U333

Ing. Jiří Mužák

The mathematical model of flow and transport for simulation of intercollector transfer of contaminants.

Matematický model proudění a transportu pro simulaci úlohy mezikolektorového přetoku kontaminantů

Ing. Jiří Mužák

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI
3146071337

Disertační práce v doktorandském studiu

oboru Konstrukce strojů a zařízení

zaměření Tepelná technika

Liberec, 1999

KEZ
obr. tab
FS - 203 A.1
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17
U333S

Disertační práci jsem vypracoval samostatně

a uvedl jsem veškerou použitou literaturu

Liberec, 12. 5. 1999

Obsah

Obsah I

Současný stav problematiky III

Cíl práce IV

Zvolené metody zpracování IV

Výsledky práce a nové poznatky V

Konkrétní závěry pro další rozvoj V

Seznam zkratek a použitých symbolů 1

Seznam tabulek 2

Seznam obrázků 4

Úvod 11

1. Matematický model průlinového proudění a transportu chemických látek 13

1.1 Teoretické základy modelu průlinového proudění 14

1.2 Teoretické základy modelu transportu chemických látek 17

2. Simulační model 19

2.1 MH-model ustáleného nenasyceného průlinového proudění 19

2.2 Diskretizace oblasti 22

2.3 Prostory funkcí 24

2.4 Numerické řešení soustavy rovnic 25

Algoritmus řešení úlohy proudění 27

2.5 Model transportu chemických látek 28

FV-model transportu látek 29

Realizace modelu transportu 31

2.6 Charakteristika programových modulů 35

2.7 Testování modelů 35

3. Aplikace modelu na problematiku přestupu kontaminantů mezi cenomanským a turonským kolektorem v oblasti ložiska Stráž 37

3.1 Současný stav, cíle a postup řešení úlohy 37

3.2 Kalibrace regionálního modelu 42

3.2.1 Popis regionálního modelu 42

3.2.2 Vlastní kalibrace regionálního modelu 44

3.3 Popis přetokového transportního modelu 58

3.3.1 Koeficienty propustnosti 61

3.3.2 Okrajové podmínky 65

3.3.3 Počáteční podmínky 66

3.4 Modelové scénáře 73

3.5 Výsledky výpočtů 75

3.5.1 Nulová varianta 78

3.5.2 Sanační varianta – 10 g/l TDS 111

3.5.3 Sanační varianta – 3 g/l TDS 141

3.6 Interpretace výsledků 170

3.7 Souhrn 187

Závěr 190

Literatura 192

Současný stav problematiky

Problematika modelování proudění podzemních vod a transportu nečistot včetně simulace fyzikálně-chemických procesů probíhajících v podzemí je v současné době intenzivně studována a řešena na mnoha českých i zahraničních vědeckých pracovištích ať již v rámci základního výzkumu či výzkumu aplikovaného.

Jedním z takových pracovišť je i oddělení modelování technologických procesů s.p. DIAMO ve Stráži pod Ralskem, jehož pracovníci se výzkumu a vývoji modelových nástrojů pro účely chemické těžby uranu na ložisku Stráž věnují již více než 30 let. Za tuto dobu bylo ve spolupráci s dalšími špičkovými skupinami odborníků převážně z univerzit postupně vyvíjeno několik typů modelů na bázi metody konečných prvků. Vývoj postupoval od jednoduchých 1D modelů přes komplikovanější 2D modely až po současně používané komplexní 3D modely určené pro sledování a hodnocení dlouhodobého i krátkodobého vývoje migrace kontaminantů rozpuštěných v podzemních vodách.

Usnesením vlády ČR č. 170/96 byla chemická těžba uranu na ložisku Stráž převedena do likvidace. Důvodem pro toto rozhodnutí bylo vysoce hodnocené riziko přestupu kontaminace ze spodního cenomanského kolektoru do svrchního turonského v důsledku strukturně-tektonické stavby a velkého množství průzkumných a těžebních vrtů ve svém důsledku způsobujících oslabení izolační schopnosti spodnoturonského souvrství.

Přestup kontaminace hrozí ve větší míře až v době, kdy budou ukončeny veškeré sanační aktivity v oblasti. Tato druhotná kontaminace by mohla být podstatně vyšší než současné znečištění turonu. Ohroženy by pak byly nejen zásoby pitných vod, ale také řeka Ploučnice.

Cíl práce

Hlavní cíle předpokládané práce jsou dva. Prvním z nich je na základě současné úrovně vědeckého poznání odvození smíšené hybridní formulace úlohy filtračního proudění technologického roztoku a transportu chemických látek v něm rozpuštěných. Navržení a sestavení algoritmu výpočtu stavové matice a vektoru pravé strany pro formulaci úlohy. Tento algoritmus přepracovat do podoby programového kódu pro platformu Windows 9S a NT.

Druhým cílem je aplikace vytvořeného modelu na problém kontaktní úlohy dvou nad sebou ležících zvodní. Simulovat mezikolektorový přestup kontaminantů v oblasti ložiska Stráž v posanačním období. Provést kalibraci přetokového modelu. Vyhodnotit místa potenciálního přetoku kontaminantů a kvantifikovat rizika z toho plynoucí pro zdroj pitné vody pro Mimoň a řeku Ploučnici.

Zvolené metody zpracování

Uvažujeme-li zvodeň s volnou hladinou, je úloha průlinového proudění nelineární, neboť modelovaná oblast není předem známa. Pro takový problém je vyvinut model ustáleného nenasyceného průlinového proudění na bázi smíšené hybridní formulace metody konečných prvků. Smíšená hybridní formulace úlohy průlinového proudění vychází z Darcyho zákona a rovnice kontinuity.

Formulace úlohy transportu kontaminantů je založena na difuzní rovnici s konvekcí a členem charakterizujícím chemické reakce. Evoluční úloha je diskretizována v čase. K prostorové diskretizaci je užito prizmatických elementů, na kterých jsou generovány funkcionální prostory s konečnou dimenzí.

Výsledky práce a nové poznatky

V první kapitole jsou sumarizovány teoretické základy obou použitých modelů, modelu ustáleného nenasyceného průlinového proudění a modelu transportu chemických látek.

Ve druhé kapitole je popsána tvorba simulačního numerického modelu. Je provedena volba diskretizace oblasti s ohledem na geologické charakteristiky ložiska Stráž. Dále je popsán algoritmus řešení úlohy proudění. Je popsán princip transportního modelu. V části 2.7 jsou shrnuty některé výsledky testování vytvořeného modelu.

Třetí kapitola je zaměřena na aplikaci vytvořených modelů na reálné podmínky ložiska Stráž. V části 3.2 je shrnut postup kalibrace přetokového modelu s použitím regionálního hydrogeologického modelu. Bylo nalezena místo potencionálního přetoku v oblasti mezi VP-15 a VP-20, které bude hrát v posanačním období klíčovou roli pro stanovení limitu pro ukončení sanačního procesu. V částích 3.5, 3.6 a 3.7 jsou shrnuty výsledky dosažené simulací chování kontaminantů v posanačním období na ložisku Stráž. Je kvantifikován dopad na životní prostředí a jsou stanoveny předběžné cílové parametry sanace cenomanského kolektoru s ohledem na ohrožení zdroje pitné vody pro Mimoň.

Konkrétní závěry pro další rozvoj

Byl vytvořen a aplikován komplexní transportní model pro simulaci vývoje chování kontaminantů v posanačním období na ložisku Stráž.

Z průběhu kalibračních a simulačních výpočtů a z výsledků simulace vyplývá nutnost pokračovat ve vývoji takovýchto komplexních simulačních nástrojů, pracovat na jejich zefektivnění, zvláště pak na zefektivnění řešičů rozsáhlých strukturovaných symetrických indefinitních systémů lineárních rovnic.

Ukazuje se, že kromě chemicky relativně nezávislých složek transportovaného roztoku budou mít vliv na stanovení cílových parametrů sanace i chemicky silně závislé složky jako Al či Be. Z těchto důvodů se zdá být nutné rozšíření transportního modelu o modul chemických reakcí a takový model pak aplikovat na problematiku přestupu kontaminantů mezi cenomanským a turonským kolektorem.

Seznam zkratek a použitých symbolů

c	koncentrace
g	gravitační zrychlení
GA ČR	Grantová agentura České Republiky
CHT	chemická těžba
$\boldsymbol{K}(p)$	tenzor hydraulické vodivosti
k_x, k_y, k_z	filtrační koeficient (koeficient hydraulické vodivosti) ve směru x, y, z
MH-model	model založený na smíšené hybridní formulaci úlohy proudění
MI-6	označení vrtu na čerpání pitné vody pro Mimoň
NH_4^+	amonný iont
p	tlaková výška
P-model	*model založený na primární formulaci úlohy proudění*
$S(p)$	nasycenost
SO_4^{2-}	síranový iont
SPD	symetrický pozitivně definitní
TDS	celková solnost, rozpuštěné látky
t	čas
$\boldsymbol{u}$	filtrační rychlost
UI AV ČR	Ústav informatiky Akademie věd České Republiky
VP-n	vyluhovací pole, n – identifikační číslo pole
ρ	hustota roztoku
∇	gradientní operátor
$\nabla\cdot$	operátor divergence

Seznam tabulek

3.4/1 Charakteristika jednotlivých subvariant základních scénářů mezikolektorového přetoku

3.5/1 Množství TDS v turonu dle subvariant – nulová varianta

3.5/2 Množství látek přeteklých do turonu – nulová varianta

3.5/3 Množství látek přeteklých do turonu – nulová varianta

3.5/4 Koncentrace ve vrtu MI-6 – nulová varianta

3.5/5 Koncentrace ve vrtu MI-6 – nulová varianta

3.5/6 Množství ve vrtu MI-6 – nulová varianta

3.5/7 Množství ve vrtu MI-6 – nulová varianta

3.5/8 Koncentrace v Ploučnici – nulová varianta

3.5/9 Koncentrace v Ploučnici – nulová varianta

3.5/10 Množství v Ploučnici – nulová varianta

3.5/11 Množství v Ploučnici – nulová varianta

3.2/12 Množství TDS v turonu dle subvariant – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/12 Množství TDS v turonu dle subvariant – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/13 Množství látek přeteklých do turonu – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/14 Množství látek přeteklých do turonu – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/15 Koncentrace ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/16 Koncentrace ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/17 Množství ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/18 Množství ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/19 Koncentrace v Ploučnici – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/20 Koncentrace v Ploučnici – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/21 Množství v Ploučnici – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.5/22 Množství v Ploučnici – sanační varianta – 10 g/l TDS

3.2/23 Množství TDS v turonu dle subvariant – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/24 Množství TDS v turonu dle subvariant – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/25 Množství látek přeteklých do turonu – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/26 Množství látek přeteklých do turonu – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/27 Koncentrace ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/28 Koncentrace ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/29 Množství ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/30 Množství ve vrtu MI-6 – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/31 Koncentrace v Ploučnici – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/32 Koncentrace v Ploučnici – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/33 Množství v Ploučnici – sanační varianta – 3 g/l TDS

3.5/34 Množství v Ploučnici – sanační varianta – 3 g/l TDS

Seznam obrázků

2.2/1 Prvek použitý pro diskretizaci – pětistěn

2.2/2 Prvek použitý pro diskretizaci – čtyřboký jehlan

2.2/3 Prvek použitý pro diskretizaci – simplex

2.5/1 Schéma transportně reakčního modelu

3.1/1 Vývoj hladin zvodní v oblasti

3.1/2 Schématický litostratigrafický řez

3.2/1 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku, lokalizace regionálního a přetokového modelu

3.2/2 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku, úroveň cenomanské hladiny - březen 1996

3.2/3 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku - rozložení k_x v poloizolátoru, varianta A

3.2/4 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku, odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech. Varianta A

3.2/5 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku - rozložení k_x v poloizolátoru, varianta B

3.2/6 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku, odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech. Varianta B

3.2/7 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku - rozložení k_x v poloizolátoru, varianta C

3.2/8 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku, odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech. Varianta C

3.2/9 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku - rozložení k_x v poloizolátoru, varianta D

3.2/10 Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku, odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech. Varianta D

3.3/1 Model mezikolektorového přetoku - modelová síť

3.3/2 Model mezikolektorového přetoku - rozložení k_x v rozpadavých pískovcích

3.3/3 Model mezikolektorového přetoku - počáteční rozložení koncentrací NH_4, nulová varianta

3.3/4 Model mezikolektorového přetoku - počáteční rozložení koncentrací SO_4, nulová varianta

3.3/5 Model mezikolektorového přetoku - počáteční rozložení konc. NH_4, sanační varianta 10 g/l

3.3/6 Model mezikolektorového přetoku - počáteční rozložení konc. SO_4, sanační varianta 10 g/l

3.3/7 Model mezikolektorového přetoku - počáteční rozložení konc. NH_4, sanační varianta 3 g/l

3.3/8 Model mezikolektorového přetoku - počáteční rozložení konc. SO_4, sanační varianta 3 g/l

3.5/1 Model mezikolektorového přetoku - proudění v cenomanské zvodni dle subvarianty I

3.5/2 Model mezikolektorového přetoku - proudění v turonské zvodni dle subvarianty I

3.5/3 Množství TDS v turonu - nulová varianta

3.5/4 Množství látek přeteklých do turonu - nulová varianta

3.5/5 Koncentrace látek ve vrtu MI-6 - nulová varianta

3.5/6 Koncentrace látek v Ploučnici - nulová varianta

3.5/7 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, NH_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/8 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, NH_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/9 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/10 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, NH_4 v řezu modelem

3.5/11 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, SO_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/12 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, SO_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/13 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, SO_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/14 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta I, SO_4 v řezu modelem

3.5/15 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, NH_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/16 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, NH_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/17 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/18 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, NH_4 v řezu modelem

3.5/19 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, SO_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/20 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, SO_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/21 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, SO_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/22 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta II, SO_4 v řezu modelem

3.5/23 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta III, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/24 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta III, NH_4 v řezu modelem

3.5/25 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta IV, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/26 Model mezikolektorového přetoku - nulová varianta IV, NH_4 v řezu modelem

3.5/27 Množství TDS v turonu - sanační varianta 10 g/l

3.5/28 Množství látek přeteklých do turonu - sanační varianta 10 g/l

3.5/29 Koncentrace látek ve vrtu MI-6 - sanační varianta 10 g/l

3.5/30 Koncentrace látek v Ploučnici - sanační varianta 10 g/l

3.5/31 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, NH_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/32 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, NH_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/33 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/34 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, NH_4 v řezu modelem

3.5/35 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, SO_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/36 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, SO_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/37 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, SO_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/38 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - I, SO_4 v řezu modelem

3.5/39 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - II, NH_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/40 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - II, NH_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/41 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - II, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/42 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - II, NH_4 v řezu modelem

3.5/43 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - II, SO_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/44 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - II, SO_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/45 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - II, SO_4 v řezu modelem

3.5/46 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - III, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/47 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - III, NH_4 v řezu modelem

3.5/48 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - IV, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/49 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 10 g/l - IV, NH_4 v řezu modelem

3.5/50 Množství TDS v turonu - sanační varianta 3 g/l

3.5/51 *Množství látek přeteklých do turonu - sanační varianta 3 g/l*

3.5/52 Koncentrace látek ve vrtu MI-6 - sanační varianta 3 g/l

3.5/52 Koncentrace látek v Ploučnici - sanační varianta 3 g/l

3.5/54 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, NH_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/55 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, NH_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/56 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/57 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, NH_4 v řezu modelem

3.5/58 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, SO_4, turonská zvodeň, t=100 let

3.5/59 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, SO_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/60 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, SO_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/61 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - I, SO_4 v řezu modelem

3.5/62 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - II, NH_4, turonská zvodeň, t=300 let

3.5/63 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - II, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/64 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - II, NH_4 v řezu modelem

3.5/65 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - II, SO_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/66 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - II, SO_4 v řezu modelem

3.5/67 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - III, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/68 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - III, NH_4 v řezu modelem

3.5/69 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - IV, NH_4, turonská zvodeň, t=1000 let

3.5/70 Model mezikolektorového přetoku - sanační varianta 3 g/l - IV, NH_4 v řezu modelem

3.6/1 Koncentrace NH_4^+ ve vrtu MI-6 – subvarianta I

3.6/2 Koncentrace NH_4^+ ve vrtu MI-6 – subvarianta II

3.6/3 Koncentrace NH_4^+ ve vrtu MI-6 – subvarianta III

3.6/4 Koncentrace NH_4^+ ve vrtu MI-6 – subvarianta IV

3.6/5 Koncentrační přírůstek NH_4^+ v Ploučnici – subvarianta I

3.6/6 Množství TDS přeteklé do turonu – subvarianta I

3.6/7 Množství TDS přeteklé do turonu – subvarianta II

3.6/8 Množství TDS přeteklé do turonu – subvarianta III

3.6/9 Množství TDS přeteklé do turonu – subvarianta IV

Úvod

Předkládaná práce řeší v současné době velmi naléhavou problematiku matematického modelování transportu chemických látek v oblasti Stráže pod Ralskem, kde byl klasickou cestou a zároveň i chemickým loužením těžen uran.

Cílem práce je vytvoření algoritmu řešení úlohy ustáleného nenasyceného průlinového proudění a transportu kontaminantů pro problematiku přestupu kontaminantů z cenomanského kolektoru do kolektoru turonského (zásobárna pitných vod) v období po ukončení sanace chemické těžby na ložisku Stráž. Dalším cílem je aplikovat vytvořený algoritmus na reálnou úlohu přestupu kontaminantů.

Práce je strukturována dle specifikovaných cílů. První dvě kapitoly jsou zaměřeny na teoretické odvození modelů a jejich numerickou realizaci. Třetí kapitola popisuje danou aplikaci.

V kapitole 1.1 jsou popsány teoretické základy modelu ustáleného nenasyceného průlinového proudění. Jsou zde stanoveny základní řídící rovnice pro úlohu proudění, Darcyho zákon a rovnice kontinuity. Tyto základní vztahy jsou doplněny třemi typy okrajových podmínek. Dirichletova okrajová podmínka uvádějící hodnotu tlakové výšky, Newtonova okrajová podmínka definující stav při kterém je vnější tok úměrný gradientu tlakové výšky a Neumannova okrajová podmínka pro nepropustnou část hranice (podloží tvořené krystalinikem, Strážský zlom) či pro část hranice tvořenou terénem, kde je specifikována dešťová dotace.

V kapitole 1.2 je popsán teoretický základ modelu transportu kontaminantů. Řešení úlohy transportu vychází z časového rozkladu transportního operátoru na operátor konvekce, operátor chemických reakcí a operátor difuze a disperze. Jsou zde popsány bilanční rovnice pro každou z látek roztoku. Úloha je doplněna okrajovými podmínkami.

Druhá kapitola je zaměřena na realizaci simulačního numerického modelu. V kapitole 2.1 je popsána smíšená hybridní formulace úlohy neustáleného nenasyceného průlinového proudění. V kapitole 2.2 je uvedena prostorová diskretizace dané oblasti. Pro diskretizaci jsou použity prizmatické prvky se svislými bočními stěnami a obecně různým sklonem podstav. Jako doplňkové

prvky jsou použity čtyřboký jehlan a simplexový prvek. Kapitola 2.3 zavádí funkcionální prostory s konečnou dimenzí pro smíšenou hybridní formulaci úlohy proudění. Numerické řešení vygenerované soustavy lineárních rovnic a alforitmus řešení úlohy proudění jsou popsány v kapitole 2.4. Kapitola 2.5 je zaměřena na numerickou realizaci transportu chemických látek. Je zde popsán časový rozklad transportního operátoru a princip modelu transportu na bázi metody konečných objemů. V kapitole 2.6 jsou stručně charakterizovány vytvořené programové moduly. Některé výsledky testování uvedených modelů na testovacích úlohách uvádí kapitola 2.7.

Třetí kapitola je věnována aplikaci modelu na problematiku přestupu kontaminantů mezi cenomanským a turonským kolektorem v oblasti ložiska Stráž. Část 3.1 charakterizuje současný stav, cíle a postup řešení úlohy, který se skládá ze čtyř kroků: tvorba přetokového modelu a jeho naplnění daty, kalibrační výpočty na regionálním modelu, výpočty přestupu látek dle modelovaných scénářů a analýza výsledků. Kalibraci regionálního modelu je věnována samostatná kapitola 3.2. Zde je popsán charakter regionálního modelu, jeho hranice, okrajové podmínky a modelová síť. Je zde popsána i vlastní kalibrace modelu, která byla provedena ve čtyřech krocích. Jejím výsledkem je stanovení pravděpodobného intervalu hodnot vertikálního koeficientu filtrace spodnoturonského poloizolátoru. Kapitola 3.3 popisuje přetokový transportní model. Jsou zde stanoveny tři typy počátečních podmínek odvislých od stupně vyčištění cenomanského kolektoru. Z nich vyplývají i modelové scénáře popsané v kapitole 3.4. Kromě třech typů počátečních podmínek jsou zde zohledněny i krajní hodnoty intervalu vertikálních filtračních koeficientů spodnoturonského poloizolátoru v zájmové oblasti. Zohledněno je i to, že cenomanská piezometrická hladina může v posanačním období nastoupat na úroveň vyšší než byla úroveň před zahájením těžebních aktivit na ložisku Stráž. Výsledky výpočtů shrnuje kapitola 3.5. Výsledky jsou bohatě dokumentovány tabulkami a obrázky. Interpretace výsledků a shrnutí je součástí kapitol 3.6 a 3.7.

1. Matematický model průlinového proudění a transportu chemických látek

Matematický model průlinového proudění a transportu chemických látek rozpuštěných v technologickém roztoku v oblasti cenomanské a turonské zvodně je vypracován a provozován v několika variantách. Modely slouží k vypracování podkladů pro rozhodovací proces řízení jednotlivých etap sanačních prací a umožňují studium chování zbytkových roztoků z hlediska budoucího vývoje po ukončení sanace. Tato práce je zaměřena na aplikaci modelu průlinového proudění a transportu chemických látel na sledování kontaminace turonské zvodně v průběhu sanace cenomanské zvodně. Řídicími prvky jsou okrajové podmínky reprezentované výkony čerpadel a rozmístěním čerpacích respektive vtláčecích vrtů v oblasti.

Protože hladina v turonské zvodni a část hladiny v cenomanské zvodni je tvořena volnou hladinou, je úloha průlinového proudění nelineární, neboť modelovaná oblast není předem známa. Pro tento problém byl vyvinut nový model ustáleného nenasyceného průlinového proudění, který řeší úlohu průlinového proudění současně v nasycené zóně i části nenasycené zóny, přičemž rozhraní obou zón též není předem známé. Tento přístup právě umožňuje modelovat úlohu kontaktu dvou zvodní se dvěma volnými hladinami nad sebou a úlohy s diametrálně rozdílnými charakteristikami hydraulické propustnosti, ve kterých volná hladina „strmě" klesá. Předchozí modely využívající idealizace popisu volné hladiny oddělující nasycenou a „suchou" oblast neumožňovaly tyto situace simulovat respektive vykazovaly v některých částech modelované oblasti značnou numerickou nestabilitu. Modelované úlohy jsou nelineární a jsou formulovány jako úlohy optimalizační. Účelové funkcionály, jejichž hodnota je v průběhu iteračního procesu minimalizována, jsou definovány jako normy rozdílu stavových proměnných v konkrétních funkcionálních prostorech. Modely též zohledňují geometrická specifika prostředí cenomanského kolektoru, tj. vrstevnatý charakter sedimentovaných hornin, komplikovaný horizontální profil s několika tisíci vrty i značně rozsáhlou oblast. Vlastní matematická formulace modelů je pojata obecně tak, aby zahrnovala všechny podstatné aspekty transportu

chemických látek v podmínkách sanace Strážského bloku a aby bylo modely možné aplikovat (po úpravě) i v jiných situacích při řešení úlohy šíření kontaminovaných vod.

1.1 Teoretické základy modelu průlinového proudění

Prostor zvodně určuje oblast, kterou dále označíme $\Omega \subset R^3$. Průsakové proudění je charakterizováno filtrační rychlostí **u**, jejíž závislost na tlaku $\underline{p}$ je dána Darcyho zákonem

$$\mathbf{u} = -\frac{\mathbf{k}(S)}{\mu}(\nabla \underline{p} + \rho g \nabla z) = -\mathbf{K}_0(S)(\nabla \underline{p} + \rho g \nabla z), \qquad (1.1.1)$$

kde $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$, k(S) je tenzor hydraulické vodivosti porézního prostředí, tj. pozitivně definitní tenzor druhého řádu, závisející na nasycenosti prostředí S a μ je viskozita roztoku. Vzhledem k relativně nízkým koncentracím rozpuštěných látek v roztoku je viskozita považována za konstantu a v modelech je dále užíván tenzor hydraulické vodivosti $\mathbf{K}_0 = \frac{\mathbf{k}}{\mu}$ pro vodu respektive technologický roztok nepřevyšující 10%-ní koncentrace TDS. Z makroskopického hlediska jsou do tenzoru hydraulické vodivosti $\mathbf{K}_0$ integrovány i významné tektonické poruchy. Geologická struktura cenomanu je velmi komplikovaná a z důvodu rozsahu modelované oblasti nelze volit příliš jemnou diskretizaci, která by zahrnula všechny poruchy. Darcyho zákon můžeme vyjádřit v následující formě:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_0(S)\rho g\left(\nabla \frac{\underline{p}}{\rho g} + \nabla z\right) = -\mathbf{K}(S)(\nabla p + \nabla z), \qquad (1.1.2)$$

kde $p = \frac{\underline{p}}{\rho g}$ označuje tlakovou výšku a **K**(S) je tenzor hydraulické vodivosti modifikovaný gravitační konstantou. V hydrogeologických aplikacích se též užívá piezometrická výška *h*, která souvisí s tlakovou výškou podle jednoduchého vztahu *h*=*p*+z. Pro závislost tenzoru hydraulické vodivosti na nasycenosti užijeme následující vztah:

$$\mathbf{K}(S) = \mathbf{K}^{\bullet}\left[\frac{S - S_0}{1 - S_0}\right]^3,$$

kde $\mathbf{K}^{\bullet}$ je tenzor hydraulické vodivosti nasyceného horninového prostředí, S_0 je zbytková nasycenost a $S_e = \frac{S - S_0}{1 - S_0}$ udává efektivní nasycenost. Nasycenost S souvisí se zápornou tlakovou výškou p (kapilární výškou). Graficky je tato závislost vyjádřena retenční křivkou a pro analytické vyjádření této závislosti se obvykle využívá aproximační funkce navržená van Genuchtenem:

$$S(p) = S_0 + \frac{1 - S_0}{\left(1 + \alpha |p|^m\right)^{\frac{m-1}{m}}}.$$

Zde α a m vyjadřují horninové charakteristiky retenční závislosti. Dosazením tohoto vztahu do výše uvedené závislosti tenzoru hydraulické propustnosti na nasycenosti odvodíme následující vztah závislosti hydraulické vodivosti na záporné tlakové výšce:

$$\mathbf{K}(p) = \mathbf{K}^{\bullet}\frac{1}{\left(1 + \alpha |p|^m\right)^{\frac{3m-3}{m}}}.$$

Výraz:

$$k_r(p) = \begin{cases} \frac{1}{\left(1 + \alpha |p|^m\right)^{\frac{3m-3}{m}}} & je - li \quad p < 0 \\ 1 & je - li \quad p \geq 0 \end{cases}$$

vyjadřuje relativní hydraulickou vodivost. Darcyho zákon pak můžeme vyjádřit v následujícím tvaru

$$\mathbf{u} = -k_r(p)\mathbf{K}^{\bullet}(\nabla p + \nabla z), \tag{1.1.3}$$

který budeme dále používat pří odvození modelů.

Poznámka 1: *Pro vyjádření této závislosti je možné využít i jiných vztahů, které jsou publikovány v odborné literatuře. Tyto vztahy byly obvykle odvozeny pro některé druhy hornin a pro simulační modely, které mají postihnout velmi rozsáhlou hydrogeologickou oblast je lze obtížně využít. Navíc obvykle jsou tyto*

vztahy pouhou modifikací vztahu van Genuchtena a jemné odlišnosti se nedají vystihnout při „hrubé" diskretizaci, která je při modelování uvedeného rozsahu nezbytností.

V průběhu sanačních etap bude průlinové proudění ustálené. Pouze v přechodových obdobích, kdy budou zahajovat činnost nové technologie významné z hlediska hydrogeologických změn, bude průlinové proudění neustálené. Časový interval těchto přechodových období bude však relativně krátký a tedy významně neovlivní průběh dlouhodobého vývoje kontaminace turonské zvodně. Proto je úloha průlinového proudění kontaktu dvou zvodní řešena jako ustálená pro dlouhé etapy, během kterých jsou okrajové podmínky neměnné. Ustálené průsakové proudění je popsáno rovnicí kontinuity ve tvaru

$$\nabla.\mathbf{u} = q \qquad (1.1.4)$$

Operátor $\nabla\cdot = div$ je operátor divergence a funkce q vyjadřuje hustotu zdrojů roztoku, tj. výkony jednotlivých čerpadel.

Hranice oblasti je rozdělena na tři části $\Gamma_D, \Gamma_N, \Gamma_T$, na kterých jsou zadány různé okrajové podmínky. Na části Γ_D je zadána okrajová podmínka Dirichletova typu, tedy na této části hranice je zadána hodnota tlakové výšky

$$p = p_D \qquad (1.1.5)$$

a tuto část hranice určují monitorovací vrty, ve kterých je piezometrická výška průběžně měřena a tlakovou výšku můžeme snadno odvodit z výše uvedeného vztahu. Část hranice Γ_N je obvykle definována podložím a pláštěm oblasti a na této části je zadána obecná okrajová podmínka Newtonova typu, která definuje stav, při kterém je vnější tok úměrný gradientu tlakové výšky, přičemž konstantou úměrnosti je přestupový koeficient σ charakterizující propustnost dané části hranice. Tento koeficient je zadán nezápornou shora omezenou funkcí. Okrajová podmínka má tedy následující tvar

$$\mathbf{u}\cdot\mathbf{n} - \sigma(p - p_D) = q_N, \qquad (1.1.6)$$

kde p_D je změřená vnější tlaková výška a q_N je vnější tok. Tato podmínka umožňuje zahrnout i nepropustné podloží a Strážský zlom volbou $\sigma = q_N = 0$.

Na zbývající části Γ_T, kterou tvoří terén nebo nepropustné části hranice volíme nehomogenní respektive homogenní Neumannovu podmínku

$$\mathbf{u}\cdot\mathbf{n} = -u_R\,,\quad \mathbf{u}\cdot\mathbf{n} = 0\,, \tag{1.1.7}$$

kde u_R vyjadřuje střední hodnotu dešťových dotací v daném časovém intervalu.

Poznámka 2: *Nelineární část úlohy, která souvisí se stanovením tvaru modelované oblasti zahrnující i část nenasycené zóny, je řešena aplikací **P-modelu** ustáleného průlinového proudění. Ten je odvozen z primární formulace úlohy. Nelineární rovnice je řešena metodou prostých iterací, která zajistí minimalizací účelového funkcionálu vyjadřujícího odchylku tlakové výšky od předcházející hodnoty této proměnné, pomocí které byla nastavena relativní hydraulická propustnost. Tato odchylka je minimalizována během iteračního procesu generujícího ustálený stav. Výhody tohoto postupu jsou dány především jeho snazší numerickou realizací. **MH-model** průlinového proudění je odvozen ze smíšené hybridní formulace úlohy a je aplikován pro ustálené režimy proudění, které jsou určeny aplikací P-modelu.*

Poznámka 3: *Popis **P-modelu** není obsahem této práce, a proto pouze krátce sumarizujeme jeho vlastnosti. Výhodou **P-modelu** je jeho relativně snadná implementace. Diskretizací integrální rovnice dostaneme SPD soustavu pro tlakovou výšku p. Filtrační rychlost **u** však musíme odvodit aplikací Darcyho zákona, tím však ztrácíme její hladkost. Tato filtrační rychlost nezajistí vyrovnané bilance na mezielementových stěnách prostorově diskretizované úlohy. Tedy výsledky P-modelu neumožňují aplikaci upwind techniky při řešení úlohy transportu chemických látek metodou konečných objemů. P-model je však velmi vhodný pro hydrogeologické analýzy a stanovení tvaru rozhraní nasycené a nenasycené zóny.*

1.2 Teoretické základy modelu transportu chemických látek

Řešení kompletní transportní úlohy je velmi obtížné a zahrnuje stanovení vývoje několika desítek chemických komponent technologického roztoku s uvážením konvekce, difuze, disperze a více než sto chemických reakcí látek v roztoku

i mezi látkami roztoku a horniny. Aplikovaná varianta modelu úlohy transportu, která je realizovaná pro určení vývoje sanace, vychází z časového rozkladu operátoru transportu na operátor konvekce, operátor chemických reakcí a konečně i operátor difuze a disperze. Nový chemický stav na konci zvoleného časového intervalu dostaneme superpozicí jednotlivých vlivů, přičemž ve vytypovaných lokalitách oblasti s podobnými transportními charakteristikami řešíme vlivy menšího významu na delších časových intervalech časově synchronizovaných se základní časovou diskretizací.

Kompletní úloha transportu je popsána bilančními rovnicemi pro každou z látek roztoku a pro ℓ-tou látku má tvar

$$\frac{\partial c^\ell}{\partial t} + \nabla\cdot\left(\mathbf{u}\, c^\ell\right) - \nabla\cdot\left(\mathbf{D}\,\nabla c^\ell\right) + c^\ell q^- + r^{\ell,-}\left(c^\ell, c^i, ..\right) = c^{\ell *} q^+ + r^{\ell,+}\left(c^k, c^i, ..\right) \qquad (1.2.1)$$

kde $\mathbf{D}$ je difuzně-disperzní tenzor závislý na molekulární difuzivitě ℓ-té látky, podélné a příčné disperzivitě a filtrační rychlosti $\mathbf{u}$ podle následujícího vztahu:

$$\mathbf{D} = D_m \delta_{ij} + \alpha_T |\mathbf{u}|\ \delta_{ij} + \left(\alpha_L - \alpha_T\right)\frac{u_i u_j}{|\mathbf{u}|}, \qquad (1.2.2)$$

kde D_m je koeficient molekulární difuze, $\mathbf{u}$ je filtrační rychlost, α_L, α_T jsou koeficienty podélné a příčné disperze. Okrajové podmínky se volí homogenní. Na vtokových stěnách hranice, jejichž sjednocení označíme $\partial\Omega^+$, předpokládáme, že do oblasti vtéká nekontaminovaná voda a volíme homogenní Dirichletovu podmínku

$$c^\ell = 0 \qquad (1.2.3)$$

respektive volíme nehomogenní podmínku pokud známe typ přitékající vody a její chemické složení. Na výtokových stěnách, jejichž sjednocení označíme $\partial\Omega^-$, volíme homogenní Neumannovu podmínku

$$\mathbf{D}\ \nabla c^\ell \cdot \mathbf{n} = 0 \qquad (1.2.4)$$

charakterizující stav, kdy jsou chemické komponenty vynášeny z oblasti pouze vlivem konvekce, tj. vliv difuze je z důvodu nízkých koncentrací zanedbán.

2. Simulační model

2.1 MH-model ustáleného nenasyceného průlinového proudění

MH-model je založen na pevném rozkladu oblasti Ω na systém disjunktních podoblastí – elementů, který dále označíme E_h (index h označuje diskretizační parametr). Na každém elementu MH-model požaduje slabé splnění Darcyho zákona a rovnice kontinuity. Tento systém podmínek je doplněn i o slabé splnění bilančních rovnic na mezielementových stěnách. Označme Γ_h strukturu mezielementových stěn a vnějších stěn, které nenáleží do Γ_D. Na zvoleném rozkladu E_h definujeme prostor $\mathbf{H}(div;E_h)$ vektorových funkcí, jejichž souřadnice náleží do Lebesgueova prostoru $L_2(\Omega)$ a $\nabla\cdot\mathbf{u}^e$ náleží do $L_2(e)$ pro každý element e rozkladu E_h. Zde horní index e označuje restrikci funkce $\boldsymbol{u}$ na element e. V zavedeném prostoru $\mathbf{H}(div;E_h)$ je aproximována filtrační rychlost $\boldsymbol{u}$. Dále na *zvolené struktuře stěn* Γ_h *je definován prostor stop* $H^{1/2}(\Gamma_h)$ *funkcí ze* Sobolevova prostoru $H^1_D(\Omega)$. Darcyho zákon (1.1.3) je upraven na následující tvar

$$R_r(p)\mathbf{A}\ \mathbf{u} = -\nabla p - \nabla z\,. \qquad (2.1.1)$$

Zde tenzor $\mathbf{A}$ ($\mathbf{A}=[\mathbf{K}^*]^{-1}$) označuje tenzor odporu porézního prostředí a $R_r(p)=[k_r(p)]^{-1}$ je relativní zvýšení odporu v nenasyceném prostředí. Označme $\mathbf{H}(div;\Omega)$ prostor vektorových funkcí, jejichž divergence náleží do Lebesgueova prostoru $L_2(\Omega)$ funkcí integrovatelných s kvadrátem. Rovnici (2.1.1) násobíme skalárně vektorovou testovací funkcí $\mathbf{v}$, která je definována na celé oblasti Ω a náleží do výše zavedeného prostoru $\mathbf{H}(div;\Omega)$, a rovnici integrujeme přes oblast Ω. Dostaneme následující integrální rovnici:

$$\int_\Omega R_r(p)\mathbf{A}\mathbf{u}\cdot\mathbf{v}\ d\Omega = -\int_\Omega[\nabla p+\nabla z]\cdot\mathbf{v}\ d\Omega\,.$$

V tomto případě musí funkce p náležet do Sobolevova prostoru funkcí $H^1(\Omega)$, jejíž složky gradientu jsou v oblasti Ω integrovatelné s kvadrátem. Abychom oslabili tuto podmínku, aplikujeme na pravou stranu Greenovu větu a obdržíme

$$\int_\Omega R_r(p)\mathbf{Au}\cdot\mathbf{v}\ d\Omega = \int_\Omega [p+z].\nabla\cdot\mathbf{v}\ d\Omega - \int_{\partial\Omega} [p+z].\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}\ dS,$$

kde symbol $\partial\Omega$ označuje hranici oblasti Ω a $\mathbf{n}$ je jednotkový normálový vektor vnější vzhledem k Ω. Pro zjednodušení dalších zápisů zavedeme následující označení:

$$\int_\Omega \varphi.\psi\ d\Omega = (\varphi,\psi),$$

$$\int_{\partial\Omega} \varphi.\psi\ dS = \langle\varphi,\psi\rangle_{\partial\Omega}.$$

Pomocí zavedené symboliky můžeme integrální rovnici zapsat ve tvaru:

$$\left(R_r(p)\mathbf{Au},\mathbf{v}\right) - (p,\nabla\cdot\mathbf{v}) + \langle p,\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}\rangle_{\partial\Omega} = (z,\nabla\cdot\mathbf{v}) + \langle z,\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}\rangle_{\partial\Omega}.$$

Tato integrální rovnice definuje slabé splnění Darcyho zákona na celé oblasti Ω.

MH-model je založen na pevném rozkladu oblasti Ω na systém disjunktních podoblastí-elementů, který dále označíme E_h (index h označuje diskretizační parametr). Na každém elementu MH-model požaduje slabé splnění Darcyho zákona a rovnice kontinuity. Tento systém podmínek je doplněn i o slabé splnění bilančních rovnic na mezielementových stěnách. Označme Γ_h strukturu mezielementových stěn a vnějších stěn, které nenáleží do Γ_D. Tedy jedná se buď o vnitřní stěny nebo o stěny, na nichž není zadána Dirichletova okrajová podmínka. Na zvoleném rozkladu E_h definujeme prostor $\mathbf{H}(div;E_h)$ vektorových funkcí, jejichž souřadnice náleží do Lebesgueova prostoru $L_2(\Omega)$ a $\nabla\cdot\mathbf{u}^e$ náleží do $L_2(e)$ pro každý element e rozkladu E_h. Zde horní index e označuje restrikci funkce $\boldsymbol{u}$ na element e. V zavedeném prostoru $\mathbf{H}(div;E_h)$ je aproximována filtrační rychlost $\mathbf{u}$. Dále na zvolené struktuře stěn Γ_h je definován prostor stop $H^{1/2}(\Gamma_h)$ funkcí ze Sobolevova prostoru $H^1_D(\Omega)$.

Slabé splnění Darcyho zákona (2.1.1) v prostoru $\mathbf{H}(div;E_h)$ vyžaduje splnění následující integrální rovnice, ve které je integrál na pravé straně upraven aplikací Greenovy formule,

$$\sum_{e\in E_h}\left\{\left(R_r\left(\lambda^e\right)\mathbf{A}\ \mathbf{u}^e;\mathbf{v}\right)-\left(p^e;\nabla\cdot\mathbf{v}\right)+\left\langle\lambda^e;\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}^e\right\rangle_{\partial e\cap\Gamma_h}\right\}=\sum_{e\in E_h}\left\{\left(z^e;\nabla\cdot\mathbf{v}\right)-\left\langle z^e;\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}^e\right\rangle_{\partial e}-\left\langle p_D^e;\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}^e\right\rangle_{\partial e\cap\Gamma_D}\right\}. \tag{2.1.2}$$

Tato rovnice je formulována pro ustálené proudění. Splnění této integrální rovnice požadujeme pro všechna **v** z prostoru $\mathbf{H}(div;E_h)$. Slabé splnění rovnice kontinuity ustáleného proudění vede na následující integrální rovnici

$$-\sum_{e\in E_h}\left(\nabla\cdot\mathbf{u}^e;\phi\right)=-\sum_{e\in E_h}\left(q^e;\phi\right). \tag{2.1.3}$$

Splnění výše uvedené rovnice (2.1.3) požadujeme pro všechna ϕ z prostoru $L_2(\Omega)$.

Konečně slabé splnění bilančních rovnic na struktuře Γ_h v prostoru $H^{1/2}(\Gamma_h)$ a zadaných okrajových podmínek vede na třetí integrální rovnici

$$\sum_{e\in E_h}\left\{\left\langle\mathbf{u}^e\cdot\mathbf{n}^e;\mu\right\rangle_{\partial e\cap\Gamma_h}-\left\langle\sigma\lambda^e;\mu\right\rangle_{\partial e\cap\Gamma_h}\right\}=\sum_{e\in E_h}\left\{\left\langle q_N^e-\sigma p_D^e;\mu\right\rangle_{\partial e\cap\Gamma_N}+\left\langle u_R^e;\mu\right\rangle_{\partial e\cap\Gamma_T}\right\}. \tag{2.1.4}$$

Splnění této rovnice požadujeme pro všechny funkce μ z prostoru $H^{1/2}(\Gamma_h)$.

Výše uvedený systém integrálních rovnic můžeme shrnout do jediné rovnice zavedením nelineární formy

$$\begin{aligned}B\left(E_h,R_r(\lambda);\mathbf{w}^*,\mathbf{w}\right)=\sum_{e\in E_h}\Big\{&\left(R_r(\lambda)\mathbf{A}\ \mathbf{u}^e;\mathbf{v}\right)-\left(p^e;\nabla\cdot\mathbf{v}\right)-\left(\nabla\cdot\mathbf{u}_n^e;\phi\right)+\\&+\left\langle\lambda^e;\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}^e\right\rangle_{\Gamma_h}+\left\langle\mathbf{u}^e\cdot\mathbf{n}^e;\mu\right\rangle_{\Gamma_h}-\left\langle\sigma\lambda^e;\mu\right\rangle_{\Gamma_h\cap\Gamma_N}\Big\}\end{aligned} \tag{2.1.5}$$

a nelineárního funkcionálu

$$\begin{aligned}Q\left(E_h,R_r(\lambda);\mathbf{w}\right)=\sum_{e\in E_h}\Big\{&-\left(q^e;\phi\right)+\left(z;\nabla\cdot\mathbf{v}\right)-\left\langle z;\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}^e\right\rangle+\\&+\left\langle p_D^e;\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}^e\right\rangle_{\Gamma_h}-\left\langle u_R;\mu\right\rangle_{\Gamma_h}+\left\langle u_N^e-\sigma\lambda_n^e;\mu\right\rangle_{\Gamma_h\cap\Gamma_N}\Big\}\end{aligned} \tag{2.1.6}$$

kde $\mathbf{w}^*=(\mathbf{u},p,\lambda)$ a $\mathbf{w}=(\mathbf{v},\phi,\mu)$ jsou funkce z prostoru

$$\mathbf{W} = \left(\mathbf{H}(div, E_h) \times L_2(\Omega) \times H^{1/2}(\Gamma_h)\right).$$

Potom slabé řešení **MH-modelu** ustáleného průlinového proudění nazveme funkci $\mathbf{w}^*$ z prostoru ***W***, která splňuje integrální rovnici

$$B\left(E_h, R_r(\lambda); \mathbf{w}^*, \mathbf{w}\right) = Q\left(E_h, R_r(\lambda); \mathbf{w}\right) \tag{2.1.7}$$

pro všechny funkce **w** z prostoru **W**.

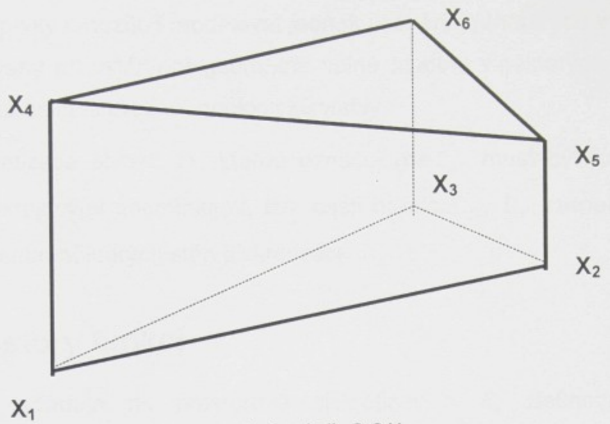
Poznámka 4: *Výhodou **MH-modelu** je přímá aproximace filtrační rychlosti **u**, která je vstupní veličinou pro modely transportu chemických látek. MH-model zajišťuje splnění bilančních rovnic na stěnách elementů a představuje moderní prostředek pro řešení úloh průsakového proudění. Jeho nevýhodou je vyšší počet proměnných v diskretizované formě ve srovnání s P-modelem.*

Poznámka 5: *MH-model průlinového proudění se zahrnutím nenasycené zóny umožňuje řešení úlohy na pevné síti, přičemž volná hladina je aproximována izolinií* $p = 0$. *Na každém iteračním kroku model vyžaduje dobrý odhad nelineárních členů, tj. koeficientu relativního odporu prostředí. Podrobně bude tento postup uveden v algoritmu MH-modelu.*

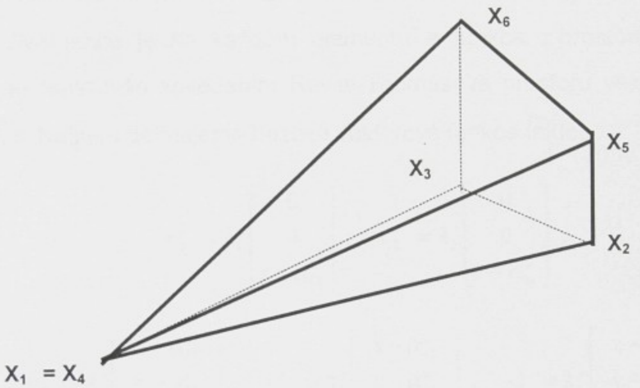
2.2 Diskretizace oblasti

Diskretizace oblasti musí být zvolena tak, aby co nejlépe vystihovala podstatné charakteristiky prostředí. Mezi tyto vlastnosti náleží především vrstevnatý charakter sedimentovaných hornin. Jednotlivé geologické vrstvy se mnohdy liší řádovými rozdíly koeficientů propustnosti i chemickým složením. Proto byl za základní prvek diskretizace zvolen prizmatický element se svislými bočními stěnami a obecně různým sklonem základen, viz obrázek 2.2/1. Tento prvek umožňuje vystihnout vrstevnatý charakter prostředí i komplikovaný horizontální profil s několika tisíci vrty. Navíc tato prostorová diskretizace poskytuje přehledné datové struktury, což je vzhledem k rozsahu modelované oblasti velmi důležitá vlastnost.

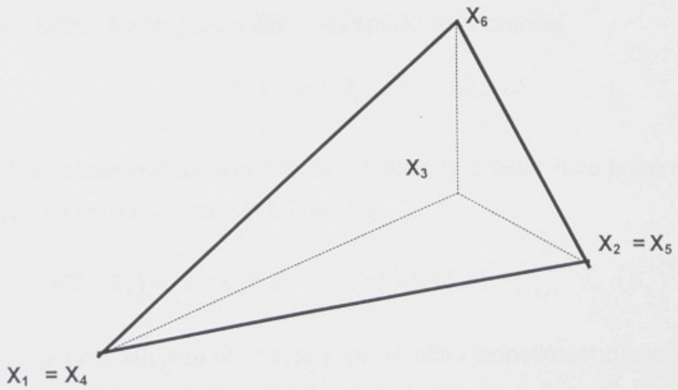
Jako doplňkové prvky jsou zvoleny prvek tvaru čtyřbokého jehlanu a prvek simplexový, u nichž jeden respektive dva vrtikálně sousedící uzly degenerují v uzel jediný, viz obrázky 2.2/2. a 2.2/3.



obrázek č. 2.2/1



obrázek č. 2.2/2



obrázek č. 2.2/3

Tyto prvky umožňují modelovat jednak uzávěry jednotlivých vrstev a jednak jsou aplikovány při vyjádření geometrie volné hladiny v některých lokalitách, ve kterých volná hladina protíná geologické vrstvy.

Diskretizace oblasti Ω, kterou označujeme E_h, musí být kompatibilní se zadanými okrajovými podmínkami, tzn. části hranic Γ_D, Γ_N respektive Γ_F musí být sjednocením některých stěn diskretizace E_h.

2.3 Prostory funkcí

MH-model vyžaduje na prostorové diskretizaci E_h definovat konečně dimenzionální aproximaci divergenčního prostoru $\mathbf{H}(div;E_h)$ vektorových funkcí, jejichž divergence je na každém elementu *e* funkce z prostoru $L_2(e)$. Tento prostor je realizován zavedením Raviat-Thomasova prostoru vektorových funkcí $\mathbf{RT}_{-1}(E_h)$. *Nejprve definujeme bázové vektorové funkce takto:*

$$\mathbf{v}_1^e = k_1^e \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z - \alpha_{13}^e \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v}_2^e = k_2^e \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z - \alpha_{23}^e \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{v}_3^e = k_3^e \begin{bmatrix} x - \alpha_{31}^e \\ y - \alpha_{32}^e \\ \beta_3^e z - \alpha_{33}^e \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v}_4^e = k_4^e \begin{bmatrix} x - \alpha_{41}^e \\ y - \alpha_{42}^e \\ \beta_4^e z - \alpha_{43}^e \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v}_5^e = k_5^e \begin{bmatrix} x - \alpha_{51}^e \\ y - \alpha_{52}^e \\ \beta_5^e z - \alpha_{53}^e \end{bmatrix}.$$

Parametry těchto funkcí jsou definovány splněním podmínky

$$\int_{\partial e_j} \mathbf{n}_j^e \cdot \mathbf{v}_i^e \, dS = \delta_{ij}; \quad i,j = 1,2,3,4,5.$$

A následně můžeme definovat Raviart-Thomasův prostor jako lineární obal výše uvedených bázových vektorových funkcí, tj.

$$\mathbf{RT}_{-1}(E_h) = \left\{ \mathbf{v} \in \mathbf{L}_2(\Omega);\ \mathbf{v}|_e \in [\mathbf{v}_1^e, \mathbf{v}_2^e, \mathbf{v}_3^e, \mathbf{v}_4^e, \mathbf{v}_5^e,]_\alpha;\ \forall e \in E_h \right\}.$$

Tedy filtrační rychlosti jsou normovány podmínkou jednotkového toku vždy jednou ze stěn elementu a *nulovými toky stěnami zbývajícími*. Tlaková výška v MH-modelu proudění je aproximována po elementech respektive stěnách rozkladu

konstantními funkcemi, tj. v prostorech $M_{-1}^{0}(E_h) \subset L_2(\Omega)$ respektive $M_{-1}^{0}(\Gamma_h) \subset L_2(\Gamma_h)$. Zavedeme-li prostor

$$\mathbf{W}_h = \mathbf{RT}_{-1}(E_h) \times M_{-1}^{0}(E_h) \times M_{-1}^{0}(\Gamma_h),$$

pak aproximací soustavy integrálních rovnic MH-modelu v prostoru $\mathbf{W}_h \times \mathbf{W}_h$ odvodíme nelineární soustavu se symetrickou indefinitní maticí následujícího typu:

$$\begin{bmatrix} R_r(\lambda)\mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \\ \mathbf{B}^T & & \\ \mathbf{C}^T & & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \end{bmatrix}. \qquad (2.3.1)$$

2.4 Numerické řešení soustavy rovnic

Diskretizace získané pomocí metody konečných prvků vedou k rozsáhlým systémům lineárních algebraických rovnic. Tyto systémy jsou řídké a strukturované. Efektivní řešení rozsáhlých (řekněme od desítek tisíc proměnných výše) třídimenzionálních a špatně podmíněných problémů, se kterými se setkáváme je stále komplikovaný a v mnoha ohledech otevřený problém. Navíc je zapotřebí jej též přizpůsobit dostupné výpočetní technice.

Standardním postupem řešení užitým pro malé systémy (do několika desítek tisíc rovnic) jsou přímé metody, např. Choleského faktorizace pro SPD systémy, obecná Gaussova eliminace pro nesymetrické lineární soustavy. Přímé metody dokáží využít maticové struktury, ale v praxi mají obvykle problémy jak s velikostí faktorů matice tak s dobou výpočtu. V tomto případě je jedinou alternativou použití iteračního algoritmu.

Značná pozornost v poslední době je věnována výzkumu metod typu sdružených gradientů. Přes velké množství různých metod a léta intenzívního výzkumu však důležité otázky týkající se rychlosti konvergence, existence posloupnosti přibližných řešení a numerické stability zůstávají stále otevřené.

V průběhu řešení grantového projektu GA ČR 96/205/0921 je na spoluřešitelském pracovišti UI AV ČR zkoumán problém z mnoha různých pohledů. Jsou aplikovány a zkoumány jak iterační tak přímé metody, které byly

úspěšně začleněny do kódů řešení diskretizovaných lineárních systémů vzniklých v různých formulacích spojitého problému.

Moderním trendem výzkumu je uvažovat vzájemný vztah spotřebované paměti a času pro jednotlivé fáze výpočtu a adaptivně je upravovat pomocí rozdělení datových struktur na bloky s použitím různého počítačového prostředí. Na UI AV ČR byly vyvinuty takové přímé algoritmy, které dosahují vyvážení datového toku mezi faktory a zásobníkem, používanými pro sloupcovou a submaticovou variantu řídkého řešiče tohoto typu. Výsledky byly implementovány a jsou obsaženy v řešičích použitých pro reálné výpočty.

Z iteračních postupů byla použita především metoda sdružených gradientů. Její rychlost konvergence je známa a závisí na rozložení vlastních čísel matice lineárního systému. Po teoretické stránce je důležité studovat hlavně otázku jejího předpodmínění. Tedy v určitém smyslu použití kombinace přímé a iterační metody ve formě předpodmíněné iterační metody.

Je známo, že pro mnohé úlohy, především třídimenzionální, klasická předpodmínění typu neúplné Choleského faktorizace nedávají dobré výsledky. Proto je zapotřebí se uchýlit k mnohem robustnějšímu přístupu. Tento výzkum byl prováděn v těsném sepětí s grantovými projekty Z. Strakoše a byly navrženy nové způsoby explicitního předpodmínění. Dosažené výsledky jsou velmi slibné a efektivní programy pro výpočet předpodmínění jsou jedním z důležitých výsledků v této oblasti.

Smíšené a smíšené hybridní formulace vedou na řešení **symetrických, ale indefinitních soustav** rozsáhlých a řídkých lineárních rovnic s nulovým diagonálním blokem. Tato struktura umožňuje uvažovat několik různých algoritmických postupů, které se mohou často velmi lišit svou efektivitou. Především je přirozené uvažovat použití metody sdružených gradientů pro řešení systému Schurova doplňku s SPD maticí. Další možností je uvažovat lineární systém jako celek a použít metodu MINRES. Použití symetrizace indefinitního systému na SPD problém je další metodou řešení.

Pro řešení kontaktní úlohy dvou zvodní byl použit řešič vyvinutý Ing. M. Tůmou, CSc. a Ing. Rozložníkem z UI AV ČR.

Algoritmus řešení úlohy proudění

1. Na podkladě geometrie sítě, materiálových a okrajových podmínek vypočteme všechny stacionární lineární části formy (**A**, **B**, **C**, **S**) a funkcionálu ($\mathbf{q}_1$, $\mathbf{q}_2$, $\mathbf{q}_3$) a uložíme je do paměti, odkud je budeme během iteračního procesu načítat při řešení stavu na každém časovém subintervalu časové diskretizace.

2. Definujeme k=0 (k je index iterací nelineární části úlohy), $\mathbf{u}_0$, $\mathbf{p}_0$, λ_0 , položíme

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{u}_{k-1},\quad \mathbf{p}_k = \mathbf{p}_{k-1},\quad \lambda_k = \lambda_{k-1}$$

a sestavíme symetrickou indefinitní maticí a vektor pravé strany:

$$\begin{bmatrix} R_r(\mathbf{p}_k)\mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \\ \mathbf{B}^T & & \\ \mathbf{C}^T & & \mathbf{S} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \end{bmatrix}.$$

3. Řešíme stavovou soustavu

$$\begin{bmatrix} R_r(\mathbf{p}_k)\mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \\ \mathbf{B}^T & & \\ \mathbf{C}^T & & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{k+1} \\ \mathbf{p}_{k+1} \\ \lambda_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \end{bmatrix}.$$

4. Definujeme vektory citlivosti :

$$\mathbf{c}_p^k = \mathbf{p}_{k+1} - \mathbf{p}_k .$$

$$\mathbf{c}_\lambda^k = \lambda_{k+1} - \lambda_k$$

5. Dále definujeme vektory $\mathbf{w}_k^p$, $\mathbf{w}_k^\lambda$ zohledňující předchozí vývoj iterací:

$$[\mathbf{w}_k^p]_i = w_1,\ \text{je-li}\ [\mathbf{c}_p^{nk}]_i \times [\mathbf{c}_p^{k-1}]_i < 0\ ,$$

$$[\mathbf{w}_k^p]_i = w_2,\ \text{je-li}\ [\mathbf{c}_p^{k}]_i \times [\mathbf{c}_p^{k-1}]_i \geq 0\ .$$

$$[\mathbf{w}_{nk}^\lambda]_i = w_1,\ \text{je-li}\ [\mathbf{c}_\lambda^{nk}]_i \times [\mathbf{c}_\lambda^{k-1}]_i < 0\ ,$$

$$[\mathbf{w}_k^\lambda]_i = w_2,\ \text{je-li}\ [\mathbf{c}_\lambda^{k}]_i \times [\mathbf{c}_\lambda^{k-1}]_i \geq 0\ .$$

Zde souřadnice $w_1 \in (0,1)$ tlumí možné oscilace iteračního procesu a souřadnice $w_2 \in (1,2)$ urychlují iterační proces.

6. Nový stav definujeme takto:

$$\mathbf{p}^j_{k+1} = \mathbf{p}^j_k - \left[\mathbf{w}^p_k\right]_j \times \left[\mathbf{c}^k_p\right]_j,$$

$$\lambda^m_{k+1} = \lambda^m_k - \left[\mathbf{w}^\lambda_k\right]_m \times \left[\mathbf{c}^k_\lambda\right]_m.$$

7. Konvergenci iteračního procesu posuzujeme podle chyby, která je dána hodnotou

$$e_k = \max_{j\in J}\left|\left[\mathbf{c}^k_p\right]_j\right| + \max_{m\in K}\left|\left[\mathbf{c}^k_\lambda\right]_m\right|.$$

8. Je-li splňeno kriterium zastavení $e_k < \varsigma$ (zde ς je zadaná přesnost), potom volíme stav $\mathbf{u}_{k+1}$, $\mathbf{p}_{k+1}$, λ_{k+1} za řešení nelineárního problému a položíme tedy:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{k+1},\ \mathbf{p} = \mathbf{p}_{k+1},\ \lambda = \lambda_{k+1}.$$

9. Není-li splněno kriterium zastavení iteračního procesu, tj. $e_k \geq \varsigma$, položíme *k=k+1* a iteraci opakujeme.

2.5 Model transportu chemických látek

Řešení transportní rovnice (1.2.1) je velmi obtížný problém. Její řešení v úplném tvaru lze dosáhnout jen pro malé sítě a jednoduchou geometrii. To je dáno tím, že diskretizace soustavy vede na nesymetrickou matici, jejíž řešení je časově velmi náročné. Proto je tento problém řešen časovým rozkladem operátoru transportu na posloupnost jednotlivých vlivů (konvekce, chemických reakcí a difuze, disperze), které jsou pak na každém časovém subintervalu superponovány. V období sanace je dominantním vlivem transportního vývoje vliv **konvekce**, jehož rovnice je dána takto:

$$\frac{\partial c^\ell}{\partial t} + \mathbf{u}\cdot\nabla c^\ell + c^\ell q^- = c^{\ell *} q^+. \qquad (2.6.1)$$

V této rovnici označuje q^- výkon čerpání a q^+ označuje výkon vtláčení roztoku o koncentraci ℓ-té látky dané hodnotou $c^{\ell *}$. Tato rovnice je časově diskretizována na základě explicitního schématu a řešena na každém časovém kroku. Dalším významným vlivem transportního vývoje jsou chemické změny, které jsou *rozděleny na změny vyvolané ustanovením nové rovnováhy látek v roztoku*. Tyto

změny lze matematicky popsat soustavou nelineárních rovnic pro komponenty roztoku v následující formě:

$$G^m(c^\ell, c^i, c^k, \ldots) = 0 \text{ , pro } \ell, i, k \in L_s, \qquad (2.6.2)$$

kde L_s označuje indexovou množinu komponent roztoku. Pokud dochází na daném časovém intervalu k větším chemickým změnám, je nutné vzhledem k nelinearitám ustanovení chemické rovnováhy na tomto časovém intervalu počítat soustavu (2.6.2) i několikrát respektive řešit problém chemických rovnováh na menším časovém intervalu, který je synchronizován s původní časovou diskretizací transportní rovnice. Dále řešíme vliv chemických změn vyvolaných rozpouštěcími a srážecími reakcemi, které jsou ve srovnání s reakcemi v roztoku mnohem pomalejší, a proto jsou řešeny na základě kinetického modelu a popsány následujícími diferenciálními rovnicemi

$$\frac{\partial c^\ell}{\partial t} + r^{\ell,-}(c^\ell, c^i, ..) = r^{\ell,+}(c^k, c^i, ..). \qquad (2.6.3)$$

Zde funkce $r^{\ell,-}$ definuje změny v koncentraci ℓ-té látky vyvolané srážecími reakcemi a $r^{\ell,+}$ definuje dotaci ℓ-té látky vlivem rozpouštění látek obsažených v hornině. Obě funkce zahrnují rychlostní koeficienty, které jsou nastaveny podle okamžitého chemického stavu prostředí. Konečně v oblastech pomalého průsakového proudění (okrajové části oblasti sanace a oblasti pro modelování šíření zbytkových roztoků) doplníme do modelu i vliv difuze a disperze, která je matematicky vyjádřena následující parciální diferenciální rovnicí parabolického typu:

$$\frac{\partial c^\ell}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\mathbf{D}\ \nabla c^\ell\right) = 0, \ \ell \in L_s. \qquad (2.6.4)$$

Tato rovnice je diskretizována rozkladem oblasti na suboblasti a lze ji řešit MH-modelem difuzní rovnice, jehož odvození je analogické odvození integrální rovnice (1.2.17) s tím, že rovnice je lineární.

FV-model transportu látek

Úloha transportu látek je na každém časovém intervalu $\langle t_{n-1}, t_n \rangle$ složena z jednotlivých vlivů rozloženého operátoru transportu. Na počátku je vypočtena

změna rozložení koncentrací jednotlivých komponent roztoku vlivem konvekce v poli filtračních rychlostí. K integraci rovnice je aplikováno explicitní schéma a upwind technika na stěnách elementu zmíněného rozkladu oblasti. Odtud odvodíme integrální rovnici ve tvaru

$$\frac{1}{\Delta t}\left(c^{\ell}_{n-2/3};\phi^{e}\right)=-\left\langle \mathbf{u}^{e}\cdot\mathbf{n}^{\partial e}c^{\ell}_{n-1},\mu^{\partial e}\right\rangle_{\Gamma_h}-\left(c^{\ell}_{n-1}\,q^{-};\phi^{e}\right)+\left(c^{\ell*}_{n-1}\,q^{+};\phi^{e}\right)+\frac{1}{\Delta t}\left(c^{\ell}_{n-1};\phi^{e}\right)$$

(2.6.8)

Zde $\Delta t=t_n-t_{n-1}$ definuje délku *n*-tého časového intervalu a ϕ^{e} označuje charakteristickou funkci elementu *e* a $\mu^{\partial e}$ definuje charakteristickou funkci stěny ∂e. V případě užití explicitního schématu dostaneme nové rozložení koncentrací látek v roztoku aplikací vztahu

$$\mathbf{c}^{\ell}_{n-2/3}=\mathbf{V}^{-1}\Delta t\left\{-\mathbf{N}\ \mathbf{c}^{\ell}_{n-1}+\mathbf{Q}^{+}c^{\ell*}_{n}-\mathbf{Q}^{-}\mathbf{c}^{\ell}_{n-1}\right\}+\mathbf{c}^{\ell}_{n-1}, \qquad (2.6.9)$$

kde $\mathbf{V}$ je diagonální matice, jejíž diagonální prvky definují objemy jednotlivých elementů, $\mathbf{N}$ je přetoková matice definující upwind na stěnách rozkladu a $\mathbf{Q}^{+}$ respektive $\mathbf{Q}^{-}$jsou diagonální matice, jejichž diagonální prvky definují výkony vtláčení či čerpání do jednotlivých elementů.

Ve druhé fázi řešíme změny dané chemickými reakcemi. Nejprve jsou ustanoveny nové chemické rovnováhy látek v roztoku řešením soustavy nelineárních rovnic

$$G^{m}\left(c^{\ell}_{n-1/2},c^{\ell}_{n-2/3},c^{i}_{n-1/2},c^{i}_{n-2/3},\dots\right)=0 \qquad (2.6.10)$$

pro látky v roztoku, tzn. $\ell\in L_s$. Dále jsou do změn koncentrací zahrnuty i změny určené srážecími, rozpouštěcími a ostatními „pomalými" reakcemi, které jsou popsány kinetickými rovnicemi. Tyto rovnice vyjádříme v integrálním tvaru na objemu jednotlivých elementů následovně

$$\frac{1}{\Delta t}\left(c^{\ell}_{n-1/3};\phi^{e}\right)=\left(r^{\ell,+}_{n};\phi^{e}\right)-\left(r^{\ell,-}_{n};\phi^{e}\right)+\frac{1}{\Delta t}\left(c^{\ell}_{n-1/2};\phi^{e}\right). \qquad (2.6.11)$$

Tyto chemické změny jsou vypočteny jak pro látky v roztoku tak i pro látky obsažené v hornině. Konečně ve třetí fázi řešení chemické situace na konci *n*-tého

časového kroku zahrneme i změny, ke kterým dojde vlivem difuze a disperze. V oblastech, ve kterých je konvekce řádově větší než difuzní toky vyvolané gradientem koncentrací jednotlivých komponent roztoku, můžeme tento výpočet vynechat.

$$\frac{1}{\Delta t}\left(c_n^\ell;\phi^e\right)-\left(\nabla\cdot\mathbf{D}\nabla c_n^\ell;\phi^e\right)=\frac{1}{\Delta t}\left(c_{n-\frac{1}{3}}^\ell;\phi^e\right). \tag{2.6.12}$$

Tato rovnice je prostorově diskretizována na základě MH-formulace úlohy.

Realizace modelu transportu

Transportní úloha je řešena v časových krocích vzájemným přestupem roztoku mezi jednotlivými prvky sítě. Po provedení výpočtu přestupu je na daném prvku řešena bilance rozpuštěných látek a jsou vypočteny nové koncentrace látek v roztoku.

3D pětistěnný prvek, jaký je použit při diskretizaci smíšené hybridní formulace úlohy proudění, má celkový objem V_0. Část V_r z celkového objemu prvku je zaplněna horninou a část V_f je zaplněna roztokem. Jestliže ε je porosita, pak:

$$V_f=\varepsilon\cdot V_0\,,\quad V_r=(1-\varepsilon)\cdot V_0\,.$$

Výsledkem řešení úlohy proudění pomocí smíšené hybridní formulace jsou toky přes jednotlivé stěny prvků dané diskretizace. Nechť U_j^e, $j=1,2,3,4,5$ jsou toky přes stěny vybraného prvku e. Kladná hodnota U_j^e představuje tok směrem do prvku, záporná hodnota tok směrem ven. Rozměr veličiny U_j^e je objem za jednotku času, tj. v našem případě např. m^3/den. Přestupující objem roztoku na daném prvku splňuje podmínku

$$\sum_{j=1}^{5}U_j^e=Q^e\,,$$

kde Q^e je intenzita zdroje nebo propadu v daném prvku. Transport látek je implementován se zvoleným časovým krokem Δt. Množství roztoku přetékajícího

během časového kroku přes danou stěnu je $\Delta t \cdot U_j^e$. Pro všechny prvky musí splňovat podmínku

$$\Delta t\left(\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{5}\left|U_j^e\right|+\left|Q^e\right|\right)\leq V_f$$

Uvedená podmínka zaručuje, že v jednom časovém kroku nepřeteče prvkem větší množství roztoku než je objem roztoku v prvku. Tato podmínka je analogií Pécletova čísla užívaného v jiných modelech, které vyjadřuje vzájemný vztah mezi síťovým parametrem (velikost prvku), rychlostí proudění a délkou časového kroku. To je třeba mít stále na mysli při tvorbě konceptuálního modelu pro řešení konkrétního problému.

Rozpuštěné látky přestupují přes stěny prvků zároveň s kapalinou. V modelu předpokládáme, že koncentrace jednotlivých látek jsou konstantní na celém objemu prvku. Množství každé látky přestupující přes stěnu daného prvku je dáno součinem přestupujícího objemu a koncentrace ℓ-té látky v prvku, ze kterého roztok přitéká

$$M_i^{e,\ell}=U_i^e\cdot C^{e,\ell}$$

kde M_i je množství látky přestupující přes stěnu prvku, e je index prvku, do kterého roztok vstupuje (jsou vždy dvě možnosti pro každou vnitřní stěnu sítě).

Množství látky, která vstupuje resp. vystupuje do resp. z daného prvku zdrojem resp. propadem nebo okrajovou stěnou sítě je součinem objemu roztoku a koncentrace dané látky

$$M_Q^{e,\ell}=Q\cdot\Delta t\cdot C^{e,\ell}.$$

Koncentrace $C^{e,\ell}$ v případě, když roztok vtéká do prvku, musí být zadáne formou okrajové podmínky. V případě, že roztok z prvku vystupuje, mění se koncentrace v čase a odpovídá okamžité koncentraci v daném prvku.

Pro každou sledovanou látku je na začátku časového kroku proveden bilanční výpočet

$$M_t^{e,\ell}=M_{t-1}^{e,\ell}+\sum_{i=1}^{5}M_i^{e,\ell}+M_Q^{e,\ell},$$

kde *e* je index prvku a *t* je index časového kroku. Nová koncentrace *l*-té látky je dána

$$C_l^{e,t} = \frac{M_l^{e,t}}{V^e}.$$

Jestliže je modelován pouze transport, jako je tomu v našem případě řešení transportní úlohy pro problém mezikolektorového přestupu, je výpočet na daném prvku ukončen. Po provedení výpočtů na každém prvku dané diskretizace je možné pokračovat s dalším časovým krokem. V případě použití transportně-reakčního modelu slouží vypočtené koncentrace jako vstup do modulu chemických reakcí.

Na obrázku č. 2.5/1 je nakresleno schéma transportně-reakčního modelu. Žlutá barva představuje kapalnou fázi (roztok), modrá barva představuje pevnou fázi (reagující minerály v hornině).

Koncentrace látek v roztoku jsou označeny *c* a indexem *a*, koncentrace látek v hornině jsou označeny *q* a indexem *b*, koncentrace sorbovaných látek značí *s* a index *c*. Index časového kroku *t* je použit pro vstupní koncentraci (koncentrace z minulého kroku) a *t+1* pro výslednou koncentraci na konci časového kroku, *e* značí index prvku a indexy *e'*, *e"* označují okolní prvky odkud přitéká roztok do prvku *e*.

V první části obrázku č. 2.5/1 je znázorněn transport, tj. přestup roztoku o daných koncentracích látek mezi jednotlivými prvky. Objem prvku a objem přestupujícího roztoku jsou graficky reprezentovány odpovídajícími oblastmi. Množství vstupujícího roztoku musí být ekvivalentní množství vystupujícího roztoku.

V dalším kroku je provedeno smíchání roztoku a výpočet nových koncentrací. Nové koncentrace jsou označeny *c'*. V případě modelování transportu jsou výsledné koncentrace konečné. Podmínky v hornině zůstávají beze změn až do této fáze výpočtu, v případě transportního modelu není nutné brát je v úvahu vůbec. V případě transportně-reakčního modelu následuje výpočet chemických reakcí. Nové koncentrace látek v roztoku a v hornině jsou pak výsledkem tohoto výpočetního kroku.

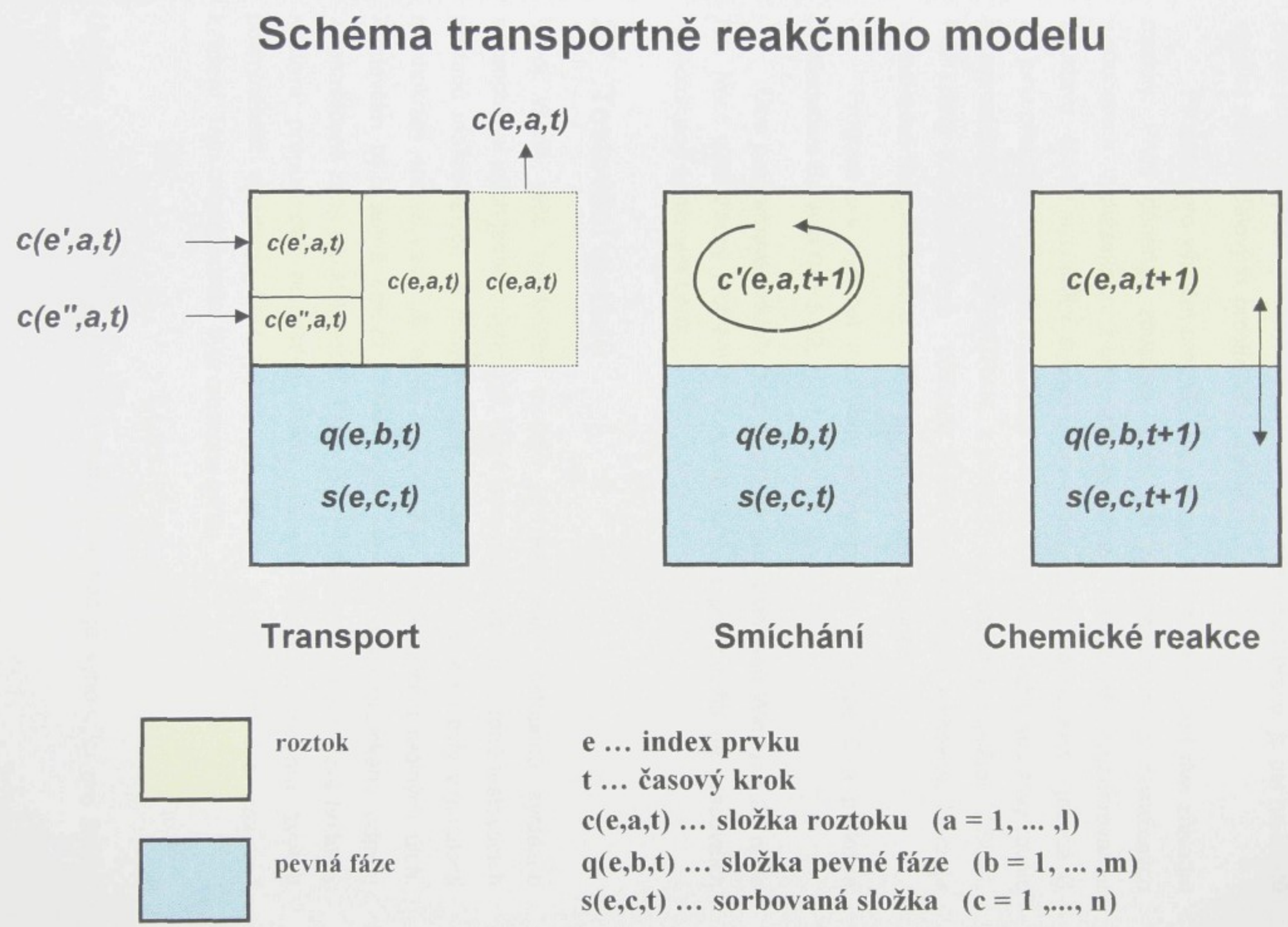


Schéma transportně reakčního modelu
c(e,a,t)
c(e',a,t)
c(e",a,t)
c(e',a,t)
c(e",a,t)
c(e,a,t)
c(e,a,t)
q(e,b,t)
s(e,c,t)
c'(e,a,t+1)
q(e,b,t)
s(e,c,t)
c(e,a,t+1)
q(e,b,t+1)
s(e,c,t+1)
Transport
Smíchání
Chemické reakce
roztok
pevná fáze
e … index prvku
t … časový krok
c(e,a,t) … složka roztoku (a = 1, ... ,l)
q(e,b,t) … složka pevné fáze (b = 1, ... ,m)
s(e,c,t) … sorbovaná složka (c = 1 ,..., n)

Obr. č. 2.5/1

2.6 Charakteristika programových modulů

Ačkoli podrobný popis použitých programů není cílem této práce, je asi na místě stručně se o modelových prostředcích zmínit.

Program pro výpočet proudění na základě MH–modelu tvoří dva základní moduly. První generuje soustavu rovnic na základě informací obsažených v souborech vycházejících z preprocesoru. Druhý modul řeší vygenerovanou soustavu. Modul vytvářející soustavu lineárních rovnic, je napsán v jazyce C a k jeho přeložení byl použit kompilátor Borland C++ 5.02. Řešič soustavy rovnic je vypracován v jazyce FORTRAN, k překladu byl použit kompilátor VISUAL FORTRAN 5.0. Výsledkem překladu řešiče je dynamická knihovna, která je v závěrečné fázi přilinkována do výsledného modulu proudění.

Program pro výpočet transportu je vypracován v jazyce C a přeložen překladačem Borland C++ 5.02.

Oba programové moduly jsou vytvořeny pro platformu Windows 95 nebo NT. Není však žádný problém tyto moduly upravit pro použití na pracovních stanicích pod systémem UNIX.

2.7 Testování modelů

Vývoj všech výše uvedených modelů je realizován postupnou syntézou a kompletací jejích jednotlivých částí, které jsou vždy podrobeny řadě testovacích příkladů realizovaných na malých sítích. Lineární části modelů byly v minulosti mnohokráte analyzovány při řešení nejrůznějších modelových i reálných úloh. Především bylo nutné omezit shora zadání relativního hydraulického odporu v nenasycené zóně pro MH-model. Tento úkol byl nezbytný, neboť nízké hodnoty relativní propustnosti respektive velké hodnoty relativního odporu zvyšují podmíněnost soustavy, čímž zvyšují její citlivost a prodlužují čas potřebný k řešení. Tato charakteristika byla omezena takto:

$$R_r(p) \leq 10^3 .$$

Uvedené hodnoty odpovídají vlkosti zhruba 10%, což je vyhovující pro řešení reálných situací.

Dále testovací práce směřovaly k podrobnému průzkumu při přechodu elementů z nenasyceného stavu do stavu nasyceného a naopak. Jak již bylo uvedeno výše, mohou při těchto přechodech nastat nežádoucí numerické oscilace, a proto bylo nutné vhodně nastavit koeficienty útlumu w_1, w_2.

3. Aplikace modelu na problematiku přestupu kontaminantů mezi cenomanským a turonským kolektorem v oblasti ložiska Stráž

3.1 Současný stav, cíle a postup řešení úlohy

Usnesením vlády ČR č. 170/96 byla chemická těžba uranu na ložisku Stráž převedena do likvidace. Již dříve bylo rozhodnuto o provedení sanace podzemních vod vyvedením kontaminantů na povrch, jejich přepracování na hospodářsky využitelné produkty a bezpečné uložení nevyužitelného zbytku. Důvodem pro toto rozhodnutí bylo vysoce hodnocené riziko přestupu kontaminace ze spodního cenomanského kolektoru do svrchního turonského v důsledku strukturně-tektonické stavby a velkého množství průzkumných a těžebních vrtů ve svém důsledku způsobujících oslabení izolační schopnosti spodnoturonského souvrství.

Přestup kontaminace hrozí ve větší míře až v době, kdy budou ukončeny veškeré sanační aktivity v oblasti. Pak vystoupá cenomanská piezometrická hladina na svoji původní úroveň (před započetím těžební činnosti), která je v západní části ložiska vyšší než turonská. Schematicky je to znázorněno na obrázku č. 3.1/1. Tato druhotná kontaminace by mohla být podstatně vyšší než současné znečištění turonu. Ohroženy by pak byly nejen zásoby pitných vod, ale také řeka Ploučnice.

Přestože se počítá s maximální spolehlivostí tamponáže všech vrtů, nelze riziko kontaminace podél vrtů podceňovat, protože některé (zejména staré průzkumné) vrty nemusí být vůbec nalezeny a likvidace vrtů nemusí být ve všech případech 100% úspěšná. Rozhodně však lze vyloučit riziko snadno identifikovatelných větších soustředěných přetoků, spíše se bude jednat o plošné zvýšení propustnosti poloizolátoru.

Ještě větším nebezpečím je riziko přírodních cest pro mezikolektorovou komunikaci podzemních vod v ploše strážského bloku i za jeho hranicemi (zlomová pásma, sopečné sopouchy, přímé kontakty stratigraficky odlišných

kolektorů v důsledku blokové stavby svrchnokřídových sedimentů v potenciálně ohrožené oblasti). Podrobný geologický a hydrogeologický průzkum v jihozápadním předpolí ložiska definoval některá riziková místa, nelze však vyloučit jejich existenci i v blízkosti kontaminované oblasti.

Uváděné řešení problematiky mezikolektorového přestupu kontaminantů však má některé nedostatky. Prvním z nich je skutečnost, že nebylo možno provést kalibraci přetokových parametrů podle ustálené hladiny při dlouhodobém ustáleném režimu odparky. Provedená kalibrace podle situace v prvním pololetí 1996 je méně spolehlivá, protože mezi turonskou a cenomanskou hladinou na vyluhovacích polích jsou jen malé rozdíly.

Druhým nedostatkem je provedení výpočtů pouze na transportním modelu bez uvažování chemických změn roztoků při jejich přestupu do turonu a migraci kontaminantů směrem k Mimoni.

Problematika modelování mezikolektorového přetoku cenoman – turon doposud nebyla řešena v tak komplexní podobě jako je tomu nyní. Na základě analýzy celého problému byl vypracován poměrně komplikovaný postup řešení, jehož osnova je uvedena na následujících řádcích:

- tvorba přetokového modelu a jeho naplnění daty,
- kalibrační výpočty na regionálním modelu,
- výpočty přestupu látek dle modelových scénářů,
- analýza výsledků.

Úloha simulace přetoku je svým charakterem natolik specifická, že bylo nutno zvolit zvláštní přístup k jejímu řešení. Jedná se v podstatě o řešení dvou odlišných úloh s použitím dvou rozdílných modelů. Pro vlastní řešení mezikolektorového přetoku z cenomanu do turonu byl sestaven model lokálního charakteru zahrnující vertikálně oba kolektory, v ploše obsahující z modelového hlediska významné lokality jako místa možného přetoku kontaminantů – tj. vyluhovací pole a jejich okolí, či místa potencionálního ohrožení druhotnou kontaminací – vrt MI-6 (zdroj pitné vody pro Mimoň), řeka Ploučnice.

Pro následnou snadnější orientaci v dalším textu je přiložen obrázek č. 3.1/2, který uvádí litostratigrafický řez zájmovou oblastí. Na něm je patrná schematizovaná geologická stavba území ložiska Stráž.

Od počátku řešení úlohy bylo zřejmé, že klíčovým problémem je správné nastavení filtračních koeficientů spodnoturonského poloizolátoru. To lze učinit pouze kalibrací za pomoci regionálního modelu, který zahrnuje podstatně větší oblast než model přetokový, a tak je možné eliminovat výskyt lokálních chyb, které by měly silný vliv na výsledky získané přetokovým modelem.

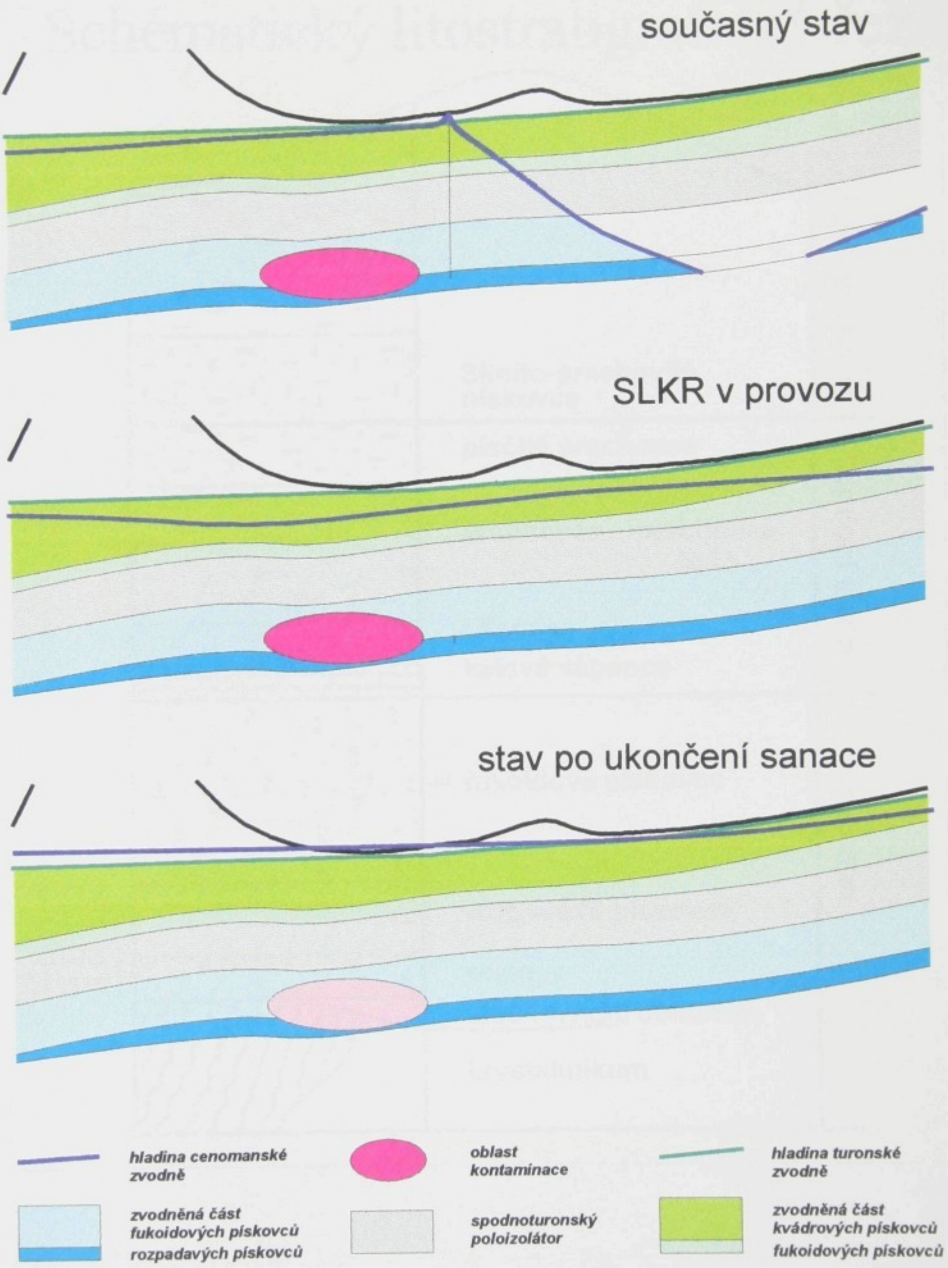
Pro kalibrační výpočty byl tedy použit *regionální* hydrogeologický model. Hodnoty filtračních koeficientů, získané řešením sady kalibračních výpočtů, byly po patřičných úpravách přeneseny do přetokového modelu a vlastní variantní výpočty přetoku kontaminantů z cenomanu do turonu byly již počítány na tomto modelu.

Jak již bylo řečeno, nejsou charakteristiky spodnoturonského poloizolátoru, získané při malém rozdílu hladin, jednoznačné. Zůstává zde jistý interval, v němž se mohou pohybovat. V úvahu je též třeba vzít snížení propustnosti po zatamponování všech vrtů, což lze provést pouze spekulativně. Ani úroveň ustáleného piezometrického povrchu v cenomanu po ukončení sanace nelze určit s dostatečnou spolehlivostí.

Různými kombinacemi možných hodnot filtračních koeficientů a výšky hladiny je možné získat velké množství variant. Po počátečních orientačních propočtech byly formulovány dva hlavní scénáře – optimistický a pesimistický. První z nich obsahuje nejpříznivější kombinaci všech parametrů, při nichž je přetok *minimální*, druhý naopak kombinaci nejméně *příznivou*. Tyto hlavní scénáře jsou doplněny dvěma vedlejšími.

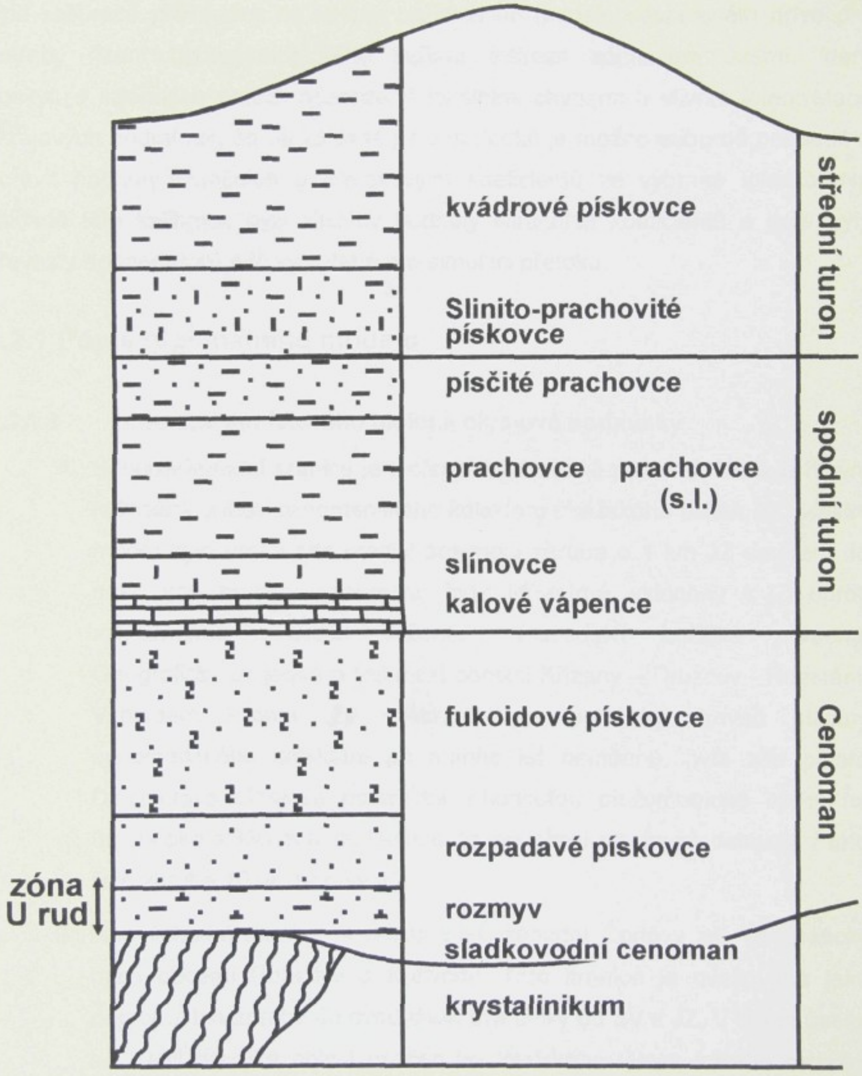
Interpretace výsledků je zaměřena hlavně na posouzení rizik a na diskusi z nich vyplývajících cílových parametrů sanace.

Vývoj hladin zvodní v oblasti



Obr. č. 3.1/1

Schématický litostratigrafický řez



Obr. č. 3.1/2

3.2 Kalibrace regionálního modelu

K tomu abychom mohlí správně nakalíbrovat vlastní model přetoku kontaminantů z cenomanu do turonu, je nejprve nutné správně určit hodnoty filtračních koeficientů ve vertikálním směru spodnoturonského poloizolátoru. Z toho důvodu byla kalibrace prováděna na větším regionálním modelu sestaveném dříve pro potřeby řízení hydrogeologického režimu v širším zájmovém území, který poskytuje informace natolik nezatížené lokálními chybami a vlivem interpretace okrajových podmínek, že na základě jeho výsledků je možno odborně posoudit a upravit hodnoty filtračních a přetokových koeficientů ve vybrané lokalitě. Na základě této kalibrace byly zjištěny hodnoty filtračních koeficientů a poté byly převzaty do modelové sítě vytvořené pro simulaci přetoku.

3.2.1 Popis regionálního modelu

3.2.1.1 Hranice modelového bloku a okrajové podmínky

A. Severovýchodní hranice je tvořena linií Lužické poruchy, která je hlavní infiltrační oblastí cenomanského kolektoru strážského bloku. Pro vlastní model bylo nutno tuto hranici posunout zhruba o 1 km JZ směrem do míst, kde horniny cenomanu jsou již mírně ukloněny k JZ oproti vztyčenému souvrství v těsném sousedství Lužické poruchy. Geograficky se jedná o linii mezi obcemi Křížany – Druzcov - Rozstání. Vzhledem k tomu, že v této linii je prakticky úroveň hladiny cenomanského kolektoru po mnoho let neměnná, byla zde přijata Dirichletova okrajová podmínka s hodnotou piezometrické výšky na úrovni okolo 330 m n. m. Dotace do modelové plochy představuje z této linie zhruba 10 m^3 za minutu.

B. Jihovýchodní hranice je přijata v linii západní Čertovy zdi, geograficky mezi obcemi Rozstání a Kuřivody. Tato hranice je uvažována jako nepropustná zhruba do dvou třetin své délky od SV k JZ. V tomto úseku se k linii přimyká oblast osečensko-kotelského tělesa ložního bazaltu, tvořícího polopropustnou „*nádobu*“, plněnou úzkým hrdlem od severu. Zbývající jihozápadní jedna třetina této hranice je v oblasti minimálních

výkyvů piezometrické výšky v cenomanském kolektoru. Proto byla přijata do modelu Dirichletova okrajová podmínka (konstantní výška) na úrovni zhruba 275 m n. m.

C. Jihozápadní hranice na geografické linii Kuřivody – Boreček – Zákupy je ve své severozápadní části ukončena na Strážském zlomu. Pro matematický model zde byla opět přijata Dirichletova okrajová podmínka na úrovni okolo 280 m n. m. V této linii je piezometrická úroveň cenomanského kolektoru přibližně shodná s úrovní volné hladiny turonského kolektoru.

D. Severozápadní hranice je v celé své délce totožná s linií Strážského zlomu. Tuto hranici na základě hydrogeologických zkušeností dělíme na:

- úsek od Mimoně po průsečík s hydraulickou bariérou Stráž (zhruba 1 km západně od města Stráž pod Ralskem), který je v modelu uvažován jako nepropustný,
- úsek od hydraulické bariéry po důl Křížany, ve kterém nejlépe vyhovuje Newtonova okrajová podmínka s piezometrickou výškou na úrovni 322 až 330 m n.m. se zadanou hodnotou přetokového koeficientu (σ),
- úsek od dolu Křížany po Lužickou poruchu, kde je zvolena Dirichletova okrajová podmínka podle současné úrovně piezometrické hladiny cenomanského kolektoru.

E. Spodní hranicí je relativně nepropustné podloží mořských sedimentů cenomanu. Tato plošná hranice je poměrně členitá v závislosti na paleoreliéfu, avšak v generelu je její úklon zhruba 1^0 JZ směrem.

F. Svrchní hranice je plocha stropu fukoidových pískovců mořského cenomanu (báze souvrství spodního turonu) se stejným charakterem generálního spádu jako spodní hranice, avšak s absolutní úrovní o 60 m výše. Pro matematický model zde byla přijata Newtonova okrajová podmínka s piezometrickou výškou na úrovni shodné s úrovní hladiny sousední zvodně se zadanou hodnotou přetokového koeficientu (σ).

3.2.1.2 Modelová síť regionálního modelu

Síť konečných prvků regionálního modelu pokrývá zájmovou oblast určenou výše svými hranicemi. Na obrázku č. 3.2/1 je vyznačena lokalizace regionálního i přetokového modelu v oblasti strážského bloku. Celková plocha regionální modelové sítě činí 430 km^2. Síť je tvořena 1492 uzly a 2732 plošnými prvky. Vertikálně je síť rozdělena do dvou vrstev. První zastupuje souvrství rozpadavých pískovců, druhá souvrství fukoidových pískovců.

Původní síť regionálního modelu nebyla pro uvedený účel příliš vhodná. Obsahovala totiž ještě nepropustnou hranici uvnitř oblasti na žíle vulkanitu, táhnoucí se od hydraulické bariéry přes dolové pole Hamr. V důsledku toho vycházely extrémní rozdíly měřené a vypočtené hladiny východně od hydraulické bariéry (tzn. těsně za hranicí přetokového modelu). Tato vnitřní hranice byla zrušena a žíla je reprezentována protáhlými trojúhelníkovými prvky tak, jak je běžné v transportních modelech s.p. DIAMO.

Ani po provedené úpravě není síť regionálního modelu ideální pro kalibraci přetokových parametrů. Nevýhodná je zejména velká nerovnoměrnost hustoty sítě, která je v prostoru hydraulické bariéry a směrem k drenážním překopům dolu Hamr mnohonásobně vyšší než v jiných oblastech včetně vyluhovacích polí. Ještě závažnějším nedostatkem je absence žil neovulkanitů (kromě výše zmíněné úpravy), které v hrubé regionální síti nemohli být zohledněny.

Hodnoty filtračních a přetokových koeficientů byly do regionálního modelu převzaty z původního modelu pro řízení hydrogeologického režimu v oblasti strážského bloku jako počáteční nastavení pro následující kalibraci.

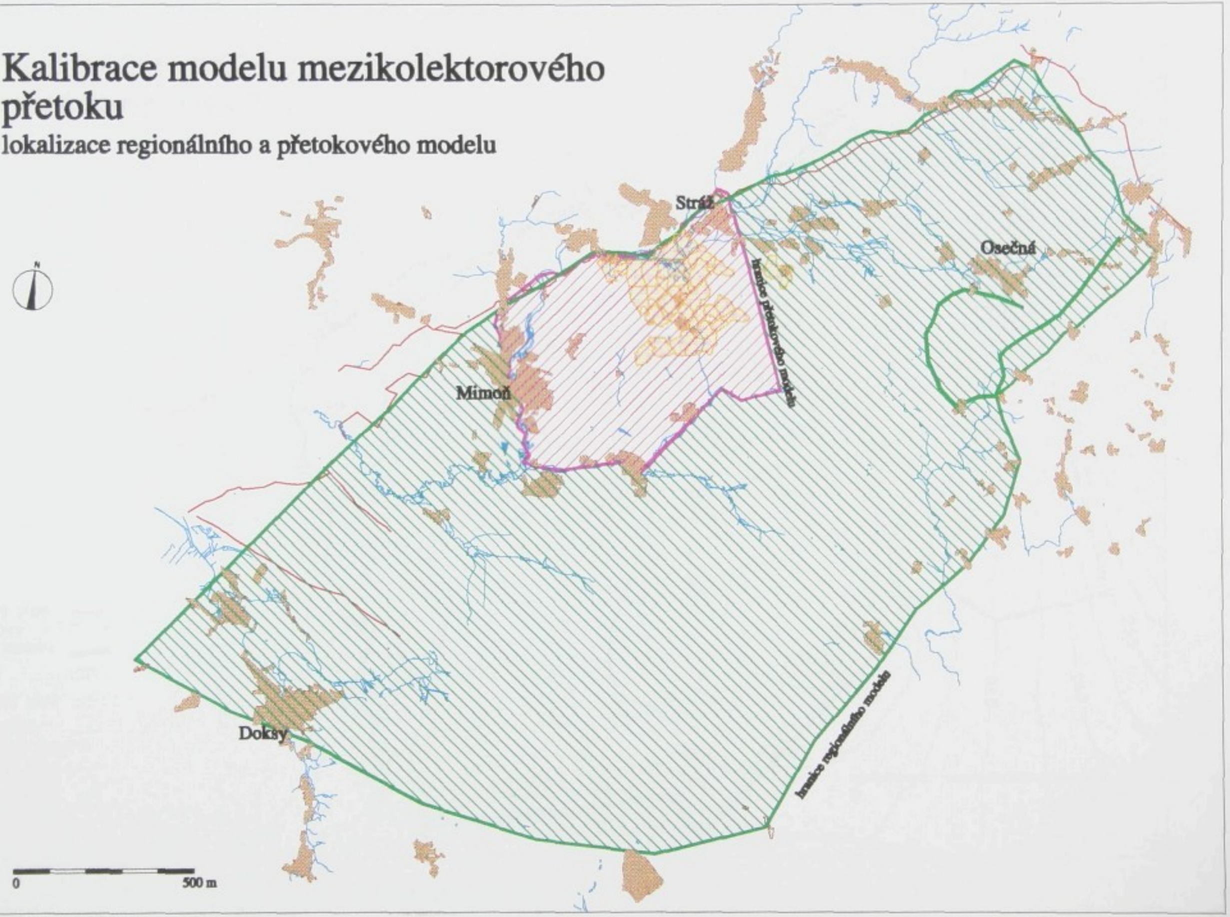
3.2.2 Vlastní kalibrace regionálního modelu

Abychom mohli správně nastavit filtrační koeficienty lokálního přetokového modelu zahrnujícího obě zvodně včetně oddělující vrstvy - spodnoturonského poloizolátoru, bylo nejprve nutné regionální model poměrně pracně kalibrovat.

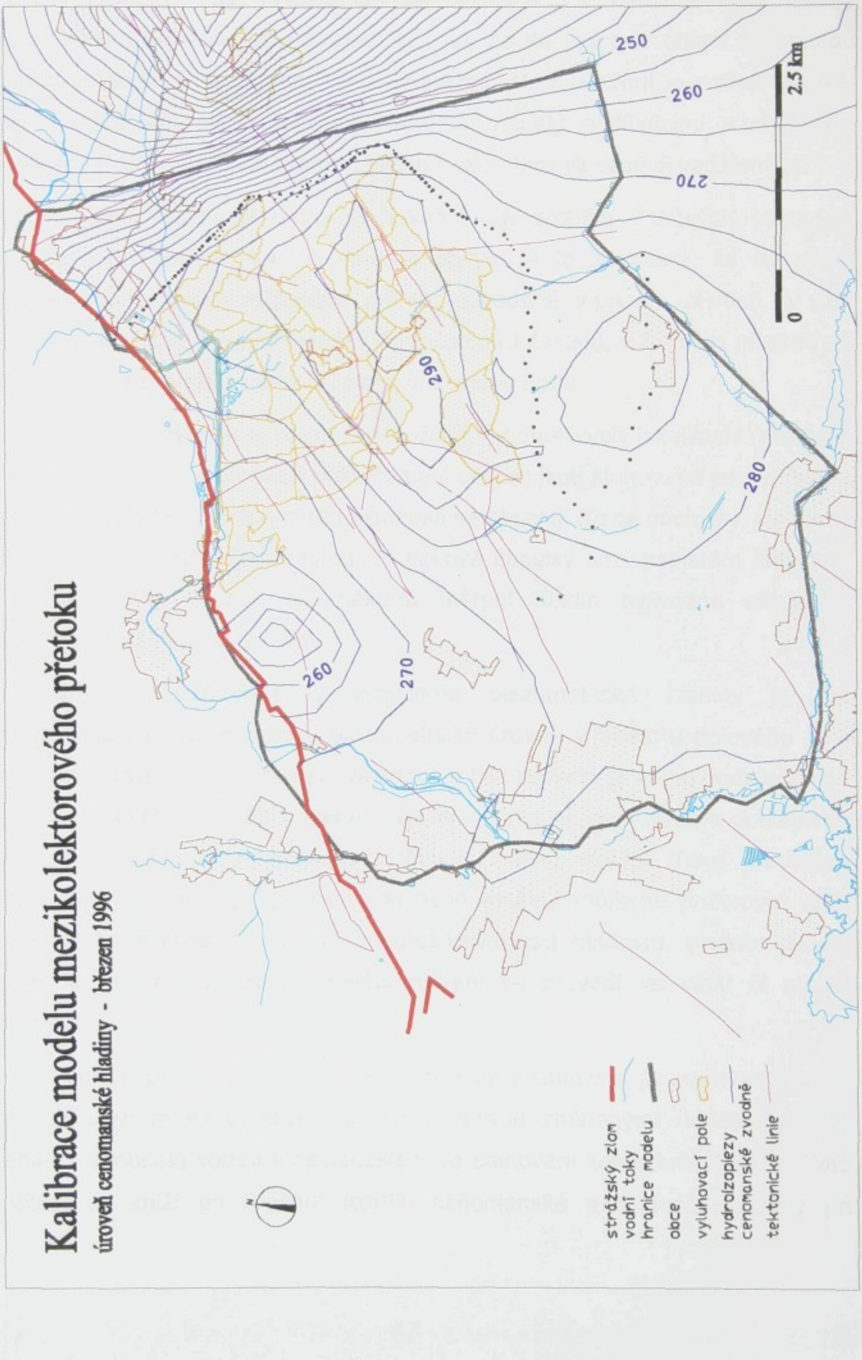
Kalibrace byla prováděna na hodnoty piezometrických výšek v cenomanském kolektoru vyhodnocené ke konci března 1996 (viz obr. 3.2/2), neboť k tomuto datu jsou k dispozici výsledky měření prováděných v rámci regionálního pozorování – tj. pokrývající celé zájmové území. Úroveň

Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku

lokalizace regionálního a přetokového modelu



Obr. č. 3.2/1


Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
úroveň cenomanské hladiny - březen 1996
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
hydroizopiezy cenomanské zvodně
tektonické linie
250
260
270
280
290
260
270
0
2.5 km

Obr. č. 3.2/2

piezometrické hladiny však ještě není v ploše polí chemické těžby ovlivněna činností odparky, pro níž se od poloviny roku z polí CHT čerpá značný objem vod s častými výpadky. Tato čerpací činnost ovlivňuje tvar piezometrické hladiny cenomanského kolektoru a vzhledem k tomu, že se jedná o oblast s napjatou hladinou, je odezva na čerpání téměř okamžitá, ale k ustálení je potřebná delší doba. Taková situace je těžko postižitelná modely počítajícími s ustáleným prouděním. Proto byla kalibrace prováděna s daty dnes již časově vzdálenými.

K měření hladin je nutno podotknout, že probíhá v určitých časových intervalech. Pro region jsou to intervaly čtvrtletí a to znamená, že do stavu z března jsou zahrnuta regionální měření povedená v prvním čtvrtletí. V užší zájmové oblasti jsou měření častější (1× měsíčně i častěji), v žádném případě se však nejedná o okamžitý stav k určitému časovému bodu.

Podobně vtláčená a čerpaná množství v jednotlivých lokalitách (překopy, dolové pole, bariéry, vyluhovací pole, čerpací centra) jsou stanovena jako průměry za čtvrtletí, protože v jejich okamžité činnosti se objevují různé odchylky, vyvolané konkrétní situací. Vzhledem k tomu, že tlakové impulsy se v napjatém kolektoru šíří velmi rychle, mohou být některá měření hladin ovlivněna aktuálním hydraulickým režimem ve zvodni.

Porovnání naměřené a vypočtené piezometrické hladiny je též komplikováno tím, že stanovení piezometrické úrovně v prostoru dolového pole Hamr se neprovádí pomocí měření ve vrtech a tyto hodnoty je nutno dodatečně po úpravách dodávat do souboru měření. To se v minulosti neprovádělo dostatečně důsledně, protože to z provozních důvodů nebylo nutné. Také v místech soustředěného čerpání (čerpací centra) nebo vtláčení můžeme pozorovat větší rozdíly mezi měřenou a vypočtenou piezometrickou hladinou, protože model reaguje na přítomnost zdroje, kdežto měření se provádí ve větší či menší vzdálenosti, kde je vliv zdroje již oslaben.

Uvedené problémy neobyčejně komplikují kalibraci a je nutno je mít na zřeteli při interpretaci výsledků. Společně s výše zmíněnými nedostatky sítě regionálního modelu vedou k neurčitostem ve stanovení koeficientů filtrace. Tato neurčitost se sníží po zvýšení rozdílu cenomanské a turonské hladiny při

ustáleném provozu odparky. Nicméně lze již současnou kalibraci prohlásit za dostatečně věrohodné první přiblížení k realitě.

Nejprve byla provedena základní kalibrace horizontálních koeficientů filtrace regionálního modelu. Týkala se hlavně oblasti mezi hydraulickou bariérou a dolovým polem, kde se nejvíce projevila změna modelové sítě. Ostatní úpravy byly motivovány snahou o vyjádření funkce tektoniky a neovulkanitů v hrubé modelové síti. Tato snaha ovšem nemohla být plně úspěšná.

Hlavním cílem kalibrace bylo stanovení intervalu reálných hodnot vertikálního koeficientu filtrace souvrství spodního turonu. K tomu nebylo možno použít výsledků ojediněle prováděných laboratorních měření. Spodnoturonské horniny je totiž možno považovat za nepropustné pro konvektivní i difuzní transport z hlediska zájmového časového horizontu tisíců let. Nedostatečná izolační schopnost tohoto souvrství je podmíněna jeho tektonickým i antropogenním narušením. Efektivní přetokové parametry lze v takovém případě zjistit pouze řešením inverzní úlohy.

Hodnoty přetokového koeficientu, jenž figuruje v regionálním modelu, můžeme dle definičního výrazu k/B, kde k vyjadřuje koeficient filtrace a B mocnost zvodně, snadno přepočítat na hodnoty vertikálního koeficientu filtrace zadávaného do přetokového modelu. Proto budeme v dalším textu uvádět pouze hodnoty filtračního koeficientu.

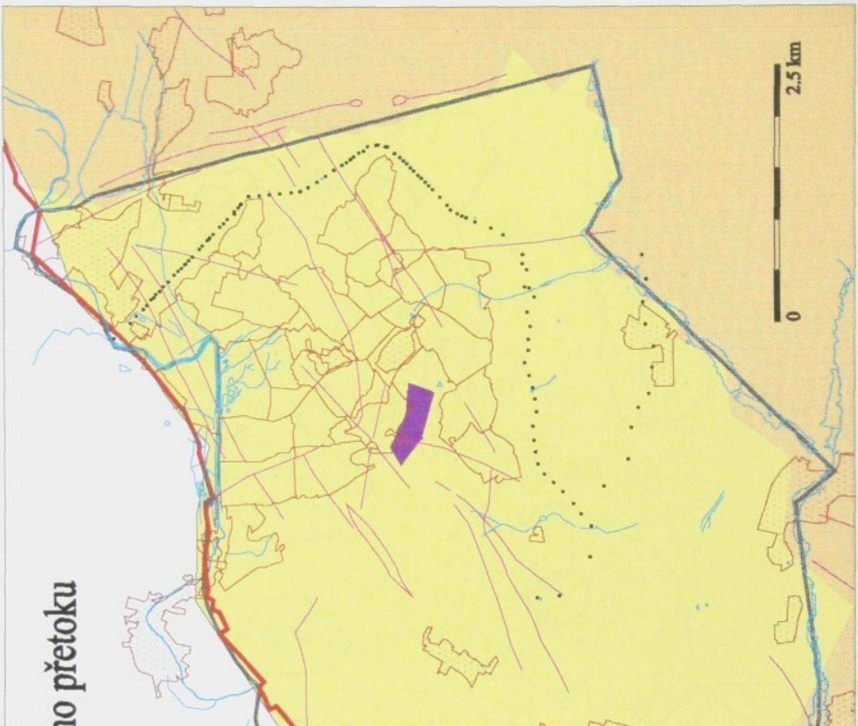
Kalibrace přetoku v regionálním modelu byla prováděna v několika krocích, z nichž popsány a graficky dokumentovány jsou pouze čtyři nejvýznamnější. V prvním základním kroku, tzv. variantě A, byly použity hodnoty filtračních koeficientů převzaté z původního modelu pro řízení hydrogeologického režimu v zájmovém území strážského bloku. Vertikální koeficienty filtrace spodnoturonského poloizolátoru byly v zájmové oblasti nastaveny plošně konstantní s hodnotou 0,0001 m/den. Vyjímkou je pouze oblast přetoku v ploše polí chemické těžby mezi VP-15 a VP-20, kde byla zadána hodnota 0,05 m/den. Tato situace je znázorněna na obrázku č. 3.2/3. Výsledky kalibračního výpočtu napovídají, že hodnota koeficientu 0,0001 m/den byla podceněna v oblasti polí chemické těžby. To ukazuje obrázek č. 3.2/4, který zachycuje izolinie rozdílu vypočtené a měřené cenomanské hladiny. Odtud je patrné, že největší rozdíl je

dosažen právě v oblasti polí chemické těžby, kde je vypočtená piezometrická hladina silně pod úrovní hladiny měřené.

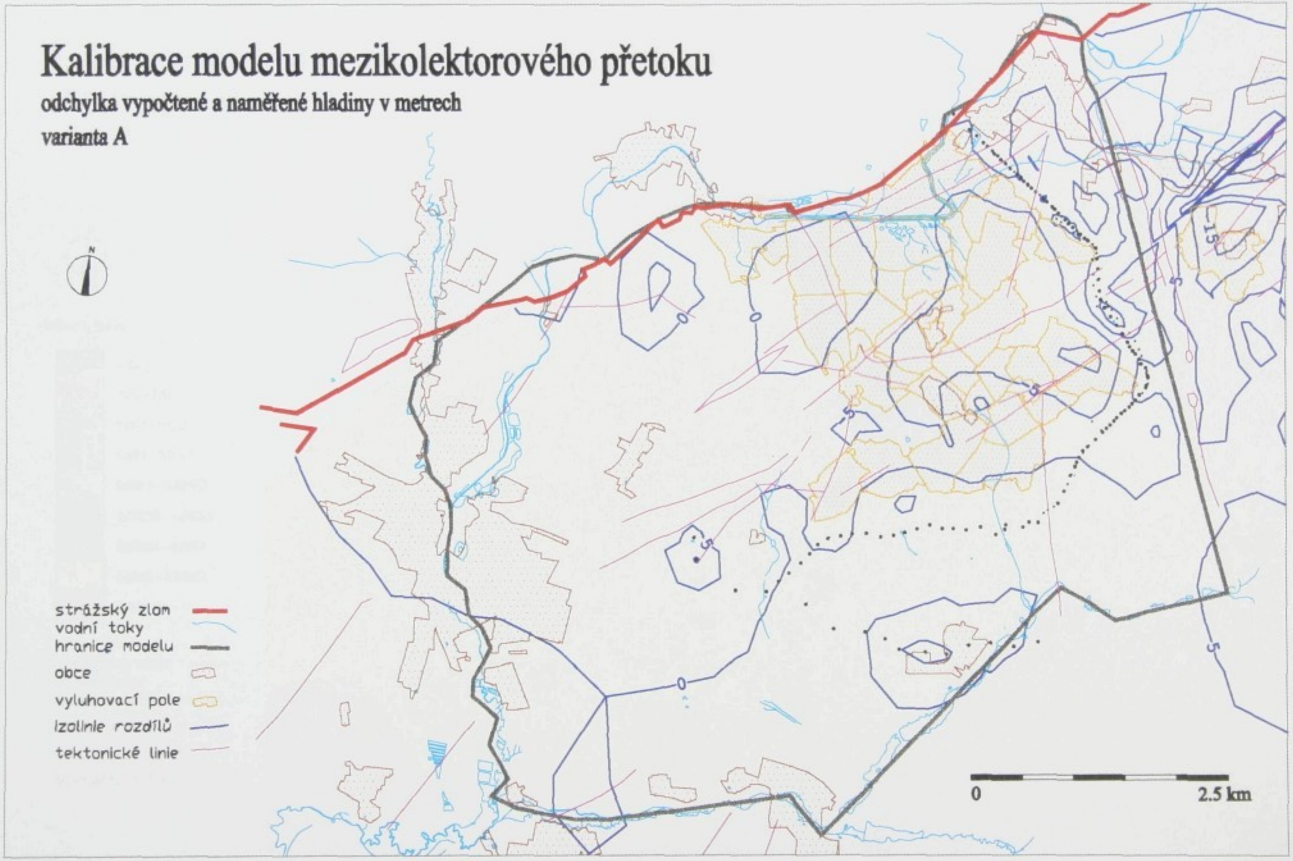
Následující kalibrační krok, varianta B, zohledňuje poznatky získané řešením varianty A. Jeho cílem bylo ohraničit propustnost poloizolátoru shora. Vertikální filtrační koeficienty byly v ploše polí chemické těžby zvýšeny, a to následujícím způsobem. V oblasti plochy polí s vrty staré konstrukce byla nastavena hodnota koeficientu 0,01 m/den, v ploše polí s liftovou těžbou a vyšší hustotou vrtné sítě byla zadána hodnota 0,005 m/den. Na nejnovějších vyluhovacích polích s čerpadlovou těžbou a nízkou hustotou vrtné sítě byla zvolena hodnota 0,001 m/den. Hodnota koeficientu v místě přetoku mezi VP-15 a VP-20 byla zachována. Tuto situaci dokumentuje obrázek č. 3.2/5. Výsledky tohoto kalibračního kroku jsou ve formě rozdílové mapy hladin zobrazeny na obrázku č. 3.2/6. Je zřejmé, že uvedená změna hodnot filtračních koeficientů způsobí přílišné zvýšení úrovně piezometrické vypočtené hladiny oproti hladině měřené. Lze tedy říci, že reálné hodnoty koeficientu filtrace se budou pohybovat v rozmezí hodnot použitých v prvním a ve druhém kalibračním kroku.

Následná varianta C reaguje na výsledky obou předchozích variant. Obrázek č. 3.2/7 ukazuje nové plošné rozložení vertikálních filtračních koeficientů. V oblasti plochy polí s vrty staré konstrukce byla nasazena hodnota koeficientu 0,0004 m/den, v ploše polí s liftovou těžbou a vyšší hustotou vrtné sítě byla zadána hodnota 0,00027 m/den. Na nejnovějších vyluhovacích polích s čerpadlovou těžbou a nízkou hustotou vrtné sítě byla zvolena hodnota koeficientu 0,00013 m/den. Hodnota koeficientu v místě přetoku mezi VP-15 a VP-20 byla snížena na 0,04 m/den. Z rozdílové mapy na obrázku č. 3.2/8 je patrné, že na většině zájmové oblasti je úroveň vypočtené piezometrické hladiny nižší proti úrovni hladiny měřené. Jedná se hlavně o východní část komplexu VP i o plochu mezi VP-15 a VP-20.

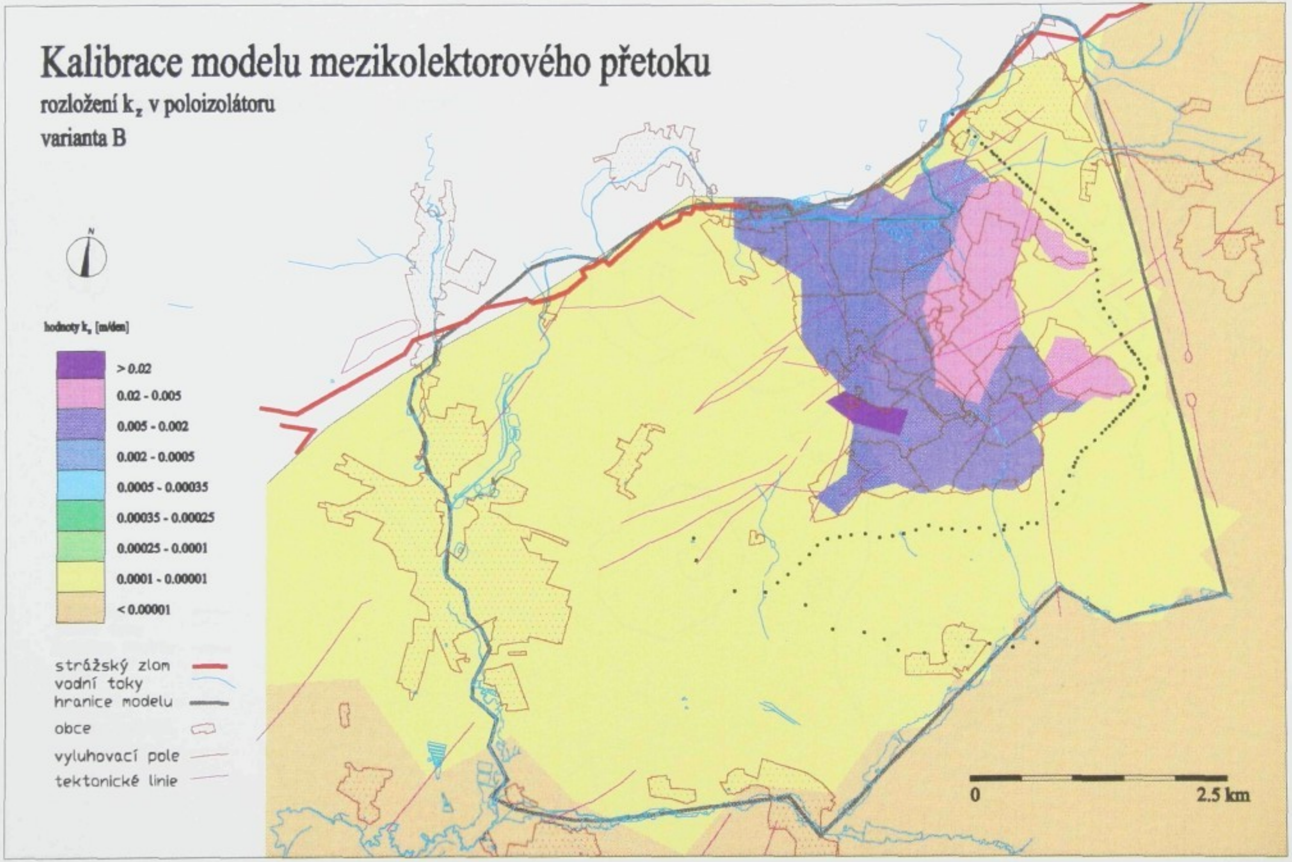
Poslední popisovaný kalibrační krok, varianta D, byl zaměřen na přesnější stanovení hodnot vertikálních filtračních koeficientů spodnoturonského poloizolátoru včetně stanovení horního limitu, vymezujícího s jistou pravděpodobností interval, ve kterém se mohou pohybovat reálné hodnoty těchto koeficientů. V oblasti plochy polí s vrty staré konstrukce byla nastavena hodnota 0,0006 m/den, v ploše polí s liftovou těžbou a vyšší hustotou vrtné sítě byla


Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
rozložení k_z v poloizolátoru
varianta A
N
hodnoty k_z [m/den]
> 0.02
0.02 - 0.005
0.005 - 0.002
0.002 - 0.0005
0.0005 - 0.00035
0.00035 - 0.00025
0.00025 - 0.0001
0.0001 - 0.00001
< 0.00001
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
tektonické linie
0
2.5 km

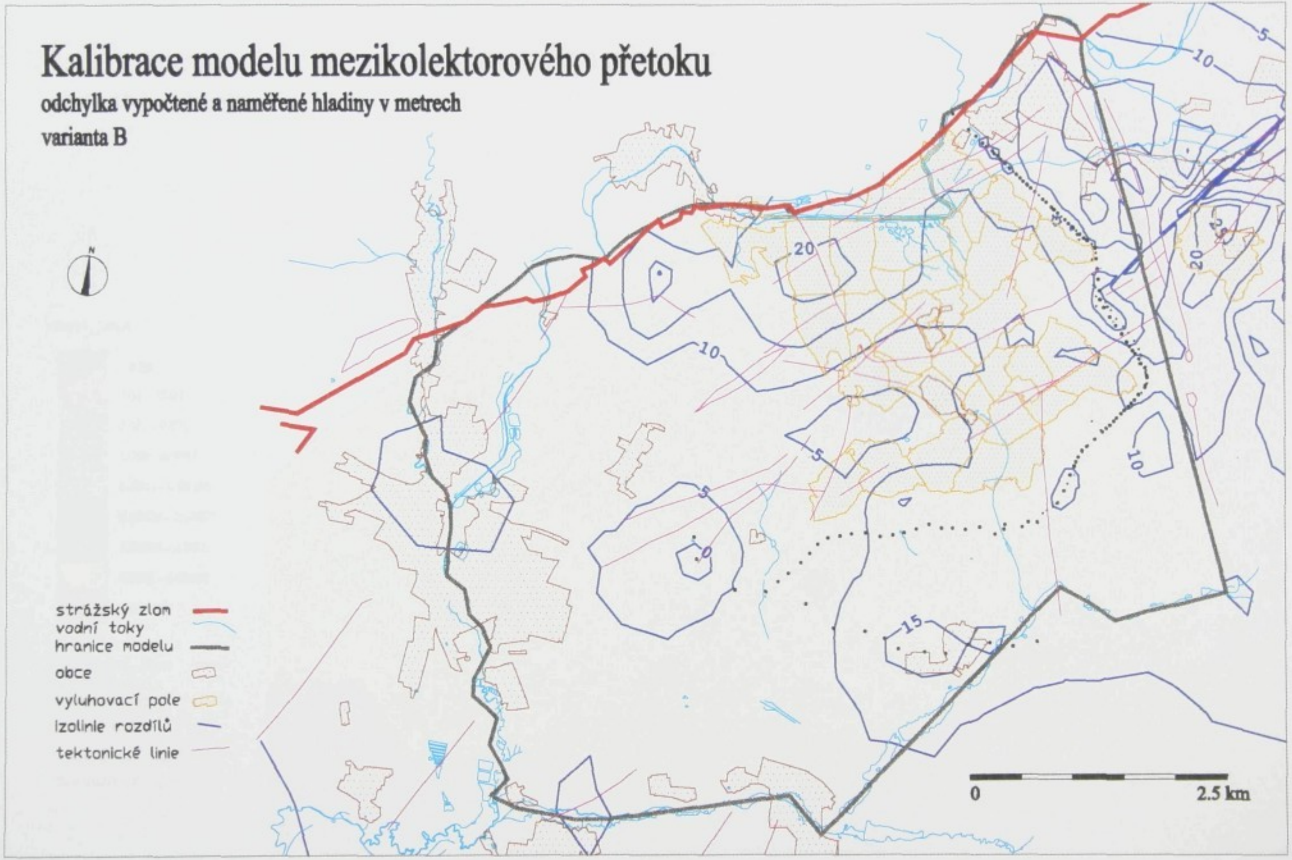
Obr. č. 3.2/3


Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech
varianta A
N
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
izolinie rozdílů
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.2/4

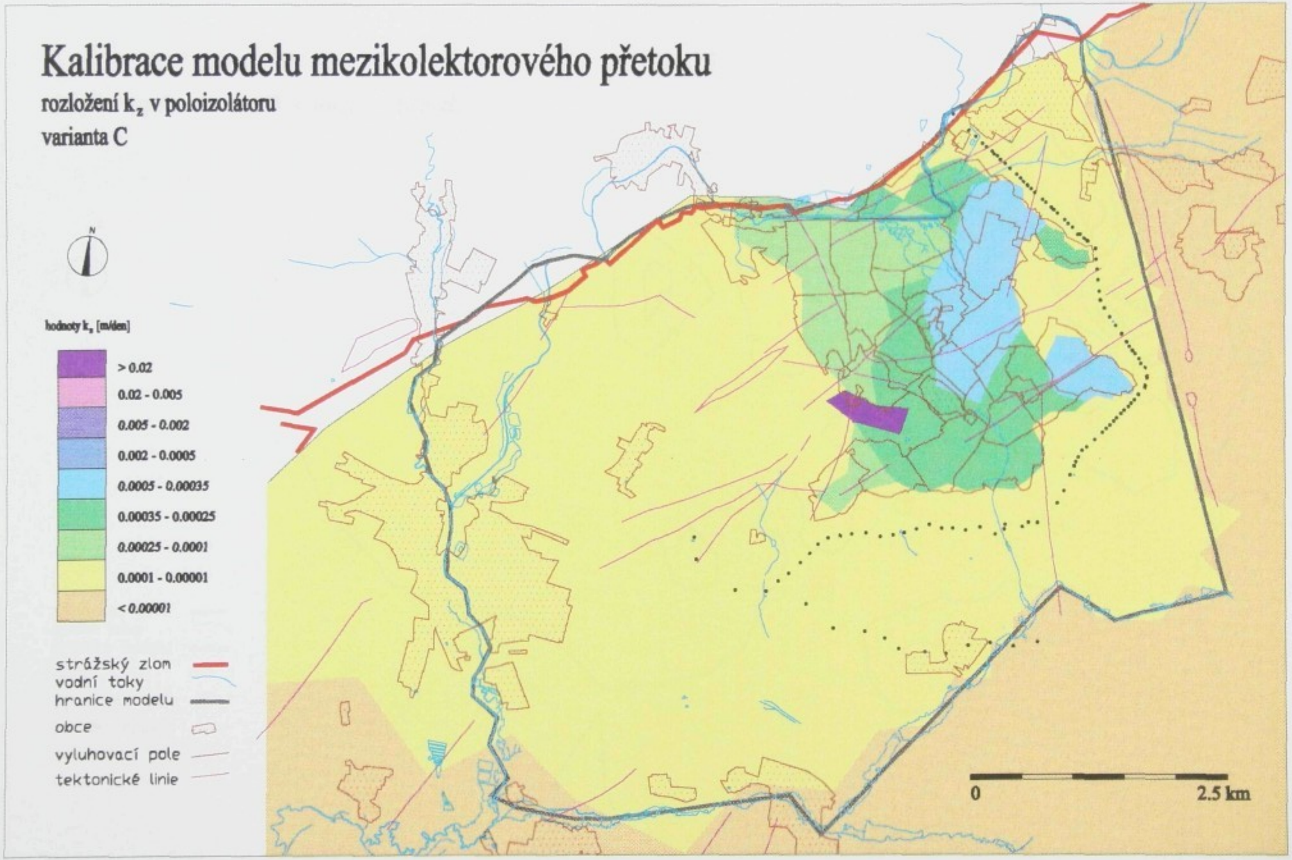

Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
rozložení k_z v poloizolátoru
varianta B
N
hodnoty k_z [m/den]
> 0.02
0.02 - 0.005
0.005 - 0.002
0.002 - 0.0005
0.0005 - 0.00035
0.00035 - 0.00025
0.00025 - 0.0001
0.0001 - 0.00001
< 0.00001
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.2/5

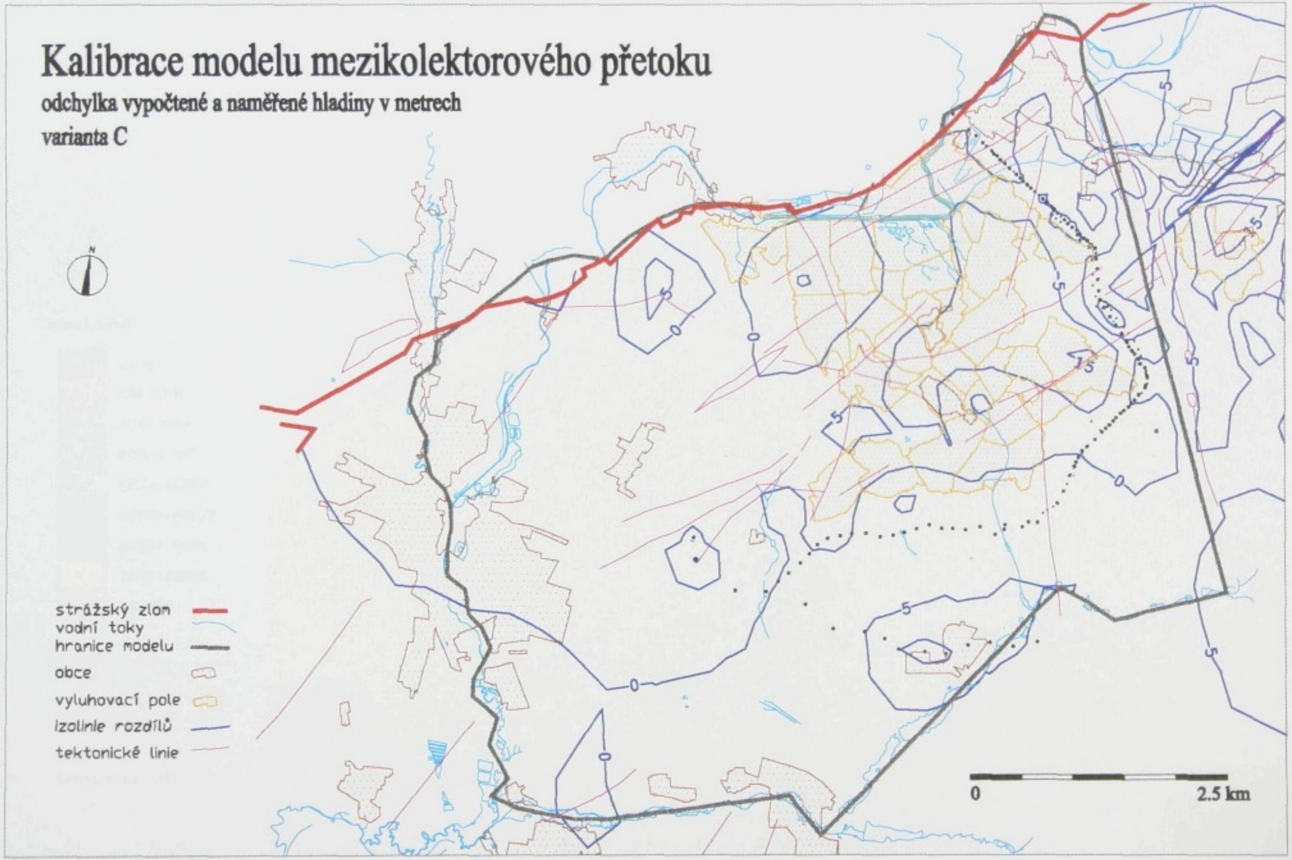


Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech
varianta B
N
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
izolinie rozdílů
tektonické linie
0
2.5 km
5
10
15
20
25
0

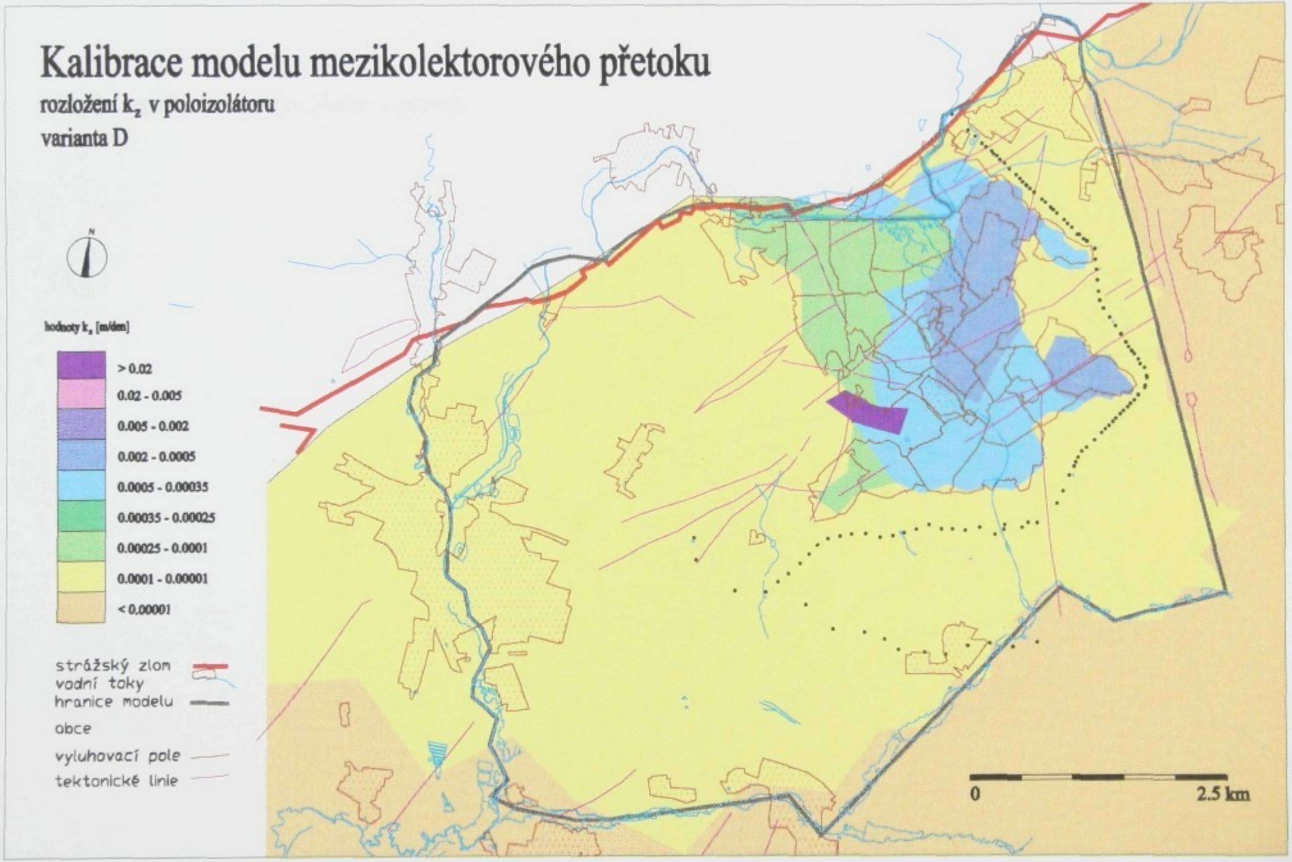
Obr. č. 3.2/6


Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
rozložení k_z v poloizolátoru
varianta C
N
hodnoty k_z [m/den]
> 0.02
0.02 - 0.005
0.005 - 0.002
0.002 - 0.0005
0.0005 - 0.00035
0.00035 - 0.00025
0.00025 - 0.0001
0.0001 - 0.00001
< 0.00001
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
tektonické linie
0
2.5 km

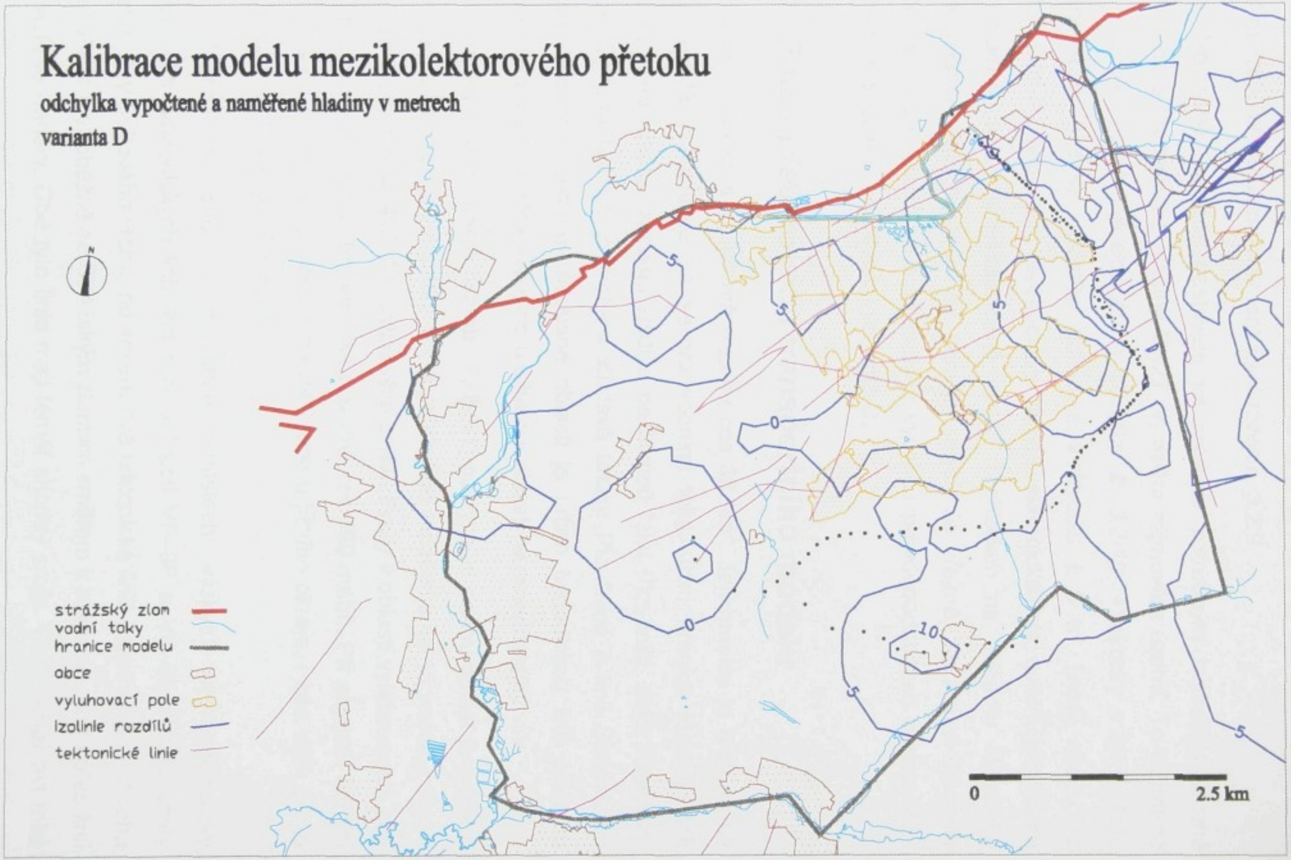
Obr. č. 3.2/7


Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech
varianta C
N
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
izolinie rozdílů
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.2/8


Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
rozložení k_z v poloizolátoru
varianta D
N
hodnoty k_z [m/den]
> 0.02
0.02 - 0.005
0.005 - 0.002
0.002 - 0.0005
0.0005 - 0.00035
0.00035 - 0.00025
0.00025 - 0.0001
0.0001 - 0.00001
< 0.00001
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.2/9



Kalibrace modelu mezikolektorového přetoku
odchylka vypočtené a naměřené hladiny v metrech
varianta D
N
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
izolinie rozdílů
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.2/10

zadána hodnota 0,0004 m/den. Na nejnovějších vyluhovacích polích s čerpadlovou těžbou a nízkou hustotou vrtné sítě byla zvolena hodnota 0,0002 m/den. Hodnota koeficientu v místě přetoku mezi VP-15 a VP-20 byla zvýšena na 0,08 m/den. Tuto situaci dokumentuje obrázek č. 3.2/9.

Posledně uvedené nastavení se projevilo potřebným zvýšením úrovně vypočtené piezometrické hladiny téměř na celém zájmovém území. To je patrné na rozdílové mapě vykreslené na obrázku č. 3.2/10. Prakticky v celé ploše vyluhovacích polí se odchylka pohybuje v rozmezí ± 5 m. Lepší shodu na regionálním modelu, který nerespektuje vedlejší tektonické linie, ovlivňující lokálně tvar hladiny, nelze pravděpodobně docílit. S ohledem na nejistoty obsažené v kalibračních datech by to ani nemělo smysl. Je zřejmé, že reálné hodnoty přetokových parametrů se s dostatečně vysokou pravděpodobností budou blížit hodnotám použitým v kalibrační variantě D.

3.3 Popis přetokového transportního modelu

Modelovaná zájmová oblast má rozlohu cca 38 km^2. Její hranice je tvořena na jihu, západě a částečně na severu vodními toky. Jižní hranice kopíruje tok Ploužnického potoka, západní sleduje po Mimoň řeku Ploučnici, dále Panenský potok. Severní hranice je tvořena střídavě tokem Ploučnice a linií Strážského zlomu. Východní okraj modelované oblasti je určen tektonickou linii Jeleních vrchů, která má na hydrogeologickou situaci v oblasti nezanedbatelný vliv.

Síť konečných prvků (viz obr. č. 3.3/1) pokrývající danou oblast je tvořena 1619 uzly a 3119 plošnými prvky. Síť je prostorově rozdělena na 15 vrstev, celkem tedy obsahuje zhruba 47000 prostorových prvků. Prvky v oblasti vyluhovacích polí mají tvar rovnostranného trojúhelníka o straně cca 100 metrů. Při západní hranici jsou prvky o hraně asi 2× větší a největší jsou u jižního okraje, i zde však délka jejich hran nepřesahuje 400 metrů.

Pravidelnost sítě je narušena v místech výskytu hydrogeologicky významných tektonických linií. Na rozhraní polí VP–8F a VP–8E sledují prvky průchod žíly Bukového vrchu, na severu dvě tektonické linie probíhající z JZ rohu pole VP–24 rovnoběžně se Strážským zlomem směrem k severovýchodu přes linii hydraulické bariéry. Obě tyto linie mají téměř shodný směr. Tento směr byl také

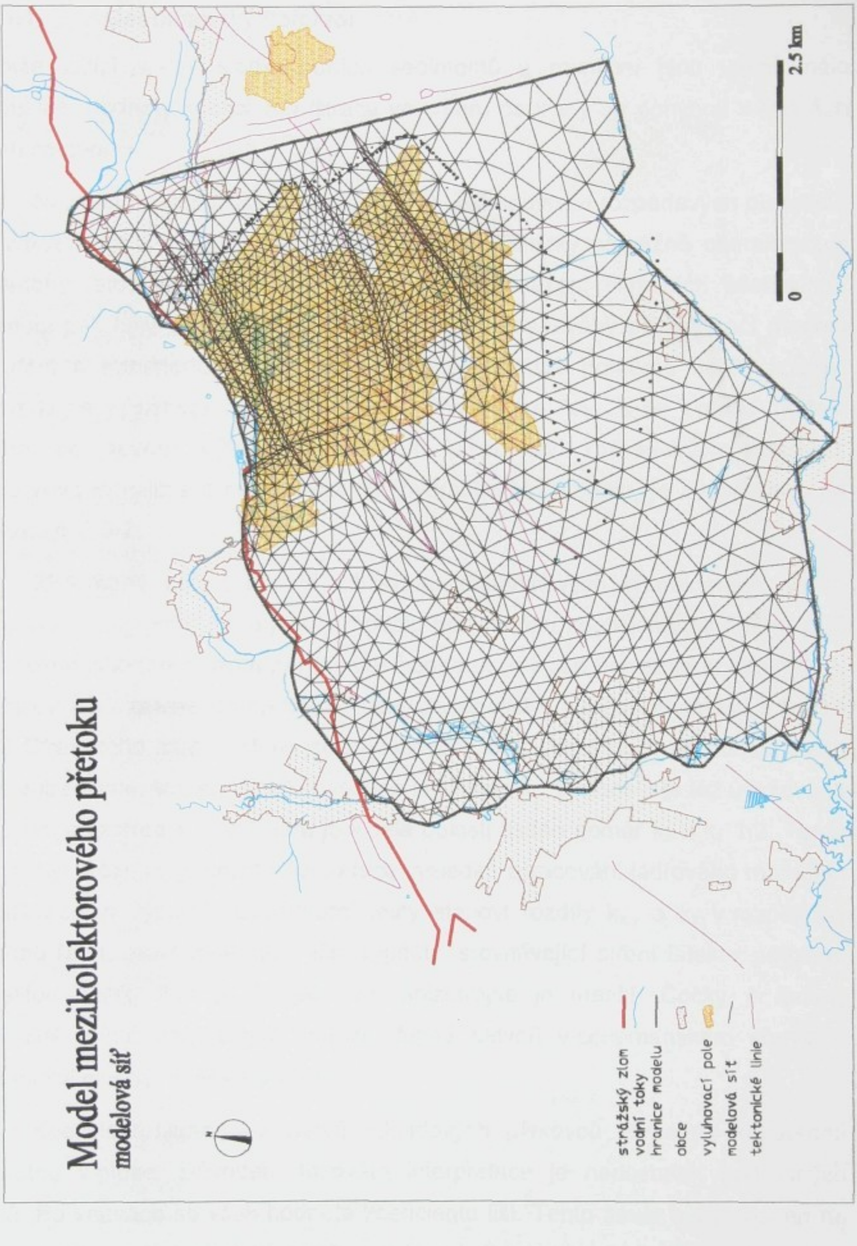
zvolen jako směr hlavní osy anizotropie odpovídající existenci dalších tektonických struktur menších rozměrů, které nemohly být v modelu uvažovány individuálně.

Vertikální členění modelové sítě respektuje hlavní stratigrafická rozhraní. Báze modelu kopíruje reliéf nepropustného podloží, tvořeného krystalinikem, strop zájmové oblasti tvoří volná hladina turonského kolektoru. Pro účely modelu bylo souvrství sladkovodního cenomanu a rozmyvu sjednoceno do jediné vrstvy - A1. Toto souvrství má velmi proměnlivou mocnost a v některých oblastech není vůbec vyvinuto. Vzhledem ke své relativně nízké propustnosti prakticky neovlivňuje ani pohyb roztoků v cenomanském kolektoru a pro řešení mezikolektorového přetoku má zcela zanedbatelný význam.

Rozpadavé pískovce, představující nejpropustnější část cenomanského souvrství, nevykazují v modelové ploše významnou stratifikaci v propustnosti. Proto byly rozděleny na dvě vrstvy shodných vlastností - C1 a C2. Nad nimi ležící fukoidové pískovce jsou již ve vertikálním členění více proměnlivé, byly rozděleny na dvě vrstvy o mocnosti 8 metrů - D1 a D2, přičemž D2 je velmi málo propustná. Zbylá mocnost byla rozdělena na vrstvy D3 a D4 v poměru 1:1.

Souvrství spodního turonu bylo děleno na třetiny bez ohledu na průběh rozhraní jednotlivých vrstev v něm vyvinutých. Důvodem je nedostatek přesných údajů, s jejichž použitím by bylo možno vhodně interpretovat celou modelovanou oblast. Proto jsou kalové vápence, slínovce, prachovce i písčité prachovce presentovány vrstvami E1, E2 a E3 bez ohledu na jejich mocnost.

Souvrství středního turonu - prachovité pískovce, bylo rozděleno na vrstvy I1 a I2 v poměru 1:1. Kvádrové pískovce tvoří vrstvy J1 – J3, rozdělené poměrem 1:1:1. Nezvodněná část turonských sedimentů není z hlediska modelu zajímavá, neboť tu neprobíhá žádné proudění, transport ani loužení či zpětné srážení kontaminantů. Poloha volné hladiny byla odečtena z map vykreslujících měřenou úroveň turonské hladiny k pololetí roku 1996.


Model mezikolektorového přetoku
modelová síť
N
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
modelová síť
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.3/1

3.3.1 Koeficienty propustnosti

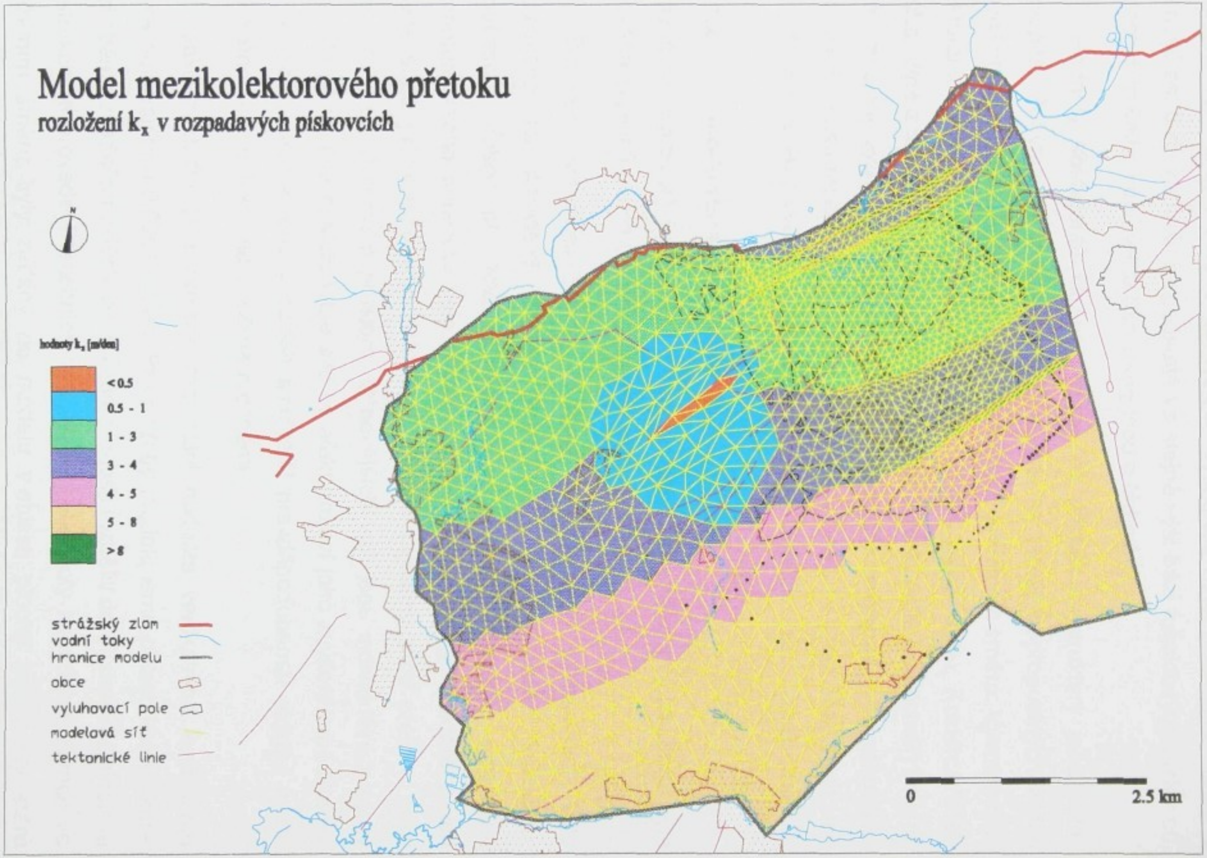
3.3.1.1 Cenomanský kolektor

Nejníže ležící vrstvy sladkovodních sedimentů a rozmyvu jsou velmi málo propustné, hodnoty koeficientu filtrace ve směru os x a y se pohybují v setinách metru za den.

Největší hodnotu filtračního koeficientu má souvrství rozpadavých pískovců. Na základě mnoha čerpacích zkoušek, jejichž výsledky převážně charakterizují parametry této vrstvy, bylo určeno počáteční rozložení filtračních koeficientů. Hodnoty pak byly v 80.a 90. letech postupně upřesňovány při kalibraci modelů proudění a transportu látek a jsou v současné době poměrně dobře známy. Pohybují se v rozmezí 1,5 – 10 m/den a obecně lze říci, že se v ploše modelu zvyšují od severu k jihu. Rozložení k_x v souvrství rozpadavých pískovců, aktualizované kalibrací na regionálním hydraulickém modelu, je vyobrazeno na obrázku č. 3.3/2.

Zkoumaná oblast působí z hlediska materiálových charakteristik velice kompaktním dojmem, proto jsou v modelu horizontální koeficienty filtrace k_x a k_y uvažovány jako téměř izotropní (poměr hodnot k_y a k_x se pohybuje kolem 1:1,1). Vyjímkou jsou známé tektonické poruchy zasahující do zájmové oblasti a blízké okolí Strážského zlomu, které jsou uvažovány buď velmi málo propustné nebo silně anizotropní, tzn. k_x několikanásobně převyšuje k_y. V modelu je též uvažována vertikální anizotropie. V průměru je v celé oblasti zadán poměr k_z a k_x 1:2. Tento poměr byl určen na základě interpretace výsledků zpracování jádrového materiálu a kalibračních výpočtů. Laboratorní testy stanoví rozdíly $k_{x,y}$ a k_z v rozpětí až jednoho řádu, provedené kalibrační výpočty, srovnávající šíření látek v podzemí s realitou, však ukazují, že efektivní anizotropie je menší. Čočky a laminy vertikálně méně propustných hornin zřejmě netvoří v cenomanském souvrství rozsáhlejší plošně souvislé polohy.

Koeficient filtrace ve vrstvě fukoidových pískovců je zadán konstantní hodnotou v ploše. Důvodem takovéto interpretace je nedostatek podrobných údajů. Po vrstvách se však hodnota koeficientu liší. Tento závěr byl stanoven na základě informací získaných vyhodnocením vrtného jádra a nálevových zkoušek a


Model mezikolektorového přetoku
rozložení k_x v rozpadavých pískovcích
N
hodnoty k_x [m/den]
< 0.5
0.5 - 1
1 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 8
> 8
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
modelová síť
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.3/2

je podepřen i výsledky karotážního měření zakyselení fukoidových pískovců. Běžné hodnoty filtračního koeficientu ve fukoidových pískovcích se pohybují v řádu x .10^{-1} m/den. Nad první vrstvou vystupuje hůře propustná vrstva o mocnosti asi 8 m, kopírující v podstatě ve stejné výši bázi fukoidových pískovců. Hodnoty filtračního koeficientu této vrstvy jsou o řád nižší.

Hodnoty koeficientů filtrace vázané na tektonické struktury jsou velmi rozmanité. Pohybují se v rozmezí 0,01 m/den na téměř nepropustných žilách neovulkanitů (extrémní hodnota), až do 10 m/den v podélném směru. Významnými strukturami ve zkoumané oblasti jsou linie žíly Bukového vrchu, Kozích hřbetů, Ralska, silně anizotropní (podélně vodivé a příčně velmi málo propustné) linie při severním okraji vyluhovacích polí a neovulkanitová žíla směru JZ – SV zasahující do východní části modelu z dolového pole Hamr. Tyto linie procházejí vertikálně celým blokem a jejich vliv se projevuje ve všech souvrstvích u obou kolektorů.

3.3.1.2 Spodnoturonský poloizolátor

Správnému nastavení koeficientů filtrace spodnoturonského poloizolátoru byla věnována zvýšená pozornost při kalibraci celého modelu.

Souvrství spodního turonu se svojí velmi nízkou propustností bylo považováno za přirozený izolátor turonské a cenomanského kolektoru. V současné době již toto konstatování neplatí. Izolační schopnost spodnoturonského souvrství byla narušena několika tisíci vrty. Některé z nich (hlavně staré průzkumné vrty) nebyly dostatečně zajištěny proti přetoku mezi zvodněmi v zapažnicovém prostoru. U novějších vrtů jsou individuální přetoky malé, ale při značné hustotě vrtné sítě se efekt projeví jako zvýšení propustnosti v dané ploše. Kromě toho v oblasti s největší pravděpodobností existují místa s přirozenou komunikací mezi oběma zvodněmi.

Jako základní byla zvolena regionální hodnota vertikálního koeficientu filtrace poloizolátoru 0,0001 m/den. Pro potřeby modelu jsme oblasti komunikace mezi oběma zvodněmi v důsledku těžební činnosti rozdělili do tří skupin z hlediska konstrukčního provedení těžebních vrtů. Největší hodnoty koeficientu filtrace ve vertikálním směru byly zadány do modelu v oblasti plochy polí s vrty staré konstrukce, které byly paženy pouze jednoduchými polyetylénovými pažnicemi a u nichž se dá předpokládat jistá netěsnost pažení. Střední hodnoty pokrývají plochy

polí s liftovou těžbou a vyšší hustotou vrtné sítě. Zde byla již použita bezpečnější konstrukce vrtu s dvojitým pažením přes turonský kolektor - vnitřní pažnice polyetylénová a vnější ocelová. Na nejnovějších vyluhovacích polích s čerpadlovou těžbou a nízkou hustotou vrtné sítě předpokládáme komunikaci nejmenší. Vzhledem k tomu, že v oblasti byl prováděn intenzivní geologický průzkum a je tu situováno množství geologicko-průzkumných vrtů procházejících až do cenomanských souvrství, byly i zde nasazeny přetokové koeficienty (i když o velmi nízké hodnotě).

Číselné hodnoty vertikálních koeficientů filtrace byly stanoveny na základě kalibračních výpočtů na regionálním modelu. Na tomto modelu byly určeny přibližné současné efektivní hodnoty. Protože se však jedná o modelování situace po ukončení sanace, kdy budou technologické a průzkumné vrty zatamponovány, předpokládá se zlepšení situace. Do modelu však nebyly nasazeny koeficienty na úrovni původního stavu, protože nelze předpokládat dokonalé utěsnění všech vrtů.

Nejhorší možná situace byla charakterizována přibližnými současnými hodnotami podle varianty D kalibrace (obr. č. 3.2/7 a 3.2/8). Pro optimistický předpoklad byly zvoleny nižší koeficienty, zhruba odpovídající variantě C kalibrace. Modelové výpočty ukázaly, že propustnost poloizolátoru na vyluhovacích polích má druhořadý význam.

V ploše polí chemické těžby mezi VP–15 a VP–20, kde je dlouhodobě místně zvýšená hladina cenomanského kolektoru bez důvodné příčiny v podobě cíleného vtláčení, předpokládáme existenci komunikace obou kolektorů. Turonský kolektor tu zřejmě dotuje kolektor cenomanský, kde je v důsledku těžby v současné době hladina cenomanské podzemní vody pod úrovní hladiny turonské podzemní vody. Tato komunikace probíhá patrně po přírodní cestě. Proto zde byly přijaty odhady z kalibrace regionálního modelu – optimistický 0,04 m/den a pesimistický 0,08 m/den. Při různých variantách kalibračních výpočtů se ukázalo, že není vyloučena ani hodnota vyšší. Přesto, že se zatím nepodařilo zjistit vrt, který by mohl přetok v tomto území způsobit, je ještě určitá naděje, že se podaří takový vrt (nebo málo rozsáhlou přírodní komunikaci) identifikovat. Pak by bylo možno vhodným technickým zásahem přetok snížit. Tuto situaci hodnotí dvě alternativní varianty, při nichž byly výše uvedené základní hodnoty vertikálního koeficientu filtrace sníženy 5×.

3.3.1.3 Turonský kolektor

Z tohoto horizontu zatím není dostatek vhodných údajů pro stanovení hodnot filtračních koeficientů. Vyhodnocení vrtných jader, kterých však není mnoho, určitou variabilitu v rozložení filtračních koeficientů naznačuje. Čerpací zkoušky poskytují výsledky velmi různorodé. Data z jejich vyhodnocení jsou však do modelu málo použitelná. Proto jsem se opíral o známé průměrné hodnoty a o řešení inverzní úlohy viz (MUŽÁK & SMETANA 1996) a (NOVÁK et al. 1996 - turon).

Vrstvy slinito-prachovitých pískovců mají hodnoty filtračního koeficientu v horizontálním směru odpovídající x . 10^{-1} m/den, propustnosti vrchních vrstev kvádrových pískovců, dosahujících až k terénu a místně až k terénu zvodněných, jsou řádově vyšší. Z průměrných hodnot vystupuje masiv Ralska se sníženou propustností a údolní niva Ploučnice na severním okraji modelu s propustností zvýšenou.

3.3.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky modelu jsou určeny charakterem zvolené hranice zájmové oblasti. V oblasti turonského kolektoru jsou zadány hodnoty výšky turonské hladiny odpovídající úrovni hladiny v tocích, které definují hranici modelu (Ploužnický potok, Ploučnice, Panenský potok). Části hranice modelu kopírující Strážský zlom jsou považovány za nepropustné. Na východním okraji modelu je zadána výška hladiny odečtená z map vykreslujících měřenou úroveň turonské hladiny k pololetí roku 1996.

Na okraji modelové sítě odpovídajícímu spodnoturonskému poloizolátoru je zadána okrajová podmínka nulového přetoku, okraj je tedy považován za nepropustný.

V části modelu, která pokrývá cenomanskou zvodeň, je předepsána okrajová podmínka na výšku cenomanské piezometrické hladiny. Určení piezometrické úrovně cenomanské hladiny po zatopení dolu a ustálení poměrů ve zvodni je problematické. Logický předpoklad, že výtlačná výška dosáhne stejné úrovně jako před zahájením těžební činnosti ve strážském bloku, nemusí být správný. Nelze vyloučit, že se cenomanská piezometrická hladina ustálí o něco

výše v důsledku narušení poloizolátoru hornickou činností a vrtnými pracemi východně od prostoru vyluhovacích polí. Turonská hladina kopírující terén je zde položena výše a může zde docházet k přetoku z turonu do cenomanu s následným zvýšením cenomanské piezometrické hladiny. V tlakovém cenomanském kolektoru pak zvýšení dosáhne i do kontaminované oblasti. Zvýšení cenomanské hladiny proti původnímu stavu nemůže být vzhledem k morfologii terénu v oblasti Hamerského jezera příliš velké. K podstatnému nárůstu přetoku z cenomanu do turonu však stačí zvýšení o první jednotky metrů. Pro modelové výpočty byly zvoleny dvě úrovně cenomanské piezometrické hladiny. První odpovídá původní úrovni hladiny. Jako alternativa k ní byla zvolena hladina zvýšená na východním okraji modelu proti dolovému poli Hamr I o 3 m, což představuje v dané konfiguraci značné zvýšení.

3.3.3 Počáteční podmínky

Počáteční podmínky, které doplňují definici modelu, byly pro model přetoku kontaminantů z cenomanu do turonu vypracovány ve třech typech. Tyto typy počátečních podmínek následně určují základní tři varianty modelových scénářů.

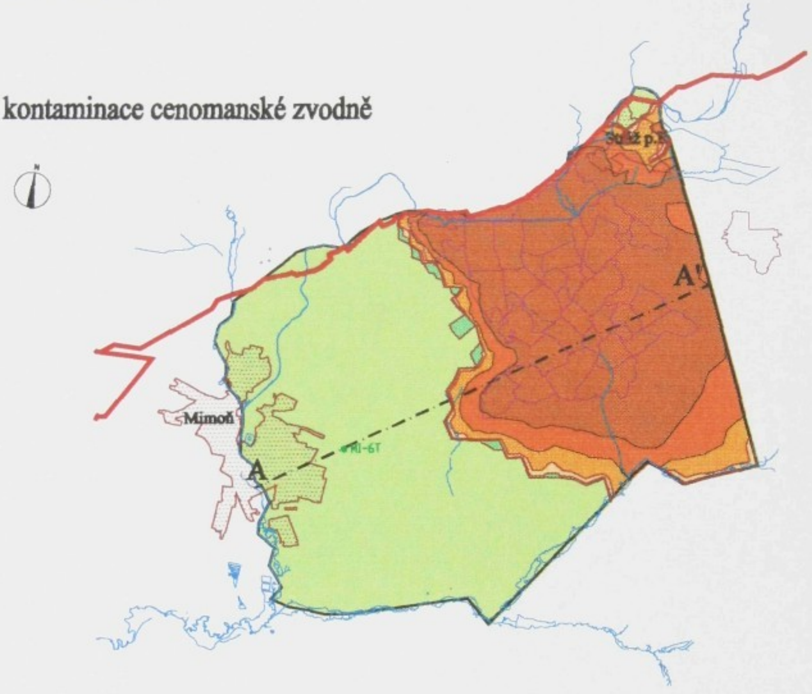
Nulová varianta je charakterizována počátečními podmínkami odpovídajícími současnému stavu v cenomanském kolektoru tak, jak byl definován v (DIAMO 1995), tzn. 4.82 mil. tun TDS, 3.81 mil. tun SO_4^{2-} a 88.66 tis. tun NH_4^+ rozpuštěných v cenomanském kolektoru. Počáteční rozložení koncentrací SO_4^{2-} a NH_4^+ je uvedeno na obrázcích č. 3.3/3 a 3.3/4. Turonský kolektor je uvažován jako nekontaminovaný jak v této, tak i v ostatních variantách (jsou předpokládány sanační aktivity vedoucí k vyčištění turonu).

Druhé dvě varianty jsou pojaty jako varianty sanační. První z těchto variant předpokládá vyčištění cenomanského kolektoru na úroveň kontaminace odpovídající průměrné hodnotě koncentrace TDS 10 g/l. To představuje, že na ploše cca 10 km^2 je soustředěno 1.62 mil. tun TDS, 1.29 mil. tun SO_4^{2-} a 31.5 tis. tun NH_4^+ viz (DIAMO 1995). Tato varianta je nazvána sanační varianta – 10 g/l TDS. Počáteční rozložení koncentrací SO_4^{2-} a NH_4^+ pro tuto variantu je uvedeno na obrázcích č. 3.3/5 a 3.3/6. Poslední varianta, sanační varianta – 3 g/l TDS, předpokládá vyčištění cenomanského kolektoru na úroveň kontaminace odpovídající průměrné hodnotě koncentrace TDS 3 g/l. Tuto variantu lze

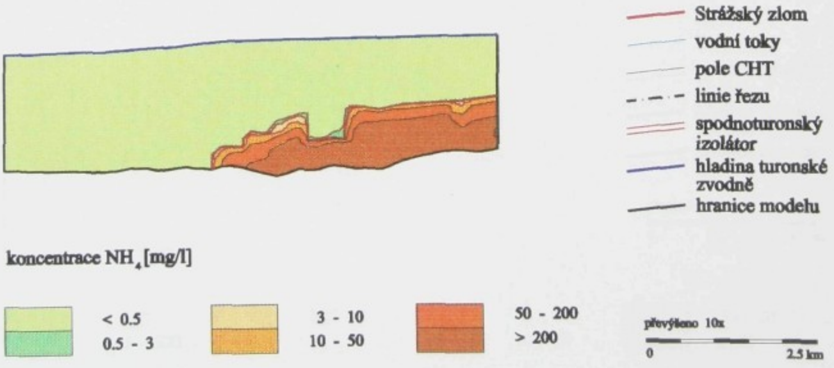
Model mezikolektorového přetoku

počáteční rozložení koncentrací NH_4
nulová varianta

kontaminace cenomanské zvodně



rozložení kontaminace v řezu modelem

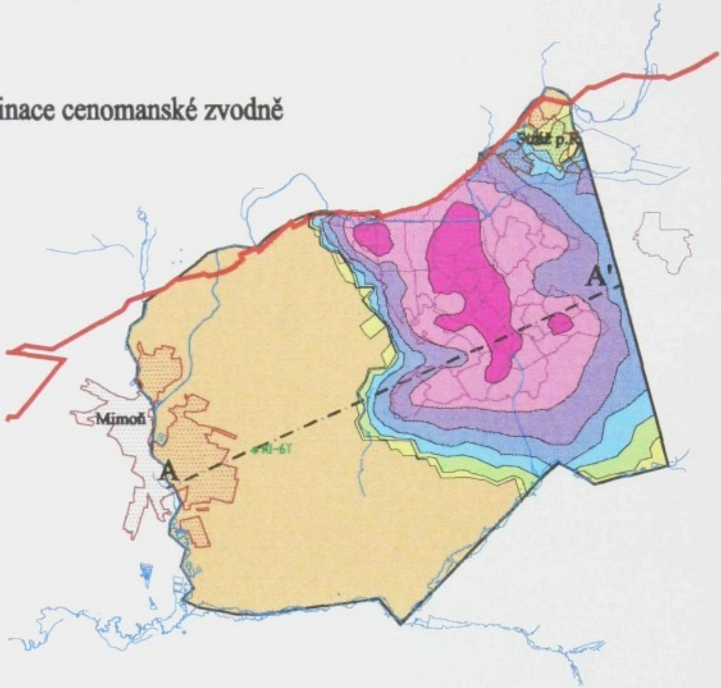


Obr. č. 3.3/3

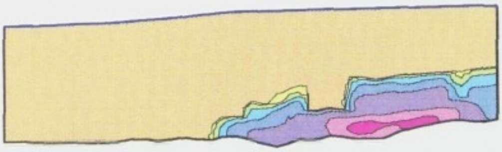
Model mezikolektorového přetoku

počáteční rozložení koncentrací SO_4
nulová varianta

kontaminace cenomanské zvodně



rozložení kontaminace v řezu modelem



Strážský zlom
vodní toky
pole CHT
linie řezu
spodnoturonský izolátor
hladina turonské zvodně
hranice modelu

převýšeno 10x
0 2.5 km

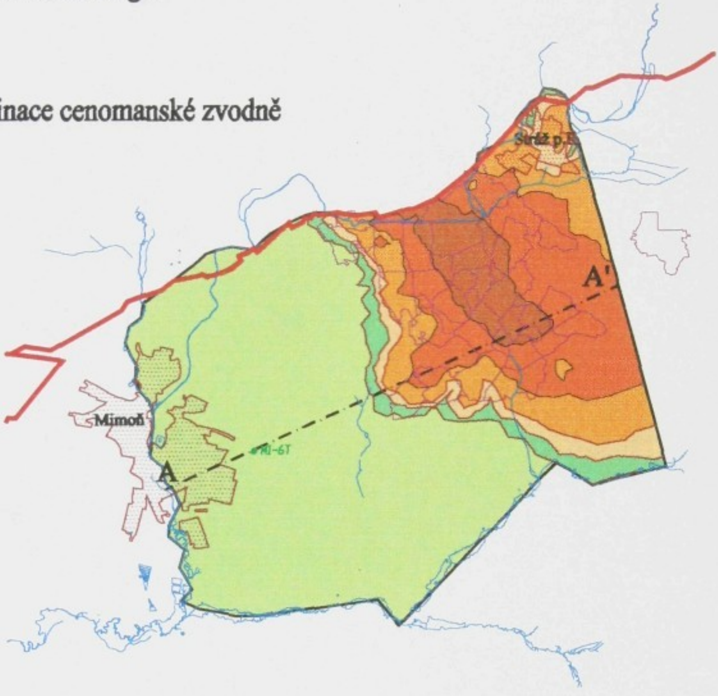
koncentrace SO_4 [g/l]

< 0.05	0.25 - 1	3 - 10	30 - 50
0.05 - 0.25	1 - 3	10 - 30	> 50

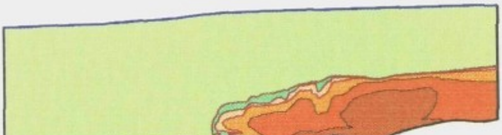
Model mezikolektorového přetoku

počáteční rozložení koncentrací NH_4
sanační varianta 10 g/l

kontaminace cenomanské zvodně



rozložení kontaminace v řezu modelem



- Strážský zlom
- vodní toky
- pole CHT
- linie řezu
- spodnoturonský izolátor
- hladina turonské zvodně
- hranice modelu

koncentrace NH_4 [mg/l]

- < 0.5
- 0.5 - 3
- 3 - 10
- 10 - 50
- 50 - 200
- > 200

převýšeno 10x

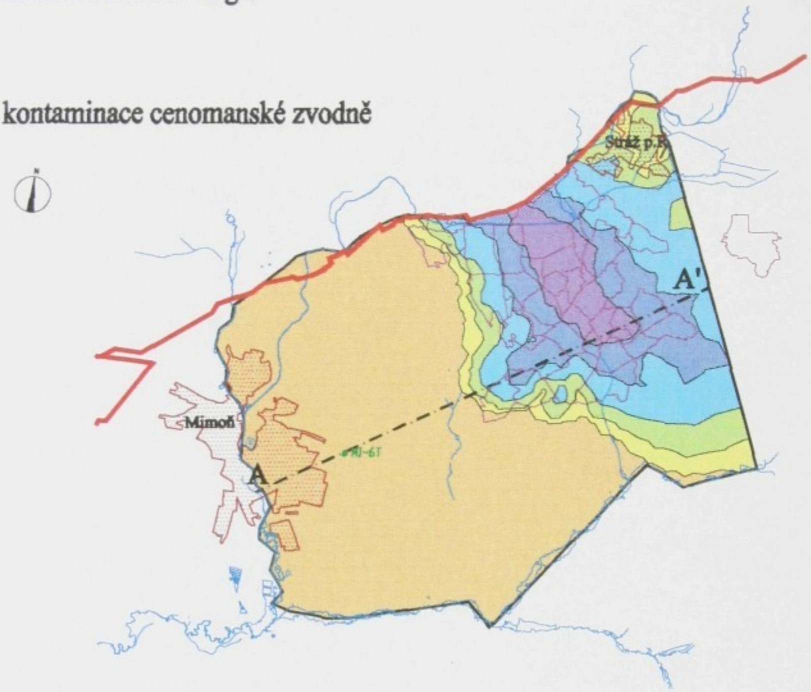
0 2.5 km

Obr. č. 3.3/5

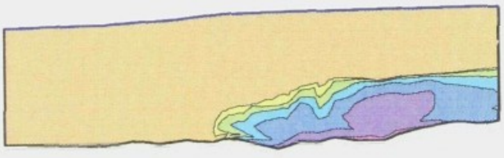
Model mezikolektorového přetoku

počáteční rozložení koncentrací SO_4
sanační varianta 10 g/l

kontaminace cenomanské zvodně



rozložení kontaminace v řezu modelem



koncentrace SO_4 [g/l]

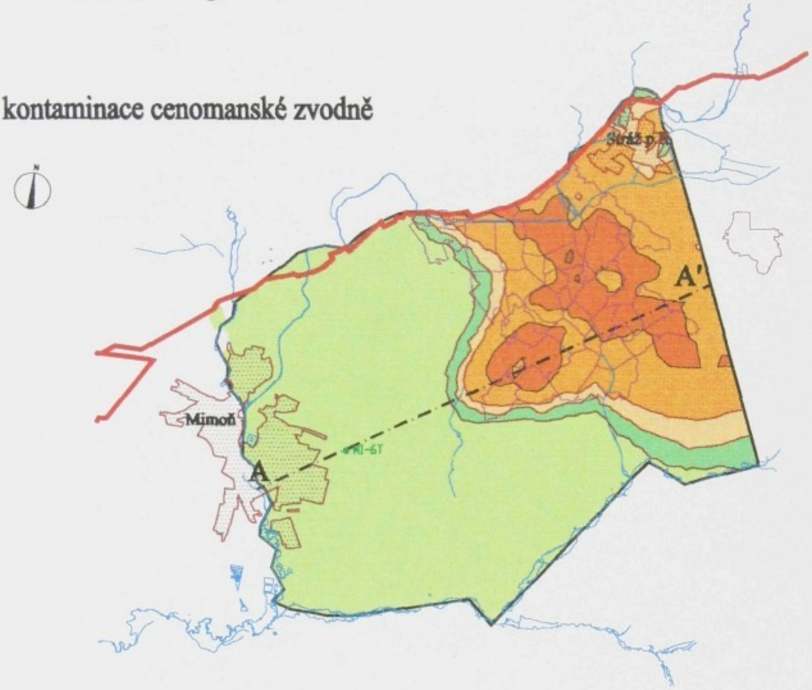
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50

Obr. č. 3.3/6

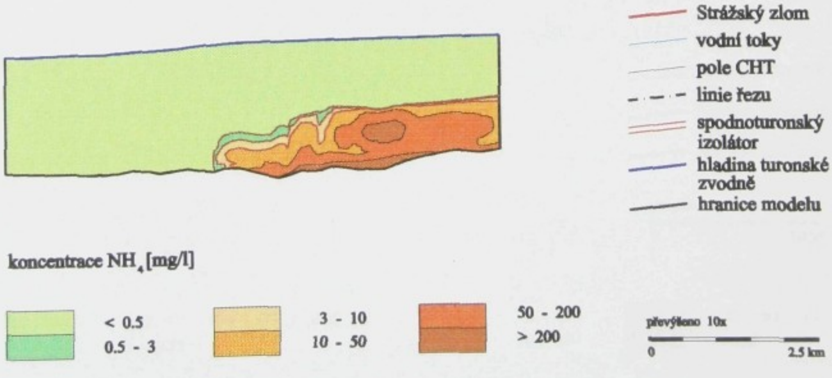
Model mezikolektorového přetoku

počáteční rozložení koncentrací NH_4
sanační varianta 3 g/l

kontaminace cenomanské zvodně



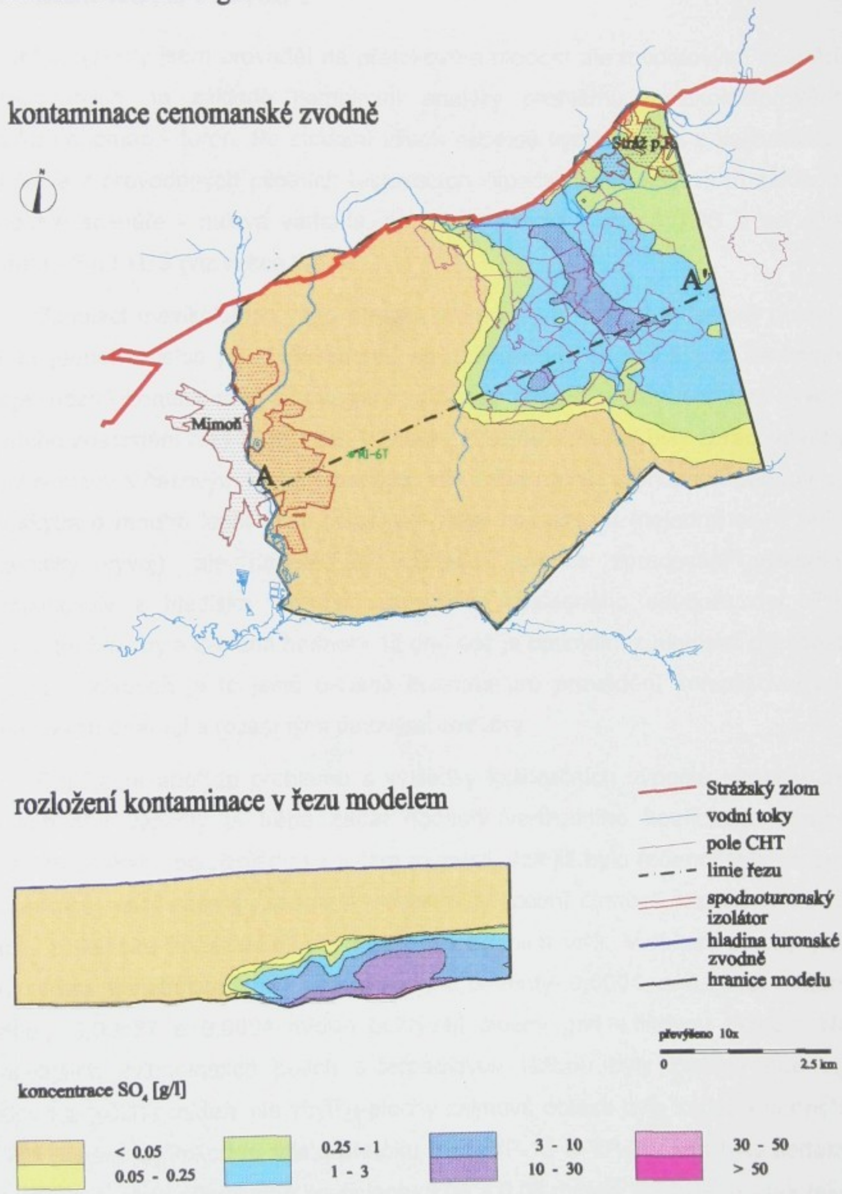
rozložení kontaminace v řezu modelem



Obr. č. 3.3/7

Model mezikolektorového přetoku

počáteční rozložení koncentrací SO_4
sanační varianta 3 g/l



Obr. č. 3.3/8

charakterizovat množstvím 763 tis. tun TDS, 589 tis. tun SO_4^{2-} a 14 tis. tun NH_4^+ rozprostřených na ploše 16 km^2 viz (DIAMO 1995). Odpovídající počáteční rozložení koncentrací SO_4^{2-} a NH_4^+ je uvedeno na obrázcích č. 3.3/7 a 3.3/8.

3.4 Modelové scénáře

Variantní výpočty jsem prováděl na přetokovém modelu dle modelových scénářů vypracovaných na základě komplexní analýzy problému mezikolektorového přetoku cenoman - turon. Po zvážení všech aspektů vyplývajících z kalibračních výpočtů a z provedených pilotních testovacích výpočtů jsem sestavil tři základní modelové scénáře - nulová varianta, sanační varianta - 10 g/l TDS a sanační varianta - 3 g/l TDS (viz sekce 3.3.3).

Simulaci mezikolektorového přetoku jsem rozvrhl tak, aby časově pokryla období jednoho tisíce let. Toto období se zdá vhodné zejména pro sledování vývoje možné kontaminace zdroje pitné vody pro Mimoň a pro sledování vývoje možného znečištění řeky Ploučnice. Výsledky získané simulací byly zpracovávány a archivovány s časovým krokem padesát let. Volba menší vzorkovací periody by neposkytla o mnoho lepší sadu údajů pro další zpracování (nejedná se o příliš dynamický vývoj), ale naopak by následný proces zpracování výsledků zkomplikovala z hlediska velikosti rozsáhlého výsledného souboru dat. Pro transportní krok byla zvolena hodnota 15 dní, což je optimální z hlediska přesnosti výpočtu a zároveň je to ještě únosná hodnota pro provádění komplikovaných numerických operací s rozsáhlými datovými soubory.

Počáteční analýza problému a výsledky kalibračních výpočtů ukázaly, že pro variantní výpočty je třeba zadat hodnoty vertikálního koeficientu filtrace spodnoturonského poloizolátoru v jistém rozmezí. Jak již bylo řečeno, byly oblasti komunikace mezi oběma zvodněmi v důsledku těžební činnosti rozděleny do tří skupin z hlediska konstrukčního provedení těžebních vrtů. V oblasti plochy polí s vrty staré konstrukce byly zadány limitní hodnoty 0,0004 a 0,0006 m/den. Hodnoty 0,00027 a 0,0004 m/den pokrývají plochy polí s liftovou těžbou. Na nejnovějších vyluhovacích polích s čerpadlovou těžbou byly zadány hodnoty 0,00013 a 0,0002 m/den. Na zbytku plochy zájmové oblasti byla zadána hodnota 0,0001 m/den. Výjimkou je místo přetoku mezi VP-15 a VP-20, kde byly zadány hodnoty vertikálního filtračního koeficientu 0,04 a 0,08 m/den. Protože je však také

možné, že v tomto místě se nejedná o přirozený přetok, ale o přetok způsobený vrtnou činností (může se jednat např. o starý průzkumný vrt), je též možné do budoucna předpokládat přesnou identifikaci situace v tomto místě a eventuelní provedení opatření vedoucích ke snížení či zamezení rizika přetoku. Z toho důvodu byly stanoveny i alternativní hodnoty vertikálního filtračního koeficientu zohledňující takovou situaci. Jedná se o čísla 0,008 a 0,016 m/den.

Výsledky testovacích výpočtů potvrdily předpokládaný silný vliv změny úrovně cenomanské piezometrické hladiny na chování modelu. Protože lze předpokládat, že se cenomanská piezometrická hladina ustálí pravděpodobně nad úrovní původní hladiny před započetím těžební činnosti ve strážském bloku (viz předpoklady v sekci 3.3.2), byly pro variantní výpočty uvažovány dvě úrovně hladiny, původní a zvýšená, místy až o 3 m.

Kombinací výše uvedených parametrů byly sestaveny čtyři subvarianty pro každou variantu simulačních scénářů, dvě základní – I (pesimistická) a II (optimistická) a dvě alternativní – III a IV. Jejich charakteristiky shrnuje tabulka č. 3.4/1.

Tabulka 3.4/1: Charakteristika jednotlivých subvariant základních scénářů mezikolektorového přetoku

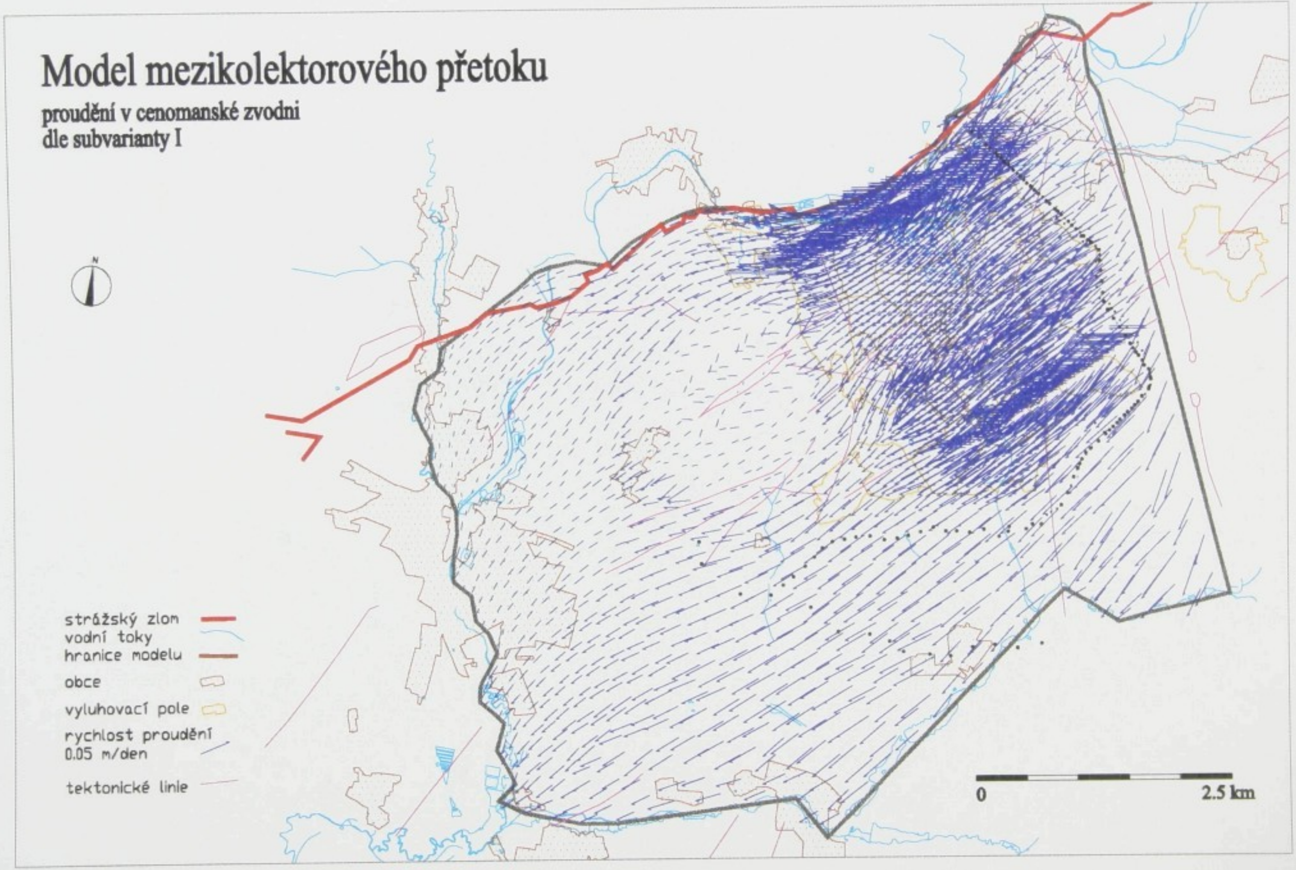
Subvarianta	Vertikální koeficient filtrace [m/den]				úroveň piez.hl. cenomanu
	stará VP	Liftová VP	čerpadlová VP	místo přetoku	
I	0,0006	0,0004	0,0002	0,08	zvýšená o 3 m
II	0,0004	0,00027	0,00013	0,04	původní
III	0,0006	0,0004	0,0002	0,016	zvýšená o 3 m
IV	0,0004	0,00027	0,00013	0,008	původní

Přetok kontaminantů z cenomanu do turonu a jejich následný transport turonským kolektorem byl tedy sledován celkem ve dvanácti variantách. Výsledky všech variant jsou prezentovány a diskutovány v následující kapitole

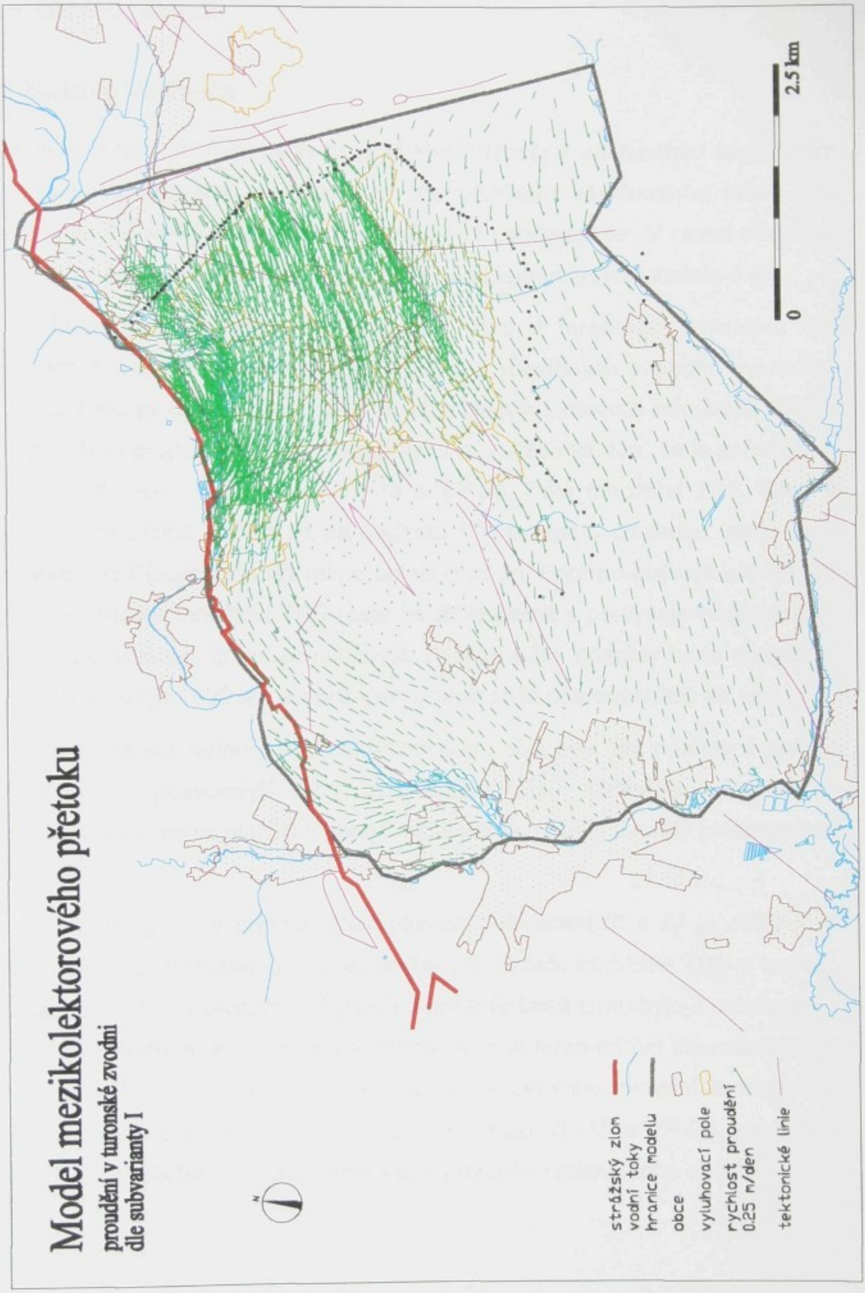
3.5 Výsledky výpočtů

Pohyb kontaminantů v cenomanském i turonském kolektoru je dán charakterem proudění, jenž je zachycen na dvou obrázcích č. 3.5/1 a 3.5/2. První ukazuje proudové pole v cenomanu a na druhém je znázorněno proudové pole v turonském kolektoru. V cenomanu převažuje jihozápadní směr proudění. V turonu jsou patrné dva hlavní proudy – severní a jižní dráha. Oba směřují od severovýchodu k vrtu MI-6 a jsou odděleny masivem Ralska. Hlavní přetok mezi cenomanem a turonem se děje převážně v oblasti vyluhovacích polí s vyšší hodnotou filtračního koeficientu a v místě přetoku mezi poli VP-15 a VP-20.

V průběhu řešení bylo sledováno množství látek obsažených v turonském kolektoru v oblasti mezi CHT a Mimoní. Protože hranice modelu je definována Ploučnicí u Mimoně, dochází během simulovaného období k úniku kontaminantů mimo sledovanou oblast. Kontaminanty jsou transportovány turonským kolektorem, menší část jich unikne do Ploučnice v okolí Mimoně. Předpokládá se, že větší část kontaminace podteče Ploučnici a v pozdější době bude pravděpodobně řekou zachycena mimo oblast modelu jihozápadně od Mimoně poblíž Brenné. Dále bylo sledováno celkové množství látek přeteklých do turonu a množství a koncentrace látek ve vrtu MI-6, reprezentujícím zdroj mimoňského vodovodu, a v Ploučnici poblíž Mimoně. Hodnoty koncentračních přírůstků jednotlivých kontaminantů v Ploučnici byly rozpočítány na průměrný průtok Q = 1350 l/s, odpovídající průtoku Q_{355} = 950 l/s měřenému v profilu Mimoň. Výsledky byly vyhodnocovány s časovým krokem 50 let v průběhu tisíciletého období a jsou vždy shrnuty v přiložených tabulkách. Pro porovnání chování varianty za různých podmínek, určených typem subvarianty, byly vykresleny grafy dokumentující časové vývoje množství TDS v turonu, množství jednotlivých látek přeteklých do turonu a koncentrační přírůstky těchto látek ve vrtu MI-6 a v Ploučnici. Postup koncentračního mraku pro dvě základní složky - SO_4^{2-} a NH_4^+ v časech 100, 300 a 1000 let od počátku simulace graficky dokumentují vždy v pohledu ve vrstvě J2 a v řezu zájmovou oblastí přiložené obrázky. Takto rozsáhlý soubor graficky dokumentovaných výsledků je však doložen pouze pro subvarianty I a II, tedy základní subvarianty pro něž uvažujeme pesimistický, resp. optimistický odhad podmínek. V případě alternativních subvariant III a IV je dokumentováno pouze


Model mezikolektorového přetoku
proudění v cenomanské zvodni
dle subvarianty I
N
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
rychlost proudění
0.05 m/den
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/1


Model mezikolektorového přetoku
proudění v turonské zvodni
dle subvarianty I
N
strážský zlom
vodní toky
hranice modelu
obce
vyluhovací pole
rychlost proudění
0.25 m/den
tektonické linie
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/2

rozložení koncentrace NH_4^+ po tisíci letech a postup koncentračního mraku v řezech zájmovou oblastí.

3.5.1 Nulová varianta

Jak již bylo řečeno nulová varianta je charakterizována počátečním rozložením koncentrací kontaminantů v cenomanu odpovídajícím současnému stavu (viz sekce 3.3.3). Turonský kolektor je uvažován bez kontaminace. V rámci simulace této varianty byly řešeny všechny čtyři uvedené subvarianty (viz kapitola 3.4).

Tabulka č. 3.5/1 zachycuje množství TDS v turonském kolektoru dle jednotlivých subvariant. Na obrázku č. 3.5/3 je z uvedených výsledků vykreslen graf. Z obrázku je patrné, že v případě subvarianty I naroste množství TDS v turonu poměrně prudce během prvních 200 let až na 245 tis. tun. To je způsobeno převážně přetokem v místě mezi VP-15 a VP-20. Poté množství TDS klesá v průběhu následujících 300 let až na hodnotu 173 tis. tun v důsledku úniku části kontaminatů do Ploučnice a též mimo oblast modelu. Poté po zbývajících 500 let simulačního období množství TDS roste téměř lineárně a převyšuje hodnotu 240 tis. tun. Dle charakteru grafu lze usuzovat, že maximální hodnoty bude dosaženo po delší době než je 1000 let, ale pravděpodobně příliš nepřevýší 300 tis. tun.

V případě subvarianty II je charakter grafu obdobný, jen nárůsty a pokles množství jsou pozvolnější. To způsobuje nižší vertikální propustnost spodnoturonského poloizolátoru v oblasti vyluhovacích polí a v místě přetoku mezi VP-15 a VP-20.

Charakter grafů v případě alternativních subvariant III a IV je odlišný. V průběhu celého simulovaného období dochází k nárůstu množství TDS v turonu. Tento nárůst je však v prvních 300 letech pozvolnější než tomu bylo u subvariant I a II. Ve druhé polovině simulovaného období je však tento nárůst intenzivnější ve srovnání se základními subvariantami. Důvodem takového chování je radikálně snížená vertikální propustnost v místě přetoku mezi VP-15 a VP-20, která zde zamezí přetoku velkého množství látek v první třetině simulovaného období.

Tabulka 3.5/1: Množství TDS v turonu dle subvariant – nulová varianta

Čas [rok]	Množství TDS v turonu dle subvariant [tis. t]			
	I	II	III	IV
0	0,000	0,000	0,000	0,000
50	47,040	1,240	2,520	0,010
100	156,140	12,290	21,260	0,160
150	230,730	33,120	52,770	0,840
200	245,710	54,430	81,490	2,530
250	229,690	69,920	101,310	5,420
300	205,160	79,000	114,310	9,390
350	187,180	82,120	123,780	14,080
400	177,760	81,130	132,580	19,120
450	173,830	78,270	141,820	24,180
500	173,410	74,870	151,500	28,990
550	175,530	71,470	161,550	33,420
600	179,680	68,360	172,020	37,420
650	185,440	65,780	182,960	41,030
700	192,430	63,880	194,350	44,340
750	200,300	62,750	206,090	47,500
800	208,780	62,410	218,030	50,650
850	217,610	62,870	230,030	53,930
900	226,590	64,090	241,900	57,470
950	235,480	66,070	253,460	61,350
1000	244,090	68,750	264,530	65,610

V tabulkách č. 3.5/2 a 3.5/3 je uvedeno množství jednotlivých kontaminantů, které se rozšíří během sledovaného období z cenomanu do turonu v případě

jednotlivých subvariant. Množství látek je v závislosti na čase vykresleno v grafech na obrázku č. 3.5/4. Z tabulky je zřejmé, že během celého simulovaného období přeteče z cenomanu do turonu v případě pesimistikých podmínek nulové varianty (subvarianta I) téměř 980 tis. tun TDS, což je téměř 20% z uvažovaného současného množství rozpuštěných látek v cenomanu. V případě optimistických podmínek nulové varianty (subvarianta II) přeteče do turonu za 1000 let celkem 283 tis. tun TDS, tj. necelých 6% z uvažovaného současného množství rozpuštěných látek v cenomanu. V případě alternativní subvarianty III je toto množství ve srovnání se subvariantou I nižší o jednu třetinu, v případě subvarianty IV je přeteklé množství o více než polovinu menší než je tomu u subvarianty II.

V tabulkách č. 3.5/4 a 3.5/5 je shrnut vývoj koncentrací jednotlivých kontaminantů ve vrtu MI-6 (vrt reprezentuje zdroj pitné vody) v průběhu simulačního období. Časová závislost koncentrací je vykreslena v grafech na obrázku č. 3.5/5. Odtud je patrné, že v případě pesimistické subvarianty I naroste koncentrace velmi rychle (již po 200 letech) až na hodnoty 2,5 g/l TDS, 1,99 g/l SO_4^{2-} a 38,7 mg/l NH_4^+. Tyto hodnoty překračují pro NH_4^+ více než 12× a pro SO_4^{2-} téměř 8× limity C normy ČSN 75 72 14 - *Jakost vod - Surová voda pro úpravu na pitnou vodu*. Limity uváděné touto normou jsou pro SO_4^{2-} 250 mg/l a pro NH_4^+ 3 mg/l. Poté koncentrace látek klesají. V případě optimistické varianty II dostoupí koncentrace svého maxima po 400 letech. V té době se hodnoty koncentrací pohybují kolem 495 mg/l TDS, 394 mg/l SO_4^{2-} a 8,3 mg/l NH_4^+. I v tomto případě však hodnoty koncentrace NH_4^+ přestoupí limit C téměř třikrát. Budeme-li takto posuzovat alternativní subvarianty, zjistíme, že v případě subvarianty III dostoupí koncentrace svého maxima po 300 letech a poté po zbytek simulovaného období kolísají v rozmezí hodnot 400 - 550 mg/l TDS, 300 - 450 mg/l SO_4^{2-} a 7,7 - 9 mg/l NH_4^+. I v tomto případě však hodnoty koncentrace NH_4^+ přestoupí limit C trojnásobně. V případě subvarianty IV zjistíme, že koncentrace téměř lineárně narůstají po celé simulační období a k jeho konci dosáhnou hodnot 159 mg/l TDS, 126 mg/l SO_4^{2-} a 2,75 mg/l NH_4^+. Přestože v tomto případě není limit C dosažen, je zřejmé, že koncentrace budou nadále narůstat i po uplynutí tisíciletého simulačního období, až pravděpodobně překročí limit C.

V tabulkách č. 3.5/6 a 3.5/7 jsou uvedena množství kontaminantů odčerpaná vrtem MI-6 kumulovaně. Je tedy zřejmé, že po tisíci letech bude vrtem

odčerpáno 500 tis. tun TDS, 397 tis. tun SO_4^{2-} a 8,6 tis. tun NH_4^+ v případě subvarianty I, 160 tis. tun TDS, 128 tis. tun SO_4^{2-} a 2,8 tis. tun NH_4^+ v případě subvarianty II. U alternativní subvarianty III, resp. IV bude odčerpáno 199 tis., resp. 31,4 tis. tun TDS, 158 tis., resp. 24,7 tis. tun SO_4^{2-} a 3,5 tis., resp. 500 tun NH_4^+.

Následující tabulky č. 3.5/8 a 3.5/9 uvádějí časový vývoj koncentračních přírůstků k přirozenému pozadí pro jednotlivé kontaminanty v řece Ploučnici. Graficky jsou tyto závislosti zobrazeny v grafech na obrázku č. 3.5/6. Z obrázku lze vypozorovat, že koncentrace kontaminantů v Ploučnici budou po celé simulované období vzrůstat. Z číselných hodnot je však zřejmé, že Ploučnice nebude nikterak závažně ohrožena druhotnou kontaminací. To je zřejmé i z tabulek č. 3.5/10 a 3.5/11, které uvádějí množství kontaminujících látek uniklých do Ploučnice. Ukazuje se, že množství kontaminantů uniklých do Ploučnice jsou podstatně menší než množství odčerpaná mimoňským vodovodem.

Obrázky č. 3.5/7 - 3.5/14 graficky dokumentují postup koncentračního mraku zájmovou oblastí v průběhu simulovaného období v případě pesimistické subvarianty I. Z obrázků jsou zřejmé dvě cesty postupu kontaminantů turonským kolektorem. První, významná hlavně v první polovině simulovaného období, vedoucí od místa přetoku mezi VP-15 a VP-20 jihozápadním směrem k vrtu MI-6 a dále do Ploučnice, a druhá, jejíž hlavní vliv se projeví až v pozdějším období, vedoucí ze severní části polí CHT podél Strážského zlomu směrem k Ploučnici. Na obrázcích znázorňujících řezy zájmovou oblastí je patrný silný přetok v místě mezi VP-15 a VP-20 a postup kontaminantů směrem k vrtu MI-6. Ke konci simulovaného období je patrný i přetok plochou polí CHT.

Optimistickou subvariantu II dokumentují stejným způsobem obrázky č. 3.5/15 - 3.5/22. Zde je patrná snížená vertikální propustnost v oblasti polí CHT a především vliv nižší úrovně cenomanské piezometrické hladiny, které způsobují podstatné snížení přetoku v ploše polí CHT. Přetok v místě mezi VP-15 a VP-20 je však stále významný.

Alternativní subvarianty III a IV jsou dokumentovány na obrázcích č. 3.5/23 - 3.5/26. Přestože byla vertikální propustnost v místě mezi VP-15 a VP-20

Tabulka č. 3.5/4: Koncentrace ve vrtu MI-6 - nulová varianta

Čas [rok]	Koncentrace ve vrtu MI-6 dle subvariant [mg/l]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.009	0.004	0.000	0.007	0.002	0.000
100	195.373	152.365	2.344	0.581	0.365	0.005
150	1787.370	1425.560	25.131	40.977	31.656	0.489
200	2503.790	1991.450	38.659	192.920	153.208	2.626
250	2252.850	1787.250	37.064	349.701	279.485	5.281
300	1859.370	1475.430	31.540	438.573	350.034	7.064
350	1442.040	1145.440	25.044	480.589	383.004	7.956
400	1184.940	942.042	20.836	494.539	394.043	8.282
450	1033.260	821.609	18.399	484.166	385.849	8.237
500	919.880	731.186	16.673	465.872	371.298	8.044
550	826.672	656.659	15.278	444.840	354.466	7.773
600	750.771	595.849	14.136	419.626	334.222	7.419
650	691.149	547.964	13.228	391.022	311.248	6.997
700	645.886	511.492	12.527	361.802	287.794	6.549
750	612.544	484.513	12.000	334.761	266.096	6.121
800	588.870	465.258	11.617	311.612	247.517	5.745
850	573.094	452.341	11.355	292.970	232.541	5.435
900	563.846	444.688	11.196	278.804	221.143	5.194
950	559.948	441.369	11.123	268.851	213.118	5.018
1000	560.279	441.493	11.117	262.816	208.232	4.905

Tabulka č. 3.5/5: Koncentrace ve vrtu MI-6 - nulová varianta

Čas [rok]	Koncentrace ve vrtu MI-6 dle subvariant [mg/l]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.008	0.003	0.000	0.007	0.002	0.000
100	1.494	1.021	0.014	0.069	0.023	0.000
150	88.276	68.908	1.084	0.228	0.078	0.000
200	332.976	265.207	4.653	0.658	0.297	0.003
250	511.719	408.119	7.774	2.030	1.232	0.019
300	558.864	444.904	8.925	5.328	3.692	0.066
350	553.941	440.953	9.080	11.216	8.226	0.155
400	529.629	421.920	8.855	19.924	15.025	0.293
450	506.098	403.381	8.614	31.443	24.094	0.479
500	488.250	389.107	8.460	45.469	35.203	0.711
550	469.609	373.999	8.300	61.224	47.736	0.977
600	449.715	357.792	8.111	77.504	60.730	1.258
650	431.970	343.259	7.935	93.021	73.143	1.533
700	419.229	332.708	7.820	106.795	84.182	1.784
750	412.612	327.047	7.786	118.405	93.497	2.000
800	412.008	326.200	7.834	128.003	101.206	2.181
850	416.817	329.703	7.959	136.157	107.757	2.335
900	426.369	337.030	8.152	143.622	113.754	2.474
950	440.020	347.677	8.406	151.147	119.800	2.608
1000	457.099	361.113	8.713	159.351	126.389	2.750

Tabulka č. 3.5/2: Množství látek přeteklých do turonu - nulová varianta

Čas [rok]	Množství látky přeteklé do turonu dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	47.040	37.230	0.610	1.243	0.939	0.014
100	157.020	124.980	2.280	12.301	9.690	0.158
150	256.600	203.920	3.940	33.474	26.631	0.476
200	332.780	264.220	5.300	57.735	45.987	0.876
250	388.310	308.190	6.350	80.731	64.252	1.273
300	431.050	342.020	7.200	101.208	80.479	1.632
350	470.270	373.040	7.990	118.149	93.877	1.939
400	508.700	403.370	8.780	132.321	105.056	2.203
450	546.940	433.510	9.570	145.080	115.091	2.445
500	585.100	463.540	10.370	157.198	124.595	2.676
550	623.250	493.520	11.180	169.014	133.834	2.904
600	661.420	523.500	11.980	180.673	142.928	3.132
650	699.720	553.550	12.790	192.272	151.956	3.360
700	738.240	583.770	13.610	203.912	161.001	3.590
750	777.100	614.240	14.420	215.716	170.165	3.823
800	816.410	645.070	15.240	227.830	179.569	4.062
850	856.250	676.330	16.070	240.424	189.349	4.309
900	896.700	708.070	16.900	253.679	199.651	4.567
950	937.780	740.340	17.740	267.774	210.623	4.839
1000	979.500	773.110	18.580	282.880	222.402	5.127

Tabulka č. 3.5/3: Množství látek přeteklých do turonu - nulová varianta

Čas [rok]	Množství látky přeteklé do turonu dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	2.526	1.939	0.031	0.011	0.005	0.000
100	21.309	16.857	0.300	0.166	0.109	0.002
150	53.830	42.792	0.830	0.876	0.632	0.013
200	88.660	70.440	1.452	2.639	1.975	0.041
250	121.611	96.527	2.079	5.690	4.329	0.091
300	152.391	120.864	2.693	9.942	7.626	0.165
350	181.893	144.158	3.301	15.143	11.661	0.257
400	211.750	167.696	3.927	21.012	16.210	0.364
450	242.587	191.971	4.577	27.316	21.087	0.482
500	274.430	217.005	5.251	33.910	26.178	0.608
550	307.205	242.747	5.947	40.737	31.437	0.740
600	340.875	269.175	6.661	47.811	36.876	0.878
650	375.447	296.302	7.392	55.195	42.548	1.024
700	410.957	324.164	8.138	62.988	48.534	1.178
750	447.462	352.811	8.900	71.309	54.931	1.341
800	485.021	382.295	9.677	80.293	61.853	1.517
850	523.684	412.662	10.470	90.087	69.416	1.706
900	563.488	443.944	11.277	100.840	77.742	1.911
950	604.440	476.150	12.099	112.698	86.951	2.135
1000	646.519	509.265	12.934	125.801	97.156	2.379

Tabulka č. 3.5/6: Množství ve vrtu MI-6 - nulová varianta

Čas [rok]	Množství ve vrtu MI-6 dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.838	0.649	0.010	0.003	0.001	0.000
150	25.543	20.251	0.340	0.326	0.246	0.004
200	84.232	67.028	1.210	3.192	2.504	0.041
250	146.740	116.667	2.209	10.343	8.210	0.144
300	200.204	159.080	3.103	20.705	16.487	0.307
350	242.768	192.871	3.834	32.681	26.037	0.503
400	276.464	219.649	4.423	45.382	36.157	0.714
450	305.083	242.405	4.929	58.101	46.292	0.929
500	330.343	262.487	5.383	70.418	56.109	1.140
550	352.939	280.443	5.796	82.229	65.521	1.345
600	373.345	296.646	6.177	93.441	74.454	1.542
650	391.998	311.442	6.531	103.952	82.823	1.729
700	409.297	325.150	6.864	113.706	90.585	1.905
750	425.583	338.039	7.182	122.726	97.757	2.069
800	441.134	350.333	7.488	131.093	104.406	2.223
850	456.178	362.213	7.785	138.919	110.619	2.367
900	470.899	373.828	8.077	146.319	116.491	2.505
950	485.453	385.303	8.366	153.408	122.112	2.637
1000	499.964	396.738	8.654	160.290	127.566	2.766

Tabulka č. 3.5/7: Množství ve vrtu MI-6 - nulová varianta

Čas [rok]	Množství ve vrtu MI-6 dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.006	0.003	0.000	0.001	0.000	0.000
150	0.748	0.575	0.009	0.004	0.001	0.000
200	6.105	4.817	0.080	0.015	0.006	0.000
250	17.369	13.802	0.245	0.047	0.023	0.000
300	31.445	25.017	0.465	0.137	0.083	0.001
350	45.924	36.541	0.700	0.345	0.232	0.004
400	59.988	47.741	0.933	0.743	0.529	0.010
450	73.394	58.423	1.159	1.403	1.031	0.020
500	86.276	68.691	1.380	2.395	1.796	0.035
550	98.695	78.585	1.597	3.775	2.869	0.057
600	110.608	88.069	1.810	5.574	4.275	0.086
650	122.026	97.147	2.018	7.787	6.012	0.122
700	133.045	105.898	2.222	10.381	8.055	0.165
750	143.812	114.437	2.424	13.304	10.361	0.214
800	154.487	122.893	2.626	16.502	12.888	0.268
850	165.218	131.385	2.831	19.928	15.598	0.327
900	176.136	140.018	3.039	23.554	18.469	0.389
950	187.356	148.886	3.254	27.374	21.496	0.455
1000	198.976	158.066	3.476	31.396	24.685	0.525

Tabulka č. 3.5/8: Koncentrace v Ploučnici - nulová varianta

Čas [rok]	Koncentrace v Ploučnici dle subvariant [mg/l]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.017	0.013	0.000	0.001	0.000	0.000
150	0.101	0.078	0.003	0.004	0.003	0.000
200	0.337	0.263	0.008	0.013	0.009	0.000
250	0.826	0.649	0.018	0.030	0.021	0.001
300	1.343	1.056	0.029	0.062	0.045	0.001
350	1.745	1.370	0.040	0.106	0.078	0.002
400	2.106	1.651	0.049	0.157	0.117	0.003
450	2.463	1.929	0.058	0.213	0.160	0.005
500	2.819	2.206	0.067	0.275	0.206	0.006
550	3.162	2.473	0.075	0.341	0.257	0.008
600	3.477	2.719	0.083	0.411	0.309	0.009
650	3.761	2.940	0.089	0.482	0.363	0.011
700	4.016	3.139	0.094	0.553	0.418	0.013
750	4.246	3.319	0.099	0.625	0.473	0.015
800	4.455	3.484	0.103	0.695	0.527	0.016
850	4.648	3.635	0.107	0.766	0.581	0.018
900	4.827	3.776	0.110	0.836	0.635	0.019
950	4.997	3.911	0.113	0.908	0.691	0.021
1000	5.159	4.040	0.116	0.983	0.749	0.023

Tabulka č. 3.5/9: Koncentrace v Ploučnici - nulová varianta

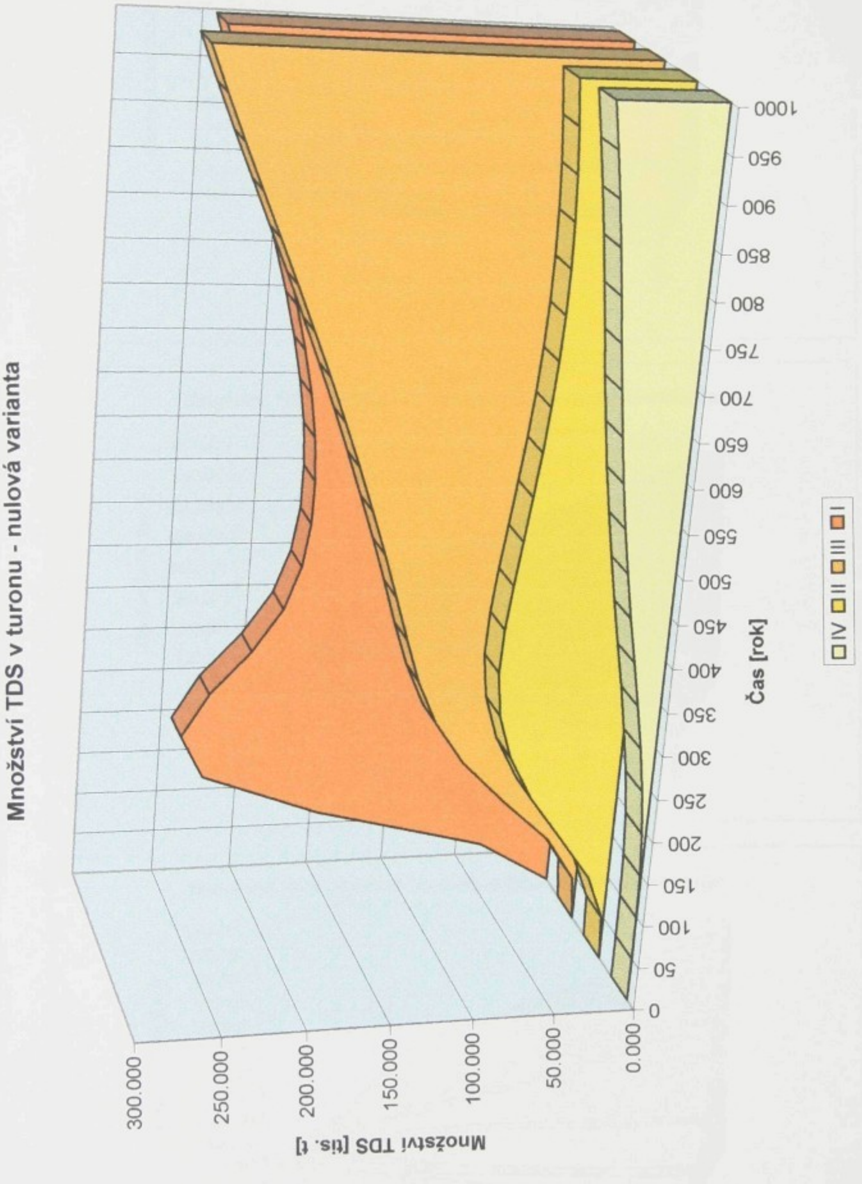
Čas [rok]	Koncentrace v Ploučnici dle subvariant [mg/l]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.018	0.014	0.000	0.001	0.000	0.000
150	0.108	0.083	0.003	0.004	0.003	0.000
200	0.301	0.235	0.008	0.013	0.009	0.000
250	0.595	0.465	0.015	0.028	0.020	0.001
300	0.973	0.761	0.024	0.052	0.037	0.001
350	1.404	1.099	0.035	0.084	0.061	0.002
400	1.858	1.453	0.046	0.126	0.092	0.003
450	2.316	1.811	0.057	0.178	0.131	0.004
500	2.764	2.161	0.067	0.239	0.177	0.006
550	3.186	2.490	0.077	0.307	0.229	0.007
600	3.573	2.793	0.085	0.381	0.285	0.009
650	3.921	3.066	0.093	0.458	0.344	0.011
700	4.231	3.309	0.100	0.536	0.404	0.013
750	4.508	3.526	0.105	0.614	0.464	0.015
800	4.757	3.723	0.110	0.692	0.524	0.016
850	4.985	3.902	0.115	0.769	0.583	0.018
900	5.196	4.069	0.118	0.846	0.643	0.020
950	5.393	4.225	0.122	0.924	0.703	0.021
1000	5.580	4.374	0.125	1.005	0.766	0.023

Tabulka č. 3.5/10: Množství v Ploučnici - nulová varianta

Čas [rok]	Množství v Ploučnici dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.039	0.029	0.001	0.002	0.001	0.000
150	0.268	0.206	0.007	0.011	0.007	0.000
200	1.028	0.799	0.025	0.040	0.027	0.001
250	2.893	2.265	0.066	0.108	0.076	0.002
300	5.924	4.648	0.133	0.248	0.178	0.005
350	9.864	7.741	0.222	0.488	0.355	0.011
400	14.619	11.468	0.333	0.842	0.619	0.018
450	20.180	15.822	0.464	1.324	0.979	0.029
500	26.545	20.802	0.616	1.946	1.445	0.043
550	33.684	26.385	0.785	2.717	2.025	0.060
600	41.535	32.523	0.972	3.644	2.723	0.082
650	50.026	39.161	1.172	4.732	3.544	0.107
700	59.094	46.249	1.386	5.981	4.488	0.136
750	68.681	53.743	1.610	7.392	5.555	0.169
800	78.740	61.608	1.843	8.962	6.744	0.206
850	89.233	69.814	2.085	10.691	8.055	0.246
900	100.131	78.341	2.334	12.579	9.490	0.290
950	111.412	87.170	2.590	14.630	11.050	0.338
1000	123.059	96.291	2.852	16.849	12.740	0.389

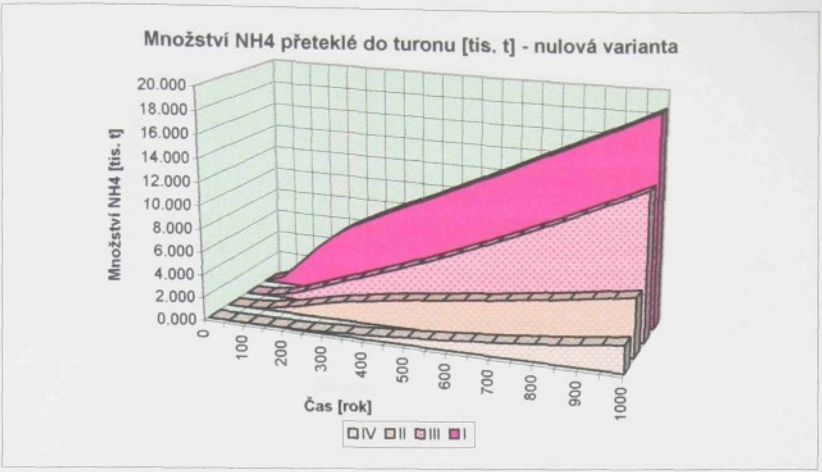
Tabulka č. 3.5/11: Množství v Ploučnici - nulová varianta

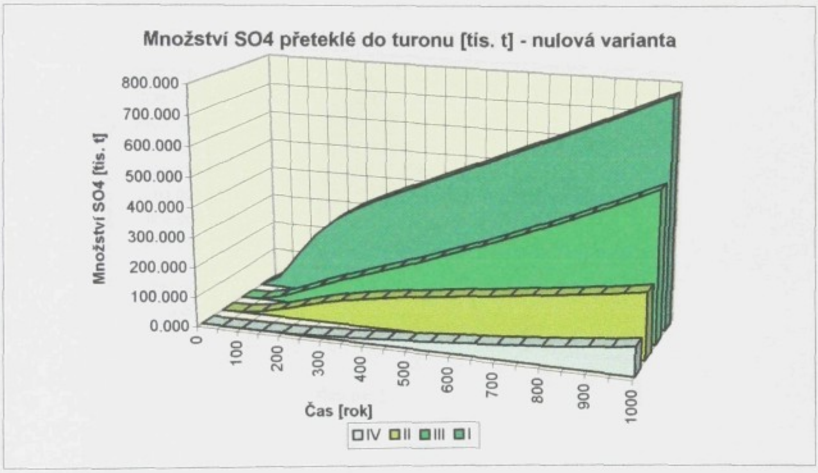
Čas [rok]	Množství v Ploučnici dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.042	0.032	0.001	0.002	0.001	0.000
150	0.286	0.220	0.008	0.011	0.008	0.000
200	0.966	0.749	0.025	0.041	0.028	0.001
250	2.309	1.799	0.060	0.105	0.073	0.002
300	4.506	3.517	0.115	0.222	0.157	0.005
350	7.676	5.997	0.193	0.413	0.295	0.010
400	11.871	9.278	0.297	0.698	0.503	0.016
450	17.101	13.367	0.425	1.101	0.800	0.026
500	23.341	18.245	0.576	1.640	1.200	0.039
550	30.533	23.868	0.749	2.334	1.717	0.055
600	38.600	30.174	0.942	3.195	2.362	0.075
650	47.452	37.096	1.152	4.229	3.139	0.100
700	57.005	44.566	1.377	5.439	4.051	0.129
750	67.183	52.528	1.615	6.826	5.099	0.162
800	77.924	60.933	1.864	8.389	6.281	0.198
850	89.179	69.742	2.122	10.125	7.597	0.239
900	100.910	78.928	2.390	12.036	9.048	0.284
950	113.087	88.468	2.665	14.123	10.636	0.333
1000	125.686	98.343	2.947	16.391	12.365	0.385

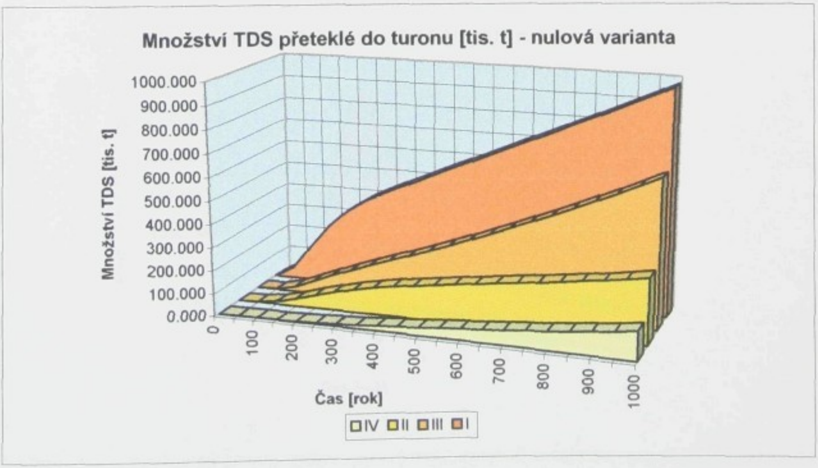


Množství TDS v turonu - nulová varianta
Množství TDS [tis. t]
0.000
50.000
100.000
150.000
200.000
250.000
300.000
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
Čas [rok]
IV
II
III
I

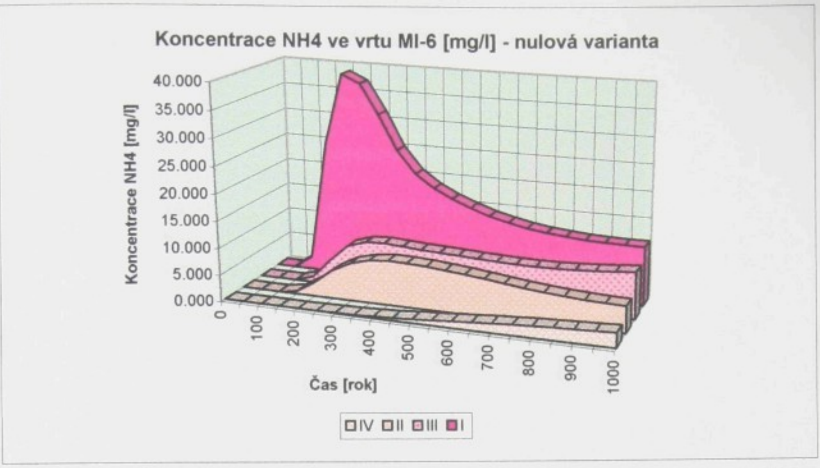
Obr. č. 3.5/3

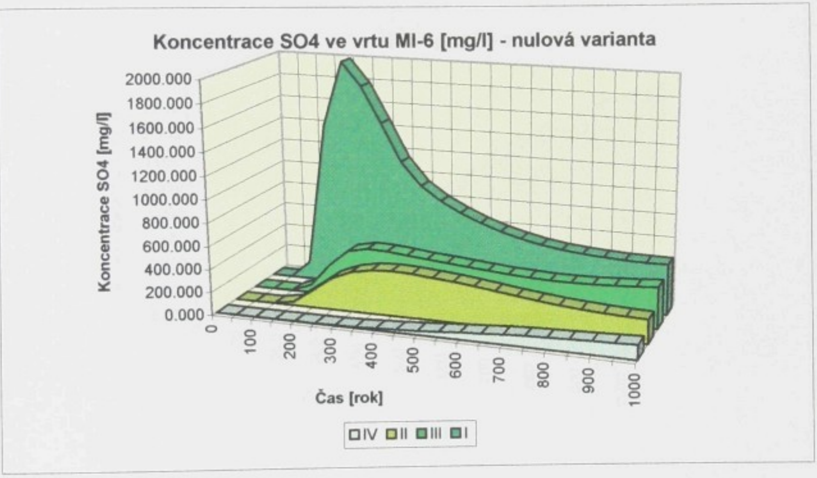

Množství NH4 přeteklé do turonu [tis. t] - nulová varianta
Množství NH4 [tis. t]
20.000
18.000
16.000
14.000
12.000
10.000
8.000
6.000
4.000
2.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

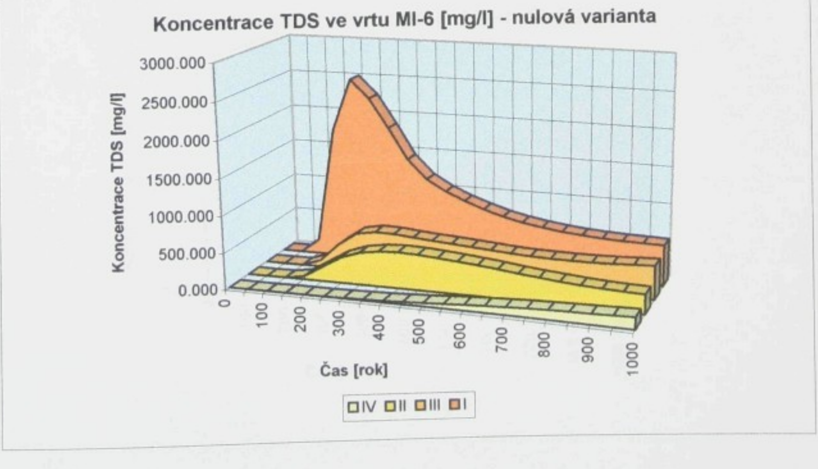

Množství SO4 přeteklé do turonu [tis. t] - nulová varianta
Množství SO4 [tis. t]
800.000
700.000
600.000
500.000
400.000
300.000
200.000
100.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I


Množství TDS přeteklé do turonu [tis. t] - nulová varianta
Množství TDS [tis. t]
1000.000
900.000
800.000
700.000
600.000
500.000
400.000
300.000
200.000
100.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

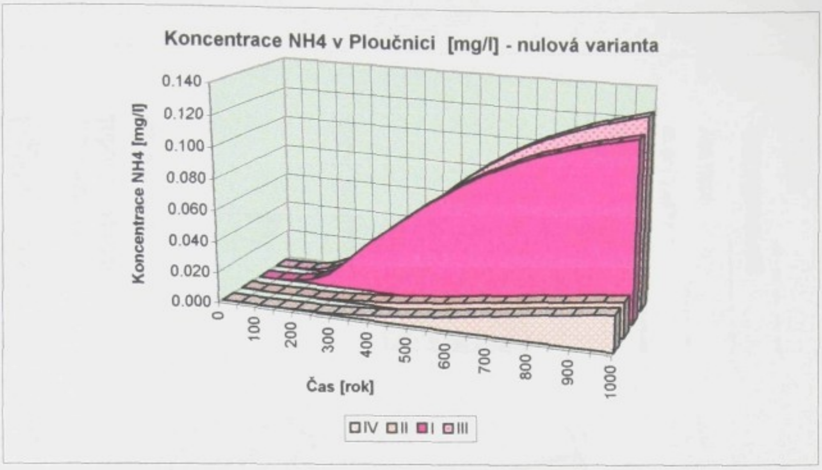
Obr. č. 3.5/4

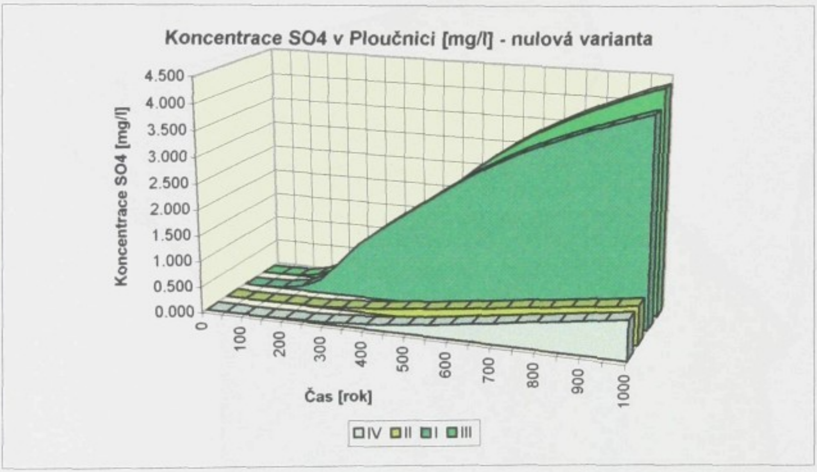

Koncentrace NH4 ve vrtu MI-6 [mg/l] - nulová varianta
Koncentrace NH4 [mg/l]
40.000
35.000
30.000
25.000
20.000
15.000
10.000
5.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

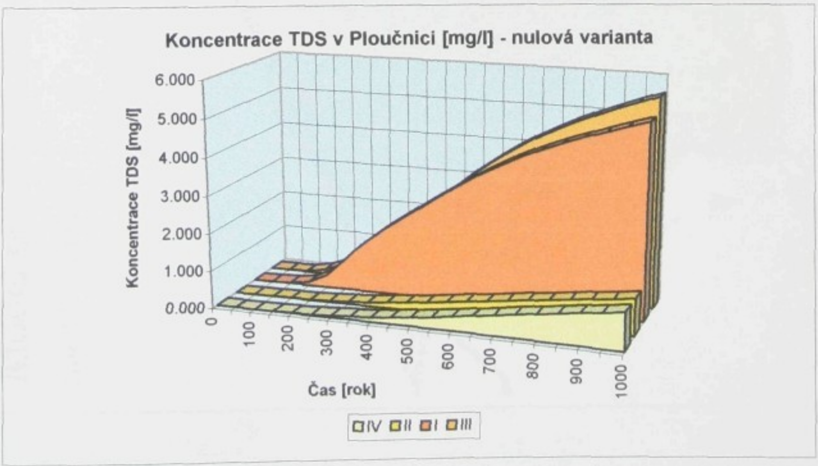

Koncentrace SO4 ve vrtu MI-6 [mg/l] - nulová varianta
Koncentrace SO4 [mg/l]
2000.000
1800.000
1600.000
1400.000
1200.000
1000.000
800.000
600.000
400.000
200.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I


Koncentrace TDS ve vrtu MI-6 [mg/l] - nulová varianta
Koncentrace TDS [mg/l]
3000.000
2500.000
2000.000
1500.000
1000.000
500.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

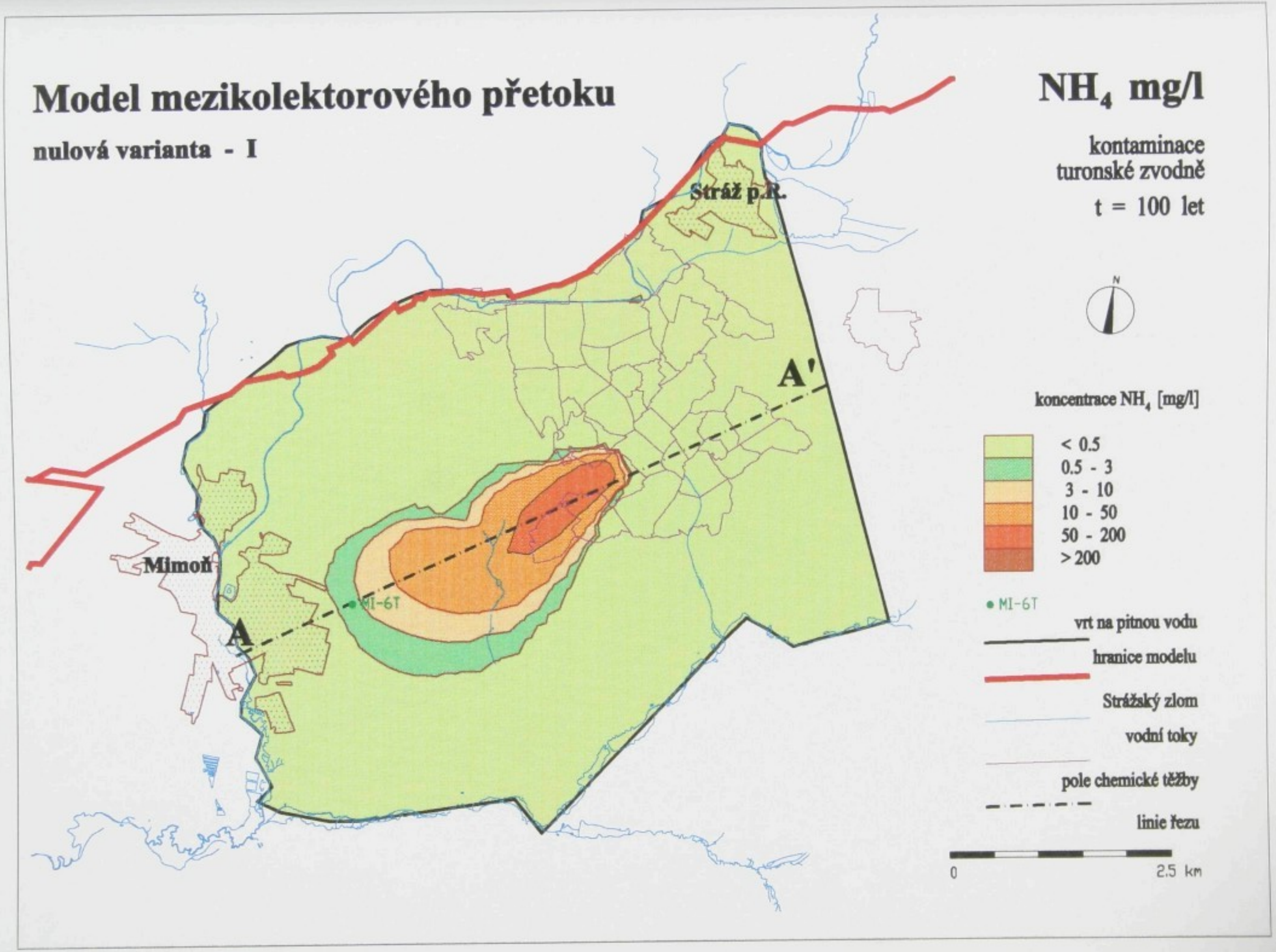
Obr. č. 3.5/5


Koncentrace NH4 v Ploučnici [mg/l] - nulová varianta
Koncentrace NH4 [mg/l]
0.140
0.120
0.100
0.080
0.060
0.040
0.020
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III

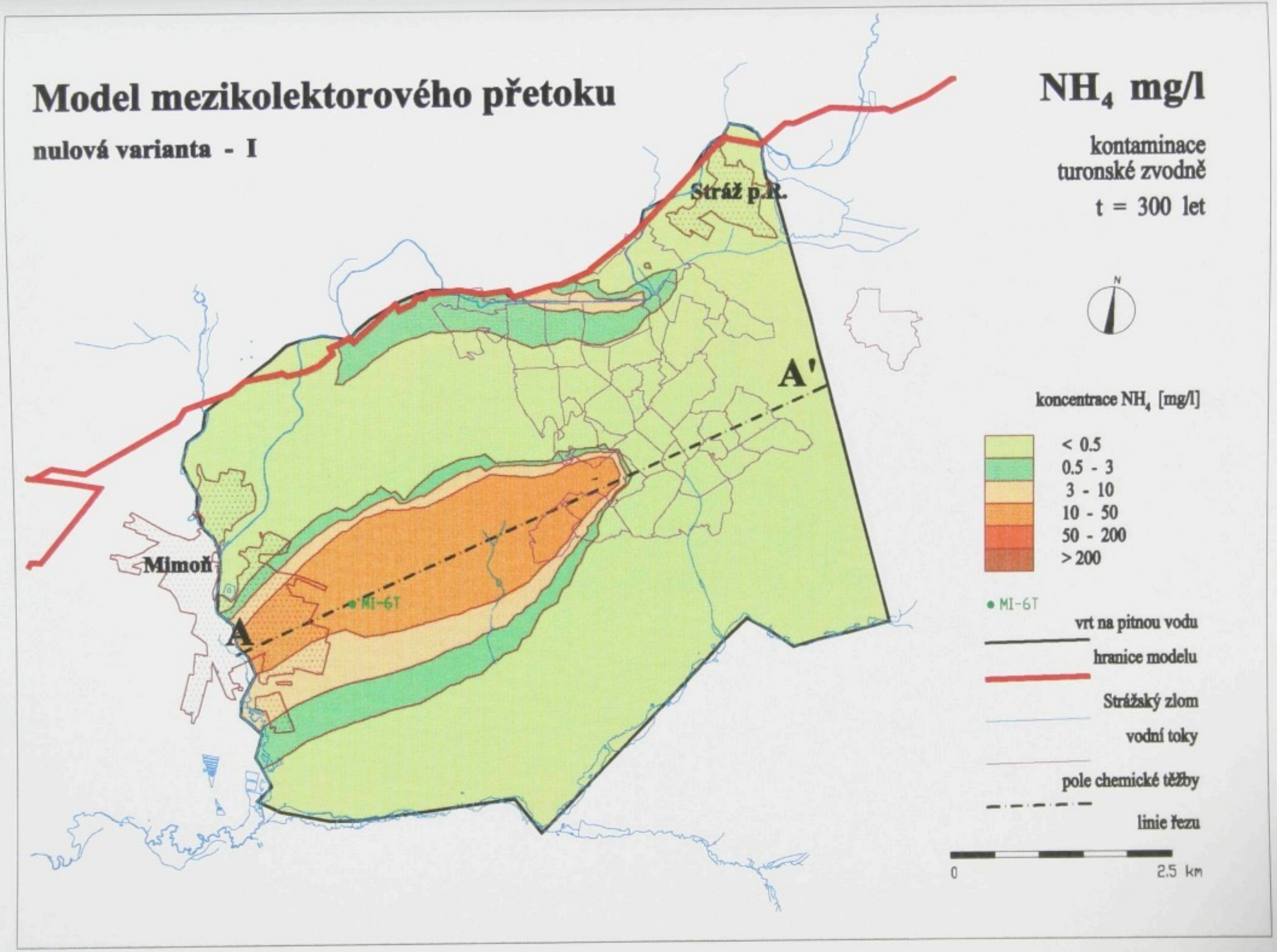

Koncentrace SO4 v Ploučnici [mg/l] - nulová varianta
Koncentrace SO4 [mg/l]
4.500
4.000
3.500
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
0.500
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III


Koncentrace TDS v Ploučnici [mg/l] - nulová varianta
Koncentrace TDS [mg/l]
6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III

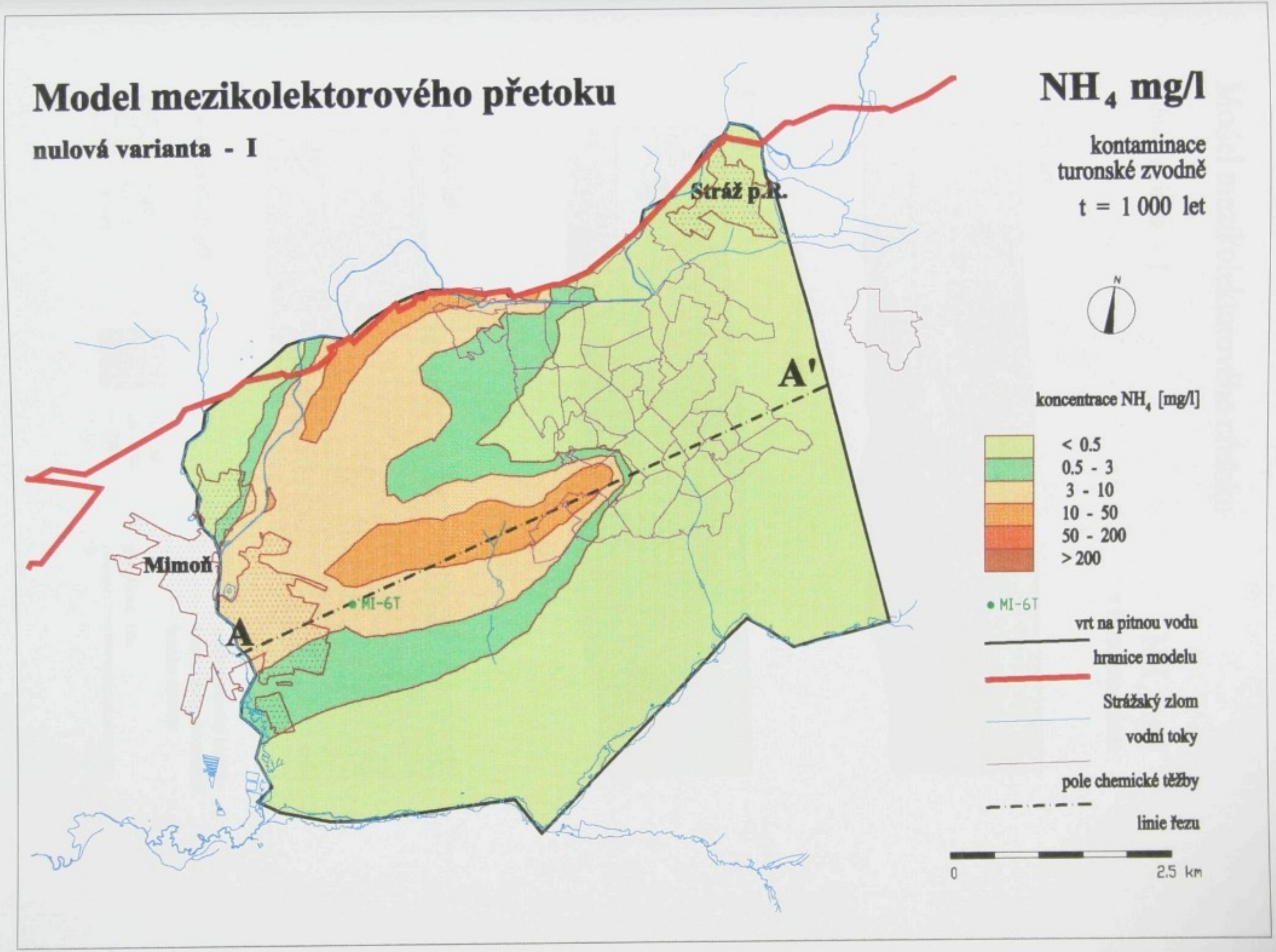
Obr. č. 3.5/6


Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - I
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 100 let
N
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'

Obr. č. 3.5/7


Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - I
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/8



Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - I
NH_4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
Stráž p.R.
A'
A
Mimoň
MI-6T
koncentrace NH_4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

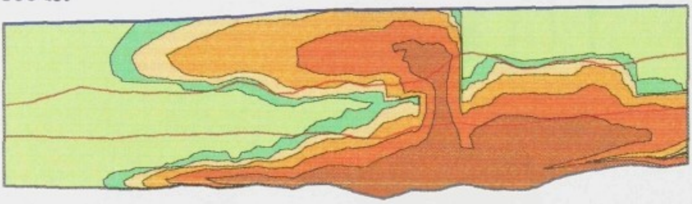
Obr. č. 3.5/9

Model mezikolektorového přetoku

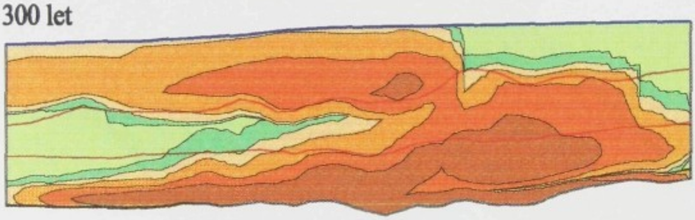
nulová varianta - I

NH_4 mg/l
v řezu modelem

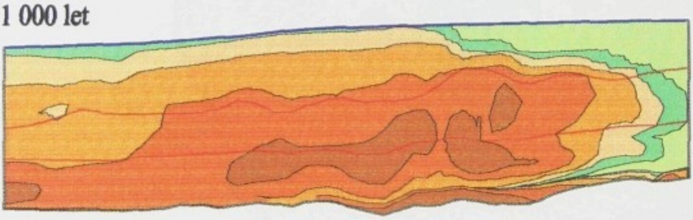
t = 100 let



t = 300 let



t = 1 000 let



koncentrace NH_4 [mg/l]

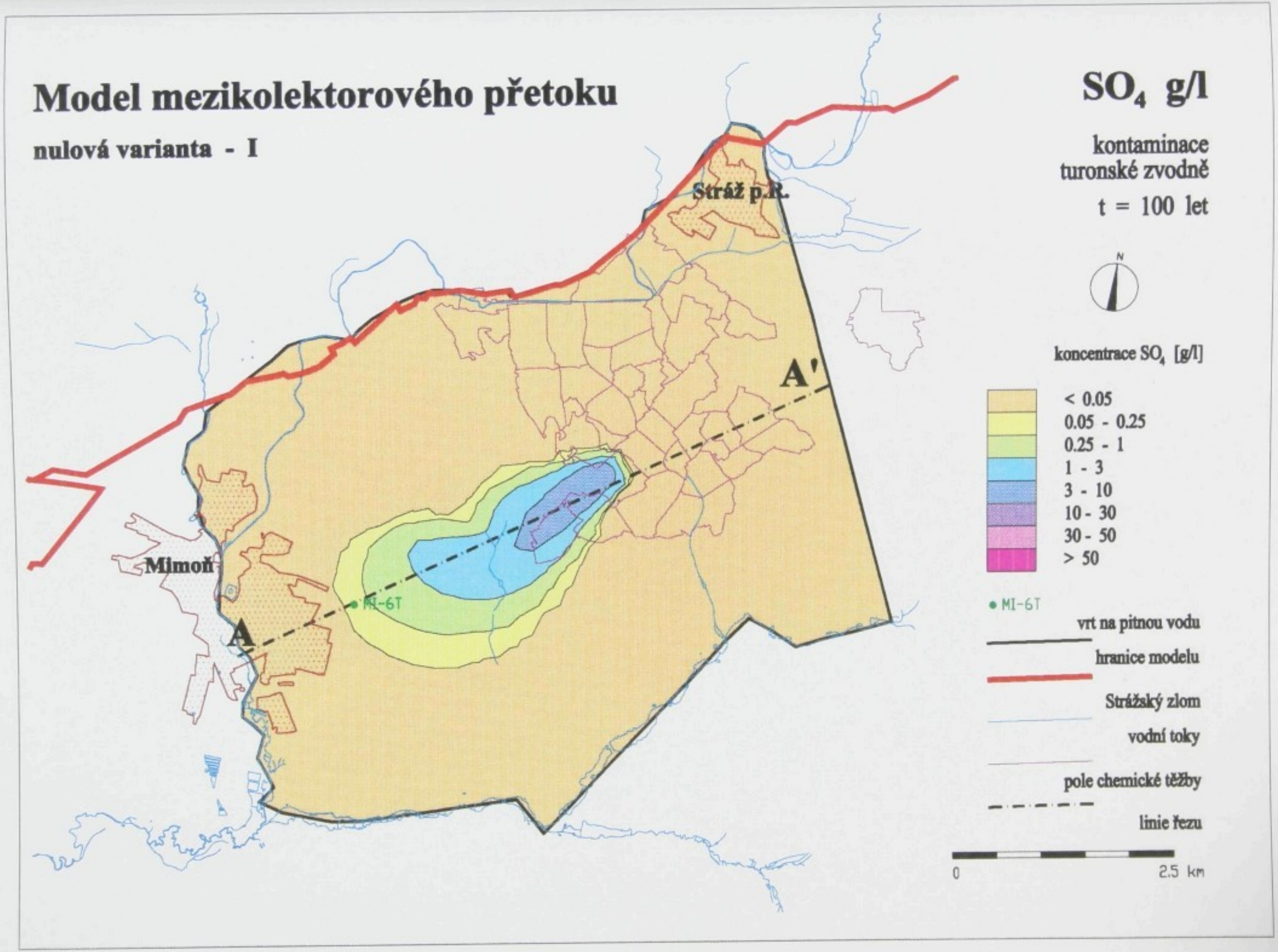
- < 0.5
- 0.5 - 3
- 3 - 10
- 10 - 50
- 50 - 200
- > 200

spodnoturonský izolátor
hladina turonské zvodně
hranice modelu

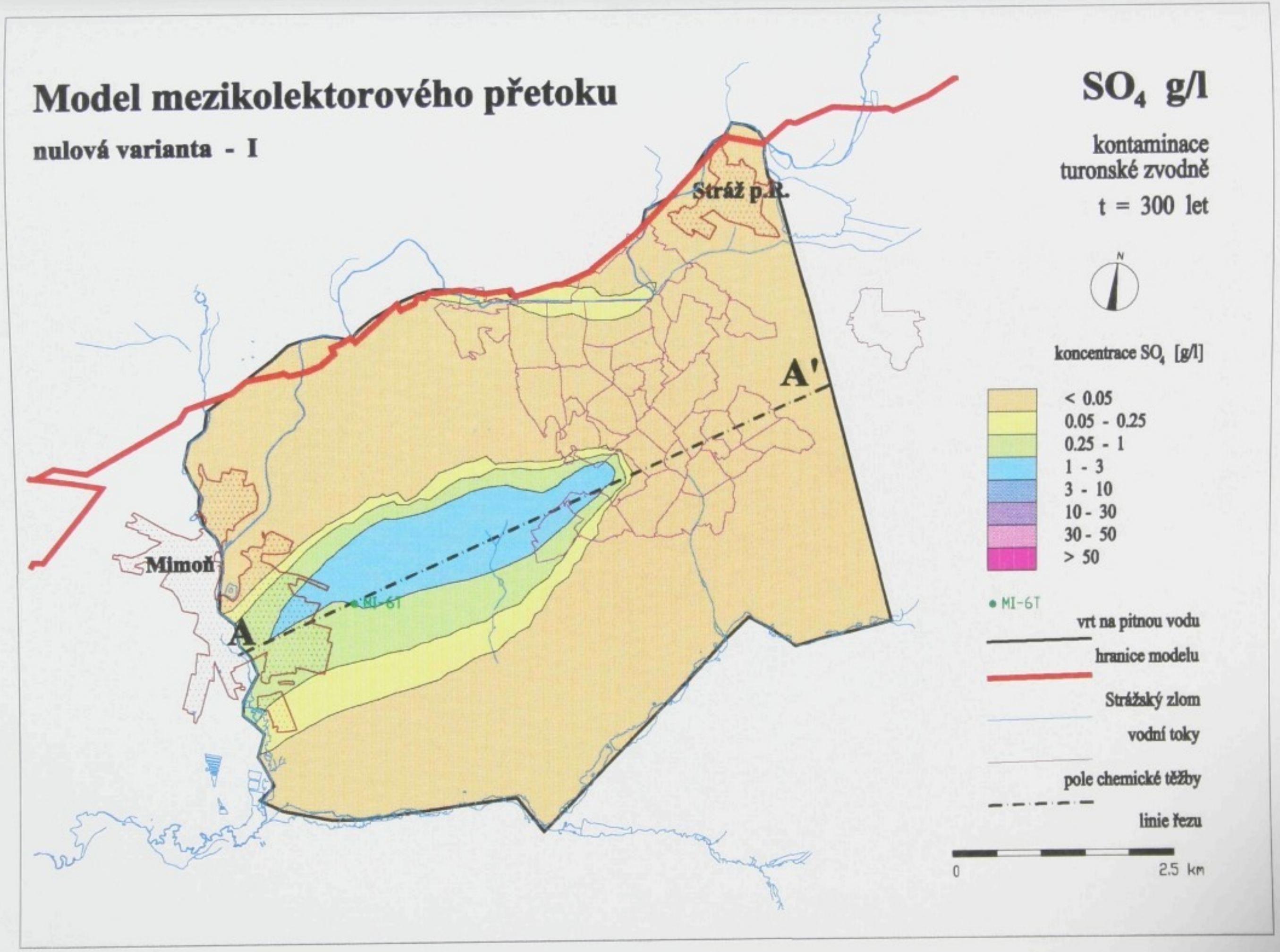
převýšeno 10x

0 2.5 km

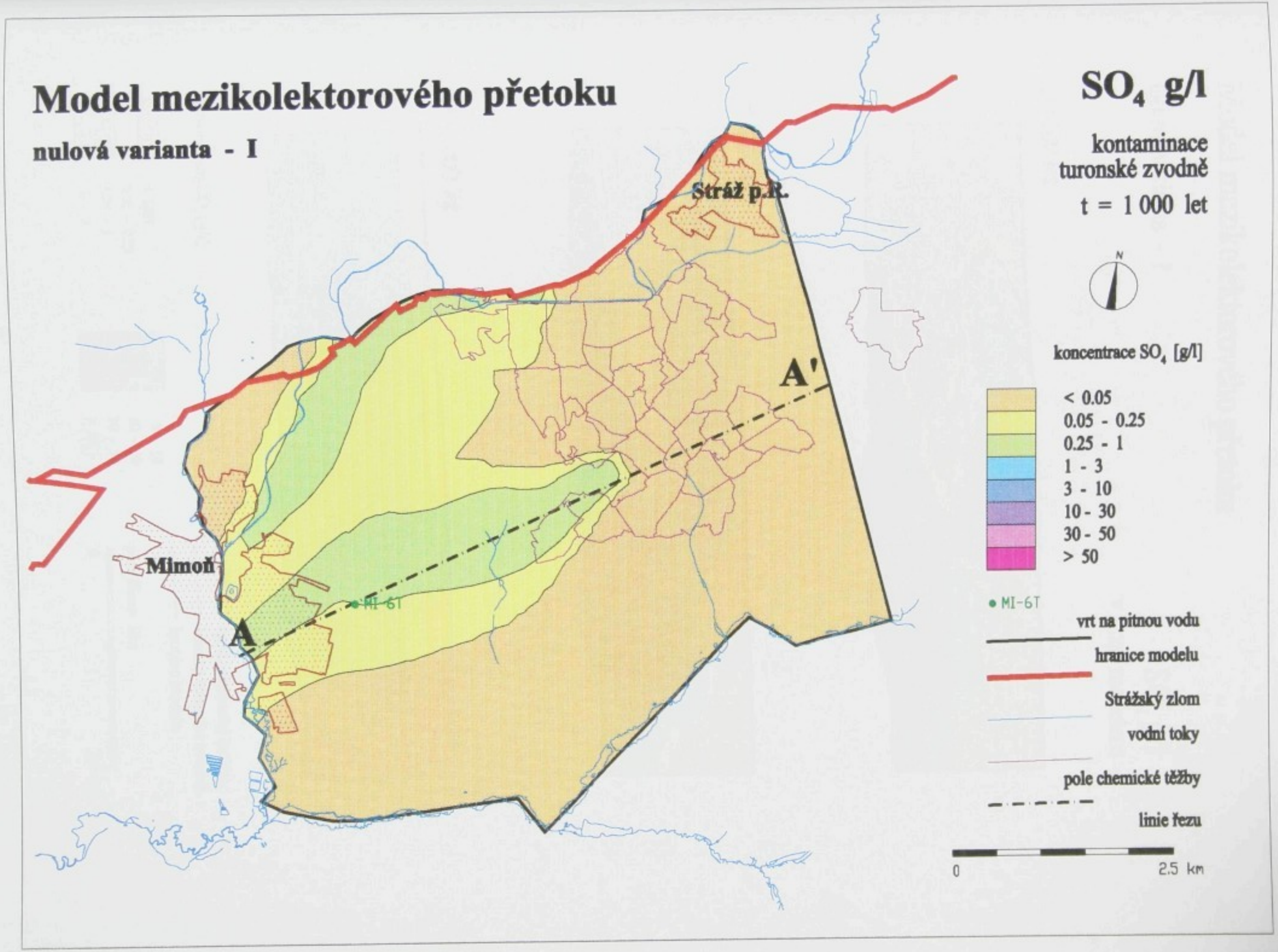
Obr. č. 3.5/10


Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - I
SO$_4$ g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 100 let
N
koncentrace SO$_4$ [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'

Obr. č. 3.5/11


Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - I
SO_4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
N
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/12

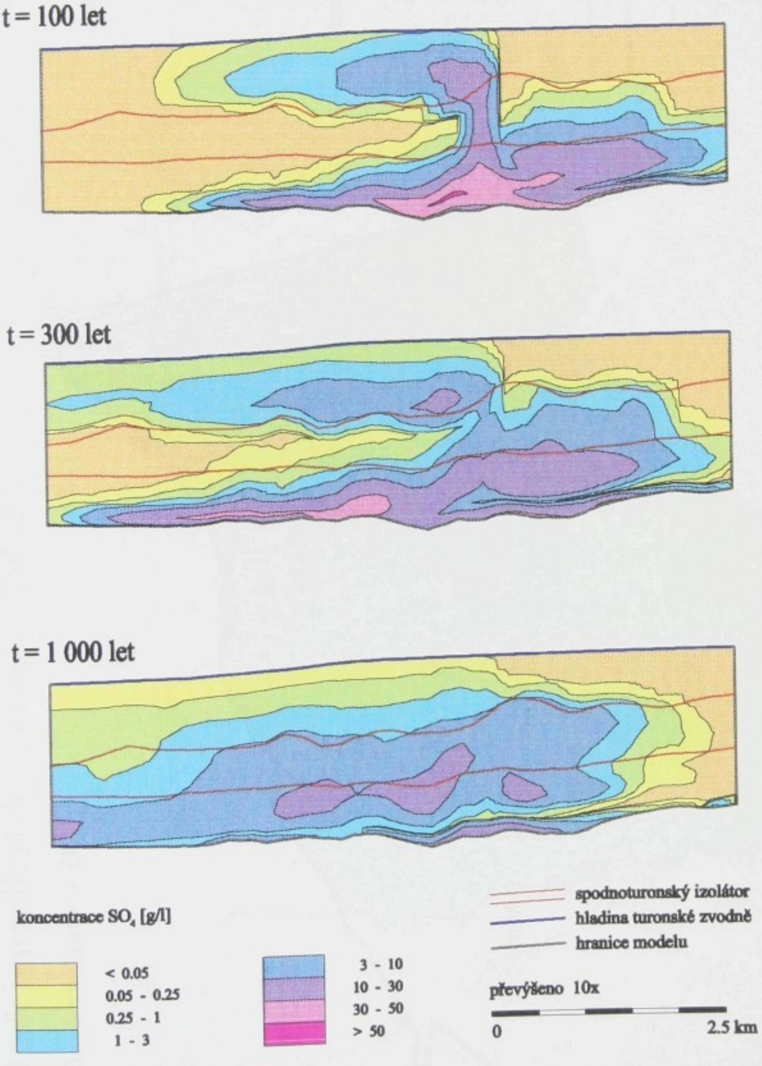

Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - I
SO_4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/13

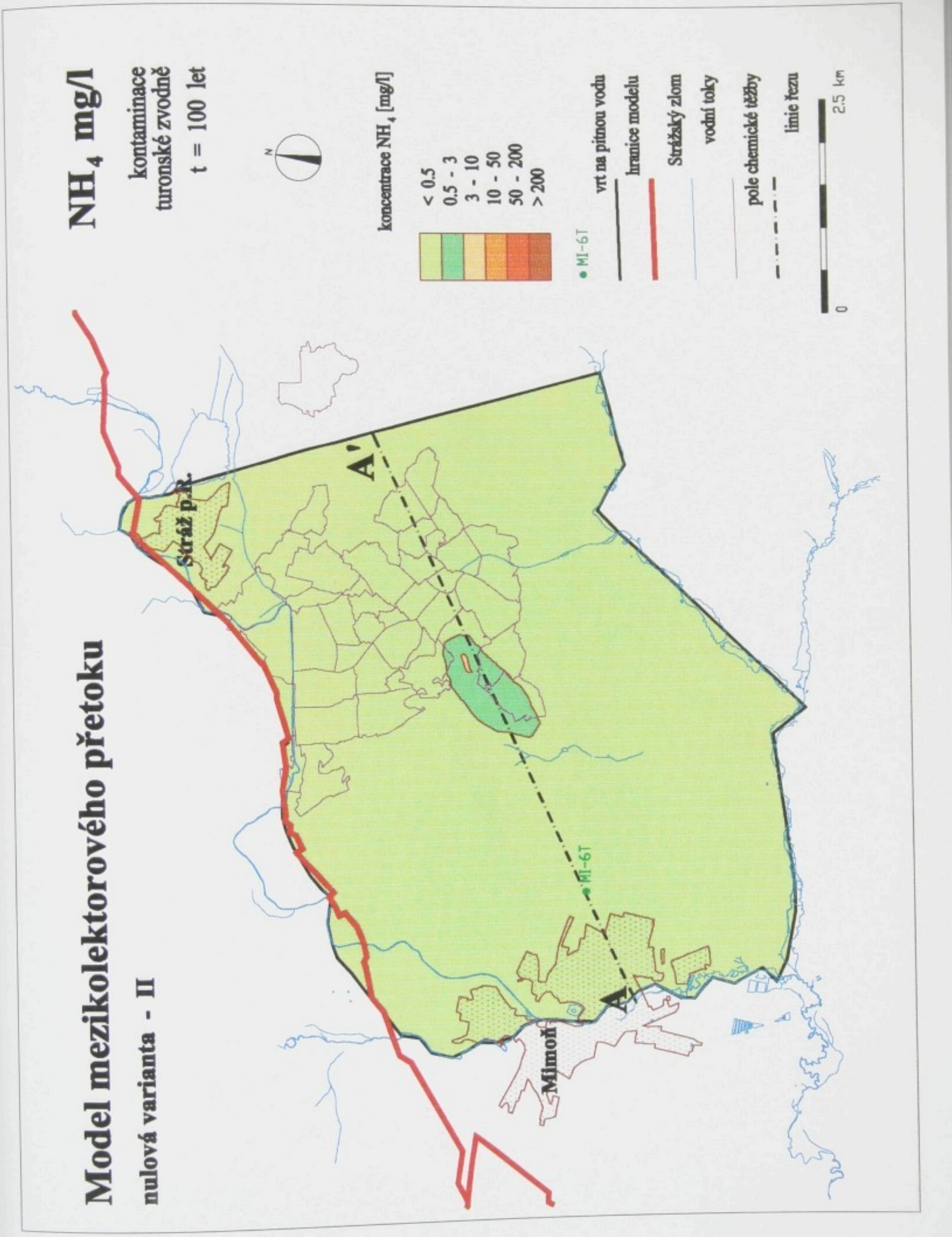
Model mezikolektorového přetoku

nulová varianta - I

SO_4 g/l
v řezu modelem

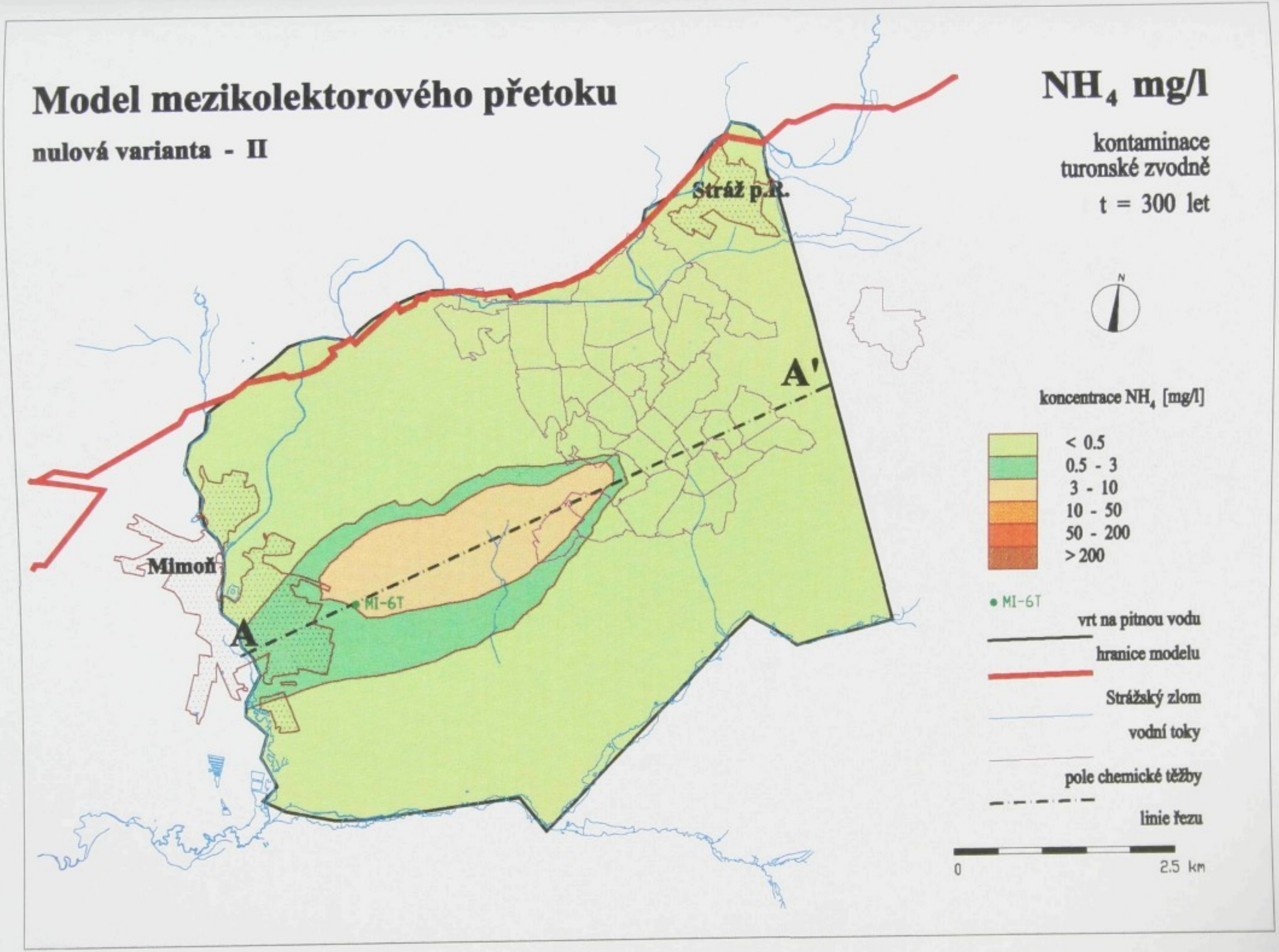


Obr. č. 3.5/14



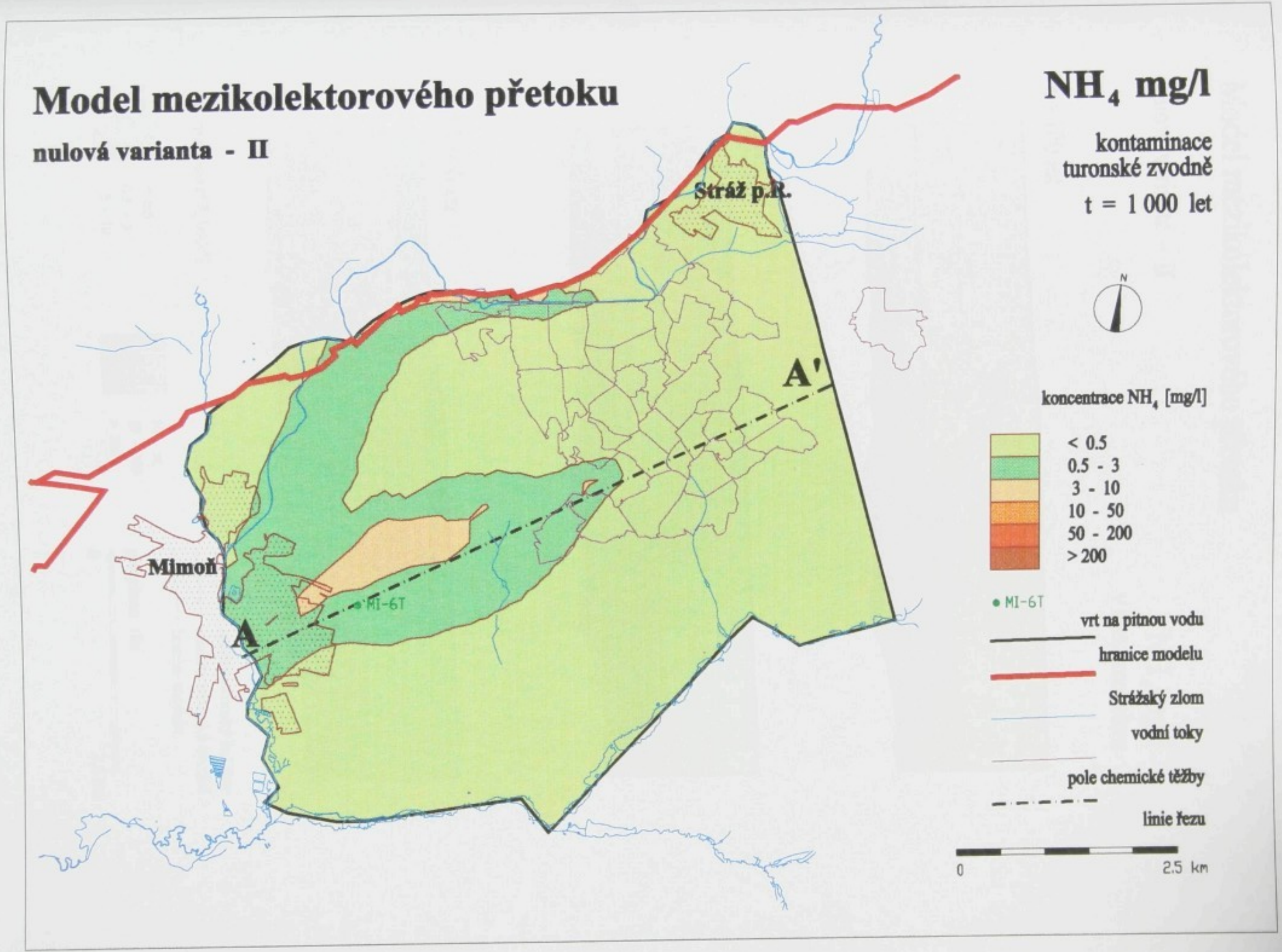
Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - II
NH$_4$ mg/l
kontaminace turonské zvodně
t = 100 let
N
koncentrace NH$_4$ [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
A'
MI-6T
A
Mimoň

Obr. č. 3.5/15



Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - II
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/16

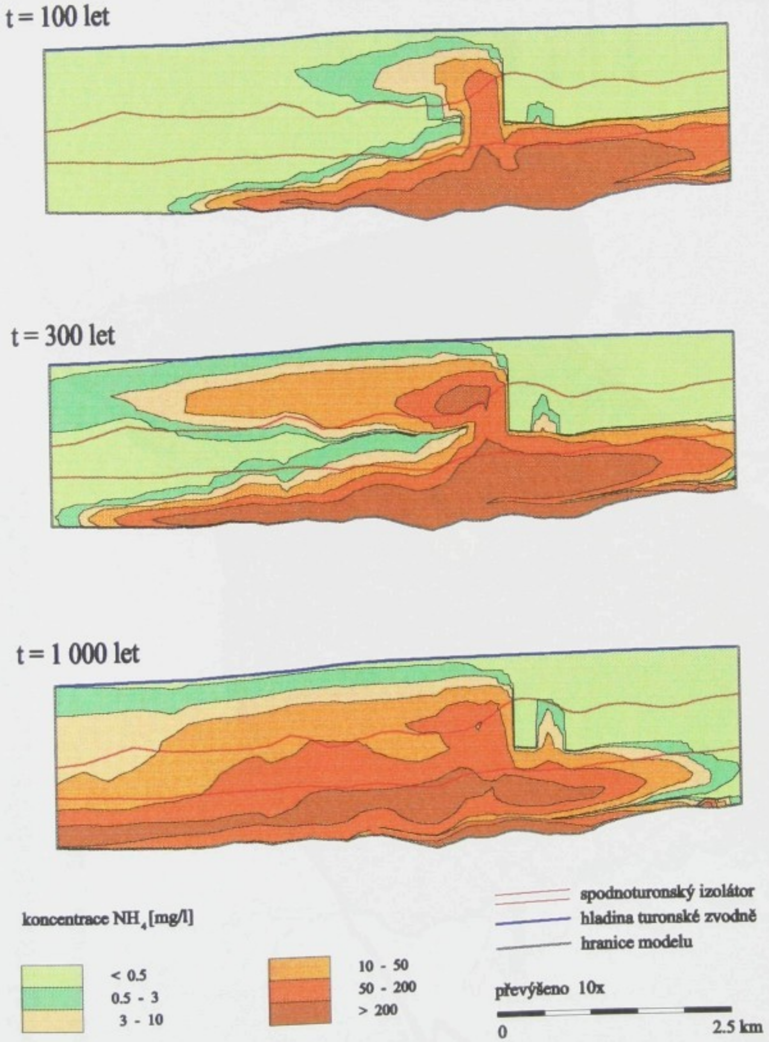

Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - II
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'

Obr. č. 3.5/17

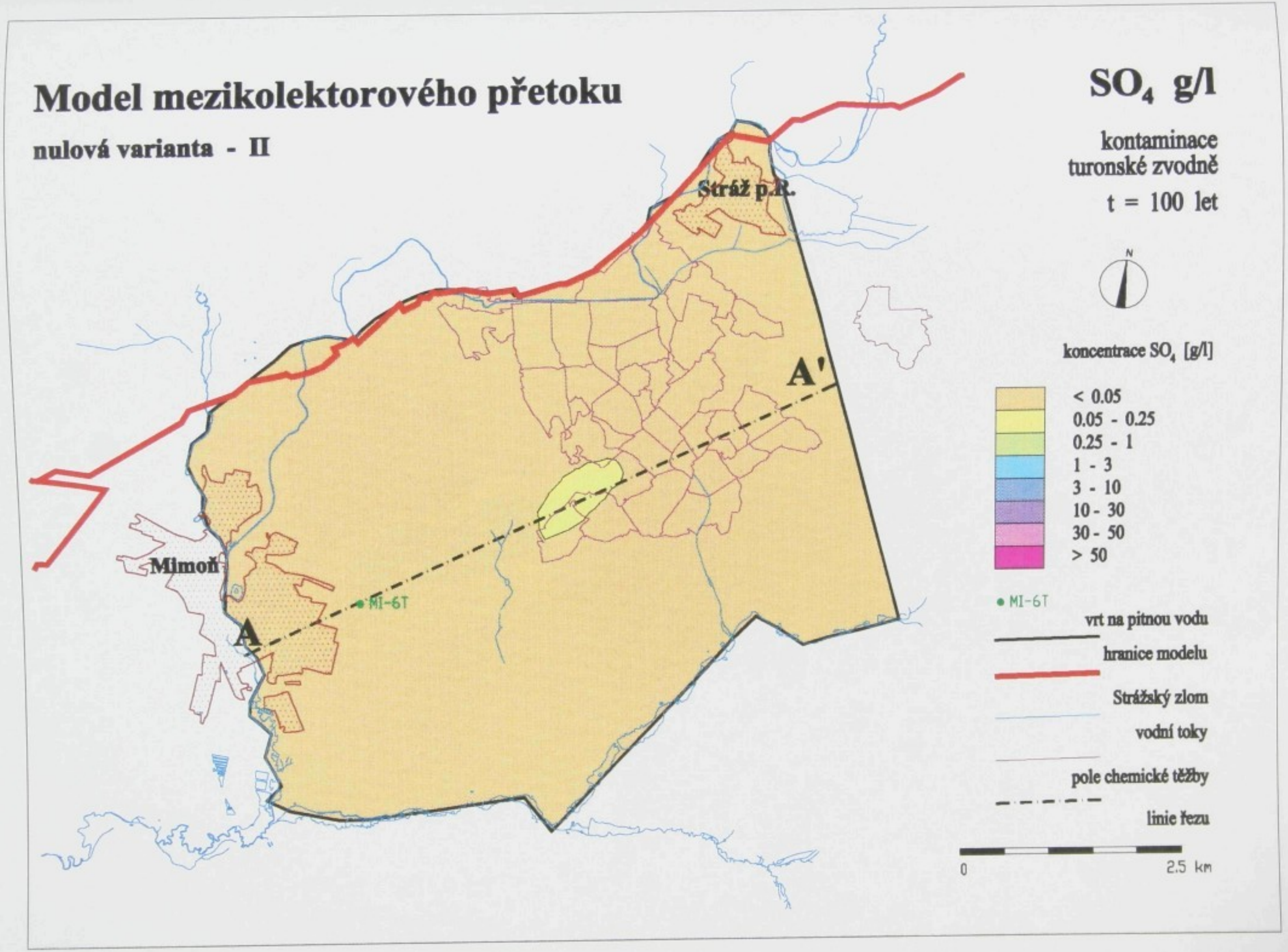
Model mezikolektorového přetoku

nulová varianta - II

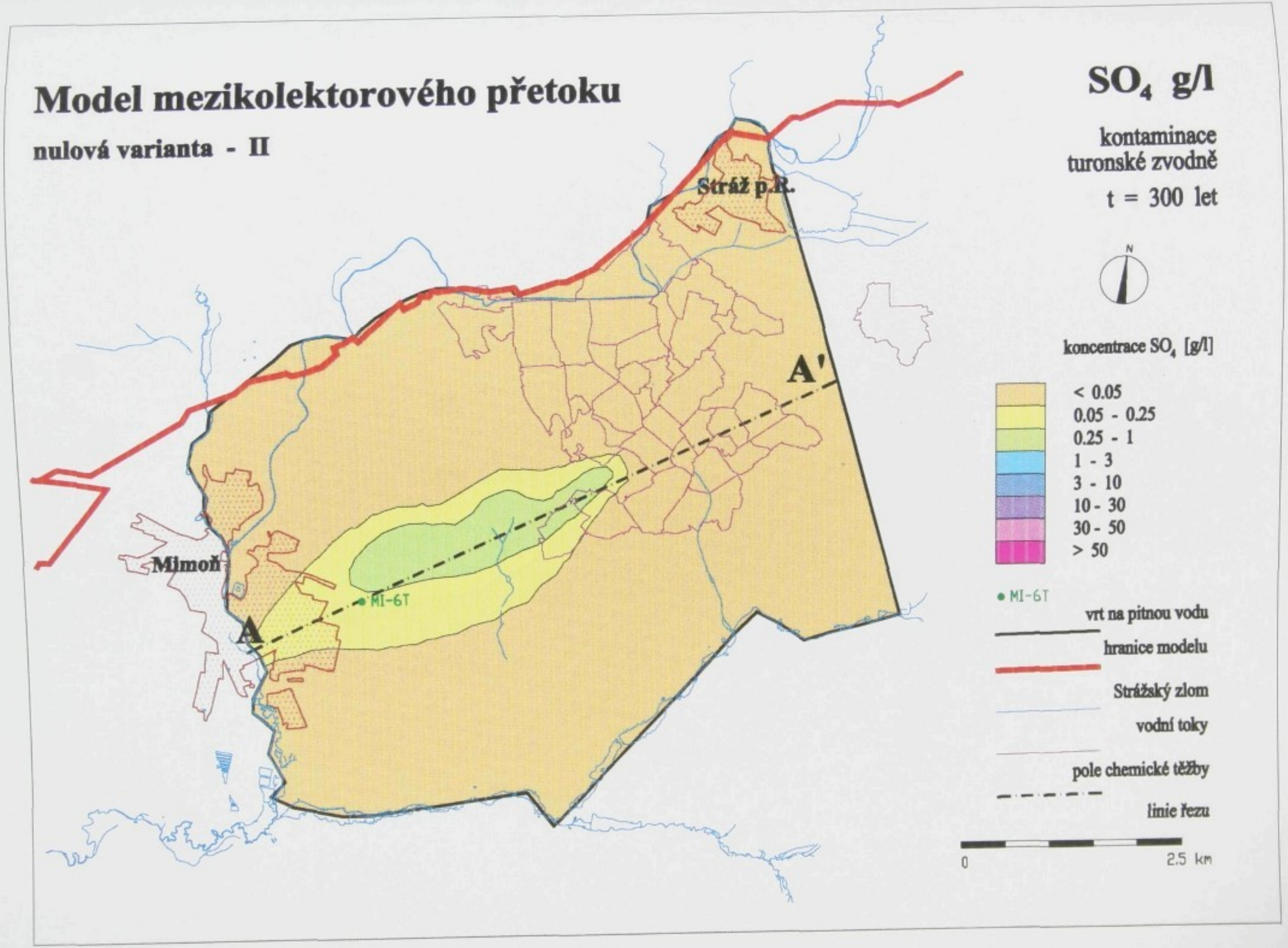
NH_4 mg/l
v řezu modelem



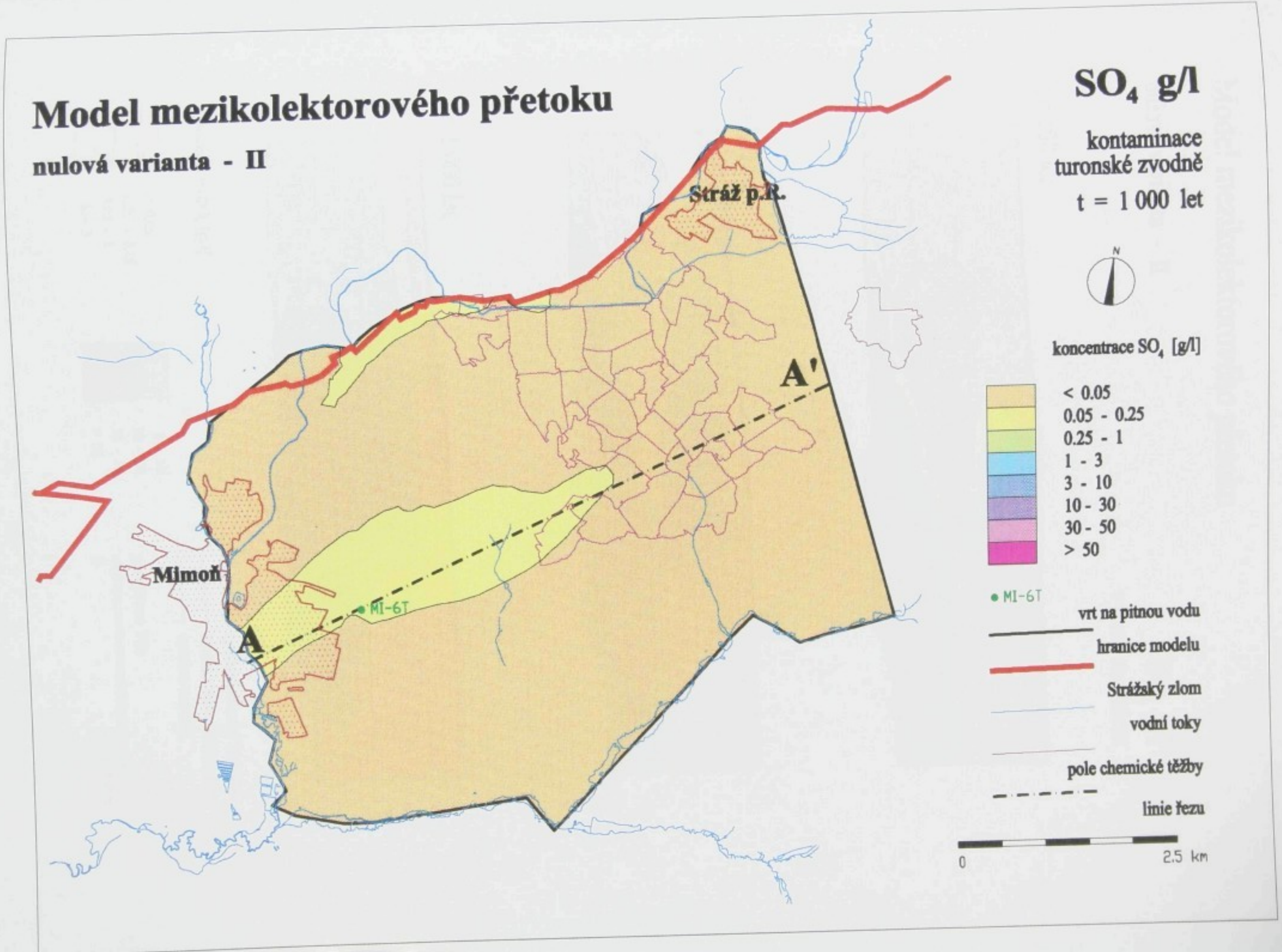
Obr. č. 3.5/18


Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - II
SO_4 g/l
kontaminace turonské zvodně
t = 100 let
N
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/19


Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - II
SO_4 g/l
kontaminace turonské zvodně
t = 300 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/20

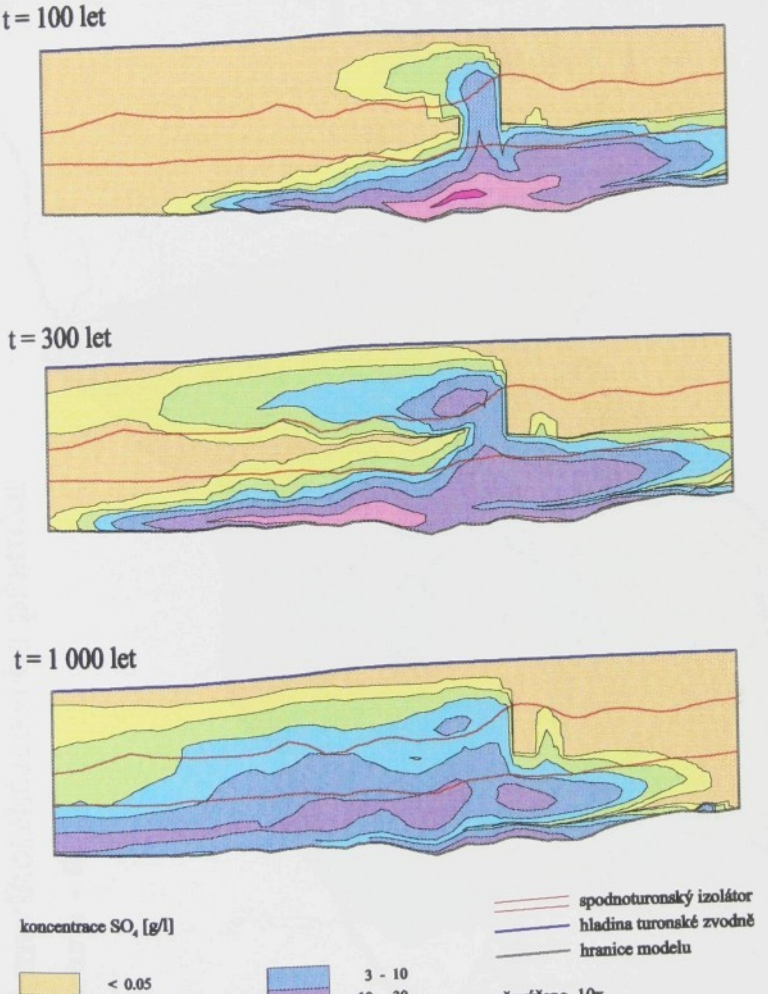

Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - II
SO_4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/

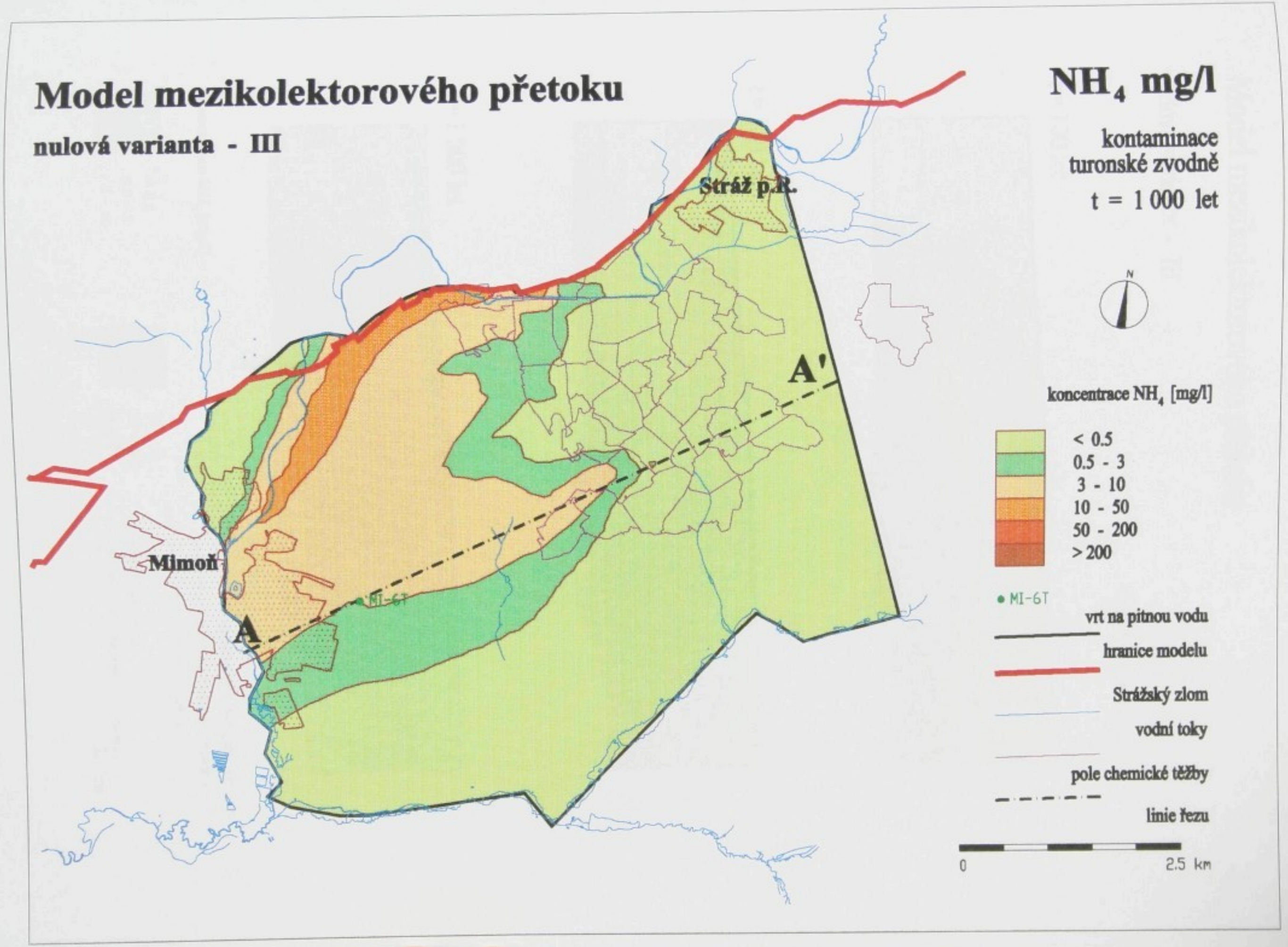
Model mezikolektorového přetoku

nulová varianta - II

SO_4 g/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/22

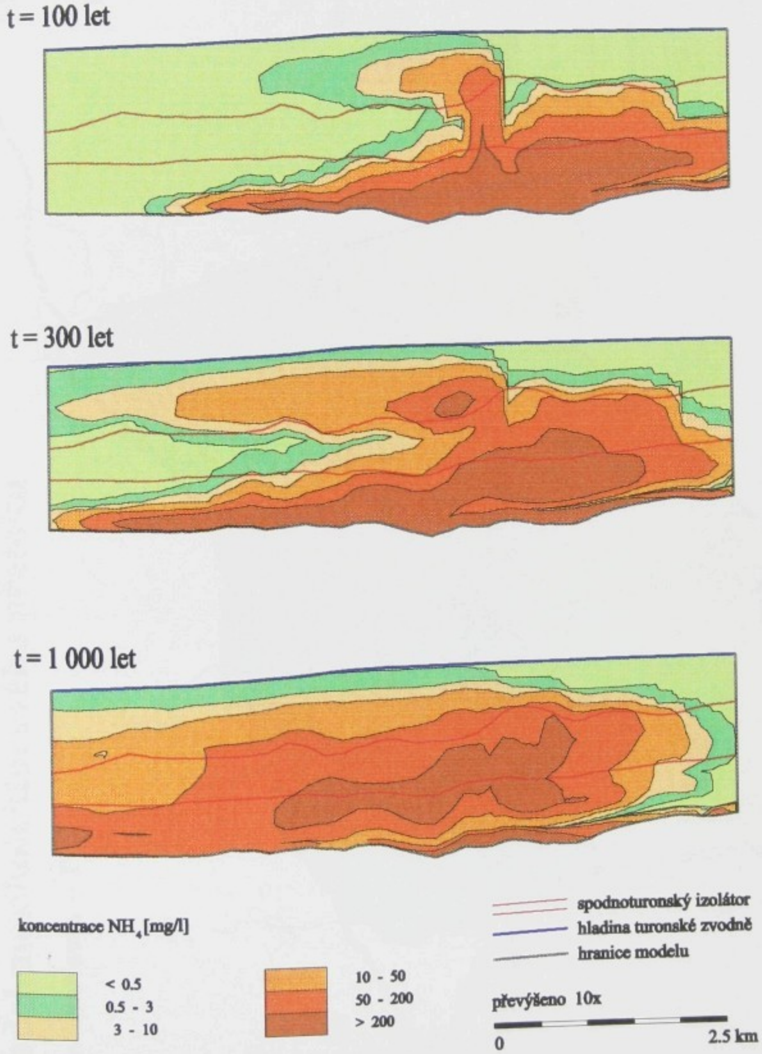

Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - III
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'

Obr. č. 3.5/23

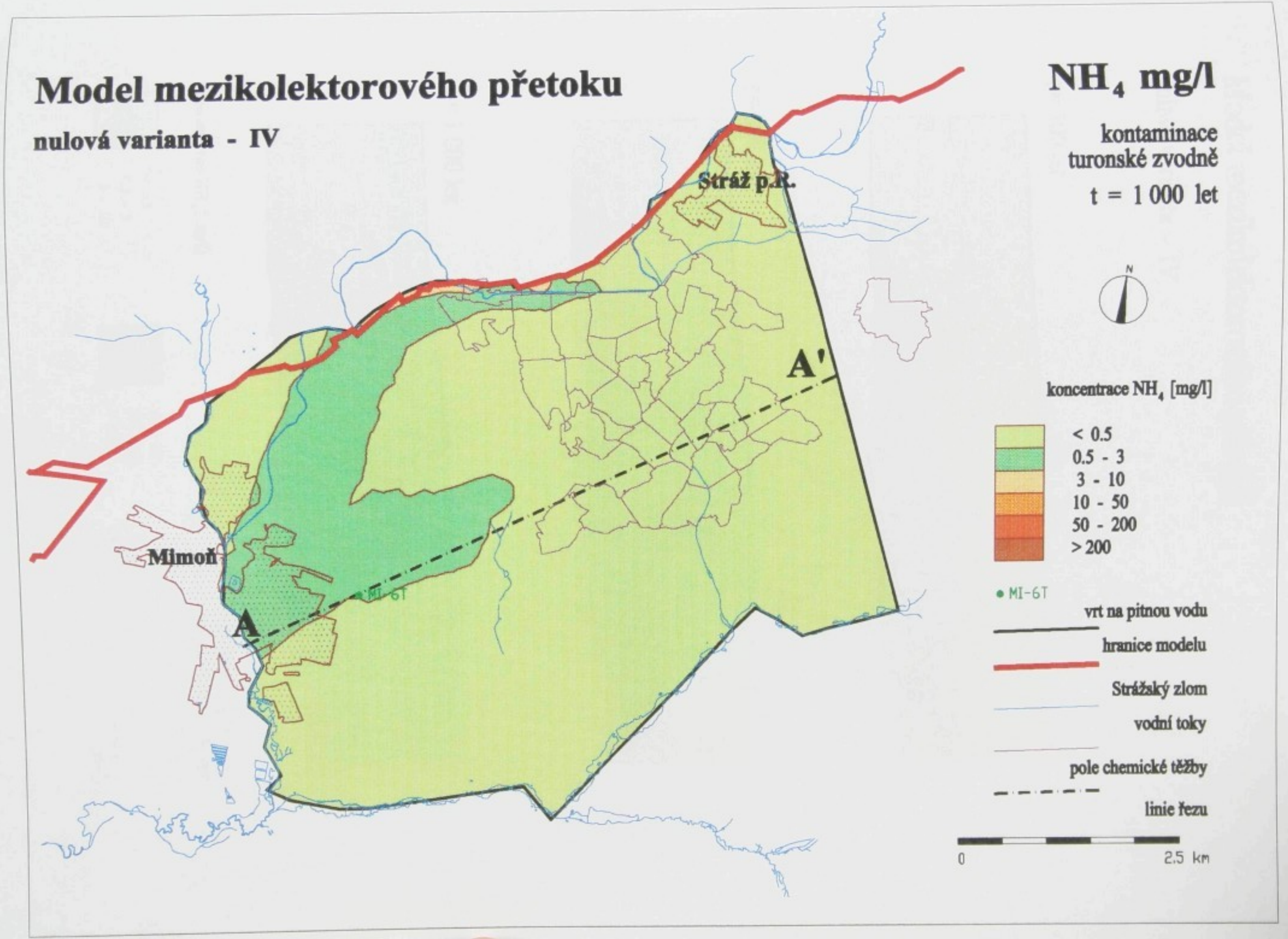
Model mezikolektorového přetoku

nulová varianta - III

NH$_4$ mg/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/

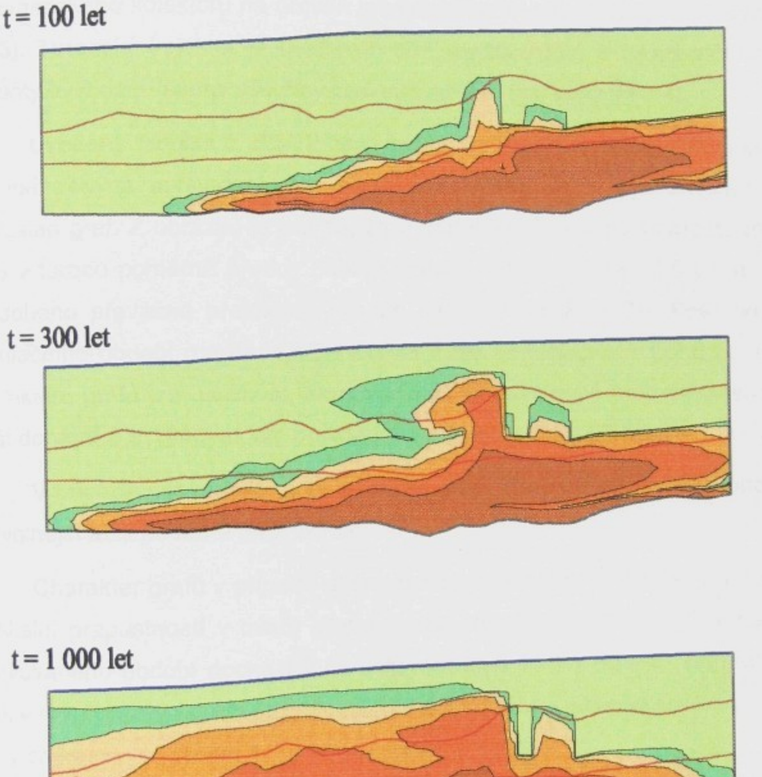

Model mezikolektorového přetoku
nulová varianta - IV
NH_4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace NH_4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/

Model mezikolektorového přetoku

nulová varianta - IV

NH_4 mg/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/2

podstatně snížena, je přetok v tomto místě stále patrný a významný (viz obr. č. 3.5/24 a 3.5/26).

3.5.2 Sanační varianta – 10 g/l TDS

Sanační varianta - 10 g/l TDS je charakterizována počátečním rozložením koncentrací kontaminantů v cenomanu odpovídajícím stavu po vyčištění cenomanského kolektoru na úroveň průměrné koncentrace 10 g/l TDS (viz sekce 3.3.3). Turonský kolektor je uvažován bez kontaminace. V rámci simulace této varianty byly opět řešeny všechny čtyři subvarianty (viz kapitola 3.4).

Uvedená tabulka č. 3.5/12 zachycuje množství TDS v turonském kolektoru dle jednotlivých subvariant. Na obrázku č. 3.5/27 je z uvedených výsledků vykreslen graf. Z obrázku je patrné, že v případě subvarianty I naroste množství TDS v turonu poměrně prudce během prvních 200 let až na 72,5 tis. tun. To je způsobeno převážně přetokem v místě mezi VP-15 a VP-20. Poté po zbytek simulačního období množství TDS zvolna roste až k hodnotě 127,6 tis. tun. Dle charakteru grafu lze usuzovat, že maximální hodnoty bude opět dosaženo až po delší době než je 1000 let, ale pravděpodobně nepřevýší 140 tis. tun.

V případě subvarianty II je charakter grafu obdobný, jen nárůst množství je pozvolnější až k hodnotě 34,7 tis. tun.

Charakter grafů v případě alternativních subvariant III a IV je dán sníženou vertikální propustností v místě přetoku mezi VP-15 a VP-20. V průběhu celého simulovaného období dochází k nárůstu množství TDS v turonu. Tento nárůst je však v prvních 200 letech pozvolnější, ve srovnání se subvariantami I a II, ale má trvalý charakter po celých 1000 let simulace.

V tabulkách č. 3.5/13 a 3.5/14 je uvedeno množství jednotlivých kontaminantů, které se rozšíří během sledovaného období z cenomanu do turonu v případě jednotlivých subvariant. Množství látek je v závislosti na čase zachyceno v grafech na obrázku č. 3.5/28. Z tabulek vyplývá, že za 1000 let přeteče z cenomanu do turonu v případě pesimistického scénáře pro tuto sanační variantu (subvarianta I) téměř 440 tis. tun TDS, což je téměř 27% z uvažovaného počátečního množství rozpuštěných látek v cenomanu. Tento relativní nárůst oproti nulové variantě je způsoben odlišným charakterem počátečního rozložení

Tabulka 3.5/12: Množství TDS v turonu dle subvariant
– sanační varianta – 10 g/l TDS

Čas [rok]	Množství TDS v turonu dle subvariant [tis. t]			
	I	II	III	IV
0	0,000	0,000	0,000	0,000
50	9,712	0,380	0,756	0,011
100	42,019	2,593	5,340	0,100
150	67,786	7,519	15,174	0,356
200	72,571	13,654	26,013	0,866
250	71,766	18,172	35,015	1,705
300	72,901	20,856	43,338	2,904
350	76,368	22,765	52,059	4,454
400	81,491	24,465	61,220	6,319
450	87,167	26,043	70,506	8,452
500	92,777	27,470	79,560	10,789
550	98,086	28,706	88,128	13,257
600	103,018	29,728	96,073	15,777
650	107,550	30,544	103,334	18,273
700	111,675	31,190	109,893	20,685
750	115,391	31,722	115,757	22,969
800	118,695	32,202	120,951	25,103
850	121,581	32,693	125,504	27,088
900	124,039	33,252	129,447	28,942
950	126,059	33,920	132,802	30,696
1000	127,637	34,719	135,587	32,387

koncentrací kontaminantů. V případě optimistických podmínek této sanační varianty (subvarianta II) přeteče do turonu za 1000 let celkem 115 tis. tun TDS, tj. 7% z uvažovaného počátečního množství rozpuštěných látek v cenomanu. V případě alternativní subvarianty III je toto množství ve srovnání se subvariantou I nižší o jednu třetinu, v případě subvarianty IV je přeteklé množství o jednu polovinu menší než je tomu u subvarianty II.

V tabulkách č. 3.5/15 a 3.5/16 je shrnut vývoj koncentrací jednotlivých kontaminantů ve vrtu MI-6 v průběhu simulačního období. Časová závislost koncentrací je vykreslena v grafech na obrázku č. 3.5/29. Odtud je patrné, že v případě pesimistické subvarianty I naroste koncentrace velmi rychle (již po 200 letech) až na hodnoty 759 mg/l TDS, 598 mg/l SO_4^{2-} a 13,6 mg/l NH_4^+. Tyto hodnoty překračují pro NH_4^+ více než čtyřnásobně a pro SO_4^{2-} více dvojnásobně limity C normy ČSN 75 72 14. Poté koncentrace látek trvale klesají. V případě optimistické varianty II dostoupí koncentrace svého maxima po 650 letech. V té době se hodnoty koncentrací pohybují kolem 162 mg/l TDS, 129 mg/l SO_4^{2-} a 3,3 mg/l NH_4^+. V tomto případě hodnoty koncentrace NH_4^+ těsně přestoupí limit C. Budeme-li takto posuzovat alternativní subvarianty, zjistíme, že v případě subvarianty III nedosáhnou koncentrace svého maxima během celého simulovaného období. Ke konci simulace dosáhnou hodnoty 270 mg/l TDS, 214 mg/l SO_4^{2-} a 5,4 mg/l NH_4^+. I v tomto případě však hodnoty koncentrace NH_4^+ přestoupí limit C téměř dvakrát. V případě subvarianty IV zjistíme, že koncentrace opět narůstají po celé simulační období a k jeho konci dosáhnou hodnot 67 mg/l TDS, 54 mg/l SO_4^{2-} a 1,4 mg/l NH_4^+. Přestože v tomto případě není limit C dosažen, je zřejmé, že koncentrace budou nadále narůstat i po uplynutí tisíciletého simulačního období, ale patrně k překročení limitu C nedojde.

V tabulkách č. 3.5/17 a 3.5/18 jsou uvedena množství kontaminantů odčerpaná vrtem MI-6 kumulovaně. Je tedy zřejmé, že po tisíci letech bude vrtem odčerpáno 202 tis. tun TDS, 160 tis. tun SO_4^{2-} a 3,9 tis. tun NH_4^+ v případě subvarianty I, 58 tis. tun TDS, 46 tis. tun SO_4^{2-} a 1,1 tis. tun NH_4^+ v případě subvarianty II. U alternativní subvarianty III, resp. IV bude odčerpáno 87 tis., resp. 11 tis. tun TDS, 69 tis., resp. 8,6 tis. tun SO_4^{2-} a 1,7 tis., resp. 213 tun NH_4^+.

Následující tabulky č. 3.5/19 a 3.5/20 uvádějí časový vývoj koncentračních přírůstků k přirozenému pozadí pro jednotlivé kontaminanty v řece Ploučnici.

Tabulka č. 3.5/13: Množství látek přeteklých do turonu - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Množství látky přeteklé do turonu dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	9.712	7.749	0.154	0.380	0.302	0.006
100	42.240	33.458	0.727	2.601	2.063	0.042
150	73.497	57.967	1.313	7.644	6.046	0.128
200	95.420	75.135	1.741	14.449	11.395	0.252
250	115.530	90.918	2.142	20.713	16.293	0.371
300	135.574	106.691	2.548	26.340	20.679	0.480
350	156.499	123.175	2.974	31.903	25.013	0.589
400	178.387	140.423	3.422	37.658	29.500	0.703
450	200.917	158.173	3.885	43.683	34.200	0.823
500	223.724	176.134	4.354	49.973	39.108	0.950
550	246.526	194.079	4.823	56.455	44.162	1.081
600	269.130	211.859	5.288	63.023	49.278	1.214
650	291.422	229.379	5.745	69.589	54.386	1.347
700	313.338	246.592	6.195	76.097	59.442	1.479
750	334.850	263.476	6.635	82.530	64.434	1.609
800	355.946	280.022	7.066	88.908	69.377	1.738
850	376.623	296.230	7.487	95.271	74.304	1.866
900	396.880	312.101	7.899	101.675	79.261	1.995
950	416.717	327.635	8.301	108.176	84.292	2.126
1000	436.136	342.838	8.693	114.827	89.438	2.259

Tabulka č. 3.5/14: Množství látek přeteklých do turonu - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Množství látky přeteklé do turonu dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.757	0.601	0.013	0.011	0.008	0.000
100	5.370	4.256	0.094	0.106	0.076	0.002
150	15.548	12.277	0.285	0.387	0.276	0.006
200	27.941	22.003	0.528	0.956	0.690	0.016
250	40.527	31.868	0.783	1.904	1.387	0.032
300	54.090	42.511	1.061	3.279	2.409	0.056
350	68.962	54.194	1.368	5.092	3.767	0.089
400	85.145	66.915	1.704	7.338	5.459	0.132
450	102.457	80.528	2.063	10.001	7.474	0.183
500	120.621	94.809	2.439	13.051	9.791	0.242
550	139.357	109.537	2.828	16.450	12.380	0.309
600	158.431	124.526	3.223	20.149	15.203	0.382
650	177.671	139.639	3.621	24.098	18.221	0.460
700	196.955	154.780	4.018	28.253	21.398	0.543
750	216.210	169.892	4.415	32.581	24.711	0.629
800	235.391	184.940	4.809	37.067	28.147	0.718
850	254.476	199.908	5.199	41.715	31.709	0.811
900	273.452	214.786	5.587	46.543	35.414	0.906
950	292.313	229.571	5.970	51.584	39.287	1.006
1000	311.052	244.258	6.350	56.873	43.356	1.111

Tabulka č. 3.5/15: Koncentrace ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Koncentrace ve vrtu MI-6 dle subvariant [mg/l]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.009	0.003	0.000	0.007	0.002	0.000
100	42.636	34.010	0.680	0.347	0.248	0.005
150	420.384	334.027	6.956	10.229	8.067	0.163
200	759.501	598.423	13.625	40.242	31.892	0.651
250	617.241	484.701	11.410	83.940	66.449	1.451
300	510.750	401.513	9.613	113.497	89.685	2.058
350	465.276	366.863	8.892	122.376	96.673	2.281
400	447.671	353.964	8.678	129.712	102.585	2.463
450	442.405	350.423	8.685	140.077	110.969	2.702
500	437.578	346.962	8.680	150.104	119.105	2.936
550	429.465	340.731	8.588	157.473	125.115	3.119
600	418.743	332.308	8.420	161.476	128.418	3.234
650	406.899	322.896	8.210	162.236	129.115	3.280
700	395.046	313.402	7.986	160.377	127.707	3.267
750	383.840	304.366	7.765	156.704	124.833	3.210
800	373.612	296.068	7.556	151.974	121.097	3.126
850	364.456	288.601	7.364	146.832	117.010	3.029
900	356.282	281.908	7.189	141.802	112.990	2.929
950	348.885	275.841	7.028	137.280	109.356	2.837
1000	342.040	270.234	6.876	133.527	106.317	2.758

Tabulka č. 3.5/16: Koncentrace ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Koncentrace ve vrtu MI-6 dle subvariant [mg/l]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.008	0.003	0.000	0.007	0.002	0.000
100	0.752	0.567	0.012	0.060	0.020	0.000
150	20.122	15.941	0.321	0.179	0.066	0.000
200	72.937	57.807	1.212	0.406	0.187	0.002
250	131.599	103.886	2.328	0.829	0.465	0.007
300	147.069	115.860	2.693	1.587	1.017	0.019
350	150.260	118.507	2.817	2.862	1.994	0.040
400	162.030	128.106	3.097	4.833	3.537	0.075
450	178.296	141.270	3.466	7.644	5.762	0.127
500	194.892	154.636	3.842	11.376	8.735	0.198
550	209.390	166.280	4.174	16.016	12.443	0.290
600	221.151	175.705	4.444	21.436	16.784	0.399
650	230.602	183.249	4.660	27.421	21.585	0.522
700	238.366	189.407	4.832	33.722	26.647	0.653
750	244.928	194.567	4.972	40.103	31.777	0.788
800	250.634	199.014	5.089	46.355	36.808	0.922
850	255.763	202.975	5.189	52.312	41.602	1.049
900	260.536	206.637	5.278	57.852	46.058	1.167
950	265.110	210.132	5.360	62.908	50.119	1.274
1000	269.558	213.525	5.438	67.471	53.777	1.369

Tabulka č. 3.5/17: Množství ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Množství ve vrtu MI-6 dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.195	0.155	0.003	0.002	0.001	0.000
150	5.536	4.409	0.089	0.097	0.076	0.002
200	21.904	17.352	0.374	0.711	0.562	0.011
250	40.147	31.695	0.707	2.313	1.831	0.038
300	54.535	42.997	0.975	4.931	3.901	0.085
350	67.111	52.897	1.214	8.010	6.333	0.141
400	78.898	62.204	1.441	11.269	8.909	0.203
450	90.423	71.326	1.665	14.762	11.674	0.270
500	101.833	80.369	1.891	18.527	14.659	0.343
550	113.077	89.287	2.115	22.521	17.830	0.421
600	124.073	98.013	2.335	26.662	21.122	0.504
650	134.775	106.505	2.551	30.863	24.465	0.589
700	145.167	114.751	2.761	35.049	27.797	0.673
750	155.259	122.756	2.965	39.162	31.072	0.757
800	165.073	130.536	3.163	43.164	34.261	0.840
850	174.636	138.111	3.357	47.036	37.347	0.919
900	183.975	145.503	3.545	50.776	40.327	0.997
950	193.113	152.731	3.729	54.392	43.208	1.071
1000	202.066	159.807	3.910	57.899	46.001	1.144

Tabulka č. 3.5/18: Množství ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Množství ve vrtu MI-6 dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.003	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000
150	0.199	0.157	0.003	0.004	0.001	0.000
200	1.342	1.063	0.022	0.011	0.004	0.000
250	4.055	3.209	0.069	0.026	0.012	0.000
300	7.749	6.120	0.135	0.057	0.031	0.000
350	11.587	9.145	0.206	0.113	0.069	0.001
400	15.619	12.329	0.283	0.211	0.139	0.003
450	20.025	15.817	0.368	0.371	0.258	0.005
500	24.864	19.654	0.462	0.616	0.444	0.009
550	30.110	23.818	0.566	0.969	0.717	0.016
600	35.695	28.255	0.678	1.453	1.095	0.025
650	41.554	32.910	0.796	2.085	1.591	0.036
700	47.635	37.743	0.919	2.877	2.216	0.052
750	53.901	42.721	1.047	3.834	2.974	0.070
800	60.325	47.823	1.177	4.955	3.863	0.093
850	66.889	53.034	1.310	6.235	4.880	0.118
900	73.581	58.343	1.446	7.663	6.017	0.147
950	80.394	63.744	1.584	9.230	7.264	0.179
1000	87.323	69.235	1.724	10.920	8.611	0.213

Tabulka č. 3.5/19: Koncentrace v Ploučnici - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Koncentrace v Ploučnici dle subvariant [mg/l]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.009	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000
150	0.054	0.042	0.001	0.002	0.002	0.000
200	0.162	0.127	0.003	0.007	0.005	0.000
250	0.360	0.281	0.007	0.016	0.011	0.000
300	0.596	0.465	0.012	0.030	0.022	0.001
350	0.798	0.622	0.017	0.051	0.037	0.001
400	0.996	0.776	0.021	0.076	0.056	0.001
450	1.206	0.940	0.026	0.106	0.078	0.002
500	1.413	1.102	0.030	0.138	0.103	0.003
550	1.605	1.253	0.034	0.174	0.130	0.003
600	1.777	1.388	0.038	0.211	0.159	0.004
650	1.926	1.505	0.041	0.249	0.188	0.005
700	2.051	1.604	0.044	0.287	0.217	0.006
750	2.153	1.685	0.046	0.323	0.246	0.007
800	2.235	1.751	0.048	0.358	0.273	0.007
850	2.300	1.802	0.049	0.392	0.299	0.008
900	2.350	1.842	0.050	0.424	0.324	0.009
950	2.387	1.871	0.051	0.454	0.348	0.009
1000	2.412	1.892	0.051	0.484	0.371	0.010

Tabulka č. 3.5/20: Koncentrace v Ploučnici - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Koncentrace v Ploučnici dle subvariant [mg/l]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.010	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000
150	0.058	0.045	0.001	0.002	0.002	0.000
200	0.161	0.125	0.003	0.007	0.005	0.000
250	0.314	0.245	0.007	0.016	0.011	0.000
300	0.505	0.393	0.011	0.029	0.020	0.001
350	0.722	0.562	0.016	0.047	0.034	0.001
400	0.954	0.743	0.021	0.070	0.051	0.001
450	1.190	0.927	0.026	0.099	0.073	0.002
500	1.419	1.107	0.031	0.132	0.098	0.003
550	1.634	1.276	0.035	0.168	0.125	0.003
600	1.828	1.428	0.039	0.206	0.155	0.004
650	1.997	1.562	0.043	0.245	0.185	0.005
700	2.141	1.675	0.046	0.284	0.215	0.006
750	2.260	1.770	0.048	0.322	0.245	0.007
800	2.357	1.847	0.051	0.359	0.273	0.007
850	2.435	1.908	0.052	0.395	0.301	0.008
900	2.495	1.957	0.053	0.429	0.328	0.009
950	2.540	1.993	0.054	0.462	0.354	0.010
1000	2.572	2.019	0.055	0.494	0.379	0.010

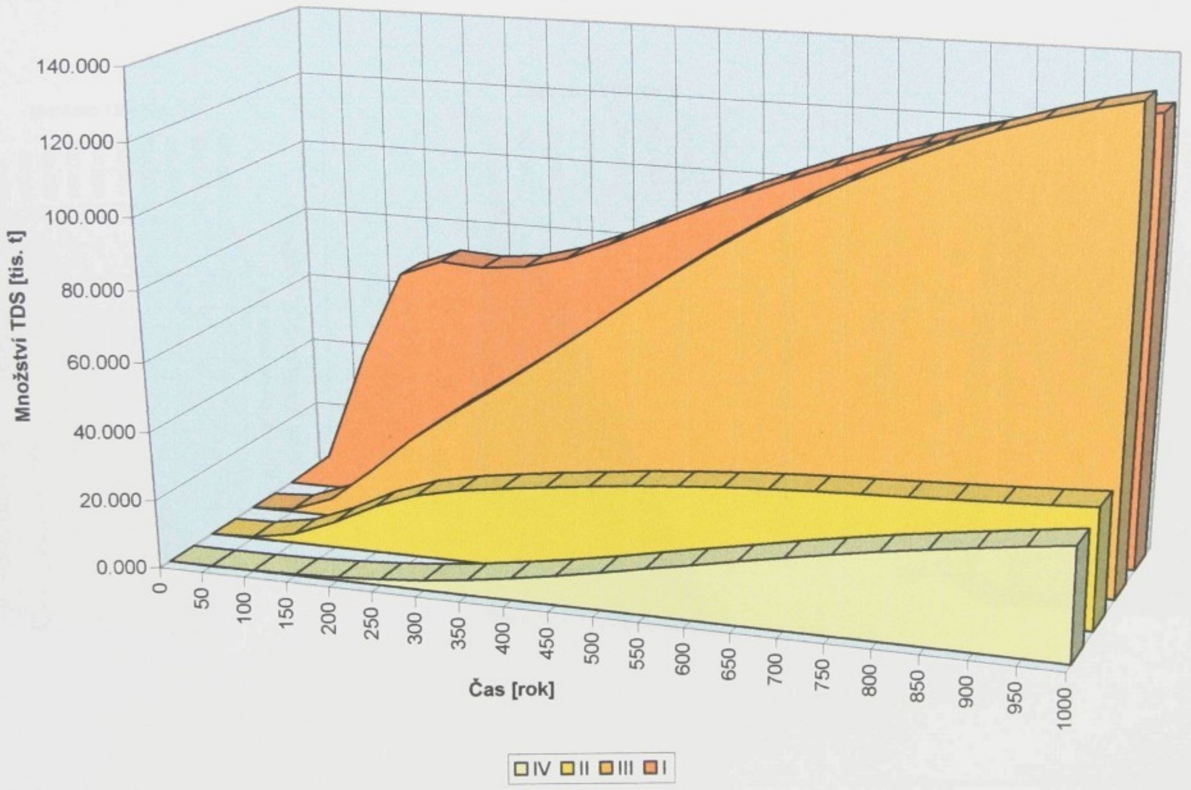
Tabulka č. 3.5/21: Množství v Ploučnici - sanační varianta - 10 g/l

Čas [rok]	Množství v Ploučnici dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.021	0.017	0.000	0.001	0.001	0.000
150	0.143	0.112	0.003	0.006	0.004	0.000
200	0.509	0.397	0.011	0.021	0.015	0.000
250	1.322	1.032	0.028	0.057	0.040	0.001
300	2.669	2.083	0.056	0.125	0.089	0.002
350	4.471	3.487	0.094	0.239	0.173	0.004
400	6.719	5.239	0.141	0.412	0.300	0.008
450	9.441	7.360	0.199	0.650	0.477	0.012
500	12.631	9.849	0.267	0.962	0.710	0.019
550	16.255	12.678	0.345	1.355	1.004	0.026
600	20.267	15.812	0.431	1.832	1.363	0.036
650	24.614	19.211	0.524	2.395	1.788	0.047
700	29.244	22.833	0.623	3.043	2.279	0.061
750	34.105	26.638	0.727	3.773	2.833	0.076
800	39.152	30.590	0.835	4.582	3.449	0.092
850	44.346	34.659	0.946	5.466	4.124	0.111
900	49.652	38.818	1.059	6.423	4.856	0.130
950	55.040	43.043	1.174	7.449	5.642	0.152
1000	60.485	47.314	1.290	8.540	6.479	0.174

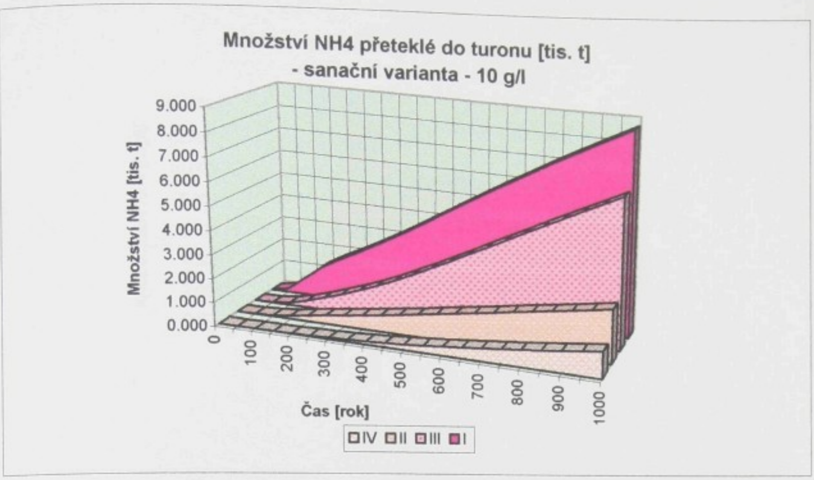
Tabulka č. 3.5/22: Množství v Ploučnici - sanační varianta - 10 g/l

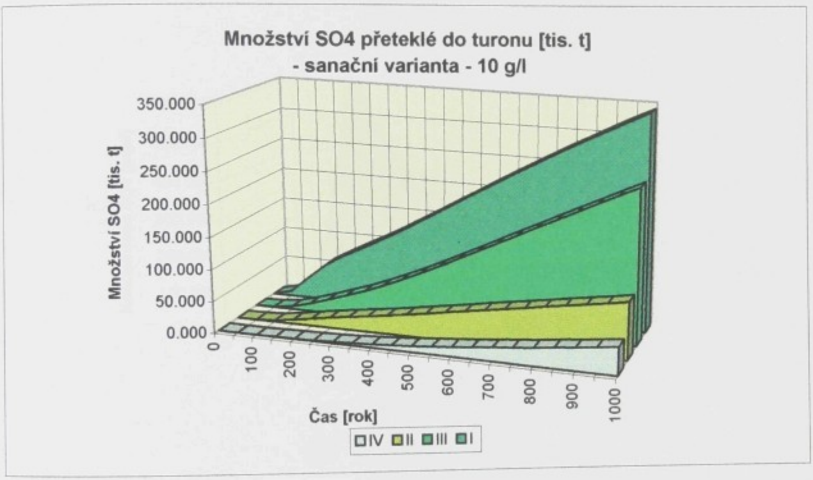
Čas [rok]	Množství v Ploučnici dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.023	0.018	0.000	0.001	0.001	0.000
150	0.153	0.119	0.003	0.006	0.004	0.000
200	0.516	0.403	0.011	0.022	0.015	0.000
250	1.226	0.955	0.027	0.057	0.040	0.001
300	2.366	1.843	0.051	0.122	0.086	0.002
350	3.997	3.112	0.086	0.227	0.163	0.004
400	6.151	4.790	0.133	0.385	0.279	0.007
450	8.837	6.883	0.190	0.608	0.443	0.012
500	12.042	9.382	0.259	0.905	0.664	0.018
550	15.731	12.263	0.339	1.284	0.947	0.025
600	19.859	15.488	0.427	1.749	1.296	0.035
650	24.369	19.014	0.524	2.302	1.713	0.046
700	29.203	22.797	0.628	2.943	2.198	0.059
750	34.306	26.793	0.737	3.670	2.750	0.074
800	39.628	30.963	0.851	4.481	3.368	0.091
850	45.124	35.271	0.969	5.372	4.047	0.109
900	50.757	39.689	1.090	6.341	4.788	0.129
950	56.491	44.188	1.212	7.384	5.587	0.151
1000	62.299	48.746	1.336	8.498	6.442	0.174

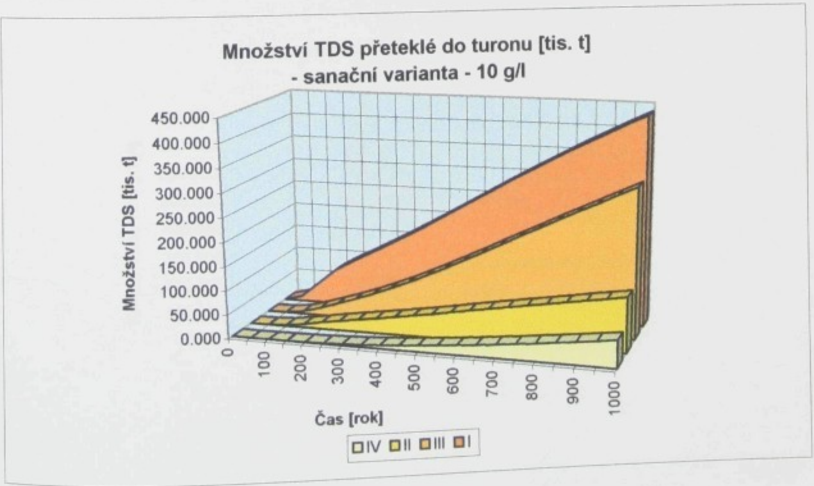
Množství TDS v turonu - sanační varianta - 10 g/l



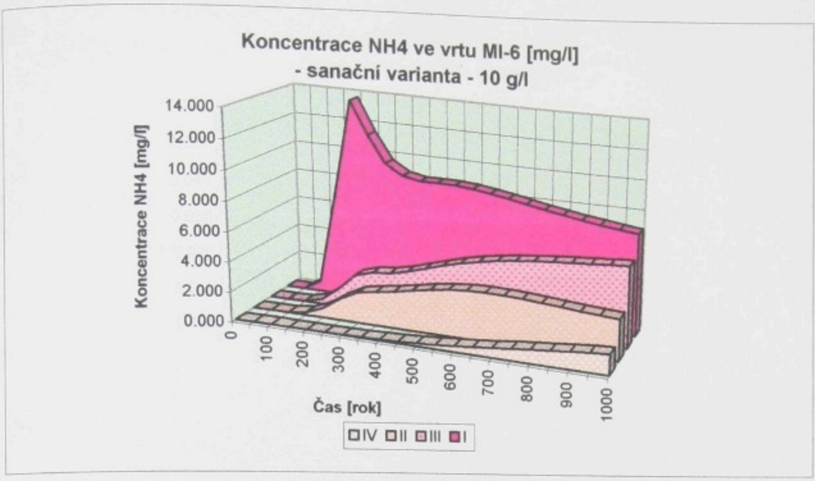
Obr. č. 3.5/27

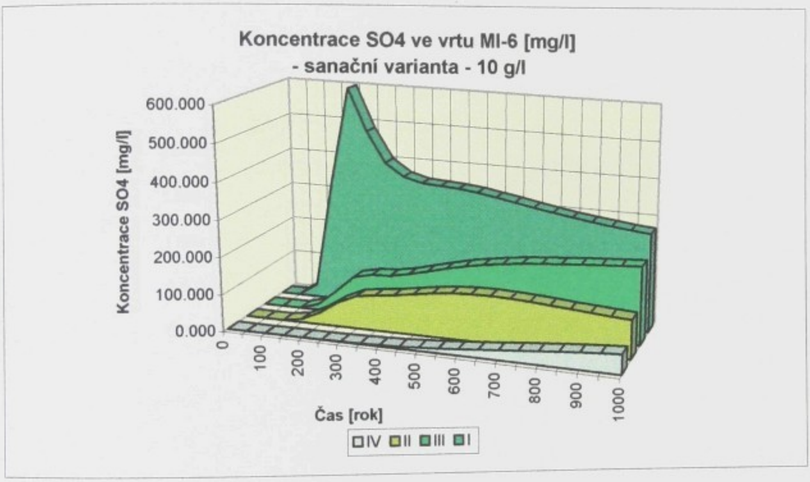

Množství NH4 přeteklé do turonu [tis. t]
- sanační varianta - 10 g/l
Množství NH4 [tis. t]
9.000
8.000
7.000
6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

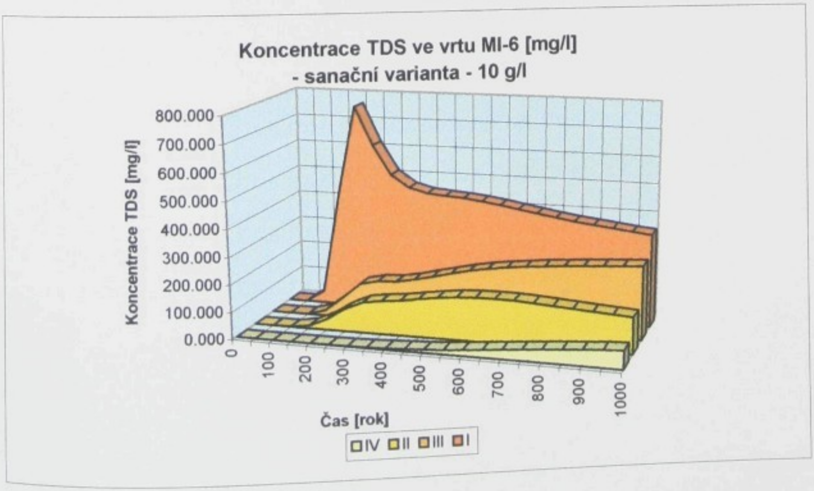

Množství SO4 přeteklé do turonu [tis. t]
- sanační varianta - 10 g/l
Množství SO4 [tis. t]
350.000
300.000
250.000
200.000
150.000
100.000
50.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I


Množství TDS přeteklé do turonu [tis. t]
- sanační varianta - 10 g/l
Množství TDS [tis. t]
450.000
400.000
350.000
300.000
250.000
200.000
150.000
100.000
50.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

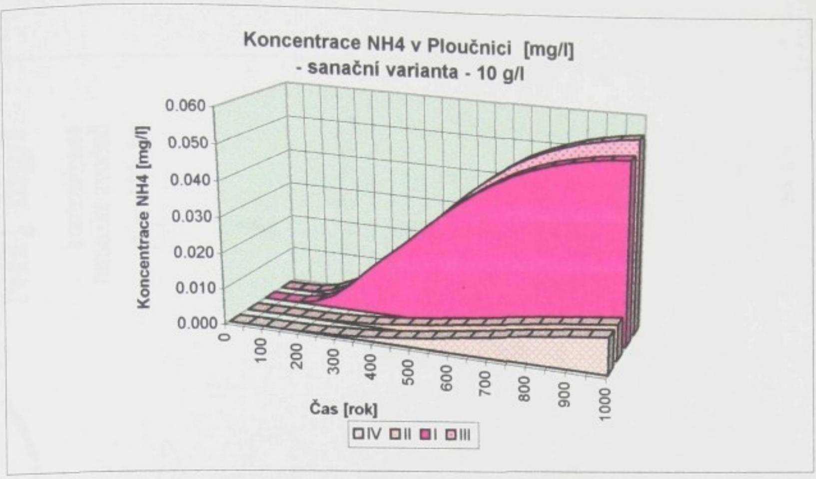
Obr. č. 3.5/28

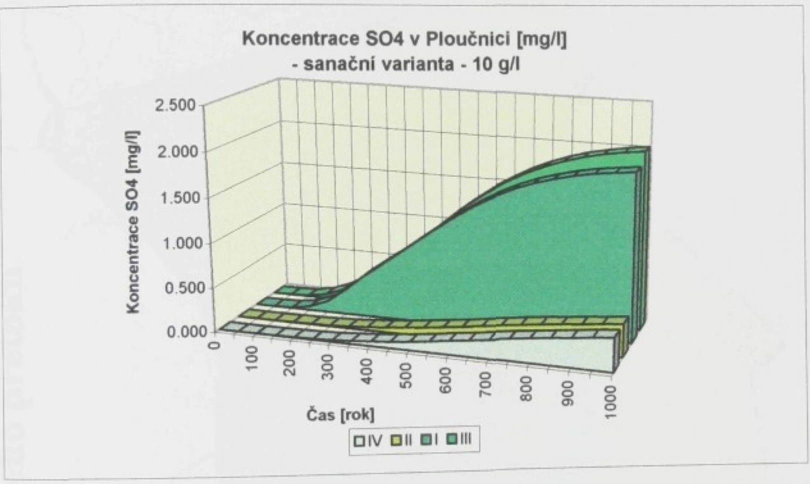

Koncentrace NH4 ve vrtu MI-6 [mg/l]
- sanační varianta - 10 g/l
Koncentrace NH4 [mg/l]
14.000
12.000
10.000
8.000
6.000
4.000
2.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

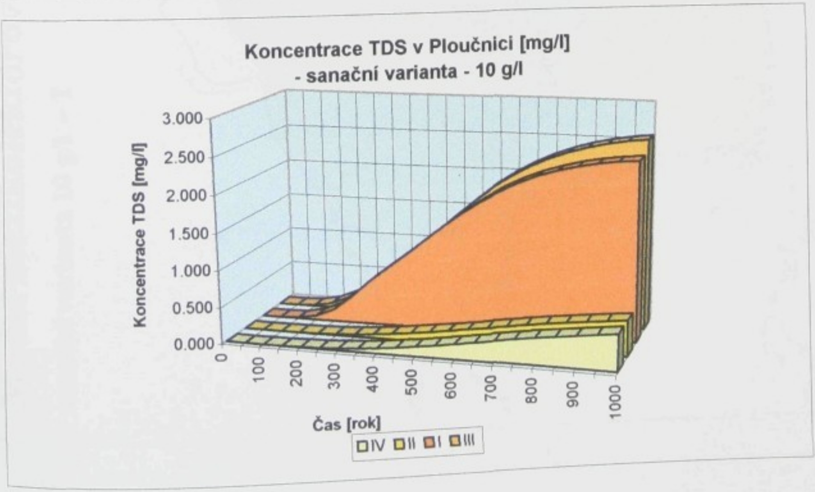

Koncentrace SO4 ve vrtu MI-6 [mg/l]
- sanační varianta - 10 g/l
Koncentrace SO4 [mg/l]
600.000
500.000
400.000
300.000
200.000
100.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I


Koncentrace TDS ve vrtu MI-6 [mg/l]
- sanační varianta - 10 g/l
Koncentrace TDS [mg/l]
800.000
700.000
600.000
500.000
400.000
300.000
200.000
100.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

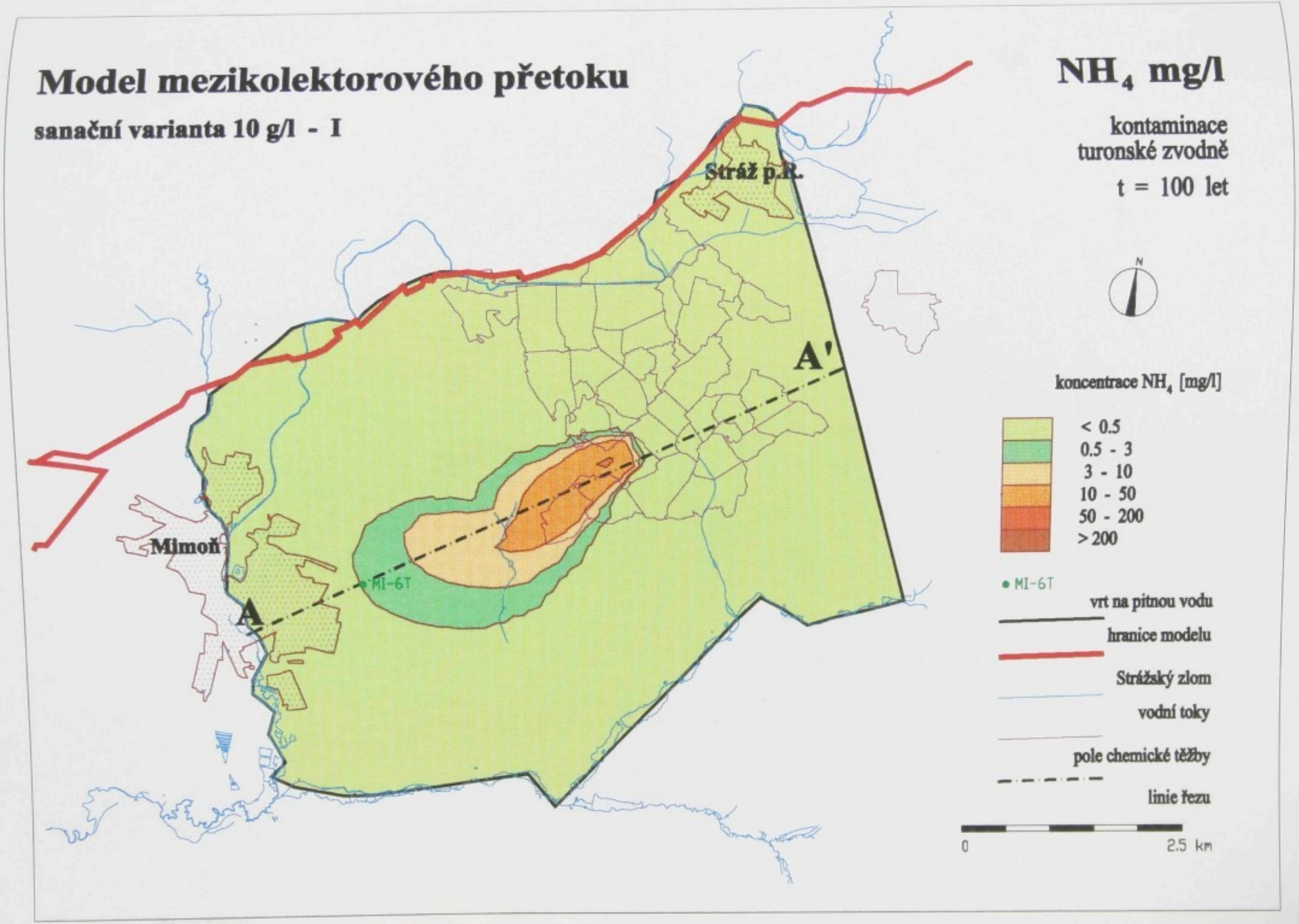
Obr. č. 3.5/29


Koncentrace NH4 v Ploučnici [mg/l]
- sanační varianta - 10 g/l
Koncentrace NH4 [mg/l]
0.060
0.050
0.040
0.030
0.020
0.010
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III

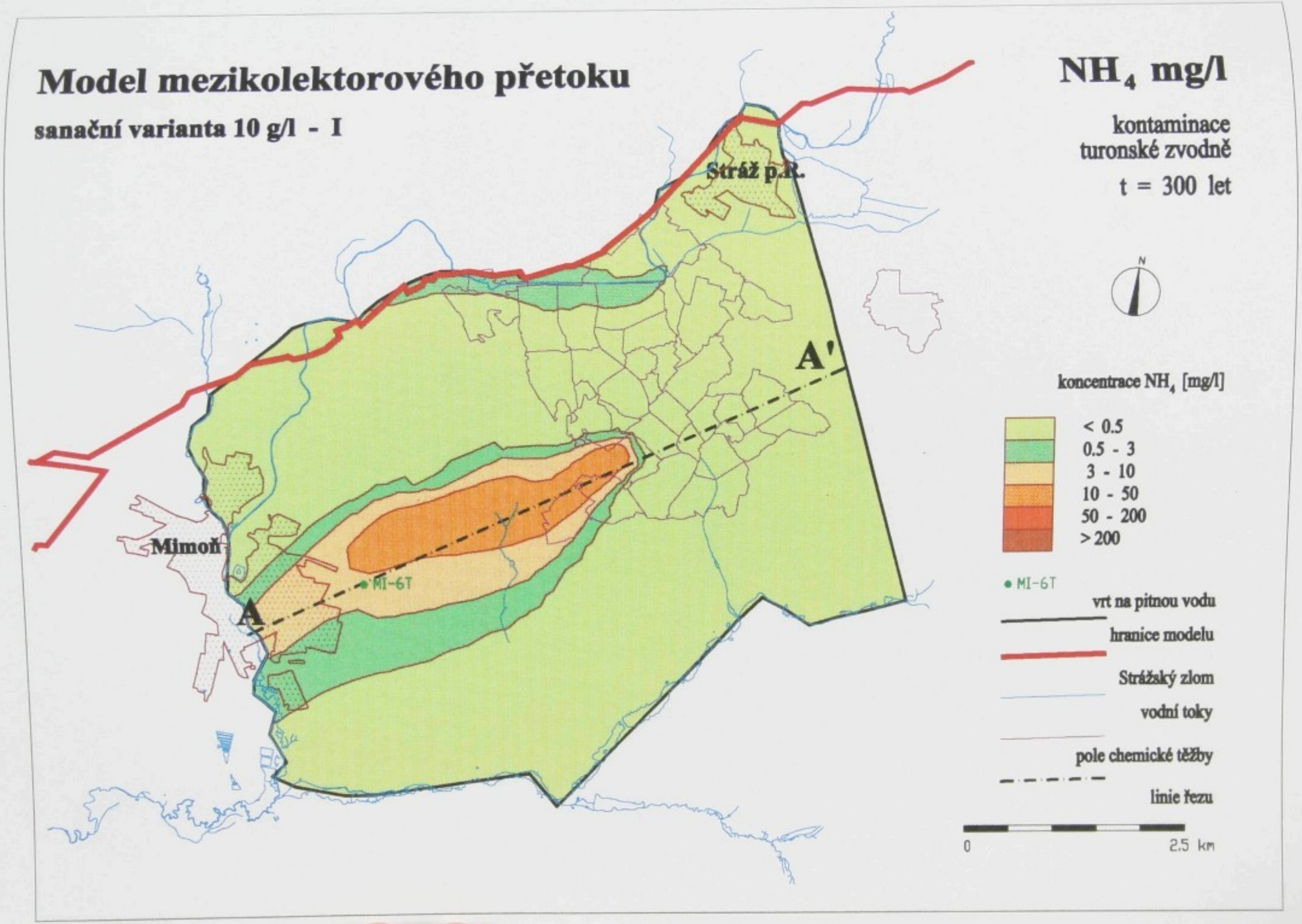

Koncentrace SO4 v Ploučnici [mg/l]
- sanační varianta - 10 g/l
Koncentrace SO4 [mg/l]
2.500
2.000
1.500
1.000
0.500
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III


Koncentrace TDS v Ploučnici [mg/l]
- sanační varianta - 10 g/l
Koncentrace TDS [mg/l]
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
0.500
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III

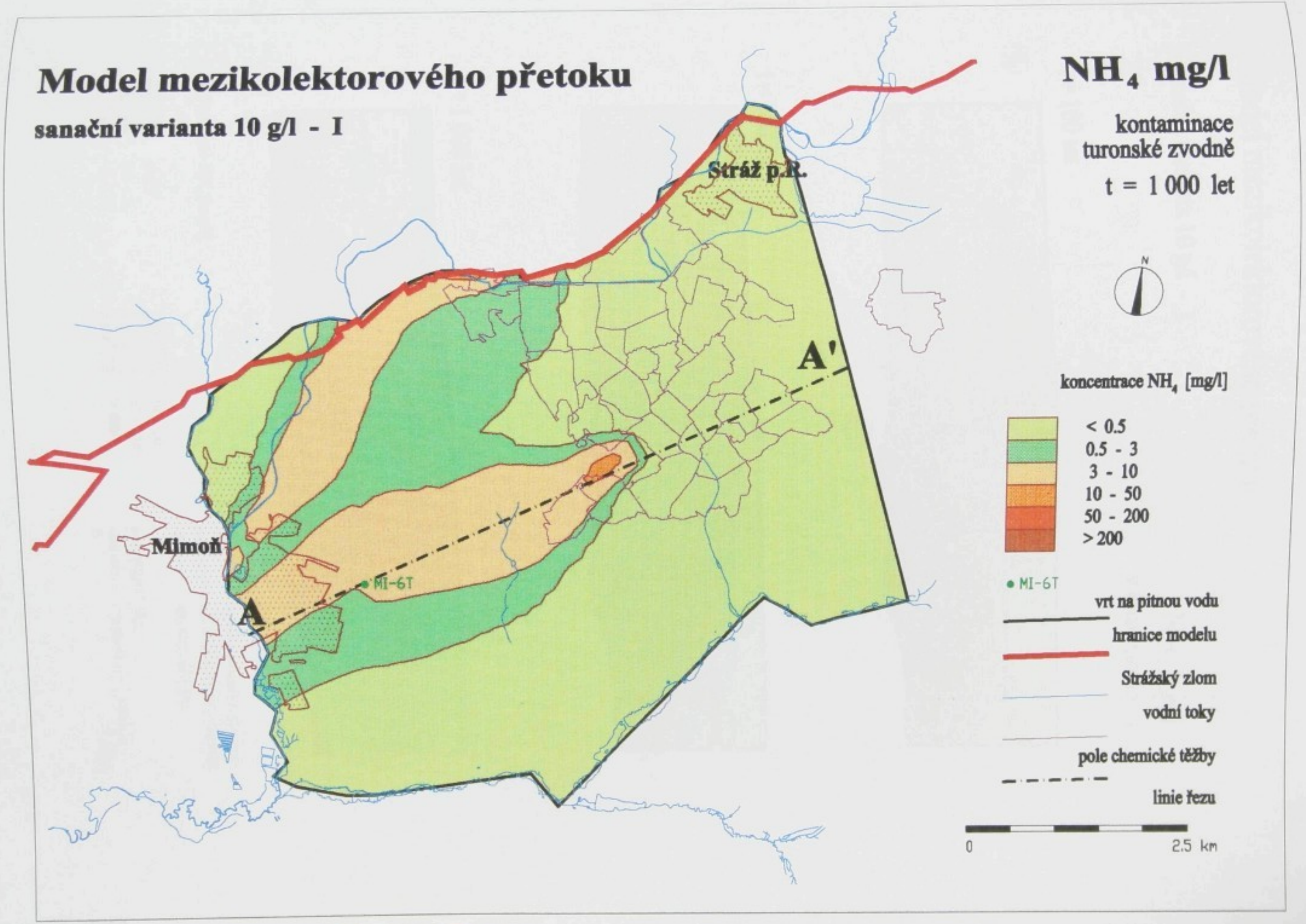
Obr. č. 3.5/30


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - I
NH$_4$ mg/l
kontaminace turonské zvodně
t = 100 let
N
koncentrace NH$_4$ [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/31


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - I
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/32


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - I
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

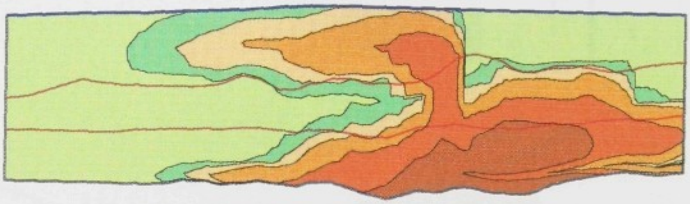
Obr. č. 3.5/33

Model mezikolektorového přetoku

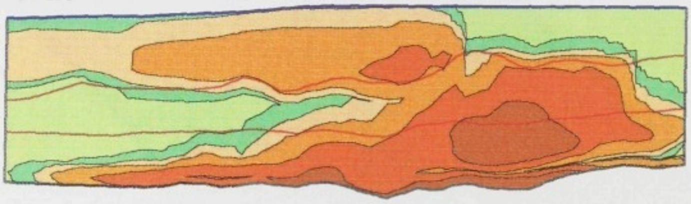
sanační varianta 10 g/l - I

NH_4 mg/l
v řezu modelem

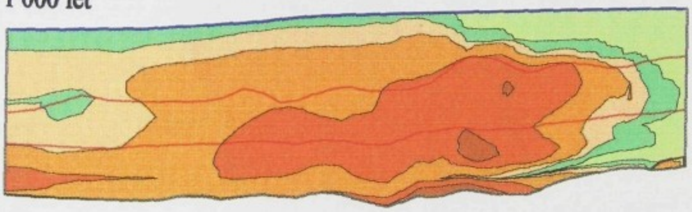
t = 100 let

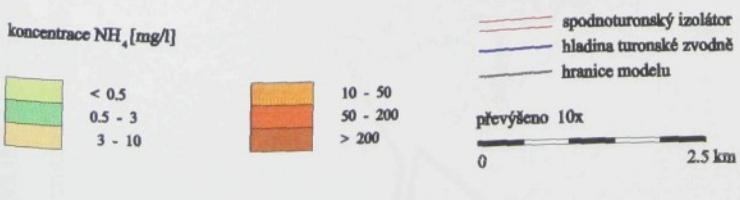


t = 300 let

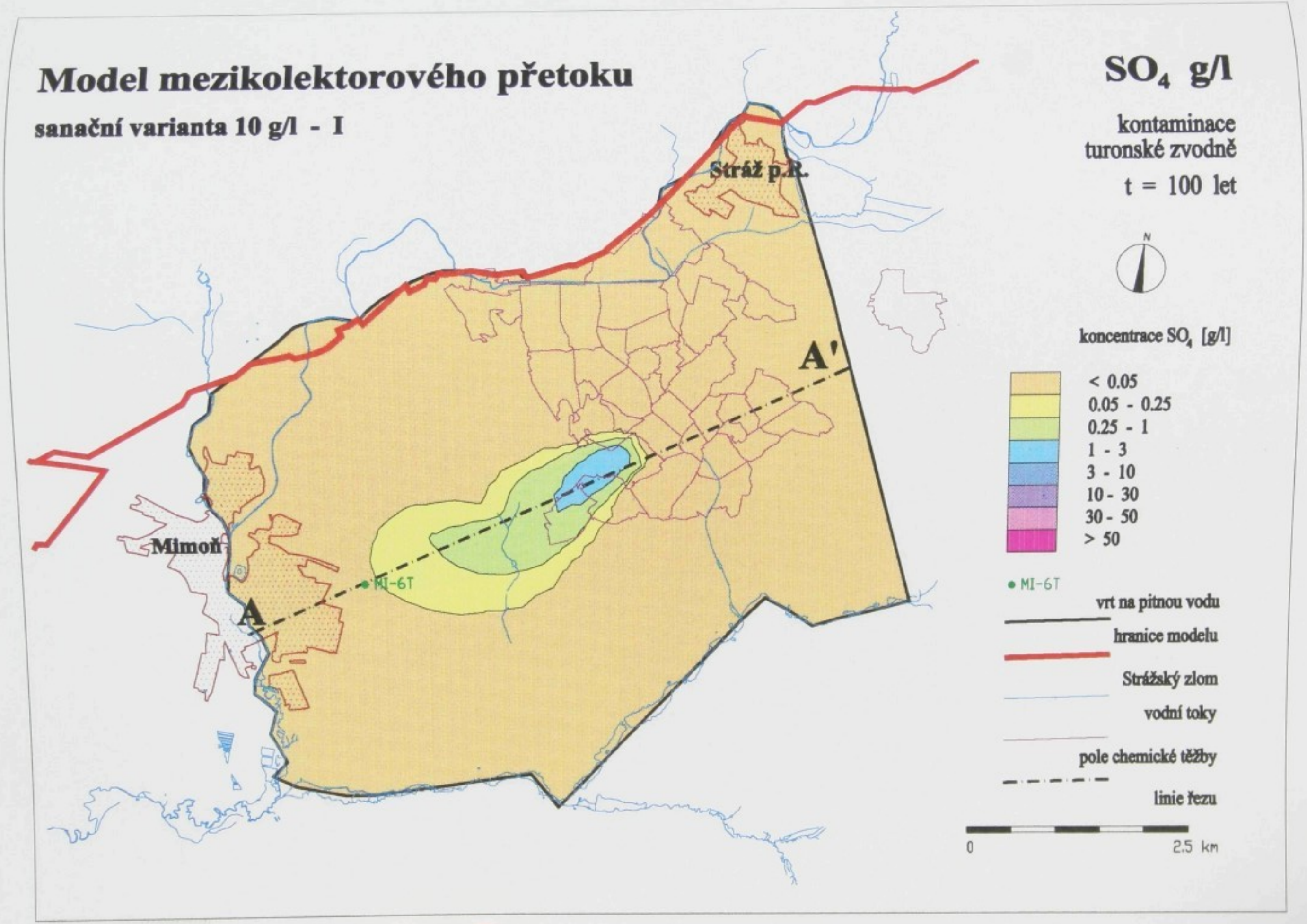


t = 1 000 let

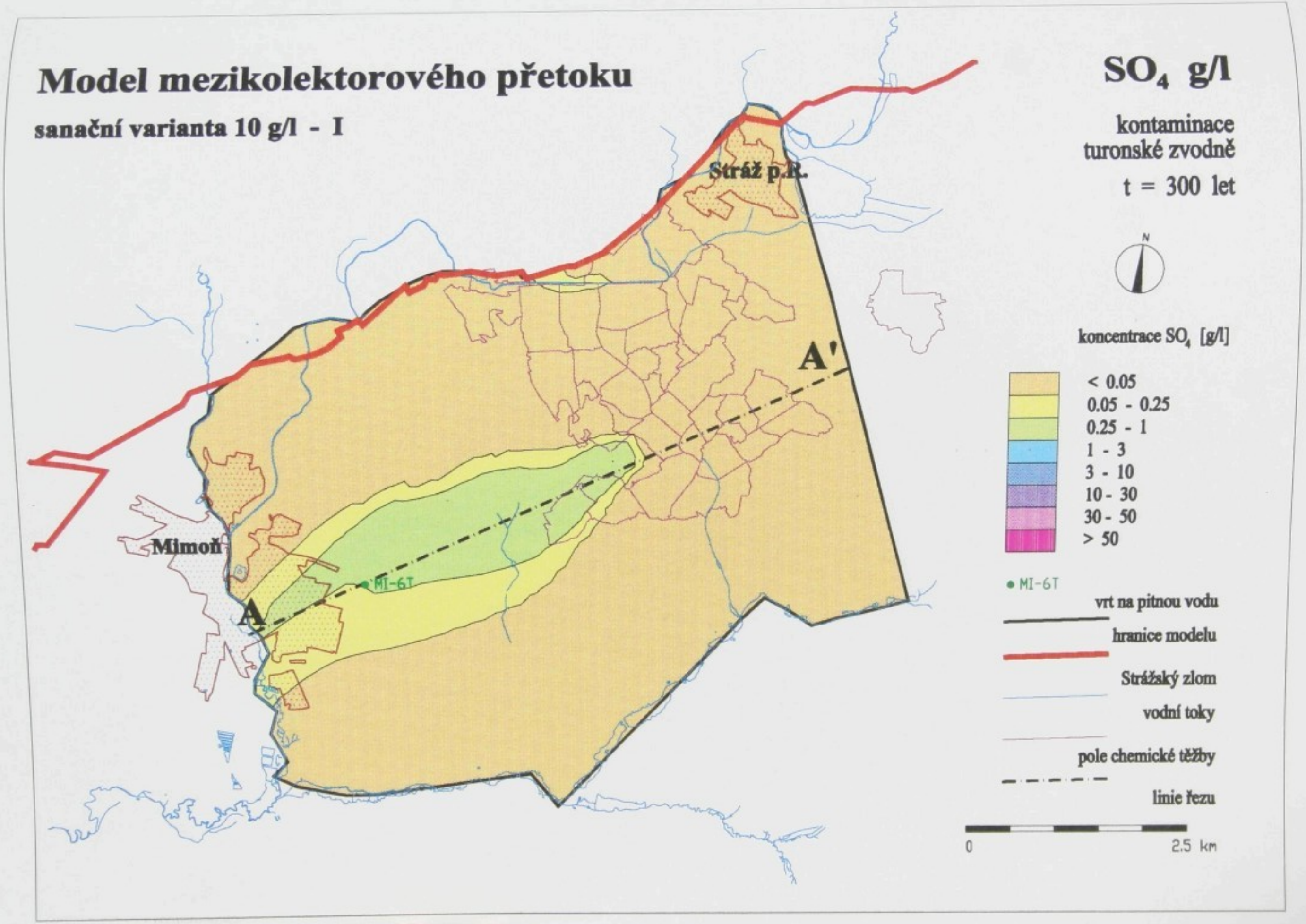




Obr. č. 3.5/34

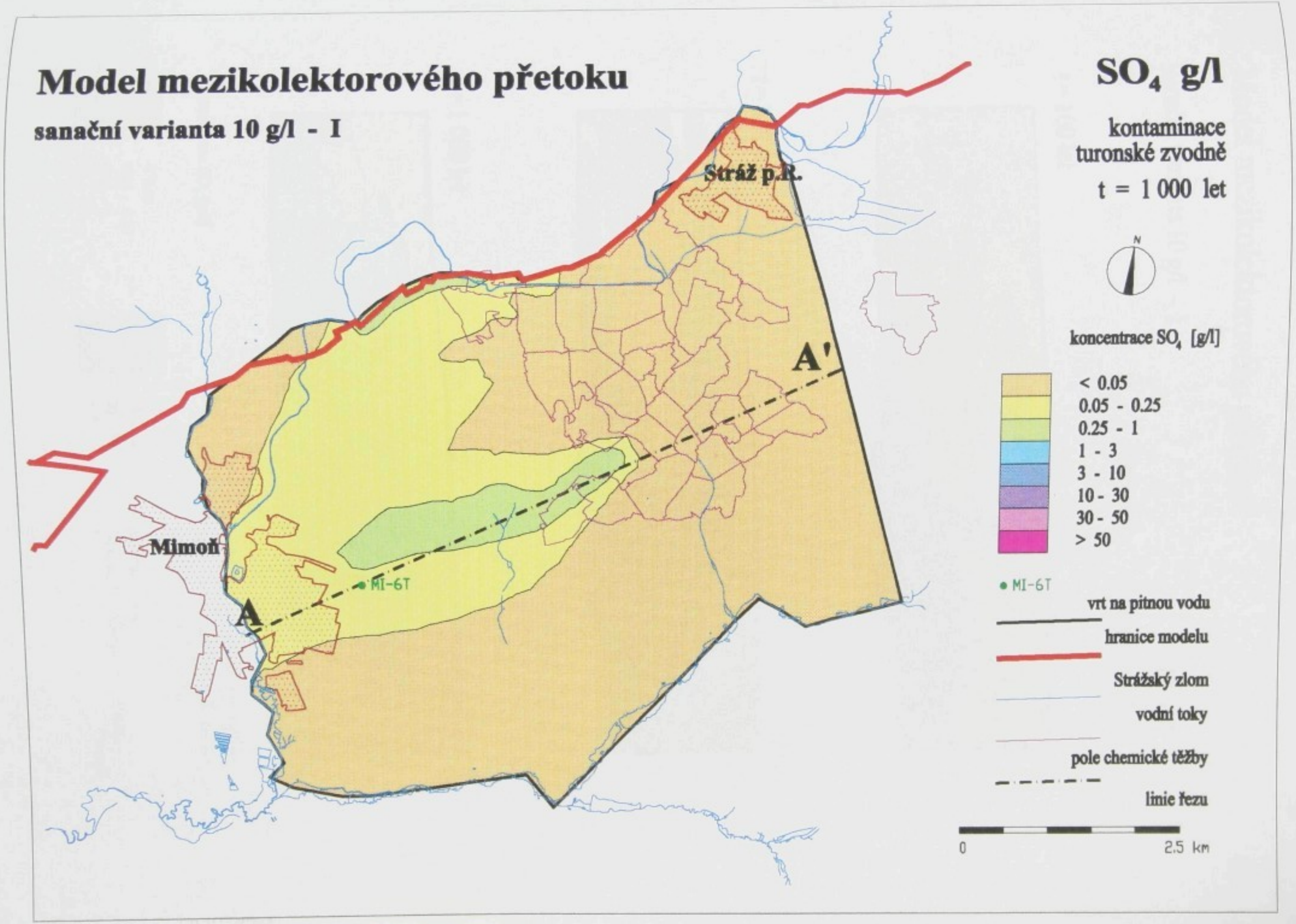

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - I
SO4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 100 let
N
koncentrace SO4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'

Obr. č. 3.5/35



Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - I
SO4 g/l
kontaminace turonské zvodně
t = 300 let
N
koncentrace SO4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/36

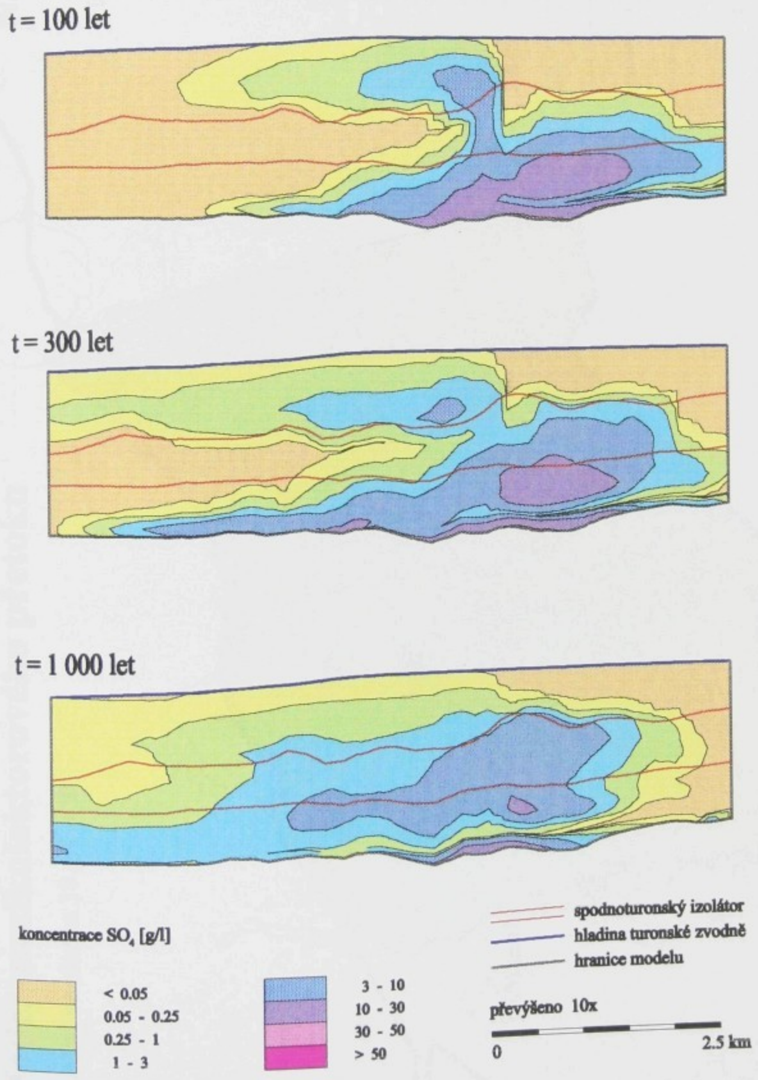

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - I
SO_4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/37

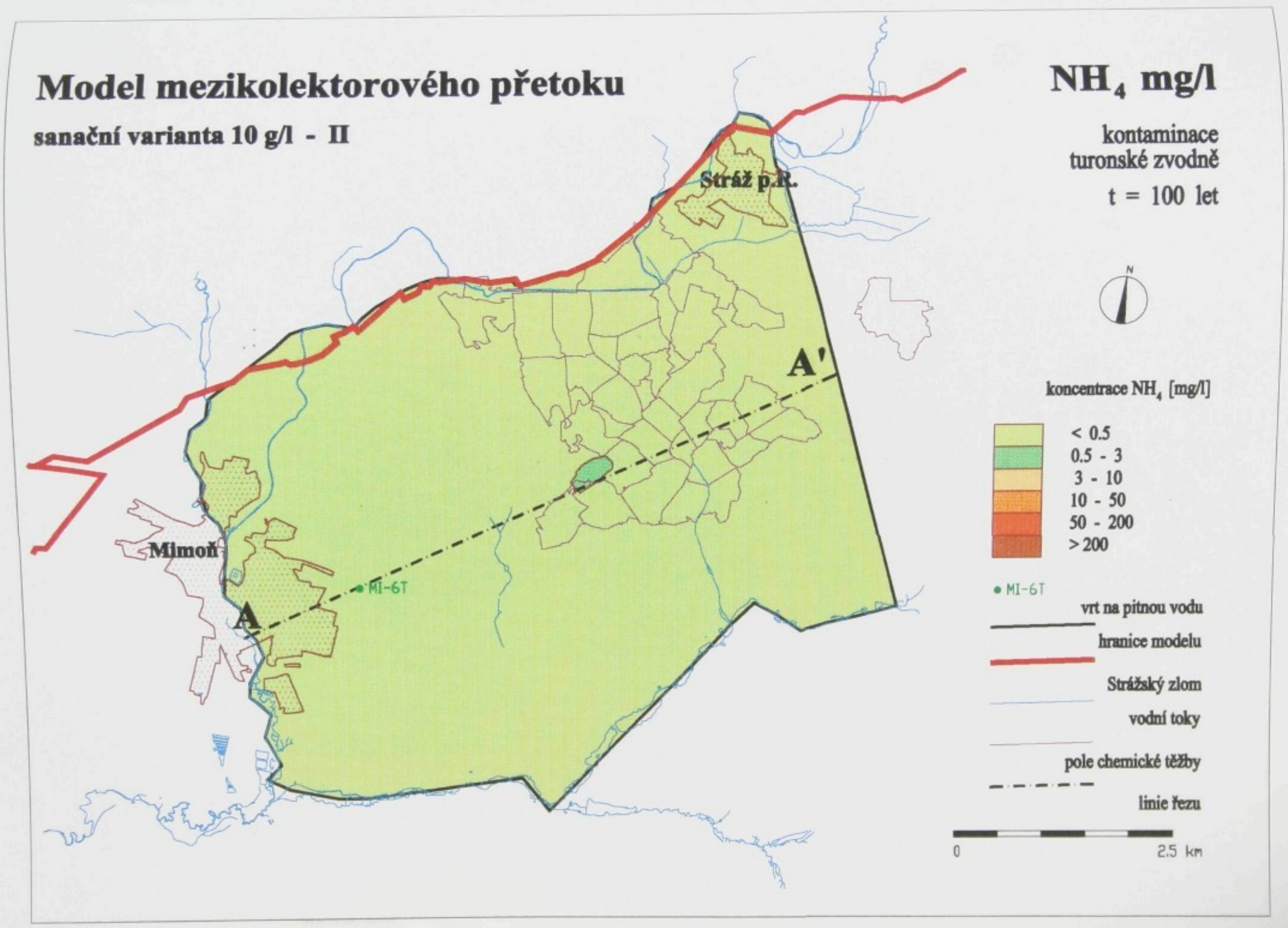
Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 10 g/l - I

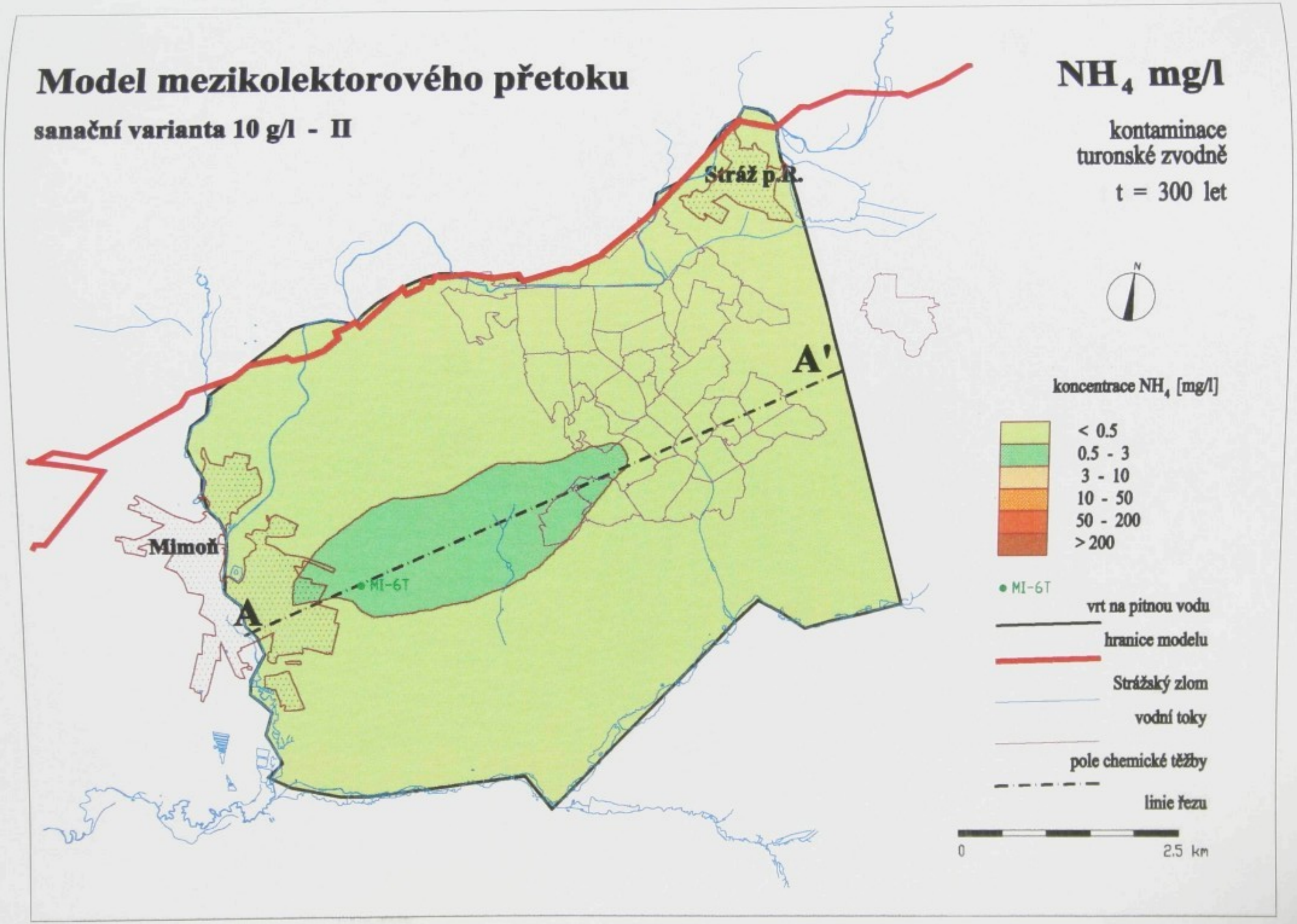
SO$_4$ g/l
v řezu modelem



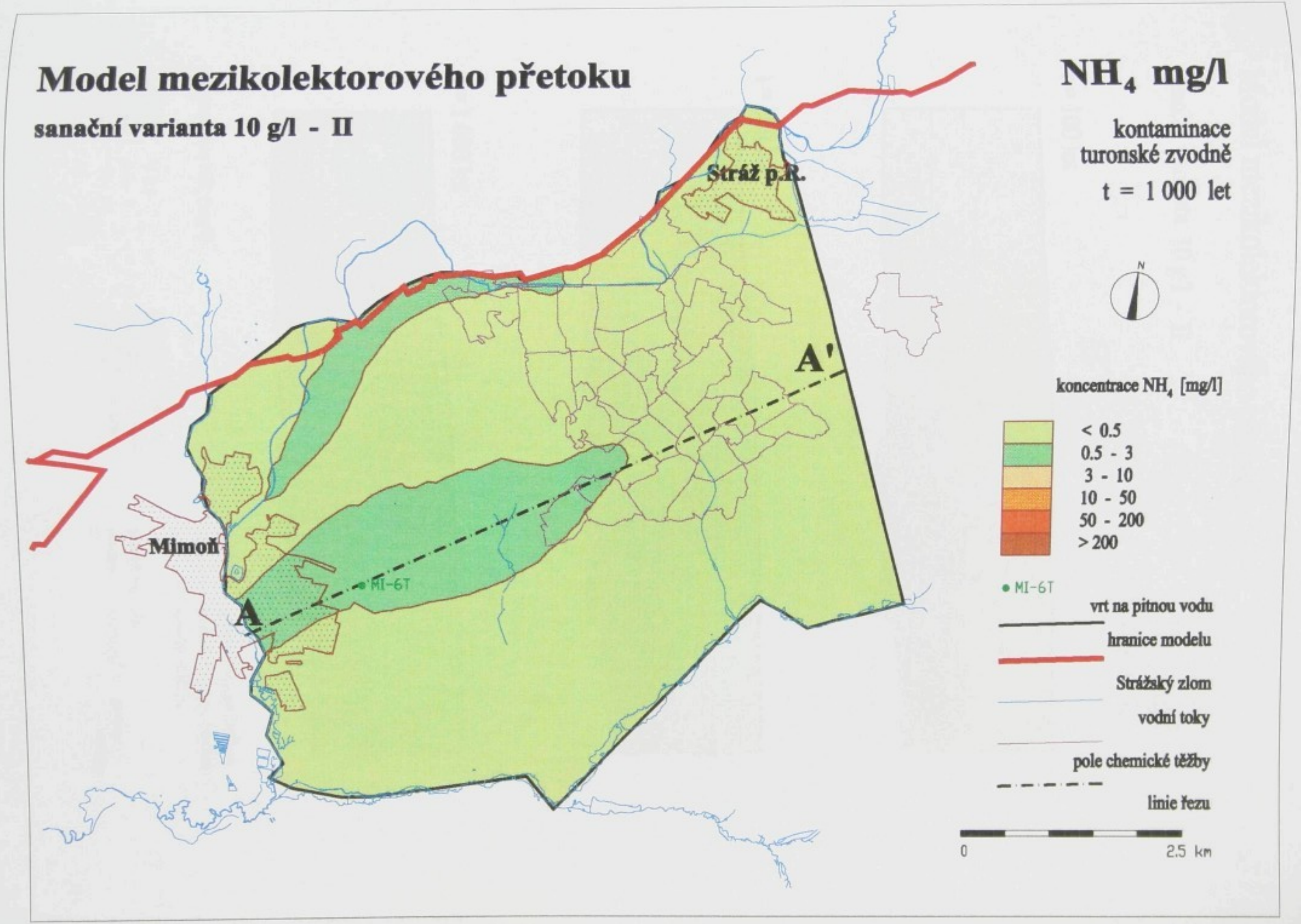
Obr. č. 3.5/38


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - II
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 100 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/39


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - II
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
N
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/40



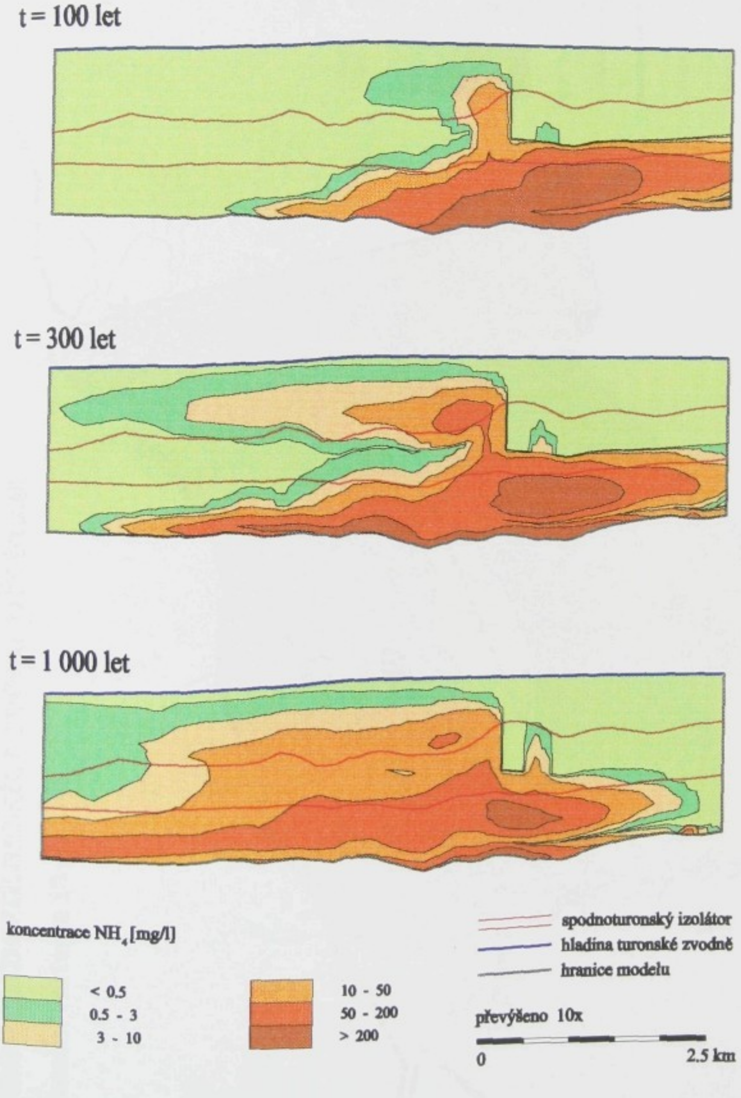
Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - II
NH_4 mg/l
kontaminace turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace NH_4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/41

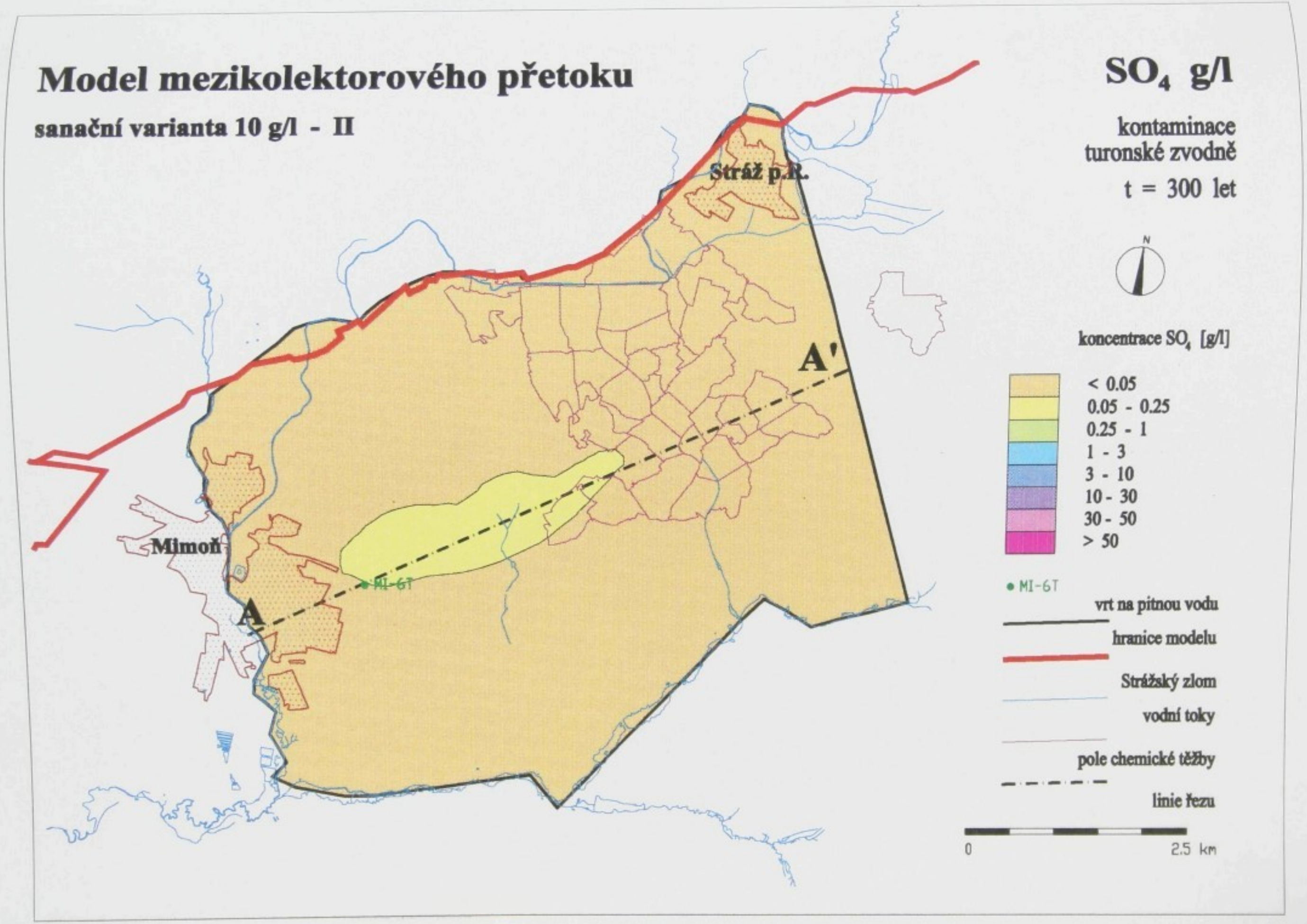
Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 10 g/l - II

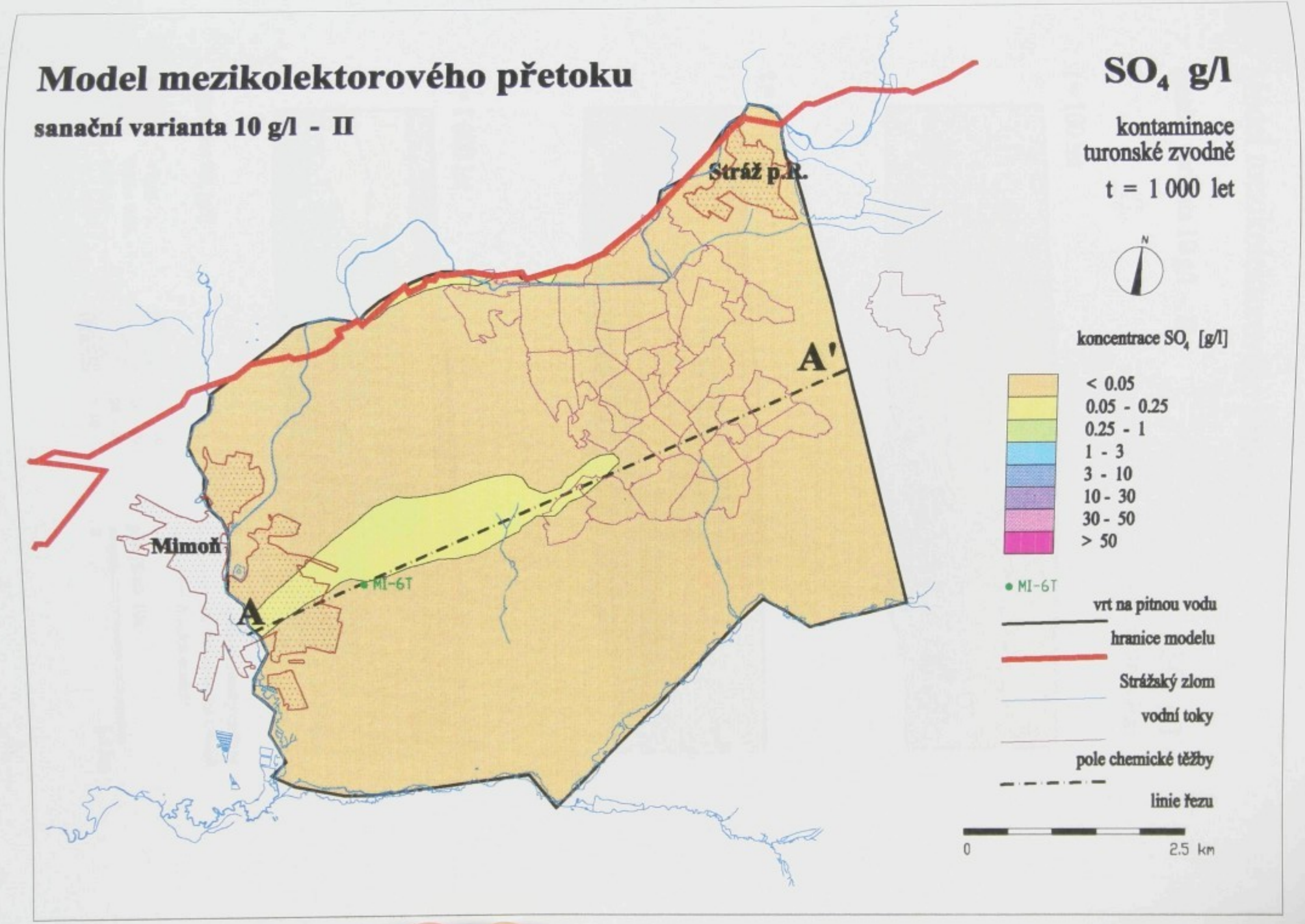
NH$_4$ mg/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/42


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - II
SO_4 g/l
kontaminace turonské zvodně
t = 300 let
N
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'

Obr. č. 3.5/43

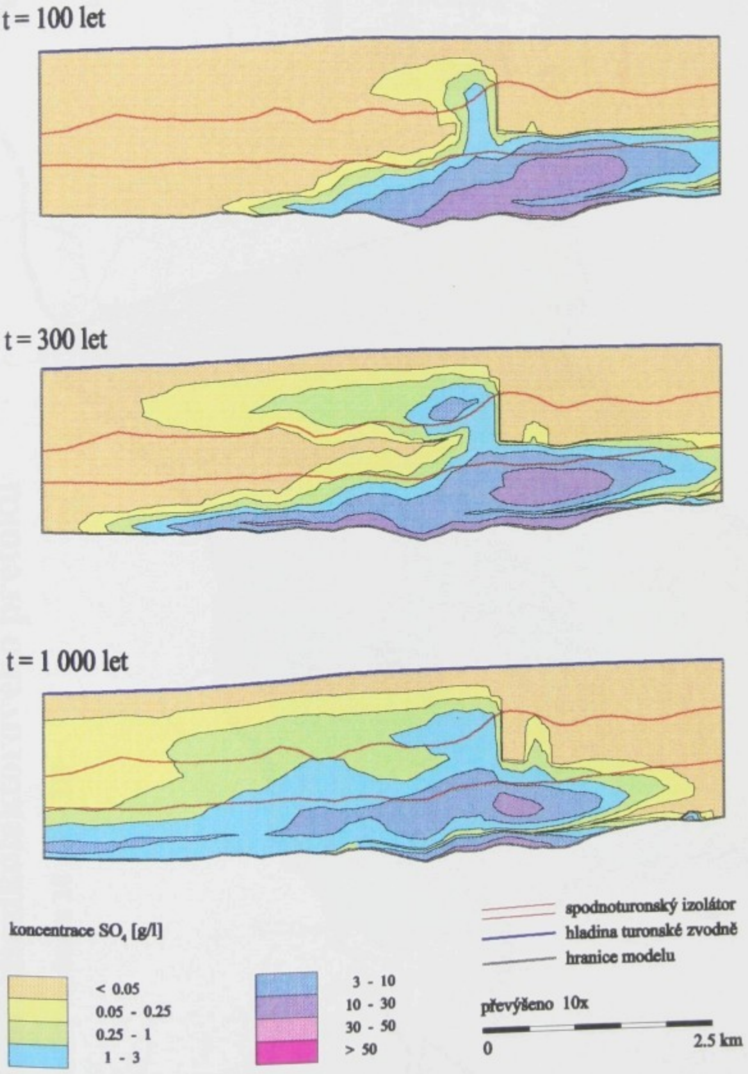

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - II
SO4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace SO4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

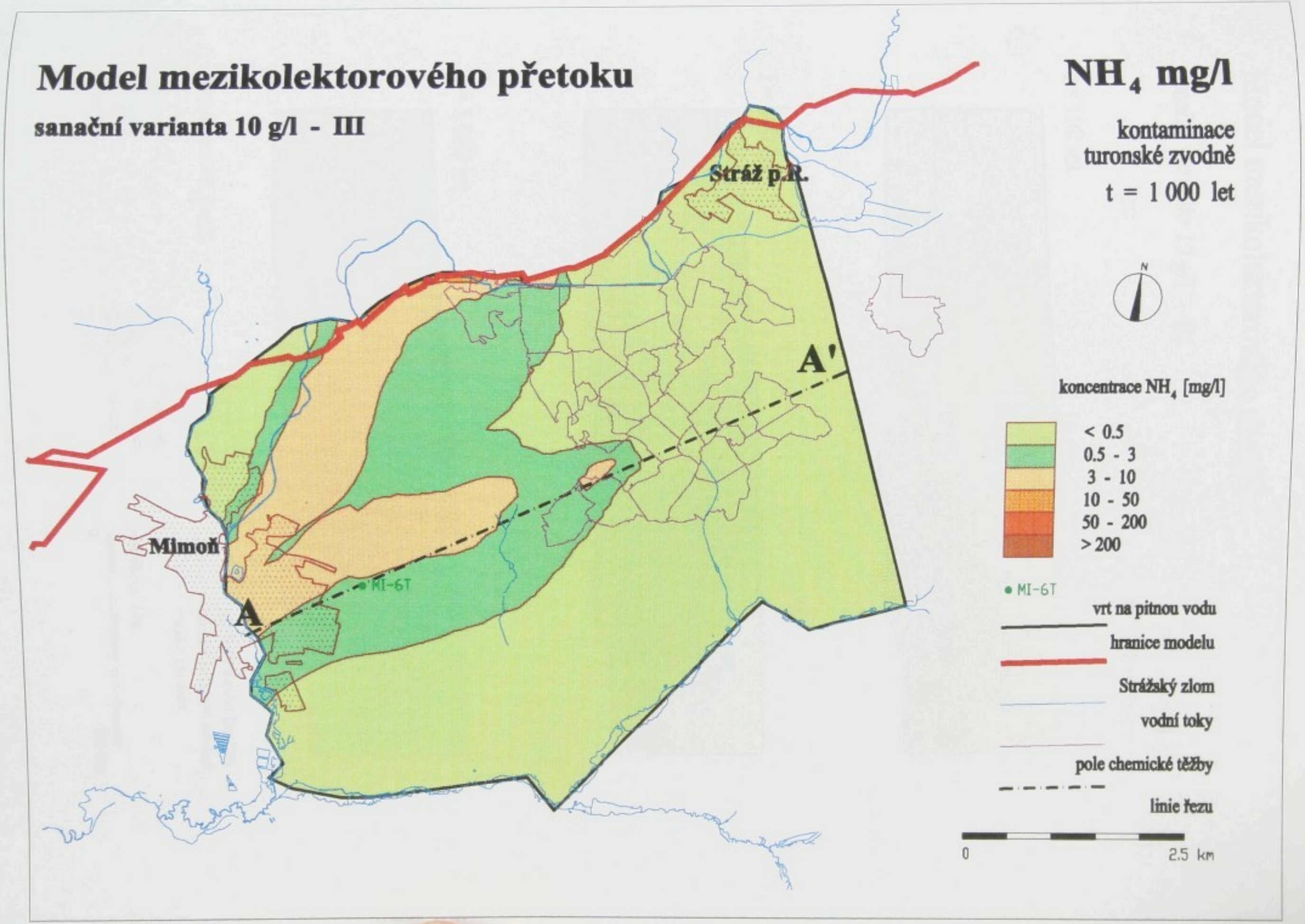
Obr. č. 3.5/44

Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 10 g/l - II

SO_4 g/l
v řezu modelem



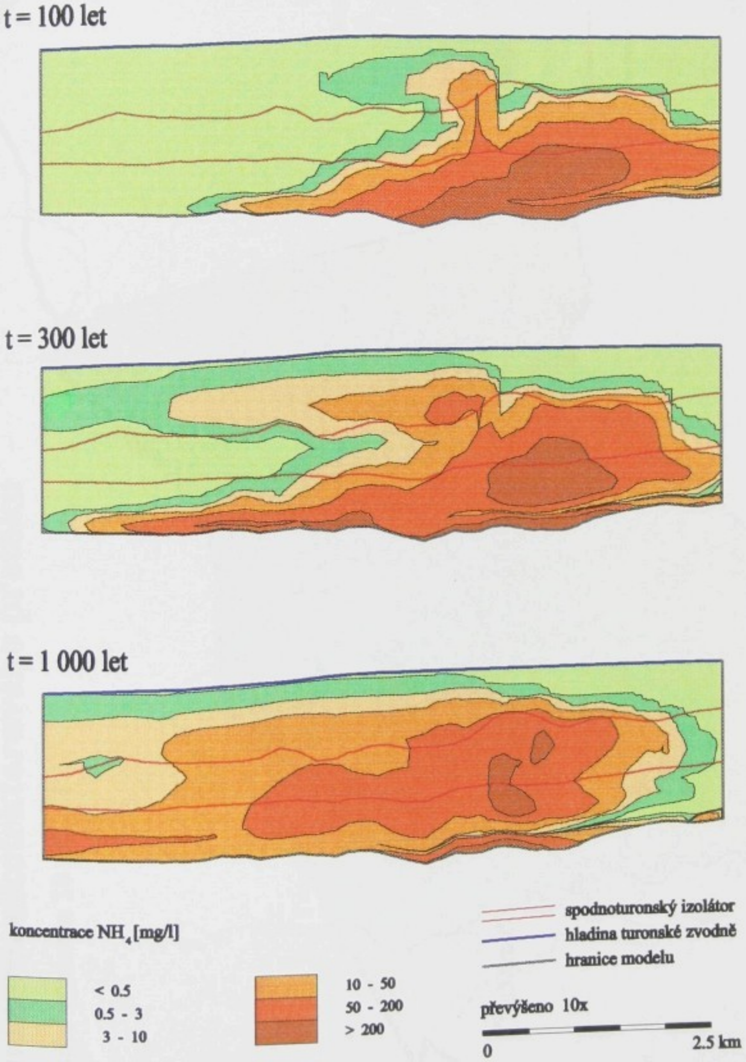

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - III
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/46

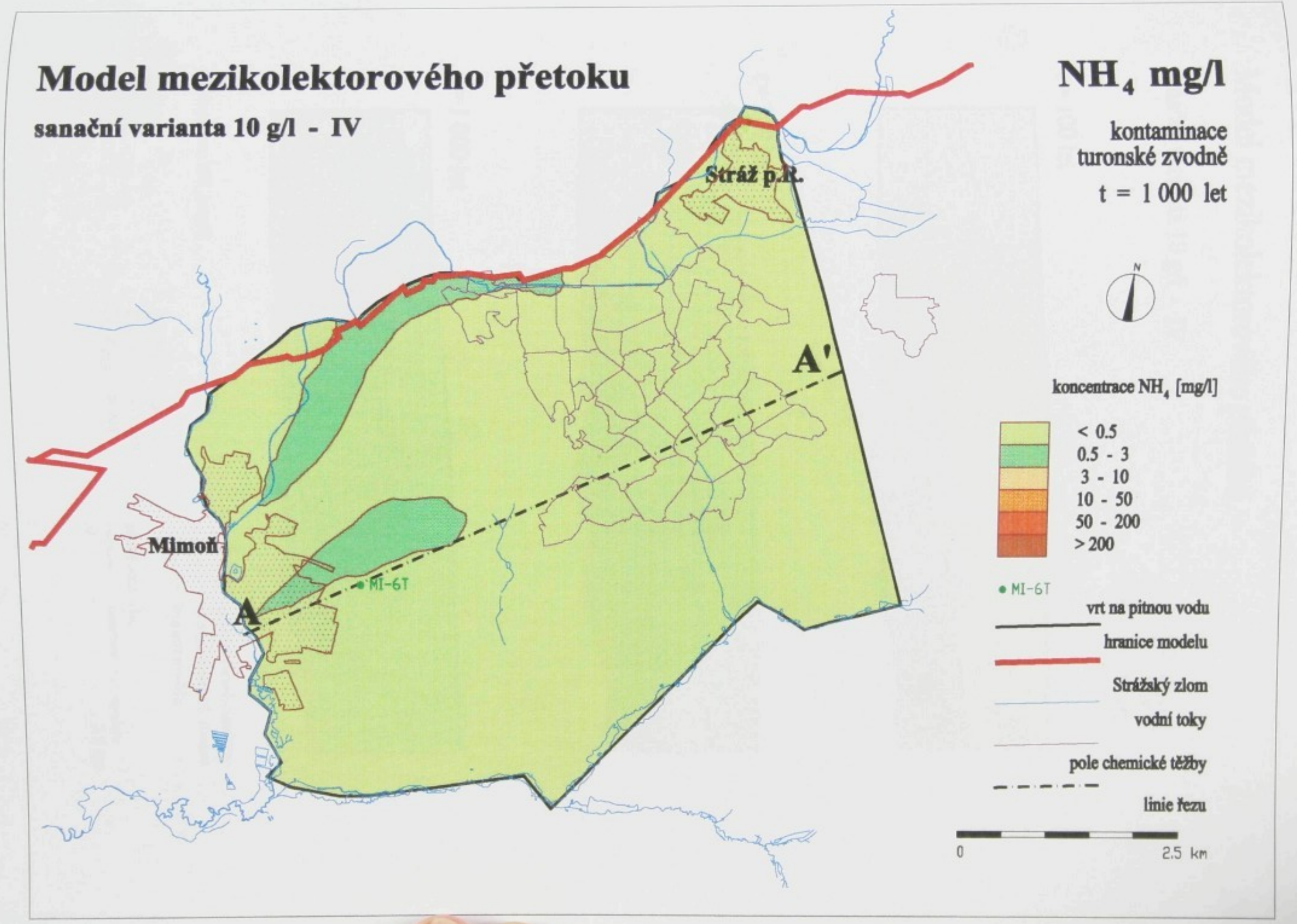
Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 10 g/l - III

NH_4 mg/l
řezu modelem



Obr. č. 3.5/47

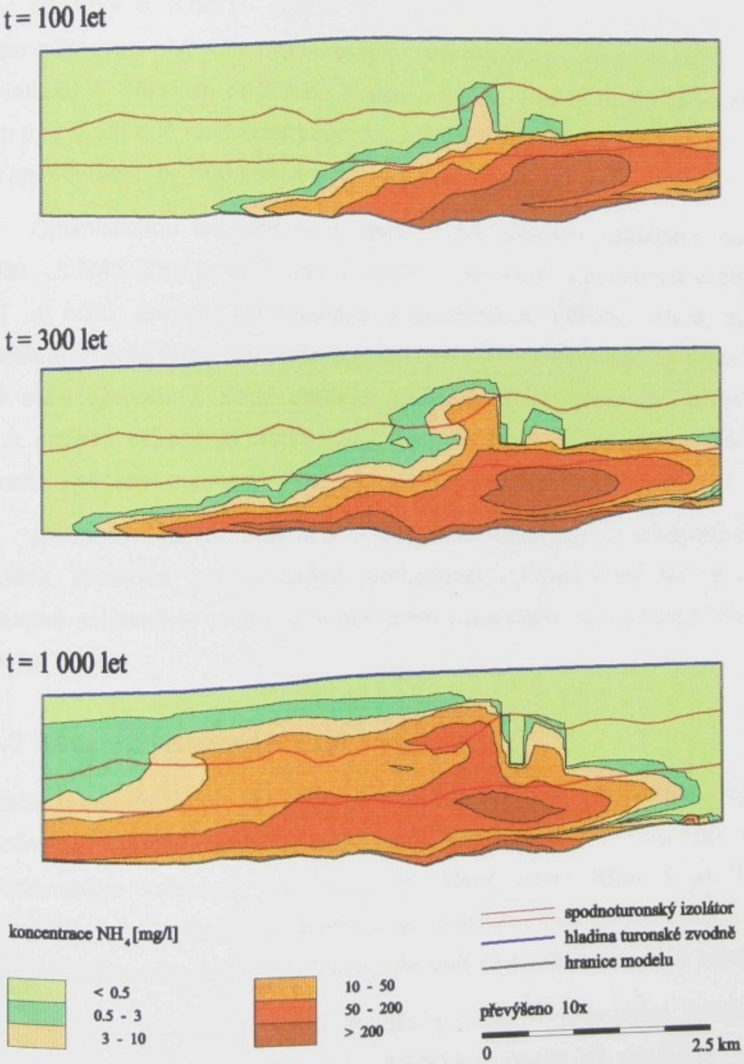

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 10 g/l - IV
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/48

Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 10 g/l - IV

NH_4 mg/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/49

Graficky jsou tyto závislosti vyobrazeny v grafech na obrázku č. 3.5/30. Odtud lze vypozorovat, že koncentrační přírůstky kontaminantů v Ploučnici budou po celé simulované období vzrůstat. Z číselných hodnot je však opět zřejmé, že Ploučnice nebude nikterak závažně ohrožena druhotnou kontaminací i v tomto případě. To je zřejmé i z tabulek č. 3.5/21 a 3.5/22, které uvádějí množství kontaminujících látek uniklých do Ploučnice.

Obrázky č. 3.5/31 - 3.5/38 graficky dokumentují postup koncentračního mraku zájmovou oblastí v průběhu simulovaného období v případě pesimistické subvarianty I. Přestože do turonu budou pronikat látky o menší koncentraci než tomu bylo v případě nulové varianty, bude limit C pro NH_4^+ překročen ve vrtu MI-6 již v období těsně po 100 letech od počátku simulace.

Optimistickou subvariantu II dokumentují stejným způsobem obrázky č. 3.5/39 - 3.5/45. Zde je opět patrná snížená vertikální propustnost v oblasti polí CHT a nižší úroveň cenomanské piezometrické hladiny, která způsobuje podstatné snížení přetoku v ploše polí CHT. Přetok v místě mezi VP-15 a VP-20 je však stále významný. Sada obrázků dokumentujících šíření složky SO_4^{2-} není úplná, protože situace ve vrstvě J2 v čase 100 let po začátku simulace není pro vykreslení nikterak zajímavá. Proto nebyl tento stav dokumentován.

Alternativní subvarianty III a IV jsou dokumentovány na obrázcích č. 3.5/46 - 3.5/49. Přestože byla vertikální propustnost v místě mezi VP-15 a VP-20 podstatně snížena, je přetok v tomto místě stále patrný a významný (viz obr. č. 3.5/47 a 3.5/49).

3.5.3 Sanační varianta – 3 g/l TDS

Sanační varianta - 3 g/l TDS je charakterizována počátečním rozložením koncentrací kontaminantů v cenomanu odpovídajícím stavu po vyčištění cenomanského kolektoru na úroveň průměrné koncentrace 3 g/l TDS (viz podkapitola 3.3.3). Turonský kolektor je uvažován bez kontaminace. V rámci simulace této varianty byly opět řešeny všechny čtyři subvarianty (viz kapitola 3.4).

Tabulka č. 3.5/23 uvádí množství TDS v turonském kolektoru dle jednotlivých subvariant. Na obrázku č. 3.5/50 je z uvedených dat vykreslen graf. Z obrázku je patrné, že v případě subvarianty I naroste množství TDS v turonu

Tabulka 3.5/23: Množství TDS v turonu dle subvariant – sanační varianta – 3 g/l TDS

Čas [rok]	Množství TDS v turonu dle subvariant [tis. t]			
	I	II	III	IV
0	0,000	0,000	0,000	0,000
50	4,237	0,173	0,322	0,008
100	15,531	1,040	2,107	0,056
150	25,757	2,688	5,750	0,169
200	29,222	4,757	10,194	0,371
250	30,407	6,382	14,510	0,682
300	32,368	7,456	18,934	1,118
350	35,416	8,367	23,774	1,690
400	39,326	9,365	28,988	2,417
450	43,481	10,486	34,360	3,317
500	47,343	11,692	39,606	4,395
550	50,660	12,900	44,466	5,637
600	53,392	14,009	48,768	7,001
650	55,604	14,941	52,445	8,429
700	57,378	15,670	55,508	9,857
750	58,773	16,220	58,010	11,225
800	59,821	16,637	60,021	12,492
850	60,538	16,978	61,603	13,636
900	60,939	17,286	62,804	14,651
950	61,047	17,588	63,660	15,549
1000	60,892	17,894	64,199	16,348

během prvních 200 let až na 30 tis. tun. Poté množství TDS roste méně prudce až ke svému maximu 61 tis. tun v čase 950 let.

V případě subvarianty II narůstá množství TDS pozvolněji po celou dobu simulace až k hodnotě 18 tis. tun, kterou pravděpodobně v dalším čase příliš nepřekročí

V případě alternativních subvariant III a IV dochází v průběhu celého simulovaného období k nárůstu množství TDS v turonu až k hodnotě 64 tis. tun, resp. 16 tis. tun.

V tabulkách č. 3.5/24 a 3.5/25 je uvedeno množství jednotlivých kontaminantů, které se rozšíří během sledovaného období z cenomanu do turonu v případě jednotlivých subvariant. Množství látek je v závislosti na čase vykresleno v grafech na obrázku č. 3.5/51. Z tabulky je zřejmé, že v průběhu tisíciletého období přeteče z cenomanu do turonu v případě subvarianty I této sanační varianty 202 tis. tun TDS, což je téměř 26% z uvažovaného počátečního množství rozpuštěných látek v cenomanu. V případě optimistického scénáře (subvarianta II) přeteče do turonu za 1000 let celkem 55 tis. tun TDS, tj. necelých 7% z uvažovaného počátečního množství rozpuštěných látek v cenomanu pro tuto variantu. V případě alternativní subvarianty III je toto množství ve srovnání se subvariantou I nižší o jednu třetinu, v případě subvarianty IV je přeteklé množství dvakrát menší než je tomu u subvarianty II.

V tabulkách č. 3.5/26 a 3.5/27 je shrnut vývoj koncentrací jednotlivých kontaminantů ve vrtu MI-6. Časová závislost koncentrací je vynesena v grafech na obrázku č. 3.5/52. Odtud je patrné, že v případě pesimistické subvarianty I bude mít koncentrační přírůstek dvě maxima. První v čase 200 let po začátku simulace (hodnoty 280 mg/l TDS, 221 mg/l SO_4^{2-} a 4,8 mg/l NH_4^+) a v čase 550 let po začátku simulace (hodnoty 226 mg/l TDS, 179 g/l SO_4^{2-} a 4,4 mg/l NH_4^+). Tyto hodnoty překračují pro NH_4^+ o 50% limit C normy ČSN 75 72 14. Poté koncentrace látek klesají. V případě optimistické varianty II dostoupí koncentrace svého globálního maxima po 750 letech. V té době se hodnoty koncentračních přírůstků pohybují kolem 82 mg/l TDS, 65 mg/l SO_4^{2-} a 1,7 mg/l NH_4^+. V tomto případě hodnoty koncentrací kontaminantů nepřestoupí limit C. Budeme-li takto posuzovat alternativní subvarianty, zjistíme, že v případě subvarianty III dostoupí

Tabulka č. 3.5/24: Množství látek přeteklých do turonu - sanační varianta - 3 g/l

Čas [rok]	Množství látky přeteklé do turonu dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	4.238	3.374	0.071	0.173	0.137	0.003
100	15.628	12.373	0.263	1.047	0.825	0.018
150	28.084	22.104	0.488	2.757	2.163	0.047
200	37.721	29.595	0.672	5.110	3.987	0.088
250	46.880	36.724	0.849	7.382	5.724	0.129
300	56.384	44.140	1.035	9.507	7.332	0.168
350	66.587	52.121	1.236	11.736	9.013	0.209
400	77.587	60.730	1.454	14.223	10.895	0.256
450	89.118	69.753	1.683	17.022	13.021	0.309
500	100.833	78.912	1.916	20.142	15.398	0.368
550	112.461	87.992	2.147	23.525	17.980	0.433
600	123.842	96.865	2.372	27.066	20.682	0.502
650	134.907	105.480	2.591	30.658	23.419	0.571
700	145.638	113.823	2.803	34.224	26.131	0.639
750	156.034	121.893	3.007	37.731	28.791	0.706
800	166.091	129.692	3.204	41.176	31.398	0.772
850	175.805	137.215	3.394	44.578	33.970	0.836
900	185.172	144.462	3.577	47.965	36.526	0.900
950	194.195	151.436	3.753	51.358	39.087	0.965
1000	202.883	158.146	3.921	54.773	41.665	1.029

Tabulka č. 3.5/25: Množství látek přeteklých do turonu - sanační varianta - 3 g/l

Čas [rok]	Množství látky přeteklé do turonu dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.323	0.255	0.006	0.008	0.005	0.000
100	2.117	1.672	0.038	0.062	0.040	0.001
150	5.884	4.627	0.108	0.197	0.125	0.003
200	10.870	8.515	0.203	0.447	0.286	0.006
250	16.375	12.794	0.312	0.839	0.543	0.011
300	22.559	17.604	0.435	1.393	0.913	0.020
350	29.526	23.028	0.574	2.125	1.414	0.031
400	37.251	29.048	0.729	3.061	2.065	0.046
450	45.631	35.580	0.897	4.226	2.889	0.066
500	54.484	42.480	1.075	5.637	3.903	0.091
550	63.597	49.578	1.257	7.291	5.105	0.120
600	72.789	56.729	1.441	9.163	6.476	0.154
650	81.930	63.834	1.623	11.213	7.985	0.192
700	90.949	70.835	1.802	13.392	9.593	0.232
750	99.815	77.709	1.977	15.658	11.267	0.274
800	108.523	84.455	2.149	17.982	12.985	0.317
850	117.080	91.078	2.317	20.351	14.737	0.360
900	125.492	97.585	2.482	22.767	16.525	0.405
950	133.764	103.980	2.644	25.241	18.358	0.450
1000	141.899	110.266	2.802	27.789	20.250	0.497

Tabulka č. 3.5/26: Koncentrace ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 3 g/l

Čas [rok]	Koncentrace ve vrtu MI-6 dle subvariant [mg/l]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.008	0.003	0.000	0.007	0.002	0.000
100	19.362	15.384	0.337	0.229	0.154	0.003
150	157.299	124.928	2.583	4.370	3.401	0.076
200	280.787	221.001	4.838	14.869	11.706	0.255
250	250.791	196.105	4.521	28.372	22.357	0.492
300	216.400	169.115	3.980	38.724	30.424	0.691
350	204.697	160.378	3.817	42.601	33.391	0.779
400	204.871	161.083	3.873	46.268	36.283	0.863
450	212.705	167.703	4.078	52.294	41.103	0.993
500	221.396	174.840	4.296	59.592	46.975	1.151
550	225.938	178.576	4.420	66.923	52.889	1.312
600	225.669	178.411	4.437	73.429	58.137	1.457
650	222.016	175.500	4.377	78.290	62.059	1.568
700	216.770	171.285	4.279	81.078	64.316	1.634
750	211.203	166.792	4.172	81.913	65.005	1.657
800	205.841	162.452	4.067	81.289	64.518	1.648
850	200.662	158.259	3.964	79.815	63.344	1.619
900	195.428	154.030	3.859	78.019	61.905	1.583
950	189.940	149.612	3.748	76.243	60.476	1.546
1000	184.148	144.967	3.630	74.638	59.179	1.513

Tabulka č. 3.5/27: Koncentrace ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 3 g/l

Čas [rok]	Koncentrace ve vrtu MI-6 dle subvariant [mg/l]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.008	0.003	0.000	0.007	0.002	0.000
100	0.435	0.315	0.007	0.060	0.020	0.000
150	8.379	6.586	0.146	0.175	0.063	0.000
200	26.753	21.129	0.455	0.354	0.146	0.001
250	46.638	36.694	0.812	0.596	0.280	0.004
300	54.606	42.775	0.981	0.924	0.491	0.008
350	58.236	45.597	1.072	1.383	0.817	0.015
400	65.409	51.343	1.228	2.031	1.305	0.026
450	75.845	59.723	1.449	2.939	2.012	0.042
500	87.942	69.421	1.707	4.194	3.005	0.066
550	99.997	79.064	1.965	5.876	4.348	0.099
600	110.522	87.469	2.190	8.034	6.079	0.143
650	118.854	94.103	2.367	10.672	8.199	0.197
700	125.060	99.021	2.497	13.747	10.674	0.261
750	129.600	102.592	2.590	17.173	13.433	0.333
800	133.016	105.255	2.658	20.822	16.371	0.410
850	135.741	107.359	2.710	24.535	19.359	0.488
900	138.021	109.106	2.752	28.140	22.258	0.564
950	139.948	110.573	2.787	31.480	24.941	0.633
1000	141.522	111.764	2.814	34.442	27.316	0.694

Tabulka č. 3.5/28: Množství ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 3 g/l

Čas [rok]	Množství ve vrtu MI-6 dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.089	0.071	0.002	0.001	0.001	0.000
150	2.279	1.812	0.038	0.046	0.035	0.001
200	8.194	6.487	0.137	0.286	0.223	0.005
250	15.264	12.031	0.262	0.843	0.662	0.014
300	21.256	16.714	0.371	1.729	1.360	0.030
350	26.679	20.956	0.472	2.791	2.192	0.049
400	31.966	25.106	0.571	3.938	3.092	0.070
450	37.368	29.359	0.674	5.211	4.091	0.094
500	42.999	33.804	0.783	6.660	5.231	0.122
550	48.808	38.393	0.896	8.300	6.526	0.154
600	54.670	43.027	1.011	10.122	7.968	0.190
650	60.477	47.618	1.125	12.093	9.529	0.229
700	66.166	52.114	1.237	14.163	11.170	0.271
750	71.712	56.495	1.347	16.279	12.849	0.314
800	77.116	60.761	1.454	18.397	14.530	0.357
850	82.384	64.918	1.558	20.486	16.188	0.399
900	87.518	68.965	1.659	22.531	17.811	0.440
950	92.513	72.901	1.758	24.530	19.397	0.481
1000	97.362	76.719	1.853	26.485	20.948	0.521

Tabulka č. 3.5/29: Množství ve vrtu MI-6 - sanační varianta - 3 g/l

Čas [rok]	Množství ve vrtu MI-6 dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
150	0.088	0.068	0.002	0.004	0.001	0.000
200	0.530	0.417	0.009	0.010	0.004	0.000
250	1.495	1.178	0.026	0.023	0.009	0.000
300	2.833	2.228	0.049	0.042	0.019	0.000
350	4.291	3.369	0.076	0.072	0.036	0.001
400	5.885	4.619	0.106	0.115	0.063	0.001
450	7.710	6.054	0.140	0.179	0.105	0.002
500	9.831	7.726	0.181	0.271	0.170	0.003
550	12.269	9.653	0.229	0.400	0.264	0.005
600	15.002	11.814	0.283	0.580	0.398	0.009
650	17.980	14.172	0.342	0.821	0.583	0.013
700	21.145	16.678	0.405	1.137	0.827	0.019
750	24.449	19.293	0.471	1.537	1.139	0.027
800	27.854	21.989	0.539	2.029	1.525	0.036
850	31.338	24.745	0.608	2.617	1.988	0.048
900	34.887	27.551	0.679	3.300	2.527	0.061
950	38.490	30.399	0.751	4.073	3.140	0.077
1000	42.139	33.281	0.824	4.929	3.818	0.094

Tabulka č. 3.5/30: Koncentrace v Ploučnici - sanační varianta - 3 g/l

Čas [rok]	Koncentrace v Ploučnici dle subvariant [mg/l]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
150	0.008	0.006	0.000	0.001	0.000	0.000
200	0.029	0.022	0.001	0.002	0.001	0.000
250	0.076	0.058	0.001	0.005	0.003	0.000
300	0.136	0.104	0.003	0.009	0.005	0.000
350	0.193	0.148	0.004	0.015	0.009	0.000
400	0.258	0.197	0.005	0.022	0.013	0.000
450	0.338	0.260	0.007	0.030	0.019	0.000
500	0.429	0.330	0.009	0.039	0.025	0.001
550	0.524	0.404	0.011	0.050	0.033	0.001
600	0.616	0.476	0.013	0.062	0.042	0.001
650	0.700	0.542	0.015	0.075	0.052	0.001
700	0.772	0.598	0.016	0.090	0.062	0.002
750	0.829	0.643	0.017	0.105	0.074	0.002
800	0.873	0.677	0.018	0.119	0.085	0.002
850	0.904	0.702	0.019	0.134	0.096	0.002
900	0.924	0.718	0.019	0.148	0.108	0.003
950	0.937	0.728	0.019	0.162	0.118	0.003
1000	0.943	0.733	0.019	0.175	0.129	0.003

Tabulka č. 3.5/31: Koncentrace v Ploučnici - sanační varianta - 3 g/l

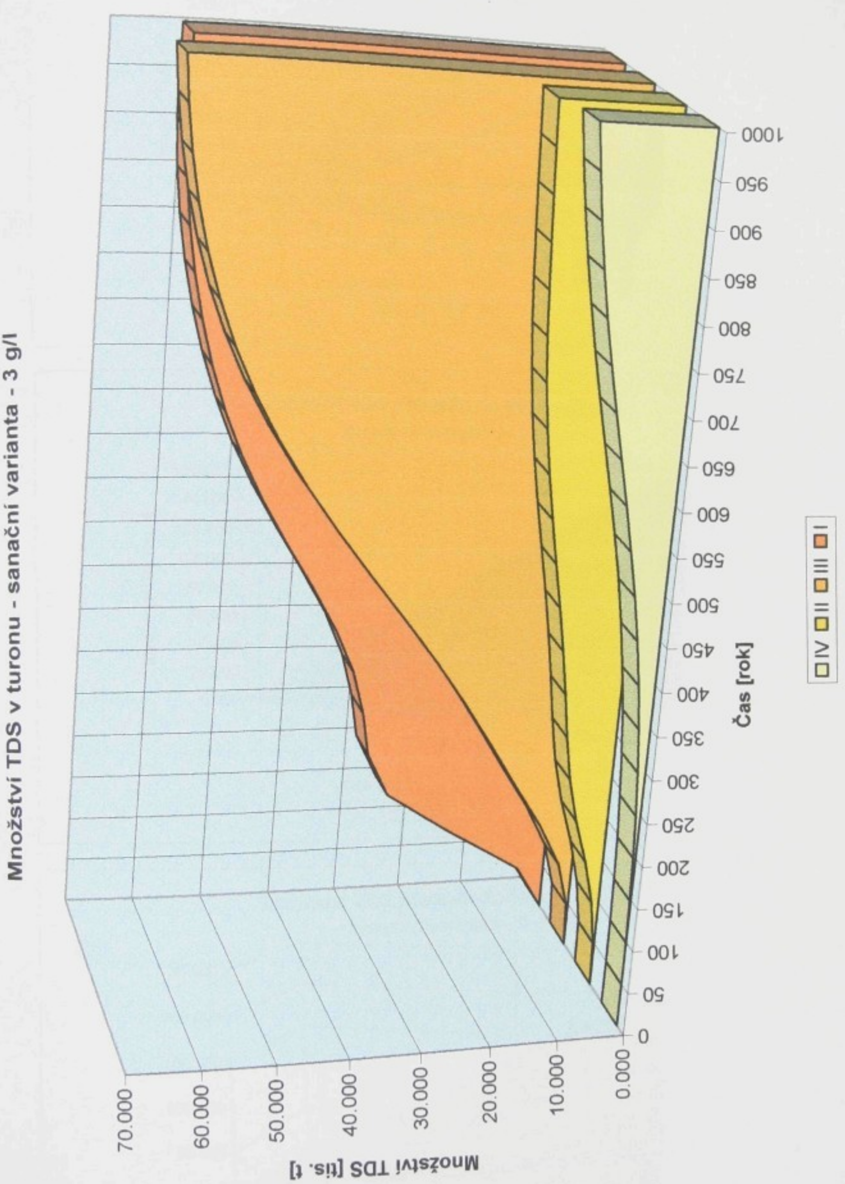
Čas [rok]	Koncentrace v Ploučnici dle subvariant [mg/l]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
150	0.009	0.007	0.000	0.001	0.000	0.000
200	0.026	0.020	0.001	0.002	0.001	0.000
250	0.055	0.042	0.001	0.005	0.003	0.000
300	0.098	0.074	0.002	0.008	0.005	0.000
350	0.158	0.120	0.003	0.013	0.007	0.000
400	0.235	0.179	0.005	0.019	0.011	0.000
450	0.326	0.250	0.007	0.027	0.016	0.000
500	0.426	0.328	0.009	0.036	0.023	0.001
550	0.530	0.409	0.011	0.047	0.031	0.001
600	0.631	0.488	0.013	0.059	0.040	0.001
650	0.724	0.561	0.015	0.073	0.050	0.001
700	0.804	0.623	0.017	0.087	0.061	0.002
750	0.868	0.674	0.018	0.103	0.072	0.002
800	0.917	0.712	0.019	0.118	0.084	0.002
850	0.952	0.740	0.020	0.134	0.096	0.002
900	0.976	0.758	0.020	0.149	0.108	0.003
950	0.990	0.770	0.021	0.164	0.119	0.003
1000	0.998	0.776	0.021	0.178	0.131	0.003

Tabulka č. 3.5/32: Množství v Ploučnici - sanační varianta - 3 g/l

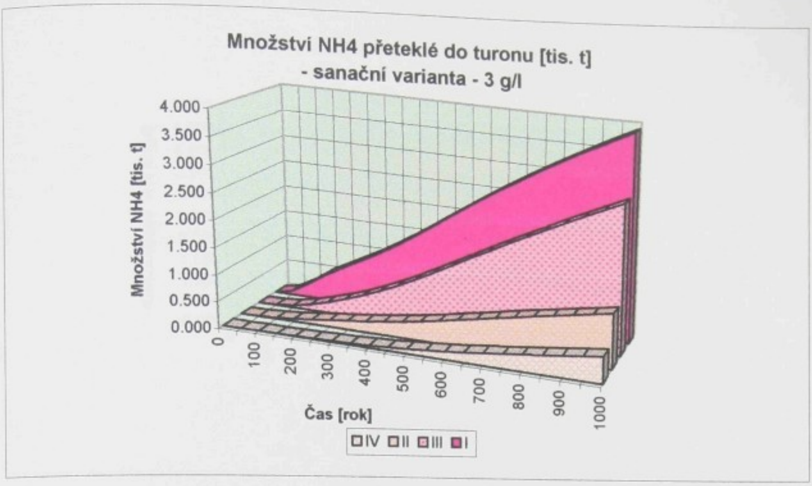
Čas [rok]	Množství v Ploučnici dle subvariant [tis. t]					
	I			II		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
150	0.022	0.016	0.000	0.002	0.001	0.000
200	0.087	0.066	0.002	0.007	0.004	0.000
250	0.258	0.197	0.005	0.019	0.010	0.000
300	0.565	0.432	0.011	0.040	0.022	0.000
350	1.001	0.765	0.020	0.073	0.042	0.001
400	1.583	1.211	0.031	0.122	0.072	0.001
450	2.347	1.797	0.047	0.189	0.114	0.002
500	3.316	2.543	0.067	0.277	0.170	0.004
550	4.499	3.455	0.091	0.389	0.244	0.006
600	5.890	4.531	0.120	0.529	0.338	0.008
650	7.470	5.755	0.153	0.700	0.455	0.011
700	9.212	7.105	0.189	0.902	0.596	0.014
750	11.084	8.557	0.228	1.139	0.763	0.018
800	13.054	10.086	0.269	1.408	0.955	0.023
850	15.094	11.670	0.311	1.711	1.173	0.029
900	17.182	13.291	0.354	2.046	1.416	0.035
950	19.297	14.934	0.398	2.413	1.683	0.042
1000	21.427	16.589	0.442	2.809	1.973	0.050

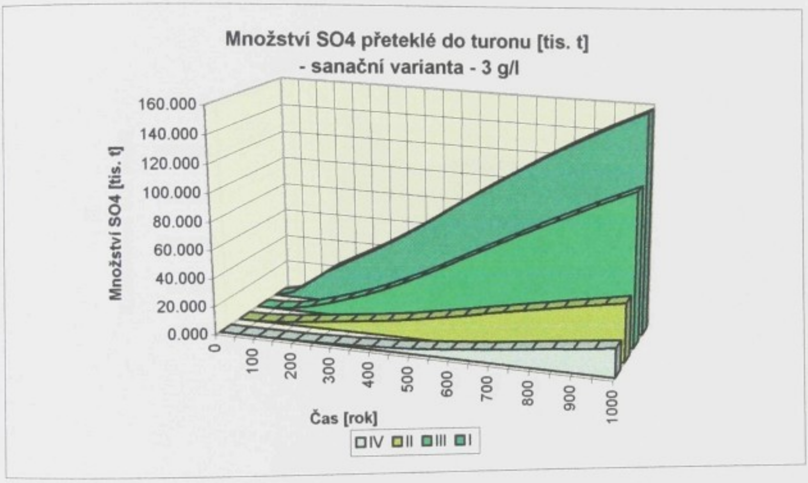
Tabulka č. 3.5/33: Množství v Ploučnici - sanační varianta - 3 g/l

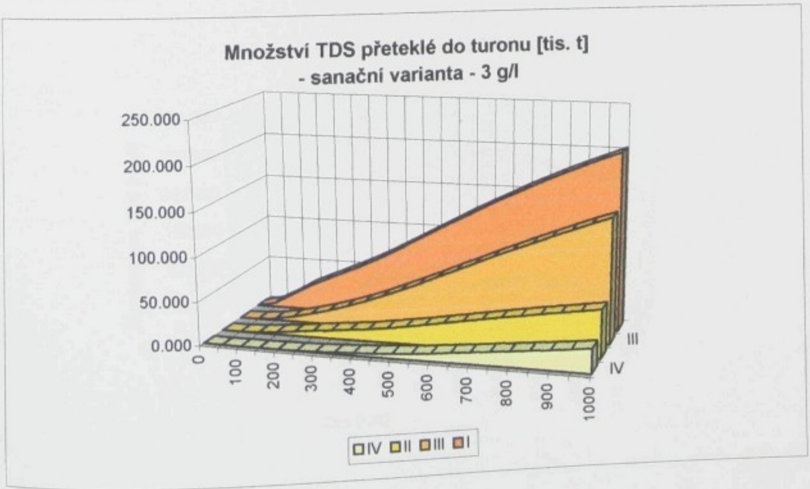
Čas [rok]	Množství v Ploučnici dle subvariant [tis. t]					
	III			IV		
	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+	TDS	SO_4^{2-}	NH_4^+
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
150	0.023	0.017	0.000	0.002	0.001	0.000
200	0.082	0.062	0.002	0.007	0.004	0.000
250	0.206	0.155	0.004	0.018	0.010	0.000
300	0.428	0.323	0.009	0.038	0.020	0.000
350	0.785	0.595	0.016	0.067	0.037	0.001
400	1.315	1.000	0.027	0.111	0.063	0.001
450	2.050	1.563	0.042	0.172	0.100	0.002
500	3.012	2.303	0.062	0.253	0.151	0.003
550	4.209	3.227	0.087	0.359	0.220	0.005
600	5.634	4.329	0.117	0.493	0.309	0.007
650	7.269	5.595	0.151	0.658	0.421	0.010
700	9.083	7.003	0.189	0.855	0.558	0.013
750	11.043	8.524	0.230	1.087	0.721	0.018
800	13.112	10.132	0.273	1.353	0.910	0.022
850	15.262	11.802	0.318	1.655	1.127	0.028
900	17.465	13.514	0.363	1.991	1.370	0.034
950	19.701	15.252	0.410	2.361	1.640	0.041
1000	21.955	17.005	0.456	2.763	1.935	0.049


Množství TDS v turonu - sanační varianta - 3 g/l
Množství TDS [tis. t]
70.000
60.000
50.000
40.000
30.000
20.000
10.000
0.000
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
Čas [rok]
IV
II
III
I

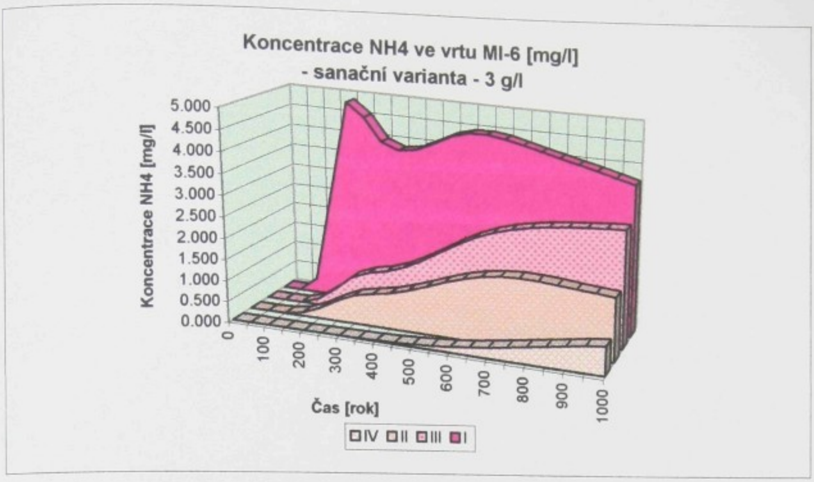
Obr. č. 3.5/50

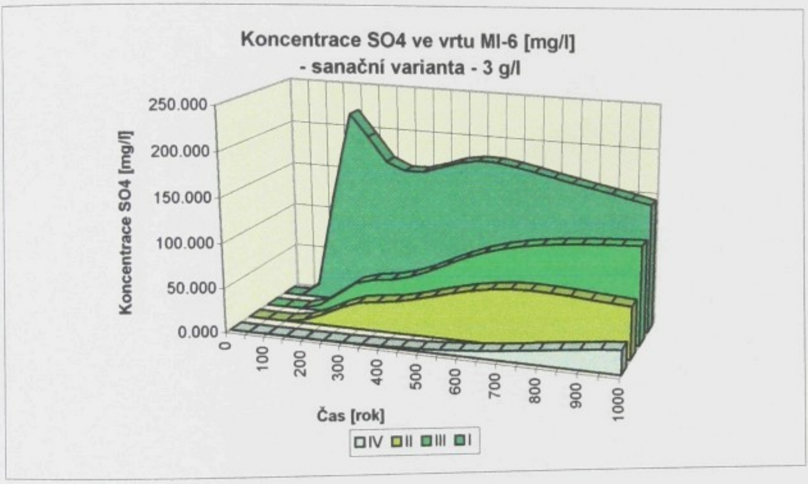

Množství NH4 přeteklé do turonu [tis. t]
- sanační varianta - 3 g/l
Množství NH4 [tis. t]
4.000
3.500
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
0.500
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I

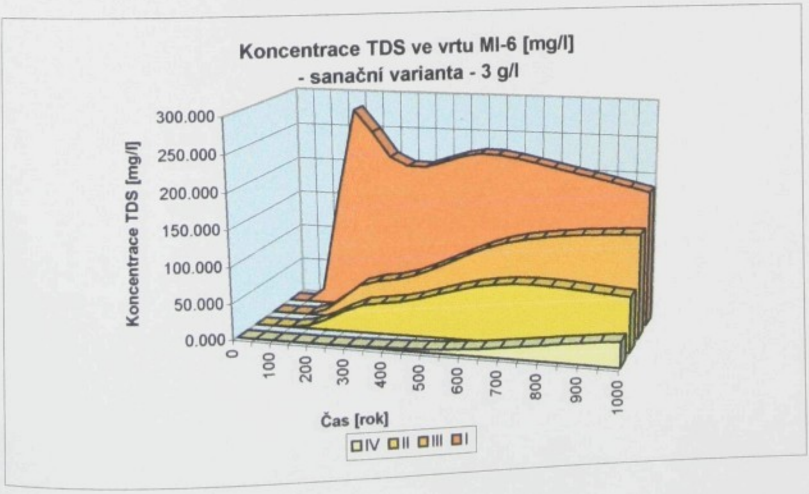

Množství SO4 přeteklé do turonu [tis. t]
- sanační varianta - 3 g/l
Množství SO4 [tis. t]
160.000
140.000
120.000
100.000
80.000
60.000
40.000
20.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II III I


Množství TDS přeteklé do turonu [tis. t]
- sanační varianta - 3 g/l
250.000
200.000
150.000
100.000
50.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
III
IV
IV II III I

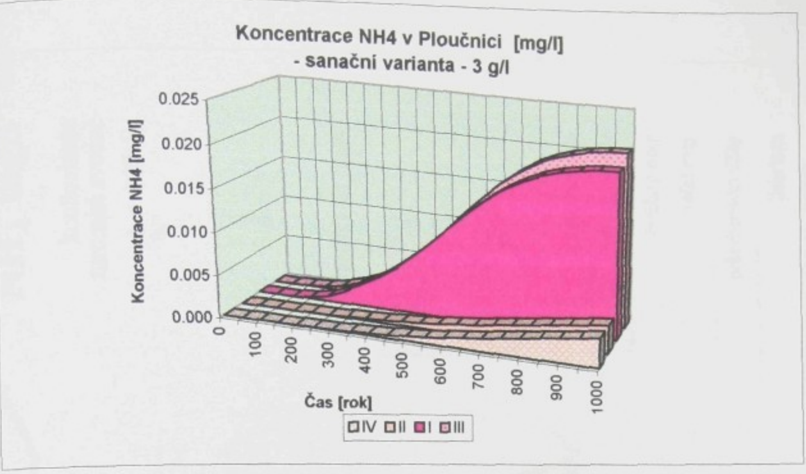
Obr. č. 3.5/51

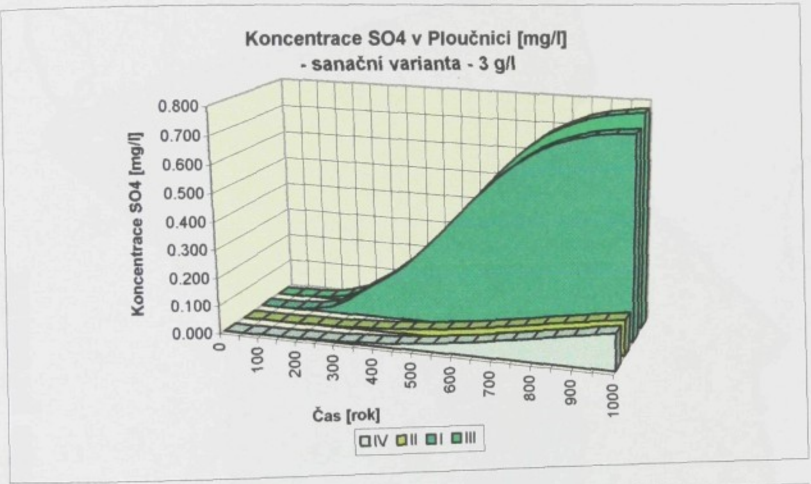

Koncentrace NH4 ve vrtu MI-6 [mg/l]
- sanační varianta - 3 g/l
Koncentrace NH4 [mg/l]
5.000
4.500
4.000
3.500
3.000
2.500
2.000
1.500
1.000
0.500
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV
II
III
I

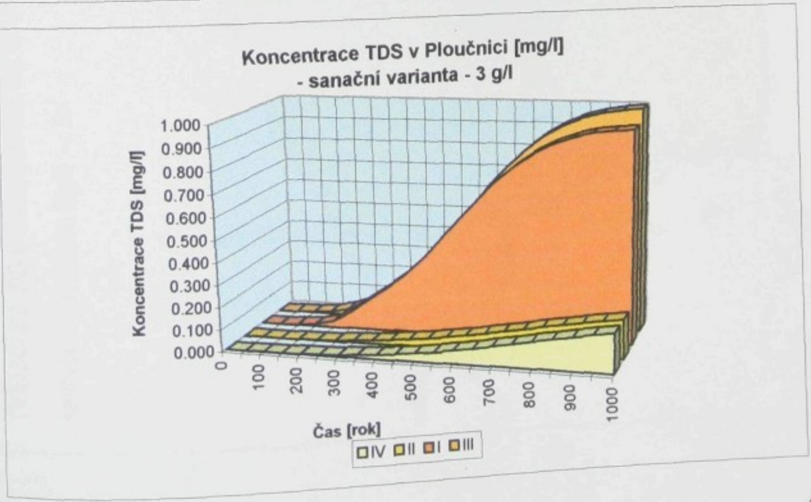

Koncentrace SO4 ve vrtu MI-6 [mg/l]
- sanační varianta - 3 g/l
Koncentrace SO4 [mg/l]
250.000
200.000
150.000
100.000
50.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV
II
III
I


Koncentrace TDS ve vrtu MI-6 [mg/l]
- sanační varianta - 3 g/l
Koncentrace TDS [mg/l]
300.000
250.000
200.000
150.000
100.000
50.000
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV
II
III
I

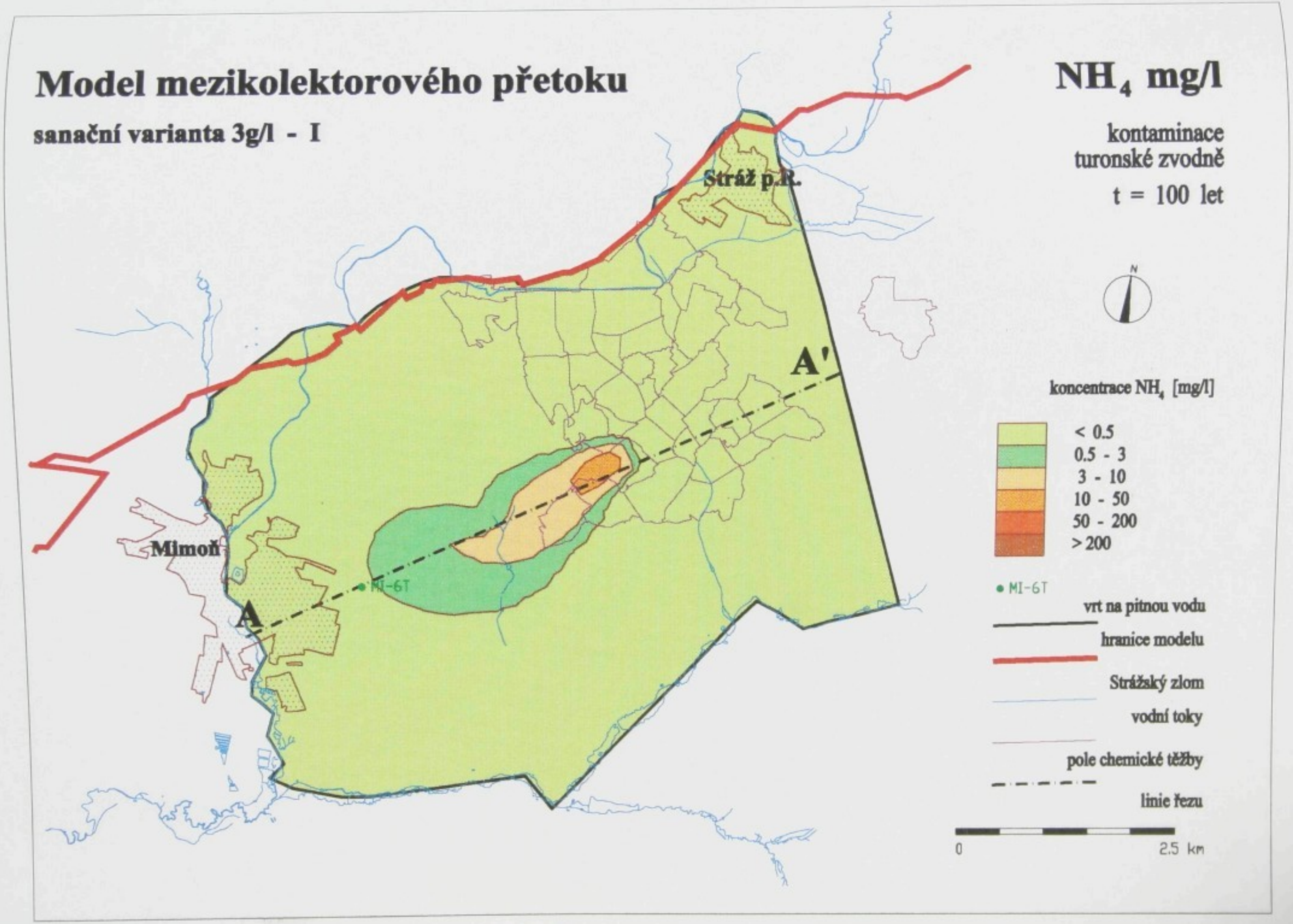
Obr. č. 3.5/52


Koncentrace NH4 v Ploučnici [mg/l]
- sanační varianta - 3 g/l
Koncentrace NH4 [mg/l]
0.025
0.020
0.015
0.010
0.005
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III

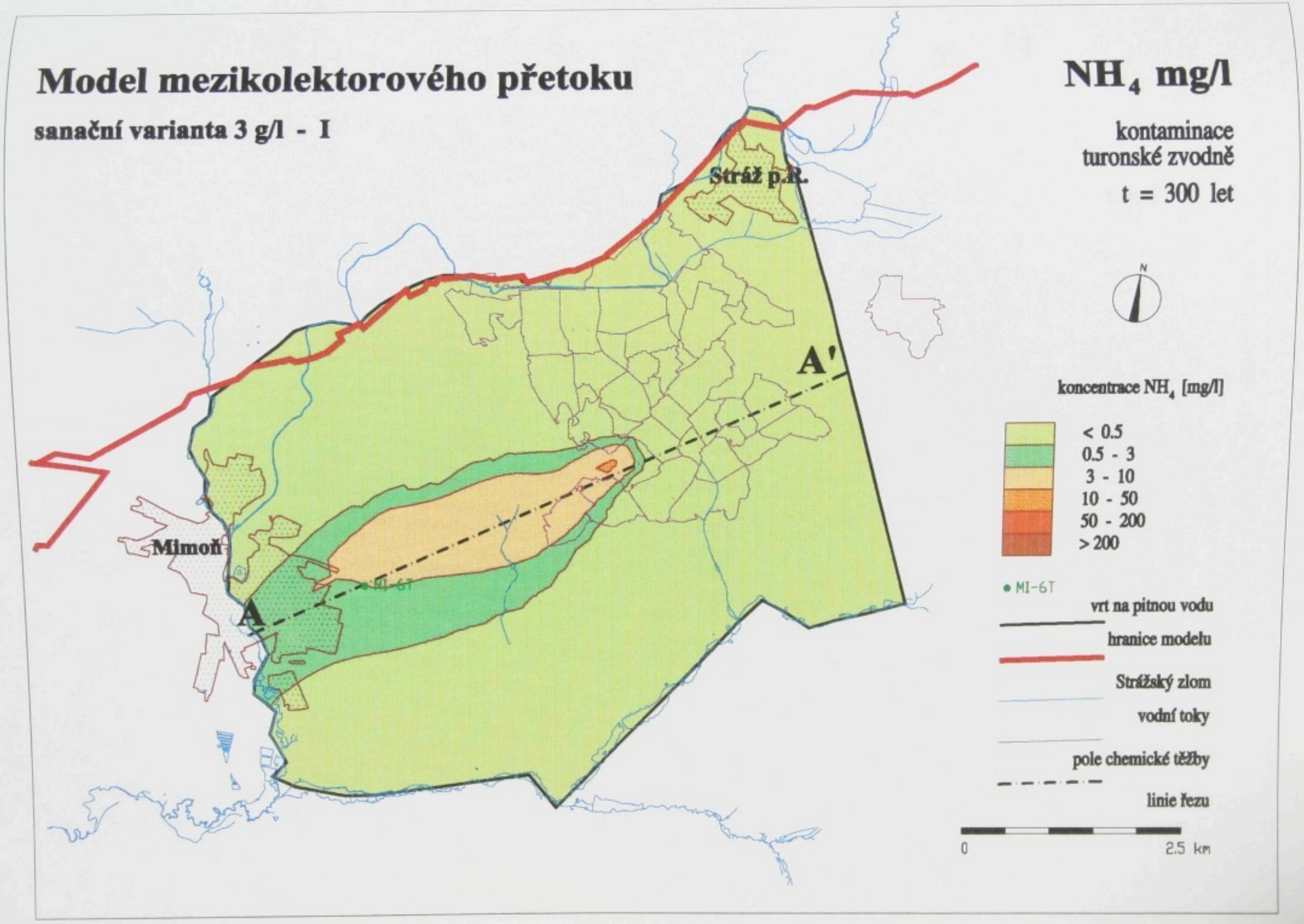

Koncentrace SO4 v Ploučnici [mg/l]
- sanační varianta - 3 g/l
Koncentrace SO4 [mg/l]
0.800
0.700
0.600
0.500
0.400
0.300
0.200
0.100
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III


Koncentrace TDS v Ploučnici [mg/l]
- sanační varianta - 3 g/l
Koncentrace TDS [mg/l]
1.000
0.900
0.800
0.700
0.600
0.500
0.400
0.300
0.200
0.100
0.000
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Čas [rok]
IV II I III

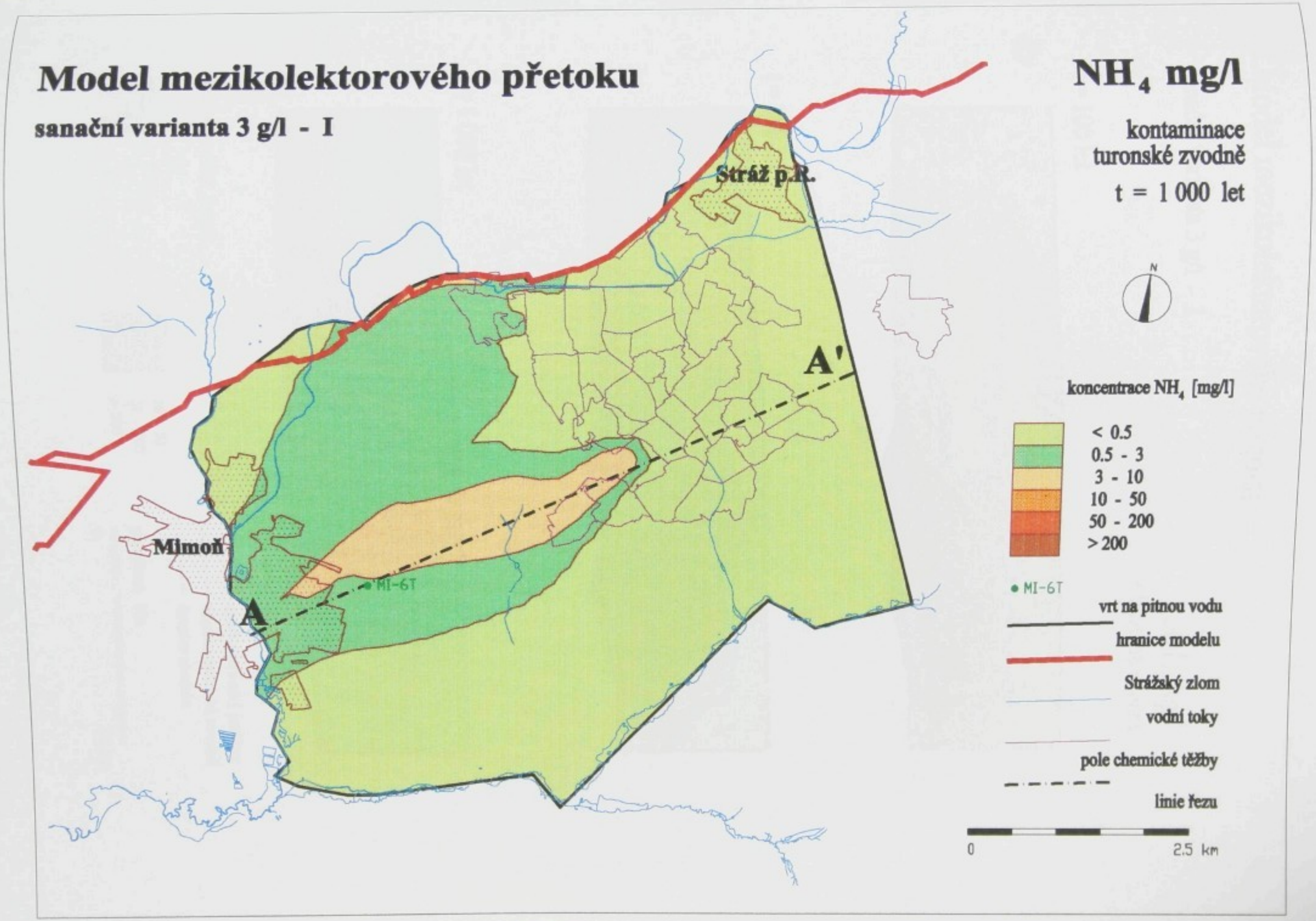
Obr. č. 3.5/53


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3g/l - I
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 100 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/54


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - I
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
N
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/55



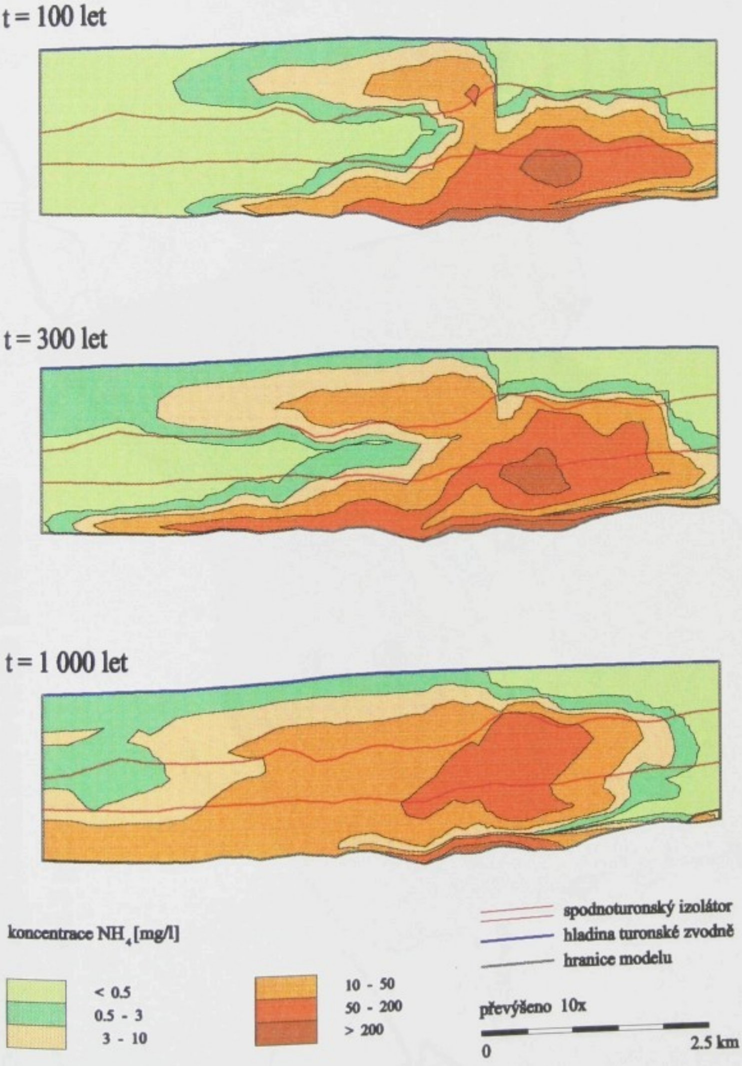
Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - I
NH_4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH_4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/56

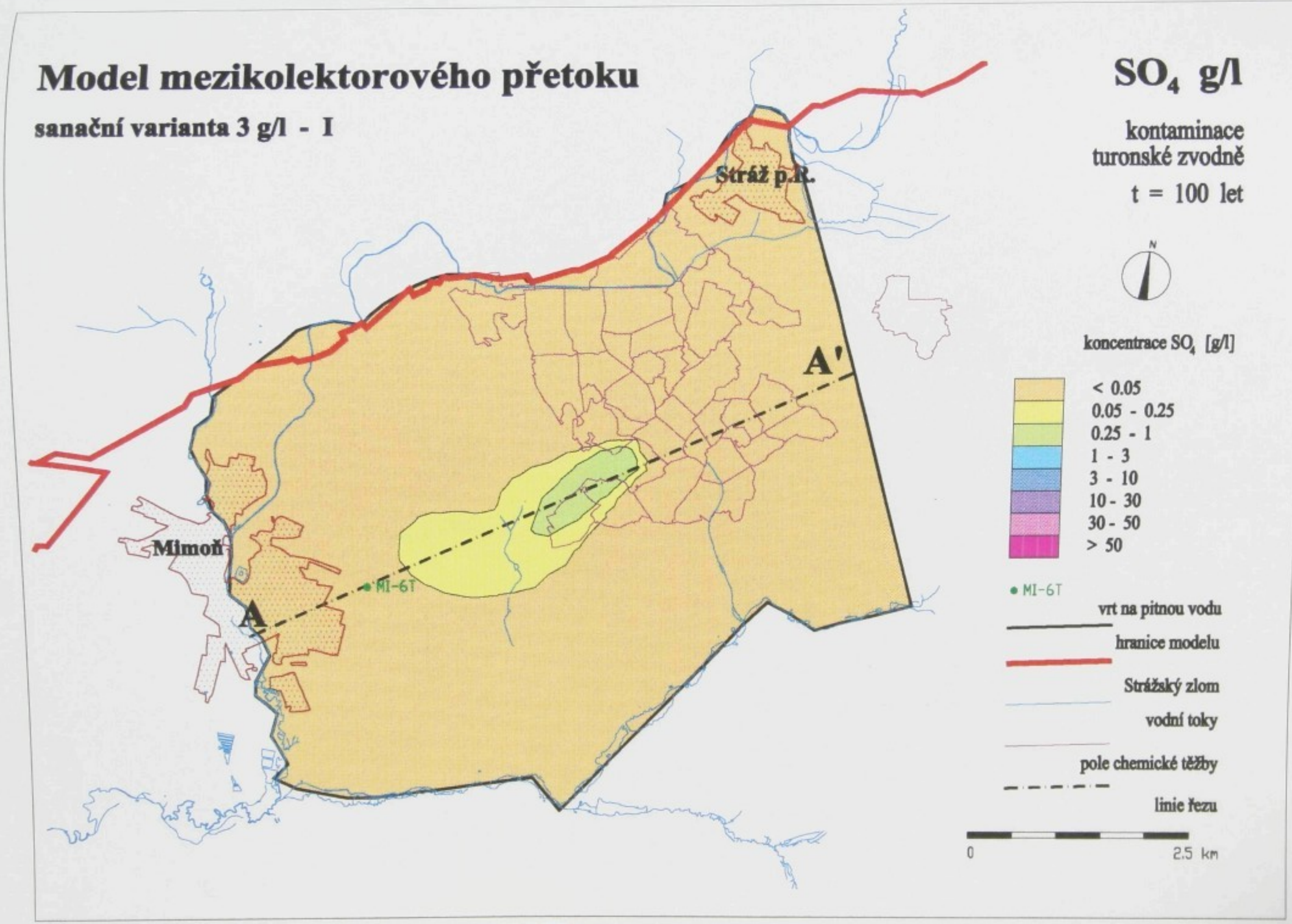
Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 3 g/l - I

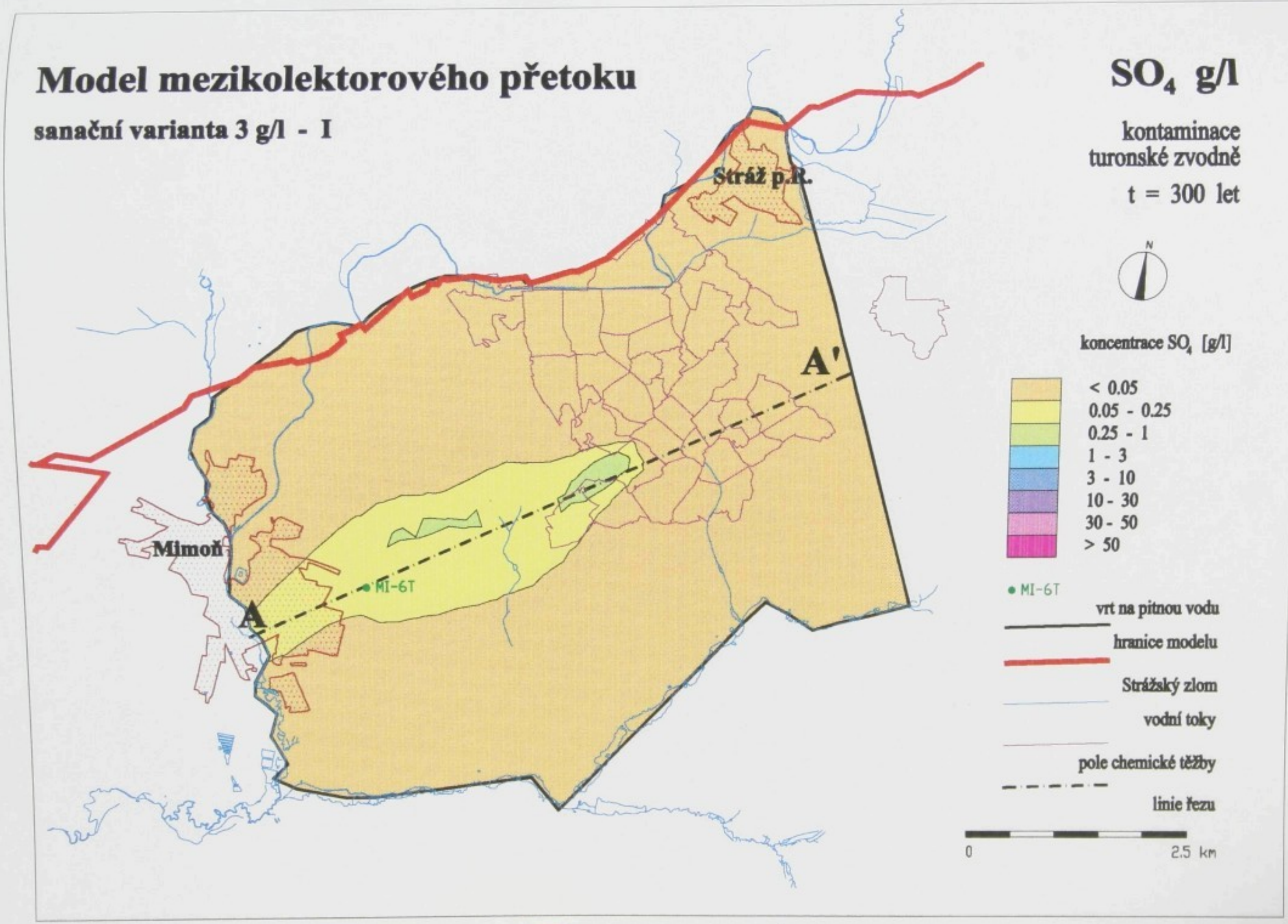
NH_4 mg/l
v řezu modelem



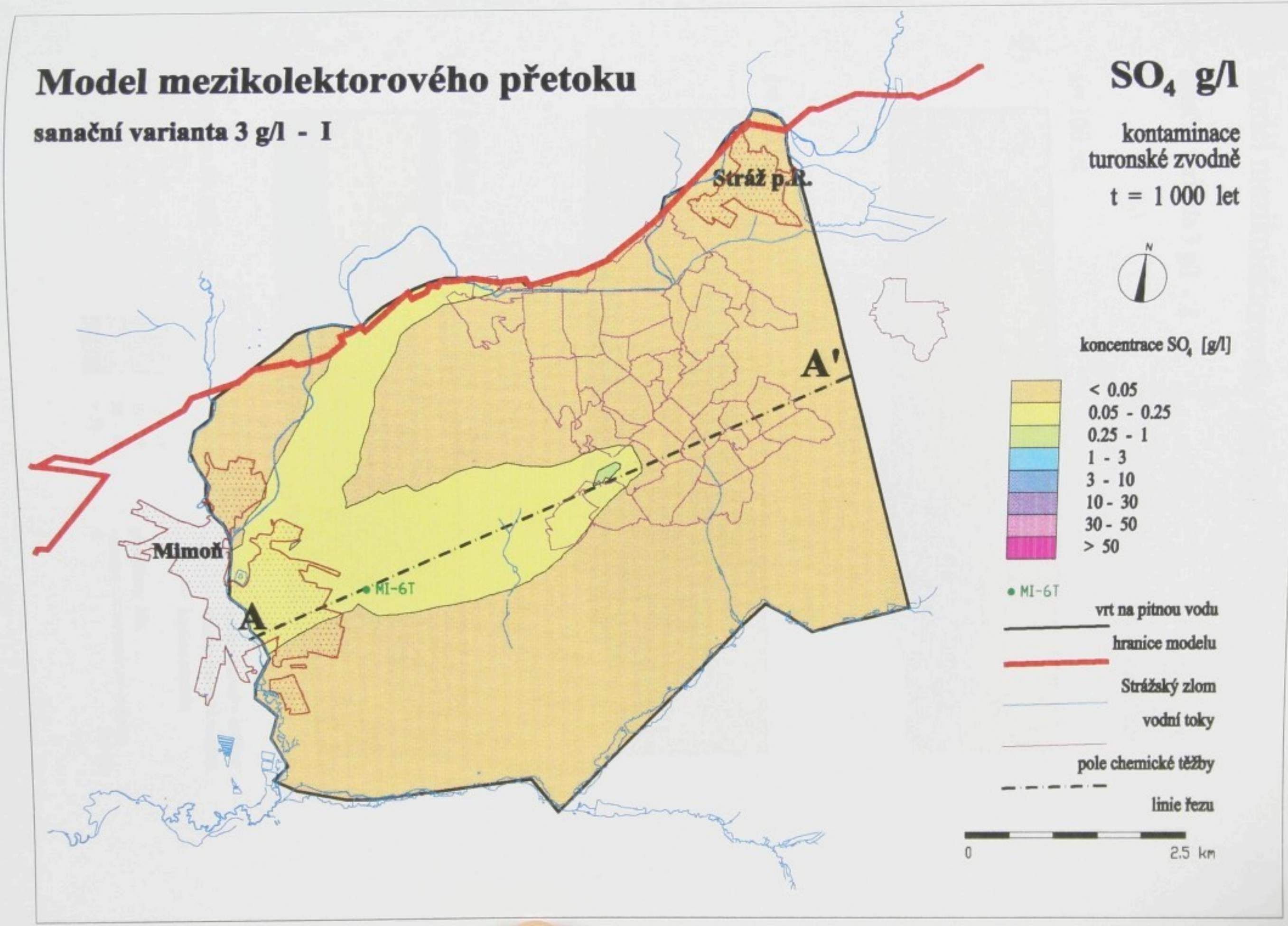
Obr. č. 3.5/57


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - I
SO_4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 100 let
N
koncentrace SO_4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/58


Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - I
SO4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
N
koncentrace SO4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/59

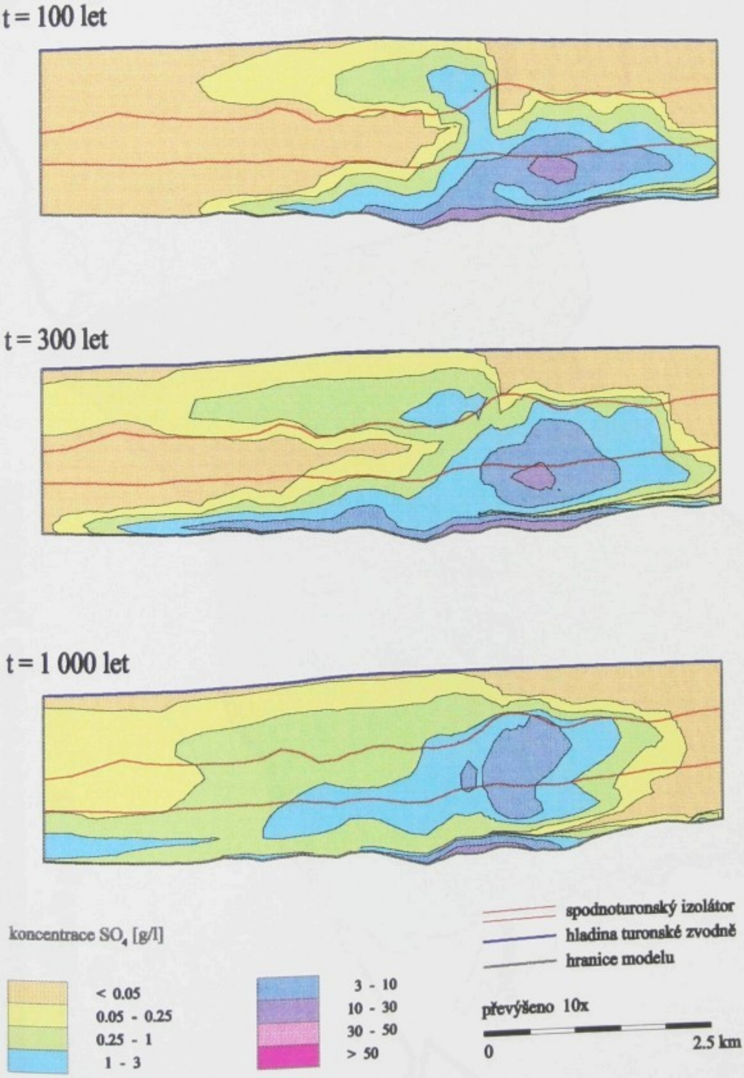

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - I
SO4 g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace SO4 [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/60

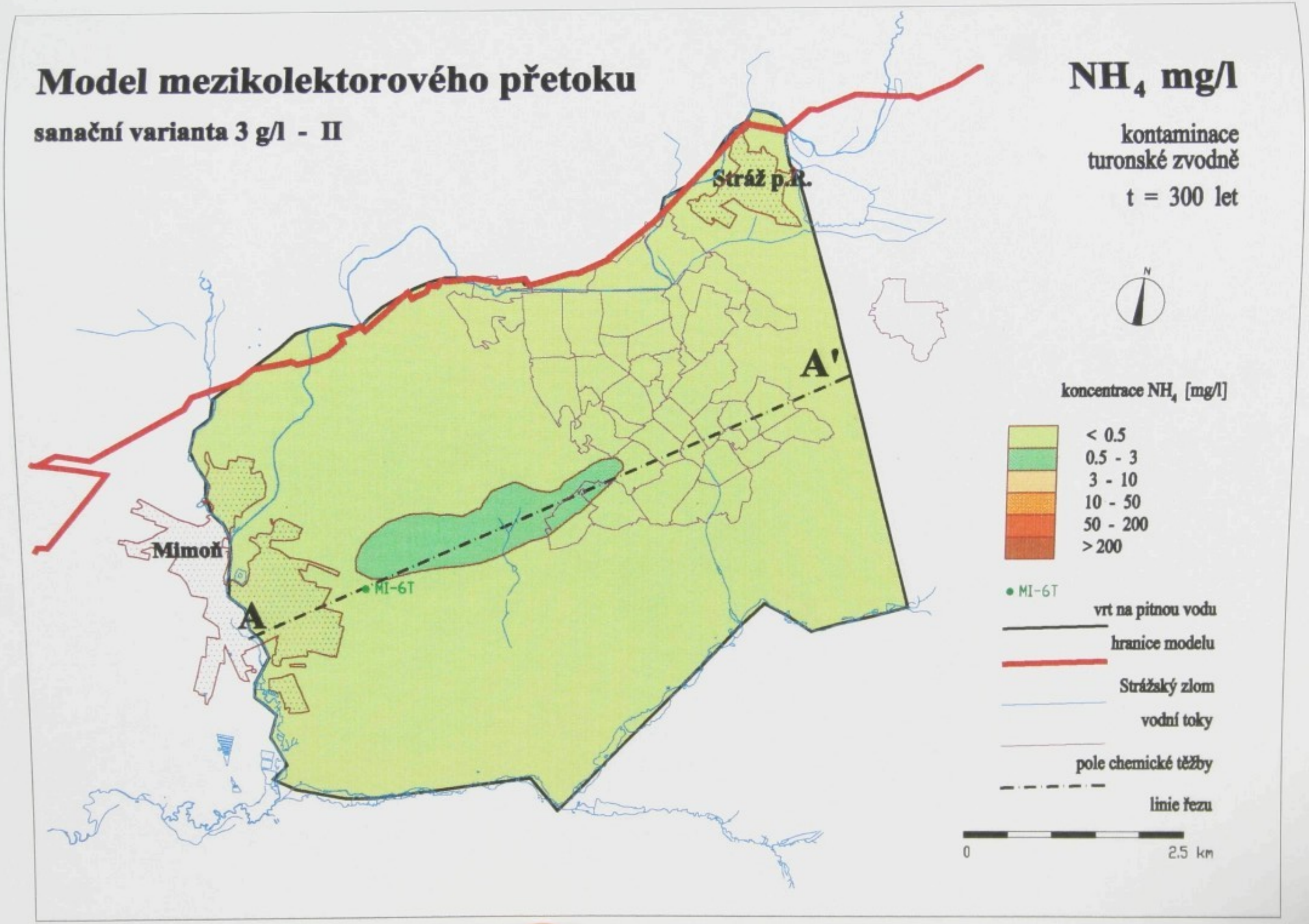
Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 3 g/l - I

SO_4 g/l
v řezu modelem

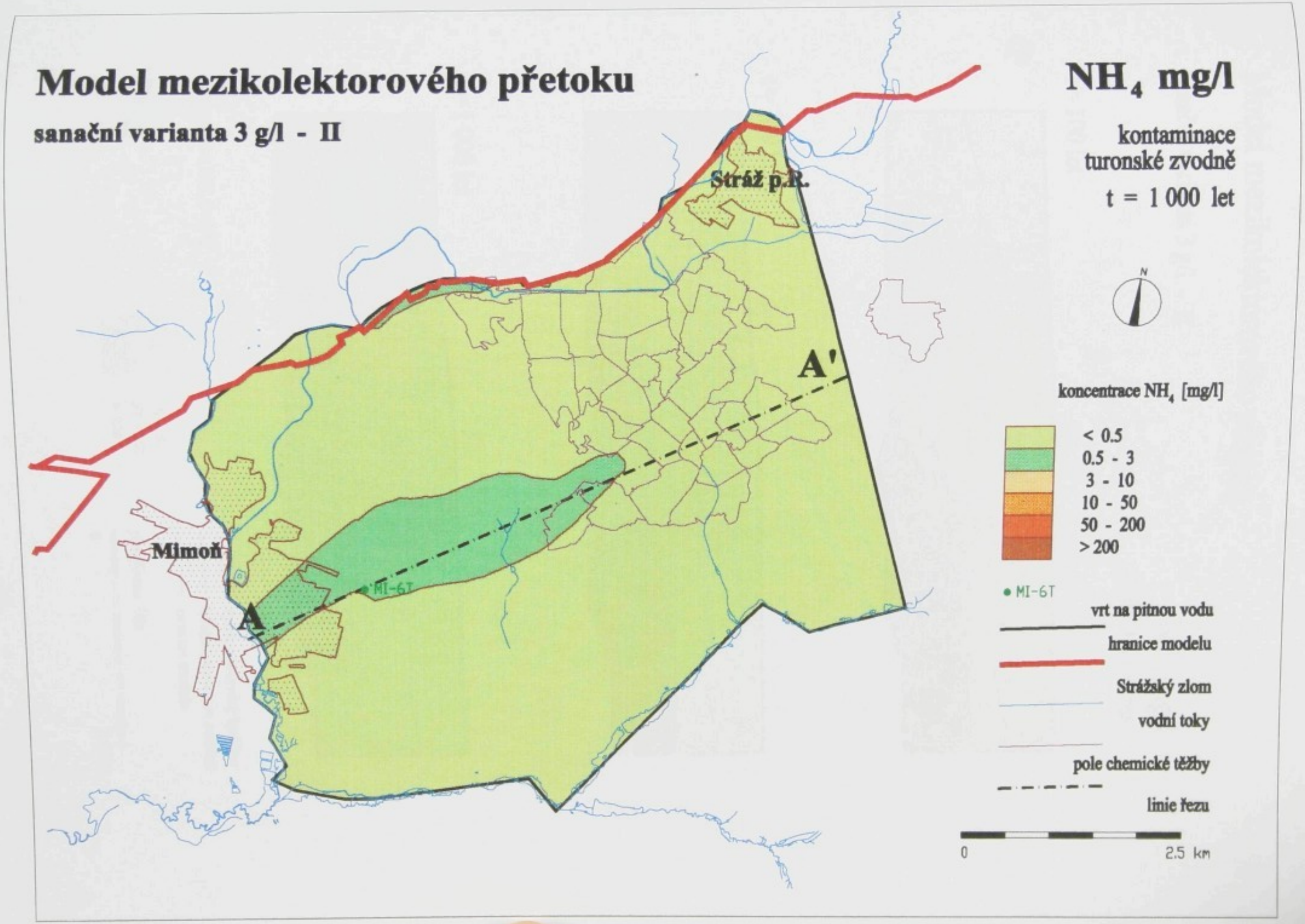


Obr. č. 3.5/61



Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - II
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 300 let
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
N
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/62

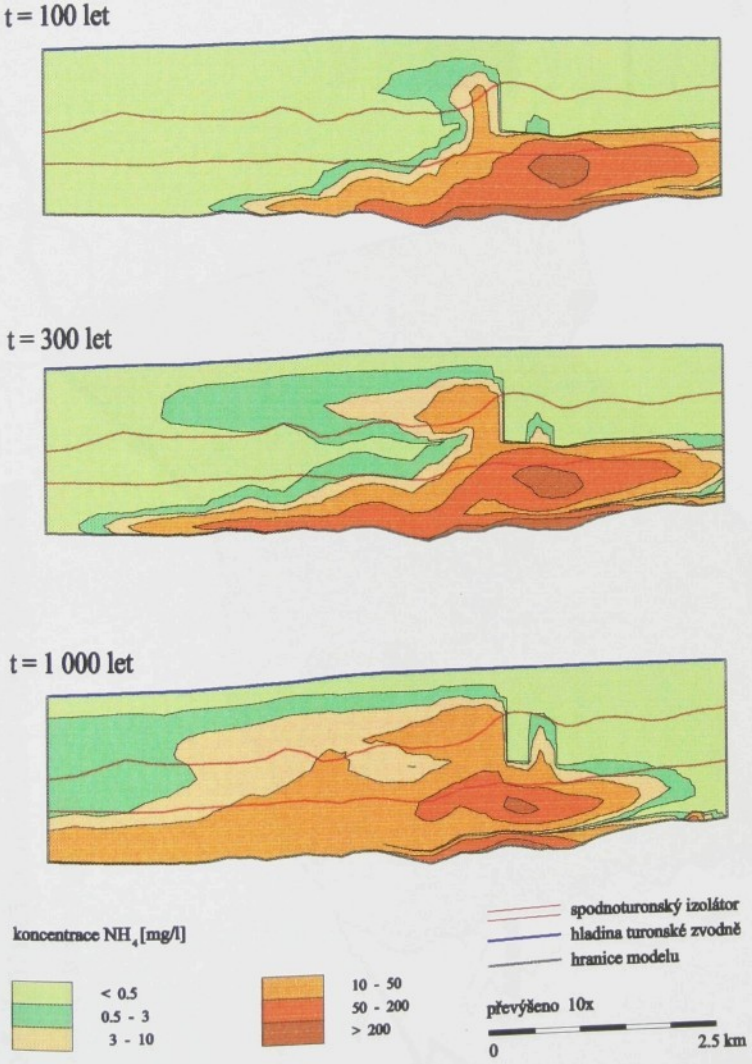

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - II
NH4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T
koncentrace NH4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km

Obr. č. 3.5/63

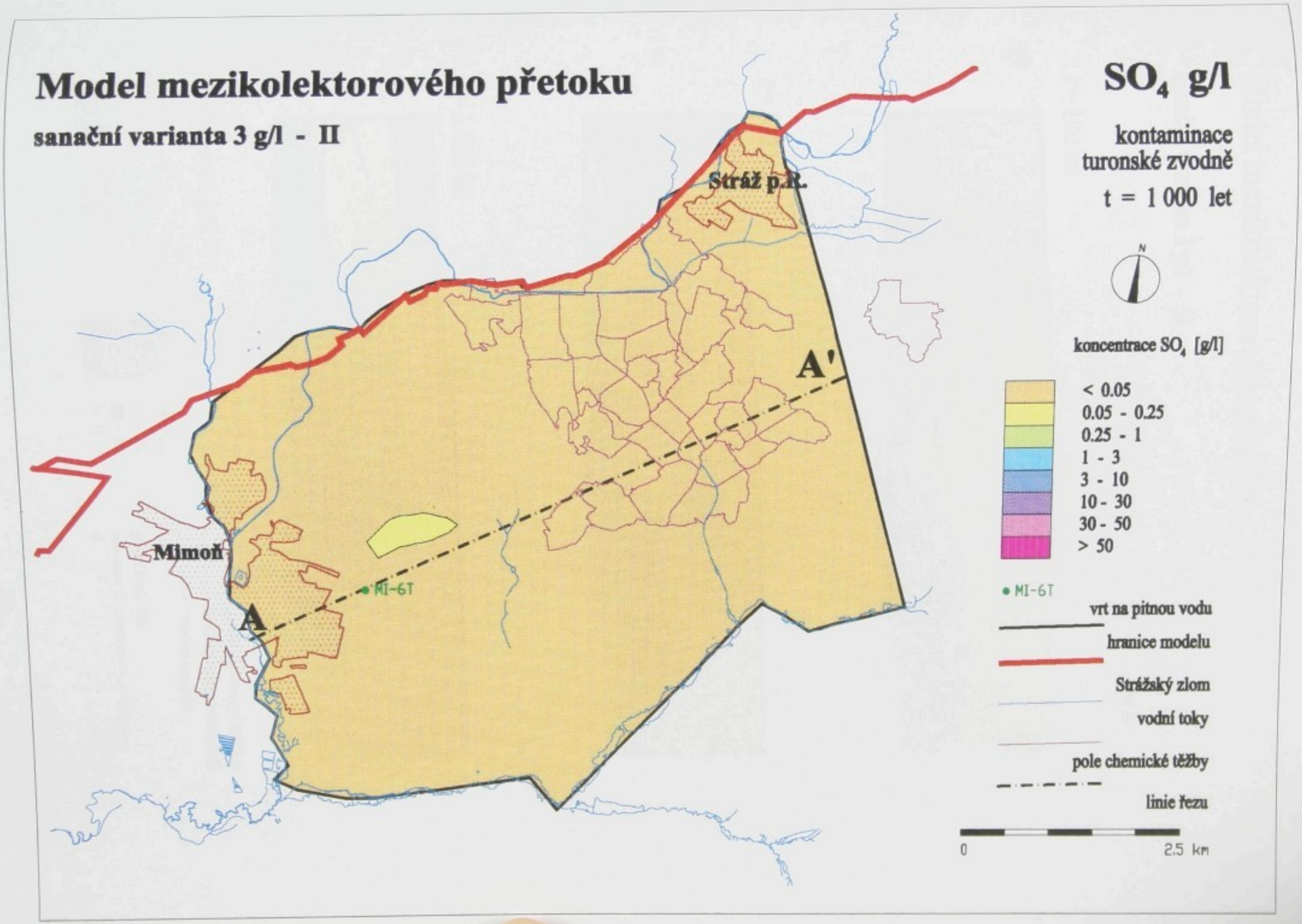
Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 3 g/l - II

NH_4 mg/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/64

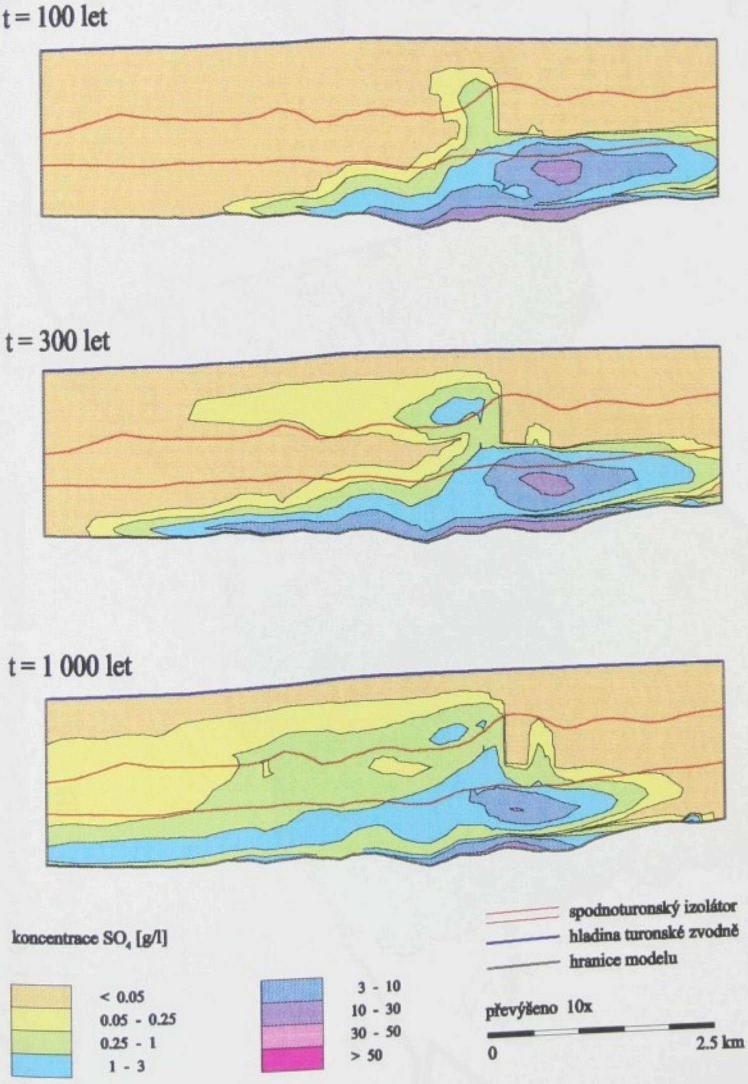

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - II
SO$_4$ g/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace SO$_4$ [g/l]
< 0.05
0.05 - 0.25
0.25 - 1
1 - 3
3 - 10
10 - 30
30 - 50
> 50
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/65

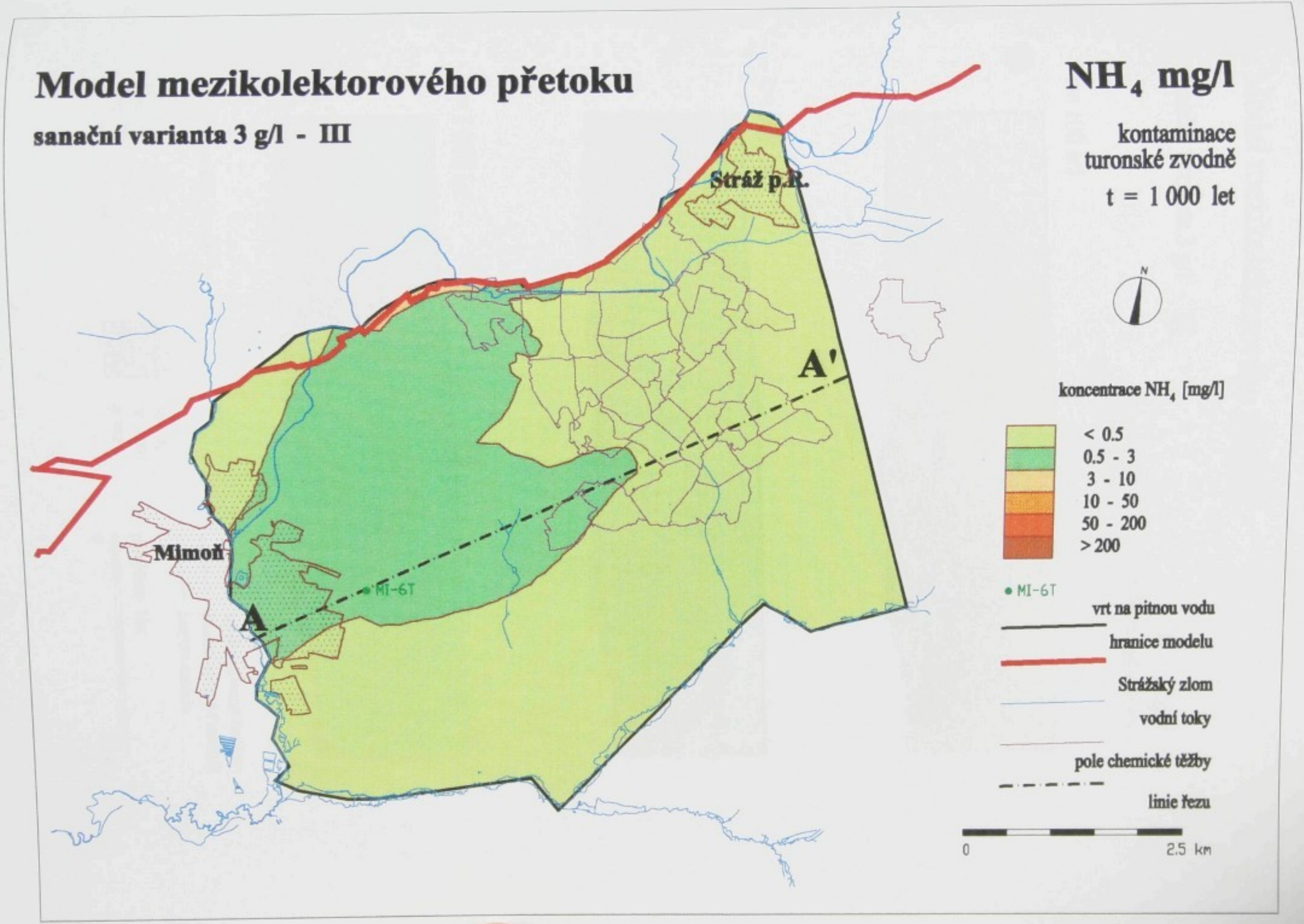
Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 3 g/l - II

SO_4 g/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/66

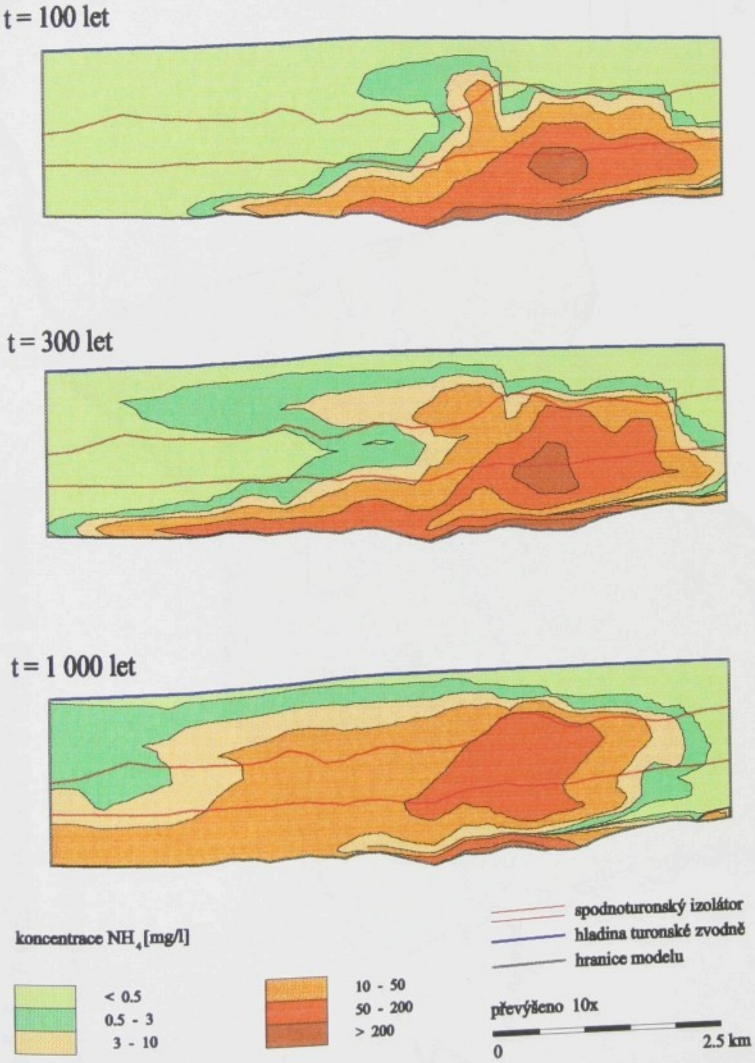

Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - III
NH_4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace NH_4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

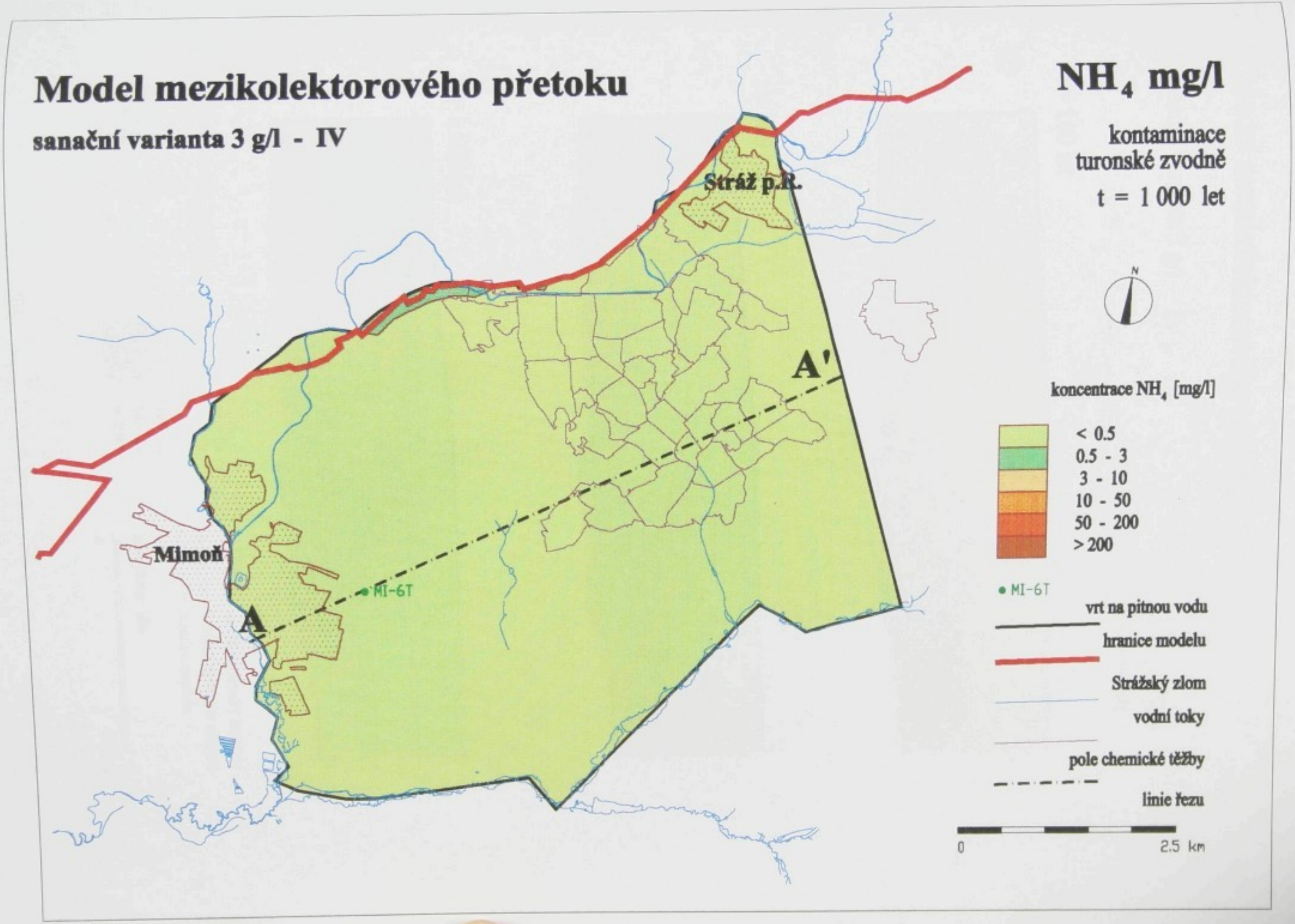
Obr. č. 3.5/67

Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 3 g/l - III

NH_4 mg/l
v řezu modelem





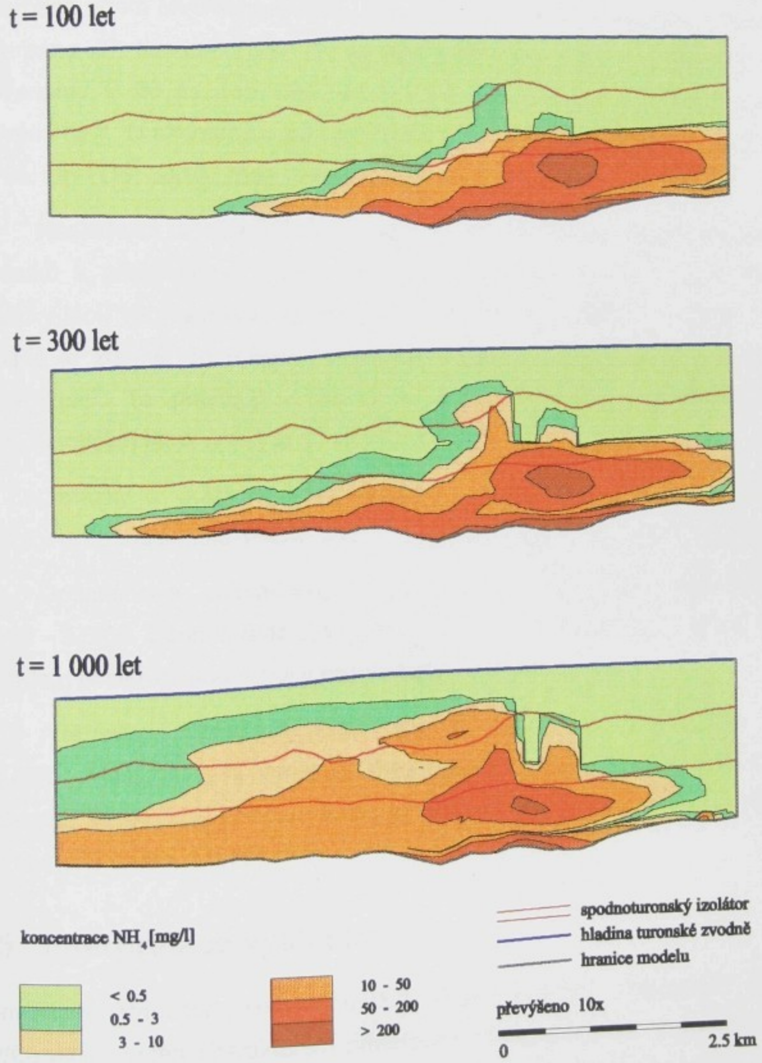
Model mezikolektorového přetoku
sanační varianta 3 g/l - IV
NH_4 mg/l
kontaminace
turonské zvodně
t = 1 000 let
N
koncentrace NH_4 [mg/l]
< 0.5
0.5 - 3
3 - 10
10 - 50
50 - 200
> 200
MI-6T
vrt na pitnou vodu
hranice modelu
Strážský zlom
vodní toky
pole chemické těžby
linie řezu
0
2.5 km
Stráž p.R.
Mimoň
A
A'
MI-6T

Obr. č. 3.5/69

Model mezikolektorového přetoku

sanační varianta 3 g/l - IV

NH_4 mg/l
v řezu modelem



Obr. č. 3.5/70

koncentrace své nejvyšší hodnoty na konci simulačního období. Hodnoty v tomto čase dosahují 142 mg/l TDS, 112 mg/l SO_4^{2-} a 2,8 mg/l NH_4^+. I v tomto případě hodnoty koncentrací nepřestoupí limit C. V případě subvarianty IV zjistíme, že koncentrační přírůstky narůstají po celé simulační období a k jeho konci dosáhnou hodnot 34 mg/l TDS, 27 mg/l SO_4^{2-} a 0,7 mg/l NH_4^+.

V tabulkách č. 3.5/28 a 3.5/29 jsou uvedena množství kontaminantů odčerpaná vrtem MI-6 kumulovaně. Je tedy zřejmé, že po tisíci letech bude vrtem odčerpáno 97 tis. tun TDS, 77 tis. tun SO_4^{2-} a 1,9 tis. tun NH_4^+ v případě subvarianty I, 26 tis. tun TDS, 21 tis. tun SO_4^{2-} a 521 tun NH_4^+ v případě subvarianty II. U alternativní subvarianty III, resp. IV bude odčerpáno 42 tis., resp. 4,9 tis. tun TDS, 33 tis., resp. 3,8 tis. tun SO_4^{2-} a 824, resp. 94 tun NH_4^+.

Následující tabulky č. 3.5/30 a 3.5/31 uvádějí časový vývoj koncentračních přírůstků k přirozenému pozadí pro jednotlivé kontaminanty v řece Ploučnici. Graficky jsou tyto závislosti zobrazeny v grafech na obrázku č. 3.5/53. I v tomto případě je zřejmé, že Ploučnice nebude nikterak závažně ohrožena druhotnou kontaminací. To potvrzují i tabulky č. 3.5/32 a 3.5/33, uvádějící množství kontaminujících látek uniklých do Ploučnice.

Obrázky č. 3.5/54 - 3.5/61 graficky dokumentují postup koncentračního mraku v průběhu simulovaného období v případě pesimistické subvarianty I.

Optimistickou subvariantu II dokumentují stejným způsobem obrázky č. 3.5/62 - 3.5/66. Časová řada dokumentující šíření kontaminantů opět není úplná. Důvodem je nezajímavý vývoj v počátečním období simulace.

Alternativní subvarianty III a IV jsou dokumentovány na obrázcích č. 3.5/67 - 3.5/70. Přestože byla vertikální propustnost v místě mezi VP-15 a VP-20 podstatně snížena, je přetok v tomto místě i tentokráte stále patrný a významný (viz obr. č. 3.5/68 a 3.5/70).

3.6 Interpretace výsledků

Konvektivní transport kontaminujících látek v oblasti strážského bloku je jednoznačně určen charakterem proudového pole. Řešením úlohy proudění za uvažovaných podmínek, která předchází vlastnímu modelování transportu, byla určena situace proudění v cenomanském i turonském kolektoru. V obou

kolektorech převládá proudění v jihozápadním směru (obr. č. 3.5/1 a 3.5/2). V turonu jsou však patrné dvě hlavní dráhy šíření kontaminantů. Jižní dráha vede z centra polí CHT a z jihu obtéká Ralsko. Dále je ovlivněna čerpáním ve vrtu MI-6 a pokračuje mimo oblast modelu jižně od Mimoně. Severní dráha vede severně od Ralska podél Strážského zlomu, pokračuje podél Ploučnice směrem k Mimoni, kde je ovlivňována vrtem MI-6. Turonským kolektorem jsou kontaminanty unášeny rychleji, protože rychlost proudění je téměř dvoj- až trojnásobná ve srovnání s rychlostí proudění v cenomanu.

Klíčový význam pro přestup látek má propustnost spodnoturonského poloizolátoru. Kalibrací regionálního modelu byl stanoven pravděpodobný interval efektivních hodnot vertikálního koeficientu filtrace k_z v ploše vyluhovacích polí v současné době. Efektivní hodnota vyjadřuje průměrnou (zdánlivou) hodnotu k_z v ploše, která odpovídá reálnému efektu mnoha malých bodových přetoků zapažnicovým prostorem nedokonale cementovaných vrtů. Po likvidaci vrtů, jejíž součástí je i spolehlivá tamponáž se efektivní hodnota k_z sníží. Je možné, že výsledky tamponáže vrtů budou lepší a propustnost poloizolátoru v ploše VP bude pod dolní hranicí intervalu použitého v modelu pro období po ukončení sanace.

Zásadní změnu v dosavadním pojetí hodnocení rizik představuje kvantifikace parametrů mezikolektorového přetoku v oblasti mezi VP-15 a VP-20 (v současné době z turonu do cenomanu), který signalizuje dlouhodobě zvýšená piezometrická hladina v cenomanském kolektoru. Tímto místem projdou kontaminanty z cenomanu do turonu podstatně rychleji a v nepříznivých podmínkách i ve větším množství, než celou plochou vyluhovacích polí. Hodnota koeficientu filtrace zde byla stanovena na 0,04 –0,08 m/den, tzn. o dva řády vyšší než ve vyluhovacích polích.Tuto hodnotu bude třeba upřesnit v období stabilizovaného provozu odparky.

Jedná se patrně o přirozenou komunikaci v tektonicky postiženém území při V a JV úpatí Ralska, s četnými projevy explozivního vulkanismu a vertikálních posuvů malých ker s amplitudou do 10 – 15, výjimečně až do 30 m. Pravděpodobnost, že by se jednalo o „zapomenutý" (starý průzkumný) vrt je velmi malá, protože v minulosti bylo prováděno již několik pokusů takový vrt nalézt.

V každém případě je nutno tuto oblast podrobněji prozkoumat s cílem identifikace přetokové cesty. V případě bodového nebo maloplošného přetoku lze uvažovat o tamponáži, při lokalizaci přetoku do omezené oblasti pak s aplikací metod fyzikální imobilizace, tzn. s vytvořením málo propustné horizontální bariéry. Význam takového opatření je doložen modelovými výpočty.

Velký vliv na velikost přetoku bude mít vzájemná poloha piezometrické hladiny cenomanského a turonského kolektoru. Není zcela jisté, zda se cenomanská piezometrická hladina ustálí na své původní úrovni před zahájením těžební činnosti nebo zda nastoupá o něco výše v důsledku narušení poloizolátoru v prostoru dolu Hamr, kde se kromě důlních děl nachází též mnoho průzkumných vrtů. Naštěstí tvar terénu, který kopíruje turonská hladina, nedává velkou možnost pro radikální zvýšení piezometrické hladiny cenomanského kolektoru v prostoru Hamerského jezera. V modelu uvažované zvýšení o 3 m představuje pravděpodobně maximum. Vliv je ovšem natolik značný, že bude nutno se tímto problémem podrobněji zabývat. Na hrubém regionálním modelu nelze určit polohu hladiny přesněji než s odchylkou cca 5 m, proto bude nutno řešit úlohu sestavením samostatného modelu.

Shrneme-li hlavní faktory, ovlivňující intenzitu přetoku, jedná se o

- vertikální koeficient filtrace v místě přetoku mezi VP-15 a VP-20,
- vertikální koeficienty filtrace v ploše VP
- výšku cenomanské piezometrické hladiny po skončení sanace.

Všechny tyto faktory byly kvantifikovány s jistou neurčitostí, vyjádřenou intervalem v úvahu připadajících hodnot. Protože by z těchto hodnot bylo možno sestavit příliš velký počet variant, byly superponovány všechny nepříznivé vlivy do scénáře I a všechny příznivé do scénáře II. Je zřejmé, že taková kumulace je nepravděpodobná. Výsledky výpočtů je třeba chápat jako horní a dolní mez rizik, přičemž pravděpodobný interval rizik je užší. Zbývající dva vedlejší propočtené scénáře odpovídají uvedeným s tím, že k_z v prostoru mezi VP-15 a VP-20 jsou 5× menší. Scénář III tedy opět prezentuje pesimistický a scénář IV optimistický pohled v případě, že by se podařilo přetok omezit.

S pomocí výsledků jednotlivých scénářů (subvariant) lze usoudit na některé obecné závislosti. Množství látek přeteklých do turonu má v pesimistických subvariantách v prvních 200 – 300 letech rychlejší nárůst proti variantám optimistickým, pak je tempo přírůstku zhruba stejné pro subvarianty I, II a III, IV (viz. např. obr. č. 3.4/4, 3.4/28, 3.4/51). Prudký náběh je zřejmě podmíněn hlavně úrovní cenomanské hladiny. Rychlost přírůstku je po celou sledovanou dobu určena zejména intenzitou přetoku mezi VP-15 a VP-20, což je doloženo menším nárůstem přestupu při pětinásobném snížení k_z v daném místě při jinak stejných hodnotách ve vyluhovacích polích. Rozdíly k_z ve vyluhovacích polích mají jen podružný význam. Dominantní vliv na přestup látek má komunikace mezi zvodněmi v prostoru mezi VP-15 a VP-20. Tento vliv se výrazně zvyšuje s úrovní cenomanské piezometrické hladiny.

Vývoj množství látek v turonském kolektoru v modelované oblasti (např. obr. č. 3.4/3, 3.4/27, 3.4/50) vykazuje ve variantách se zvýšenou hladinou maximum po 200 – 300 letech, které odpovídá rychlému přechodu relativně silně koncentrovaných roztoků popisovanou komunikační cestou. Pak následuje pokles v důsledku odtransportování látek do Ploučnice nebo přes Z okraj modelu a po něm nárůst způsobený plošným přetokem přes vyluhovací pole (ovšem se značným příspěvkem v ploše mezi VP-15 a VP-20). Druhého maxima v těchto podmínkách bylo dosaženo pouze v sanační variantě 3 g/l TDS (obr. č. 3.4/50), při menším vyčištění nastane až za více než 1000 let. Z porovnání obrázků č. 3.4/3, 3.4/27, 3.4/50 vidíme, že relativní výška prvého maxima závisí na zbytkové koncentraci v cenomanu.

Jestliže piezometrická hladina cenomanského kolektoru nevystoupí nad svoji původní úroveň (subvarianty II a IV), bude nárůst látek v turonu mnohem pozvolnější a jeho rychlost bude záviset na k_z v místě přetoku. V tomto případě nelze očekávat dosažení maxima v době 1000 let. Absolutní maximum bude patrně vyšší než u pesimistických subvariant I a III, protože relativně větší část látek přejde přes plochu VP východně od místa přetoku a budou tedy rozptýleny s menšími koncentracemi ve větším objemu.

Vývoj koncentrací v referenčním bodu, kterým je vrt MI-6, využívaný k odběru pitné vody pro město Mimoň, svědčí o rychlejším průniku silnějších roztoků v subvariantě I. Ten vyvolá prudký nárůst znečištění vody s následným

poměrně rychlým poklesem (obr. č. 3.4/5). Druhotné maximum se již neobjeví (pouze v sanační variantě 3 g/l TDS – obr. č. 3.4/52). Také zde pozorujeme, že v pesimistických variantách se absolutní maximum nachází ve sledovaném tisíciletém intervalu, kdežto u optimistických variant s pomalejším náběhem koncentrace na konci období ještě stoupají. Lze však předpokládat, že nedosáhnou hodnot, které jsou prognózovány u pesimistických variant po 1000 letech. To potvrzuje výše vyslovený předpoklad (doložený též v situačních mapkách šíření koncentrace), že nárůst množství TDS v turonu v druhé polovině hodnoceného časového intervalu způsobuje zejména nárůst kontaminovaného objemu při snižování koncentrací.

Poněkud jiný pohled ukazují koncentrační přírůstky látek v Ploučnici (např. obr. č. 3.4/6, 3.4/30, 3.4/53). Zde téměř mizí rozdíl mezi optimistiskými a pesimistickými subvariantami. Koncentrační přírůstky vykazují zřetelnou závislost pouze na parametrech přetoku mezi VP-15 a VP-20.

Nyní se pokusme zhodnotit efekt stupně vyčištěni cenomanského kolektoru na poměry v turonu a odvodit alespoň přibližné požadavky na cílové parametry sanace cenomanu. Hodnocení bude vztaženo k vrtu MI-6. Norma ČSN 75 72 14 - *Jakost vod - Surová voda pro úpravu na pitnou vodu* uvádí limity C pro jednotlivé kontaminující látky. Tento limit pro NH_4^+ činí 3 mg/l a pro SO_4^{2-} 250 mg/l. Norma ČSN 75 71 11 pro pitnou vodu udává 0,5 mg/l pro NH_4^+ a 250 mg/l pro SO_4^{2-}. Z výše předložených výsledků jednoznačně vyplývá, že kritickou škodlivinou je amonný ion NH_4^+. Udržení koncentrace NH_4^+ na úrovni pitné vody se nezdá být reálné.

V grafech na obrázcích č. 3.6/1 – 3.6/4 jsou porovnávány koncentrace NH_4^+ ve vrtu MI-6 s limitem C dle normy ČSN 75 72 14. Z obrázku č. 3.6/1 vyplývá, že v případě pesimistického scénáře kombinujícího nejméně příznivé přetokové parametry (subvarianta I), nebude postačovat ani vyčištění cenomanského kolektoru na úroveň 3 g/l TDS. V tom případě totiž koncentrace NH_4^+ překročí daný limit téměř 1,5×. Pro dodržení požadovaného limitu by bylo nutné vyčištění na úroveň okolo 2 g/l TDS. V případě kombinace příznivých přetokových parametrů (subvarianta II) bude vyčištění cenomanu na úroveň 3 g/l TDS dostatečné. Při úrovni 10 g/l TDS je limit těsně překročen. Zde by zřejmě bylo dostatečné čištění na 8 – 9 g/l TDS.

Uvážíme-li možnost omezit mezikolektorovou komunikaci v místě mezi VP-15 a VP-20, bude z hlediska kontaminace vody ve vrtu MI-6 postačující vyčistit cenomanskou zvodeň v jinak nepříznivých podmínkách na úroveň cca 5 g/l TDS. Koncentrace ve vrtu sice stoupají po celé tisíciletí, ale nedosahují takových hodnot jako v případě subvarianty I. To je způsobeno tím, že v místě mezi VP-15 a VP-20 nepřeteče příliš velké množství kontaminantů v počátečním období simulace, ale jisté množství bude zvolna přetékat po celé sledované období. Zkombinujeme-li nejpříznivější podmínky včetně omezení komunikace v místě mezi VP-15 a VP-20 (subvarianta IV), zůstane pravděpodobně jediný neakceptovatelný scénář, ve kterém bude překročen limit ve vrtu MI-6 (po delší době než je simulační období), a to ponecháme-li kontaminaci cenomanského kolektoru na současné úrovni. Pro dodržení limitu by zřejmě stačilo vyvést ze zvodně zhruba polovinu kontaminantů. Protože kritické jsou v tomto směru koncentrace NH_4^+, bylo by možné sanaci provádět pouze vyváděním kamence hlinito-amonného se zpětným vtláčením matečných louhů.

Výsledky základních subvariant I a II ukazují široký interval pro volbu cílových parametrů sanace cenomanského kolektoru, zaručující zachování koncentrací dle limitu C normy ČSN 75 72 14 ve vrtu MI-6. Uvážíme-li, že obě krajní hodnoty 2 a 9 g/l TDS odpovídají málo pravděpodobným kombinacím extrémních přetokových parametrů, můžeme tento koncentrační interval přesněji specifikovat na 3 – 5 g/l.

Subvarianty III a IV ukazují, že v případě omezení lokálního přetoku se celý interval posunuje k vyšším hodnotám. S největší pravděpodobností by pak stačilo stanovit cílové koncentrace na 7 – 12 g/l TDS. Z toho je zřejmé, že by omezení přetoku přineslo podstatné zkrácení sanace a úspory 10 – 12 mld. Kč na čištění roztoků a vyplatilo by se část této sumy na toto omezení vynaložit.

Během simulovaného období dochází k úniku kontaminantů mimo sledovanou oblast. Kontaminanty transportované turonským kolektorem z menší části uniknou do Ploučnice v okolí Mimoně. Větší část kontaminace však podteče Ploučnici a v pozdější době bude pravděpodobně řekou zachycena mimo oblast modelu jihozápadně od Mimoně poblíž Brenné. V modelu bylo přesně sledováno množství kontaminantů, které uniknou do Ploučnice v okolí Mimoně. Na základě této informace byly stanoveny koncentrační přírůstky kontaminujících látek

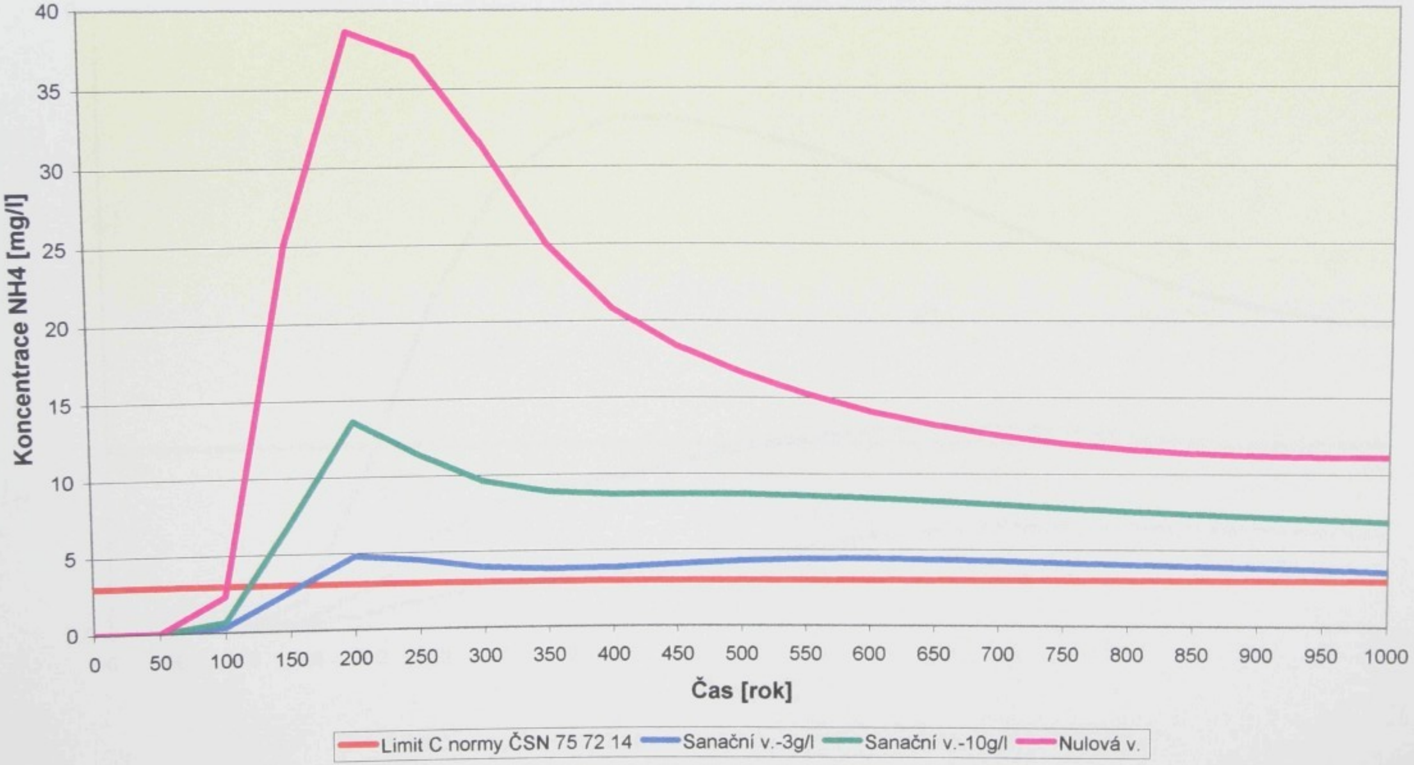
v Ploučnici. V grafu na obrázku č. 3.6/5 je zobrazen časový vývoj koncentračních přírůstků NH_4^+ v Ploučnici v případě nejméně příznivých podmínek. Z grafu je zřejmé, že v žádné ze základních variant nebude Ploučnice touto kontaminací nikterak ohrožena. Uvážíme-li, že množství, které podteče Ploučnici a později jí bude zachyceno poblíž Brenné, je zhruba 15× větší, tak ani toto množství Ploučnici závažně neohrozí.

Následující obrázky č. 3.6/6 – 3.6/9 graficky dokumentují časovou závislost množství TDS přeteklých do turonu. Tentokráte jsou však porovnávány jednotlivé varianty vyčištění cenomanského kolektoru v rámci subvariant. V případě nejhorších přetokových podmínek přeteče při nulové variantě 20% rozpuštěných látek z množství obsaženého v cenomanském kolektoru v současné době. Bude-li cenomanský kolektor vyčištěn na úroveň 10 g/l TDS bude toto množství více než o polovinu menší (téměř 9%). V případě vyčištění na 3 g/l TDS to bude množství ještě o polovinu menší (tedy téměř 4,5%). Obdobné poměry je možné odvodit i pro ostatní tři subvarianty. U subvarianty II se jedná o procentuelní hodnoty vztažené k současnému množství kontaminantů v cenomanském kolektoru 5,9%, 2,4% a 1,1%. Pro subvariantu III jsou tyto hodnoty 13,4%, 5,1% a 2,9% a pro subvariantu IV 2,6%, 1,2% a 0,6%.

Přestup látek při vyčištění zvodně na 3 g/l TDS je 4 - 5× menší proti nulové variantě. Přitom se průměrné koncentrace TDS ve zvodni sníží téměř 10× a celkové množství látek 7×. Zde se otvírá prostor pro možné další zlepšení situace. Sanaci je třeba vést nejen s cílem vyvedení potřebné tonáže látek z pozemí, ale také se zajištěním vhodného rozložení zbytkové kontaminace ve zvodni z hlediska následného mezikolektorového přestupu.

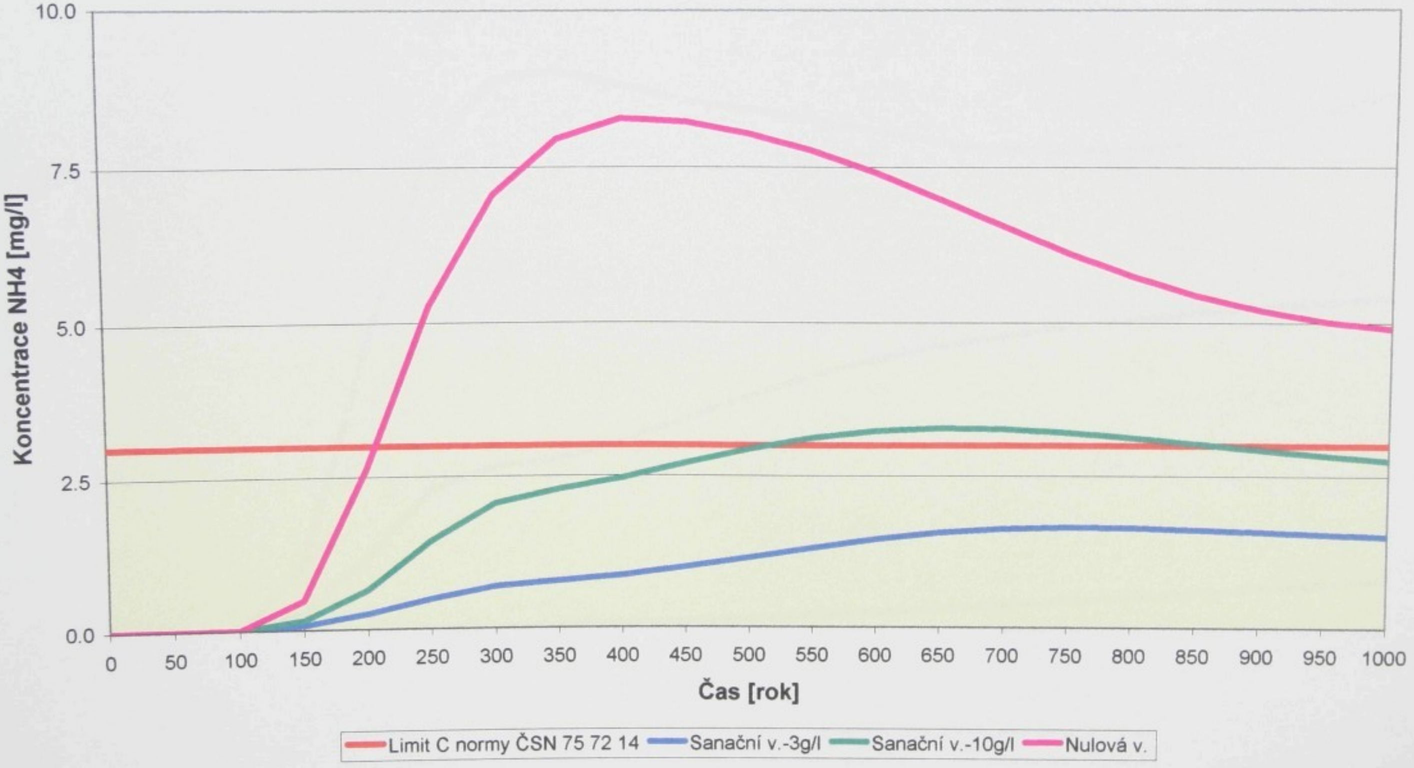
Zajímavé je porovnání výsledků subvariant II a III. Zatímco maximální koncentrace ve vrtu MI-6 jsou téměř stejné (obr. č. 3.6/2 a 3.6/3), je celkové množství látek přeteklých do turonu v subvariantě III více než dvojnásobné. Nabízí se otázka, zda poloha vrtu MI-6 není natolik nevýhodná, že při volbě jiného referenčního bodu severněji či jižněji by byly získány výsledky podstatně lepší. Jinými slovy, že v širším sledovaném prostoru V od Mimoně budou podmínky v průměru významně lepší než ve vrtu MI-6 a při vybudování jiného čerpacího vrtu by mohlo být dosažení koncentračního limitu snazší a levnější.

Koncentrace NH4 ve vrtu MI-6 - subvarianta I



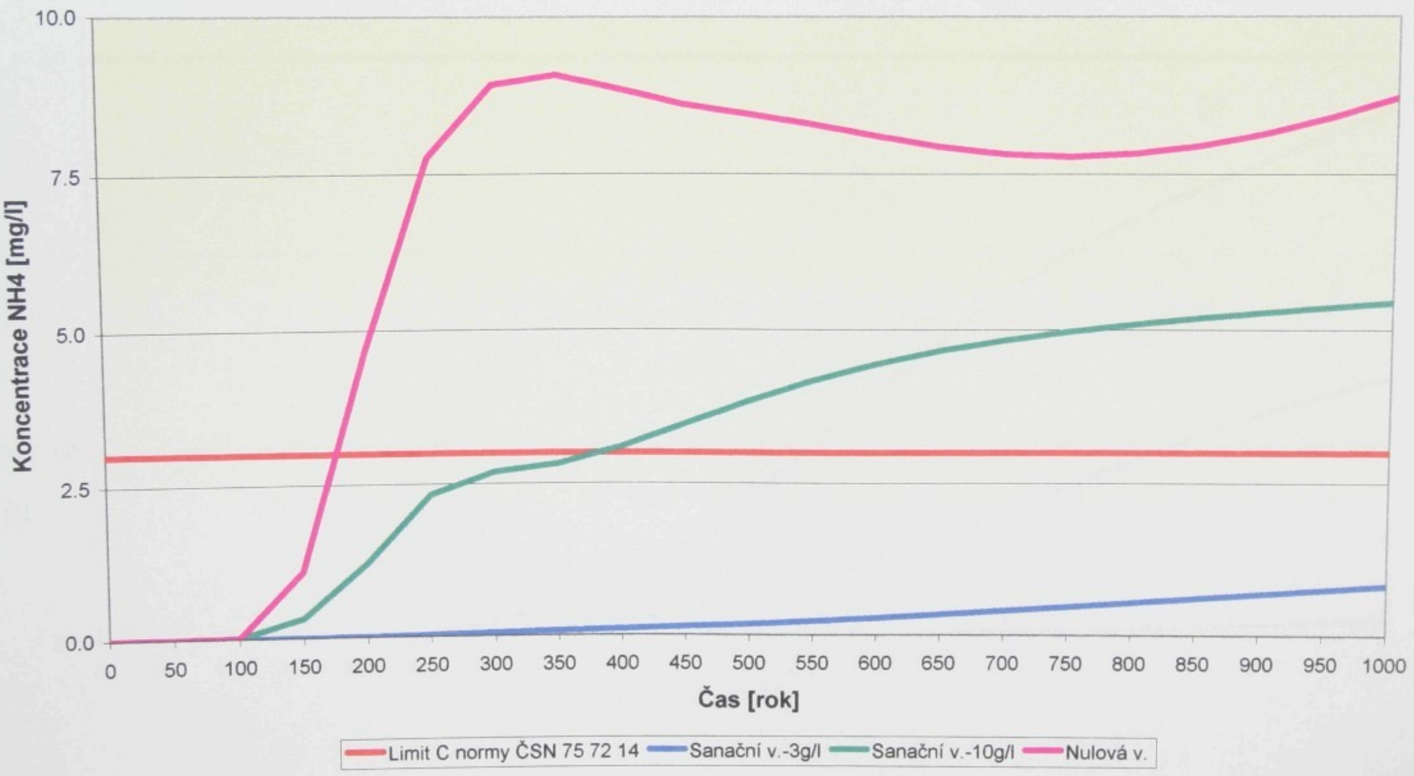
Obr. č. 3.6/1

Koncentrace NH4 ve vrtu MI-6 - subvarianta II



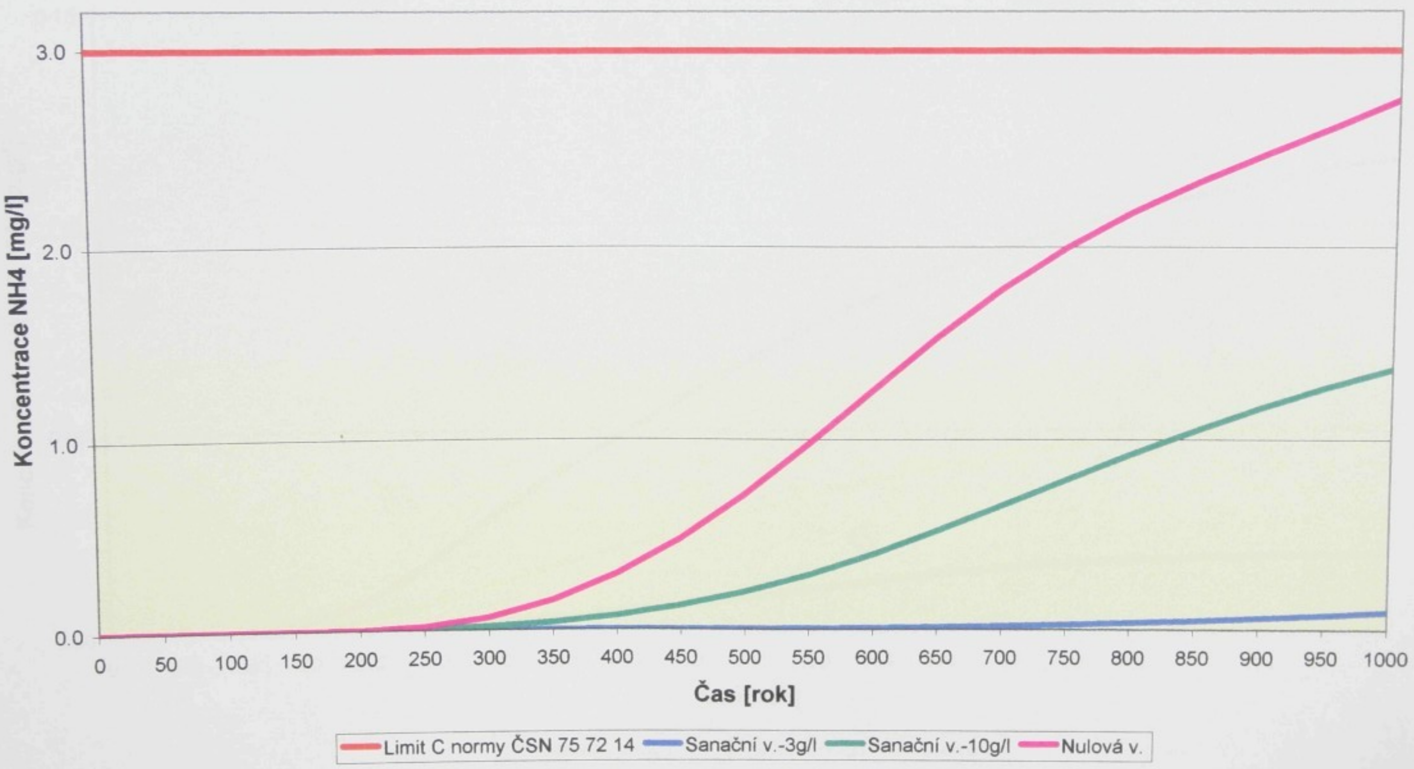
Obr. č. 3.6/2

Koncentrace NH4 ve vrtu MI-6 - subvarianta III

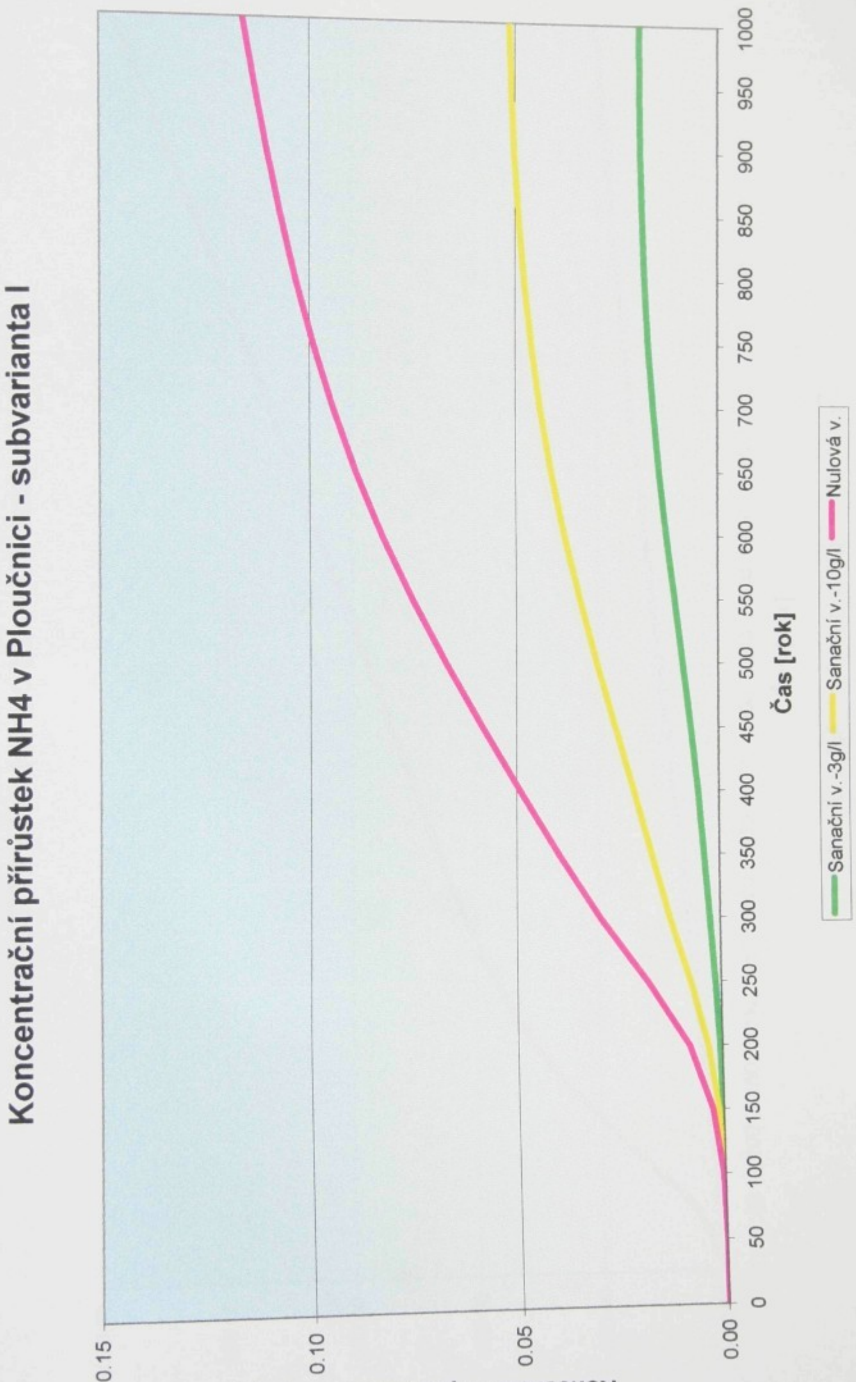


Obr. č. 3.6/3

Koncentrace NH4 ve vrtu MI-6 - subvarianta IV



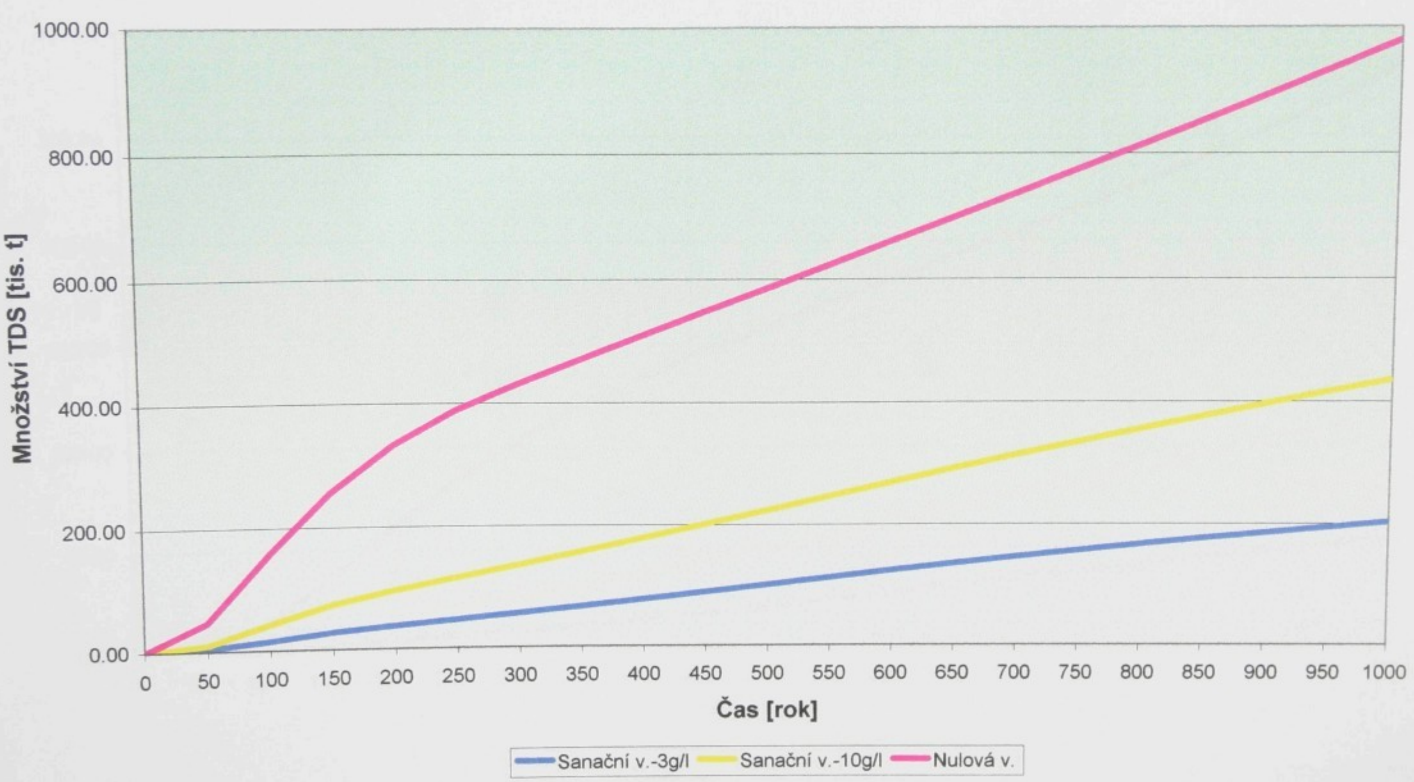
Obr. č. 3.6/4



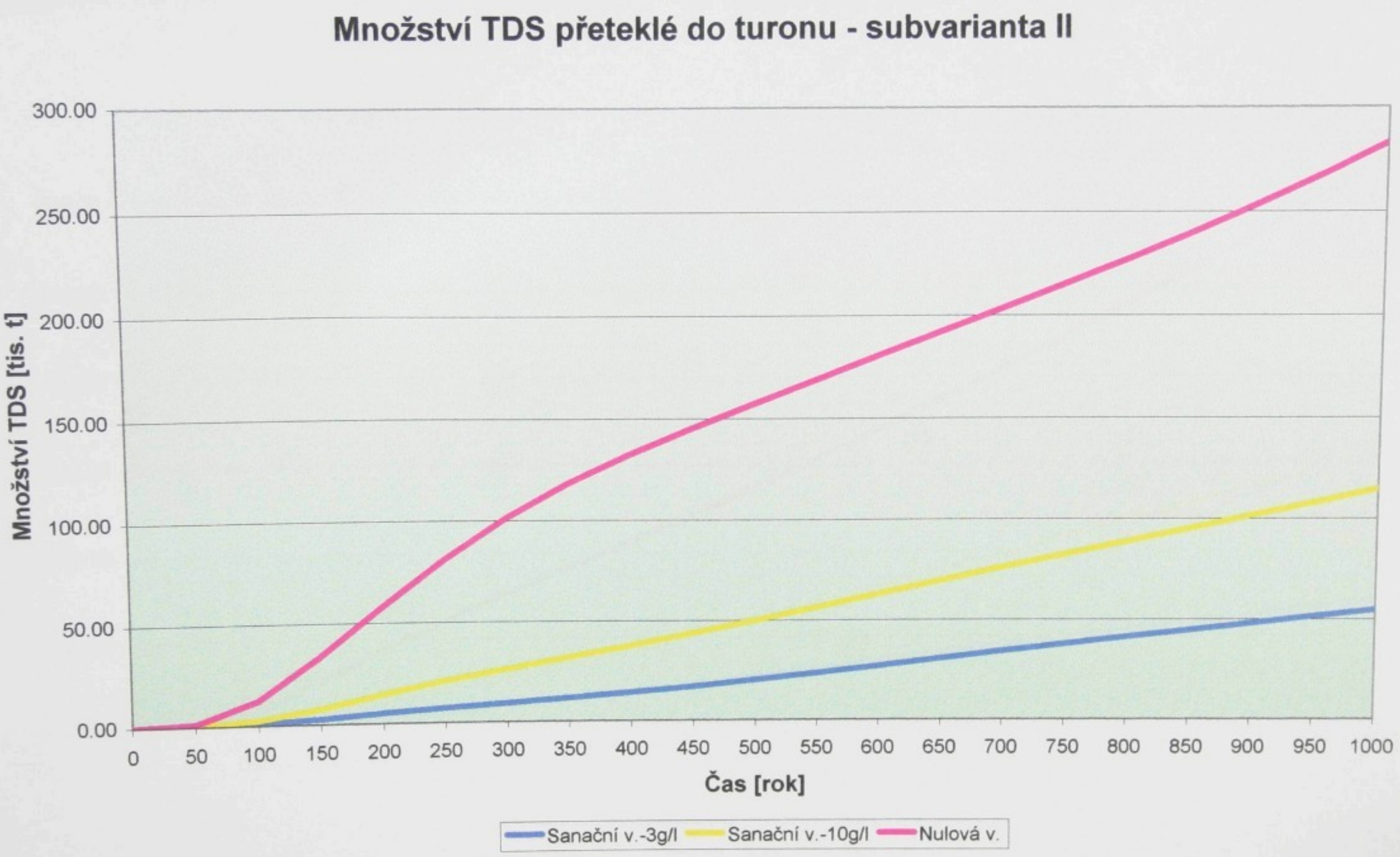
Koncentrační přírůstek NH4 v Ploučnici - subvarianta I
Koncentrační přírůstek NH4 [mg/l]
0.15
0.10
0.05
0.00
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
Čas [rok]
Sanační v.-3g/l
Sanační v.-10g/l
Nulová v.

Obr. č. 3.6/5

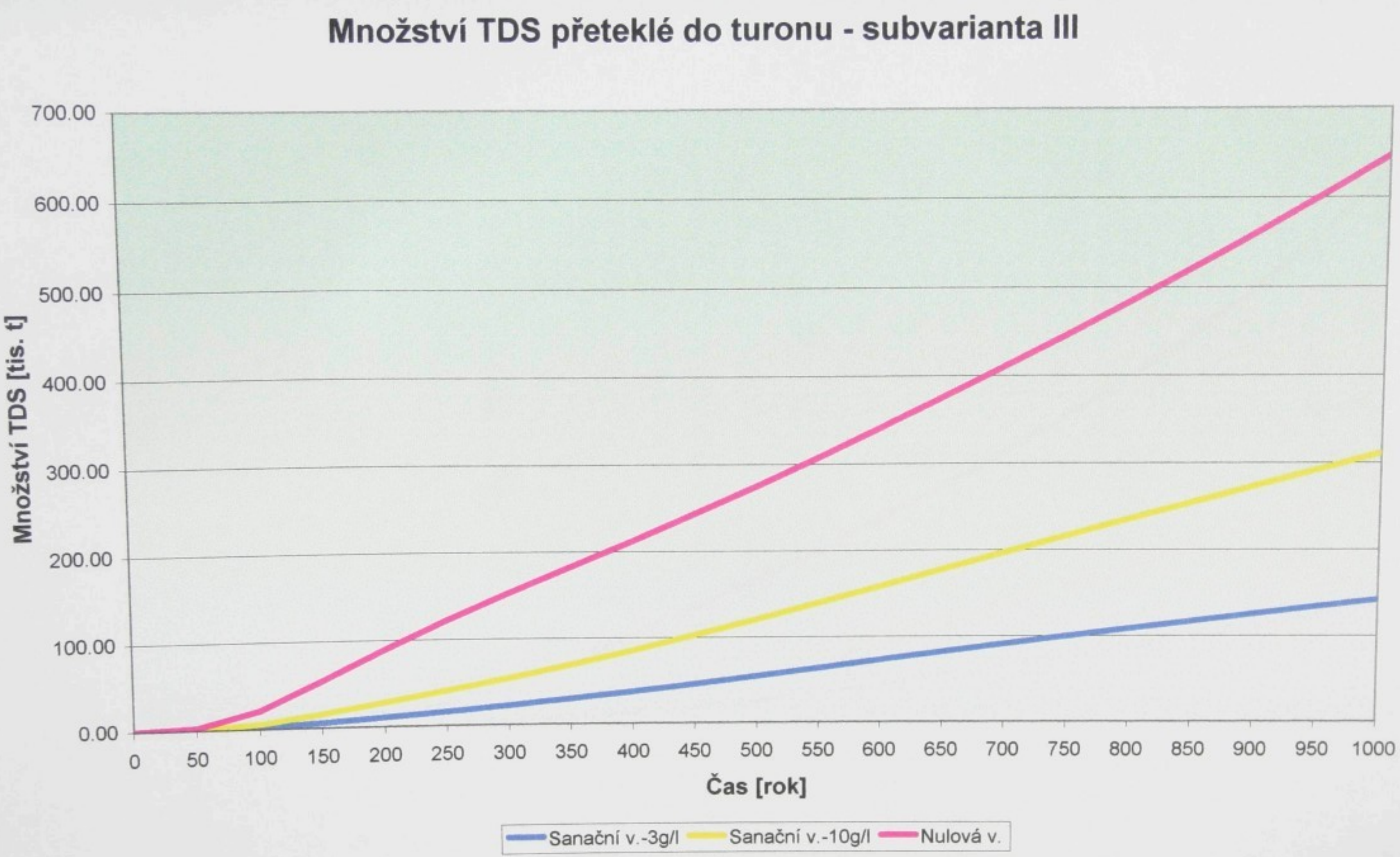
Množství TDS přeteklé do turonu - subvarianta I



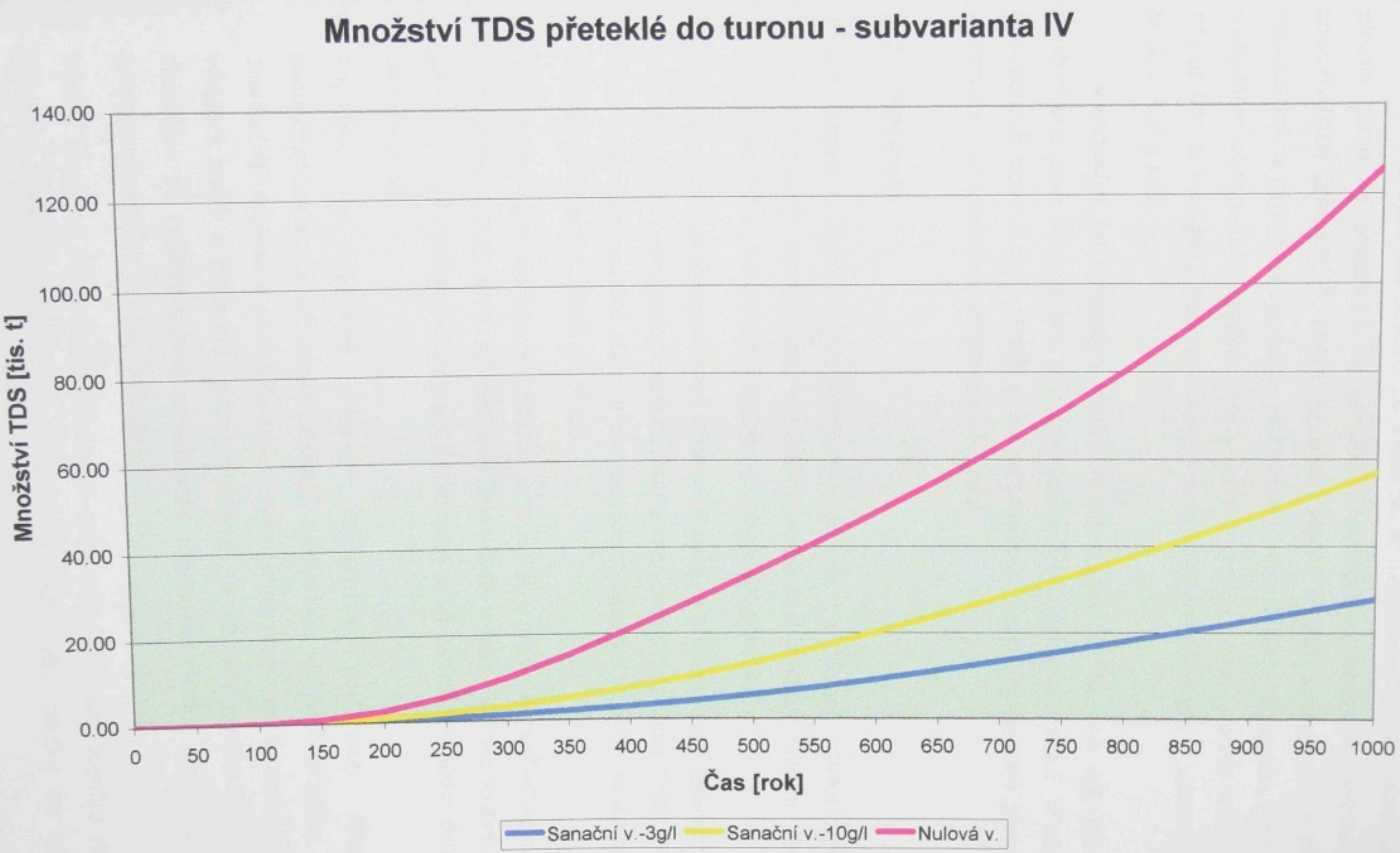
Obr. č. 3.6/6


Množství TDS přeteklé do turonu - subvarianta II
300.00
250.00
200.00
150.00
100.00
50.00
0.00
Množství TDS [tis. t]
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
Čas [rok]
Sanační v.-3g/l
Sanační v.-10g/l
Nulová v.

Obr. č. 3.6/7


Množství TDS přeteklé do turonu - subvarianta III
Množství TDS [tis. t]
700.00
600.00
500.00
400.00
300.00
200.00
100.00
0.00
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
Čas [rok]
Sanační v.-3g/l
Sanační v.-10g/l
Nulová v.

Obr. č. 3.6/8


Množství TDS přeteklé do turonu - subvarianta IV
140.00
120.00
100.00
80.00
60.00
40.00
20.00
0.00
Množství TDS [tis. t]
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
Čas [rok]
Sanační v.-3g/l
Sanační v.-10g/l
Nulová v.

Obr. č. 3.6/9

V závěru bych rád podotkl, že v této etapě modelování mezikolektorového přetoku jsme se soustředili na simulaci konvektivního transportu vybraných znečišťujících látek (SO_4^{2-}, NH_4^+), které dostatečně indikují kontaminaci a příliš nepodléhají změnám v důsledku podzemních chemických procesů. Protože v použitém transportním modelu není použita sorpce, je nutno počítat s tím, že nástup koncentrací NH_4^+ bude pomalejší a ostrá maxima zejména v I. subvariantě budou nižší a širší.

V roztocích se vyskytují i další rizikové složky (Al, Be, As aj.), jejichž koncentrace jsou silně závislé na vývoji celkového chemismu roztoků. V blízké budoucnosti bude nutné vytvořit a na problematiku mezikolektorového přetoku aplikovat komplexní transportně-reakční model.

3.7 Souhrn

1. Byl sestaven model mezikolektorového přetoku pro oblast ložiska Stráž. Pomocí tohoto modelu byl kvantifikován přestup kontaminujících látek z cenomanské do turonského kolektoru po ukončení sanace.
2. Kalibrace přetokových parametrů spodnoturonského souvrství byla provedena na regionálním hydrogeologickém modelu podle údajů z 1. pololetí 1996. Přes různé potíže se podařilo stanovit pravděpodobný interval hodnot vertikálních koeficientů filtrace v dílčích plochách.
3. Nejvýznamnějším výsledkem kalibrace je určení k_z v místě mezikolektorového přetoku mezi VP-20 a VP-15 v rozmezí 0,04 – 0,08 m/den. Pravděpodobně se jedná o přírodní komunikaci, po níž v současné době turonský kolektor dotuje cenomanský.
4. Přestože lze výsledný interval vertikálního koeficientu filtrace spodnoturonského poloizolátoru získaný současnou kalibrací prohlásit za dostatečně věrohodné první přiblížení k realitě, bude do budoucna nutné tento výsledek ověřit a případně upravit rekalibrací na základě nových informací získaných po zvýšení rozdílu cenomanské a turonské hladiny při ustáleném provozu odparky.
5. Výskyt uvedené komunikace zásadním způsobem ovlivňuje ocenění rizika přestupu látek do turonského kolektoru a klade vyšší nároky na cílové

parametry sanace cenomanu. Tímto oslabeným místem spodnoturonského poloizolátoru může projít více kontaminantů než mnohonásobně větší plochou vyluhovacích polí.

6. Území mezi VP-20 a VP-15 je třeba detailně prozkoumat (nejlépe v rámci geologicko-průzkumných prací) a nalézt místo propojení obou kolektorů. Pak bude možno hledat technická řešení omezující přetok – tamponáž vrtu nebo otevřené poruchy, vytvoření málo propustné desky pod stropem cenomanského souvrství nebo na bázi turonu metodami fyzikální imobilizace apod.
7. Na regionálním modelu byly určeny přibližné současné efektivní hodnoty vertikálních koeficientů filtrace v plochách vyluhovacích polí. Protože však byla modelována situace po ukončení sanace, kdy budou vrtná díla zatamponována, byl interval, ve kterém se hodnoty koeficientů pohybují, posunut směrem k nižším hodnotám.
8. Z počátečních testovacích výpočtů vyplynulo, že k podstatnému nárůstu přetoku z cenomanu do turonu stačí zvýšení cenomanské piezometrické hladiny o jednotky metrů. Protože nelze vyloučit ustálení hladiny o něco výše, než byla původní úroveň hladiny před začátkem těžební činnosti, byly pro modelové výpočty zvoleny dvě úrovně cenomanské piezometrické hladiny. Původní a zvýšená o 3 m.
9. Byly vytvořeny dva hlavní scénáře modelování mezikolektorového přetoku. Optimistický scénář, zohledňující nejpříznivější kombinaci parametrů minimalizujících přetok, a scénář pesimistický, uvažující kombinaci nejméně příznivou. Hlavní scénáře byly doplněny dvěma alternativními, které vycházejí z možnosti provést opatření omezující přetok v místě mezi VP-15 a VP-20.
10. Byly sestaveny tři základní varianty modelových výpočtů založené na různém stupni vyčištění cenomanského kolektoru. Nulová varianta daná současnou úrovní kontaminace a dvě sanační varianty, z nichž první předpokládá vyčištění na úroveň průměrné koncentrace 10 g/l TDS a druhá na 3 g/l TDS.
11. Z výsledků modelování pesimistického scénáře vyplývá, že do turonu přeteče během 1000 let v nulové variantě 980 tis. tun TDS, což činí 20% z množství obsaženého v současné době v cenomanských roztocích. V optimistickém

případě by to bylo necelých 6 %. To jsou čísla podstatně vyšší proti dosavadním předpokladům.

12. Hodnocení efektu cílových parametrů sanace bylo provedeno pro situaci ve vrtu MI-6 mimoňského vodárenského systému. Vypočtené hodnoty byly porovnávány s limitem C dle normy ČSN 75 72 14 pro NH_4^+ - 3 mg/l.

13. Pro obě krajní kombinace buď nepříznivých nebo příznivých podmínek vycházejí cílové parametry, odpovídající 2 a 9 g/l TDS. Protože takové kombinace jsou málo pravděpodobné, lze doporučit stanovení cílových parametrů na úrovni 3 – 5 g/l TDS.

14. Výsledky modelových výpočtů naznačují, že význam bude mít nejen celkový inventář zbytkových látek v cenomanském kolektoru, ale také jeho rozložení vzhledem k místům zvýšených přetoků. Tímto problémem bude nutno se dále zabývat.

15. V případě úspěšného zásahu v kritickém místě mezi VP-15 a VP-20 by bylo možno posunout interval potřebných cílových parametrů výše, asi na úroveň 7 – 12 g/l TDS.

16. Řeka Ploučnice nebude nikterak vážně ohrožena druhotnou kontaminací ani v případě, že by znečištění cenomanského kolektoru bylo ponecháno na současné úrovni. Nezdá se ani pravděpodobné, že by látky podteklé pod Ploučnicí v oblasti Mimoně mohly později vážně ohrozit řeku v oblasti jihovýchodně od Mimoně.

17. Do budoucna bude nutné sestavit a na problematiku mezikolektorového přetoku aplikovat komplexní transportně-reakční model, zahrnující více chemických komponent, jejichž koncentrace jsou závislé na vzájemných interakcích roztoků a hornin. Tyto efekty budou mít podstatný vliv na chování migrujících látek a při zpřesňování modelu je nebude možné pominout.

Závěr

Sanace horninového prostředí po chemické těžbě na ložisku Stráž představuje složitý interdisciplinární problém, v jehož řešení se prolínají aspekty celé řady vědních a technických odborů. Jedním z nich je i obor matematického modelování.

Předložená práce řeší problematiku matematického modelování transportu chemických látek se zaměřením na aplikaci modelu na reálnou úlohu přestupu kontaminantů z cenomanského kolektoru do turonského v období po skončení sanace ložiska Stráž.

Použití odvozených modelů na výše popsanou problematiku přineslo nové poznatky. K nejdůležitějším patří:

- Kvantifikace přetokových parametrů spodnoturonského poloizolátoru v prostoru jihovýchodního úbočí Ralska mezi vyluhovacími poli VP-15 a VP-20. Při kalibraci regionálního hydrogeologického modelu zde byly zjištěny koeficienty filtrace až o dva řády vyšší než lze očekávat ve vyluhovacích polích.
- Sestavení přetokového modelu a výpočet přestupu látek z cenomanu do turonu po ukončení sanace. Za nepříznivých podmínek může do turonu v prostoru mezi vyluhovacími poli a Ploučnicí v Mimoni přestoupit za 1000 let až 20% rozpuštěných látek z cenomanu.
- Předběžné stanovení úrovně zbytkové kontaminace cenomanského kolektoru na 3-5 g/l TDS. Tato úroveň s velkou pravděpodobností zaručí, že ve vrtu MI-6, kde se odebírá pitná voda pro Mimoň, bude dodržen limit C dle ČSN 75 72 14 pro NH_4^+.

Uvedené modely a hlavně jejich aplikace slouží jako podklady při rozhodování nejen regionálních, ale i vládních orgánů. Získané poznatky základním způsobem ovlivňují rozhodovací proces ohledně průběhu sanace cenomanského kolektoru. Předběžně stanovený cílový parametr sanace 8 g/l TDS zbytkové kontaminace se zdá být nyní nedostatečný. Ve svém důsledku to bude znamenat prodloužení doby sanace a tím i navýšení nákladů na sanaci.

Závěrem je nutné zdůraznit (jak vyplývá z předchozího textu), že řešení celého projektu matematického modelování je velmi rozsáhlé. Na řešení formulační části řešených úloh se podílejí skupiny odborníků z českých univerzit, zejména skupina vedená Doc. Dr. Ing. Jiřím Maryškou,Csc. z Technické Univerzity v Liberci. Algebraická část úlohy je řešena kolektivem pracovníků UI AV ČR v Praze na řešení praktických úloh se podílí tým odborníků z oddělení modelování technologických procesů s. p., DIAMO ve Stráži pod Ralskem.

Na tomto místě bych rád poděkoval lidem ze zmíněných institucí za skvělou spolupráci při řešení uvedené problematiky, za pomoc, cenné zkušenosti a rady, které přispěly ke vzniku této práce.

Literatura

BEAR,J., VERRUIJT,A. (1990): *Modelling Groundwater Flow and Pollution.* D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1990.

BENEŠ,M., STÝBLO,M., MARYŠKA,J. & MUŽÁK,J. (1996): *The application of mathematical models of the transport of chemical substances in the remediation of consequences of the uranium mining.* In Proceedings of 3rd Workshop on Modelling of Chemical Reaction Systems, Heidelberg, 1996.

CIARLET,P.G. (1978): *The Finite Element Method for Elliptic Problems,* North-Holland publishing company, Amsterdam, 1978.

ČSN 75 72 14 - *Jakost vod - Surová voda pro úpravu na pitnou vodu,* norma ČSN.

DIAMO (1995): *Analýza chemické těžby uranu na ložisku Stráž se zvláštním zřetelem na přípravu sanace a sanaci přírodního prostředí.* Stráž p.R., 1995.

FRYDRYCH,D., MARYŠKA,J., MUŽÁK,J., SEVERÝN, O. (1998): *Application of Mixed-Hybrid Model of Porous Media to the Flooding Uranium Mine after Closing Mining Activities.* In proceedings of ACOMEN 98, pages 613 - 620, Gent, 1998.

KAASSCHIETER,E.F., HUIJBEN,A.J.M. (1990): *Mixed-hybrid finite elements and streamline computation for the potential flow problem,* Report PN-90-02-A, TNO Institute of Applied Geoscience, Delft, 1990.

KAZDA,I. (1985): *Proudění podzemní vody,* SNTL, Praha, 1985.

MARYŠKA,J., FRYDRYCH,D. (1992a): *Užití prizmatických prvků při řešení variačních úloh v oblastech s vrstevnatou strukturou.* Výzkumná zpráva VZ – 67/92, DIAMO, 1992.

MARYŠKA,J., FRYDRYCH,D. (1992b): *Výpočet lokální matice skalárních součinů tvarových funkcí obecného prizmatického prvku.* Výzkumná zpráva VZ – 68/92, DIAMO, 1992.

MARYŠKA,J., FRYDRYCH,D., MUŽÁK,J. (1997): *Mixed-hybrid Model of Unsteady Free Boundary Porous Media Fluid Flow.* In Handlovičová A., Komorníková, M. & Mikula, K. editors Proceedings of Contributed Papers and

Posters of ALGORITMY'97, pages 149 - 155, Zuberec, Slovakia, September 2 - 5, 1997.

MARYŠKA,J., MUŽÁK,J.(1994): *Hybrid-mixed model of the transport of the chemical substances.* In Proceedings of Numerical Modelling in Continuum Mechanics, volume Part II., pages 181 – 189, Praha, 1994.

MARYŠKA,J., MUŽÁK,J. (1995): *Mathematical modelling of the transport of chemical species in the contaminated underground water.* In Bourgeat,A.P., Carraso,C., Luckhaus,S. & Mikelič,A., editors, Proceedings of the Conference Mathematical Modelling of Flow Through Porous Media, pages 450 – 459, St. Etienne, France, May 22 – 26, 1995. World Scientific.

MARYŠKA,J., MUŽÁK,J. & STÝBLO,M. (1995a): *Mixed-hybrid formulation of the transport of chemicals in the contaminated underground water.* In Mika, S., Míková, M. & Brandner, M., editors, Lecture Notes of IMAMM '95, pages 115 – 129, Srní, June 25 – 30 1995. Univ. Of West Bohemia in Plzeň.

MARYŠKA,J., MUŽÁK,J. & STÝBLO,M. (1995b): *Mixed-hybrid model of the transport of chemicals in the contaminated underground water.* In Proceedings of Kolokvium „Dynamika tekutin'95", pages 43 – 48, Praha, 1995. Institute of Thermomechanics of AS CR.

MARYŠKA,J., MUŽÁK,J. & STÝBLO,M. (1996a): *Mixed-hybrid model of the transport of chemicals in the contaminated underground water.* In Proceedings of Aktuální problémy mechaniky tekutin '95, pages 43 – 48, Praha, 1996. Institute of Thermomechanics of AS CR.

MARYŠKA,J., MUŽÁK,J. & STÝBLO,M. (1996b): *Mixed model of the unsteady porous media flow.* In Proceedings of Aktuální problémy mechaniky tekutin '96, pages 25 – 26, Praha, 1996. Institute of Thermomechanics of AS CR.

MARYŠKA,J., MUŽÁK,J. & STÝBLO,M. (1996c): *Mixed-hybrid model of porous media flow of varying density fluid.* In Proceedings of Aktuální problémy mechaniky tekutin '96, pages 27 – 28, Praha, 1996. Institute of Thermomechanics of AS CR.

MARYŠKA,J., STÝBLO, M., NOVÁK,J., MAREČEK,P., MUŽÁK,J. & WASSERBAUER,V. (1997): *The Modelling of Chemicals Leakage from the*

Waste Pond. In Handlovičová A., Komorníková, M. & Mikula, K. editors Proceedings of Contributed Papers and Posters of ALGORITMY'97, pages 143 - 148, Zuberec, Slovakia, September 2 - 5, 1997.

MUŽÁK,J. (1994): *Solution of large sparse systems of equations generated by the FEM by direct and iterative methods*, Masters Theses, TU Liberec, 1994.

MUŽÁK,J. (1995): *Podrobný popis funkce a ovládání programů matematických modelů pro výpočet difuze a transportu látek užitím smíšené-hybridní formulace*. Výzkumná zpráva VZ – 210/95, DIAMO, 1995.

MUŽÁK,J. (1998): *Model vývoje šíření kontaminantů v coniacké zvodni v oblasti odkaliště chemické úpravny Stráž*. Sborník příspěvků 10. hydrogeologické konference, strany 87 - 92, Stráž pod Ralskem, 9. - 11. září, 1998.

MUŽÁK,J., SMETANA,R. (1996): *Stráž block groundwater pollution*, Modelling report. VZ-352/96, DIAMO Stráž p.R. 1996.

NOVÁK,J. a kol (1996): *Posouzení možnosti přečerpávání odkalištních vod do dolu Hamr I*. Závěrečná zpráva. VZ 304/96, archiv s.p.DIAMO, Stráž p.R. 1996.

NOVÁK,J., CHARVÁT,J., MUŽÁK,J. & FRYDRYCH,D. (1997): *Charakterizace modelových prostředků pro proudění podzemní vody a transport kontaminantů v horninovém prostředí vyvinutých ve firmě DIAMO, s.p.*, Výzkumná zpráva VZ - 465/97, DIAMO, 1997.

NOVÁK,J., CHARVÁT,J., MUŽÁK,J. & PISKOVÁ,E. (1997): Vývoj šíření kontaminantů v coniacké zvodni v oblasti odkaliště CHÚ Stráž. Výzkumná zpráva VZ – 393/97, DIAMO, 1997.

NOVÁK,J., CHARVÁT,J., MUŽÁK,J., WASSERBAUER,V. & AMM (1998): *Ovlivnění kvality podzemních vod a životního prostředí při sanaci odkaliště CHÚ Stráž*. Výzkumná zpráva VZ – 495/98, DIAMO, 1998.

NOVÁK,J., MUŽÁK,J. (1996): *Modelování experimentu vtláčení koncentrovaných roztoků na VP – 8F*. Výzkumná zpráva VZ – 379/96, DIAMO, 1996.

NOVÁK,J., MUŽÁK,J. & WASSERBAUER,V. (1996): *Model turonské zvodně*. Výzkumná zpráva VZ – 385/96, DIAMO, 1996.

NOVÁK,J., WASSERBAUER,V. & MUŽÁK,J. (1998): *Modelování aktuálního režimu nakládání s vodami.* Výzkumná zpráva VZ – 507/98, DIAMO, 1998.

STÝBLO,M., MUŽÁK,J. (1997): *Computational model of porous media flow of varying density fluid.* In Proceedings of Aktuální problémy mechaniky tekutin '97, pages 51 - 52, Praha, 1997. Institute of Thermomechanics of AS CR.

ZIENKIEWICZ,O.C., TAYLOR,R.L. (1989): *The Finite Element Method*, McGraw-Hill, London, 1989.