

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování



**Příprava vstupů pro modelování pohybu  
radionuklidů v okolí úložišť radioaktivních  
látek**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Kuráž, PhD.

Diplomant: Bc. Pavla Spěváčková

2015

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Michala Kuráže, PhD. a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze 27.3.2015

Pavla Spěváčková

## **Poděkování**

Na tomto místě bych ráda poděkovala mému vedoucímu práce doc. Ing. Michalu Kurážovi, PhD. za objektivní připomínky a metodické vedení práce. Dále Ing. Milošovi Janů ze SÚRAO za poskytnuté podklady k tématu diplomové práce. Stejně tak bych chtěla poděkovat Ing. Baštovi za konzultace ohledně práce v GIS a největší poděkování patří mým rodičům a rodině, bez jejichž podpory by tato práce nemohla být napsána.

V Praze 27.3.2015

Pavla Spěváčková

## Zkratky:

**ČVUT** České vysoké učení technické

**EW** ( exempt waste ) ostatní odpad

**FJFI** Fakulta jaderné fyziky a inženýrství

**HIC** ( High Integrity Container )

**HLW** ( high level waste ) vysoce radioaktivní odpad

**CHOPAV** Chráněná oblast přirozené akumulace vod

**ILW** ( intermediate level waste ) - středně radioaktivní odpad

**IAEA** ( International Atomic Energy Agency )

Mezinárodní agentura pro atomovou energii

**IRAO** institucionální radioaktivní odpad

**JE** jaderná elektrárna

**LL** ( long life ) dlouhodobý

**LLW** ( low level waste ) nízko radioaktivní odpad

**MPO** Ministerstvo průmyslu a obchodu

**NAGRA** ( Swiss National Co-operative for the Disposal of Radioactive Waste )

- švýcarské národní sdružení pro odstraňování radioaktivního odpadu

**RAO** radioaktivní odpad

**SL** ( short life )- krátkodobý

**SÚJB** Státní úřad pro jadernou bezpečnost

**SÚRAO** Správa úložišť radioaktivního odpadu

**SZÚ** Státní zdravotní ústav

**ÚJF Řež** Ústav jaderné fyziky

**ÚVVVR** Ústav pro výzkum, výrobu a využití radioisotopů

**VJP** vyhořelé jaderné palivo

## **Abstrakt (CZ)**

Cílem předkládané diplomové práce bylo nashromáždit a zpracovat podklady pro vytvoření geologického modelu oblasti s úložištěm radioaktivních látek. Tato data by měla posloužit pro účely environmentálního modelování v problematice šíření radionuklidů z úložiště radioaktivního odpadu, konkrétně na lokalitě Richard.

Rešeršní část práce se zabývá úvodem do environmentálního modelování, popisem vzniku a rozdělení radioaktivních odpadů, jejich úpravou a zpracováním a zmiňuje se o světových úložištích radioaktivního odpadu.

Samostatnou kapitolu tvoří charakteristika zájmového území v blízkosti úložiště radioaktivního odpadu Richard na Litoměřicku. V této kapitole jsou popsány geologické, klimatické, hydrologické i seizmické poměry zájmové lokality.

Důležitou částí práce je metodika, popisující shromáždění dat pro rešerši, shromáždění a přípravu dat pro vytvoření modelu pomocí interpolačních technik v programu ArcGis 10.2, popis dat a jejich zpracování pomocí interpolace a popis použité statistické metody cross validation pro vyhodnocení kvality interpolace.

Výsledky shrnují výstupy ze všech užitých interpolačních technik. Nejvhodnější výstupy byly následně porovnány a statisticky byla zhodnocena kvalita užitých interpolačních metod pro danou lokalitu, aby výsledek co nejvěrněji simuloval reálné prostředí.

V diskuzi a závěru jsem okomentovala výsledky práce, zhodnotila jednotlivé grafické i statistické výstupy a uvedla doporučení pro možné vylepšení výsledku.

Podstatnou částí diplomové práce jsou i přílohy, které doplňují metodickou část o cenná data.

Přínos práce spočívá v podrobnějším průzkumu zájmové lokality z hlediska geologie a zpracování dat pomocí geografického informačního systému, což může sloužit jako podklad pro další odbornou činnost.

## **Abstract (EN)**

The aim of this diploma work is a collection and adaption of data, necessary for creating a geological model in the area around a radioactive waste repository Richard, situated near the town Litoměřice. This model has to simulate faithfully the real environment of the area under study. In the future, the obtained data will be used for models, solving problems of the radioactive waste diffusion into the environment in the locality of radioactive waste repository.

The introduction to the environmental modelling, the survey of the sources and characteristics of radioactive waste are described in detail. Survey of radioactive waste treatment and survey of radioactive waste repositories all over (around) the world are an integral part of this work.

Detailed description of the radioactive waste repository area Richard includes geological, climatic, hydrological and seismic conditions.

Methology of data collection and their transformation to the form used for model creation is presented. For the model formed by interpolation techniques, programme ArcGis 10.2. is used. Statistical method Cross validation, used for the evaluation of interpolation quality, is described.

Results of various interpolation techniques are summarized and compared. The qualities of the best fitting interpolation techniques for the locality under study are statistically compared. On the bases of statistic and graphic outputs, the interpolation method simulating accurate real conditions is recommended.

Significant part of this work is presented in the attachments, which complete the methodical part with valuable and important data.

This diploma work gives important information for detailed and specialized geological survey. The collection of data and its processing in GIS (Geological Information System) can be used as a base for future specialised research.

**Klíčová slova**

Úložiště radioaktivního odpadu, transport radionuklidů, environmentální modelování, interpolace

**Key words**

Radiative waste repository, transport of radionuclides, environmental modeling, interpolation

## OBSAH

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>2. CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>11</b>
<b>3. LITERÁRNÍ REŠERŠE</b> .....	<b>12</b>
3.1 ENVIRONMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ.....	12
3.1.1 Transportní procesy a proudění vody v porézním prostředí.....	13
3.1.2 Okrajové a počáteční podmínky.....	14
3.2 RADIOAKTIVNÍ ODPAD (RAO).....	15
3.2.1 Vznik RAO.....	15
3.2.2 Dělení RAO.....	16
3.2.3 Zdroje RAO.....	17
3.2.4 Klasifikace RAO... ..	18
3.2.5 Třídy RAO.....	19
3.3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ.....	22
3.3.1 Veličiny a jednotky.....	24
3.3.2 Ionizující záření v ŽP.....	26
3.4 ÚPRAVA A ZPRACOVÁNÍ RAO.....	30
3.5 ÚLOŽIŠTĚ VE SVĚTĚ.....	31
<b>4. CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ</b> .....	<b>34</b>
4.1 POPIS ZÁJMOVÉ LOKALITY.....	34
4.1.1 Důlní komplex Richard včetně ÚRAO.....	35
4.2 GEOLOGICKÉ POMĚRY.....	38
4.2.1 Geotechnické poměry horninového masivu.....	42
4.2.2 Strukturně tektonické poměry.....	44
4.3 KLIMATICKÉ POMĚRY.....	44
4.4 HYDROLOGICKÉ POMĚRY.....	45
4.4.1 Hydrogeologické poměry.....	45
4.4.2 Složení vod.....	48
4.4.3 Oběh podzemní vody.....	49
4.5 SEISMICITA.....	50
<b>5. METODIKA</b> .....	<b>51</b>
5.1 SHROMÁŽDĚNÍ DAT REŠERŠNÍHO CHARAKTERU.....	51
5.2 SHROMÁŽDĚNÍ DAT PRO PRÁCI V GIS.....	51



5.3 POPIS VSTUPNÍCH DAT – FORMÁTY, SOFTWARE.....	51
5.4 PŘÍPRAVA DAT PRO PRÁCI V ArcGis.....	52
5.5 INTERPOLACE V GIS.....	56
5.6 ZHODNOCENÍ KVALITY INTERPOLACE.....	60
<b>6. VÝSLEDKY PRÁCE .....</b>	<b>62</b>
6.1 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ, GIS VÝSTUPY.....	62
6.2 STATISTICKÉ VÝSTUPY PRO VRSTVU 3, 4 A 5.....	82
<b>7. DISKUZE.....</b>	<b>95</b>
<b>8. ZÁVĚR.....</b>	<b>96</b>
<b>9. POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>98</b>
<b>10. PŘÍLOHY.....</b>	<b>103</b>
PŘÍLOHA Č. 1 – Situace schématických geologických řezů v zájmové oblasti ÚRAO Richard.....	103
PŘÍLOHA Č. 2 – Schématický geologický řez A-B.....	104
PŘÍLOHA Č. 3 - Schématický geologický řez C-D.....	105
PŘÍLOHA Č. 4 – Ukázka vstupních dat pro práci v GIS	
a) Formát xls.....	106
b) Formát .txt.....	107
PŘÍLOHA Č. 5 – Výsledek metody cross validation pro vrstvu 3.....	108
PŘÍLOHA Č. 6 – Výsledek metody cross validation pro vrstvu 4.....	112
PŘÍLOHA Č. 7 – Výsledek metody cross validation pro vrstvu 5.....	116
<b>11. DATOVÝ NOSIČ</b>	

## **1. ÚVOD**

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou radioaktivního odpadu a současnou situací v otázce jeho ukládání a vlivu úložišť na okolní prostředí. Problematiku úložišť radioaktivních odpadů je třeba řešit jak z pohledu vztahu k životnímu prostředí, tak z pohledu vlivu na lidské zdraví.

Jednou z prvotních otázek při plánování úložišť radioaktivních odpadů je výběr vhodné lokality, kde jedním z nejdůležitějších kritérií je struktura geologického prostředí, a to kvůli potenciálnímu šíření radionuklidů v lokalitě. Je třeba vypracovat bezpečnostní scénáře, pomocí studií a modelových situací zohlednit způsob transportu radionuklidů v okolí a získané výsledky aplikovat do praxe. Každá tato studie i modelová situace vyžaduje nashromáždění všech potřebných údajů o lokalitě a jejich přípravu k dalšímu zpracování.

Tato diplomová práce se zabývá již konkrétní reálnou lokalitou, v které je umístěno jedno ze 4 úložišť radioaktivního odpadu v ČR - Richard.

Práce je členěna na několik oddílů. Rešeršní část se zabývá problematikou RAO z pohledu jeho vzniku a dalšího nakládání, popis zájmové lokality shrnuje geologické, klimatické a hydrologické podmínky, metodika popisuje způsob získání a zpracování dat pro tvorbu modelu, ve výsledcích jsou výstupy interpolací provedených na základě získaných dat oblasti a celou práci uzavírá diskuze a závěr.

## **2. CÍLE PRÁCE**

Cílem předkládané diplomové práce bylo nashromáždít a zpracovat dostupné podklady pro vytvoření modelu šíření radionuklidů z úložiště radioaktivního odpadu Richard. Takto připravené a zpracované vstupy by měly být základem pro další práci environmentálního modelování transportu radionuklidů v okolí úložiště.

### 3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

#### 3.1 ENVIRONMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ

Problematika zabezpečení úložišť radioaktivních odpadů je v dnešní době neodmyslitelně spjata s environmentálním modelováním, pomocí kterého se dá velmi přesně nasimulovat reálné prostředí zájmové lokality za pomoci různých typů modelů, např. geologickým modelem, transportním modelem, hydrogeologickým modelem aj. Jde o využití údajů z dané lokality, které jsou získávány přímo v terénu, z map, výpočtů atd. a jsou dále zpracovávány počítačovými softwary, pomocí kterých se co nejpřesněji modelují procesy a situace, které mohou nastat v přírodě reálně nastat.

Matematické modely můžeme rozdělit dle Kováře 1990, Bevena 2001, Hrádka 2002 na:

- stochastické
- deterministické
- smíšené

**Stochastické modely** charakterizuje absence vazby mezi příčinou a následkem popisovaného jevu v rámci charakterizovaného systému.

**Deterministické modely** popisují fyzikální systém pomocí matematických vztahů. Přesnost popisu závisí na kvalitě vstupních dat. Čím větší jsou požadavky na přesnost modelu, tím rostou i požadavky na kvalitu a množství vstupních dat. Dle kvality a kvantity pozorovaných měření a odvozených parametrů dělíme deterministické modely na další dvě skupiny:

- hydrologické modely
- hydrodynamické modely

**Hydrodynamické modely** popisují realitu nejpřesněji. Jde o modely respektující principy zachování hmoty, hybnosti a energie. Řešené procesy popisují pomocí diferenciálních rovnic.

Mezi modely stochastickými a deterministickými dochází k určitému překryvu, jde pak o **modely smíšené**.

### **3.1.1 Transportní procesy a proudění vody v porézním prostředí**

Hlavní řešenou problematikou v otázce zabezpečení úložišť radioaktivních odpadů je transport kontaminantů v horninovém prostředí, který vyžaduje řešení diferenciálních rovnic, konkrétně pohyb vody ve zvodních řeší parciální derivace 2. řádu.

Proudění podzemní vody v porézním prostředí a transport kontaminantů popisují tyto základní rovnice: (Kutílek 1978, Císlarová 1989)

- rovnice kontinuity
- Darcyho zákon pro nasycené prostředí
- Darcy-Buckinghamovův zákon pro nenasycené prostředí

### 3.1.2 Okrajové a počáteční podmínky

Při řešení rovnic proudění je dále nezbytné vymežit počáteční a okrajové podmínky.

#### *Počáteční podmínky*

Počátečními podmínkami rozumíme stav popisující proudění v čase  $t_0 = 0$ . Stanovení těchto podmínek nám umožňuje řešit nestacionární proudění. Schematicky lze podmínku vyjádřit pomocí vztahu (1)

$$H=f(x,y,z,t_0) \quad (1)$$

tj., jako rovnici funkce  $f()$  souřadnic  $x, y, z$  v prostoru v čase  $t_0$ , kdy známe hydraulickou výšku  $H$ . Průběh hydraulické výšky se s časem mění.

(Mucha, Šestakov, 1987)

#### *Okrajové podmínky*

U řešení rovnic proudění používáme dvě okrajové podmínky – Dirichletovu a Neumannovu. Okrajové podmínky definují průběh hodnot pro celou dobu trvání simulace na všech hranicích oblasti. (Císlerová 1989)

#### **Dirichletova okrajová podmínka**

Jde o tlakovou okrajovou podmínku. U tohoto typu je známá hodnota neznámé funkce na určité části hranice řešené oblasti proudění  $\Omega$ . V případě známé tlakové výšky  $h_\Gamma$  na části hranice  $\Gamma$  se definuje pomocí vztahu (2). Podmínku lze definovat také pomocí objemové vlhkosti  $\theta$  (3).

$$h(x,t) = h_\Gamma \text{ pro } \forall (x,t) \in \Gamma_x [0,T) \quad (2)$$

$$\theta(x,t) = \theta_\Gamma \text{ pro } \forall (x,t) \in \Gamma_x [0,T) \quad (3)$$

(Císlerová & Vogel, 1998)

## Neumannova okrajová podmínka

Jde o nestabilní či tokovou okrajovou podmínku. Použijeme ji v případě, že známe rychlost proudění v kolmém směru přes hranici oblasti  $\Gamma_N$ . Voda může do systému přitékat nebo odtékat. Neumannova okrajová podmínka je definována předpisem níže (4), vztaženým k vnější normále hranice  $\vec{n}$ , tok musí být vyjádřen pomocí rovnice proudění s proměnnou  $h$  (tlaková výška) nebo  $\theta$  (hydraulická vodivost) kde  $K$  je hydraulická vodivost a  $q$  objemový průtok. (Císlarová & Vogel, 1998).

$$-K \left( \frac{\partial h(x,t)}{\partial \vec{n}} + n_3 \right) = q_\Gamma \quad \text{pro } \forall (x,t) \in \Gamma_x [0,T] \quad (4)$$

Neumannova podmínka může popisovat měřený odtok ve dně nebo srážky či výpar na okraji oblasti vyjadřujícím terén.

V inženýrské praxi se Neumannova okrajová podmínka používá také v homogenní podobě jako nulový tok „no flow“, kdy je výraz roven nule (5). Tato podmínka může reprezentovat například nepropustné geologické podloží.

(Císlarová & Vogel 1998, Mucha & Šestakov 1987).

$$-K \left( \frac{\partial h(x,t)}{\partial \vec{n}} + n_3 \right) = 0 \quad \text{pro } \forall (x,t) \in \Gamma_x [0,T] \quad (5)$$

## 3.2 RADIOAKTIVNÍ ODPAD (RAO)

### 3.2.1 Vznik RAO

Při veškeré činnosti s radioaktivními látkami dochází ke vzniku RAO, a přestože je poměr vyprodukovaného RAO oproti ostatnímu nebezpečnému odpadu malý (pouze setiny procent), je třeba při jeho zpracování a ukládání dodržovat přísné postupy. Toto vše je zajišťováno státním dozorem - Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB), který vznikl k 1. 1. 1993. (MPO a SÚRAO 2000)

RAO dělíme dle příslušné radioaktivity a stejně tak určujeme i jejich nebezpečnost pro okolí. Zneškodnění RAO spočívá v jejich úplné izolaci od životního prostředí, a to na celou dobu, po kterou představují riziko pro člověka i životní prostředí. Tzn., že RAO jsou ukládány do úložišť, kde jsou díky systému několika na sobě nezávislých a vzájemně se doplňujících bariér zcela izolovány od životního prostředí a zabezpečeny před únikem nebezpečných látek do okolí po dobu, než jejich radioaktivita klesne na úroveň přijatelnou pro biosféru.

(MPO a SÚRAO 2000; SÚRAOd [www.rawra.cz](http://www.rawra.cz))

### 3.2.2 Dělení RAO

Definice z Atomového zákona říká, že RAO jsou látky, předměty nebo zařízení obsahující radionuklidy nebo jimi kontaminované, pro něž se nepředpokládá další využití. (Zákon č. 18/1997 Sb.)

Podle vzniku dělíme RAO do dvou skupin:

- institucionální radioaktivní odpady
- odpady vznikající v souvislosti s jaderným cyklem \*

**Institucionální radioaktivní odpady** (z nejaderných cyklů) vznikají např. ve zdravotnictví, výzkumu, průmyslu či zemědělství. Jedná se např. o staré měřicí přístroje, biologický odpad, injekční stříkačky a jiné laboratorní pomůcky, pracovní oděvy, radioaktivní zářiče aj. (Guizerix a kol. 1987, Janů 2003b)

**Odpady vznikající v souvislosti s jadernou energií** jsou různé kapaliny, kaly, pevné látky a všechny materiály, pomůcky i oděvy, které přišly do styku s radionuklidy z jaderného cyklu\*. V budoucnu nejspíš také půjde o vyhořelé jaderné palivo. RAO z jaderného cyklu převyšují ostatní zdroje.

\***Jaderný palivový cyklus**, představuje soubor činností, spojených s manipulací s jaderným materiálem za účelem výroby jaderné energie. (SÚRAOd [www.rawra.cz](http://www.rawra.cz))

### 3.2.3 Zdroje radioaktivních odpadů

#### **Jaderný palivový cyklus (IAEA 1994)**

- Těžba a úprava uranové rudy
- Úprava jaderného paliva
- Provoz reaktoru, výroba energie
- Manipulace s vyhořelým palivem

**Výroba a využití radionuklidů** nesouvisející s jadernou energetikou, jde o menší množství RAO.

- Výzkumná činnost
- Výroba radioizotopů
- Využití radioizotopů

**Odstavení jaderných zařízení** - po ukončení provozu jaderných zařízení vzniká různorodý RAO. Jde o RAO různé aktivity i objemu, např. zařízení, konstrukční materiály aj. Před uložením se provádí dekontaminace, separace využitelných radionuklidů a nevyužitelný zbytek je zkoncentrován na co nejmenší objem. (Osmanlioglu 2006, Romanovskiy a kol. 2001, Zakrzewska a kol. 2001)

**Odpad z nejaderných činností**, vznikající při určitých průmyslových činnostech s využitím surovin s přirozenou radioaktivitou (jde např. o výrobu umělých hnojiv, těžbu ropy a plynu). Zde se radionuklidy vyskytují jen v malých koncentracích, ale při zpracování mohou být zkoncentrovány nad hranici pro neradioaktivní odpad.

(IAEA 1994)

**Vyhořelé jaderné palivo (VJP)** není odpadem, pokud ho za něj neprohlásí jeho majitel nebo SÚJB. Vztahují se na něj stejné požadavky jako na radioaktivní odpad, ale musí být zachována možnost jeho dalšího zpracování. (MPO a SÚRAO 2000)



### 3.2.4 Klasifikace RAO

Aby došlo ke sjednocení klasifikace RAO v členských státech IAEA (Mezinárodní agentura pro atomovou energii) byl roku 1994 vydán touto organizací dokument s názvem „Klasifikace radioaktivního odpadu“ (Classification of Radioactive Waste ). Tento dokument se vztahuje k materiálu, který obsahuje radionuklidy o koncentraci nebo radioaktivitě vyšší než povolená hladina pro výjimky z jaderné regulační kontroly, stanovené regulačním orgánem. Vztahuje se na RAO ve všech skupenstvích a klasifikuje je ve velkém rozsahu od vysoce radioaktivních až po nízko radioaktivní. (IAEA 1994)

#### Parametry klasifikačního systému

Klasifikační systém musí zahrnovat:

- pokrytí všech druhů RAO
- veškerá stádia zpracování RAO
- třídy RAO vzhledem k potenciálnímu nebezpečí
- flexibilitu pro řešení specifických potřeb
- změny terminologie
- jednoduchost k pochopení
- pokud možno univerzální použitelnost

Do výběru parametrů pro klasifikaci musíme zahrnout důležité vlastnosti RAO:

- původ
  - kritičnost
  - radiologické vlastnosti (poločas rozpadu, výkon tepla, intenzita procházejícího radioaktivního záření, radioaktivita a koncentrace radionuklidů, povrchová kontaminace a dávkový faktor daných radionuklidů)
  - fyzikální vlastnosti (skupenství, odolnost vůči korozi, obsah organických látek, hořlavost, reaktivita, vývoj plynů, sorpce radionuklidů)
  - biologické vlastnosti (potencionální biologické riziko)
- (IAEA 1994)

### 3.2.5 Třídy RAO

Klasifikační systém IAEA zahrnuje 3 třídy RAO (IAEA 1994):

1. vysoce aktivní odpad (high level waste) – HLW
2. středně aktivní odpad (intermediate level waste) – ILW
3. nízko aktivní odpad (low level waste) – LLW

Podle poločasu rozpadu je RAO dělen na krátkodobý a dlouhodobý.

Tyto třídy označují obsah aktivity (radioaktivity), radiotoxicitu a vývin tepelné energie. Podle toho, zda jde o RAO s krátkodobým nebo dlouhodobým poločasem rozpadu se následně vybírá typ úložiště.

**HLW** (vysoce radioaktivní odpad) - obsahuje vysoké koncentrace krátkodobých i dlouhodobých radionuklidů, hlavně štěpné produkty, některé aktinidy, oddělené během zpracování ozařeného paliva; další vysoce radioaktivní odpad, produkující významné množství tepla při radioaktivním rozpadu; vyhořelé palivo pro reaktory, pokud je deklarováno jako odpad. Vyžaduje vysoký stupeň izolace od biosféry, většinou geologická úložiště. Díky radioaktivnímu rozpadu vydává velké množství tepla, a to většinou po několik staletí.

**ILW** (středně aktivní odpad), vyžaduje stínění proti radioaktivnímu záření, ale nevyžaduje opatření proti vývoji tepla během zpracování a transportu.

**LLW** (nízko aktivní odpad) - vzhledem k nízkému obsahu radionuklidů nevyžaduje stínění při zpracování a dopravě.

Hranice mezi třídami ILW a LLW byla stanovena na hladinu dávky 2 mSv/hod.

U ILW a LLW (**LILW**) se rozlišují odpady s krátkým poločasem rozpadu (SL - short life) a dlouhým poločasem rozpadu (LL – long life), dále se odlišují odpady obsahující  $\alpha$  zářiče.

**LILW-SL** (krátkodobý RAO) se rozpadne na úroveň nízké (přijatelné) aktivity z radiologického hlediska po dobu trvání administrativních kontrol. Obsahuje i

dlouhodobé radionuklidy v nízkých koncentracích, nutná kontrola i z hlediska radiotoxicity. Kromě toho obsahuje i krátkodobé radionuklidy, které mohou být ve vyšších koncentracích, protože se rychle rozpadají. Má široký rozsah koncentrací i druhů radionuklidů, čili zde může být i více způsobů uchovávání. Záleží na formě, balení i národních předpisech. Od jednoduchých povrchových zavážek, přes technická povrchová zařízení až po uchovávání v geologických formacích v různých hloubkách.

**LILW-LL** ( dlouhodobý RAO ) se nerozpadne na nízkou úroveň aktivity, požadovanou z radiologického a administrativního hlediska. Obsahuje dlouhodobé radionuklidy v množství, které vyžaduje oddělení od biosféry, většinou v geologických úložištích o hloubce několika set metrů.

Rozlišení na RAO dlouhodobý a krátkodobý je důležité pro plánování délky uložení RAO v přísných podmínkách. Limity radioaktivity závisí zejména na radiologických, fyzikálních, chemických a biologických vlastnostech jednotlivých radionuklidů. V žádném případě neplatí, že dlouhodobé RAO jsou nebezpečnější než krátkodobé.

Se vzrůstající radioaktivitou daného typu RAO rovněž stoupají požadavky na jeho izolaci od životního prostředí, stínění a chlazení. Jde o jednoduché metody až po geologické odstínění.

RAO musí být izolován od biosféry v úložištích po dobu, dokud se nerozpadne. Úložiště RAO musí mít technické krytí min. několik metrů, např. beton, jeskyně, důl

**EW** (exempt waste) ostatní odpad je odpad z jaderných zařízení, jehož radiologické účinky jsou zanedbatelné. Udává se v termínech radioaktivity nebo koncentrace radionuklidů a měl by zahrnovat fyzikální charakteristiku, specifikaci typu a množství nebo objem RAO.

EW obsahuje velmi malé množství radioaktivity, proto není považován za radioaktivní a může být vyjmut z kontroly. Tzn., že ačkoli z fyzikálního hlediska je stále radioaktivní, může se s ním zacházet jako s neradioaktivním. Doporučení IAEA: do EW zařadit pevný materiál s roční dávkou pro veřejnost 0,01mSv, tj 10 μSv.

Doporučená radioaktivita závisí na daném radionuklidu a pohybuje se od 0,1 Bq/g do 10 000 Bq/g. ( IAEA 1994, IAEA 2003 )

Přehled rozdělení RAO dle IAEA je uvedeno v tab.č.1

Třída RAO	Typická charakteristika	Dispozice
1. EW	Hladina radioaktivity pod toleranční mezí, vycházející z roční dávky pro obyvatelstvo <0,01mSv	Žádná radiologická omezení
2. LLW a ILW (LILW)  2.1. krátkodobý (LILW-SL)  2.2. dlouhodobý (LILW-LL)	Hladina radioaktivity nad hladinou toleranční meze a tepelný výkon pod 2kW/m <sup>3</sup>  Omezené množství dlouhodobých radionuklidů (limit pro $\alpha$ zářiče do 4000 Bq/g v jednotlivých baleních a do celkového průměru 400 Bq/g pro celé balení  Dlouhodobé množství radionuklidů, přesahující limit pro krátkodobý odpad	Blízko povrchu nebo geologického úložiště (Geological disposal facility)  Geologické úložiště
3. HLW	Tepelný výkon >2kW/m <sup>3</sup> a množství dlouhodobých radionuklidů, přesahujících limit pro krátkodobý RAO	Geologické úložiště

Tab.č.1 Přehled klasifikace RAO (IAEA 1994)

V ČR není jednoznačně určen způsob kategorizace RAO a VJP a obvykle se vychází z doporučení IAEA a Evropské komise (EC) následně:

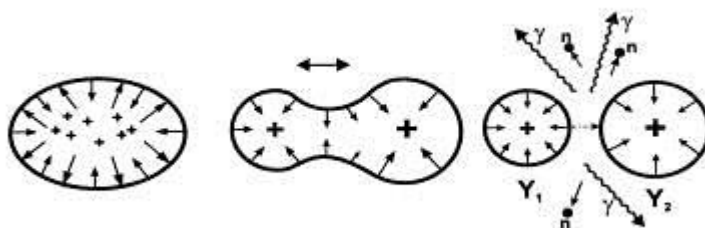
- přechodné RAO - budou vyňaty nejpozději do 5 let z působnosti atomového zákona
- krátkodobé středně radioaktivní odpady - lze je přijmout do přípovrchových úložišť

- dlouhodobé středně radioaktivní odpady - musí být umístěny do hlubinných úložišť
- vysoce radioaktivní odpady - musí být umístěny do hlubinných úložišť (MPO a SÚRAO 2000)

### 3.3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Ionizující záření, které je emitováno při přeměně radioaktivních radionuklidů, můžeme popsat jako proud hmotných a nehmotných částic ( fotonů ), které při průchodu látkou vyvolávají ionizaci.

Přeměna radioaktivních nuklidů (tzv. radioaktivita), je vlastnost atomového jádra samovolně se přeměňovat (rozpadat) na jiný nuklid. (obr.č.1). Vždy jde o děj exoergický, tzn. dochází při něm k uvolňování energie. Objev nestability jádra učinil r. 1896 H. Becquerel a dále se radioaktivitou zabývali manželé Pierre Curie a Marie Curie-Sklodowska. Štěpení jádra pomocí neutronů objevili Hahn se svými spolupracovníky, samovolné pak Flerov a Petrzak. (Magill, Galy 2005)



Obr.č.1 Průběh samovolného štěpení jádra ( Navrátil, Hála 1985 )

Při radioaktivním rozpadu vznikají tři druhy jaderného záření –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Reakce jsou popsány např. v publikaci Hála 1998.

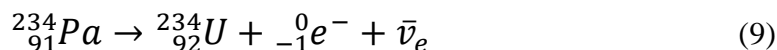
Záření  $\alpha$ : probíhá u těžších jader (s protonovým číslem  $Z > 83$ ). Jde o proud  $\alpha$ -částic, tj. jádra  ${}^4_2\text{He}$ . Nově vzniklý prvek má vždy o 2 protony a 4 nukleony méně, čímž se nachází v periodické tabulce o dvě místa vlevo od původního prvku (6),(7).  $\alpha$ -záření

má silné ionizační účinky, lze je ale odstínit již tenkou vrstvou kovu nebo listem papíru. Ve vzduchu má dosah cca 5 cm.

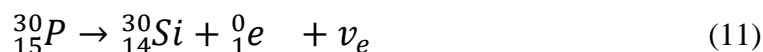


Záření  $\beta$ : jde o proud elektronů se spojitým spektrem energií. Je pronikavější než záření  $\alpha$ , má však slabší ionizační účinky. Je odchylováno elektromagnetickým polem na opačnou stranu než záření  $\alpha$ . Lze jej odstínit kovovou fólií. Rozlišujeme dva typy přeměny  $\beta$ :

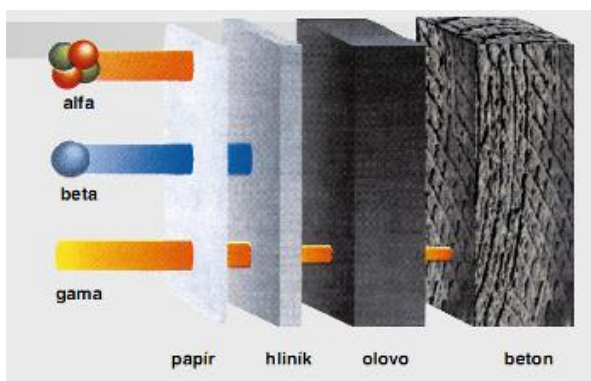
přeměna  $\beta^-$  - dochází k ní při nadbytku neutronů v jádře. Dojde k uvolnění elektronu z neutronu, z kterého se tak stává proton. Z jádra je tedy emitován elektron ( $\beta^-$ ) a elektronové antineutrino ( $\bar{\nu}$ ). Nově vzniklý prvek má tedy o jeden proton více a nachází se v periodické tabulce prvků o jedno místo vpravo od původního prvku (8),(9).



$\beta$  (elektronový záchyt) je vyvolán přebytkem protonů, dochází k zachycení orbitálního elektronu a z protonu vzniká neutron. Při elektronovém záchytu je z jádra emitováno pouze neutrino ( $\nu$ ) a tzv. charakteristické rentgenovské záření nově vzniklého prvku, generované přechodem elektronu z vyšších elektronových slupek do „mezery“ po zachyceném orbitálním elektronu. Nově vzniklý prvek má protonové číslo o jedno menší a v periodické tabulce se nachází o jedno místo vlevo od původního prvku (10),(11).



Záření  $\gamma$  : veškeré fotonové záření doprovázející záření  $\beta$  a  $\alpha$ , nedochází zde ke změně jádra, mění se pouze energetický obsah. Není odchylováno elektromagnetickým polem a lze jej odstínit těžkým kovem a betonem. (Majer 1961, Hála 1998, Hussein 2007)  
Na obrázku č.2 jsou znázorněny materiály, kterými lze jednotlivé typy záření odstínit.



Obr.č.2 Materiály odstiňující ionizující záření (SÚRAOb informační brožura)

### 3.3.1 Veličiny a jednotky

Rychlost přeměny radioaktivního nuklidu lze vyjádřit jako změnu počtu radioaktivních atomů za časovou jednotku (12). (Kuráž 2011)

$$\lambda A(t)^n = dA(t)/dt \quad (12)$$

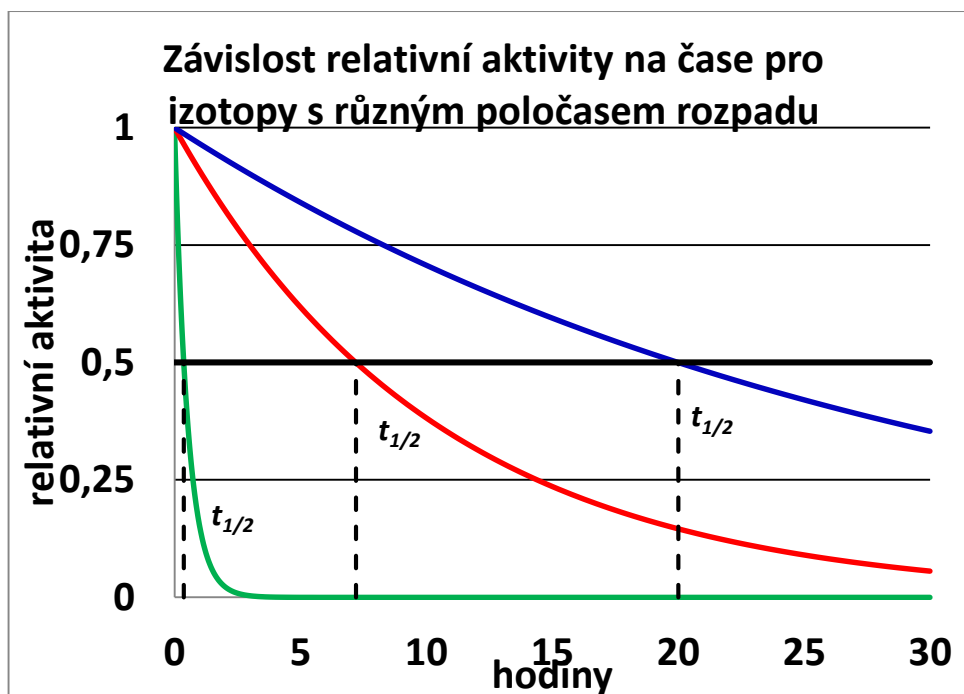
Kde  $A$  je aktivita,  $\lambda$  – rozpadová konstanta (čas<sup>-1</sup>) a  $t$  čas, v případě radioaktivního rozpadu  $n=1$ .

Jednotkou aktivity je Becquerel ( Bq ), který udává 1 rozpad za sekundu. Dřívější jednotkou byl Curie (Ci), počet rozpadů za sekundu v 1g Ra. (13)

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \quad (13)$$

Při rozpadu radioaktivních atomů časem ubývá, popisujeme tzv. poločas rozpadu  $T_{1/2}$ , který je definován jako časový úsek, během něhož se původní aktivita radioaktivního

nuklidu sníží na polovinu (obr.č.3). Prvek „vymře“ po uplynutí cca 10-ti poločasů rozpadu (jeho původní aktivita se zmenší na cca 1/1000). Tento poznatek je důležitý ve vztahu k otázce radioaktivního odpadu.



Obr.č.3. Závislost aktivity na čase pro izotopy s různým poločasem rozpadu.

Dalšími veličinami jsou:

dávka – celkové působení na látku, jednotkou je Gray Gy (J/kg)

expozice – velikost náboje všech iontů vybuzených  $\gamma$  zářením, jednotka Coulomb (C/kg)

jakostní (váhový) faktor  $w_R$ , který vyjadřuje biologický účinek jednotlivých druhů záření, uvedeno v tab.č.2

dávkový ekvivalent, tj. součin dávky a jakostního faktoru, jednotkou Sievert Sv (J/kg). (Hála 1998)



Typ záření	Radiační váhový faktor $w_R$
Fotony	1
Elektrony a mezony	1
Fotony a nabité piony	2
Částice alfa, štěpné fragmenty, těžké ionty	20
Neutrony	2,5 – 20; spojitá závislost na energii neutronů

Tab.č.2 Doporučené radiační váhové faktory (ICRP Publication 103 2007)

### 3.3.2 Ionizující záření v životním prostředí

Člověk je v průběhu svého života vystaven ionizujícímu záření, které může být buď přírodního původu nebo z umělých zdrojů. Záření z přírodních zdrojů včetně kosmického záření působí nepravidelně a v malých dávkách na každého a je běžnou součástí života. (Ajayi 2008, Appleton 2007)

Ionizující záření z umělých zdrojů působí na člověka např. při lékařských vyšetřeních, z některých domácích spotřebičů apod. Další skupina obyvatel je záření vystavena při výkonu své profese; jsou to osoby pracující např. v jaderných elektrárnách, ve zdravotnictví při práci s RTG zářením a nukleární medicínou, při vědě a výzkumu, zpracování uranové rudy apod. Jde o tzv. kritickou skupinu obyvatel.

Celkový průměrný příkon ekvivalentní dávky ze všech přírodních zdrojů je asi 2,4 mSv/rok. Jde o velmi malé dávky záření a nepředpokládá se negativní působení na organismus. Když tyto dávky srovnáme s průměrnými dávkami z umělého ozáření, jejich hodnoty jsou daleko nižší a jsou způsobeny ve většině z lékařských aplikací. Ozáření působící na člověka z přírodních zdrojů je shrnuto v tab. č.3

(Klener 1987, Hála 1998; vyhláška č. 307/2002 § 2)

Zdroj expozice	roční efektivní dávka (mSv)	
	Průměr	typické rozpětí
kosmické záření ionizující + fotony neutrony kosmogenní radionuklidy  celkové kosmické + kosmogenní záření	0,28 (0,30) <sup>a</sup> 0,10 (0,08) 0,01 (0,01)  0,39	    0,3 – 1,0 <sup>b</sup>
externí přírodní záření vnější vnitřní  celkové přírodní záření	0,07 (0,07) 0,41 (0,39)  0,48	   0,3 – 0,6 <sup>c</sup>
expozice inhalací uranová a thoriová řada radon ( <sup>222</sup> Rn) thoron ( <sup>220</sup> Th)  celková expozice inhalací	0,006 (0,01) 1,15 (1,2) 0,10 (0,07)  1,26	    0,2 – 10 <sup>d</sup>
dietární expozice <sup>40</sup> K uranová a thoriová řada  celková dietární expozice	0,17 (0,17) 0,12 (0,06)  0,29	   0,2 – 0,8 <sup>e</sup>
Celkově	2,4	1-10

a – dřívější výsledky

b - rozpětí od úrovně mořské hladiny po vysoké nadmořské výšky

c – závisí na přítomnosti radionuklidů v půdě a ve stavebních materiálech

d – závisí na akumulaci radonu ve vnitřním prostoru

e – závisí na obsahu radionuklidů v potravinách a pitné vodě

Tab.č.3 . Průměrné roční ekvivalentové dávky z přírodních zdrojů (UNSCEAR 2000)

Srovnání roční ekvivalentní dávky z přírodních a umělých zdrojů záření je uvedeno v tab. č.4

ZDROJ ZÁŘENÍ	H (mS.rok <sup>-1</sup> )	podíl (%)
kosmické záření	380	12,5
kosmogenní radionuklidy	12	0,4
přírodní radionuklidy-zevní ozáření <sup>a</sup>	460	15
přírodní radionuklidy-vnitřní ozáření <sup>a</sup>	230	7,5
radon a produkty jeho přeměny	1300	43,1
těžební průmysl <sup>b</sup>	24	0,75
jaderná energetika <sup>c</sup>	8	0,2
výroba radionuklidů	0,8	0,02
radioaktivní spotřební produkty	0,4	0,01
lékařské aplikace	660	20,6

a – mimo radon a produkty jeho přeměny

b – radon a produkty jeho přeměny z těžby a spalování fosilních paliv a z těžby a zpracování fosfátových hnojiv

c – nezahrnuje ozáření v případech havárií jaderných zařízení

Tab.č.4 Průměrné roční ekvivalentní dávky z přírodních i umělých zdrojů působící na člověka (Hála 1998)

Ozáření může být buď ze zdroje ionizujícího záření, který je mimo organismus, tzv. ozáření zevní a nebo z radionuklidů, které se dostaly do organismu, tzv. ozáření vnitřní. Do organismu se radionuklidy mohou dostat s příjmem potravy, nápojů nebo dýchacími cestami, a dále při různých klinických vyšetřeních. Běžně jsou přírodní radionuklidy v těle udržovány v rovnováze a k jejímu vychýlení dochází jen při neodborné manipulaci s radioaktivním materiálem nebo při jaderných haváriích, příp. při užití z medicínského hlediska. V případě vnitřního ozáření působí radionuklidy v těle nerovnoměrně na jednotlivé orgány. Některé orgány hromadí radionuklidy více než ostatní. Kritickým orgánem se nazývá ten orgán, který dostane nejvyšší dávku s ohledem na svou citlivost. V tab.č.5 jsou uvedeny efektivní poločasy (tj. doba, za kterou klesne radioaktivita v organismu na polovinu) a kritické orgány některých radionuklidů. Nebezpečí z vnitřního ozáření spočívá v tom, že radionuklid se nachází uvnitř organismu a nemůžeme tedy vytvořit ochrannou bariéru pro kritický orgán. (Hála 1998, Klener 1987)

Nuklid	T	T <sup>a</sup> <sub>ef</sub>	kritický orgán
<sup>3</sup> H	12,35 roků	10-20 dní	celé tělo
<sup>14</sup> C	5736 roků	35 dní	tuková tkáň
<sup>90</sup> Sr	28,1 roků	15 roků	Kost
<sup>131</sup> I	8,05 roků	7,5 dní	štítná žláza
<sup>137</sup> Cs	30 roků	70 dní	celé tělo
<sup>210</sup> Po	138,4 roků	58 dní	celé tělo
<sup>226</sup> Ra	1620 roků	45 roků	kost
<sup>239</sup> Pu	24400 roků	110 roků	kost, plíce

a – pro kritický orgán

Tab.č. 5. Efektivní poločasy a kritické orgány pro některé radionuklidy (Hála 1998)

Soubor fyzikálních, chemických a biologických vlastností radionuklidu se nazývá radiotoxicita, která s dalšími parametry slouží k vyjádření celkového rizika na životní prostředí. Ozáření z umělých zdrojů je za běžných podmínek velmi nízké a nemělo by překročit tzv. limity ozáření, což jsou normy vycházející ze zásad radiační ochrany. V ČR nesmí základní limit pro obyvatelstvo překročit 1 mSv / rok a vyjadřuje součet efektivních dávek zevního i vnitřního ozáření mimo lékařské ozáření a ozáření z přírodního pozadí. Pro osoby, které jsou pravidelně ve styku se zdroji ionizujícího záření z důvodu svého pracovního zaměření, se stanovuje vyšší limit, tzv. základní limit pro pracovníky se zdroji záření, tj. součet efektivních dávek nesmí být větší než 50 mSv / rok a současně ne větší než 100 mSv za pět let jdoucích po sobě. (Klener 1987, Hála 1998 ,Vyhláška SÚJB 307/2002 Sb.)

### 3.4 ÚPRAVA A ZPRACOVÁNÍ RAO

RAO se do úložišť ukládají po maximálním zmenšení jejich objemu, radionuklidy jsou převedeny na stabilní a nerozpustné formy a jsou uzavřeny ve vhodných obalech.

Nízko a středně aktivní odpad představuje 99% veškerého RAO. Úprava tohoto RAO je prováděna jeho slisováním do ocelových sudů, které jsou následně vloženy do větších a mezivrstva je zalita betonem. Po uzavření se sud opatří asfaltovým nátěrem.

Spalitelný RAO se upravuje ve speciálních pecích a plyny, které při úpravě vznikají jsou zbavovány radioaktivity mokrou separací nebo filtrací.

Nuklidy z kapalných RAO se převádí na nerozpustné sraženiny, které se fixují bitumenací nebo cementováním.

Vysoce radioaktivní odpad tvoří jen 1% objemu z veškerého RAO, ale koncentruje se v něm 90 % radioaktivity. Tento odpad tvoří pouze VJP a produkty vznikající při jeho zpracování. Většina odpadu se skladuje v ocelových nádržích a v přepracovatelských závodech, dále se zpracovává jen zbylá menší část, a to tzv. vitrifikací, kdy vzniká konečná radioaktivní tavenina, která se vlévá do ocelových kontejnerů. Vitrifikace se provádí v zemích, kde dochází k přepracování VJP, např. Velká Británie, Rusko, Francie. (Hála 1998)

### 3.5 ÚLOŽIŠTĚ VE SVĚTĚ

Přehled světových úložišť uvádí Rempe v tab. č.6

Úložiště	Hostitelská hornina	Provoz
Hostim (CZ)	vápencový důl	1959-1965
Ruské injektáže (RUS)	klastické (úlomkovité) sedimenty	od roku 1963
Richard (CZ)	vápencový důl	od roku 1964
Asse (D)	solný důl (sůl, potaš)	1967-1978
Bratrství (CZ)	uranový důl	od roku 1974
Morsleben (D)	solný důl (sůl, potaš)	1978-1998
Fosmark (S)	krystalinické podloží	od roku 1998
Olkiluoto a Loviisa (F)	krystalinické podloží	od roku 1992/1997
WIPP (USA)	Sůl	od roku 1999

Tab.č.6 Přehled úložišť ve světě (Rempe 2007)

**Rusko** – ukládání kapalného RAO (hlavně z přepracovatelských závodů) pomocí hlubinné injektáže probíhá již od roku 1963. Do pískovce do hloubky několika stovek metrů bylo tak uloženo již cca 50 milionů m<sup>3</sup> odpadu. Chemické i fyzikální interakce mezi odpadem a horninou zabraňují migraci. Monitorováním byla prokázána bezpečnost.

Ukládání probíhá na 3 lokalitách: Železnogorsk (Krasnojarsk) od roku 1967, Tomsk (Seversk) od roku 1963 a Dimitrovgrad od roku 1966.

**SRN** - ukládání RAO ve dvou lokalitách starých solných dolů:

Asse (1967 – 1978), z politických a historických důvodů není právně úložištěm RAO, byl zde ukládán LLW a ILW.

Morsleben (1978 – 1998). Je zde uložen silidifikovaný kapalný odpad. Stabilita prostředí byla zvýšena znovunaplněním nepoužívaných prostorů vytěženou solí. Finální uzavření rok 2010.

**Švédsko – úložiště** Fosmark (od roku 1998), ukládá se zde do 4 horizontálních komor (LLW) a jednoho vertikálního sila (ILW), které je v prostoru vytěženém ve skalním podloží min. 50 m pod úrovní hladiny Baltského moře

**Finsko** – úložiště v lokalitách Olkiluoto a Loviisa (1992 a 1997), úložiště pro LLW a ILW ve skalním podloží, předpokládaná doba využití cca 40 let.

**USA - WIPP (Waste Isolation Pilot Plant)** Nové Mexiko (od roku 1999), ukládání ILW (transurany + dlouhodobé radionuklidy) v solné skalní formaci. Úložiště bylo vytvořeno uměle pro odpad z jaderných zbraní.

Dále Rempe uvádí výčet plánovaných úložišť nebo úložišť v přípravě či budování, uvedeno v tab. č.7

<b>Projekt</b>	<b>Hostitelská hornina</b>	<b>Stav</b>
Finsko – Onkalo	krystalinické podloží	Aktivní
Francie	jílovec (argilit)	Aktivní
Německo – Gorleben	sůl	Pozastavené
Německo – Konrad	důl na železnou rudu	nefunkční povolení
Švédsko	krystalinické podloží	Aktivní
USA – Yucca Mountain	sopečný tuf	Aktivní

Tab.č.7 Plánovaná úložiště a úložiště ve výstavbě ( Rempe 2007 )

**Finsko** – pro ukládání vyhořelého jaderného paliva vybrána lokalita Eurajoki (blízko Olkiluoto jaderné elektrárny). Plánování stavby od roku 2004, stavba předpokládána v letech 2010 – 2020.

**Francie** - jílovitá formace 420 až 550 m pod povrchem, poblíž Bure in Lorraine. Do budoucna určeno pro HLW a ILW. V současnosti jde o podzemní výzkumnou laboratoř, jejíž stavba začala v roce 2003 a v roce 2004 započaly experimentální práce, zabývající validací koncepce v jílovité formaci.

## **SRN**

Gorleben, solný dóm, určeno pro HLW i další kategorie RAO. Plánované vytěžení šachet v hloubce cca 850 m pod povrchem. V roce 2000 zastaveno z politických důvodů.

Konrád, povoleno 2002, z politických důvodů opět pozastaveno.

**Švédsko** – vybrány lokality dvou úložišť v krystalinickém skalním podloží, studovány v Äspö Hard Rock Laboratory. Předpoklad začátku ukládání 2020.

**USA** - Yucca Mountain, Nevada – vulkanický tuf. Určeno pro ukládání civilního i vojenského RAO. Na rozdíl od ostatních světových úložišť je 300m nad úrovní hladiny spodní vody. Kontejnery budou z nekorozních materiálů (titan, slitiny). Předpokládané otevření v roce 2020. ( Rempe 2007, Wessels 2007 )

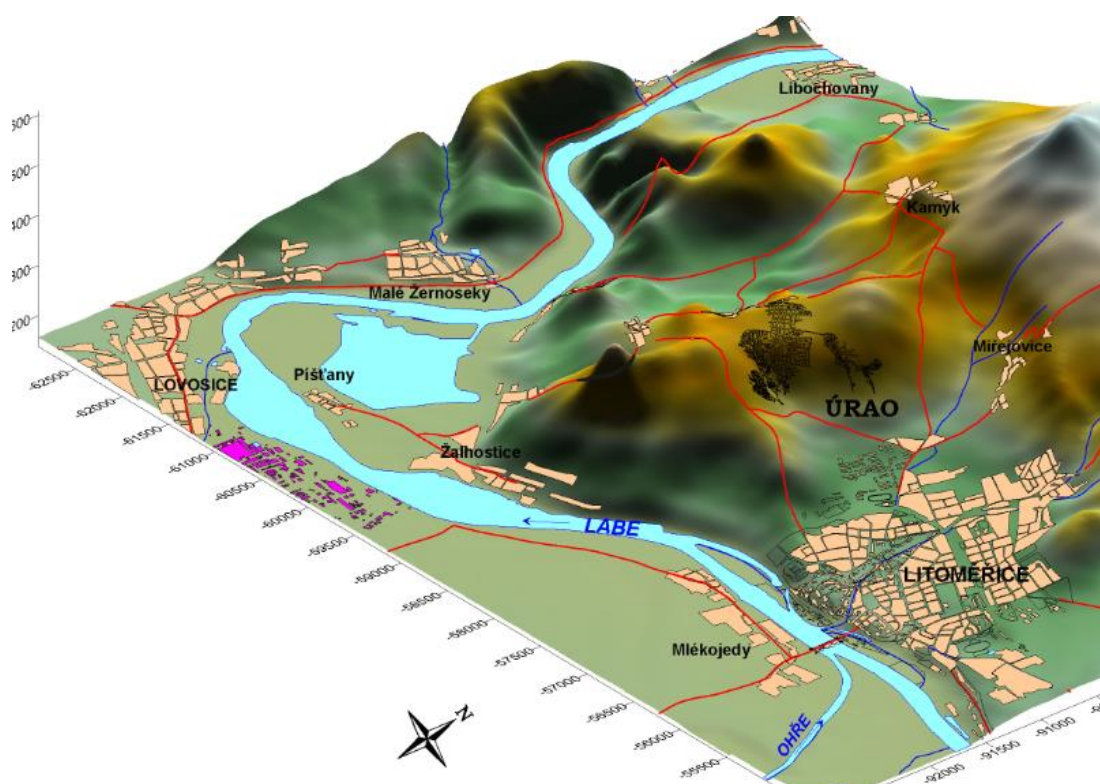
Situací úložišť ve Finsku a Švédsku se zabývá práce Milnese a kol. 2008, zkušenosti z různých světových úložišť jsou uvedeny v Bulletinu IAEA (Han a kol. 1997).



## 4. CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

### 4.1 POPIS ZÁJMOVÉ LOKALITY

Zájmové území zobrazené na obr.č. 4 včetně důlního komplexu Richard se nachází v katastrálním území Litoměřic, v severo-západní části pod vrchem Bídnice (361 m n.m.), cca 1,5 km od zástavby Litoměřic. Povrchový areál ÚRAO leží přibližně 250 m n.m. a v roce 1992 bylo MŽP ČR vyhlášeno chráněné území úložiště RAO Richard (č.j. ÚOCH/1608/92). Zájmová lokalita se nachází v CHKO České středohoří, vlastní ÚRAO leží zhruba 1 km severovýchodně od přírodní rezervace vrchu Radobýl a při severním okraji Chráněné oblasti přirozené akumulace vod (CHOPAV) Severočeská křída. Vlastní ÚRAO i většina zájmové oblasti do CHOPAV nezasahuje. (GEOTIP 2002, Polák 2013)



Obr.č.4 Zájmová lokalita v okolí ÚRAO Richard (převzato ze zprávy Polák 2013)

#### 4.1.1 Důlní komplex Richard včetně ÚRAO

Rozsáhlý důlní komplex byl původně určen k těžbě vápence. Těžba probíhala na třech místech hlubinným způsobem a vápenec se tu těžil asi 80 let až do roku 1943, kdy během války začali Němci hledat na našem území podzemní prostory vhodné ke zbudování podzemních továren a zaměřili se právě na lokalitu vápencového dolu u Litoměřic. Byla zastavena těžba vápence a začaly se budovat podzemní prostory s názvem „Richard“ ( I, II, III ). Výstavbu přerušil konec války v květnu 1945. Do té doby byla upravena jen malá část podzemí a po likvidaci německého zařízení začala roku 1946 opět těžba vápence Čížkovickými cementárnami a vápenkami. V roce 1962 bylo ložisko vytěženo a byla povolena výstavba úložiště RAO v střední části důlního komplexu Richard II. Úložiště Richard bylo uvedeno do provozu pro ukládání nízko a středně aktivního IRAO v roce 1964 a jeho využitelnost je plánována do roku 2070.

K ukládání RAO bylo upraveno v období 1962-64 630 m chodeb a postranních komor o objemu 17 050 m<sup>3</sup> v části Richard II. Jedná se pouze o malou část původního důlního komplexu Richard I, II a III, zbudovaného ve vápencové lavici. Povrchový areál ÚRAO leží v nadmořské výšce cca 250 m (vchod do úložiště je 250,4 m n.m.). Ukládací prostory jsou 70-80 m pod zemí a nadloží i podloží tvoří nepropustné horniny. Nachází se nad hladinou spodní vody a celkově jde tedy o suché úložiště. Voda se dostává do ukládacích prostor a chodeb jen ve velmi malém množství, a to např. ze vzdušné vlhkosti díky umělé ventilaci, která funguje v úložišti nebo v okolí vchodu úložiště, což ovšem žádným způsobem neovlivňuje uložený RAO. (SÚRAO 2010)

RAO je ukládán do komor podél komunikační chodby, která je 6-8 m široká a 4-5 m vysoká. Stabilitu zajišťují železobetonové rámy. Sokl i počva jsou vybetonovány a drenážní systém zajišťuje odvod technologické vody, aby nedocházelo k deformaci betonových podlah. Z geotechnického pohledu je ÚRAO stabilní a nehrozí zde jakékoliv mechanické porušení ani vliv seismických projevů. (SÚRAO 2010)

Hydrogeologické monitorování okolí úložiště zajišťuje 13 vrtů a sleduje se radionuklid <sup>3</sup>H. Jeho objemové aktivity jsou hluboko podlimitní. Žádné jiné radionuklidy nebyly detekovány (Vrbata 2004). Výsledky z monitorování oblasti úložiště Richard, byly

použity k modelové studii šíření polutantů v dané lokalitě. Podobné modelové studie na šíření radionuklidů v prostředí se zpracovávají i v zahraničí. Jako významný příklad můžeme uvést výzkum a testování transportních modelů v horninách, který provedla společnost Nagra v lokalitě Grimsel Test Site. (Smith a kol. 2001).

RAO je do uskladňovacích komor úložiště umístován vysokozdvížným vozíkem do pěti řad na sebe. Před uložením je odpad kontrolován, zda není poškozena obalová jednotka a zda není povrchově kontaminován. Do úložiště je odpad od původce odpadu dopravován již roztríděný a v obalech. Každá obalová jednotka je označena a uložena dle časové souslednosti příjmu. (SÚRAO 2010)

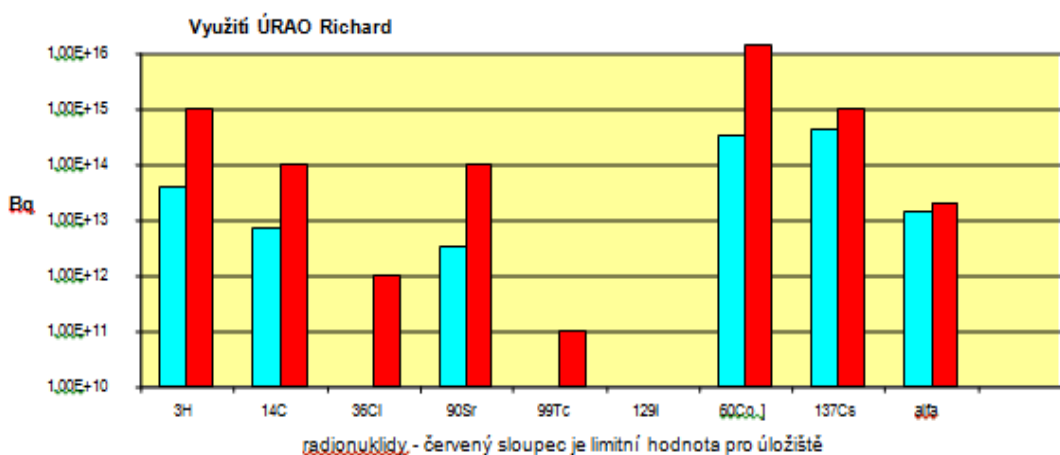
Od roku 1985 jsou odpady ukládány do dvojitých sudů, vnitřní 100 l je plechový lakovaný, vnější 200 l je z plechu o tloušťce 1,5 mm a je oboustranně pozinkovaný. Meziprostor se vyplňuje betonem. Dále se RAO ukládají do atypických obalů podle potřeby. (SÚRAO 2010)

Částečný přehled radionuklidů uložených v úložišti Richard uvádí Konopásková v tab.č. 8. Celkově je zde uloženo okolo stovky různých radionuklidů.

<b>Položka</b>	<b>1964-2005</b>	<b>Limitní hodnota</b>
	<b>/Bq/</b>	<b>/Bq/</b>
<sup>3</sup> H	5,0E+13	1,0E+15
<sup>14</sup> C	8,2E+12	1,0E+14
<sup>36</sup> Cl	9,0E+09	1,0E+12
<sup>90</sup> Sr	2,7E+13	1,0E+14
<sup>99</sup> Tc	6,3E+07	1,0E+11
<sup>129</sup> I	5,3E+06	2,0E+08
<sup>60</sup> Co	3,2E+14	Nelimitováno
<sup>137</sup> Cs	5,3E+14	1,0E+15
alfa [Bq]	1,6E+13	2,0E+13

Tab.č. 8. Radionuklidy uložené v úložišti Richard ( Konopásková 2010c )

Více rizikové odpady, tzv. kritické radionuklidy, jako např.  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  a  $^{239}\text{Pu}$  (cca  $10^{13}$  Bq) se od roku 1985 ukládají separátně. Jejichž současná uložená aktivita se při různých, aktuálně se měnících limitech pohybuje od o 3 řády podlimitní až po limitní úroveň, což je při plánování výstavby hlubinného úložiště v České republice předurčuje spíše k budoucímu převozu z úložiště Richard, kde by byly do té doby pouze uskladněny. Co a Cs zářiče se ukládají do speciálního trubkového trezoru, který je z 15-ti silnostěnných nerezových trubek s olověnou zátkou. Využití úložiště a limitní hodnoty jsou uvedeny v obr.č.5.



Obr.č.5 Využití úložiště Richard (Konopásková 2010c)

Naplněné komory jsou uzavírány, vždy ale za podmínek umožnění přístupu k technologickému vybavení dolu, jako je např. ventilace, drenážní systém a další instalace. Dále musí zůstat zajištěné přístupné nouzové východy a průjezdné udržovací komunikace. (SÚRAO 2010)

Rozhodnutím SÚJB č. 150/97 ze dne 28.5.1997, bylo úložiště Richard Litoměřice zařazeno mezi jaderná zařízení. Ukládání RAO a provoz úložiště zajišťuje od roku 1997 SÚRAO a celé okolí vchodu do úložiště je v majetku SÚRAO.

(Janů 2003a, Konopásková 2010c, MPO a SÚRAO 2001)

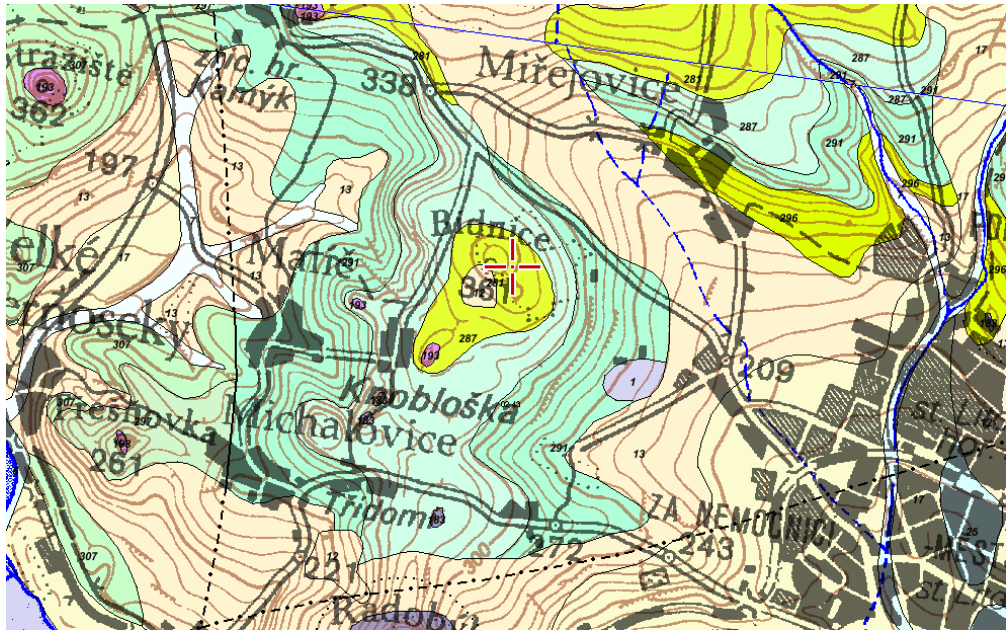
Během roku 2010 bylo do úložiště Richard uloženo 555 standardních obalových jednotek (tj.  $115,5 \text{ m}^3$ ) o celkové aktivitě  $1416 \text{ GBq}$  a 18 jednotek RAO o celkové aktivitě  $762 \text{ GBq}$ . Souhrnné informace o úložišti jsou uvedeny v tab.č.9. (SÚRAO 2010)

<b>Uvedení do provozu</b>	1964
<b>Ukončení provozu</b>	Nestanoveno
<b>Hloubka úložiště pod povrchem</b>	70-90 m
<b>Celkový upravený objem úložiště</b>	17 050 m <sup>3</sup>
<b>Zaplňené prostory</b>	5 096 m <sup>3</sup>
<b>Volné prostory</b>	3 302 m <sup>3</sup>
<b>Tunel a další komunikace (vč. k Richardu I)</b>	8 652 m <sup>3</sup>
<b>Zůstatková aktivita</b>	9,47 · 10 <sup>14</sup> Bq (95% aktivity tvoří využitě uzavřené zářiče - <sup>60</sup> Co, <sup>137</sup> Cs, <sup>241</sup> Am, <sup>239</sup> Pu, <sup>90</sup> Sr, <sup>85</sup> Kr, <sup>147</sup> Pm; z neuzavřených zářičů tvoří 80-90% <sup>3</sup> H)

Tab.č.9 Souhrnné údaje o úložišti Richard Litoměřice ( Janů 2003a )

## 4.2 GEOLOGICKÉ POMĚRY

Zájmové území lokality dolu Richard je tvořeno sedimentárními horninami křídý s intruzemi terciérních vulkanických hornin s tektonickým porušením. Podloží křídý tvoří metamorfované horniny krystalinika a sedimentární horniny permokarbonu. Pokryv tvoří kvartérní zeminy (rozložení viz obr.č.6), jejichž přehled je uveden níže.



Obr.č.6 Geologické a geovédní mapy ([www.geologicke-mapy.cz](http://www.geologicke-mapy.cz))

#### **písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment [ID: 12]**

Eratém: **kenozoikum**, Útvar: **kvartér**, Horniny: **písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment**, Typ hornin: **sediment nezpevněný**, Mineralogické složení: **pestré**, Zrnitost: **písčito-hlinitá až hlinito-písčitá**, Barva: **různá**, Poznámka: **často polygenetické**, Soustava: **Český masiv - pokryvné útvary a postvariské magmatity**, Oblast: **kvartér**

#### **olivinický nefelinit, analcimit a 'leucitit' [ID: 193]**

Eratém: **kenozoikum**, Útvar: **terciér (paleogén - neogén)**, Oddělení: **eocén, oligocén, miocén**, Suboddělení: **eocén svrchní, oligocén spodní, oligocén střední, oligocén svrchní, miocén spodní**, Poznámka: **terciér**, Horniny: **nefelinit olivinický, analcimit, leucitit**, Typ hornin: **vulkanit**, Mineralogické složení: **nefelín, (analcim), 'leucit', olivín, magnetit**, Barva: **šedá**, Soustava: **Český masiv - pokryvné útvary a postvariské magmatity**, Oblast: **terciér**, Region: **podkrušnohorské pánve a přilehlé vulkanické hornatiny, rozptýlené alkalické vulkanity**, Jednotka: **České středohoří, území české křídové tabule**, Poznámka: **České středohoří, CKT**

### **vápnité jílovce, slínovce, vápnité prachovce [ID: 281]**

Eratém: **mezozoikum**, Útvar: **křída**, Oddělení: **křída svrchní**, Stupeň: **coniac, santon**, Podstupeň: **svrchní coniak**, Souvrství: **březenské**, Horniny: **jílovec vápnitý, slínovec, prachovec vápnitý**, Typ hornin: **sediment zpevněný**, Mineralogické složení: **vápnitý**, Soustava: **Český masiv - pokryvné útvary a postvariské magmatity**, Oblast: **křída**, Region: **česká křídová pánev**, Jednotka: **ohárecký vývoj, lužický vývoj, labský vývoj**

### **silicifikované jílovité vápence a slínovce [ID: 287]**

Eratém: **mezozoikum**, Útvar: **křída**, Oddělení: **křída svrchní**, Stupeň: **coniac**, Podstupeň: **coniak spodní, coniak střední**, Souvrství: **teplické**, Člen: **rohatecké**, Poznámka: **pásmo Xd**, Horniny: **vápenec silicifikovaný, slínovec**, Typ hornin: **sediment zpevněný**, Mineralogické složení: **jíl, silicifikovaný**, Poznámka: **periodity**, Soustava: **Český masiv - pokryvné útvary a postvariské magmatity**, Oblast: **křída**, Region: **česká křídová pánev**, Jednotka: **ohárecký vývoj, jizerský vývoj**, Poznámka: **jizerský vývoj na západ od řeky Jizery**

### **vápence jílovité a slínovce (střídání) [ID: 291]**

Eratém: **mezozoikum**, Útvar: **křída**, Oddělení: **křída svrchní**, Stupeň: **turon, coniac**, Podstupeň: **turon svrchní, coniak spodní**, Souvrství: **teplické**, Poznámka: **pásmo Xb, při bázi vápenců koproilitová vrstva Xa**, Horniny: **vápenec jílovitý, slínovec**, Typ hornin: **sediment zpevněný**, Mineralogické složení: **jíl**, Poznámka: **rytmy vápenec-slínovec**, Soustava: **Český masiv - pokryvné útvary a postvariské magmatity**, Oblast: **křída**, Region: **česká křídová pánev**, Jednotka: **ohárecký vývoj**

Pro řešení problematiky transportu potenciálních kontaminantů z úložiště Richard v horninovém prostředí je důležité složení a tektonické porušení křídových hornin. Složení křídových hornin je způsobeno změnami sedimentačních podmínek svrchnokřídového moře.

Spodní část horninového komplexu (stáří cenoman-spodní turon) má celkovou mocnost několik desítek metrů a je tvořena cenomanskými pískovci s místy ojediněle šedými prachovitopísčitymi jílovci. Pískovec je jemnozrný až středně zrnitý, slabě jílovitý, bělošedý a hlavním horninotvorným minerálem je křemen.

Svrchní část komplexu stáří cenoman-spodní turon má celkovou mocnost řádově desítky metrů a je tvořena šedým až šedožlutým jemnozrným slinitým pískovcem. Horninu tvoří jemná izometrická křemenná zrna. Intergranuláry vyplňuje kalcitové pojivo a jílové minerály, dále omezeně glaukonit, který se lokálně rozkládá na směs limonitu a opálu. Lokálně zde dochází k přechodům do písčitých jílovců, prachovců a slínovců. V okolí ÚRAO jsou jemnozrné slinité pískovce spodního turonu od hloubky cca 200 m.n.m.

V horninovém komplexu stáří turon-senon s celkovou mocností několik desítek metrů je základním litotypem šedý slínovec s vložkami světle šedého jílovitého vápence. V blízkosti ÚRAO jsou slínovce středního turonu v intervalu cca 200-250 m.n.m. a tvoří podloží jílovitého vápence báze svrchního turonu, kde je situováno ÚRAO. Nadloží úložiště tvoří slínovec.

Vlastní ÚRAO je vybudováno ve světle šedých jílovitých vápencích báze svrchního turonu. 70-90% horniny je tvořeno  $\text{CaCO}_3$  s příměsí jílových minerálů a omezeně s akcesorickým pyritem a glaukonitem. Vápenec má tvar subhorizontální desky s mocností přes 5m na JJZ v okolí Richard I a směrem k Richardu III na SSV se mocnost snižuje až pod 2m.

Nadloží vápence tvoří šedé slínovce svrchního turonu až senonu s vložkami jílovitých vápenců a psamitickou příměsí. Jde o jílovitý slínovec, kde jílové minerály převažují nad  $\text{CaCO}_3$ . Navětralé partie počvy dolu jsou střípkovitě rozpadavé a slínovec při kontaktu se vzdušnou vlhkostí jílovitě zvětrává. Celková mocnost slínovců nadloží ÚRAO je cca 50 m. (GEOTIP 2012)



#### 4.2.1 Geotechnická charakteristika horninového masivu

Horninové prostředí důlního komplexu je tedy tvořeno třemi typy subhorizontálně uložených sedimentárních hornin. Jsou to slínovce podloží, vápence a slínovce nadloží. Jde o anizotropní prostředí.

Nejlepší vlastnosti mají jílovité vápence (ložisko, báze svrchního turonu): obsah  $\text{CaCO}_3$  je cca 75%, jemnozrnné písčité příměsi cca 15%. Jde o horninu neztváralou, kompaktní, středně pevnou, nepravidelného až lasturnatého zlomu. Místy s lavicovitou odlučností několika mm vrstviček jílu.

Slínovce nadloží mají mnohem horší vlastnosti. Hranice mezi vápenci a nadložními slínovci je ostrá a jeví se jako odlučná strukturní plocha. Obsah  $\text{CaCO}_3$  je pod 60%. Jde o tmavě šedé slínovce s výraznou odlučností podle vrstev a subvertikálních diskontinuit. Oddělující se desky mají mocnost 30cm a vlivem zvětrávání se oddělují cca 10 cm šupinky.

Podložní tmavě šedé jílovité slínovce (střední turon) až vápenité jílovce mají nejhorší technické vlastnosti. Obsah  $\text{CaCO}_3$  klesá pod 35%, jsou měkké, tenké deskovitě vrstevnaté, zvětralé a střípkovitě rozpadavé. V rámci průzkumu pro bezpečnostní studii (Geotip 2001) byly všechny tři typy hornin podrobeny zkouškám mechaniky hornin. Charakteristické hodnoty pro jednotlivé horninové typy jsou uvedeny v tab.č.10 (Beneš a kol.1996, GEOTIP 2002)

Parametr			Slínovec nadloží	Vápenec ložisková poloha	Slínovec podloží
Zatřídění dle ČSN 73 1001 (stupeň pevnosti)			R4	R3-R2	R4
<b>Popisné vlastnosti</b>					
Objemová hmotnost přirozená, vlhká	$\rho_n$	(kg.m <sup>-3</sup> )	<b>2360</b>	<b>2555</b>	<b>2420</b>
Objemová tíha vlhká	$\gamma_n$	(kN.m <sup>-3</sup> )	<b>23,8</b>	<b>25</b>	<b>24</b>
Tíhová vlhkost přirozená	$w_n$	(%)	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>5,3</b>
Stupeň nasycení	$S_r$	(%)	<b>70</b>	<b>60</b>	<b>70</b>
Pórovitost	$n$	(%)	<b>14,6</b>	<b>5,8</b>	<b>11</b>
Nasákavost do ustálené hmotnosti (po 48 hod.)		(%)	-	<b>4,04</b>	-
Propustnost po nasycení (filtrační součinitel)	$k_{10}$	(m.s <sup>-1</sup> )	<b>8,6.10<sup>-11</sup></b>	<b>2,2.10<sup>-9</sup></b>	<b>5,4.10<sup>-10</sup></b>
Bobtnavost		(%)	<b>11,4</b>	-	<b>3,5</b>
<b>Deformační a pevnostní zkoušky</b>					
Pevnost v prostém tlaku	$\sigma_c$	(Mpa)	<b>22</b>	<b>48</b>	<b>25</b>
Modul přetvárnosti	$E_{def}$	(Mpa)	<b>2960</b>	<b>15 560</b>	<b>4980</b>
Modul pružnosti	$E$	(Mpa)	<b>4040</b>	<b>19 040</b>	<b>7030</b>
Poissonovo číslo	$\nu$		<b>0,05</b>	<b>0,13</b>	<b>0,07</b>
Úhel pevnosti (úhel vnitřního tření)	$\varphi$	(°)	<b>61°</b>	<b>64°</b>	<b>62°</b>
Počáteční pevnost (smyková pevnost při 0,00 normálovém namáhání)	$\tau_0$	(Mpa)	<b>3,25</b>	<b>6,75</b>	<b>2,75</b>

Tab.č.10 Charakteristické geotechnické vlastnosti horninových typů (GEOTIP 2002)

Celé horninové prostředí zájmové lokality se dělí na 7 geologických vrstev: (GEOTIP 2002)

1. vrstva – povrchová, tvořena kvartérními sedimenty (spraše a šterkopísky), lokalizovaná okolo koryta Labe a Píšťanského jezera
2. vrstva - svrchní vrstva slínovců
3. vrstva – podloží úložiště, slínovce, po stranách kopce vystupující místy a povrch
4. vrstva – pískovce, klesající směrem k Labi
5. vrstva – pískovce s příměsí jílovců, kopíruje vrstvu 4
6. vrstva – jílovců, bazální vrstva v místech pod korytem Labe a jezera
7. vrstva – ruly a fylity, bazální vrstva doplňující vrstvu 6 pod oblastí úložiště

#### 4.2.2 Strukturně tektonické poměry

Prostupnost hornin pro vodu ovlivňuje kromě litologie hlavně charakter a množství puklin tektonického původu. Zájmové území v okolí dolu Richard leží v zóně se zvýšenou tektonickou činností, a to díky struktuře litoměřického hlubinného lomu vedoucího ve směru SV-JZ s kernou stavbou.

ÚRAO je vyhloubeno v horninovém komplexu severně od Litoměřického zlomu a intruze Radobýlu a uplatňuje se zde hlavně tektonika směru S-J a SSZ-JJV a SZ-JV. Horninový blok s ÚRAO je ještě dále segmentován s dílčími pohyby. Celkově nízké měrné odpory při povrchovém geofyzikálním průzkumu svědčí o velkém podílu pelitické frakce, tj. jílové minerály v celém horninovém komplexu podloží ÚRAO, který je tvořen slínovci a jemnozrnnými slínitými pískovci.

Jižně od Litoměřického zlomu v horninovém bloku křídových sedimentů Radobýlu jsou umístěny jímací vrty Pišťanského meandru, které se využívají pro čerpání pitné vody pro veřejné zásobování.

Svrchní část zóny Litoměřického lomu i dalších zlomů má velký podíl jílovité výplně. Nižší podíl jílovité výplně a tím i vyšší prostupnost můžeme předpokládat v hlubších partiích křídové pánve nebo křídového fundamentu. Převážně v rozpukané zóně podél osy zlomu. (GEOTIP 2012)

#### 4.3 KLIMATICKÉ POMĚRY

Zájmové území v okolí důlního komplexu Richard je oblast teplá a suchá s mírnou zimou. Dlouhodobý roční srážkový úhrn (Litoměřice 174 m n.m.) je 473 mm. Srážková maxima jsou v období červen až srpen, minima leden až březen. Průměrná roční teplota je 8,5°C. (GEOTIP 2012).

Průměrné roční srážkové úhrny pro rok 2003-2012 jsou uvedeny v tab.č.11 (Polák 2013)

hydrologický rok	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	průměr
úhm (mm)	367.7	401.7	380.6	391.2	426.1	427.6	405.3	544.3	354.8	473.7	417.3

Tab.č.11 Průměrné roční srážkové úhrny 2003-2012 (Polák 2013)

#### 4.4 HYDROLOGICKÉ POMĚRY

Zájmové území leží v povodí Labe. Průměrný roční průtok v Labi je 290,7 m<sup>3</sup>/s ve vodotečném profilu Litoměřice.

Zájmové území je součástí dílčích hydrologických povodí:

č. 1-13-05-002

č. 1-13-05-003 (zde ÚRAO, hl. erozní bázi je koryto Labe mezi Litoměřicemi a Lovosicemi)

č. 1-13-05-009

č. 1-13-05-015

(GEOTIP 2012, Polák 2013)

##### 4.4.1 Hydrogeologické poměry

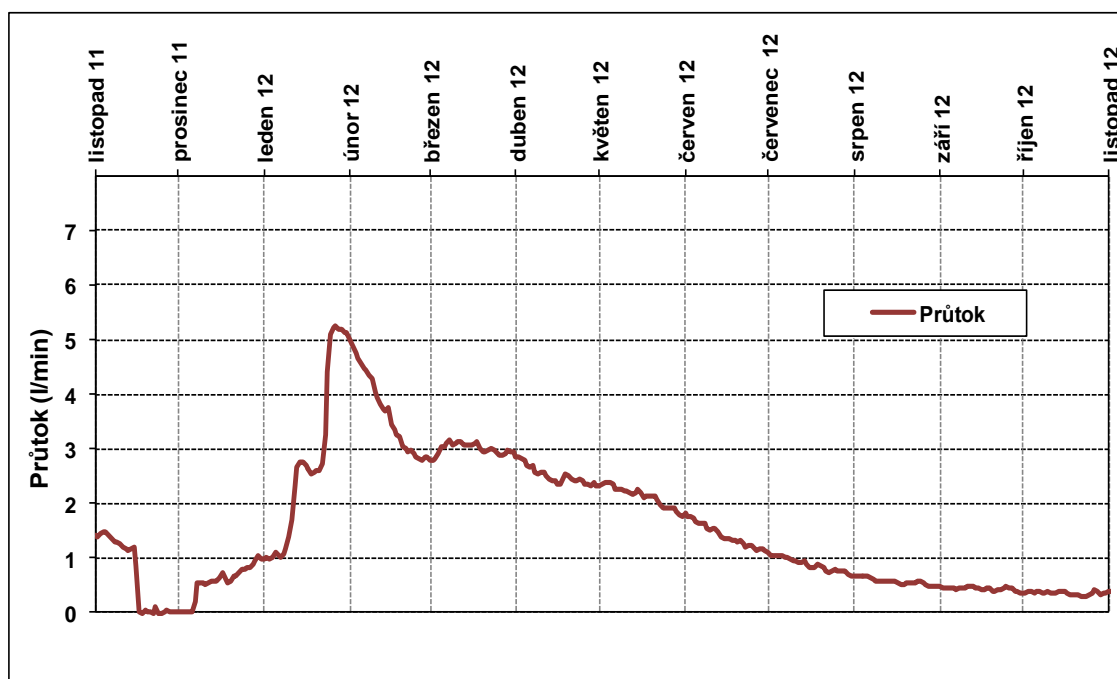
Na zájmovém území můžeme rozlišit dva vodohospodářsky významné kolektory. Celoplošný křídový kolektor hlubšího oběhu podzemní vody, cenoman-spodní turon a lokální kolektor mělkého oběhu podzemní vody, který tvoří kvartérní štěrkopisky údolní nivy Labe. Oba kolektory se využívají pro zásobování pitnou vodou. V blízkosti úložiště můžeme rozlišit ještě vodohospodářsky nevýznamný kolektor v sedimentech středního turonu.

Celoplošný **kolektor cenoman-spodní turon** tvoří horniny s převládající psamitickou frakcí (pískovce) a částečně i horniny s převládající frakcí pelitickou (jílovce). Je dotován podzemním přítokem a infiltrací. Jde o průlinově-puklinový kolektor s transmisivitou 10<sup>-2</sup> až 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s a koeficientem filtrace 10<sup>-4</sup> až 10<sup>-7</sup> m/s. Pro oběh podzemní vody má hlavní význam puklinová propustnost s nižší příčnou a vyšší

podélnou propustností. Směr proudění podzemní vody jde směrem k jihu k erozní bázi koryta Labe. Režim hladin podzemních vod je lokálně volný a lokálně napjatý. Místy je možno v tomto kolektoru odlišit dva kolektory s rozdílnými tlakovými vlastnostmi, spodní turon a cenoman. V okolí ÚRAO je hladina podzemní vody 180-187 m n.m. (HV-1, PV9). V okolí drenáže kolektoru do Labe je hladina podzemní vody 141-145 m n.m. (PV12).

Lokální zvodnění středního turonu v okolí ÚRAO je popisováno jako **střednoturonský puklinový kolektor** s volnou hladinou. Proudění podzemní vody probíhá vertikálně směrem k bázi kolektoru. Transmisivita je zde  $10^{-5}$  až  $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s a koeficient filtrace  $10^{-6}$  až  $10^{-9}$  m/s. Kolektor je odvodňován do podložního kolektoru cenoman-spodní turon nebo do nadložních kvartérních hornin. Hladina podzemní vody v okolí ÚRAO je na úrovni 218-228 m n.m., tj. 40 m nad hladinou ve spodním turonu a cenomanu. Během sledování v letech 1997-2012 hladina podzemní vody kolísala v rozsahu 5-9 m.

ÚRAO je uloženo v desce jílovitého vápence. Podloží i nadloží tvoří slínovcový komplex střední turon-senon s minimální propustností a koeficientem filtrace  $10^{-6}$  až  $10^{-12}$  m/s. Důlní vody důlního komplexu včetně ÚRAO vznikají infiltrací srážek po umělých nehomogenitách jako např. vrty, větrací komíny apod. a kondenzací vzdušné vlhkosti. Pohyb vod v celém důlním komplexu, cca 27 km chodeb, je velmi slabý a je omezen na drenážní systém. Množství důlní vody je cca v setinách až desetínách l/s. Průběh velikosti odtoku v roce 2012 je znázorněn na obr.č.7. Tato voda je přes kontrolní jímku vypouštěna do kanalizačního systému města Litoměřice a kvalita je stále monitorována.



Obr.č.7 Průběh odtoku důlních vod v roce 2012 (Geotip 2013b)

Pokryv zájmové oblasti tvoří kvarterní horniny, které jsou až na šterkopísky Labe slabě propustné. Šterkopísky nivy Labe jsou dobře průlinově propustné. Volná hladina podzemní vody je zde v přímé hydraulické spojitosti s tokem. Tento lokální **kolektor v kvartérních sedimentech** je vodohospodářsky velmi významný a přes tento kolektor dochází k odvodnění kolektoru cenoman-spodní turon.

(GEOTIP 2012, Polák 2013)

#### *Odběry podzemní vody:*

Významné vodárenské odběry jsou v zájmové oblasti hlavně v okolí píšťanského meandru. Využíván je kolektor cenoman-spodní turon (vrty V1a a V4a) a kolektor kvartérních sedimentů (8 mělkých vrtů). V Litoměřicích není žádný významný odběr podzemní vody. Dříve byl evidován odběr u nemocnice (Li1b), který byl ukončen v roce 2007, dále odběr pro mrazírny (LT1), ukončen r. 2005 a odběr v pivovaru (HV1) ukončen v r. 2002. Pro modelové řešení jsou významné odběry z let 2002-2012 z databáze evidovaných odběrů VÚV TGM v.v.i. (Polák 2013)

#### 4.4.2 Složení vod

Složení vod v zájmové oblasti bylo stanoveno na základě hydrochemického monitoringu provedeného v letech 2001-2002.

Důlní voda ÚRAO je základního typu Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>, pH 7,7-8,1, se zvýšenou mineralizací, tvrdost 16,7-18,7 mval/l. Je slabě agresivní. Ze sledovaných kovů a doprovodných prvků byly detekovány pouze stopy B (0,14-0,18mg/l), Ba (0,03-0,05 mg/l), Br (0,056-0,083 mg/l), I (0,0022-0,0028 mg/l), Sr (3,3-3,7 mg/l) a ojediněle bylo detekováno Li (0,10 mg/l). Jde o podzemní vodu, která se do důlního systému dostává přes umělé nehomogenity v nadložních slínovcích. Složení důlní vody nevede ke změně chemismu, který by mohl být způsoben vyluhováním uložených RAO. Radiační monitoring SÚRAO vykazuje zvýšený obsah tritia.

Podzemní vody lokálního zvodnění středního turonu v blízkosti ÚRAO (PV4, PV5, PV6) jsou základního typu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> (PV4) až CaSO<sub>4</sub> (PV6), hodnoty pH 7,2-9,2 s mineralizací 310 (PV6)- 1200 (PV4) mg/l, tvrdost 3,7 (PV6) – 19,4 (PV4). Ze sledovaných prvků byly detekovány B (0,06-0,10 mg/l), Ba (0,015-0,048 mg/l), Li (0,022-0,04 mg/l), Sr (0,44-3,9 mg/l) a ojediněle Al (0,12 mg/l), Br (0,19 mg/l), I (0,0043 mg/l) a Zn (0,011 mg/l). Velký rozptyl parametrů je způsoben proměnlivou infiltrací srážek do puklinových systémů v bližším a vzdálenějším okolí. Složení vod neindikuje změnu chemismu, jehož příčinou by byly průsaky z úložiště.

Podzemní vody hlubšího oběhu hlavní křídové zvodně ze spodního turonu bližšího okolí ÚRAO (HV1, PV2/2, PV3, PV9, KAS) jsou typu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>, pH 6,8-8,0 se zvýšenou mineralizací 840-1700 mg/l, tvrdost 15,7-29,9 mval/l. Ze sledovaných kovů a doprovodných prvků byly detekovány pouze stopové množství Ba (0,011-0,018 mg/l), Br (0,05-0,064 mg/l), Li (0,04-0,18 mg/l), Sr (0,68-1,7 mg/l) a výjimečně Al (0,15 mg/l – PV1), B (0,07mg/l – PV1) a Zn (0,29 mg/l – PV9). Složení podzemních vod neindikuje změny chemismu.

Podzemní voda vzdáleného okolí ÚRAO z vrtů PV10 a PV11 je typu Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>, pH 7,02-7,04 se zvýšenou mineralizací 1000-1100 mg/l, tvrdost 16,404-16,409

mval/l. Ze sledovaných kovů a doprovodných prvků bylo detekováno stopové množství B (0,18-0,26 mg/l), Ba (0,019-0,024 mg/l), Br (<0,05-0,13 mg/l), Li (0,091-0,11 mg/l), Sr (3,4-4,5 mg/l) a Zn (0,26-0,46 mg/l). Jde o podzemní puklinovou vodu ze slínovců středního turonu a podílí se na dotaci hlavní křídové zvodně v oblasti k erozní bázi koryta Labe. Složení podzemní vody neindikuje změny chemismu.

Podzemní vody hlubšího oběhu hlavní křídové zvodně ze spodního turonu a cenomanu vzdáleného okolí ÚRAO jsou typu Ca-Mg(Na)-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> (vrty PM-V 1 a pivovar), pH 6,8-7,0 se zvýšenou mineralizací 680-950 mg/l, tvrdost 11,4-13,7 mg/l. Sledované kovy a doprovodné prvky byly zjištěny ve stopovém množství B (0,15-0,19 mg/l), Br (0,052-0,63 mg/l), I (0,0057-0,0084 mg/l), Li (< 0,05-0,13 mg/l), Sr (1,3-1,7 mg/l). Složení neindikuje změnu chemismu. (GEOTIP 2013a)

#### **4.4.3 Oběh podzemní vody**

Proudění podzemní vody v zájmové oblasti je vertikálně i horizontálně nehomogenní.

V nadloží ÚRAO voda infiltruje ze srážek a vertikálně prosakuje do úložiště, kde je část odváděna drenážním systémem a část dále prosakuje k hladině podzemní vody v kolektoru středního turonu a následně infiltruje do kolektoru cenoman-spodní turon. V nasycené zóně tohoto kolektoru se směr proudění mění z vertikálního na horizontální, směrem k drenážním oblastem.

Mezi oblastí možné kontaminace podzemní vody v ÚRAO a oblastmi drenáže se nacházejí výrazné nehomogenity, které ovlivňují trasu možného transportu kontaminantů:

- litoměřický zlom (ve směru SV-JV s poklesy na jih do údolí Labe)
- linie Kamýk-Malíč-Michalovice (zlomové pásmo ve směru S-J) s poklesy na východ od údolí Labe
- čedičová intruze Radobýl
- žilná intruze bazaltů ve směru SZ-JV v okolí vrchu Knobloška



Mimo tyto významné nehomogenity se na změně trasy transportu kontaminantů mohou podílet i nehomogenity geologicky méně významné, ale s významem hydrogeologickým. (Polák 2013)

#### 4.5 SEISMICITA

V zájmové oblasti můžeme hovořit o velmi slabé seismicitě. V období 1590 – 1986 bylo dosaženo maximální intenzity zemětřesení podle stupnice MSK 64 stupně 3 – 4. Vyšší intenzita byla zjištěna jen v roce 1963, kdy bylo dosaženo stupně 4-5 (epicentrum Rakousko) a podle historických záznamů v roce 1590 byl dosažen stupeň 6 (epicentrum Rakousko). Lokalita včetně úložiště ÚRAO je z hlediska bezpečnosti zařazena do výpočtového stupně 6 podle MSK 64. Z průzkumů a dostupných informací je zřejmé, že seismicita lokality nepředstavuje riziko pro stabilitu ÚRAO a změnu režimu proudění podzemní vody.

Z pohledu dlouhodobé stability ÚRAO lze považovat za potencionální riziko seismicita vyvolaná uměle. Zdrojem umělé seismicity může být těžba s využitím trhavin v okolních kamenolomech (Kamýk, Malé Žernoseky, Dobkovičky, Libochovice) a těžba hnědého uhlí odpaly v okolí Bíliny. Dalším zdrojem může být i výstavba inženýrských sítí a staveb v pevných horninách Litoměřic. Do 50m od důlního díla by měla být minimalizována jakákoliv seismicky aktivní činnost, tj. hlavně zemní a destrukční práce. Rychlost kmitání základové desky by neměla přesáhnout 3mm/s. Tato hodnota byla empiricky stanovena pro ochranu historických staveb a památek při výstavbě pražského metra. Podzemní díla uvnitř horninového masívu mohou být zatížena až desetinásobně. Seismickými normami jsou doporučena měření a monitoring. (GEOTIP 2013a)

## **5. METODIKA**

### **5.1 SHROMÁŽDĚNÍ DAT REŠERŠNÍHO CHARAKTERU**

Pro rešeršní část práce jsem využila doporučenou literaturu, odbornou a vědeckou literaturu související s tématem, materiály poskytnuté panem Ing. Janů ze SÚRAO, materiály poskytnuté z ČVUT FJFI, literaturu z Národní Technické Knihovny, materiály z přednášek, z internetových zdrojů apod.

### **5.2 SHROMÁŽDĚNÍ DAT PRO PRÁCI V GIS**

Data potřebná k vytvoření vizualizace jednotlivých geologických vrstev zájmové lokality v GIS jsem získala od Ing. Janů ze SÚRAO. Výchozím podkladem byly geologické řezy zájmové oblasti, včetně údajů z karotážních měření z vrtů v okolí. Formát dat popisuje následující podkapitola 5.3.

### **5.3 POPIS VSTUPNÍCH DAT – FORMÁTY, POTŘEBNÝ SOFTWARE**

Vstupní podklady v podobě pdf. nákresů geologických řezů zájmové lokality nebyly v této podobě přímo použitelné pro práci v geografickém softwaru ArcGis, proto bylo třeba je nejprve podrobně prostudovat a získat z nich data uložitelná ve formátu xls. (popsáno v kapitole 5.4). Tato data byla následně použita pro tvorbu geologických vrstev a jejich interpolaci. Pracovala jsem s verzí softwaru ArcGis verze 10.2.2. získanou z Netstorage.

## 5.4 PŘÍPRAVA DAT PRO PRÁCI V ArcGis

### Určení souřadnic a mocností jednotlivých geologických vrstev

Prvotním cílem bylo zjistit JTSK-Křovákovi souřadnice obou geologických řezů, označených jako profil A-B a profil C-D. Porovnáním mapy *Situace schématických geologických řezů* (příloha č. 1.) s mapou z webového zdroje (mapy Seznam) jsem zjistila, že mapa *Situace geologických řezů* dává zkreslené hodnoty (pravděpodobně nepřesným skládáním jednotlivých mapových listů). Z tohoto důvodu jsem přesné souřadnice konců profilů odečetla z webového zdroje.

Konce profilů byly odečteny v souřadnicích (WGS84) a tyto souřadnice jsem přepočítala na souřadnice JTSK pomocí web aplikace na [www.estudanky.eu/prevody-souradnic](http://www.estudanky.eu/prevody-souradnic). Následně jsem odečetla skutečnou délku profilů z mapy *Situace schématických geologických řezů A-B a C-D* v měřítku 1:10 000.

Mapové podklady *Schématických geologických řezů* (příloha č.2 a č.3) jsem naskenovala do rozlišení 600 dpi (formát .jpg). a na obou profilech (A-B, C-D) jsem vyznačila místa, v kterých budu zjišťovat mocnosti jednotlivých geologických vrstev (A1, A2, B1, atd.) a očíslovala tektonické linie (z1, z2, atd.).

Bylo třeba určit:

- 1) polohu jednotlivých vyznačených míst na obou profilech v souřadnicích JTSK
- 2) polohu jednotlivých zlomů
- 3) nadmořskou výšku terénu v místě vyznačených bodů-profilů a zlomů
- 4) nadmořské výšky hranic jednotlivých vrstev na profilech
- 5) nadmořské výšky hranic geologických vrstev na jednotlivých zlomech z levé i pravé strany
- 6) polohu vodních ploch a dolu Richard

Poloha jednotlivých profilů v JTSK byla zjišťována následujícím způsobem:

Vycházíme ze zjištěných JTSK souřadnic konců profilů A-B a C-D, př. pro profil C-D v tab.č.12

<b>Bod</b>	<b>Y</b>	<b>X</b>
<b>C</b>	$Y_C$	$X_C$
<b>D</b>	$Y_D$	$X_D$

Tab.č.12 Formát JTSK souřadnic pro profil C-D.

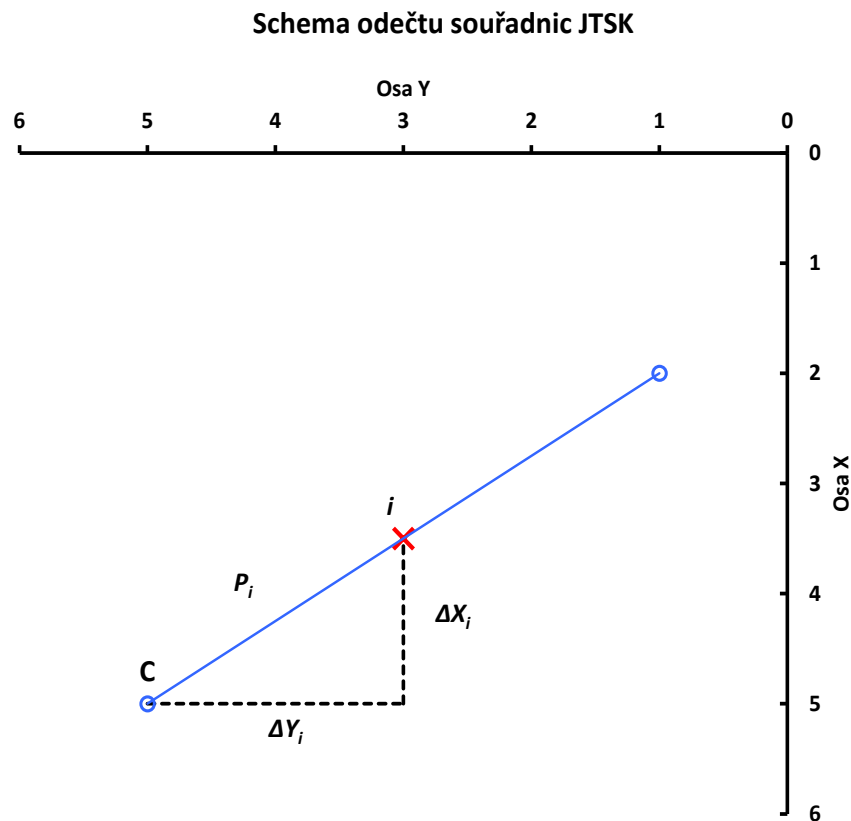
Směrnice profilu se vypočte podle vztahu (14):

$$S = \frac{X_D - X_C}{Y_C - Y_D} \quad (14)$$

Platí, že (15)

$$P_i^2 = \Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 \quad (15)$$

Grafické znázornění odečtu souřadnic JTSK zobrazuje obr.č.8.



Obr.č.8 Schéma odečtu souřadnic JTSK

Kde  $P_i$  je vzdálenost bodu  $i$  od koncového bodu profilu (m),  $\Delta X_i$  je přírůstek souřadnice x bodu  $i$  od polohy koncového bodu profilu a  $\Delta Y_i$  je přírůstek souřadnice y bodu  $i$  od polohy koncového bodu profilu.

Jelikož platí  $\frac{\Delta X_i}{\Delta Y_i} = S$  dostáváme:

$$P_i^2 = S^2 \Delta Y_i^2 + \Delta Y_i^2 = \Delta Y_i^2 (S^2 + 1) \quad (16)$$

$$\text{z toho } \Delta Y_i = \frac{P_i}{\sqrt{(S^2+1)}} \quad (17)$$

Potom souřadnice JTSK pro libovolný bod  $i$  na profilu C-D jsou:

$$Y_i = Y_C + \Delta Y_i \text{ a } X_i = X_C + S \Delta Y_i \quad (18)$$

Vzdálenosti bodu  $i$  od koncového bodu profilu byly počítány pomocí vztahu:

$$P_i = \frac{\Delta n_i}{\Delta n_{CD}} P_{CD} \quad (19)$$

Kde  $P_i$  je vzdálenost bodu  $i$  od koncového bodu profilu C (m),  $\Delta n_i$  je vzdálenost bodu  $i$  od koncového bodu profilu v naskenovaném obrázku profilu C-D v pixelech a  $\Delta n_{CD}$  je délka celého profilu C-D v naskenovaném obrázku v pixelech.

$P_{CD}$  je délka celého profilu C-D v metrech (odečteno z mapy *Schématický geologický řez C-D* v měřítku 1:10 000).

**Nadmořské výšky** jsem odečetla v místech profilů a zlomů z naskenovaného jpg obrázku *Schématického geologického řezu* pomocí vztahu:

$$mnm_j = \frac{\Delta m_j}{\Delta m_{450}} 450 - 50 \quad (20)$$

Kde  $mnm_j$  je nadmořská výška bodu  $j$ ,  $\Delta m_j$  je vzdálenost v pixelech v naskenovaném obrázku bodu  $j$  od nadmořské výšky -50 m n.m. (základní linie v obrázku řezu),  $\Delta m_{450}$  je vzdálenost v pixelech mezi -50 a 400 m n.m. v naskenovaném obrázku.

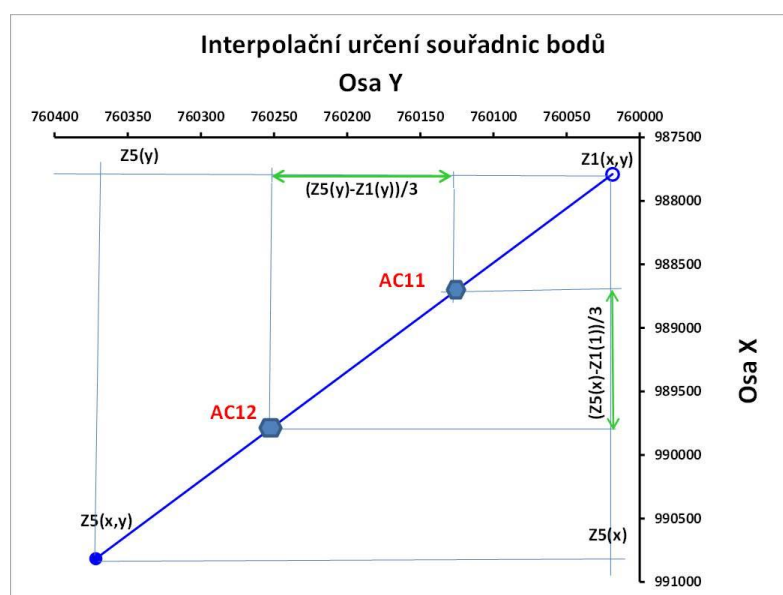
Stejný postup pro zjištění JTSK souřadnic a nadmořských výšek jsem použila i při vyhodnocení profilu A-B.

Výsledná data jsem uložila ve formátu xls. a použila je jako vstupní data pro práci v GIS.

S těmito daty jsem provedla první zkušební interpolaci na jednotlivých geologických vrstvách, z jejichž výsledku se ukázalo, že body pouze z řezů jsou nedostatečné a výstup z interpolace neodpovídá reálnému prostředí. Proto bylo potřeba body na řezech doplnit ještě o data z dalších bodů-profilů v dané oblasti. Protože další nákresy jednotlivých geologických vrstev nebyly k dispozici, určila jsem doplňující body lineární interpolací mezi body (AC11, AC12, atd.) řezu A-B a C-D. Přičemž body, mezi kterými byla provedena interpolace, jsem zvolila v bodě zlomů na jednotlivých profilech. Všechny body byly zjištěny následujícím postupem:

Př. Stanovení bodů AC11, AC12:

K interpolaci jsem použila body z1 na profilu AB a z5 na profilu CD. Tyto body jsem spojila přímkou a v jedné třetině přímky od bodu z1 byl umístěn bod AC11 a ve dvou třetinách bod AC12. Souřadnice bodů byly určeny z podobnosti trojúhelníků (obr.č.9).



Obr.č.9 Interpolační určení souřadnic bodů

Souřadnice  $x$  bodu AC11 byla určena ze vztahu:

$$AC11(x) = z1(x) - \frac{z5(x)-z1(x)}{3} \quad (21)$$

A podobně se vypočetly ostatní souřadnice podle vztahů:

$$AC12(x) = z1(x) - \frac{2(z5(x)-z1(x))}{3} \quad (22)$$

$$AC11(y) = z1(y) - \frac{z5(y)-z1(y)}{3} \quad (23)$$

$$AC12(y) = z1(y) - \frac{2(z5(y)-z1(y))}{3} \quad (24)$$

Stejným způsobem na základě podobnosti trojúhelníků jsem vypočetla nadmořské výšky v bodech AC11 a AC12 pro jednotlivé vrstvy:

$$AC11(nm) = z1(nm) + \frac{z5(nm)-z1(nm)}{3} \quad (25)$$

$$AC12(nm) = z1(nm) + \frac{2(z5(nm)-z1(nm))}{3} \quad (26)$$

Stejně jsem dopočítala souřadnice a nadmořské výšky pro ostatní doplňující interpolované body.

Takto získané údaje o nových bodech jsem doplnila do tabulky k původním údajům a použila je k interpolaci pomocí ArcGis. (Příloha č. 4)

## 5.5 INTERPOLACE V GIS

Interpolace je definována jako proces predikce hodnot určité veličiny v požadovaném místě, na základě hodnot naměřených v bodech umístěných v zájmové lokalitě v oblasti tohoto místa. Na základě různých interpolačních technik lze tak z dostupných bodů o známých hodnotách sledované veličiny provést odhady hodnot v bodech neznámých. (Bašta 2008)

Pro interpolaci jsem použila tři interpolační techniky: IDW, TOPO TO RASTER a NATURAL NEIGHBOR.

## Popis použitých interpolačních technik

### IDW:

Podstatou metody inverzních vzdáleností je tzv. *první geografické pravidlo*: „Věci, které mají k sobě blíže, spolu více souvisí než ty vzdálenější“. Tato metoda se proto používá k určení nadmořské výšky z buňky pomocí váženého průměru z nadmořských výšek bodů ležících do určité vzdálenosti (dle vyhledávacího poloměru) od počítané buňky. Váhy jsou reprezentovány inverzemi vzdáleností bodů od místa odhadovaného parametru. Jde o exaktní, lokální a deterministickou interpolační metodu. Užívaná zkratka metody IDW pochází z anglického výrazu *inverse distance weighted*. (Bašta 2008, Kadlčíková 2007)

Základní rovnice pro metodu IDW:

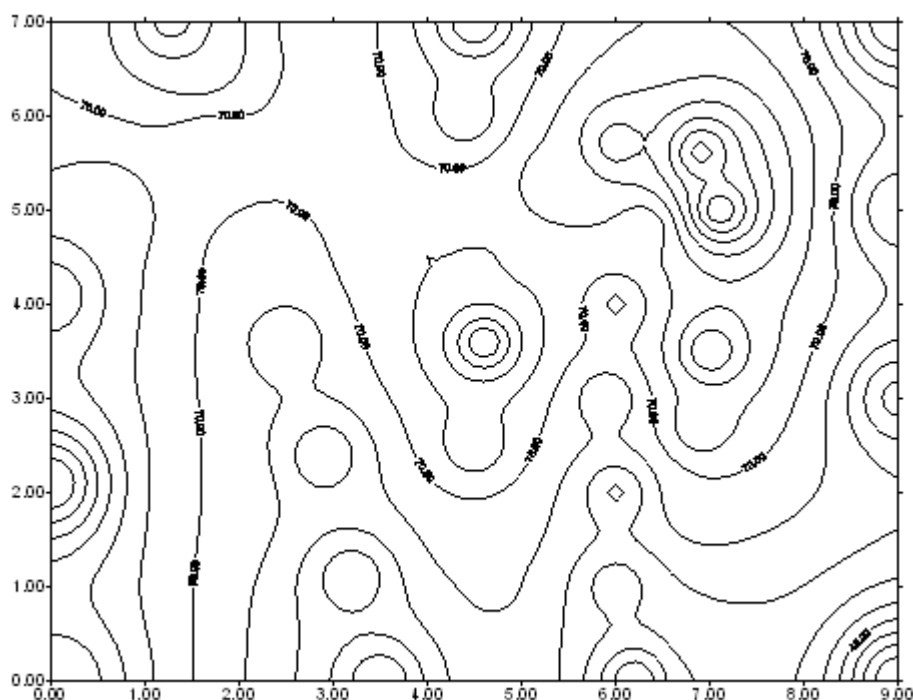
$$\hat{z}(p_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(p_i) \quad (27)$$

kde  $z(p_0)$  představuje odhad výšky interpolovaného bodu  $p_0$ ,  $z(p_i)$  reprezentuje výšku  $i$ -tého vzorového bodu  $p_i$  a  $\lambda_i$  je váha, která přiřazuje hodnotě  $z(p_i)$  poměrnou důležitost při procesu interpolace, tzn. jakou měrou ovlivní výška  $z(p_i)$  výsledný odhad výšky  $z(p_0)$ . (Bašta 2008)

- data jsou vážena vzdáleností bodu od ostatních
- čím vyšší je váha, tím menší je ovlivnění ostatními body
- síla váhy klesá se vzdáleností od bodu
- s tím, jak váha klesá, interpolovaná hodnota se přibližuje datovému bodu
- důsledkem je vytváření "očí" okolo datových bodů, což se dá zmírnit nastavením vyhlazujícího parametru smooth

Metoda IDW je velmi rychlá, lze ji bez problému použít i na rozsáhlé datové soubory. Příklad výsledku znázorňuje obr.č.10





Obr.č.10 Příklad výstupu interpolační metody IDW (web.natur.cuni.cz.)

U metody IDW jsem interpolovala s nastavením defaultních parametrů softwaru ArcGis, měnila jsem pouze následující hodnoty, abych mohla porovnat vliv změny parametrů.

Varianta 1 – velikost pixelu 10; počet blízkých bodů 10

Varianta 2 – velikost pixelu 5; počet blízkých bodů 5

Varianta 3 – velikost pixelu 7; počet blízkých bodů 7

### **TOPO TO RASTER:**

Jde o metodu používanou pro zobrazení hydrologicky korektního digitálního modelu terénu, přičemž dovoluje modelovat náhlé změny povrchu. Metoda Topo to raster používá interaktivní způsob výpočtu. Je výpočetně účinná jako lokální interpolační metody (např. IDW) a zároveň si zachovává vlastnost, že výsledný povrch neztratil spojitost, jakou mají globální interpolační metody (např. spline). Protože tvar povrchu významně ovlivňují hydrologické procesy, metoda topo to raster kombinuje při výpočtu nejen výšková data, ale i data vodních toků, vodních ploch a dalších.

Metoda používá ojedinělý algoritmus, který dokáže velmi zpřesnit výsledný povrch, samozřejmě za předpokladu správného definování všech parametrů.

Druhy vstupních dat:

- výškové body (point elevation)
- bodová vrstva, která má uložené výšky jako atributy
- vrstevnice (contour) – liniová vrstva, výšky vrstevnic jsou uloženy jako atributy
- vodní toky (stream) – liniová vrstva, linie musí být orientovány směrem po proudu a každý tok může být vyjádřen pouze jednou linií. Vodní toky mají prioritu před výškovými body a vrstevnicemi
- deprese (sink) – bodová vrstva reprezentující topografický pokles
- hranice (boundary) – polygonová vrstva, buňky výstupního rastru za touto hranicí budou mít hodnotu NoData
- jezera (lake) – polygonová vrstva, buňky výsledného rastru uvnitř jezera budou mít hodnotu minimální výšky na břehu jezera

Metoda TOPO TO RASTER umožňuje použití hodně typů vstupních dat a nastavení mnoha parametrů. (Křikavová 2009)

U metody TOPO TO RASTER jsem pracovala s parametry:

Velikost pixelu 10, počet blízkých bodů 10.

### **METODA PŘIROZENÉHO SOUSEDA (Natural Neighbor)**

Použití této metody je bez parametrů, které by ovlivňovaly její výsledek. Počet sousedů udává rozmístěním bodů v ploše. Před výpočtem se volí jen velikost pixelu výsledného rastru (cell size) v závislosti na požadovaném rozlišení. Volila jsem velikost 10. Výsledný rastr při použití této metody nezahrnuje extrapolované oblasti, ale okolo měřených bodů tvoří n-úhelník a výsledkem jsou hladké a spojitě odhady. Metoda přirozeného souseda je použitelná pro různé druhy modelovaných jevů s použitím dat různé povahy. (Křikavová 2009)

Grafické výstupy jednotlivých interpolací daných vrstev jsou uvedeny v kapitole 6. Výsledky.

## 5.6 ZHODNOCENÍ KVALITY INTERPOLACE METODOU IDW

Pomocí nadstavby v programu ArcGis – Cross-Validation je možné provést statistické vyhodnocení různých interpolačních metod. Z mnoha použitých metod toto nastavení umožňuje pracovat s metodou IDW.

Princip metody cross-validation spočívá v odstranění jednoho bodu ze skupiny zadaných bodů a na jeho místě vypočte hodnotu dle zbývajících bodů. Toto opakuje pro celou skupinu bodů a porovná hodnotu zadanou s hodnotou nově odhadnutou v daném místě. Cross-validation je provedena automaticky na celém souboru bodů a výsledkem je několik typů grafů:

- a) závislost odhadnutých hodnot (nadmořských výšek) na hodnotách odečtených
- b) graf chyb, tj. závislost odchylky (rozdíl mezi nadmořskou výškou v daném bodě odhadnutou interpolací a mnou zadanou nadmořskou výškou ve stejném bodě) na zadané nadmořské výšce v daném bodě
- c) QQ graf: indikuje míru shody statistického rozdělení odchylek od normálního statistického rozdělení
- d) histogram: znázorňuje statistické rozdělení odchylek

Celkovou chybu odhadu interpolace metoda Cross Validation interpretuje pomocí hodnoty **RMS** (Root-Mean-Square). Tato hodnota indikuje míru rozptýlu odhadnutých hodnot okolo střední hodnoty. Ukazuje tak stabilitu provedené interpolace. Cílem je minimalizace této hodnoty nastavením různých parametrů.

Níže uveden vztah (28) pro výpočet RMS:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (28)$$

Kde  $x_i$  je hodnota odečtená v místě  $i$ ,  $y_i$  – hodnota interpolovaná v místě  $i$  a  $N$  je počet měření.

### **Veličiny statistických vlastností lineární regrese:**

**Interval spolehlivosti** – interval spolehlivosti pro hodnotu směrnice na hladině významnosti 95%, tj. hodnota směrnice leží s 95% pravděpodobností v intervalu směrnice  $\pm$  int. spolehlivosti

**$R^2$  – koeficient determinace** (čtverec párového korelačního koeficientu), udává jaký podíl rozptylu v pozorování závislé proměnné se podařilo regresí vysvětlit, je v intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ .

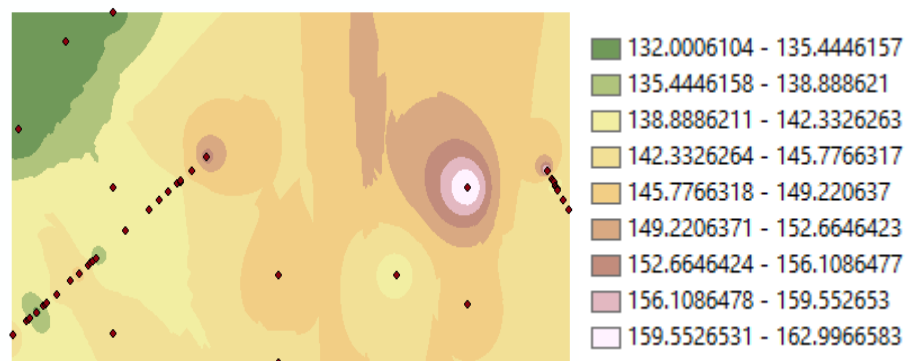
Grafy i statistické výstupy jsou uvedeny v kapitole 6. VÝSLEDKY a 10. PŘÍLOHY.

## 6. VÝSLEDKY

### 6.1 GIS VÝSTUPY, GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ

#### 1. GEOLOGICKÁ VRSTVA

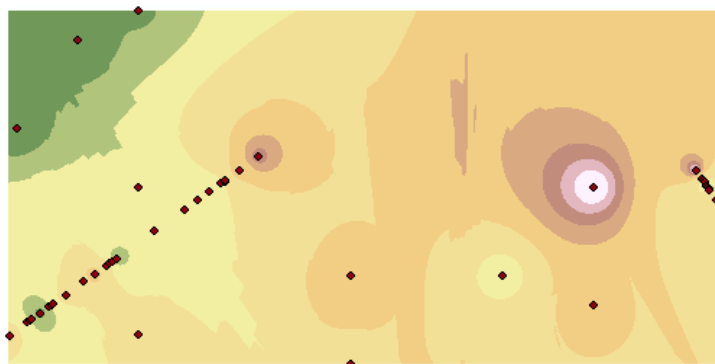
Výstupy interpolace jsou znázorněny na obr.č.11, 12, 13, 14 a 15



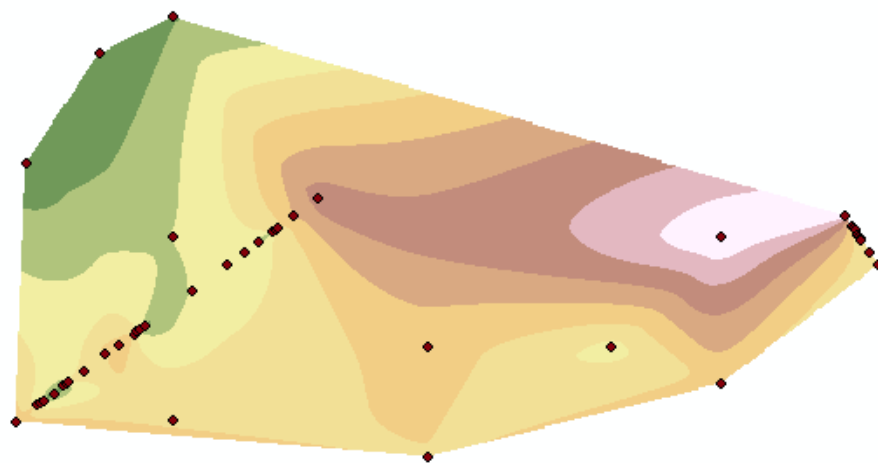
Obr.č.11 Vrstva 1 - interpolace metodou IDW (varianta 1; par.10/10)



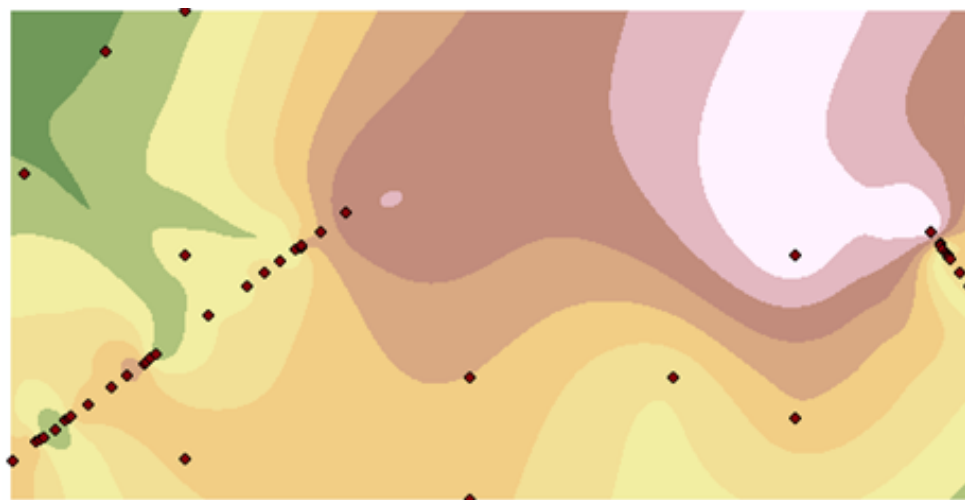
Obr.č.12 Vrstva1- interpolace metodou IDW (varianta 2; par.5/5)



Obr.č.13 Vrstva 1 - interpolace metodou IDW (varianta 3; par.7/7)



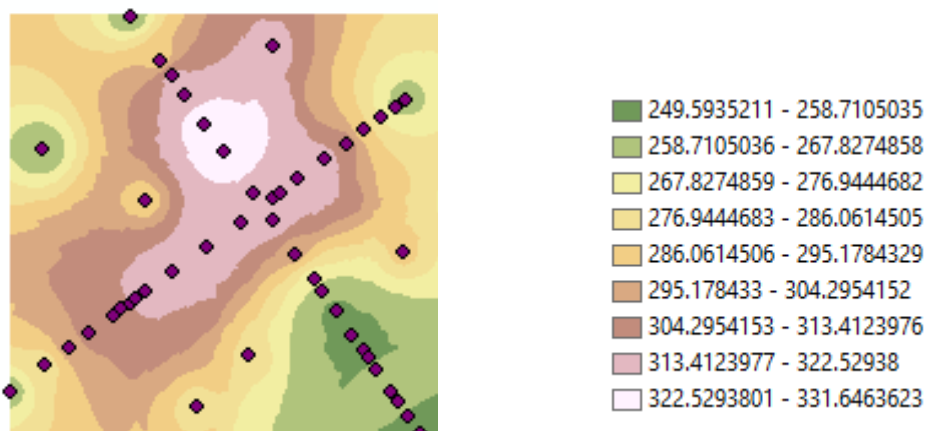
Obr.č.14 Vrstva 1 - interpolace metodou NATURAL NEIGHBOR



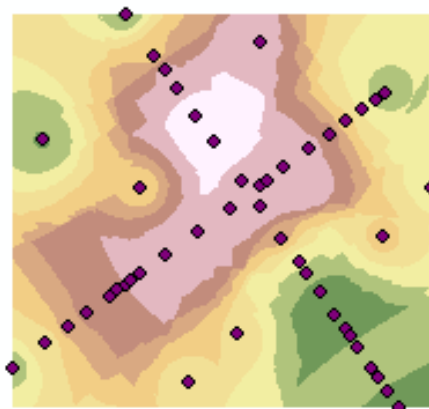
Obr.č.15 Vrstva 1 - interpolace metodou TOPO TO RASTER

## 2. GEOLOGICKÁ VRSTVA

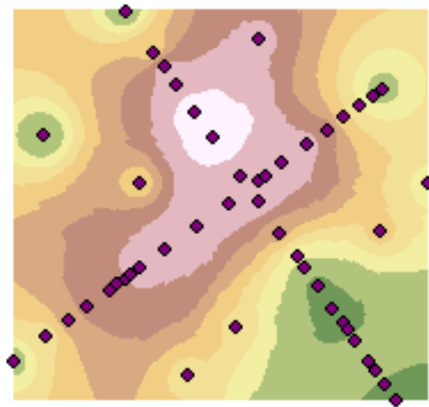
Výstupy interpolace jsou znázorněny na obr.č.16,17,18,19,20,21 a 22.



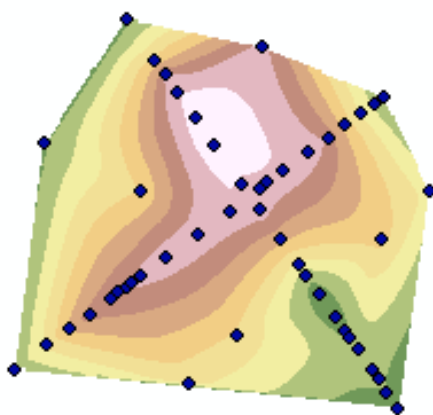
Obr.č.16 Vrstva 2 - interpolace IDW (varianta 1; par.10/10)



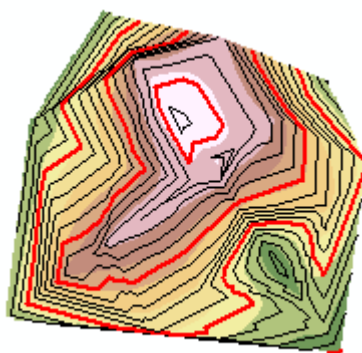
Obr.č.17 Vrstva 2 - interpolace IDW (varianta 2; par. 5/5)



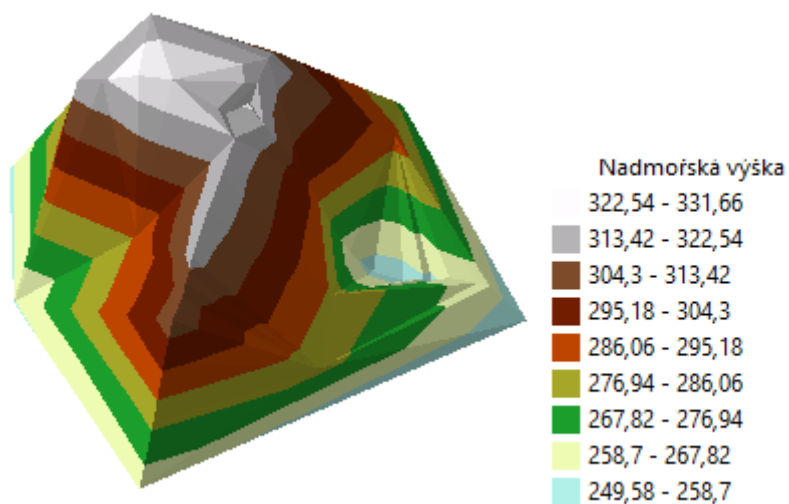
Obr.č.18 Vrstva 2 - interpolace IDW (varianta 3; par.7/7)



Obr.č.19 Vrstva 2 - interpolace metodou NATURAL NEIGHBOR

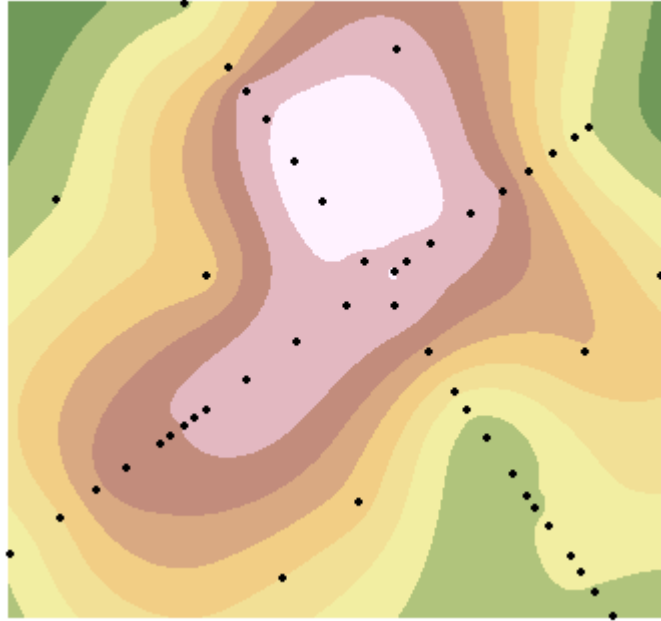


Obr.č.20 Vrstva 2 – interpolace NATURAL NEIGHBOR, zobrazení vrstevnic



Obr.č.21 Vrstva 2 – interpolace NATURAL NEIGHBOR, 3D zobrazení

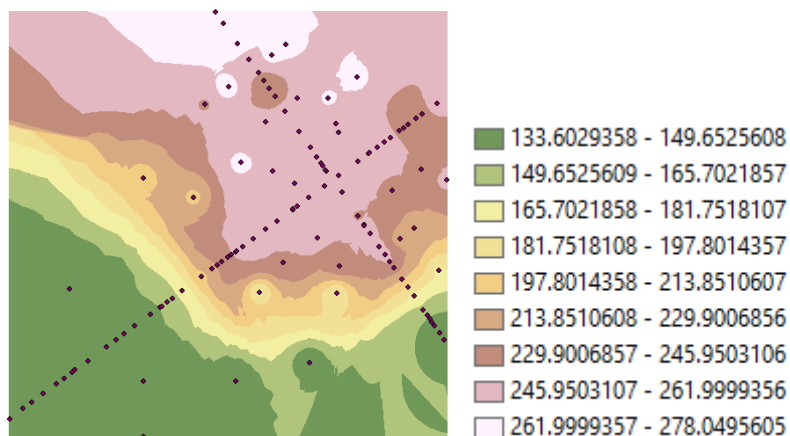




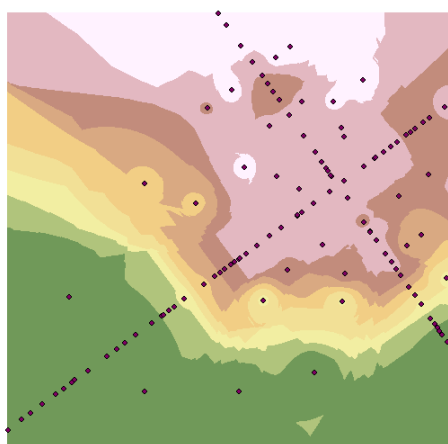
Obr.č.22 Vrstva 2 - interpolace metodou TOPO TO RASTER

### 3. GEOLOGICKÁ VRSTVA

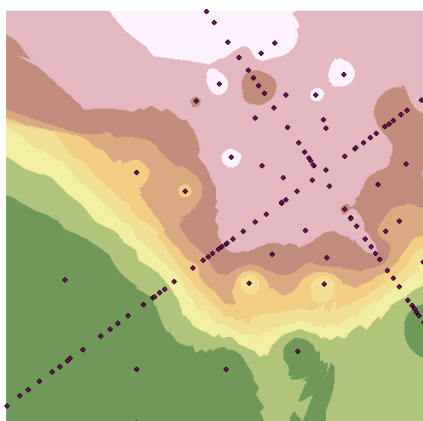
Výstupy interpolace jsou znázorněny na obr.č.23,24,25,26,27,28 a 29.



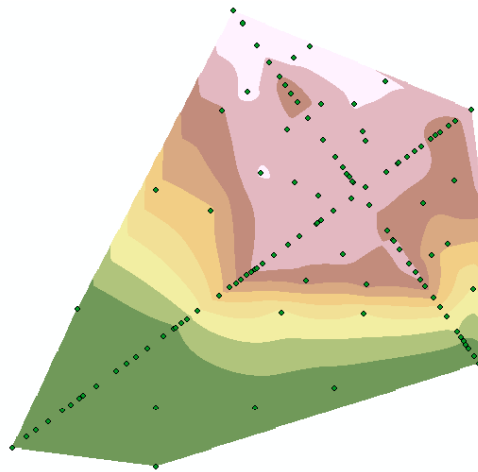
Obr.č.23 Vrstva3 - interpolace metodou IDW (varianta 1; par. 10/10)



Obr.č.24 Vrstva 3 - interpolace metodou IDW (varianta 2; par. 5/5)



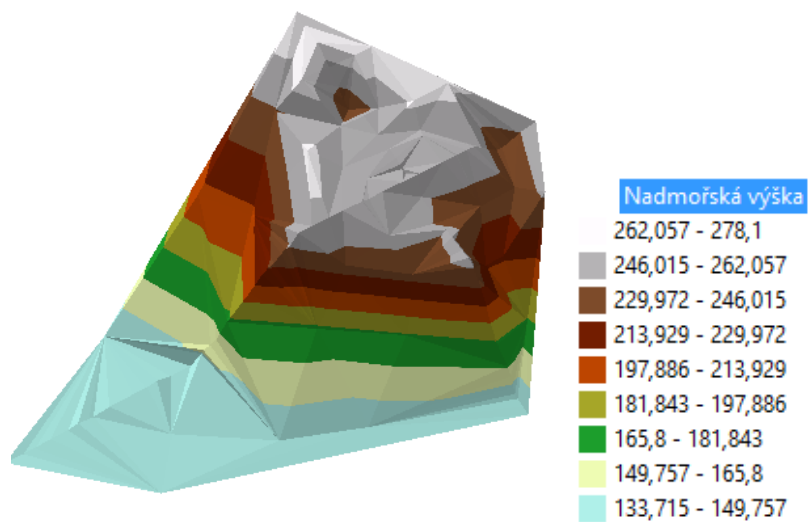
Obr.č.25 Vrstva 3 - interpolace metodou IDW (varianta 3; par.7/7)



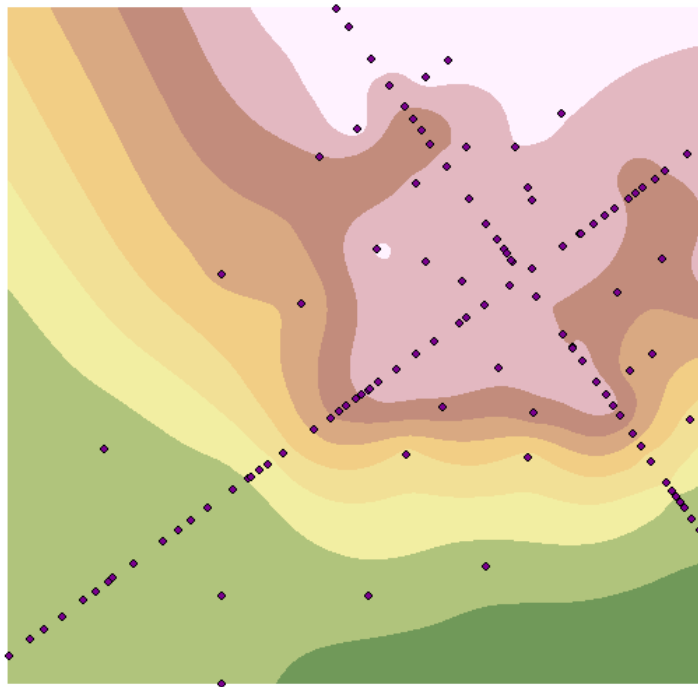
Obr.č.26 Vrstva 3 - interpolace metodou NATURAL NEIGHBOR



Obr. č.27 Vrstva 3 - interpolace NATURAL NEIGHBOUR, zobrazení vrstevnic



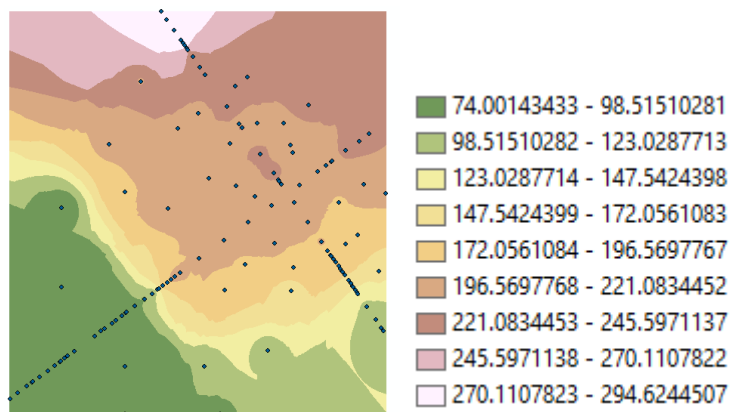
Obr.č.28 Vrstva 3 – interpolace NATURAL NEIGHBOR, 3D zobrazení



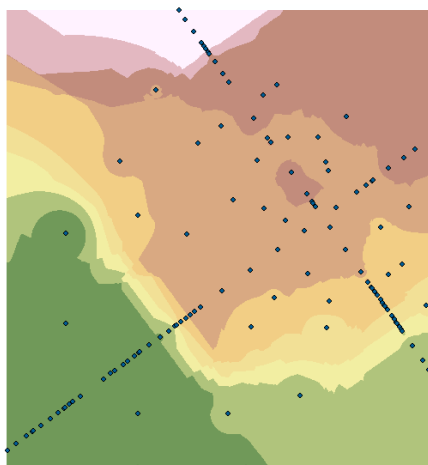
Obr.č.29 Vrstva 3 - interpolace metodou TOPO TO RASTER

#### 4. GEOLOGICKÁ VRSTVA

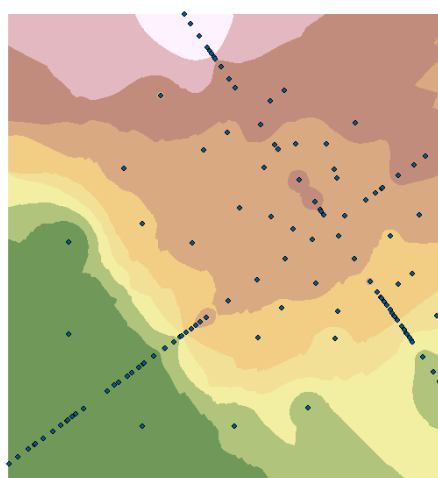
Výstupy interpolace jsou znázorněny na obr.č.30,31,32,33,34,35 a 36.



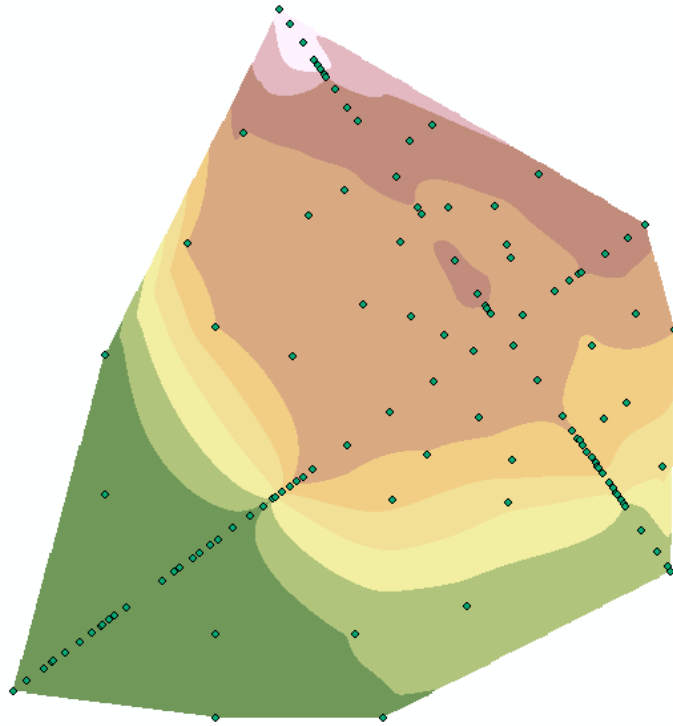
Obr.č.30 Vrstva 4 - interpolace metodou IDW (varianta 1; par. 10/10)



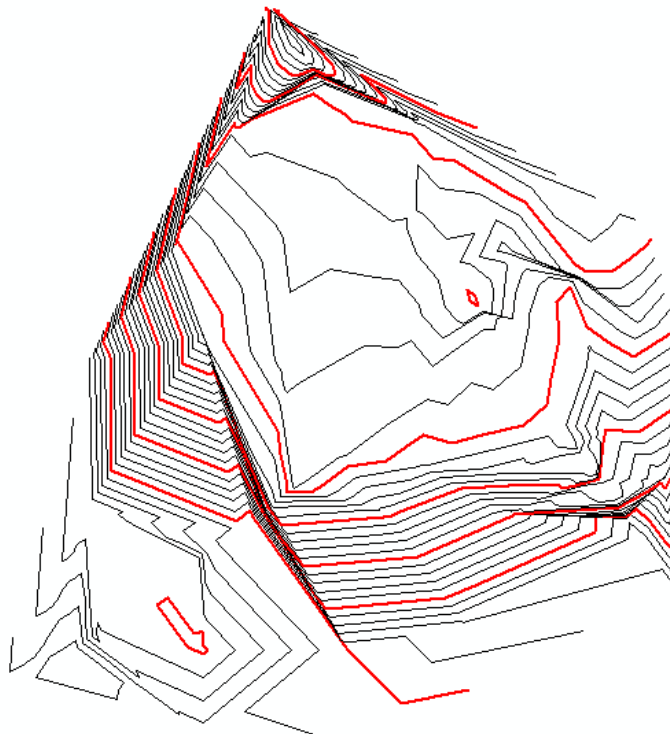
Obr.č.31 Vrstva 4 - interpolace metodou IDW (varianta 2; par.5/5)



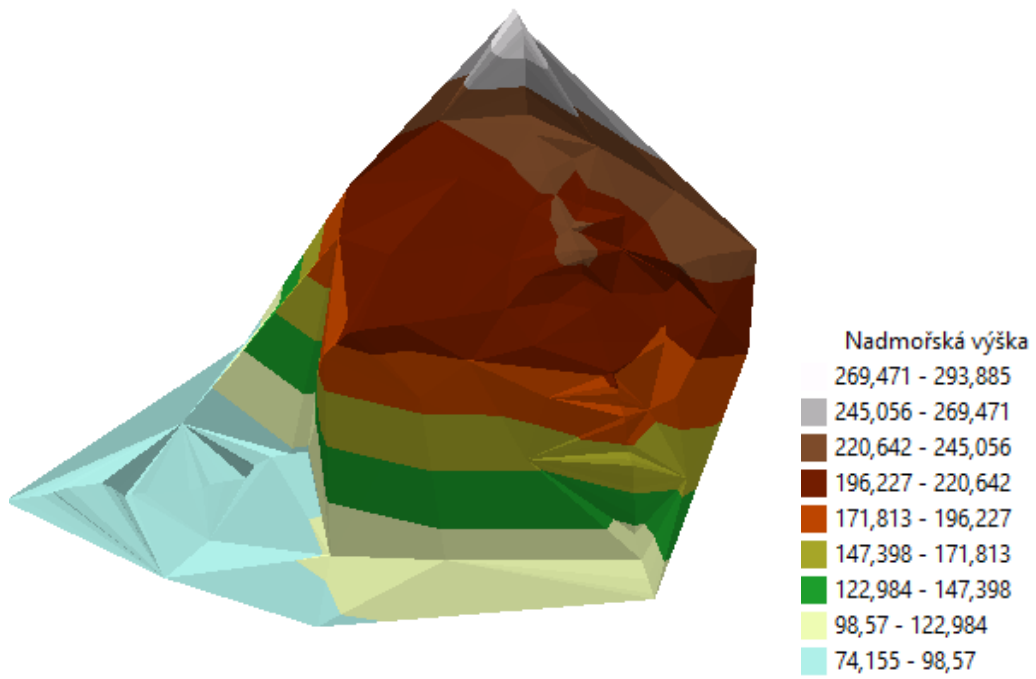
Obr.č.32 Vrstva 4 - interpolace metodou IDW (varianta 3; par. 7/7)



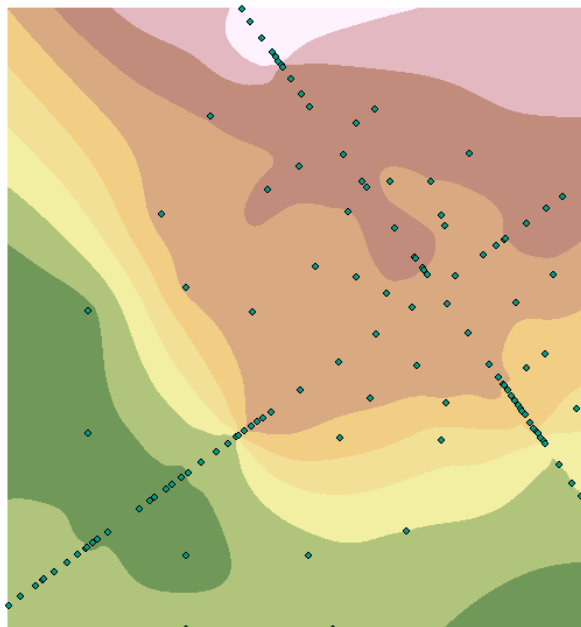
Obr.č.33 Vrstva 4 - interpolace metodou NATURAL NEIGHBOR



Obr.č.34 Vrstva 4 - interpolace NATURAL NEIGHBOR, zobrazení vrstevnic



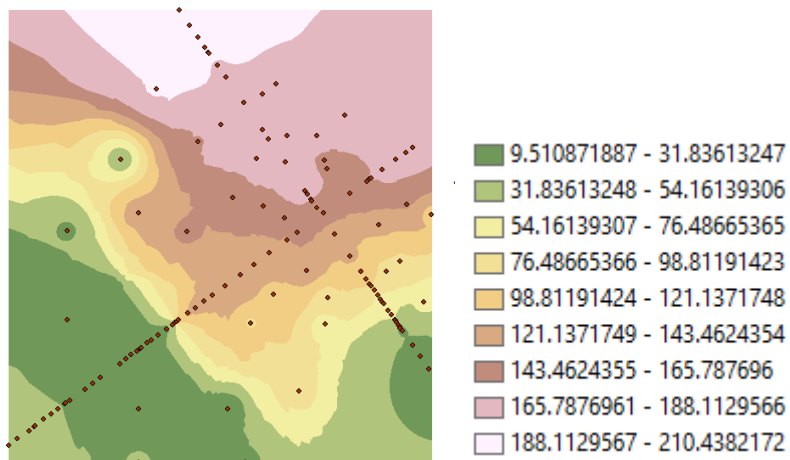
Obr.č.35 Vrstva 4 – interpolace NATURAL NEIGHBOR, 3D zobrazení



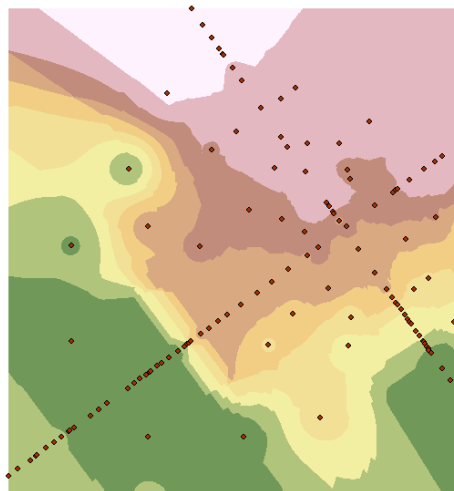
Obr.č.36 Vrstva 4 - interpolace metodou TOPO TO RASTER

## 5. GEOLOGICKÁ VRSTVA

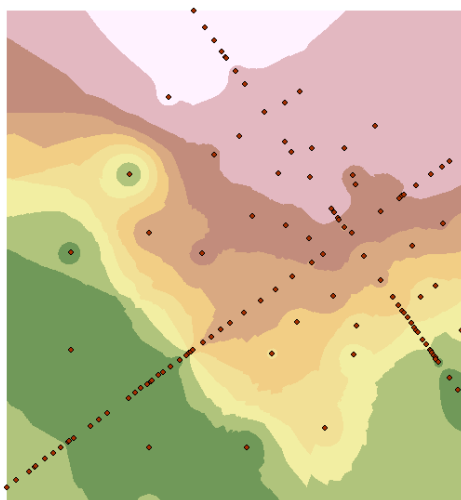
Výstupy interpolace jsou znázorněny na obr.č.37,38,39,40,41,42 a 43.



Obr.č.37 Vrstva 5 - interpolace metodou IDW (varianta 1; par. 10/10)

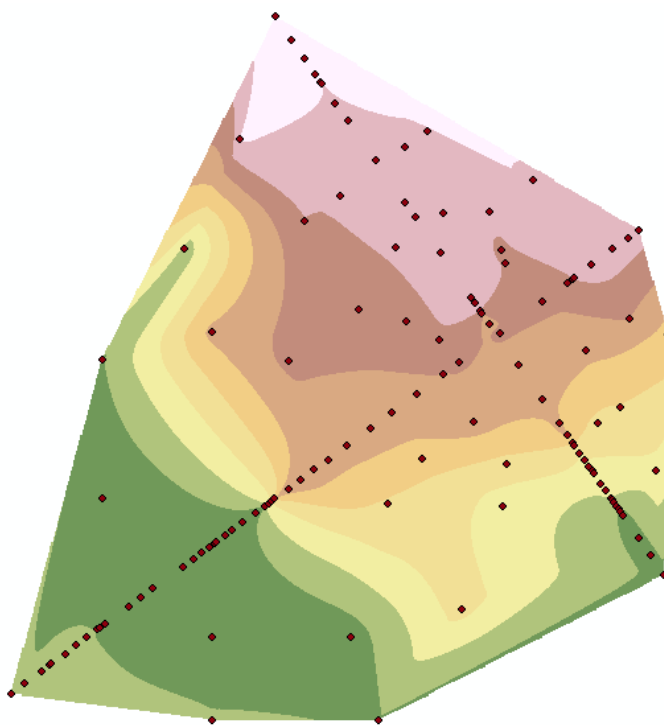


Obr.č.38 Vrstva 5 - interpolace metodou IDW (varianta 2; par. 5/5)

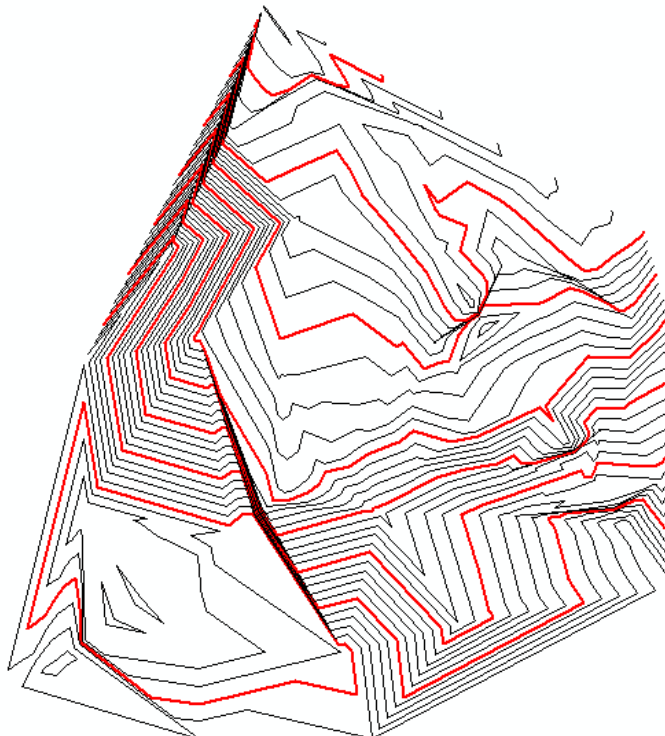


Obr.č.39 Vrstva 5 - interpolace metodou IDW (varianta 3; par. 7/7)

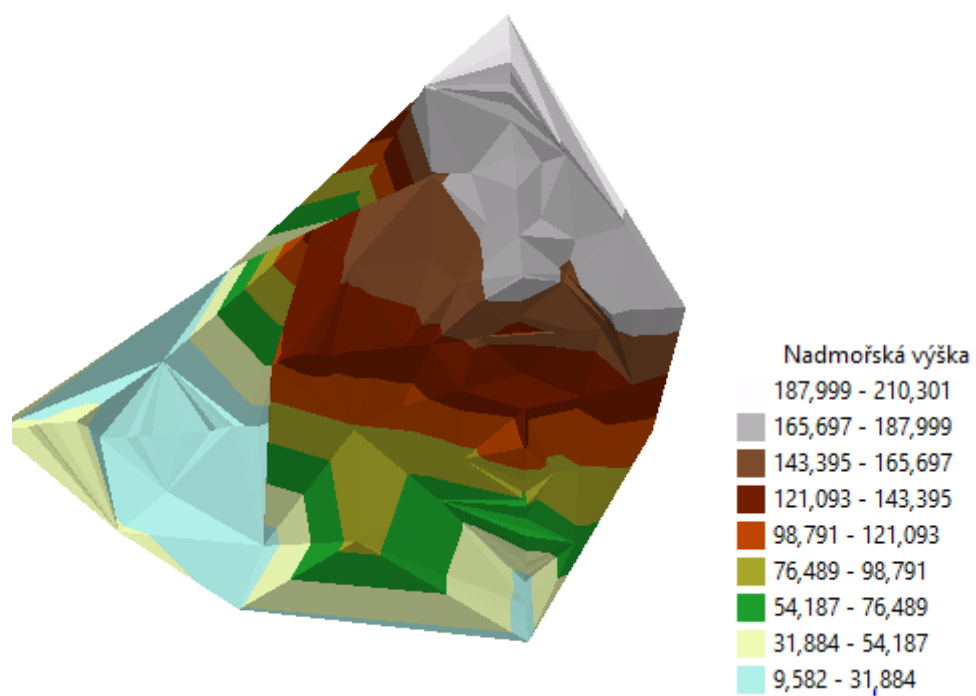




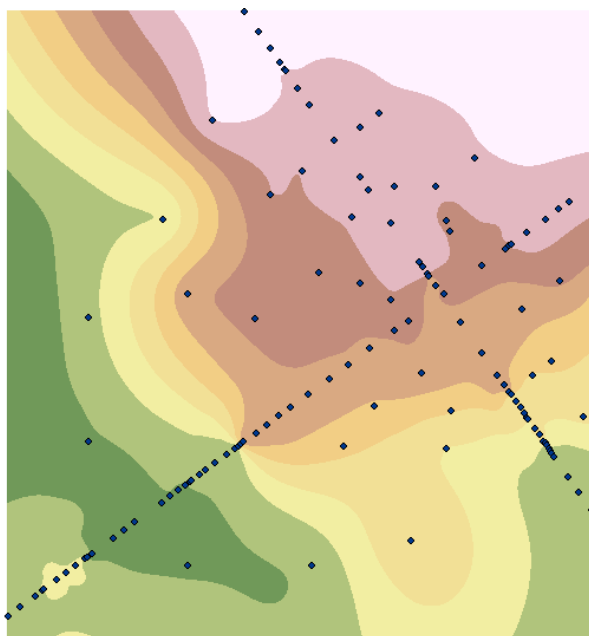
Obr.č.40 Vrstva 5 - interpolace metodou NATURAL NEIGHBOR



Obr.č. 41 Vrstva 5 - interpolace NATURAL NEIGHBOUR, zobrazení vrstevnic



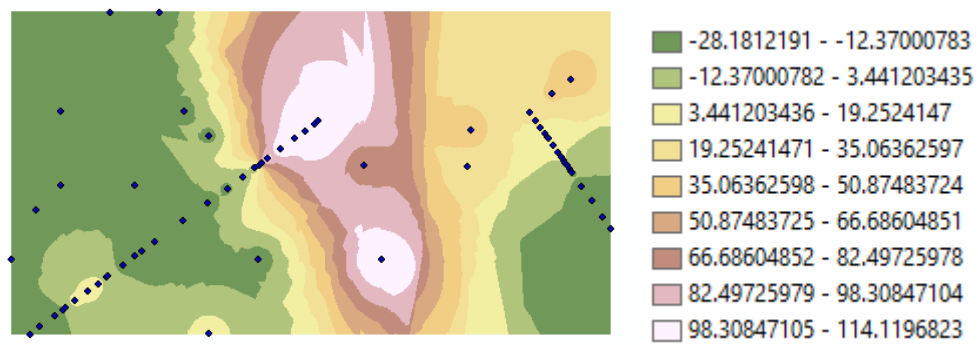
Obr.č.42 Vrstva 5 – interpolace NATURAL NEIGHBOR, 3D zobrazení



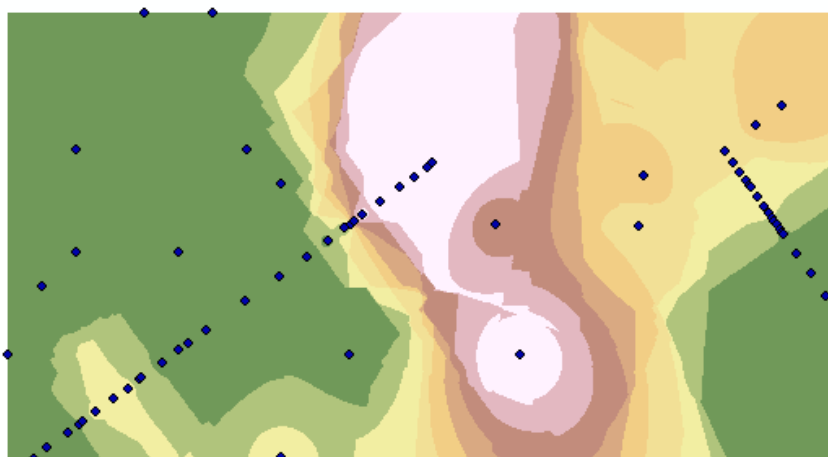
Obr.č.43 Vrstva 5 - interpolace metodou TOPO TO RASTER

## 6. GEOLOGICKÁ VRSTVA

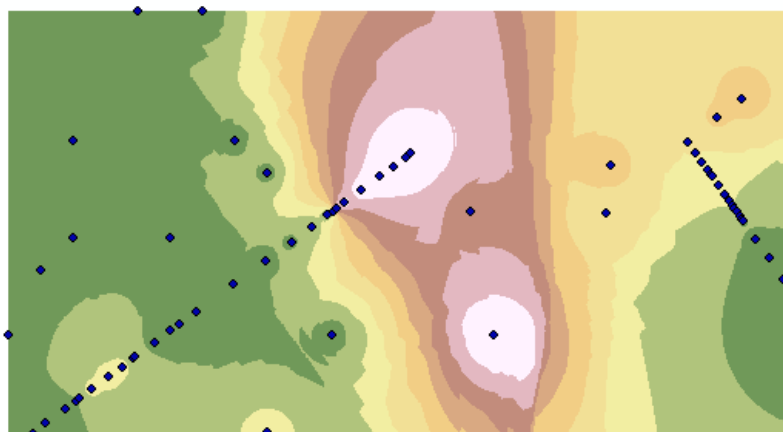
Výstupy interpolace jsou znázorněny na obr.č.44,45,46,47,48,49 a 50.



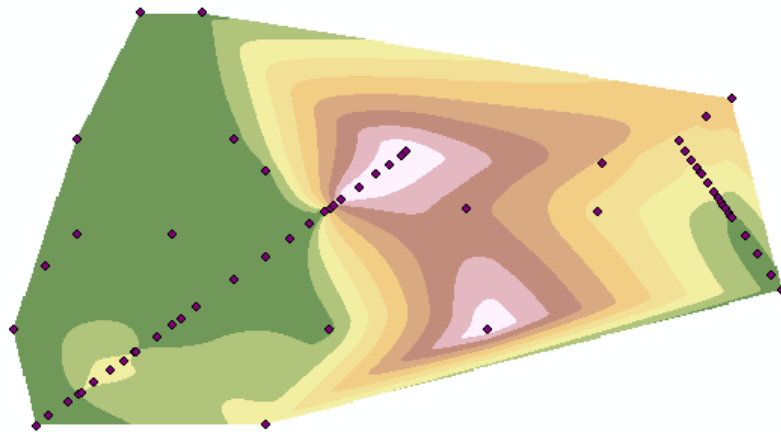
Obr.č.44 Vrstva 6 - interpolace metodou IDW (varianta 1; par.10/10)



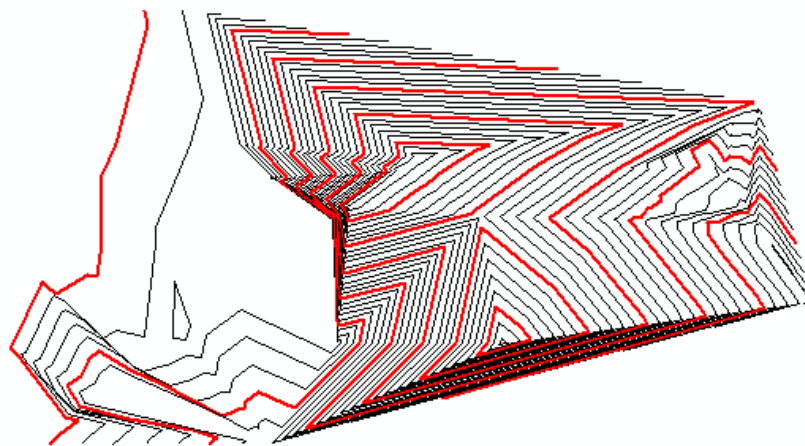
Obr.č.45 Vrstva 6 - interpolace metodou IDW (varianta 2; par.5/5)



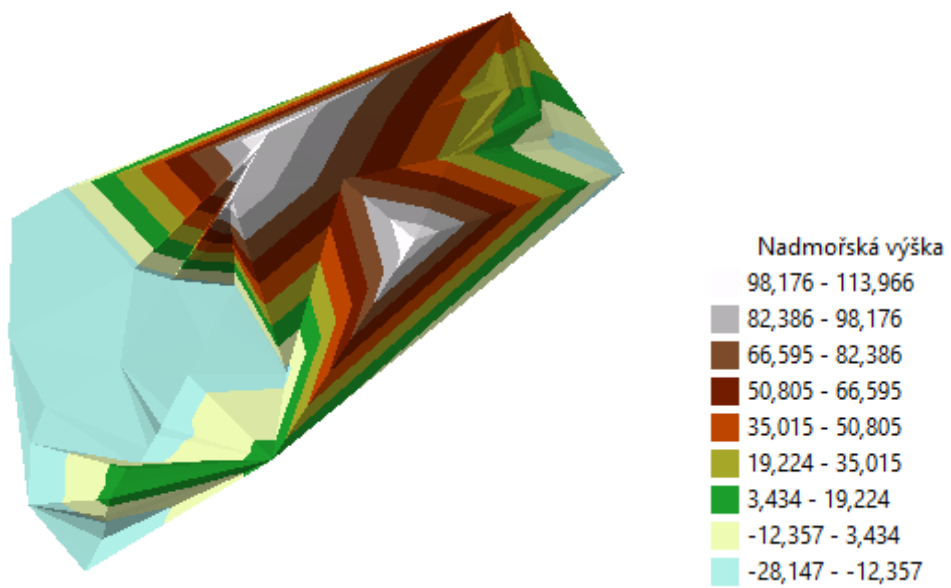
Obr.č.46 Vrstva 6 - interpolace metodou IDW (varianta 3; par. 7/7)



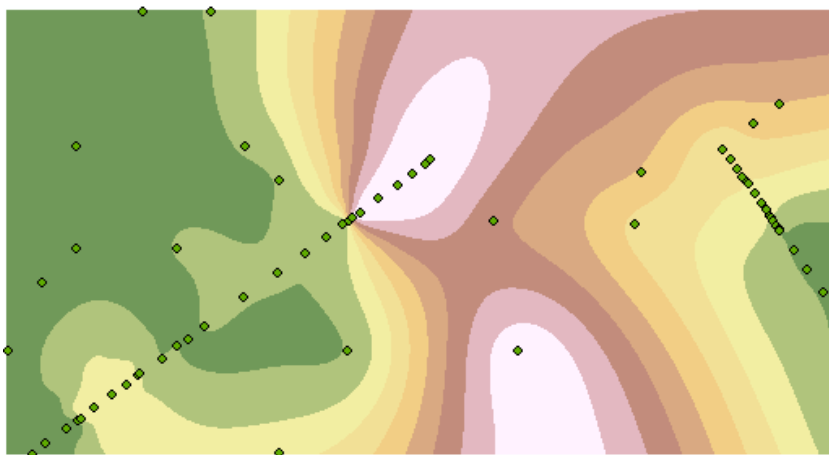
Obr.č.47 Vrstva 6 - interpolace metodou NATURAL NEIGHBOR



Obr.č.48 Vrstva 6 - interpolace NATURAL NEIGHBOUR, zobrazení vrstevnic



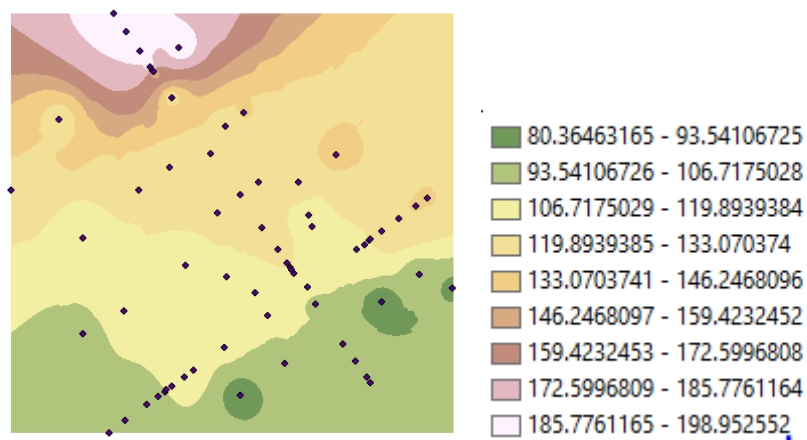
Obr.č.49 Vrstva 6 – interpolace NATURAL NEIGHBOR, 3D zobrazení



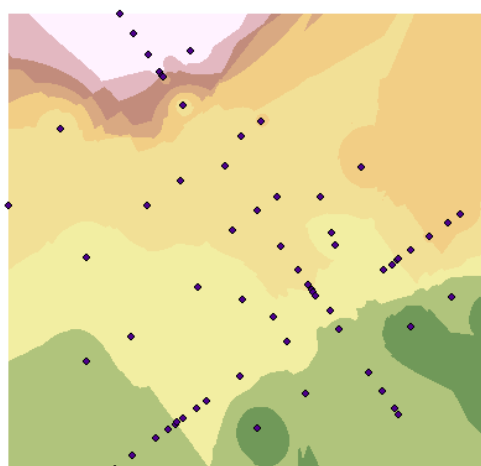
Obr.č.50 Vrstva 6 - interpolace metodou TOPO TO RASTER

## 7. GEOLOGICKÁ VRSTVA

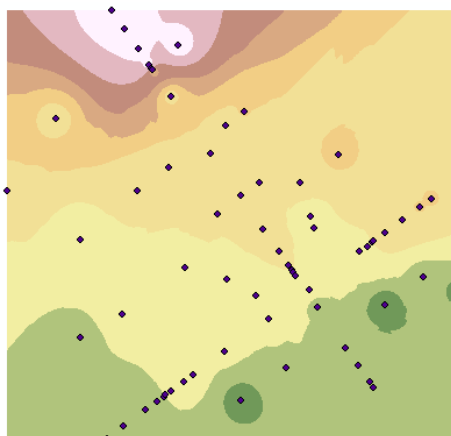
Výstupy interpolace jsou znázorněny na obr.č.51,52,53,54,55 a 56



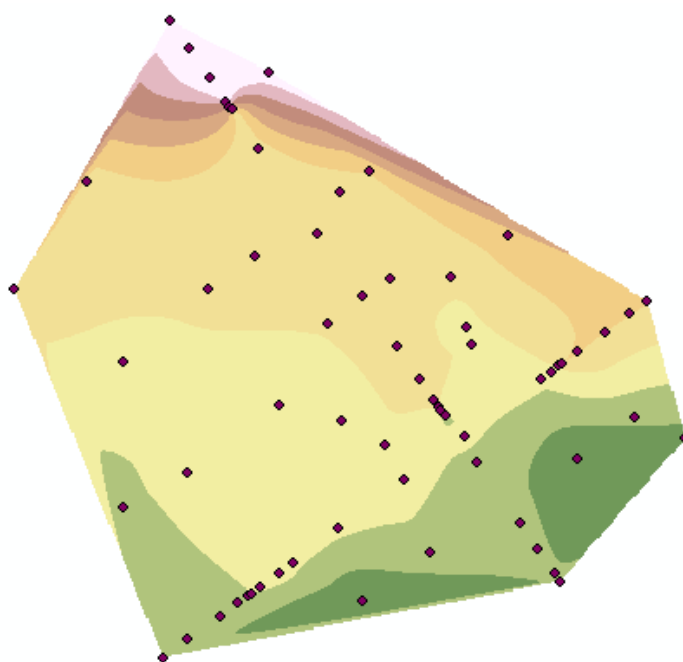
Obr.č.51 Vrstva 7 - interpolace metodou IDW (varianta 1; par.10/10)



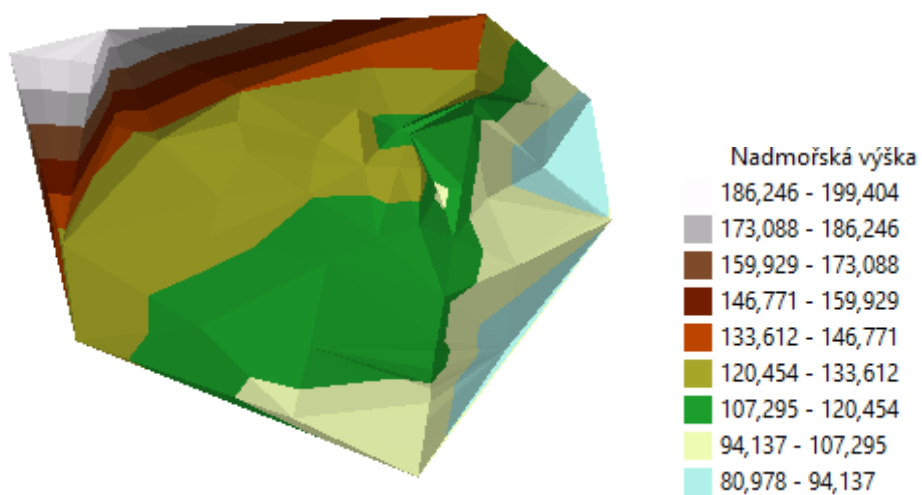
Obr.č.52 Vrstva 7 - interpolace metodou IDW (varianta 2; par.5/5)



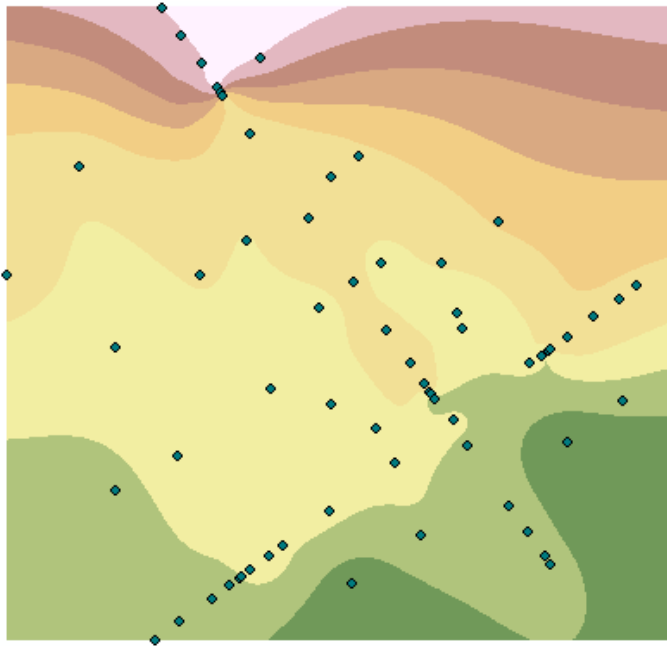
Obr.č.53 Vrstva 7 - interpolace metodou IDW (varianta 3; par. 7/7)



Obr.č.54 Vrstva 7 - interpolace metodou NATURAL NEIGHBOR



Obr.č.55 Vrstva 7 – interpolace NATURAL NEIGHBOR, 3D zobrazení



Obr.č.56 Vrstva 7 - interpolace metodou TOPO TO RASTER



## 6.2 STATISTICKÉ VÝSTUPY pro vrstvy 3, 4 a 5

Tab.č.13 udává hodnoty **RMS** (odmocnina ze střední kvadratické odchylky, viz. kapitola 5.6) nadmořské výšky odečtené a nadmořské výšky interpolované metodou Cross Validation (IDW)

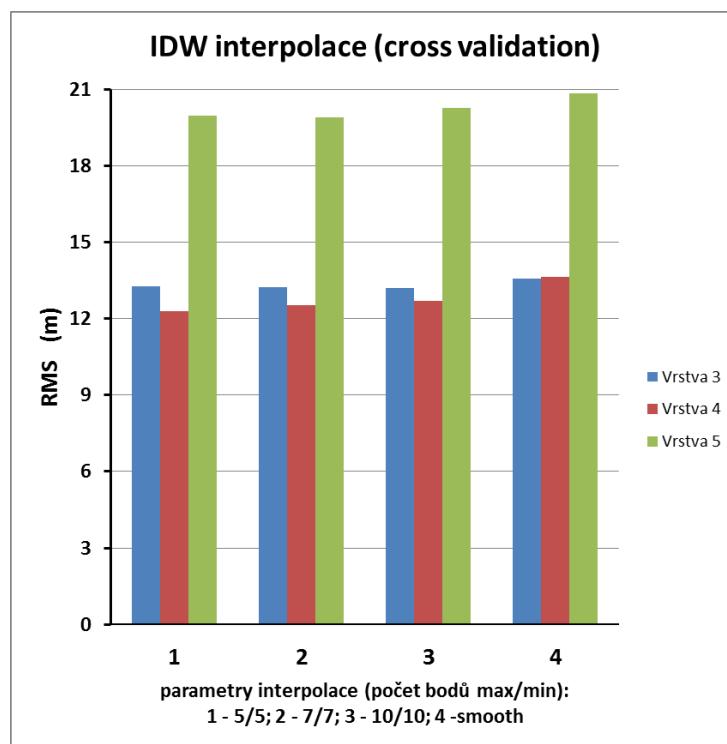
Vrstva	typ RMS	parametry interpolace IDW			
		5/5	7/7	10/10	smooth
3	a	13,27	13,24	13,21	13,57
	b	7,07	6,99	7,00	7,38
4	a	12,29	12,53	12,71	13,65
	b	7,22	7,31	7,83	7,95
5	a	19,98	19,89	20,27	20,84
	b	6,09	6,12	6,74	7,58

Tab.č.13. Hodnoty RMS – interpolace metodou IDW / cross validation

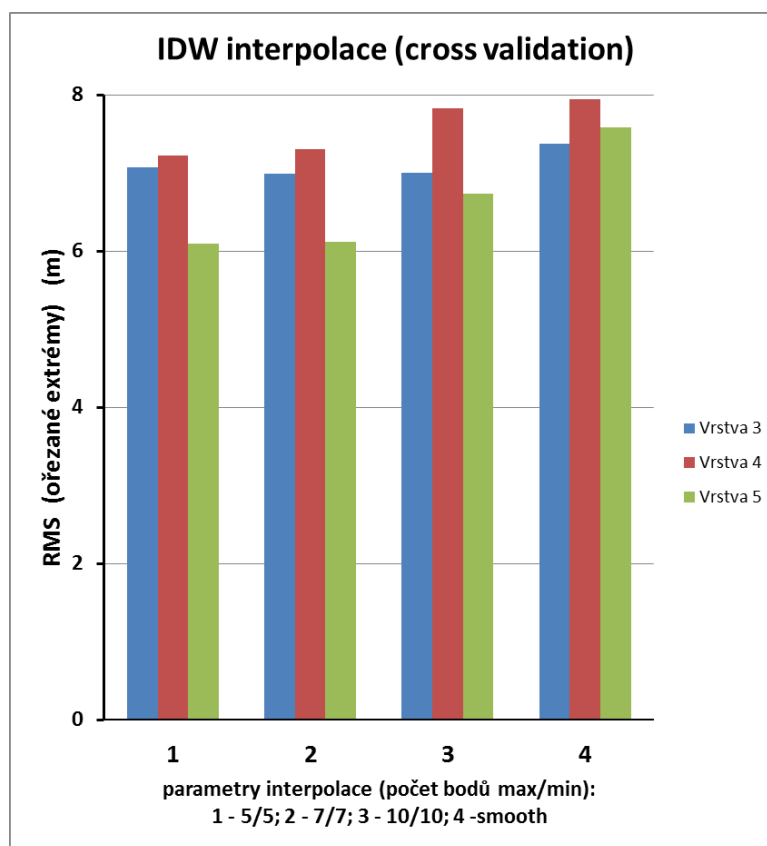
a - RMS ze všech bodů (obr.č.57 )

b - RMS z bodů, jejichž odchylka je menší než  $\pm 20$  m (RMSr),

tzn. eliminace extrémně odchýlených bodů (obr.č.58)



Obr.č.57 RMS hodnoty



Obr.č.58 RMSr hodnoty

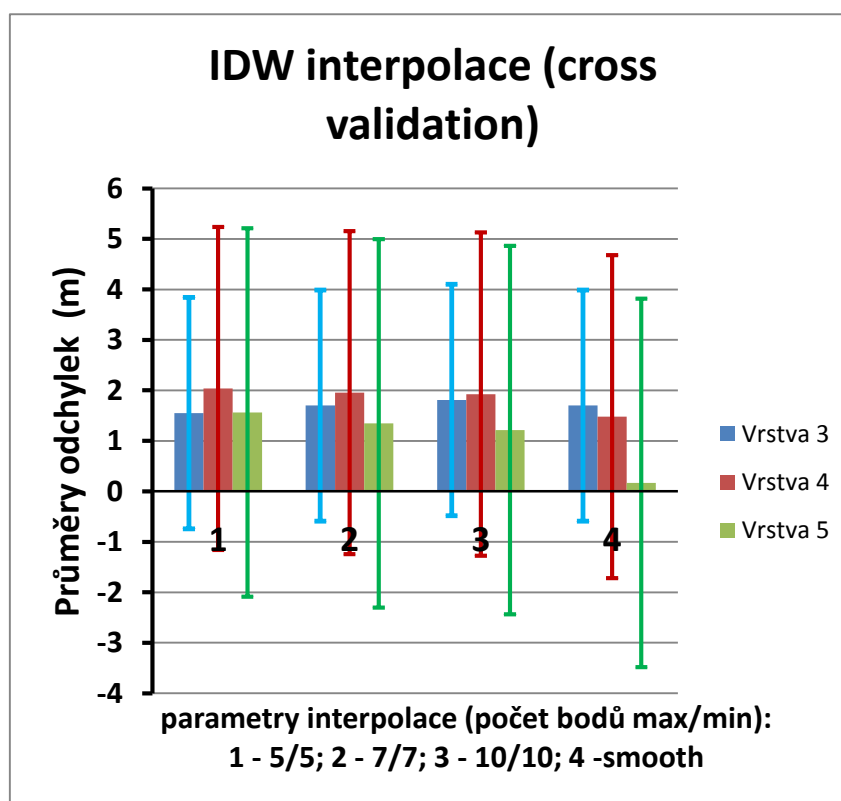
Výsledek: RMS hodnota pro danou vrstvu jenom mírně závisí na nastavení parametrů interpolace. Pro vrstvu 3 a 4 je hodnota RMS prakticky shodná, pro vrstvu 5 je výrazně větší. Při vyloučení bodů s extrémními odchylkami (cca 10% bodů), dochází ke snížení hodnoty RMS na 1/2 až 1/3 původní velikosti.

Tab.č.14 a obr.č.59 udávají **průměr odchylek** nadmořské výšky odečtené a nadmořské výšky interpolované metodou cross validation.

Vrstva	veličina	parametry interpolace			
		5/5	7/7	10/10	smooth
3	průměr	1,55	1,70	1,81	1,70
	int.spol.	2,29	2,29	2,26	2,29
4	průměr	2,04	1,96	1,93	1,48
	int.spol.	3,21	3,16	3,12	2,46
5	průměr	1,57	1,35	1,21	0,17
	int.spol.	3,62	3,61	3,68	3,79

Tab.č.14 Průměr odchylek

(int.spol.=interval spolehlivosti pro hodnotu průměru na hladině významnosti 95%, tj. průměr +/- interval spolehlivosti)



Obr.č.59 Průměry odchylek

Výsledek: průměry odchylek jsou malé kladné hodnoty; interval spolehlivosti (na hladině 95%) ale zahrnuje 0, takže lze prohlásit, že odchylka průměru od nulové hodnoty je statisticky nevýznamná.

## Přehled statistických vlastností lineární regrese

A) tab.č.15 udává parametry lineárního regresního vztahu mezi nadmořskou výškou odečtenou a nadmořskou výškou odhadnutou metodou cross validation/IDW).

Vrstva	Veličina	parametry interpolace IDW			
		5/5	7/7	10/10	smooth
3	směrnice $s_1$	0,9288	0,9261	0,9222	0,8876
	int.spol. <sup>a)</sup>	0,0442	0,0442	0,0434	0,046
	$R^2$	0,9393	0,9390	0,9405	0,9395
4	směrnice $s_1$	0,941	0,9377	0,9309	0,8985
	int.spol. <sup>a)</sup>	0,0547	0,0539	0,0531	0,056
	$R^2$	0,9154	0,9177	0,9199	0,9113
5	směrnice $s_1$	0,9297	0,9275	0,9184	0,8733
	int.spol. <sup>a)</sup>	0,0555	0,0553	0,0564	0,0581
	$R^2$	0,9297	0,9080	0,9041	0,8987

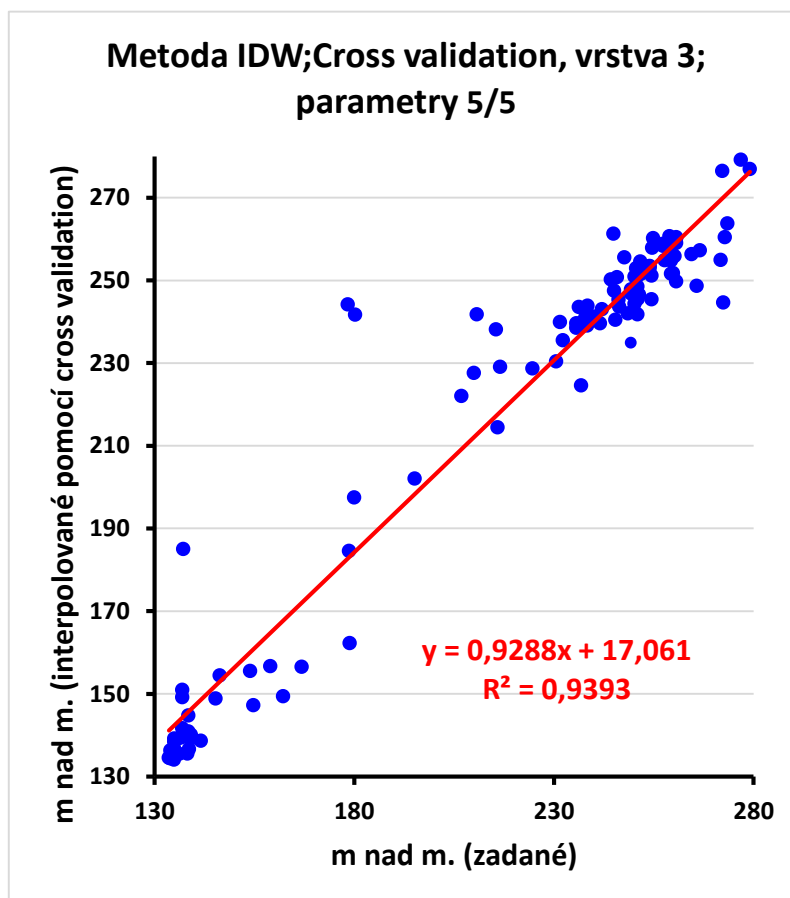
Tab.č.15 Parametry lineárního regresního vztahu,  $R^2$  – koeficient determinace

B) tab.č.16 udává hodnoty lineárního regresního vztahu mezi nadmořskými výškami odečtenými a diferencemi mezi hodnotami odečtenými a hodnotami odhadnutými metodou cross validation.

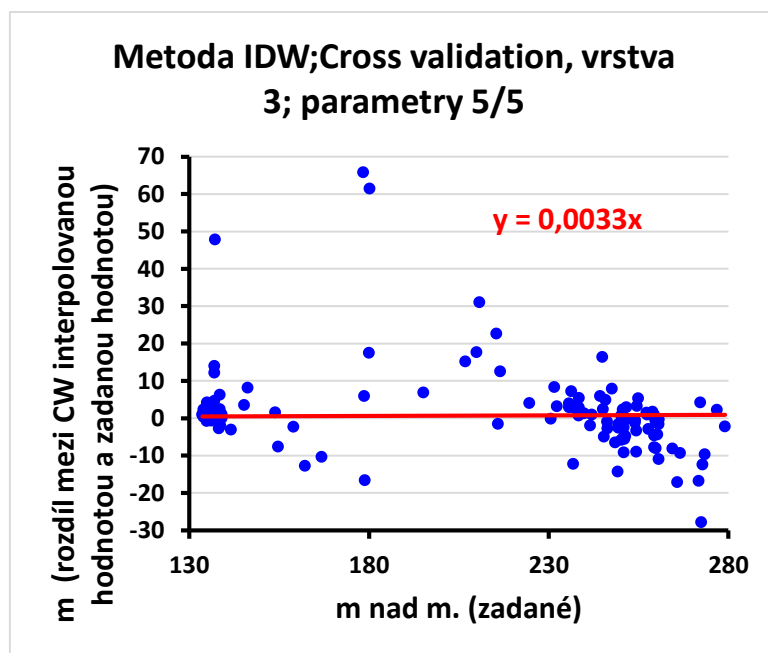
Vrstva	Veličina	parametry interpolace			
		5/5	7/7	10/10	smooth
3	směrnice $s_2$	0,0033	0,0038	0,0041	0,0022
	int.spol. <sup>a)</sup>	0,0051	0,0052	0,0051	0,0053
	$R^2$	0,0594	0,0684	0,0744	0,0395
4	směrnice $s_2$	0,0040	0,0032	0,0023	-0,0036
	int.spol. <sup>a)</sup>	0,0089	0,0087	0,0086	0,0090
	$R^2$	0,0409	0,0332	0,0242	0,0362
5	směrnice $s_2$	-0,0095	-0,0116	-0,0152	-0,0355
	int.spol. <sup>a)</sup>	0,0150	0,0149	0,0151	0,0153
	$R^2$	0,0576	0,0710	0,0909	0,2066

Tab.č.16 Parametry lineárního regresního vztahu

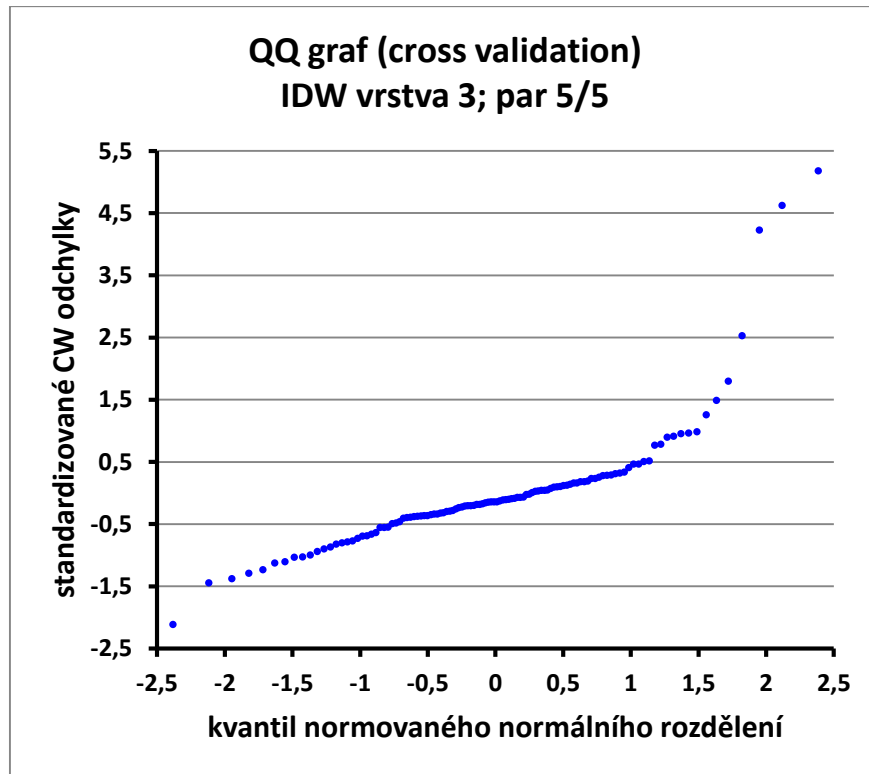
Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro **vrstvu 3** (par. 5/5) znázorňují obr.č.60,61,62, 63 a 64. (výsledky pro ostatní parametry v kapitole 10. příloha č.5)



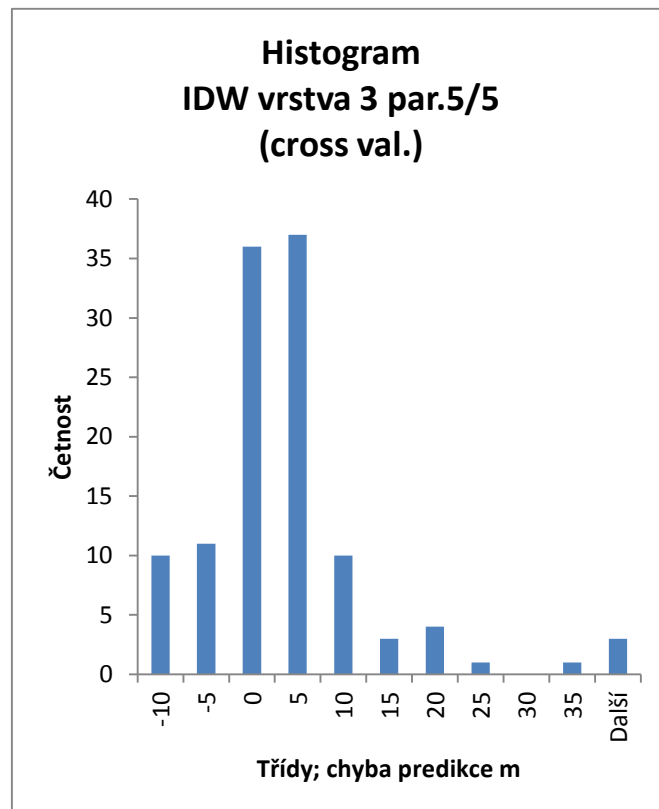
Obr.č.60 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 3)



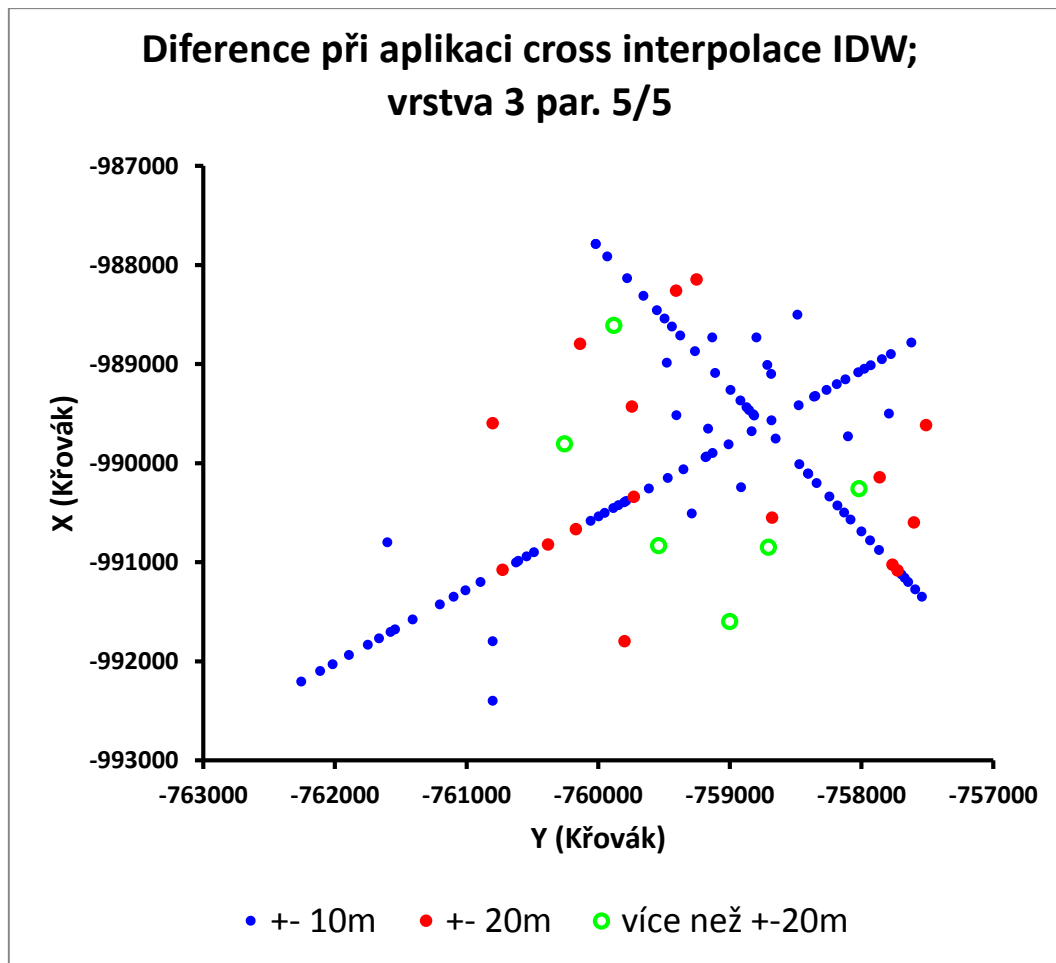
Obr.č.61 Graf chyby (vrstva 3)



Obr.č.62 QQ graf (vrstva 3)



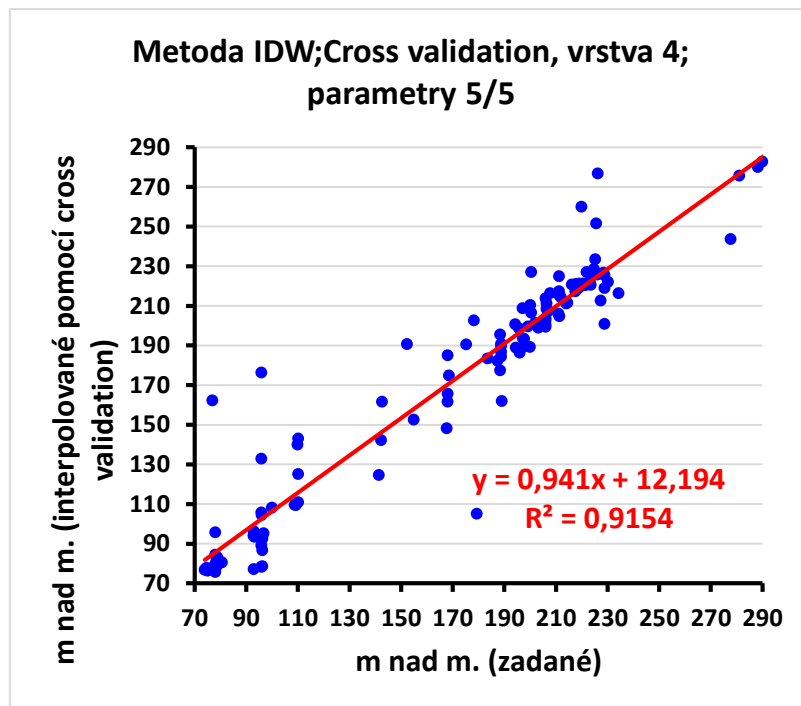
Obr.č.63 Histogram (vrstva 3)



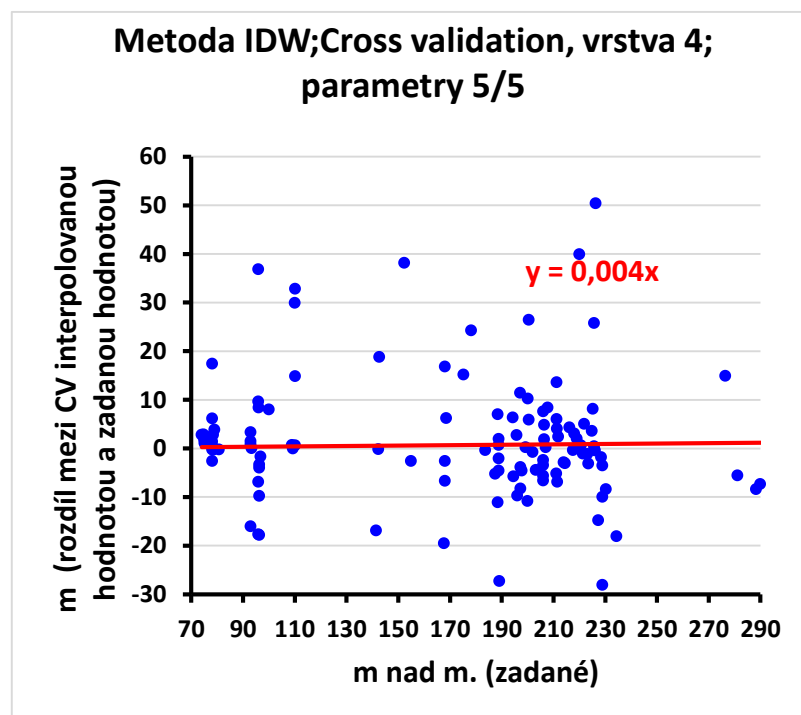
Obr.č.64 Zobrazení diferencí (vrstva 3)

Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro vrstvu 4 (parametry 5/5) znázorňují obr.č.65,66,67,68 a 69.

(výsledky pro ostatní parametry v kapitole 10. Příloha č.6)

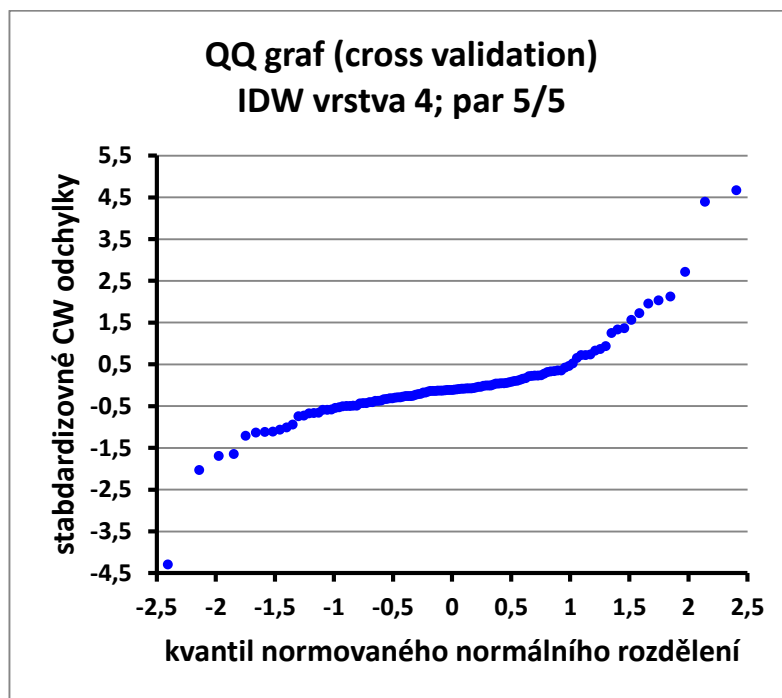


Obr.č.65 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 4)

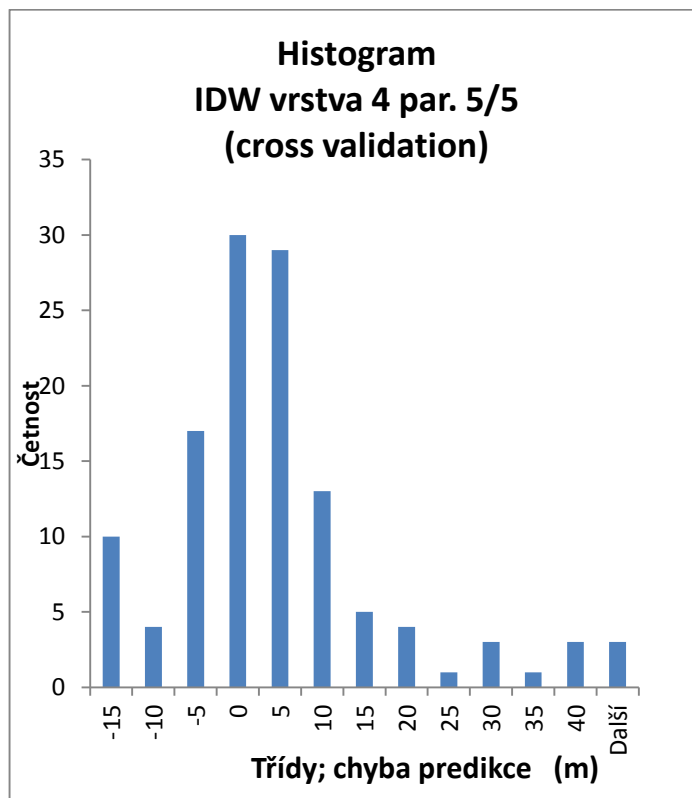


Obr.č.66 Graf chyby (vrstva 4)

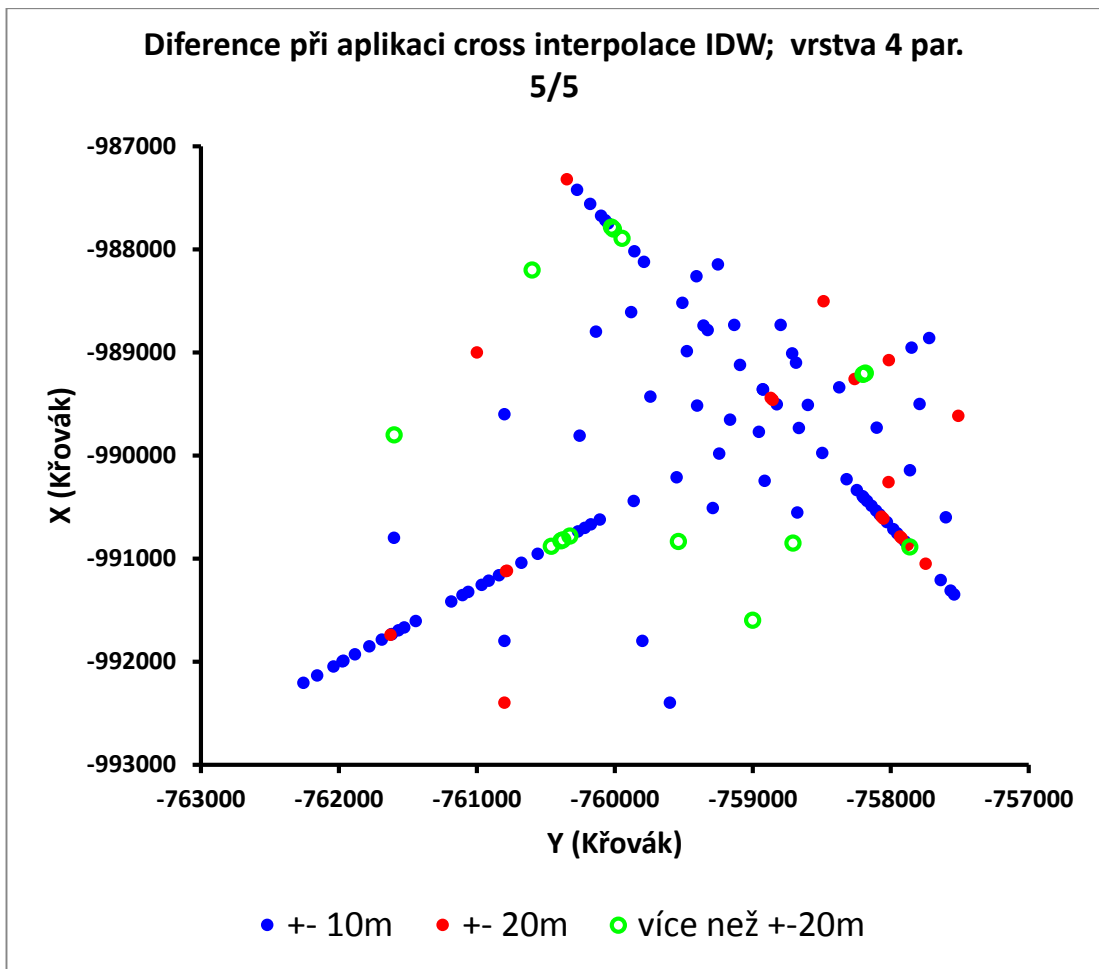




Obr.č.67 QQ graf (vrstva 4)

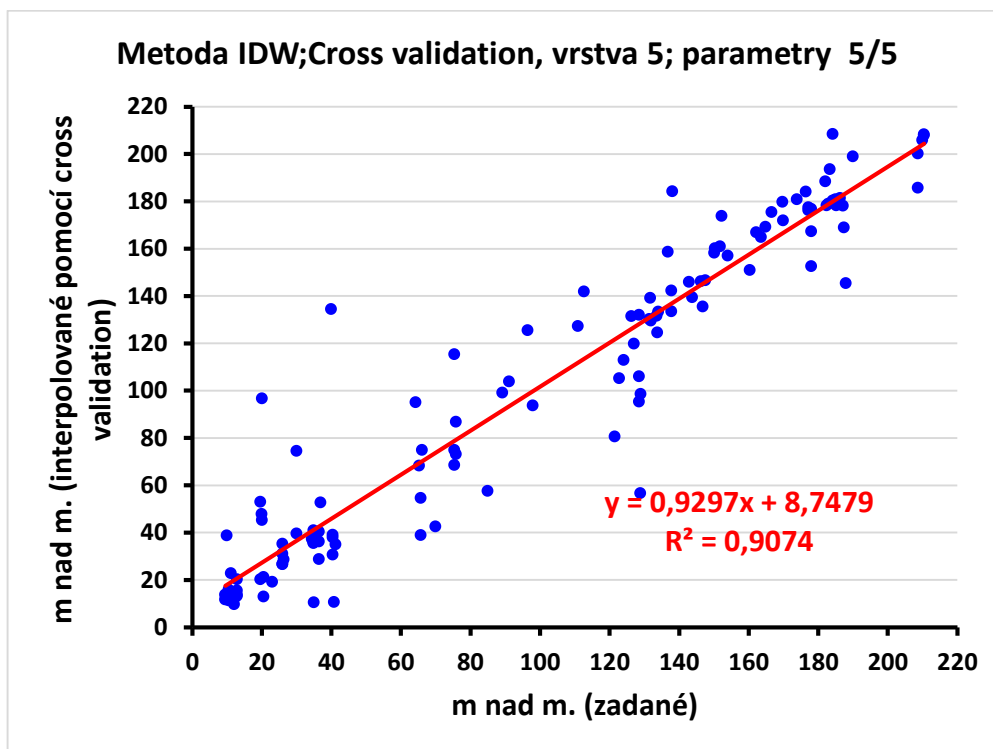


Obr.č.68 Histogram (vrstva 4)

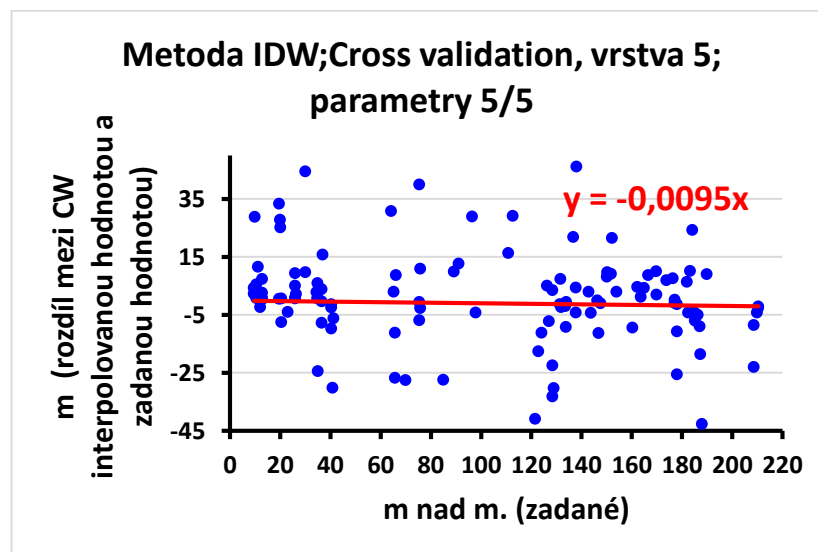


Obr.č.69 Zobrazení diferencí (vrstva 4)

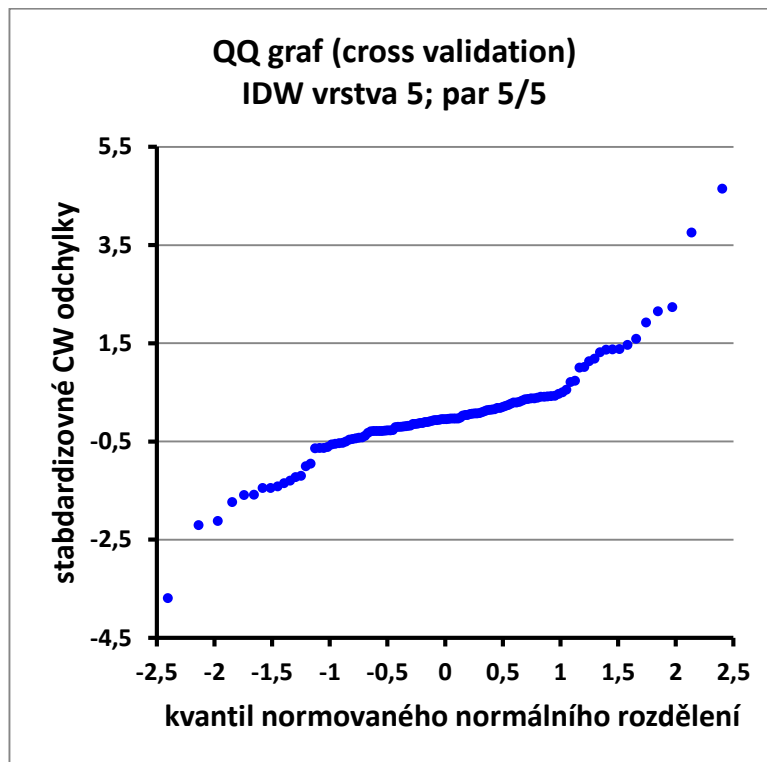
Výsledek aplikace metody Cross validation (IDW) pro vrstvu 5 (parametry 5/5) znázorňují obr.č.70,71,72,73 a 74. (výsledky pro ostatní parametry v kapitole 10. Příloha č.7)



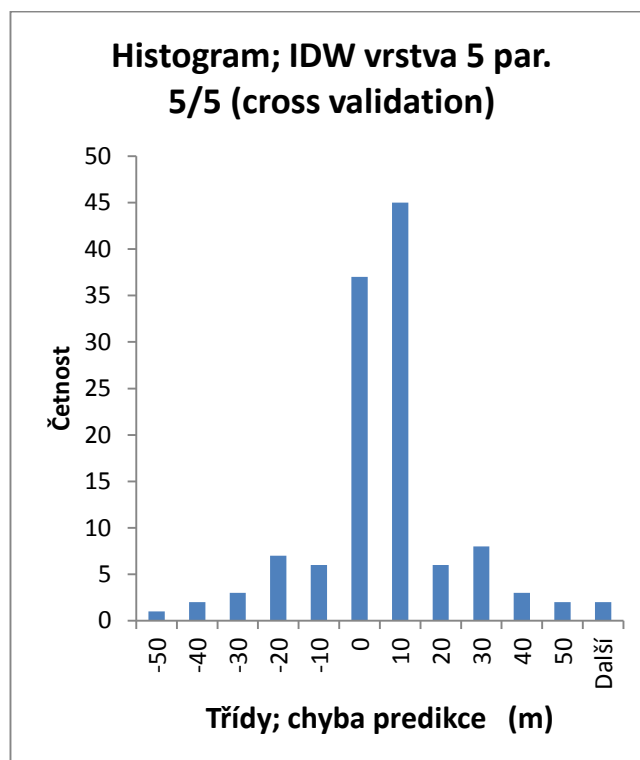
Obr.č.70 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 5)



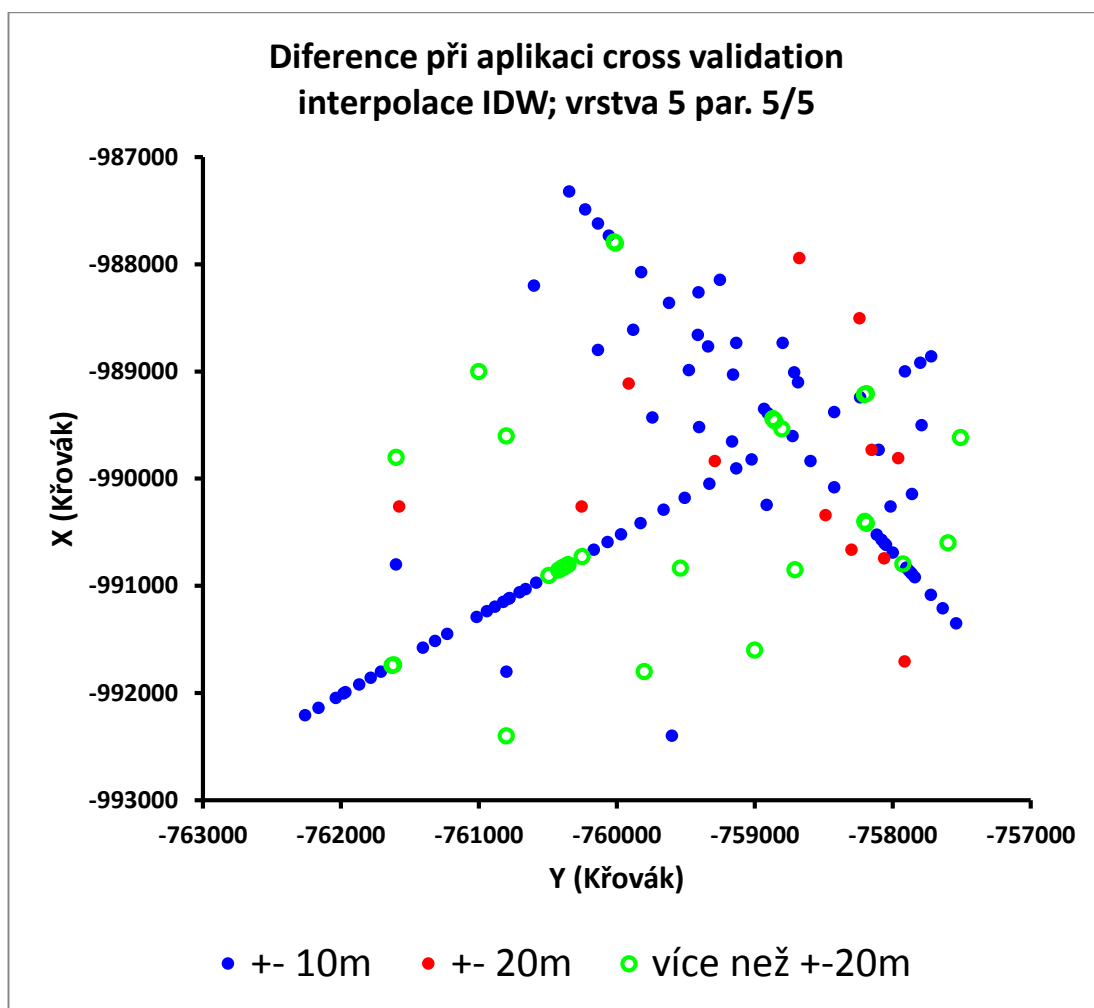
Obr.č.71 Graf chyby (vrstva 5)



Obr.č.72 QQ graf (vrstva 5)



Obr.č.73 Histogram (vrstva 5)



Obr.č.74 Zobrazení diferencí (vrstva 5)

Výsledek: směrnice závislosti  $s_1$ , tj. regresním vztahem mezi odečtenými m n.m. a metodou cross validation odhadnutými m n.m., je mírně menší než 1; podle hodnoty koeficientu determinace se lineární závislosti blíží.

Směrnice závislosti  $s_2$ , tj. regresním vztahem mezi odečtenými m n.m. a diferencí mezi hodnotami odhadnutými metodou cross validation se blíží 0; podle hodnoty koeficientu determinace není mezi hodnotami lineární závislost.

Komentář ke QQ grafům (semikvantitativní porovnání statistického rozdělení cross validation odchylek s normálním rozdělením) obecně: data vykazují ve střední části výšek přibližně normální rozdělení (lineární část QQ grafu); oba konce rozdělení jsou protaženější než odpovídá normálnímu rozdělení, zvláště u větších hodnot. Tato skutečnost je zřejmá i z příslušných histogramů.

## 7. DISKUZE

Při vizuálním posouzení grafických výstupů jednotlivých interpolačních metod pro řešené geologické vrstvy jsou na první pohled patrné rozdíly. Pokud při hodnocení bereme v úvahu i samotnou podstatu jednotlivých interpolačních metod, můžeme usoudit, která užitá metoda má jakou přednost a naopak nedostatek.

Obecně lze tvrdit, že interpolace bude tím přesnější, čím více budeme mít k dispozici vstupních dat. Na našem zájmovém území tak můžeme říci, že např. interpolace na 1. geologické vrstvě, která je pouze okrajová a body jsou od sebe umístěny ve větších vzdálenostech, mohlo dojít k většímu zkreslení než např. na vrstvách 3,4 nebo 5 interpolovaných v oblasti křížení obou profilů, kde máme k dispozici dostatek údajů. I z tohoto důvodu, bylo statistické vyhodnocení kvality prováděno právě na vrstvách s předpokladem co nejpřesnějšího výstupu interpolační metody.

Pokud porovnáme grafické výstupy jednotlivých interpolačních metod mezi sebou, můžeme u metody IDW sledovat typické vytváření tzv. „očí“, způsobené vahou některých datových bodů. Metoda NATURAL NEIGHBOR má typický výstup nepravidelného tvaru, což je důsledek interpolace pouze mezi zadanými daty. Výsledný rastr nezahrnuje extrapolované oblasti, proto tato metoda v našem případě asi nejvěrněji zobrazuje reálný terén. Na 3D výstupech metody Natural Neighbor jsou také dobře patrné zlomy. Výsledné rastry zobrazené metodou TOPO TO RASTER jsou velmi podobné jako u metody Natural Neighbor, jen v okrajových, extrapolovaných částech je vidět zkreslení výsledku díky odhadu bodů bez vstupních údajů. Tato metoda se dá doplnit o další vstupní data, např. hydrologické údaje, proto může být také velmi vhodná pro další užití v environmentálním modelování.

Metoda Cross Validation použitá pro zhodnocení kvality interpolace ukázala, že změna parametrů u metody IDW neměla zásadní vliv na výsledek interpolace. Proto další statistické vyhodnocení stačilo udělat už jen pro variantu s jedním parametrem (max. a min. počet měření v okolí 5/5) pro vrstvy 3, 4 a 5, kde byl předpoklad nejkvalitnější interpolace díky množství a rozmístění vstupních dat.

Metoda Cross Validation pro metodu IDW ukázala, že odstranění některých bodů způsobuje velké odchylky mezi odečtenými a odhadnutými hodnotami, tyto tzv. vlivné body mají zásadní vliv na průběh interpolace v daném místě. Je to dáno tím, že v daném místě je malá hustota bodů. Jedná se většinou o body vzdálené od profilů AB a CD.

Na základě statistických výsledků pro metodu IDW můžeme potvrdit, že provedená interpolace je s minimální chybou a průměry odchylek jsou statisticky nevýznamné. Vztah mezi hodnotami m.n.m. odečtenými a interpolovanými má lineární závislost.

## **8. ZÁVĚR**

Využívání jaderné energie je neoddelitelnou a prospěšnou součástí lidské činnosti a s tím souvisí i potřeba bezpečného ukládání RAO. Tato činnost vyžaduje odborný přístup od počátku vzniku RAO až po konečný krok, čímž je zamezení kontaminace životního prostředí radioaktivními látkami a následný monitoring.

Obor environmentální modelování se mimo jiné velkou mírou podílí na zajištění bezpečnosti úložišť RAO. Na základě modelů, vzniklých zpracováním experimentálních dat, lze odhadnout a eliminovat možná rizika spojená s potenciálním únikem radioaktivních látek do životního prostředí. Aby mohl být vytvořen co nejkvalitnější model oblasti, je třeba nashromáždit velké množství vstupních dat.

Cílem této práce bylo nashromáždit a zpracovat data pro následné vytvoření modelu šíření radionuklidů z úložiště Richard na Litoměřicku. Výsledkem bylo dosaženo na základě studia dostupných materiálů o zájmové lokalitě a jejich shrnutí s ohledem na vlastnosti, které mohou mít na výsledný model vliv.

Byly shrnuty základní údaje o radioaktivním odpadu, jeho vzniku a zpracování včetně ukládání do úložišť.

Dále byla shromážděna data o charakteristice zájmové oblasti v okolí ÚRAO Richard, včetně geologických, hydrologických a klimatických poměrů.

Z dalšího podrobného prozkoumání geologických dat byly získány doplňujících údaje ze zájmové oblasti, a to v podobě souřadnic a nadmořských výšek, na základě kterých byly několika interpolačními metodami vytvořeny výstupy jednotlivých geologických vrstev.

Z výsledku použitých interpolačních metod můžeme shrnout, že každá interpolační metoda má svá specifika a je vždy třeba uvážit vhodnost a způsob jejího použití pro danou lokalitu na základě znalostí jejího principu a na základě kvality a kvantity vstupních dat. Výsledek interpolace lze ovlivnit nastavením různých parametrů, i když na našem modelovém území změna parametrů neměla podstatný vliv.

Kvalita interpolace provedené na základě získaných dat byla následně otestována statistickou metodou cross validation. Ukázalo se, že cross validation hodnoty odchylek se ve střední části blíží normálnímu rozdělení, zatímco v krajních hodnotách se od normálního rozdělení výrazně odlišují, což znázorňují QQ grafy a histogramy. Je to způsobeno převážně umístěním bodů v okrajových částech zájmové oblasti, které mají od nejbližších bodů větší vzdálenosti oproti zbytku dat. Mezi metodou cross validation odhadnutými hodnotami a reálně odečtenými hodnotami můžeme potvrdit lineární závislost, což znázorňují grafy závislost. Z výsledku je patrné, že některé body mají velkou váhu na výsledek interpolace, proto bych pro přesnější výsledek doporučila tyto body doplnit o více údajů z jejich okolí.

Přínos práce spočívá v nashromáždění a zpracování údajů ze zájmové lokality, které poslouží k dalšímu použití v oboru environmentálního modelování. Údaje jak z rešeršní části, tak i data získaná z geologických podkladů, poskytují ucelený přehled o zájmové oblasti. Samotná interpolace, její zhodnocení a grafické výstupy jsou základem pro další odbornou práci na modelu šíření radionuklidů v dané oblasti.



## 9. POUŽITÁ LITERATURA:

AJAYI I.R., 2008: An evaluation of the equivalent dose due to natural radioactivity in the soil around the consolidated tin mine in Baukuru-Jos, plateau state of Nigeria. Iran. J. Radiation Research 5: 203-206

APPLETON J.D., 2007: Radon, Sources, Health Risks, and hazard mapping. Ambio 36: 85-89.

BAŠTA P., 2008: DP Digitální model terénu povodí Modrava 2, Česká Zemědělská Univerzita, Praha. 130 s.

BENEŠ V., LAŠTOVIČKA Z., KLUMPAR J., VRBATA L., DLOUHÝ Z., ČINKA J., 1996: Provozní bezpečnostní studie na úložiště RAO – jaderné zařízení RICHARD. Aquatest Stavební geologie a.s., Praha, 73 s.

BEVEN K.J., 2001: Rainfall runoff modelling. John & sons, 372 s.

CÍSLEROVÁ M., 1989: Inženýrská pedologie. ČVUT Praha, 156 s.

CÍSLEROVÁ M., VOGEL T., 1998: Transportní procesy. ČVUT, Praha, 182s,

Geologické a geovědní mapy, online:

[http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show\\_map.php?mapa=g50&y=758580&x=989119&s=1](http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show_map.php?mapa=g50&y=758580&x=989119&s=1), cit. 07/2014

GEOTIP s.r.o., 2002: Hydrogeologický a inženýrskogeologický průzkum a monitoring v roce 2002 pro zpracování dokumentace „Bezpečnostní rozbor ÚRAO Richard 2002“, Praha, 44 s.+ přílohy

GEOTIP s.r.o., 2012: Hydrogeologický monitoring ÚRAO Richard a ÚRAO Bratrství v roce 2012, Praha, 47 s.

GEOTIP s.r.o., 2013a: Hydrogeologický monitoring ÚRAO Richard a ÚRAO Bratrství v roce 2013, Praha, 49 s. Richard, 45 s. Bratrství + přílohy

GEOTIP s.r.o., 2013b: Geotechnický monitoring v roce 2013, Praha, 9 s.

GUIZERIX J., MARKOVIC V., AIREY P., 1987: Radioisotopes and radiation technology in industry. IAEA Bulletin 2: 20-24.

HÁLA J., 1998: Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. Konvoj, Brno, 311 s.

HAN K.W., HEINONEN J., BONNE A., 1997: Radioactive waste disposal: Global experience and Challenges. IAEA bulletin 39(1): 33-41

HRÁDEK F., KUŘÍK P., 2002: Hydrologie. Skriptum ČZU, Praha, 280s.

HUSSEIN E.M.A., 2007: Radiation Mechanics/Principles and Practise, Elsevier. Oxford, 323 s.

IAEA, 1994: Classification of radioactive waste. Safety series No. 111-G-1.1, International Atomic Energy Agency, Vídeň, 39s.

IAEA, 2003: Radioactive Waste Management Glossary. International Atomic Energy Agency, Vídeň, 54 s.

IAEA, 2003: The long term storage of radioactive waste: safety and sustainability. International Atomic Energy Agency, Vídeň, 17 s.

ICRP, 2007: Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4) International Commission on Radiological Protection, Ottawa, 34 s.

JANŮ M., 2003a: Informace starostům o práci SURAO. Praha, 9 s.

KADLČÍKOVÁ J., 2007: Testování a výběr interpolačních metod DMR v závislosti na typu georeliéfu. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*. 18 s.

KLENER V., BUČINA I., KUNZ E., ŠEVC J., THOMAS J., 1987: *Hygiena záření*. Avicenum / zdravotnické nakladatelství, Praha, 472 s.

KONOPÁSKOVÁ S., JELÍNEK J., FALTEJSEK J., 2010c: Roční zpráva o ukládání RAO na ÚRAO Richard. SÚRAO-2010-003, 24 s

KŘIKAVOVÁ L., 2009: *BP Interpolace bodových dat*, ČVUT Fakulta stavební, katedra mapování a kartografie, Praha 55s.

KOVÁŘ P., 1990: *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích*. VŠZ Praha, 136 s.

KURÁŽ M., 2011: *Numerical Solution of the Flow and Transport Equations in Porous Media with the Dual Permealibility Conceptual Approach*, Fakulta životního prostředí ČZU, 182 s. MAGILL J., GALY J., 2005: *Radioactivity, radionuclides, radiation*. Springer Verlag Berlin 2005, 259s.

MAJER V., 1961: *Základy jaderné chemie*, SNTL Praha, 607 s.

MAJER V., 1985: *Základy užití jaderné chemie*, SNTL Praha, 226 s.

MPO a SÚRAO, zpráva, 2000: *Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR*. Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha, 129 s.

MPO a SÚRAO, zpráva, 2001: *Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR*. Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha, 25 s.

MUCHA I., ŠESTAKOV V., 1987: *Hydraulika podzemných vod*, Bratislava, 302 s.

OSMANLIONGLU A.E., 2006: Treatment of radioactive waste by sorption on natural zeolite in Turkey. *J. of Hazardous Materials* 137: 332-335

POLÁK M. , 2013: Závěrečná zpráva k úkolu „Aktualizace hydrogeologického modelu proudění podzemní vody a transportu radionuklidů z ÚRAO Richard“. Roztoky u Prahy, 25 s. + přílohy

Přírodovědecká fakulta UK v Praze: Hlavní metody interpolace, online: [https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/vtfg2/prednasky/surfer\\_1/interpolace/interpolace.html](https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/vtfg2/prednasky/surfer_1/interpolace/interpolace.html), cit. 03/2015

REMPE N. T., 2007: Permanent Underground Repository for radioactive waste. *Progress in Nuclear Energy* 49: 365-374.

ROMANOVSKIY V.N., SMIRNOV I.V., BABAIN V.A., TODD T.A., SCOTT HERBST R., LAW J.D., BREWER K.N., 2001: The universal solvent extraction (UNEX) process. *I. Solvent Extraction and Ion Exchange* 19: 1-21.

SMITH P.A., ALEXANDER W.R., KICKMAIER W., OTA K., FREIG B., MCKINLEY I.G., 2001: Development and testing of radionuclide transport models for fractured rock: examples from the Nagra/JNC Radionuclide Migration Programme in the Grimsel Test Site, Switzerland. *J. of Contaminant Hydrology* 47: 335-348.

SÚRAO, 2010: Zpráva o činnosti v roce 2010, Praha, 44s.

SÚRAOb, Informační brožura. Praha, online: <http://www.surao.cz/cze/Informacni-koutek/Dokumenty-ke-stazeni/Brozury>, cit. 09/2014

SÚRAOd, Úložiště radioaktivních odpadů, online: <http://www.rawra.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu>, cit. 09/2014.

UNSCEAR, 2000: Exposures from natural radiation sources, Report Vol.1, Annex B. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Vídeň.

VRBATA L., ČINKA J., 2004: Hydrogeologický monitoring v roce 2004, ÚRAO Richard u Litoměřic. SÚRAO, 25 s. + přílohy

Vyhláška SÚJB č. 307/2002 § 2, o radiační ochraně, v platném znění.

WEBER W. J., EWING R.C., CATLOW C.R.A., DIAZ DE LA RUBIA T., HOBBS L.W., KINOSHITA C., MATZKE H. MOTTA A.T., NASTASI M., SALJE E.K.H., WESSELS P., 2007: Safe final nuclear waste disposal and reprocessing as supposed alternative, podklad k semináři Introductory seminar course Energy – climat – security, Universitat Hamburg 11.12.2007, 13 s.

Zákon č. 18 / 1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění.

ZAKRZEWSKA G., HARASIMOWICZ M., CHMIELEWSKI A.G., 2001: Membrane processes in nuclear technology, application for liquid radioactive waste treatment. Separation and Purification Technology V. 22-23: 617-625

## 10. PŘÍLOHY

### Příloha č. 1

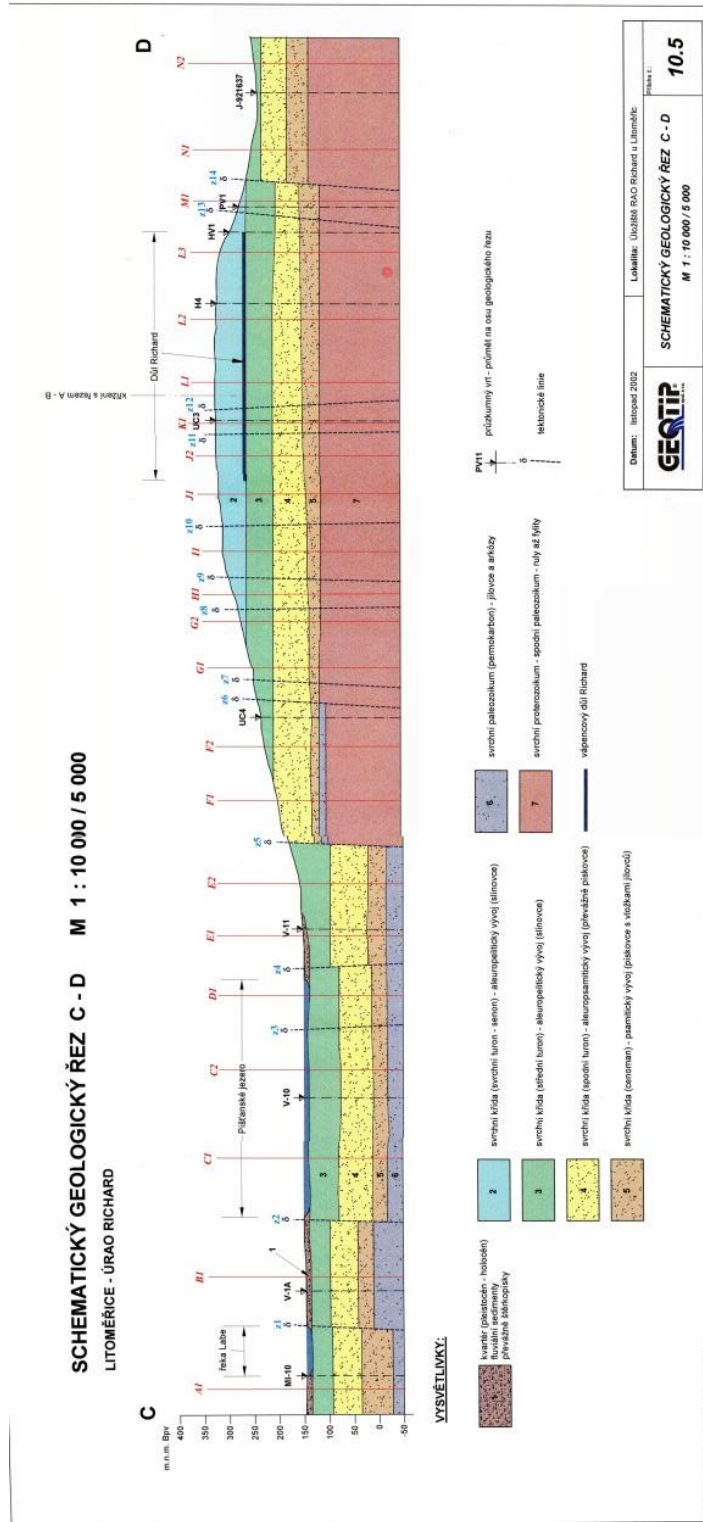
Situace schématických geologických řezů v zájmové oblasti ÚRAO Richard (GEOTIP 2002)





# Příloha č. 3

## Schématický geologický řez C-D (GEOTIP 2002)





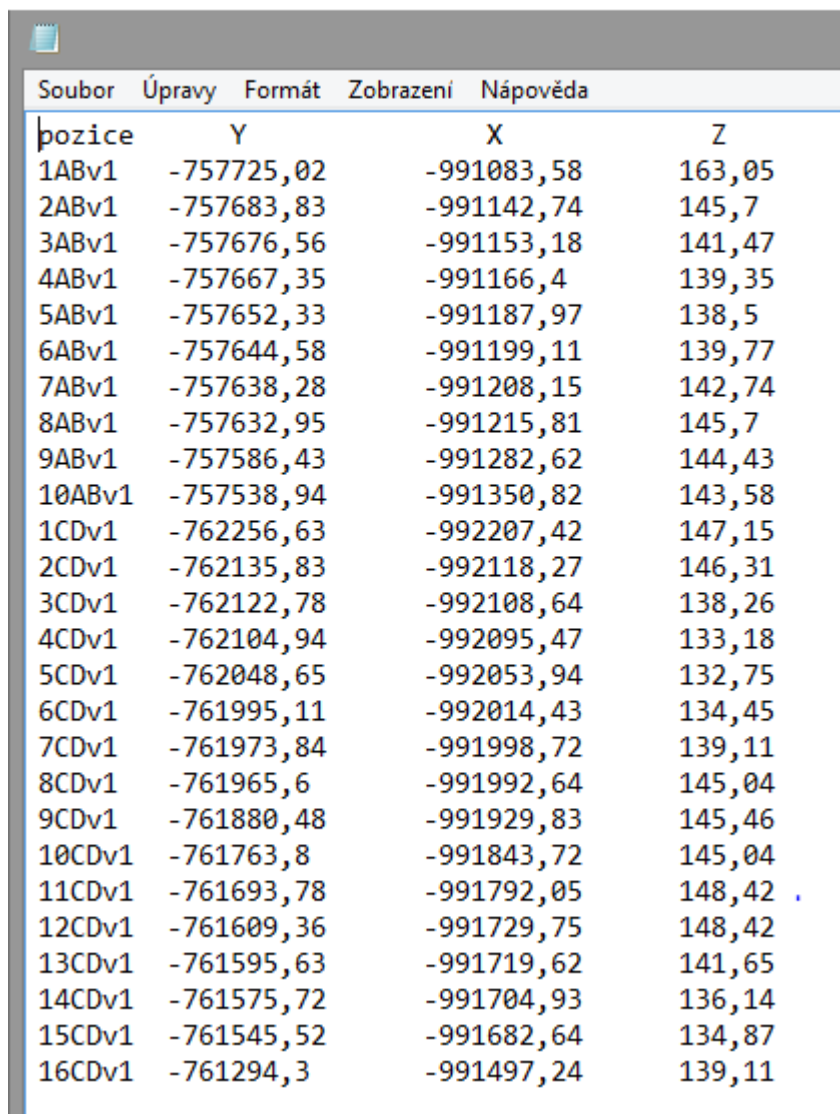
#### Příloha č. 4

Ukázka vstupních dat pro práci v GIS (souřadnice a nadmořské výšky)

- a) Formát xls. (žlutě vyznačené místo zlomu, kde byla data odečtena vždy na levé i pravé straně zlomu)

AB	z8B	-990594,333	-758065,706	235,26
AB	H1	-990653,089	-758024,792	168,36
AB	H2	-990754,164	-757954,409	169,63
AB	z9A	-990786,689	-757931,760	194,65
AB	z9B	-990786,689	-757931,760	194,65
AB	I1	-990847,544	-757889,385	142,92
AB	z10A	-990868,528	-757874,773	182,07
AB	z10B	-990868,528	-757874,773	182,07
AB	J1	-990940,924	-757824,360	110,27
AB	J2	-991081,869	-757726,215	110,27
AB	J3	-991270,728	-757594,704	110,27
AB	konec B	-991349,769	-757539,665	109,00
CD	C_konec	-992208,180	-762257,662	134,16
CD	A1	-992147,026	-762174,794	135,06
CD	z1C	-991991,555	-761964,122	135,06
CD	z1D	-991991,625	-761964,216	136,33
CD	B1	-991874,396	-761805,365	136,33
CD	z2C	-991733,809	-761614,860	136,33
CD	z2D	-991733,815	-761614,869	136,50
CD	C1	-991584,950	-761413,146	138,85
CD	C2	-991369,903	-761121,744	138,85
CD	z3C	-991271,552	-760988,473	140,41

b) Příklad dat ve formátu .txt

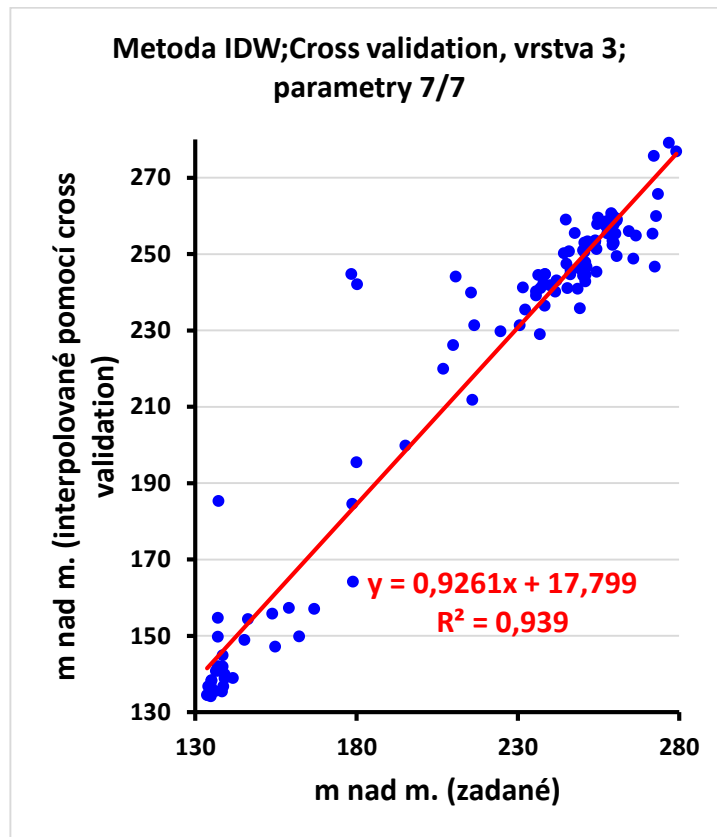


The image shows a screenshot of a text editor window. The window title bar is not visible. The menu bar contains 'Soubor', 'Úpravy', 'Formát', 'Zobrazení', and 'Nápověda'. The main text area contains a table with four columns: 'pozice', 'Y', 'X', and 'Z'. The data is organized into two groups: 'ABv1' (rows 1-10) and 'CDv1' (rows 11-20). Each row contains a position identifier, a Y-coordinate, an X-coordinate, and a Z-coordinate, all formatted with commas as decimal separators.

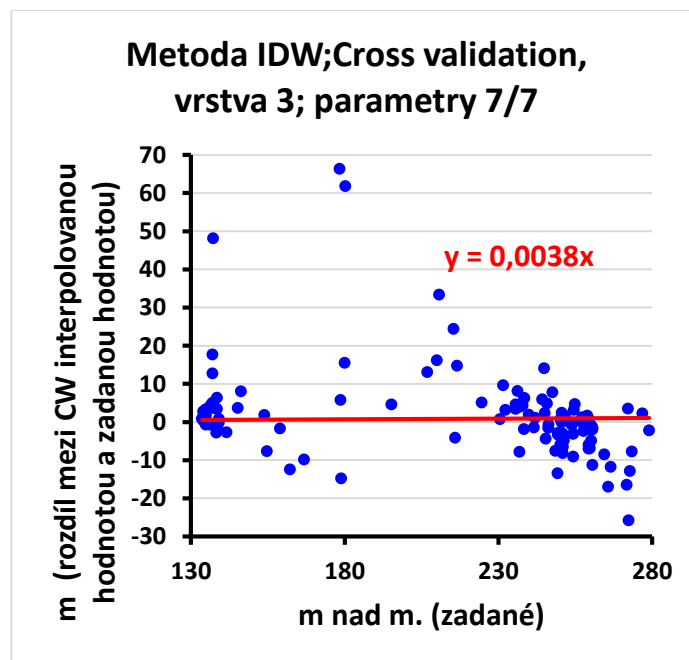
pozice	Y	X	Z
1ABv1	-757725,02	-991083,58	163,05
2ABv1	-757683,83	-991142,74	145,7
3ABv1	-757676,56	-991153,18	141,47
4ABv1	-757667,35	-991166,4	139,35
5ABv1	-757652,33	-991187,97	138,5
6ABv1	-757644,58	-991199,11	139,77
7ABv1	-757638,28	-991208,15	142,74
8ABv1	-757632,95	-991215,81	145,7
9ABv1	-757586,43	-991282,62	144,43
10ABv1	-757538,94	-991350,82	143,58
1CDv1	-762256,63	-992207,42	147,15
2CDv1	-762135,83	-992118,27	146,31
3CDv1	-762122,78	-992108,64	138,26
4CDv1	-762104,94	-992095,47	133,18
5CDv1	-762048,65	-992053,94	132,75
6CDv1	-761995,11	-992014,43	134,45
7CDv1	-761973,84	-991998,72	139,11
8CDv1	-761965,6	-991992,64	145,04
9CDv1	-761880,48	-991929,83	145,46
10CDv1	-761763,8	-991843,72	145,04
11CDv1	-761693,78	-991792,05	148,42
12CDv1	-761609,36	-991729,75	148,42
13CDv1	-761595,63	-991719,62	141,65
14CDv1	-761575,72	-991704,93	136,14
15CDv1	-761545,52	-991682,64	134,87
16CDv1	-761294,3	-991497,24	139,11

## Příloha č. 5

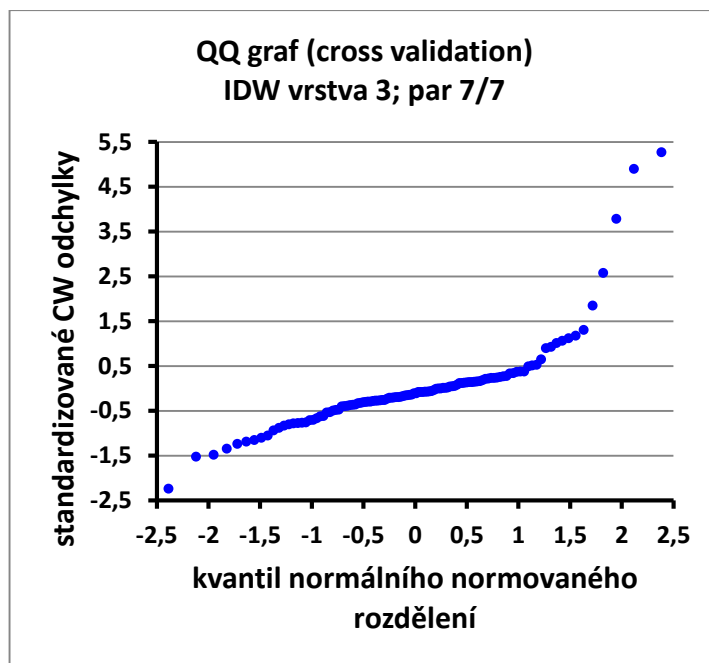
Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro vrstvu 3 (par.7/7)



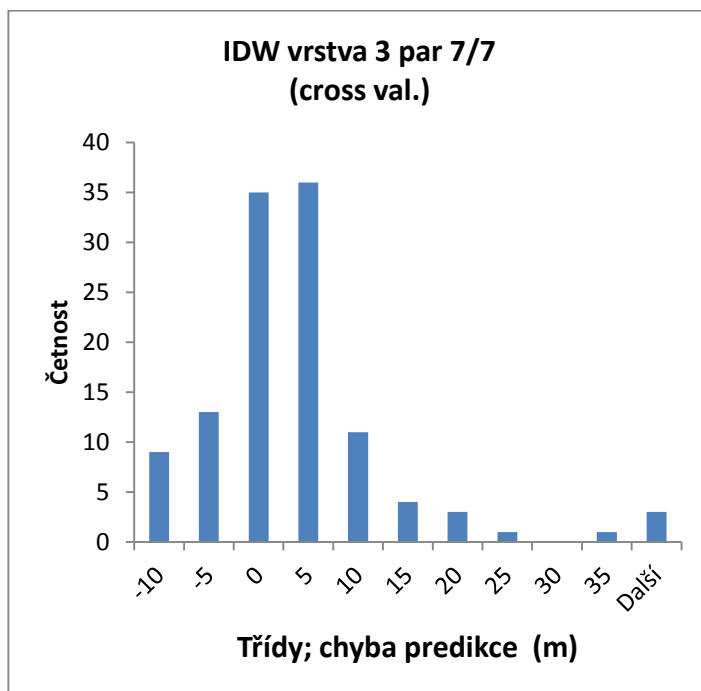
Obr. č.5.1 Závislost m.n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 3)



Obr.č. 5.2 Graf chyby (vrstva 3)

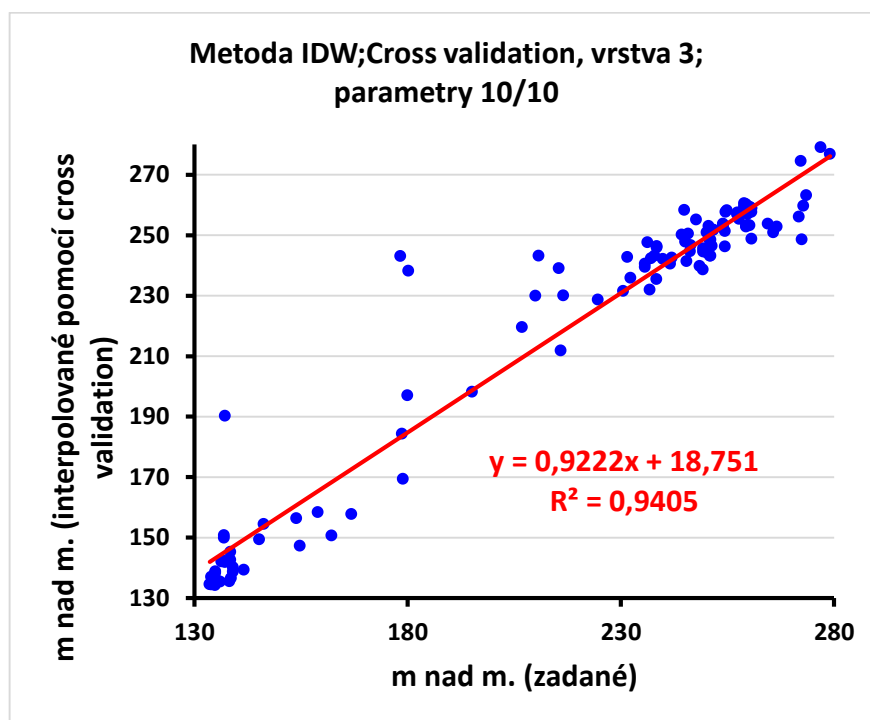


Obr.č. 5.3 QQ graf (vrstva 3)

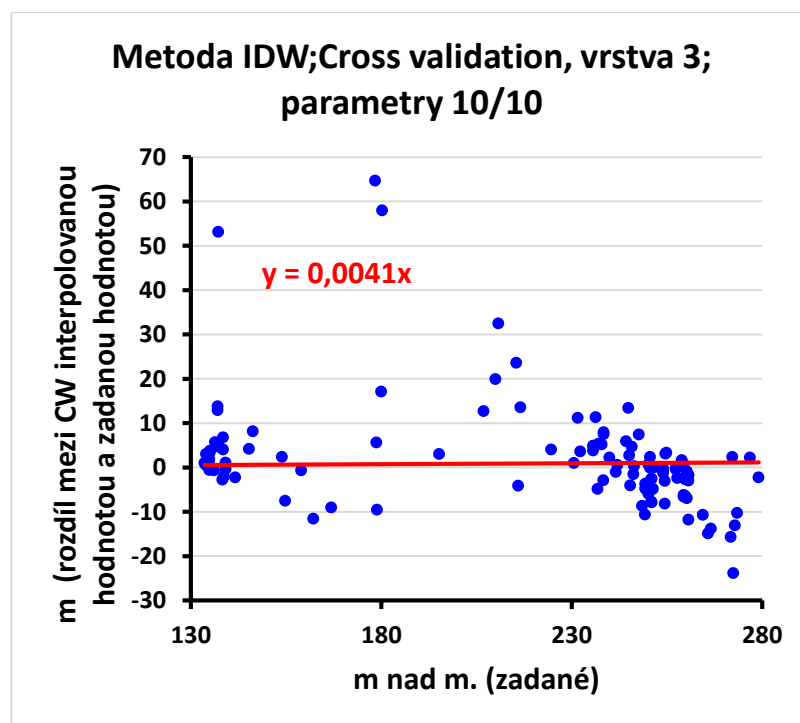


Obr.č 5.4 Histogram (vrstva 3)

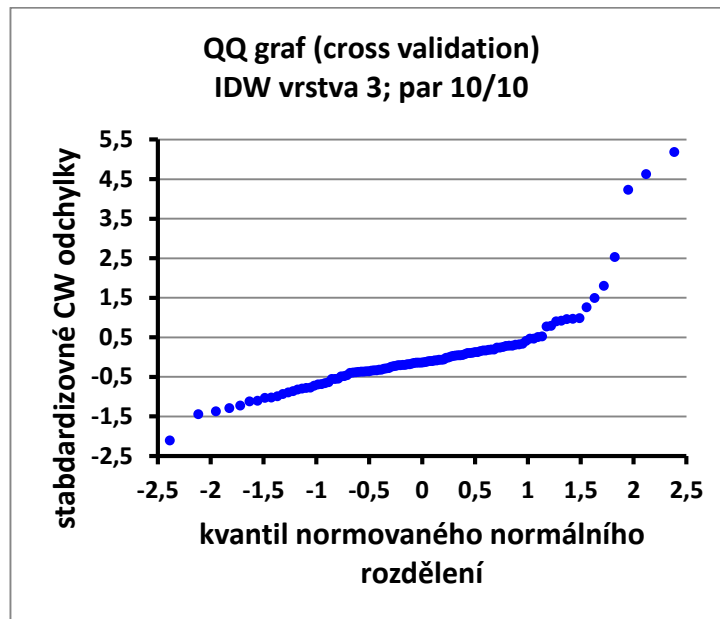
Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro vrstvu 3 (par.10/10 )



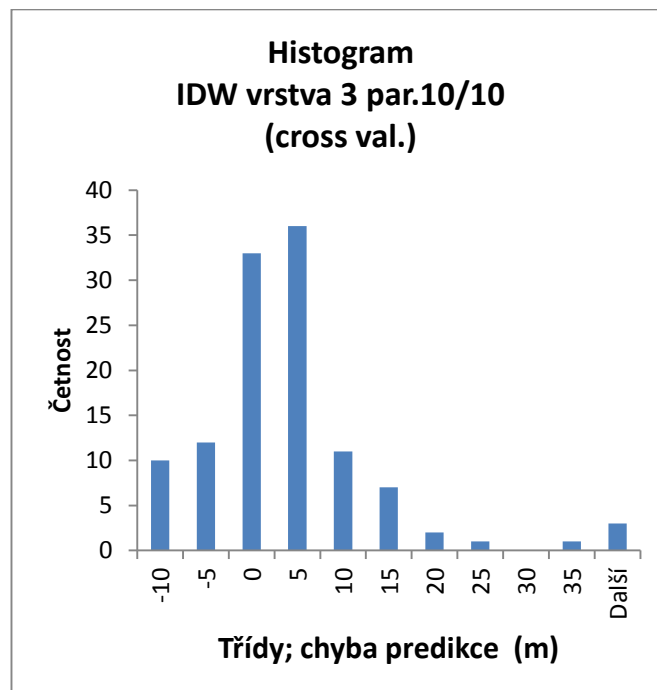
Obr. č. 5.5 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 3)



Obr. č. 5.6 Graf chyby (vrstva 3)



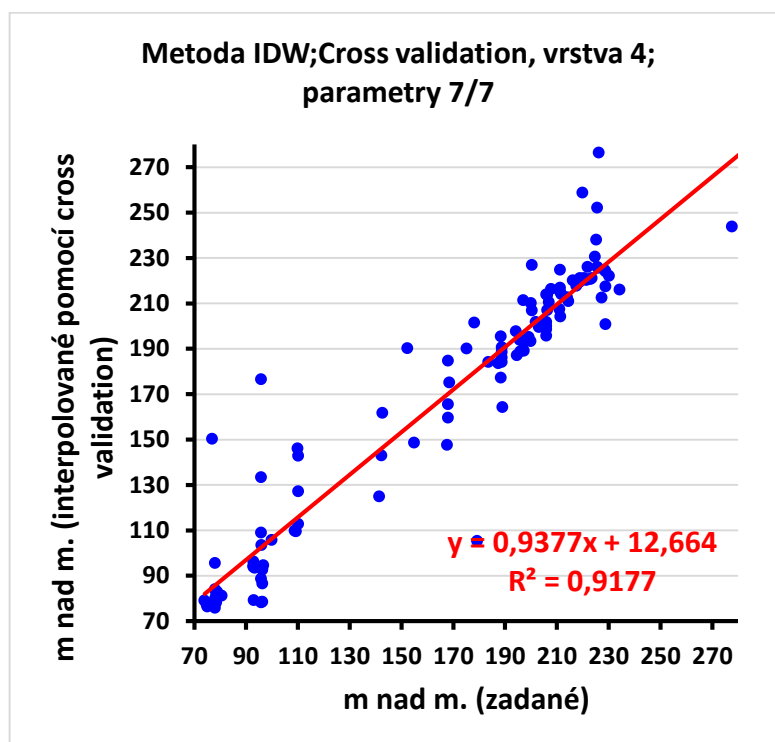
Obr.č. 5.7 QQ graf (vrstva 3)



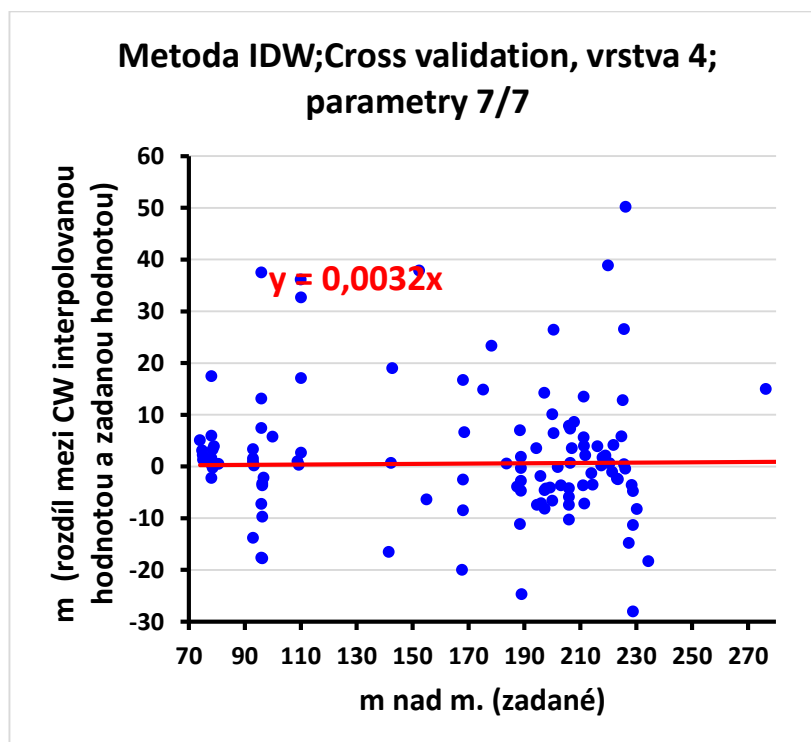
Obr.č. 5.8 Histogram (vrstva 3)

## Příloha č. 6

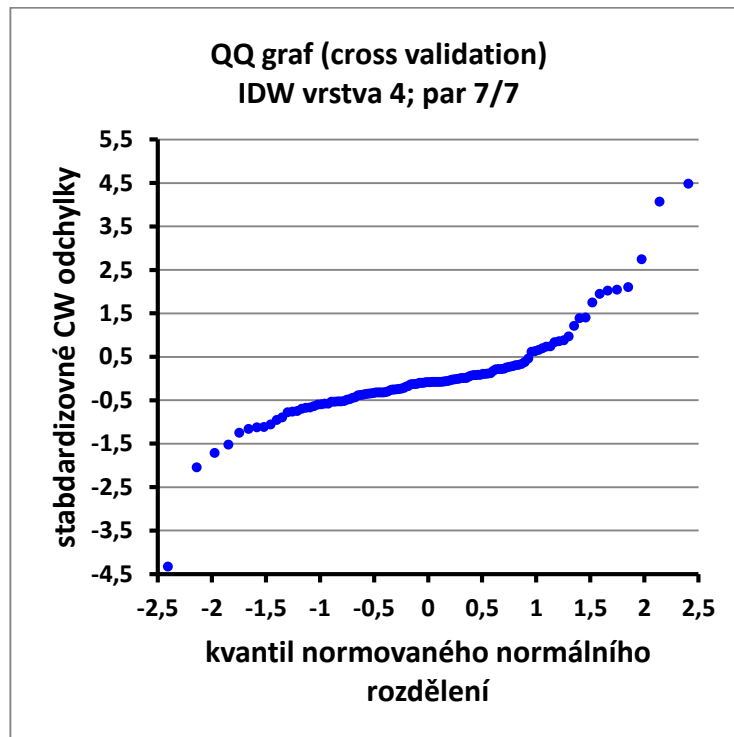
Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro **vrstvu 4** (par.7/7 )



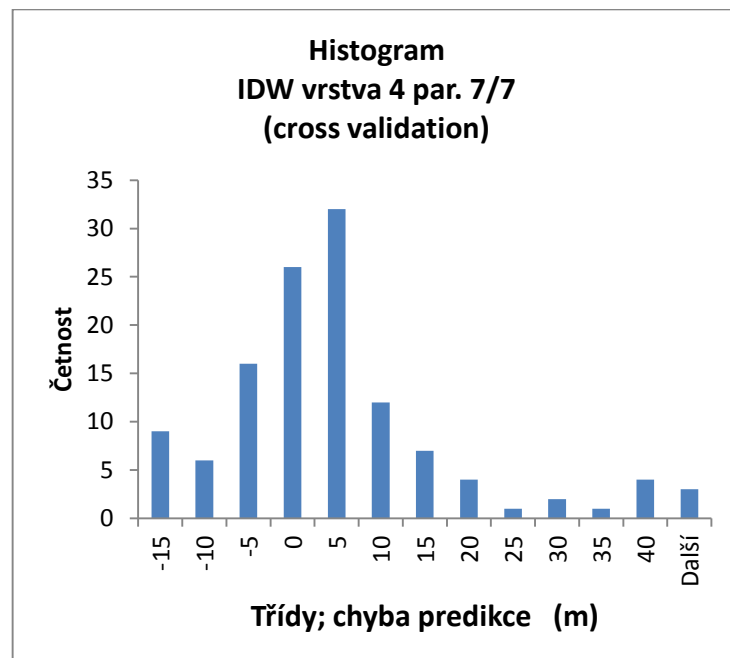
Obr.č. 6.1 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 4)



Obr.č. 6.2 Graf chyby (vrstva 4)



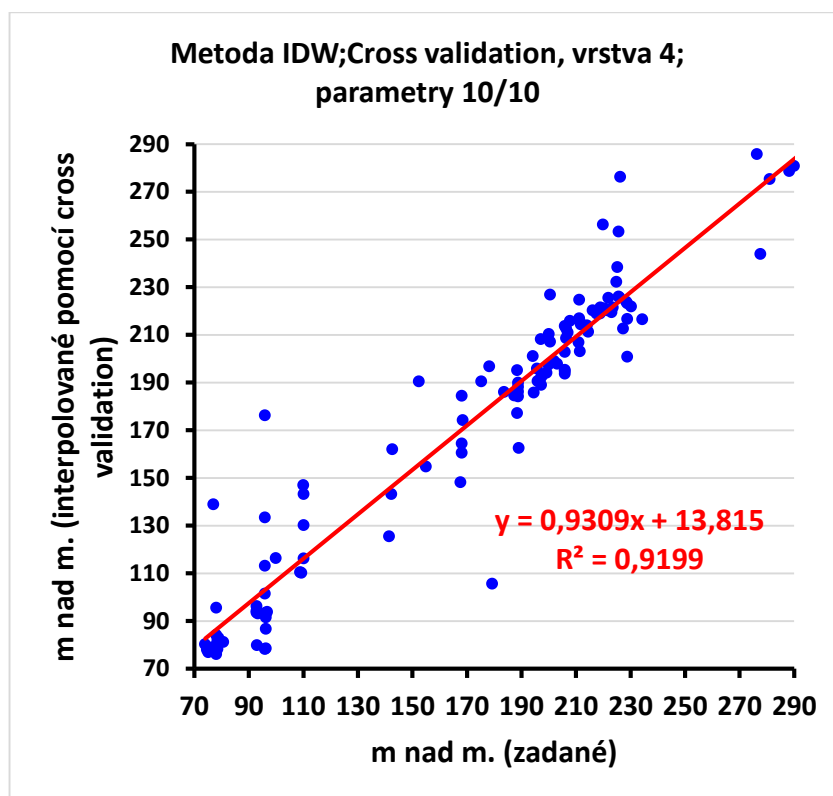
Obr.č. 6.3 QQ graf (vrstva 4)



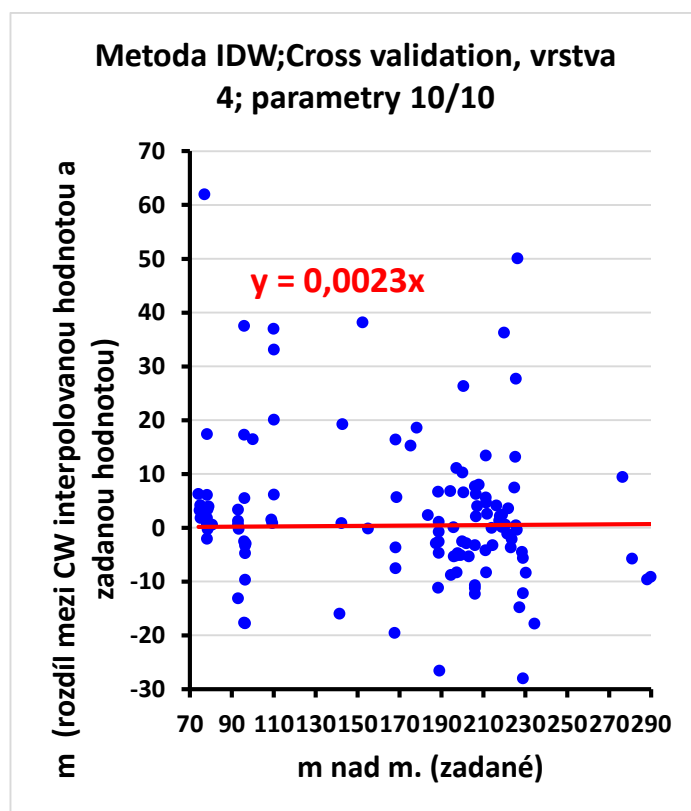
Obr.č. 6.4 Histogram (vrstva 4)



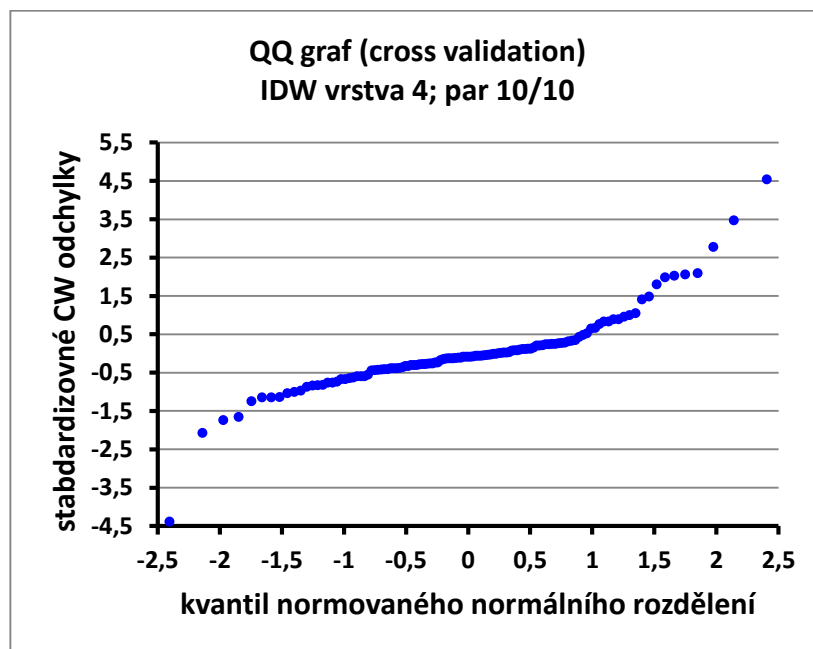
Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro vrstvu 4 (par.10/10 )



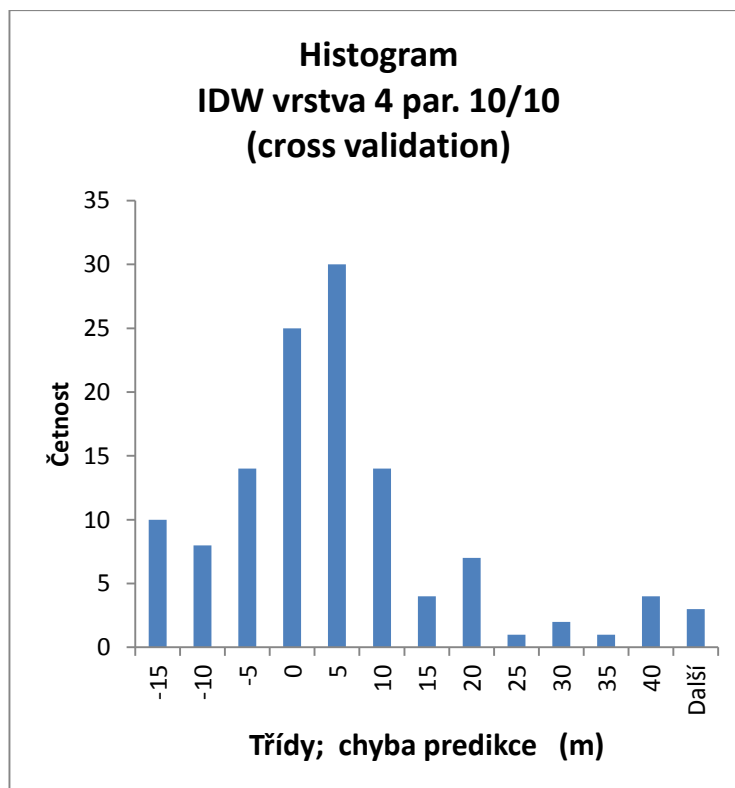
Obr. č. 6.5 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 4)



Obr. č. 6.6 Graf chyby (vrstva 4)



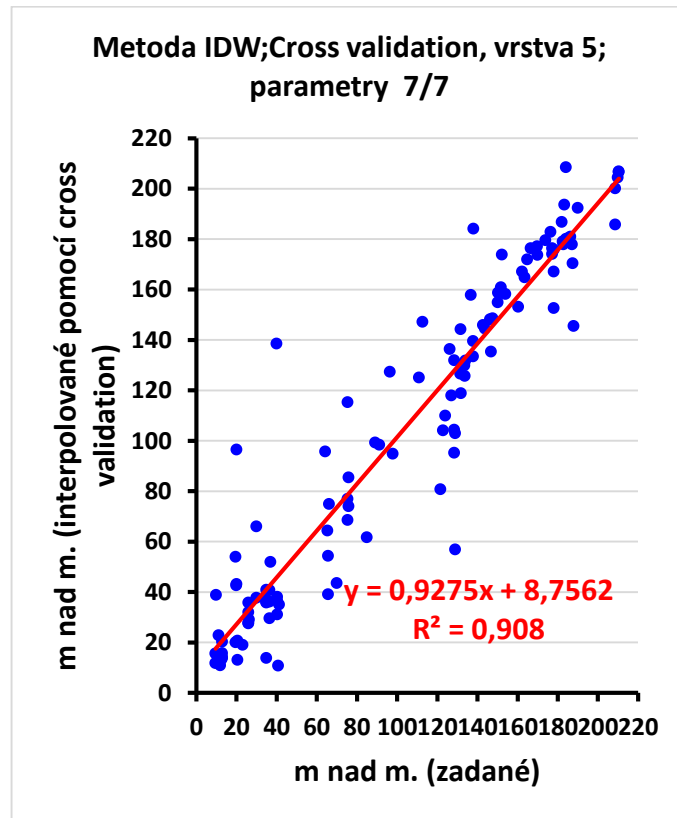
Obr.č. 6.7 QQ graf (vrstva 4)



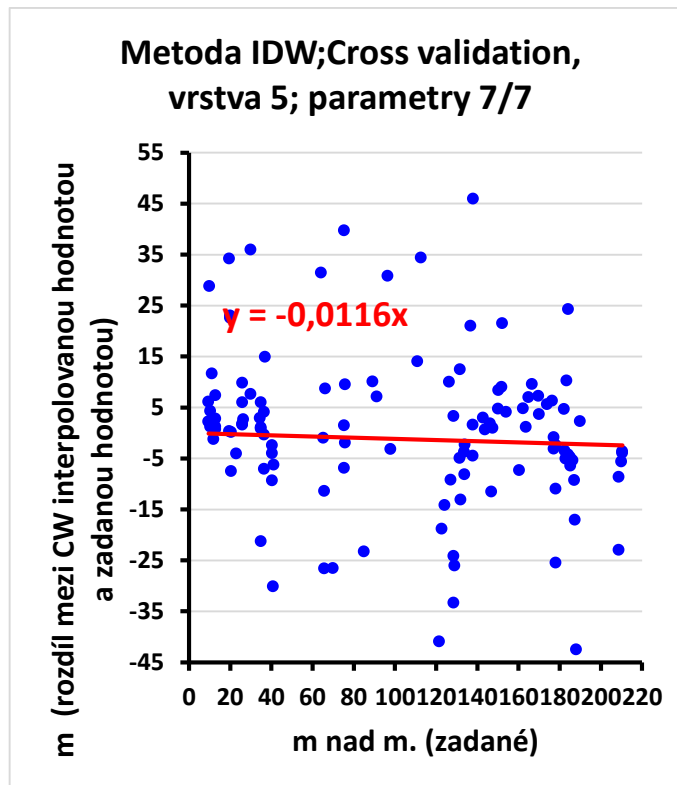
Obr.č. 6.8 Histogram (vrstva 4)

## Příloha č. 7

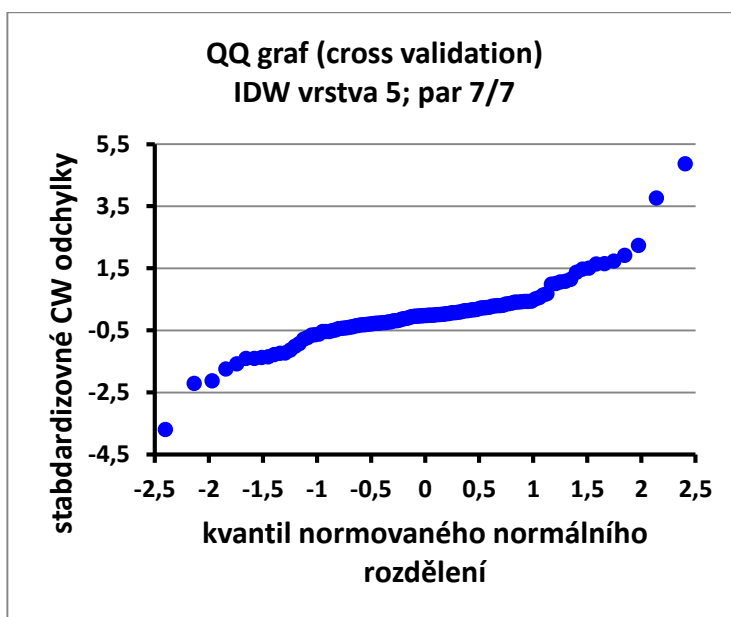
Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro vrstvu 5 (par.7/7 )



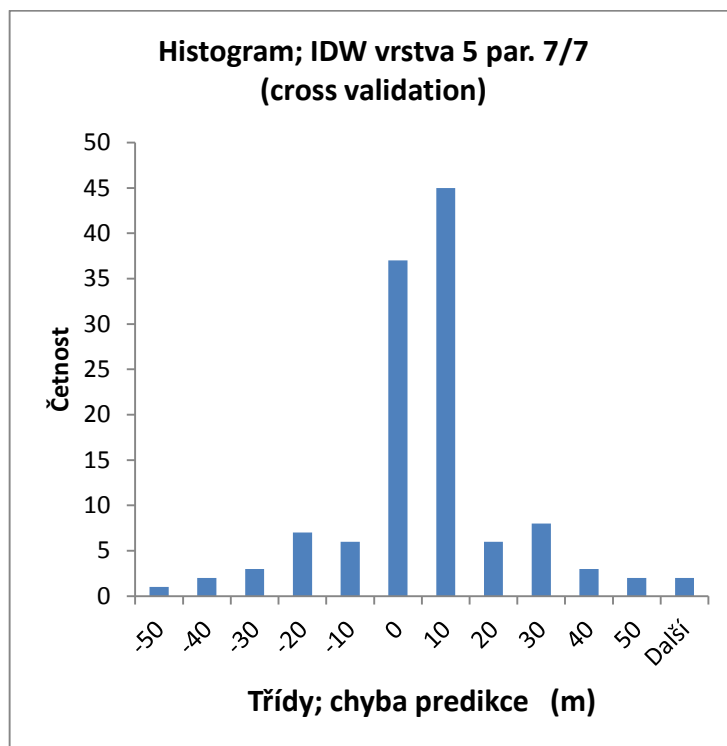
Obr. č. 7.1 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 5)



Obr.č. 7.2 Graf chyby (vrstva 5)

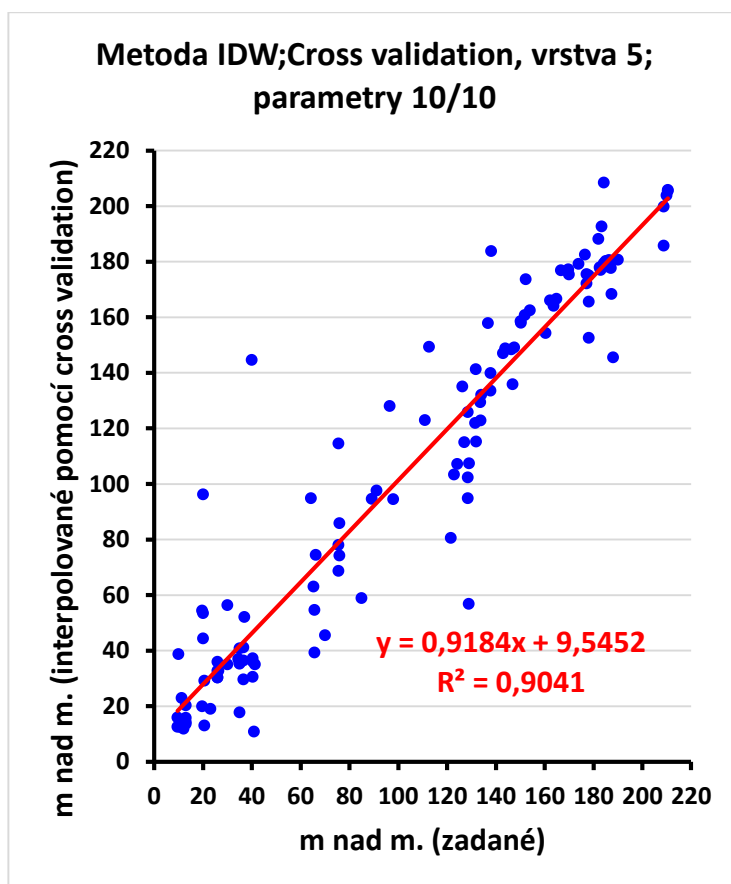


Obr.č. 7.3 QQ graf (vrstva 5)

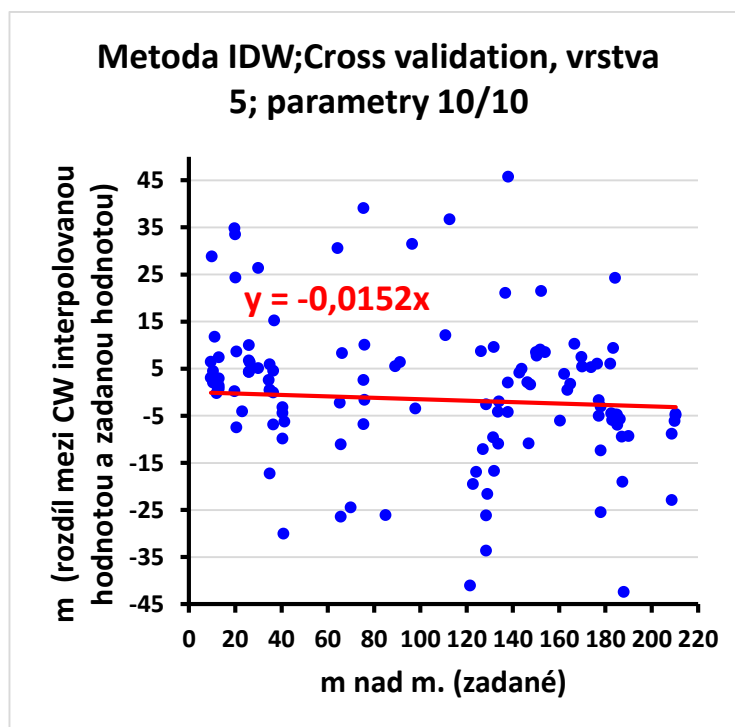


Obr.č. 7.4 Histogram (vrstva 5)

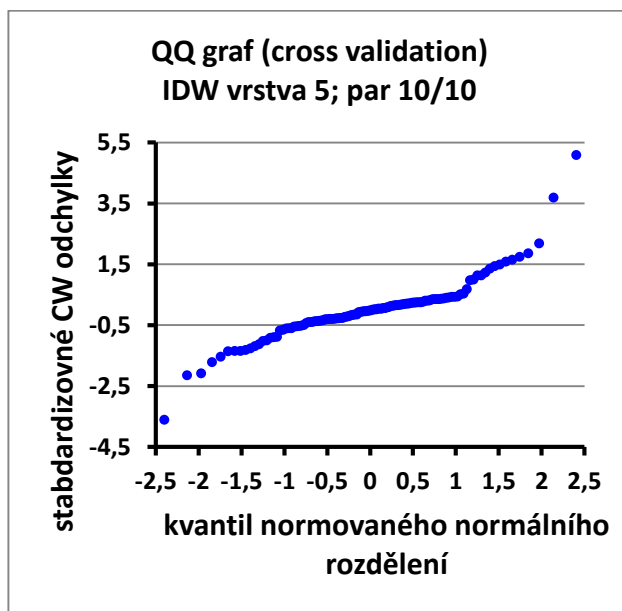
Výsledek aplikace metody cross validation (IDW) pro vrstvu 5 (par.10/10)



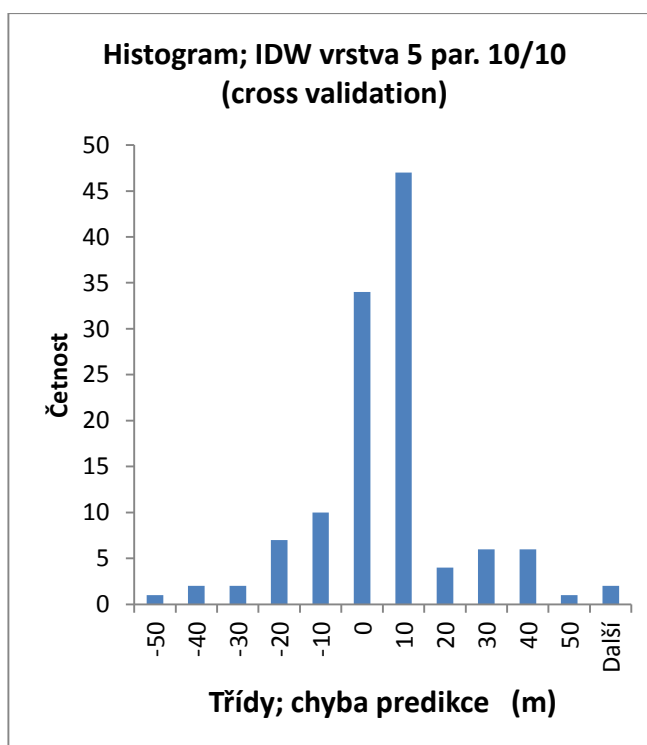
Obr. č. 7.5 Závislost m n.m. odhadnuté metodou CV na odečtené (vrstva 5)



Obr. č. 7.6 Graf chyby (vrstva 5)



Obr.č. 7.7 QQ graf (vrstva 5)



Obr.č. 7.8 Histogram (vrstva 5)

## 12. DATOVÝ DISK

Příložený datový disk obsahuje:

- a) DP ve formátu .pdf
- b) Data pro práci v GIS:
  - Vstupní data (xls, txt, shp)
  - Zlomy (xls)
  - Rastry – IDW, Natural Neighbor, Topo to raster
  - Cross Validation – pro vrstvu 3,4,5 (smooth)