

Změny kvality vody při dopravě a jejich modelování v programu Epanet 2

Ing. Kateřina Slavičková

Katedra zdravotního inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze,
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Úvod

Tento příspěvek se zabývá změnami kvality vody v distribuční síti při dopravě vody a faktory, které tyto změny ovlivňují. Je zaměřen na možnosti modelování doby zdržení, úbytku chloru a změn koncentrací vedlejších produktů dezinfekce v programu Epanet 2. V příspěvku jsou prezentovány výsledky výzkumu a modelování úbytku volného a celkového aktivního chloru při dopravě vody z úpravny vody Želivka přes vodojem Jesenice a vodojem Kopanina do pásma gravitace 312 v Praze Stodůlkách.

Vliv distribuce na kvalitu vody

Změnám kvality vody při dopravě je v současné době věnována zvýšená pozornost. Důvodem je rozvoj poznatků, s nímž souvisí změny norem, předpisů a také dokonalejší technika, která umožňuje přesnější stanovení nižších koncentrací látek. Současně dochází také k rozvoji matematických modelů, které umožňují hydraulické modelování a modelování kvality vody. Pro změny kvality vody při distribuci má velký význam dezinfekce. Dezinfekční činidlo musí zajistit spolehlivé hygienické zabezpečení vody. Je spotřebováváno při reakcích s látkami obsaženými v proudící vodě a také při reakcích s produkty koroze a biofilmy u stěny potrubí. Náklady na úpravu kvalitní pitné vody mohou být vynaloženy zbytečně, nevěnuje-li se dostatečná pozornost distribučním systémům. Je prokázáno, že v průběhu distribuce pitné vody dochází vlivem chemických, fyzikálně-chemických a mikrobiologických procesů ke zhoršování kvality vody v celé řadě ukazatelů. K těmto ukazatelům patří např. zákal, zbarvení, chuť, obsah rozpuštěných látek, obsah železa, manganu, zbytková koncentrace dezinfekčního činidla a další.

Výpočet kvality vody v programu Epanet 2

Modelování kvality vody musí být založeno na podrobném hydraulickém modelu, který zahrnuje změny hydraulických veličin v dostatečně dlouhém časovém období. Na rozdíl od hydraulických parametrů závisí parametry kvality vody na předchozích událostech. Koncentrace látky na určitém místě v síti (a v určitém čase) je závislá na dějích, které předtím proběhly na jiných místech sítě (blíže k úpravně).

Epanet 2 je software umožňující numerické modelování hydraulických poměrů v tlakových trubních sítích v dosti dlouhém časovém období včetně výpočtu doby zdržení a výpočtu některých kvalitativních parametrů. Pro modelování kvality vody je třeba sestavit podrobný hydraulický model a zahrnout do něho konkrétní změny hydraulických parametrů v čase. Jedná se především o změny odběrů, zapínání/vypínání čerpadel, provozní hladiny ve vodojemech a stav uzávěrů na potrubí.

Epanet 2 vyhodnocuje průtok v každém potrubí, tlak v každém uzlu, výšku vody v každém vodojemu a koncentrace chemických látek v síti během simulovaného časového období ve všech časových krocích. Kromě koncentrací chemických látek umožňuje simulovat dobu zdržení a stopovací pokus. Může být použit pro různé analýzy distribučního systému, například pro návrh programu odběru vzorků, kalibraci hydraulického modelu a analýzy zbytkového chloru.

Hlavní rovnice pro řešení kvality vody v Epanetu jsou založeny na principu zachování hmoty spolu s reakční kinetikou. Rozpuštěná látka se pohybuje po délce potrubí stejnou průměrnou rychlostí jako nosná tekutina a ve stejné době reaguje (přibývá nebo ubývá) určitou měrou. Mezi sousedními díly vody postupujícími potrubím nedochází k žádnému promíchávání hmoty. V uzlech sítě, které mají přítok ze dvou nebo více potrubí je uvažováno úplné a okamžité míchání tekutin. Tedy koncentrace látky opouštějící uzel je váženým průměrem koncentrací na přítoku. Pro mnoho vodojemů provozovaných v režimu naplnění a postupného prázdnění je vhodné předpokládat, že obsah akumulčních zařízení je úplně promíchávaný, pokud je přítoku předána dostatečná průtoková síla. (2). Za podmínek úplného směšování je koncentrace ve vodojemu směsí nynějšího obsahu látek a toho, který má do vodojemu vstupující voda. Současně se koncentrace ve vodojemu mění vlivem reakcí.

Reakce v proudící vodě

Když se látka pohybuje potrubím nebo zůstává v akumulční nádrži, může reagovat s dalšími látkami ve vodě. Míra reakce může být obecně popsána jako mocninná funkce koncentrace

$$r = kC^n \quad (1)$$

Kde k reakční konstanta

n řád reakce

Pokud existuje limitní koncentrace růstu nebo úbytku dané látky, pak je míra reakce

$$R = K_b (C_L - C)C^{(n-1)} \quad \text{pro } n > 0, K_b > 0 \quad (2)$$

$$R = K_b (C - C_L)C^{(n-1)} \quad \text{pro } n > 0, K_b < 0 \quad (3)$$

Kde C_L limitní koncentrace

Příklady reakcí různého řádu jsou:

- Prostý úbytek prvního řádu
Úbytek mnoha látek, jako je například chlor, může být postačujícím způsobem modelován jako prostá reakce prvního řádu.
- Saturační růst prvního řádu
Tento model může být aplikován na růst vedlejších produktů dezinfekce, jako jsou trihalogenmethany, kde je konečná tvorba vedlejšího produktu (C_L) limitována množstvím přítomných reaktivních prekurzorů.
- Dvoukomponentní úbytek druhého řádu
Tento model předpokládá, že látka A reaguje s látkou B v neznámém poměru za vzniku produktu P. Míra úbytku A je proporcionální zbývajícimu produktu A a

B. C_L může být kladné nebo záporné v závislosti na tom, zda je buď látka A nebo B v přebytku. Clark 1998 úspěšně aplikoval tento model na data úbytku chloru, která neodpovídala jednoduchému modelu prvního řádu.

- Kinetika úbytku Michaelis-Menton

Jako zvláštní případ, je-li specifikován záporný řád reakce n , Epanet použije rovnici Michaelis-Menton pro reakci úbytku nebo po úpravě jmenovatele pro modelování růstu. Tato rovnice je často užívána pro popis reakcí katalyzovaných enzymy a mikrobiální růst. Při nízkých koncentracích simuluje chování podle reakce prvního řádu a při vyšších koncentracích podle reakce nultého řádu. Pro reakce úbytku látky musí být C_L vyšší než počáteční koncentrace. Koechling (1998) aplikoval kinetiku Michaelis-Menton na modelování úbytku chloru v mnoha různých případech a zjistil, že K_b a C_L mohou být určitým způsobem vztaženy k obsahu organických látek ve vodě a k UV absorbanci.

- Růst nultého řádu

Tento zvláštní případ může být použit pro modelování stáří vody, kde s každou jednotkou času „koncentrace“ (tj. stáří) vzrůstá o jednu jednotku.

Reakce u stěny potrubí

Při dopravě vody potrubím mohou být látky ve vodě rozpuštěné transportovány ke stěně potrubí a reagovat s látkami jako jsou korozní produkty nebo biofilm. Plocha stěny potrubí dostupná pro reakci a míra přestupu hmoty mezi proudící vodou a stěnou má vliv na celkovou míru této reakce. Pro kinetiku 1. řádu může být míra reakce na stěně potrubí vyjádřena jako:

$$r = \frac{2k_w k_f C}{R(k_w + k_f)} \quad (4)$$

Kde k_w konstanta poklesu chloru u stěny pro rovnici I. řádu, [délka/čas]

k_f koeficient přestupu hmoty, [délka/čas]

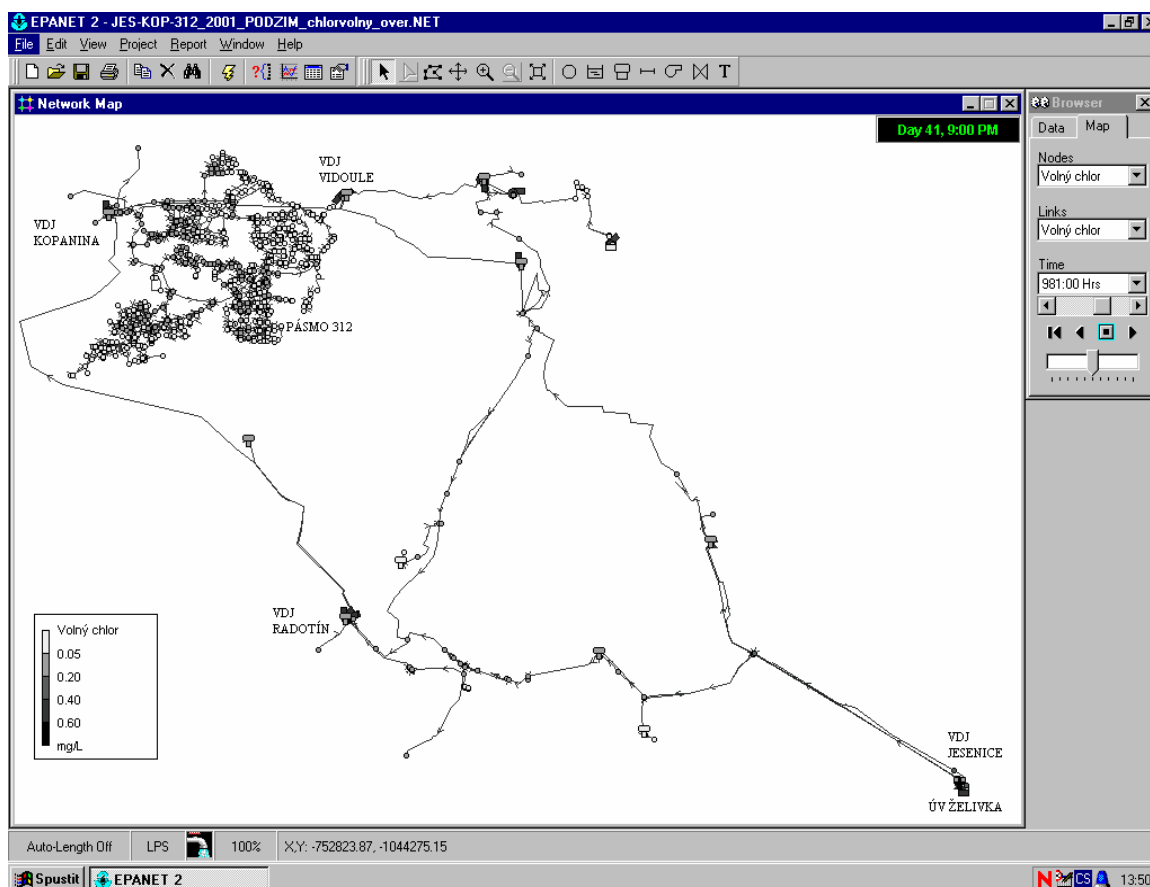
R poloměr potrubí

Modelování doby zdržení a úbytku chloru v distribuční síti ÚV Želivka - VDJ Jesenice – VDJ Kopanina – pásmo gravitace 312

Na základě analýzy dob zdržení vypočtených pro všechny uzly sítě v programu Epanet a vyhodnocení dat kvality vody za období 1997 – 1999 byla ve spolupráci s ÚLKKT vybrána vhodná místa pro sledování hodnot volného a celkového aktivního chloru. Měření bylo prováděno v závislosti na době zdržení, aby bylo možné hodnotit „stejnou“ vodu od úpravny vody až ke spotřebitelům. Dny a časy měření byly optimalizovány tak, aby se co nejvíce měření realizovalo během pracovních dnů. Měření koncentrací volného a celkového aktivního chloru proběhlo celkem čtyřikrát – v listopadu a prosinci 2000 a v červnu a listopadu 2001. Koncentrace chloru na odtoku z úpravny vody Želivka měřili pracovníci laboratoře ÚV Želivka, měření koncentrací chloru na ostatních odběrných místech prováděli pracovníci katedry zdravotního inženýrství FSv ČVUT. Pro kolorimetrické měření koncentrací chloru byl použit přenosný přístroj HACH.

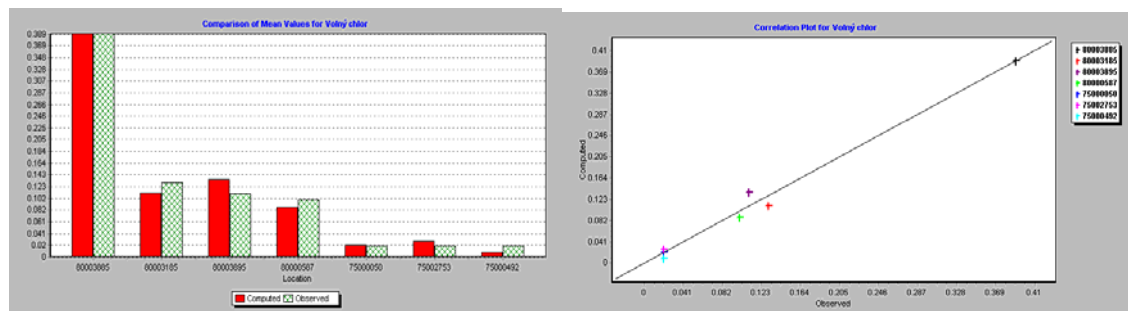
Kalibrace modelů úbytku chloru

Kalibrace modelu úbytku chloru byla pro volný i celkový aktivní chlor provedena v programu Epanet 2 s použitím dat koncentrací chloru změřených v listopadu 2000. Hydraulický model byl aktualizován a pro kalibraci byla použita data o průtocích, hladinách ve vodojemech a čerpání za období říjen a listopad 2000. Toto období považujeme za dostatečně dlouhé pro postižení pravidelně se opakujících jevů a pro ustálení systému. Při kalibraci byly měněny koeficienty úbytku chloru tak, aby modelované hodnoty co nejvíce odpovídaly hodnotám změřeným. Úbytek chloru byl modelován v proudící vodě i u stěny potrubí.



Obr. 1 Schéma distribuční sítě v modelu Epanet

U modelu volného chloru byly pro kalibraci modelu použity průměrné hodnoty koncentrací volného chloru i koncentrace změřené v listopadu 2000.



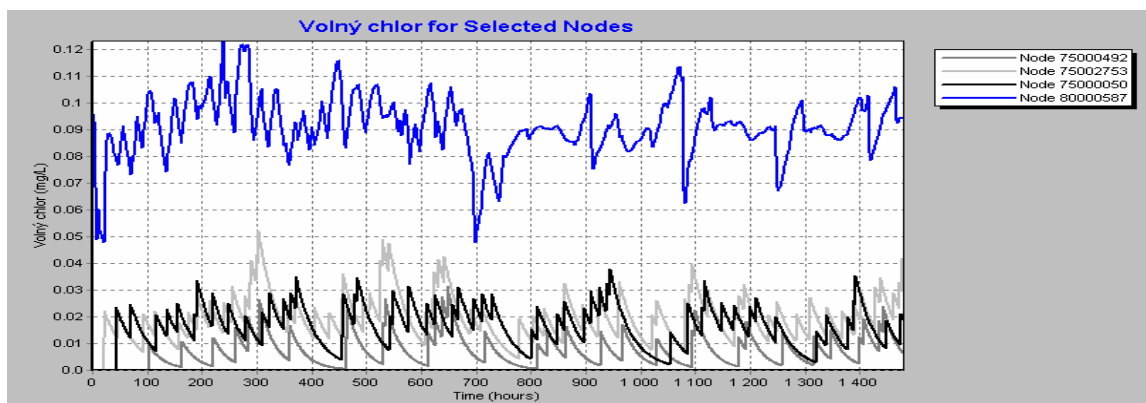
Obr. 2 Korelace průměrů změřených a modelovaných dat a porovnání průměrných namodelovaných a změřených koncentrací volného chloru

Závěry a diskuse

Doba zdržení v síti se v průběhu dne i v delším časovém období mění v závislosti na režimu čerpacích stanic. Částice vody musí při dopravě na vzdálenější místa sledované sítě urazit cca 80 km. Doba zdržení vody je až 11 dnů podle odběrného místa a průtokových poměrů v síti. Režim čerpání náhle a významně ovlivňuje změny koncentrací zbytkového chloru ve VDJ Kopanina a tím i v pásmu 312.

Obsah volného i celkového aktivního chloru v různých částech distribučního systému pitné vody v průběhu 24 hodin značně kolísá, což je ovlivněno hydrodynamickými podmínkami v síti, obsahem látek schopných oxidace, přítomností korozních produktů, depozic, volných a fixovaných bakterií. Úbytek volného i celkového aktivního chloru v distribuční síti lze zjednodušeně popsat rovnicí formální kinetiky 1. řádu.

V programu Epanet byl kinetikou 1. řádu modelován úbytek volného i celkového aktivního chloru. Vzhledem k nepravidlostem čerpání a simulaci poruchy čerpadla v modelovaném období byly modely úbytku chloru kalibrovány s použitím dat ze stejného období. Kalibrace byla provedena u rychlostních konstant úbytku chloru v proudící vodě i u stěny potrubí. U modelu volného chloru byly pro kalibraci modelu použity průměrné hodnoty koncentrací volného chloru i koncentrace změřené v listopadu 2000. Rychlostní konstanta úbytku chloru v proudící vodě $K_b = -0,36$, rychlostní konstanta úbytku chloru u stěny potrubí $k_w = -0,02$. Výsledkem kalibrace modelu celkového aktivního chloru je rychlostní konstanta úbytku chloru v proudící vodě $K_b = -0,48$ a rychlostní konstanta úbytku chloru u stěny potrubí $k_w = -0,015$.



Obr. 3 Průběh modelovaných koncentrací chloru ve vybraných uzlech

Výzkum byl realizován ve spolupráci s Pražskými vodovody a kanalizacemi, a.s.. Byl podpořen grantem NAZV QD 1004/01 a výzkumným záměrem CZ: J04/98:211100002.

Literatura

1. CHAMBERS, V.K; CREASEY, J.D.; JOY, J.S.: Modelling free and total chlorine decay in potable water distribution systems, *Aqua* Vol. 44, 1995, No. 2, str. 60-69
2. ROSSMAN, L.A.: *Epanet Users Manual*, EPA, September 2000
3. GRUNWALD, A. A KOL.: *Tvorba, evoluce a modelování vedlejších produktů dezinfekce v distribuční síti pitné vody. Závěrečná zpráva GAČR 103/99/0659, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha 2001*