Citace – Kožíšek F., Pumann P.: Metoda QMRA a její využití při hodnocení kvality povrchových i upravených vod.
Sborník konference *Pitná voda 2012*, s. 233-246. W&ET Team, Č. Budějovice 2012. ISBN 978-80-905238-0-7

METODA QMRA A JEJÍ VYUŽITÍ PŘI HODNOCENÍ KVALITY POVRCHOVÝCH I UPRAVENÝCH VOD

MUDr. František Kožíšek, CSc. [1,2], Mgr. Petr Pumann [1]

[1] Státní zdravotní ústav, Oddělení hygieny vody, Šrobárova 48, 100 42 Praha 10
voda@szu.cz
[2] Univerzita Karlova v Praze, 3. lékařská fakulta, Ústav obecné hygieny, Ruská 87, 100 00 Praha 10

Úvod

QMRA čili **Q**uantitative **m**icrobial **r**isk **a**ssessment (**kvantitativní hodnocení mikrobiologického rizika**) je systematizovaný matematický postup pro hodnocení infekčního rizika z expozice lidským patogenům. Přestože taková definice může být téměř jistou zárukou, že vodohospodáře odradí od dalšího čtení a zájmu o tuto věc, zařazujeme ji na úvod jen pro vysvětlení zkratky uvedené v názvu, ale dále se budeme snažit ji přiblížit mnohem srozumitelněji a zejména její aplikace ilustrovat na různých příkladech.

Téměř celé století od objevení některých hlavních (mikro)biologických a chemických příčin nemocí uvažovali hygienici, když měli vyjádřit zdravotní riziko, v kvalitativních pojmech (závadnost x nezávadnost) nebo v subjektivně vyjádřených semikvantitativních pojmech „malé" – „střední" – „vysoké" riziko. Čím více ale mělo takové rozhodování dopad do sféry regulace (stanovení limitů a jejich vyžadování) a tím i do sféry financí, vyvstávala naléhavá potřeba postavit toto uvažování pevně na vědecký základ a stanovit mu standardní a transparentní pravidla, která by minimalizovala nesprávné interpretace existujících vědomostí. Mimo jiné to znamenalo přejít od kvalitativního ke kvantitativnímu hodnocení rizika.

Pionýrskou práci v tomto směru odvedla americká agentura pro ochranu životního prostředí (US EPA), která v 70. a 80. letech vypracovala formální postup pro hodnocení rizika expozice chemickým látkám [1], který se dostal i do federální legislativy USA a stal se tak právně závazným. Jednalo se o logický sled čtyř kroků, které budou představeny níže. Od US EPA převzala tuto metodu Světová zdravotnická organizace (WHO), od ní Evropské společenství a tak se postupně – jako hodnocení zdravotních rizik – dostala i do právního řádu České republiky (je v zákoně o ochraně veřejného zdraví, chemickém zákoně, zákoně o ovzduší atd.).

V případě zásobování pitnou vodou umožňuje např. metoda hodnocení zdravotních rizik udělení výjimky (zmírnění hygienického limitu) a definování jejích podmínek, protože umožňuje relativně přesně spočítat, zda a jak může být populace v různých věkových skupinách vodou s vyšším obsahem nějaké látky ohrožena.

Metoda hodnocení zdravotních rizik

Hodnocení zdravotních rizik je postup pro určení míry nebezpečnosti (škodlivosti) faktorů prostředí a pravděpodobnosti vzniku onemocnění. Je to je postup, který využívá syntézu dostupných údajů podle současného vědeckého poznání pro určení druhu a stupně nebezpečnosti představovaného určitým chemickým, biologickým nebo fyzikálním faktorem, dále pro určení, v jakém rozsahu byly, jsou nebo v budoucnu mohou být působení tohoto faktoru vystaveny jednotlivé skupiny populace, a konečně

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

zahrnuje charakteristiku existujících či potenciálních rizik vyplývajících z uvedených zjištění.

Metoda sestává ze čtyř základních kroků:

1) Hodnocení nebezpečnosti (v tomto kroku popisujeme vlastnosti hodnoceného faktoru a jaké může mít dopady na zdraví).
2) Hodnocení vztahu mezi dávkou a účinkem (jestliže jsme v úvodním kroku zjistili, že faktor je (nějak) nebezpečný, v této fázi zjišťujeme, jak moc je nebezpečný; tato část procesu hodnocení rizika popisuje kvantitativní vztahy mezi dávkou a rozsahem nepříznivého účinku; cílem je odvození referenčních = bezpečných hodnot).
3) Hodnocení expozice (v tomto kroku zjišťujeme, jaká je skutečná expozice danému faktoru u určité populace).
4) Charakterizace rizika (v tomto závěrečném kroku kombinujeme odhad expoziční dávky s údajem o vztahu mezi dávkou a účinkem, abychom riziko kvantifikovali – odpovídáme na otázku, zda riziko existuje nebo neexistuje, popř. /pokud existuje/ jak je veliké).

I když z výše uvedené definice vyplývá, že metodu lze použít pro hodnocení rizika z libovolného chemického, biologického nebo fyzikálního faktoru, v praxi se toto prosazovalo postupně. Prvních 15-20 let se metoda používala téměř výhradně pro hodnocení rizika z expozice chemickým látkám, protože k tomu bylo k dispozici dostatek podkladů, zatímco hodnocení mikrobiologického rizika bylo víceméně ve stádiu vývoje resp. získávání potřebných dat o vztahu mezi dávkou a účinkem i obvyklým výskytem patogenů ve vodách. Přes několik publikovaných odborných článků v 80. a na počátku 90. let došlo k formalizaci postupu hodnocení mikrobiologického rizika až v roce 1995 zásluhou společného dokumentu ILSI Risk Science Institute a US EPA Office of Water [2]. Poté, co byl tento postup zdokonalen [3] a vyšla i samostatná monografie [4], začal po roce 2000 růst počet aplikací exponenciálně, což bylo podpořeno i několika mezinárodními výzkumnými projekty, např. Microrisk [5]. A především se použití metody QMRA stalo jak součástí oficiálních doporučení WHO pro hodnocení kvality pitné vody [6,7], tak i součástí legislativních požadavků na kvalitu vyráběné pitné vody v některých zemích, např. v Nizozemí, jak bude podrobněji uvedeno dále.

Účel použití QMRA

Jak již bylo uvedeno výše, QMRA je postup, který hodnotí pravděpodobnost lidského onemocnění následkem expozice patogenním mikroorganismům, v našem případě prostřednictvím vody. V zemích s nižším hygienickým standardem se mohou ke zjištění zdravotního dopadu mikrobiálně znečištěné vody použít epidemiologické metody, resp. sledování počtu epidemií a povinně hlášených onemocnění, u kterých je vysoká pravděpodobnost přenosu vodou. Ve vyspělých zemích, kde je výskyt těchto onemocnění i počet epidemií relativně velmi nízký, tyto metody použít nelze, protože budou příliš „hrubé" na to, aby určily případný podíl vody na výskytu souvisejících onemocnění. O tom, že i ve vyspělých zemích je voda příčinou (či přenašečem) infekčních onemocnění, není pochyb. V USA se odhaduje, pitná voda z veřejných vodovodů je ročně příčinou 5 až 10 milionů případů průjmových onemocnění (některé odhady hovoří až o 30 milionech) [8] – a do toho není započtena řada zjevných epidemií, jejichž poučný přehled z vyspělých zemí publikoval souhrnně Hrudey [9]. A právě pro odhad této zdravotní zátěže může být (mimo jiné) užitečná metoda QMRA.

Metoda QMRA

Kvantitativní hodnocení mikrobiologického rizika je založeno na již uvedeném postupu, sestávajícího ze čtyř základních kroků, který je shrnut v tabulce 1.

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

Tabulka 1. Základní schéma při hodnocení mikrobiologického rizika [podle 7]

Krok	Účel
A. Formulace problému a určení nebezpečnosti	Určení všech možných (mikrobiologických) nebezpečí pro určitý systém zásobování vodou, která by mohla mít nepříznivé zdravotní důsledky pro spotřebitele, včetně určení všech expozičních cest, druhů patogenů a povahy onemocnění
B. Hodnocení expozice	Určení velikosti a složení populace exponovaných spotřebitelů. Definování expoziční cesty, velikosti a trvání expozice
C. Hodnocení vztahu dávka – účinek	Kvantitativní definování vztahu mezi výší expozice a výskytu zdravotních následků
D. Charakterizace rizika	Integrace výstupů z předchozích dvou kroků k určení rozsahu zdravotního postižení + zhodnocení variability a nejistoty hodnocení (výpočtu)

Každý z těchto kroků si lze pak dále pracovně rozdělit do několika dílčích úkolů, jak ukazuje tabulka 2.

Tabulka 2. Přehled dílčích úkolů při hodnocení mikrobiologického rizika [podle 10]

Krok	Dílčí úkol
A. Formulace problému a určení nebezpečnosti	1. Popis systému zásobování od zdroje po konec spotřebiště
	2. Určení nebezpečí (výběr relevantních patogenů a jejich charakteristika, včetně popisu souvisejícího onemocnění)
	3. Popis nebezpečných událostí, které vedou ke vstupu patogenů do systému (např. silný déšť)
B. Hodnocení expozice	4. Stanovení či odhad výskytu patogenů v surové vodě
	5. Odhad účinnosti technologie úpravy při odstraňování patogenních mikroorganismů
	6. Posouzení možnosti změn kvality vody v průběhu akumulace a distribuce (re-kontaminace)
	7. Spotřeba vody (množství požité nepřevařené vody)
	8. Výpočet dávky (množství požitých patogenů za jednotku času)
C. Hodnocení vztahu dávka – účinek	9. Numerické stanovení vztahu mezi požitou dávkou patogenů, jejich infekčností a zdravotní odezvou v populaci (počet osob s infekcí[1])
	10. Charakterizace hostitele (exponované osoby) – zejména jeho vnímavosti a stavu imunity
	11. Zdravotní dopad (primární výstup hodnocení je riziko infekce, ale pokud existují potřebná data a je-li potřeba, lze dále odhadovat počet případů onemocnění, jejich závažnost a dopad[2] atd.)
D. Charakterizace rizika	12. Kvantitativní vyjádření rizika infekce – buď jako bodový

[1] Infekce znamená vstup infekčního agens do organismu hostitele a pomnožení či vývoj tohoto agens v jeho tkáních. Proces je provázen imunitní odpovědí hostitele. Výsledkem je buď inaparentní infekce (bez příznaků) nebo manifestní onemocnění (s klinickými příznaky).

[2] Metoda pro to se nazývá *Burden of Disease* (Zátěž nemocí) a jejím základním ukazatelem je tzv. *DALY* (*Disability Adjusted Life Years lost* čili Roky ztraceného zdraví). Jedná se o souhrnný ukazatel, který spojuje a současně charakterizuje ztráty zdraví způsobené předčasným úmrtím a nemocemi. Umožňuje porovnávat dopad různých druhů nemocí. Viz také dále v textu.

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

	odhad nebo (vezmeme-li v úvahu variabilitu a nejistotu vstupních dat a zvolíme-li stochastický přístup) distribuce rizika – popř. jejích dalších následků

Popisovat zde podrobněji postup hodnocení nemá smysl, s tím se lze seznámit detailně jinde [4, 11], jenom upozorňujeme na několik důležitých aspektů:

- Hodnocení QMRA je vhodným doplňkem systematické rizikové analýzy (např. v rámci plánů pro zajištění bezpečného zásobování vodou *Water Safety Plans*), ale může být použita i samostatně.
- Protože není únosné ani racionální zpracovávat QMRA pro každý potenciální patogen, obvykle se vybírá vhodný reprezentativní zástupce pro skupinu bakterií, virů a prvoků – např. kampylobakter, rotavirus a kryptosporidium (nejlépe ale místně specifický problematický druh, pokud je znám).
- Protože přímé stanovení patogenů v pitné vodě je náročné, často se používá údaj o jejich koncentraci v surové vodě, který se kombinuje s údajem o účinnosti použité technologie úpravy vody – tím se získá odhad množství patogenů v upravené vodě.
- Na rozdíl od chemických látek nejsou mikroorganismy ve vodě (a zvláště v pitné vodě, kde jsou minimální počty) homogenně rozptýleny, ale vyskytují se přetržitě (obvykle ve shlucích) čili expozice je náhodná. Proto se i riziko infekce vyjadřuje jako pravděpodobnost infekce.
- Vztah dávka a účinek. Zatímco dříve se předpokládalo, že k vyvolání infekce a nemoci je zapotřebí požití určité minimální infekční dávky, nyní se dává přednost alternativní hypotéze (tzv. „single-hit concept"), která předpokládá, že i jeden živý mikroorganismus může vyvolat infekci, protože dochází k pomnožení mikroorganismu v hostiteli. Samozřejmě že u takové nízké dávky je i velmi nízká pravděpodobnost infekce a onemocnění, ale teoreticky existuje [12]. Proto lze riziko infekce (resp. údaj kvantifikující vztah dávka – účinek) vztahovat na jeden mikroorganismus, což je pro výpočet rizika mnohem jednodušší. Data o vztahu dávka-účinek pocházejí z mnoha pokusů na zdravých dobrovolnících, což znamená, že nezohledňují imunitně oslabené jedince, pro které bude riziko infekce vyšší.
- Jako základní výstup se vypočte riziko infekce za den, ale protože k expozici dochází opakovaně, následně se násobením 365 vypočte riziko infekce za rok (přepokládá se při tom, že jednotlivé „expoziční události" jsou na sobě nezávislé a že nedochází k tvorbě imunity – toto zjednodušení je možné u nízkých dávek, se kterými se ve vodárensky vyspělých zemích setkáváme).

V následující tabulce 3 je ukázán příklad použití metody QMRA pro expozici kampylobakteru pitnou vodou. Kampylobakter je bakterie, která způsobuje průjmová onemocnění a má čtyři patogenní druhy, z nichž nejčastějším původcem onemocnění u člověka je *Campylobacter jejuni*. Výpočet je zde prováděn od konce – od tolerovatelné míry zdravotní zátěže, kterou WHO doporučuje na úrovni (DALY) 1×10^{-6}. Co to znamená? Ukazatel *DALY* (*Disability Adjusted Life Years lost* čili Roky ztraceného zdraví) je kombinací doby předčasného úmrtí a doby strávené v nemoci a její závažnosti. Hodnota DALY 1×10^{-6} (pro osobu a rok) znamená, že pokud bude určitému rizikovému faktoru – v našem případě určité koncentraci kampylobakteru v pitné vodě – vystaven po dobu jednoho roku milion osob, dojde u nich ke ztrátě jednoho roku života ve zdraví (obvykle kvůli běžnému průjmovému onemocnění, ale u zlomku osob může dojít i k vážnému autoimunnímu onemocnění napadajícímu nervovou tkáň /syndrom Guillain-Barré/ nebo dokonce k úmrtí). Od této úrovně rizika a při předpokladu obvyklého počtu kampylobaktera v surové povrchové vodě (100 KTJ/l) je vypočteno, jak účinná musí být technologie úpravy vody při odstranění či usmrcení tohoto patogena – 5,98 (Log_{10}).

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

Tabulka 3. Příklad výpočtu QMRA pro expozici kampylobakteru pitnou vodou [podle 7]

Ukazatel	**Jednotka**	**Výsledek**
Kvalita surové vody (C_R)	Organismy na litr	100
Účinnost úpravy, aby se dosáhlo přijatelného rizika (PT)	Redukce Log_{10}	5,98
Kvalita pitné vody (C_D)	Organismy na litr	$1{,}05 \times 10^{-4}$
Spotřeba nepřevařené pitné vody (V)	Litry za den	1
Expozice kampylobakteru pitnou vodou (E)	Organismy za den	$1{,}05 \times 10^{-4}$
Vztah dávka – účinek (r) [zdroj: cit. 4]	Pravděpodobnost infekce na požitý 1 organismus (kampylobakter)	$1{,}9 \times 10^{-2}$
Riziko infekce ($P_{inf,d}$)	Za den	$2{,}0 \times 10^{-6}$
Riziko infekce ($P_{inf,y}$)	Za rok	$7{,}3 \times 10^{-4}$
Riziko průjmového onemocnění vyplývajícího z infekce ($P_{ill/inf}$)	Pravděpodobnost onemocnění na infekci	0,3
Riziko průjmového onemocnění (P_{ill})	Za rok	$2{,}2 \times 10^{-4}$
Zátěž nemocí (db)	DALY na případ onemocnění	$4{,}6 \times 10^{-3}$
Citlivá část populace (f_S)	Procento populace	100
Zdravotní cíl (přijatelné riziko) (HT)	DALY za rok (pro osobu konzumující 1 litr vody/den)	1×10^{-6}
Použité vzorce	$\mathbf{C_D = C_R \div 10^{PT}}$	$\mathbf{E = C_D \times V}$
	$\mathbf{P_{ill} = P_{inf,y} \times P_{ill/inf}}$	$\mathbf{P_{inf,d} = E \times r}$
	$\mathbf{HT = P_{ill} \times db \times f_S \div 100}$	

Použití QMRA ve vodárenské praxi

Metodu QMRA mohou pro různé účely výzkumu i řízení rizik používat mikrobiologové, epidemiologové, hygienici i různí státní úředníci zabývající se veřejným zdravím, nicméně zde chceme poukázat na použití ze strany výrobců vody. To použití může být jak „vynucené", že jim to ukládá nějaká legislativa (budeme ilustrovat na příkladu Nizozemí), tak i dobrovolné.

K dobrovolným příkladům použití QMRA patří odpověď na otázku: ***kde je hranice mezi nutnými náklady a dostatečnou bezpečností dodávané pitné vody?*** I u relativně dobře fungujícího systému zásobování pitnou vodou je možná stále a stále investovat do různých zlepšení, které povedou k dalšímu zvyšování bezpečnosti vody (zavedení dalších kontrolních opatření, vyšší frekvence monitorování kvality vody, intenzifikace technologie úpravy apod.), ale protože finanční zdroje nejsou neomezené a pitná voda není ve většině případů jedinou či hlavní cestou přenosu patogenů a toxických látek pro člověka (často jsou např. potraviny významnějším zdrojem), může si management vodárny oprávněně položit otázku: ***potřebujeme ještě investovat do zlepšení systému nebo již je systém dostatečně bezpečný?*** V evropských i tuzemských podmínkách, alespoň pokud se jedná o větší systémy zásobování, jsou tato zařízení relativně dobře postavena, vybavena i provozována a nedodržení stanovených

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

hygienických limitů je poměrně vzácné. To však ještě nutně neznamená, že systém stále produkuje zcela nezávadnou vodu. Platí to zejména pro kombinaci kritických období, kdy se např. zhorší kvalita surové vody a zároveň ne zcela dokonale funguje proces úpravy nebo se ne zvýšeně dbá na kritické momenty (např. fáze zafiltrování pískových filtrů po praní). QMRA může na takové otázky odpovědět a poskytnout odborný důkaz, zda zabezpečení systému je dostatečné či nikoliv.
Podobné použití může být při hodnocení ne celého systému, ale jen jeho dílčího prvku. Výrobce vody si bude zpracovávat plán pro zajištění bezpečného zásobování pitnou vodou [13], aby šel s dobou nebo aby se připravil na budoucí legislativní povinnost. Z plánu vyplyne několik míst, která představují nepřijatelné riziko, na které bude muset navrhnout a aplikovat nápravné nebo kontrolní opatření. Jedná-li se o mikrobiologické riziko a není-li jasné, zda je navržené opatření dostatečné, může metoda QMRA být nástrojem, která pomůžeme tuto nejasnost vyřešit. Nebo již v předchozí fázi, kdy se teprve posuzuje, zda odhalené nebezpečí představuje riziko přijatelné či nepřijatelné, a používá se orientační semikvantitativní stupnice pro hodnocení následků (nízký – střední – vysoký dopad), může QMRA pomoci zpřesnit použitý odhad.

Použití QMRA ve vodárenství v Nizozemí

Legislativa pitné vody v Nizozemí je stejně jako v jiných zemích EU odvozena od směrnice Rady 98/83/ES o jakosti vody určené pro lidskou spotřebu. Nicméně Nizozemí se nespokojilo s minimálním standardem směrnice a stanovilo si pro mikrobiologickou kvalitu pitné vody tyto rozšířené požadavky:

1) Výrobci pitné vody s rizikovým zdrojem surové vody (tj. používající povrchovou vodu nebo podzemní vodu ovlivňovanou povrchovou vodou) musí nechat každé tři roky zpracovat studii QMRA, která doloží, že odhadované riziko infekce z distribuované vody je nižší než 1 infekce na 10.000 osob (pro enteroviry, kampylobaktery, kryptosporidia, giardie a další relevantní patogenní mikroorganismy). **Riziko $1x10^{-4}$ je vlastně vyjádřením požadovaného zdravotního cíle při zajištění nezávadnosti pitné vody resp. vyjádřením společensky akceptovatelného rizika při zásobování pitnou vodou.**
2) *E.coli* a enterokoky 0 KTJ/100 ml.
3) Aeromonády <1000 KTJ/100 ml (provozní ukazatel).
4) Počty kolonií při 22 °C <100 KTJ/ml (provozní ukazatel).
5) Koliformní bakterie a *Clostridium perfringens* 0 KTJ/100 ml (provozní ukazatel) [14].

Protože požadavek na QMRA byl pro výrobce vody nový, trvalo několik let, než byl plně zaveden do praxe. Mezitím probíhalo intenzivnější monitorování mikrobiologické kvality vody v průběhu celého systému (od surové vody po konec distribuce, přičemž v surové vodě se monitorování opakovaně zaměřuje i na výskyt patogenů, nejen indikátorů fekálního znečištění) a výzkum zaměřený na účinnost (záchytu či usmrcení referenčních patogenů) jednotlivých stupňů úpravy vody i podmínky bezpečného provozování distribučního systému. Vláda požádala RIVM (National Institute of Public Health and Environment) o zpracování oficiální metodiky, jak QMRA pro tento účel provádět a jaká data používat. Tuto metodiku („Směrnice 5318" [15]) vydalo v roce 2005 ministerstvo pro životní prostředí a územní plánování (VROM), do jehož kompetence pitná voda spadá.
Směrnice 5318 definuje čtyři referenční či indexové patogeny (enterovirus, kampylobakter, kryptosporidium a giardia), které je třeba sledovat a hodnotit. I když jde samozřejmě o zlomek možných patogenních mikroorganismů, které se v pitné vodě mohou vyskytnout, díky jejich vlastnostem a způsobu výběru (výskyt, nebezpečnost, možnost odstranění při úpravě a prevence) se má za to, že jestliže je technologie

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

úpravy vody schopná se dostatečně vypořádat s těmito referenčními organismy, je garantována dostatečná bezpečnost vody celkově.
Směrnice také definuje požadavky na monitorování těchto patogenů v surové vodě – nejde jen o minimální frekvenci, ale povinné je i vzorkování v případě mimořádných událostí (např. během vysokých srážek či krátce po nich). Například vodárny, které produkují méně než 10.000 m^3 vody za den, musí odebrat vzorek surové vody náhodně každé dva měsíce (6 do roka) a vedle toho ještě 3 vzorky v období mimořádných událostí, které vedou ke zhoršení kvality surové vody. Protože při úpravě vody během jednotlivých stupňů úpravy počet těchto patogenů postupně výrazně klesá až pod jejich detekční limit, směrnice definuje, jaké indikátorové organismy je možné použít pro sledování účinnosti úpravy vody: F-specifický nebo somatický bakteriofág je indikátorem pro enteroviry, *E. coli* indikátorem pro kampylobaktery a spory siřičitany redukujících klostridií indikátorem pro kryptosporidia a giardie [16].
V roce 2006 předložilo studie QMRA prvních pět vodárenských společností, které provozují celkem čtrnáct úpraven vody využívajících povrchové vody. Data shromážděná výrobci vody zpracoval a riziko vypočetl RIVM a každý výsledek, resp. zpráva ke každé úpravně vody pak byla probírána na společné schůzce provozovatele, RIVM a inspekce VROM. Poznatky z těchto a pozdějších hodnocení pak souhrnně komentoval a publikoval RIVM [17]. Do roku 2008 již byly studie QMRA provedeny pro všechny úpravny s povrchovou vodou.
Aby vodárenským společnostem usnadnil práci a zbavil je závislosti na externím zpracovateli QMRA, vytvořil RIVM později jednoduše obsluhovatelný počítačový program QMRAspot [16]. Výrobce vody vloží do EXCELového sešitu požadovaná data (k tomu je v programu jasná instrukce, v jakém formátu mají data být), navolí charakteristiky své úpravny vody a jedním kliknutím se provede výpočet rizika; dalším kliknutím se pak vygeneruje celá zpráva. Uživatel nepotřebuje žádné předchozí hluboké znalosti o metodě QMRA, nicméně má-li zájem, je součástí programu manuál podrobně vysvětlující celý proces a početní operace. Program umožňuje porovnávání jednotlivých lokalit, porovnání výsledku s požadovanými standardy nebo volbu různých vlastních scénářů – např. jak se sníží riziko zavedením určitého dalšího stupně úpravy vody. Program nepracuje s bodovými odhady, ale zohledňuje variabilitu distribuce vstupních hodnot pomocí metody Monte Carlo. Riziko je tedy vypočteno jak pro obvyklé podmínky provozu, tak pro kritické okamžiky horší kvality surové vody nebo nižší účinnost úpravárenské technologie.

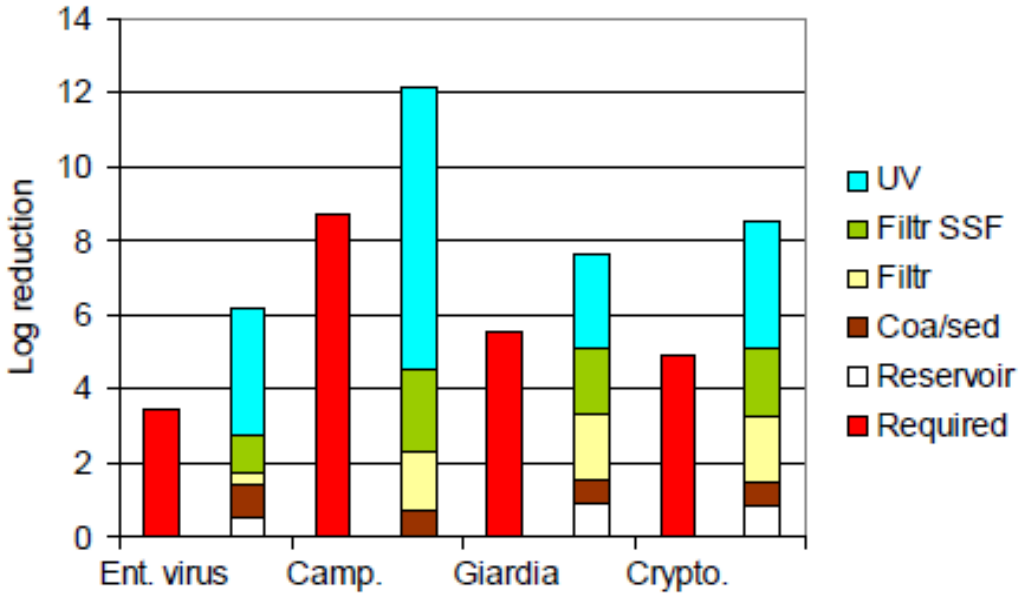
Zjednodušeně řečeno, požadovaná QMRA je porovnáním kvality surové vody a účinnosti úpravy vody za účelem zjištění, zda distribuovaná voda nepředstavuje nepřijatelné riziko infekce. Neboli jak účinná musí technologie úpravy (při dané kvalitě surové vody) být, aby pitná voda byla „ještě přijatelně" mikrobiologicky bezpečná. Provedené studie QMRA v Nizozemí ukázaly, že skutečná účinnost úpravárenského procesu (při záchytu či zneškodnění patogenů) je někdy mnohem nižší než se teoreticky předpokládalo na základě literárních údajů. V tabulce 4 je pro ilustraci uveden přehled výsledků QMRA pro čtyři různé úpravny povrchové vody, které ukazují, jak musí být na té které úpravně technologie úpravy účinná, aby upravená voda splňovala přijatelné riziko. Rozdíly jsou dané různou kvalitou surové vody. Infiltrace vody na pískových dunách nebo jiný způsob pasáže surové vody půdou je považována za nejúčinnější bariéru proti mikrobiologickým nebezpečím, protože přispívá k redukci patogenů o 8 log řádů.

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

Tabulka 4. Přehled požadovaných účinností úpravy vody (vyjádřených jako logaritmická redukce výchozího počtu patogenů v surové vodě) na čtyřech různých úpravnách vody v Nizozemí, aby byl splněn požadavek přípustného rizika 10^{-4} [podle 18]

Patogenní mikroorganismus	Lokalita 1	Lokalita 2	Lokalita 3	Lokalita 4
Kryptosporidium	6,4	5,6	5,1	6,5
Giardia	6,7	5,9	5,2	6,9
Kampylobakter	8,4	8,5	8,6	6,9
Enteroviry	4,3	4,3	4,2	5,7

Jiný příklad výstupu, tentokrát ze studie QMRA pro jednu konkrétní úpravnu vody, ukazuje obrázek 1. Na párových sloupcových grafech demonstruje požadovanou a skutečnou účinnost úpravy pro jednotlivé referenční patogeny. Levý sloupec (tmavá barva) ukazuje požadovanou účinnost úpravy (vzhledem ke kvalitě surové vody a přijatelné míře rizika), pravý sloupec ukazuje jednak celkovou účinnost, jednak podíl jednotlivých stupňů úpravy na celkové účinnosti. Účinnost je opět vyjádřena jako logaritmická redukce. Graf pěkně ilustruje, jak jednotlivé stupně úpravy mají různou účinnost na různé patogeny. Zatímco např. UV záření na této úpravně je nezbytné pro zajištění požadovaného rizika z kampylobakteru, pro kryptosporidium už tak klíčové není, jen poskytuje dodatečnou bezpečnost [18].

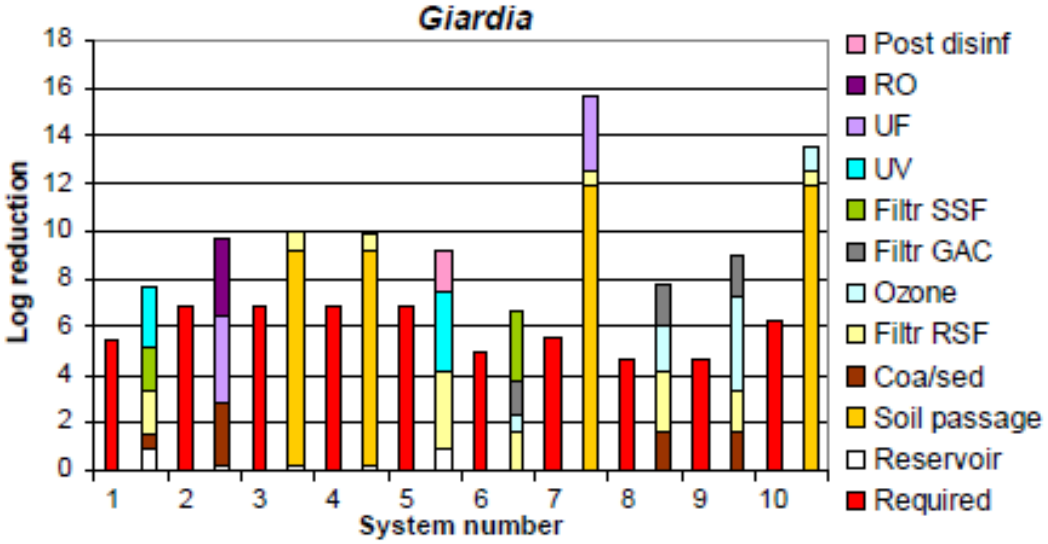


Obr. 1. Požadovaná účinnost jedné úpravny vody při odstranění vybraných patogenů (levý tmavý sloupec – „Required") **a skutečná celková účinnost a podíl jednotlivých technologických stupňů** (pravý sloupec – „Reservoir" = akumulace vody po určitou dobu v otevřené nádrži; „Filtr SSF" = pomalá písková filtrace; „Coa/sed" = koagulace a sedimentace) [18]

Na dalším obrázku (2) je ukázána obdoba, sice jen pro jeden patogenní organismus (giardii), ale na deseti různých úpravnách vody. Zatímco pro první stupeň úpravy se výpočet redukce provádí na základě sledování hodnocených patogenů před a po úpravě tímto stupněm, pro následující stupně úpravy se (vzhledem k nízkému počtu

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

samotných patogenů) posouzení účinnosti odvozuje od pilotních či modelových experimentů a z dat průběžného monitorování každého procesu.



Obr. 2. Požadovaná účinnost redukce giardií (levý tmavý sloupec – „Required") **a skutečná celková účinnost a podíl jednotlivých technologických stupňů na deseti úpravnách vody** (pravý sloupec – „Soil passage" = pasáž vody zemí či pískovými dunami; „Filtr RSF" = rychlá písková filtrace; „Filtr GAC" = filtr z granulovaného aktivního uhlí; „UF" = ultrafiltrace; „RO" = reverzní osmóza) [18]

Účinnost všech důležitých technických bariér vůči mikroorganismům musí být průběžně a pečlivě monitorována. Čím je účinnost bariéry vyšší a tedy čím vyšší dopad by mohl mít její výpadek, tím intenzivnější musí být její kontrola. Například pro bariéru zajišťující redukci patogenů o 6 log řádů by měl existovat automatický on-line monitorovací systém verifikující účinnost každých 10 sekund (!) [19].

Pokud je pitná voda vyráběná z povrchového zdroje, nizozemská legislativa požaduje denní rozbory upravené vody v ukazatelích *E. coli*, *Clostridium perfringens*, koliformní bakterie a počty kolonií (pokud se jedná o podzemní zdroj, je frekvence 1x týdně). Provozovatelé si však vedle toho dobrovolně testují pitnou vodu na přítomnost *E. coli*, ale ve větším objemu vzorku vody než je vyžadováno (obvykle od 100 do 1000 ml). Některé vodárny dokonce jednou měsíčně vyšetří na přítomnost *E. coli* až tisícilitrový vzorek vody [18].

Když se po prvních třech letech aplikace QMRA studií všichni aktéři (VROM, RIVM a vodárenské společnosti) společně sešli, aby zhodnotili své zkušenosti, většina provozovatelů tuto novou zkušenost uvítala a jmenovala konkrétní příklady, v čem jim studie pomohly „otevřít oči" vůči nedostatkům v provozu, kterých si dosud nebyli vědomi [18].

Na závěr připomínáme, že nizozemská legislativa nevyžaduje přítomnost zbytkového dezinfekčního rezidua v distribuční síti a 99% distribuované vody je zcela bez chloru nebo jiného chemického dezinfekčního oxidantu. Tento systém je postaven na filozofii, že je lepší předcházet pomnožování bakterií v distribuční síti jejich vyhladověním (distribuovaná voda musí být biologicky stabilní čili obsahovat minimum asimilovatelného uhlíku) než jejich růst potlačovat zbytkovým dezinfekčním prostředkem [18].

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

Použití QMRA při hodnocení rizik z přímé expozice povrchovým vodám

Jak jsme se v teoretickém úvodu snažili vysvětlit, je metoda QMRA univerzální pro hodnocení rizika expozice mikroorganismům, takže se nemusí jednat jen o přenos pitnou vodou, ale také o přenos potravinami nebo ovzduším (kde někdy dochází k přenosu bakterií prostřednictvím aerosolu, takže je to na pomezí mezi přenosem vodou a vzduchem). Rádi bychom proto poukázali na další rozšířenou aplikaci a tou je hodnocení zdravotních rizik způsobených mikroorganismy při přímém využití povrchových vod. Nejčastější aplikací je hodnocení rizika při rekreačním využití, především koupání, ale příkladů lze nalézt více.

Proč může taková věc zajímat provozovatele veřejného vodovodu? Protože jeho činnost většinou nespočívá jen v zásobování vodou, ale i v odvádění a čištění odpadních vod. A může se setkat s otázkou, zda se mohou lidé kilometr pod výpustí ČOV koupat, zda je bezpečné zde odebírat vodu na závlahu golfového hřiště apod. A případné přesunutí odpovědnosti na správce povodí zde neřeší problém, kdo takovou otázku zodpoví a jak svou odpověď odborně odůvodní. Přijde-li totiž na vážné řešení takové otázky, ať už se jí bude zabývat kdokoli, bude muset být směřována žádost opět na provozovatele ČOV, jaká je mikrobiologická kvalita vypouštěné vody do recipientu, resp. (pokud její monitorování neprobíhá) jaký je kvalifikovaný odhad této kvality, zejména co do obsahu patogenních mikroorganismů. A při hodnocení bezpečnosti vody v takovém místě ke koupání se pak může ukázat, že ani nová legislativa na kvalitu koupacích vod (vyhláška č. 238/2011 Sb.) není moc praktická – o jiných aplikacích (příklad závlah golfového hřiště) ani nemluvě. Odborně správným řešením bude opět aplikace metody QMRA a definování, co je společensky přijatelná míra infekčního rizika.

Americká agentura pro ochranu životního prostředí (US EPA) vydala koncem roku 2010 obsáhlý manuál pro QMRA při hodnocení zdravotního rizika sladkých vod ovlivněných fekální kontaminací ze zemědělství [20], který v příloze A uvádí přehled šestnácti studií publikovaných v mezinárodních recenzovaných časopisech, které provedly QMRA pro různé rekreační využití vod.

Z novějších příkladů lze citovat např. studii QMRA z kanadského Ontaria [21]. Ta zjistila, že koupání ve znečištěném jezeře, kde voda obsahovala kryptosporidia v průměru 91,1 oocyst/l (interval 5‰ – 95‰: 24,7 – 173 oocyst/l), je pro děti spojeno s rizikem infekce na úrovni 10 infekcí/1000 koupajících se (5‰ 2 infekce/1000 koupajících a 95‰ 3 infekce/100 koupajících), zatímco pro dospělé s rizikem 4 infekce na 1000 koupajících se osob.

QMRA u rekreačního využití povrchových vod může být v některých směrech jednodušší než u pitné vody, protože mohu pracovat s přímo stanovenými počty patogenů a nemusím hodnotit účinnost úpravy vody. Také pro hodnocení QMRA u vodní rekreace byla již vydána řada odborných podpůrných dokumentů – vedle již zmíněného [20] a v něm citovaných modelových studií jsou to např. zprávy Water Environment Research Foundation [22, 23].

Jiná použití QMRA u rizika z vodních expozic a odborná podpora QMRA

Vedle hodnocení rizika u pitné nebo rekreační vody doporučuje WHO použití metody QMRA také při hodnocení dopadu použití odpadních vod nebo šedých vod pro závlahy v zemědělství [24]. Evropské centrum pro prevenci a kontrolu nemocí (ECDC) financovalo velký projekt nazvaný „Vliv klimatických změn na nemoci přenášené potravinami a vodou v Evropě", v rámci kterého byla vytvořena velká databáze současných vědeckých poznatků o šesti vybraných patogenech (kampylobakter, kryptosporidium, listerie, salmonela, noroviry a necholerové vibrio), zejména ve vztahu k počasí a klimatickým změnám, včetně kritické meta-analýzy těchto dat. V rámci stejného projektu byl vytvořen také speciální software pro výpočet QMRA ve vztahu k možným klimatickým změnám (CC-MQMRA: Climate Change Modules for Quantitative Microbial Risk Assessment), který umožňuje modelování různých budoucích lokálních

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

scénářů změn klimatu a odhad jimi vyvolaných zdravotních dopadů způsobených některým z uvedených patogenů [25].
Metodu QMRA používá dnes již řada pracovišť ve světě, ale dvě z nich mají vedoucí postavení nejen co do zkušeností, ale především co do dalšího odborného rozvíjení této metody:

a) CAMRA (Center for Advancing Microbial Risk Assessment), což je specializované pracoviště při Michigan State University, podporované US EPA a US Department of Homeland Security. Vedle vzdělávání a publikování odborných článků ve vědeckých časopisech vytvářejí odborníci CAMRA různé nástroje pro QMRA a vydávají pravidelně zpravodaj (Advances in QMRA) a další učební texty [26].
b) Národní ústav veřejného zdraví a životního prostředí (RIVM) v Nizozemí vytváří a publikuje řadu odborných podkladů pro QMRA (např. data o vztazích mezi dávkou a účinkem pro jednotlivé patogeny). Ve věcech použití QMRA u zásobování vodou spolupracuje úzce s Technickou univerzitou v Delftu.

Závěr

Jak po mnoha výše uvedených dílčích a velmi specializovaných informací stručně a srozumitelně shrnout význam QMRA pro provozovatele vodovodů? Zkusme se vrátit k základním požadavkům na pitnou vodu, které by měly být všem srozumitelné. Pitná voda musí být čistá a zdravotně nezávadná [27], resp. pitná voda nesmí obsahovat mikroorganismy, parazity a látky jakéhokoli druhu v počtu nebo koncentraci, které by mohly ohrozit veřejné zdraví [28].
V návaznosti na tuto obecnou zásadu jsou pak v předpisech definovány určité nástroje či minimální požadavky, jak tohoto cíle dosáhnout: soubor určitých mikrobiologických ukazatelů a jejich limitů, soubor vyšetřovacích metod, minimální frekvence kontroly. To je jakési základní praktické kontrolní minimum, na kterém se společnost shodla, že je nutné ho v rámci naplňování uvedeného cíle provádět. Zatímco pro některé systémy zásobování může být toto kontrolní minimum dostatečné, pro jiné – kterým nezbývá než např. využívat surovou vodu horší kvality – to stačit nemusí. O tom svědčí příklady zahraničních epidemií z pitné vody, které se vyskytly u vodovodů, kde všechny mikrobiologické i fyzikální (i chemické) ukazatele odpovídaly předepsaným limitům. Proto je někdy nutné činit kroky nad rámec předepsaného zákonného minima, aby nebyla bezpečnost pitné vody u spotřebitele ohrožena. Vedle metody Water Safety Plans je metoda QMRA jedním z nástrojů, které k tomu lze využít.
V České republice je v rámci pravidelného vyšetřování pitné vody veřejného zásobování dodáno do národní databáze IS PiVo ročně cca 30 tisíc výsledků stanovení *E. coli* a asi 11 tisíc stanovení enterokoků. V roce 2010 byl pozitivní nález *E. coli* ve 308 případech a enterokoků ve 157 případech, což není mnoho (předpokládejme, že výrobci žádné výsledky nezatajují) a navíc i nalezené počty nejsou vysoké – obvykle se jedná o jednotky KTJ/ 100 ml (vzácně se naleznou i desítky či stovky). Představuje nález 1 kolonie *E. coli* nebo enterokoků pro spotřebitele zdravotní riziko? A pokud ano, tak jaké? Odpověď si můžete zkusit vyhledat v následujících publikacích [29, 30]. A ano, tušíte správně, pro odhad rizika byla použita metoda QMRA.

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

Poděkování

Publikace byla zpracována v rámci projektu Technologické agentury ČR „Nové metodické přístupy pro kontrolu a hodnocení povrchových vod ke koupání"; evidenční číslo projektu TA01020675.

Literatura

[1] The History of Risk at EPA. Dostupné on-line (http://www.epa.gov/risk_assessment/history.htm) dne 10.4.2012.
[2] ILSI Risk Science Institute Pathogen Risk Assessment Working Group. A Conceptual Framework for Assessing the Risks of Human Disease Following Exposure to Waterborne Pathogens. *Risk Analysis*; 16: 841-848, 1996.
[3] ILSI Risk Science Institute Workshop Report: Revised Framework for Microbial Risk Assessment. ILSI Press, Washington D.C. 2000.
[4] Haas Ch.N., Rose J.B., Gerba Ch.P. Quantitative Microbial Risk Assessment. J.Wiley & Sons, New York 1999.
[5] MICRORISK. Microbiological risk assessment: a scientific basis for managing drinking water safety from source to tap. Dostupné on-line (http://www.microrisk.com) dne 10.4.2012.
[6] WHO. Guidelines for Drinking-water Quality. 3. vyd. WHO, Ženeva 2004.
[7] WHO. Guidelines for Drinking-water Quality. 4. vyd. WHO, Ženeva 2011.
[8] Craun G.F., Brunkard J.M., Yoder J.S. et al. Causes of Outbreaks Associated with Drinking Water in the United States from 1971 to 2006. *Clinical Microbiology Reviews*, 2010; 23(3): 507–528.
[9] Hrudey S.E., Hrudey E.J. Safe Drinking Water. Lessons from Recent Outbreaks in Affluent Nations. IWA Publishing, Londýn 2004.
[10] Medema G., Ashbolt N. QMRA: its value for risk management. Microrisk, 2006. Dostupné on-line (http://camra.msu.edu/documents/QMRA_framework.pdf) dne 10.4.2012.
[11] Petterson S., Signor R., Ashbolt N., Roser D. QMRA methodology. Microrisk, 2006. Dostupné on-line (http://www.microrisk.com/uploads/microrisk_qmra_methodology.pdf) dne 10.4.2012.
[12] Hazard characterization for pathogens in food and water: Guidelines. WHO a FAO, Řím a Ženeva 2003.
[13] Tuhovčák L., Ručka J., Kožíšek F., Pumann P., Hlaváč J., Svoboda M. a kolektiv. Analýza rizik veřejných vodovodů. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2010.
[14] Anonym. Besluit van 9 januari 2001 tot wijziging van het waterleidingbesluit in verband met de richtlijn betreffende de kwaliteit van voor menselijke consumptie bestemd water. Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, 1–53, 2001.
[15] Anonym. VROM-Inspectierichtlijn Analyse microbiologische veiligheid drinkwater. VROM-Inspectie, 2005. Artikelcode 5318.
[16] Schijven F.J., Teunis P.F.M., Rutjes S.A., Bouwknegt M., De Roda Husman A.M. QMRAspot: A tool for Quantitative Microbial Risk Assessment from surface water to potable water. *Water Research* 2011; 45: 5564-5576.
[17] Schijven J.F., De Roda Husman A.M. Analysis of the microbiological safety of drinking water. Experiences with handling records 2006-7 (v holandštině). RIVM report 703719038, 2009.
[18] Smeets P.W.M.H., Medema G.J., van Dijk J.C. The Dutch secret: how to provide safe drinking water without chlorine in the Netherlands. *Drinking Water Engineering and Science* 2009; 2: 1-14.

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

[19] Smeets P.W.M.H. Stochastic modelling of drinking water treatment in quantitative microbial risk assessment. Delft University of Technology, Delft 2008.
[20] U.S. Environmental Protection Agency. Quantitative Microbial Risk Assessment to Estimate Illness in Freshwater Impacted by Agricultural Animal Sources of Fecal Contamination. EPA 822-R-10-005. US EPA Office of Water, December 2010. Dostupné on-line (http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/health/recreation/upload/P4-QMRA-508.pdf) dne 25.4.2012.
[21] Pintar K.D.M., Fazil A., Pollari F., Charron D.F., Waltner-Toews D., McEwen S.A.A. Risk Assessment Model to Evaluate the Role of Fecal Contamination in Recreational Water on the Incidence of Cryptosporidiosis at the Community Level in Ontario. *Risk Analysis* 2010; 30(1): 49–64.
[22] Bambic D., McBride G., Miller W., Stott R., Wuertz S. Quantification of Pathogens and Sources of Microbial Indicators for QMRA in Recreational Waters. Final Report PATH2R08. WERF + IWA Publishing, Londýn 2011.
[23] Dorevitch S., Li A., Liu C., Scheff P.A. Measuring Water Ingestion Among Water Recreators. Final Report PATH5R09. WERF + IWA Publishing, Londýn 2011.
[24] WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Vol. II Wastewater Use in Agriculture. WHO, Ženeva 2006.
[25] Höser Ch., 2nd Meeting of the ECDC Expert Group on Climate Change. Water & Risk. WHOCC Newsletter, No. 19 (Dec 2011), 11-13. Dostupné on-line (http://www.ihph.de/dokumente/whocc-news/Water&Risk_Vol_19_print.pdf) dne 25.4.2012.
[26] http://camra.msu.edu/index.html.
[27] Zákon o ochraně veřejného zdraví (č. 258/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů), § 3, odst. 1.
[28] Vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody (ve znění pozdějších předpisů), § 3, odst. 1.
[29] van Lieverloo J.H.M., Medema G., van der Kooij D. Risk assessment and risk management of faecal contamination in drinking water distributed without a disinfectant residual. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua* 2006; 55(1): 25–31.
[30] van Lieverloo J.H.M., Blokker E.J.M., Medema G. Quantitative microbial risk assessment of distributed drinking water using faecal indicator incidence and concentrations. *Journal of Water and Health* 2007; 5: 131–149.

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012

Citace – Kožíšek F., Pumann P.: Metoda QMRA a její využití při hodnocení kvality povrchových i upravených vod. Sborník konference *Pitná voda 2012*, s. 233-246. W&ET Team, Č. Budějovice 2012. ISBN 978-80-905238-0-7

© W&ET Team, doc. Ing. Petr Dolejš, CSc., České Budějovice 2012