

# Matematický model – nástroj pro hodnocení parametrů transportu kontaminantů

**Transport chlorovaných uhlovodíků  
z výrobního areálu Transporta Chrudim a.s.**

28. – 29. listopadu 2007, Litomyšl

**PROGEO s.r.o. :** Ing. Jan Uhlík, Ph.D.  
RNDr. Martin Milický

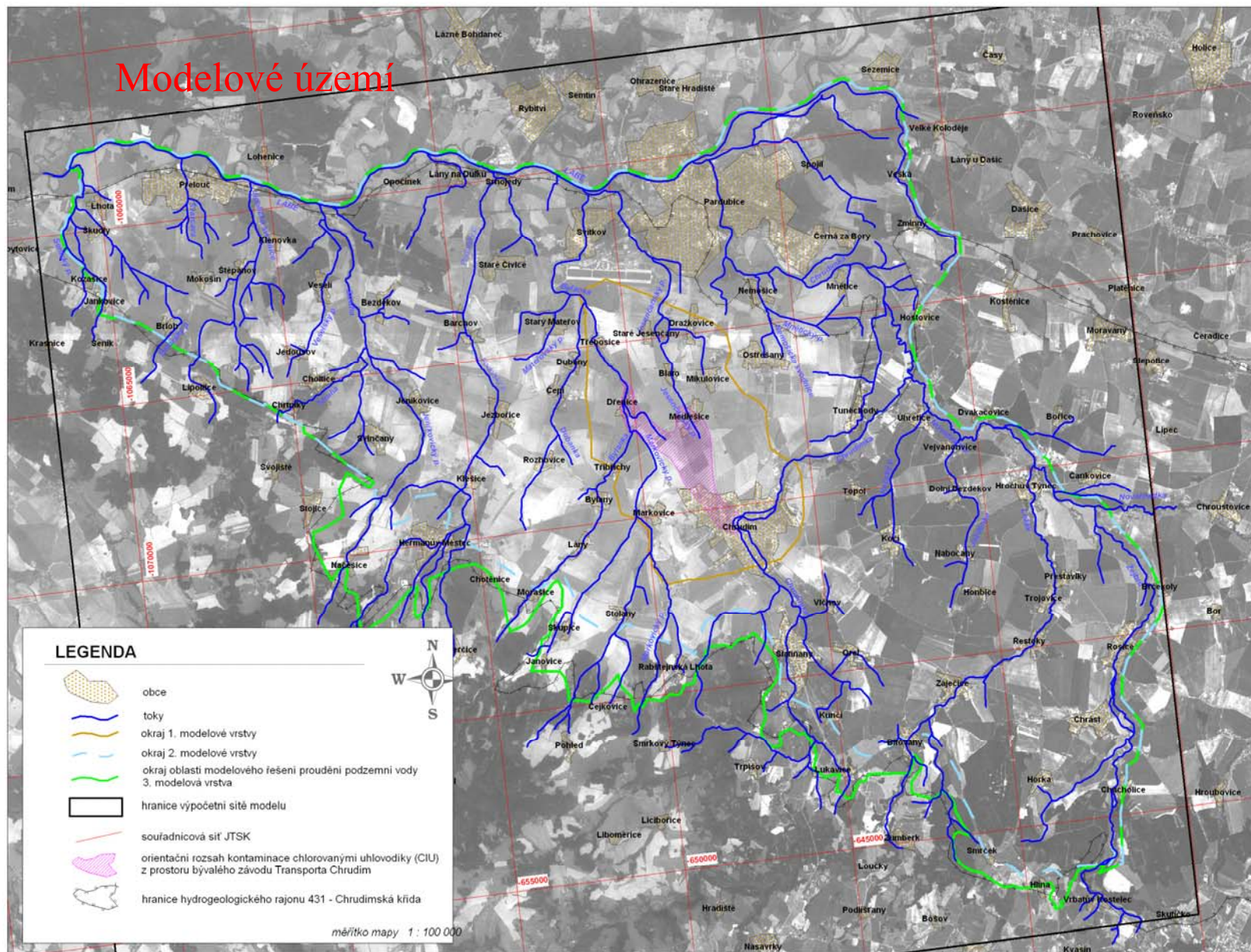
# Témata prezentace :

- Rozsah kontaminace v zájmovém území
- Matematický model :
  - Metodika řešení
  - Vstupní data
  - Kalibrace
    - Simulace proudění podzemní vody
    - Simulace transportu kontaminantu
  - Výsledky simulací
- Hodnocení parametrů transportu chlorovaných uhlovodíků z areálu Transporty Chrudim

# Rozsah kontaminace v areálu závodu a jeho okolí

- Zář 2003 - po zjištění míry a rozsahu kontaminace - na lokalitě Transporty vyhlášena havarijná situace na podzemních vodách
- Kontaminační mrak chlorovaných uhlovodíků dosahuje k obcím Medlešice (1.9 km od areálu závodu TCH) a Dřenice (3.1 km od areálu závodu)
- Obava z rozšíření kontaminace do jímacího území Markovice
- Jaro 2004 – zahájení realizace protihavarijních opatření – VZ Ekomonitor Chrudim s.r.o.
  - zamezení migrace prioritních kontaminantů podzemními vodami vně areálu bývalého s. p. Transporta – nový závod pomocí kontinuálního jímání podzemních vod z ochranné hydraulické bariéry při severovýchodní hranici výrobního areálu
  - sledování vývoje, míry a rozsahu kontaminace lokality a severního předpolí - prioritně směrem k využívaným zdrojům pitné vody pro zásobování obyvatelstva
- Chlorované uhlovodíky byly využívány při procesu výroby - vzhledem k malé znalosti byly CIU po použití zasakovány na skládky uhlí a rovněž i přímo do horninového prostředí

# Základní situace a rozsah kontaminace v okolí areálu závodu

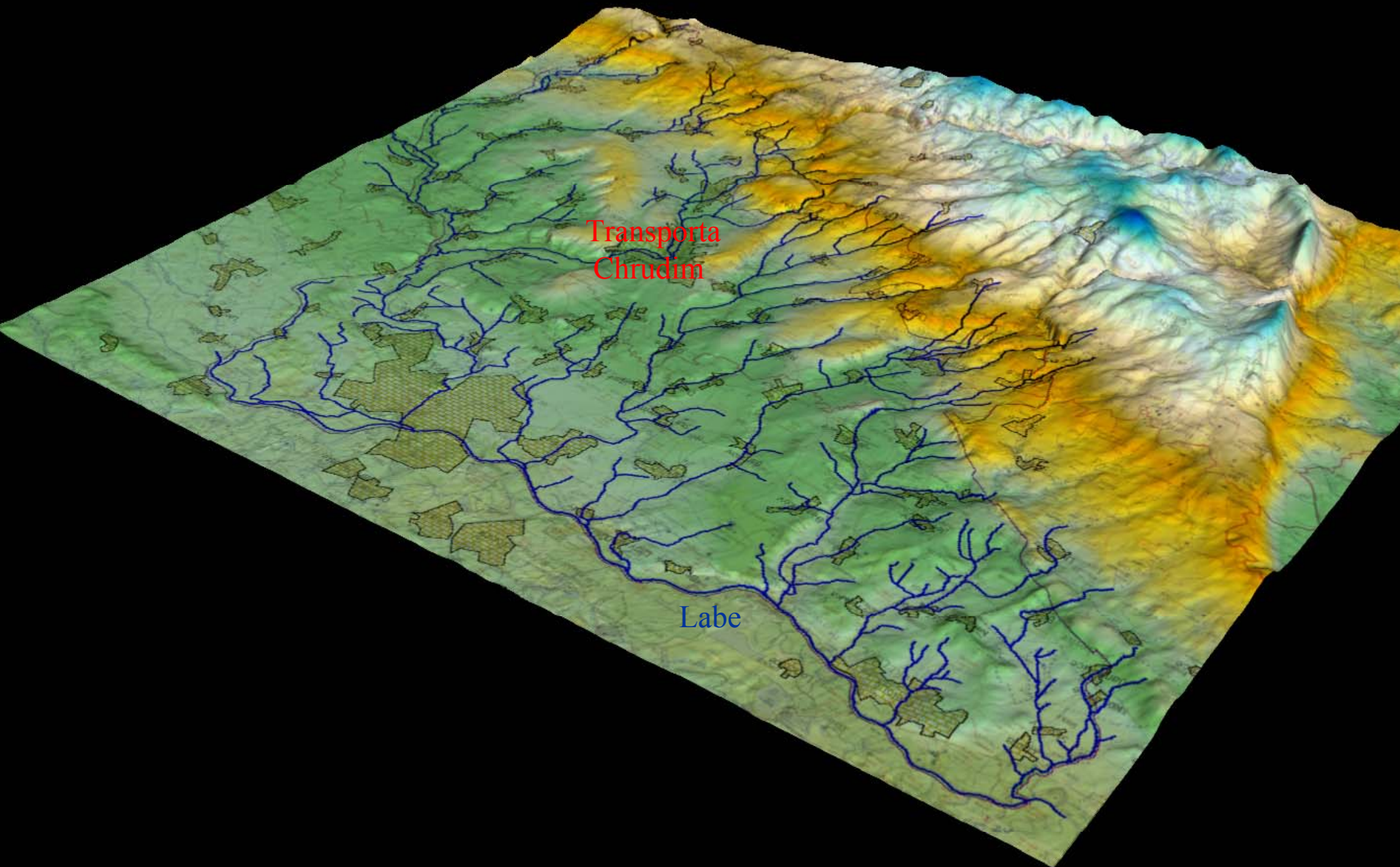


# Metodika řešení

- Geologické, hydrologické a hydrogeologické hodnocení území – rozsah kolektorů a izolátorů, oběh podzemní vody, stanovení průměrných přírodních zdrojů, vývoj hladin podzemní vody, vývoj koncentrací chlorovaných uhlovodíků – sestavení konceptuálního modelu pro zájmové území,
- Stanovení a zadání vstupních a okrajových podmínek modelu
- Simulace proudění podzemní vody
- Simulace transportu chlorovaných uhlovodíků
- Hodnocení výsledků simulací

# Morfologie terénu zájmového území

Nadmořská výška – 260 až 300 m n m    ŽH – až 660 m n m



# Geologické a hydrogeologické poměry zájmové oblasti

Hydrogeologický rajón 431 – Chrudimská křída (cenoman – coniac) – podloží – paleozoikum a proterozoikum, **Cenoman** – značně proměnné mocnosti, až 60 m, i chybí – vč.cen.souš, - **jediný kolektor**, **bělohorské** a **jizerské** souvrství – pelitický vývoj (slínovce) - **izolátory**

**Báze chrudimské křída je mírně ukloněna k SSV**

stupeň, podstupeň	souvrství, vrstvy	litologie	mocnost (m)	p o z i c e k o l e k t o r ů	
coniac	březenské souvrství	vápnité jílovce, slínovce, pískovce, flyšoidní facie	> 150	JZ	SV
	rohatecké vrstvy				
svrchní turon	teplické souvrství	vápnité jílovce, slínovce, pískovce, místy flyšoidní facie	50–120	SZ	JV
střední turon	jizerské souvrství	pískovce, slínovce, prachovce	200–280		
	spodní turon	bělohorské souvrství	slínovce		
cenoman	perucko-korycanské souvrství	pískovce, prachovce jílovce	20–110		

Převzato z Hydrogeologie České křídové pánve (Herčík, Hermann, Valečka)

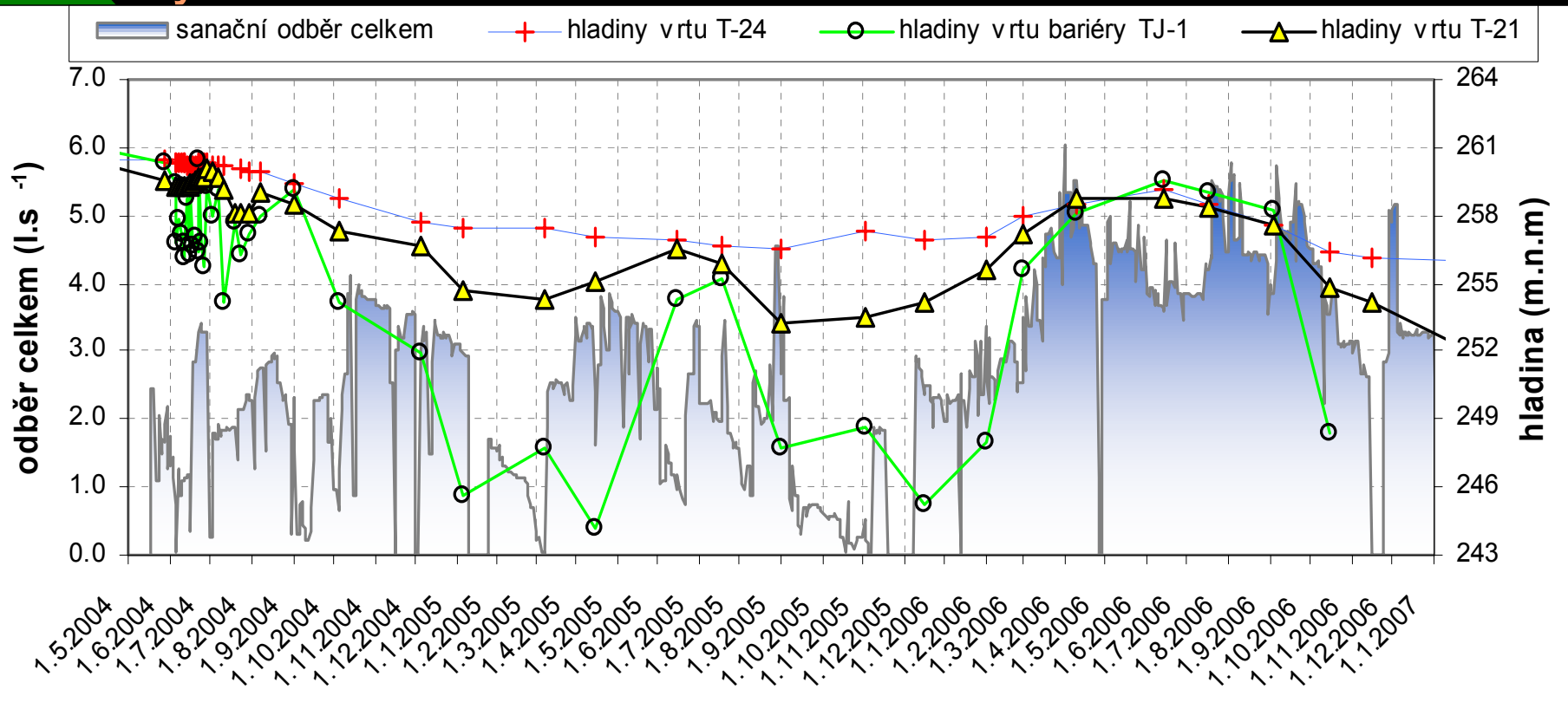
## Monitoring v zájmovém území

- Měřené a evidované hydrologické a hydrogeologické informace :
  - hladiny podzemní vody (vrty, studny – cca 90 objektů)
  - průtoky vody v tocích (19 profilů – Bylanka, Dubanka, Markovický potok, Jesenčanský potok)
  - odběry podzemní vody (včetně sanačních odběrů – 9 vrtů)
  - koncentrace chlorovaných uhlovodíků
  - srážky
- Pravidelný monitoring probíhá od března 2004



# Sanační čerpání v areálu závodu

7 vrtů hydraulické bariéry (TJ1 až 7) – severovýchodní okraj závodu  
2 vrty v ohniscích znečištění



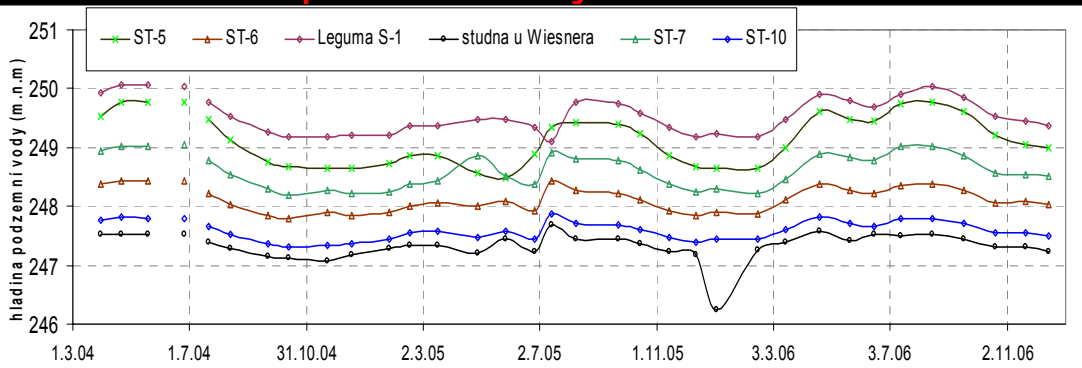
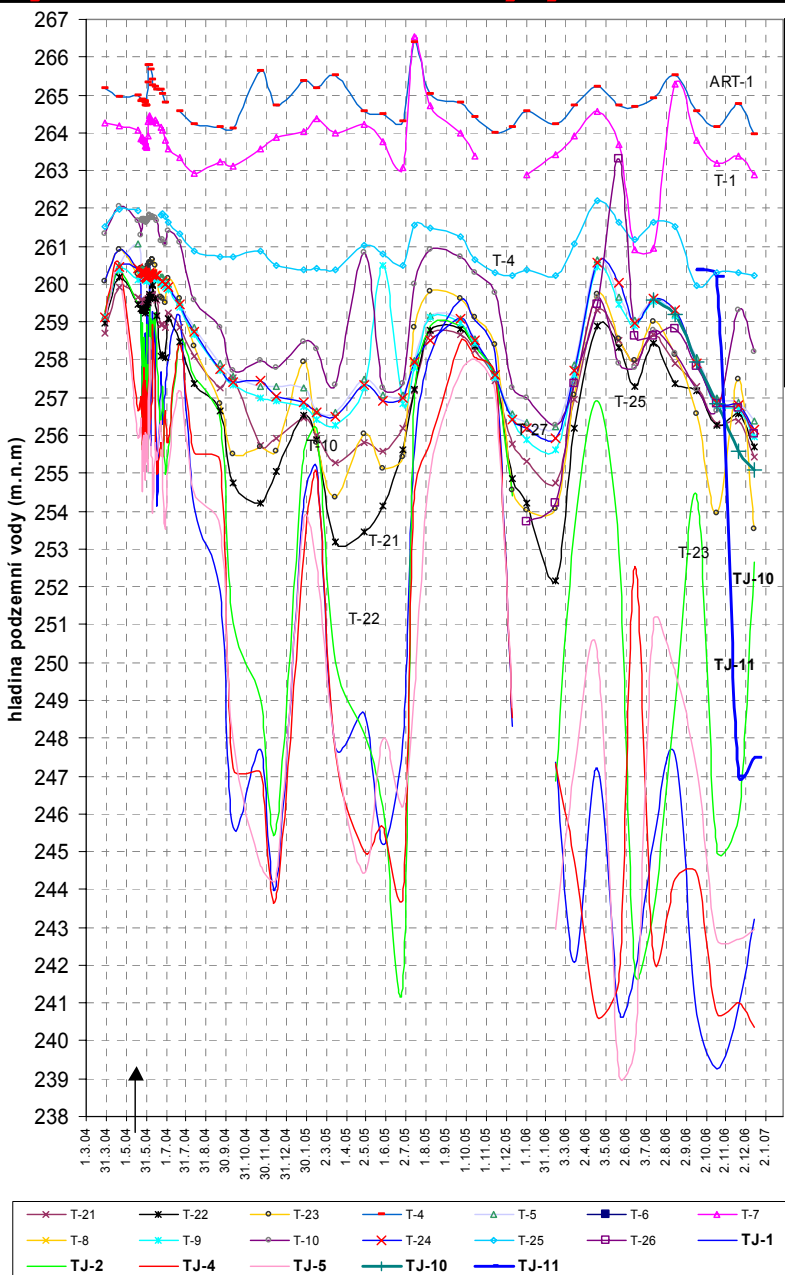
Sanační čerpání – 1 až 6 l/s,  
průměrné čerpání za období 2004 až 2006 – 1.9 l/s  
průměrné čerpání za rok 2006 – 3.7 l/s

Hladiny podzemní vody v oblasti bariéry svým trendem reagují na velikost sanačního čerpání (viz průběh hladiny ve vrtech T-24 a T-21)

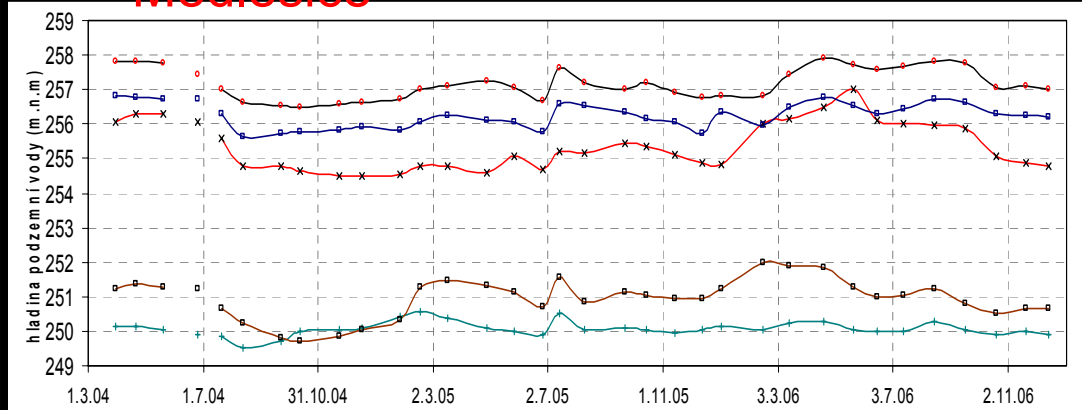
# Vývoj hladin podzemní vody

## hydraulická bariéra a její okolí

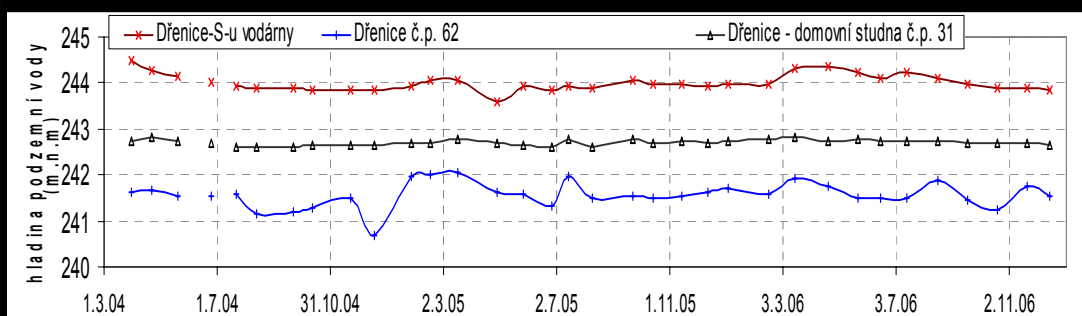
## Transporta – starý závod



## Medlešice



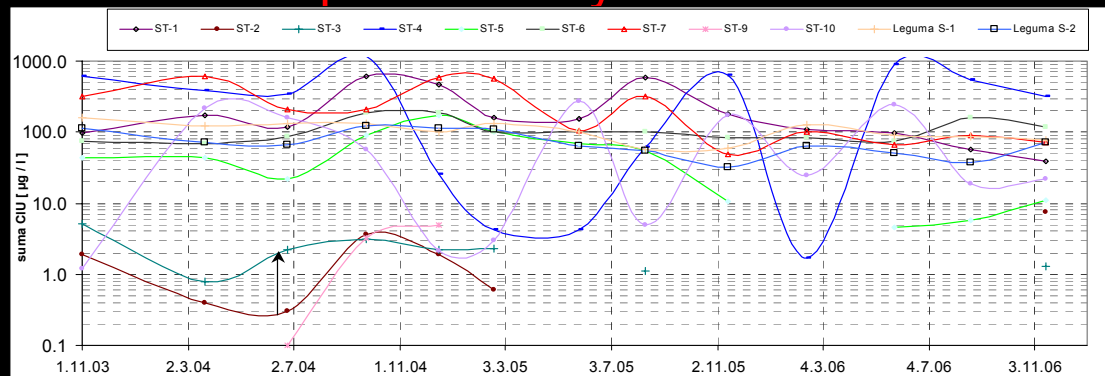
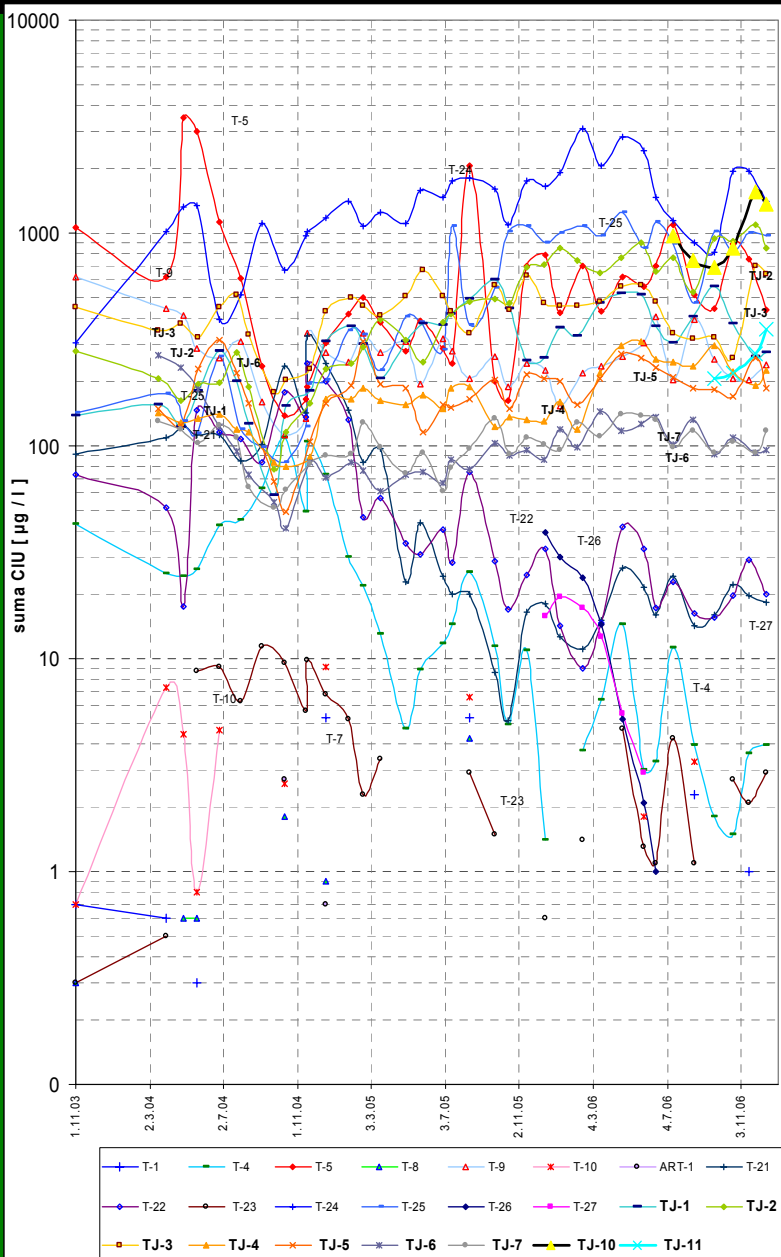
## Dřenice



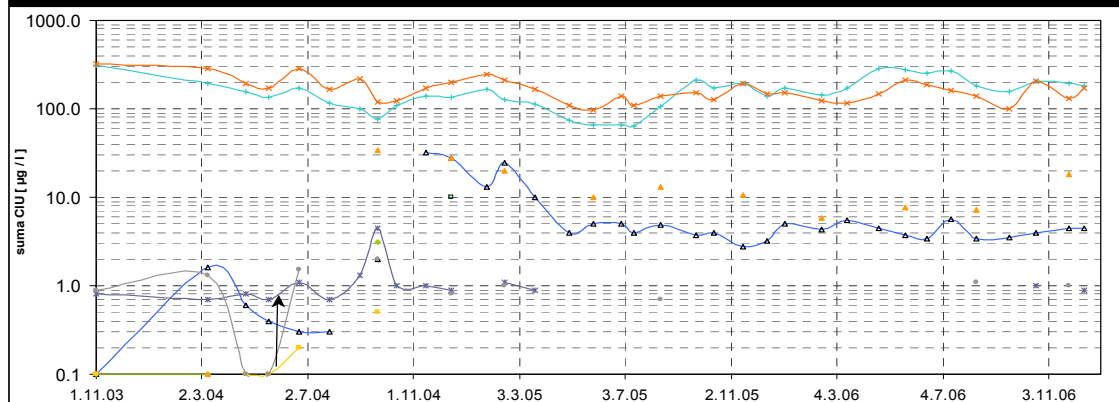
# Vývoj koncentrací chlorovaných uhlovodíků (suma CIU)

hydraulická bariéra a její okolí

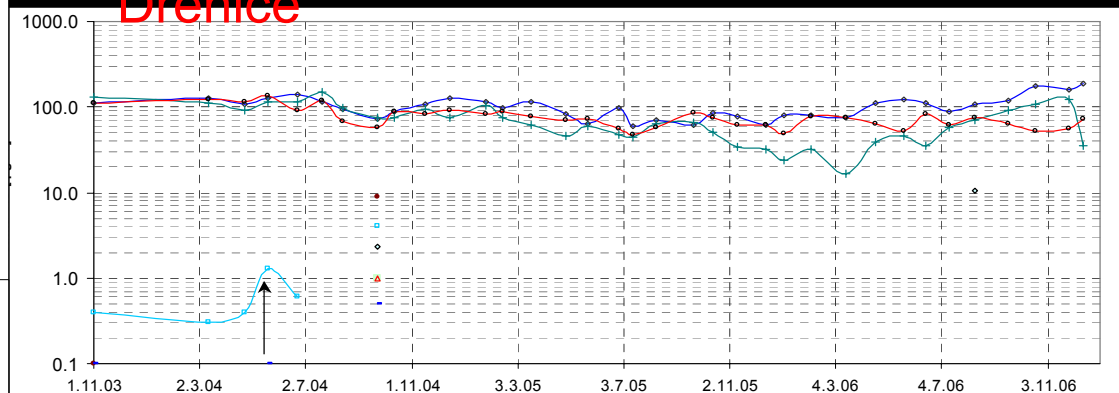
Transporta – starý závod



Medlešice



Dřenice



## Konceptuální model zájmového území :

➤ Dva oběhy podzemní vody – mělký a hluboký

- mělký oběh podzemní vody je vázán na zvodněné kvartérní sedimenty (pouze podél toků) a na prostor přípovrchového rozpojení výchozů křídy,
- hluboký oběh podzemní vody je vyvinut v psamitických sedimentech perucko-korycanského souvrství (cenoman), mocnost sedimentů souvrství je značně proměnná a v maximech dosahuje až 60 metrů,
- v nadloží cenomanského kolektoru (až po zónu přípovrchového rozpojení) se vyskytuje pelitický soubor hornin, mající funkci izolátoru

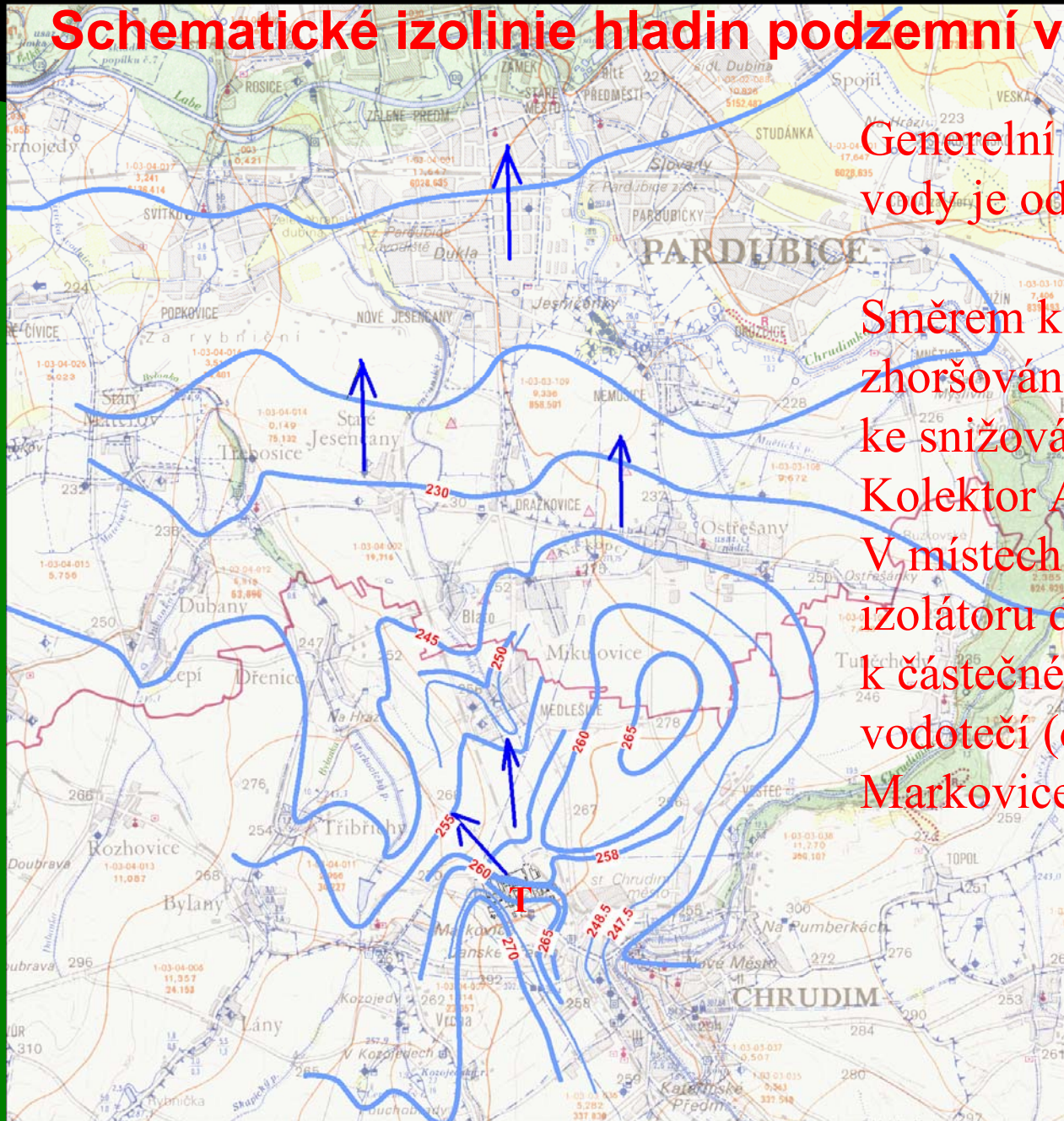
➤ Dotace kolektorů infiltrací srážek :

- Mělký – v celé ploše,
- Hluboký – na výchozech – severní úbočí Železných hor, částečně i infiltrací vody z toků

➤ Drenáž – toky (Labe, Novohradka, Markovický p.)

➤ Odběry podzemní vody – Markovice (cca 25 l/s), ukončen 2006

# Schematické izolinie hladin podzemní vody (září 2006)



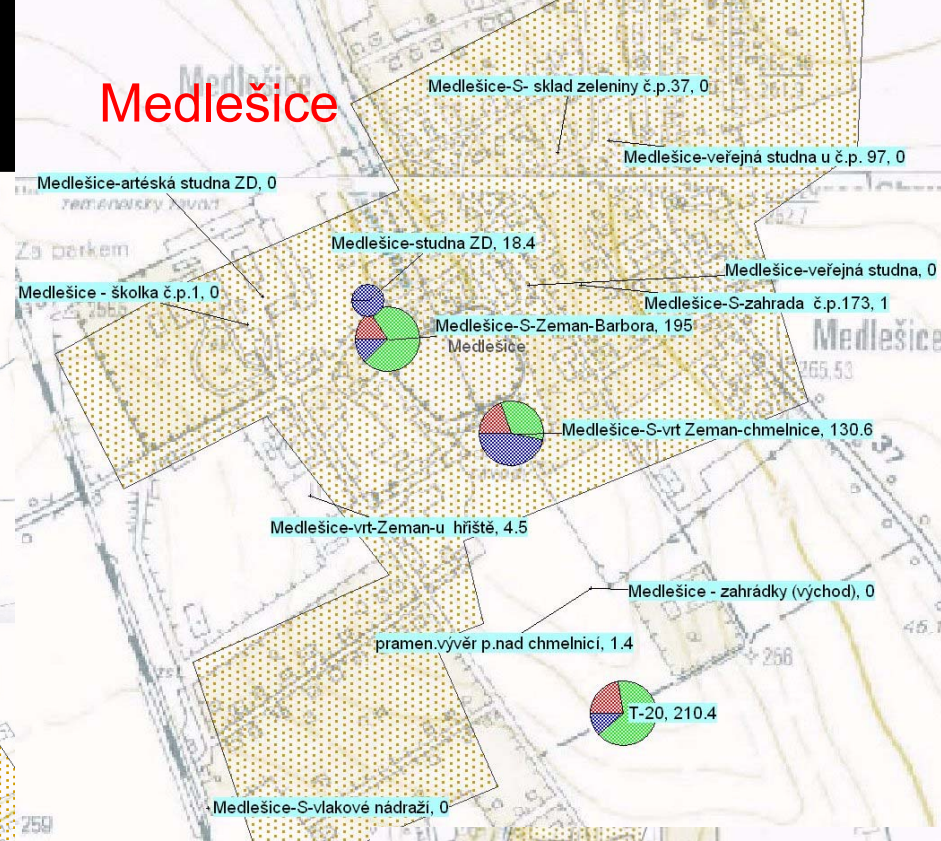
Generelní směr proudění podzemní vody je od jihu k severu.

Směrem k severu dochází ke zhoršování hydraulické vodivosti a ke snižování mocnosti kolektoru. Kolektor A je napjatý.

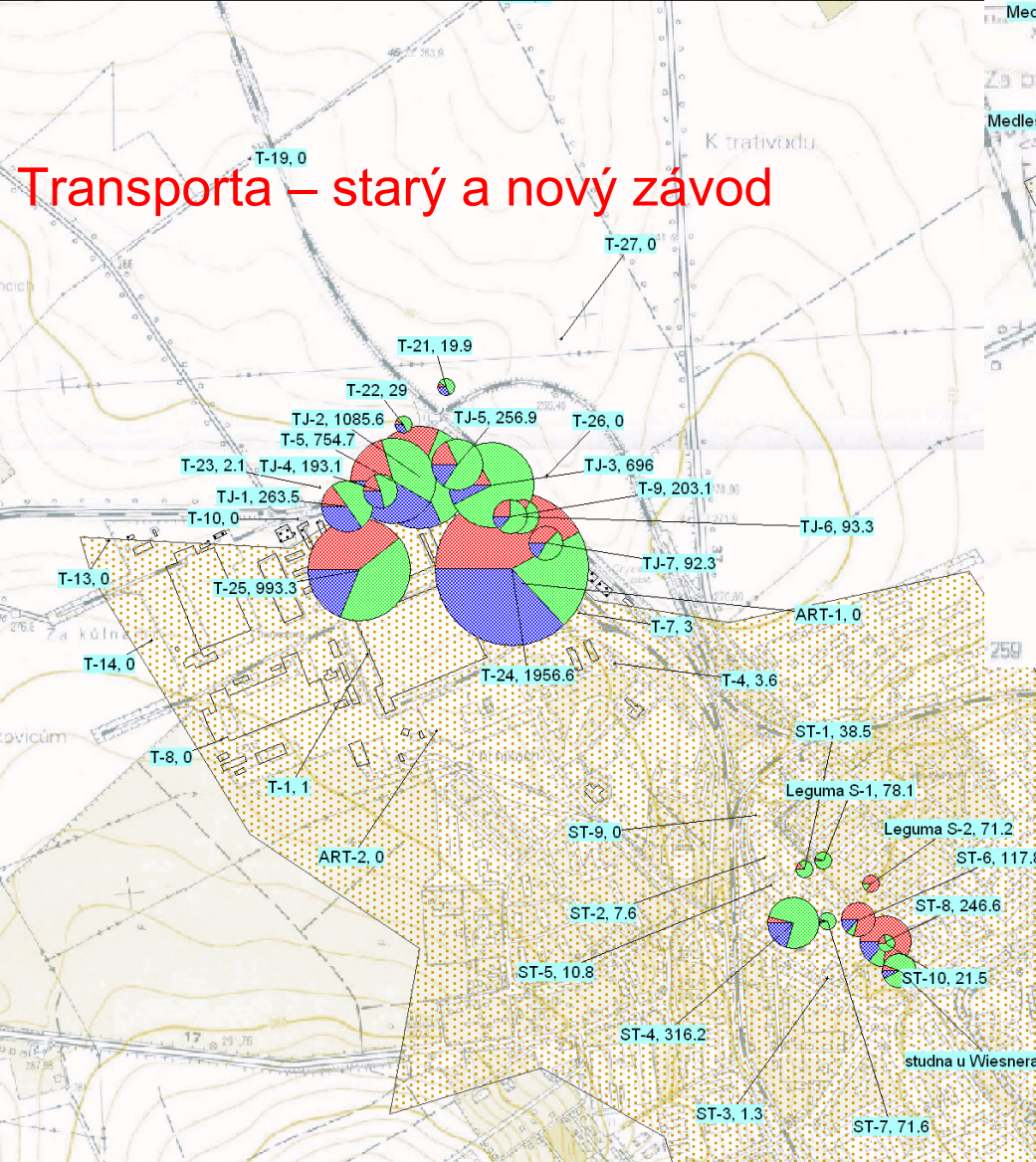
V místech porušení stropního izolátoru dochází přes nadloží k částečné drenáži do lokálních vodotečí (oblast jímacího území Markovice).

# Plošné rozložení koncentrací chlorovaných uhlovodíků

## Medlešice



## Transporta – starý a nový závod



## Dřemice



Podíl tetra- (zeleně), tri- (červeně) a di-chlorethenu (modře)

# Modelové řešení proudění podzemní vody a transportu chlorovaných uhlovodíků

- **Varianty :**

- A. stacionární simulace neovlivněného proudění podzemní vody + simulace rozšíření kontaminace CIU v období od počátku kontaminace do zahájení sanačních opatření,
- B. stacionární i nestacionární simulace proudění podzemní vody při čerpání hydraulické bariéry a po ukončení odběrů z jímacího území Markovice + simulace vývoje kontaminace v období sanačního čerpání (k zamezení výtoku CIU z areálu závodu),
- C. stacionární i nestacionární simulace proudění podzemní vody při optimalizovaném čerpání hydraulické bariéry a čerpání v ohniscích kontaminace + variantní simulace prognózního vývoje kontaminace.

## Kvantifikace parametrů proudění podzemní vody a transportu kontaminací

program MODFLOW řeší potenciální proudění podzemní vody a program MT3D řeší advekční a hydrodynamický transport kontaminantů v pórovém prostředí  
Do výpočtu transportu je možné zadat sorpci, případně rozpad kontaminantu

# Diskretizace prostoru modelu

- **Vertikálně – 3 modelové vrstvy :**

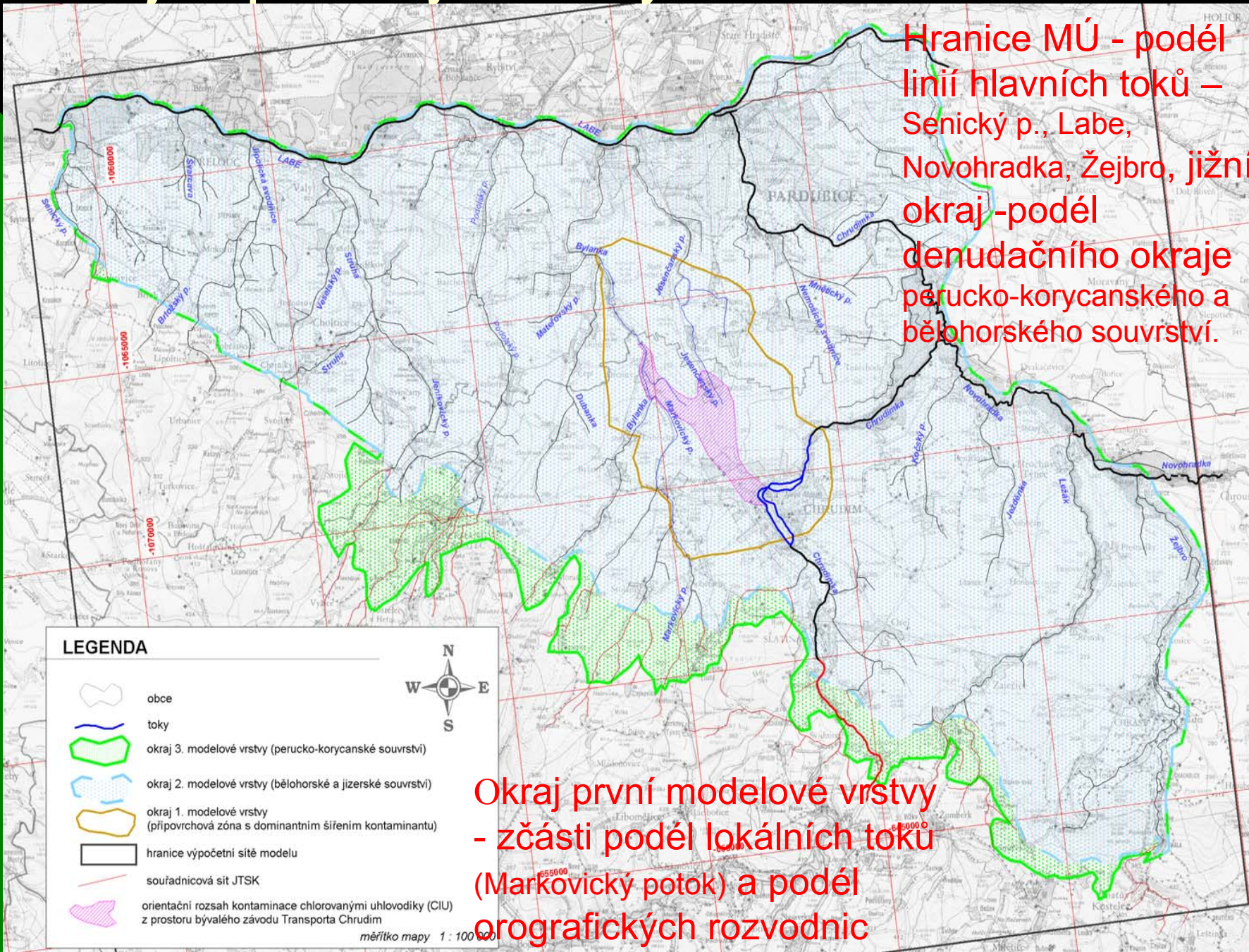
1. modelová vrstva - v této vrstvě je simulováno proudění podzemní vody v přípovrchové zvodni, rozsah první modelové vrstvy je zvolen větší než plocha zasažená kontaminací. Báze první modelové vrstvy byla odvozena jako povrch terénu snížený o 25 m (průměrná hloubka monitorovacích objektů),
2. modelová vrstva – v místech výskytu nadložní první modelové vrstvy má parametry izolátoru oddělujícího přípovrchovou zvedeň od podložního kolektoru cenomanu. V místech absence první modelové vrstvy (území neovlivněná výskytem kontaminace) se její parametry blíží parametrům přípovrchové zvodně.
- 3. modelová vrstva – v této vrstvě je simulováno proudění podzemní vody v kolektoru cenomanu.

**Horizontálně - 2 úrovně řešení :** **regionální** – širší zájmová oblast bez výskytu kontaminace – elementy 100 \* 100 metrů,

**lokální** – užší zájmová oblast s výskytem kontaminace – elementy 5\*5 metrů



# Okrajové podmínky modelových simulací



# Okrajové podmínky, infiltrace srážek

Drenáž do toků (resp. infiltrace z toků) – okrajová podmínka 3.typu  
- zadání hladinou a odporovým koeficientem),

Odběry podzemní vody - okrajová podmínka 2.typu - ( $Q=\text{konst.}$ )

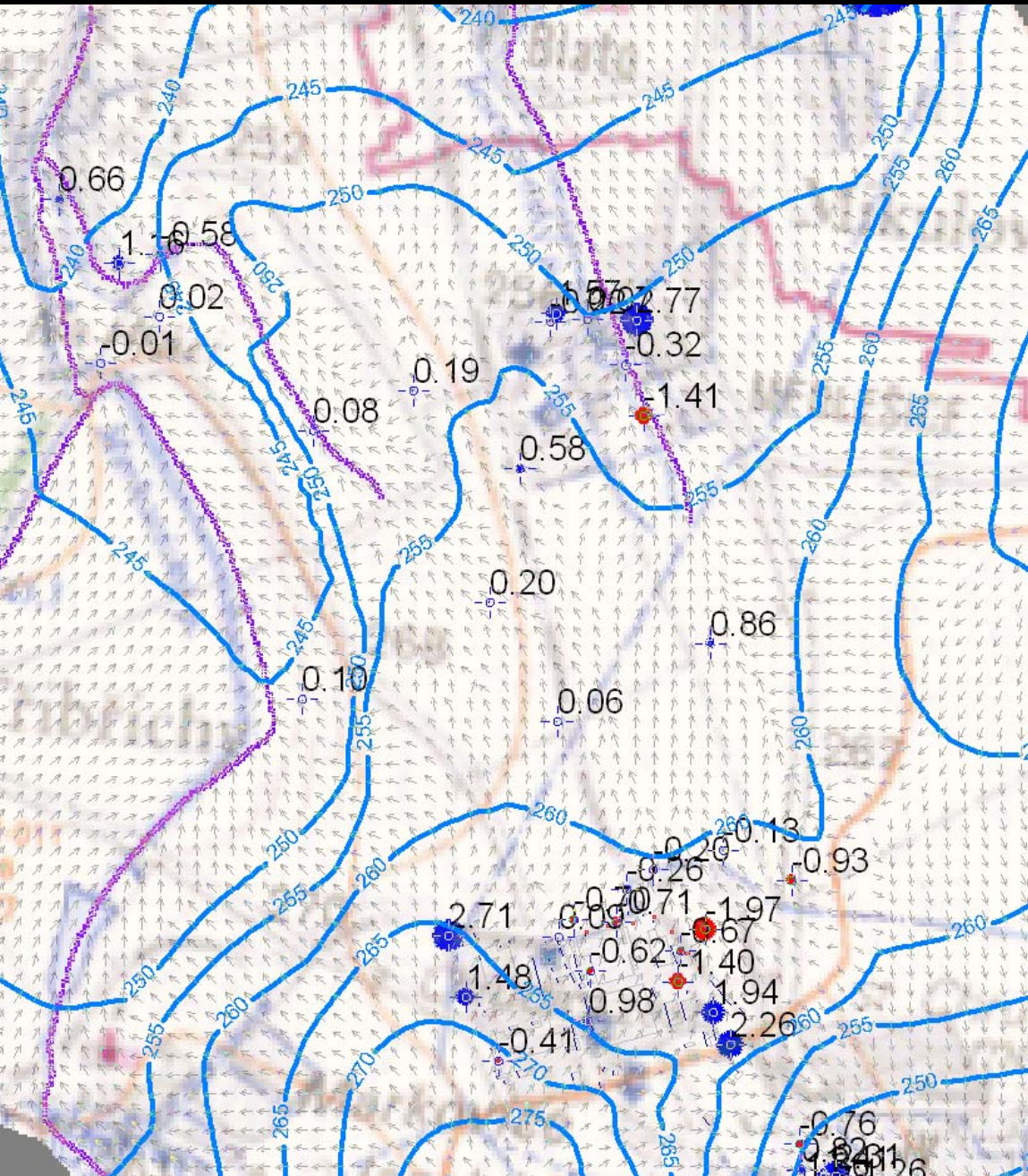
## Srážková infiltrace :

sedimenty turonu - zadána hodnotou  $3 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$  ,

na výchozech cenomanu - zadána hodnotou  $6 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ ,

v místech budov v areálu Transporty - nulová.

# Výsledky modelových simulací – varianta A



*proudění podzemní vody -  
bez odběrů podzemní vody  
z hydraulické bariéry –  
neovlivněný stav*

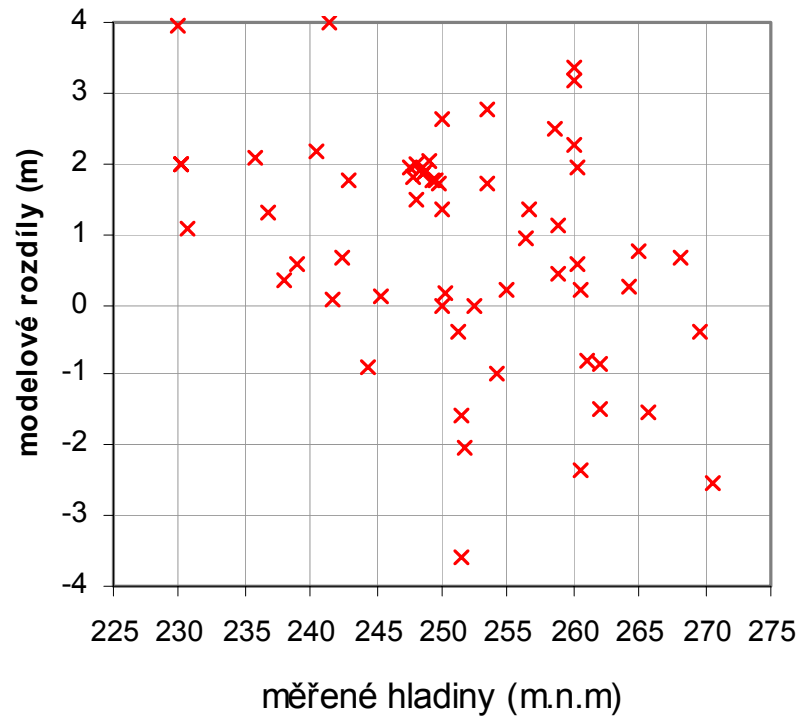
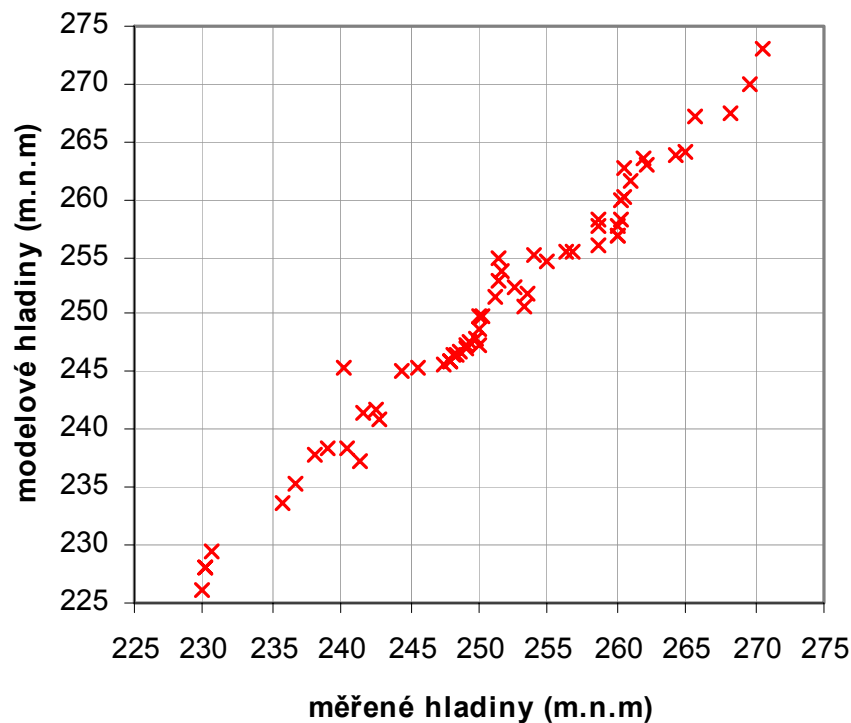
Hladiny podzemní vody v  
1.modelové vrstvě v okolí  
areálu Transporty

Při jižní hranici areálu probíhá  
hydrogeologické rozvodí mezi  
Chrudimkou a Jesenčanským  
potokem, východně od areálu  
má rozvodí nejnižší výšku -  
přibližně 260 m.n.m.

Minimální výška rozvodí může  
být vázána na pásmo zvýšených  
propustností, situovaného v linii  
průběhu Chrudimského zlomu  
(zlomového pásma).

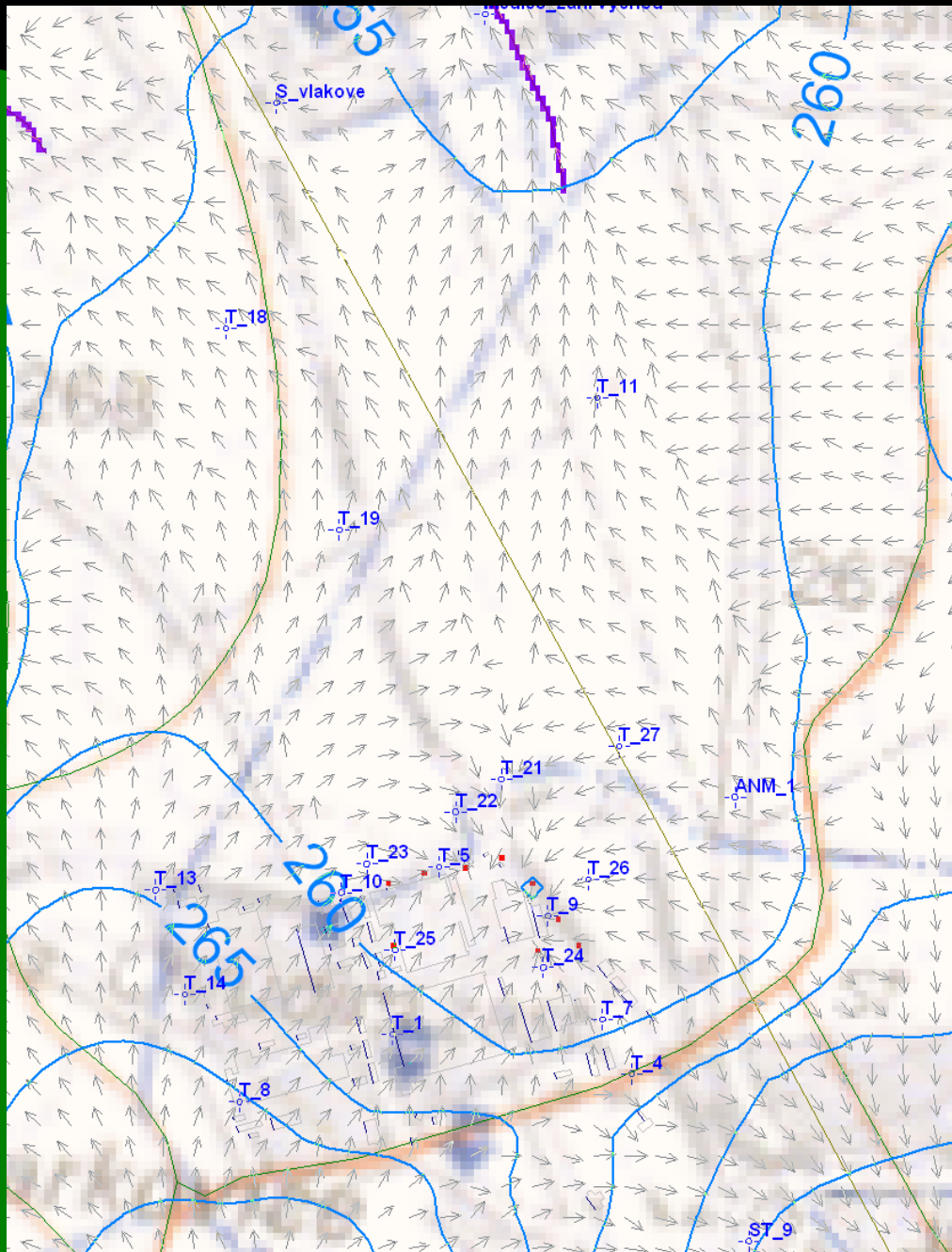
# Kalibrace modelové simulace – varianta A

*proudění podzemní vody -bez odběrů podzemní vody z hydraulické bariéry – neovlivněný stav* Porovnání modelových a měřených hladin



Většina rozdílů měřených a modelových hladin nepřesahuje 2 metry

# Výsledky modelových simulací – varianta B

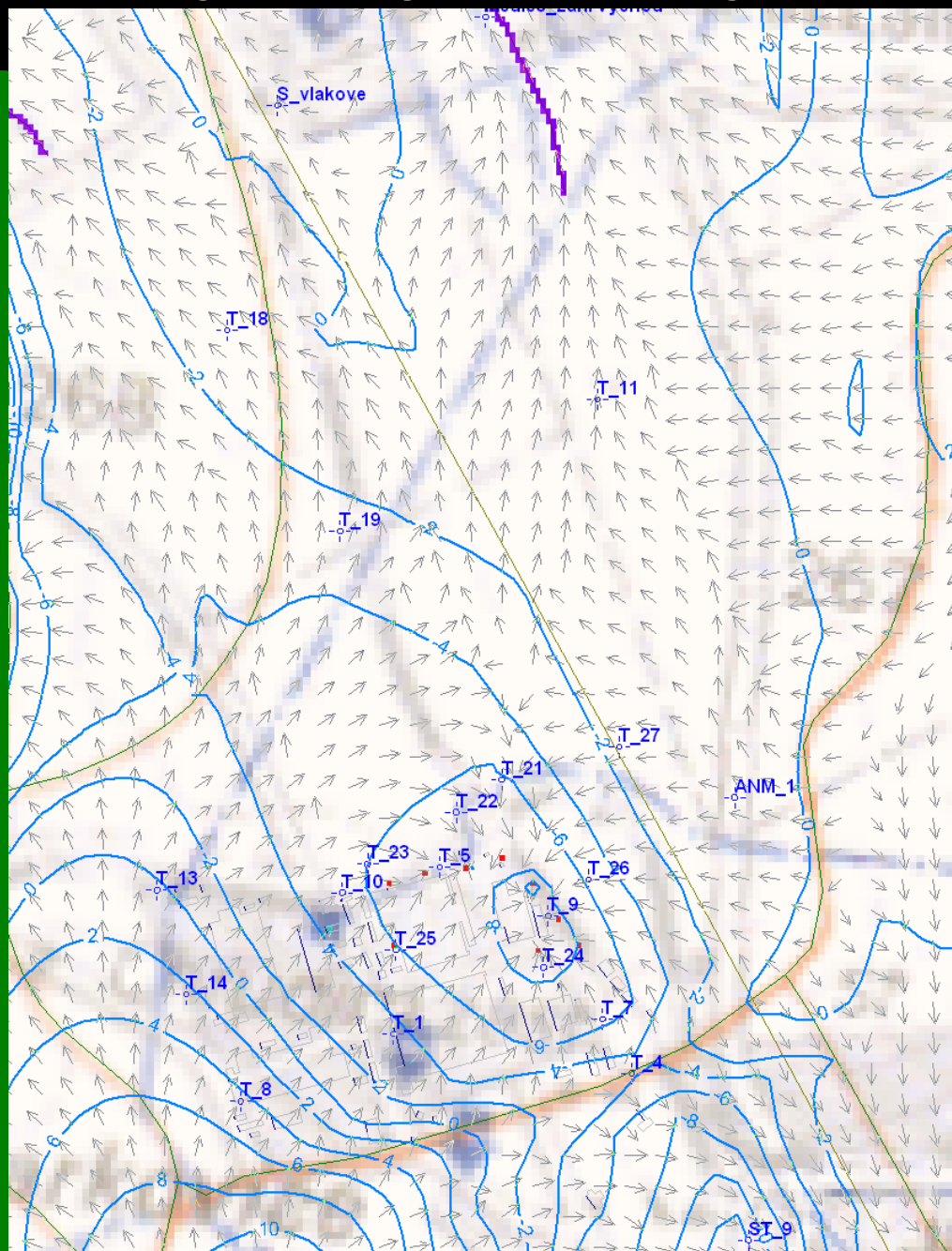


*proudění podzemní vody –  
s odběry podzemní vody  
z hydraulické bariéry a zapojení  
vrtů TJ-10 a TJ-11*

Hladihy podzemní vody v 1.  
modelové vrstvě v okolí areálu  
transporty Chrudim

Za průměrných podmínek infiltrace,  
zadaných ve stacionární simulaci,  
vzniká v oblasti hydraulické bariéry  
spojitá deprese hladiny podzemní  
vody. K proudění podzemní vody  
z areálu Transporty do severního  
předpolí nedochází (viz orientace  
šipek znázorňujících modelové směry  
proudění podzemní vody).

# Výsledky modelových simulací – varianta B



tlakové poměry v kolektorech –  
rozdíl hladin v 1.mod. vrstvě a  
3.modelové vrstvě (cenoman)

V oblasti dominantních směrů šíření  
kontaminace se vyskytuje přetlak  
zvodně cenomanu oproti zvodni  
přípovrchového rozvolnění. V oblasti  
areálu Transporty dosahují rozdíly  
hladin rozpětí 6 - 8 m (přetlak zvodně  
cenomanu).

Varianta B zpracována i ve formě  
nestacionární simulace

- období let 2004 až 2006,
- časově proměnlivá infiltrace srážek,
- časově proměnlivé čerpání,
- v měsíčním kroku

# Simulace transportu chlorovaných uhlovodíků

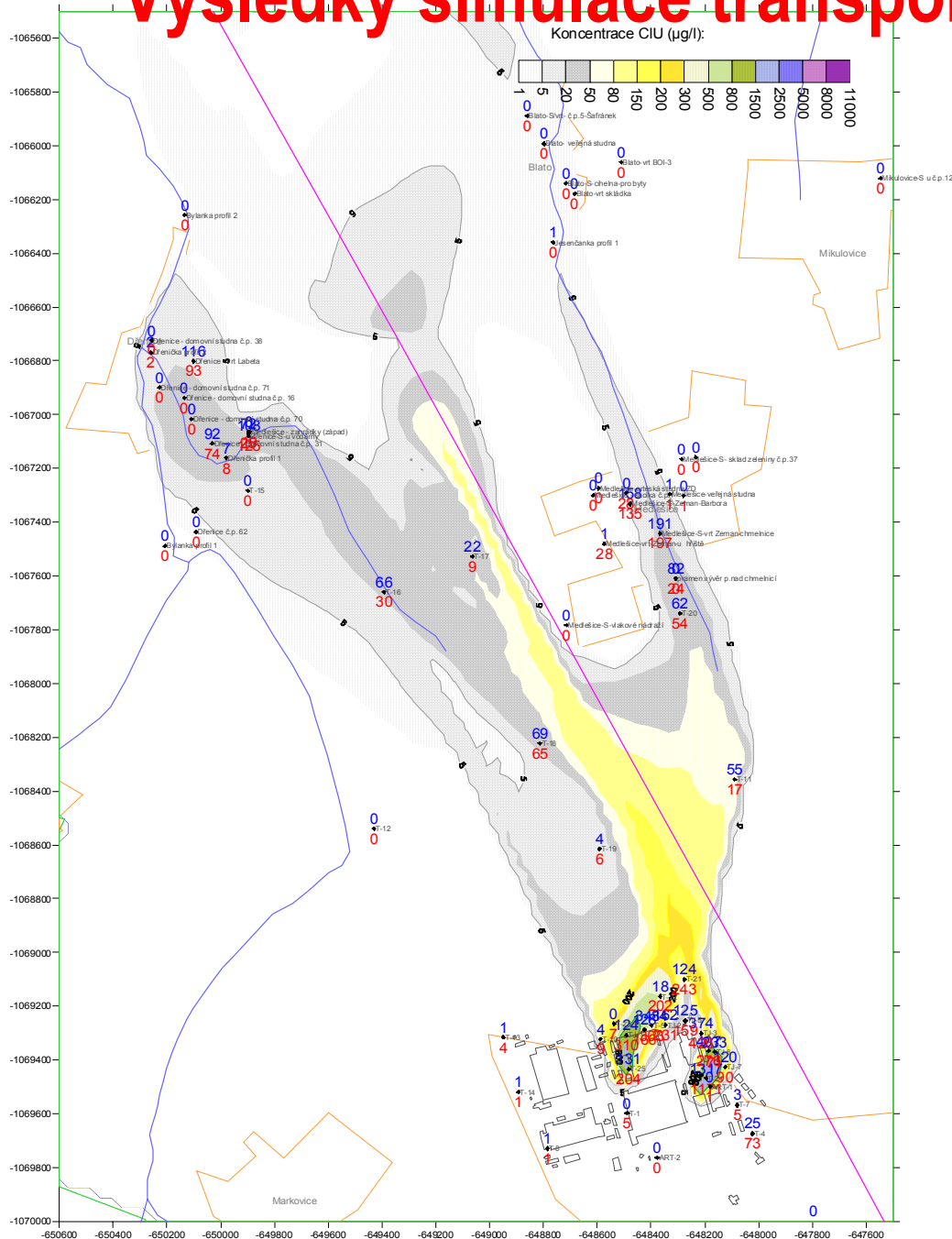
## Cíle simulací :

- objasnit současné rozložení kontaminace,
- popsat trendy vývoje v období zapojení hydraulické bariéry - ověřit možnosti případného úniku CIU do předpolí v období:
  - technických odstávek (a snížení) sanačního odběru,
  - intenzivního doplnění zásob podzemní vody ze srážkové infiltrace.
- predikovat další vývoj kontaminace,
- kvantifikovat dopady přeskupení sanačních odběrů (po vybudování vrtů TJ-10 a TJ-11) na další vývoj kontaminace,
- kvantifikovat bilanci CIU v zájmovém území

## Dílčí simulace (navazují na simulace proudění podzemní vody) :

- a) neovlivněného šíření CIU (v době před zahájením sanačních prací).
- b) transportu CIU v období čerpání hydraulické bariéry,
- c) prognózní vývoj koncentrací při trvalém snížení hladiny podzemní vody v oblasti hydraulické bariéry a při čerpání vrtů TJ-10 a TJ-11

# Výsledky simulace transportu CIU – varianta A



období do zahájení sanačních prací – 1954 – 2004

Modelové koncentrace – květen 2004

Dotace CIU – 1954 - 1974 vyšší

- 45.7 kg CIU za rok,

1974 – 2004 - snížena –

-10.6 kg CIU za rok,

-simulováno rozpouštění fáze

CIU v podzemní vodě a přítok

CIU z nenasurované zóny

Porovnání modelových a měřených koncentrací CIU

Stanovení počáteční okrajové

podmínky rozložení

koncentrací pro simulaci

transportu v období čerpání

hydraulické bariéry

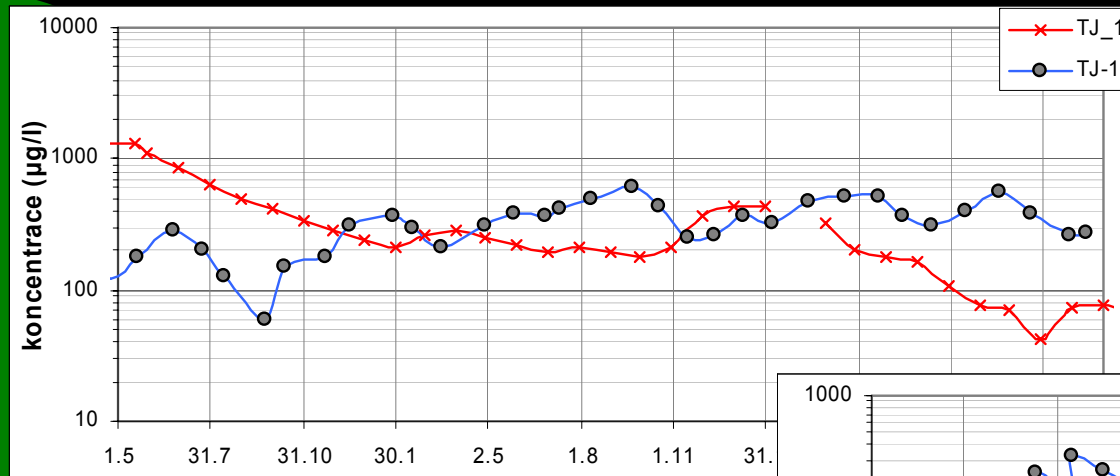


# Výsledky simulace transportu CIU – varianta B

období sanačních prací – 2004 – 2006

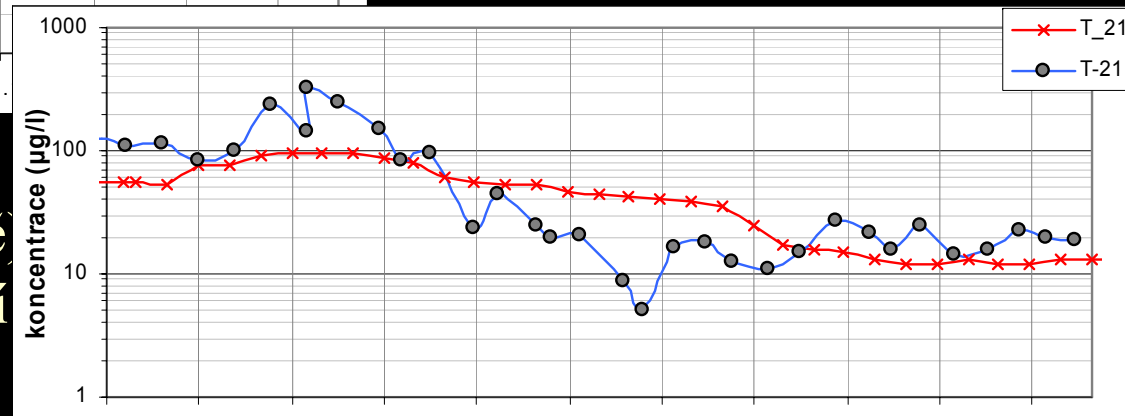
postížení změn koncentrací  
CIU v průběhu sanace

Dotace CIU – 10.6 kg CIU za rok,



TJ1 - vrt hydr. bariéry

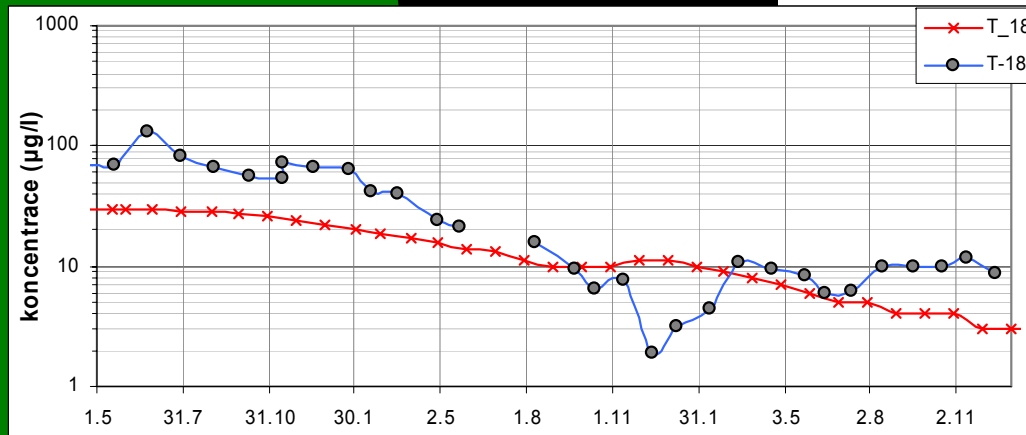
Porovnání modelových (červeně)  
a měřených (modře) koncentrací



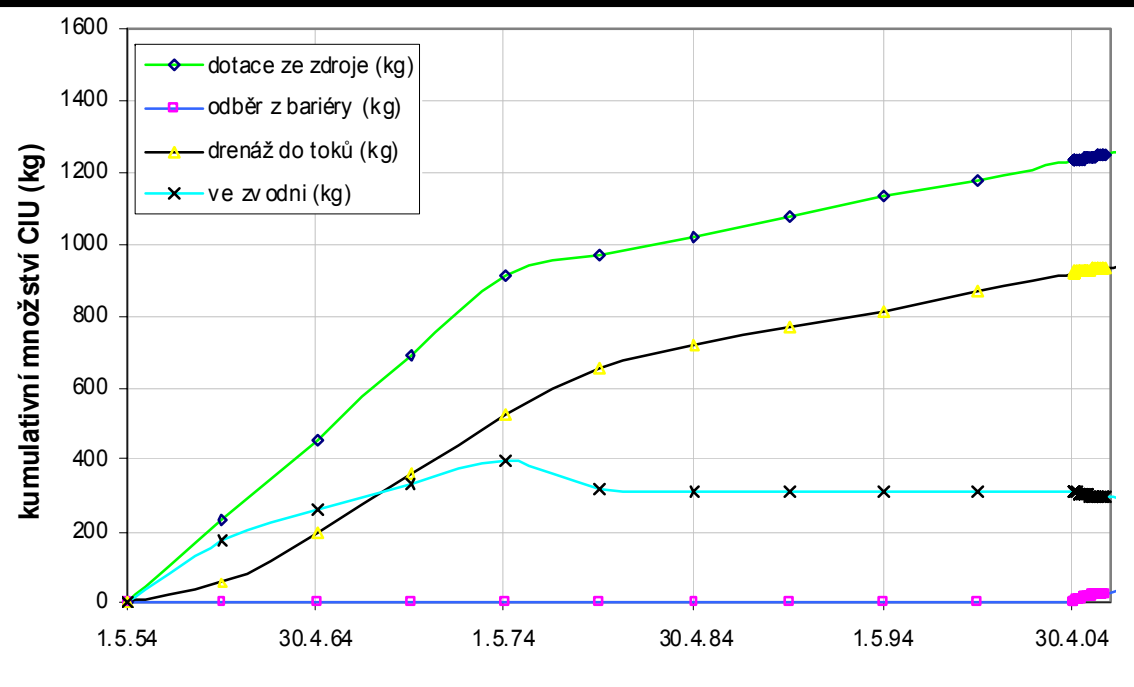
T21 – severně od bariéry

T18 - vrt jižně od Medlešic

po zahájení čerpání nedochází  
k výtoku CIU z areálu závodu –

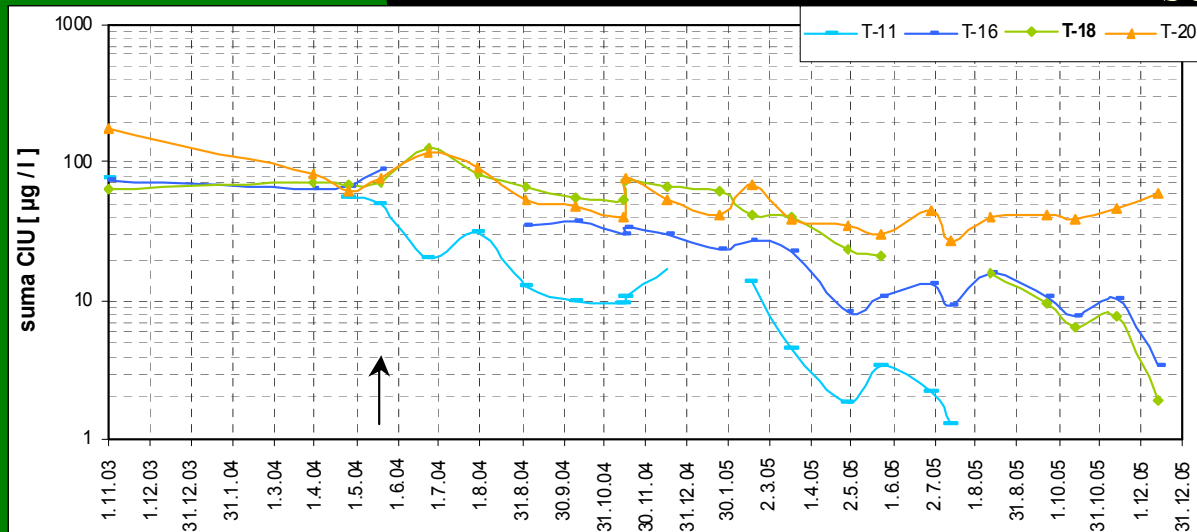


# Výsledky simulace transportu CIU – varianty A a B



## Bilance kontaminantu

Do konce roku 2006 bylo z bariéry odčerpáno 37.1 kg CIU, od zahájení sanace je veškerý kontaminant odčerpáván a drenáž CIU do toků bude postupně ubývat. Množství kontaminantu ve zvodni se od 5.2004 do 12.2006 snížilo z 270 na 242 kg CIU, současná dotace –cca 10 kg/rok.



kritické místo při kalibraci transportního modelu – odladění strmého poklesu koncentrací v severním předpolí areálu po zahájení čerpání hydraulické bariéry

# Kalibrace simulace transportu CIU

## Parametry TM ovlivňující rychlost modelového poklesu koncentrací :

- pórovitost (event. duální pórovitost),
- disperzivita (podélná, příčná a transverzální),
- distribuční koeficient sorpce  $K_d$ ,
- koeficient přestupu mezi doménou s rychlým oběhem a doménou s difuzním šířením kontaminantu (při duálním modelu),

## Parametry nakalibrovány tak, aby :

- výsledné rozložení koncentrací na konci období před zahájením sanačních prací odpovídalo rozložení měřených koncentrací před započítáním sanace (postupné rozšíření CIU z ohnisek znečištění na celou lokalitu),
- modelový pokles koncentrací v severním předpolí odpovídal poklesu pozorovanému,
- docházelo k pozorovanému setrvalému nátoků kontaminované podzemní vody k vrtům hydraulické bariéry.

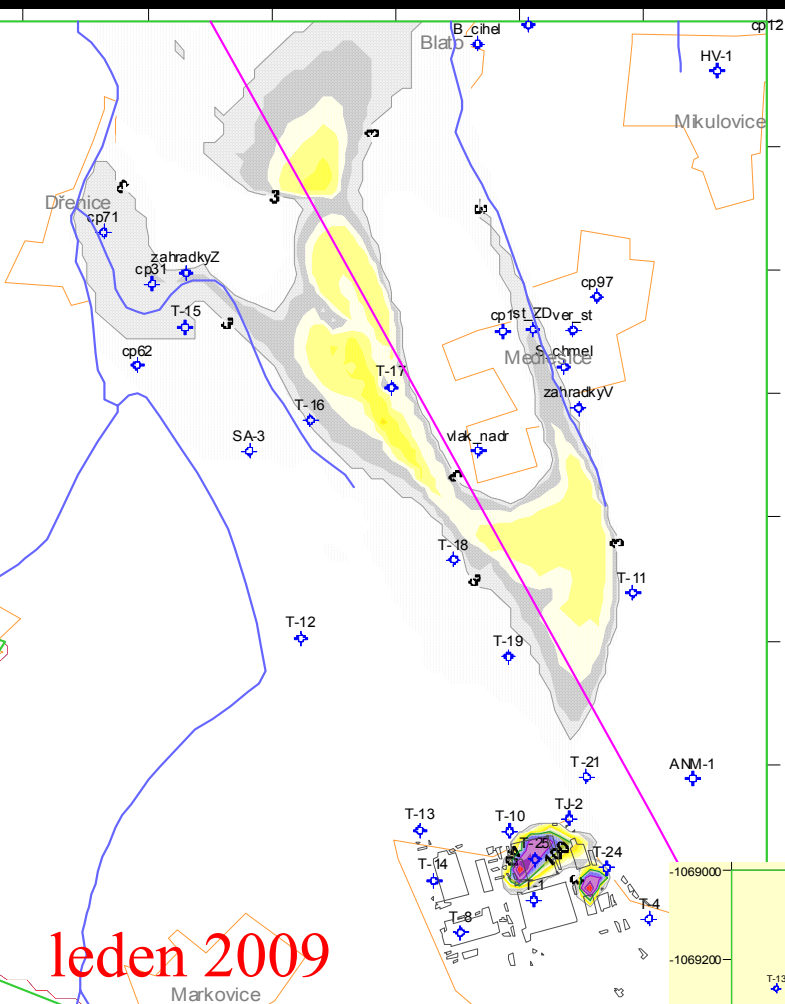
# Závěry z výsledků simulací transportu CIU

- kontaminant se přednostně šíří podél doprovodných tektonických linií Chrudimského zlomu, směry a rychlosti transportu jsou dominantně ovlivněny puklinovou propustností a pórovitostí,
- rychlá výměna podzemní vody – rychlé změny koncentrací - (transportní procesy se uplatňují pouze v malém objemu masivu zvodněné horniny - převážně v místech rozpukání => malá hodnota modelové pórovitosti z hlediska transportu; (odladěná hodnota „pouze“ **1.5%**); jaké jsou důsledky pro bilanci kontaminantu???,
- velmi malá resp. nulová sorpce CIU na horninové prostředí (v souladu s minimálním obsahem organické hmoty ve vzorcích jádra vrtů),
- minimální výměna kontaminace mezi doménou rychlého oběhu a doménou pomalého oběhu (duální model pórového prostředí, založený na představě 2 oddělených domén s rychlým /puklinovým/ prouděním a pomalým prouděním v matici horninového materiálu při popisu měřeného poklesu koncentrací selhával, respektive zadáním velmi malého koeficientu charakterizujícího výměnu vody mezi oběma doménami byl duální model „degradován“ na model jednodoménový => horninové prostředí se chová jako jednodoménové /viz bod 1/ - převážná část hmoty CIU se vyskytuje v puklinách?),

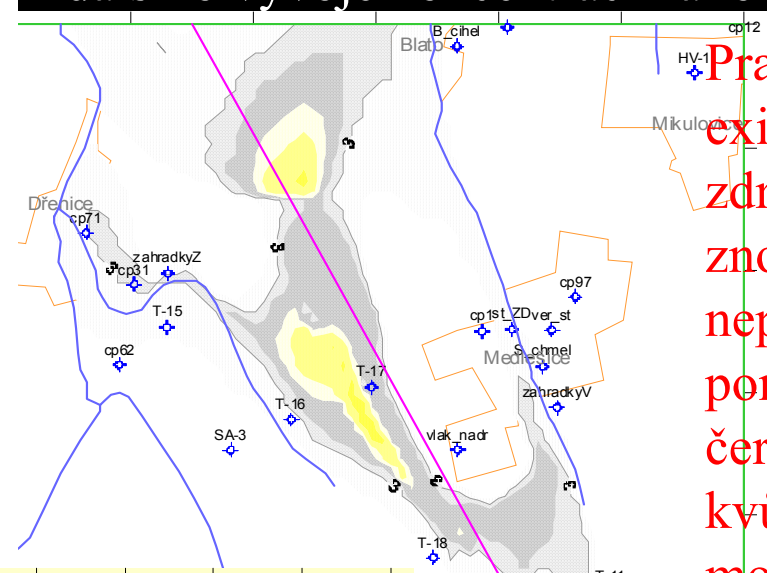
# Prognózní simulace transportu CIU – varianta C

sanační práce – 2007 – 2012

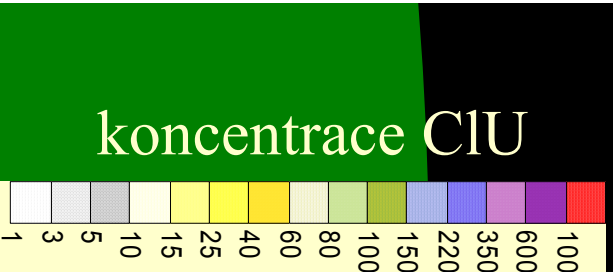
aktivní dotace CIU – cca 10 kg CIU za rok,  
(rozpuštění fáze CIU příp. přítok z nesat.zóny),  
-značná mobilita CIU je příznivá z hlediska  
dalšího vývoje koncentrací na lokalitě



leden 2009



leden 2012



Pravděpodobná existence aktivních zdrojů hrozí znovuoobením nepříznivých poměrů po ukončení čerpání bariéry, kvůli vysoké mobilitě CIU by případné obnovení úplného rozsahu kontaminace v severním předpolí areálu Transporty trvalo pouze první jednotky let.

# Co přináší aplikace modelového řešení ??

- **Syntézu** údajů z oborů klimatologie, hydrologie, geologie, hydrogeologie a kartografie => vyšší stupeň poznání území

- **Hodnocení a Prognózu**

- ◆ zásob podzemní vody,
- ◆ hladin a směrů proudění podzemní vody,
- ◆ vlivu odběrů na hladiny,
- ◆ dob a oblastí dotoku kontaminantů
- ◆ koncentrací kontaminantu

Pravidelně aktualizovaný model – umožní řešení libovolných problémů spojených s jímáním podzemní vody a zabezpečením její jakosti

**S pozdravem modelům ZDAR !**

**DĚKUJI ZA POZORNOST**