



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ
INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

STOCHASTICKÉ MODELOVÁNÍ SPOTŘEBY
VODY VE VODOVODNÍ SÍTI
STOCHASTIC MODELING OF WATER CONSUMPTION IN THE WATER SUPPLY
NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Josef Kopecký

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Josef Kopecký
Název	Stochastické modelování spotřeby vody ve vodovodní síti
Vedoucí práce	Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] INGEDULD, P., 2003: Modeling of Water Distribution Systems with MIKE NET, DHI Water & Environment, 2003
- [2] Rossman, A. L., 2000: EPANET 2 Users Manual, United States Environmental Protection Agency US E.P.A., USA, 9/2000
- [3] National Research Council of the national academies, 2006: Drinking Water Distribution Systems – Assessing and reducing Risks, the National Academic Press, Wasington D.C., ISBN: 0-309-10306-1, 2006

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V úvodní části bude provedena rešerše odborné literatury v problematice stochastického modelování spotřeby vody ve vodovodní síti. V rámci praktické části bude provedena hydraulická analýza skutečné vodovodní sítě s využitím toho způsobu modelování s velmi malým časovým krokem. Následně bude provedeno srovnání výsledků hydraulické analýzy, které se získají při využití deterministického a stochastického přístupu při stanovení uzlových odběrů v simulačním modelu vodovodní sítě. Práce bude obsahovat část teoretickou a praktickou. Pro řešení bude využito softwarových nástrojů pro hydraulickou analýzu vodovodních sítí.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá stochastickým modelováním spotřeby vody ve vodovodní síti. V úvodní části je vytvořena rešerše, kde jsou představeny dva různé přístupy stochastického modelování spotřeby vody. V praktické části je popsána tvorba deterministického hydraulického modelu a jeho kalibrace. Do tohoto modelu jsou poté vloženy vygenerované stochastické křivky odběru vody s malým časovým krokem 1 minuta. Každé domácnosti je přidělena unikátní křivka odběru vody. Poté byla provedena hydraulická analýza. V závěru práce je představeno srovnání deterministického a stochastického přístupu. Ze srovnání vyplývá, že modelování s malým časovým krokem nemá velký vliv na tlakové poměry ve vodovodní síti, ale má zásadní vliv na maximální průtoky a rychlosti, které se vyskytují v úsecích hydraulického modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

hydraulická analýza, vodovodní síť, modelování spotřeby vody, stochastická spotřeba vody, malý časový krok

ABSTRACT

This thesis deals with stochastic water demand modelling in the water supply network. In the opening section, a research is created, where two different approaches to stochastic modelling of water consumption are presented. The practical part describes the creation of a deterministic hydraulic model and its calibration. Generated stochastic water demand patterns with a small time step of 1 minute, are then inserted into this model. Each household is assigned with a unique water demand pattern. Then a hydraulic analysis was done. A comparison of deterministic and stochastic approaches is presented at the end of the thesis. The comparison shows, that small-time step modelling does not have a big impact on the pressure ratios in the water supply network, but has a huge impact on the maximum flows and speeds occurring in links of the hydraulic model.

KEYWORDS

hydraulic analysis, water distribution system, water demand modeling, stochastic water demand, small time step

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Josef Kopecký *Stochastické modelování spotřeby vody ve vodovodní síti*. Brno, 2020. 74 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Stochastické modelování spotřeby vody ve vodovodní síti* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 3. 12. 2020

Bc. Josef Kopecký
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Stochastické modelování spotřeby vody ve vodovodní síti* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 12. 2020

Bc. Josef Kopecký
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Ručkovi Ph.D. za podnětné rady a připomínky, pomocí nichž jsem byl schopný dokončit závěrečnou práci mého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	MATEMATICKÝ ZÁKLAD PRO MODELY VODOVODNÍCH SÍTÍ	11
2.1	Model	11
2.2	Matematický model	11
2.2.1	Postup při výběru vhodného matematického modelu pro vodní hospodářství.....	11
2.2.2	Počáteční a okrajové podmínky	11
2.3	Základní rovnice mechaniky kapalin	12
2.3.1	Rovnice kontinuity.....	12
2.3.2	Rovnice hybnosti	13
2.3.3	Stavové rovnice	13
2.3.4	Navier-Stokesovy rovnice a Eulerovy rovnice	14
2.3.5	Zákon zachování energie	15
2.4	Tlakové systémy trubních sítí	15
2.4.1	Bernoulliho rovnice	15
2.4.2	Zjednodušující předpoklady.....	16
2.5	Modelování spotřeby vody	18
2.5.1	Deterministický přístup.....	18
2.5.2	Stochastický přístup.....	18
3	STOCHASTICKÉ MODELOVÁNÍ SPOTŘEBY VODY	25
3.1	Simulace spotřeby vody na přípojce.....	25
3.1.1	Generování času začátku pulsů a počet pulsů.....	26
3.1.2	Generování intenzity pulsů a doby trvání pulsů log-normálním rozdělením.....	27
3.1.3	Součet souběžně běžících pulsů.....	27
3.2	Simulace spotřeby vody v objektu.....	28
3.2.1	MKZ u rezidenčních budov	28
3.2.2	MKZ u nerezidenčních budov	33
3.2.3	Možnosti využití MKZ	36
3.3	Srovnání metod POP a MKZ.....	38
4	STOCHASTICKÝ MODEL VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE VELKÝ BERANOV	39
4.1	Základní informace o obci.....	39
4.2	Vodovodní síť obce	40
4.2.1	Spotřebišťe Velký Beranov	42
4.3	Hydraulický model vodovodu Velký Beranov.....	42
4.3.1	Analýza spotřeby vody	43
4.3.2	Měrná kampaň	44
4.3.3	Kalibrace a verifikace	45
4.4	Stochastické křivky odběru vody.....	46
4.4.1	Demografické údaje.....	47

4.4.2	Koncová zařízení	49
4.4.3	Charakteristika spotřeby vody	50
4.4.1	Simulace stochastických křivek	53
4.4.2	Příklady stochastických křivek	54
4.5	Srovnání výsledků stochastického a deterministického hydraulického modelu.....	59
4.5.1	Maximální hydrostatický tlak	60
4.5.2	Minimální hydrodynamický tlak.....	61
4.5.3	Maximální rychlost proudění.....	62
4.5.4	Maximální průtoky	63
4.5.5	Maximální stáří vody	63
5	ZÁVĚR.....	65
6	POUŽITÁ LITERATURA.....	66
	SEZNAM TABULEK	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	70
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	72
	SUMMARY	74

1 ÚVOD

Hydraulické modely vodovodních sítí jsou čím dál častěji používány z důvodu modelování jakosti vody ve vodovodním potrubí. Sledují se jak rozpuštěné látky například rezidua chloru, tak i nerozpuštěné látky, které sedimentují v potrubí a jsou příčinou vzniku zákalových událostí. Pro modelování pohybu látek ve vodovodním potrubí, je klíčová znalost odběru vody z vodovodní sítě. Odběry pitné vody z vodovodní sítě ale mají přirozeně stochastickou povahu, a proto není snadné je modelovat. [35,36]

Hydraulické modely jsou většinou zpracovávány s využitím deterministických křivek odběru vody. Tyto křivky jsou vypracovány z hodnot průtoků měřených kontinuálně po celý rok průtokoměry. Měřicí zařízení průtoků umístěné na vodovodní síti, tuto síť rozdělují na měřicí okrsky. Pro každý měřicí okrsek je pak v modelu přiřazena jedna křivka průběhu spotřeby vody. Všechny uzlové odběry v měřicím okrsku kvazi-dynamického modelu jsou při výpočtu v jednotlivých časových krocích násobeny stejným koeficientem odběru vody. Tento přístup vede k hydraulickému modelu vodovodní sítě, kde téměř nedochází ke změnám směru proudění pitné vody v potrubí. Analýzy jakosti vody v modelech s deterministickým přístupem modelování spotřeby vody tak vedou k hrubým odhadům. [35,36]

Vzhledem k potřebě lepšího simulování odběru vody z vodovodní sítě, vzniklo několik metod stochastického modelování spotřeby vody. Tato práce se věnuje dvěma metodám na jejichž základě vznikly softwarové prostředky.

Prvním přístupem stochastického modelování spotřeby vody je metoda Poissonova obdélníkového pulsu. V této metodě se modeluje spotřeba pro domácnost jako celek a metoda vyžaduje osazení měřicích zařízení na vzorku budov modelované obce. Naměřené hodnoty jsou statisticky zpracovány a jsou poté použity na simulaci odběrů vody pro zbytek domácností v hydraulickém modelu. Výsledné stochastické křivky odběru vody mají charakter krátkých pulsů, většinou kratších než 1 minuta, proto se tímto přístupem obtížně simuluje například sprchování, které trvá déle. [35]

Druhým popisovaným přístupem je metoda koncových zařízení. Odběry vody jsou simulovány na úrovni jednotlivých zařizovacích předmětů v domácnosti. Metoda vyžaduje demografické údaje, statistické údaje o návycích obyvatel a technické údaje k celkem osmi typům koncových zařízení. U této metody není potřeba provádět měrnou kampaň.

Metoda koncových zařízení je použita pro stochastické modelování spotřeby vody v praktické části této diplomové práce. Metoda je aplikována na hydraulický model vodovodní sítě obce Velký Beranov. K vodovodní síti v obci je připojeno celkem 237 domácností, pro které byly vygenerovány stochastické křivky odběru vody. V závěru práce je hydraulický model se stochastickou spotřebou vody porovnán se spotřebou deterministickou.

2 MATEMATICKÝ ZÁKLAD PRO MODELY VODOVODNÍCH SÍTÍ

2.1 MODEL

Je účelové zjednodušené zobrazení reálného nebo abstraktního světa. Míra zjednodušení ovlivňuje přesnost řešení, chápanou jako míru souhlasu mezi chováním modelu a skutečností. [2]

Rozdělení: abstraktní – grafické, matematické
materiální – fyzikální

[4]

2.2 MATEMATICKÝ MODEL

Matematický model obvykle popisuje systém s pomocí množiny vstupních a výstupních proměnných, dále parametrů a množiny rovnic, které určují stavy systému a vztahy mezi proměnnými a parametry. Proměnné reprezentují nějaké vlastnosti systému. Na model se můžeme dívat také jako na množinu funkcí, která popisuje vztahy mezi různými proměnnými.

[3]

2.2.1 Postup při výběru vhodného matematického modelu pro vodní hospodářství

Pro výběr vhodného matematického modelu je nutno zohlednit řadu okolností, kterými je výběr modelu ovlivněn. Jedná se především o následující faktory.

- Definice cílů; specifikovat žádanou přesnost modelu; předpokládaná doba, po kterou má model sloužit svému účelu.
- Podrobná analýza problému a z toho vyplývající nároky na množství potřebných dat; vyhodnotit materiální, technické a personální možnosti.
- Finanční možnosti objednatele a časové nároky zpracovatele modelu.
- Na základě předchozích faktorů vybrat kolektiv pracovníků pověřených sestavením modelu.
- Použití vhodného softwaru a zajištění nutného hardwaru, který svým výkonem odpovídá zvolenému softwaru. [2]

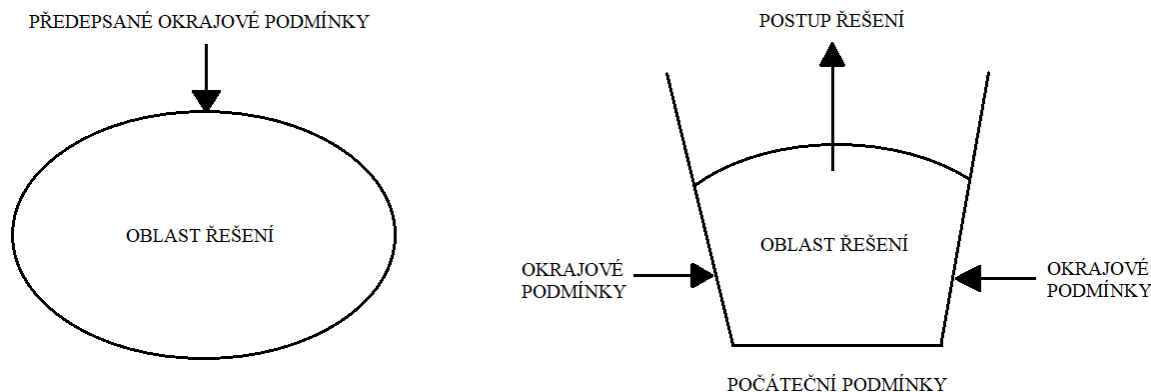
2.2.2 Počáteční a okrajové podmínky

Okrajové úlohy

Řešení se realizuje v uzavřené oblasti, platí zde základní rovnice a na hranici úlohy jsou dány okrajové podmínky. Jedná se především o časově nezávislé úlohy.

Počáteční úlohy

Jsou dány okrajové podmínky, na hranici určující topologický tvar oblasti, pro všechny řešené časové úrovně. Časový interval je ohraničen pouze na spodní hranici. [2]



Obr. 2.1 zleva-okrajová úloha, počáteční úloha [2]

2.3 ZÁKLADNÍ ROVNICE MECHANIKY KAPALIN

Mechanika kapalin patří do mechaniky tekutin, která je součástí obecné mechaniky. [2]

Tekutiny zahrnují kapaliny a plyny. Společnou vlastností tekutin je, že nemají stálý tvar, částice se od sebe snadno oddělují. Reálná tekutina je málo stlačitelná a díky tření nemá např. v trubici stejnou rychlost pohybu v celém průřezu, uprostřed se pohybuje rychleji. Ideální tekutina má stejnou rychlost v celém průřezu a je nestlačitelná. [5]

2.3.1 Rovnice kontinuity

Principem kontinuity proudění je zákon zachování hmotnosti proudící kapaliny. Z tohoto zákona vyplývá, že rozdíl hmotností kapalin do prvku vtékající a z prvku vytékající za určitý čas dt se musí rovnat časové změně hmotnosti kapaliny v tomto prvku obsažené. V hydraulice je zákon zachování hmotnosti uváděný jako rovnice kontinuity. [6]

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

Kde: $\rho(p(x,y,z,t), T(x,y,z,t))$ hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

$v_i(x,y,z,t)$ složky vektoru rychlosti v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

$x_i(t)$prostorové souřadnice, jsou funkcemi času t

Pro naši práci uvažujeme vodu proudící v potrubí jako kapalinu ideální, tedy nestlačitelnou. Rovnice tedy nabyde tvaru (2.2), kde $\rho = \text{konst}$. [2]

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

Kde $v_x(x,t)$vektor rychlosti [m.s⁻¹]
 $x_i(t)$prostorové souřadnice

2.3.2 Rovnice hybnosti

Podmínkou rovnice hybnosti je izolovaná soustava těles = soustava těles, ve které dochází ke změnám hybnosti těles, pouze jejich vzájemným působením (vnější síly na tělesa nepůsobí). Celková hybnost je dána vektorovým součtem hybností jednotlivých těles. Celková hybnost izolovaných těles se vzájemným silovým působením těles nemění (zůstává konstantní). [7]

Rovnice (2.2) dle [6].

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt} \quad (2.3)$$

Kde: σ_{ij}tenzor napětí
 ρhustota kapalin [kg.m⁻³]
 $f_i(x,y,z,t)$vektory objemového zatížení f vztažené na jednotku hmotnosti
 $v_i(x,y,z,t)$složky vektoru rychlosti v

2.3.3 Stavové rovnice

Stavové rovnice (konstitutivní vztahy), pomocí kterých propojujeme dva výše zmíněné pohybové zákony, vyjadřují závislost mezi tenzorem napětí σ_{ij} a tenzorem rychlosti přetvoření ϵ_{ij} . Pro newtonovskou kapalinu vyjadřují stavové rovnice napětí σ_{ij} v kapalině jako lineární funkci tlaku p a rychlosti přetvoření ϵ_{ij} . [6]

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda(\rho, T)\epsilon_v + 2\mu(\rho, T)\epsilon_{ij} \quad (2.4)$$

Kde: $p(x,y,z,t)$tlak
 ϵ_vtenzor rychlosti objemového přetvoření
 $\lambda(\rho, T)$koeficient objemového přetvoření
 $\mu(\rho, T)$koeficient dynamické viskozity
 δ_{ij}Kroneckerovo delta

Tenzor rychlosti přetvoření ϵ_{ij} se dá vypočítat jako lineární kombinace prvních parciálních derivací složek vektoru rychlosti v_i . [2]

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

Kde: $v_i(x,y,z,t)$složky vektoru rychlosti v
 $x_i(x,y,z,t)$prostorové souřadnice

Tenzor rychlosti objemového přetvoření je definován: [2]

$$\varepsilon_v = \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

Kde: $v_i(x,y,z,t)$složky vektoru rychlosti v

$x_i(x,y,z,t)$prostorové souřadnice

Pro objemově stálé kapaliny (zanedbáním objemového přetvoření), nabude rovnice (2.4) tvaru (2.7)

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu(\rho, T)\varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

2.3.4 Navier-Stokesovy rovnice a Eulerovy rovnice

Rovnice byly nezávisle na sobě odvozeny Claude Louis Marie Henri Navierem v roce 1821 a George Gabriel Stokesem o 24 let později v roce 1845. Tyto diferenciální rovnice jsou obecnými rovnicemi popisujícími pohyb vazké nestlačitelné kapaliny a vyjadřují pro jednotku hmotnosti protékající částice kapaliny vztah mezi silami objemovými, tlakovými a setrvačnými.

Navier-Stokesovy rovnice získáme dosazením stavových rovnic do rovnice hybnosti. Určitého zjednodušení lze také dosáhnout použitím rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu. [2]

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2.8)$$

Kde: $f_i(x,y,z,t)$vektor objemového zatížení f vztaženého na jednotku hmotnosti

$v_i(x,y,z,t)$složky vektoru rychlosti v

$x_i(x,y,z,t)$prostorové souřadnice

$p(x,y,z,t)$tlak

ρhustota kapaliny

μkoeficient dynamické viskozity

Jestliže uvažujeme ideální kapalinu, která je nestlačitelná, objemově stálá a nevazká, nepůsobí v ní smykové napětí, tj. $\mu=0$, nabudou rovnice tvaru: [2]

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2.9)$$

Kde: $f_i(x,y,z,t)$vektor objemového zatížení f vztaženého na jednotku hmotnosti

$v_i(x,y,z,t)$složky vektoru rychlosti v

$x_i(x,y,z,t)$prostorové souřadnice

$p(x,y,z,t)$tlak

ρhustota kapaliny

2.3.5 Zákon zachování energie

Pro účely modelování neizotermických dějů můžeme použít rovnici zákona zachování energie.[6] Definice říká, že při všech dějích v soustavě těles se mění jedna forma energie v jinou, nebo přechází z jednoho tělesa na druhé. Celková energie soustavy těles se však nemění. energii nelze vytvořit ani zničit a její velikost je v uzavřené soustavě stále stejná. [8]

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + v_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \lambda \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i^2} + S_\Phi \quad (2.10)$$

Kde: Φpředstavuje energii (tepelná, kinetická turbulentní, ...)

λdifúze

S_Φobjemový zdroj

2.4 TLAKOVÉ SYSTÉMY TRUBNÍCH SÍTÍ

Vodovodní síť je tlakový trubní systém, při jehož hydraulické analýze se s výhodou využívá metod matematického modelování. Cílem hydraulické analýzy je získání potřebných informací o tlakových a průtokových poměrech v těchto sítích zejména pro potřeby provozování a řízení stávajících distribučních systémů, projektování nových trubních rozvodů a také pro potřebu jejich rekonstrukcí, případné rozšiřování a napojování nových odběratelů. Měření přímo na síti sice umožňuje získat informace o průtokových a tlakových poměrech přímo v místě měření, ale k získání těchto údajů pro celou síť by bylo nutné osadit na síti velké množství měřících zařízení. To je sice technicky proveditelné, ale ekonomicky velmi náročné.

Velmi vhodné je používat k získání informací o průtokových a tlakových poměrech v síti matematický model, který je verifikován a zkalibrován na základě výsledků měření na skutečné síti ve vhodně a účelně zvolených bodech. Tento způsob poskytuje sice méně přesné informace než přímé měření, podává však informace o celé síti. [1]

Nejnámější rovnicí používanou u tlakových trubních systémů je Bernoulliho rovnice.

2.4.1 Bernoulliho rovnice

Pro výpočty v tlakových trubních sítích používáme Bernoulliho diferenciální rovnici pro neustálý pohyb vazké nestlačitelné kapaliny, na níž působí silové pole gravitace. [2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\tau}{\rho g} \frac{dO}{dA} = 0 \quad (2.11)$$

Kde: zpolohová výška osy potrubí [m]

xprostorová souřadnice ve směru osy potrubí [m]

ptlak [Pa]

ρhustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

vrychlost kapaliny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

τtečné napětí kapaliny [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$]

Oomočený obvod potrubí [m]

Aprůtočná plocha [m^2]

αCoriolisovo číslo

Ve vodovodním potrubí uvažujeme ustálený pohyb vody. Rychlost proudění se nebude v čase měnit, tím získáme tvar (2.12).

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g} + h_z = konst. \quad (2.12)$$

Kde: $\frac{p}{\rho g}$tlaková výška [m]

$\frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$ rychlostní výška [m]

h_zztrátová výška [m]

Ztrátová výška se dělí na 2 části, první z nich je ztráta třením po délce. Pro její výpočet používáme Darcy-Weisbachovu rovnici.

$$h_t = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.13)$$

Kde: λsoučinitel tření

Ldélka potrubí [m]

Dvnitřní průměr potrubí [m]

h_tztráta třením [m.v.s.]

Druhým typem ztrátové výšky jsou místní ztráty. Místní ztráty se počítají jako součet místních odporových součinitelů. Odpory se nacházejí tam, kde může na síti docházet ke zpomalení proudění vody, např. v ohybech potrubí, na uzávěrech (i v otevřené poloze) a další. Místní ztráty lze také nahradit tzv. ekvivalentní délkou potrubí, která se připočítá k délce úseku.

$$h_m = \sum \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.14)$$

Kde: $\sum \xi$součet odporových součinitelů

h_mmístní ztráty [m.v.s.]

2.4.2 Zjednodušující předpoklady

Přesnost matematického modelu je závislá na přesnosti vstupních parametrů. Jde o to s jakou přesností jsme schopni fyzikálně popsat reálnou předlohu modelu, na výběru vhodných matematických postupů a vzorců. Popsat některé děje může být velice náročné a

zdlouhavé, proto se nevyhneme jejich zjednodušení. Míra zjednodušení určuje míru přesnosti modelu. [2]

Předpoklad stacionarity

Jedná se o častý typ zjednodušení. Používá se v případě, kdy je změna okrajových podmínek a dalších parametrů modelu v čase malá. Neovlivní tak charakter proudění. Tohoto zjednodušení tak využíváme i při tvorbě modelu vodovodní sítě, kdy se teplota vody v potrubí nebo topologie sítě v čase nemění. Předpokladu stacionarity lze využít i v případě, kdy nemáme dostatek časoprostorových dat z měření pro spolehlivou kalibraci a verifikaci modelu. [2]

Snížení rozměrovosti úlohy

Známe-li předpokládaný směr a charakter proudění, je možné zanedbat složky vektoru rychlosti v některém ze směrů. Snížením rozměrovosti úlohy snížíme náročnost na výkon výpočetní techniky. Při modelování vodovodních a kanalizačních sítí používáme jednorozměrné schematizace. U těchto sítí zanedbáváme složky vektoru rychlosti kolmé na osu potrubí. [2]

Tvar a rozměry náhradní oblasti

Tvar oblasti, kterou modelujeme, může být ve skutečnosti velmi geometricky složitý. V závislosti na použitém postupu při tvorbě modelu, může být nutné tvar řešené oblasti zjednodušit. Menší přesnosti lze dosáhnout při nedostatečném počtu uzlů a dělení řešené oblasti. Můžeme se také setkat s nepřesnými, nebo málo podrobnými podklady, které nepříznivě ovlivňují výslednou přesnost modelu. [2]

Vlastnosti kapaliny

Základním médiem je ve vodním hospodářství voda. Nejčastější předpoklady pro vodu proudící v potrubí jsou:

- homogenita a izotropie vody
- nestlačitelnost
- konstantní hustota nezávislá na teplotě nebo množství nesených částic

[2]

2.5 MODELOVÁNÍ SPOTŘEBY VODY

2.5.1 Deterministický přístup

Deterministickým přístupem rozumíme takový, ve kterém veličiny, které popisujeme, náhodně nemění svůj stav. V našem případě je tímto stavem spotřeba vody. Změny v průtocích vody během dne jsou u deterministického modelu podloženy měřeními na vodovodní síti. Stav spotřeby vody tedy není v časovém kroku náhodná veličina. [19]

Na vodovodní síti jsou v běžné praxi osazeny průtokoměry s přenosem dat. Tyto průtokoměry shromažďují a odesílají data o průtocích potrubím provozovateli vodovodní sítě. Taková zařízení jsou nainstalována celoročně u vybraných objektů na vodovodní síti a tu rozdělují na měřicí okruhy. Data o průtocích jsou pak typicky s intervalem 1 hodina. Naměřená data jsou využita pro analýzu průtoků zpravidla pro pracovní a nepracovní dny a aplikována do hydraulického modelu vodovodní sítě. Pokud požadujeme hydraulický model vodovodní sítě s kratším časovým intervalem, než je jedna hodina, musí se tomu přizpůsobit analýza časové řady.

2.5.2 Stochastický přístup

Spotřeba pitné vody v každém časovém kroku má náhodný charakter. Spotřebu vody ve spotřebišti si můžeme představit jako stovky drobných odběrů, každý odběr je použití vody z vodovodní sítě. Ranní hygiena, příprava jídla, praní prádla a spousta dalších každodenních činností, při kterých využíváme vodu z vodovodních řadů, jsou pulsy s náhodnou dobou začátku, délkou trvání a intenzitou. Parametry jsou to sice náhodné, ale můžeme určit s jakou pravděpodobností nastanou a přiřadit k nim vhodnou křivku rozdělení.

Stochastické modelování spotřeby vody nám umožňuje tvorbu hydraulických modelů vodovodních sítí s velmi malým časovým krokem. Takový krok se pohybuje v řádu minut nebo i sekund, přičemž v takto krátkých intervalech se běžně na vodovodní síti neprovádí měření. Krátký časový interval v hydraulickém modelu nám dává lepší představu o proudění v uzavřeném tlakovém systému vodovodní sítě.

Rozdělení pravděpodobnosti

Jevy lze ohodnotit podle velikosti naděje, že nastanou, tedy podle toho, jakou mají pravděpodobnost nastoupení. Pravděpodobnost je objektivní vlastnost jevu, na pozorovateli nezávislou. Existuje, ať už ji umíme určit, či nikoli. [20, 29]

Rozdělení pravděpodobnosti popisuje jednoznačně přiřazení pravděpodobnosti všem možným výsledkům náhodné veličiny. Výskyt náhodné veličiny podléhá určitým zákonitostem. Náhodná veličina může být diskrétní (nabývá jednotlivých hodnot z intervalu) nebo spojitá (nabývá všech hodnot z intervalu). [21, 22]

Následující vybraná rozdělení pravděpodobnosti jsou používána v metodách tvorby stochastických křivek odběru vody. Konkrétní použití daných rozdělení nalezneme v tabulkách v kapitole 3.

Vybraná spojitá rozdělení pravděpodobnosti

Rovnoměrné rozdělení

Všechny sledované náhodné veličiny se vyskytují se stejnou pravděpodobností.

[24]

Hustota pravděpodobnosti:

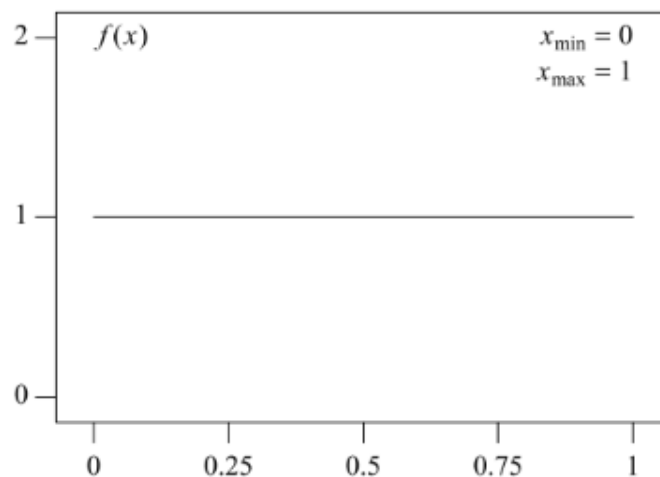
$$f(x) = \frac{1}{b - a} \quad (2.15)$$

Střední hodnota:

$$E(X) = \frac{a + b}{2} \quad (2.16)$$

Rozptyl:

$$D(X) = \frac{(b - a)^2}{12} \quad (2.17)$$



Obr. 2.2 Hustota pravděpodobnosti rovnoměrného rozdělení [24]

Normální rozdělení

Hodnoty sledovaných veličin se shlukují symetricky kolem střední hodnoty. Křivka hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení je též známá pod názvem Gaussova křivka.

[21]

Hustota pravděpodobnosti:

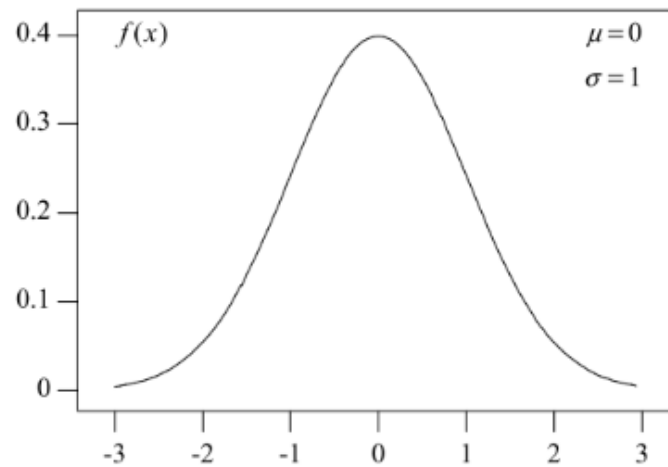
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.18)$$

Střední hodnota:

$$E(X) = \mu \quad (2.19)$$

Rozptyl:

$$D(X) = \sigma^2 \quad (2.20)$$



Obr. 2.3 Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení [24]

Logaritmicko-normální rozdělení

Náhodná veličina X má logaritmicko-normální (někdy také log-normální) rozdělení tehdy, pokud veličina $Y = \ln(X)$ má rozdělení normální. [21]

Hustota pravděpodobnosti:

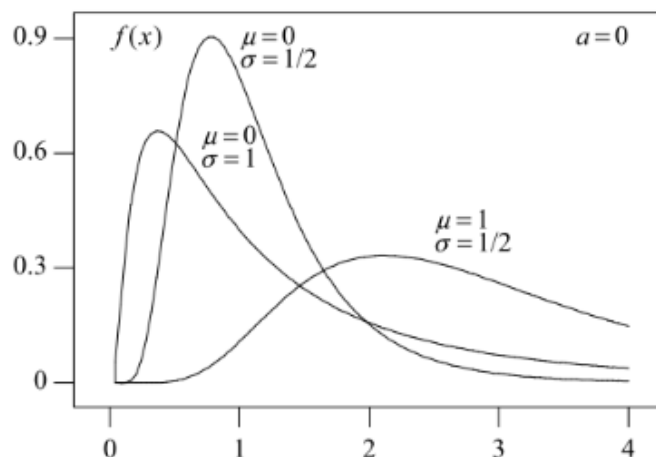
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\sigma} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.21)$$

Střední hodnota:

$$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (2.22)$$

Rozptyl:

$$D(X) = e^{2\mu + 2\sigma^2} - e^{2\mu + \sigma^2} \quad (2.23)$$



Obr. 2.4 Hustota pravděpodobnosti logaritmicko-normálního rozdělení [24]

Chí-kvadrát rozdělení

Toto rozdělení má jeden parametr n , který se nazývá počet stupňů volnosti. Počet náhodných veličin v součtu druhých mocnin značí počet stupňů volnosti. Využívá se ve statistice. [24]

Hustota pravděpodobnosti:

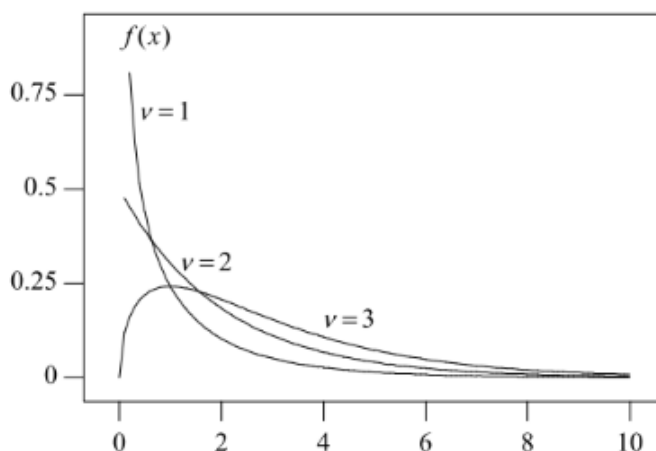
$$f(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{\frac{n-2}{2}} e^{-\frac{x}{2}} \quad (2.24)$$

Střední hodnota:

$$E(X) = n \quad (2.25)$$

Rozptyl:

$$D(X) = 2n \quad (2.26)$$



Obr. 2.5 Hustota pravděpodobnosti chí-kvadrát rozdělení [24]

Vybraná diskrétní rozdělení pravděpodobnosti

Poissonovo rozdělení

Popisuje počet výskytů pozorované události za jednotku času. Má pouze jeden parametr λ . [21]

Hustota pravděpodobnosti:

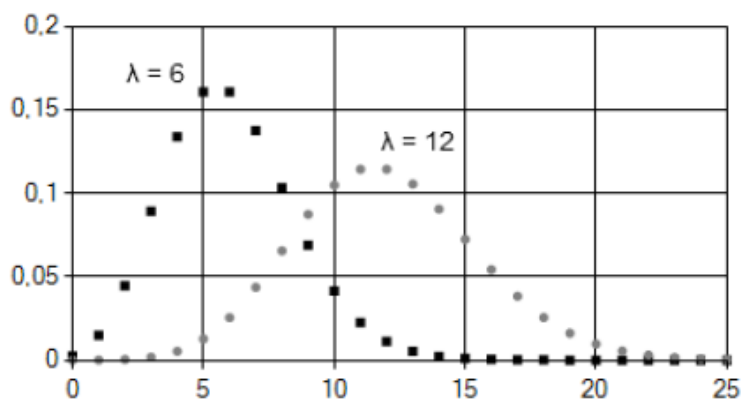
$$p(x) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} \quad (2.27)$$

Střední hodnota:

$$E(X) = \lambda \quad (2.28)$$

Rozptyl:

$$D(X) = \lambda \quad (2.29)$$



Obr. 2.6 Hustota pravděpodobnosti Poissonova rozdělení [25]

Binomické rozdělení

Toto rozdělení se používá k nezávislému výběru. Má dva parametry n a p , kdy p nabývá pouze hodnot 0 nebo 1 (událost nastala/nenastala) a n je počet experimentů. [21,25]

Hustota pravděpodobnosti:

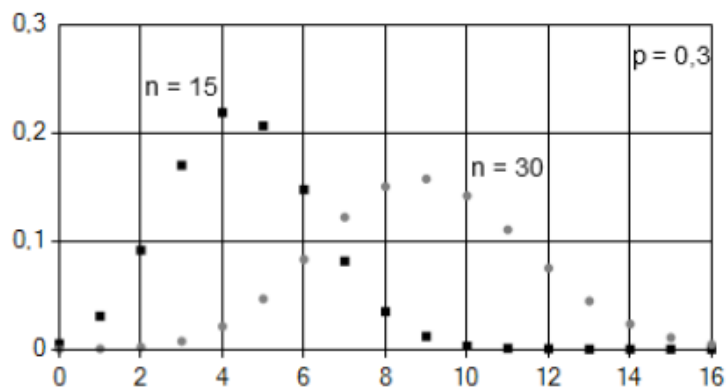
$$p(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad (2.30)$$

Střední hodnota:

$$E(X) = np \quad (2.31)$$

Rozptyl:

$$D(X) = np(1-p) \quad (2.32)$$



Obr. 2.7 Hustota pravděpodobnosti binomického rozdělení [25]

Negativní binomické rozdělení

Negativně binomické rozdělení opakovaných nezávislých pokusů ukazuje, kolik neúspěchů x předchází n -tému pokusu. [25]

Hustota pravděpodobnosti:

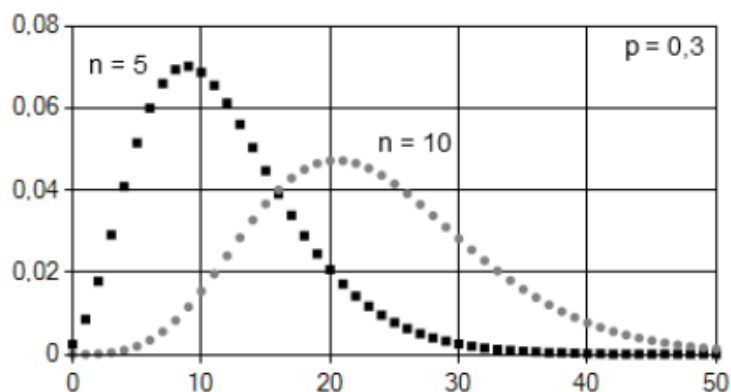
$$p(x) = \frac{(n + x - 1)!}{x! (n - 1)!} p^n (1 - p)^x \quad (2.33)$$

Střední hodnota:

$$E(X) = \frac{n(1 - p)}{p} \quad (2.34)$$

Rozptyl:

$$D(X) = \frac{n(1 - p)}{p^2} \quad (2.35)$$

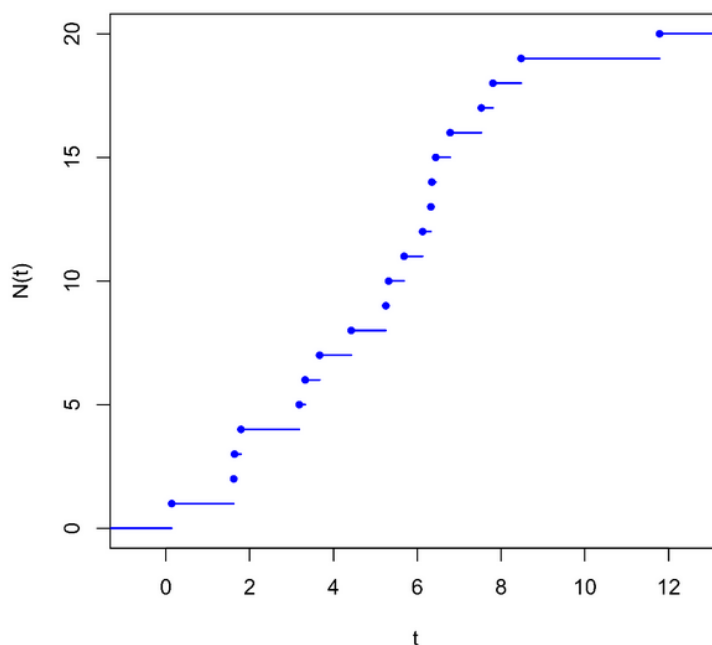


Obr. 2.8 Hustota pravděpodobnosti negativně binomického rozdělení [25]

Poissonův proces

Poissonův proces vyjadřuje počet událostí, které se staly od počátku sledování do daného časového kroku. Jde o proces náhodný, se spojitým časem a množinou stavů. Tento proces má následující vlastnosti:

- Statistické vlastnosti náhodných procesů nezávisí na minulých hodnotách
- Je zanedbatelná pravděpodobnost, že dvě a více událostí nastanou současně
- Pravděpodobnost příchodu události v intervalu $t+\Delta t$, nezávisí na historii času t [23]



Obr. 2.9 Trajektorie Poissonova procesu [21]

Trajektorie Poissonova procesu ukazuje příchod sledované události. Na svislé ose je počet událostí. Na vodorovné ose je čas, kdy událost nastala. V případě použití Poissonova procesu při stochastickém modelování spotřeby vody je sledovanou událostí odběr vody z vodovodní sítě.

Vlastností Poissonova procesu využívají obě metody tvorby stochastických křivek odběru vody popisované v následujících kapitolách.

3 STOCHASTICKÉ MODELOVÁNÍ SPOTŘEBY VODY

V této kapitole se podíváme na modelování spotřeby vody se stochastickým přístupem pomocí dvou různých metod. Obě metody se liší přístupem k řešení problému a také potřebou různých vstupních podkladů. Stochastické křivky odběru vody se dají použít v hydraulickém modelu, díky čemuž budeme schopni simulovat spotřebu na úrovni jedné domácnosti a s velmi malým časovým krokem.

3.1 SIMULACE SPOTŘEBY VODY NA PŘÍPOJCE

Tento stochastický model spotřeby vody je založen na statistikách z měření průtoků na vodovodní síti. Využívá Poissonův obdelníkový puls (POP).

POP pro použití v obytných prostorech předpokládá, že potřeba vody v rodinném domě je časově závislý Poissonův proces. Každé použití vody v domě je reprezentováno jedním pulsem s náhodnou délkou trvání a s náhodnou, ale stálou intenzitou. Tímto způsobem je možné pokrýt více než 80% poptávky po pitné vodě v objektu. Při komplexnějším použití vody v domě se vícenásobné pulsy převádí na jejich ekvivalent v jednotlivých pulsech. [11]

Křivky spotřeby pitné vody vyprodukované metodou POP lze popsat následujícími rovnicemi:

$$Q = \sum B(I, D, \tau) \quad (3.1)$$

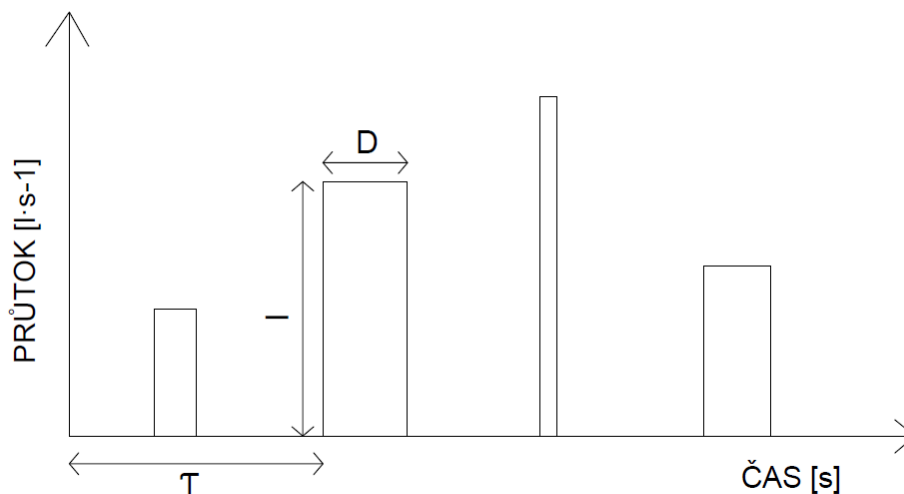
Rovnice platí, pokud je splněna následující podmínka:

$$\tau < T < \tau + D \quad (3.2)$$

Kde: I...intenzita pulsu [$l \cdot s^{-1}$]

D...doba trvání pulsu [s]

τ ...čas začátku pulsu



Obr. 3.1 Ukázka pulsů

POP model pro rezidenční budovy určuje čas začátku pulsu, dobu trvání pulsu a intenzitu pulsu na základě pěti parametrů. Tyto parametry se stanovují na základě měření průtoků na vodovodní síti u vybraného vzorku domácností ve sledovaném území. Parametry získané měřením jsou následující: [11]

- 1) Střední hodnota intenzity pulsu α
- 2) Rozptyl intenzity pulsu β^2
- 3) Střední hodnota doby trvání pulsu τ
- 4) Rozptyl doby trvání pulsu ω^2
- 5) Počet pulsů $\lambda(k)$, nebo koeficient spotřeby vody $\pi(k)$

Na základě POP byl vyvinut program PRPsym. Tento software umí generovat spotřebu vody od jednotlivých sekund až po hodiny a dny. Spotřeba vody je generována pro jednotlivé uzly modelu a může být přímo importována do programu EPANET. [11]

Algoritmus pro simulování spotřeby vody v programu RPRsym lze shrnout do tří následujících kroků:

3.1.1 Generování času začátku pulsů a počet pulsů.

Průměrný počet pulsů Poissonova procesu během časového kroku k je ve výpočtovém uzlu dán vztahem:

$$\overline{\lambda(k)} = \pi(k) \cdot \lambda \quad (3.3)$$

Kde: $\pi(k)$...uživatelé stanovený koeficient pro časový krok k
 λ ...průměrný počet pulsů na dům za minutu

Průměrný počet pulsů za minutu λ , se stanoví následujícím vztahem:

$$\lambda = \frac{Q}{\alpha\tau} \quad (3.4)$$

Kde: Q ...průměrná spotřeba vody na dům za den
 α ...střední hodnota intenzity pulsu
 τ ...střední hodnota doby trvání pulsu

Vzhledem k tomu, že jsou pulsy dány Poissonovým procesem, jsou čekací doby mezi pulsy exponenciálně rozdělené náhodné veličiny. Čekací doby mezi pulsem $m-1$ a pulsem m v časovém kroku k jsou proto dány vztahem: [11]

$$t_m(k) = \frac{-1}{\lambda(k)} \ln [U_m] \quad (3.5)$$

Kde: U_m ...náhodná proměnná na intervalu $[0,1]$

Počáteční čas m -tého pulsu během k -tého časového kroku je dán:

$$T_m(k) = \sum_{i=1}^m t_i(k) \quad (3.6)$$

Při současném splnění podmínky:

$$0 \leq T_m(k) \leq 1 \text{ hod} \quad (3.7)$$

3.1.2 Generování intenzity pulsu a doby trvání pulsu log-normálním rozdělením.

Pokud je X reprezentováno lognormálním rozdělením intenzity a dobou trvání pulsu, se známým průměrem μ a rozptylem σ^2 , potom $Y = \ln(X)$ je normální rozdělená náhodná proměnná s průměrem α a rozptylem β^2 . [11]

$$\alpha = \ln(\mu) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad (3.8)$$

$$\beta^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad (3.9)$$

Normální náhodná veličina Y s parametry α a β^2 , je počítána dle:

$$Y = \alpha + z\beta \quad (3.10)$$

Kde: z ...proměnná standardního normálního rozdělení

Na závěr se spočítá lognormálně rozdělená intenzita nebo doba trvání pulsu X , dle vztahu:

$$X = e^Y \quad (3.11)$$

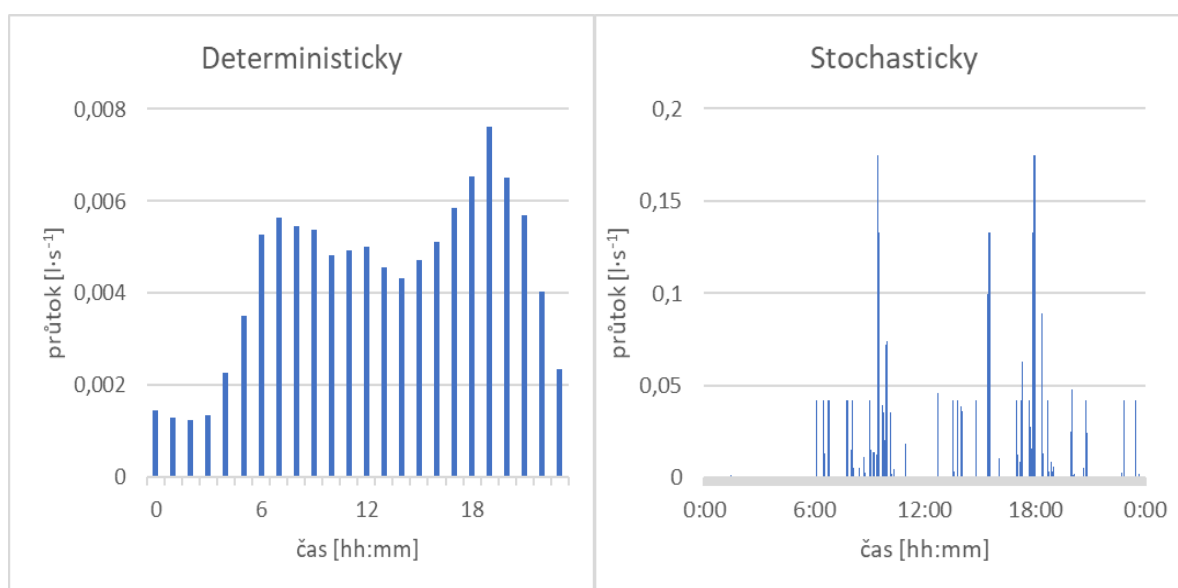
3.1.3 Součet souběžně běžících pulsů

Pulsy nalezené v předchozích krocích se sečtou, abychom získali hodnotu okamžité potřeby vody jednotlivých uzlů modelu vodovodní sítě. Celková potřeba vody ve zvoleném časovém kroku je tedy vždy součet intenzity všech aktivních pulsů. [11]

3.2 SIMULACE SPOTŘEBY VODY V OBJEKTU

U tohoto typu modelování spotřeby vody nevnímáme dům jako celek, ale dělíme ho na jednotlivé výtokové armatury. Každá armatura má poté vlastní způsob simulace spotřeby vody podle toho, jaký typ pravděpodobnostní funkce ji nejlépe popisuje. Simulaci tohoto typu nazýváme také model koncového zařízení (MKZ). Model je založený na statistických informacích o spotřebitelích připojených k vodovodní síti. Na základě pohlaví, stáří, počtu osob v domácnosti a jejich pracovním nasazení je simulováno reálné použití jednotlivých výtokových armatur v budově. Možnosti využití tohoto způsobu simulace se tak rozšiřují i pro návrh vnitřního vodovodu v budovách. [9]

Při použití MKZ, na rozdíl od modelování spotřeby vody pomocí POP, nepotřebujeme provádět měření průtoků ve vodovodní síti.



Obr. 3.2 Ukázka deterministické a stochastické křivky spotřeby vody pro dům s roční spotřebou 250 m³

3.2.1 MKZ u rezidenčních budov

Vstupní parametry pro simulaci spotřeby vody v objektu metodou MKZ, jsou získávány z průzkumů obyvatel. Při nich jednotliví obyvatelé, po dobu několika dní zapisují, kdy a na jak dlouho využívali vodu v domě. Statistická data jsou poté použita na simulaci spotřeby vody. [9,31]

- 1) Počet osob v domácnosti a jejich věk
- 2) Frekvence potřeby vody
- 3) Doba trvání a průtok vody při jejím použití
- 4) Odběr vody během dne (v noci méně než ve dne)

MKZ je postaveno na stejných principech jako POP. Každé otevření vodovodního kohoutku, spláchnutí, nebo zapnutí myčky nádobí si lze představit jako puls, který někdy

začíná, má určitou intenzitu a délku trvání. Vztah 3.1 tedy platí také pro MKZ, je ale nutné jej doplnit o indexy i, j a k . [9]

$$Q = \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{F_{jk}} B(I_{jk}, D_{jk}, \tau_{jk}) \quad (3.12)$$

Kde: k ...značí jednotlivé koncové zařízení od 1 do M
 j ...značí obyvatele v domě od 1 do N
 i ...značí frekvenci používání armatury k od obyvatele j
 D ...doba trvání pulsu
 I ...intenzita pulsu
 τ ...čas začátku pulsu

S využitím vztahu 3.12 byl v Nizozemsku vyvinut výzkumným ústavem KWR softwarový prostředek.

Koncová zařízení (k)

Koncová zařízení dělíme na následujících osm typů. Ty zahrnují vodovodní kohoutky a spotřebiče vyžadující pro svůj provoz vodu.

- 1) Záchod
- 2) Sprcha
- 3) Vana
- 4) Umyvadlo v koupelně
- 5) Pračka
- 6) Myčka nádobí
- 7) Kuchyňský dřez
- 8) Venkovní kohoutek (např. na zalévání zahrady)

V každé domácnosti se nemusí nacházet všech osm typů armatury. Proto je v MKZ zaveden parametr přítomnosti zařízení.

Tab. 1 Příklad výskytu spotřebičů a vodovodních kohoutků v domácnostech – Nizozemsko 2007 [9]

Typ koncového zařízení	Přítomnost zařízení v domácnosti [%]	Účel použití armatury	Rozdělení použití [%]
vana	36	120 l	100
umyvadlo v koupelně	100	umývání a holení	33
		čištění zubů	67
myčka nádobí	45	různé typy a značky	100
kuchyňský dřez	100	konzumace	37,5
		nádobí a úklid	25
		umývání rukou	25
		ostatní (zalévání květin, ...)	12,5
venkovní kohoutek	58	zahrada	75
		ostatní	25
sprcha	100	různé sprchové hlavice	100
pračka	98	různé typy a značky	100
záchod	100	nádržka 9 l	33,3
		nádržka 9 l s úsporným splachováním	22,2
		nádržka 6 l	11,1
		nádržka 6 l s úsporným splachováním	33,3

U každého typu zařízení se specifikuje účel použití (podtyp). Záchody se mohou lišit velikostí nádržky a možností splachovat pouze částí objemu vody. Průtok vody u sprchy ovlivňuje sprchová hlavice. Spotřeba vody u praček a myček nádobí se liší dle výrobce zařízení. U těchto spotřebičů se liší také křivka odběru vody, v závislosti na cyklu praní, nebo mytí. Kuchyňský dřez je specifický svým širokým použitím. Vodu z jeho kohoutku využíváme od přípravy jídel a nápojů, přes omývání rukou až po úklid v kuchyni. [9]

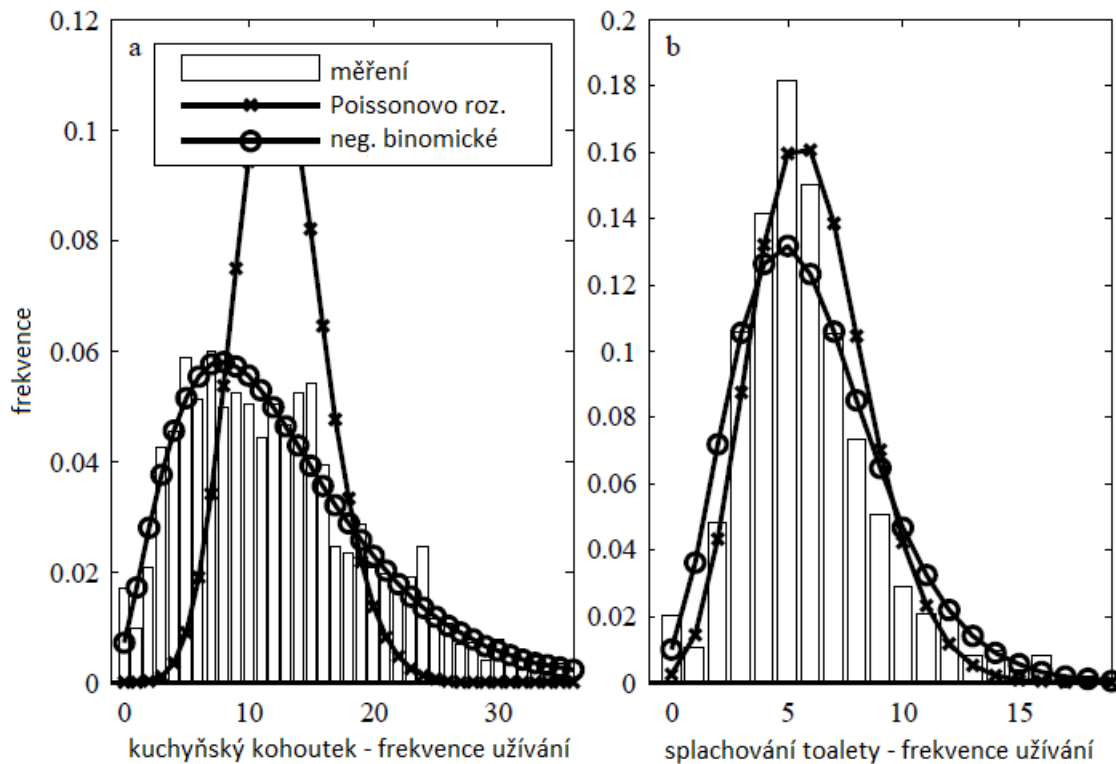
Obyvatelé domu (j)

Na obyvatelích domu je přímo závislá spotřeba vody v domě. Pro MKZ dělíme obyvatele do několika skupin podle jejich počtu v domácnosti, věku, pohlaví a zaměstnání. Frekvence použití koncových zařízení je vázána na jednotlivé obyvatele, proto je velmi důležitý i počet obyvatel v domácnosti. [9]

V ČR zajišťuje průzkum obyvatel Český statistický úřad, který provádí sčítání lidu, domů a bytů. [10]

Frekvence užívání koncového zařízení (F)

Frekvence užívání zařízení je proměnná, která vyjadřuje četnost a časové rozvržení použití zařízení, osobou za den. Pro většinu armatur je použito Poissonovo rozdělení, které nejlépe vystihuje jejich frekvenci používání. Specifický je kuchyňský dřez, kde je frekvence vázána nikoliv na osoby, ale na domácnost a den. U dřezu tak není Poissonovo rozdělení příliš přesné a vhodnější je použít negativní binomické rozdělení. [9]



Obr. 3.3 Vhodnost diskrétních rozdělení pravděpodobností pro různé aplikace [9]

Intenzita (I)

Intenzita pulsu je průtok v $l \cdot s^{-1}$. Částečně odvozeno z průzkumů a částečně z technické specifikace spotřebičů.

Intenzita proudění vody je dána typem výtokové armatury. U sprchy ovlivňuje průtok vody použitá sprchová hlavice. Použití úsporné hlavice omezuje maximální průtok vody až na $8 l \cdot min^{-1}$ oproti běžným $15-18 l \cdot min^{-1}$. U kuchyňských a koupelňových kohoutků je maximální průtok dán tlakem vody v potrubí. Zde ale platí, že ne vždy máme kohoutek puštěný naplno. Předpokládáme tak rovnoměrné rozdělení intenzity průtoku od 0 do maximálního průtoku. [9]

Doba trvání pulsu (D)

Doba trvání pulsu, je závislá na typu zařízení, z které puls pochází, tedy ze sepnutého kohoutku, nebo spotřebiče. Čas strávený ve sprše závisí na jednotlivých obyvatelích domácnosti. Tento čas je různý pro muže i ženy a mění se také s věkem. Údaje o času stráveném sprchováním se získává veřejným průzkumem. Doba napouštění záchodové nádržky závisí na vstupním průtoku a objemu oné nádržky. Nejčastěji vyskytujícími se

objemy jsou 4,5, 6 a 9 l. Pro další typy zařízení ukazuje vhodné pravděpodobnostní rozdělení následující tabulka. [9]

Tab. 2 Použití rozdělení pravděpodobností pro různé aplikace [9]

Typ koncového zařízení	Účel použití	Frekvence [den^{-1}]		Doba trvání		Intenzita [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	
		průměr	pdf	průměr	pdf	průměr	pdf
vana	120 l	0.044	Poissonovo	10 min	fix	0.2	fix
kohoutek v koupelně	umývání a holení	4.1	Poissonovo	40 s	log-normální	0.042	rovnoměrné
	čištění zubů			15 s			
myčka nádobí	různé typy a značky	0.3	Poissonovo	speciální křivka (celkem 4 cykly čerpání vody, celkem 84 s, $0.167 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 14 \text{ l}$)			
kuchyňský kohoutek	konzumace	12.6	negativní binomické	16 s	log-normální	0.083	rovnoměrné
	nádobí a úklid			48 s		0.125	
	umývání rukou			15 s		0.083	
	ostatní (zalévání květin,...)			37 s		0.083	
venkovní kohoutek	zahrada	0.44	Poissonovo	300 s	log-normální	0.1	rovnoměrné
	ostatní			15 s			
sprcha	běžná sprchová hlavice	0.7	Binomické	8.5 min	chí-kvadrát	0.142	fix
	úsporná sprchová hlavice					0.123	
pračka	různé typy a značky	0.3	Poissonovo	speciální křivka (celkem 4 cykly čerpání vody, celkem 5 min, $0.167 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 50 \text{ l}$)			
záchod	nádržka 9 l	6	Poissonovo	3.6 min	fix	0.042	fix
	nádržka 6 l			2.4 min			

*pdf – pravděpodobnostní distribuční funkce

*fix – fixní hodnota

Denní křivky užívání vody (τ)

Tyto křivky vyjadřují, kdy nejčastěji dochází k použití vybraného typu zařízení. Je například velká pravděpodobnost, že k použití vodovodního kohoutku umyvadla v koupelně dochází nejčastěji ráno a večer. Přesněji tedy před odchodem do zaměstnání nebo školy a večer těsně před spaním. Z výzkumů vyplývá, že myčka a pračka jsou nejčastěji zapínány ráno, večer, nebo v noci. U ručního mytí nádobí lze říci, že probíhá v závislosti na přípravě jídla. Použití ostatních armatur silně závisí na přítomnosti obyvatel doma a jejich spánku. [9]

Na základě přítomnosti obyvatel v domě můžeme použít následující předpoklady:

- Spotřeba vody v nočních hodinách činí 1,5% celkové denní spotřeby vody.
- Během nepřítomnosti obyvatel v domácnosti je jejich spotřeba vody nulová.

- Během půlhodiny po probuzení a návratu domů a půlhodiny před odchodem z domu a ulehnutím do postele dochází k největším spotřebám vody. V těchto půlhodinách dochází na 100% k použití sprchy a umyvadla v koupelně a soustředí se zde také polovina všech návštěv wc a 10% využití zbytku armatur v domácnosti. Do těchto časů se tak soustředí 65% denní spotřeby vody.
- Zbytek spotřeby vody během dne odpovídá 33,5% denní spotřeby vody. [9, 33]

Tab. 3 Statistická přítomnost obyvatel v domácnosti – Nizozemsko 2007 [9]

		pracovní dny					víkend
		dítě 0-12	dítě 13-18	pracující dospělí	dospělí bez práce	senior	
vstávání	čas začátku	7:00	7:00	7:00	8:00	8:00	9:00
	odchylka	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:30
odchod z domu	čas začátku	8:30	8:15	8:00	13:00	13:00	13:00
	odchylka	0:30	0:30	0:45	3:00	3:00	3:00
nepřítomnost v domě	doba trvání [h]	7.0	8.0	9.5	10.0	10.0	10.0
	odchylka [h]	2.0	2.0	3.3	4.5	4.5	4.5
spánek	doba trvání [h]	10.0	9.0	7.0	8.0	8.0	9.0
	odchylka [h]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5

Provedení simulace

Na základě metody MKZ byl vytvořen v Nizozemsku software. Po zapsání statistických dat do softwaru lze provést simulaci.

Nejprve se nasimuluje domácnost. Určí se počet obyvatel, věk, pohlaví a denní přítomnost a nepřítomnost v domě. Vstupní statistiky můžeme přizpůsobit typu simulovaného domu a vytvořit tak množství variant od malých bytů po velké rodinné domy se zahradami. Dále se nasimuluje přítomnost koncových zařízení. Například žádný venkovní kohout, 2 záchody apod. Poté se podle typu obyvatel, za použití pravděpodobnostní funkce, určí frekvence užívání armatur. Pro všechny výskyty použití zařízení se posléze určí doba trvání a intenzita, z příslušné funkce rozdělení pravděpodobnosti. Užívání armatur je simulováno po jednotlivých obyvatelích domu postupně. Po dobu používání je daná armatura blokována pro další obyvatele domu. Pokud je v domě pouze jedna sprcha, její použití jednou osobou, se nemůže shodovat s použitím druhou osobou. Sečtením všech použití získáváme křivku odběru vody v domácnosti.

Vzhledem k aplikaci pravděpodobnostních funkcí v simulaci, jsme získali pouze jeden z možných výsledků. Opakováním simulace metodou Monte Carlo můžeme predikovat spotřebu pro více domácností a získat přehled o spotřebě vody v celé ulici a spotřebišti. [9]

3.2.2 MKZ u nerezidenčních budov

MKZ je nevhodná pro stochastické modelování spotřeby vody pro průmysl. Spotřeba vody v průmyslových podnicích je úzce vázána na druh průmyslu a používanou technologii.

Pro některé nerezidenční budovy a služby ale MKZ vhodná je. Mezi takové objekty patří hotely, kanceláře anebo pečovatelské domy. [26, 32]

Tvorba křivek spotřeby vody se dá popsat stejným způsobem jako pro rezidenční budovy, a to vztahem 3.12. U rezidenčních budov se však výsledný průtok Q navíc ještě sčítá pro všechny funkční místnosti, dle následujícího vztahu.

$$Q = \sum_{h=1}^L Q_h \quad (3.13)$$

Kde: h je index pro počet funkčních místností od 1 do L

Funkční místnosti (h)

Funkční místnosti je nový typ parametru, který se vyskytuje u simulace nerezidenčních budov metodou MKZ. U hotelů, kanceláří a pečovatelských domů se definují následující funkční místnosti:

- Zasedací místnost
- Ubytovací pokoje
- Restaurace
- Fitness
- Ostatní (technická místnost, ...)

Koncová zařízení (k)

Kromě osmi, představených v kapitole o rezidenčních budovách, se zde zavádí také deváté, kávovar. Každý typ funkční místnosti má specifická koncová zařízení. Jejich počet je zadáván fixní hodnotou. Pro zasedací místnost můžeme například zadat; 6 toalet, 2 vodovodní kohoutky a kávovar. [26]

Uživatelé (j)

Definují se zvlášť pro každou funkční místnost. U nerezidenčních budov je na uživatele nahlíženo jako na skupinu, ne jako na jednotlivce. U každé skupiny je podstatné procentuální zastoupení pohlaví a jejich věk. Podle těchto parametrů se poté přiřazuje jejich frekvence užívání vody. Skupiny jsou následující. [26]

- Zaměstnanec kanceláře
- Zaměstnanec jídelny
- Uklízečka kanceláří
- Hotelový host
- Zaměstnanec restaurace

- Hotelová uklízečka
- Personál pečovatelského domu
- Obyvatel pečovatelského domu

Důvodem zavedení těchto skupin je jejich různá pracovní doba a přítomnost ve funkčních místnostech, po kterou mohou využívat pitnou vodu v objektu.

Intenzita a doba trvání pulsu (I, D)

Průtok a jeho doba trvání závisí na použité armatuře. Shrnutí armatur a typ rozdělení pravděpodobností odpovídající konkrétnímu využití nalezneme v následující tabulce. [26]

Tab. 4 Shrnutí koncových zařízení a jejich používání pro všechny funkční místnosti [26]

Funkční místnost	Typ koncového zařízení	Účel použití	Frekvence [den ⁻¹]	Doba trvání		Intenzita [l·s ⁻¹]			
			průměr	průměr	pdf	průměr	pdf		
zasedací místnost	wc	nádržka 6 l	4	2.4 min	fix	0.042	fix		
		nádržka 9 l		3.6 min					
		pisoiár		9 s					
	kohoutek	mytí rukou	4.5	16 s	fix	0.083	fix		
	kávovar		8	4.8 s	fix	0.042	fix		
ubytování	vana	120 l	0.2	10 min	fix	0.2	fix		
	wc	nádržka 6 l	4	2.4 min	fix	0.042	fix		
		nádržka 9 l		3.6 min					
	kohoutek	umývání a holení	6	40 s	log-normální	0.083	rovnoměrné		
								čistění zubů	15 s
								ostatní	45 s
	sprcha	běžná sprchová hlavice	0.2-0.8	8.5 min	chí-kvadrát	0.142	fix		
úsporná sprchová hlavice		0.123							
konfortní sprchová hlavice		0.365							
restaurace	myčka nádobí	dle výrobce a typu	var.	speciální křivka (2-14 l vody na cyklus, 50 s)					
	kuchyňský kohoutek	studená krátce	var.	15 s	log-normální	0.167	rovnoměrné		
		studená dlouze		60 s		0.25			
		teplá krátce		15 s		0.167			
		teplá dlouze		60 s		0.25			
fitness	sprcha	běžná sprchová hlavice	0.8	8.5 min	chí-kvadrát	0.142	fix		
		úsporná sprchová hlavice				0.123			
ostatní, technická místnost	úklid	plnění kýblů	var.	30 s	fix	0.5	fix		
	pračka	dle výrobce a typu	var.	speciální křivka (9-200 l vody na cyklus)					

- *pdf – pravděpodobnostní distribuční funkce
- *fix – fixní hodnota
- *var – různé subvarianty
- *frekvence je u všech zařízení poissonova rozdělení

Provedení simulace

Nejdříve jsou nasimulovány funkční místnosti. K místnostem je přiřazen počet uživatelů, jejich pohlaví a podle toho do jaké skupiny spadají také jejich denní přítomnost v objektu. Poté se na základě přítomnosti koncových zařízení simuluje frekvence užívání vody. Jedno zařízení nemůže být ve stejnou chvíli používána dvěma uživateli. Jeden uživatel však potencionálně může odebírat vodu z více míst. Sečtením všech užití vody během dne získáme křivku spotřeby vody pro funkční místnost. Sečtením všech funkčních místností, které se v objektu vyskytují, získáme křivku odběru vody pro celý objekt. [26]

3.2.3 Možnosti využití MKZ

Křivky odběru vody vytvořené pomocí MKZ jsou vhodné pro celou škálu použití. Vhodnost těchto aplikací shrnuje následující tabulka.

Tab. 5 Využití MKZ pro různé aplikace a jejich vhodnost [27]

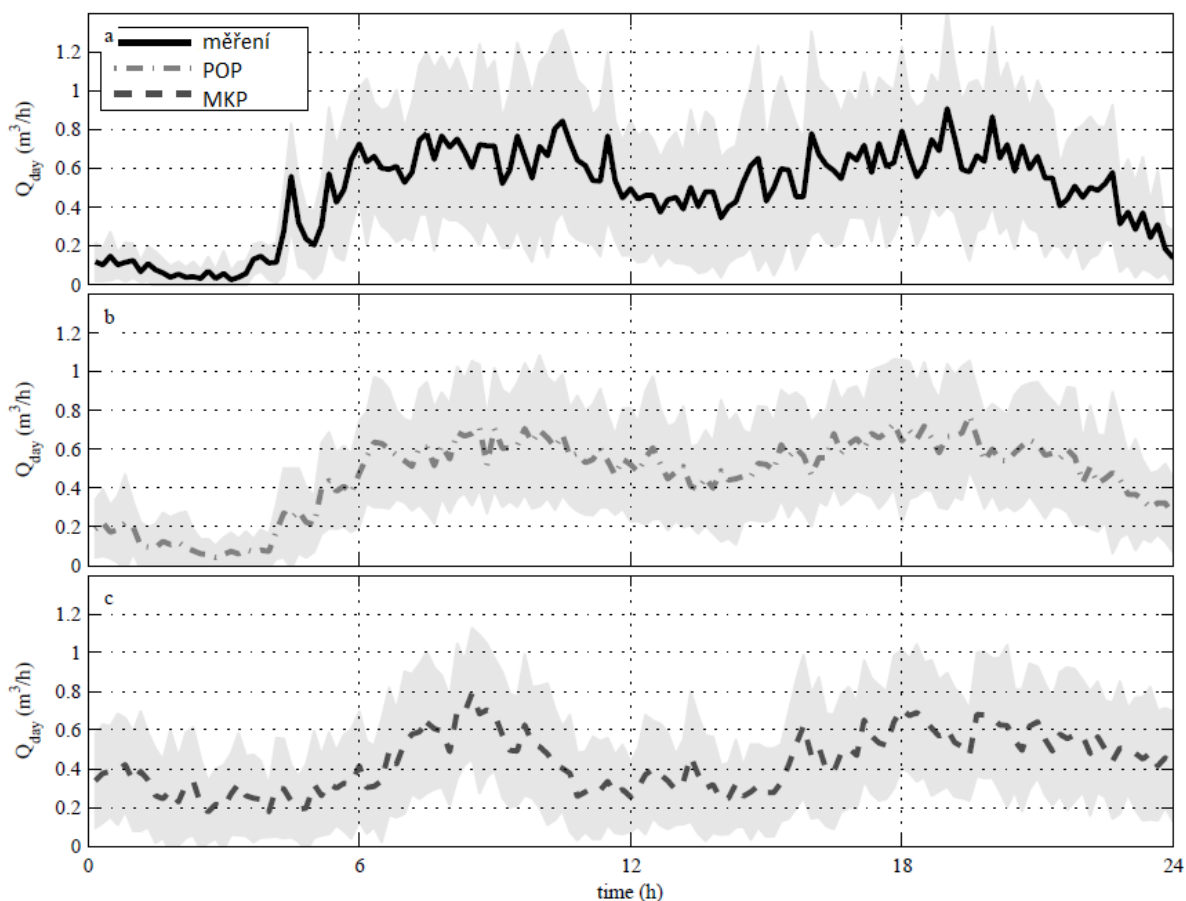
Použití		vhodný časový krok	prostorové měřítko	Je vyžadována variabilita (např. stochastické křivky odběru)?	Je model postaven na historicky akceptovatelných datech?
Modelování množství vody	hydraulický model: maximální rychlost vody v potrubí	1-5 min	jeden dům	Ano, postup času (den, sezóna) a typ (domov, škola).	Pouze pokud je k dispozici ve vhodném časovém měřítku a s variací v čase
	hydraulický model: průtok		okruhů: 10		
	změny směru průtoku knihovna křivek odběru	15- 60 min	> 500 domů	ne	ano
	ztráty	15-60 min	> 500 domů	Ano, aby bylo možné rozeznat nevyhnutelné úniky od poruch.	Pouze v případě, že jsou k dispozici bezporuchová data pro srovnání
	šíření částic	1 s	1-200 domů	ne	Pouze pokud je ve vhodném časovém kroku.
Modelování jakosti vody	doba zdržení rozpad chloru teplota růst bakterií zpětné sledování senzorů materiál částic	5 min	1-20 domů	Ano, postup času (den, sezóna) a typ (domov, škola).	Pouze pokud je k dispozici ve vhodném časovém měřítku a s variací v čase.
Návrh vodovodních řadů	samočisticí schopnost	1-10 s	1-200 domů	Ano, 50 nebo 99 percentil maximálního průtoků.	Ne, během fáze návrhu nejsou k dispozici žádné historické údaje. Návrh je pro budoucí spotřebu.
Návrh vnitřních rozvodů vody	pitná voda teplá voda vhodný účel zdroje		kohoutek; zvláště pitná a teplá voda		
Predikce budoucího odběru	návrh snížení spotřeby vody kontrola robustnosti DSPV	15- 60 min	kohoutek; vidět změny trendu	Doporučujeme zaměřit se na širší pásmo kolem predikce.	Možná; ne, když je třeba uvažovat o mezerách v trendu.
Výzkum vodovodních řadů	jakost vody v závislosti na hydraulice laboratorní nastavení vnitřní rozvody laboratorní nastavení vodovodní řady	1-10 s	kohoutek a vodoměr	Ano, pro citlivější studie	možná

3.3 SROVNÁNÍ METOD POP A MKZ

Výsledkem obou typů simulování spotřeby vody, jsou vygenerované křivky spotřeby pro jeden objekt. U POP je nutné vždy naměřit vstupní data. Z těchto dat se poté analyzují intenzita, doba trvání a časy pulsů. POP využívá pro frekvenci užívání vody v objektu časově závislý Poissonův proces, kde je rozdělení pravděpodobnosti pro intenzitu a dobu trvání logaritmicko-normální, se stejnými parametry pro všechny pulsy. [11]

U MKZ je potřeba nejdříve specifikovat uživatele a koncová zařízení v objektu. Tato data můžeme najít v literatuře, odpadá tedy nutnost nákladné měřicí kampaně. Intenzita, doba trvání a frekvence užívání vodovodní armatury v objektu je dána různými pravděpodobnostními rozděleními. Časy užívání zařízení jsou určeny na základě přítomnosti uživatelů v objektu.

Prímé srovnání obou přístupů bylo provedeno pro Milford v USA. Po dobu 30 dní zde probíhalo měření průtoků s časovým intervalem 1 s, u 21 domů. Poté byly provedeny simulace v modelu POP i MKZ a provedeno srovnání. [11]



Obr. 3.4 Srovnání naměřených hodnot se simulací metodou POP a MKZ, Milford USA [11]

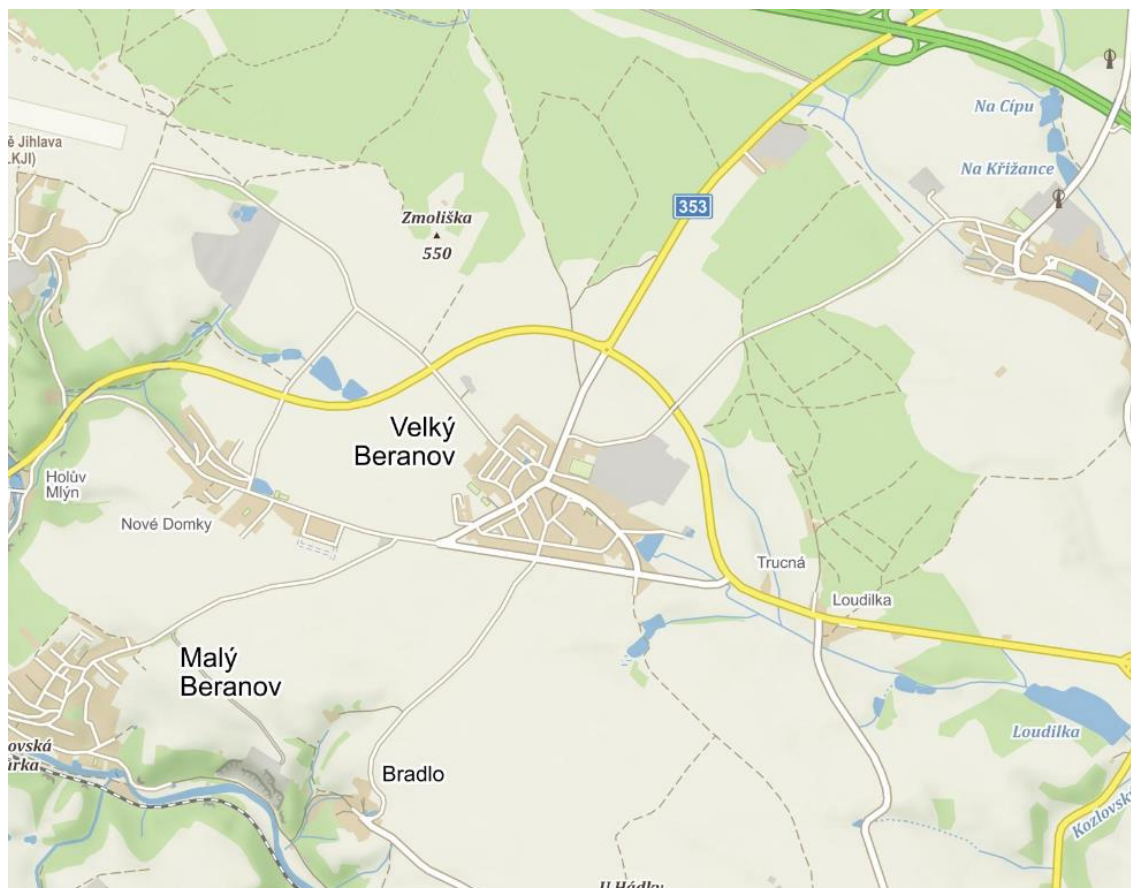
POP vykázalo lepší schopnost simulace spotřeby vody pro soubor 20 domů, MKZ zase předvedlo větší přesnost simulace pro 1 dům. Oba typy modelů nicméně předvedli dobrou schopnost simulovat křivky odběru vody.

4 STOCHASTICKÝ MODEL VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE VELKÝ BERANOV

Stochastické modelování spotřeby vody bude prezentováno na obci Velký Beranov. Křivky odběru vody získané stochastickou metodou MKZ, budou implementovány do hydraulického modelu obce. Hydraulický model vodovodní sítě Velkého Beranova jsem zpracoval v rámci své bakalářské práce v roce 2018.

4.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE O OBCI

Obec Velký Beranov leží v kraji Vysočina, asi 6 km od krajského města Jihlava. Katastrální území obce se skládá ze tří místních částí, Bradlo, Jeclov a Velký Beranov. K místní části Velký Beranov, která má k 1.1.2020 1272 obyvatel, náleží také osada Nové Domky. Necelé 2 km severně od obce protíná krajinu dálnice D1, která má u Velkého Beranova sjezd, exit 119. U sjezdu se nalézá dálniční cestmistrovství, které katastrálně spadá také pod Velký Beranov. Až do podzimu roku 2020 dusila obec vysoká intenzita automobilové dopravy, způsobená křížením důležitých komunikací v centru obce. V listopadu roku 2020 tento problém vyřešilo zprovoznění silničního obchvatu. Stavba o celkové délce 4,25 km se svojí cenou 800 milionů Kč, stala nejdražší silniční stavbou v historii kraje Vysočina. [12,13,14,16]



Obr. 4.1 Obec Velký Beranov již s vyznačeným silničním obchvatem [15]

4.2 VODOVODNÍ SÍŤ OBCE

Vodovod byl v obci vybudovaný v letech 1973-1983 a je součástí skupinového vodovodu Velký Beranov – Luka nad Jihlavou – Bítovčice – Vysoké Studnice.

Zdrojem vody jsou 4 podzemní vrty u Rytířska s vydatností $10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Společným výtlačným řadem PE DN160 délky 2,5 km, je voda čerpána do úpravně vody nad Velkým Beranovem. V úpravně protéká voda tlakovými filtry. Filtrováním přes vhodný filtrační materiál dochází k odkyselení surové vody. Ta poté ještě proteče odradonovací věží a odtéká do vodojemů. Voda zde není za běžných okolností chlorována. [17]

Vedle úpravně vody se nachází 2 zemní vodojemy. Vodojem Velký Beranov starý, o objemu $2 \times 250 \text{ m}^3$, je zásobován primárně pitnou vodou z podzemních zdrojů Rytířsko. V případě snížené vydatnosti tohoto zdroje je možné plnit vodojem také ze skupinového vodovodu Jihlava, a to výtlačným řadem z VDJ Henčov. Z VDJ Velký Beranov starý vede přiváděcí řad do osady Nové domky a místních částí Bradlo a Jeclov. Řad poté pokračuje do Luk nad Jihlavou, Bítovčic a Vysoké Studnice.

Druhým vodojemem, který se nachází u úpravně vody nad Velkým Beranovem je VDJ Velký Beranov nový. Tento zemní vodojem o objemu $2 \times 250 \text{ m}^3$ je zásobován výhradně ze zdroje podzemní vody Rytířsko. Minimální hladina ve vodojemu se nachází na kótě 558,94 m n.m. Akumulovaná voda je odtud gravitačně rozváděna dvěma směry. Do VDJ Kozlov a do spotřebišť Velký Beranov.

Provozovatelem vodovodní sítě je Vodárenská akciová společnost, a.s. divize Jihlava. Vlastníkem vodovodní sítě je, po vystoupení ze Svazu vodovodů a kanalizací, od roku 2014 obec Velký Beranov. [34]



Obr. 4.2 Jeden ze čtyř vrtů v lokalitě Rytířsko



Obr. 4.3 Úpravna vody Velký Beranov



Obr. 4.4 Vodojem Velký Beranov nový

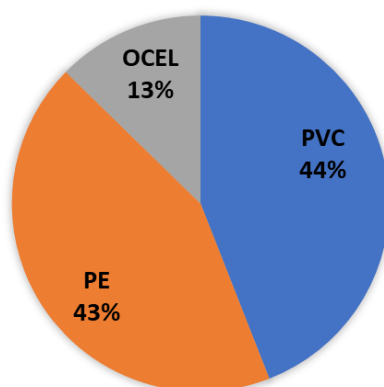
4.2.1 Spotřebišť Velký Beranov

Celé spotřebišť se nachází v jediném tlakovém pásmu. Tlak ve vodovodní síti udává hladina ve vodojemu Velký Beranov nový. V šachtě u vodojemu jsou umístěny průtokoměry. Tyto průtokoměry měří průtoky vody v potrubí, s hodinovým intervalem, po celý rok. Průtokoměr EV8 měří celkový odtok z vodojemu, EV7 měří odtok do VDJ Kozlov. Průtok do spotřebišť Velký Beranov je dán jejich rozdílem. Spotřebišť má jeden měřicí okrsek. [34]

$$VB=EV8-EV7$$

Převládajícím materiálem potrubí jsou plasty. Dimenze se pohybuje od 160 do 40 mm.

Graf 1 Procentuální zastoupení materiálů



Tab. 6 Zastoupení materiálů a dimenzí

Materiál; DN	délka[m]	[%]
PVC 160	1601	30.6
PVC 110	701	13.4
PE 110	1490	28.5
PE 90	675	12.9
PE 63	93	1.8
PE 50	3	0.1
Ocel 50	613	11.7
Ocel 40	48	0.9
Celkem	5223	100

Ve Velkém Beranově je k vodovodní síti připojeno celkem 248 nemovitostí. Celková délka vodovodní sítě je 5,2 km. Počet požárních hydrantů je 31. Rozdíl mezi nejnižší a nejvýše položenou vodovodní přípojkou je 31 m.

4.3 HYDRAULICKÝ MODEL VODOVODU VELKÝ BERANOV

Hydraulický model byl vytvořen za pomoci softwarových prostředků AutoCAD, MikeUrban a EPANET 2.0.

Prvním krokem při tvorbě modelu je získání podkladů. Podklady vodovodní sítě Velký Beranov poskytl její provozovatel, Vodárenská akciová společnost, a.s.

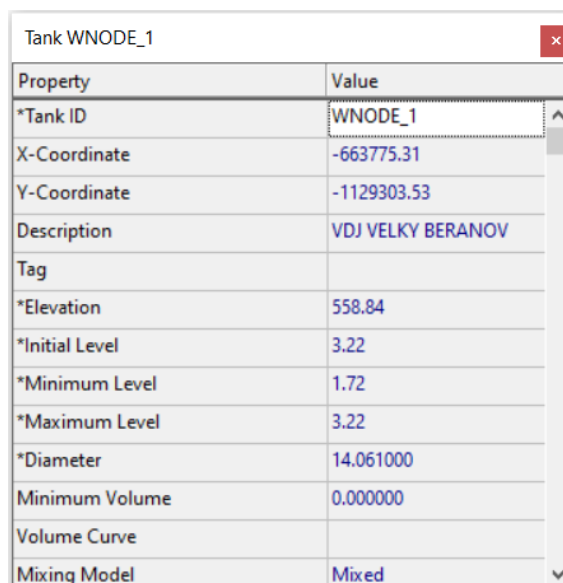
Vodovodní síť je nutné rozdělit na úseky a uzly. Uzel se dává tam, kde je: změna průměru potrubí; změna materiálu potrubí; změna drsnosti potrubí; hydrant; odbočka. Uzlem také rozdělujeme úseky tak, aby nebyli delší než 300 m. Úseky spojují jednotlivé uzly, každý úsek má počáteční a koncový uzel. Nachystaná kostra modelu ve formátu .dxf je importována do programu Mike Urban.

V programu Mike Urban byla přerozdělena spotřeba vody fakturované a ztráty, do jednotlivých uzlů modelu. Pro deterministický model je odběr vody objektů napojených do úseku rozdělena na polovinu a přičtena do přilehlých uzlů. Ztráty vody činí 15 % objemu vody fakturované a jsou rozděleny rovnoměrně podle délky úseků do přilehlých uzlů. Odběr v uzlu je agregován do jedné hodnoty odběru vody pro uzel. Poté se topologie modelu vyexportovala do programu EPANET 2.0.

Do uzlů byli doplněny nadmořské výšky. Do úseků se zapsali parametry potrubí. Konkrétně drsnost, délka a vnitřní průměr potrubí. Drsnost závisí na materiálu a stáří.

Zdrojem vody v hydraulickém modelu je reservoir. Ten je napojen na vodojem pomocí čerpadla. Pro vodojem byla v modelu zadána nadmořská výška, výška maximální a minimální provozní hladiny a také průměr a výška počáteční hladiny, která byla rovna hladině maximální.

[34]



Property	Value
*Tank ID	WNODE_1
X-Coordinate	-663775.31
Y-Coordinate	-1129303.53
Description	VDJ VELKY BERANOV
Tag	
*Elevation	558.84
*Initial Level	3.22
*Minimum Level	1.72
*Maximum Level	3.22
*Diameter	14.061000
Minimum Volume	0.000000
Volume Curve	
Mixing Model	Mixed

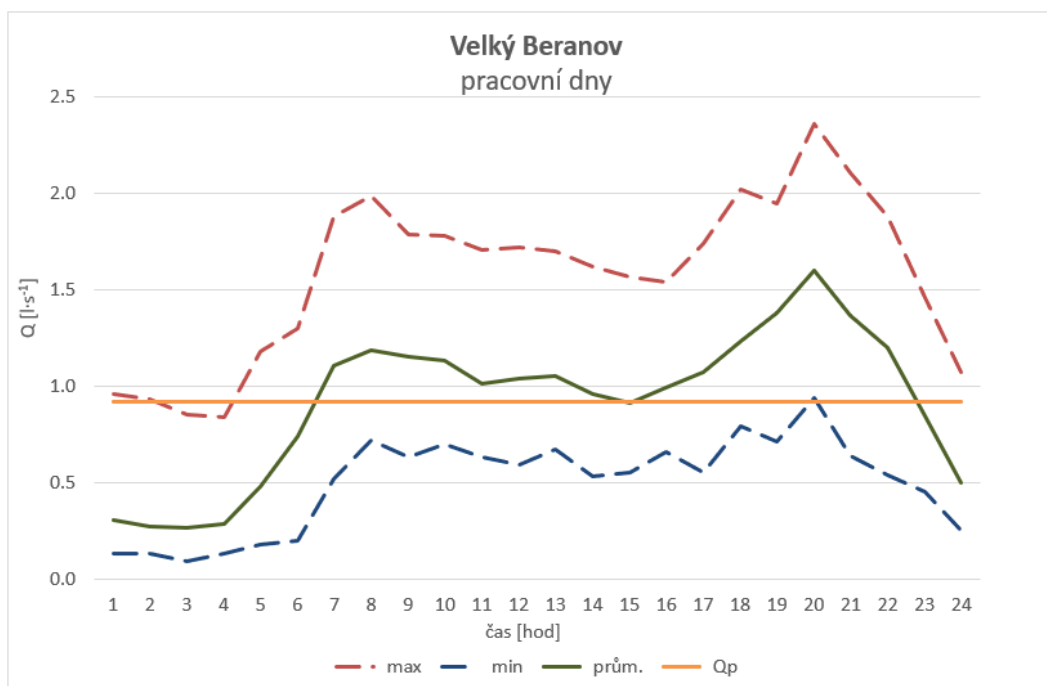
Obr. 4.5 Parametry pro vodojem Velký Beranov nový

4.3.1 Analýza spotřeby vody

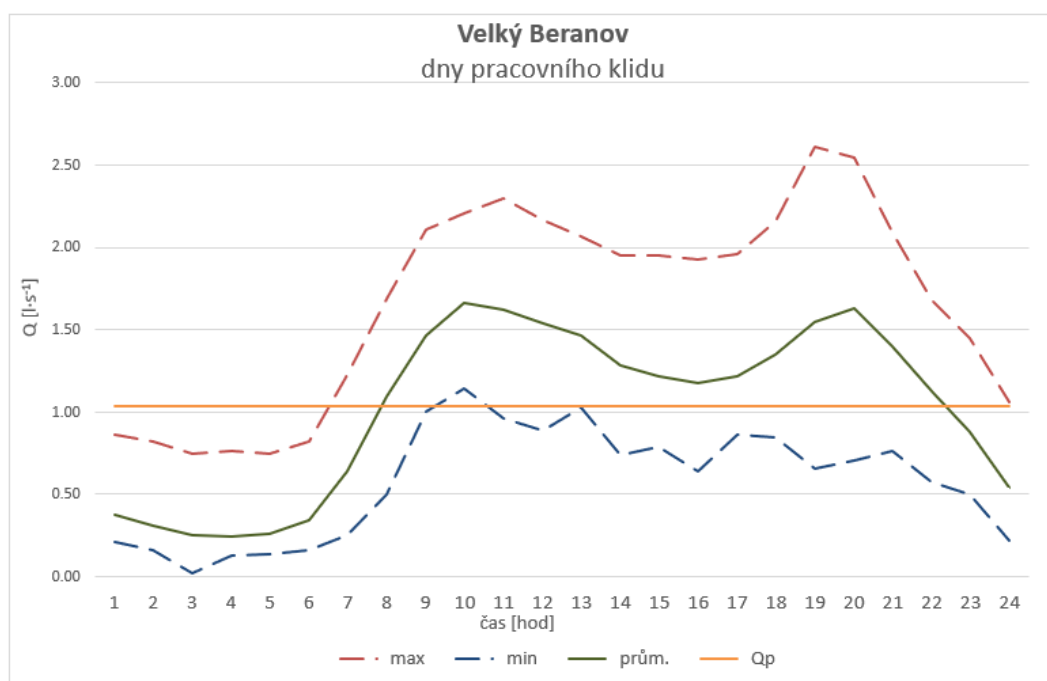
Analýza spotřeby vody slouží k vytvoření křivky odběru vody pro deterministický hydraulický model vodovodní sítě. K tomuto účelu byla použita data z průtokoměrů umístěných na odtoku z vdj Velký Beranov nový, viz. kapitola 4.2.1. Spotřebiště Velký Beranov. Analýzou těchto průtoků byli vytvořeny křivky spotřeby vody pro pracovní, a nepracovní dny.

Křivky spotřeby vody získané z analýzy průtoků byly použity také k porovnání validity stochastických křivek. [34]

Graf 2 Analýza spotřeby vody – pracovní dny [34]



Graf 3 Analýza spotřeby vody – nepracovní dny [34]



4.3.2 Měrná kampaň

Měrná kampaň probíhala v říjnu roku 2018. Zahájena byla pochůzkou po spotřebišti a návštěvou objektů na vodovodní síti. Poté byla do dvou předem vybraných hydrantů umístěna

tlaková čidla značky SEBA. Čidla měřila tlak vody v intervalu 15 s po dobu 10 dní. Poté byla čidla z hydrantů vyjmuta a naměřená data statisticky zpracována. Zpracovaná data byla použita ke kalibraci a verifikaci deterministického modelu. [34]

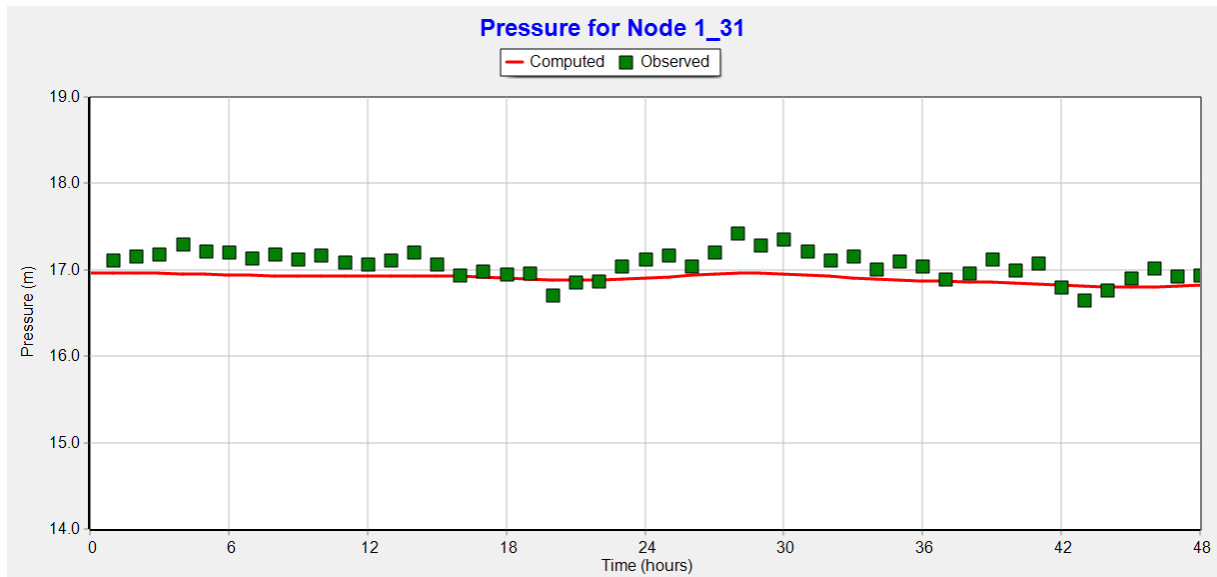


Obr. 4.6 Proplach hydrantu a následné osazení tlakového čidla SEBA

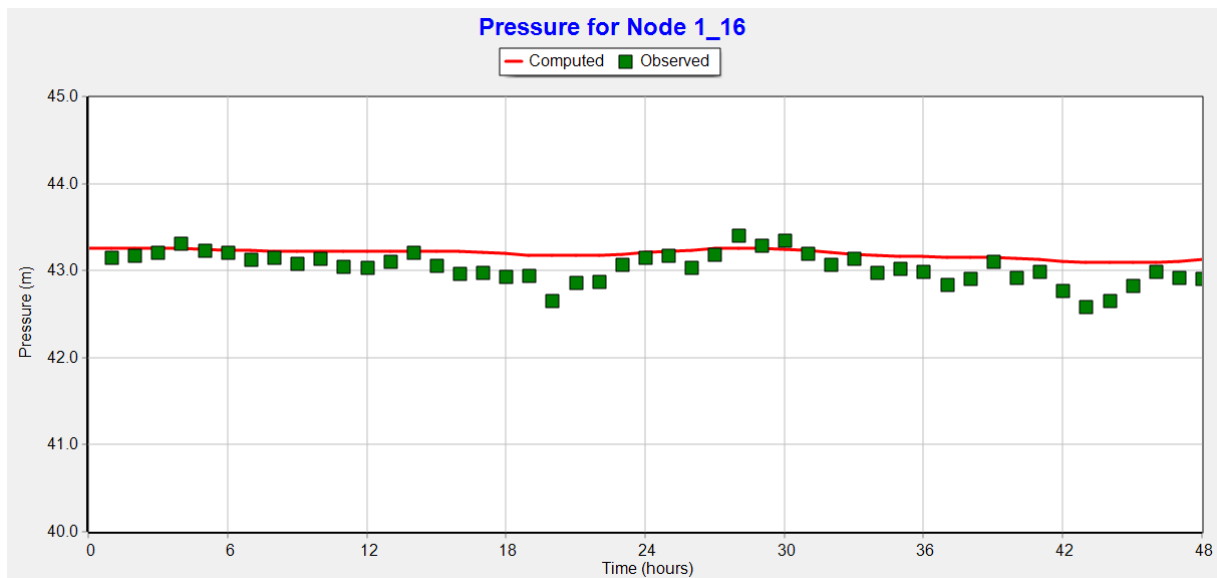
4.3.3 Kalibrace a verifikace

Na kalibraci modelu byly použity 2/3 naměřených dat. Rozlišovány byli pracovní a nepracovní dny. Pracovních dní bylo naměřeno 7 a nepracovních 2 dny. Vlastní kalibrace byla provedena metodou nejmenších čtverců. Na základě výsledku bylo sníženo dno vodojemu o 10 cm.

Verifikace byla provedena ze zbylé 1/3 dat a potvrdila správnost kalibrace. [34]



Obr. 4.7 Kalibrace uzlu 1_31



Obr. 4.8 Kalibrace uzlu 1_16

4.4 STOCHASTICKÉ KŘIVKY ODBĚRU VODY

Pro generování stochastických křivek odběru vody pro Velký Beranov byl použit softwarový prostředek založený na metodě MKZ. Tato metoda je založena na demografických datech a statistikách týkajících se spotřeby vody u obyvatelstva.

4.4.1 Demografické údaje

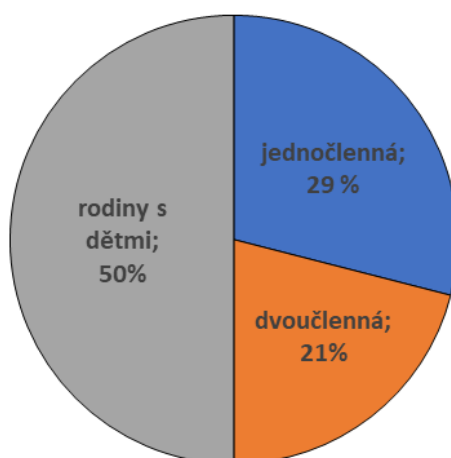
Rozdělení domácností

Domácnosti jsou rozděleny do tří kategorií, na jednočlenné, dvoučlenné, kdy oba členové jsou dospělí a vícečlenné domácnosti, které představují rodiny s dětmi. U každé domácnosti se specifikuje věková kategorie obyvatel, zastoupení pohlaví a zda členové domácnosti chodí do zaměstnání. Pro rodiny s dětmi potřebujeme znát průměrný počet členů domácnosti.

Tab. 7 Demografické údaje domácností [10]

kategorie domácnosti		1 členná	2 členná	s dětmi
počet	členů v domácnosti	1	2	2.7
procento	zastoupení domácností	29	21	50
	ženy	54	x	50
	muži	46	x	50
	žena-žena	x	2.5	x
	muž-muž	x	2.5	x
	muž-žena	x	95	x
	děti 0-12 let	x	x	25
	děti 13-18 let	x	x	17
	dospělí 19-64 let	70	70	59
	senioři >64 let	30	30	x
	pracující dospělí - oba	x	50	40
	pracující dospělí - pouze ženy	68	6	3
	pracující dospělí - pouze muži	52	26	52
	pracující dospělí - ani jeden	x	18	5

Graf 4 Kategorie domácností



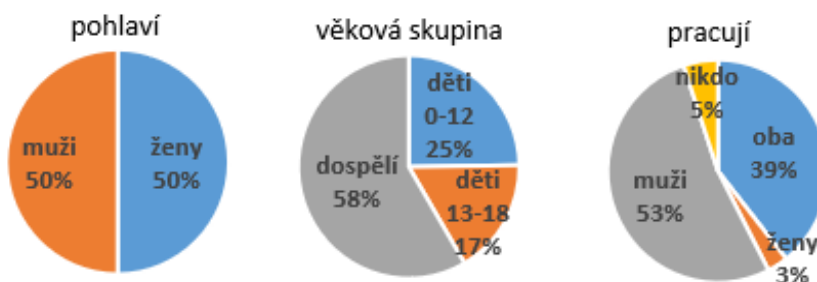
Graf 5 Jednočlenné domácnosti



Graf 6 Dvoučlenné domácnosti



Graf 7 Rodiny s dětmi



Časový rozvrh členů domácnosti

Na základě časového rozvrhu je stanovena přítomnost obyvatel v domácnosti. Pokud nejsou osoby doma, nemůžou v domácnosti odebírat vodu. Časy jsou odvozeny z analýzy průtoků a znalosti například začátku výuky. Denní časový rozvrh se stanovuje zvlášť pro pracovní a nepracovní dny.

Tab. 8 Denní rozvrh pro pracovní dny

Denní rozvrh pracovní:		dítě 0-12	dítě 13-18	pracující dospělí	dospělí bez práce	senior
		vstávání	čas začátku	7:00	7:00	6:00
	odchylka	1:00	1:00	1:30	1:00	1:00
odchod z domu	čas začátku	7:30	7:15	7:00	13:00	13:00
	odchylka	0:30	0:30	0:45	3:00	3:00
nepřítomnost v domě	doba trvání	7:00	8:00	9:30	10:00	10:00
	odchylka	2:00	2:00	3:15	4:30	4:30
spánek	doba trvání	10:00	9:00	7:00	8:00	8:00
	odchylka	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00

Tab. 9 Denní rozvrh pro nepracovní dny

Denní rozvrh nepracovní:		dítě 0-12	dítě 13-18	pracující dospělí	dospělí bez práce	senior
		vstávání	čas začátku	9:00	9:00	8:00
	odchylka	2:00	2:00	1:00	1:00	2:00
odchod z domu	čas začátku	10:00	10:00	8:00	8:00	9:00
	odchylka	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00
nepřítomnost v domě	doba trvání	4:30	4:30	8:30	6:30	6:30
	odchylka	2:00	2:00	4:00	4:00	4:00
spánek	doba trvání	10:00	9:00	8:00	8:00	8:00
	odchylka	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00

4.4.2 Koncová zařízení

Pro každé z osmi koncových zařízení zadáváme jeho pravděpodobnost přítomnosti v domácnosti. Pro wc, sprchu, koupelnový kohoutek a kuchyňský dřez předpokládáme přítomnost vždy a u všech typů domácností. Zda se bude v domě nacházet myčka nádobí, pračka a vana závisí na velikosti domácnosti. Existence venkovního kohoutku je podřízena přítomností zahrady. U objektů s vyšší roční spotřebou vody roste pravděpodobnost, že jsou některé zařizovací předměty zastoupeny vícekrát, typicky wc a sprcha. [30]

Jak často bude zařizovací předmět používán závisí buď na členech domácnosti, nebo na velikosti domácnosti. Kuchyňský dřez, myčka nádobí a pračka mají navíc také svojí denní křivku, která udává nejpravděpodobnější časy používání těchto zařízení.

Graf 8 Využití vodovodního kohoutku v průběhu dne [9]



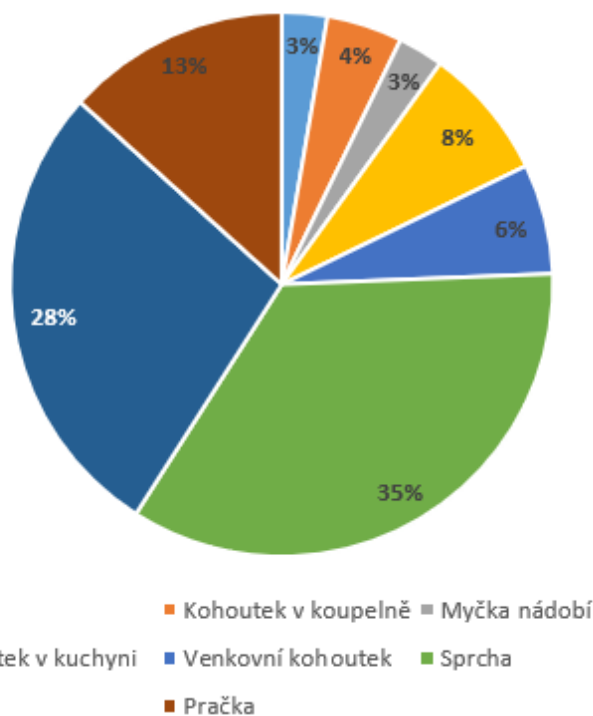
Každý typ zařizovacího předmětu má také podtyp, který symbolizuje konkrétní účel využití vody. Podtypy se liší spotřebou vody při použití daného zařizovacího předmětu.

Seznam podtypů viz. tab. 1. Pro hodnoty, které nebylo možné dohledat z domácího prostředí, byla použita data ze zahraničí.

Koncová zařízení a jejich podtypy byly nastaveny tak, aby souhlasila dílčí specifická spotřeba vody jednoho uživatele, viz. následující graf. Celková denní spotřeba vody jednoho obyvatele činila za rok 2019 89 m³. [28]

Graf 9 Specifická spotřeba vody v domácnosti

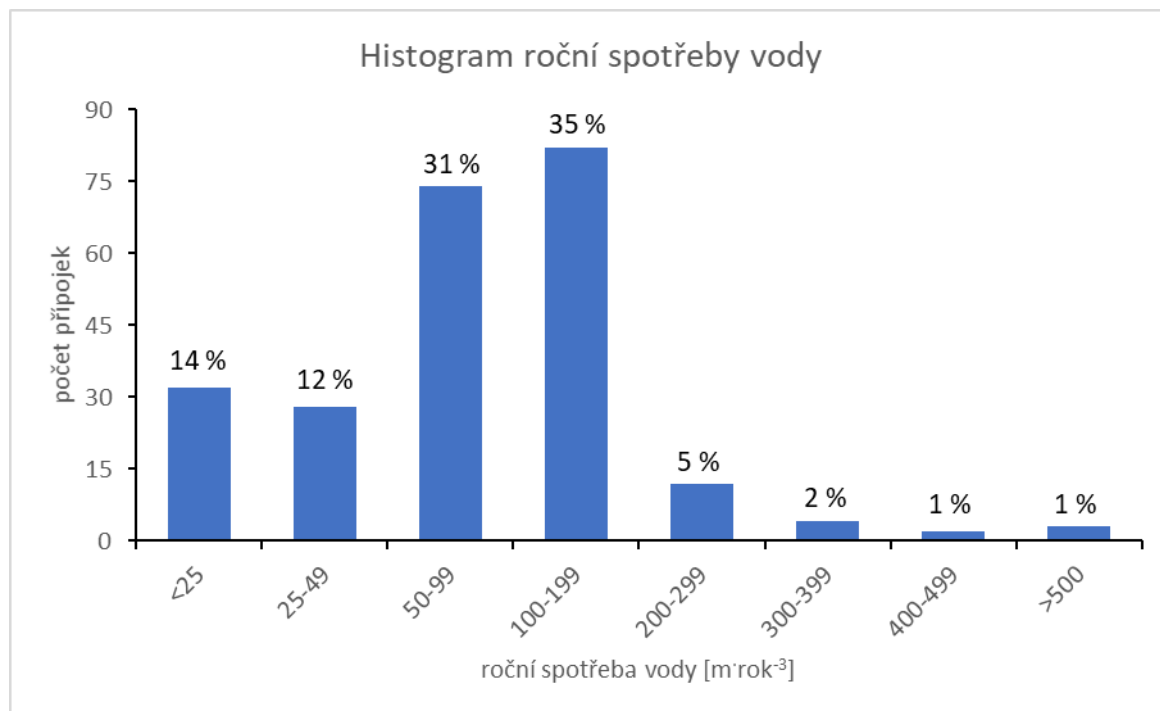
Koncové zařízení	$q_{SPEC} [l \cdot os^{-1} \cdot d^{-1}]$
Vana	2.4
Kohoutek v koupelně	4.0
Myčka nádobí	2.4
Kohoutek v kuchyni	7.0
Venkovní kohoutek	5.8
Sprcha	30.7
Wc	24.5
Pračka	11.8
Celkem	88.6



4.4.3 Charakteristika spotřeby vody

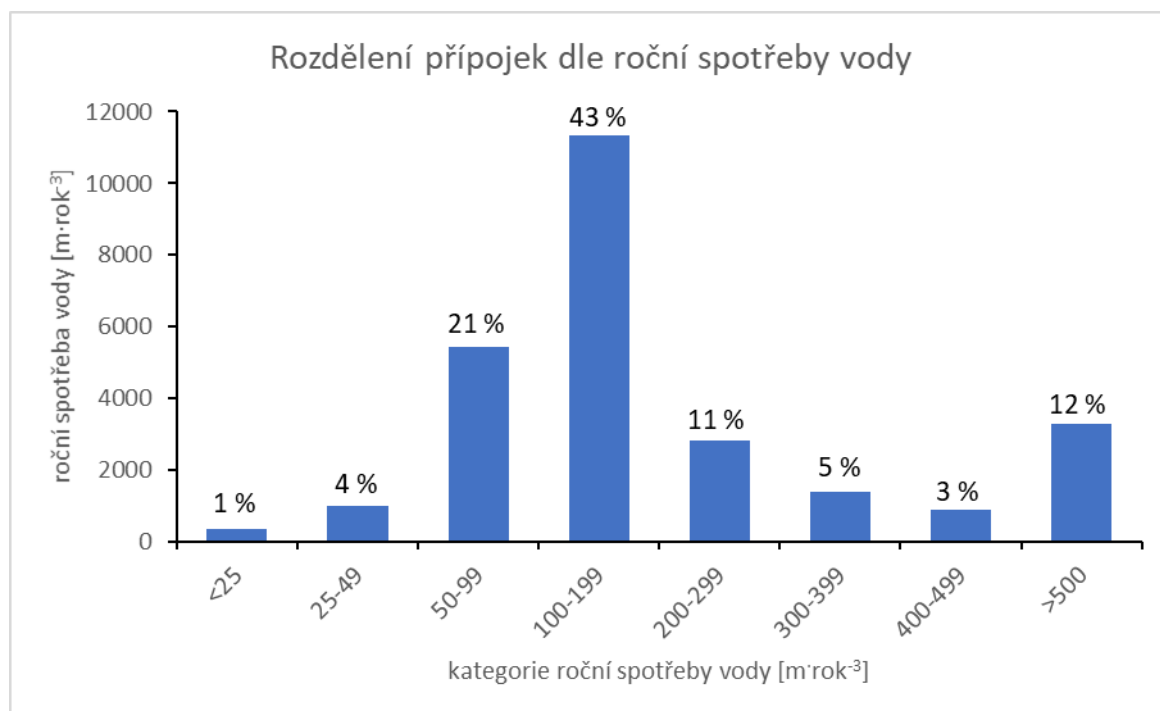
Zástavba má venkovský charakter, dominantním odběratelem vody je místní základní škola s jídelnou a mateřská škola. Hodnoty roční spotřeby vody na přípojkách pochází z odečtu spotřeby vody jednotlivých vodoměrů. Uvažovaná roční spotřeba je voda fakturovaná za rok 2017. Z 248 přípojek, vykázalo 11, roční spotřebu vody nulovou. Při tvorbě modelu proto nebudou zahrnuty.

Graf 10 Histogram roční spotřeby vody obce Velký Beranov



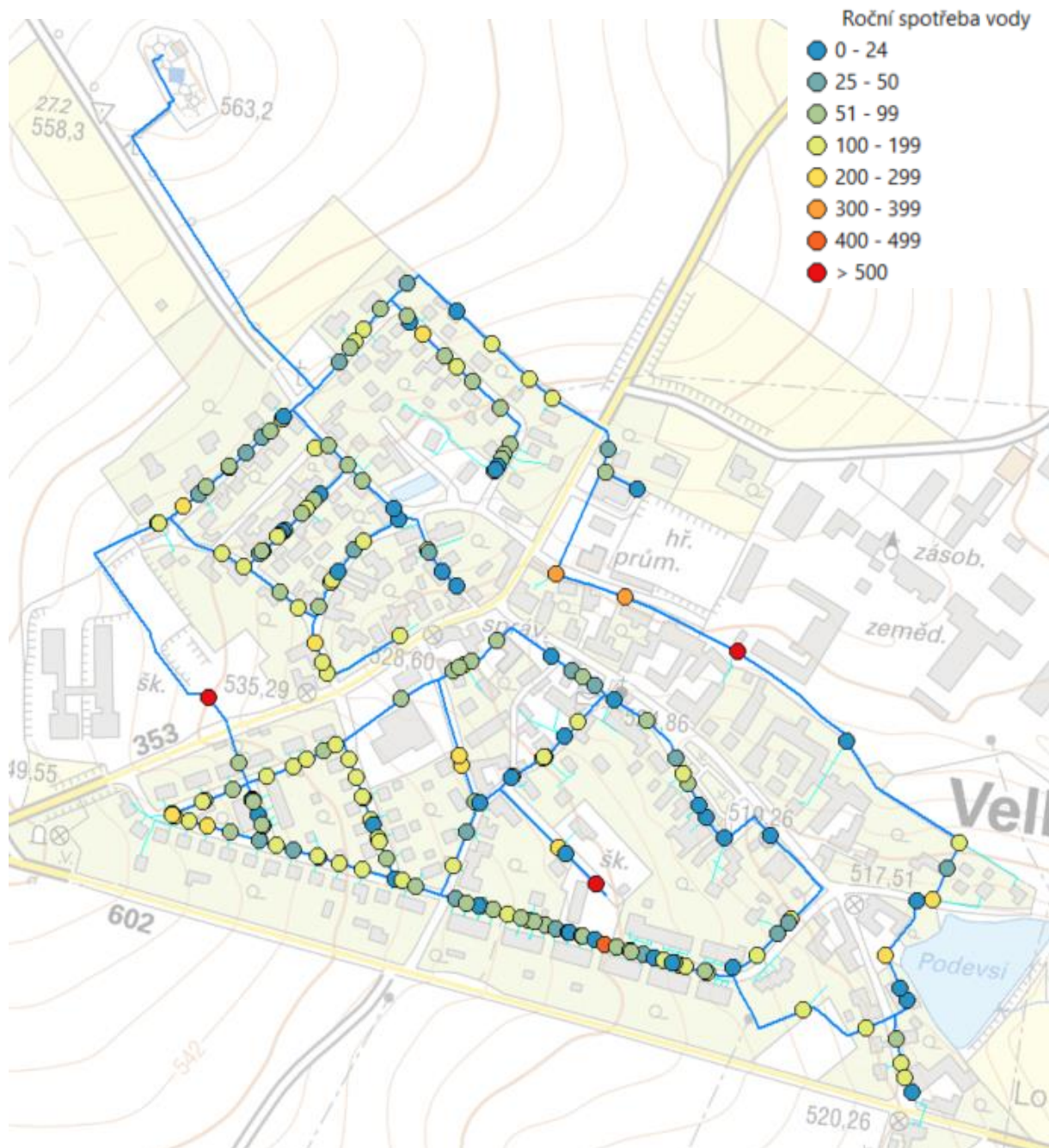
Z histogramu spotřeby vody za rok pro jednotlivé nemovitosti ve Velkém Beranově vyplývá, že největší zastoupení mají domácnosti se spotřebou 50 - 199 m³·rok⁻³. Větší spotřebu vykázalo 9 % objektů a na 60 přípojkách byla roční spotřeba vody nižší než 50 m³·rok⁻³.

Graf 11 Objem vody spotřebované v jednotlivých kategoriích roční spotřeby



Nejmenší podíl na objemu spotřebované vody má 32 přípojek s roční spotřebou menší než 25 m³·rok⁻³. Dominantní kategorií jsou opět domácnosti se spotřebou 50 - 199 m³·rok⁻³.

Celých 12 % objemu spotřebované vody za rok mají na svědomí pouze 3 přípojky a patří mezi ně základní škola i mateřská škola ve Velkém Beranově.



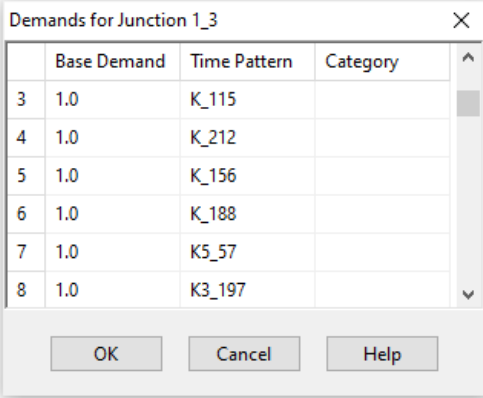
Obr. 4.9 Rozmístění přípojek a jejich roční spotřeba vody

Na obrázku výše si můžeme prohlédnout, v kterých místech vodovodní síť Velkého Beranova dochází k největší koncentraci připojených domácností. Červené kolečko v levé části spotřebiště značí přípojku největšího odběratele vody ze sítě, základní školu.

Stochastické křivky jsou přiřazovány k jednotlivým přípojkám na základě shody roční spotřeby vody.

4.4.1 Simulace stochastických křivek

Všechny simulované křivky mají časový krok 1 minuta a celkovou délku 7 dní. Zahrnují 5 pracovních a 2 nepracovní dny. Vzhledem k tomu, že hodnoty průtoků v generovaných křivkách nejsou bezrozměrné koeficienty, ale konkrétní průtoky v $l \cdot s^{-1}$, je zadávaný odběr v hydraulickém modelu roven 1.



	Base Demand	Time Pattern	Category
3	1.0	K_115	
4	1.0	K_212	
5	1.0	K_156	
6	1.0	K_188	
7	1.0	K5_57	
8	1.0	K3_197	

Obr. 4.10 Stochastické křivky přiřazené do uzlu v softwaru EPANET

Na základě zadaných demografických údajů a statistických dat bylo v prvním kroku vygenerováno 250 stochastických křivek s označením K. Z tohoto počtu bylo využito 113 křivek, které byly přiřazeny do hydraulického modelu Velkého Beranova. Pro pokrytí zbytku přípojek bylo nutné navýšit roční spotřebu vody domácností úpravou demografických a statistických dat. Postupně tak vznikly další řady křivek s označením K2, K3, K4 a K5. Pro každou řadu bylo generováno 250 křivek. Jednotlivé řady se odlišují postupným navýšením počtu osob v domácnosti a snížením podílu jednočlenných domácností. Další změnou bylo zvýšení pravděpodobnosti, že se v domácnosti nachází více koncových zařízení a zvýšeným odběrem vody z venkovního kohoutu.

U domácností s roční spotřebou vody vyšší než 250 m^3 byl výsledný průběh spotřeby vody získán součtem dvou a více vygenerovaných stochastických křivek. Je tak zaveden předpoklad, že se objekty s takto vysokou roční spotřebou vody skládají z více domácností. U objektů, kde bylo dosaženo výsledné křivky odběru vody sečtením více křivek, byla nastavena přítomnost venkovního kohoutu tak, aby byl vždy jen jednou pro daný simulovaný objekt. Celkem bylo vygenerováno 1250 stochastických křivek, ze kterých bylo vybráno na základě podobnosti roční spotřeby vody 204 křivek, které byly aplikovány do hydraulického modelu.

Pro základní školu a mateřskou školu byl průběh spotřeby vody nasimulován pomocí koeficientů. Těmito koeficienty byla vynásobena roční spotřeba vody. Koeficienty byly voleny tak, aby reflektovaly otevírací dobu, přestávky, obědovou pauzu a odpolední výuku. O víkendy je spotřeba vody v těchto objektech nulová.

Kategorii domácností s roční spotřebou do 25 m^3 byla přiřazena křivka s konstantní hodnotou, kdy koeficient=1. U objektů s takto nízkou roční spotřebou vody je obtížné nasimulovat křivky metodou MKZ. Je pravděpodobné, že objekty nejsou obydleny, nebo jsou využívány pouze sezónně.

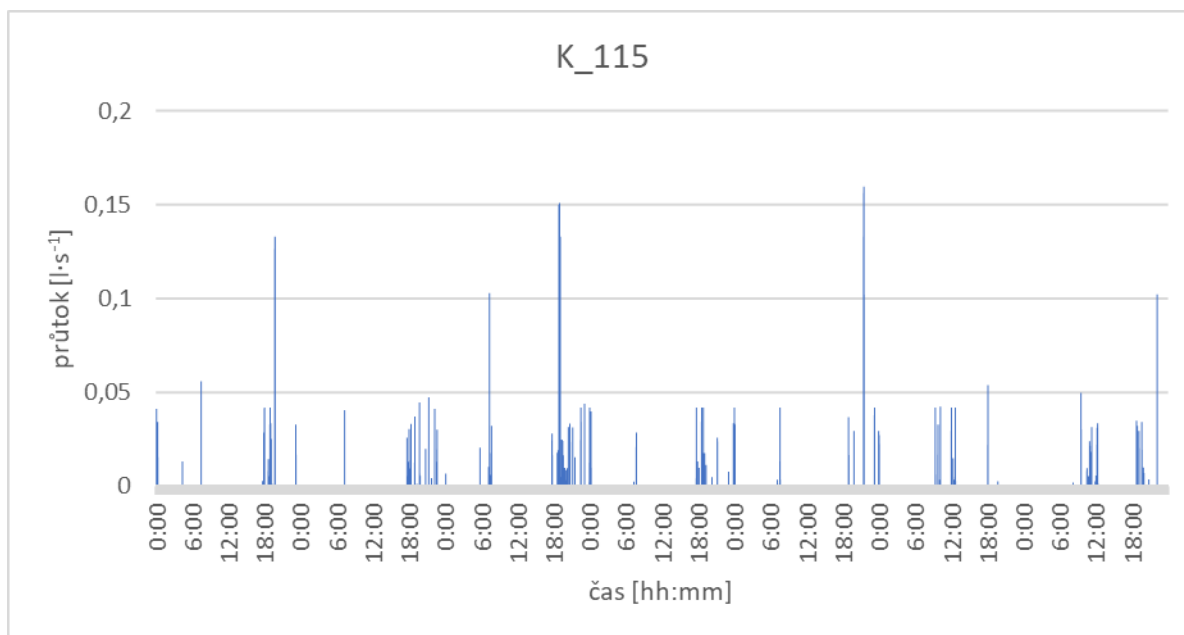
Do hydraulického modelu byly také přidány ztráty vody v potrubí. Ztráty činí 15 % objemu vody fakturované. Objem ztrát vody je rozdělený do uzlů rovnoměrně podle délky

přilehlých úseků. Křivka průběhu ztrát během modelovaného týdne je konstantní, koeficient=1.

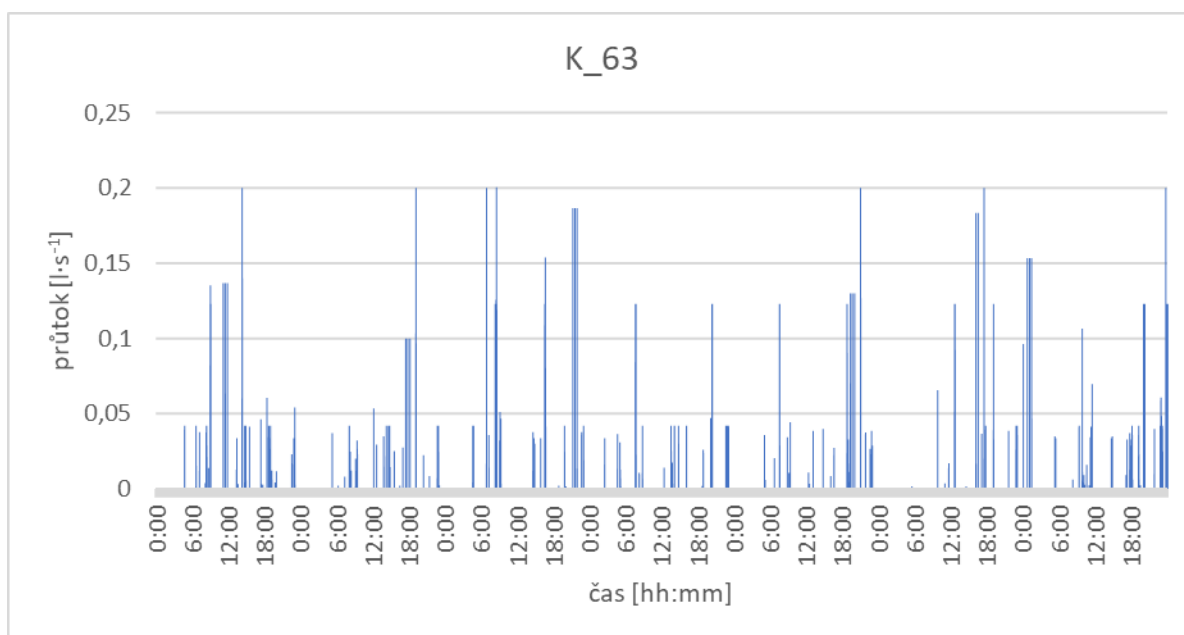
4.4.2 Příklady stochastických křivek

Srovnání vygenerovaných stochastických křivek v závislosti na objemu roční spotřeby vody v domácnosti. Stochastické křivky odběru vody jsou pro každý objekt unikátní. Za každou kategorii domácností je v této kapitole vybrána jedna křivka pro ukázkou.

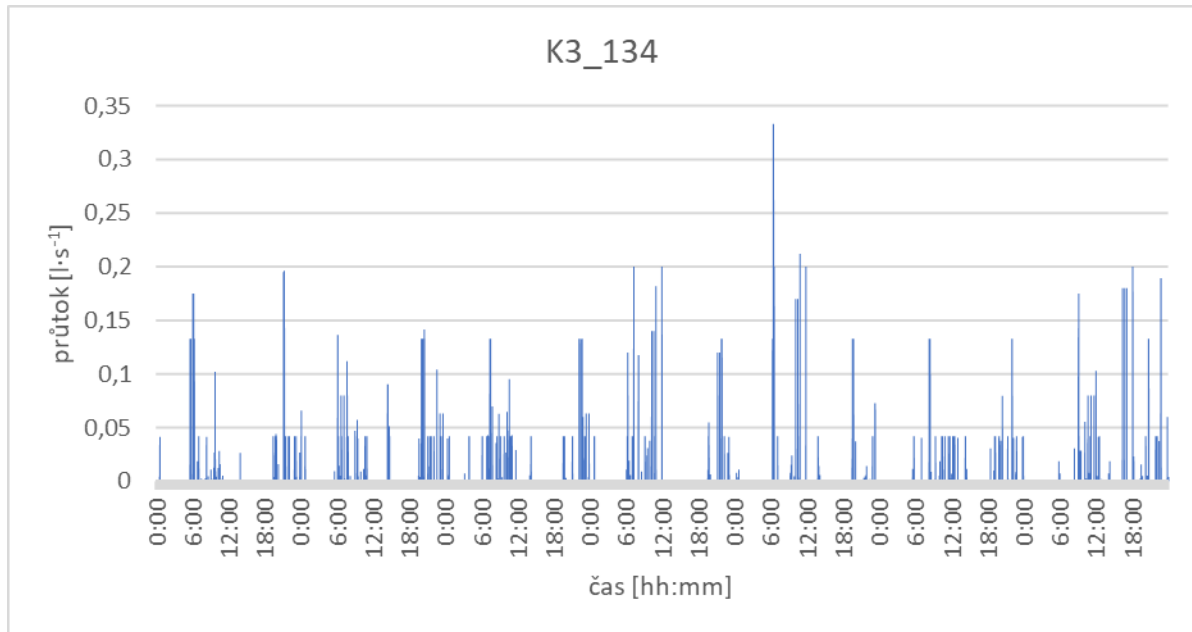
Graf 12 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 25 - 49 m³



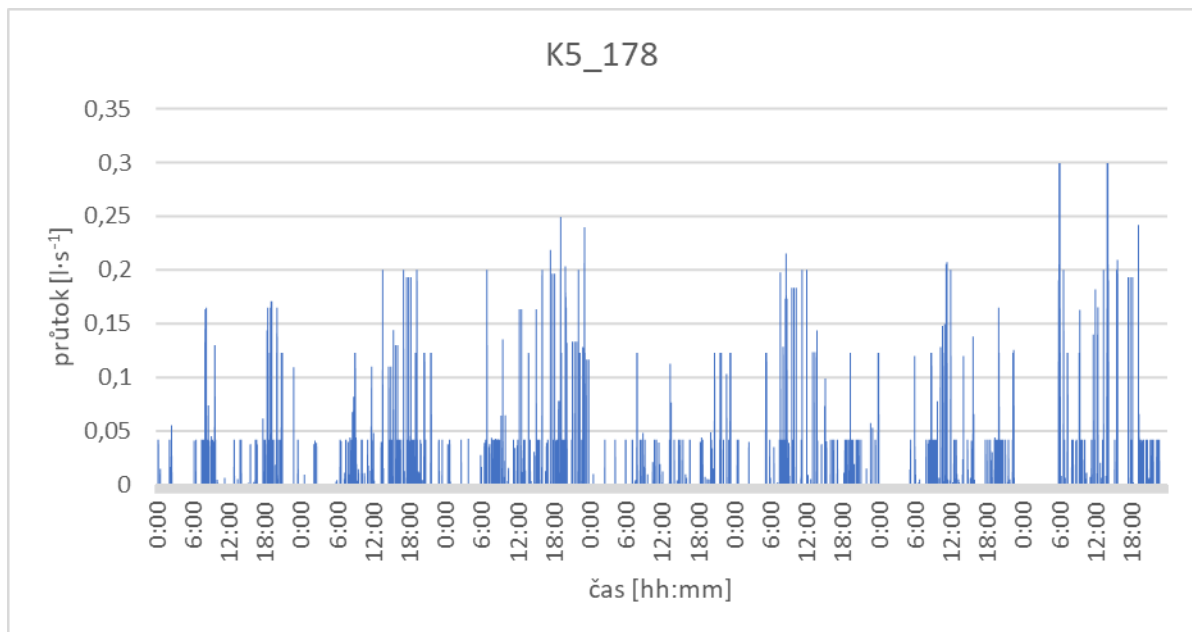
Graf 13 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 50 - 99 m³



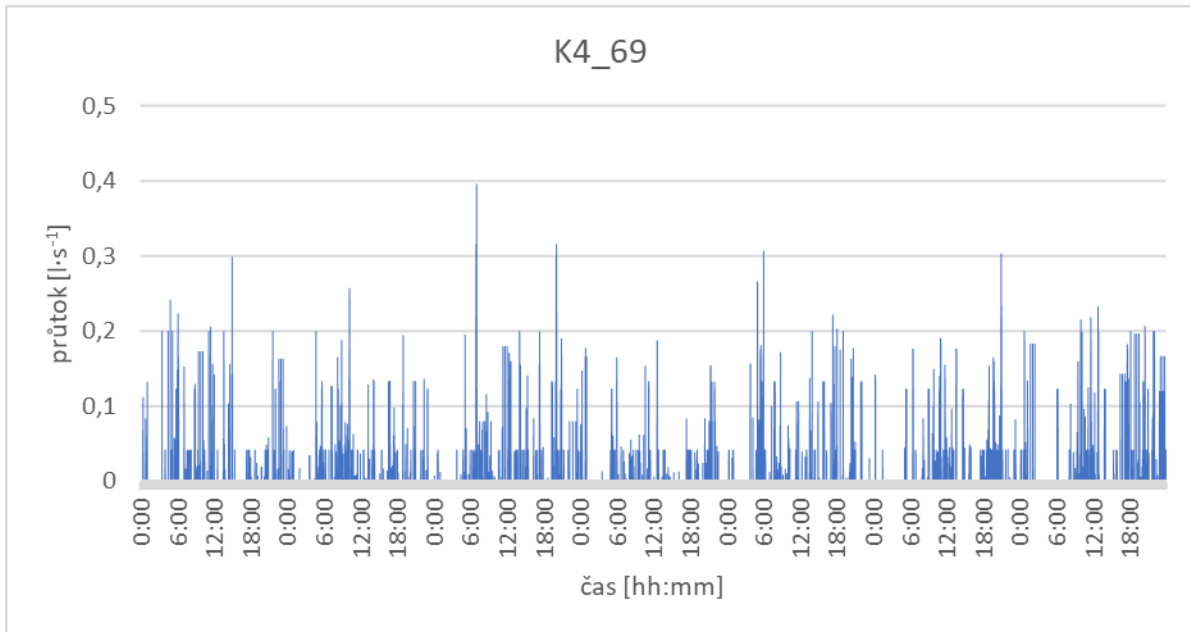
Graf 14 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 100 - 199 m³



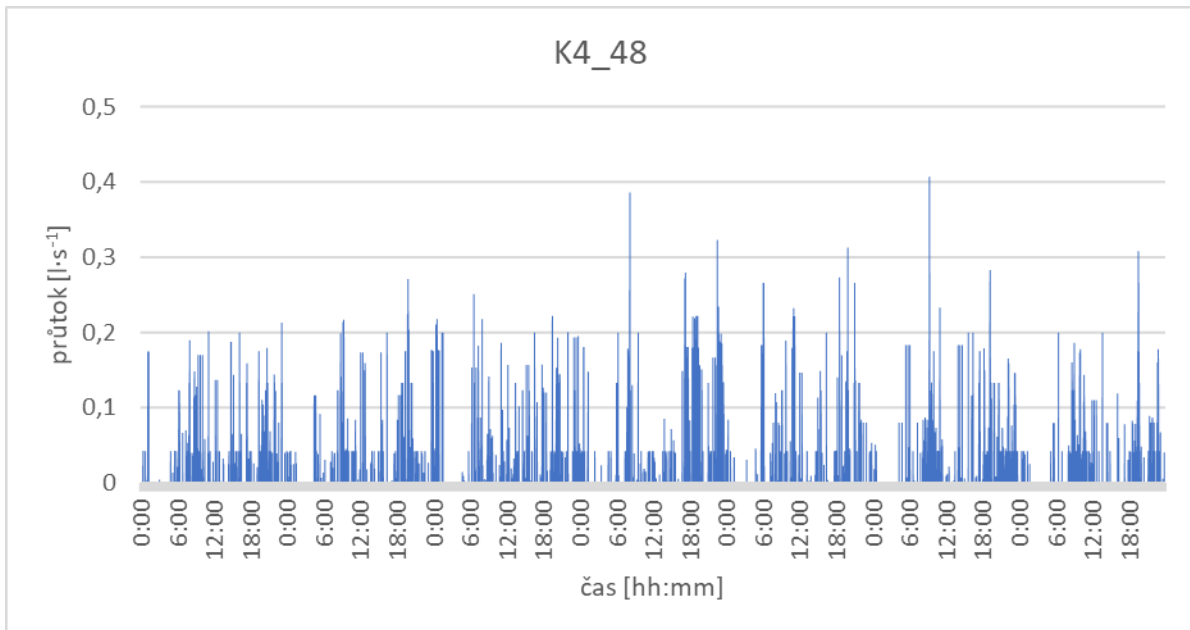
Graf 15 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 200- 299 m³



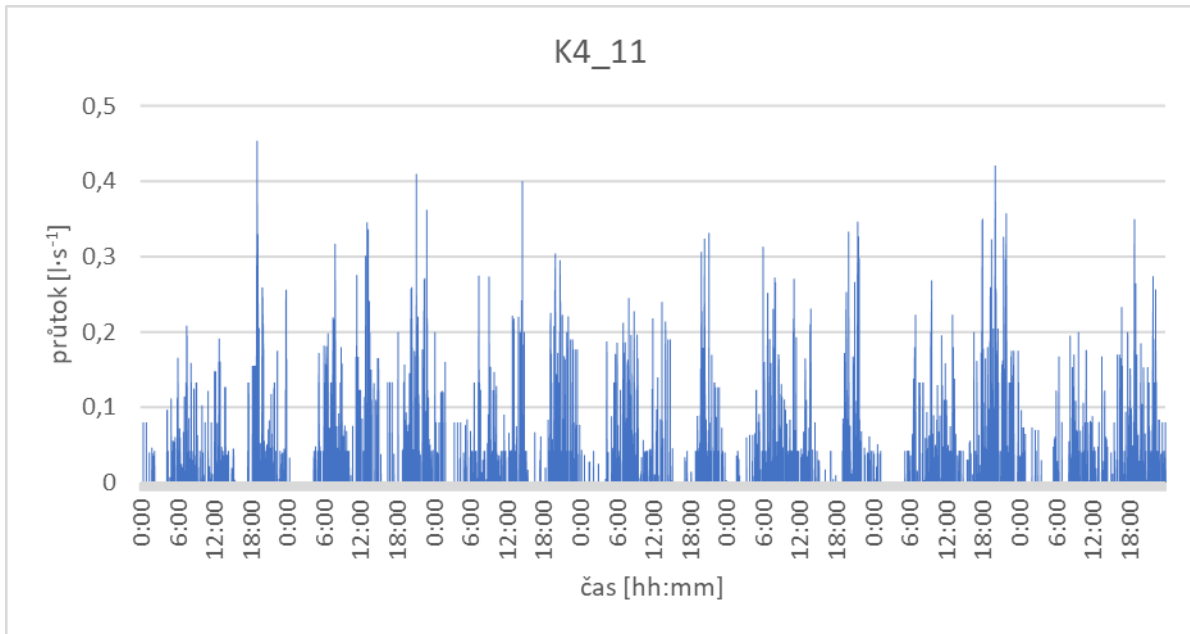
Graf 16 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 300 - 399 m³



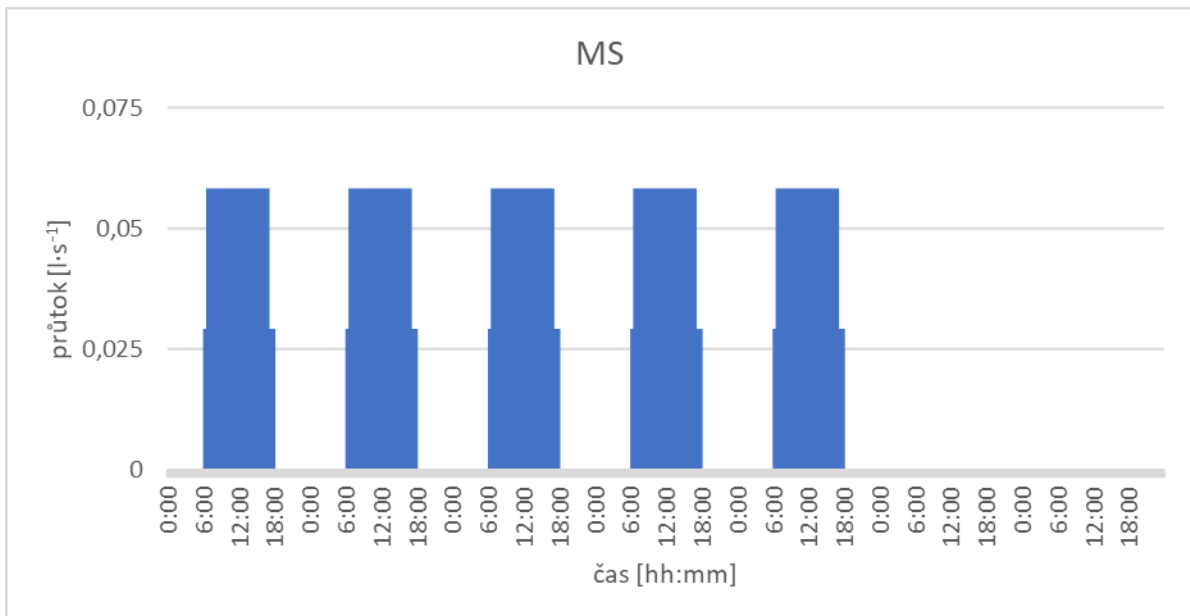
Graf 17 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 400 - 499 m³



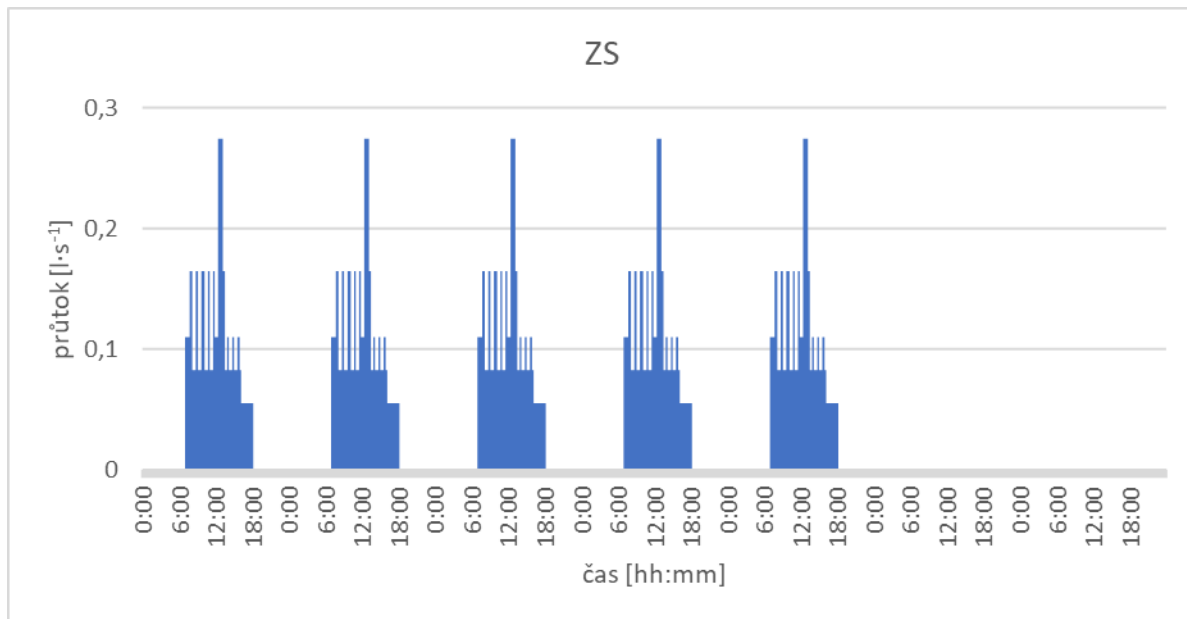
Graf 18 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou > 500 m³



Graf 19 Průtoky pro mateřskou školu

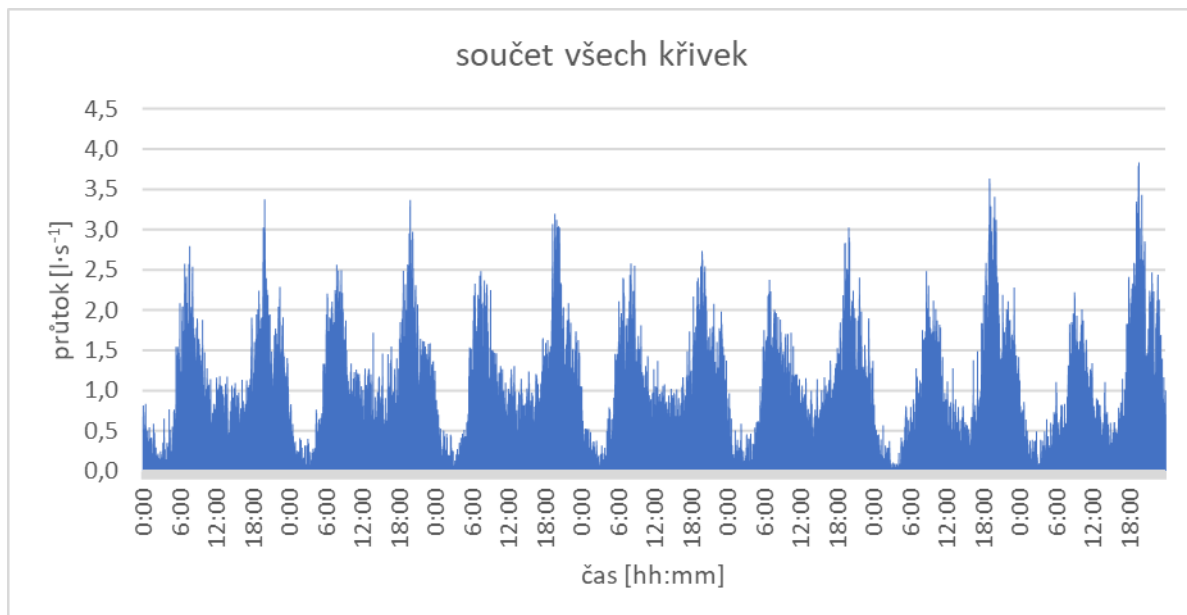


Graf 20 Průtoky pro základní školu



U grafu průběhu spotřeby pro celou obec je vidět, jak se liší jednotlivé modelované dny. V rámci pracovních dní je maximální denní průtok ve čtvrtek na úrovni $\frac{3}{4}$ špičkového pondělního průtoku.

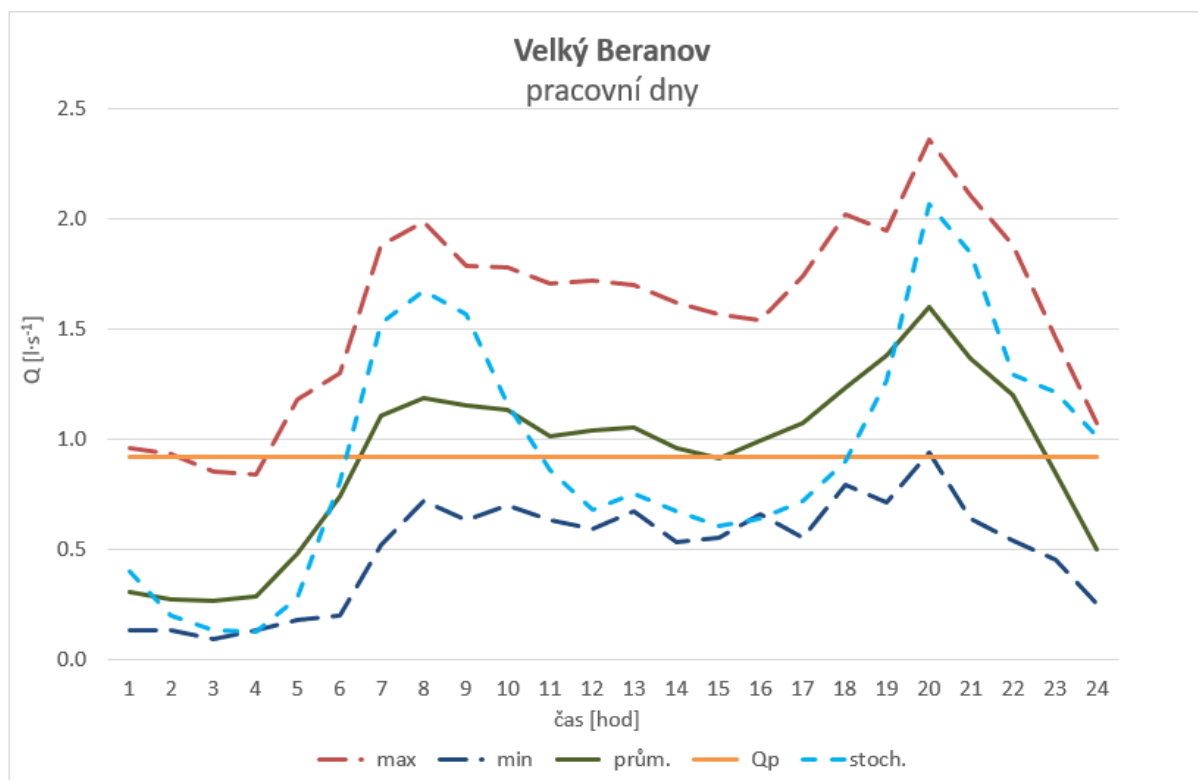
Graf 21 Týdenní průběh spotřeby vody s časovým krokem 1 minuta. Součet za celé spotřebišťe Velký Beranov



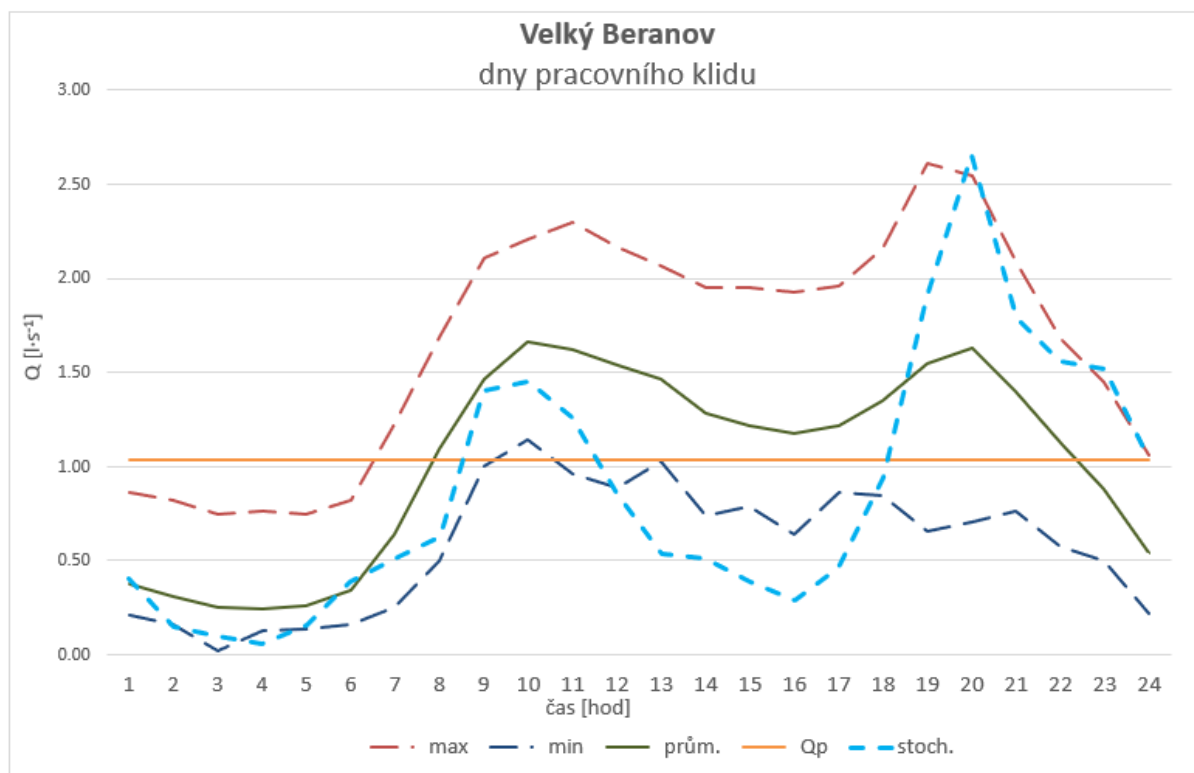
4.5 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ STOCHASTICKÉHO A DETERMINISTICKÉHO HYDRAULICKÉHO MODELU

Po sečtení vygenerovaných průtoků pro všechny domácnosti a vytvoření hodinových průměrů pro pracovní a nepracovní dny u stochastického modelu, lze přímo srovnat stochastické rozdělení spotřeby vody s deterministickým.

Graf 22 Srovnání průběhu spotřeby vody stochastického modelu – pracovní dny



Průběh denní spotřeby vody pro pracovní dny stochasticky simulovaného odběru vykazuje dobrou shodu s analýzou spotřeby vody deterministického modelu. Ranní i odpolední špička se časově i tvarově shodují. Křivka průběhu stochastické spotřeby vody vykazuje větší výkyvy v průtocích, v žádném časovém kroku však nepřesahuje naměřené minimální nebo maximální hodnoty naměřené na vodovodní síti. Průměrný průtok stochastické spotřeby vody je o $0,05 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ vyšší.

Graf 23 Srovnání průběhu spotřeby vody stochastického modelu – nepracovní dny

Srovnání průběhu spotřeby vody pro nepracovní dny je méně přesné než průběh ve dny pracovní. Povedlo se zachytit ranní nástup spotřeby vody a tvar ranní špičky. Přes odpolední hodiny ale dochází k propadu, ke kterému ve skutečnosti nedochází. Večerní špička je příliš ostrá a velká nicméně nastává ve správnou hodinu. Průměrná spotřeba vody za nepracovní den je u stochastické spotřeby nižší než v pracovní dny, ve skutečnosti je tomu ale naopak.

Jelikož se Velký Beranov nachází 5 km od krajského města Jihlava, je možné, že někteří obyvatelé města Jihlava navštěvují o víkendu Velký Beranov, a proto má v nepracovní dny vyšší průměrnou spotřebu než ve dny pracovní.

Horší shodu stochastické a deterministické křivky spotřeby vody během dne vidím v nemožnosti dostatečně popsat odlišnosti pro pracovní a nepracovní den v metodě MKZ.

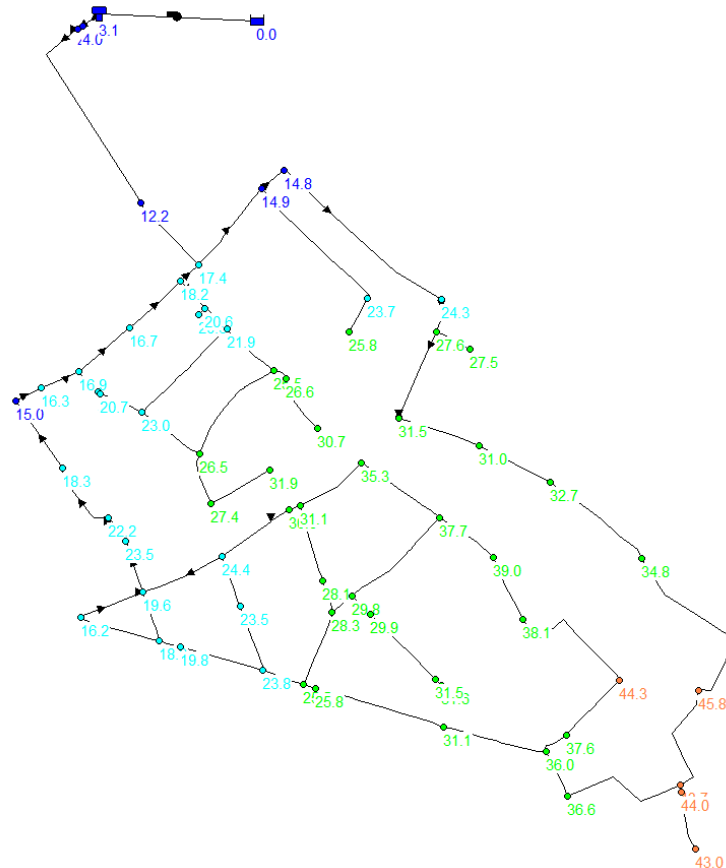
4.5.1 Maximální hydrostatický tlak

Rozdíl v maximálních tlacích u hydraulických modelů se stochastickým a deterministickým odběrem vody je minimální. Maximální tlak je dán polohou hladiny ve vodojemu. V noci, kdy jsou odběry ze sítě obecně nejmenší, dosahují oba modely shodných maximálních tlaků.

4.5.2 Minimální hydrodynamický tlak

Při srovnání minimálních tlaků vyskytujících se během dne na vodovodní síti zjistíme, že ani zde se tlaky u obou metod příliš neliší. Stochastický model má minimální tlaky mírně nižší než deterministický. Nejvyšší rozdíl minimálních hodnot činí 0,6 m v.sl. v uzlu 1_49. Průměrný rozdíl činí zanedbatelných 0,14 m v.sl.

Rozdíl v maximálních a minimálních tlacích je při srovnání obou modelů zanedbatelný. Kalibrace deterministického modelu je tak platná i pro model stochastický.



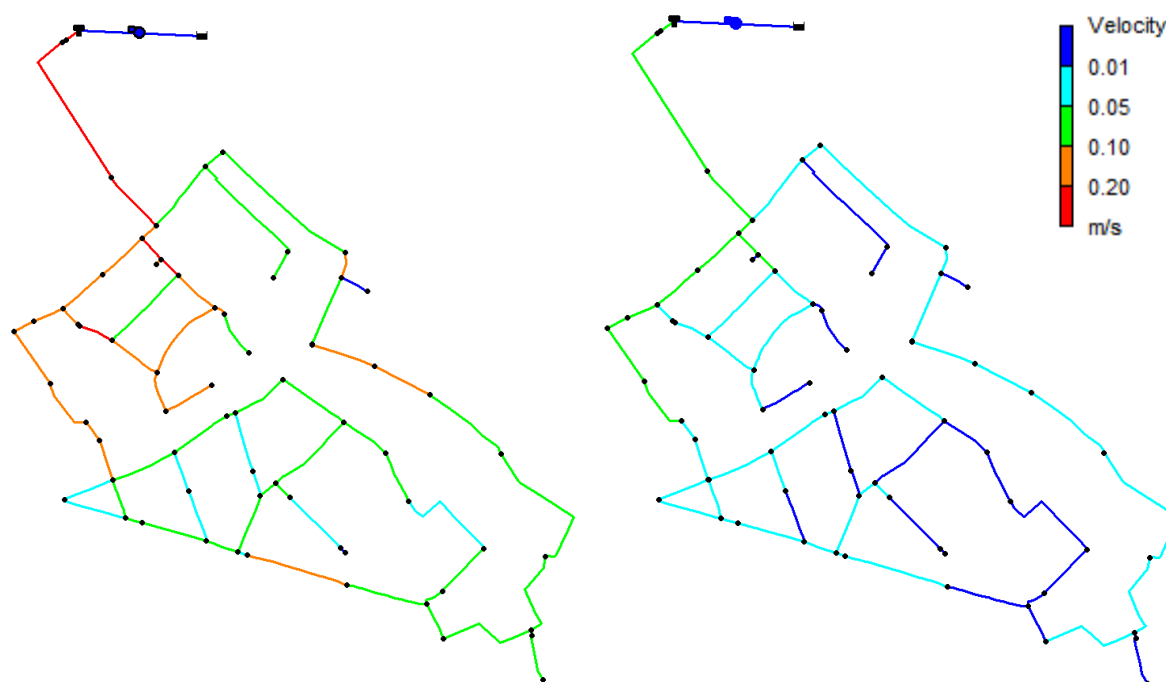
Obr. 4.11 Minimální hydrodynamické tlaky ve stochastickém modelu

4.5.3 Maximální rychlost proudění

Při srovnávání maximálních rychlostí, které se během modelovaného období vyskytnou, je třeba si uvědomit, že srovnáváme nejen stochastický model s deterministickým, ale že oba modely mají také jiný časový krok. Čím menší časový krok, tím vyšší, maximální rychlosti, které se na síti mohou vyskytnout. Protože je ve Velkém Beranově měření průtoků s časovým krokem 1 hodina, nelze bez dodatečného osazení dalšího měřicího zařízení modelovat deterministický model s kratším časovým krokem. U stochastického modelu je časovým krokem 1 minuta. Tento časový krok lze metodou MKZ simulovat bez dalšího měření na skutečné síti.

Další výhodou stochastického simulování spotřeby vody je malé prostorové měřítko, kdy modelujeme křivky odběru pro každou domácnost zvlášť. Díky tomu se naplno projeví rychlosti proudění vody i v koncových úsecích modelu, které bychom deterministickým modelem nebyli schopni získat.

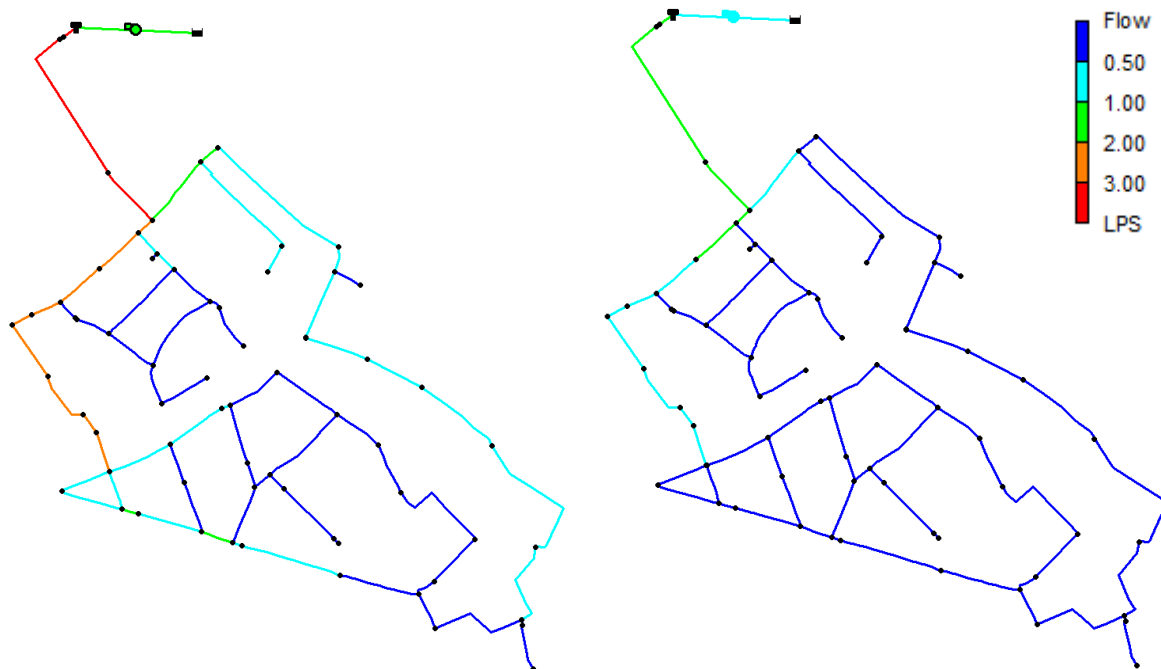
Maximální rychlost proudění u deterministického modelu je na vodovodní síti Velkého Beranova $0,097 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. U stochastického modelu je to 2,8x více, tedy $0,28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměrně je maximální rychlost proudění ve stochastickém modelu 3,6x vyšší než u modelu deterministického. Rozdíly v maximální rychlosti proudění vody ve vodovodní síti obou modelů jsou značné. Nicméně i výsledky maximální rychlosti stochastického modelu ukazují, že rychlosti jsou ve Velkém Beranově nízké.



Obr. 4.12 Srovnání maximálních rychlostí stochastického (vlevo) a deterministického (vpravo) modelu

4.5.4 Maximální průtoky

Maximální průtoky se u obou modelů liší podobně jako rychlost proudění. U stochastického modelu je maximální průtok v příváděcím řadu $3,95 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, u deterministického modelu činí tato hodnota $1,66 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměrné zvýšení maximálních průtoků v modelovaném období je 2,7x ve prospěch stochastického modelu.

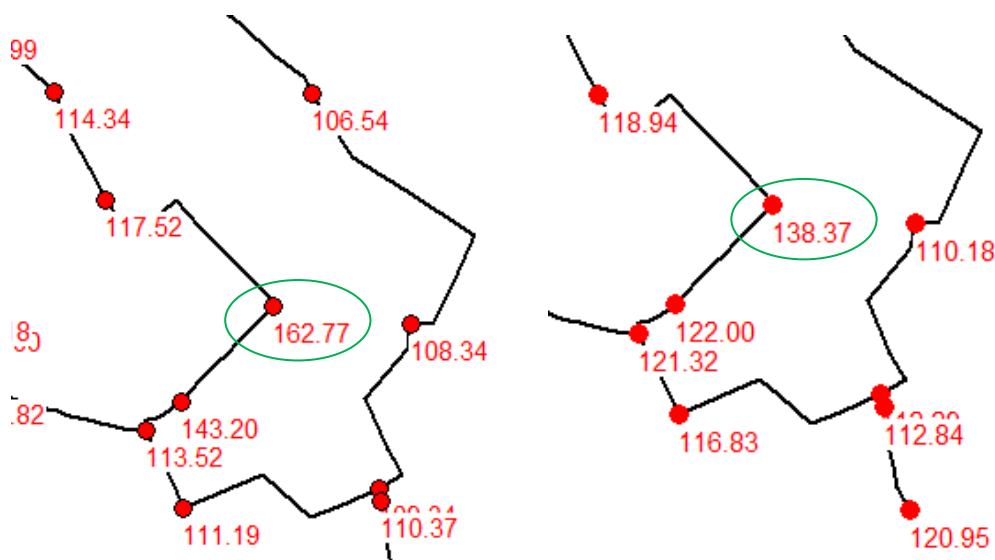


Obr. 4.13 Srovnání maximálních průtoků stochastického (vlevo) a deterministického (vpravo) modelu

Důležitou vlastností stochastického modelu je malé prostorové měřítko, kdy každá domácnost má vlastní křivku odběru vody. To je vhodné při modelování jakosti vody. Stochastický model nám díky tomu odkrývá, změny ve směru proudění vody v úseku během dne. Změny směru proudění přitom mají zásadní vliv na pohyb a ukládání sedimentů.

4.5.5 Maximální stáří vody

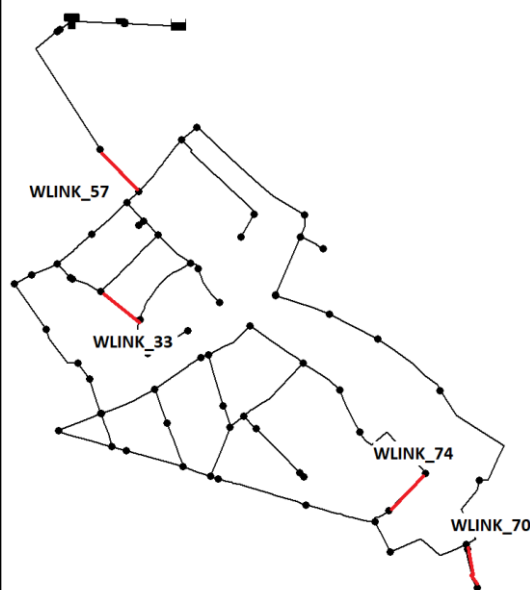
V úsecích, kde nedochází ke změnám směru proudění vody se maximální stáří vody shoduje u obou modelů. Tato shoda je dána tím, že oba modely mají průměrnou denní potřebu podobnou. Stochastický model simulováním odběrů vody na úrovni domácnosti odkrývá změny směru proudění v některých úsecích. V těchto úsecích tak díky zpětnému proudění dochází k delšímu zdržení vody, které deterministický model nedokáže predikovat.



Obr. 4.14 Rozdíl v určení stáří vody v uzlu, v jehož okolí dochází ke změnám ve směru proudění. Vlevo stochastický model, vpravo deterministický

Tab. 10 Porovnání vybraných úseků

Stochastický model			
úsek	max Q [$l \cdot s^{-1}$]	max v [$m \cdot s^{-1}$]	změna proudění
WLINK_70	0.327	0.066	ne
WLINK_74	0.308	0.066	59.6
WLINK_57	3.940	0.230	ne
WLINK_33	0.313	0.160	21.4
Deterministický model			
úsek	max Q [$l \cdot s^{-1}$]	max v [$m \cdot s^{-1}$]	změna proudění
WLINK_70	0.011	0.002	ne
WLINK_74	0.006	0.001	ne
WLINK_57	1.662	0.097	ne
WLINK_33	0.032	0.016	ne
Rozdíl			
úsek	max Q [$l \cdot s^{-1}$]	max v [$m \cdot s^{-1}$]	změna proudění
WLINK_70	0.316	0.064	x
WLINK_74	0.301	0.065	x
WLINK_57	2.279	0.133	x
WLINK_33	0.281	0.143	x



Obr. 4.15 Lokality vybraných úseků

V tabulce porovnání vybraných úseků je vidět, jak velký rozdíl může být mezi výsledky modelů s různým časovým a prostorovým měřítkem. Stochastický model s časovým krokem 1 minuta a unikátní křivkou odběru vody pro každou přípojku vykazuje násobně vyšší maximální průtoky a rychlosti. Navíc lze díky němu určit úseky, ve kterých se během dne mění směr proudění.

5 ZÁVĚR

V úvodu práce je provedena rešerše dvou přístupů ke stochastickému modelování spotřeby vody. Metoda POP využívá dat, která je potřeba naměřit na vzorku simulovaných domácností. Provádění takového měření je nákladná a časově náročná záležitost. U druhého přístupu ke stochastickému modelování spotřeby potřeba měření odpadá.

Metoda koncových zařízení je založena na demografických informacích, statistických datech chování členů domácností a technické specifikaci zařizovacích předmětů. Na základě řady různých pravděpodobností je simulováno používání vody v domě. Tato metoda byla použita v praktické části této diplomové práce.

V praktické části byla metodou MKZ modelována stochastická spotřeba vody. Obec Velký Beranov, na které bylo modelování spotřeby aplikováno, má necelých 1300 obyvatel a nachází se v ní 248 vodovodních přípojek. Objekty připojené k vodovodní síti byly rozděleny do několika kategorií podle roční spotřeby vody. Pro objekty s roční spotřebou vyšší než 25 m³ byly následně generovány stochastické křivky odběru vody. Časový krok v těchto křivkách byl 1 minuta. Délka modelovaného období činila 1 týden a skládala se z 5 pracovních a dvou nepracovních dní. Každá z křivek tak obsahuje 10 080 údajů o spotřebě v domácnosti, kterou modeluje. Stochastické křivky spotřeby vody byly následně aplikovány do hydraulického modelu Velkého Beranova v programu EPANET. Zde byla provedena kvazi-dynamická hydraulická analýza vodovodní sítě. Cílem práce bylo kromě vytvoření stochastického hydraulického modelu také jeho porovnání s modelem deterministickým.

Po převedení minutového časového kroku na hodinový bylo provedeno srovnání průběhů spotřeby stochastického modelu s deterministickým. Stochastická křivka vykazovala dobrou shodu s analýzou průtoků v pracovní dny. Pro nepracovní dny mi chyběla možnost více ovlivnit průběh a objem spotřeby vody.

Prvním z řady srovnání výsledků obou hydraulických modelů byly tlaky ve vodovodní síti. Na základě výsledků lze říci, že vliv stochastického modelování spotřeby vody má na tlakové poměry ve spotřebišti zanedbatelný vliv. Při srovnání výsledků maximálních průtoků se naplno projevil malý časový krok u stochastického modelu. Ve všech úsecích vodovodní sítě vypočítal stochastický model vyšší maximální průtoky než model deterministický. Průměrný nárůst maximálních průtoků činil 270 %. Nutno připomenout, že průměrný průtok je u obou modelů téměř totožný. Podobně jako maximální průtoky se zvětšili výsledky maximálních rychlostí v potrubí, které jsou ale stále ve Velkém Beranově malé. Vyšší rychlost vody v potrubí je žádaná, neboť nebude docházet k sedimentaci nerozpuštěných látek.

Stochastický model předvedl také schopnost odhalit, v jakých úsecích vodovodní sítě Velkého Beranova, dochází ke změnám směru proudění vody. V některých úsecích až 40 % času proudí voda opačným směrem. V takovém úseku dochází ke stárnutí vody a s tím související zhoršení její jakosti. Tyto úseky jsou také náchylnější k sedimentaci nerozpuštěných látek. Odhalení takového úseku je možné díky modelování spotřeby na úrovni domácností, ve stochastickém modelu.

Malý časový a prostorový krok má zcela zásadní vliv na velikost průtoků a modelované rychlosti v potrubí. Přestože bylo někdy obtížné dohledat statistická data, představuje stochastické modelování spotřeby vody metodou koncových zařízení, velmi zajímavé možnosti vylepšení hydraulických modelů.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TUHOVČÁK, Ladislav. *Vodárenství: Doprava vody*. Brno, 2006.
- [2] ŘÍHA, Jaromír. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: PC-DIR, spol. s r.o., 1997.
- [3] HŘEBÍČEK, Jiří. *Úvod do matematického modelování s využitím MAPLE* [online]. 2010 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://www.iba.muni.cz/res/file/ucebnice/hrebicek-uvod-do-matematickeho-modelovani.pdf>
- [4] KUČERA, Tomáš. *Vodojemy a čerpací stanice: (přednáška)*. Brno, 2018.
- [5] GYMNÁZIUM, OLOMOUC-HEJČÍN. *Mechanika tekutin* [online]. In: . s. 10 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://smd.gytool.cz/downloads/3_6_MECHANIKA_TEKUTIN_BAR.pdf
- [6] MASE, G.E. *Theory and problems of continuum mechanics*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- [7] *Zákon zachování hybnosti* [online]. In: FYZIKA007. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanika/zakon-zachovani-hybnosti>
- [8] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky: Zákon zachování energie* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/50-zakon-zachovani-energie>
- [9] BLOKKER, E. J. M., J. H. G. VREEBURG a J. C. VAN DIJK. Simulating residential water demand with a stochastic end-use model. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2010.
- [10] Složení domácností v Kraji Vysočina. *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/xj/slozeni_domacnosti_v_kraji_vysocina
- [11] E.J.M., Blokker. Comparison of two approaches of residential water demand modelling. In: . 2008. ISBN 978-90-8957-015-4.
- [12] Malý lexikon obcí ČR 2020. *Český statistický úřad* [online]. 1.1. 2020 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=MLO202010&z=T&f=TABULKA&skupId=3530&katalog=32955&pvo=MLO202010&pvokc=101&pvoch=40665>
- [13] Nejdražší silniční stavba Vysočiny: Po obchvatu Velkého Beranova už jezdí auta. *Jihlavský deník* [online]. 31.10.2020 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: https://jihlavsky.denik.cz/zpravy_region/nejdrazsi-silnicni-stavba-vysociny-po-obchvatu-velkeho-beranova-uz-jezdi-auta-20.html
- [14] *Obchvat Velkého Beranova bude otevřen přesně podle harmonogramu – 30. října 2020* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.kr-vysocina.cz/obchvat-velkeho-beranova-bude-otevren-presne-podle-harmonogramu-30-rijna-2020/d-4103433/p1=3380>
- [15] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=15.6629415&y=49.4060629&z=14>

- [16] O obci. *Velký Beranov oficiální web obce* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.velkyberanov.cz/o%2Dobci/d-5957/p1=5992>
- [17] Velký Beranov - CZ063.3707.6105.225 - stav 16. 1. 2017. *PRVK Kraje Vysočina* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <http://prvk.kr-vysocina.cz/prvk/karty/nahled/218>
- [18] FOEKEMA, H a O ENGELSMA. Een ander consumptiepatroon (het waterverbruik thuis 2001). *TNS NIPO*. Amsterdam, **2001**.
- [19] PŘIBYLOVÁ, Lenka. *Deterministické modely* [online]. 2015 [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/ps15/determ/web/docs/deterministonline.pdf>. Masarykova univerzita.
- [20] Pravděpodobnost. *Matematika.cz* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://matematika.cz/pravdepodobnost>
- [21] PAVLÍK, Tomáš. Biostatistika pro matematickou biologii. *Matematickabiologie.cz* [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinicky-ch-a-biologicky-ch-dat--biostatistika-pro-matematickou-biologii>
- [22] *Náhodná veličina* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn1/nahvelic.htm>
- [23] *Definice Poissonova procesu* [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-modelovani-dynamicky-ch-biologicky-ch-dat--vybrane-kapitoly-z-matematickeho-modelovani--poissonuv-proces--definice-poissonova-procesu>
- [24] NADRCHAL, Tomáš. *Generátory pseudonáhodných čísel rozdělení pravděpodobností*. 2013. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [25] NADRCHAL, Tomáš. *Pravděpodobnostní kalkulátor*. 2015. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [26] E.J.M., Blokker, Pieterse-Quirijns E.J. a Vreeburg J.H.G. Simulating non-residential water demand with a stochastic end-use model. *Journal of Water Resources Planning and Management.* , 19.
- [27] E.J.M., Blokker, Vera C.A. a Moerman A. Review of applications for SIMDEUM, a stochastic drinking water demand model with a small temporal and spatial scale. *Drink. Water Eng. Sci.* 2017, 12.
- [28] Spotřeba vody. *Www.scvk.cz* [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.scvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/spotreba-vody/>
- [29] NEUBAUER, Jiří a Oldřich KŘÍŽ. *Základy statistiky*. Praha: Grada Publishing, 2012.
- [30] ABRAHAM, E., E.J.M. BLOKKER a I. STOIANOV. Network Analysis, Control Valve Placement and Optimal Control of Flow Velocity for Self-Cleaning Water Distribution Systems. , 8 s.
- [31] ZLATANOVIC, Ljiljana, Andreas MOERMAN a Jan Peter VAN DER HOEK. Development and validation of a drinking water temperature model in domestic drinking water supply systems. *Urban Water Journal*. 2017.

- [32] PIETERSE-QUIRIJNS, E. J., E. J. M. BLOKKER a E. VAN DER BLOM. Non-residential water demand model validated with extensive measurements and surveys. *Drinking Water Engineering and Science*. 2013.
- [33] BLOK, Michael M. J. *Spatio-temporal modelling of drinking water consumption in Amsterdam*. Wageningen, The Netherlands, 2016. Degree of Master of Science. Wageningen University and Research Centre.
- [34] KOPECKÝ, Josef. *Hydraulická analýza vodovodní sítě obce Velký Beranov*. Brno, 2019. 63 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.
- [35] BLOKKER, E.J.M., J.H.G. VREEBURG a A.J. VOGELAAR. COMBINING THE PROBABILISTIC DEMAND MODEL SIMDEUM WITH A NETWORK MODEL. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*. 2006, , 11.
- [36] BLOKKER, E. J. M., J. H. G. VREEBURG a S. G. BUCHBERGER. Importance of demand modelling in network water quality models: a review. *Drink. Water Eng. Sci.* 2008, , 27-38.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklad výskytu spotřebičů a vodovodních kohoutků v domácnostech – Nizozemsko 2007 [9]	30
Tab. 2 Použití rozdělení pravděpodobností pro různé aplikace [9].....	32
Tab. 3 Statistická přítomnost obyvatel v domácnosti – Nizozemsko 2007 [9].....	33
Tab. 4 Shrnutí koncových zařízení a jejich používání pro všechny funkční místnosti [26]	35
Tab. 5 Využití MKZ pro různé aplikace a jejich vhodnost [27]	37
Tab. 6 Zastoupení materiálů a dimenzí	42
Tab. 7 Demografické údaje domácností [10]	47
Tab. 8 Denní rozvrh pro pracovní dny	48
Tab. 9 Denní rozvrh pro nepracovní dny	49
Tab. 10 Porovnání vybraných úseků	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 zleva-okrajová úloha, počáteční úloha [2]	12
Obr. 2.2 Hustota pravděpodobnosti rovnoměrného rozdělení [24].....	19
Obr. 2.3 Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení [24].....	20
Obr. 2.4 Hustota pravděpodobnosti logaritmicke-normálního rozdělení [24].....	21
Obr. 2.5 Hustota pravděpodobnosti chí-kvadrát rozdělení [24].....	21
Obr. 2.6 Hustota pravděpodobnosti Poissonova rozdělení [25].....	22
Obr. 2.7 Hustota pravděpodobnosti binomického rozdělení [25]	23
Obr. 2.8 Hustota pravděpodobnosti negativně binomického rozdělení [25].....	23
Obr. 2.9 Trajektorie Poissonova procesu [21].....	24
Obr. 3.1 Ukázka pulsů.....	25
Obr. 3.2 Ukázka deterministické a stochastické křivky spotřeby vody pro dům s roční spotřebou 250 m ³	28
Obr. 3.3 Vhodnost diskretních rozdělení pravděpodobností pro různé aplikace [9].....	31
Obr. 3.4 Srovnání naměřených hodnot se simulací metodou POP a MKZ, Milford USA [11]	38
Obr. 4.1 Obec Velký Beranov již s vyznačeným silničním obchvatem [15].....	39
Obr. 4.2 Jeden ze čtyř vrtů v lokalitě Rytířsko.....	40
Obr. 4.3 Úpravna vody Velký Beranov.....	41
Obr. 4.4 Vodojem Velký Beranov nový	41
Obr. 4.5 Parametry pro vodojem Velký Beranov nový.....	43
Obr. 4.6 Proplach hydrantu a následné osazení tlakového čidla SEBA.....	45
Obr. 4.7 Kalibrace uzlu 1_31	46
Obr. 4.8 Kalibrace uzlu 1_16	46
Obr. 4.9 Rozmístění přípojek a jejich roční spotřeba vody.....	52
Obr. 4.10 Stochastické křivky přiřazené do uzlu v softwaru EPANET	53
Obr. 4.11 Minimální hydrodynamické tlaky ve stochastickém modelu	61
Obr. 4.12 Srovnání maximálních rychlostí stochastického (vlevo) a deterministického (vpravo) modelu	62
Obr. 4.13 Srovnání maximálních průtoků stochastického (vlevo) a deterministického (vpravo) modelu.....	63
Obr. 4.14 Rozdíl v určení stáří vody v uzlu, v jehož okolí dochází ke změnám ve směru proudění. Vlevo stochastický model, vpravo deterministický	64
Obr. 4.15 Lokalita vybraných úseků	64

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Procentuální zastoupení materiálů	42
Graf 2 Analýza spotřeby vody – pracovní dny [34].....	44
Graf 3 Analýza spotřeby vody – nepracovní dny [34].....	44
Graf 4 Kategorie domácností	47
Graf 5 Jednočlenné domácnosti	48
Graf 6 Dvoučlenné domácnosti.....	48
Graf 7 Rodiny s dětmi	48
Graf 8 Využití vodovodního kohoutku v průběhu dne [9].....	49
Graf 9 Specifická spotřeba vody v domácnosti.....	50
Graf 10 Histogram roční spotřeby vody obce Velký Beranov	51
Graf 11 Objem vody spotřebované v jednotlivých kategoriích roční spotřeby	51
Graf 12 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 25 - 49 m ³	54
Graf 13 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 50 - 99 m ³	54
Graf 14 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 100 - 199 m ³	55
Graf 15 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 200- 299 m ³	55
Graf 16 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 300 - 399 m ³	56
Graf 17 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou 400 - 499 m ³	56
Graf 18 Průtoky v domácnosti s roční spotřebou > 500 m ³	57
Graf 19 Průtoky pro mateřskou školu	57
Graf 20 Průtoky pro základní školu	58
Graf 21 Týdenní průběh spotřeby vody s časovým krokem 1 minuta. Součet za celé spotřebiště Velký Beranov	58
Graf 22 Srovnání průběhu spotřeby vody stochastického modelu – pracovní dny.....	59
Graf 23 Srovnání průběhu spotřeby vody stochastického modelu – nepracovní dny	60

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

- ρ ... hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 v_i složky vektoru rychlosti v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 x_iprostorové souřadnice, jsou funkcemi času t
 σ_{ij}tenzor napětí
 $f_i(x,y,z,t)$vektory objemového zatížení f vztažené na jednotku hmotnosti
 $v_i(x,y,z,t)$složky vektoru rychlosti v
 ε_vtenzor rychlosti objemového přetvoření
 $\lambda(\rho,T)$koeficient objemového přetvoření
 $\mu(\rho,T)$koeficient dynamické viskozity
 μkoeficient dynamické viskozity
 $p(x,y,z,t)$tlak
 Φpředstavuje energii
 λdifúze
 S_Φobjemový zdroj
 zpolohová výška osy potrubí [m]
 xprostorová souřadnice ve směru osy potrubí [m]
 ptlak [Pa]
 ρhustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 vrychlost kapaliny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 τtečné napětí kapaliny [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$]
 Oomočený obvod potrubí [m]
 Aprůtočná plocha [m^2]
 αCoriollisovo číslo
 h_zztrátová výška [m]
 $\sum\xi$součet odporových součinitelů
 h_mmístní ztráty [m.v.s.]
POP...Poissonův obdelníkový puls
 I ...intenzita pulsu [$1\cdot\text{s}^{-1}$]
 D ...doba trvání pulsu [s]
 τ ...čas začátku pulsu
 $\pi(k)$...uživatелеm stanovený koeficient pro časový krok k

λ ...průměrný počet pulsů na dům za minutu
 Q ...průměrná spotřeba vody na dům za den
 α ...střední hodnota intenzity pulsu
 τ ...střední hodnota doby trvání pulsu
 U_m ...náhodná proměnná na intervalu [0,1]
 z ...proměnná standardního normálního rozdělení
MKZ...metoda koncových zařízení
 k ...značí jednotlivé koncové zařízení od 1 do M
 j ...značí obyvatele v domě od 1 do N
 i ...značí frekvenci používání armatury k od obyvatele j
 D ...doba trvání pulsu
 I ...intenzita pulsu
 τ ...čas začátku pulsu
pdf... pravděpodobnostní distribuční funkce
fix...fixní hodnota
 h ...index pro počet funkčních místností od 1 do L
VDJ...vodojem
PE...polyethylen
PVC...polyvinylchlorid

SUMMARY

In the introduction, there is a research of two approaches to stochastic water demand modelling. The POP method uses data that needs to be measured on a sample of simulated households. Making such measurements is a costly and time-consuming business. In the second approach to stochastic modeling of consumption, the need for measurement is eliminated.

The end-use model is based on demographic information, statistical data on the behavior of household members and the technical specifications of end-uses. Based on a number of different probabilities, the use of water in the house is simulated.

In the practical part, the stochastic water consumption was modeled using the MKZ method. The village of Velký Beranov, to which consumption modeling has been applied, has 248 water connections. Stochastic water abstraction patterns were subsequently generated for buildings with an annual consumption of more than 25 m³. The time step in these curves was 1 minute. The length of the modeled period was 1 week and consisted of 5 working and two non-working days. Each of pattern contains 10,080 data on household consumption,

The aim of the work was, in addition to creating a stochastic hydraulic model, also its comparison with the deterministic model. Stochastic pattern showed good agreement with the analysis of flows on working days. For non-working days, I lacked the opportunity to influence the course and volume of water consumption more.

Based on the results, it can be said that the influence of stochastic modeling of water consumption has a negligible effect on the pressure conditions in the consumer. Stochastic model also demonstrated the ability to detect in which sections of the Velký Beranov water supply network, were changes in the direction of water flow. In some sections, up to 40% of the time, the water flows in the opposite direction.

A small time and spacial scale has a fundamental effect on the size of flows and modeled velocities in the pipeline. Although it has sometimes been difficult to find statistical data, stochastic modeling of water consumption with end-use model is a very interesting way to improve hydraulic models.