

Přírodovědecká Fakulta
Univerzita Karlova v Praze
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky
Albertov 6, Praha 2, 128 43



**Matematický model regionálního proudění podzemní vody
v oblasti melechovského masivu využívající data
dálkového průzkumu Země**

Diplomová práce

Zdena Pušová

Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Jiří Mls, CSc.

Praha, květen 2007

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Matematický model regionálního proudění podzemní vody v oblasti melechovského masivu využívající data dálkového průzkumu Země* vypracovala samostatně a za použití řádně citovaných pramenů (viz. příložený seznam literatury).

v Praze dne 1.9. 2007

Zdena Pušová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala svému školiteli Doc. RNDr. J. Mlsovi, CSc. za užitečné rady, které mi při zpracování mé diplomové práce poskytl, a Mgr. Tomášovi Ondovčínovi za všestrannou pomoc a zejména za pomoc v oblasti softwaru.

OBSAH

ABSTRAKT	3
ABSTRACT	4
1. ÚVOD	5
2. METODIKA	8
3. PŘÍRODNÍ POMĚRY	10
3.1 GEOMORFOLOGIE	10
3.2 KLIMATICKÁ CHARAKTERISTIKA	11
3.3 HYDROGRAFIE, HYDROLOGIE	12
4. GEOLOGICKÉ POMĚRY	14
4.1 GEOLOGICKÝ VÝVOJ A CHARAKTERISTIKA JEDNOTEK	14
4.2 STRUKTURNÍ CHARAKTERISTIKA	17
4.2.1 <i>Vertikální pukliny</i>	18
4.2.1.1 <i>Směrová statistika</i>	19
4.2.2 <i>Subhorizontální pukliny</i>	19
4.2.3 <i>Subhorizontální pukliny a vertikální vývoj puklinatosti</i>	20
4.2.4 <i>Výplň puklin a poruch</i>	21
4.2.5 <i>Vztah rozpukání a geomorfologie</i>	22
5. HYDROGEOLOGIE	23
5.1 HYDROGEOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA ÚZEMÍ	23
5.1.1 <i>Odtokové poměry</i>	23
5.1.2 <i>Oběh podzemních vod</i>	24
5.1.3 <i>Proudění podzemních vod</i>	26
5.2 HYDRAULICKÉ VLASTNOSTI HORNIN	27
5.3 VLIV TEKTONICKÝCH PORUCH NA POHYB PODZEMNÍ VODY	29
5.4 TYPY PODZEMNÍCH VOD	30
5.5 PRAMENY	31
5.6 RADON V PODZEMNÍ VODĚ	31
6. KONCEPČNÍ MODEL	32
6.1 VYMEZENÍ MODELOVANÉ OBLASTI	32
6.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY	33
6.3 POPIS MODELOVÝCH VRSTEV	33
6.3.1 <i>Vlastnosti puklin</i>	34
6.4 INFILTRACE	34
7. NUMERICKÝ MODEL	35
7.1 MATEMATICKÁ FORMULACE	35
7.2 POUŽITÝ SOFTWARE	35
7.3 GEOMETRIE MODELOVÉ OBLASTI	37
7.4 VSTUPNÍ PARAMETRY	38
7.4.1 <i>Modelové vrstvy</i>	38
7.4.2 <i>Vlastnosti rozhraní modelových vrstev</i>	39
7.4.3 <i>Hydraulické vlastnosti vrstev a puklin</i>	39

7.4.4 Infiltrace.....	40
7.4.5 Okrajové podmínky	40
7.4.6 Podmínky počáteční iterace	41
8. KALIBRACE.....	42
9. VÝSLEDKY.....	43
10. DISKUSE VÝSLEDKŮ	46
11. ZÁVĚR.....	49
SEZNAM LITERATURY:.....	50

Seznam příloh:

Příloha 1: Topografická mapa zájmového území

Příloha 2: Geologická mapa zájmového území

Příloha 3: Využitá puklinová síť

Příloha 4: Informace o pozorovacích objektech použitých při kalibraci

4.1 Přehled kalibračních bodů

4.2 Mapa kalibračních bodů

Příloha 5: Mapy izolinií hydraulických výšek

5.1 Mapa izolinií hydraulických výšek v 1. modelové vrstvě

5.2 Mapa izolinií hydraulických výšek ve 2. modelové vrstvě

5.3 Mapa izolinií hydraulických výšek ve 3. modelové vrstvě

5.4 Mapa izolinií hydraulických výšek ve 4. modelové vrstvě

5.5 Mapa izolinií hydraulických výšek v 5. modelové vrstvě

5.6 Mapa izolinií hydraulických výšek v 6. modelové vrstvě

Příloha 6: Vertikální řezy modelovanou oblastí

6.1 Poloha řezů A a B

6.2 Vertikální řez A (směr S-J)

6.3 Vertikální řez B (směr Z-V)

Příloha 7: Mapy z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku

7.1 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku v 1. modelové vrstvě

7.2 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku ve 2. modelové vrstvě

7.3 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku ve 3. modelové vrstvě

7.4 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku ve 4. modelové vrstvě

7.5 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku v 5. modelové vrstvě

7.6 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku v 6. modelové vrstvě

Příloha 8: Doba výstupu částic

8.1 Informace o zkoumaných bodech

8.2 Mapa zkoumaných bodů

Příloha 9: Mapa odtoku podzemní vody skrz hranice oblasti

Abstrakt

Do puklinového prostředí pevných hornin jsou v současné době projektovány zásobníky a úložiště různého typu včetně hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Pro bezpečnostní analýzy těchto projektů jsou nezbytné matematické modely proudění podzemních vod založené na dobré znalosti hydraulických vlastností puklinového prostředí.

Úkolem diplomové práce bylo vytvořit matematický model regionálního proudění podzemní vody v oblasti melechovského masivu do hloubky 1 km pod úroveň terénu, zjistit rozsah proudění podzemní vody do této hloubky a dobu výstupu částic z předpokládané hloubky hlubinného úložiště. Zájmové území se shoduje s tzv. testovací lokalitou vytipovanou v rámci vývoje hlubinného úložiště vysoce aktivních odpadů Správou úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). V modelu využitá puklinová síť byla vytvořena pomocí leteckých snímků v okolí Melechova.

Pro tvorbu modelu byl použit simulační program FEFLOW 5.2 vyvinutý německou firmou WASY. Byl vytvořen šestivrstevný stacionární model oblasti. Pro kalibraci modelu byly využity známé hodnoty hydraulických výšek v konkrétních bodech. Výsledkem simulace jsou mapy izolinií hydraulických výšek ve všech šesti modelových vrstvách, znázornění z-souřadnic vektoru hustoty toku ve vrstvách, odhad objemu vody vertikálně proudící vrstvami a čas výstupu částic na hladinu podzemní vody z předpokládané hloubky hlubinného úložiště.

Abstract

Different kinds of receivers and disposal sites, including deep radioactive waste repositories, are now projected into fissured hard rocks. Mathematical models of groundwater flow are a necessary tool of risk analysis of these projects. The models must be based on good knowledge of hydraulic properties of fractured rocks.

The main aim of this thesis was to establish a mathematical model of groundwater flow in the Melechov massif to the depth of 1 km, to investigate groundwater flow within this block and to estimate the uprise time of water from supposed depths of repository to the surface. The Melechov massif was chosen for this task because it was selected by the Radioactive Waste Repository Authority (RAWRA) as a test site. The model uses fracture network obtained by means of remote sensing from aerial photographs of Melechov surroundings.

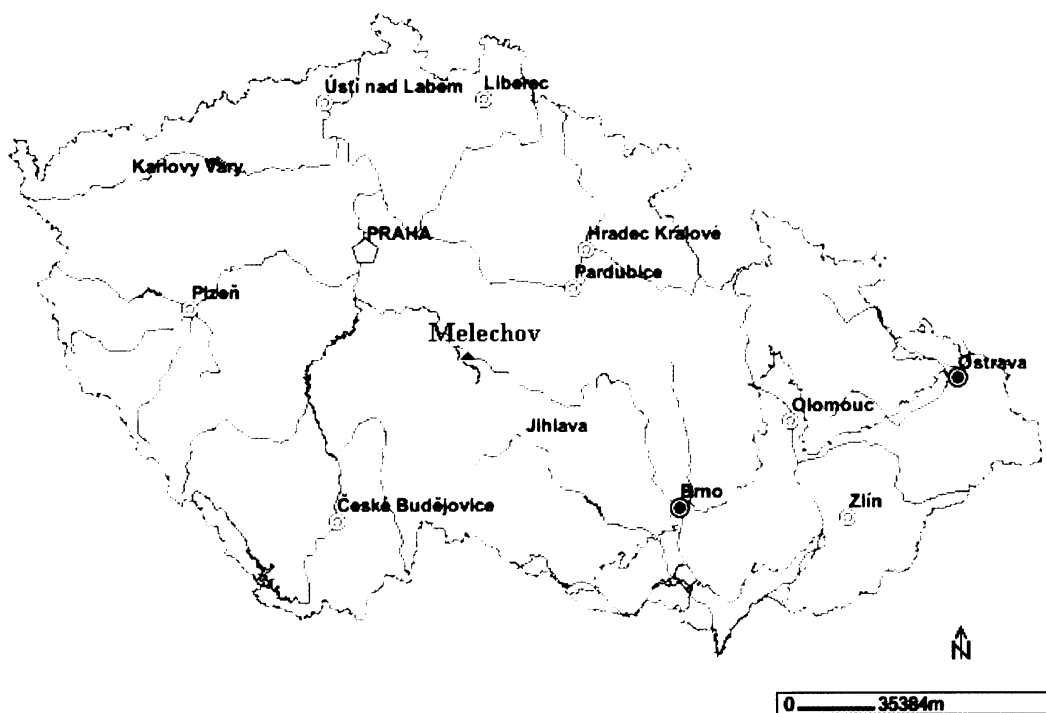
The numerical model was created and performed using FEFLOW 5.2, a groundwater flow modelling software developed by the German company WASY. A six-layer stationary model was developed and calibrated using known values of hydraulic heads. The outputs of the simulation are maps of hydraulic head in the area of interest, maps of vertical components of flux density, estimates of vertical groundwater flow rates in each layer and uprise times of groundwater from supposed repository depths to the drainage levels of groundwater table.

1. Úvod

Melechovský masiv je součástí centrálního moldanubického masivu při jeho severním konci. Nachází se v centrální části Českomoravské vrchoviny s centrem asi 10 km severně od Humpolce a 15 km západně od Havlíčkova Brodu (viz. obr.1).

Na základě předchozího průzkumu byl melechovský masiv doporučen Českým geologickým ústavem jako vhodné prostředí pro testovací lokalitu. Tato lokalita slouží jednak pro výběr, ověřování a optimalizaci metod pro průzkum lokalit v procesu umísťování hlubinného úložiště, jednak jako zdroj dat o obecné charakteristice granitoidních masivů v geologických podmínkách Českého masivu (J. Procházka, 1998).

Specifikem zájmové lokality je přítomnost značného množství otevřených a vzájemně propojených puklin a právě na ně je zaměřena zadaná úloha. V modelu využitá puklinová síť byla vytvořena pomocí leteckých snímků v okolí Melechova (V. Lysenko, 2004) a obsahuje tedy nejvýznamnější vertikální pukliny v zájmové oblasti.



Obr 1.: Lokalizace Melechovského masivu v rámci ČR; zdroj: Portál veřejné správy České republiky

Vzhledem ke skutečnosti, že melechovský masiv je testovací lokalitou SÚRAO, byla v této oblasti realizována již celá řada modelů. M. Havlík (2001) modeloval proudění podzemní vody na melechovském masivu nejprve jako 2D - ve dvou vertikálních řezech napříč masivem a poté jako 3D model horninového bloku s rozměry cca 5 x 6 x 1 km na místě předpokládaného hlubinného úložiště. 3D model byl realizován pomocí programu STAFF 3D, který umožňuje simulaci puklinového prostředí jako prostředí s tzv. duální porozitou. V tomto konceptu je hydrogeologické prostředí chápáno jako systém málo propustných bloků porézní matrix oddělených sítí puklin. Důležitým závěrem plynoucím z uvedených modelů je fakt, že tvar reliéfu výraznou měrou ovlivňuje proudění podzemní vody do značných hloubek.

V. Frydrych (2004) vytvořil v rámci projektu PADAMOT model, jehož hranice se do značné míry shodují s hranicemi mnou realizovaného modelu. Kvůli simulaci poklesu hydraulické vodivosti s hloubkou obsahoval tento model 14 vrstev. Každá z těchto vrstev byla z hydraulického hlediska homogenní a izotropní, ovšem s jinou hydraulickou vodivostí. Hodnoty hydraulické vodivosti pro hlubší části masivu zde byly vypočteny pomocí rovnice (Gustafson & Liedholm, 1989):

$$K(z) = K_0 \cdot 10^{\frac{z}{C}}$$

$K(z)$hydraulická vodivost v hloubce Z (m)

K_0 počáteční hodnota hydraulické vodivosti blízko povrchu

C (m).... koeficient určující rychlost poklesu

Model byl vytvořen pomocí programu Ground Water Vistas. Výsledky simulace mimo jiné prokázaly, že spolu s hloubkou roste vliv regionálního proudění a oslabuje se drenážní funkce menších toků. Významnou drenážní funkci mají řeka Sázava a nádrž Švihov na řece Želivce.

V roce 2006 zpracovala regionální model proudění podzemní vody v melechovské oblasti T. Dupalová (2006). Model sestával ze sedmi vrstev a simuloval proudění do hloubky cca 1 km. Zaměřoval se na menší povrchové toky, jejichž vliv na proudění podzemní vody (poloha vůči hladině podzemní vody, kolmatace dna) zpřesňoval. Tato simulace byla provedena pomocí programu FEFLOW. Model opět neuvažoval jednotlivé pukliny ani puklinové systémy. Mimo

jiné potvrdil, že většina infiltrované vody zůstává ve svrchní části masivu a jen velmi malá část zasakuje do hlubších partií.

Z výše uvedeného je patrné, že předkládaná práce navazuje na dřívější poznatky avšak zaměřuje pozornost na dosud více méně opomíjenou skutečnost - přítomnost puklinových systémů v zájmové lokalitě a jejich vliv na proudění podzemní vody.

2. Metodika

Pro řešení zadaného úkolu byl využit program německé firmy WASY FEFLOW, verze 5.2. Tento simulační software pracuje na základě obecných zákonů proudění podzemní vody a využívá metodu konečných prvků k řešení příslušných úloh.

Při matematickém modelování je nutné smysluplně definovat okrajové podmínky na hranicích zájmové oblasti. Proto byl model realizován na území, které je ohraničeno z části vodními toky a z části morfologickými rozvodnicemi. Takto definované hranice lze v matematickém modelu stanovit pomocí známých okrajových podmínek. Jako podkladovou mapu jsem pro potřeby modelu využila vektorové vyobrazení hranic oblasti vytvořené již dříve v rámci projektu PADAMOT (V. Frydrych, 2004).

Dalším krokem při tvorbě modelu bylo vytvoření sítě prvků, v nichž pak probíhají modelové výpočty. Tato síť byla vytvořena s ohledem na puklinové systémy zjištěné na zájmovém území metodami dálkového průzkumu Země. Pro potřeby modelu byl upraven soubor fotolineací (V. Lysenko, 2004). Jeho úprava spočívala v odstranění nežádoucích jevů - krátkých přesahů protínajících se puklin a malých úhlů (pod 15°), jež některé pukliny svíraly. Do programu FEFLOW byl upravený soubor včleněn jako druhá podkladová mapa s vektorovým zobrazením puklin v zájmové oblasti.

Vzhledem k tomu, že model měl postihnout proudění podzemní vody do hloubky přibližně 1 km, realizovaný model obsahuje šest vertikálních vrtev. Tím je umožněno postihnout změny v propustnosti masivu s hloubkou. Mocnost jednotlivých vrstev se směrem k povrchu snižuje. Modelové vrstvy reprezentují zónu zvětralin, zónu připovrchového rozvolnění puklin a dále více či méně porušený horninový masiv. Do nejsvrchnější vrstvy modelu byl importován tvar zemského reliéfu v podobě souboru se souřadnicemi bodů včetně jejich nadmořské výšky. Povrch dalších tří modelových vrstev vznikl upravením výchozího datového souboru v programu Surfer. Povrch ostatních vrstev byl ponechán planární.

Simulační program vyžaduje zadání okrajových podmínek na hranicích všech rozhraní mezi modelovými vrstvami. Díky vhodné volbě hranic oblasti, byly využity dvě základní

okrajové podmínky – přímé zadání konkrétní hydraulické výšky a definování nulového průtoku skrz hranici. Nadmořské výšky hladin vodních toků byly odečteny ze základních vodohospodářských map měřítka 1 : 50 000. Množství vody infiltrované ze srážek bylo zadáno pomocí zdrojového členu v prvním modelovém rozhraní.

Při tvorbě modelu je dále nutné definovat hydraulické vlastnosti jednotlivých vrstev a v tomto případě také hydraulické vlastnosti 2D prvků v 3. až 6. vrstvě, simulujících puklinové systémy granitového masivu.

Po získání prvotní verze modelového řešení následovala kalibrace modelu. Do druhého, třetího a čtvrtého rozhraní bylo umístěno celkem 20 kalibračních bodů - míst se známou hydraulickou výškou. Kalibrace pak probíhala pomocí změny hydraulických vlastností modelových vrstev a puklinových systémů a pomocí změny množství vody infiltrované ze srážek. Snahou bylo dosáhnout co nejlepší shody mezi známými a vypočtenými hydraulickými výškami v kalibračních bodech.

3. Přírodní poměry

Melechovský granitový masiv se rozkládá přibližně v oblasti mezi Humpolcem, Světlou nad Sázavou a Ledčí nad Sázavou. Toto granitové těleso zasahuje celkem na čtyři listy základní mapy ČR 1 : 25 000 (23 - 122 Ledeč nad Sázavou, 23 - 124 Senožaty, 23 - 211 Světlá nad Sázavou a 23 - 213 Humpolec).

3.1 Geomorfologie

Pro celé modelované území je typický vrchovinný reliéf. Podle geomorfologického členění České republiky patří melechovský masiv do provincie České vysočiny a z ní českomoravské soustavy, k podsoustavě Českomoravská vrchovina, k celkům Křemešnická vrchovina (jihozápadní část území) a Hornosázavská pahorkatina (severozápadní část území). Nejvyšším bodem území je vlastní vrch Melechov s nadmořskou výškou 709 m. Hluboce zaříznuté koryto řeky Sázavy odděluje vrch Melechov od elevace Žebrákovského kopce (601 m n.m.). V místech, kde řeka Sázava opouští masiv se zároveň nachází nejnižší položený bod - 360 m n. m. Další výraznou dominantou je Holý vrch u hradu Lipnice s nadmořskou výškou 620 m. Poměrně značný spád reliéfu má výrazný vliv na oběh podzemních vod v připovrchové zóně.

Charakteristickým rysem Českomoravské vrchoviny, který se dodnes projevuje na reliéfu, je, že byla vždy souší a permanentně více či méně denudovaná. Ještě dnes, po tektonickém výzdvihu, připomíná celá vrchovina slabě vyklenutou parovinu s hluboce sbroušenou stavbou. Mladší zlomová tektonika je omezena na okrajové zlomy a ojediněle, uvnitř vrchoviny, na několik příkopů a hrástí, mezi něž patří i vrch Melechov. V povýzdvihové modelaci se uplatnila zejména zpětná eroze, která rozbrázdila zlomové okraje Českomoravské vrchoviny hluboce zaříznutými údolními (např. řeka Sázava, Želivka). Jak při zpětné erozi, tak při celkové denudaci vrchoviny se uplatňuje výrazně selektivní zvětrávání hornin podmíněné jejich různou odolností - křemence, odolné žuly, amfibolity a cordieritické ruly se uplatňují jako elevace, deprese vznikají v měkčích a rozpadavých horninách. Pleistocénní periglaciální podnebí způsobilo hluboké mrazové zvětrávání rul i žul, jehož produkty dnes tvoří mohutné deluviální pláště. Četná jsou kamenná moře a proudy, mrazové srázy a balvanové skupiny.

3.2 Klimatická charakteristika

Zkoumané území je v mírně teplé klimatické oblasti a podoblasti mírně vlhké vrchovinné a částečně pahorkatinné. Nadmořská výška, která ovlivňuje klimatické poměry, se pohybuje od 709 m do 360 m. Většina území je mírně vlhká s mírnou zimou.

Průměrné roční teploty vzduchu se pohybují od 6 °C v částech s vyšší nadmořskou výškou až po 7 °C v částech níže položených.

Množství spadlých srážek na území melechovského masivu je nejlépe charakterizováno údaji ze srážkoměrné stanice Loukov. Tato stanice leží v centru masivu, byla zřízena Českým geologickým ústavem v rámci sítě malých povodí Geomon. Plocha povodí Loukov činí 0,43 km², nadmořská výška povodí se pohybuje mezi 472 - 658 m. Průměrný roční srážkový úhrn z let 1995 - 1999 činí 710 mm (viz. tab. 1).

stanice Loukov	
rok	průměrné srážky (mm.rok ⁻¹)
1995	954
1996	636
1997	659
1998	625
1999	664

Tab.1.: Průměrné roční úhrny srážek (mm) ve srážkoměrné stanici Loukov; zdroj: Fottová, D. (2000)

Pro srovnání těchto údajů s dlouhodobým normálem mohou sloužit srážkové úhrny ze srážkoměrných stanic ČHMÚ ležících při okrajích masivu (viz tab.2).

stanice	Q1 (mm)	nadm. výška (m)
Ledeč nad Sázavou	691,4	400
Světlá nad Sázavou	679,8	410
Humpolec	665,8	523
Dolní Kralovice	647,3	420
Havlíčkův Brod	671,3	455
	Q2 (mm)	
Hulice	659,5	378

Tab.2.: Průměrné roční úhrny srážek (mm) ve stanicích ČHMÚ za období 1961 - 2000 (Q1), za období 1990 - 2006 (Q2); zdroj: ČHMÚ, odbor klimatologie

Z uvedených informací vyplývá, že průměrný úhrn srážek je na melechovském masivu přibližně 680 mm.rok⁻¹.

3.3 Hydrografie, hydrologie

Zájmové území náleží do oblasti povodí Dolní Vltavy. Relativně hustá síť vodních toků spadá do dvou hlavních povodí. Převážná část území patří do povodí Sázavy po Želivku (povodí č. 1-09-01), západní okraj masivu spadá do povodí Želivky po ústí do Sázavy (povodí č. 1-09-02). Rozvodnice mezi těmito povodími vede přibližně po linii Kaliště - Podivický vrch - Spálenko - Kamenná Lhota - Malé Bojiště. Z menších vodních toků jsou pro melechovský masiv nejvýznamnější Pstružný, Koutecký a Meziklaský potok - levostranné přítoky Sázavy, které vedou přes masiv od jihu k severu. Pravostranné přítoky Sázavy Pavlovský a Žebrákovský potok leží již mimo zájmové území.

Západní hranici území tvoří vodárenská nádrž Švihov na řece Želivce. Je to jeden z nejvýznamnějších vodohospodářských komplexů v České republice. Nádrž byla vybudována v letech 1965 - 1975 4,5 km nad soutokem řeky Želivky se Sázavou s cílem zásobovat hlavní město Prahu a okolní oblasti pitnou vodou. Z hlediska objemu vody v zásobním prostoru, z hlediska odebíraného množství i rozsahu povodí (1178 km²) jde o největší vodárenskou nádrž nejen v České republice, ale i ve střední Evropě. Vybudováním nádrže došlo nejen ke změně místní erozní báze, ale také k ovlivnění přirozeného režimu Želivky i Sázavy pod soutokem. Význačnějšími přítoky Želivky jsou Martinický a Blažejovický potok.

Hlavní drenážní bází sledované oblasti je vodohospodářsky významný tok řeky Sázavy.

Z tab. 3 jsou patrné průměrné dlouhodobé průtoky ve vybraných vodoměrných stanicích v širším okolí zájmového území za období 1931-1980.

stanice	tok	Q (m³s⁻¹)
Světlá nad Sázavou	Sázava	8,17
Chlístov	Sázava	6,02
Senožaty	Martinický potok	0,66
Poříčí nad Sázavou	Sázava	23,2
Zruč nad Sázavou	Sázava	9,92
Blažejovice	Blažejovický potok	0,15
Soutice	Želivka	6,97
Kácov	Sázava	17,86

Tab3.: Průměrné dlouhodobé průtoky ve stanicích ČHMÚ za období 1931-1980 (Q); zdroj: ČHMÚ, odbor hydrologie

4. Geologické poměry

Melechovský masiv je nejsevernější součástí centrálního moldanubického plutonu, který představuje nejrozsáhlejší variský komplex vyvřelých hornin v Českém masivu. Jedná se o částečně izolovanou, koncentricky uspořádanou granitovou intruzi s pláštěm pararul monotónní série moldanubika (na západě i pestré série moldanubika), ve kterém převažují biotitické a sillimaniticko - biotitické ruly a migmatity s cordieritem. Z gravimetrických výpočtů vyplývá, že subvertikální těleso melechovského masivu sahá do hloubky 13 - 15 km (J. Šrámek, 2001). Intruze granitoidních těles probíhaly ve třech časově a patrně i zdrojově odlišných fázích, čemuž odpovídají tři typy muskoviticko - biotitických granitů, z nichž některé jsou dále členěny detailněji. Z hlediska fyzikálních vlastností jsou tyto typy prakticky neodlišitelné, liší se více z hlediska geochemického (i různým výskytem radionuklidů) a zrnitostí. Obecně lze všechny granity melechovského masivu definovat jako granity peraluminické. Z tektonického hlediska je melechovský masiv podobně jako celý centrální moldanubický pluton antiklinorní strukturou s plochými rameny upadajícími pod úhlem 25 - 30°. Základní strukturální směr SSV - JJZ je shodný se směrem osy antiklinoria centrálního plutonu. Mladší systém zlomů má směr ZSZ - VJV. (Geologická mapa zájmové lokality viz. příloha 2.)

4.1 Geologický vývoj a charakteristika jednotek

Geologická stavba melechovského masivu má charakter koncentricky uspořádané intruze. Na základě podrobných geologických a geochemických výzkumů lze tuto intruzi rozdělit do tří časově oddělených fází (Mlčoch B. a kol., 2000). K nejstarší fázi patří tzv. lipnický, koutský a leukokráttní granit. Do druhé intruzivní fáze lze zařadit typ melechovský, který má s granity předchozí fáze ostré intruzivní kontakty. Díky centrální pozici a tvaru lze předpokládat, že granit typu stvořidla patří do třetí závěrečné fáze intruze. Pegmatity jako žilné horniny jsou vázány pouze na granity nejstarší intruzivní fáze.

paleozoikum

1a) lipnický typ (Eisgarn)

- je nejstarší a nejrozšířenější, tvoří nepravidelnou kru mezi Lipnicí, Dolním Městem a Prosečí (ve východní části masivu)
- drobně až středně zrnitý muskovit - biotitický granit
- tvoří bezprostřední kontakt s krystalickým pláštěm a obsahuje četné uzavřeniny hornin pláště ještě hluboko ve svém endokontaktu; poměrně přesné vymezení rozsahu lipnického granitu v terénu je umožněno jeho neobyčejně vysokým obsahem Th, které umožnilo stanovit rozsah tohoto granitu pomocí gamaspektrometrie; odlišné mineralogické a geochemické charakteristiky nevylučují možnost, že se spíše jedná o in - situ rekrystalizované starší plášťové horniny

1b) koutský typ (též světelský nebo typ Dolní Březínka)

- tvoří periferii masivu a drobná tělesa v jeho okolí
- drobně až středně zrnitý biotit - muskovitický granit (podobný typu Čerřínek), ve kterém přítomnost sillimanitu a xenolitů pararul byla zjištěna jen ojediněle

1c) leukokrátňí muskovitický granit

- drobné světlé muskovitické až biotit - muskovitické granity místy až povahy žilné žuly
- typický je výskyt shluků až hnízd tvořených drobným turmalínem

2) melechovský typ (také typ Landštejn)

- tvoří obvod vlastního melechovského pně v západní části masivu
- hrubozrný, místy až porfyrický biotit - muskovitický granit
- oproti předchozím typům je ostře omezen a v rámci tohoto typu se mimo občasné nahloučeniny biotitu neprojevuje žádná další variabilita; neobsahuje uzavřeniny pláště ani žíly pegmatitů, pouze křemenné žíly

3) typ Stvořidla

- nachází se v centrální části složeného melechovského pně, kde vytváří oválné těleso (morfologicky nejvyšší části území - 709 m n.m.)
- drobně zrnitý řídký porfyrický biotit - muskovitický granit

- dříve interpretován jako tektonicky zakleslá křá granitu lipnického typu, avšak gamaspektrometrie prokázala oproti lipnickému typu odlišné obsahy U a Th; obsahuje uzavřeniny hrubozrnného melechovského typu, je vůči němu ostře omezen

žilný doprovod

Lipnický a koutský typ žuly jsou pronikány pegmatitovými roji žil směru SSV - JJZ až S - J. Tyto žily o mocnosti do 20 cm jsou směrově a mocnostně velmi stálé, jsou možným doprovodným jevem mladší intruze vlastního melechovského typu granitu do původních migmatitů lipnické žuly a granitů koutského typu.

proterozoikum

Pararuly zastížené v plášti granitoidů melechovského masivu patří k monotónní sérii moldanubika, při kontaktu s granitem jsou většinou silně granitizované. Intenzita jejich granitizace závisí na vzdálenosti od kontaktu. Pro výchozí metamorfovanou vulkanosedimentární formaci předpokládá Z. Mísař (1983) za nejpravděpodobnější nejméně středně proterozoické stáří.

terciér

Místně se zachovaly drobné reliktů neogénu. Vedle štěrků a písků z různorodého materiálu včetně valounů konglomerátů byly nalezeny i červenohnědé železité pískovce (v minulosti těženy jako nekvalitní zelená ruda).

kvartér

Kvartérní pokryv patří ke kvartéru extraglaciálních oblastí - a to pahorkatin a hor Českého masivu. Mocnosti a rozšíření kvartérních uloženin jsou ve spojitosti s morfologií území a petrografickým složením hornin. Kromě svahových hlín, sutí a eluvií s proměnlivou mocností jsou na území také rozšířeny eolické, většinou hlinité a sprašovitě uloženiny. V zaříznutých údolích jsou hlavně v rozšířených místech vyvinuty fluvialní sedimenty údolních teras, většinou hrubozrnné a často zahliněné, překryté povodňovými hlínami.

Kvartérní pokryv granitoidů je chudší než v oblastech pararul. Je to způsobeno rozdílným větráním hornin, změnou říční sítě v kvartéru a bouřlivou erozí mezi Světlou a Ledčí nad Sázavou.

Mocnost hlin je většinou menší než 50 cm (často i méně než 30 cm). Běžné jsou eluviálně zvětralé výchozy přímo v polích. Granity zvětrávají na písčité eluvium, které dosahuje mocnosti přes 2 m, jak dokumentují zemní práce na obvodu kopce Melechova a výskyt příležitostných pískoven v okolí obcí. Hloubka navětrání granitů je větší než 10 m.

Deluviální sedimenty jsou většinou smíšeného typu kamenito - písčito - hlinité a plynule přecházející do splachových a nivních hlin. Na svazích Melechova jsou hojné blokové a balvanité sutě dvojí geneze. Buď se jedná o zbytky kamenného moře, nebo se jedná o balvanité větrání obnažené vodotečí (např. peřeje Stvořidla), kde bloky prodělaly minimální pohyb. Blokové a balvanité větrání s charakteristickou horizontální odlučností je typické pro hrubozrnný melechovský typ granitu. V okolí Dolního Města jsou vyvinuty sprašové hlíny. Lokálně jsou sprašové hlíny zachovány i v povodí Pstružného potoka.

4.2 Strukturní charakteristika

Granitizované pararuly jsou na kontaktu s granitem velmi intenzivně provrásněny. Orientace plutonu a vrásová stavba metamorfitů ukazují na základní strukturní směr SSV - JJZ. Tomuto směru odpovídá i starší disjunktivní systém. Na tento systém jsou vázány i žíly pegmatitů a křemene. Podél východního okraje melechovského masivu byla zjištěna poruchová pásma tohoto směru doprovázená mylonitizací a drcením hornin. Základní strukturní směr SSV - JJZ je shodný se směrem osy antiklinoria centrálního plutonu.

Mladší systém zlomů směru SZ - JV je výraznější a projevuje se horizontální i vertikální složkou pohybu. Nejmarkantnější je melechovský zlom omezující na jihu melechovský masiv, který představuje hlavní poruchovou zónu, podle níž byla SV kra vyzdvižena a částečně posunuta k SZ. Tato zóna je doprovázena paralelními zlomy a je možnou součástí regionálního hlubinného sázavského zlomu. Poruchy podélné se směrem centrálního masivu nebyly sledovány. Stejněho směru je i poruchové pásmo východně od Lipnice nad Sázavou doprovázené žilným křemenem. Systém zlomů stejného směru se výrazně projevuje i na severním okraji melechovského masivu, kde je místy využíván tokem Sázavy a jsou na něj vázány hranice hornin.

Překvapivá je regionální směrová stálost hlavních puklinových systémů. Jako směrově nejstálejší se jeví systém ZSZ - VJV. Směrová stálost puklin tohoto směru potvrzuje naprosto

dominantní vliv regionálního stresového pole na jejich vznik, převládajícího nad lokálním napětím. Regionální stresové pole převládající nad lokálním totiž vytváří jednotně orientovaný systém puklin bez směrových variací.

Vymapování strukturních prvků (vodivých poruch) probíhalo pomocí terénních průzkumů a různými geofyzikálními metodami (dipólové odporové profilování, metoda velmi dlouhých vln, vertikální odporové sondování). Metoda dálkového průzkumu (DPZ) byla použita pro doplnění a zpřesnění dosud určených hlavních směrů rozpukání a zlomového porušení oblasti.

4.2.1 Vertikální pukliny

Křehce duktilní zóny a metamorfní foliace jsou nejstaršími deformačními projevy uvnitř tělesa melechovského masivu. Jejich přítomnost je jedním z hlavních argumentů pro dynamickou interpretaci rozpukání a vyloučení většiny vlivů tzv. granitové tektoniky na vznik puklin. Všechny pukliny s výjimkou připovrchových exfoliačních puklin cca do hloubek max. 3 m, jsou projevy polyfázové tříštivé tektoniky v pevné žule. Pukliny nesou rysy klasického zlomového porušení v křehkém materiálu. Porušují starší stavbu migmatitu v Lipnici. Pukliny jsou většinou hladké, rovné, vytváří svazky - zvláště systém SSZ - JJV. Velikost kolísá od cm až do hektarových rozměrů. Charakteristická je regionální směrová stálost hlavních puklinových systémů. Jako směrově nejstálější se podle P. Rajlichy (2001) projevuje systém ZSZ - VJV. Ostatní regionální systémy představují směry SZ - JV, S - J, SSV - JJZ a SV - JZ. Byla zjištěna i dobrá shoda rozpukání s lineamenty dálkového průzkumu a s morfologií.

V modelu využitá puklinová síť byla vytvořena pomocí leteckých snímků v okolí Melechova (měřičské panchromatické letecké snímky ze srpna 1975 a června 1983 v měřítku 1 : 25 000). Poté byl soubor výsledných fotolineací korelován se známými tektonickými strukturami (V. Lysenko 2004). Takto získaná puklinová síť obsahuje nejvýznamnější vertikální pukliny oblasti, masiv je ve skutečnosti rozpukán mnohem více. (Využitá puklinová síť viz. příloha 3.)

4.2.1.1 Směrová statistika

Analýza ve statistických diagramech ukazuje více populací puklin. Nejzajímavějším výsledkem je směrová stálost systémů ZSZ - VJV poukazující na dominantní vliv vnějšího stresového pole a na jeho naprosté převládání nad lokálním stresovým polem, které by vedlo k větší směrové různorodosti. Jednotné orientace puklin shodné pro různé lokality oblasti poukazují rovněž na polyfázový časový vznik puklin v řadě dílčích etap. Regionální směrová stálost se projevuje zvláště u souborů: ZSZ - VJV, SSZ - JJV, dále u směrů SSV - JJZ a SV - JZ. Nebyl zjištěn rozdíl mezi zastoupením puklin v různých typech granitoidů. Pukliny jsou většinou vertikální, pouze systém SSZ - JJV vykazuje statisticky úklon k JZ (P. Rajlich, 2001).

Vzájemné časové vztahy nejsou pro všechny skupiny puklin jednoznačné. Zajímavým fenoménem je přesně kolmý směr ZSZ - VJV a SSV - JJZ puklin. Puklinové zóny směru SSV - JJZ jsou typickým regionálním směrem i mimo žulový masiv. Systém je zastoupen téměř na všech lokalitách melechovského masivu, je mu podřízena i intruze stvořidelského granitu v centrální části masivu (P. Rajlich, 2001).

4.2.2 Subhorizontální pukliny

Subvertikální pukliny jsou nejčtenější zjištěné pukliny, což je statisticky zkreslený obraz, protože většinu lokalit představují zatopené lůvky, kde byly přímému pozorování nejvíce dostupné vertikální plochy.

Subhorizontální pukliny bývají v převážné části interpretací označovány jako exfoliační, protože jejich hustota směrem do hloubky klesá. Jejich vznik je vykládán odlehčováním horninového masivu při regionálním výzdvihu - odlehčení a uplatnění regionálního zbytkového stresového pole, případně klimatickými vlivy. Nabízí se ale i jiné vysvětlení a to reakce mechanicky izotropního tělesa na příčné stlačení (P. Rajlich, 2001). Subhorizontální pukliny jsou hlavním fenoménem, kterým se odlišují granitové terény od okolních metamorfních či sedimentárních souvrství. Jak ukazují např. jejich výplně, jedná se často o tektonický prvek vyvolaný příčným stlačením žulového masivu v ranných fázích intruze. Ve vrstevnatém materiálu by tato deformace vedla k vrásnění. Zvýraznění těchto puklin připovrchovými

zvětrávacími procesy může vést k jejich výkladu jako exfoliačního fenoménu. Na zahušťování subhorizontálních puklin směrem k povrchu bude mít velký vliv váha nadložních hornin. Jejich plošný rozsah může být značný jak ukazují pegmatitové žíly a pukliny bez výplně.

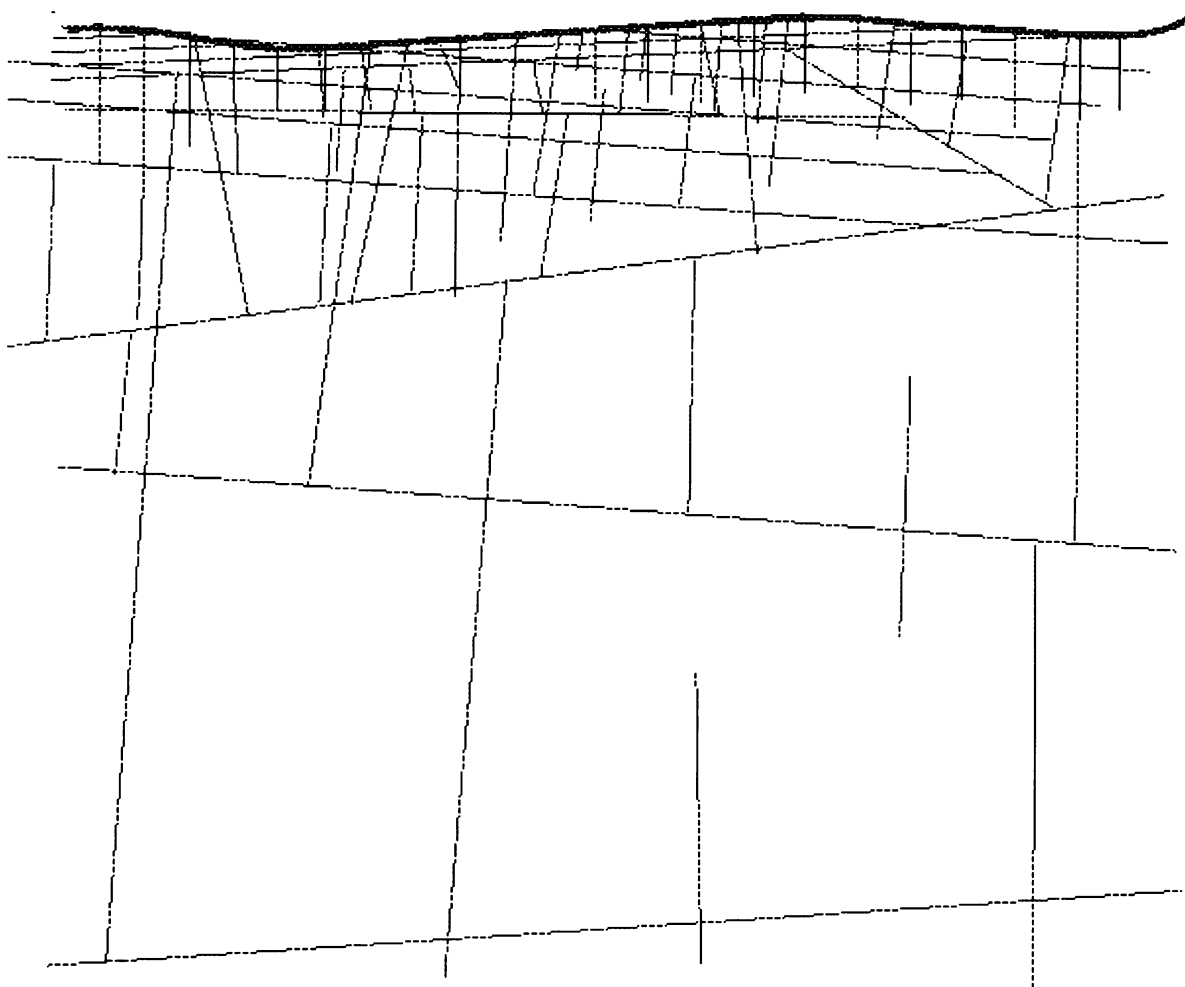
Exfoliační pukliny jsou v melechovském masivu připovrchovým jevem zasahujícím do hloubky maximálně 2 - 3 m. Jsou ovlivněny hlavně mrazovým větráním a využívají původních horninových anizotropií nejvíce rovnoběžných se zemským povrchem. Výsledkem geometrického vlivu subhorizontálních puklin bývá tvorba exfoliačních kleneb.

Subhorizontální pukliny představují v melechovském masívu do určité míry samostatný průběžně se vyvíjející systém. Jako struktury pravděpodobně vzniklé reakcí nevrstevnatého tělesa na boční stlačení byly posléze vícenásobně oživeny a zahušťovány při dalších deformacích a v oblasti připovrchových klimatických vlivů. Subhorizontální pukliny jsou podle orientační analýzy směrově sblížené se směrem ZSZ - VJV, což by ukazovalo na to, že byly založeny již v nejstarší fázi tektonického porušení (P. Rajlich, 2001).

4.2.3 Subhorizontální pukliny a vertikální vývoj puklinatosti

Další důležité zjištění je interakce starších subhorizontálních puklin s mladšími vertikálními. Vertikální pukliny se na starších subhorizontálních rozvětvují. Toto konstatování má významný dopad na interpretaci vzniku horizontálních puklin, které jsou P. Rajlichem (2001) považovány za reakci homogenního tělesa na příčné stlačení. Uvedený jev rovněž dokládá, že v případě melechovského masivu některé horizontální pukliny vznikly již v rané fázi křehkého porušení.

Ubývání subhorizontálních puklin směrem do hloubky lze vysvětlit zvyšující se úlohou váhy nadložních hornin. Vzhledem ke své interakci s vertikálními puklinami mají pravděpodobně i zásadní vliv na ubývání puklin ostatních systémů do hloubky. Logický závěr může být, že vzhledem k vysoce pravděpodobnému ubývání subhorizontálních puklin do hloubky a s předpokladem rozvětvování subvertikálních puklin na subhorizontálních směrem vzhůru je možné celkově předpokládat zmenšování hustoty puklin směrem do hloubky (P. Rajlich, 2001) viz. obr. 2. Z obrázku je patrné, že nejdůležitější role subhorizontálních puklin pro proudění podzemní vody je v propojení puklin vertikálního směru.



Obr. 2: Hypotetická představa o vertikální distribuci puklin v závislosti na preexistujících a oživovaných subhorizontálních puklinách (není vztaheno k měřítku); zdroj: Rajlich, P. (2001)

4.2.4 Výplň puklin a poruch

Výplň puklin a poruch je klíčovým faktorem jejich propustnosti. Jak ukazují zkušenosti z naftového průzkumu, i silně rozpukaný granit s tzv. vyhojenými puklinami může být pro fluida nepropustný. Výplň může pocházet buďto z vlastního - okolního prostředí puklin, nebo být přinesena z větších vzdáleností.

Charakter výplně závisící na bezprostředním okolí je dán teplotou horninového prostředí v době vzniku puklin. V pneumatolytickém stádiu je výplň tvořena pegmatity a s klesající teplotou se uplatňuje křemen a chlorit. Produkty zvětrávání jsou tvořeny jílovými minerály.

Výplň puklin pocházející ze vzdálenějších zdrojů představují různé hydrotermální produkty, včetně sulfidů, karbonátů, chloritů a křemene nebo horninové žíly.

Výplň větších poruch je tvořena mylonitizovanými a drcenými horninami, popřípadě tektonickým jílem. Na propustnosti tektonických poruch se podílí kromě výplně i tvar těchto poruch. V granitech podzemní voda cirkuluje především v síti otevřených puklin.

4.2.5 Vztah rozpukání a geomorfologie

Porovnání puklin zjištěných při terénních průzkumech (většinou v lomech) s lineamenty dálkového průzkumu a s topografií vykazuje shodu i v menších detailech. Lineamenty dálkového průzkumu tedy zřejmě vyznačují zóny výraznějšího rozpukání až zlomy, rovněž jako topografie a obě metody lze proto kombinovat. Na jednotlivých lokalitách je možné pozorovat směrovou shodu vrstevnic či geomorfologických útvarů jako jsou vodní toky a hřebety s hlavním směrem rozpukání. Tuto skutečnost nejlépe dokumentuje tok Sázavy, kde se na vytvoření jejího hluboce zaříznutého koryta postupně uplatňují jednotlivé hlavní směry rozpukání.

5. Hydrogeologie

Zájmové území náleží k hydrogeologickému rajónu 652 - Krystalinikum v povodí Sázavy. Horninové prostředí granitů, pararul až migmatitů tvoří hydrogeologický masiv. Zde je dominantní puklinová porozita, která ve zvětralinovém pokryvu přechází až do porozity průlinové. Podzemní voda je v hydrogeologickém masivu vázaná nejčastěji na připovrchovou zónu rozpukání hornin včetně zvětralinového pokryvu. Transmisivita hornin bývá zpravidla nízká. Oběh podzemní vody má většinou lokální charakter. Pro zájmové území je charakteristický střední dlouhodobý specifický odtok podzemní vody, který se pohybuje mezi $2 - 3 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Hlavní drenážní bází území je vodohospodářsky významný tok řeky Sázavy.

5.1 Hydrogeologická charakteristika území

Území melechovského masivu spadá do hydrogeologického rajónu č. 652 Krystalinikum v povodí Sázavy. Aktivní oběh podzemních vod je zde vázán na zvodeň tvořenou připovrchovou zónou zvětralinového pláště a rozpojení puklin. Tato zvodeň se prostírá bez přerušení v celé oblasti melechovského masivu a přechází dále do okolního krystalinika. Hlubší, zpomalený oběh podzemních vod probíhá výhradně po puklinách a poruchových zónách masivu, podle zahraničních zkušeností sahá do hloubek cca 300 m (L. Rukavičková, 2001). Dále pak následuje zóna praktické stagnace podzemních vod, doba zdržení podzemních vod zde dosahuje až desítek tisíc let. I v této zóně však může docházet k relativně rychlému pohybu podzemních vod, který je podmíněn přítomností výrazného, dobře propustného poruchového pásma sahajícího do velkých hloubek. Kvartérní fluviální uloženiny jsou vzhledem k dobré průlinové propustnosti vodohospodářsky významným kolektorem (L. Rukavičková, 2001).

5.1.1 Odtokové poměry

Podle mapy odtoku podzemní vody ČSSR (J. Krásný, 1982) dosahuje v jihovýchodní části masivu dlouhodobý specifický odtok podzemní vody hodnot $3 - 5 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ a na zbytku území hodnot $2 - 3 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. B. Včíslová (1991) uvádí v regionální práci věnované východní

části moldanubika pro sledované území hodnotu specifického podzemního odtoku v rozsahu 1,1 - 2,3 l.s⁻¹.km⁻².

V letech 1994 - 1999 byla prováděna režimní měření průtoků povrchových vod na Meziklaském potoce (Z. Zelinka, 2000). Specifický odtok podzemní vody stanovený z minimálních naměřených průtoků v průběhu těchto let je 1,9 l.s⁻¹.km⁻².

Od roku 1995 do současnosti probíhá také kontinuální měření průtoků na malém povodí Loukov na jihovýchodním svahu Melechova (D. Fottová, 2000). Hodnoty specifického odtoku podzemní vody pro jednotlivé hydrologické roky vypočítané metodou 30 denních minim kolísají od 2,3 do 3,5 l.s⁻¹.km⁻².

Z uvedených faktů vyplývá, že průměrná hodnota specifického podzemního odtoku na melechovském masivu je 2 - 3 l.s⁻¹.km⁻².

5.1.2 Oběh podzemních vod

Oběh podzemních vod je na území vázán převážně na puklinový systém a jen sporadicky na lépe propustné horninové komplexy. Kvartérní kolektory jsou plně zapojeny do systému oběhu podzemních vod v krystaliniku.

Na základě změny propustnosti horninových komplexů, vyplývající z rozdílného petrografického složení, litologického vývoje a tektonických poměrů lze na území vymezit 3 zóny oběhu podzemních vod:

1. Připovrchová zóna aktivního oběhu podzemních vod

Tato zvrstvení se prostírá bez přerušení v celé oblasti melechovského masivu a přechází dále do okolního krystalinika. Hladina podzemní vody je převážně volná a sleduje konformně terén. Hloubka hladiny podle terénních měření kolísá od 0 do 19 m pod terénem, průměrná hodnota je 3 m pod terénem. Hloubka oběhu je dána úrovní místní drenážní báze. Nejčastějším způsobem odvodnění mělkého oběhu podzemních vod je skrytý příron do povrchových toků prostřednictvím fluviálních nebo deluviofluviálních sedimentů, případně svahovými, suťovými nebo méně častými puklinovými prameny. Jejich vydatnost se zpravidla pohybuje od setin do

desetin $l.s^{-1}$. Během terénních prací byly zjištěny jisté rozdíly v charakteru oběhu podzemních vod v různých typech granitů. Oblast masivu tak lze rozčlenit do tří dílčích zvodní podle jejich geologického složení: zvodně tvořená granity typu Melechov a Stvořidla, zvodně tvořená koutským typem granitu a zvodně tvořená granitem typu Lipnice. Neexistují ovšem žádné reálné hydrogeologické hranice mezi těmito dílčími jednotkami. Rozdíly v oběhu podzemních vod jsou způsobeny zejména morfologií a rozdílným stářím jednotlivých typů granitů. Při tvorbě modelu jsem se rozhodla tuto variabilitu neuvažovat a zaměřit se na pásmo rozpojení puklin.

Tuto zónu je dále možné rozdělit na:

1.A pásmo kvartérních sedimentů a zvětralinového pláště granitů

Zvětralinový plášť granitů a kvartérní sedimenty tvoří mělkou zvodně s převážující průlinovou propustností. Na území melechovského masivu dosahuje tato zvodně mocnosti 2 - 6 m v závislosti na morfologii území a přítomnosti tektonicky porušených hornin. Do tohoto pásma je zahrnut i kolektor kvartérních fluviálních sedimentů vyvinutých podél vodních toků. Jeho plošné rozšíření i mocnost je velmi malá. Proudění podzemní vody je zde převážně horizontální a to jednak ve směru k toku a následně rovnoběžně s povrchovým tokem. Větší akumulace holocenních fluviálních sedimentů, zastoupené písčitymi hlínami s příměsí šterku, o mocnosti okolo 4 m se nachází především podél toku Sázavy. Na tyto sedimenty je s ohledem na jejich mocnost vázaná pouze lokální zvodně s volnou hladinou podzemní vody. Kolísání hladiny podzemní vody ve zvětralinovém plášti nepřesahuje 1 m.

1.B pásmo připovrchového rozpojení puklin

Pásmo připovrchového rozpojení puklin sahá do hloubky 80 - 100 m a pohyb podzemních vod se zde uskutečňuje výhradně po puklinách. I v rámci tohoto pásma je možné vydělit dvě hloubkové úrovně. Do hloubky 40 - 50 m je možné očekávat relativně vydatné přítoky podzemní vody do vrtu (v řádu $0,01 - 0,1 l.s^{-1}$). V hlubších partiích pásma rozpojení puklin se ještě stále můžeme setkat s relativně častými přítoky do vrtu, ale jejich vydatnost se pohybuje převážně v řádu tisícín, výjimečně setin $l.s^{-1}$ a běžnými metodami hydrogeologického průzkumu je velmi obtížné je lokalizovat.

2. Střední zóna zpomaleného oběhu podzemních vod

Hlubší, zpomalený oběh probíhá výhradně po puklinách a poruchových zónách masivu v dosahu tektonického porušení hornin. Podle zahraničních zkušeností sahá do hloubek cca 300 m

(L. Rukavičková, 2001). Hlubší zvodně jsou na tomto území velmi omezené, ojediněle se vytváří na propustných drcených tektonických zónách v hlubších částech krystalinika.

3. Spodní zóna velmi pomalého oběhu až stagnace podzemních vod

Tato zóna je prostorově velmi omezená, zahrnuje hluboké krystalinikum. Doba zdržení podzemních vod zde dosahuje až desítek tisíc let (L. Rukavičková, 2001). I v této zóně však může docházet k relativně rychlému pohybu podzemních vod, který je podmíněn přítomností výrazného, dobře propustného poruchového pásma sahajícího do velkých hloubek.

5.1.3 Proudění podzemních vod

Srážkové vody spadlé v oblasti melechovského masivu infiltrují do zvětralinového pláště tvořeného písčítým, hlinitopísčítým či jílovitopísčítým materiálem s relativně dobrou propustností. K infiltraci dochází v celé ploše zvodně připovrchové zóny. Převážná část těchto infiltrovaných srážek zůstává v pásmu zvětralinového pláště a zúčastňuje se vzhledem ke značně členitému reliéfu melechovského masivu poměrně rychlého oběhu podzemních vod. K drenáži dochází zpravidla v úrovni místní erozní báze, ale často i nad ní, ať už vlivem polohy jílovitých zvětralin nebo přítomností zlomu či tektonické zóny s drenážní funkcí. Menší část vod pak proniká dále do pásma rozpojení puklin a pohybuje se po jednotlivých puklinách nebo po tektonických liniích buď opět k místní erozní bázi, nebo v místech výchozu tektonických zón k povrchu kde vyvěrá většinou skrytě do zvětralinového pláště. Jen velmi malé množství srážkových vod pronikne pod hranici 100 m do pásma zpomaleného oběhu podzemních vod (L. Rukavičková, 2001).

Významně je v posledních letech ovlivněn režim zvodnění puklinového systému v okolí vodní nádrže Švihov na Želivce, kde se změnila místní erozní báze a tím i infiltrace do puklinového systému. V roce 1975 zde byla do provozu uvedena nádrž s délkou vzdutí 38 km a výškou hráze 58 m.

Množství infiltrovaných srážek je podmíněno kromě velikosti efektivních srážek (rozdíl úhrnu srážek a výparu) také intenzitou deště a schopností hornin vsakovat vodu. Schopnost horninového prostředí vsakovat vodu je pak závislá na charakteru a mocnosti zvětralinového

pláště, intenzitě rozpukání, na rozevření puklin a na typu jejich výplně, geomorfologické pozici a sklonu svahu.

5.2 Hydraulické vlastnosti hornin

Propustnost granitů melechovského masivu v přípovrchové zóně je obdobná jako propustnost ostatních granitů moldanubického plutonu. V různých typech granitů se podle předpokladu průměrné hodnoty hydraulické vodivosti zvětalinového pláště prakticky neliší a ve výsledcích se malé rozdíly v propustnosti mezi jednotlivými druhy hornin vůbec neprojeví (M. Havlík, 2001). Propustnost zvětralinového pláště je závislá zejména na jeho morfologické pozici a mocnosti, jen nepatrný vliv má pak typ granitu (zrnitost). Průměrná hydraulická vodivost zvětralinového pláště pro celý melechovský masiv je $3,77 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Informací ze svrchní části pásma rozpojení puklin (do 30 m pod terénem) je méně, průměrná hodnota hydraulické vodivosti je $1,26 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ (L. Rukavičková, 2001).

Hlubší partie rozpukáných masivů granitů mají v závislosti na počtu a charakteru puklin velký rozsah koeficientů filtrace. Otevřené pukliny v poruchových pásmech mají v průměru koeficient filtrace 10^{-5} m.s^{-1} , zatímco neporušený granit a granit s uzavřenými, nebo sekundárně vyplněnými puklinami má tento koeficient řádově $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Hydraulická vodivost granitů s hloubkou obecně klesá. Tento pokles není lineární, ale mění se skokem. Hydraulické vlastnosti bývají poměrně stabilní pro blok hornin určitého hloubkového rozsahu. Zcela mimo tento trend stojí hydraulická vodivost významných puklinových zón, která může být o 2 - 4 řády vyšší než je hydraulická vodivost okolních hornin (L. Rukavičková, 2001). Poznatky o hydraulických vlastnostech puklinového prostředí granitových masivů na území České republiky (získané z hydrodynamického testování) jsou shrnuty v tab. 4.

hydraulická vodivost ($m \cdot s^{-1}$)	horninové prostředí
$10^{-11} - 10^{-10}$	neporušený granit, granit s uzavřenými puklinami nebo puklinami vyplněnými sekundárními minerály
$10^{-9} - 10^{-8}$	připovrchová zóna rozvolnění puklin, poruchová pásma částečně zatěsněná minerálními výplněmi
10^{-7}	vodivé poruchy a pukliny menšího rozsahu, připovrchová zóna rozvolnění puklin s vysokou mírou propojení puklinových systémů
10^{-6}	regionálně významná otevřená poruchová pásma, významné otevřené pukliny
10^{-5}	otevřené pukliny v poruchových pásmech

Tab. 4.: Hydraulické vlastnosti puklinového prostředí granitových masivů na území ČR; zdroj: Rukavičková, L. (2006)

Hydraulická vodivost obecně nezávisí na četnosti puklin, ale výhradně na přítomnosti otevřených puklin a jejich fyzikálních a prostorových vlastnostech. Vodivost zejména ovlivňuje rozevření puklin, míra jejich sekundární výplně a propojení s okolním puklinovým systémem. Při hydrodynamickém testování se ukázalo, že korelace počtu puklin zastižených na vrtném jádře s hydraulickou vodivostí testované etáže často ukazuje inverzní trend - čím je vyšší počet zastižených puklin, tím menší je pravděpodobnost výskytu otevřené vodivé pukliny. Přítomnost velké propustné poruchy významně ovlivní hydraulické vlastnosti okolní puklinové sítě až do vzdálenosti 40 m od vlastní poruchy (L. Rukavičková, 2006).

Konkrétní informace z hlubších partií melechovského masivu poskytuje 5 vrtů s hloubkou 200 m realizovaných na lokalitách Kostelní les, Zadní les a Lipnice v rámci projektu Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv (K. Breiter, 2006). Vrty Mel-1 a Mel-2 realizované na lokalitě Kostelní les prošly hrubozrnným granitem melechovského typu, s častým výskytem otevřených propustných puklin s vysokou mírou hydraulického propojení, která výrazně zvyšuje hydraulickou vodivost horninového prostředí. V připovrchové zóně rozvolnění puklin do hloubky 150 m pod terén se hydraulická vodivost pohybuje nejčastěji v rozsahu řádů 10^{-8} a 10^{-7} $m \cdot s^{-1}$. Úseky, které zastihly významné propustné pukliny a úseky s hustou sítí propojených otevřených puklin, vykazují hodnotu hydraulické vodivosti v řádu 10^{-6} $m \cdot s^{-1}$. Pod 150 m hydraulická vodivost klesá až k řádu 10^{-9} $m \cdot s^{-1}$. Tato lokalita se vyznačuje vysokou hydraulickou vodivostí a vysokou mírou propojení puklinových systémů. Nejvýznamnější roli zde hrají subhorizontální pukliny. Vrt Mel-3 na lokalitě Zadní les zastihl v hloubce 120 - 132 m významnou poruchovou zónu s vysokou hydraulickou vodivostí

v řádu 10^{-6} m.s⁻¹. Mimo tuto zónu je hydraulická vodivost nejčastěji v řádu 10^{-8} a 10^{-7} m.s⁻¹. Vrt Mel-4 leží mimo hlavní poruchovou zónu. V tomto vrtu převažuje hydraulická vodivost v řádu 10^{-10} m.s⁻¹. Zastižené vodivé polohy mají hydraulickou vodivost v řádu 10^{-7} m.s⁻¹ a jsou tvořeny jednotlivými puklinami s malou storativitou. Ve vrtu Mel-5 byly zastiženy dvě vodivé poruchy v hloubkách okolo 50 a 100 m. Jejich hydraulická vodivost se pohybuje v řádu 10^{-6} a 10^{-7} m.s⁻¹. Hydraulické vlastnosti neporušeného granitu jsou obdobné jako ve vrtu Mel-4.

5.3 Vliv tektonických poruch na pohyb podzemní vody

Výskyt puklinových systémů a poruchových pásem hraje hlavní roli při pohybu podzemní vody v granitových masivech. Hydraulická vodivost se zde často mění o několik řádů na velmi krátkou vzdálenost. Tato skutečnost je způsobena přítomností omezeného počtu významných otevřených propustných puklin či poruchových zón a rozdílnou mírou propojení jednotlivých puklinových systémů. Vysoká četnost poruch (puklin a zlomů) v horninovém prostředí i vysoká míra jejich propojení ve strukturním slova smyslu nemusí indikovat i vysokou hydraulickou vodivost zastiženého horninového prostředí. Propustnost masivu tedy nezávisí jen na četnosti puklin, ale také na jejich vzájemné spojitosti, stupni rozevření, drsnosti stěn a zejména na jejich výplni. Charakter výplní otevřených puklin v zóně podpovrchového rozpojení hornin je obdobný charakteru zvětralin. Zvětralin v území parametamorfítů mají převážně jílovitý až písčitojílovitý charakter, v oblastech ortorul a vyvěřelých hornin jsou jílovitopísčité až písčité. Pukliny i poruchové zóny jsou také velmi často vyplněny sekundárními minerály nebo zcela uzavřeny vlivem geostatického napětí. Hydraulické vlastnosti uzavřených a vyplněných puklin se blíží vlastnostem neporušeného horninového prostředí a pro aktivní oběh podzemních vod mají tyto pukliny jen omezený význam. Ve větších hloubkách pod přípovrchovou zónou proudí podzemní voda pouze po řídké síti komunikujících otevřených puklin a to ne v celé jejich ploše, ale jen v částech, které mají charakter kanálů. Obecně lze konstatovat, že výrazné zlepšení puklinové propustnosti nastává s růstem migmatitizace a také v křehkých horninách, kde se uplatňuje mladá tříštivá tektonika. Vznikají dobře propustné drenážní struktury s hloubkovým dosahem zvodnění i do několika set metrů. Pro oběh podzemních vod je důležitá poměrně řídká síť nejmladších otevřených puklin s drenážním účinkem, zatímco hustá síť sepnutých puklin oběh podzemních vod zpomaluje.

Podle L. Rukavičkové (2006) hrají ve svrchních 200 m masivu nejvýznamnější roli subhorizontální pukliny. S hloubkou pod terénem roste význam šikmých puklin. V hloubkách kolem 100 m se subhorizontální pukliny začínají uzavírat tíhou nadložních hornin, jejich dominantní roli v proudění podzemních vod přebírají pukliny šikmé a ve větších hloubkách podzemní voda proudí převážně po strmých puklinách.

Ve vrtech melechovského masivu byly prokázány významné propustné polohy regionálního charakteru (jednotky km) s vysokou storativitou a specifickými piezometrickými poměry. Výskyt vodivých puklin zde není vázán pouze na připovrchovou zónu. Melechovský granit se vyznačuje relativně hustou sítí otevřených, dobře propojených puklin a celkově vyšší hydraulickou vodivostí. Velká zrna granitu melechovského typu zamezují svírání puklin. Otevřenost puklinového systému může být způsobena extenzním napětovým polem v okolí lokality Kostelní les.

5.4 Typy podzemních vod

Na území melechovského masivu je v připovrchové zvodni silně vyvinuta vertikální hydrochemická zonálnost. Ve zvětralinovém plášti (s hloubkovým dosahem do 10 m) s rychlým oběhem podzemní vody je zcela dominantním typem podzemní vody $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$. Z kationtů v této zóně zcela převládá Ca^{2+} , relativně vyšších koncentrací často dosahuje Na a zcela výjimečně Mg^{2+} . Mezi anionty opět jednoznačně převládají ionty SO_4^{2-} , vzhledem k mělkému a rychlému oběhu vod v této zóně jsou často výrazně zastoupeny ionty NO_3^- . Mineralizace těchto vod se pohybuje v rozmezí 90 - 450 mg.l^{-1} , přičemž je možné říci, že mineralizace vyšší než 250 mg.l^{-1} je způsobena antropogenním znečištěním, pH kolísá mezi hodnotami 5 a 7 (L. Rukavičková, 2001).

V hlubších částech připovrchové zvodně převládá typ $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$. Mezi kationty dominuje Ca^{2+} , velmi hojný je i Na. Pro tuto zónu je typická převaha aniontů HCO_3^- , jen výjimečně se v relativně vyšších koncentracích vyskytnou ionty SO_4^{2-} nebo HCO_3^- . Mineralizace podzemních vod nepřesahuje hodnotu 300 mg.l^{-1} , pH opět kolísá mezi 5 a 7, obecně lze však říci, že hodnota pH se zvyšující se hloubkou oběhu mírně stoupá.

5.5 Prameny

Kromě skrytých vývěrů do sedimentů v úrovni erozní báze místních vodních toků dochází k drenáži podzemních vod na území melechovského masivu prostřednictvím relativně četných puklinových, suťových a puklinově suťových pramenů. Vydatnost těchto pramenů se pohybuje v řádu setin a desetin $l \cdot s^{-1}$, litrové vydatnosti dosahují pouze některé prameny v jarních měsících. Řada vydatnějších pramenů uváděných na starších mapových pracích je v současné době využita pro domovní zásobování.

Prameny se vyskytují ve dnech terénních depresí, ve svazích hluboce zaříznutých údolí vodních toků - většinou jen těsně nad erozní bází v místech, kde dochází k výrazné změně sklonu svahu a konečně ve svazích často vysoko nad erozní bází, u těchto pramenů můžeme předpokládat vazbu na tektonickou linii nebo puklinový původ. Vývěry vázané na erozní bázi bývají často plošné, se zamokřenou pramenní kotlinou o průměru prvních desítek metrů. Tektonicky podmíněné prameny jsou naopak převážně bodové a vyskytují se často v liniích. Vzdálenost jednotlivých bodových vývěrů na těchto liniích je velmi různorodá od prvních jednotek metrů až po stovky metrů. Prameny vázané na morfologii se vyskytují v místech, kde se příkrý svah mění v mírný. V těchto místech dochází k nahromadění granitových sutí a vzniku plošných pramenních vývěrů. Chemismus pramenů vcelku dobře odpovídá charakteristice vod zvětralinového pásma uvedené v předchozí kapitole. Zvýšené obsahy iontů NO_3^- a Cl^- se vyskytují u pramenů, které odvodňují území s velkým podílem zemědělsky obhospodařovaných ploch.

5.6 Radon v podzemní vodě

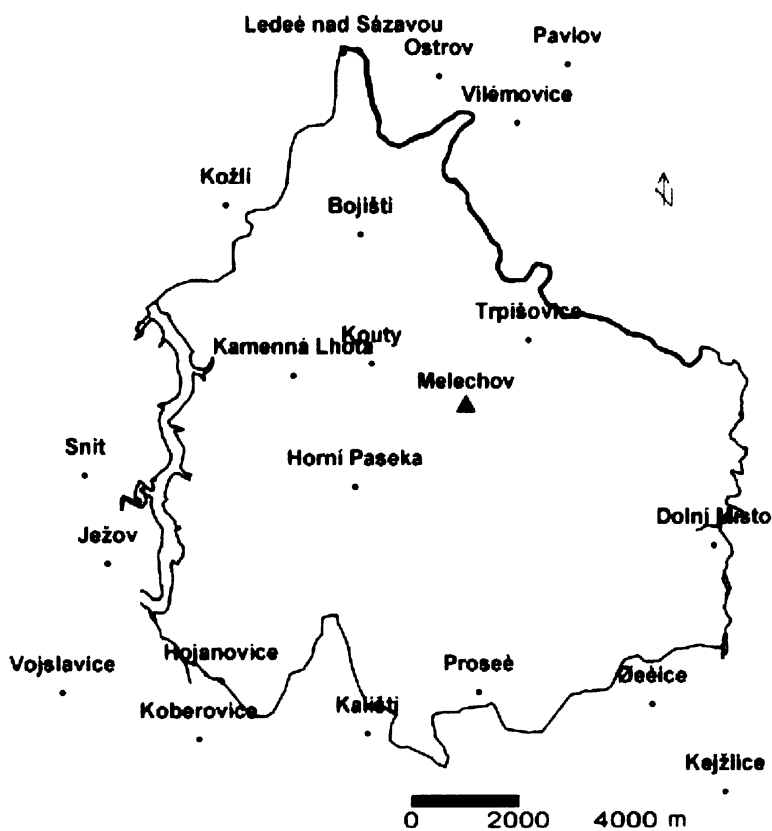
Zvýšený obsah Rn v podzemní vodě může indikovat výskyt vodivé poruchy, je proto nutné tomuto jevu věnovat zvýšenou pozornost. Obsahy Rn v podzemních vodách melechovského masivu jsou velmi různorodé a pohybují se od jednotek $Bq \cdot l^{-1}$ až po hodnoty, které více než desetinásobně přesahují limity pro pitnou vodu. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny v Koutech ($1704 Bq \cdot l^{-1}$), na severozápadním svahu Melechova ($1440 Bq \cdot l^{-1}$) a u Požírné ($1000 Bq \cdot l^{-1}$). U pramenů se objemová aktivita radonu pohybuje v rozmezí $320-1000 Bq \cdot l^{-1}$ (L. Rukavičková, 2001).

6. Koncepční model

Horninové prostředí modelovaného území považují díky regionálnímu měřítku za izotropní, avšak díky přítomnosti puklin za nehomogenní prostředí.

6.1 Vymezení modelované oblasti

Hranice zájmové oblasti je na severu, východě a západě tvořena vodními toky. Na severovýchodě je hraničním tokem řeka Sázava, na východě hranici tvoří Pstružný potok a na západě přehradní nádrž Švihov na řece Želivce. Na jihozápadě je hranice tvořena potokem pramenícím u Hojanovic, který se vlévá do přehrady. Zbývající části hranice, na severozápadě a jihu jsou tvořeny hranicí morfologickou - rozvodnicí. Jedná se o rozvodnice povodí 4. řádu. Na jihu vede rozvodnice přibližně po linii Hojanovice, Kaliště, Kejžlice a na severozápadě přes Kožlí k Ledči nad Sázavou.



obr.3.: Hranice modelovaného území – modré linie vyznačují vodní toky, červené linie vyznačují rozvodnice

Hlubkový dosah modelu oblasti je přibližně 1 km pod povrch terénu.

6.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky je nutné zadat do hraničních bodů všech modelových rozhraní. V prvním rozhraní se hranice tvořené vodními toky vyjádří pomocí Dirichletovy okrajové podmínky a rozvodnice pomocí Neumannovy okrajové podmínky. Ve druhém modelovém rozhraní jsou za předpokladu komunikace mělké zvodně s povrchovými toky zadány stejné okrajové podmínky jako v rozhraní prvním. Do hraničních bodů všech ostatních rozhraní byla zadána Neumannova okrajová podmínka, hranice jsou považovány za nepropustné. Stejně tak plocha posledního rozhraní je vzhledem ke své hloubce (přibližně 1 km pod terénem) považována za nepropustnou.

6.3 Popis modelových vrstev

Modelovaná oblast je vertikálně rozčleněna do šesti vrstev, jejichž plošný rozsah je totožný s rozsahem oblasti. Svrchní dvě vrstvy mají průlinovou propustnost, korespondují se zónou rozloženého a navětralého granitu. Ostatní modelové vrstvy mají propustnost převážně puklinovou a reprezentují více či méně neporušený granitový masiv. Mocnost jednotlivých vrstev se pohybuje od 4 do 400 m a směrem k povrchu snižuje.

Informace o hydraulických vodivostech pro vrstvy s průlinovou propustností (zvětalinový plášť a svrchní část pásma rozpojení puklin - do hloubky 30 m pod terénem) jsem získala z práce L. Rukavičkové (2001) (viz kapitola 5.2). V následujících vrstvách se objevuje mimo průlinové i propustnost puklinová, takže hodnoty hydraulických vodivostí pro horninový masiv jsou relativně velmi nízké a na důležitosti z hlediska hydrauliky získávají pukliny. Při určování hydraulické vodivosti v těchto modelových vrstvách jsem vycházela z autoreferátu disertační práce L. Rukavičkové (2006) (viz kapitola 5.2). Konkrétní hodnoty hydraulických vodivostí modelových vrstev jsou uvedeny v kapitole 7.4 Vstupní parametry.

6.3.1 Vlastnosti puklin

Ve třetí až šesté modelové vrstvě dominuje puklinová propustnost. Pro potřeby modelu jsem upravila soubor fotolineací z práce V. Lysenka (2004). Soubor reprezentuje nejvýznamnější vertikální pukliny v oblasti zjištěné pomocí metody dálkového průzkumu Země.

Vlastnosti puklinové sítě se mohou lišit v jednotlivých modelových vrstvách i v rámci těchto vrstev. Obecně se propustnost puklin (reprezentovaná jejich šířkou) s hloubkou pod terénem snižuje. Při určování vlastností puklin jsem vycházela z informací nalezených v práci M. Veselého a J. Mlša (2004), kde je uvedeno průměrné rozevření štěrbin v krystalických horninách v řádu 10 - 600 μm ($1 \cdot 10^{-5}$ - $6 \cdot 10^{-4}$ m). Rozevření puklin jsem v rámci kalibrace modelu měnila v rozmezí řádů 10^{-5} - 10^{-3} m.

6.4 Infiltrace

K infiltraci dochází přes celou plochu modelované oblasti. Infiltrované množství srážek jsem určila s ohledem na známé průměrné hodnoty podzemního odtoku 2 - 3 $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (viz. kapitola 5.1.1). Vzhledem k průměrnému úhrnu srážek $680 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ (viz. kapitola 3.2) činí infiltrované množství 9 - 14 % čili 63 - 94 $\text{mm} \cdot \text{rok}^{-1}$.

7. Numerický model

7.1 Matematická formulace

Úloha je v modelu řešena pomocí rovnice kontinuity popisující proudění podzemní vody (o konstantní hustotě) v heterogenním, anizotropním, porézním prostředí:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

$k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} (x, y, z)$...hydraulická vodivost [$L T^{-1}$]

$h (x, y, z, t)$hydraulická výška [L]

$W (x, y, z, t)$zdrojový člen (infiltrace, evapotranspirace) [T^{-1}]

$S_s (x, y, z)$specifická storativita [L^{-1}]

tčas [T]

x, y, zsouřadnicové osy

Ljednotka délky

T jednotka času

Vzhledem k tomu, že zadanou úlohu řeším jako stacionární problém a hydraulickou vodivost považuji za směrově nezávislou, řídicí rovnici lze psát v jednodušší podobě:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -\frac{W}{k}$$

7.2 Použitý software

Pro řešení zadané úlohy byl použit program FEFLOW (verze 5.2) vytvořený firmou WASY z Německa v roce 2005.

Simulační systém FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) je vhodný pro modelování proudění podzemní vody a transportních procesů v porézním prostředí. Program pracuje na základě metody konečných prvků. Kromě proudění vody v něm lze simulovat také transport tepla a kontaminantů (včetně chemického rozpadu, sorpce, teplotních a hustotních vlivů). Umožňuje řešit jak 2D tak 3D úlohy, stacionární i nestacionární problémy, proudění v saturovaném i nesaturovaném, izotropním i neizotropním prostředí. Program je též vybaven funkcemi pro simulaci proudění v diskrétních 1D / 2D prvcích - puklinách, kanálech, nebo tunelech.

Výstupy ze simulací mohou být jednak grafické, jednak datové. Jedním z nabízených výstupů jsou mapy s vyznačením hydraulických výšek a velikosti a směru vektoru objemové hustoty toku. Program také umožňuje exportovat informace o hydraulických výškách, rychlostech proudění a tlacích v jednotlivých uzlech sítě a v neposlední řadě poskytuje nástroj pro zjištění výstupové doby částice z kteréhokoliv místa modelu na hladinu podzemní vody.

Prvním krokem při tvorbě modelu je vytvoření sítě, pro jejíž uzlové body nakonec získáme požadované parametry. Tato síť může být tvořena trojbokými nebo čtyřbokými prvky různých rozměrů, které podle našeho výběru mohou respektovat geologická rozhraní, říční síť, nebo např. systém tektonických poruch. Parametry, jako je hydraulická vodivost, transmisivita a storativita, se zadávají přímo do jednotlivých prvků sítě. Každý prvek sítě může mít tyto parametry odlišné.

Parametry, jako je infiltrace a hydraulická výška se zadávají do jednotlivých uzlů sítě. Pro získání dat ve všech bodech sítě lze použít různé interpolační metody, např. kriging.

Na rozhraní mezi jednotlivými modelovými vrstvami se nachází tzv. slice - plocha, jež slouží k ohraničení vrstev. Tomuto rozhraní můžeme v programu FEFLOW přiřadit specifickou vlastnost, jako například to, že bude simulovat volnou hladinu podzemní vody. To v praxi znamená, že vrstva ohraničená takovouto plochou se samovolně deformuje podle programem vypočtené hydraulické výšky v jednotlivých uzlech sítě tak, že všechny prvky modelu zůstávají saturované. Program nabízí také možnost simulovat pomocí slice volnou hladinu podzemní vody bez vertikálního pohybu rozhraní. V závislosti na pohybu hladiny podzemní vody tedy může dojít k tomu, že některé prvky modelu pak budou částečně nesaturované. Toto nastavení je vhodné pokud ve vrstvě, kterou rozhraní překrývá, očekáváme hladinu dalšího akviferu. Pokud

nastavení nespecifikujeme, rozhraní se automaticky přizpůsobí výsledům simulace. Poslední možností je ponechat tuto plochu fixní, což je vhodné, pokud rozhraní modelových vrstev kopíruje skutečné geologické rozhraní.

Právě do rozhraní modelových vrstev se vkládají okrajové podmínky modelu. Program pracuje s okrajovými podmínkami čtyř typů. Dirichletovou okrajovou podmínkou lze předepsat konkrétní hodnotu hydraulické výšky v uzlech sítě. Neumannovou okrajovou podmínkou lze předepsat proudění kolmo na hranici v hraničních uzlech modelové sítě. Newtonovou okrajovou podmínkou je definován vztah mezi hydraulickou výškou a průtokem hranicí. Poslední podmínka se vztahuje k samostatné studni a lze jí definovat čerpání v konkrétním bodě sítě. Všechny okrajové podmínky mohou být časově závislé. V programu lze také simulovat přetékání mezi akvifery. Infiltrace nebo evaporace se nezadáva jako okrajová podmínka, nýbrž jako zdrojový člen v prvním modelovém rozhraní (slice). Tento člen může být časově závislý.

Pukliny, zlomy a pod. lze do modelu zadat jako diskrétní 1D nebo 2D prvky. Jejich propustnost lze nasimulovat dvěma způsoby. Buď mohou být tyto prvky vyplněné materiálem o určité hydraulické vodivosti, kde se proudění řídí Darcyho zákonem, nebo mohou být nevyplněné a proudění v nich se pak řídí Hagen - Poiseuilleovým (kubickým) zákonem.

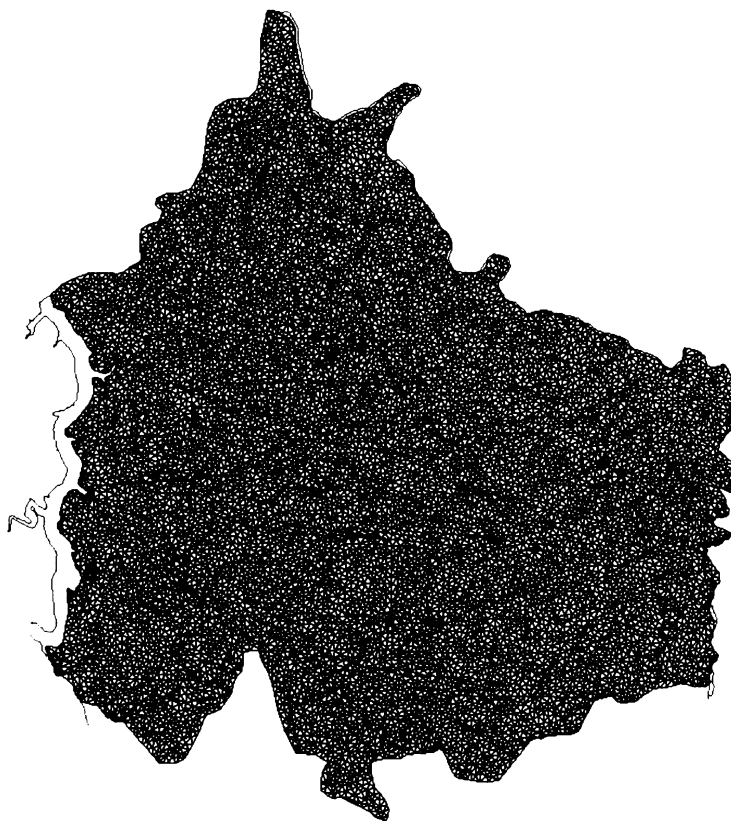
Pro urychlení výpočtu je vhodné zadat do všech sliců startovací hodnotu hydraulické výšky, s níž se začínají výpočty.

7.3 Geometrie modelové oblasti

Modelované území má plochu 75,8 km². Maximální šířka oblasti ve směru V - Z je 11 165 m a ve směru S - J 13 070 m. Maximální vertikální rozměr oblasti je 1 161 m, 452 m pod hladinu moře.

Hustota trojbokých prvků modelové sítě je patrná z obr. 4. Tyto prvky jsou sestaveny tak, že respektují puklinovou síť zaznamenanou v zájmovém území - upravený soubor fotolineací z práce V. Lysenka (2004).

Výsledný počet elementů sítě je 116 352 a uzlových bodů 70 385.



Obr. 4.: Hustota trojbokých prvků modelové sítě

7.4 Vstupní parametry

7.4.1 Modelové vrstvy

Mocnosti jednotlivých modelových vrstev jsou přehledně zaznamenány v tab. 5.

vrstva	mocnost (m)
1	4
2	26
3	60 - 140
4	110 - 300
5	300
6	400

Tab.5.: Mocnosti modelových vrstev

Povrch prvních tří vrstev kopíruje v různých hloubkových úrovních zemský reliéf. Povrch čtvrté vrstvy je oproti předchozím mírně shlazený a u ostatních vrstev byl povrch ponechán planární. Původní datový soubor s nadmořskými výškami terénu zájmového území byl upravován pomocí programu Surfer.

7.4.2 Vlastnosti rozhraní modelových vrstev

Prvnímu rozhraní je přiřazena vlastnost free & movable. Může se vertikálně pohybovat, simuluje volnou hladinu podzemní vody tak, aby všechny prvky modelu zůstaly saturované. Poslední slice má již přednastavenou vlastnost fixed a nebude se tedy pohybovat za žádných okolností. Ostatní rozhraní nejsou specifikována a přizpůsobí se tedy výsledkům simulace.

7.4.3 Hydraulické vlastnosti vrstev a puklin

Hydraulické vodivosti pro jednotlivé modelové vrstvy jsou uvedeny v tab. 6. Vzhledem k prostorové izotropii melechovského masivu z regionálního měřítka, postačuje jedna hodnota hydraulické vodivosti pro popis propustnosti prostředí ve všech směrech. V první a druhé modelové vrstvě se hodnoty hydraulických vodivostí vztahují k průlinové propustnosti prostředí, v ostatních vrstvách reprezentují tyto hodnoty propustnost více či méně porušeného granitového masivu.

Vlastnosti puklin v jednotlivých modelových vrstvách jsou přehledně zaznamenány v tab. 6. Zvolila jsem možnost zadání propustnosti puklin pomocí Hagen - Poiseuilleova zákona, kde je propustnost jednotlivých puklin reprezentována jejich šířkou (rozevřením) (H.-J.G. Diersch, 2005):

$$q = -\frac{b^2 \rho g}{12\mu} \nabla h$$

qhustota toku [LT^{-1}]

bšířka pukliny [L]

ρ hustota vody [ML^{-3}]

ggravitační zrychlení [LT^{-2}]

μdynamická viskozita vody [$ML^{-1}T^{-1}$]

hhydraulická výška [L]

L.....jednotka délky

T.....jednotka času

M.....jednotka hmotnosti

V první a druhé modelové vrstvě se 2D prvky simulující pukliny nevyskytují.

vrstva	hydraulická vodivost modelových vrstev (ms^{-1})	rozevření puklin (m)
1	$3 \cdot 10^{-5}$	
2	$1 \cdot 10^{-6}$	
3	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$
4	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-4}$
5	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-5}$
6	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Tab.6: Hydraulické vodivosti modelových vrstev a rozevření puklin v jednotlivých vrstvách

7.4.4 Infiltrace

Hodnota zdrojového členu v prvním rozhraní (In-flow on top), která v modelu zastupuje infiltraci vody ze srážek, se pohybuje mezi 9 - 14 % průměrného ročního srážkového úhrnu, tedy 63 - 94 $mm \cdot rok^{-1}$ ($1,73 \cdot 10^{-4}$ - $2,59 \cdot 10^{-4}$ $m \cdot den^{-1}$). Použila jsem vyšší mezní hodnotu, tedy $2,59 \cdot 10^{-4}$ $m \cdot den^{-1}$.

7.4.5 Okrajové podmínky

Program FEFLOW vyžaduje zadání okrajových podmínek do hraničních bodů všech modelových rozhraní. V prvním rozhraní jsou hranice tvořené vodními toky vyjádřeny pomocí Dirichletovy okrajové podmínky. Konkrétní hodnoty hydraulických výšek toků byly odečteny z vodohospodářských map 1 : 50 000 list 23 - 12 Ledec nad Sázavou a list 23 - 21 Havlíčkův

Brod. Tam, kde je hranice oblasti tvořena rozvodnicemi, byla zadána Neumannova okrajová podmínka s nulovou pravou stranou - skrze tuto hranici nedochází k proudění podzemní vody. Vzhledem k tomu, že jsou podzemní vody v mělké zvodni v hydraulické spojitosti s povrchovými toky, byly do hraničních bodů druhého modelového rozhraní v hloubce 4 m pod terénem zadány stejné okrajové podmínky jako do hraničních bodů rozhraní prvního (ve smyslu hodnot hydraulických výšek). Nelze ovšem předpokládat, že by hydraulická výška v hlubších částech masivu také odpovídala hladinám povrchových toků. Pro hranice hlubších rozhraní jsem uplatnila předpoklad, že skrze tyto hranice nedochází k proudění podzemní vody. Proto byla do všech zbylých hraničních bodů zadána Neumannova okrajová podmínka s nulovou pravou stranou a to i v místech, kde je hranice na povrchu tvořena vodními toky. Případná odchylka od tohoto konceptu by neměla mít zásadní vliv na výsledek vzhledem k tomu, že převážná část oběhu podzemních vod probíhá v připovrchových vrstvách.

Dle standardního nastavení skrz plochu posledního rozhraní nedochází k žádnému proudění podzemních vod.

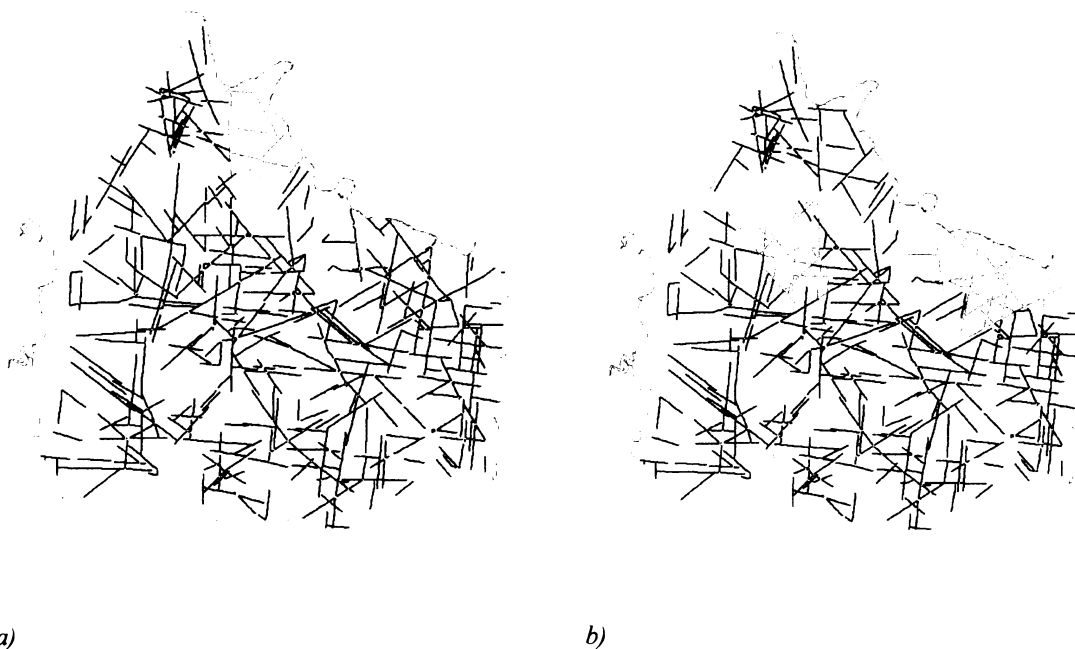
7.4.6 Podmínky počáteční iterace

Do všech modelových rozhraní byla před započítím výpočtu vložena startovací hodnota hydraulické výšky. Cílem tohoto kroku bylo urychlit výpočet. Vkládané hodnoty jsem určila pomocí datového souboru souřadnic nadmořských výšek bodů oblasti a předpokladu, že hladina podzemní vody se nachází přibližně 4 m pod povrchem a převážně kopíruje terén.

8. Kalibrace

Pro kalibraci modelu jsem využila soubor informací o studnách a vrtech v zájmové oblasti vytvořený L. Rukavičkovou (2001). Z tohoto souboru jsem vybrala 20 objektů tak, aby pokud možno rovnoměrně pokryly zájmovou oblast. Nadmořská výška těchto objektů se pohybuje mezi 385 a 601 m n.m., jejich hloubka je v rozmezí 2,3 - 200 m a naměřená hladina podzemní vody se pohybuje od 380 do 593,5 m n.m. Informace o perforaci výstroje těchto jímacích objektů jsem neměla k dispozici. Ve druhém modelovém rozhraní se nachází 16 kalibračních bodů, ve třetím 2 kalibrační body a ve čtvrtém rozhraní taktéž 2 kalibrační body. Toto rozdělení závisí na hloubce skutečných objektů nacházejících se v těchto bodech, neboť chybí údaje o jejich otevření vzhledem k okolnímu prostředí. Informace o všech objektech využitých při kalibraci a mapu s vyznačením jejich polohy lze najít v příloze 4.

Pomocí změn hydraulické vodivosti jednotlivých modelových vrstev a zejména pomocí změn propustnosti puklin (reprezentované rozevřením - jejich šířkou) jsem se snažila přiblížit s modelem vypočtenou hydraulickou výškou ve vybraných bodech (v místech skutečných objektů) k hydraulické výšce naměřené na těchto místech ve vrtech a studnách. Oproti počátečnímu nastavení modelu se po kalibraci v každé vrstvě vyskytují oblasti s vyšší i nižší propustností puklin, tedy s rozdílným rozevřením puklin (viz. obr 5.).



Obr. 5.: Prostorové rozložení propustnějších a méně propustných puklin; modrozelenou barvou jsou v obr. a) vyznačeny nejvíce rozevřené pukliny, v obr. b) méně rozevřené pukliny; černě vyznačené pukliny mají nejnižší propustnost.

Konečné rozdíly mezi vypočtenou a skutečnou hydraulickou výškou v kalibračních objektech jsou uvedeny v přehledné tabulce v příloze 4. Tato práce si nekladla za cíl simulovat lokální změny hydraulických výšek, rozdíly mezi vypočtenou a skutečnou hydraulickou výškou v kalibračních bodech se pohybují od 0,2 do 14,5 m (s jedinou výjimkou - u kalibračního bodu č. 18 činí tento rozdíl 23,6 m). V bodech s kladnou hodnotou rozdílu mezi vypočtenou a skutečnou hydraulickou výškou byla modelem vypočtena vyšší hladina než byla v tomto místě změřena ve skutečnosti. Naopak v kalibračních bodech se zápornou hodnotou tohoto rozdílu byla nasimulovaná hladina nižší než hladina skutečně změřená.

Vzhledem k tomu, že namodelované hydraulické výšky byly ve většině případů vyšší než skutečné, využila jsem ke kalibraci modelu ještě změnu množství vody infiltrované ze srážek. Snížila jsem toto množství ze 14 na 9 % z ročního srážkového úhrnu, tedy na $1,73 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{den}^{-1}$.

Hodnoty hydraulických vodivostí a rozevření puklin v jednotlivých vrstvách k nimž jsem během kalibrace dospěla jsou uvedeny v tab. 7.

vrstva	hydraulická vodivost modelových vrstev (ms^{-1})	rozevření puklin (m)		
1	$3 \cdot 10^{-5}$			
2	$1 \cdot 10^{-6}$			
3	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
4	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
5	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
6	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Tab.7.: Hodnoty hydraulické vodivosti modelových vrstev a rozevření puklin po kalibraci

Správnost modelu lze posoudit pomocí celkové vodní bilance. Pro stacionární úlohy platí, že množství vody do oblastí vstupující se musí rovnat množství vody z oblastí vystupující. Případný rozdíl znamená chybu modelu. Z tohoto hlediska lze model vytvořený pro řešení zadané úlohy považovat za vyhovující (viz. tab. 8).

celková vodní bilance			
	množství vody vstupující do oblasti ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	množství vody vstupující do oblasti ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	rozdíl ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
skrz hranice	713,14	14384,99	
infiltrace	13631,64	0	
celkově	14344,78	14384,99	-40,21

Tab.8.: Celková vodní bilance modelu

9. Výsledky

Výsledky modelování jsou zpracovány formou map izolinií hydraulických výšek v jednotlivých vrstvách (příloha 5). Pro jejich vykreslení byl použit program Surfer, verze 8.0, vytvořený americkou firmou Golden Software. Na mapách izolinií hydraulických výšek v první a druhé modelové vrstvě je patrný vliv nejpropustnějších puklin, přestože je propustnost těchto vrstev simulována jako průlinová. Na všech ostatních mapách izolinií hydraulických výšek v jednotlivých modelových vrstvách je patrný vliv puklin na tvar izolinií. V příloze 6 jsou uvedeny 2 vertikální řezy modelovanou oblastí. Řez A je veden ve směru S - J přes nejvyšší bod oblasti (vrchol Melechov), řez B je veden ve směru Z - V také přes nejvyšší bod oblasti (viz. mapa polohy řezů - příloha 6.1).

Dalším výsledkem je grafické znázornění z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku v jednotlivých modelových vrstvách (příloha 7). Pro zpracování těchto výsledků byl také použit program Surfer. Přehled rozsahu z-složky vektoru objemové hustoty toku v jednotlivých modelových vrstvách je uveden v tab. 9.

vrstva	z-složka vektoru objemové hustoty toku (ms^{-1})	
	min.	max.
1	$-7,5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
2	$-5 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$
3	$-5 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$
4	$-7 \cdot 10^{-19}$	$9 \cdot 10^{-19}$
5	$-8 \cdot 10^{-24}$	$1,1 \cdot 10^{-23}$
6	$-2,2 \cdot 10^{-24}$	$2,6 \cdot 10^{-24}$

Tab.9.: Rozsah z-složky objemové hustoty toku (záporné hodnoty - proudění směrem dolů, kladné hodnoty - proudění směrem vzhůru)

V první modelové vrstvě, která představuje kvartérní pokryv území, dochází k relativně pomalému stejnoměrnému zasakování vody. Ve druhé modelové vrstvě také dochází k zasakování téměř v celé ploše, ale podél severní hranice dochází k vzestupu podzemní vody stejně jako ve dvou oblastech ve středu území (jednou z nich je okolí vrchu Melechov). Ve třetí modelové vrstvě se zdají být oblasti vzestupu a zasakování podzemní vody plošně vyrovnané. V nejvýše položených partiích oblasti dochází oproti předchozí vrstvě k zasakování. K vzestupu

podzemní vody dochází téměř podél celé severní hranice. Ve čtvrté modelové vrstvě lze nalézt dvě soustředěné oblasti kde dochází k relativně rychlému vzestupnému proudění, k nejintenzivnějšímu zasakování zde dochází podél východní hranice území. V páté modelové vrstvě se oproti vrstvě předchozí nenachází žádná soustředěná oblast vzestupu podzemních vod. Dochází zde k velmi pomalému zasakování téměř v celé ploše oblasti. V šesté modelové vrstvě naopak dochází k pomalému vzestupu podzemní vody téměř v celé ploše oblasti, kromě okolí nejvýše položených partií území a oválné oblasti podél východní hranice.

Dále byla pomocí funkce Pathline z programu FEFLOW zkoumána doba, za níž částice podzemní vody z určitého bodu modelované oblasti dosáhne v ideálním případě hladiny podzemní vody. Zaměřila jsem se na rozhraní mezi 5. a 6. modelovou vrstvou, neboť přibližně v této hloubce (600 m pod povrchem) by se mělo nacházet případné úložiště radioaktivních odpadů. Zkoumala jsem chování částic z 57 bodů z úrovně od 254 do 294 m pod hladinou moře. Výsledné doby výstupu částic na hladinu podzemní vody (pokud to výpočet dovolil), včetně počáteční a konečné z-souřadnice jsou uvedeny v příloze 8 spolu s mapou polohy zkoumaných bodů a vyznačením místa, kam částice z těchto bodů za výsledný čas doputovaly. Doba výstupu částic z této hloubkové úrovně se podle této simulace pohybuje od 2,33 do $2,4 \cdot 10^{11}$ dní, čili řádově od desítek hodin po stovky milionů let.

Z mapy v příloze 9 lze vysledovat, kde dochází k největšímu odtoku podzemní vody na hranicích modelované oblasti - je to na několika místech severní hranice území a východní hranice území.

10. Diskuse výsledků

Z rozložení hydraulických výšek v jednotlivých vrstvách modelu je patrné, že na melechovském masivu je proudění podzemních vod zásadně ovlivněno existencí významných puklinových systémů. Na jednotlivých mapách izolinií hydraulických výšek lze sledovat vliv puklinové sítě na průběh těchto izolinií. Pukliny se zvětšenou vodivostí (rozevřenější - viz obr. 5.) mají vliv na průběh izolinií hned v první modelové vrstvě, přestože v prvních dvou modelových vrstvách byla simulována pouze propustnost průlinová. Vliv všech puklin bez rozdílu hydraulické vodivosti se plně projeví až od třetí modelové vrstvy, v níž už byly simulovány vertikální 2D prvky představující pukliny. Z výše uvedeného je zřejmé, že hydraulicky aktivní puklinové systémy mohou ovlivňovat režim proudění podzemních vod také v zóně zvětralin a kvartérního pokryvu.

Nejlepší shody úrovně modelových a skutečných hladin podzemní vody v místech kalibračních bodů bylo dosaženo při snížení vodivosti masivu a celkovým zvětšením propustnosti (rozevření) puklin ve všech vrstvách. Místy došlo až k řádovému rozdílu mezi předpokládanou a simulovanou šířkou puklin. Snížení infiltrovaného množství vody ze srážek dále zmenšilo odchylku těchto úrovní hydraulických výšek. Přesto se tyto hodnoty liší v průměru o 6,3 m. Tato nesrovnalost je dána tím, že model simuluje regionální proudění podzemní vody a nelze jím tedy postihnout lokální změny proudění. Pro ověření správnosti naměřených úrovní hladin v kalibračních objektech jsem pro výpočet těchto hladin využila ještě empirického vzorce pro výpočet hladiny podzemní vody v závislosti na povrchu terénu (M. Havlík, 2001):

$$y = 1,001x - 3,0359$$

x...úroveň povrchu (m n. m.)

y...úroveň hladiny podzemní vody

Z tohoto srovnání vyplývá, že hodnota úrovně hladiny podzemní vody v kalibračním bodě č. 18 vykazuje lokální výjimečnost (oproti hodnotě vypočtené výše uvedeným vzorcem se liší o 10,4 m - viz příloha 4). Právě v tomto kalibračním bodě se vyskytuje největší rozdíl mezi namodelovanou a skutečnou hladinou podzemní vody.

Při řešení zadané úlohy jsem se zaměřila na vertikální pukliny, neboť jsou na zájmové lokalitě výrazným fenoménem a v předchozích modelech realizovaných na tomto území jim nebyla věnována dostatečná pozornost. Jak píše ve své práci L. Rukavičková (2006) hrají ve svrchních 200 m masivu nejvýznamnější roli pukliny subhorizontální. Jejich důležitost pro proudění podzemní vody však spočívá převážně v propojování puklin vertikálních, čímž je umožněno zasakování a vystupování vody po puklinových systémech. Jako první přiblížení složité problematiky puklinového proudění je tedy vhodné zabývat se pouze puklinami vertikálními.

Z prostorového rozložení z-složky objemové hustoty toku v jednotlivých modelových vrstvách lze potvrdit, že největší drenážní účinek má v dané oblasti řeka Sázava - severní hranice území (viz příloha 7.2, 7.3).

Z výsledků zaměřujících se na dobu výstupu částic vody je patrné, že většina podzemní vody se z hloubky okolo 600 m pod terénem nedostane na povrch v reálném čase. Ovšem díky přítomnosti puklinových systémů se z některých bodů modelované oblasti dostává voda k povrchu překvapivě rychle, řádově v desítkách hodin. Body, u nichž byla sledovaná doba výstupu nejkratší, jsou v přímé korelaci s puklinovým systémem. Toto je patrné z mapy v příloze 8, kde se jedná o body č.: 2, 7, 47, 49. Je tedy zřejmé, že v případě budování jakýchkoliv zásobníků a úložišť v granitových masivech, je nutné klást patřičný důraz právě na zkoumání puklinové propustnosti původních hornin.

Místa, kde odtéká maximální množství podzemní vody z modelované oblasti, také korelují s výskytem puklinových systémů. Tam, kde dochází ke křížení erozní báze a puklinových pásem lze zaznamenat největšímu odvodňování oblasti, což potvrzuje dosavadní zkušenosti a předpoklady. Nejdůležitějším drenážním tokem zkoumané oblasti je podle předpokladů řeka Sázava, jejíž koryto je z větší části tektonicky predisponováno.

Výsledné řešení úlohy se značně shoduje s dříve realizovanými modely, které však celou oblast simulovaly jako průlinově propustnou (např. V. Frydrych (2004) nebo T. Dupalová (2006)). Mnou předkládaný model přináší oproti starším pracem nové poznatky o možné roli puklinových systémů v proudění podzemní vody granitovým masivem.

Zjištěné výsledky potvrdily, že proudění podzemní vody v rozpukaném masivu je velmi obtížně predikovatelná záležitost. Směrem do hloubky je proudění podzemní vody celkově pomalejší, přesto se však díky propojeným a otevřeným puklinovým systémům může za normálních tlakových podmínek podzemní voda dostávat z velkých hloubek relativně rychle na povrch.

11. Závěr

Byl vytvořen stacionární matematický model regionálního proudění podzemní vody v oblasti melechovského masivu s šesti vertikálními vrstvami. Model simuloval proudění podzemní vody jako proudění v předpokládaném puklinovém systému. Momentálně se jedná o nejlepší aproximaci puklinového proudění na melechovském masivu.

Matematický model potvrdil, že většina infiltrující vody zůstává ve svrchních částech masivu (zóna zvětralin a přípovrchového rozvolnění puklin) a jen velmi malý objem z této podzemní vody proniká po puklinových systémech do hlubších částí masivu. Hlavní infiltrační oblastí melechovského masivu je zároveň nejvýše položená oblast - okolí vlastního vrchu Melechov (709 m n.m). Nejvýznamnější drenážní linií oblasti je řeka Sázava.

Na základě výsledků realizovaného modelu je možné konstatovat, že většina podzemní vody se z hloubky okolo 600 m pod terénem (uvažovaná hloubka pro úložiště vysoce aktivních odpadů) nedostane na povrch v reálném čase. Ovšem díky přítomnosti puklinových systémů v tomto masivu některé částice doputují na hladinu podzemní vody řádově za dobu několik desítek hodin.

Přestože je velikost vertikální složky vektoru objemové hustoty toku velmi malá, existence otevřených a propojených puklinových systémů dovoluje i překvapivě rychlé proudění podzemních vod z velkých hloubek až k povrchu oblasti.

Jak je patrné z výše uvedeného, proudění podzemní vody v rozpukaných masivech je velmi obtížně predikovatelná záležitost a při budování podzemních zásobníků a úložišť jakéhokoliv typu je žádoucí věnovat problematice puklinových systémů zvýšenou pozornost.

Pro další zkvalitnění výsledků modelu by bylo vhodné zpřesnit geometrii puklinové sítě, k tomu však neexistují podklady. Bylo by rovněž vhodné získat více dat z hlubších částí masivu o možném rozevření puklin, případně o šířkách poruchových pásem. Pro možnost využití kalibrace modelu pomocí množství vody drénované říčními toky, by bylo vhodné provést měření průtoku na vodních tocích uvnitř oblasti.

Seznam literatury:

Breiter K.(2006): Geologická dokumentace a vyhodnocení vrtných prací (závěrečná zpráva), MS SÚRAO, Praha

Diersch H.-J.G. (2005): User´s Manual, WASY Software FEFLOW 5.2, Berlin

Diersch H.-J.G. (2005): Reference Manual, WASY Software FEFLOW 5.2, Berlin

Dupalová T. (2006): Matematický model regionálního proudění podzemní vody v oblasti melechovského masivu, diplomová práce, Karlova Univerzita, Přírodovědecká fakulta, Praha

Fottová D. et al. (2000): Hodnocení změn látkových toků a kritických zátěží v síti malých povodí GEOMON v České republice, ČGÚ, Praha

Frydrych V. (2004): PADAMOT - Mathematical modellig of grounwater flow in fracture rocks at Melechov massif, Charles University, Faculty of Science, Praha

Gustafson G., Liedholm (1989): Groundwater FlowCalculation on a Regional Scale at The Swedish Hard Rock Laboratory, SKB Progress Report 25-88-17, Stockholm

Havlík M. (2001):Different Approaches in Numerical Modelling of Groundwater Flow in Hard Rocks – Parametric Case Study at the Melechov Massif , Charles University, Faculty of Science, Praha

Karous M., Görtler R., Nikl P. (2001): Regionální geofyzikální profilová měření na lokalitě melechovský masiv, MS SÚRAO, Praha

Krásný J. et al. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. ČHMÚ, Praha

Krásný J. (2004): Hydrogeologic setting of the Melechov massif region: Considerations on deep repositories possibilities, MS ČGU, Praha

Lysenko V. (2004): Vyhodnocení puklinové sítě z leteckých snímků v okolí Melechova, MS ČGU, Praha

Mísař Z. et. al. (1983): Geologie ČSSR I., SPN, Praha

Mlčoch B., Breiter K., Schulmannová B. (2000): Geologická mapa melechovského masívu 1:10000, MS ČGÚ, Praha

Mls, J. (1996): A Mathematical Model of Combined Flow in Fractures and Overlying Layers, Acta Universitatis Carolinae Geologica, 40, 151-158

Myslil V. et al. (1986): Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR 1:200 000, list 23 Jihlava, ÚÚG, Praha

Procházka J. et al. (1998): 3. etapa geologicko výzkumných prací pro ukládání vysoce aktivního odpadu, Souborná zpráva za období 1992 – 1997, MS ČGÚ, Praha

Procházka J. a kol. (2001): Vymezení ploch perspektivních pro 2. etapu výběru testovacích polygonů v prostoru melechovského masívu (souborná zpráva projektu), ČGÚ, MS SÚRAO, Praha

Procházka J. a kol. (2006): Výběr polygonů na testovací lokalitě - 2. etapa. Závěrečná zpráva projektu, MS SÚRAO, Praha

Rajlich P. (2001): Strukturně geologické mapování pro lokalizaci testovacích polygonů v oblasti melechovského masívu, MS SÚRAO, Praha

Rukavičková L. (2001): Účelová hydrogeologická mapa melechovského masívu 1:25 000 (Zpráva o hydrogeologickém výzkumu), ČGÚ Praha

Rukavičková L. (2006): Vývoj metodiky hydraulického testování rozpukaného masívu, autoreferát disertační práce, Technická universita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Liberec

Šrámek J., Sedlák K.(2001): Regionální sv.-jz. tíhový profil na lokalitě melechovský masiv, MS SÚRAO, Praha

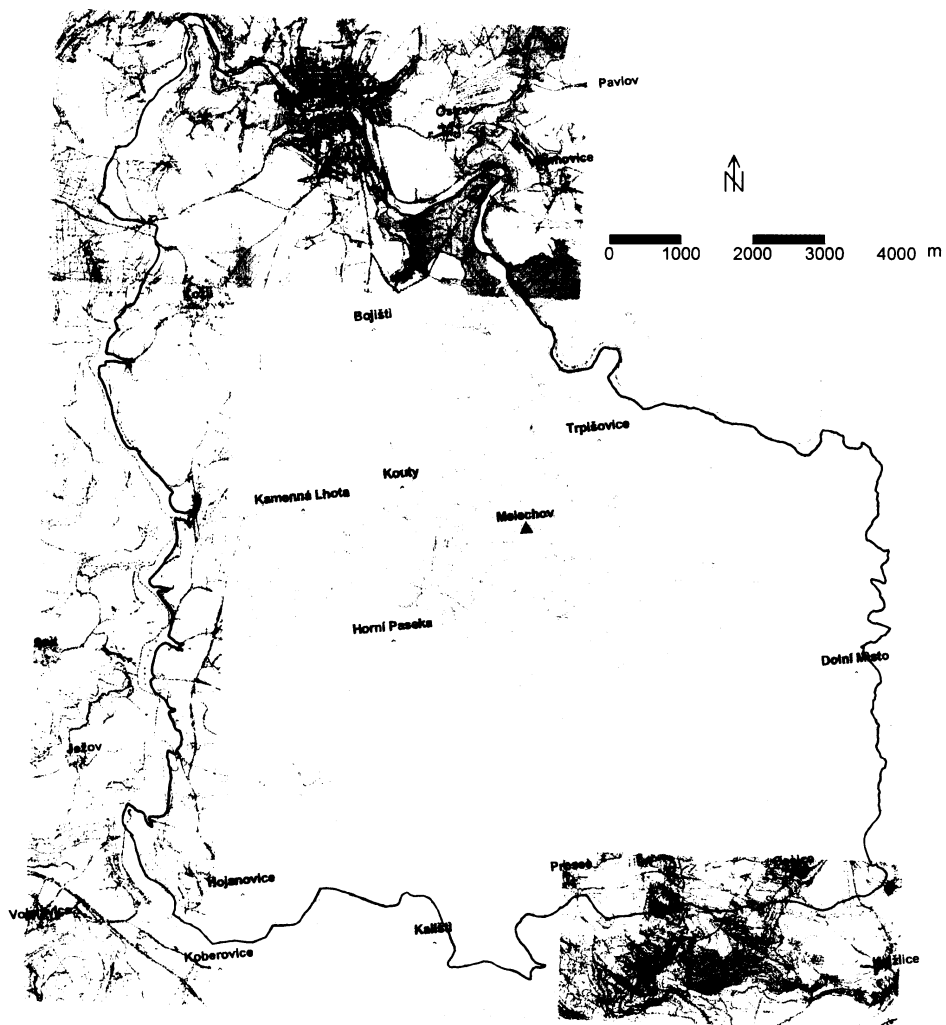
Včíslová B. (1991): Hydrogeologická syntéza východní části moldanubika, MS Geofond, Praha

Veselý M., Mls J. (2004): Water Flow in Single Fracture with Variable Aparture, Journal of Hydrology and Hydromechanics 52., 2, 77-90

Zelinka Z. (2000): Hydrogeologický výzkum melechovského masivu jako testovací lokality geologického výzkumu a vývoje hlubinného úložiště vysoce aktivního odpadu. Režimní měření na lokalitě melechovský masiv. Zpráva za období 1994-1999. MS Vodní zdroje GLS Praha a.s. Praha

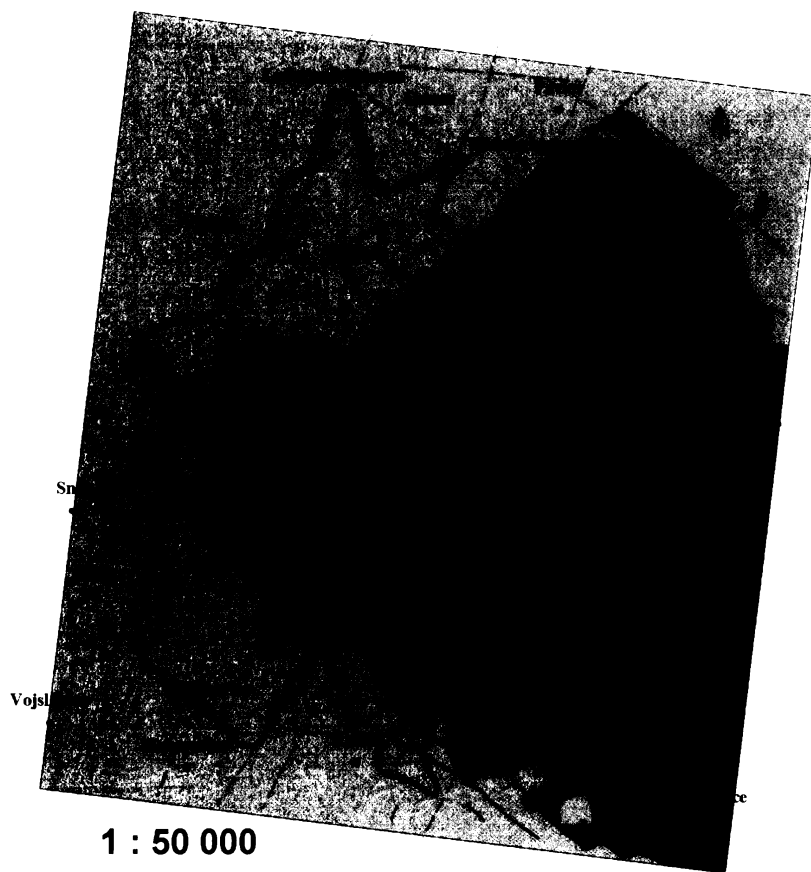
Přílohová část

Příloha 1: Topografická mapa zájmového území













Modrá linie znázorňuje přibližnou hranici zájmového území.

Příloha 2: Geologická mapa zájmového území



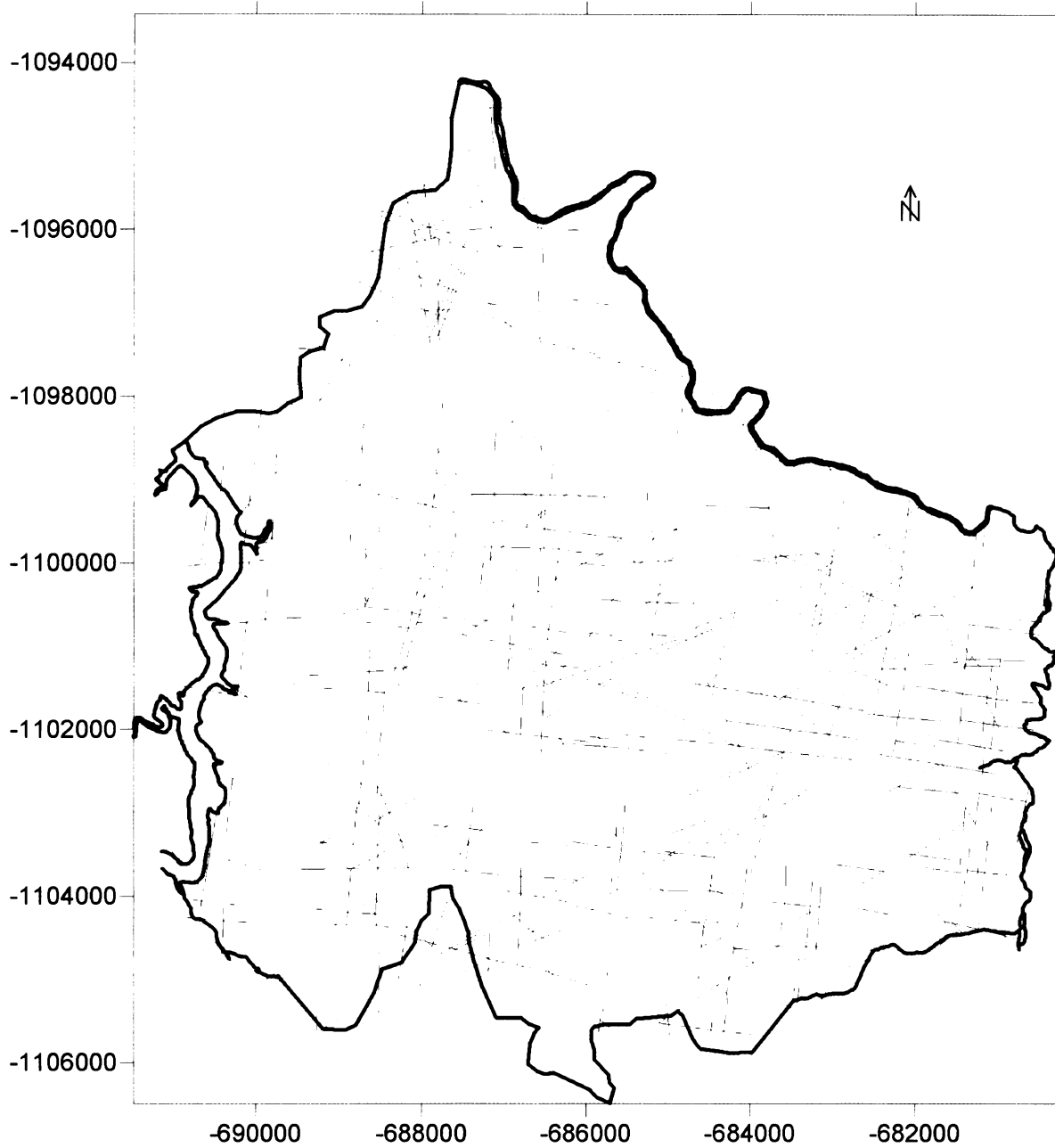
1 : 50 000

0 2000 4000 m

	lineamenty zjištěné geofyz. měření		jemnozrný biotit-muskovitický granit (typ Stvoridla)
	tektonické linie		hrubozrný biotit-muskovitický granit (typ Melechov)
	kremenné zily		jemnozrný muskovit-biotitický granit (typ Lipnice)
	pegmatity, aplity		strednezrný biotit-muskovitický granit (typ Kouty)
	leukokrání muskovitický granit		muskovit-biotitické pararuly

Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území.

Příloha 3: Využitá puklinová síť



Modrá Linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené Linie vyznačují puklinovou síť.

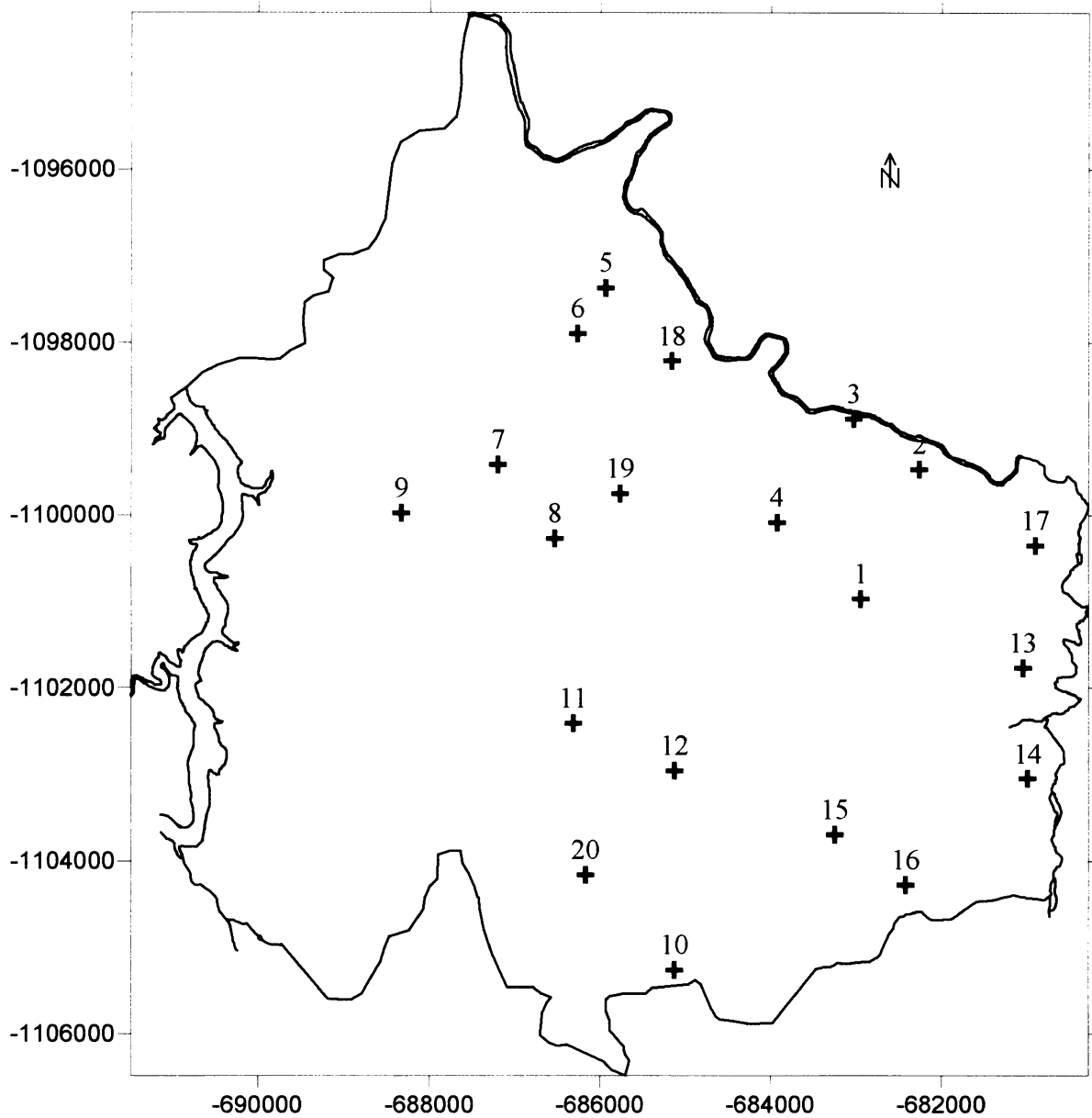
Příloha 4: Informace o pozorovacích objektech použitých při kalibraci

4.1 Přehled kalibračních bodů

bod	lokality	č. mapy 1:10000	souřadnice S-JTSK		nadmořská výška objektu (m.n.m.)	hloubka objektu (m)	nadmoř. výška hladiny podz.v. (m.n.m.)	číslo slice	modelová hladina (m.n.m.)	rozdíl model. a skuteč. hladiny (m)	nadm. výška hladiny - vzorec (m.n.m.)	rozdíl skut. a vypočt. hladiny (m)
			X	Y								
1	Mezíklasti	23-21-06	-682944,89	-1100966	469,5	4,1	466,9	2	467,7	0,8	466,9	0,0
2	Smrčná chata č. 101	23-21-06	-682261,64	-1099468	416,0	8,5	411,2	2	424,5	13,3	413,4	-2,2
3	Smrčná č.p. 7	23-21-06	-683025,7	-1098881	385,0	6,4	380,0	2	391,1	11,1	382,3	-2,3
4	Koňkovic č.p. 19	23-21-06	-683924,56	-1100085	514,0	5,9	508,4	2	497,2	-11,2	511,5	-3,1
5	Veliká	23-12-10	-685936,29	-1097367	421,0	13,3	416,1	2	415,4	-0,7	418,4	-2,3
6	Mstislavice	23-12-10	-686264,46	-1097894	430,5	2,9	430,0	2	430,4	0,4	427,9	2,1
7	Kouty	23-12-10	-687202,37	-1099412	497,0	12,0	487,5	2	488,4	0,9	494,5	-7,0
8	Kouty č.p. 66	23-12-10	-686532,9	-1100267	537,0	4,4	537,0	2	538,2	1,2	534,5	2,5
9	Kamenná Lhota č.p. 50	23-12-10	-688328,92	-1099977	526,5	2,3	525,1	2	516,8	-8,3	524,0	1,1
10	Proseč	23-21-16	-685126,22	-1105255	582,0	3,2	580,7	2	582,5	1,8	579,5	1,2
11	Rejčkov	23-12-15	-686314,29	-1102405	596,0	5,7	591,1	2	598,8	7,7	593,6	-2,5
12	Dobrá Voda	23-12-15	-685122,4	-1102954	563,0	3,9	559,7	2	566,7	7,0	560,5	-0,8
13	Dolní Město	23-21-11	-681054,19	-1101766	456,0	4,1	455,7	2	453,3	-2,4	453,4	2,3
14	Dolní Město č.p. 239	23-21-11	-680994,69	-1103046	446,0	16,0	440,1	2	454,6	14,5	443,4	-3,3
15	Malé Křepiny	23-21-11	-683249,66	-1103690	528,0	3,4	526,6	2	526,8	0,2	525,5	1,1
16	Bystřé	23-21-11	-682420,55	-1104270	502,0	2,5	501,3	2	500,1	-1,2	499,5	1,8
17	Kochánov	23-21-06	-680911,26	-1100349	446,0	22,0	442,9	3	429,5	-13,4	443,4	-0,5
18	Dobrovítova Lhota č. p. 27	23-12-10	-685161,38	-1098209	473,0	30,0	460,0	3	436,4	-23,6	470,4	-10,4
19	Kostení les (Mel-2)	23-12-10	-685767,27	-1099752	600,9	200	593,5	4	605,0	11,5	598,5	-5,0
20	Zadní les (Mel-4)	23-12-15	-686174,45	-1104157	583,3	200	576,9	4	589,0	12,1	580,8	-3,9

Příloha 4: Informace o pozorovacích objektech použitých při kalibraci

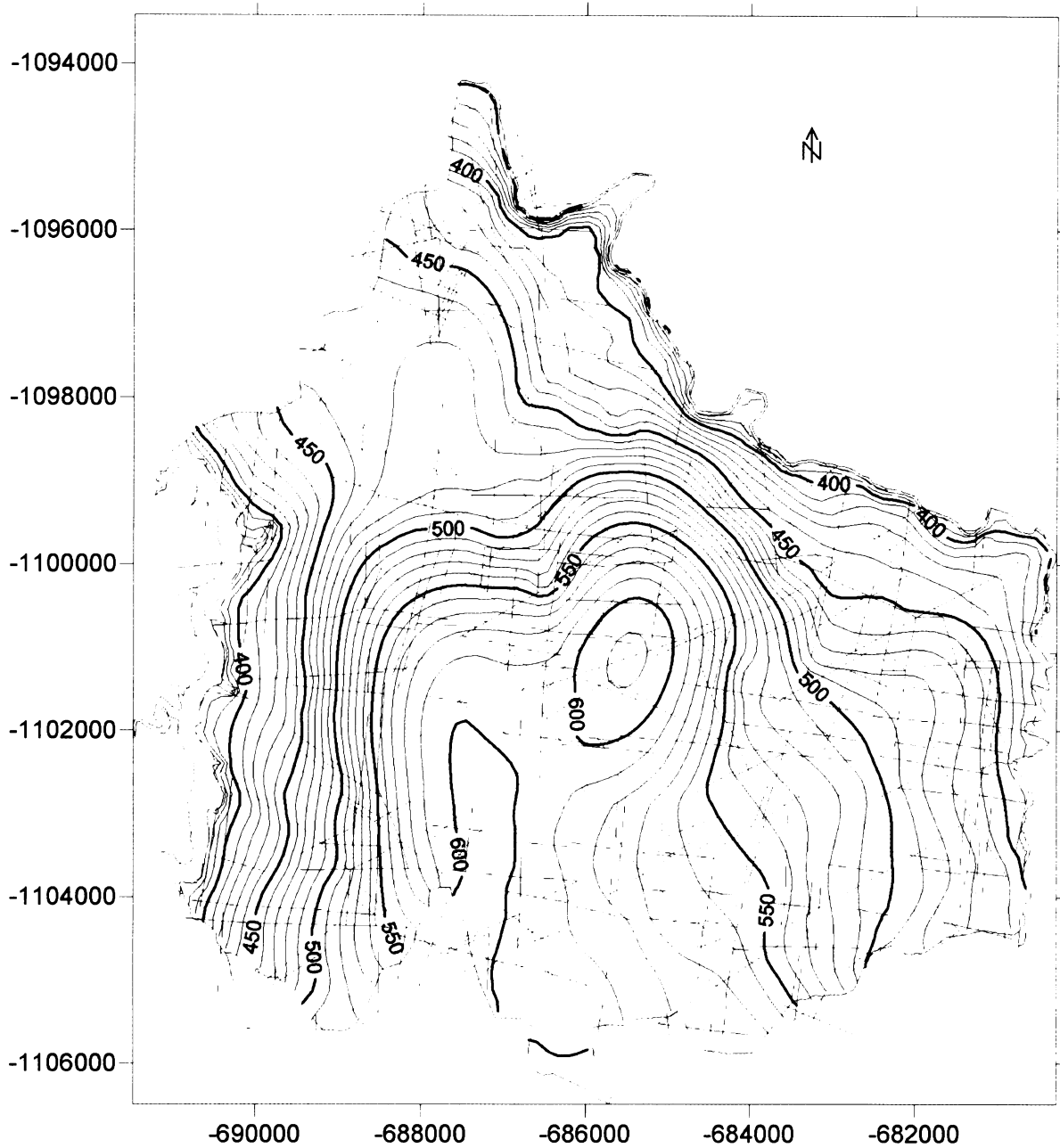
4.2 Mapa kalibračních bodů



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Oranžové křížky s čísly vyznačují polohu jednotlivých objektů využitých pro kalibraci.

Příloha 5: Mapy izolinií hydraulických výšek

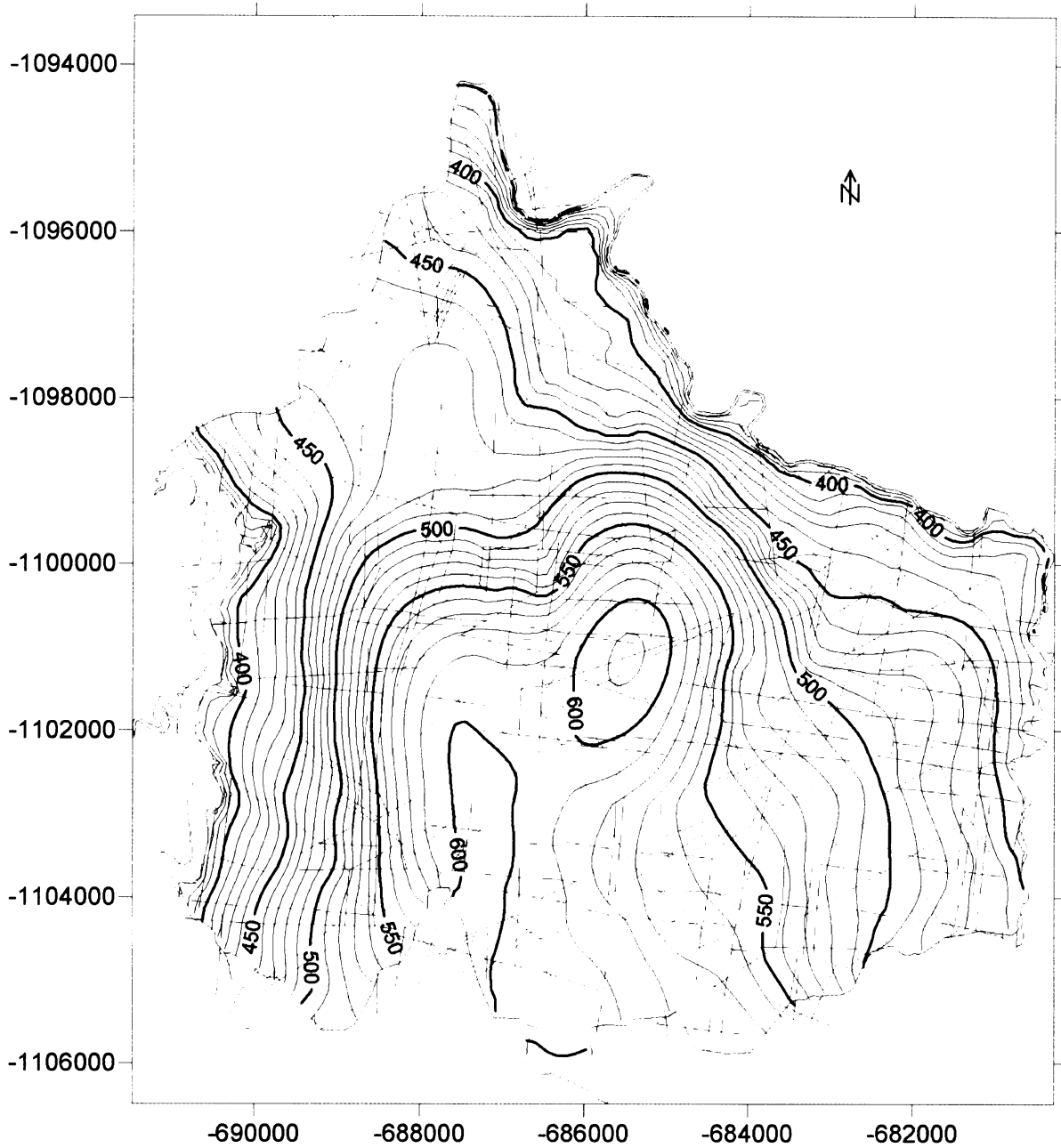
5.1 Mapa izolinií hydraulických výšek v 1. modelové vrstvě



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené linie vyznačují puklinovou síť. Černě jsou zaznamenány izoliny hydraulické výšky.

Příloha 5: Mapy izolinií hydraulických výšek

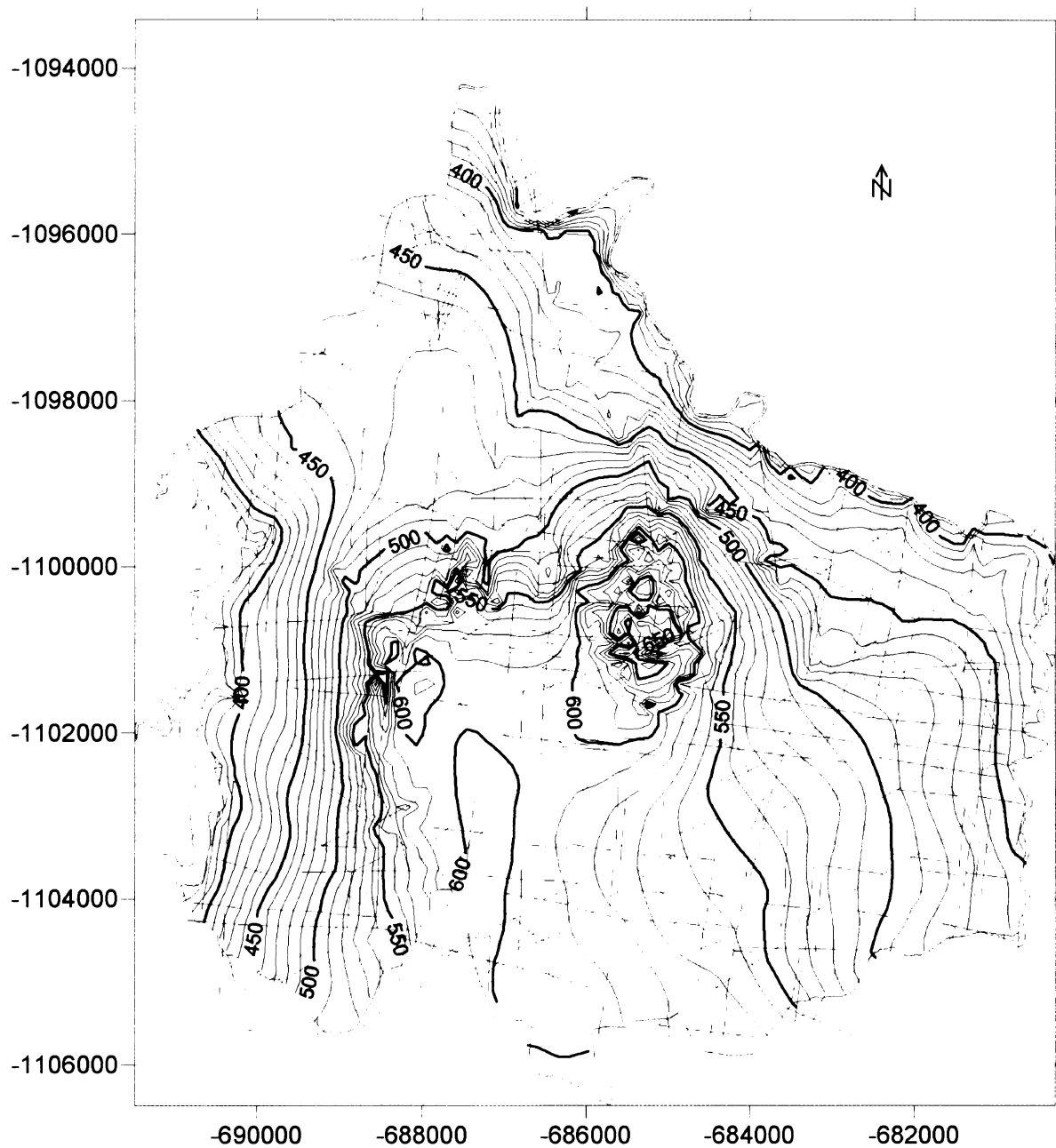
5.2 Mapa izolinií hydraulických výšek ve 2. modelové vrstvě



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené linie vyznačují puklinovou síť. Černě jsou zaznamenány izolinie hydraulické výšky.

Příloha 5: Mapy izolinií hydraulických výšek

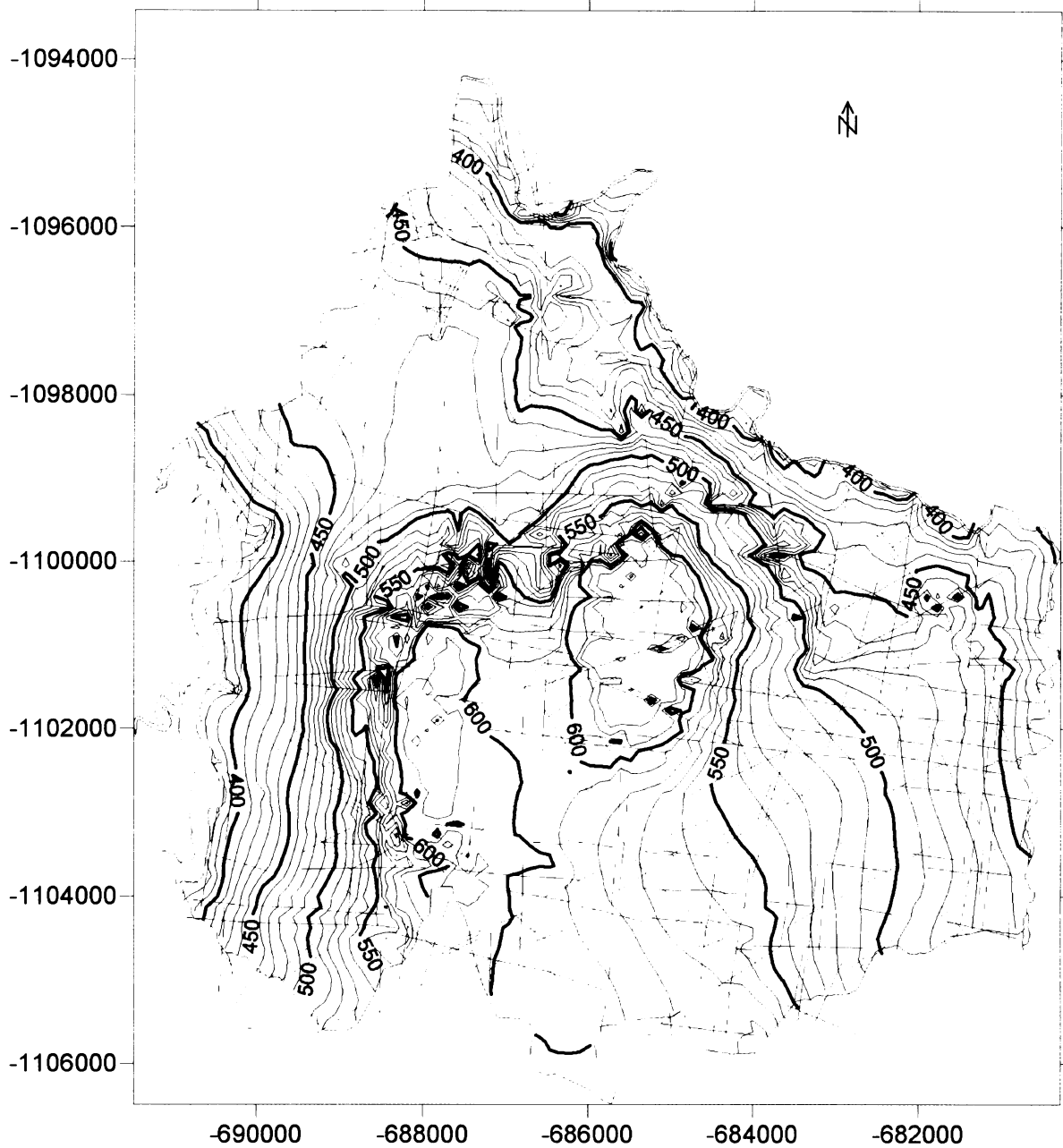
5.3 Mapa izolinií hydraulických výšek ve 3. modelové vrstvě



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené linie vyznačují puklinovou síť. Černě jsou zaznamenány izolinie hydraulické výšky.

Příloha 5: Mapy izolinií hydraulických výšek

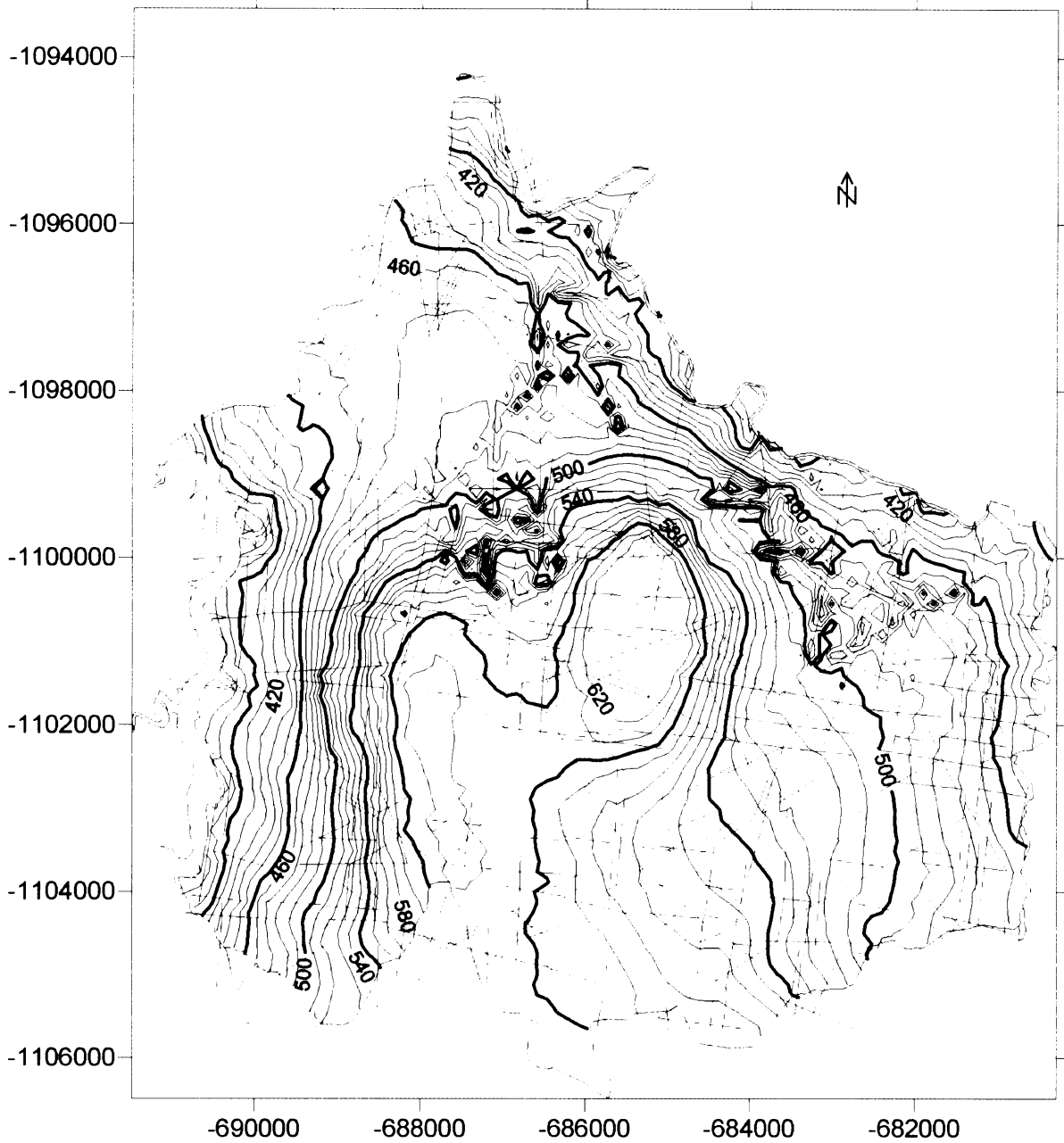
5.4 Mapa izolinií hydraulických výšek ve 4. modelové vrstvě



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené linie vyznačují puklinovou síť. Černě jsou zaznamenány izolinie hydraulické výšky.

Příloha 5: Mapy izolinií hydraulických výšek

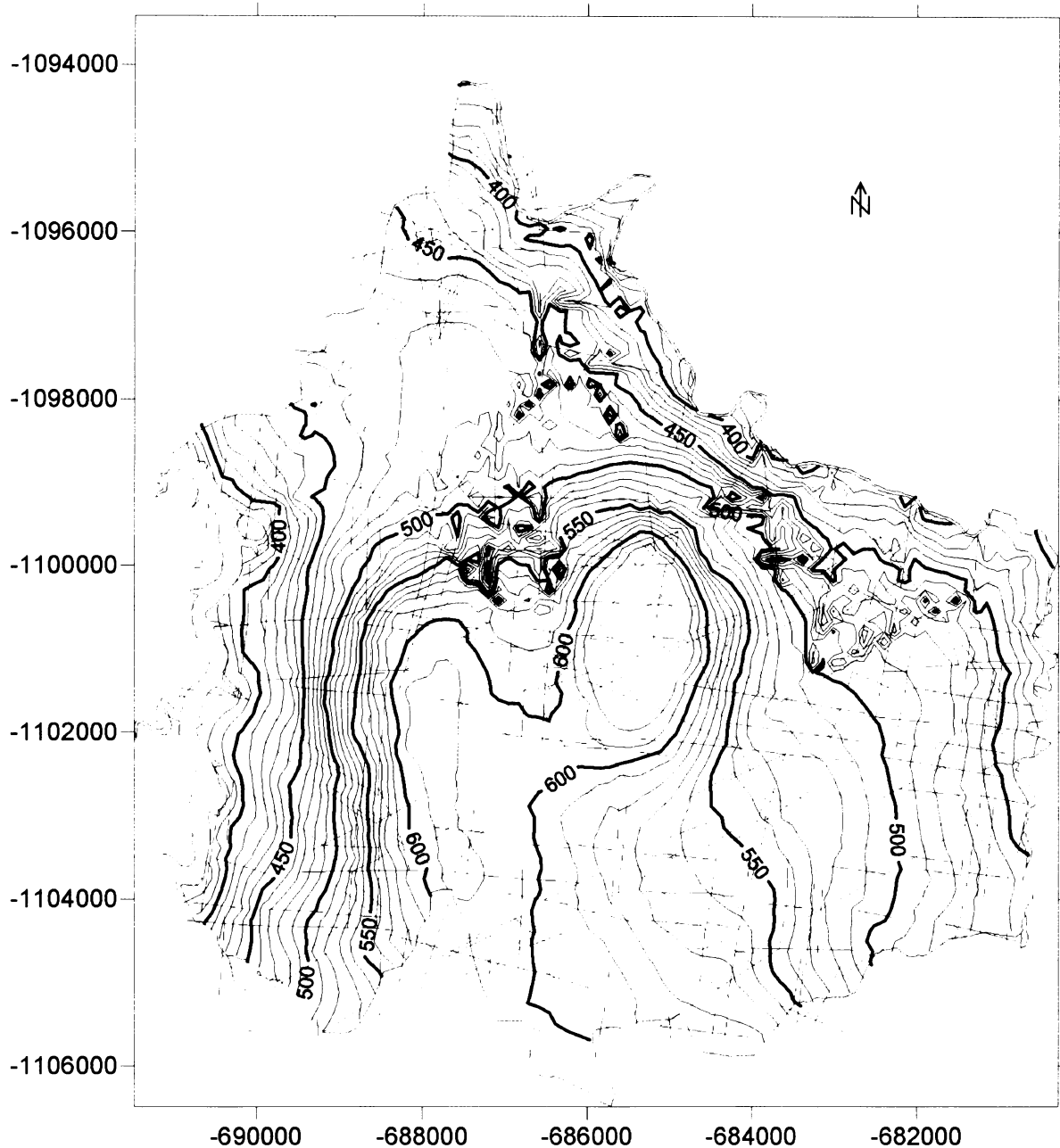
5.5 Mapa izolinií hydraulických výšek v 5. modelové vrstvě



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené linie vyznačují puklinovou síť. Černě jsou zaznamenány izolinie hydraulické výšky.

Příloha 5: Mapy izolinií hydraulických výšek

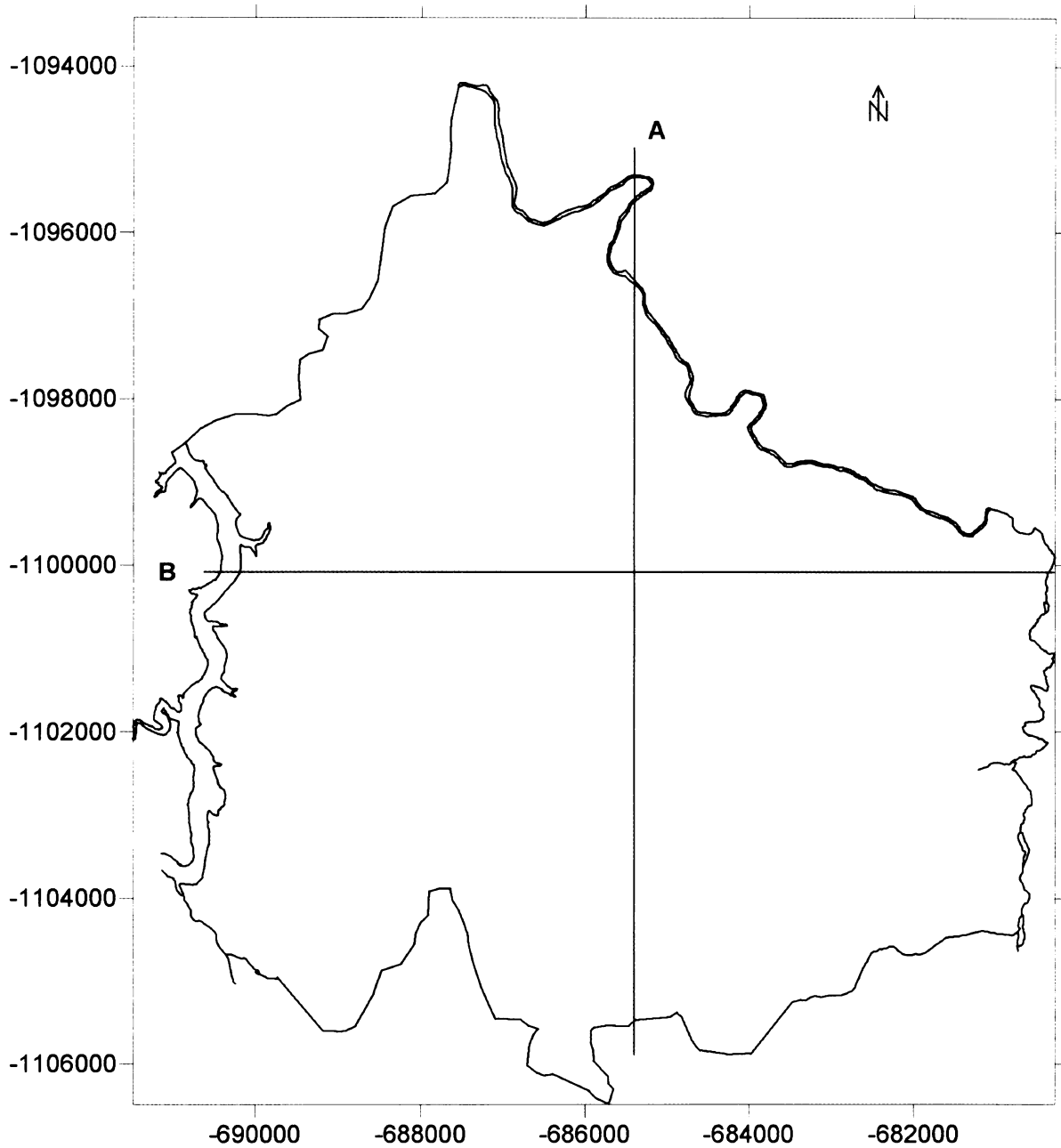
5.6 Mapa izolinií hydraulických výšek v 6. modelové vrstvě



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené linie vyznačují puklinovou síť. Černě jsou zaznamenány izolinie hydraulické výšky.

Příloha 6: Vertikální řezy modelovanou oblastí

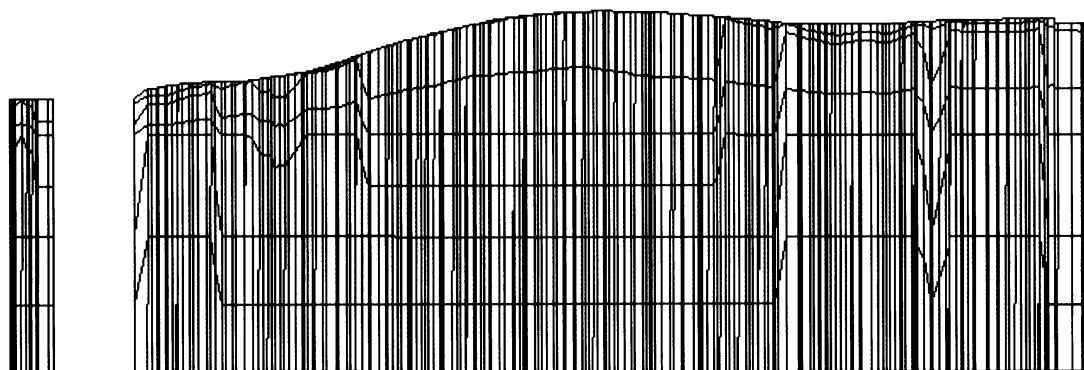
6.1 Poloha řezů A a B



Modrá line znázorňuje hranici zájmového území. Fialové line znázorňují pozici vertikálních řezů A a B.

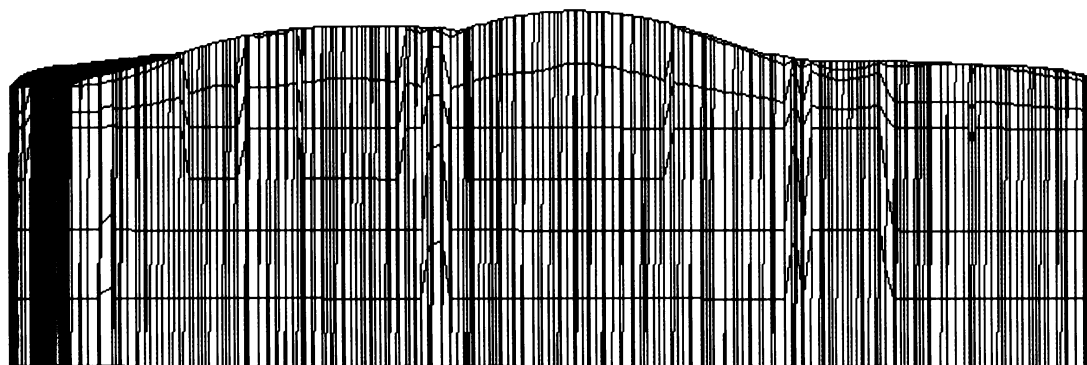
Příloha 6: Vertikální řezy modelovanou oblastí

6.2 Vertikální řez A (směr S-J)



řez A

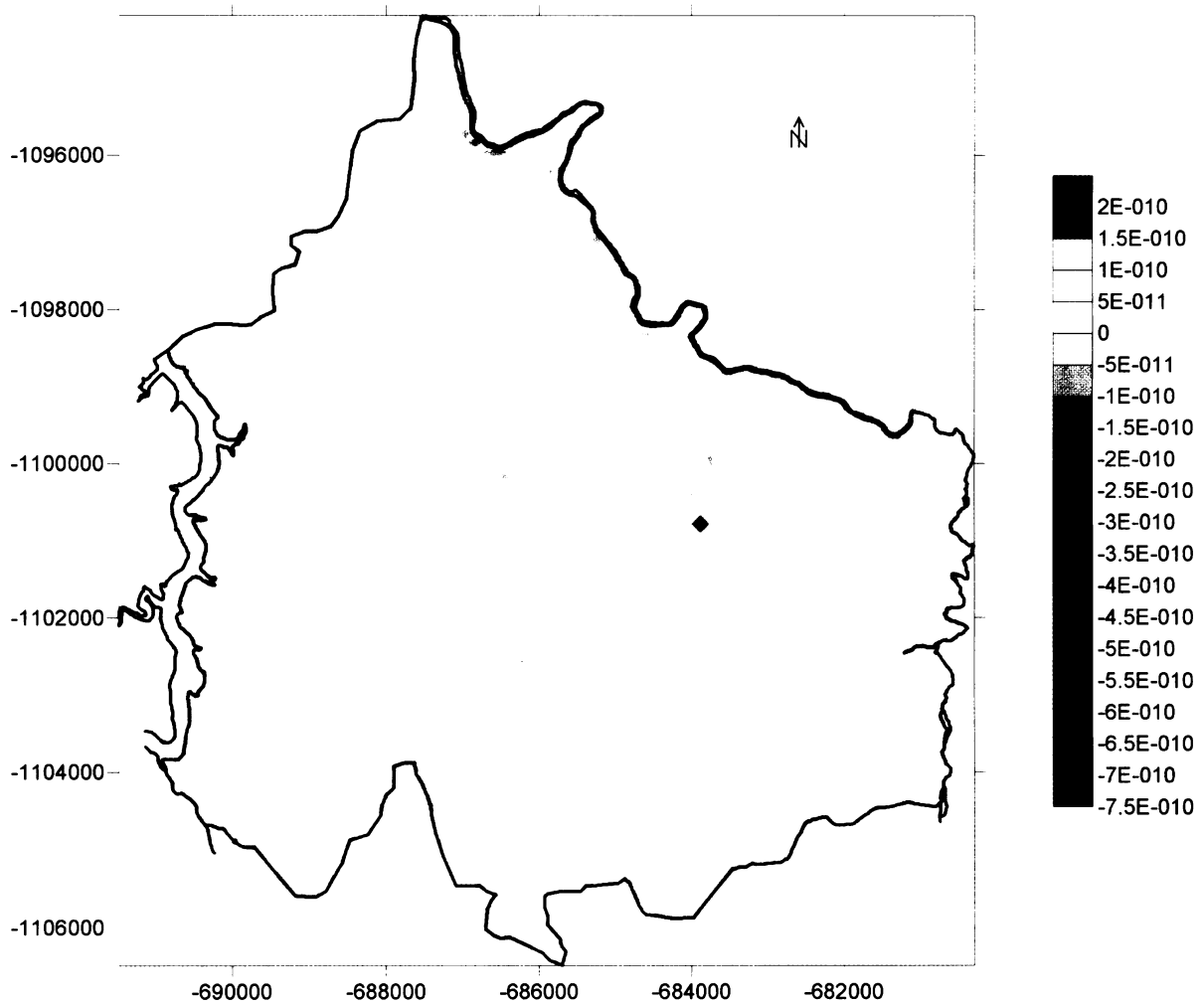
6.3 Vertikální řez B (směr Z-V)



řez B

Příloha 7: Mapy z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku

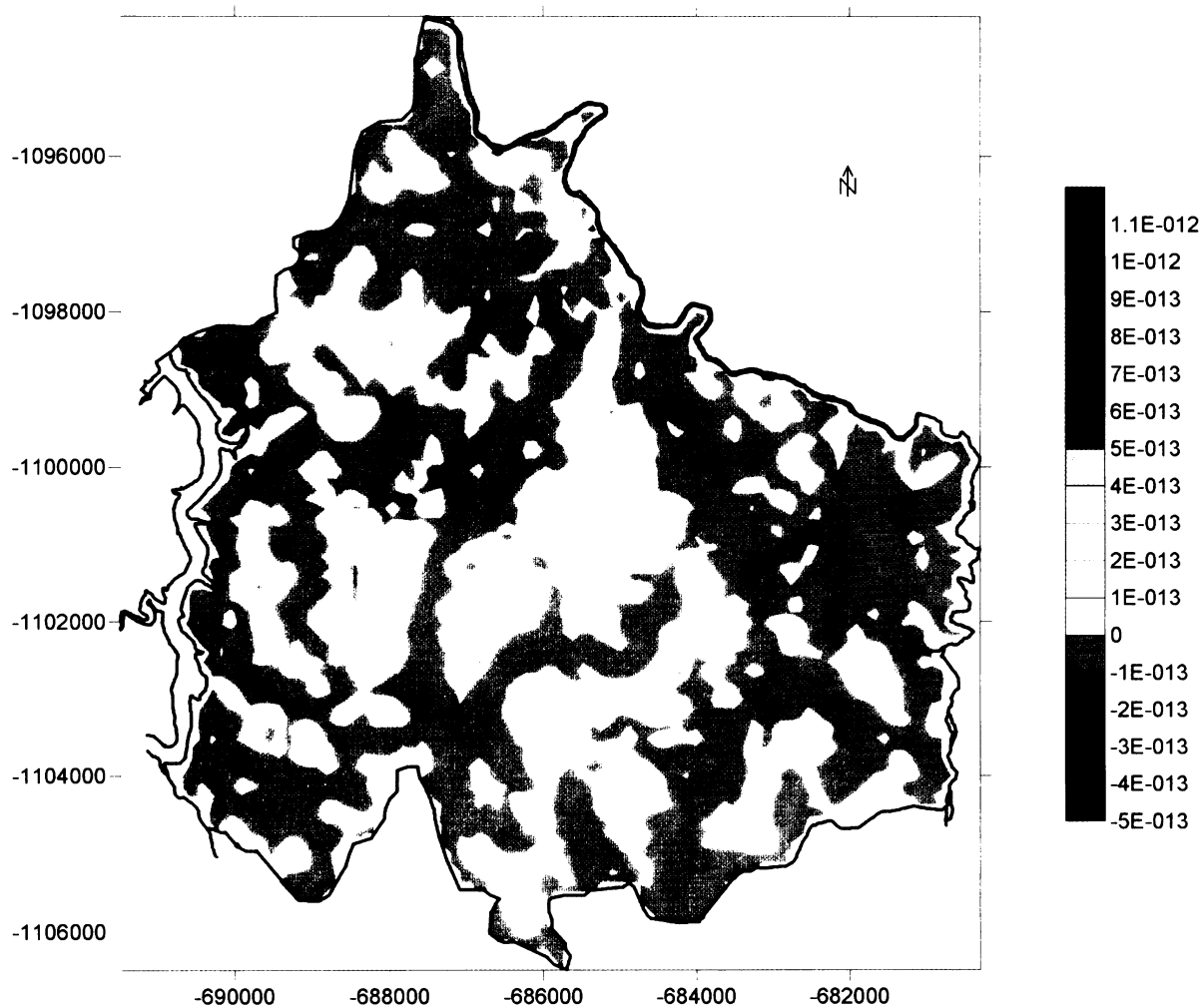
7.1 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku v 1. modelové vrstvě



Hnědá linie znázorňuje hranici zájmového území. Barevnou škálou je vyznačen rozsah z-složky vektoru objemové hustoty toku.

Příloha 7: Mapy z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku

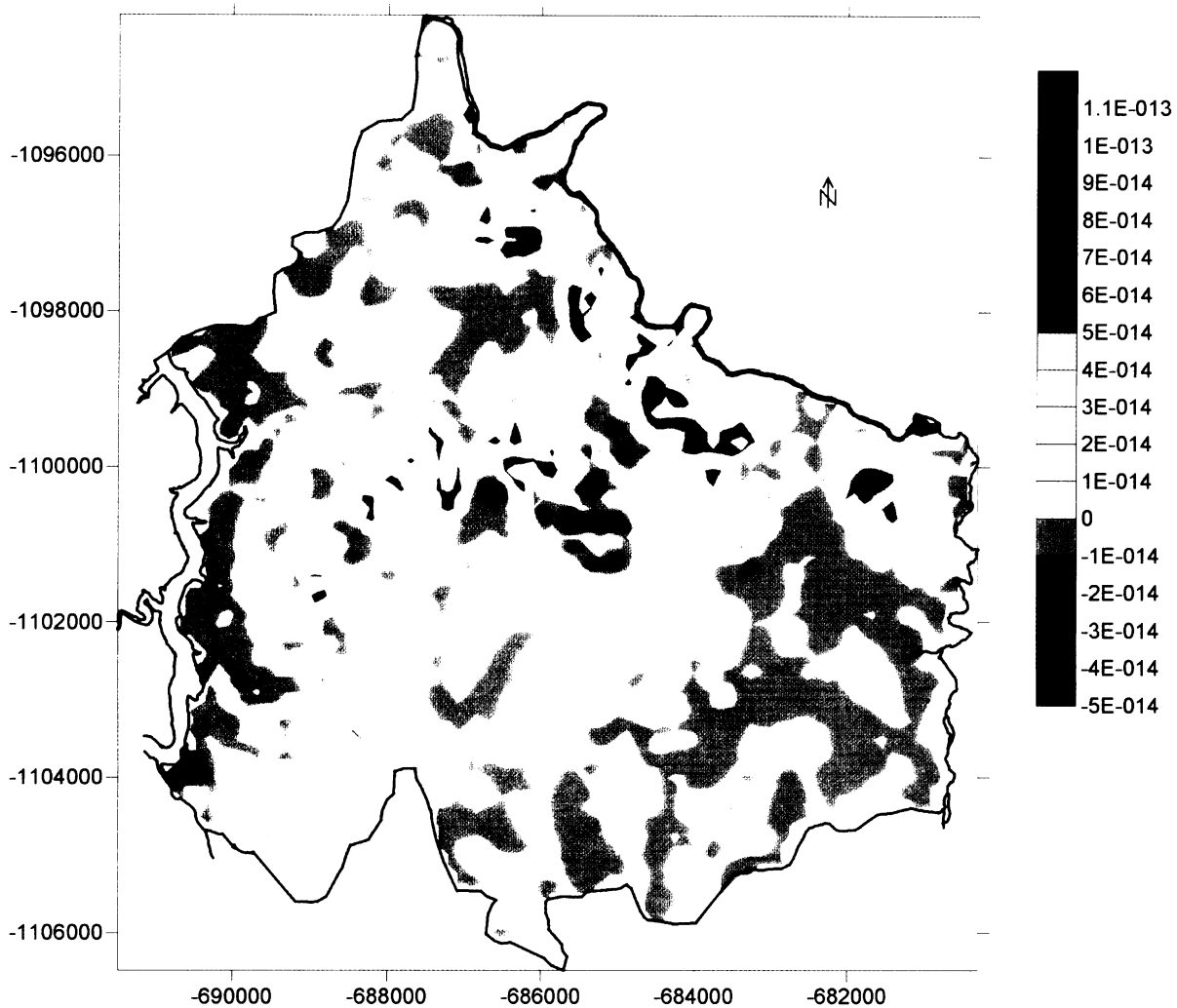
7.2 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku ve 2. modelové vrstvě



Hnědá linie znázorňuje hranici zájmového území. Barevnou škálou je vyznačen rozsah z-složky vektoru objemové hustoty toku.

Příloha 7: Mapy z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku

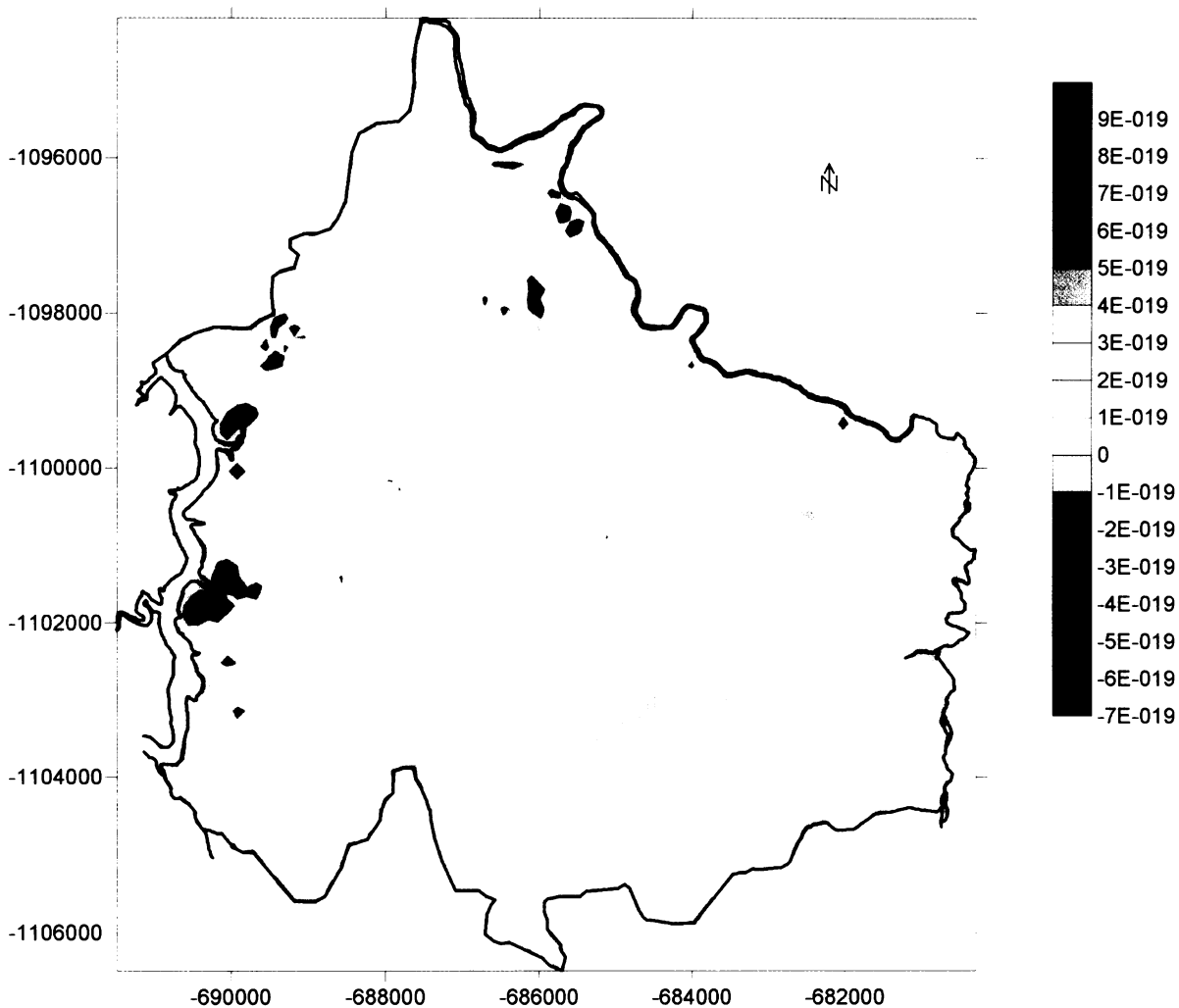
7.3 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku ve 3. modelové vrstvě



Hnědá linie znázorňuje hranici zájmového území. Barevnou škálou je vyznačen rozsah z-složky vektoru objemové hustoty toku.

Příloha 7: Mapy z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku

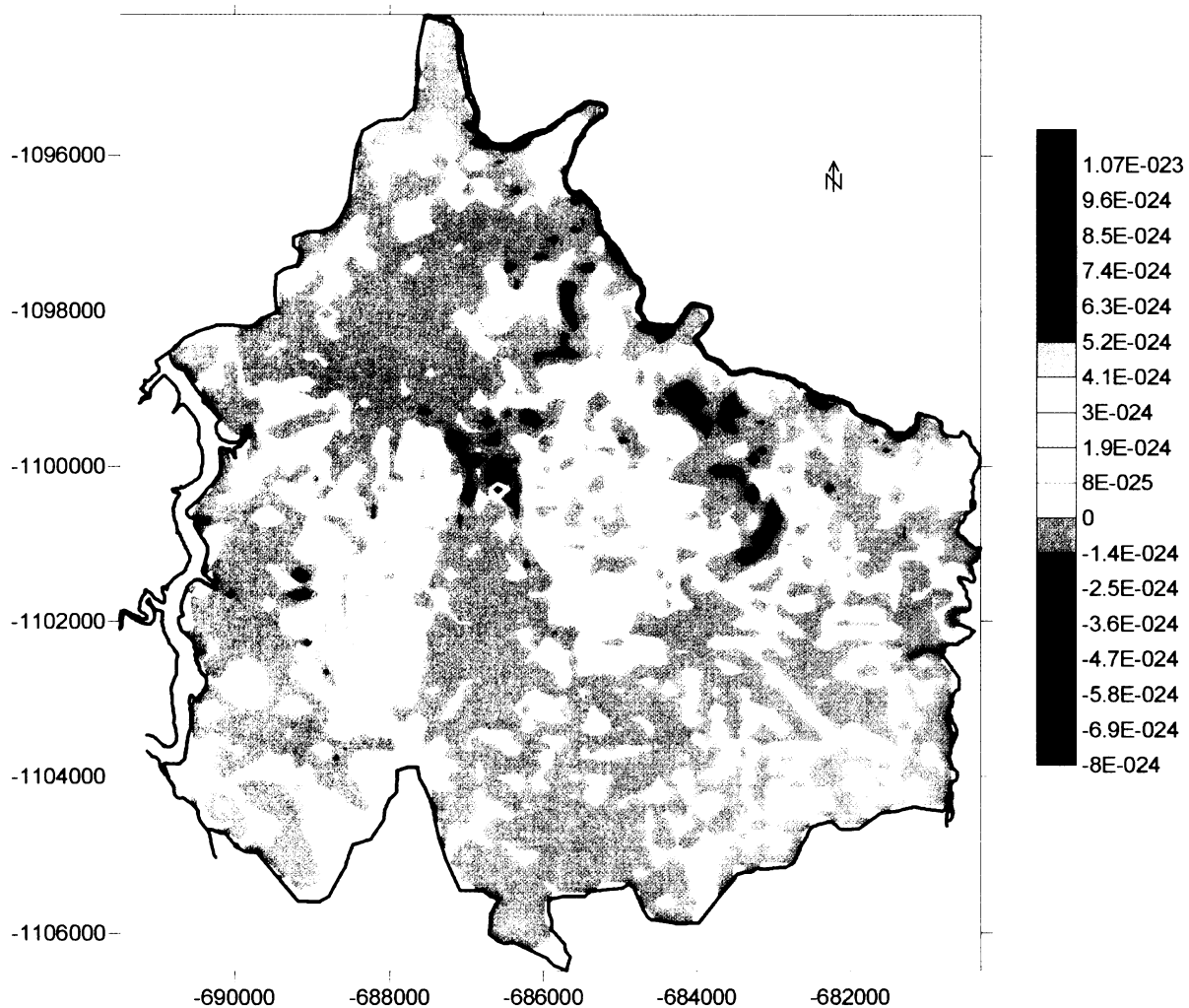
7.4 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku ve 4. modelové vrstvě



Hnědá linie znázorňuje hranici zájmového území. Barevnou škálou je vyznačen rozsah z-složky vektoru objemové hustoty toku.

Příloha 7: Mapy z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku

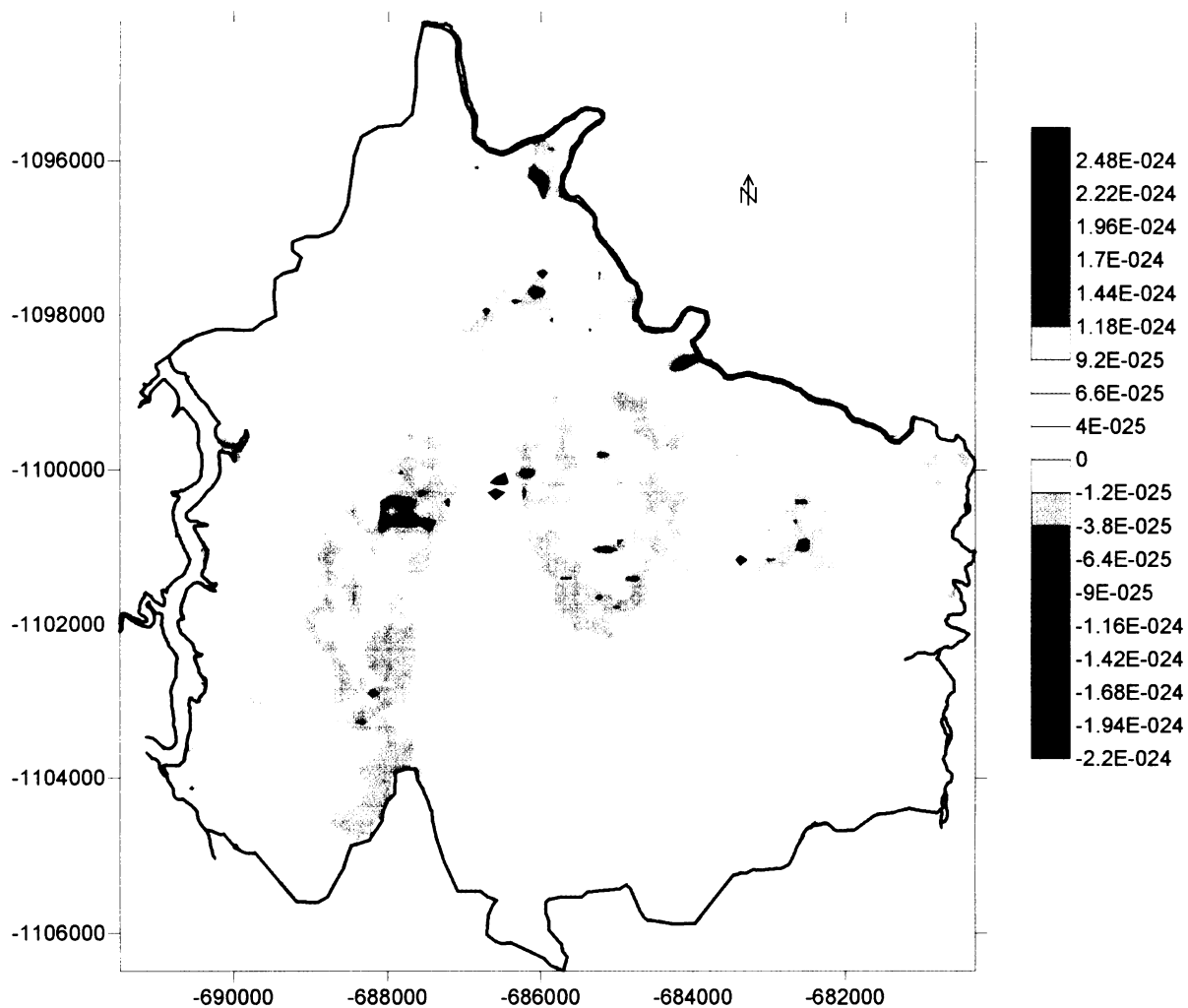
7.5 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku v 5. modelové vrstvě



Hnědá linie znázorňuje hranici zájmového území. Barevnou škálou je vyznačen rozsah z-složky vektoru objemové hustoty toku.

Příloha 7: Mapy z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku

7.6 Mapa z-souřadnic vektoru objemové hustoty toku v 6. modelové vrstvě



Hnědá linie znázorňuje hranici zájmového území. Barevnou škálou je vyznačen rozsah z-složky vektoru objemové hustoty toku.

Příloha 8: Doba výstupu částic

8.1 Informace o zkoumaných bodech

číslo bodu	iniciální souřadnice X	iniciální souřadnice Y	iniciální souřadnice Z (m)	konečná souřadnice Z (m)	čas výstupu částice (den)
1	-685917,4	-1095828,1	-254,7	-251,9	$1,48 \cdot 10^9$
2	-685917,4	-1096127,0	-261,3	130,7	2,34
3	-685917,4	-1096441,9	-266,5	-227,7	$7,79 \cdot 10^{10}$
4	-685917,4	-1096805,0	-267,7	276,2	207,67
5	-685917,4	-1097131,6	-266,6	102,1	$6,20 \cdot 10^8$
6	-685917,4	-1097482,9	-274,0	180,9	$2,68 \cdot 10^6$
7	-685917,4	-1097850,4	-280,1	226,1	16,29
8	-685917,4	-1098156,6	-275,5	-275,5	$3,23 \cdot 10^8$
9	-685917,4	-1098576,5	-282,5	-256,7	$1,70 \cdot 10^{10}$
10	-685917,4	-1098854,9	-285,5	-261,3	$1,90 \cdot 10^{10}$
11	-685917,4	-1099117,4	-289,8	-268,6	$1,67 \cdot 10^{10}$
12	-685917,4	-1099403,2	-281,7	-177,0	13742,96
13	-685917,4	-1099798,3	-280,2	-291,5	$2,54 \cdot 10^8$
14	-685917,4	-1100108,9	-280,5	-400,9	$2,97 \cdot 10^8$
15	-685917,4	-1100471,9	-281,7	-270,1	$3,06 \cdot 10^8$
16	-685917,4	-1101157,2	-276,9	-269,8	$5,02 \cdot 10^8$
17	-685917,4	-1101508,6	-284,3	-325,8	$3,05 \cdot 10^6$
18	-685917,4	-1102097,6	-287,6	-375,0	$3,08 \cdot 10^6$
19	-685917,4	-1102460,7	-288,8	-330,5	$1,00 \cdot 10^{10}$
20	-685917,4	-1102828,1	-294,9	-333,6	$2,46 \cdot 10^9$
21	-685917,4	-1103154,7	-293,9	-295,3	$3,88 \cdot 10^9$
22	-685917,4	-1103520,7	-279,0	-383,9	$1,78 \cdot 10^9$
23	-685917,4	-1103863,4	-276,6	-280,7	$1,82 \cdot 10^9$
24	-685917,4	-1104217,7	-268,0	-270,9	$2,72 \cdot 10^8$
25	-685917,4	-1104738,2	-271,8	-275,2	$1,27 \cdot 10^{10}$
26	-685917,4	-1105064,8	-270,7	-257,0	$8,47 \cdot 10^9$
27	-685917,4	-1105416,2	-278,2	-246,9	$1,02 \cdot 10^{10}$
28	-685917,4	-1106003,8	-260,5	-263,0	$1,88 \cdot 10^9$
29	-685917,4	-1106266,2	-264,9	-249,9	$2,49 \cdot 10^{10}$
30	-690225,3	-1100972,8	-264,5	-263,7	$3,48 \cdot 10^8$

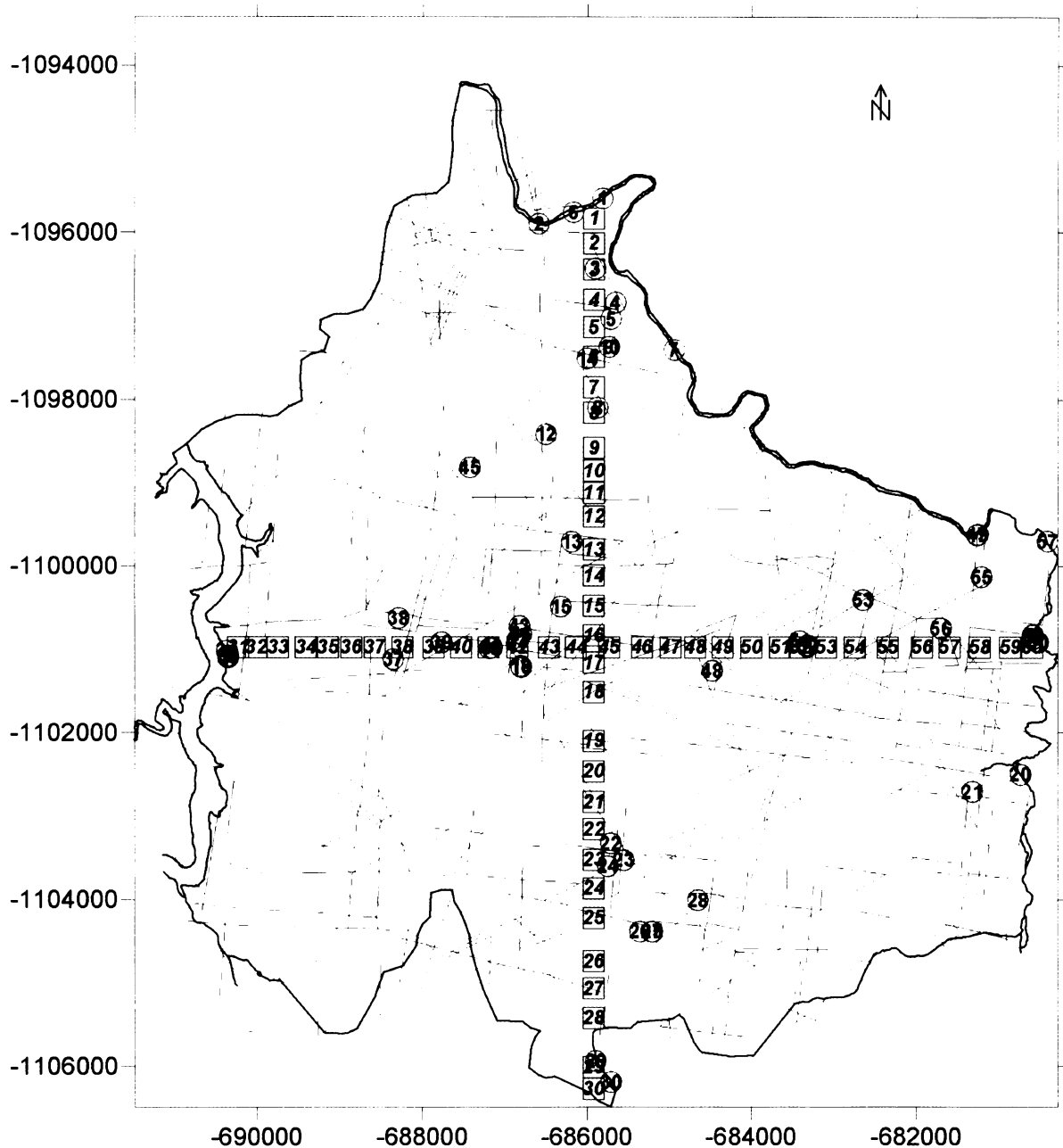
Příloha 8: Doba výstupu částic

8.1 Informace o zkoumaných bodech - dokončení

číslo bodu	iniciální souřadnice X	iniciální souřadnice Y	iniciální souřadnice Z (m)	konečná souřadnice Z (m)	čas výstupu částice (den)
31	-690008,8	-1100972,8	-262,6	-262,7	$1,97 \cdot 10^9$
32	-689743,4	-1100972,8	-266,5	-267,2	$3,62 \cdot 10^9$
33	-689410,0	-1100972,8	-261,3	-264,2	$4,70 \cdot 10^9$
34	-689142,0	-1100972,8	-266,1	-270,9	$5,47 \cdot 10^9$
35	-688859,6	-1100972,8	-270,5	-273,7	$6,22 \cdot 10^9$
36	-688577,2	-1100972,8	-274,8	346,7	47,23
37	-688244,1	-1100972,8	-274,8	94,8	60546,52
38	-687863,0	-1100972,8	-285,7	-61,7	11091,34
39	-687530,8	-1100972,8	-290,8	-329,6	$4,80 \cdot 10^8$
40	-687197,7	-1100972,8	-290,8	-293,8	$6,38 \cdot 10^7$
41	-686848,0	-1100972,8	-291,1	-288,4	885,61
42	-686465,1	-1100972,8	-291,9	-261,0	$9,37 \cdot 10^6$
43	-685731,6	-1100972,8	-287,9	-365,4	$5,14 \cdot 10^5$
44	-685332,0	-1100972,8	-288,9	395,4	$1,40 \cdot 10^5$
45	-684982,4	-1100972,8	-289,2	380,8	103,37
46	-684683,4	-1100972,8	-293,7	399,8	$1,19 \cdot 10^8$
47	-684347,7	-1100972,8	-278,6	381,4	142,14
48	-683998,0	-1100972,8	-278,9	-285,1	$5,72 \cdot 10^9$
49	-683648,3	-1100972,8	-279,2	-368,9	$2,40 \cdot 10^{11}$
50	-683410,0	-1100972,8	-277,7	-281,7	$6,58 \cdot 10^8$
51	-683093,1	-1100972,8	-272,4	-452,0	$1,23 \cdot 10^8$
52	-682345,1	-1100972,8	-273,7	-337,2	$8,87 \cdot 10^5$
53	-681928,7	-1100972,8	-270,0	-295,8	$4,99 \cdot 10^9$
54	-681597,0	-1100972,8	-275,0	365,3	7911,72
55	-681231,3	-1100972,8	-275,6	-230,9	$3,60 \cdot 10^8$
56	-680866,4	-1100972,8	-281,1	-282,0	$1,17 \cdot 10^9$
57	-680601,1	-1100972,8	-285,2	-285,8	$4,44 \cdot 10^8$

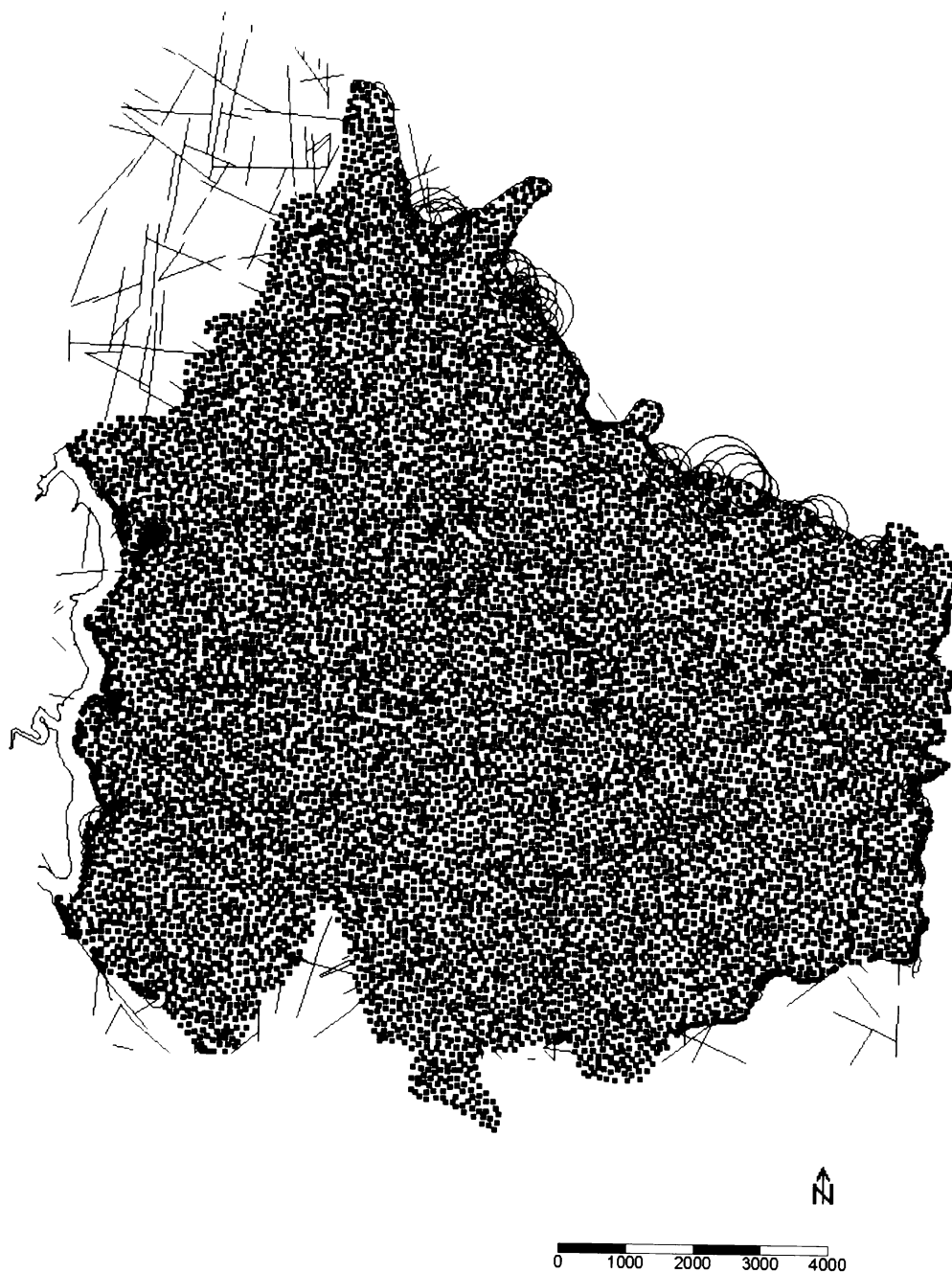
Příloha 8: Doba výstupu částic

8.2 Mapa zkoumaných bodů



Modrá linie znázorňuje hranici zájmového území. Červené linie vyznačují puklinovou síť. Pomocí oranžových čtverečků s čísly je zaznamenána počáteční poloha zkoumaných bodů. Zelená kolečka s čísly označují konečnou polohu, kam doputuje částice ze zkoumaných bodů (zobrazeno bez ohledu na vertikální souřadnici polohy).

Příloha 9: Mapa odtoku podzemní vody skrz hranice oblasti



Modrou barvou jsou zaznamenány body, kde dochází k odtoku podzemní vody skrz hranici oblasti (modré kružnice znázorňují relativní velikost odtoku). Červeně jsou vyznačeny body v nichž dochází k infiltraci nebo k přítoku podzemní vody do zájmové oblasti. Červené linie vyznačují puklinovou síť.