

Optimální rozmístění monitorovacích stanic pro zajištění bezpečnosti vodovodních distribučních sítí

Vypracoval: Ondřej Vrba, student 4. roč. magisterského studia FAST VUT v Brně
ÚVHO FAST VUT v Brně, Žižkova 17, 602 00 Brno
Datum: 10/2006
Pracovní modul: PM3

Abstrakt: Článek se zabývá sledováním pohybu a koncentrace kontaminujících látek ve vodárenském distribučním systému. Popisuje využití programu OptiMQ, vyvinutého Ostfeldem a Salomonsem. Metodika je složená ze 2 stupňů, konstrukce matice náhodného znečištění a výpočtu pomocí genetického algoritmu. Postup je znázorněn v příkladové aplikaci programu. Ukazuje závislost mezi identifikační pravděpodobností, mírou překrytí monitorovacích stanic oproti počtu monitorovacích stanic pro různé rozsahy znečištění.

Abstract: Tracking pollutant movement and concentrations within a water distribution system, addressed below through optiMQ, developed by Ostfeld and Salomons. The methodology is composed of two main stages, Randomized Pollution Matrix Construction and Maximum Row Matching Using a Genetic Algorithm. Program is using in example application. The example show the tradeoffs between the detection likelihood and the redundancy, versus the number of monitoring stations, for pollution events of one, two, and three injections, and for a level of service, respectively.

OPTIMAL MONITORING STATIONS ALLOCATIONS FOR WATER DISTRIBUTION SYSTEMS SECURITY

Avi Ostfeld

(Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel)

Mays, Larry W.: Water Supply Systems Security, Arizona State University Tempe, Arizona, 2004, Mc Graw Hill publishing, ISBN 0-07-142531-4

Sledování pohybu a koncentrace kontaminující látky ve vodárenském distribučním systému VDS je komplexní proces, který vyžaduje:

- vytvoření matematického modelu pro analýzu hydraulických poměrů,
- monitorování kvalitativních parametrů vody v reálném čase (kontaminace)
- optimální rozmístění monitorovacích stanic

V roce 1990 U.S. EPA vydává směrnice vyžadující splnění standardu kvality vody u spotřebitele (kohoutky) spíše než ve zdrojích vody (ČOV). Vytvoření EPANETu, veřejného modelu, který simuluje chování vody uvnitř tlakových potrubí (skládajících se ze studen,

vodojemů, potrubí, armatur, uzlů, čerpadel), sleduje průtoky v potrubí, hladinu ve vodojemu, tlaky v uzlech a koncentraci chem.složek v celé distribuční síti po celou dobu simulace.

Obchodní aktivita organizace U.S. EPA, v intenzivním výzkumu ve vývoji senzorů a monitorovacích systémů pro měření, nebo poskytnutí "finger prints" („stručné výstupy“), v reálném čase kontaminujících látek, které vnikly do vodovodní distribučních systémů (VDS) (existují senzory/stanice pro chlor, chloraminy, pH, teplotu a ostatní, ale nejsou senzory pro hrozby z bio-zbraní vzniklých úmyslným útokem (bakterie typu Antrax, Salmonela, Biotoxin..)). Přerušování dodávky může mít obecně za následek vznik významného ekonomického následků, ale rozhodující je přímá hrozba na lidské zdraví. Proti tomu je znečištění vzniklé úmyslným zaviněním (chemicky a/nebo biologicky) nesrovnatelnou potenciální hrozbou ve VDS.

Předmětem této kapitoly je metodika pro zlepšení zabezpečení VDS, která spojí problematiku dopravovaného množství vody se simulací kvality vody v reálném čase s monitorováním pro poskytnutí včasné detekce (EWDS) kontaminace vody. Metodika, zrealizovaná v nekomerčním programu optiMQ, vyvinutá Ostfeldem a Salomonsem (2003).

Vědecké pozadí:

- Předpisy U.S. EPA požadují, aby vzorky byly odebrány v lokalitách, které jsou reprezentanty kvality vody v systému, „reprezentant“, však není výslovně definovaný.
- Lee a Deininger (1992) vyvinuli postup založený na ustáleném proudění. Autoři užívali názor, že kvalita vody v uzlu blíže ke zdroji (proti proudění) může být odvozena z odběru vzorku v uzlu vzdálenějším po proudění. Používali analýzy spolu s celočíselným proměnným programováním (integer programming), našli rozvržení monitorovacích stanic s maximálním pokrytím systému. Uzlové příspěvky stanovili použitím ustáleného zdrojového algoritmu od Boulose a Altmana (1993).
 - metoda má několik omezení:
 - ustálený stav kvality vody nastává jen zřídka.
 - metoda neuvažuje změnu proudění v čase a změnu kvality vody.
- Harmant et al. (2001) upravili účelové funkce, uvedli do modelu časovou závislost a kvalitu vody s požadovaným pokrytím. Váží vzorky směrem k větším proudům a "starší" vodě. Uzly s nižší kvalitou vody dostaly vyšší váhy v účelové funkci. Směr v optimálním řešení byl instalovat stanice po proudění lokality, kde existuje směs proudů. Včasná detekce monitorovacím systémem bude záviset na tom, že čidla ve vzdálených uzlech budou postrádat nebo otálet s odhalením změny kvality vody, mohlo by dojít k zasažení spotřebitelů.

- Ostfeld a Kessler (1997, 1999, 2001) představili a použili konstrukční metodologii pro odhalování náhodného znečištění úmyslným narušením VDS. Navrhovaný algoritmus zapojil ustanovení pomocné sítě, kterou reprezentují všechny možné směry proudění pro typický požadovaný cyklus (např. den), „all shortest paths“ algoritmus identifikuje znečištěnou část, a „set covering“ algoritmus optimálně přidělí monitorovací stanice, algoritmický výsledek je minimální soubor monitorování stanice, které vyhoví dané úrovni služby. Hlavní nedostatek je v tom, že nebere v potaz ředění vody a obměny kvality vody tak jak jsou rozdělené v síti; neustálené proudění znečištěné vody.
- Další řešení přes optiMQ je vyvinuté Ostfeldem a Salomonsem (2003).

optiMQ

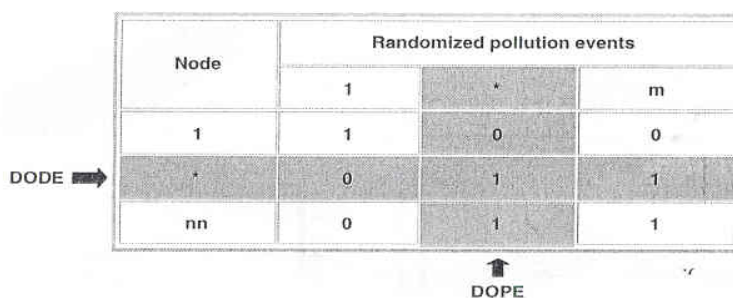
Definice:

- Level of service (LOS) - maximální objem znečištěné vody distribuované spotřebitelům v koncentraci vyšší než je požadováno. Minimum hazard level (MHL - minimální úroveň rizika)
- Pollution event (PE) - znečištění, úmyslné teroristické „vnesení“ znečišťující látky do jednoho nebo několika uzlů systému, včetně spotřebitelských uzlů, vodojemů, studen apod. Až tři možné útoky (události) v různých časech jsou považovaná za hromadnou znečišťující událost (PE).
- Domain of pollution event (DOPE) - oblast znečištěné události, soubor všech znečištěných uzlů až k LOS.
- Domain of detection of a node (DODN) - oblast odhalení uzlu, soubor všech detekovaných znečišťujících událostí jednotlivou monitorovací stanicí.
- Redudancy (R) – míra zálohy (překrytí), relativní množství znečišťujících událostí, zjištěných nejméně dvěma monitorovacími stanicemi.

Metodika je složená ze dvou hlavních stupňů:

1) Konstrukce matice náhodného znečištění (RPM)

nn od m 0 - 1 maticí, kde nn odkazuje na uzly VDS (studny, vodojemy, nádrže, spotřebitelské uzly), m k souboru příkazu pro vytvoření náhodného čísla znečišťujících událostí, a "1" a "0" pro znečištěný/neznečištěný uzel, co se každého týče. Sloupec obsahuje všechny zamořené uzly v nahromaděném objemu až se rovnají úrovni služby LOS; i -tý řádek: vytvoření náhodného čísla znečišťující události vypátratelného od monitorovací stanice umístěné v uzlu „ i “, monitorovací zařízení přijme a poskytne v reálném čase data.



2) Maximum Row Matching Using a Genetic Algorithm (GA)

použití genetického algoritmu odpovídající maximální řadě. Na RPM vloží číslo monitorovací stanice, která zahrnuje uchazeče monit. systému. GA je aplikovaný na nalezení souboru řad s max. se rovnajícím sloupcem. Uvnitř optiMQ každého GA chromozómu je celočíselný proměnný řetěz rovnající se NOMS (počet navrhovaných monitorovacích stanic + stávající monit.stanice (vodojemy, zdroje, atd.) tj. identifikační systém). Každé celočíselné proměnné číslo uvnitř řetězce může přijmout nějakou celočíselnou proměnou hodnotu odpovídající uzlovému označení VDS (kandidátské umístění stanic), vyřazují se uzly, ve kterých už monitorovací stanice existují. Vhodnost každého GA řetězce odpovídá sloupcovému pokrytí, označení identifikační pravděpodobnosti (DL), s max. hodnotou „1“, jestliže všechna znečištění jsou zjistitelná souborem stanic. Výsledkem tohoto stupně je optimální identifikační soustava monitorovacích stanic pro danou úroveň služby.

Program optiMQ

První obrazovka optiMQ se skládá ze 7stupňů:

1. Vhodný vstupní soubor EPANETu [name.inp]
2. Vybrat existující monitorovací stanice pokud jsou definované.
3. Pravděpodobnost různého znečištění v uzlech, nastavím (např.jestliže je uzel vysoce zabezpečen, jeho pravděpodobnost napadení se nastaví malým číslem).
- 4.Parametry znečišťující události: počet znečišťujících událostí (max.3), čas.interval mezi po sobě jdoucími znečištěními, LOS – nejvyšší míra zamořeného objemu, MHL – koncentrace nad kterou je voda považována za kontaminovanou, dávkování znečišťující látky.
5. Vytvoření RPM, definuje se velikost RPM pro znečišťující událost pro 2 nebo 3 napadení (pro 1 napadení každý uzel v systému je řešeno po 5min. po dobu 24 hod, cyklus obsahuje 288 řešení na uzel).
6. GA parametry: počet generací, populační velikost, mutace pravděpodobnosti.

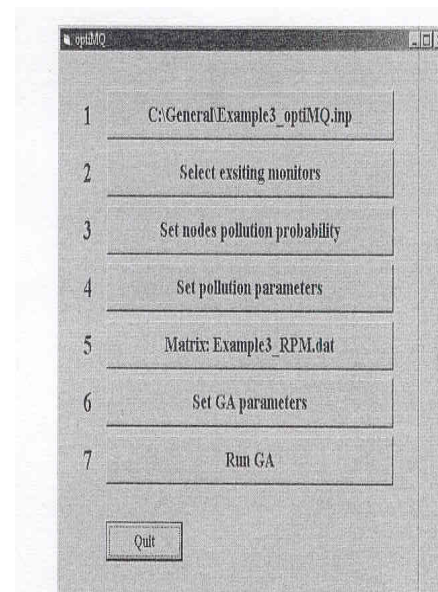


FIGURE 16.2 The optiMQ main screen.

7. Čísla kandidátských stanic jsou definované, spuštění výpočtu GA

Příklad aplikace

Systém se skládá z:

2 zdrojů (jezero a řeka)

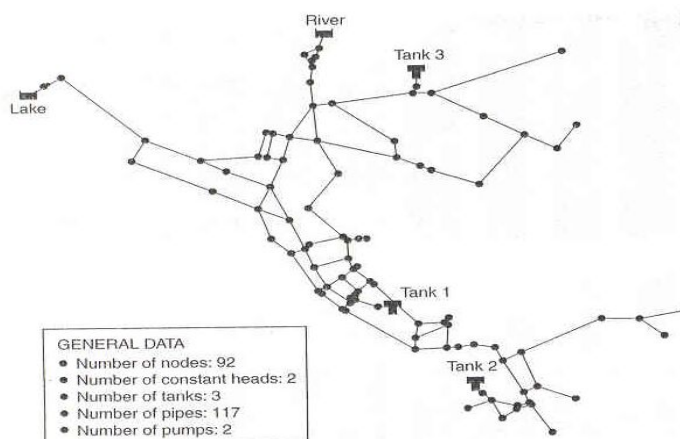
3 vodojemy

117 úseků

92 uzlů (spotřebitelské a vnitřní)

2 čerpací stanice

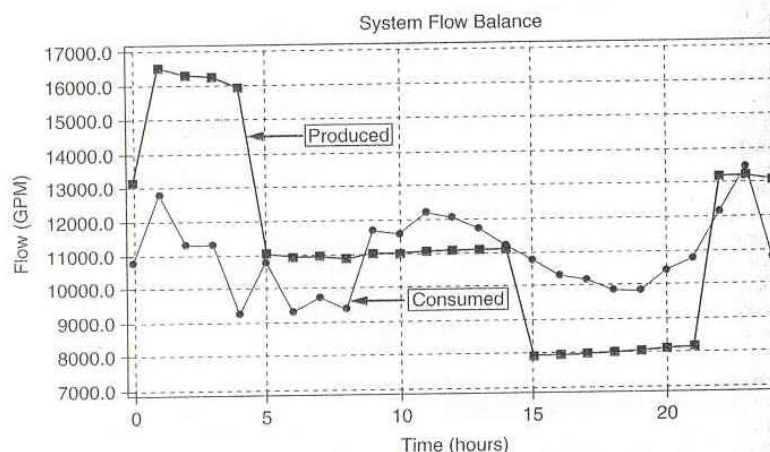
Systém podléhá požadovanému 24-hodinovému vzoru.



Celková výroba a spotřeba vody v systému v průběhu dne.

Další charakteristiky volně ke stažení na webu U.S. EPA, 2003

EPANET př.3.



Analýza byla provedena na osobním počítači 2.4 GHz/512K RAM s následujícími výpočtovými délkami:

Stupeň A-RPM

výpočet trval 9,8 a 16,5 hod

Pro jedno znečištění (27936 znečišťující události = v každém systémovém uzlu každých 5 min po dobu 24 hodin)

Pro 2 a 3 znečištění (47045 náhodné znečišťující události rovny $5nn^2$, kde nn =celkový počet systémových uzlů (97)), $5nn^2$ je nalezená heuristická kvantita pro počet náhodných realizací potřebných vykonat pro stanovení RPM pro 2 a 3 znečištění tak aby přijaly „silné“

(nekolísavé) řešení.

Stupeň B-GA

hledání trvalo 20 – 30 min pro každý GA

výpočet s 50 řetězci v každém obyvatelstvu a 100 generacemi. Délka výpočtu závisí na velikosti RPM a na počtu zvažovaných kandidátských monit. stanic ve výpočtu GA.

Povaha znečišťující události:

Znečištění se vnáší do uzlu 159 v 1:00 a.m.

Látka se vstříkne v poměru 2kg/min po dobu 5min, celkem tedy 10kg látky. Ostré zvýšení znečištění v uzlu.

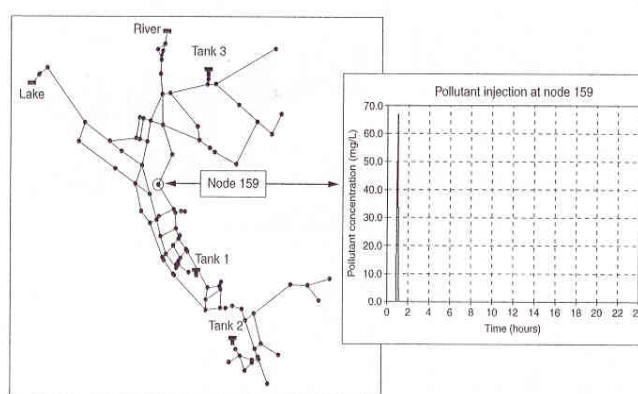
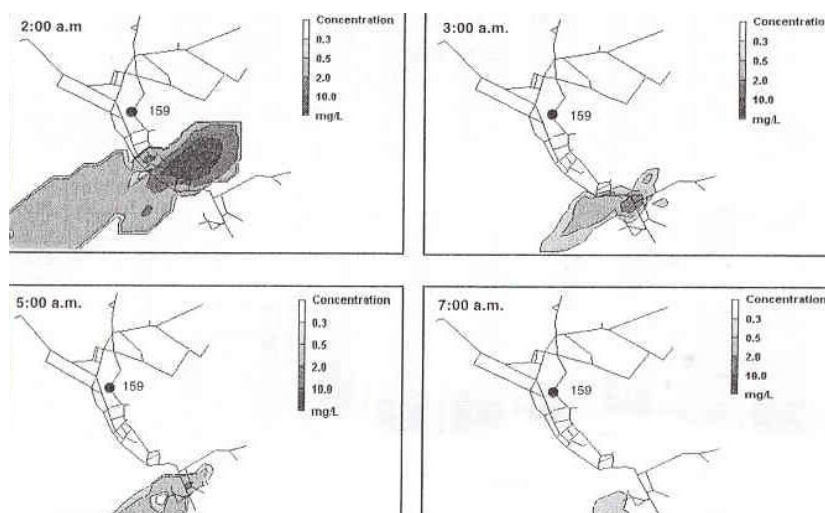


FIGURE 16.5 Pollutant injection example event at node 159 at 1 a.m.—2 kg/min of a pure pollutant (%100 concentration) injection for 5 min (i.e., a total of 10 kg).

Následující šíření látky po proudu.

Událost je ukončena asi okolo 7:00 a.m.



Hlavní výsledky tohoto modelu

Čísla ukazují porovnání mezi identifikační pravděpodobností (DL) a mírou zálohy (překrytím) (R), oproti počtu monitorovacích stanic (NOMS), pro znečišťující události (PE) jedno, dvě nebo tři zasažení systému a pro úroveň služby (LOS) z 50, 500 a 1000 gal (gallon (US) 1 gal = 3,78543dm³ , tedy 190l, 1900l a 3800l). V případě 2 a 3 zasažení, následnost po sobě jdoucích injekcí znečišťujících látek je 15min.MHZ = 0,3 mg/l

Vstříkované množství 2kg/min po dobu 5min, tedy 10kg znečišťující látky.

Předpokládá se umístění již existujících monitorovacích stanic a to ve zdrojích a vodojemech.

Závislost mezi LOS a počtem monit. stanic pro jednu injekci znečišťující události
 Když LOS lepší, DL se snižuje
 DL jsou přibližně stejné pro LOS 500 a 1000 gal pokud narůst NOMS přes 6 stanic, hlavní zvýšení R, menší DL.
 Výpočtová doba 40 hod.

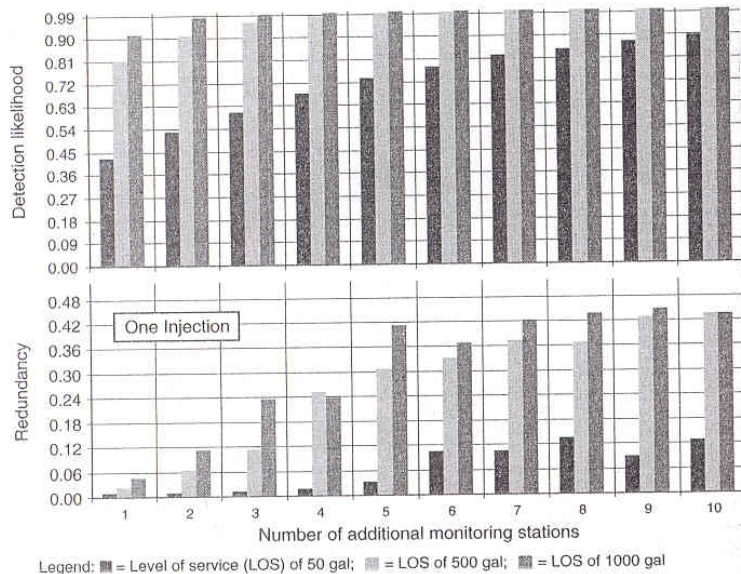


FIGURE 16.7 Tradeoff between the level of service (LOS) and the number of additional monitoring stations for a one injection pollution event.

Závislost mezi LOS a počtem monit.stanic pro dvě injekce znečišťující události
 Podobná chování jako pro 1 injekci.
 Výpočtová doba 60 hod.

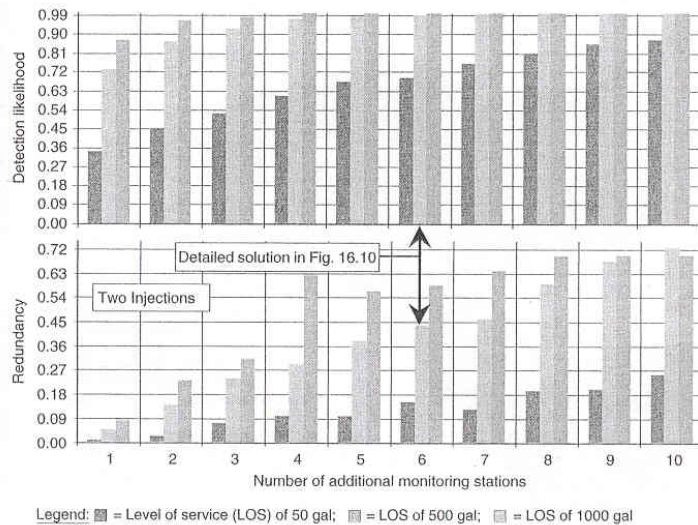


FIGURE 16.8 Tradeoff between the level of service (LOS) and the number of additional monitoring stations for a two injection pollution event.

Ukázka rozvržení monitorovacích stanic pro LOS 500 gal

(viz. též předchozí obr.)

Rozložení 6 dalších monitorovacích stanic .
Stanice 143, 203 a 241 jsou blízko systémových okrajových uzlů.

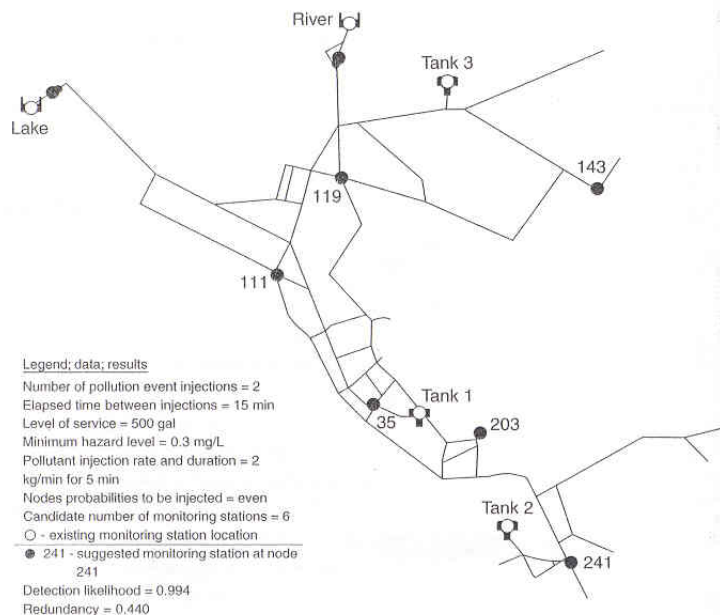


FIGURE 16.10 Example of a monitoring station allocation solution.

Obrázek popisuje citlivost analýzy proti předchozímu obr.

Distribuční systém je dělen na 4 bezpečnostní zóny, každá má různou relativní pravděpodobnost, že právě zde dojde ke kontaminaci, v rozsahu od jedné (nejnižší pravděpodobnostní zóna) k deseti (nejvyšší).

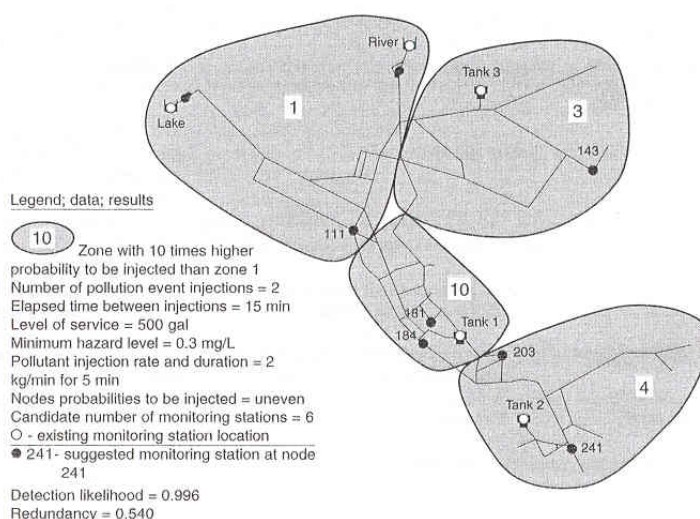


FIGURE 16.11 Sensitivity analysis—Example 3 with different security level zones.

Výsledky ukazují nepatrnou změnu detekční pravděpodobnosti (0,996 ve srovnání s 0,994), ale vysoké zvýšení míry zálohy (překrytí), R (0,54 ve srovnání s 0,44). Zůstávají stanice v uzlech 111, 143, 203 a 241, ale změna stanic 35 za stanici 181 a 119 za stanici 184.

Vyšší bezpečnost systému.

Závěr

Monitorování znečištění v kombinaci s hydraulickým modelem sítě může hrát důležitou roli ve sledování šíření kontaminujících látek ve VDS. To zefektivní varovný systém a tedy zvýší ochranu distribučního systému pitné vody. Příkladová aplikace ukázala kompromisy mezi počtem monitorovacích stanic oproti identifikační pravděpodobnosti a míře zálohy (překrytí), pro různou znečišťující událost a úroveň služby. Doposud hlavní omezení navrhované metodiky je skutečný čas monitorovacího vybavení.

On-line měřicí zařízení (čidla) existují pro zákal, zbytkový chlor, pH, teplotu a další, tj. nepřímé indikátory k znečišťující události. Tato situace se však rychle mění,

- díky potřebě pro online monitorování kvality vody,
- kroky z výzkumných technologických zařízení.