poruchy i nejednoznačnost zjištění faktoru, který poruchu způsobil či nejvíce ovlivnil, výrazně ovlivňuje způsob řešení.

### 3.2. Regresní analýza

Pro hodnocení faktorů vlivu stáří, materiálu potrubí a hydrodynamického tlaku vody na poruchovost vodovodních sítí byla použita regresní analýza.

Cílem regresní analýzy je postihnout závislost hodnot jednoho náhodného vektoru  $(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$  na hodnotách druhého vektoru  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Tedy, při řešení úlohy jde o nahrazení každé zjištěné (tj. skutečné, např. změřené) hodnoty  $y_i$  závislé proměnné  $Y$  hodnotou, ležící na nějaké spojitě regresní funkci, tj. hodnotou teoretickou, vypočítanou. Pravidlo, přiřazující každé změřené hodnotě  $y_i$  její vypočtený protějšek  $\hat{y}_i$  definuje fundamentální statistická metoda - metoda nejmenších čtverců.

#### 3.2.1. Výpočetní prostředky pro řešení regresní analýzy závislosti poruch na daném faktoru

Pro výpočet regresní analýzy byl využit program Microsoft Excel 97.

Při zkoumání poruchovosti je datová řada doplněna o trendovou křivku a zobrazen tak směr vývoje dat. Pro znázornění směru vývoje dat lze využít následující typy regresních křivek:

- ◆ lineární Trendová křivka je vypočtena podle lineární rovnice  $y = mx + b$ , kde  $m$  (sklon) a  $b$  (posunutí) jsou konstanty. Označení uvedeného typu odpovídá použití funkce LINREGRESE.
- ◆ mocninný Pro výpočet trendové křivky je použita mocninná rovnice  $y = c x^b$ , kde  $c$  a  $b$  jsou konstanty.



- ◆ exponenciální Pro výpočet trendové křivky je použita exponenciální rovnice  $y = c e^{bx}$ , kde  $c$  a  $b$  jsou konstanty a  $e$  je Eulerova konstanta (základ přirozeného logaritmu).

V grafu lze rovněž zobrazit další informace o regresní křivce, včetně rovnice regresní křivky a hodnoty  $R$ -kvadrát.

Hodnotu  $R$ -kvadrát lze použít pro vyhodnocení spolehlivosti trendové křivky. Pro logaritmické, mocninné a exponenciální trendové křivky je v programu Microsoft Excel použit transformovaný regresní model.

Hodnoty  $R$ -kvadrát se vypočítají z následujícího vztahu:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} , \quad (1)$$

kde

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2)$$

a

$$SST = \left( \sum Y_i^2 \right) - \frac{\left( \sum Y_i \right)^2}{n} . \quad (3)$$

V rovnicích (1)-(3) je používána symbolika zápisu z uživatelské příručky (či nápovědy) programu Microsoft Excel. V dalším textu bude hodnota  $R^2$  nazývána index determinace. Druhá odmocnina vztahu (1), která se používá k vyjádření síly závislosti, se nazývá index korelace.

### 3.3. Analýza poruch na vodovodních řadech - vyhodnocení

Analýzu poruch v závislosti na stáří potrubí, materiálu potrubí a tlaku vody v potrubí případně na jiných faktorech lze provést vhodnými matematickými prostředky. V práci byla použita regresní analýza. Výhodou regresní analýzy je její jednoduchost, přehlednost a dostupnost softwaru, je tedy levnější a rychlejší.

Nevýhodou je menší těsnost vypočítaných regresních vztahů, na druhé straně však poskytuje možnost hodnocení parciálních vlivů a jejich vzájemného poměru.

Při analýze vlivu stáří potrubí na počet poruch hlavního řadu bylo dosaženo zajímavých, i když ne vždy těsných vztahů.

#### Zjištěné regresní rovnice

Při analýze poruch prováděné pouze na potrubí z šedé litiny do profilu DN 300 již lze vysledovat těsnější vztahy mezi naměřenými a teoreticky vypočítanými hodnotami. Byla odvozena následující rovnice z údajů za rok 1998:

$$y = 19,496 e^{0,015x} \quad (4)$$

při indexu determinace

$$R^2 = 0,7563 \quad (5)$$

Pro rok 1997 byla odvozena následující rovnice:

$$y = 17,53e^{0,0153x} \quad (6)$$

při indexu determinace

$$R^2 = 0,6426 \quad (7)$$

Těsnot výše uvedených regresních vztahů vyjádřených rovnicemi (4) a (6) je pouze přiměřeně velká.

Při analýze vlivu hydrodynamického tlaku na počet poruch hlavního řadu v případové studii tlakového pásma 1.6 vodojemu Barvičova byl zjištěn mnohem jednoznačnější výsledek. Při překročení limitní hodnoty tlaku podle normy ČSN 75 5401 dochází k výraznému nárůstu poruchovosti, který je možné vyjádřit zejména exponenciální závislostí a následující rovnicí:

$$y = 5,6316 e^{0,0332x} \quad (8)$$

při indexu determinace

$$R^2 = 0,909. \quad (9)$$

### **Veličiny, které je vhodné při vzniku poruchy sledovat**

Je možno konstatovat, že v současné databázi poruch BVK, a.s. chybí v práci vyhodnocené parametry, tj. *hydrodynamický tlak v místě poruchy a stáří potrubí* v okamžiku vzniku poruchy. Rovněž chybí informace o *materiálu* vodovodního potrubí v místě poruchy. Tato data by měla být k dispozici v okamžiku zavedení nového programu na evidenci poruch, který by měl být propojen s geografickým informačním systémem.

Jako vhodné se jeví sledovat (a v budoucnosti zahrnout do multikriteriální funkce) tyto další parametry:

- dynamika poruch,
- celková cena za opravu poruchy,
- dopravní zatížení (v případě, že je vodovod uložen ve vozovce).

### 3.4. Spolehlivost vodovodních sítí

Jedním z dílčích faktorů, které slouží k ohodnocení  $i$ -tého úseku vodovodního potrubí, byl tzv. význam úseku v rámci topologické struktury sítě. Toto ohodnocení je určeno výpočtem okamžité spolehlivosti vodovodní sítě v případě vyřazení  $i$ -tého úseku z provozu.

Okamžitá celková spolehlivost vodovodní sítě  $R_i$  je počítána jako podíl počtu uzlů sítě, u kterých je dosažen alespoň minimální tlak dle normy ČSN 75 5401, ku počtu všech uzlů sítě.

Okamžitá spolehlivost  $R_i$  vodovodní sítě pro  $i$ -tý prvek výběrového statistického souboru je tedy dána vztahem:

$$R_i = \frac{u_i - v_i}{u_i} = 1 - \frac{v_i}{u_i} = 1 - \lambda_i, \quad (10)$$

kde  $R_i$  ... je spolehlivost sítě,  
 $\lambda_i$  ... je intenzita poruch v  $i$ -tém pseudonáhodném stavu sítě, přičemž poruchou se rozumí případ, že v uzlu není dosažen minimální tlak,  
 $u_i$  ... je počet uzlů sítě,  
 $v_i$  ... je počet uzlů sítě, kde není v  $i$ -tém stavu dosažen minimální předepsaný tlak.

Tedy, okamžitá celková provozní spolehlivost stávajícího tlakového pásma vodovodní sítě je definována na základě spolehlivosti jejich prvků – uzlů sítě.

Pro provozovatele vodovodní sítě je důležité hledat ty úseky, které nejvíce ovlivňují spolehlivost tlakových pásem vodovodní sítě. V případě poruchy  $i$ -tého prvku (úseku) vodovodní sítě je tento úsek (a v závislosti na topologii sítě a rozmístění uzavíracích armatur případně další úseky) vyřazen z provozu. Potom lze spočítat okamžitou spolehlivost  $R_i$  podle výše uvedeného vztahu (10). Okamžitá spolehlivost  $R_i$ , resp. hodnota  $1 - R_i$  vyjadřuje význam  $i$ -tého úseku v topologické struktuře tlakového pásma. Čím je hodnota  $1 - R_i$  vyšší, tím je úsek v rámci tlakového pásma důležitější. V případové studii je vypočítána okamžitá spolehlivost vodovodní sítě tlakového pásma 1.6 Barvičova.

#### 3.4.1. Okamžitá spolehlivost prvku - úseku vodovodní sítě tlakového pásma 1.6 Barvičova - výpočet významu prvku systému

Při výpočtu okamžité spolehlivosti byla provedena následující zjednodušení:

- ♦ okamžitá spolehlivost byla počítána pro případy, že byl právě  $i$ -tý úsek sítě (a v závislosti na topologické struktuře případně i další úseky) mimo provoz, tj. nebyla uvažována možnost dvou či více poruch v jednom časovém okamžiku,

- ♦ každý úsek sítě lze vyřadit v případě poruchy z provozu. Ve skutečnosti nejsou na koncích všech úseků vždy umístěny uzávěry. V minulosti dokonce docházelo k případům, že některé uzávěry byly nefunkční a bylo třeba v případě poruchy hledat nejbližší funkční uzávěr, v tomto případě byla vyřazena větší část vodovodní sítě z provozu,
- ♦ okamžitá spolehlivost byla počítána pro jeden konkrétní stav sítě, tj. jednu danou (provozní) hladinu vodojemu a jeden (max. hodinový) odtok do sítě,
- ♦ okamžitá spolehlivost byla počítána podle vztahu (10), tj. jako podíl uzlů sítě, u kterých byl dosažen alespoň min. tlak  $P_i^*$  ku počtu všech uzlů sítě. V případové studii byla vzata hodnota min. tlaku dle normy ČSN 75 5401, tj.  $P_j^* = 0,25$  MPa. Výjimku tvořily uzly, kde maximální hydrostatický tlak byl nižší než 0,25 MPa, v těchto případech byla uvažována hodnota  $P_j^* = 0,15$  MPa

Při výpočtu byl vyřazen vždy právě jeden ze 167 úseků tlakového pásma. Tedy, bylo provedeno 167 výpočtů, které byly seřazeny do jednotlivých listů programu Microsoft Excel a následně vyhodnoceny podle vztahu (10).

### 3.5. Multikriteriální hodnocení

Multikriteriální funkce bude posuzovat každý úsek sítě z hlediska jeho stáří a materiálu potrubí, jeho významu v topologické struktuře tlakového pásma vodovodní sítě a zatížení hydrodynamickým tlakem. Cílem úlohy je nalézt úsek vodovodní sítě, který je maximálně ohodnocen a jehož výměnou dojde k maximálnímu zvýšení spolehlivosti vodovodní sítě.

Jedná se tedy o řešení funkce:

$$F = \max H^i \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (11)$$

kde  $H^i$  ...je celkové ohodnocení  $i$ -tého úseku,

Stanovení ohodnocení jednotlivých úseků tvoří základní podklad rozhodovacích procesů. Celkové ohodnocení míry výhodnosti rekonstrukce  $i$ -tého prvku (úseku) vodovodní sítě lze stanovit jako vážený průměr dílčích ohodnocení vzhledem k jednotlivým kritériím ve tvaru:

$$H^i = \sum_{j=1}^n v_j \cdot h_j^i \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (12)$$

kde  $H^i$  ...je celkové ohodnocení  $i$ -tého úseku,

$v_j$  ...je váha  $j$ -tého kritéria,

$h_j^i$  ...dílčí ohodnocení  $i$ -tého úseku podle  $j$ -tého kritéria,

$n$  ...je počet kritérií rozhodování,

$p$  ...je počet úseků.

Je zřejmé, že dílčí kritéria musí mít požadavek stejného extrému (maxima) funkce. Na základě celkového ohodnocení úseku jsou jednotlivé úseky uspořádány podle klesajícího celkového bodového ohodnocení, přičemž nejvýše ohodnocený úsek nejvíce ovlivňuje spolehlivost vodovodní sítě (jeho rekonstrukcí lze docílit nejvýraznějšího zvýšení spolehlivosti sítě).

Při sestavení celkového ohodnocení  $i$ -tého úseku je vycházeno z následujících předpokladů:

- váha kritéria je  $v_j = 1$ . Nelze ověřit platnost předpokladu preferenčních kritérií, ani nelze stanovit, který člen multikriteriální funkce je významnější oproti jinému členu funkce.
- hodnoty  $h_j^i$  dílčích ohodnocení multikriteriální funkce se stanovují metodou dílčích funkcí užitku. Ve dvou případech – poruchovost a spolehlivost  $R_i$  (resp. hodnota  $1-R_i$ ) se předpokládá linearita těchto funkcí. Pro stanovení  $h_j^i$  dílčích ohodnocení multikriteriální funkce podle kritéria hydrodynamického tlaku a stáří úseku se vychází ze znalosti exponenciální funkce z regresní analýzy (závislosti poruchovosti na stáří úseku resp. na hydrodynamickém tlaku).

### 3.5.1. Stanovení dílčího ohodnocení $i$ -tého úseku podle $j$ -tého kritéria

Dílčí ohodnocení podle jednotlivých kritérií lze získat např. metodou dílčích funkcí užitku. Analogicky pro stanovení hodnoty podle dílčího kritéria významu úseku v topologické struktuře sítě a poruchovosti úseku lze zvolit metodu lineárních funkcí užitku.

Nechť je vodovodní síť rozdělena na  $i$  úseků a každý úsek má podle  $j$ -tého kritéria ohodnocení  $x_j^i$ . Úsek, který má nejnižší ohodnocení je označen 0 a tomuto úseku je přiřazena hodnota  $x_j^0$ . Analogicky úsek s nejvyšším ohodnocením je označen \* a tomuto úseku je přiřazena hodnota  $x_j^*$ .

Dílčí ohodnocení  $h_j^i$  daného úseku  $i$  podle zvoleného kritéria  $j$  je získáno ze vztahu:

$$h_j^i = \frac{x_j^i - x_j^0}{x_j^* - x_j^0}, \quad (13)$$

kde  $x_j^0$  ...je nejnižší dílčí ohodnocení daného úseku sítě,

$x_j^*$  ...je nejvyšší dílčí ohodnocení daného úseku sítě,

$x_j^i$  ...je dílčí ohodnocení  $i$ -tého úseku.

Je zřejmé, že  $h_j^i \in \langle 0, 1 \rangle$ .

Pro stanovení hodnoty podle dílčího kritéria stáří úseku a max. hydrodynamického tlaku v úseku se vychází z podobného vztahu:

$$h_j^i = \frac{f_j(x^i) - f_{j \min}(x^i)}{f_{j \max}(x^i) - f_{j \min}(x^i)}, \quad (14)$$

kde  $f_j(x)$  ...je funkce podle dílčího  $j$ -tého kritéria získaná regresní analýzou,  
 $f_j(x^i)$  ...je hodnota funkce  $f_j$  v bodě  $x^i$  (tj. podle kritéria  $j$  a pro daný úsek  $i$ ),  
 $f_{j \max}(x^i)$  ...je nejvyšší hodnota funkce  $f_{j \max}$  v bodě  $x^i$ ,  
 $f_{j \min}(x^i)$  ...je minimální hodnota funkce  $f_{j \min}$  v bodě  $x^i$ .

I v tomto případě  $h_j^i \in \langle 0,1 \rangle$ .

### 3.6. Členy multikriteriální funkce

Podle předchozí kapitoly byla sestavena multikriteriální funkce, která je složena z 5 členů, přičemž jednotlivé příspěvky funkce budou:

- ◆  $h_1^i$  - poruchovost úseku (průměrná poruchovost přepočítaná na jednotku délky sítě),
- ◆  $h_2^i$  - stáří úseku,
- ◆  $h_3^i$  - hydrodynamický tlak v úseku,
- ◆  $h_4^i$  - význam úseku v rámci topologické struktury sítě vypočítaný z okamžité spolehlivosti vodovodní sítě (hodnota  $1-R_i$ ),
- ◆  $h_5^i$  - korekční faktor (je popsán pouze teoreticky).

## 4. Hlavní výsledky práce

Na vodovodní síti v provozování BVK, a.s. byla statisticky vyhodnocena poruchovost podle různých faktorů. Zejména byla zkoumána závislost počtu poruch hlavního řadu na stáří potrubí, materiálu potrubí a hydrodynamickém tlaku.

Při zkoumání závislosti počtu poruch na materiálu mohou být dosažené výsledky ovlivněny nerovnoměrným zastoupením posuzovaných materiálů. Přesto je možné učinit obecný závěr, že mezi málo poruchové řady lze zařadit vodovody z tvárné litiny, oceli a azbestocementu. Naopak poruchovost šedé litiny, PE a sklolaminátu je mírně nadprůměrná.

Dále byla provedena analýza závislosti počtu poruch na stáří vodovodního potrubí. Nejdříve byly posuzovány všechny poruchy. Lze konstatovat, že kategorie stáří do 50 let vykazují podprůměrnou poruchovost, zatímco vodovody starší 50 let vykazují výrazně nadprůměrnou poruchovost. Výjimku tvoří kategorie 80-89 let, kde poruchovost významně ovlivňuje I. březovský vodovod, takže celkový počet poruch na jednotku délky a rok v této kategorii je podprůměrný.

Rovněž byly podrobeny analýze poruchy na materiálu šedá litina a také byly statisticky vyhodnoceny poruchy na tomto materiálu pouze do profilu DN 300 včetně. U této analýzy je možno konstatovat podobný závěr, jako u zkoumání poruch na celé vodovodní síti. Je překvapivé, že nejstarší vodovody netvoří nejporuchovější část sítě, ale jejich poruchovost je srovnatelná s poruchovostí kategorie 50-59 let.

Z výsledků vlivu stáří na poruchovost na potrubí ze šedé litiny do profilu DN 300 byla provedena regresní analýza, kde byly získány rovnice (4) při indexu determinace (5) a rovnice (6) při indexu determinace (7).

Těsnost uvedených regresních vztahů je pouze přiměřeně velká. Výše uvedené analýzy byly provedeny na statistických souborech poruch v letech 1997 a 1998.

V práci byl také hodnocen vliv hydrodynamického tlaku na poruchovost vodovodní sítě. Na případové studii vyhodnocení poruch na vodovodním potrubí tlakového pásma 1.6 Barvičova bylo zjištěno, že hydrodynamický tlak významně ovlivňuje poruchovost vodovodní sítě, a to zejména tehdy, pokud přesahuje max. limitní hodnoty uvedené v normě ČSN 75 5401.

Při analýze vlivu hydrodynamického tlaku na poruchovost sítě byla odvozena rovnice (8) při indexu determinace (9). Přestože je index determinace velmi vysoký, nelze považovat odvozenou rovnici za obecně platnou. Pro ověření obecné platnosti rovnice (8) by bylo vhodné vyhodnotit poruchovost vodovodní sítě v závislosti na hydrodynamickém tlaku na celé vodovodní síti v provozování BVK, a.s., případně na jiných lokalitách. V každém případě lze BVK, a.s. doporučit pokračovat v započaté práci týkající se redukce tlaků na vodovodní síti.

Na případové studii tlakového pásma 1.6 byla stanovena okamžitá spolehlivost vodovodní sítě  $R_i$  v případě vyřazení  $i$ -tého úseku tlakového pásma a následně posouzen význam každého úseku v topologické struktuře vodovodní sítě  $(1-R_i)$ . Okamžitou spolehlivost tlakového pásma 1.6 Barvičova významně ovlivní porucha na 6 úsecích sítě, při poruše ostatních úseků se okamžitá spolehlivost celé sítě výrazně nesníží.

Rovnice závislosti poruchovosti na stáří potrubí a hydrodynamickém tlaku získané pomocí regresní analýzy byly využity pro výpočet příspěvku multikriteriální funkce. Další příspěvky multikriteriální funkce tvoří vliv průměrné poruchovosti úseku a význam úseku v topologické struktuře tlakového pásma  $(1-R_i)$ .

Z dosažených výsledků uvedených výše je možno formulovat následující závěry:

Cíle vytyčené v úvodu disertační práce lze považovat za splněné. Byla provedena analýza poruch na celé vodovodní síti v provozování BVK, a.s., byly nalezeny regresní vztahy, popisující vliv stáří potrubí a hydrodynamického tlaku na počet poruch hlavního řadu.

Nicméně prováděné analýzy a řešení dílčích úloh odhalilo řadu dalších problémů, které bylo nutno řešit, nebo které se vyřešit nepodařilo. Nejdůležitějším problémem je pořízení vstupních údajů. Již pořízení vazby porucha - úsek potrubí (materiál a stáří potrubí) v letech 1997 a 1998 byl časově velmi náročný úkol, který omezoval rozsah řešení. Nalezení výše uvedené vazby např. v roce 1996 se ukázalo jako velmi problematické, resp. nemožné. Proto nebylo možné vyhodnotit poruchovost v dalších letech a i do budoucna se jeví jako velmi obtížné statisticky zpracovat poruchy v letech 1999 a 2000. Vyřešení problému je možné jedině zavedením nové evidence poruch, která bude propojena s geografickým informačním systémem (automatizované získávání podkladů).

Postupné získávání dat a zejména časový faktor byly příčinou, proč nedošlo k vyhodnocení poruchovosti v roce 1999 a proč nedošlo k odladění multikriteriální funkce pro více dílčích faktorů.

Teprve dlouhodobé ověření multikriteriální funkce v procesu návrhu realizačních akcí ve střednědobém plánu oprav a rekonstrukcí vodovodních sítí může dát jednoznačnou odpověď na otázku, zda byl zvolen správný přístup k řešení daného problému.

Přesto lze konstatovat, že multikriteriální funkce založená na parciálním hodnocení jednotlivých faktorů, které nejvíce ovlivňují poruchovost a tedy



i spolehlivost vodovodních sítí, si může najít své místo v rámci řešené problematiky hodnocení úseků sítě.

Z výsledků práce vyplynula řada nových námětů a problémů. V dalším výzkumu je vhodné zaměřit se zejména na tyto sporné otázky:

- ◆ je vhodné aplikovat multikriteriální hodnocení na všechny úseky vodovodních řadů v provozování BVK, a.s.,
- ◆ jako účelné se jeví pokračovat ve vyhodnocení poruchovosti vodovodní sítě v dalších letech,
- ◆ pravděpodobně je třeba doplnit multikriteriální funkci o další členy (faktory), které ovlivňují spolehlivost vodovodní sítě, zejména o korekční faktor (zohledňující externí vlivy, např. plánovaná rekonstrukce vozovky, kanalizace, ostatních inženýrských sítí, ...),
- ◆ zohlednit dynamiku nebo alespoň počet poruch na jednom úseku vodovodní sítě, celkovou cenu za opravu a příp. dopravní zatížení,
- ◆ vzhledem k obrovskému rozvoji výpočetní techniky lze do budoucnosti uvažovat o jiném způsobu řešení problému a případně regresní analýzu nahradit vhodnými typy modelů (např. neuronové sítě, genetické algoritmy).

## 5. Literatura

- [1] Ajiz, M. A. - Jennings A.: A robust incomplete Choleski conjugate gradient algorithm, International Journal for numerical methods in engineering, 1984, Vol. 20, str. 949-966,
- [2] Alegre, H.: Develop Decision Criteria to Prioritize Replacement and Rehabilitation of Mains and Appurtenances, Survey results of LNEC project 606/1/13381 - AWWARF 459, 1998, Lisboa,
- [3] Anděl, J.: Statistické metody, MATFYZPRESS, Praha, 1993,
- [4] Ayres, F.: Theory and problems of matrices, Mc.Graw-Hill Co., New York, 1962
- [5] Bao, Y. - Mays, L. W.: Model for Water Distribution System Reliability, Journal of Hydraulic Engineering, 1990, Vol. 116, No. 9, p. 1119 - 1137, ISSN 0733-9429/90/0009-1119,
- [6] Cross, H.: Analysis of flow in networks of conduits or conductors, Bulletin No. 286, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Illinois, 1936
- [7] Dalík, J.: Matematika, Numerické metody, 2.vydání, Brno, Nakladatelství VUT Brno, 1992, 145 str., ISBN 80-214-0455-8,
- [8] Dvořák, P.: Koncepce využití programu ODULA v BVK, a.s., Konference uživatelů programu ODULA (s mezinárodní účastí), Praha, 02/1999,
- [9] Dvořák, P.: Vliv stáří a materiálu vodovodního potrubí na počet poruch hlavního řádu, Mezinárodní konference Voda Zlín 2000, Zlín, 03/2000,
- [10] Gabriel, P., Kratochvíl, J., Šerek, M.: Výpočetní technika pro obor vodní hospodářství a vodní stavby, STNL/ALFA, Praha, 1982
- [11] Goulter, I. - Davidson, J. - Jacobs, P.: Predicting Water-Main Breakage Rates, Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, Vol. 119, No. 4, p. 419 - 435, ISSN 0733-9496/93/0004-0419,
- [12] Goulter, I. C. - Kazemi, A.: Analysis of Water Distribution Pipe Failure Types in Winnipeg, Canada, Journal of Transportation Engineering, 1989, Vol. 115, No. 2, p. 95 - 111, ISSN 0733-947X/89/0002-0095,
- [13] Hebák, P. - Hustopecký, J.: Vícerozměrné statistické metody s aplikacemi, 1. vydání, Praha, SNTL/ALFA, 1987, 456 str.,
- [14] Herz, R. K.: Exploring rehabilitation needs and strategies for drinking water distribution networks, Conference Master Plans for Water Utilities, 1998, ISBN 80-238-2460-0, str. 197-202,
- [15] Hestenes M. R. - Stiefel, E.: Methods of conjugate gradients for solving linear systems, National Bureau of Standards J. Res, 1952, vol. 49, str. 409-436,
- [16] Hirner, W.: Evaluation of water supply and distribution systems with performance indicators, Conference Master Plans for Water Utilities, 1998, ISBN 80-238-2460-0, str. 89-102,
- [17] Hlaváč, J.: Vektor vodního zdroje, habilitační práce, VUT FAST Brno, 1994

- [18] Ingeduld, P. - Vyčítal, J.: Matematické modelování vodovodních sítí, 1999, ročník 8, číslo 3, str. 1-3,
- [19] Jowitt, P. W. - Xu, Ch.: Predicting Pipe Failure Effects in Water Distribution Networks, Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, Vol. 119, No. 1, p. 18 - 31, ISSN 0733-9496/93/0001-0018,
- [20] Kershaw D.: The incomplete Choleski-Conjugate gradient method for the interative solution of systems of linear equations, Journal of Computational Physics, 1978, vol. 26, str. 43-65,
- [21] Kolář V. - Patočka C. - Bém J.: Hydraulika, 1. vydání, Praha, SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1983, 480 str.,
- [22] Koutková, H. - Moll, I.: Úvod do pravděpodobnosti a matematické statistiky, 1. vydání, Brno, MON, 1991, 140 str., ISBN 80-214-0237-5,
- [23] Kratochvíl, J. - Šerek, M.: Spolehlivost vodovodních sítí, Vodohospodářský časopis, 1983, 31, č. 6, str. 584 – 594,
- [24] Minařík, B.: Statistika I pro ekonomy a manažery, 1. vydání, Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1995,
- [25] Nacházel, K. - Patera, A. - Přenosilová, E. - Toman, M.: Vodohospodářské soustavy, 1. vydání, Praha, ČVUT Fakulta stavební, 1997, 75 str.,
- [26] Prax, P.: Využití optimalizačních metod při řízení systému odvodnění urbanizovaného celku, XI. mezinárodní vědecká konference, sekce vodní hospodářství a vodní stavby, VUT FAST v Brně, 18.-20.10.1999, Brno, str. 245-248,
- [27] Říha, J. a kol.: Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů, 1. vydání, Brno, PC-DIR, spol. s r.o., 185 str., ISBN 80-214-0827-8,
- [28] Salgado, R. - Todini, E. - O'Connell, P.E.: Comparison of the gradient method with some traditional methods for analysis of water supply distribution networks, 1987, International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester, U.K.,
- [29] Šerek, M. - Ošlejšek, J. - Tuhovčák, L. - Lhotáková, Z.: Komplexní projekt zdravotního inženýrství - Inženýrské sítě, 1. vydání, Brno, MON, 1989, 150 str.,
- [30] Šrytr, P. a kol: Intenzifikace provozu inženýrských sítí, dotisk 1. vydání, Praha, ČVUT v Praze, 1990, 144 stran,
- [31] Todini, E. - Pilati, S.: A gradient method for the analysis of pipe networks, International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK, September 8-10, 1987,
- [32] Tuhovčák, L. - Dvořák, P.: The used methods of master plan of water distribution system in Brno, Conference Master Plans for Water Utilities, 1998, ISBN 80-238-2460-0, str. 59-62,
- [33] Tuhovčák, L. - Višcor, P. – Valkovič, P. – Raclavský, J.: Expertní systém jako podpůrný prostředek pro plánování rekonstrukcí a sanací vodovodních řadů, 6. konference o bezvýkopových technologiích, Brno, 2000

- [34] Višcor, P. – Tuhovčák, L.: Spolehlivost vodovodních sítí, II. mezinárodní konference VODA Zlín 98, Zlín, 24.-26. březen 1998, str. 97-102
- [35] Votruba, L. - Heřman, J. - a kolektiv: Spolehlivost vodohospodářských děl, 1. vydání, Praha, Česká matice technická, 1993, 496 str., ISBN 80-209-0251-1,
- [36] Walpole, R. - Myers, R.: Probability and Statistics for Engineers and Scientists, MACHILLAN PUBLISHING COMPANY, New York, 1990,
- [37] Walski, M.: Predicting Pipe Failure Effects in Water Distribution Networks, Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, Vol. 119, No. 1, p. 402 - 404 - Discussion to this paper.

## 6. Abstract

The thesis deals with the theory of hydraulic modelling of water distribution systems, theory of reliability of water network, regressive analyses and proposal for the multi-criteria evaluation.

Based on the above theory, the study statistically evaluates factors that affect the failure rate in discrete sections (elements) of the water system, proposes the most important parameters suitable for monitoring in case of a failure, proposes an optimum method of evaluating the factors affecting the reliability of the water system and proposes a multi-criteria function that recommends the suitable sequence of repairs or reconstructions to be carried out on a section of a water pipeline network.

The introductory chapter deals with mathematic modelling of water flow in water systems. It covers the handles issues of mathematical modelling, purposes and objectives of modelling, mathematical formulations of given problems and developing of models of stabilised pressure flow in pipe networks.

Modelling of water flow in water systems aims at obtaining required information on pressure and flow rate ratios. Measurement conducted directly on the system enables collecting of precise information on the flow rate and pressure rations in the measurement post; however, in order to collect this data for each node on the system, it would be necessary to install a great number of measuring instruments on the pressure zone. This is technically feasible but hardly workable from the economic viewpoint. Thus, the mathematical modelling of the water system pressure zone is an essential means for determination of static head in all nodes of the water system. It is also important for calculating the immediate reliability of the water system and for determining water pressure in a spot in a main where a failure occurs.

In order to compute pressurised flow in water systems, use was made of the programmes ODULA 3.0 (MIKENET) and WAST 3.1 that were used to develop models of pressure zones 1.6 Barvičova and 3.7 Řečkovice.

The next chapter deals with failures on the water pipe networks. This concerns evaluation of breakdowns on the water system of the city of Brno. Only failures occurring on the water pipe network, referred to as „ failures on the mains“ are evaluated. This mainly covers statistic assessment of the effects of materials, age of pipes and hydrodynamic pressure in relation to the number of failures on the mains. While the effect of materials and age of water pipes was evaluated based on a statistic set of all failures occurring on the mains in Brno, the effect of hydrodynamic pressure was evaluated based on the case study of the pressure zone 1.6 Barvičova. The effect of age of the pipes and hydrodynamic pressure was evaluated by employing the regressive analysis. The computed regression equations are used in the thesis for multi-criteria evaluation of network sections.

Furthermore, the thesis deals with the reliability of water systems. Immediate overall reliability of the water system  $R_i$  is computed as a proportion of the number of nodes on the system (where at least the minimum pressure under ČSN 75 5401 standards is reached) to the total number of system nodes. What is important for a water system operator is to identify those sections that have the greatest impact on the reliability of water system pressure zones. In case of a failure of an  $i$  element (section) of the water system, this section (and, potentially other sections in dependence on the system topology and lay-out of closing valves) is put out of operation. Consequently, the immediate reliability  $R_i$  can be computed on the basis of the aforementioned relation. The immediate reliability  $R_i$ , i.e. value  $1 - R_i$  expresses the importance of the  $i$  section in the topological structure of the pressure zone. The higher the value  $1 - R_i$ , the greater the importance of the section within the pressure zone. The case study includes calculation of the immediate reliability of the water system in the 1.6 Barvičova pressure zone.

The thesis also covers multi-criteria evaluation of a section of the system. The multi-criteria function assesses each section of the system in terms of its age and material of pipes, its importance in the topological structure of the pressure zone of the water system and hydrodynamic pressure load. The objective of this exercise is to identify such a section of the water system that is evaluated in the maximum extent and whose replacement will result in the maximum improvement of the water system reliability.

The multi-criteria evaluation will make it possible to identify the most risky sections in terms of the potential occurrence of a failure. Their prompt reconstruction or placement will result in reduction in the failure rate and, consequently, in growing reliability of the water system.

In the near or more distant future, the multi-criteria function built on partial evaluation of discrete factors having the greatest influence on the failure rate as well as reliability of water systems will establish its position in the sphere of evaluating sections of the systems. The results of the study can be utilised when dealing with the issue of more optimum using of funds when planning reconstructions or repairs on the water pipelines.

## 7. ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno:	Ing. Pavel Dvořák
Datum a místo narození:	30. 12. 1969, Brno
Dosažené vzdělání:	VUT FAST Brno, stavební inženýr, státní závěrečná zkouška v roce 1993 s vyznamenáním
Specializace:	Vodní hospodářství a vodní stavby
Odborná praxe:	
10/1993	doktorandské studium na ÚVHO, FAST VUT v Brně
2/1997	odborný asistent na ÚVHO, FAST VUT v Brně
3/1998	technický pracovník Útvaru VHR a projekce, Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.
9/2000	Odborná stáž, Northumbrian Water Limited, Velká Británie

Ing. Pavel Dvořák po ukončení řádného studia na Fakultě stavební VUT v Brně nastoupil na interní doktorandské studium na Ústav vodního hospodářství obcí a zde působil v různých pracovních zařazeních až do roku 1998. Od března 1998 pracuje v akciové společnosti Brněnské vodárny a kanalizace jako technický pracovník na Útvaru vodohospodářského rozvoje a projekce. Zde se mimo jiné zabývá tvorbou matematických modelů vodovodních sítí.

Mezi jeho další aktivity lze zařadit analýzu poruchovosti vodovodního potrubí a zpracování a aktualizace mapy stáří vodovodních řadů s ohledem na skladbu akcí ve střednědobém plánu (SDP) oprav a rekonstrukcí.

Ing. Pavel Dvořák je autorem a spoluautorem těchto prací a studií:

- Generel vodovodní sítě města Brna, 1995
- Zásobování vodou oblasti Lesná-Soběšice-Sadová, 1998
- Zásobování vodou oblasti Ořešín, Útěchov, Jehnice, 1998
- Studie zásobování vodou MČ Slatina, (matematické modelování přivaděče Tábor - Stránská skála a tlakového pásma 3.11 - Slatina) 1999
- Studie zásobování vodou obce Soběšice (matematický model tlakového pásma 2.2.1.), 1999
- Matematický model tlakového pásma 3.7. - Řečkovice, 2000
- Posouzení uvažovaných profilů vodovodů u vodojemů Líšeň pro výhledový stav (matematické modely tlakových pásem Líšeň I a II včetně kalibrace), 2000

## 8. Seznam publikací

1. Dvořák, Tuhovčák

Simulační řízení provozu vodárenské soustavy

Katedra Informatiky, Fakulta elektrotechnická VŠB Ostrava

XVI. podzimní moravskoslezské kolokvium, Vybrané problémy simulačních modelů

Sborník přednášek, 6.-8. 9. 1994, odborný článek, strana 119-121,

2. Tuhovčák, Dvořák, Maděříč

Czas przepływu jako podstawa do modelowani jakości wody wodociagowej

(Conference of Technical University of Wroclav)

Polytechnicka Univerzita Wroclav, Poland, 1996

3. Tuhovčák, Dvořák

The used methods of master plan of water distribution system in Brno,

Conference on Master Plans for Water Utilities,

1st International Conference of IWSA, Praha, June 1998, ISBN 80-238-2460-0

4. Dvořák

Koncepce využití programu ODULA ve společnosti Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.

1. konference uživatelů programu ODULA (s mezinárodní účastí)

Praha, hotel Don Giovanni, březen 1999

5. Dvořák

Vliv stáří a materiálu vodovodního potrubí na počet poruch hlavního řadu

Mezinárodní konference VODA ZLÍN 2000, březen 2000

6. Višcor, P., Tuhovčák, L., Dvořák, P.:

Analýza spolehlivosti vodovodní sítě - analytický modul SUPSYS, Sborník SEMINÁŘ 2000 k výsledkům řešení výzkumného záměru VUT MSM 261100006, FAST VUT Brno 2000

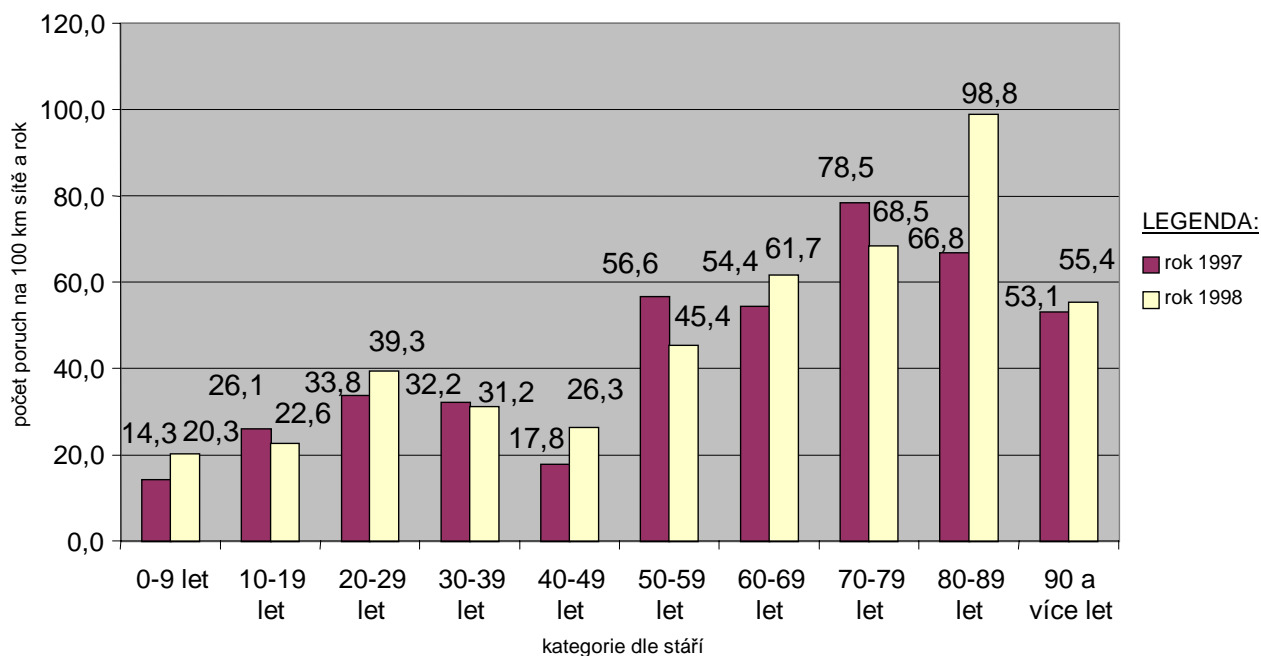
7. Dvořák, P., Tuhovčák, L.:

Multikriteriální hodnocení vodovodních řadů pro potřeby plánování jejich rekonstrukcí, Sborník SEMINÁŘ 2000 k výsledkům řešení výzkumného záměru VUT MSM 261100006, FAST VUT Brno 2000

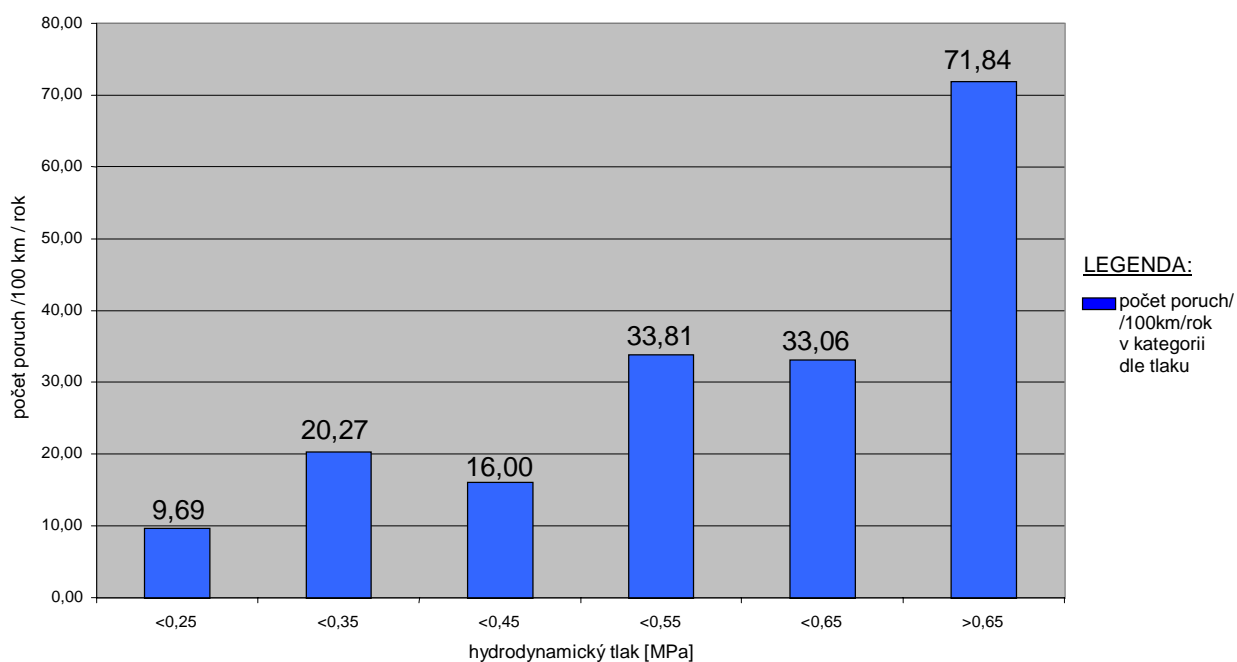


## 9. Příloha 1

**Obr. 14:** Počet poruch hlavního řadu v roce 1997 a 1998 na 100 km potrubí z šedé litiny do profilu DN 300 včetně za rok v závislosti na stáří



**Obr. 19:** Vliv hydrodynamického tlaku vody v potrubí na počet poruch hlavního řadu



## 10. Příloha 2

*Tab. 39: Výsledná kritériální funkce v roce 1996*

ID úseku	Poč. uzel	Konc. uzel	$h_1^i$	$h_2^i$	$h_3^i$	$h_4^i$	$H^i$
59	46	125	0,58	1,00	0,74	0,00	2,31
132	94	96	1,00	0,35	0,54	0,00	1,89
67	51	126	0,28	0,56	1,00	0,00	1,85
56	44	45	0,00	0,87	0,72	0,00	1,59
147	102	106	0,39	0,54	0,62	0,00	1,55
166	113	120	0,44	0,48	0,59	0,00	1,52
61	48	46	0,00	0,75	0,74	0,00	1,49
28	23	25	0,15	0,74	0,55	0,01	1,45
63	50	49	0,10	0,61	0,74	0,00	1,44
62	49	48	0,00	0,68	0,74	0,00	1,41
118	85	84	0,58	0,22	0,59	0,00	1,40
27	23	24	0,14	0,69	0,55	0,01	1,39
146	103	105	0,19	0,52	0,63	0,00	1,35
149	107	108	0,20	0,58	0,54	0,00	1,33
1	1	2	0,00	0,00	0,32	1,00	1,32

*Tab. 40: Výsledná kritériální funkce v roce 1997*

ID úseku	Poč. uzel	Konc. uzel	$h_1^i$	$h_2^i$	$h_3^i$	$h_4^i$	$H^i$
59	46	125	0,58	1,00	0,96	0,00	2,53
132	94	96	1,00	0,35	0,70	0,00	2,06
56	44	45	0,00	0,87	0,94	0,00	1,81
61	48	46	0,00	0,75	0,96	0,00	1,71
166	113	120	0,44	0,48	0,77	0,00	1,70
63	50	49	0,10	0,61	0,96	0,00	1,66
62	49	48	0,00	0,68	0,96	0,00	1,63
28	23	25	0,15	0,74	0,72	0,01	1,62
118	85	84	0,58	0,22	0,77	0,00	1,58
27	23	24	0,14	0,69	0,72	0,01	1,56
147	102	106	0,20	0,54	0,81	0,00	1,54
146	103	105	0,19	0,52	0,82	0,00	1,54
144	103	104	0,26	0,43	0,82	0,00	1,51
32	26	28	0,00	0,75	0,69	0,01	1,45
1	1	2	0,00	0,00	0,42	1,00	1,42

*Pozn: Úseky, které jsou v Tab. 39 a 40 označeny šedou barvou, byly v letech 1997 a 1998 rekonstruovány.*