

# Sledování změn obsahu volného aktivního chloru při dopravě pitné vody

*Ing. Kateřina Slavičková, Prof. Ing. Alexander Grünwald, Csc., Ing. Marek Slaviček*  
Katedra zdravotního inženýrství, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze,  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

---

## Úvod

Tento příspěvek se zabývá modelováním úbytku chloru v distribuční síti a jeho praktickou aplikací na distribuční řad ÚV Plav - Tábor. V příspěvku jsou uvedeny některé poznatky z výzkumu, který byl prováděn pracovníky katedry zdravotního inženýrství FSv ČVUT v letech 1996 – 2000 na jihočeském přivaděči ÚV Plav – Tábor. Úbytek chloru lze popsat kinetickou rovnicí prvního řádu. K úbytku chloru dochází nejen v proudící vodě, ale také u stěny potrubí. Model kvality vody musí být založen na detailně zpracovaném hydraulickém modelu distribuční sítě. Měření koncentrací chloru v závislosti na době zdržení je nutné pro modelování kvality vody a pro kalibraci modelu.

## Změny kvality vody při distribuci

Zachování kvality pitné vody při její dopravě je hlavní technologický problém, který nesmí být zanedbán. Dva hlavní nástroje, které pomohou provozovateli garantovat spolehlivost, kvalitu a bezpečnost vodárenského systému jsou modelování kvality vody a on-line monitoring. Na rozdíl od hydraulických podmínek, které jsou dobře prozkoumány a mohou být matematicky popsány, chemické děje probíhající v distribučních systémech důkladně pochopeny nejsou. Úbytek chloru v síti je důsledkem spotřeby jednak vodou a organickou hmotou v ní obsaženou, jednak reakcemi na povrchu potrubí. Procesy zahrnují reakce s vodou přenášenými druhy organismů, materiály potrubí, depozicemi a biofilmy. Tyto procesy rovněž závisí na teplotě. Spotřeba chloru ve vodě je v literatuře dostatečně popsána, ale to neplatí o spotřebě na povrchu potrubí. Produkty koroze hrají při úbytku chloru velkou roli a byl zjištěn lineární vztah mezi mírou koroze a mírou spotřeby chloru.

## Předpoklady pro modelování úbytku chloru

Mnohé ze softwarových produktů, které jsou k dostání v současné době, používají zjednodušenou rovnici popisující úbytek reaktivních činidel, například chloru. Proto Chambers et al. zkoumal platnost zjednodušené rovnice úbytku pro volný a celkový chlor během dopravy vody a s použitím modelů WATNET pro hydraulický model a WATQUAL pro modelování kvality. Parametry kvality vody mohou být úspěšně modelovány pouze za předpokladu, že jsou v hydraulickém modelu správně simulovány průtoky. Pro modelování kvality vody je třeba detailnější model než pro modelování hydraulických poměrů. Malé odběry, např. v předimenzovaných koncových úsecích sítě, které jsou z hlediska hydraulického zanedbatelné, představují nízké

průtoky a tím dlouhou dobu zdržení a koncentrace chloru v těchto potrubích mohou být pod přijatelnými hodnotami. Proto je třeba je zahrnout do modelu kvality vody.

Na rozdíl od hydraulických parametrů, parametry kvality vody závisejí 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). Z tohoto důvodu se pro významné analýzy kvality vody používají modely, které simulují chování systému v dostatečně dlouhém časovém období. Je-li správný předpoklad, že úbytek chloru je reakcí pseudo-prvního řádu, pak by úbytek měl být exponenciální. Výzkum provedený Chambersem et al. na dvou podobných distribučních sítích ukázal, že exponenciální model úbytku chloru je vhodný pro modelování úbytku volného a celkového chloru v distribučním systému. Průměrné hodnoty rychlostní konstanty úbytku volného chloru pro obě sítě byly stejné. Průměrné hodnoty rychlostní konstanty úbytku celkového chloru byly podobné. Úspěch modelování kvality vody závisí na dobře zkalibrovaném hydraulickém modelu.

Pro modelování je třeba znát koncentrace chloru na počátku trasy, dobu zdržení (měla by korespondovat s časy odběrů vzorků v síti, aby bylo možné porovnání změřených a namodelovaných dat) a rychlostní konstantu úbytku chloru. Relativně velké kladné nebo záporné odchylky naznačují, že úbytek chloru je různý v jednotlivých částech sítě. Tento úbytek by bylo možné přesněji modelovat s použitím více rychlostních konstant odpovídajících těmto částem sítě, případně jednotlivým potrubím, místo jediné konstanty pro celou síť. Tento přístup by vyžadoval velké množství vstupních podkladů a nákladných měření. Je rovněž možné využít rozdělení podle fyzikálních charakteristik distribučního systému, například podle materiálu a stáří potrubí.

## **Modelování úbytku aktivního volného chloru:**

Pro modelování jsme použili dvě metody:

- a) Metodu založenou na předpokladu, že úbytek chloru lze popsat kinetickou rovnicí I. řádu, jedná se o funkční závislost na době zdržení

Integrací této rovnice pro počáteční podmínku  $t=0$ ,  $c=c_0$  dostaneme:

$$c_t = c_0 * e^{-kt} \quad (\text{mg.l}^{-1}) \quad (1)$$

- kde
- |       |   |
|-------|---|
| $c_t$ | je koncentrace chloru v čase $t$ [ $\text{mg l}^{-1}$ ]   |
| $c_0$ | je počáteční koncentrace chloru [ $\text{mg l}^{-1}$ ]    |
| $k$   | je rychlostní konstanta úbytku chloru [ $\text{d}^{-1}$ ] |
| $t$   | je doba zdržení vody v potrubí [dny]                      |

b) Model s předpokladem úbytku chloru v proudící vodě a na stěně potrubí

Modely úbytku chloru na stěně potrubí vycházejí z předpokladu, že aktivní reakční zóna se nachází v molekulové vrstvě na vlastní stěně potrubí. Volný nebo vázaný chlor je transportován z proudící vody ke stěně potrubí a může reagovat podle kinetiky nultého nebo prvního řádu.

Reakce prvního řádu je charakterizována koeficientem úbytku s rozměrem délka za čas [m/d]. Označíme-li tento koeficient  $k_{wl}$ , pak rychlost reakce na stěně se dá vyjádřit jako

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} = - \frac{k_{wl} \cdot c_w}{R_H} \quad (2)$$

kde  $k_{wl}$  je koeficient úbytku chloru [ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ]  
 $c_w$  je koncentrace chloru na stěně potrubí [ $\text{mg l}^{-1}$ ]  
 $R_H$  hydraulický poloměr potrubí [m]

Celkově pak platí pro úbytek látky v proudící vodě

$$\theta_{(c)} = -k_b - \frac{k_f}{R_H} \cdot (c - c_w) \quad (3)$$

kde  $k_b$  reakční konstanta I. řádu [ $\text{d}^{-1}$ ]  
 $c$  koncentrace látky v proudící vodě [ $\text{mg l}^{-1}$ ]  
 $k_f$  koeficient přestupu hmoty mezi proudící vodou a stěnou potrubí [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $R_H$  hydraulický poloměr potrubí ( $d/4$ ) [m]  
 $c_w$  koncentrace látky na stěně potrubí [ $\text{mg l}^{-1}$ ]

## Modelování koncentrací chloru v distribučním řadu Plav-Tábor

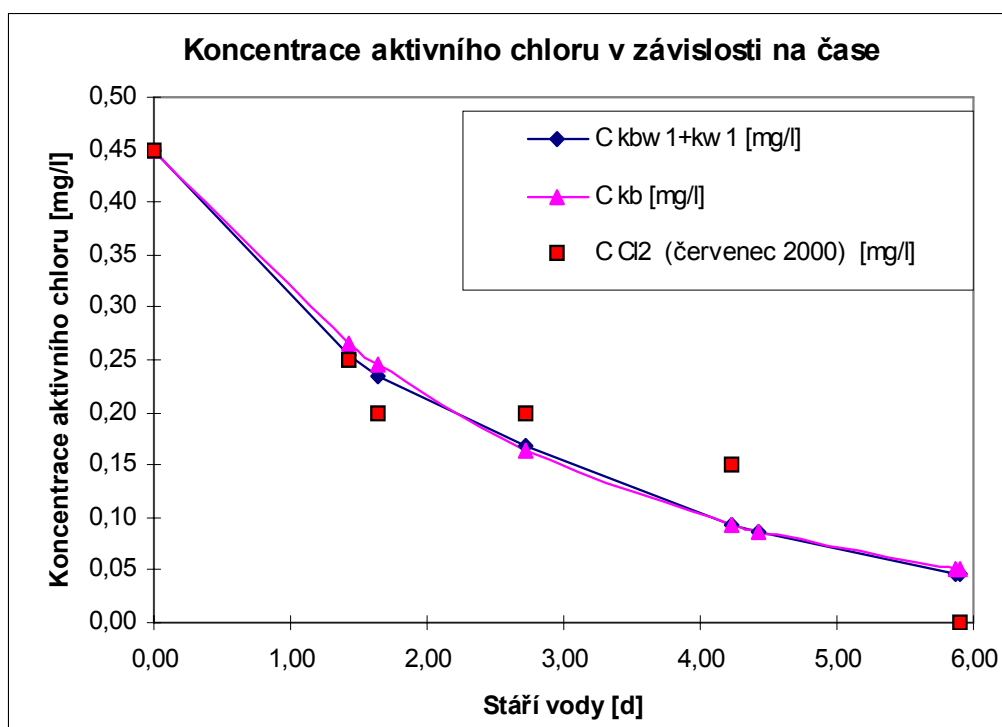
Modelování aktivního chloru podle dvou výše popsaných modelů bylo zrealizováno v letech 1997 – 2000 v distribučním řadu z úpravní vody Plav do Tábora. Data pro modelování poskytla Jihočeská vodárenská společnost, a.s., Vodovody a kanalizace Jižní Čechy, a.s. a Výzkumný ústav vodohospodářský TGM.

Koncentrace chloru se na odtoku z ÚV Plav nebo Hosín II odtok se pohybovaly za celé sledované období v rozmezí od 0,15 do 0,85  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . V měsících, kdy se neprováděl rozbor kvality vody, byly vyhodnoceny pouze doby zdržení. Koncentrace volného aktivního chloru na přítoku do vodojemu Sv. Anna byly nulové. Z rozborů kvality vody vyplývá, že často je v tomto místě nulová také hodnota koncentrace celkového aktivního chloru. Nulové hodnoty koncentrací volného aktivního chloru se vyskytovaly také v šachtě Veselí n/L. Doby zdržení na konci přivaděče ve vodojemu Sv. Anna byly za celé sledované období v rozmezí 4,56 až 7,26 dne. Průměrná doba zdržení byla 5,86 dne, což je 140,7 hodin.

**Tabulka 1 - Porovnání modelů výpočtu koncentrace aktivního chloru**

	$K_{bw1}$	0,3	$k_b$	
	$K_{w1}$	0,025	0,372	
	$K'$ [ $d^{-1}$ ]	$C_{k_{bw1}+k_{w1}}$ [ $mg.l^{-1}$ ]	$C_{k_b}$ [ $mg.l^{-1}$ ]	$C_{Cl_2}$ [ $mg.l^{-1}$ ]
Plav		0,45	0,45	0,45
	0,400			
Hosín odtok		0,25	0,26	0,25
	0,400			
Chotýčany přítok		0,23	0,24	0,2
Chotýčany	0,301			
Chotýčany odtok		0,17	0,16	0,2
	0,400			
RŠ Veselín.L.		0,09	0,09	0,15
	0,400			
odb. Zlukov		0,09	0,09	
	0,425			
odb. Čekanice		0,05	0,05	
	0,499			
Sv. Anna přítok		0,05	0,05	0,00
Korelační koeficient R		0,96	0,96	
Součet čtverců odchylek		0,007	0,009	

**Obrázek 1 - Porovnání koncentrací aktivního chloru**



V rovnici prvního modelu jsou nejvýraznější faktory úbytku chloru souhrnně zahrnuty do jediné rychlostní konstanty  $k_b$ , která je jednotná pro celý trubní systém.. Doba zdržení je pro tento model jediná nezávislá proměnná. Výsledné hodnoty  $k_b$  [ $d^{-1}$ ] se za celé sledované období 1997 - 2000 pohybovaly v intervalu  $\langle 0,252;1,336 \rangle$ , jejich korelační koeficienty se pohybovaly v intervalu  $\langle 0,637;0,999 \rangle$ , korelační koeficient nižší než 0,9 se vyskytl pouze 5 krát.

Druhá metoda se vyznačuje podrobnějším přístupem k řešené problematice. Koeficient úbytku se skládá ze dvou částí - z úbytku chloru v proudící vodě a z přestupu chloru z proudící vody ke stěně potrubí včetně následné reakce s fixovanou biomasou a spotřebou chloru při procesu koroze. Výsledné hodnoty se za celé sledované období 1997 - 2000 pohybovaly pro  $k_{bw1}$  [ $d^{-1}$ ] v intervalu  $\langle 0,00;1,336 \rangle$  a  $k_{w1}$  [ $d^{-1}$ ] v intervalu  $\langle 0,00;0,586 \rangle$ , jejich korelační koeficienty se pohybovaly v intervalu  $\langle 0,828;1,000 \rangle$ , korelační koeficient nižší než 0,9 se vyskytl pouze v jediném případě. Tento model vykazuje velkou těsnost s naměřenými hodnotami.

Příklad porovnání vypočtených hodnot rychlostních konstant úbytku chloru v dopravované vodě pro oba modely je uveden v Tab. 1.. Na Obr. 1 je uvedena závislost koncentrace aktivního chloru na době zdržení vody v síti a porovnání vypočtených a změřených koncentrací.

## Závěry

Výsledky ukazují, že koncentrace volného chloru je možné předpovědět pomocí použitých prediktivních modelů. Vysoké hodnoty korelačních koeficientů jsou důkazem, že oba typy modelů je možné použít i pro dálkový vodárenský privaděč České Budějovice – Tábor. Druhá metoda vykazuje těsnější korelace. Při podrobném zkoumání úbytku chloru při dopravě vody je tedy třeba uvažovat s úbytkem chloru z přestupu chloru z proudící vody ke stěně potrubí včetně následné reakce s fixovanou biomasou a spotřebou chloru při procesu koroze. Rozptyl hodnot  $k_b$ , resp.  $k_{bw1}$  a  $k_{w1}$  je relativně značný, je tedy třeba tuto problematiku dále zkoumat a hledat další závislosti pro přesnější určení rychlostní konstanty.

## Literatura

1. PIRIOU, P. ; LEVI, Y.; HERAUD, J.; KIENE, L.: New tools and applications in modelling and monitoring water quality in drinking water distribution systems, Specialised Conference, Amsterdam 1996, str. 137-157
2. 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
3. GRÜNWARD, A.; ŠTASTNÝ, B.; VLČKOVÁ, K.; ZEITHAMMEROVÁ, J.; SLAVÍČKOVÁ, K.; SLAVÍČEK, M. Výzkum možnosti ekologické a ekonomické úpravy a dopravy pitných vod, ČVUT, Praha, 2000, str. 4-18

*Tento výzkum byl podporován grantem GAČR 1003/99/00659.*