

Modelování úbytku chloru a nárůstu koncentrací železa v distribuční síti pitné vody

*Ing. Kateřina Slavičková, Ph.D., Prof. Ing. Alexander Grünwald, CSc,
Ing. Marek Slaviček, Ph.D., Ing. Bohumil Šťastný, Ing. Klára Štrausová*
Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, Fakulta stavební, ČVUT v Praze,
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Úvod

Modely kvality vody v rozvodném systému jsou podstatným prvkem snahy vodáren dodávat zdravotně nezávadnou a příslušnou normu splňující vodu až k poslednímu spotřebiteli. Řádně kalibrované a verifikované modely kvality vody v distribučním systému je možno aplikovat při předpovědi možnosti potenciálního zhoršení kvality vody, při vyhodnocení účinnosti dezinfekčního systému, při zhodnocení vlivu distribuční sítě na kvalitu vody a případně při projektech na zlepšení funkce a provozu akumulčních nádrží.

Tento příspěvek se zabývá změnami kvality vody v distribuční síti při dopravě vody a je zaměřen na možnosti modelování úbytku celkového aktivního chloru, volného chloru a nárůstu koncentrací železa v programu Epanet 2. V příspěvku jsou prezentovány výsledky výzkumu a modelování změn kvality vody v části Jihočeské vodárenské soustavy z úpravny vody Plav do vodojemu Hodušín.

Modelování změn kvality vody v programu Epanet 2

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. Pro modelování kvality vody používá EPANET 2 metodu Lagrangian time-driven metod a v pevně daných časových krocích sleduje změny v řadě segmentů vody, které se pohybují potrubím a míchají v uzlech. 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. Kromě reakcí v proudící vodě umožňuje program současně modelovat také reakce u stěny potrubí.

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

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

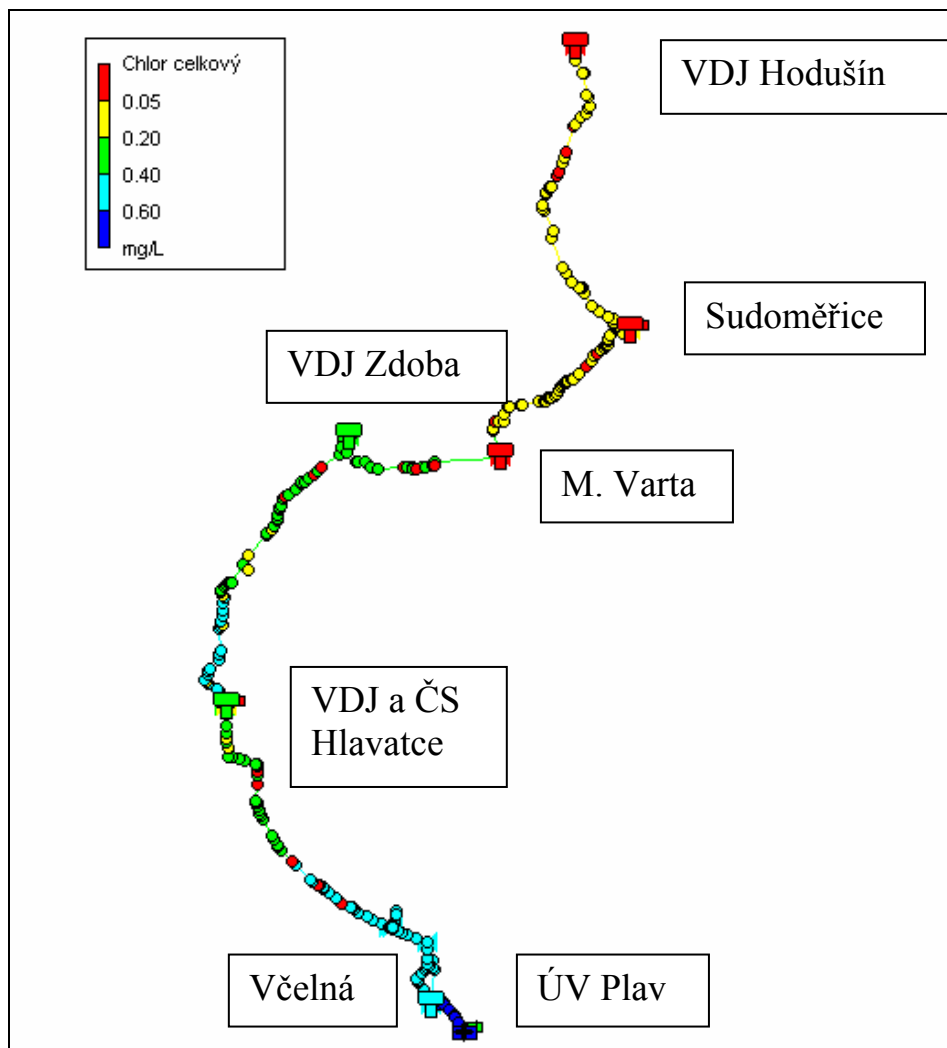
$$R = K_b (C - C_L)C^{(n-1)} \quad \text{pro } n>0, K_b<0 \quad (3)$$

Kde C_L limitní koncentrace

Program Epanet 2 je úspěšně využíván pro modelování úbytku chloru již mnoho let. V tomto případě jsme se snažili ověřit možnost jeho využití také pro modelování nárůstu koncentrací železa.

Základní údaje a měření dat

Délka řešené části sítě je 89,77 km. Nezbytným podkladem pro modelování změn kvality vody byl dříve sestavený hydraulický model části Jihočeské vodárenské soustavy v úseku ÚV Plav – Hodušín. Schéma modelované sítě je na obr. 1.

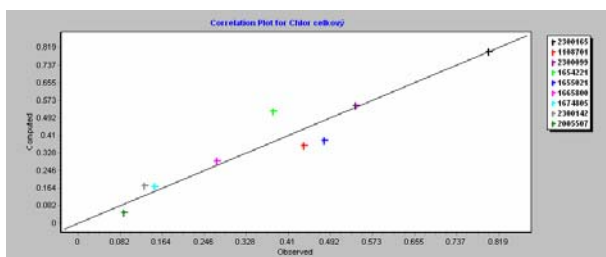


Obr. 1. Schéma modelovaného úseku ÚV Plav – Hodušín se zobrazením hodnot celkového aktivního chloru

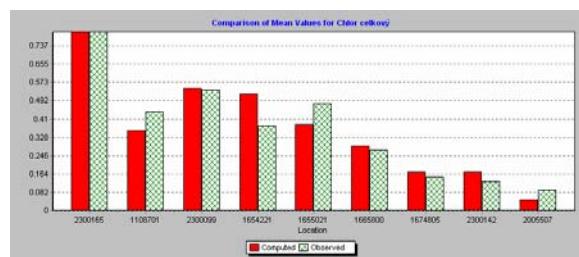
Pro kalibraci modelů bylo realizováno podrobnější měření koncentrací celkového aktivního chloru, volného chloru a železa v týdnu od 9.9.2002 do 13.9.2002. Další měření pro verifikaci modelů byla realizována na konci roku 2002 ve všech odběrných místech a v roce 2003 ve sníženém počtu odběrných míst. Voda je dochlorována na VDJ Hlavatce a na VDJ Zdobá, v některých dnech měření je rozdíl mezi koncentrací měřenou na přítoku a na odtoku nepatrný (voda nebyla dochlorována nebo byla dávka natolik nízká, že se dochlorování neprojeví), jindy je rozdíl koncentrací významný. Proto byly pro kalibraci modelů úbytku celkového aktivního i volného chloru použity průměry z hodnot měřených v týdnu od 9.9.2002 do 13.9.2002.

Modelování úbytku celkového aktivního a volného chloru v distribuční síti ÚV Plav – VDJ Hodušín

V programu Epanet 2 byly sestaveny různé modely úbytku celkového aktivního a volného chloru s využitím kinetiky prvního a nultého řádu jak v proudící vodě, tak u stěny potrubí. Na základě vyhodnocení měřených dat koncentrací celkového aktivního a volného chloru byly jednotlivé modely kalibrovány s využitím průměrů koncentrací chloru měřených v kalibračním týdnu. Modely, které vykazovaly nejlepší shodu měřených a modelovaných veličin byly verifikovány. Po snížení počtu odběrných míst pro měření v roce 2003 data nepostihovala variabilitu koncentrací před a po dochlorování. Tato měření byla postačující pro další verifikaci modelu, model však bylo třeba nejprve kalibrovat a verifikovat s využitím podrobnějších měření z roku 2002.



Obr. 2 Korelace průměrů změřených a modelovaných dat celkového aktivního chloru

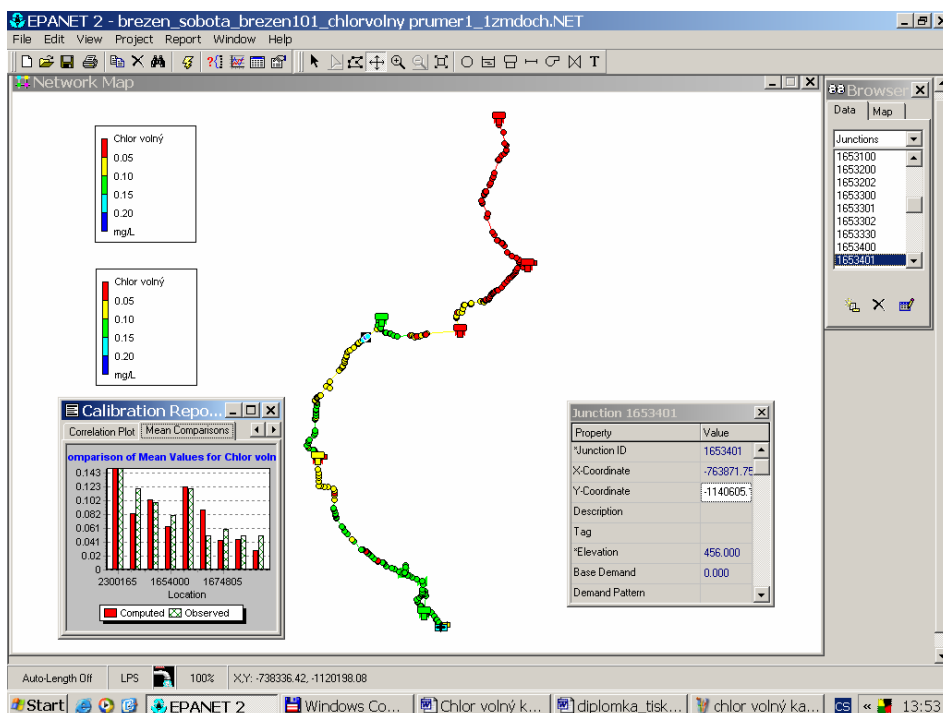


Obr. 3 Porovnání průměrů namodelovaných a změřených koncentrací celkového aktivního chloru

Výsledkem kalibrace modelu úbytku celkového aktivního chloru jsou rychlostní konstanty úbytku chloru, které jsou v případě modelu 1. řádu v proudící vodě a 1. řádu u stěny potrubí $k_b = -0,1 \text{ d}^{-1}$ a $k_w = -0,06 \text{ m/d}$ a pro model 1. řádu v proudící vodě a 0. řádu u stěny potrubí jsou $k_b = -0,18 \text{ d}^{-1}$ a $k_w = -2,2 \text{ mg/m}^2/\text{d}$. Ukázka porovnání měřených a modelovaných hodnot je na obrázcích 2. a 3. Oba modely vykazovaly poměrně vysokou korelaci měřených a vypočtených hodnot, proto byly vzhledem k variabilitě dat a jejich malému množství oba verifikovány.

Modely úbytku celkového aktivního chloru byly verifikovány s pomocí dat měřených v období říjen 2002 – leden 2004. Výsledky verifikace ukazují, že úbytek celkového aktivního chloru je možné předpovědět pomocí těchto modelů, pro některé stavy systému je vhodnější modelovat úbytek chloru u stěny potrubí podle reakcí 1. řádu, pro jiné podle reakcí 0. řádu.

Také modely volného chloru byly zkalibrovány na základě průměrných měřených koncentrací chloru. Rychlostní konstanty úbytku volného chloru jsou pro model 1. řádu v proudící vodě a 1.řádu u stěny potrubí $k_b = -0,03 \text{ d}^{-1}$ a $k_w = -0,008 \text{ m/d}$ a pro model 1. řádu v proudící vodě a 0.řádu u stěny potrubí $k_b = -0,09 \text{ d}^{-1}$ a $k_w = -0,075 \text{ mg/m}^2/\text{d}$. Tyto dva modely byly zvoleny pro verifikaci jako nejvhodnější, protože vykazovaly poměrně vysokou korelaci měřených a vypočtených hodnot. Ukázka výstupu z programu Epanet 2 je na obr.4.



Obr. 4 Ukázka výstupu z programu Epanet 2 s výsledky kalibrace modelu volného chloru

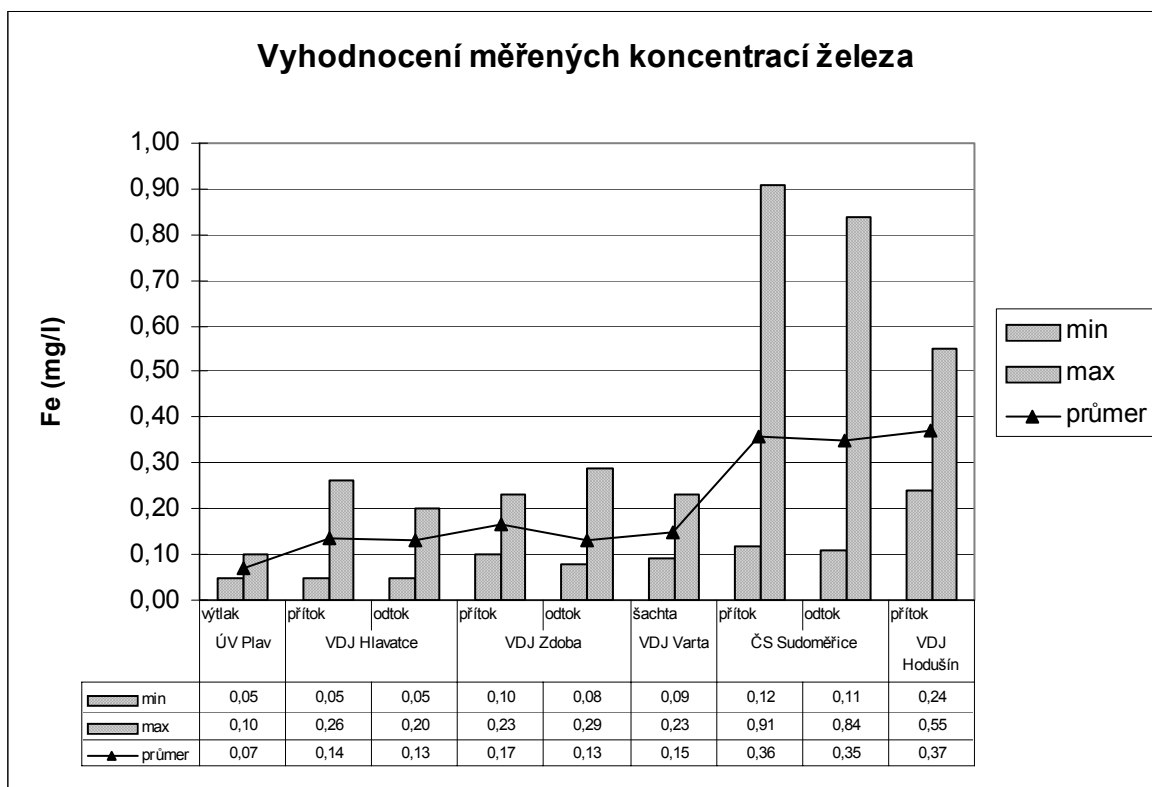
Modely byly verifikovány s pomocí nezávislých dat měřených v období říjen 2002 – leden 2004. Výsledky verifikace ukazují, že úbytek volného chloru je možné předpovědět pomocí těchto modelů, pro 1/3 dnů s měřením pro verifikaci bylo vhodnější modelovat úbytek chloru u stěny potrubí podle reakcí 1. řádu, pro 2/3 realizovaných měření pro verifikaci podle reakcí 0. řádu.

Modelování nárůstu koncentrací železa v distribuční síti ÚV Plav – VDJ Hodušín

V rámci výzkumu prováděného ve spolupráci s JčVaK České Budějovice v zásobovacím řádu z úpravny vody Plav na vodojem Hodušín jsme se podrobně zabývali korozí, jejím monitorováním a způsoby omezení koroze. Jedním z dílčích úkolů bylo ověření možnosti modelování nárůstu koncentrací železa v distribuční síti s využitím programu Epanet 2. Koroze způsobuje zhoršení kvality vody v distribučním systému, obohacování pitné vody železem, rozrušování vnitřní strany potrubí a tvorbu inkrustů, které vedou k zanášení vodovodních rozvodů.

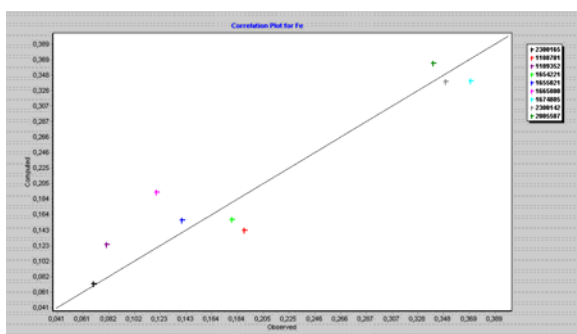
Nejprve byla vyhodnocena všechna měřená data koncentrací železa, dále byla realizována měření pro kalibraci a verifikaci modelů v období září 2002 – leden 2004.

Vyhodnocení dat měřených v kalibračním týdnu je na obr. 5. Odběry byly prováděny vždy 1x za den v průběhu celého týdne. Byly sestaveny modely nárůstu koncentrací železa s využitím kinetiky 1. a 0. řádu v proudící vodě a 1. a 0. řádu u stěny potrubí. Byla realizována kalibrace modelů nárůstu koncentrací železa na základě průměrných hodnot koncentrací železa měřených v týdnu od 9.-13.9.2002. Průměry vystihují změny kvality mnohem lépe, protože nejsou tolik ovlivněny nárazovými změnami podmínek a tím i náhlými změnami koncentrací nebo špatnými měřeními.

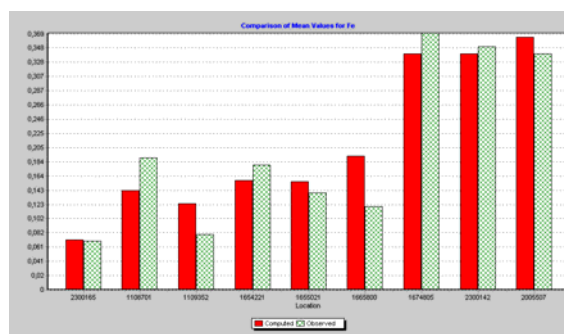


Obr. 5 Vyhodnocení dat koncentrací železa měřených pro kalibraci modelu

Nejllepší shody měřených a modelovaných hodnot dosáhl model nárůstu koncentrace železa 1.řádu v proudící vodě a nultého řádu u stěny potrubí. Rychlostní konstanty tohoto modelu jsou $K_b=0,0058 \text{ d}^{-1}$ a $K_w=1,905 \text{ mg/m}^2/\text{d}$. Ukázka výsledků kalibrace je na obr. 6. a 7.



Obr. 6 Korelace průměrů změřených a modelovaných dat železa



Obr. 7 Porovnání průměrů namodelovaných a změřených koncentrací železa

Na základě výsledků kalibrace modelů byly pro verifikaci zvoleny tři modely nárůstu koncentrace železa, které vykazovaly nejvyšší shodu. V roce 2002 se měření prováděla na celkem 9 odběrných místech větve ÚV Plav- Hodušín, pro rok 2003 bylo množství odběrných míst redukováno na 4. Dostupná data z měření v roce 2003 ukazují na skutečnost, že koncentrace železa v posledním místě sledovaného úseku z roku 2003, tj. ČS Sudoměřice vykazují 2-krát menší hodnoty koncentrace než v roce předešlém. Při verifikaci bylo ověřeno, že i přes pokles koncentrací železa v distribuční síti je simulační model v Epanetu 2 využitelný pro další analýzy systému.

Závěry a diskuse

Vzhledem k velké variabilitě dat koncentrací volného a celkového aktivního chloru byly v obou případech verifikovány dva modely, které vykazovaly největší shodu měřených a modelovaných dat. Vytvořené modely jsou využitelné pro další analýzy systému.

Byla ověřena vhodnost použití Epanetu 2 pro modelování nárůstu koncentrace železa v distribuční síti. Při kalibraci a verifikaci modelů nárůstu koncentrace železa s využitím dat z roku 2002 odpovídal skutečným změnám koncentrace železa nejlépe model 1. řádu v proudící vodě a 0. řádu u stěny potrubí s rychlostními konstantami $k_b=0,0058 \text{ d}^{-1}$ a $k_w=1,905 \text{ mg/m}^2/\text{d}$. V roce 2003 se provozovateli podařilo dosáhnout výrazného snížení koncentrací železa ve sledované distribuční síti. Proto byly při verifikaci zkoušeny všechny úspěšně zkalibrované modely a pro změněné podmínky v roce 2003 nejlépe vyhovoval model 1. řádu v proudící vodě a 1. řádu u stěny potrubí při hodnotách rychlostních konstant $k_b= 0,0035 \text{ d}^{-1}$ a $k_w=0,0180 \text{ m/d}$. Tato skutečnost může být způsobena jednak celkovým snížením koncentrace železa v síti, ale také snížením počtu odběrných míst. Výsledky modelování ukazují, že nárůst koncentrace železa je možné předpovědět pomocí získaných prediktivních modelů a že program Epanet 2 je využitelný pro modelování nárůstu koncentrací železa.

Výzkum byl realizován ve spolupráci s JčVaK České Budějovice. Byl podpořen grantem NAZV 1G46036.

Literatura

Grünwald, A. - Fošumpaur, P. - Šťastný, B. - Slavičková, K. - Slaviček, M. - Štrausová, K. - Čiháková, I.: Inovace procesu úpravy vody a zabezpečení vysoké kvality pitné vody v distribučních systémech [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, katedra zdravotního inženýrství, 2004. 1G46036. 62 s.

Grünwald, A. - Mach, M. - Slavičková, K. - Slaviček, M. - Šťastný, B. - Kasal, R. - Štrausová, K.: Výzkum efektu úpravy vody na její jakost při prodlužujícím se zdržení v rozvodné síti [Výroční zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, katedra zdravotního inženýrství, 2004. QD1003. 80 s.

Grünwald, A. - Mach, M. - Šťastný, B. - Slaviček, M. - Slavičková, K., Šaršeová, M. - Kasal, R. - Štrausová, K.: Výzkum efektu úpravy vody na její jakost při prodlužujícím se zdržení v rozvodné síti [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, katedra zdravotního inženýrství, 2003. QD1003. 44 s.