

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geochemie



**Bc. Michal Hošek**

Kontaminace nivy Ploučnice těžkými kovy  
ve vztahu k její architektuře

Contamination of floodplain of the Ploučnice river by heavy metals:  
relation to its architecture

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Viktor Goliáš, PhD

Konzultant: RNDr. Tomáš Matys Grygar, CSc.

Praha 2014

## Abstrakt:

Tato diplomová práce je zaměřena především na mapování kontaminantů uvolněných do prostředí pravděpodobně z těžby uranu. Současně jsou kontaminanty využívány pro rekonstrukci říčních sedimentárních procesů. V práci hodnotíme geochemickou situaci na lokalitě Boreček (součást obce Ralsko) za pomoci povodňových sedimentů jako sedimentárního archivu znečištění posledních desítek let prvky U, Ba, Zn a Ni. K výběru zájmové oblasti byla využita jednak mapa letecké gamaspektrometrie, pro bližší lokalizaci následně povrchová gamaspektrometrie. Celkem bylo na Borečku odebráno deset hloubkových profilů nivních sedimentů (max do 230 cm) a jeden v Mimoni, všechny byly dále podrobeny rtg fluorescenční spektrální analýze (XRF), napříč nivou byly provedeny gamakarotáže, pro interpretace stavby nivy byly využito odporového profilování (ERT) a u vybraných profilů změřeno  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{210}\text{Pb}$ . Vztah mezi  $^{226}\text{Ra}$  a Ba dokládá přítomnost radiobarytu jako hlavního zdroje gama záření. Poměru  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  bylo použito pro orientaci ve stáří sedimentů. Za použití faktorů nabohacení (LEF) jsme dále provedli chemostratigrafickou korelaci sedimentů, k tomu jsme koncentrace zájmových prvků vztahovali na zrnitost sedimentu pomocí normalizace. Analýzy prokázaly, že uložení kontaminace v nivě je nerovnoměrné, a to jak do hloubky, tak plošně. Zvýšené obsahy zájmových prvků jsou vázány především na terénní deprese vyplněné jemnými povodňovými sedimenty. Pomocí ERT a digitálního modelu terénu (DMT) jsme pak tyto deprese interpretovali jako paleokoryta, jež jsou díky agradaci zazemněná. Původ podstatné části kontaminantů je s největší pravděpodobností společný, jak naznačuje průběh křivek LEF. Dále je v práci diskutován mechanismus sekundárního znečišťování, ke kterému docházelo i po ukončení znečištění primárního díky recyklaci přechodných uloženin v korytovém páse. Výsledky předkládané diplomové práce jsou součástí studie publikované v odborném časopise.

Klíčová slova: nivní sedimenty, těžké kovy, uran, radium, Ploučnice

## Summary:

This thesis is focused on mapping of contaminants released into the environment probably due to uranium mining. These chemical contaminants are used to reconstruct the sedimentary processes. In the thesis we evaluate geochemical situation in the catchment area in the locality Borecek (part of the municipality Ralsko) using the overbank sediments as sedimentary archives of pollution during the last decades by elements U, Ba, Zn, Ni and  $^{226}\text{Ra}$ . A map of aerial survey of gamma activity was used to select the area of interest, for more accurate localisation we used a surface gamma spectrometry. On Borecek we retrieved ten depth profiles of alluvial sediments (up to 230 cm) and one in Mimon, all samples were subjected to X-ray fluorescence spectral analysis (XRF), across the floodplain we performed gamma wire logs. For interpretations of floodplains architecture electrical resistivity tomography (ERT) was used and selected profiles were analysed for the activity of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Pb}$ . Interrelation of  $^{226}\text{Ra}$  and Ba proved that radiobarite is the main source of the gamma activity.  $^{210}\text{Pb} / ^{226}\text{Ra}$  ratio was used as sediment age indicator. With enrichment factor (LEF), we performed chemostratigraphic correlation of the sediments, for that the concentration of the target elements is corrected for varying lithology using normalisation. Analyses showed that the deposition of contamination in the floodplain is uneven in depth as well as in the area. Increased contents of the target elements are mainly found in terrain depressions filled with fine overbank sediments. With ERT and digital terrain models (DTM), we interpreted these depression as paleochannels, which are buried due to aggradation. The curves of LEF indicates that origin of majority of the contaminants is most likely joint. Furthermore in the study we discussed the mechanism of secondary pollution. The results of this thesis have become a part of a paper published in a research journal.

Key words: aluvial sediments, heavy metals, uranium, radium, Ploučnice

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením školitele Mgr. Viktora Goliáše, Ph.D. a konzultanta RNDr. Tomáše Matyše Grygara, CSc., a veškeré použité prameny jsou řádně citovány v seznamu literatury. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 5. 4. 2015

.....  
Michal Hošek

## Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl velmi srdečně a radostně poděkovat všem, co mi pomohli a podporovali mě při mém studiu, ač to mnohdy nebylo lehké. Především ale děkuji mé rodině, které jsem jistě způsobil spoustu vrásek a šedin navíc, že při mě vždy stáli.

Obrovský dík patří Tomáši Matysi Grygarovi z ÚACH v Řeži, jenž byl nejen zdrojem mnoha cenných rad, vždy si našel chvíli na konzultaci, kde žádná otázka nebyla příliš hloupá a svým nadšením, pozitivním přístupem k práci a obrovskou energií mi pomohl překonat chvíle beznaděje a především mi umožnil se dostat k práci, která mi činí vnitřní radost.

Dále velmi děkuji svému školiteli, Wikimu Goliášovi, za spoustu rad, pomoc při zorientování se v radioaktivní problematice, skvělé chvíle v terénu a jeho rovnocenný přístup. Pro každého studenta je radost ho mít za školitele.

Děkuji také Ing. Jitce Elznicové, Ph.D. (FŽP Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem) za tvorbu DMT podkladů a také možnost čerpat finance v rámci projektu OPVK „Modernizace výuky technických a přírodovědných oborů na UJEP se zaměřením na problematiku ochrany životního prostředí – ENVIMOD“ (CZ.1.07/2.2.00/28.0205). Dále děkuji lidem z Laboratoře environmentální geochemické analýzy v Řeži, konkrétně Tereze Novákové, Zuzaně Hájkové, Petru Vormovi a Radce Barochové, jednak že mě přijali mezi sebe a ukázali mi, že i na pracovišti může být přátelské prostředí a také za pomoc při provedení neskutečného množství EDXRF analýz. A v neposlední řadě díky Kristýně Kotkové, kamarádce ve zbrani, za podporu psychickou.

## Obsah:

Úvod .....	1
1.1. Geologie a geografie studovaného území.....	4
1.1.1. Geologie oblasti.....	5
1.1.2. Ještědský hřbet .....	5
1.1.3. Česká křídová pánev .....	6
1.1.4. Neovulkanity .....	7
1.1.5. Kvartér.....	8
1.1.6. Hydrogeologie .....	9
1.2. Uranové zrudnění .....	10
1.3. Historie těžby a znečišťování prostředí .....	11
1.4. Shrnutí dosavadních prací o znečištění Ploučnice.....	13
2. Metodika .....	15
2.1. Odběr a zpracování vzorků.....	15
2.2. Povrchové měření gama aktivity v terénu .....	17
2.3. Mělká gama karotáž.....	18
2.4. Laboratorní gamaspektrometrie – měření $^{226}\text{Ra}$ a $^{210}\text{Pb}$ .....	19
2.5. Kalibrace analýz XRF .....	19
2.6. Normalizace.....	20
2.7. Faktor nabohacení.....	22
3. Výsledky: .....	23
3.1. Terénní radiometrické metody.....	23
3.1.1. Karotáž - Boreček 1 – Profil PLP1 .....	23
3.1.2. Karotáž - Boreček 2 – Profil PLP2 .....	24
3.1.3. Karotáž – Boreček 3 – Profil PLP3 a PLP4 .....	25
3.1.4. Povrchová gamaspektrometrie - Boreček .....	27
3.1.4. Povrchová gamaspektrometrie – Mimoň koupaliště.....	28
3.1.5. Laboratorní gama spektrometrické stanovení radionuklidů a poměry $^{226}\text{Ra}/\text{Ba}$ a $^{226}\text{Ra}/\text{U}$ .....	29
3.1.6. Laboratorní gama spektrometrické stanovení radionuklidů – $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ .....	31
3.2. Prvkové znečištění sedimentů zjištěné pomocí XRF .....	33
3.2.1. MHP1 .....	33
3.2.2. MHP2 .....	35
3.2.3. MHP3 .....	37

3.2.4.	MHP4 .....	38
3.2.5.	MHP5 .....	39
3.2.6.	MHP6 .....	40
3.2.7.	MHP7 .....	41
3.2.8.	MHP8 .....	42
3.2.9.	MHP9 .....	43
3.2.10.	MHP10.....	44
3.2.11.	MHP12.....	45
4.	Diskuze.....	47
4.1.	Srovnání metod analýzy distribuce znečištění v nivní výplni .....	48
4.2.	Znečištění aktivní nivy vzhledem k nivní architektuře .....	49
4.3.	Dosažené výsledky ve vztahu k historii těžby uranu.....	53
4.4.	Výhledy na další práce v oblasti.....	56
5.	Závěr .....	59
6.	Literatura.....	60
7.	Přílohy- primární data .....	64

## Seznam obrázků:

Obrázek 1- Znázornění laterálního pohybu koryta Ploučnice v letech 1938-2010.....	3
Obrázek 2 - Vyznačení zájmových oblastí.....	5
Obrázek 3- Zjednodušená geologická mapa zájmové oblasti. ....	9
Obrázek 4 - Aktivita $^{226}\text{Ra}$ ve vodě Ploučnice v letech 1965 - 2002 .....	13
Obrázek 5 - Letecká mapa koncentrace (ppm eU). ....	15
Obrázek 6 - Digitální model terénu (DMT) s polohami vrtaných profilů MHP a karotáže PLP .....	17
Obrázek 7- Mělká gamakarotáž se sondou KS-20B na bodě PLP2/0 na břehu Ploučnice. ....	18
Obrázek 8 - Kalibrační křivka U. ....	20
Obrázek 9 - Znázornění principu výpočtu faktoru nabohacení pro Ploučnici .....	23
Obrázek 10 – Profil PLP1 - řez nivou .....	24
Obrázek 11 – Profil PLP2 - řez nivou .....	25
Obrázek 12 - Průběh kontaminace v karotážních vrtech PLP3/1 a PLP3/2. ....	26
Obrázek 13- Průběh kontaminace v karotážních vrtech PLP4/1 a PLP4/2. ....	26
Obrázek 14 - Dávkový příkon záření gama - mapa zájmové oblasti s vyznačenými MHP profily + měřené body. ....	27
Obrázek 15 - Výsledky povrchové gamaspektrometrie v lokalitě Mimoň, koupaliště. ....	28
Obrázek 16 - Lineární závislost Ba na $^{226}\text{Ra}$ , porovnání výsledků z XRF (Ba) a Lab. GS ( $^{226}\text{Ra}$ ). ....	29
Obrázek 17 - Poměr $^{226}\text{Ra}$ v ppm eU a U v ppm.....	30
Obrázek 18 - Poměr $^{210}\text{Pb}$ a $^{226}\text{Ra}$ na profilu MHP2.....	31
Obrázek 19 - Poměr $^{210}\text{Pb}$ a $^{226}\text{Ra}$ na profilu MHP9 .....	32
Obrázek 20 - Poměr $^{210}\text{Pb}$ a $^{226}\text{Ra}$ na profilu MHP10.....	32
Obrázek 21 - Poměr $^{210}\text{Pb}$ a $^{226}\text{Ra}$ na profilu MHP12.....	33

Obrázek 22 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP1 .....	35
Obrázek 23 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP2.....	36
Obrázek 24 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP3.....	37
Obrázek 25 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP4.....	38
Obrázek 26 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP5.....	39
Obrázek 27 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP6.....	40
Obrázek 28 - Litologický popis hloubkový profil prvků ve vrtu MHP7. ....	41
Obrázek 29 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP8.....	42
Obrázek 30 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP9.....	43
Obrázek 31 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP10.....	45
Obrázek 32 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP12, Mimoň. ....	46
Obrázek 33 - Srovnání míst znečištění ve vztahu ke geomorfologii nivy.....	52
Obrázek 34 – ERT - zobrazení nivní architektury pomocí odporového řezu. ....	52
Obrázek 35 - Znázornění principu primárního a sekundárního znečištění .....	58

#### Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Relativní odchylky stanovení pro vybrané prvky .....	16
Tabulka 2 – Funkce kalibračních křivek.....	20
Tabulka 3 – Normalizační křivky.....	21
Tabulka 4 - Průměrné obsahy vybraných rizikových prvků ve světových pískovcích, v pískovcích v místech zrudnění i mimo ně ve studované oblasti a v průměrných půdách...55	

## Úvod:

Během několika posledních desítek let roste zájem společnosti o historické ekologické zátěže a o jejich vliv na vodní sedimentární prostředí. Zejména dřívější studie jsou zaměřené na sedimenty vodních sedimentárních archivů, ať už estuárií, příbřežních zón či říčních a jezerních depozitů, využívaných k popisu dlouhodobě ukládané kontaminace (Heim a Schwarzbauer, 2013; Brandenberger a kol., 2008).

Sedimenty obecně mohou být použity jako velmi dobrý environmentální archiv několika posledních desítek až miliónů let. Mohou nést záznamy o vývoji klimatu, zda bylo podnebí spíše charakteru tropického či došlo k zalednění, o skladbě okolní fauny a flory a v neposlední řadě i o vlivu člověka na krajinu, ve které žije, a s tím často spojeného znečištění prostředí (Macklin a kol., 1994).

Pro ideální environmentální archiv je důležitá spojitost záznamu, což je však v reálu málokdy splněno, ať už vlivem člověka a jeho zásahů do rázu krajiny, či nějakou krátkou, ale dramatickou událostí (*eventem*), díky které může být část sedimentů přepracována nebo velmi rychle uložena. Podmínka spojitosti bývá po většinou splněna u ledovců v dostatečně chladných oblastech, jež jsou také pro rekonstrukce klimatických podmínek využívané. Pro popis změn prostředí mírného a teplého klimatu se využívají více mořské a jezerní sedimenty. Za alternativu, jejíž zvláštností je ale složitost vnitřní stavby, se považují říční sedimenty, vypovídající o lokálních změnách v krajině, jakými mohou být regulace daného toku, zemědělská aktivita v okolí, či přirozený pohyb koryta (Notebaert a kol. 2011).

Kontaminanty vázané na sedimenty říčního prostředí mají zdroje buď *bodové*, jako je průmyslové znečištění z konkrétního místa těžby nebo zpracování, výpustě z čištění odpadních vod atd., *liniové* nebo *plošné*. Důsledkem součtu působení mnoha vzdálených (už nerozlišitelných) zdrojů, remobilizace kontaminovaného aluvia, pouličních a zemědělských splachů a dalších obecných zdrojů je pak znečištění *difúzní*. Obecně lze chemické látky znečišťující prostředí rozdělit jednak na sloučeniny, vyráběné ze specifických důvodů, jako jsou pesticidy a jiné průmyslové chemikálie, či látky jako vedlejší produkty průmyslové činnosti (spalovací procesy, těžba nerostných surovin). Výzkum antropogenních kontaminantů, obsažených v sedimentech může poskytnout vodítka k určení hlavních zdrojů a cest, kudy se polutanty dostávají do prostředí, v neposlední řadě je možné je využít k rekonstrukci sedimentárních procesů. Mezi nejdůležitější archivy těžkých kovů

a znečišťujících látek v říčním prostředí patří záplavová území, koryta, pobřežní mokřady a přehrazené nádrže (Heim a Schwarzbauer, 2013; Brandenberger a kol., 2008).

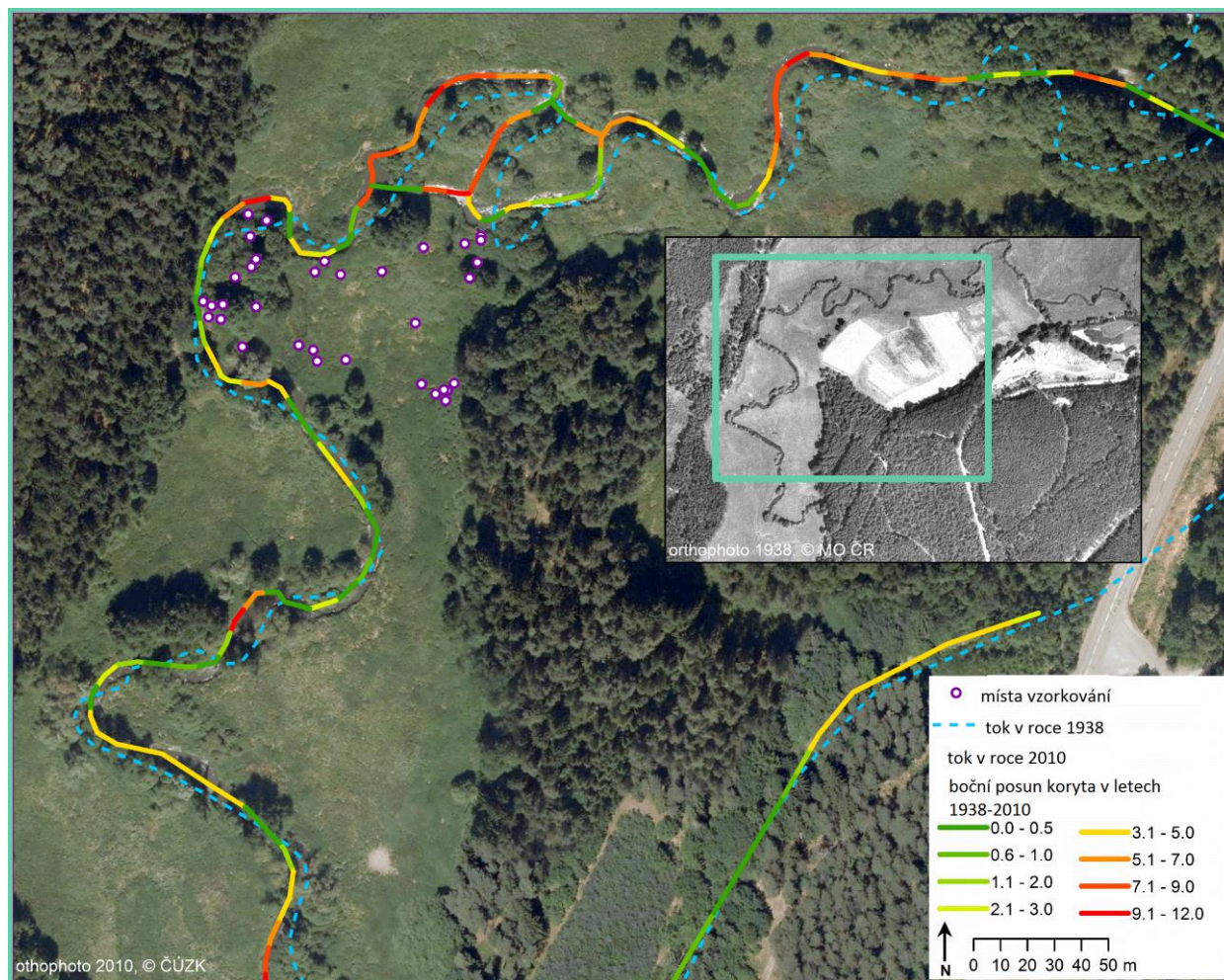
U menších toků je však jejich sedimentární archiv velmi citlivý na jakékoliv změny v charakteru toku, proto je nutné korelovat v zájmovém území více profilů a takto si ověřovat dosažené závěry. Skoro až maximalisticky extrémní pravidlo pro hustotu odběru vzorků v profilu napříč nivou je, že vzdálenost mezi jednotlivými vrty by měla být menší než šířka koryta.

Aby mohl být proveden geochronologický výzkum sedimentů vodního prostředí, je potřeba splnění základních podmínek, jako je jednak nepřerušovaná sedimentace jemnozrnných částic, byť třeba jen přibližně jednou ročně při rozlivu řeky do nivy, a dostatečně dlouhá doba ukládání mezi desítkami až stovkami let. Pro datování sedimentů se využívají různé techniky, ať už měření aktivity radioizotopů jako  $^{137}\text{Cs}$  (výbuch v jaderné elektrárně v Černobylu v roce 1986), laminování (varvy) v důsledku sezónních změn (ty jsou ale jen vzácně se vyskytující), organických sloučenin jako časových značkovacích či pylové analýzy. Pro posledních 100-150 let je díky krátkému poločasu rozpadu (22,3 let) vhodné  $^{210}\text{Pb}$  z atmosférické depozice (Heim a Schwarzbauer, 2013).

V dnešní době však už ve vyspělých zemích těžké kovy nejsou nejobávanějšími polutanty, toto neblahé „privilegium“ patří spíše organickým látkám, jako jsou PCB a PAU (plolychlorované bifenyly a polyaromatické uhlovodíky). Heim a kol. (2004) dokonce rozlišuje kontaminanty na běžné a moderní, kde běžné, kam řadí také těžké kovy, své koncentrace už v posledních desetiletích snižují. Naopak moderní, převážně organické polutanty, jsou hlavně problémem období po roce 1970 a jejich koncentrace stále rostou. Je proto pravděpodobné, že sedimentární archivy poslouží v blízké budoucnosti ke studiu historie jejich vstupu do životního prostředí, stejně jako slouží dnes pro těžké kovy.

Cílem této diplomové práce bylo především hledání kontaminantů teoreticky uvolněných do prostředí při těžbě uranu závodem Československý uranový průmysl (ČSUP), n.p., dnes DIAMO, s.p., a jejich využití jako stopovačů pro rekonstrukci stavby nivy řeky Ploučnice. Zájmovou oblastí byla niva v oblasti Boreček, kde byly provedeny jen minimální regulační zásahy do koryta a řeka se chová takřka přirozeně. V této oblasti je mnohonásobně překročeno litogenní pozadí prvků Zn, Ba, U, Ni a  $^{226}\text{Ra}$  a existuje domněnka, že jsou jejich zvýšené obsahy úzce spojené právě s těžbou U (Kafka 2003; Slezák 2000). Regulace toku, provedená jednak závodem ČSUP (v oblasti těžby) a Povodím Ohře (dále po proudu), situaci

zřejmě poněkud komplikuje. Ploučnice je v zájmové oblasti poměrně rychle se překládající řeka. To potvrdily i letecké snímky z roku 2010, které ve srovnání s realitou ukázaly posun koryta a vznik několika ostrovů během několika málo let (Obr. 1).



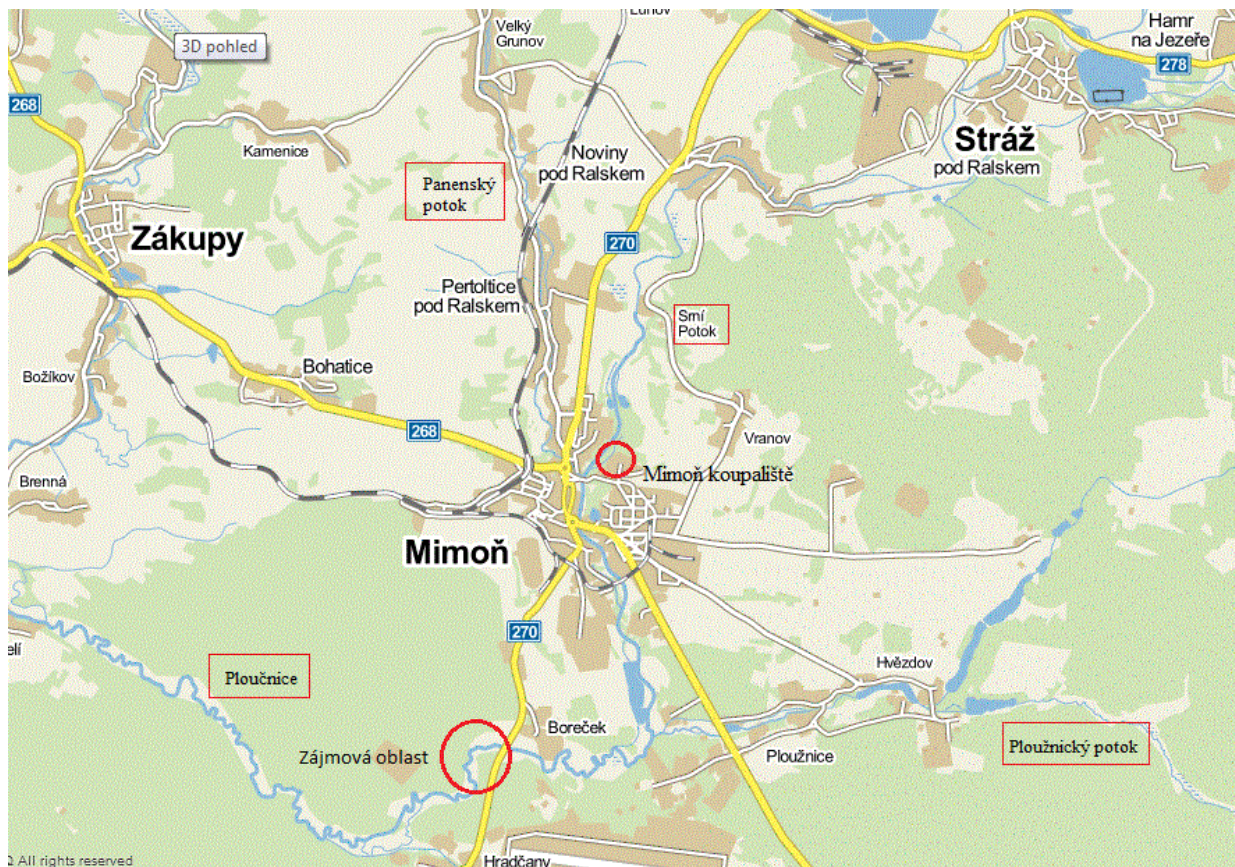
Obrázek 1- Znázornění laterálního pohybu koryta Ploučnice v letech 1938-2010.

Posun je uváděn v metrech (převzato z práce Matys Grygar a kol., 2014). Vložený letecký snímek je z roku 1938.

## 1.1. Geologie a geografie studovaného území

Horní tok řeky Ploučnice, nacházející se v geologické jednotce Česká křídlová pánev, pramení na úpatí Ještědského hřbetu, nad obcí Horní Paseky ve výšce 760 m n. m. Přes poměrně krátký tok, asi 103 km k ústí Labe, si řeka vyvinula dynamické sklonové poměry, kterými se její tok rozděluje do tří úseků se značně rozdílnými proudovými a sedimentačními charakteristikami. Nad Hamrem se ráz toku mění z bystřinného charakteru se sklonem až 33,8‰, dále, v úseku do ústí Panenského potoka v Mimoní, nastává další zmírnění spádu na 2,8‰ a u České Lípy klesá spád dokonce na 0,6‰ (Fiedler a Novák, 1995). Díky podstatnému snížení unášecí schopnosti toku řeka vytvořila pod Mimoní až po Žandov širokou údolní nivu s četnými meandry, kde dochází k ukládání suspendovaných částic. Převládají zde střední až jemné písky, prachové a jílovité uloženiny. Při srovnání se staršími říčními terasami, jež je možno ve vyšších geomorfologických úrovních nalézt, chybí v nivě v úsecích s malým spádem štěrkové uloženiny. Poslední úsek, začínající za Žandovem, je tvořen odolnými vulkanickými horninami. V tomto úzkém údolí se spádem 6,4 ‰ se neukládají téměř žádné sedimenty.

Za samotný pramen Ploučnice je označována tůň na louce na jižním okraji obce Janův důl u Osečné, pod kterou se tok rozdvouje. Jedno rameno protéká obcemi Chrástná a Břevniště, druhé jižnější teče do Hamerského rybníka, pod kterým se ramena opět slévají. U Stráže pod Ralskem se do Ploučnice vlévá Ještědský potok, patřící mezi její vydatné přítoky, dále zde do ní ústí obtokový kanál z centrální dekontaminační stanice podniku DIAMO (dříve Uranový průmysl), vedoucí čištěné důlní vody. V Mimoní do Ploučnice pravostranně ústí Panenský potok, o několik km níže, mezi Borečkem a Mimoní, se vlévá Ploužnický potok (Obr. 2). Od tohoto soutoku po Českou Lípu dochází k přirozenému meandrování řeky. Dalším přítokem je Hradčanský potok, který do Ploučnice ústí pod obcí Hradčany. Pod Brennou se přidává Svitavka a Dobranovský potok. V České Lípě je tok řeky regulován, naopak za městem je široká údolní niva, kde do ní od severu vtéká Sporka a od jihu Robečský potok. Za Žandovem vtéká Ploučnice do Českého středohoří, odkud teče až do Děčína, kde se vlévá do Labe.



Obrázek 2 - Vyznačení zájmových oblastí (červený kroužek ve spodní části obrázku) a hlavních přítoků Ploučnice.

### 1.1.1. Geologie oblasti

Pramenná oblast leží na úbočí Ještědského hřebene v oblasti hornin ještědského krystalinika. Pro malou vodnatost přináší tento tok do sedimentů Ploučnice jen málo materiálu, jde především o sericitické kvarcity ordoviku až siluru. Fylitické horniny, vápence a metavulkanity, jsou méně odolné, jejich výskyt je tedy v relativně jemnozrnných sedimentech údolní nivy spíše nepravděpodobný.

### 1.1.2. Ještědský hřbet

Ještědský hřbet se nachází v Západosudetské oblasti a jeho nejstarší horniny dosahují ordovického stáří. Vystupují zde silurské tmavé grafitické fylity a silicity a svrchně silurské hlíznaté vápence, jež jsou ekvivalentem nejmladší silurské jednotky v durynské facii saxothuringika. Z devonu se zde nalézají zelené břidlice a v okolí Světlé pod Ještědem vrstevnaté vápence, kde bylo stáří dokázáno paleontologicky, pomocí stromatoporoidů rodu

*Stachyodes*. V lomu na Velkém Vápenném u Jitavy, v severozápadní části Ještědského hřbetu, se nacházejí černé břidlice s pyritem, stratigraficky zařazené do nejvyššího devonu. Spodní karbon je znám ze Světlé pod Ještědem a Velkého Vápenného u Jitavy, kde spočívá karbonický sled v kulmském vývoji na nejvyšším devonu. Je zde vyvinut několikametrový sled zelenavých vápničitých břidlic s vložkami prachovců, v nadloží hrubozrnné droby a drobnozrnné slepence. Spodnokarbonický sled Ještědského hřbetu je společně s devonem silně zvrásněn a slabě regionálně metamorfován ve facii zelených břidlic (Chlupáč a kol. 2011).

### 1.1.3. Česká křídová pánev

Leží v severní části Českého masivu a jde o největší pánev na území ČR. Nejprve byla vyplňována sladkovodními sedimenty, později, při cenomanské transgresi trvající bez přerušení až do santonu, i mořskými písčitymi, jílovitými a vápničitými sedimenty. Osa protažení je od SZ k JV souhlasně s labskou zlomovou linií (obr. 3). V nejhlubší části dosahuje mocnost jejích sedimentů více než 900 m. V západní podkrušnohorské oblasti je část České křídové pánve zakryta uloženinami terciéru a terciérními vulkanity Českého středohoří. V jejím vývoji můžeme rozlišit 3 hlavní fáze vyplňování. Jednak spodní až střední cenoman, dále svrchní cenoman a coniac až santon. V první fázi docházelo k vyplňování dílčích depresí členitého reliéfu aluviálními sedimenty. V té době se ukládaly bazální části peruckých vrstev jako pískovce.

Ve druhé fázi, ve svrchním cenomanu, přišla z oblasti Tethydy mořská transgrese, jsou pro ni tedy typické jezerní sedimenty, směrem do nadloží přecházející do facií mořských glaukonitových pískovců korycanského souvrství. Během svrchního cenomanu dosáhla transgrese vrcholu – nastoupily pelagické facie: tmavší prachovce a jílovce.

Na počátku turonu opět došlo k transgresi, pánev se rozšiřovala a došlo i k zaplavení elevací. Na většině území se tedy ukládaly prachovité vápničné slínovce bělohorského souvrství, ojediněle slínité vápence. V lužické oblasti, kde docházelo k nejrychlejší subsidenci dna pánve, pokračovalo ukládání kvádrových pískovců, typických šikmým zvrstvením a dnes často tvořících skalní města (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).

Poslední etapa začíná výraznou dílčí transgresí na bázi teplického souvrství, typického prachovito-písčitymi sedimenty, přecházejících do slínovců. Zrychlená subsidence vyvrcholila v době ukládání březenského souvrství, které má vyšší příměs nezralého materiálu jako živců a úlomků hornin (Kachlík, 2003).

Nejmladší, merboltické souvrství, zachované pouze jako denudační zbytky v Českém středohoří v podloží terciérních vulkanitů, je tvořeno méně zpevněnými, středně zrnitými bělavými pískovci s jílovitou základní hmotou a příměsí živcových zrn (Chlupáč a kol., 2011).

#### 1.1.4. Neovulkanity

Neoidní vulkanity na území ČR jsou součástí poměrně rozsáhlé středoevropské vulkanické provincie, která vznikla na předpolí Alpského orogenu patrně v souvislosti s extenzí kůry vyvolané výstupem plášťového diapiru. V Českém masivu jako neoidní označujeme vulkanickou činnost současnou s alpiským vrásněním v alpsko-karpatské oblasti. Díky alpiským procesům zde vznikly saxonské zlomy a zlomová pásma, které vedly k průnikům magmat ze svrchního zemského pláště až na povrch (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).

Hlavní vulkanická centra se v Českém masivu soustřeďují především v oherském riftu v severozápadních Čechách (Doupovské hory, České středohoří) a při labské linii směru SZ-JV, která tvoří jihozápadní omezení západosudetské oblasti. Na blízkost této linie je vázána labská tektonicko-vulkanická zóna, na SV omezená lužickou poruchou (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).

Vulkanická činnost započala již ve svrchní křídě, maximum spadá do terciéru, dozvuky přetrvaly do kvartéru. Podle Ulrycha a Pivce (1997), lze projevy vulkanismu rozdělit do dvou stádií, starší preriftové a mladší riftové. Do preriftového stadia patří vulkanická činnost s časovým rozpětí 80-50 Ma, vyznačuje se žilnými proniky ultrabazických magmat, soustřeďujících se při vnějších zlomech SV části oherského riftu a při lužickém zlomu. Povrchové produkty nejsou známy, zřejmě podlehly erozi. Hlavní tektonická a vulkanická aktivita oherského riftu a jiných oblastí se projevuje od svrchního eocénu do spodního miocénu, jde tedy o riftové stadium 40-18 MA. Jeho produkty jsou povrchová, žilná i intruzivní tělesa a akumulace vulkanoklastik od ultrabazických až k intermediálním horninám (tefrity, olivinické bazalty, fonolity (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).

Velké množství rozptýlených neovulkanitů je v oblasti české křídové pánve a v přilehlých částech západosudetské oblasti. Neovulkanity jsou soustředěny především v SV pokračování oherského riftu, kam patří Lužické hory a vulkanické centrum žitavské pánve, jež na naše

území zasahuje jen periferními tělesy u Frýdlantu, Liberce a Varnsdorfu (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).

Hojně se tělesa soustřeďují v blízkosti lužické poruchy a na křížení poruch ve směru SV-JZ, paralelních s oherským riftem. Charakteristické jsou zde ultrabazické alkalické horniny melilitické skupiny, patřící nejstarší vulkanické fázi (svrchní křída až eocén). Většinou se jedná o žilná podpovrchová tělesa, obnažená erozí. Najdeme je převážně v povodí řeky Ploučnice v Podještědí, v okolí Mimoně a Českého Dubu (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).

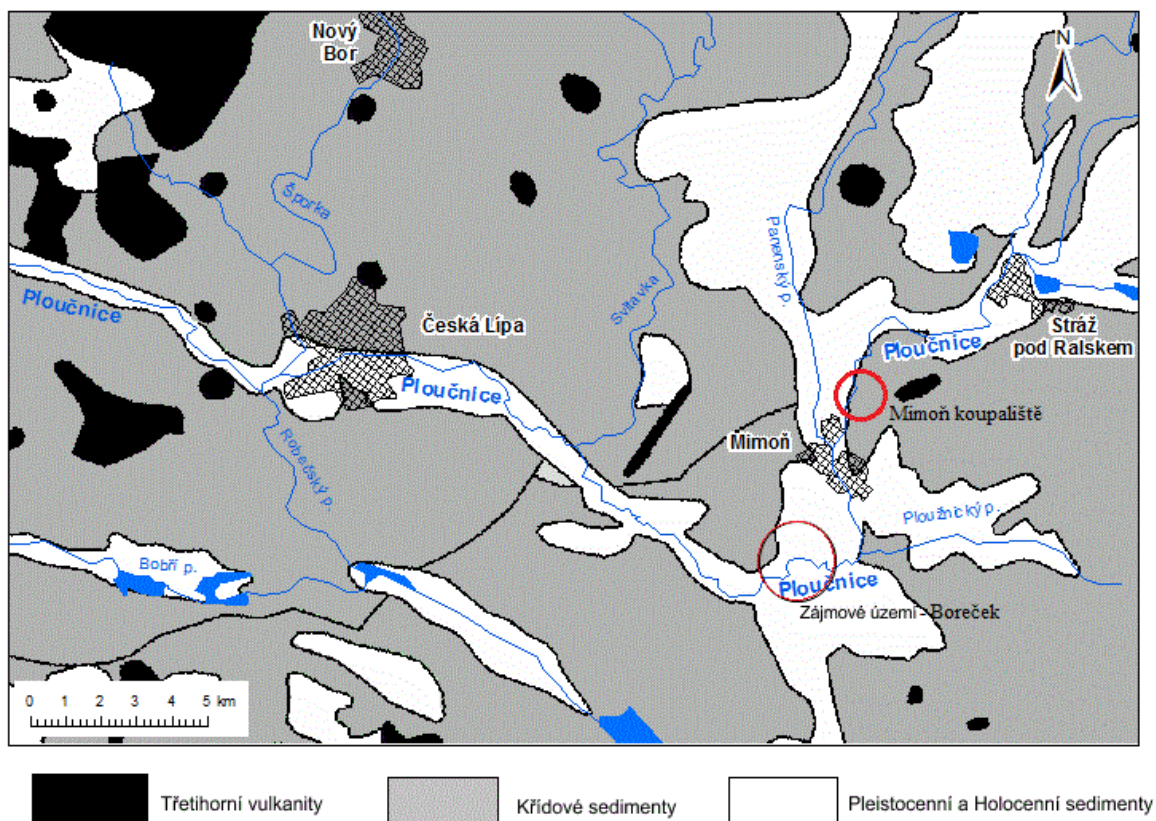
Jako typické horniny zde nacházíme žilné polzenity, tedy alkalické ultrabazické horniny s žádným, či velmi malým podílem augitu. Často naopak obsahují nefelin, melilit a olivín. Magmata melilitových hornin nejspíše vznikla tavením peridotitů ve svrchním plášti. V pozdně magmatickém stadiu došlo k obohacení U, Th, Nb, Zr aj. (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).

#### 1.1.5. Kvartér

Největší zastoupení mají na horním toku Ploučnice především šterkopískové říční terasy a váté písky, jde tedy spíše o akumulární oblast.

Fluviální akumulace mají různý charakter podle částí toku, kde se hromadily. Sedimenty divočících toků najdeme na horních úsecích s velkým spádem a překládáním koryt. Sedimenty meandrujících toků, vyskytujících se na středních a dolních úsecích s menším spádem, vytvářejí terasovité akumulace písčitých šterků. Sedimenty spodních částí toků jsou tvořeny jemnozrnnými, horizontálně zvrstvenými uloženinami nivních akumulací. V terasových akumulacích dominují šterkové a písčité sedimenty. Typické uloženiny interglaciálů jsou nivní hlíny, vytvořené na povrchu glaciálních terasových šterků.

Mezi významné glaciální uloženiny patří eolické sedimenty, pokrývající velké plochy o mocnostech v desítkách metrů. Dělí se na vápnité spraše, nevápnité sprašové hlíny a navaté písky (Chlupáč a kol., 2011; Kachlík 2003).



Obrázek 3- Zjednodušená geologická mapa zájmové oblasti. Vytvořila J. Elznicová (UJEP Ústí nad Labem) a je převzat z publikace Majerové a kol. (2013).

#### 1.1.6. Hydrogeologie

Hydrogeologické poměry sedimentárního komplexu křídových hornin strážského bloku byly shrnuty v pracích Kafky (2003) a Slezáka (2000). V tomto komplexu jsou charakteristické 2 hlavní kolektory podzemních vod, lišících se od sebe litologickým vývojem souvrství, cenomanský a turonský. Cenomanský tlakově zvodněný kolektor je ve většině zájmového území tvořen dvěma vrstvami mořského cenomanu, v rozpadavých a fukoidových pískovcích o mocnosti 40-60 m. Tyto polohy náležejí korycanským vrstvám. Na bázi se ojediněle vyskytují málo propustné pískovce pásma rozmyvu a sedimenty sladkovodního cenomanu, s mocností až 30 m. K dotaci cenomanského kolektoru dochází při lužické poruše (cca 70 l/s) a přetokem z nadložního turonského kolektoru hlavně v místech porušení spodnoturonského kolektoru. Zvodnění v cenomanském kolektoru má tlakový charakter v celém zájmovém území, kromě hluboké deprese v okolí hlubinného dolu v Hamru.

Stropní izolátor cenomanského kolektoru je tvořen bělohorským souvrstvím o mocnosti 60-70 m, které odděluje turonský kolektor. Toto souvrství místy narušeno tektonikou, tělesy vulkanitů a velkým počtem vrtů. Z těchto důvodů je souvrství brát pouze jako poloizolátor, což je doloženo hydrologickými bilancemi.

Turonský zvodněný kolektor je litologicky tvořen především jemnozrnnými až hrubozrnnými pískovci s vložkami drobných slepenců. Litostratigraficky tyto horniny náležejí jizerskému souvrství.

Turonská zvodeň má volnou hladinu a dosahuje mocnosti až 150 m. Dotována je především infiltrovaným podílem atmosférických srážek. Celková hodnota přírodních zdrojů zde činí cca 2070 l/s. K odvodnění podzemních vod turonského kolektoru dochází směrem ze zájmového území do povrchového toku řeky Ploučnice a jejích přítoků (cca 1110 l/s)

Chemismus podzemních vod turonského a cenomanského kolektoru je velmi blízký. Turonské vody se řadí převážně do hydrogenuhličitanové formace vápňkové facie, s celkovou mineralizací 100-300 ppm. Cenomanské vody jsou většinou stejné facie, avšak s mírně vyšší mineralizací, 150-600 ppm, zásadním rozdílem je ale vysoký obsah radionuklidů, především  $^{226}\text{Ra}$ , který zde byl přirozeně asi o dva řády vyšší (10 Bq/l) než v turonském kolektoru. To znemožnilo využívání cenomanských vod jako zdroje pitné vody (Kafka a kol., 2003; Slezák, 2000).

## 1.2. Uranové zrudnění

Uranové zrudnění v sedimentech severočeské křídové pánve je stratiformní se subhorizontálním charakterem. Většina tohoto zrudnění patří k pískovcovému typu a je vázána na několik subhorizontálních poloh v cenomanských sedimentech s mocností až 8 metrů. Je spojeno se sedimenty spodního (sladkovodního) a spodního (mořského) cenomanu. Jeho charakteristickým rysem je vazba na souvrství s vysokými podíly zuhelnatělé organické hmoty a pyritu a na okolí hranic výrazně odlišných litologických typů. Tvar těles je nejčastěji deskovitý, místy čočkovitý. Mineralogicky je v zájmové oblasti zrudnění reprezentováno poměrně pestrou paletou uranových a uranonosných minerálů. Vlastní uranová mineralizace má v hornině disperzní povahu a je vázána převážně na pojivo sedimentů, organickou hmotu a na dutinky v zrnech klastických minerálů. K uranonosným minerálům náleží oxidy uranu, fosfáty a silikáty, z hlediska těžebního jsou nejvýznamnější uraninit, ningyolit, uranonosné

leukoxeny, hydratovaný metakoloidní křemičitan zirkoničitý (hydrozirkon), jenž bývá provázen koloidním baddeleyitem. Uran se v těchto minerálech vyskytoval ve čtyřmocné formě, s obsahy 40-80 %. Jeho loužitelnost závisela především na mineralogické formě. Nejobtížněji loužitelné minerály byly hydrozirkon a leukoxeny, což je dáno tím, že větší část uranu izomorfně zastupovala zirkon v jeho koordinačních polyedrech a uran je tedy v hydrozirkonu blokován. Omezená loužitelnost v případě uranonosných leukoxenů byla způsobena rezistencí oxidu titanu, bránící přístupu regeneračních roztoků k uranu uvnitř leukoxenových zrn. Uranové rudy severočeské křídly byly charakteristické akumulací uranu v nejjemnějších podílech (tedy částicích rudniny < 0,1 mm), tvořených převážně kaolinitem, slídkami a chloritem. Tyto podíly byly v sedimentech zastoupeny v množstvích 10-80 % z celkové hmotnosti rudniny a bylo zde koncentrováno 75-80 % uranu. (Kafka et al., 2003).

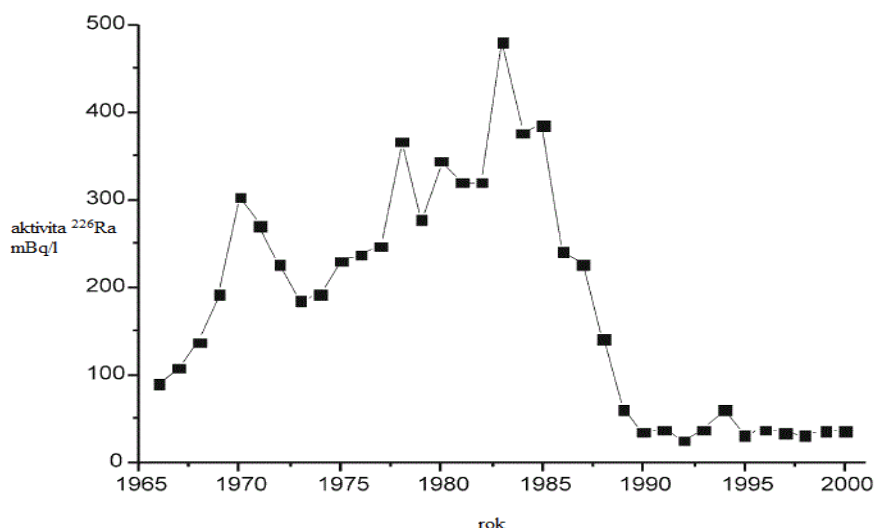
### 1.3. Historie těžby a znečišťování prostředí

Během druhé poloviny 20. století probíhal v České republice intenzivní průzkum a těžba uranových rud. Největší ložisko pískovcového typu bylo nalezeno v roce 1963, kdy byla v Severočeské křídové oblasti při leteckém geofyzikálním průzkumu zjištěna magnetická anomálie. Tu potvrdil strukturální vrt HJ-1 (Hamr na Jezeře) a navíc prokázal obsahy U průmyslového významu (Slezák, 2000). V následujících 30- ti letech zde probíhala souběžně jak hlubinná, tak chemická těžba. V této jednotce bylo vymezeno celkem 8 ložisek. Chemickou metodou *ISL (in situ leaching)*, tedy loužením pomocí kyseliny sírové však byla dobývána pouze Stráž a částečně Hamr. Tato metoda spočívá v tom, že je do produktivního horizontu vháněn systémem vtláčecích vrtů loužící roztok, který prostupuje porézním prostředím a louží jednotlivé složky přítomného zrudnění. Díky své agresivitě však kyselina louží z horniny i mnohé jiné prvky než uran. Tento roztok, obohacený uranem, je dále veden do chemické stanice, kde se užitkové složky separují, a upravený loužící roztok je vháněn zpět do ložiska.

Chemická těžba uranu v oblasti strážeckého bloku byla zahájena ve 2. polovině 60. let minulého století a trvala do 1. 4. 1996. Během této doby bylo do horninového prostředí vtláčeno cca 4 100 000 t H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 320 000 t HNO<sub>3</sub> a 113 000 t NH<sub>3</sub> a celkem vytěženo cca 15 000 t uranu (Hostomská a Hostomský, 2007; Kafka a kol., 2003; Slezák 2000).

Díky rozdílným podmínkám pro hlubinnou těžbu, pro kterou je třeba dokonalého osušení ložiska (a tedy čerpání vod), a těžby chemické, naopak vyžadující co nejvyšší hladinu podzemní vody pro vyšší efektivní čerpání, a především pak díky vzájemné blízkosti obou způsobů těžby, docházelo k únikům kyselých roztoků z podzemního loužení do hlubinného dolu Hamr. (Kühn a kol., 1993). Podle Kafky (2003) vody, čerpané z dolu Hamr, obsahovaly množství volných kyselin, těžkých kovů a radioizotopů. Za jednoznačný projev těžby U můžeme považovat asociaci s  $^{226}\text{Ra}$ . Hanslík a kol. (2002) vypožoroval v úseku mezi Stráží pod Ralskem a Mimoní souvislost mezi zvýšením  $^{226}\text{Ra}$  a začátkem těžby (obr. 4). Od poloviny 60. let se koncentrace  $^{226}\text{Ra}$  zvyšuje, a to až do roku 1989, kdy zde byla vybudována centrální dekontaminační stanice (Hanslík a kol. 1995; Hanslík 2010; Datel, Ekert 2008).

Ačkoliv samotná chemická těžba byla zahájena již v roce 1967, k výstavbě prvních hydraulických bariér, tedy umělých tlakových rozvodů v cenomanském kolektoru, vytvořených vtlačáním vody pro zamezení hydraulického dipólu, bylo přistoupeno až v roce 1977 a k jejich optimalizaci došlo až v roce 1985. Do té doby pronikaly kyselé vody nejen do dolu Hamr 1, ale i do okolních vyluhovacích polí (Kühn a kol., 1993; Slezák, 2000). V prvních fázích těžby byly na dolu Hamr jako bezpečnostní opatření používány sedimentační nádrže (bývalý rybník Pustý), a to až do roku 1989, kdy byla teprve zprovozněna (zkolaudována) čistička. Samotné kaly byly zpracovávány na chemické úpravně Stráž od roku 1973 (Slezák, 2000; Kafka a kol., 2003). V práci Justýna a kol. (1985) je dále zmiňováno, že se v roce 1972 do Horecké nádrže, dnes vodní nádrže Stráž pod Ralskem, v důsledku blíže nespecifikovaných havarijních stavů na čističce odpadních vod, vypouštěly radioaktivní důlní vody. Tato nádrž byla dále přímo kontaminovaná prosakujícími vodami z obtokového kanálu a přelivem z něho, navíc zde dochází každoročně k vypouštění nádrže, díky čemuž mají kontaminované sedimenty možnost se dostat dále po proudu (Kühn a kol., 1993). Kühn (1996) navíc uvádí, že 18. 7. 1981 postihla Ploučnici povodeň, dle neoficiálních zdrojů až stoletá, povodí Ohře uvádí  $Q > 50$ , která patrně přispěla k distribuci kontaminantů dále do povodí (Fiedler a Novák, 1995, Kafka a kol., 2003; Datel a Ekert, 2007; Kühn, 1997; Hanslík a kol. 2005). Obecně extrémní srážkové stavy a povodně aktivují transport pevných částic z přechodných uloženin v povodí i přímo v korytech vodních toků. Povodní byl jistě takto ohrožen i bývalý rybník Pustý, využívaný jako sedimentační nádrž.



Obrázek 4 - Aktivita <sup>226</sup>Ra ve vodě Ploučnice v letech 1965 - 2002, odběrové místo Noviny pod Ralskem (Hanslík a kol., 2002)

#### 1.4. Shrnutí dosavadních prací o znečištění Ploučnice

Systematictější analýzy znečištění nivy Ploučnice probíhaly zhruba od 90. let minulého století. Zpočátku však byl kladen důraz především na radioaktivní izotopy, hlavně <sup>226</sup>Ra. Teprve s postupem času se zájem rozšířil i na další prvky, hlavně na těžké kovy v sedimentech Ploučnice. Prvotní impuls k systematickým pracem dával podnik uranového průmyslu ve Stráži pod Ralskem, patrně pod vlivem časnějších studií varujících před stavem říčního prostředí Ploučnice.

Zřejmě první práci na téma radionuklidů vypracoval Kříbek a kol. (1979). Zajímavé je porovnání hodnot <sup>226</sup>Ra a U z místa nedotčeného ČSUP (Československý uranový průmysl), tedy úsekem před Břevništěm a Hamerským rybníkem, kde Kříbek (1979) naměřil 1-2 pg.g<sup>-1</sup> <sup>226</sup>Ra a 1-2 µg.g<sup>-1</sup> U a úseky níže po proudu, konkrétně mezi Břevništěm a zaústěním obtokového kanálu pod Stráží pod Ralskem. Zde hodnoty dosahovaly až 560 pg.g<sup>-1</sup> resp. 40 µg.g<sup>-1</sup>. Za možný zdroj autor uvádí haldu pod šachtou Hamr 1, z které se průsakové i srážkové vody dostávaly přímo do toku Ploučnice. V úseku od zaústění obtokového kanálu po Noviny pod Ralskem, konkrétně v pevné suspendované hmotě v obtokovém kanálu, přivádějícím odpadní vody z uranového průmyslu, navíc naměřil 3034 pg.g<sup>-1</sup> <sup>226</sup>Ra a 798 µg.g<sup>-1</sup> U. Hanslík a kol. (1990) se pokusil zhodnotit celkovou kontaminaci nivy Ploučnice, především z hlediska radionuklidů. Ačkoliv zpracoval obrovské množství vrtů, z dnešního

pohledu je zásadním nedostatkem to, že předpokládal stejnoměrné plošné rozložení kontaminace v nivě a nebral v úvahu sedimentární procesy vlastní říčnímu prostředí. Teprve první letecká mapa gama aktivity v oblasti povodí Ploučnice (Dědáček a Zabadal, 1991) poskytla představu o skutečném prostorovém rozložení radioaktivního znečištění.

Obsahům těžkých kovů v sedimentech se věnovala Buňatová (1993), která vzorkovala a analyzovala říční i nivní sedimenty podél celého toku Ploučnice. Došla k závěru, že zdrojem těžkých kovů je nejen uranový průmysl, ale především průmysl ve větších městech (Mimoň, Česká Lípa, Stráž pod Ralskem). Podle její práce se v největších koncentracích vyskytují Cd, Co, Zn, Ni a Pb a to právě pod uvedenými městy. Jako hlavní pravděpodobný zdroj pro Cd, Pb a Zn označila zinkovnu v Brništi.

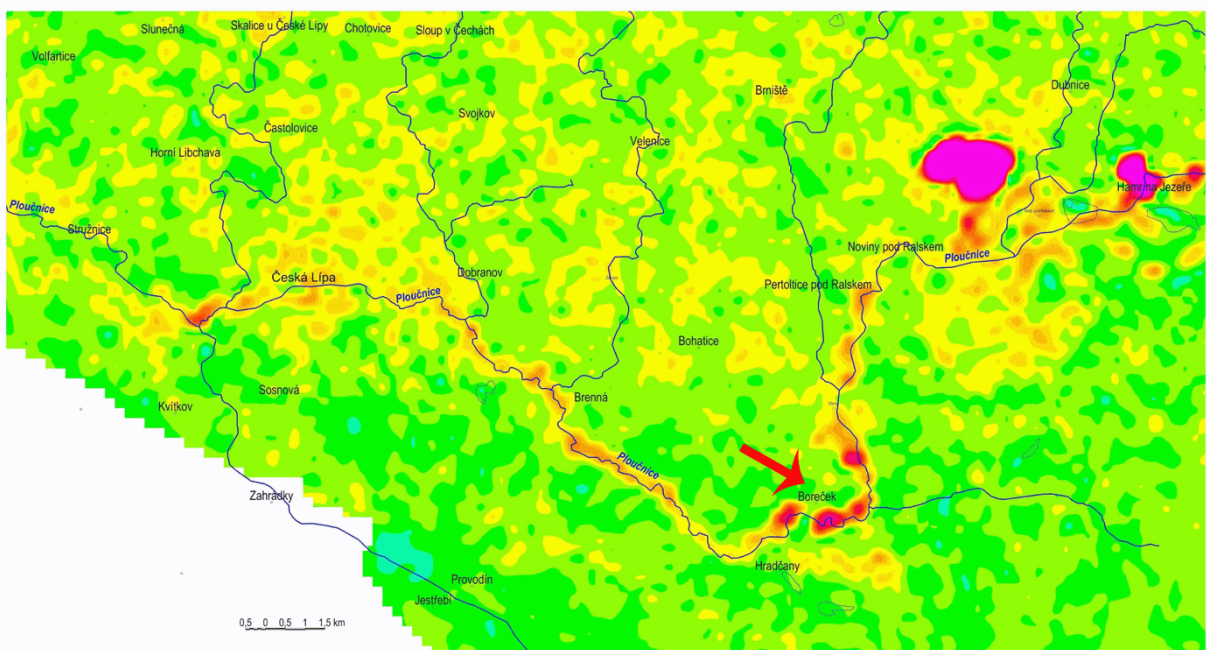
Podrobnému studiu těžkých kovů se v neregulovaných částech toku Ploučnice pod Mimoní se věnoval ve své disertační práci Kühn (1996). Určoval jednak celkové koncentrace prvků a dále za použití metody sekvenční extrakce zjišťoval formy a vazby uranu. Zjistil, že nejvíce je vázán v oxidhydroxidech Fe, organické hmotě, případně v karbonátech. V opuštěných korytech, agradačních valech a jesepech naměřil nejvyšší koncentrace Cd, U, Zn a Ni, výsledky však nebyly korigovány na změny litologie, vlastní říčnímu prostředí. Zajímavé však je, že Boreček označil za lokalitu méně ovlivněnou těžbou (kromě U).

Kolář (2004) se věnoval distribuci vybraných těžkých kovů v říčních sedimentech horního toku Ploučnice a následně porovnával zjištěné hodnoty s hodnotami z roku 1992. K analýze, stejně jako Hrdoušek (2005) používal jednak celkový rozklad sedimentu a dále loužení za pomoci směsí kyselin. Ani tyto práce nezohledňovaly povahu říční sedimentace, a také zde chyběly údaje o zrnitosti a typu analyzovaného sedimentu. Nicméně obě práce shodně pozorují snižování koncentrací Ni níže po toku, naopak u Pb zvyšování pod městy Mimoň a Česká Lípa. Hrdoušek (2005) spolu s Kühnem (1996) označují jako možný zdroj kontaminace povodí Ploučnice zinkem jednak uranový průmysl ve Stráži pod Ralskem, jednak firmu na zpracování odpadů Gesta (Rynoltice), zinkovnu v Brništi a odpadní systémy větších měst. Nicméně Majerová a kol. (2013) pomocí korelací mezi Ni a Zn dokládala, že zinkovna určitě nebyla hlavním zdrojem Zn v sedimentech Ploučnice pod Mimoní.

## 2. Metodika

### 2.1. Odběr a zpracování vzorků

Vzorky říčních sedimentů byly vzhledem k zaměření práce odebrány po předchozím zhodnocení letecké koncentrace U v ppm eU (obr. 5), vytvořené firmou Miligal (Gnojek a kol., 2005). Na základě tohoto dokumentu byla pro tuto diplomovou práci zvolena oblast pod obcí Boreček, která vykazovala silně zvýšené hodnoty povrchové gama aktivity.



Obrázek 5 - Letecká mapa koncentrace (ppm eU), vytvořená firmou Miligal (2005).

Samotný odběr probíhal během dubna a května roku 2013. Jedna část odběrů, vrty MHP1 – MHP6 (**M**ichal **H**ošek **P**loučnice), byla vedena napříč říční nivou Ploučnice, na jejím levém břehu a jeden vrt MHP7 přímo na násepu. Druhá část odběrů byla prováděna na pravém břehu, MHP8 – MHP10. Obě místa odběrů byla zvolena na základě provedeného terénního měření pomocí scintilačního gamaspektrometru GT-30.

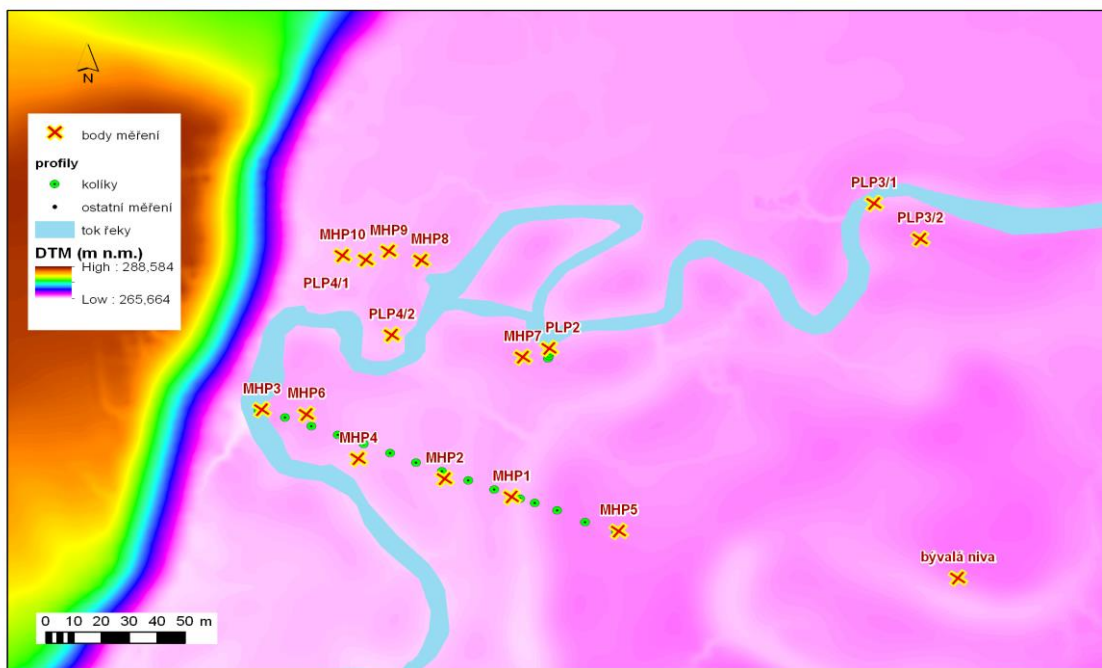
Vzorky sedimentů do hloubky cca 30- ti cm byly odebrány z ručně kované sondy v intervalu 2-3 cm. Vzorky z větších hloubek byly odebrány pomocí ručního žlábkového vrtáku firmy Eijkelkamp (Holandsko) s průměrem sondy 2 nebo 3 cm, interval vzorkování byl 5 cm. Celkem takto bylo získáno asi 450 vzorků. Každý vrt byl detailně popsán.

Následně byl každý vzorek usušen za pokojové teploty či při 50 °C a bez dalšího sítování umlet na planetárním mlýnu Pulverisette 6 na analytickou jemnost v keramické misce ze ZrO<sub>2</sub> kuličkami ze stejného materiálu. Přibližně 2 g mletého vzorku bylo nasypáno do měřících kyvet a analyzováno na EDXRF přístroji MiniPAL 4.0, vždy ve 4 cyklech, pro prvky lehké, středně těžké, těžké a nejtěžší, s chybou měření 1 – 4 %. Hodnoty relativních odchylek stanovení jsou uvedeny v tabulce 1. Signály zájmových prvků byly následně kalibrovány pomocí výsledku analýz z ICP-MS. Podrobnosti této procedury jsou uvedeny v článku Matyse Grygara a kol. (2014).

Tabulka 1 - Relativní odchylky stanovení pro vybrané prvky.

Prvek	Rel. odch. v %
Pb	12,6
Ni	16,8
Zn	9,8
Fe	6,8
Rb	7,5
Al	23

Pro znázornění a popis litologie v části 3 (Výsledky) byl použit jednak terénní deník a pro přesnější odlišení faciálních přechodů poměr Al/Si z XRF analýzy. Jílové minerály obsahují Al i Si, naopak v pískové frakci převládá křemen (SiO<sub>2</sub>), proto s klesající velikostí částic roste poměr Al/Si (Matys Grygar a kol., 2014; Dung a kol., 2013). Tento princip se v praxi ukázal jako velmi užitečný, protože rozlišit v terénu jíl od prachu je často obtížné.



Obrázek 6 - Digitální model terénu (DMT) s polohami vrтанých profilů MHP a karotáže PLP (Ploučnice profil). Model vytvořila J. Elznicová (UJEP Ústí nad Labem).

## 2.2. Povrchové měření gama aktivity v terénu

Terénní měření povrchové gama aktivity bylo prováděno pomocí scintilačního gamaspektrometru GT-30 s krystalem typu NaI(Tl), tedy krystalu na bázi jodidu sodného, aktivovaného thaliem, který umožňuje stanovení koncentrace radioizotopů K, U a Th přímo v terénu. Pro naše orientační měření byla nastavena funkce „Survey“, monitorující celkové gama záření (po dobu měření 2 s). Veškerým bodům měření byly přiřazeny GPS souřadnice, což nám dále umožnilo pomocí programu Surfer 8 vytvořit mapu celkové gama aktivity zájmového území (obr. 14). Toto území jsme procházeli v co nejhustší síti, tam kde terén a hladina vody v nižších úrovních nivy dovolily, od vysokých hodnot až po hodnoty pozad'ové, vždy s gamaspektrometrem ve výšce pasu. Šlo tedy o měření v poloprostoru  $2\pi$ .

### 2.3. Mělká gama karotáž

V prostoru nivy byla dále realizována také mělká gama karotáž PLP – **Ploučnický profil** (Obr. 6), na profilu nivou, na krátkém profilu na výsepu (boční sedimenty, Obr. 11) a dále na několika jednotlivých bodech nivy (Obr. 12, 13).

Měřicí aparatura se skládala karotážní sondy KS-20B (Obr. 7) se scintilačním krystalem NaI(Tl) 12 x 16 mm, radiometru RP-12 (oba přístroje ZMA Ostrov n. Ohří) a připojeného externího čítače impulsů. Citlivost aparatury byla stanovena měřením karotážních standardů na kalibrační základně závodu DIAMO s.p. ve Stráži pod Ralskem. Měření bylo prováděno v ručních výtlocích do hloubky až 175 cm. Hloubkový krok měření byl 10 cm. Časy měření byly voleny v závislosti na aktivitě od 30 s do 10 s tak, aby byly počty naměřených impulsů vždy srovnatelné. Výsledky byly vyjádřeny v jednotkách ppm eU (pseudokoncentracích). Pro převod na hodnoty dávkového příkonu pro geometrii  $4\pi$  platí vztah:  $1 \text{ ppm eU} = 11,35 \text{ nGy/h}$ . V blízkosti povrchu je radiometricky složitá situace přechodu měření z geometrie plného prostoru  $4\pi$  do geometrie nekonečného poloprostoru  $2\pi$ . Po konzultaci s prof. Milanem Matolínem byly korigovány hodnoty dvou nejmělkých bodů těmito koeficienty: hloubka 0 povrch (x 2), hloubka 10 cm (x 1.5). Hlubší měření nebyla korigována. Ke grafickému zpracování přepočtených hodnot dávkového příkonu záření gama [ppm eU] byl použit program Surfer 8.



Obrázek 7- Mělká gamakarotáž se sondou KS-20B na bodě PLP2/0 na břehu Ploučnice.

## 2.4. Laboratorní gamaspektrometrie – měření $^{226}\text{Ra}$ a $^{210}\text{Pb}$

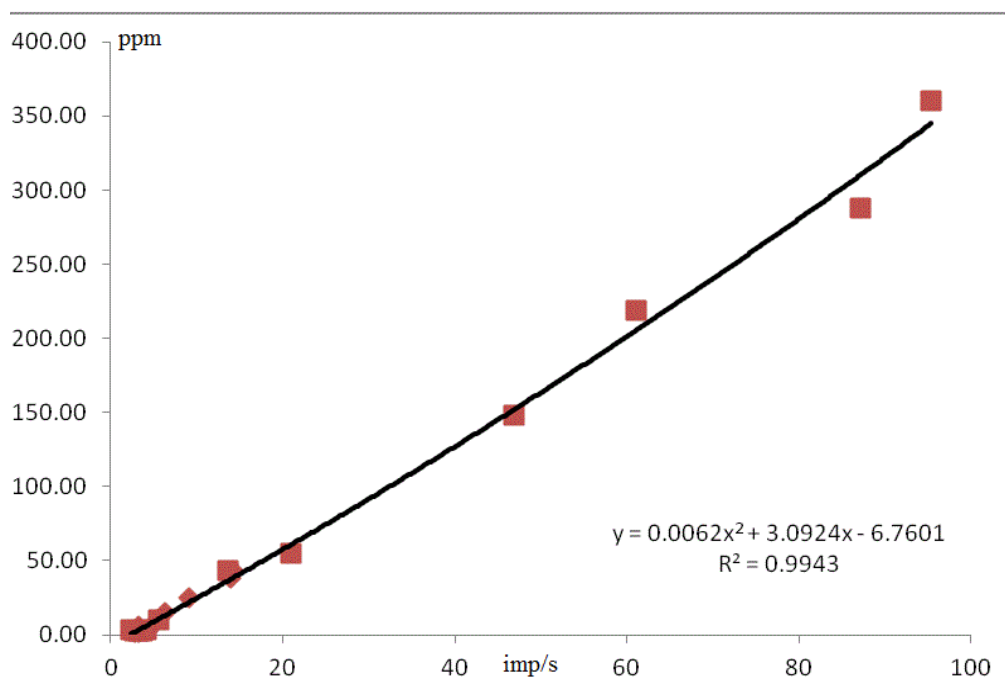
Pro určení aktivit  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{210}\text{Pb}$  ve vybraných vzorcích bylo zvoleno měření na laboratorním nízkopozadovém, anticompton-antikoincidenčním gamaspektrometru SILAR (sestrojen Viktorem Goliášem pro měření nízkých aktivit  $^{210}\text{Pb}$  v malých vzorcích, Hamrová a kol. 2010). Je to dvoudetektorový systém v geometrii označované jako „well-in-well“. Hlavní (měřicí) studnový detektor, s prostorovým úhlem detekce  $4\pi$ , je studnový Na(Tl) krystal o velikosti 40x40 mm, s účinností 46,2 % pro  $^{210}\text{Pb}$  (47 keV). Ten je umístěn ve studnovém detektoru velkého objemu, který je zapojen do antikoincidenčního kanálu analyzátoru a slouží pro aktivní potlačení pozadí i eliminaci comptonova kontinua. Pasivní stínění tvoří 10 cm olova. Detektorový systém je obsluhován multikanálovým analyzátozem Canberra DSA 2000 se softwarem GENIE 2000.

Popsaný gamaspektrometr byl použit pro stanovení přirozených radionuklidů ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ). Vzorky bylo nutno pro analýzu navážít (navážky v rozmezí 1,17 – 3,69 g) a zalít parafínem do HDPE trubiček a nechat 14 dní emanovat k dosažení radioaktivní rovnováhy mezi  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{222}\text{Rn}$ . Doba měření se velmi lišila, záleželo na aktivitě vzorku, požité časy se pohybovaly v rozmezí 1-12 h. Pro zjištění pozadí přístroje byla měřena buničina, měřená ve stejné geometrii HDPE trubiček.

Pro stanovení citlivosti aparatury pro jednotlivé radionuklidy bylo použito následujících standardů: IAEA RGU-1, IAEA RGTh-1, IAEA RGK-1 a dvou in-home standardů pro U a  $^{210}\text{Pb}$ . Jako certifikovaný referenční materiál byl použit UTS-4 (uranium tailings, CANMET) s těmito výsledky: 33,5 Bq/g  $^{226}\text{Ra}$  (certifikováno 38,6 Bq/g), 33,2 Bq/g  $^{210}\text{Pb}$  (certifikováno 32,4 Bq/g) a 14,2 Bq/g U (certifikováno 12,5 Bq/g). Shodu a tedy i správnost výsledků lze hodnotit jako dostatečně uspokojivou.

## 2.5. Kalibrace analýz XRF

Data z RTG fluorescenční spektrometrie, udávaná v c.p.s. (signál detektoru na čáře daného prvku, *counts per second*) bylo nutné kalibrovat pomocí analýz ICP-MS (Obr. 8). Tyto analýzy byly provedeny na vybraných vzorcích z analyzované série sedimentů. Rovnice kalibračních křivek jsou uvedeny v tab. 2.



Obrázek 8 - Kalibrační křivka U.

Tabulka 2 - Funkce kalibračních křivek.

Prvek	Kalibrační funkce	R <sup>2</sup>
Zn	$Zn (ppm) = 2,39 * Zn(c.p.s.)$	0,998
Ni	$Ni (ppm) = 3,84 * Ni(c.p.s.) - 24,09$	0,713
Rb	$Rb (ppm) = 1,375 * Rb(c.p.s.)$	0,830
U	$U (ppm) = 0,0062 * [U(c.p.s.)]^2 + 3,092 U(c.p.s.) - 6,8$	0,994

## 2.6. Normalizace

Prostorová distribuce prvků v sedimentech závisí především na zrnitosti a je tehdy, zvláště pokud se jedná o tak pestré prostředí jako říční, velmi proměnlivá. V praxi to znamená, že obsahy zájmového prvku se budou lišit např. v korytových sedimentech, tedy často s relativně vysokým obsahem hrubých frakcí, štěrku a písku, než třeba v nivních sedimentech, kde převládají prachovité až jílovité frakce, a přesto to nemusí být důsledkem kontaminace. U hrubšího materiálu totiž je zvýšený hlavně obsah křemene, obsahujícímu především prvky

Si a O, a naopak je méně ostatních složek, zvláště jílových minerálů, organické hmoty či oxidů Fe. S rostoucím poměrem SiO<sub>2</sub> se pak snižuje celá řada vazebných procesů jako adsorpce, desorpce, precipitace, difúze do mřížky minerálů atd.

Abychom tedy mohli korigovat obsahy rizikových prvků na změny litologie (zrnitosti) sedimentů, je velice výhodné provést normalizaci, tedy využít obsahu jiného prvku než zájmového, se stejným či podobným vztahem k zrnitostním frakcím v sedimentu (někdy se označuje takový prvek nepřesným, ale názorným termínem „litogenní“). Takovým „litogenním“ prvkem mohou být Al, Ti, Rb, Fe, Zr, Sr (Dung a kol., 2013). V praxi je k výběru potřeba empirického hledání vhodného prvku a vhodné funkce, kde nezávisle proměnnou je prvek neovlivněný antropogenně či postdepozičními změnami („litogenní“ prvek) a závisle proměnnou je koncentrace daného zájmového prvku. Pro tuto práci byl tento výběr prováděn pro zájmové prvky Zn, Ni, Ba, U a <sup>226</sup>Ra. Jako nejvhodnější „litogenní“ prvek se ukázalo Rb.

Kritériem vhodnosti pro normalizaci byl regresní koeficient závislosti obsahu zájmového a „litogenního“ prvku R<sup>2</sup>. Normalizační křivka může být buď jednoduchá lineární funkce, nebo v případě, že zájmový a normalizační prvek nemají zcela stejnou distribuci koncentrací v jednotlivých zrnitostních frakcích, nějakou obecnější funkcí, např. polynomickou (Nováková a kol., 2013; Matys Grygar a kol., 2014). Pro funkce místního pozadí pro oblast Borečku bylo využito dat pořízených v rámci této diplomové práce a předchozí studie (Majerová a kol., 2013). Nalezené normalizační funkce jsou shrnuty v tab. 3.

Tabulka 3 - Normalizační křivky využití v této práci (převzato z práce Matys Grygar a kol., 2014).

ED XRF signál	Rovnice normalizační křivky	Počet bodů	R <sup>2</sup>
Ba/Rb	Ba (c.p.s.)= 0,199*Rb (c.p.s.) + 1,8301	153	0,773
Ni/Rb	Ni (ppm)= 0,226*Rb (c.p.s.) + 1,31	155	0,751
Zn/Rb	Zn (ppm)= 0,0045*[Rb (c.p.s.)] <sup>2</sup> + 0,340*Rb (c.p.s.)	155	0,878
U/Rb	U (ppm)= 0,0317*Rb (c.p.s.) + 0,7611	105	0,615

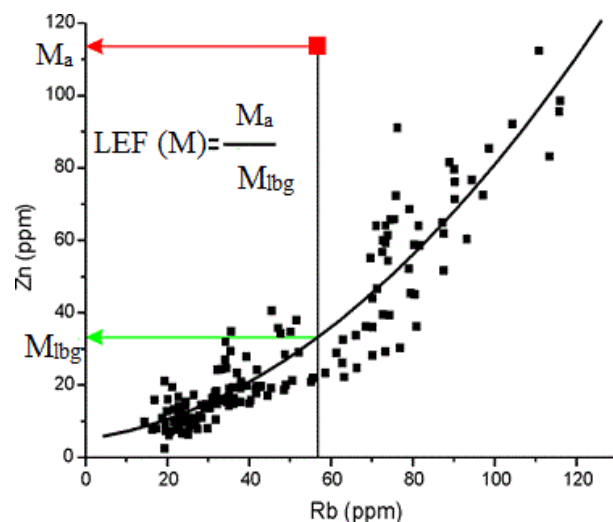
## 2.7. Faktor nabohacení

Pro znázornění antropogenního znečištění sedimentů byl použit tzv. faktor obohacení, jenž je definován jako poměr aktuální koncentrace prvku vzhledem k místnímu litogennímu pozadí:

$$\text{LEF (M)} = M_a / M_{\text{lb}}g$$

kde LEF (*local enrichment factor*) je faktor nabohacení zájmového prvku M v daném vzorku,  $M_a$  je aktuální (nalezená) celková koncentrace prvku a  $M_{\text{lb}}g$  je pozad'ová koncentrace prvku M v sedimentu neznečištěném a neovlivněném postdepoziční migrací (obr. 9). Předpokladem tohoto postupu je, že aktuální koncentrace je součtem antropogenní složky (znečištění) a „přirodní“ (pozad'ové) složky:  $M_a = M_{\text{antropogenní}} + M_{\text{lb}}g$ . Použitím tohoto postupu je možno korigovat výsledky analýz jak na vliv zrnitosti, tak na místní geochemii sedimentů. Hodnocení znečištění pomocí LEF tedy není založeno na normovaných obsazích či jinak definovaných limitech. Při vynesení LEF do grafů v závislosti na hloubce je velmi dobře vidět také vliv dřívější migrace prvků po uložení do sedimentů. Metodika výpočtu faktoru nabohacení je podrobněji popsána v pracích Grygara a kol. (2010); Matyse Grygara a kol (2013) a Novákové a kol. 2013). Pro výpočet LEF  $^{226}\text{Ra}$  jsme však postrádali dostatek pozad'ových vzorků. V tomto případě tedy bylo nutné použít hodnoty z práce Hanslíka (2005), konkrétně z jeho referenčního nekontaminovaného vrtu S8, kde pozadí odpovídalo 50 Bq/kg.

Dung a kol. (2013) navrhl obecné hodnocení (bez konkretizace prvků) znečištění prostředí či sedimentů dle následujících kritérií, stanovených na základě výsledných hodnot faktorů nabohacení: nekontaminované prostředí ( $\text{LEF} \sim 1$ ), mírné znečištění ( $1 < \text{LEF} \leq 3$ ), střední znečištění ( $3 < \text{LEF} \leq 5$ ), středně velké znečištění ( $5 < \text{LEF} \leq 10$ ), velké znečištění ( $10 < \text{LEF} \leq 25$ ), velmi velké znečištění ( $25 < \text{LEF} \leq 50$ ) a extrémně velké znečištění ( $\text{LEF} > 50$ ).



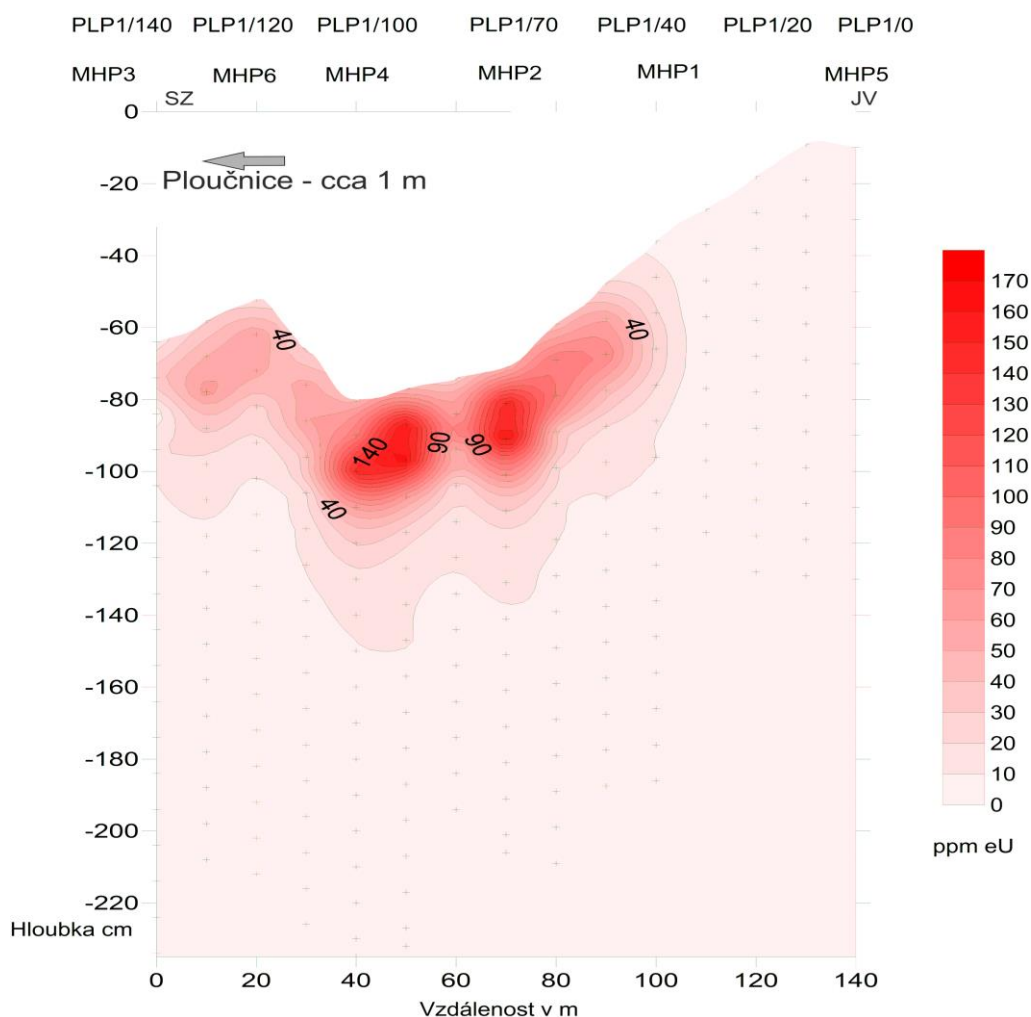
Obrázek 9 - Znázornění principu výpočtu faktoru nabohacení pro Ploučnici (Matys Grygar a kol., 2014).

### 3. Výsledky:

#### 3.1. Terénní radiometrické metody

##### 3.1.1. Karotáž - Boreček 1 – Profil PLP1

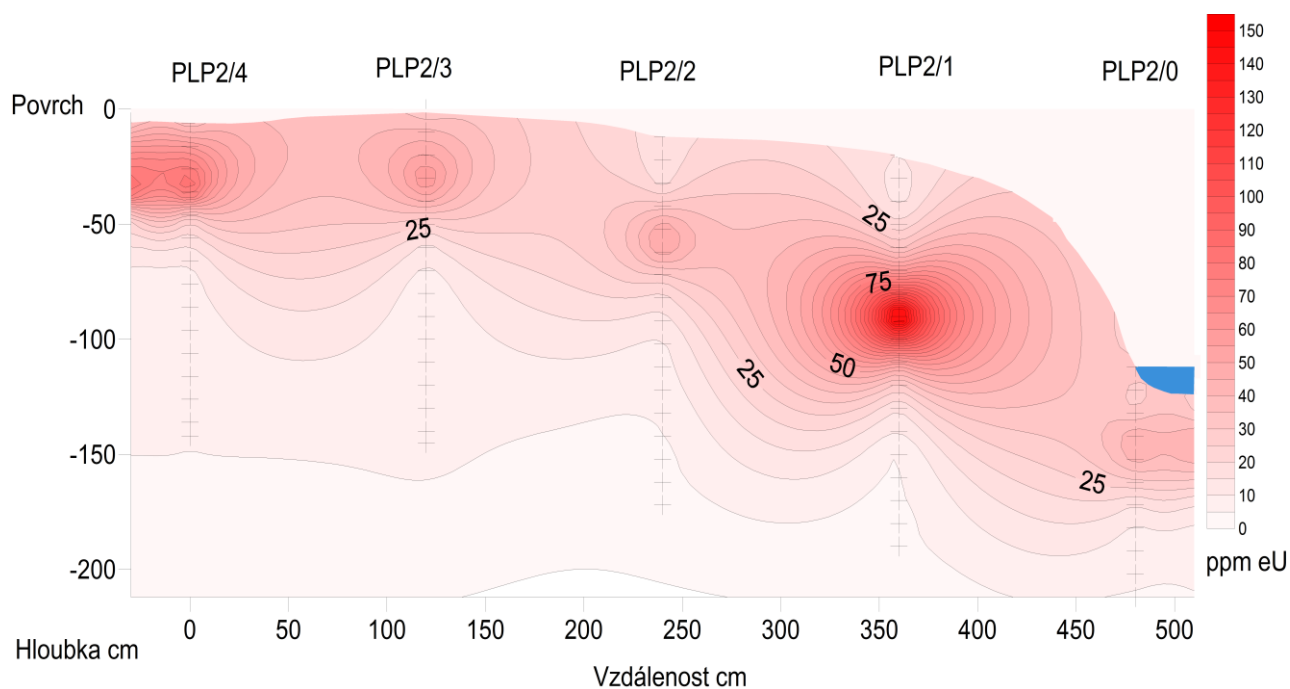
Na obrázku 10 jsou zobrazeny výsledky měření celkové gama aktivity pomocí mělké gama karotáže, které jsme prováděli v linii odběrů vzorků sedimentů MHP na levém břehu. Je zde vidět tvar sedimentárního tělesa s nejvyšším obsahem kontaminantů (radionuklidů). Při porovnání DMT a karotáží je patrné, že dva kontaminační „mraky“, tělesa sedimentů s nejvyšší aktivitou, se nacházejí mezi vrty MHP2 a MHP4, tedy v mírné terénní depresi, obsahující jemnozrnější materiál, odpovídající povodňovým hlínám. Směrem k okrajům nivy míra znečištění klesá, což koreluje s litologií vrtů MHP3 a MHP1.



Obrázek 10 – Profil PLP1 - řez nivou - zobrazení tvaru sedimentárních těles s nejvyšší gama aktivitou podle výsledků měření mělké gama karotáže, tvar povrchu odpovídá převýšenému profilu podle digitálního modelu terénu. V popisu dálkové osy jsou zobrazeny i odpovídající vrty MHP.

### 3.1.2. Karotáž - Boreček 2 – Profil PLP2

Tato karotáž byla prováděna na levém břehu Ploučnice, cca 50 metrů daleko od linie MHP1-6, směrem od SSV k JJZ. Profil PLP2 se nachází na výsepu a kontaminace je zde již vlivem toku překryta. Směrem do proximální nivy, ve vrtu PLP2/1 je soustředěna gama aktivita nejvyšší, v nezvykle velké hloubce cca 70 cm. Jedná se pravděpodobně o bočně uložené sedimenty, vzniklé při postupném překládání koryta. Následně byly tyto sedimenty překryty čistším materiálem a došlo k jejich pohřbení. Blíže korytu je toto pohřbení hlubší, směrem do nivy se kontaminace blíží k povrchu.

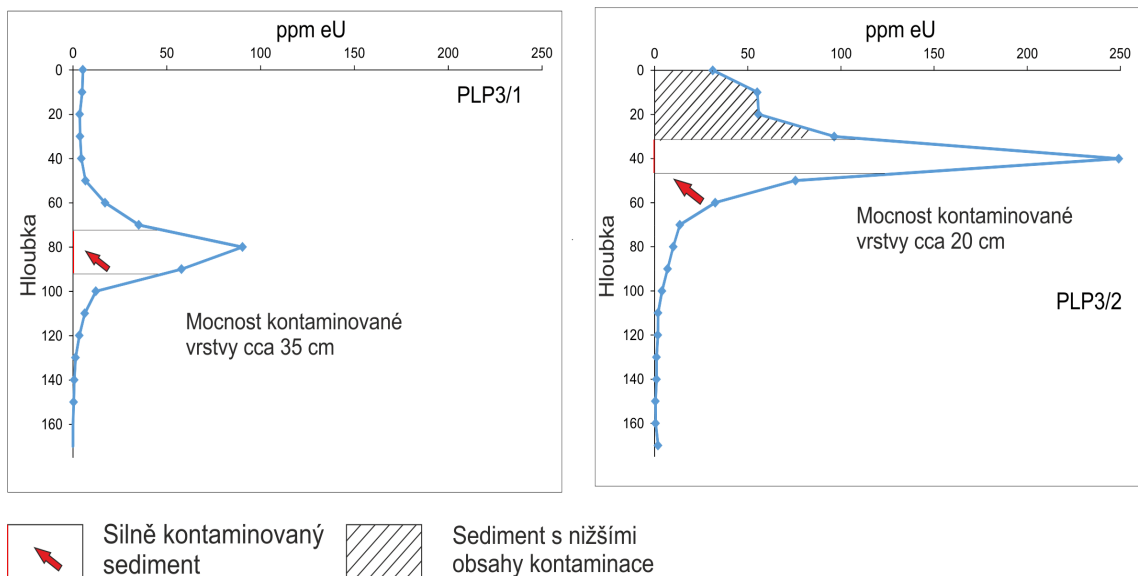


Obrázek 11 – Profil PLP2 - řez nivou - kolmo na linii MHP1-6 - zobrazení tvaru sedimentárních těles s nejvyšší gama aktivitou podle výsledků měření mělké gama karotáže. Jedná se o nepřevýšený profil, morfologie povrchu a výška hladiny Ploučnice byla změřena podrobnou nivelací. Modrá barva značí řeku Ploučnici.

### 3.1.3. Karotáž – Boreček 3 – Profil PLP3 a PLP4

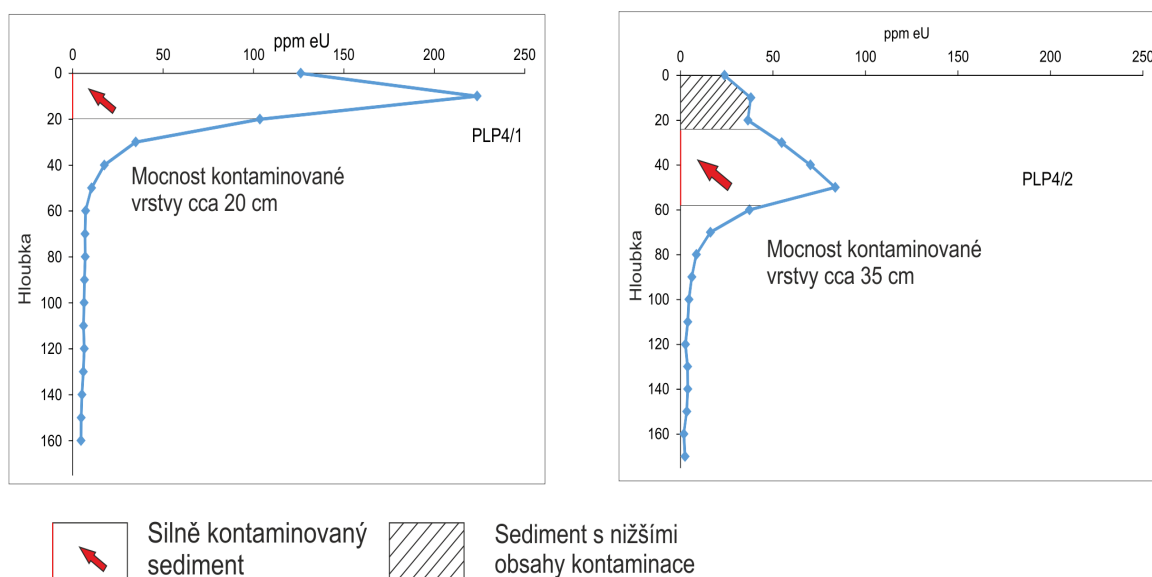
Zpracování karotážních křivek bylo prováděno podle publikace Radiometric Reporting Methods and Calibration in Uranium Exploration (IAEA, 1976). Mocnost kontaminované vrstvy zjistíme, pokud od maxima křivky odečteme pozadí a následně vedeme kolmici k ose y. V polovině této kolmice počítáme mocnost vrstvy.

Karotáž PLP3 se nachází na levém břehu Ploučnice, konkrétně na jesepe (viz Obr. 6). Od ostatních profilů je vzdálena cca 100 m. Na výsledcích je patrné, že dochází k postupnému pohřbívání kontaminace pomocí bočně ukládaných sedimentů. V profilu PLP3/1, vzdálenému od koryta 1,5 m, je tato kontaminace v hloubce asi 80 cm (max 90 ppm eU), v PLP3/2 je pohřbení menší, asi 40 cm (max 249 ppm eU).



Obrázek 12 - Průběh kontaminace v karotážních vrtech PLP3/1 a PLP3/2.

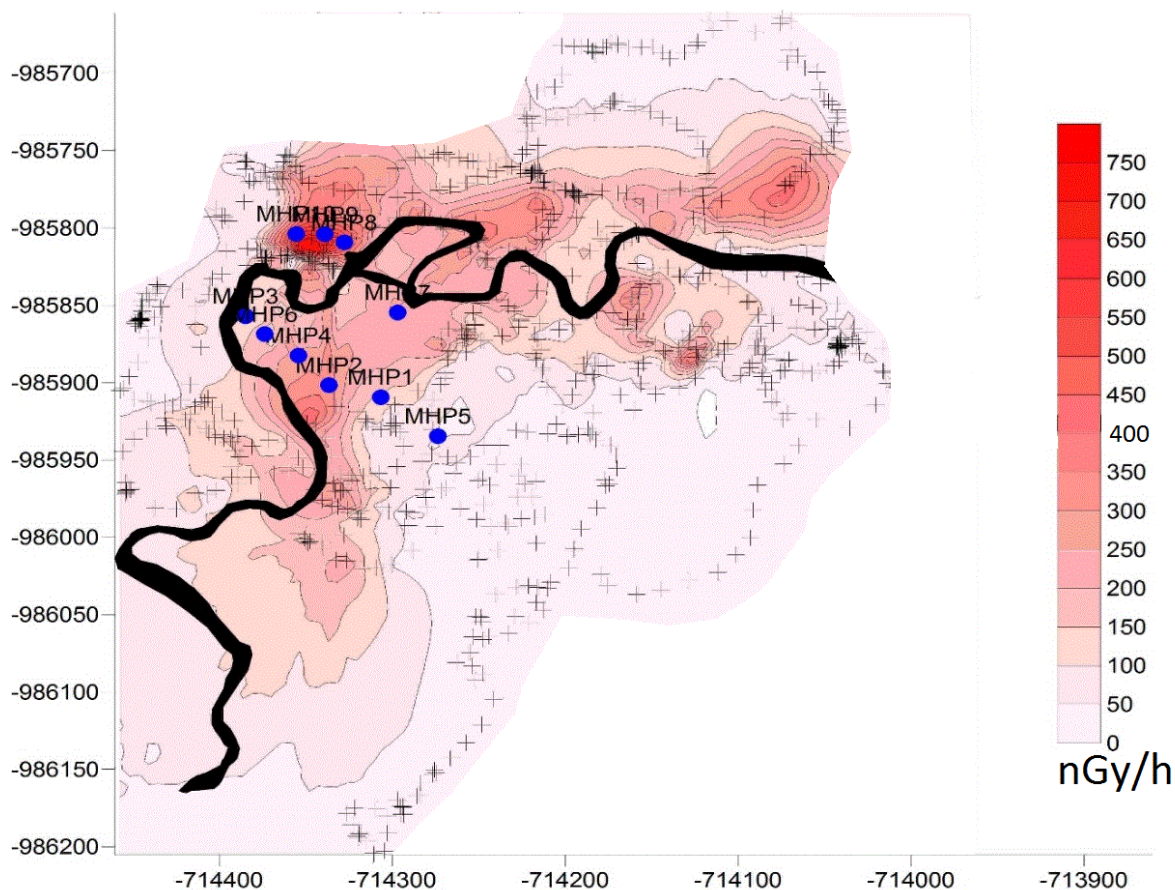
Karotáž PLP4 leží v blízkosti vrtů MHP9;10, tedy na území s vysoce zvýšenou gama aktivitou. PLP4/1 má své maximum v hloubce 15 cm (224 ppm eU), což souhlasí s vrtem MHP9, ležícím asi 3 m vedle. Naopak PLP4/2, ležící na výsepu asi 5 m od koryta, svého maxima dosahuje v 50 cm (84 ppm eU), kontaminace je zde již pohřbená.



Obrázek 13- Průběh kontaminace v karotážních vrtech PLP4/1 a PLP4/2.

### 3.1.4. Povrchová gamaspektrometrie - Boreček

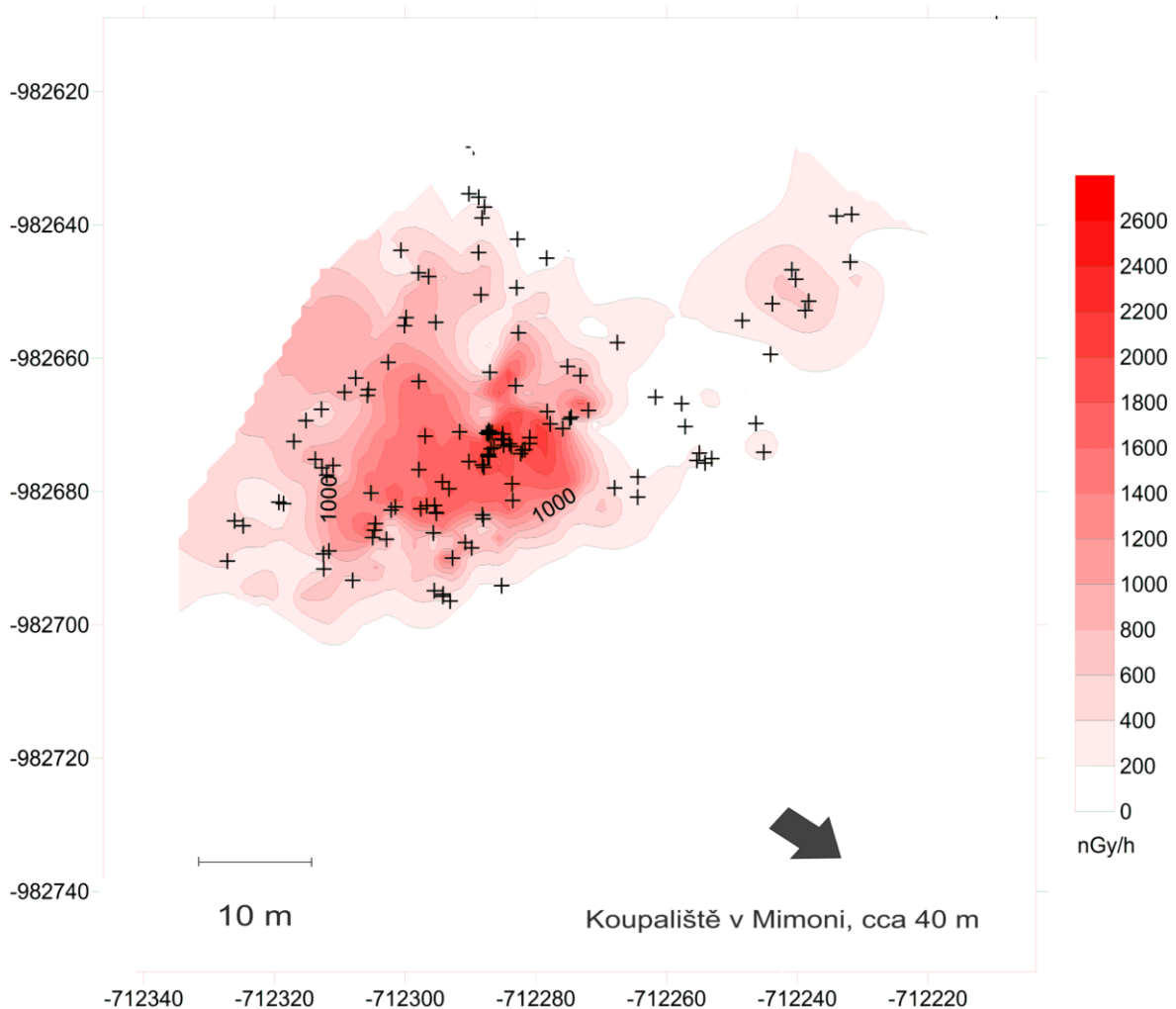
Výsledky povrchové gama aktivity na Borečku jsou znázorněny na obr. 14. Většina nejaktivnějších míst (až 748 nGy/h) odpovídá výplavovým plošinám za nárazovými břehy, kde dochází při zvýšení průtoku v korytě k vylití a zaplavení. Tyto hodnoty je však nutné brát s jistou rezervou, jednak program při jejich vizualizaci používá interpolaci mezi jednotlivými body a pak pokud je sediment překryt vrstvou méně aktivní, signál klesá. V našem případě však rozdíly v míře aktivity mezi jednotlivými body, plochami, odpovídaly výsledkům z vrtů a XRF. Konkrétně MHP8 - MHP10 skutečně leží na *Hot spot* a MHP2 a MHP4 v depresích se silně zvýšenou gama aktivitou. Naproti tomu MHP5, ležící na říční terase i MHP3, kde dochází k pravidelnému odnosu materiálu, vykazují hodnoty gama nízké. Pro orientaci v terénu se gamaspektrometr ukázal jako nanejvýš schopný pomocník.



Obrázek 14 - Dávkový příkon záření gama - mapa zájmové oblasti s vyznačenými MHP profily + měřené body.

### 3.1.4. Povrchová gamaspektrometrie – Mimoň koupaliště

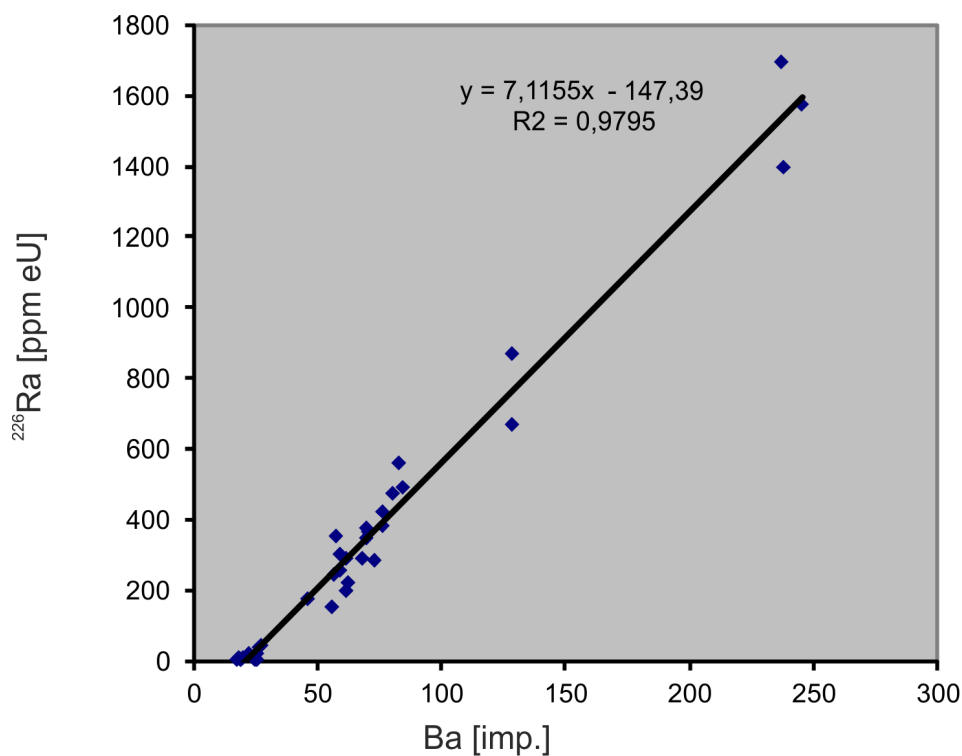
Na základě mapy letecké gama aktivity (Obr. 5 - Gnojek a kol., 2005) a dat povrchové gama aktivity uvedené v práci Kühna (1996) jsme provedli terénní gamaspektrometrii u starého náhonu ke koupališti v Mimoně (obr. 15). Zde jsme našli místo s velmi zvýšenou gama aktivitou (až 2578 nGy/h). Ta byla tak patrná už při zjišťování povrchové gama aktivity pravděpodobně proto, že kontaminovaný sediment je zde ve velmi tenké a koncentrované povrchové vrstvě a nebyl překryt sedimentem z hlediska kontaminace „nařaděným“ pozdější říční sedimentací. Toto místo u koupaliště je tedy velmi odlišné v porovnání s profily na Borečku, kde je hlavní část polutantů koncentrována cca v 15-20 cm a často dokonce překryta méně znečištěným sedimentem.



Obrázek 15 - Výsledky povrchové gamaspektrometrie v lokalitě Mimoně, koupaliště. Vyobrazené body ukazují prochozené území.

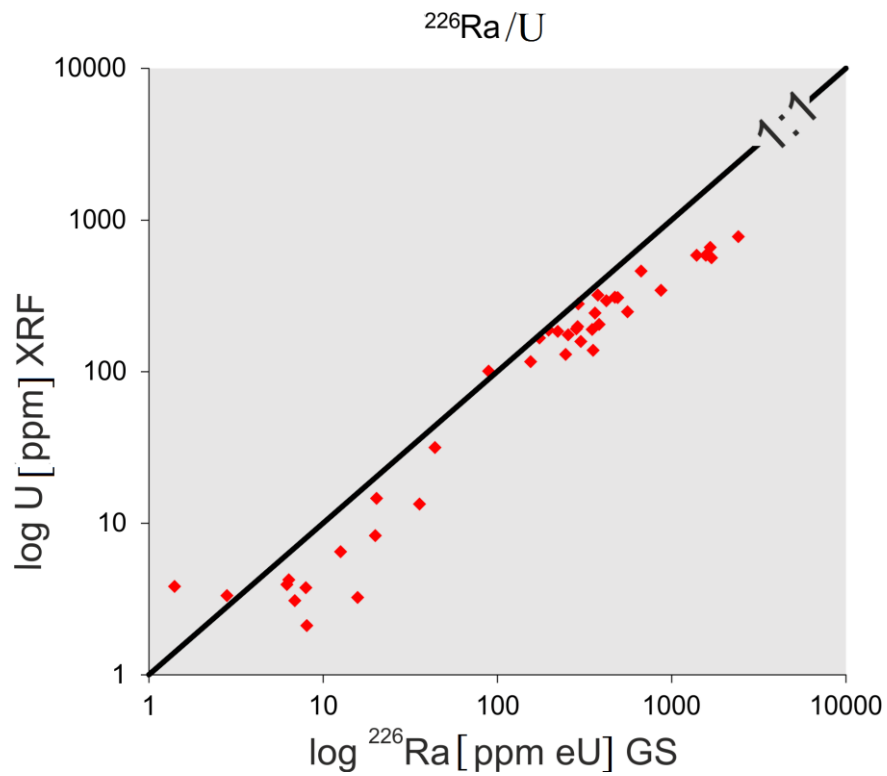
### 3.1.5. Laboratorní gama spektrometrické stanovení radionuklidů a poměry $^{226}\text{Ra}/\text{Ba}$ a $^{226}\text{Ra}/\text{U}$

Na laboratorním spektrometru SILAR jsme na obsahy  $^{226}\text{Ra}$  změřili celkem čtyři profily, MHP2;9;10;12. Výsledné aktivity  $^{226}\text{Ra}$ , vyjádřené v ppm eU (ekvivalent U) jsme porovnali s výsledky z XRF pro uran. Pro křivky Ba jsou používány „surové“ hodnoty z XRF, tedy imp/s. Baryum se totiž do roztoku převádí jen velmi těžko a následně vyžaduje technologicky náročné zpracování, pro analýzy ICP nebyl dostatek financí. Nicméně toto srovnání závislosti Ba na  $^{226}\text{Ra}$  plně postačí. Z obr. 16, kde je tato závislost graficky znázorněna, vyplývá jejich těsná asociace.



Obrázek 16 - Lineární závislost Ba na  $^{226}\text{Ra}$ , porovnání výsledků z XRF (Ba) a Lab. GS ( $^{226}\text{Ra}$ ).

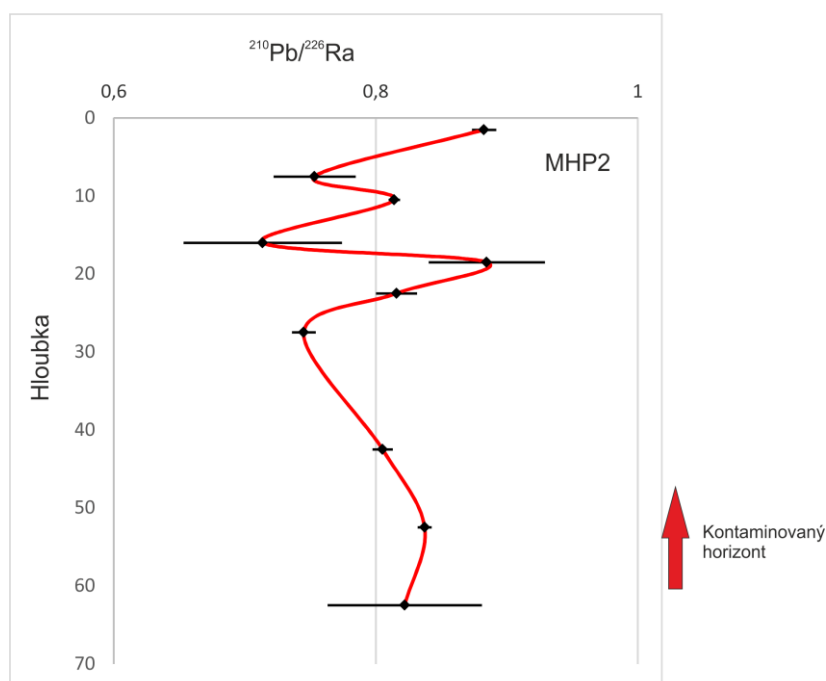
Na obrázku 17 jsme pro poměr  $^{226}\text{Ra}/\text{U}$  sloučili výstupy z XRF a laboratorního gamaspektrometru. Graf ukazuje, že většina měřených vzorků, kromě jednoho, je pravděpodobně během těžby ochuzená o hlavní dobývanou surovinu, o uran.



Obrázek 17 - Poměr  $^{226}\text{Ra}$  v ppm eU (data z laboratorního gama spektrometru) a U v ppm (výsledky z XRF). Vyznačena linie radioaktivní rovnováhy pro  $^{226}\text{Ra}/\text{U} = 1:1$ .

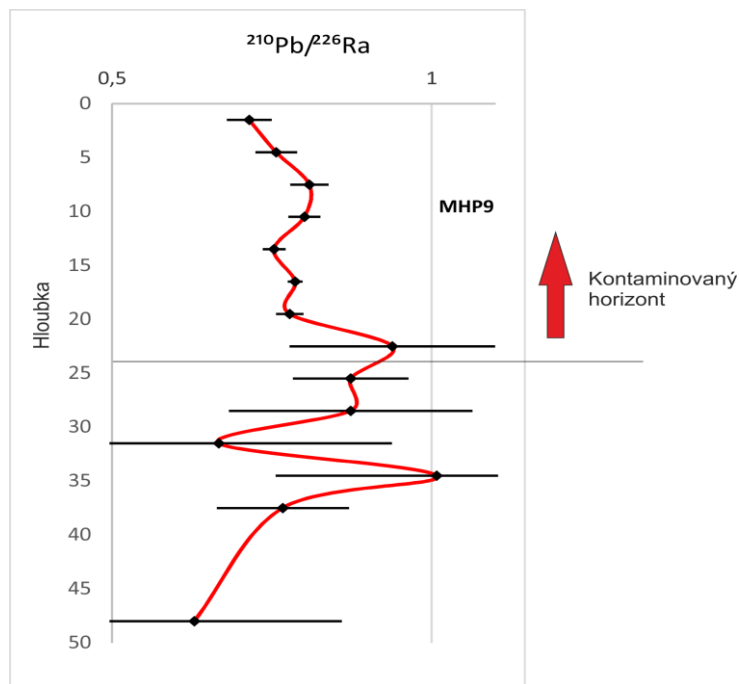
### 3.1.6. Laboratorní gama spektrometrické stanovení radionuklidů – $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$

Na laboratorním gama spektrometru jsme změřili mimo  $^{226}\text{Ra}$  také  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22,6$  let), vznikající rozpadem právě  $^{226}\text{Ra}$ . S časem se tyto dva izotopy dostávají do rovnováhy 1:1 (v porézním sedimentu však téměř nereálné díky úniku  $^{222}\text{Rn}$ ), z jejich poměru je tedy možné určit, zda se jedná o mladší či starší sediment. Na Obr. 18 je tento poměr vyobrazen pro vrt MHP2. Trend křivky zde však neukazuje na kontinuální ukládání, spíše svědčí o přepracovaném materiálu (viz obr. 23), teprve v hloubce 27,5 cm je vývoj sedimentů jednoznačně směrem ke starším.



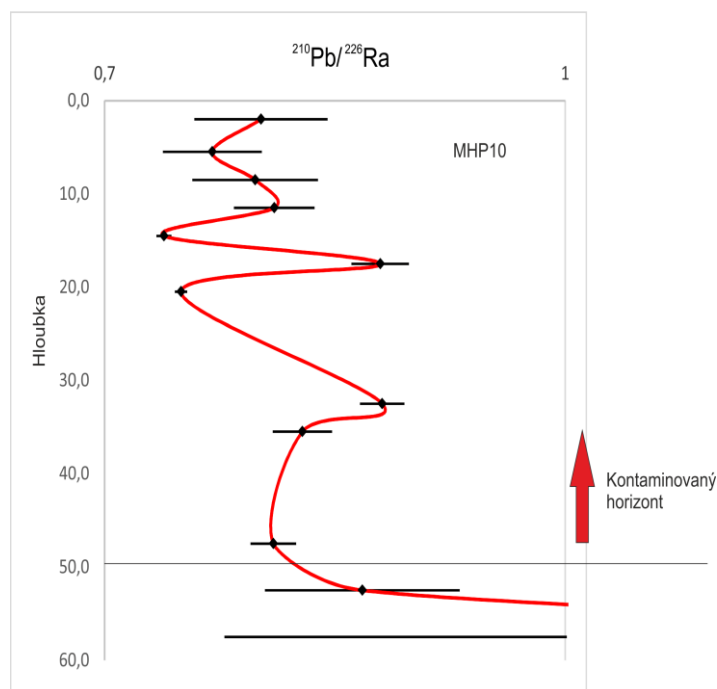
Obrázek 18 - Poměr  $^{210}\text{Pb}$  a  $^{226}\text{Ra}$  na profilu MHP2, kontaminovaný horizont je zde v celé šíři měření.

Ve vrtu MHP9 (obr. 19) můžeme vidět trend stárnutí sedimentů směrem do hloubky, kdy se poměr  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  zvyšuje a blíží k 1, tedy ke stavu radioaktivní rovnováhy. V tomto vrtu pravděpodobně docházelo ke kontinuálnímu ukládání materiálu, bez jeho dalšího přepracování. To lze však s jistotou říci jen do hloubky cca 20 cm, u hlubších vzorků z podloží kontaminovaného horizontu jsou již chybové úsečky příliš velké.



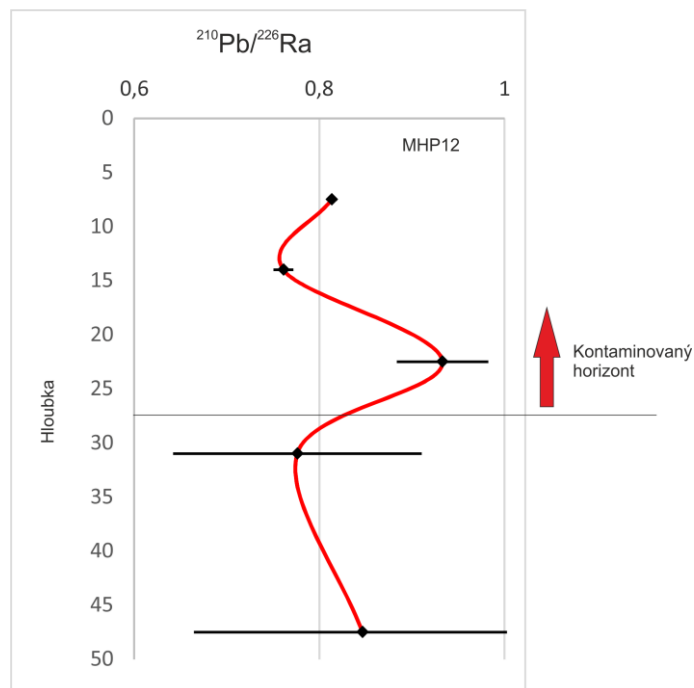
Obrázek 19 - Poměr  $^{210}\text{Pb}$  a  $^{226}\text{Ra}$  na profilu MHP9 s vyznačeným kontaminovaným horizontem.

Poměr izotopů pro MHP10 (obr. 20) ukazuje stejný trend jako MHP9, tedy kontinuální ukládání sedimentů a zvětšující se stáří do větší hloubky. Poslední dva pozadřové vzorky však mají opět chybovou úsečku velmi velkou, proto je lepší je nebrat přímo v potaz.



Obrázek 20 - Poměr  $^{210}\text{Pb}$  a  $^{226}\text{Ra}$  na profilu MHP10 s vyznačeným kontaminovaným horizontem.

Vrt MHP12 (obr. 21), nacházející se v blízkosti koupaliště v Mimoni bohužel trpí nedostatkem vzorků. V rámci úzkého kontaminovaného horizontu se nacházejí pouze 3 nejvyšší vzorky, přesto je zde vidět, že se jedná o velmi „divoké místo“, zvláště v prvních 20 cm.



Obrázek 21 - Poměr  $^{210}\text{Pb}$  a  $^{226}\text{Ra}$  na profilu MHP12.

### 3.2. Prvkové znečištění sedimentů zjištěné pomocí XRF

#### 3.2.1. MHP1

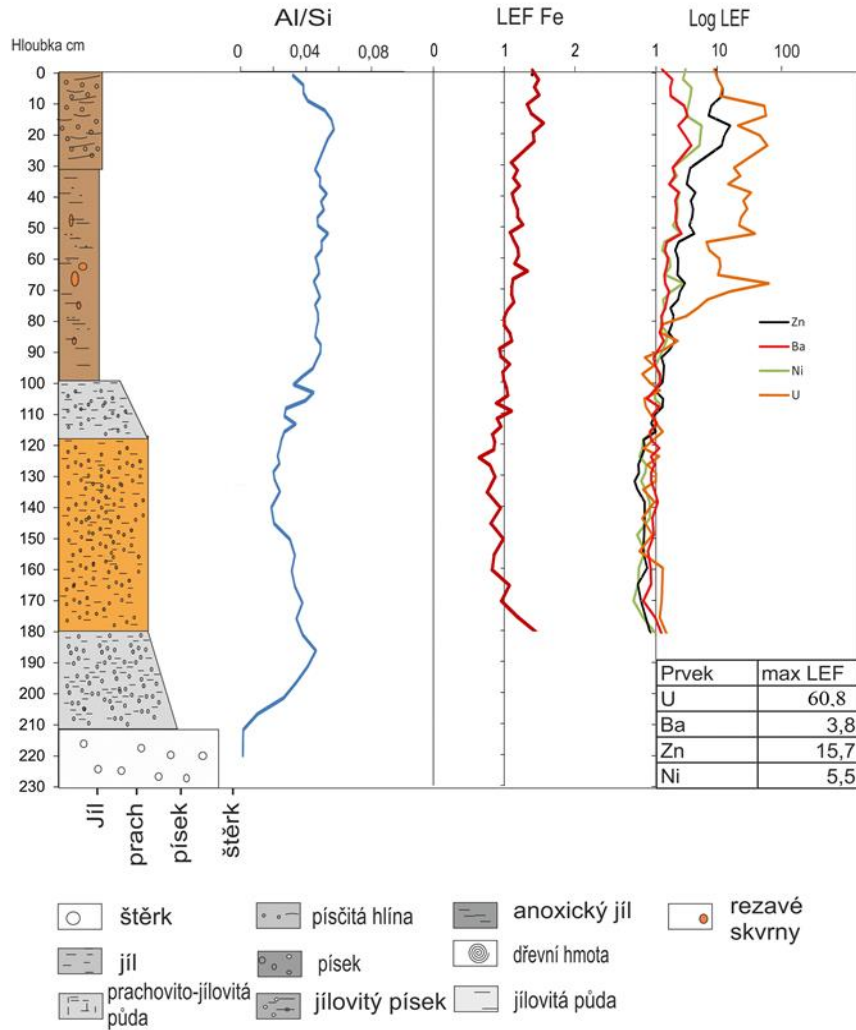
Profil MHP1 (obr. 22) byl odebrán na levém břehu Ploučnice, při okraji současné nivy, v těsné blízkosti bývalého koryta, pod starou říční terasou. Přesnější umístění profilu je znázorněno na obr. 6.

Na bázi profilu (230-210 cm) se nachází tmavý, mírně organický štěrk s příměsí hrubozrnného písku. V intervalu 200-170 cm se nachází středně zrnitý jílovitý písek, který postupně zjemňuje do písčitého jílu rezivě-béžové barvy (170-110 cm). Od 110 do 95 cm ubývá písčité frakce, převládá šedý jíl, v hloubce 95-30 cm postupně přechází v čistý hnědý jíl

se skvrnami, (zřejmě v důsledku oxidačně-redukčního prostředí). Svrchní 30 cm mocná vrstva reprezentuje hnědou povodňovou hlínu.

Pro vyjádření kontaminace prostředí zájmovými kovy je použit LEF, konkrétně v obr. 22 je znázorněn pro Zn, Ba, Ni, U. Průběh křivky LEF Zn naznačuje kontaminaci již od vrchních centimetrů, kde LEF začíná od hodnoty 9 a roste až do 18,5 cm, kde dosahuje hodnoty 15,7. Pod touto hranicí dochází k radikálnímu snížení až na hodnoty 3,6-3,2. V hloubce 55 cm dochází k mírnému nárůstu, od 70 cm až na bázi hodnoty kontinuálně klesají. Pokud vezmeme v potaz také litologii (křivku Al/Si), lze si všimnout závislosti mezi hrubostí sedimentu a obsahem kovů. Křivka LEF Fe pak v hloubce 100 až 210 cm naznačuje reduktimorfni zónu, víceméně trvalé mírné ochuzení ( $LEF < 1$ ), v redukčním prostředí se kovy mohou uvolňovat a migrovat. Velmi podobný trend je možné pozorovat i u ostatních zájmových prvků, především Ni, u kterého je tvar křivky se Zn téměř totožný, své maximum (5,5 LEF) má také v hloubce od 15 do 25 cm. Pod touto hloubkou LEF klesá až k hodnotám 0,5-1 (trvalé ochuzení).

V úzkém vztahu jsou v profilu MHP1 Ni a Zn a především Ba s U, u kterých je možné pozorovat maxima ve stejných hloubkách (24,5 cm s hodnotami 3,8 resp. 60,8 LEF). Baryum vykazuje tyto hodnoty pravděpodobně zejména proto, že k čištění důlních vod zde byl využíván chlorid barnatý, který sráží radium ve formě  $(Ba, Ra)SO_4$ .



Obrázek 22 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP1

Pro vyobrazení litologie profilů se vztahem k jejich LEF prvků Zn, Ni, U, Ba, Fe a poměru Al/Si byl použit program Corel X7. Případné hrubnutí či zjemňování sedimentu je ošetřeno pomocí zrnitostní škály ve spodní části obrázku a případně šikmým charakterem vrstvy. Jednotlivé typy sedimentů je možno určit pomocí legendy, rozdílné barvy odpovídají jejich reálné barvě v době vzorkování, tedy ve vlhkém stavu.

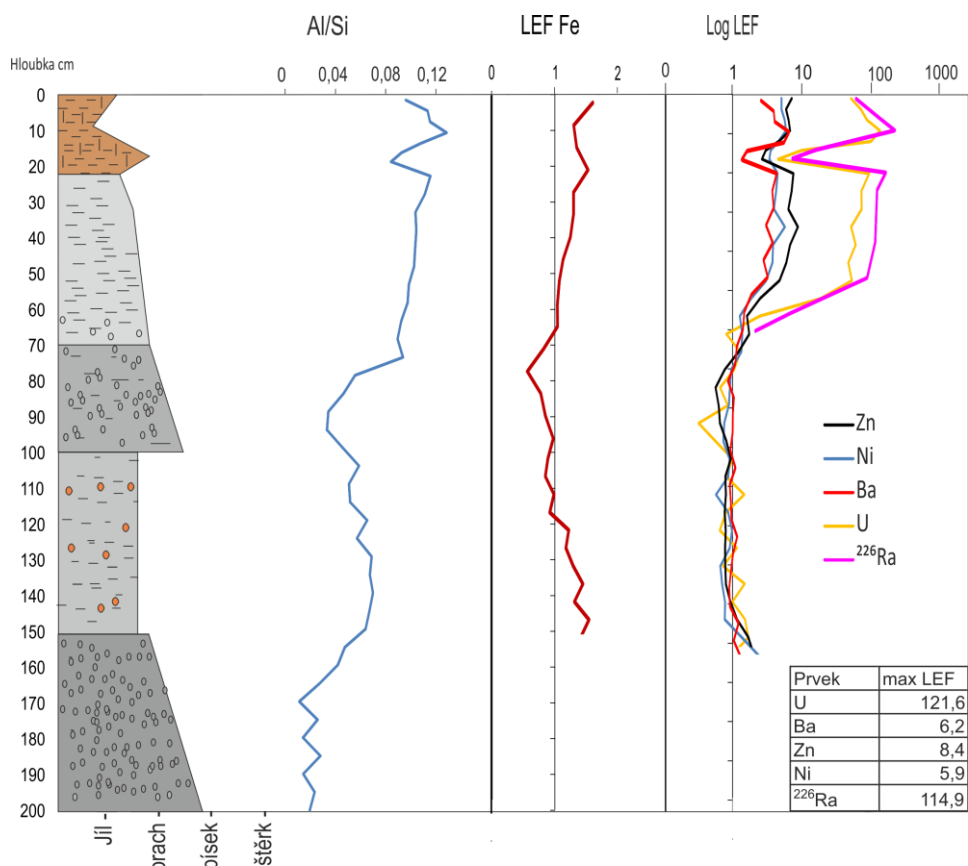
### 3.2.2. MHP2

Profil MHP2 (obr. 23) byl odebíráán ve vzdálenosti cca 25 metrů od MHP1, blíže ke středu nivy na levém břehu (viz Obr. 6).

Z hlediska sedimentárního záznamu je vrchní vrstva 0-20 cm hnědá hlína se stopami glejení, postupně získávající jemně písčité charakter. Tento jev je možné pozorovat až do hloubky

cca 70 cm, kde se sediment mění v jílovitý písek šedavé barvy s rezavými skvrnami, jež je možno přičítat střídání redukčního a oxidačního prostředí. V hloubce 100-150 cm se jedná spíše o jíl s příměsí písku, taktéž zde byly pozorovány rezavé skvrny. Hlouběji k bázi, 150-195 cm se charakter sedimentu mění v hrubě písčité, na křivce LEF je patrné trvalé ochuzení o Fe, což značí převládající redukční prostředí. Při srovnání litologie a LEF Fe je velmi dobře vidět vztah mezi zrnitostí sedimentu a reduktimorfni zónou (60-200 cm).

Na tomto profilu bylo navíc měřeno i  $^{226}\text{Ra}$  a je zde vidět těsná vazba mezi mírou kontaminace a zrnitostí sedimentu. K velkému nabohacení dochází u všech prvků již v prvních centimetrech, U, Ba i  $^{226}\text{Ra}$  dosahují svého maxima v cca 10 cm, kde je sediment nejjemnější. Průběh křivek těchto tří prvků je zcela totožný, zvýšenou kontaminaci můžeme pozorovat až do hloubky cca 55 cm. Pod touto hranicí znečištění prudce klesá. Prvky Ni ani Zn v tomto profilu taktéž dosahují zvýšených hodnot, od 70 cm je jejich koncentrace téměř až pozadřová. Stejně tak Zn je v porovnání s ostatními profily pouze mírně zvýšený, jeho nejvyšší LEF 8,4 se nachází cca ve 22 cm, směrem k bázi už pouze klesá.

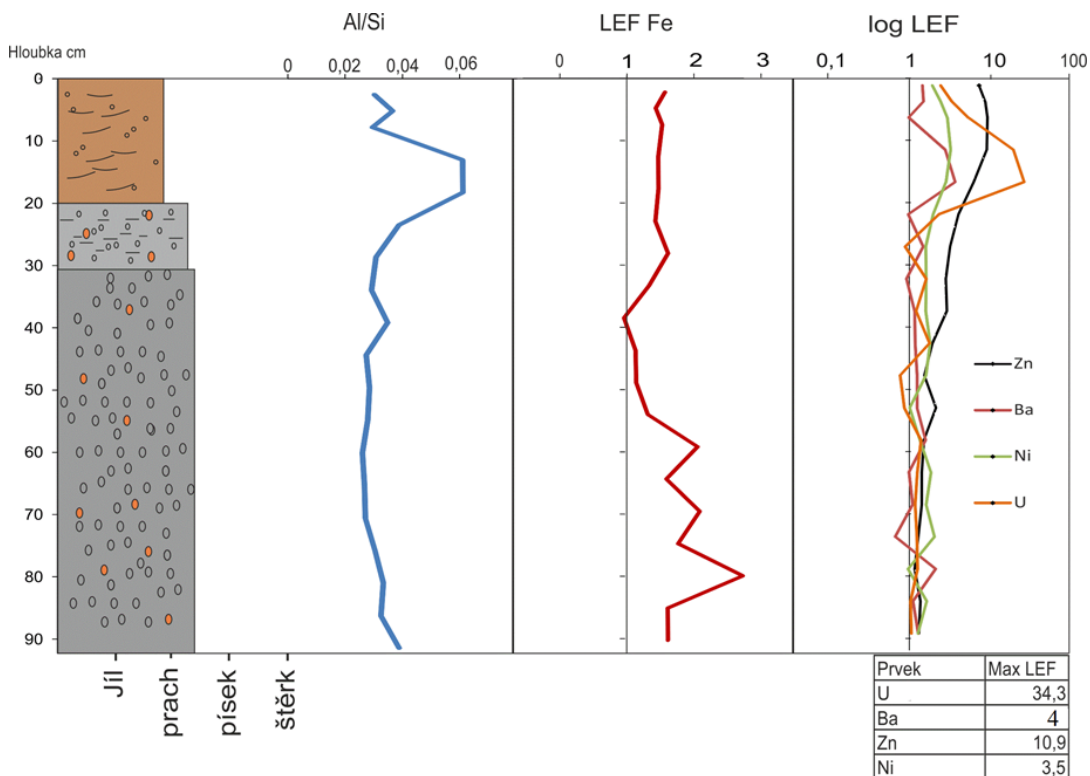


Obrázek 23 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP2

### 3.2.3. MHP3

Profil MHP3 (obr. 24) byl odebrán na kraji u současného koryta nivy, resp. na jesepu levého břehu Ploučnice, zhruba 100 m daleko od staré říční terasy. Vzhledem k výšce nárazového břehu profil sahá jen do hloubky 90 cm (tedy do hladiny vody v řece v době odběru).

Litologicky je možno vrt popsat jako hnědou, povodňovou hlínu jen ve svrchních 20 cm, směrem k bázi hlína získává rezavé skvrny oxidů Fe. Od hloubky 30 cm sediment postupně hrubne, stává se více písčítým, opět s rezavými skvrnami oxidů Fe. V 80 cm je sediment ryze písčítý, šedý, anoxický. Stejně tak podle Al/Si není průběh zrnitosti příliš dynamický, k jediné výraznější změně dochází v prvních 20 cm, což odpovídá jemné povodňové hlíně, ležící na hrubším, patrně korytovém (jesepovém) sedimentu. LEF Fe zůstává relativně konstantní až do hloubky 40 cm, odkud začíná mírně kolísat. Zvýšení obsahů zájmových prvků je zde úzce spjato s vrstvou jemnozrnného sedimentu. V průběhu celého profilu Zn vykazuje relativně zvýšené hodnoty (max 10,9 LEF). Stejně tak ostatní prvky dosahují svého maxima v hloubce kolem 15 cm.

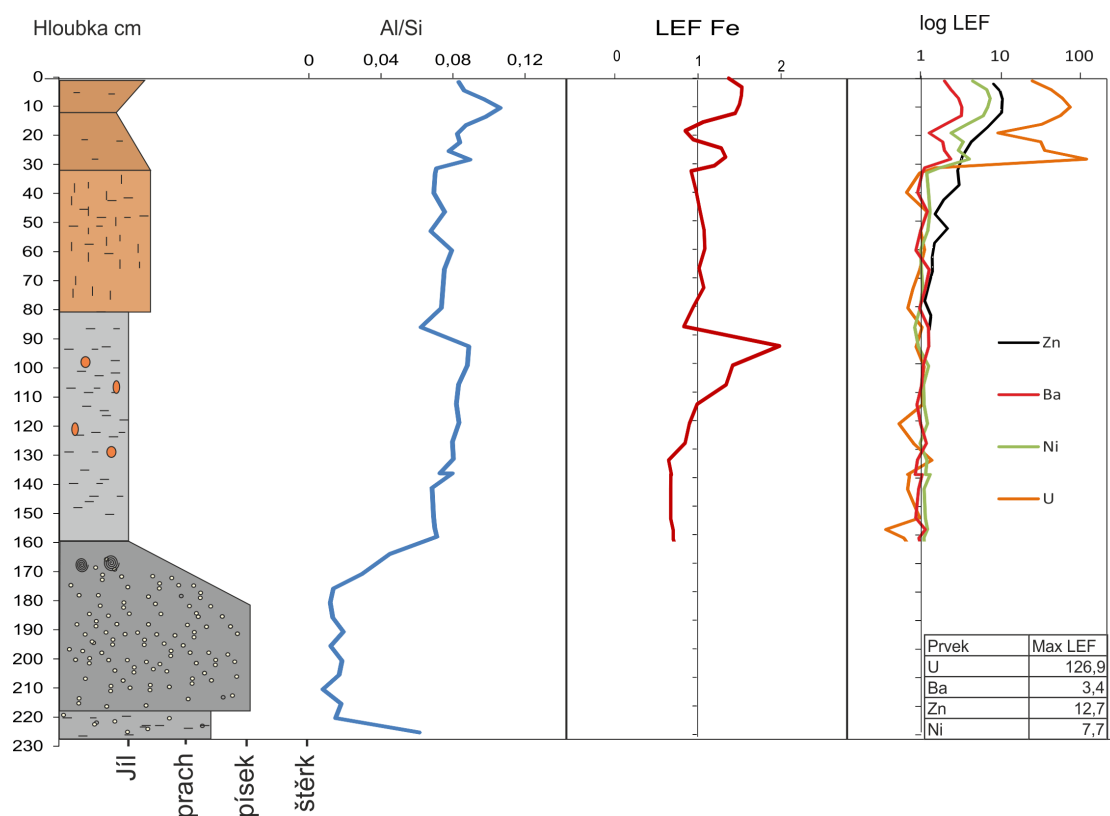


Obrázek 24 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP3.

### 3.2.4. MHP4

Vrt MHP4 byl odebírán zhruba uprostřed linie v nivě na levém břehu a jedná se o nejhlubší vrt popsáný v této práci (obr. 25).

Z hlediska litologie se jedná o relativně pestrý vrt, kde je v prvních 30 cm hnědá povodňová hlína, do hloubky mírně zjemňující. Od 30-80 cm se jedná o prachovito-jílovitý sediment, který ostře nasedá na jílovitou vrstvu, s rezavými skvrnami Fe oxidů. Ta se postupně mění přes prachovitou až ke středně zrnité písčité, s výskytem organické hmoty, zde konkrétně dřevní hmoty. V posledních deseti cm dochází ke zjemnění sedimentu na prachovito-písčité. LEF Fe se zvyšuje přesně v nástupu jílové vrstvy a postupně klesá se zrnitostí sedimentu. LEF zájmových prvků také koreluje se zrnitostí a svého maxima dosahují v povodňových hlínách.

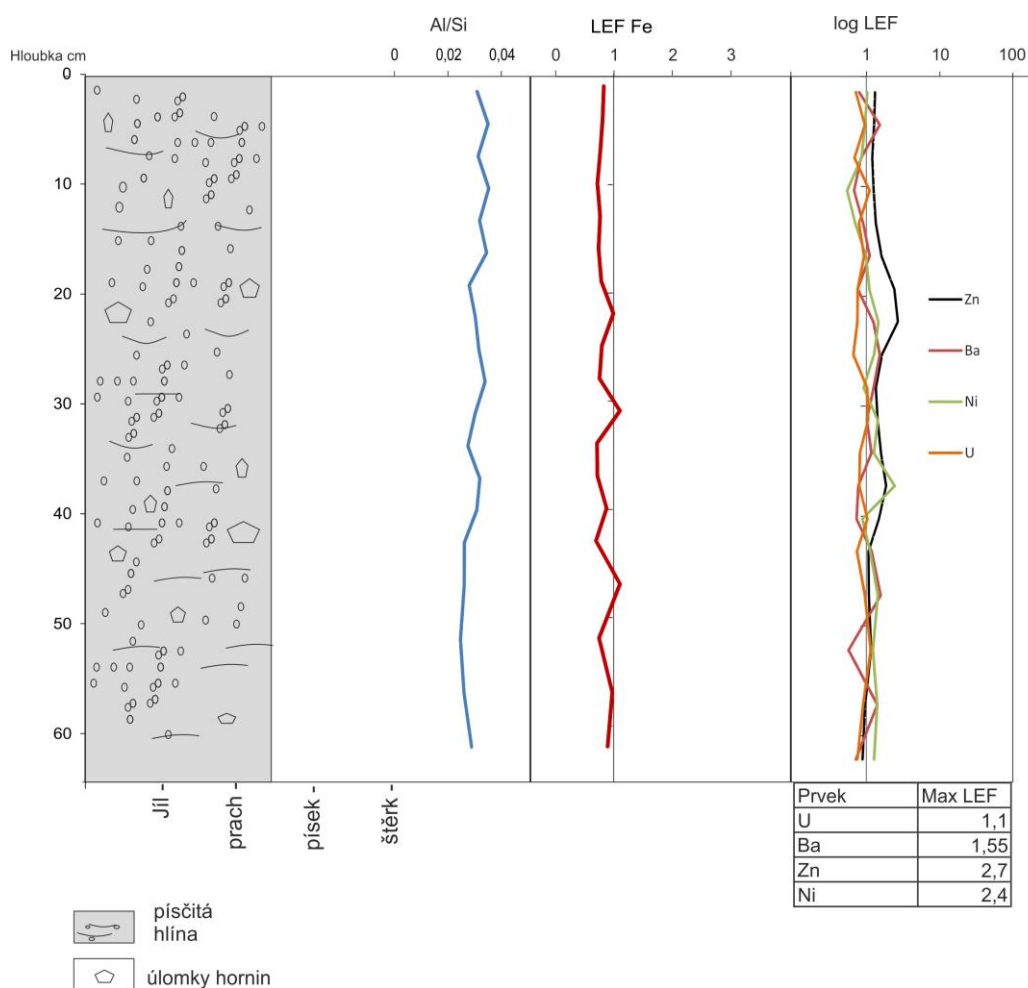


Obrázek 25 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP4.

### 3.2.5. MHP5

Vrt MHP5 byl odebírán zhruba 1 m nad úrovní aktivní nivy na říční terase (nivním stupni) v lese na okraji aktivní nivy (obr. 26).

Vzhledem k povaze sedimentu se u tohoto profilu podařilo odebrat pouze svrchních 65 cm (ve větších hloubkách je sediment velmi hrubý, nebylo možné použít žlábkový vrták). Terasa je tvořena štěrkem v hlinité matrici, v celém profilu se nacházejí klasty různých velikostí a tvarů, v rozmezí od 5 do 10 cm. Jednalo se především o křemeny, břidlice a vulkanity, matricí sedimentu je písčité hlína. Tento profil byl odebrán především pro získání sedimentů, které byly ukládány ještě před rozsáhlým antropogenním vlivem, tedy pro zjištění pozadových koncentrací zájmových prvků. LEF Fe je po celé délce profilu oproti ostatním vrtům mírně snížený, dochází zde k častému kolísání. Zájmové prvky jsou zde v koncentracích minimálních, ve většině případů LEF kolísá kolem hodnoty 1 v souladu s očekáváním absence výrazného znečištění

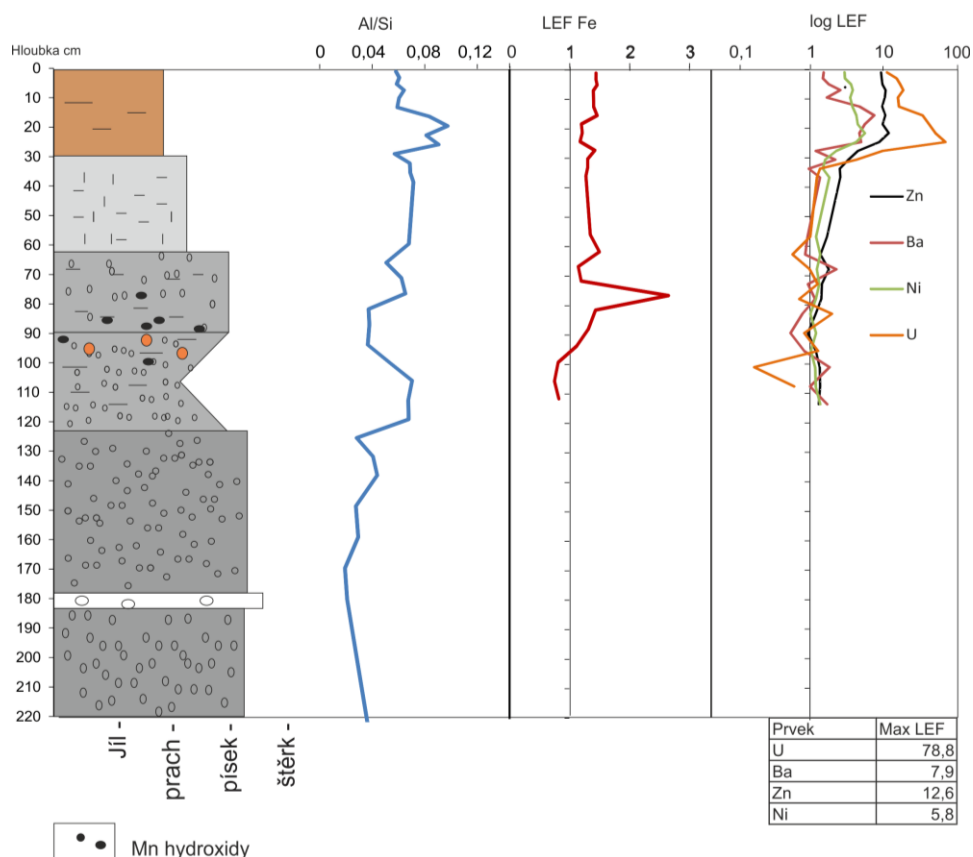


Obrázek 26 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP5.

### 3.2.6. MHP6

Profil MHP6 byl odebíráán zhruba 20 m od levého břehu Ploučnice v aktivní nivě (obr. 27). Jedná se o relativně hluboký a litologicky pestrý profil, kde prvních 25 cm odpovídá jílovité půdě. Ta se mění na jílovito-prachovou, která v cca v 60 cm nasedá na jílovito-písčité sediment, obsahující jednak černé milimetrové skvrny, pravděpodobně oxidy Mn, a také rezavé skvrny oxidů Fe. V 90 cm sediment mírně zjemňuje, má charakter šedého anoxického jemnozrného písku s prachem. V hloubce 110 cm opět hrubne a nasedá na středně zrnitý písek, s mírným obsahem prachové frakce. Ve 175 cm se v profilu vyskytuje asi 5 cm vrstvička štěrčiku, s klasty kolem 2 mm. Niže, až k bázi, je opět vrstva písku.

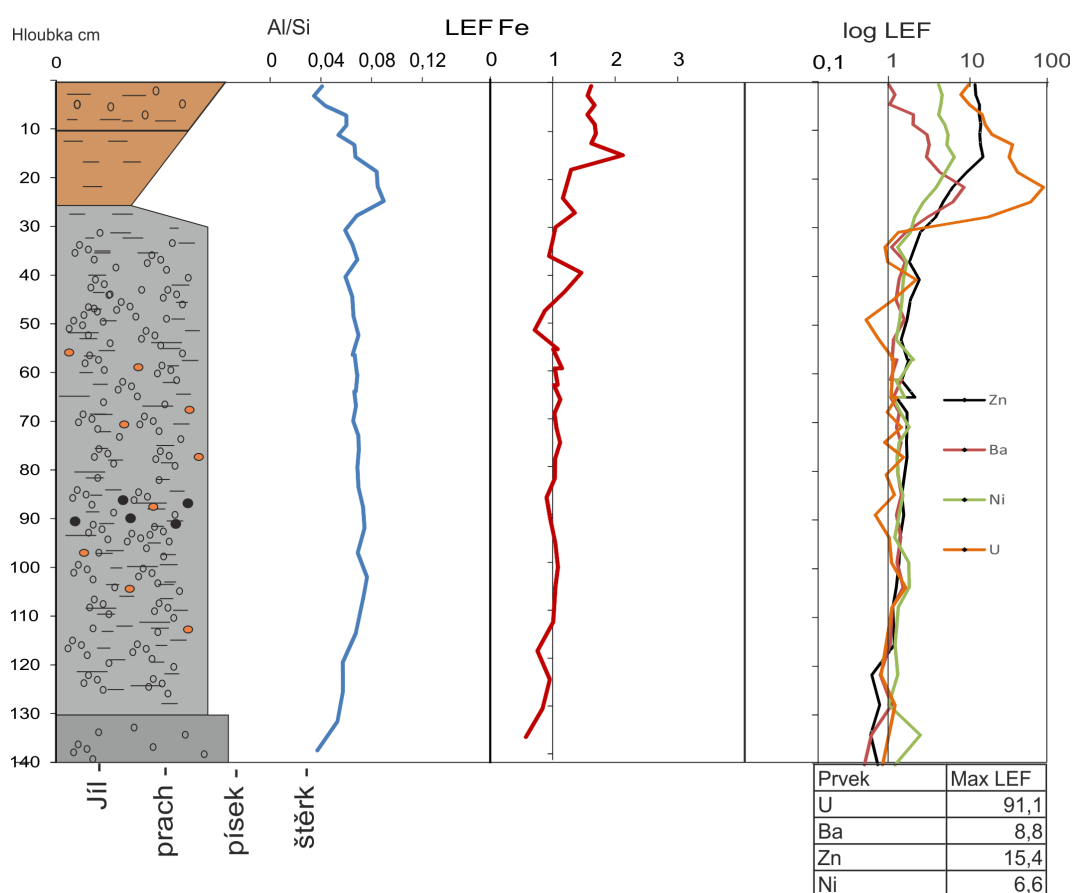
LEF Fe je do hloubky 75 cm konstantní, zde však dochází ke krátkému zvýšení na 2,7. Tento jev je možno vysvětlit namletím a změřením nějaké železité konkrce. Ke znečištění zájmovými prvky zde dochází již od svrchních cm, nejvyšších hodnot opět dosahuje U, zvýšené hodnoty však vykazují všechny prvky. Znečištění je vázáno na jemnozrný materiál, jakmile sediment hrubne, LEF se prudce snižuje.



Obrázek 27 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP6.

### 3.2.7. MHP7

MHP7 se již nenachází v hlavní odběrové linii, ale kolmo na ní, výše, proti toku Ploučnice, na výsepu, taktéž na levém břehu (obr. 28, poloha vrtu je v mapce na obr. 6). V tomto profilu je ve svrchní vrstvě jílovitý písek, dolů postupně zjemňující, který v 10 cm přechází v jílovitou půdu o mocnosti zhruba 15 cm. Znečištění roste od vrchu směrem k nejjemnějšímu materiálu, kde kulminuje, dále opět klesá. Zn zde má ostrý nástup již od prvních centimetrů, což by mohlo ukazovat na relativně nedávnou dobu přínosu nebo na absenci uložení mladšího, méně znečištěného sedimentu. Velmi dobře je zde vidět i podobný trend průběhu Ba a U. Tato velmi znečištěná zóna nasedá na vrstvu jílovitého písku, která od hloubky 55 do 115 cm obsahuje rezavé Fe skvrny, navíc okolo 90 cm i bročky hydroxidů Mn velikosti cca 1 mm. Pod hloubkou 130 cm má sediment charakter šedého písku. Křivky Al/Si a LEF Fe potvrzují závěry odvozené z litologického popisu, jejich průběhy vykazují maxima v hloubkách kolem 15 – 25 cm. Minimum LEF Fe v hloubce 120 cm a níže odpovídá reduktimorfnímu prostředí s převládajícím redukčním charakterem, tedy prostředí dlouhodobě nasycené vodou. Směrem k povru půdy jsou pak převládající spíše oxidační podmínky.

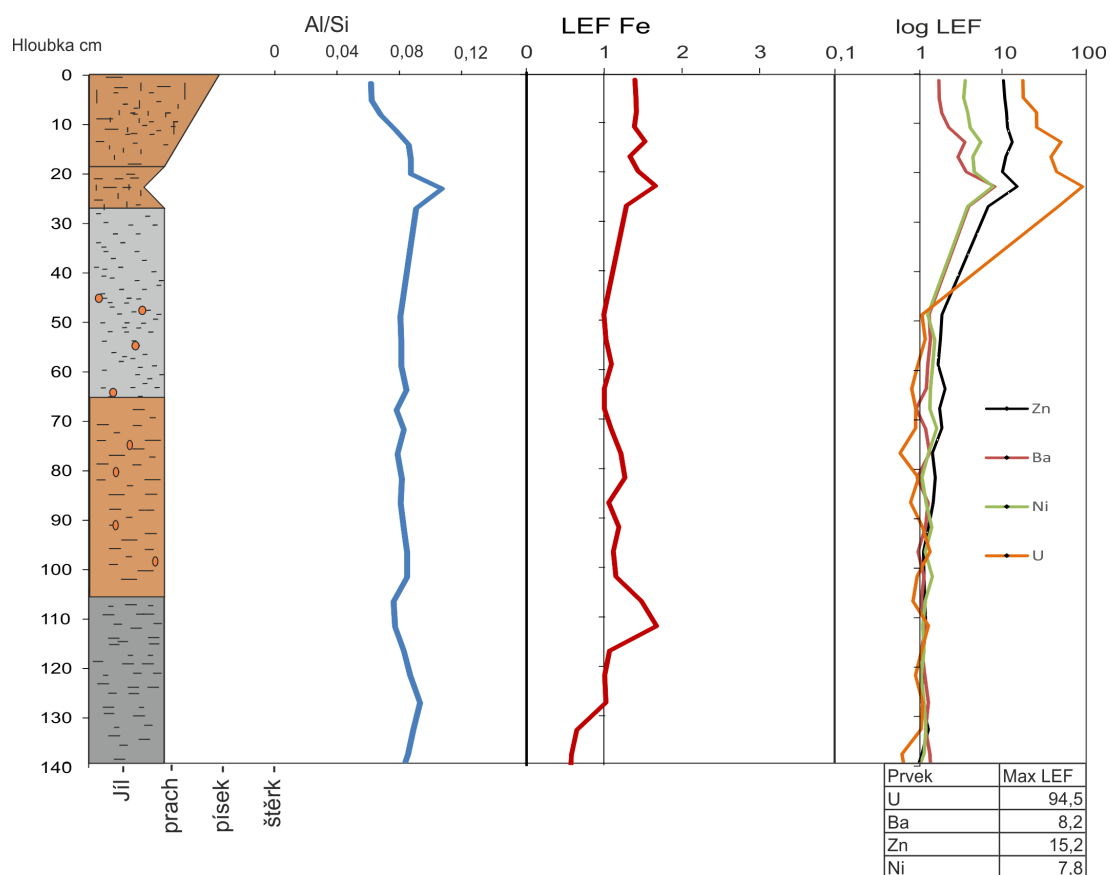


Obrázek 28 - Litologický popis hloubkový profil prvků ve vrtu MHP7.

### 3.2.8. MHP8

Umístění tohoto profilu bylo navrženo na základě terénního měření pomocí gamaspektrometru GT-30, který v tomto místě vykazoval jedny z nejvyšších hodnot povrchové gama aktivity ve studovaném území. Docházelo zde pravděpodobně k častému vylití koryta a tedy velkému přínosu znečištěného sedimentu (obr. 29).

Vrchní vrstva mocná asi 20 cm odpovídá prachovito-jílovitě půdě, směrem k bázi zjemňující. Vrstva 20-30 cm má jílovitý charakter. V této vrstvě je soustředěno největší znečištění. Je zajímavé, že průběh křivek všech čtyř prvků je téměř identický, což by mohlo svědčit o *eventové* události, kdy se všechny prvky dostaly do místa uložení najednou. V hloubce 30 cm, kde dochází k velmi mírnému hrubnutí sedimentu a stejně tak LEF Fe klesá ke své obvyklé hodnotě okolo 1, je pokles LEF zájmových prvků víc než patrný. Od 30 do 110 cm si sediment drží charakter jílovito-prachovitý, od 50 cm, kde se i zvyšuje LEF Fe a objevují se Fe skvrny, klesá LEF na téměř požadové hodnoty. V hloubce 115 cm sediment opět zjemňuje na šedý, anoxický jíl, s občasným výskytem uhlíkatého materiálu o velikosti několik mm.

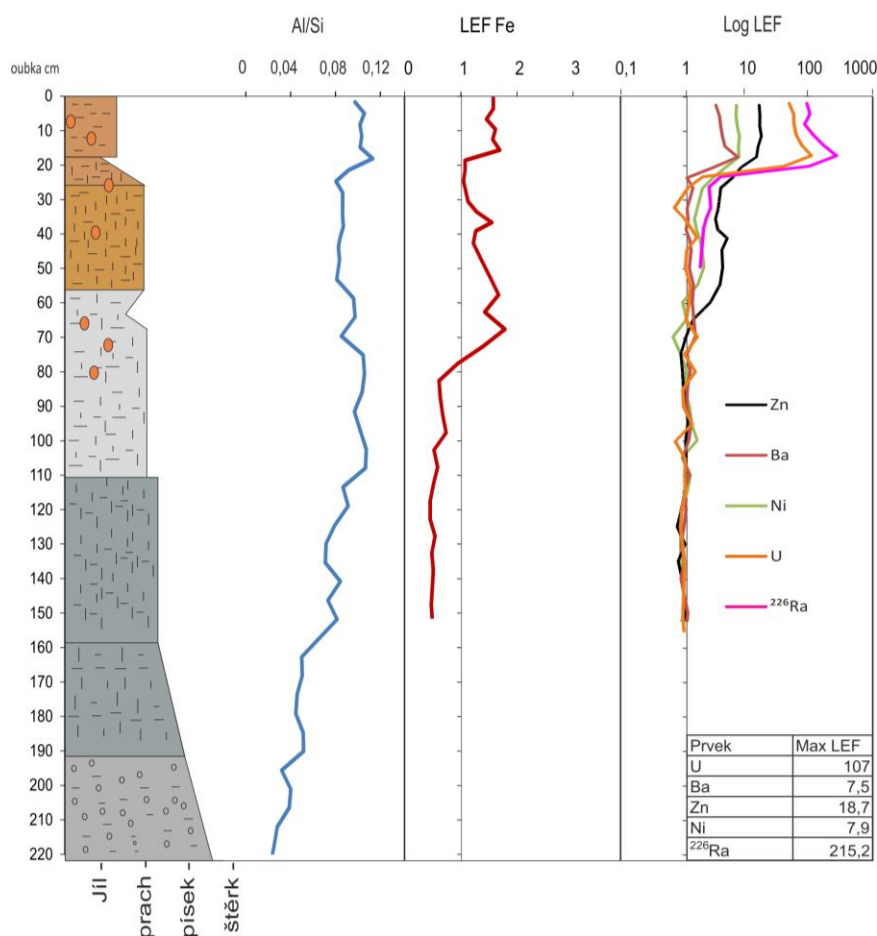


Obrázek 29 - Litologický popis a hlubkový profil prvků ve vrtu MHP8.

### 3.2.9. MHP9

Tento profil (obr. 30) se nachází zhruba 20 m za MHP8, v linii vedoucí od JV k SZ. Taktéž byl zvolen na základě pozemní gamaspektrometrie, která zde vykazovala extrémně zvýšené hodnoty (obr. 14).

Litologicky je prvních 20 cm jílovitá drobtovitá hlína, s přechodem do hlíny glejové, ve které je soustředěna většina znečištění zájmovými prvky. Prvky U a Zn zde dosahují téměř nejvyšších hodnot LEF, 107 resp. 19. Měřeno zde bylo i  $^{226}\text{Ra}$ , opět se zde ukazuje jeho těsná asociace s prvky U a Ba. Hluběji ve vrtu, kde dochází ke změně litologie (hrubnutí), tyto hodnoty prudce klesají. Jílovitá zde vrstva nasedá na mírně hrubnoucí prachovito-jílovitou půdu béžové barvy. Tento typ sedimentu je možno pozorovat s malými zrnitostními změnami až do hloubky 110 cm. V hloubce 40-65 cm se nacházejí rezavé Fe skvrny, což dobře odpovídá křivce LEF Fe. Kolem 90 cm se v sedimentu vyskytují drobné uhlíky. Od 110 do 190 cm sediment mírně hrubne, stále se však jedná o jílovitý prach, který ve 190 cm přechází ve velmi jemnozrnný písek.

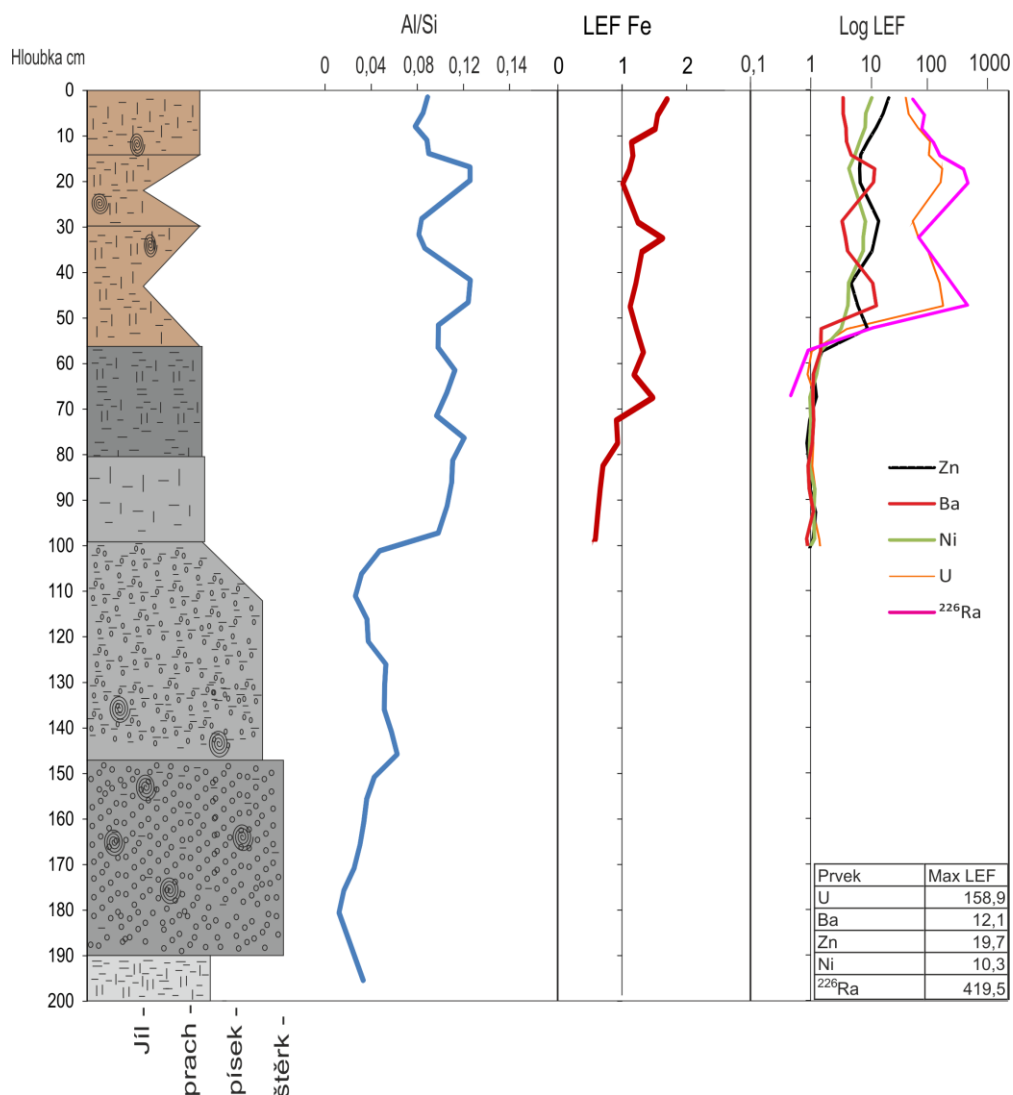


Obrázek 30 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP9.

### 3.2.10. MHP10

MHP10 byl umístěn v linii dvou předchozích vrtů, je z nich nejvíce vzdálen současnému korytu, z druhé strany se již blíží křídovému výchozu (obr. 31).

Místo, odkud pochází tento profil, vykazovalo nejvyšší povrchovou gama aktivitu na Borečku (748 nGy/h). Největší znečištění se potvrdilo i při detailnějším rozboru. Průběh křivek zájmových prvků se zde mírně liší, resp. U, Ba a  $^{226}\text{Ra}$  spolu korespondují, kdy je sice již v prvních cm patrné silné znečištění, svých maxim však dosahují až v 17 a 47,5 cm shodně. Stejně tak u obou dochází k poklesu v 52,5 cm. Průběh křivek Zn a Ni spolu taktéž naprosto souhlasí. Ty svých maxim dosahují téměř na povrchu, další vrcholy vykazují ve 29 cm a 52 cm, odkud koncentrace výrazně klesá, a v 60 cm se jedná už jen o mírně zvýšené, spíše pozad'ové hodnoty. Křivka Al/Si svým průběhem odpovídá spíše trojici U, Ba a  $^{226}\text{Ra}$ , kde nejvyšší koncentrace korelují s nejjemnějším sedimentem a nejvyšším Al/Si. Naopak Zn a Ni souhlasí s křivkou LEF Fe, kde při vyšším obsahu Fe roste i koncentrace obou prvků. Litologicky lze profil do 50 cm popsat jako šedohnědou jílovitou slatinu s kousky dřev (rašelinná matrix), která následně přechází v šedou prachovo-jílovitou půdu. V ní se v 60 - 80 cm zvyšuje obsah jílové frakce a barva se mění do modrošedé. Ve 100 cm dochází k náhlému zhrubnutí na středně zrnitý písčité jíl, kde se v hloubce 140 – 150 nacházejí organické zbytky. Směrem k bázi písek hrubne, pod hranicí 190 cm se objevuje prachovo-jílovitý sediment, není však jisté, že do profilu patří nebo zda jde o artefakt použití žlábkového vrtáku.

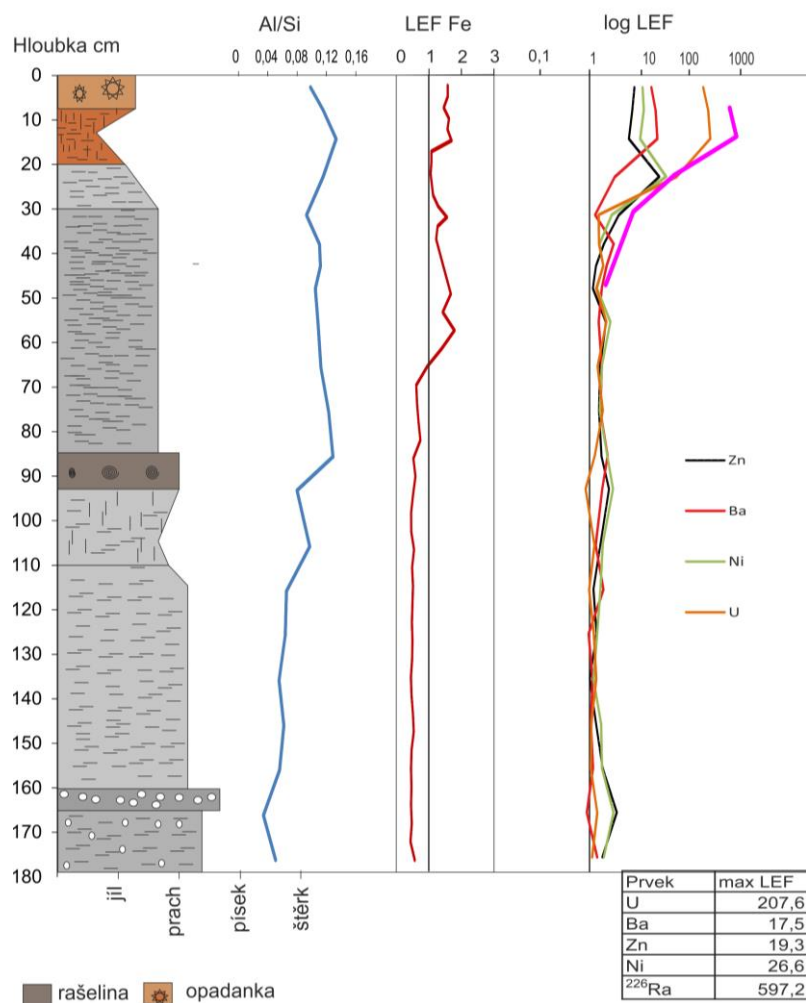


Obrázek 31 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP10.

### 3.2.11. MHP12

Vrt MHP12 (obr. 32) byl odebírán severně od koupaliště v Mimoni, v lužním lese nedaleko starého náhonu ke koupališti. V tomto místě byly podle Kühna (1996) omezené plochy s nebývale zvýšenou gama aktivitou, přisouzené vylití Ploučnice z náhonu ke koupališti před rokem 1981 či průsaku kyselých vod z průzkumných vrtů. Existence jedné takové vysoce aktivní plochy se prokázala i při našem terénním průzkumu pomocí gamaspektrometru v rámci této práce. Proto byl ve středu aktivní oblasti odebrán tento vrt.

Svrchní vrstvu, cca 5 cm, lze charakterizovat jako lesní opad, pod kterým je relativně mocná vrstva (15 cm) hnědé povodňové hlíny. Zde jsou druhé nejvyšší hodnoty LEF Ba ze všech profilů vůbec, konkrétně 17,5. Radium v této hloubce dosahuje dokonce absolutního maxima, 597 LEF, což značně přesahuje i hodnoty „Hot spotu“ na Borečku. Dále do hloubky, za povodňovou hlínou, se nachází šedý jílovitý jílu značné mocnosti, sahající až do hloubky kolem 85 cm. V prvních centimetrech této vrstvy je možné pozorovat maxima LEF Zn a Ni, 19,3 resp. 26,6 LEF. Ta jsou současná s maximy LEF Fe, což by mohlo označovat nejen postsedimentární původ (nabohacení rizikových prvků na redoxní akumulaci oxidů Fe), ale i současnou kontaminaci rizikovými prvky a Fe. Průběh křivek těchto prvků je zcela totožný. Okolo 60 cm prudce klesá LEF Fe, s největší pravděpodobností díky převládajícím redukčním podmínkám. V hloubce 85-95 cm je vrstva rašelinného charakteru, ostře oddělená od jílovito-prachovitěho sedimentu, zvolna přecházejícího do jílu. V hloubce cca 160 cm se nachází tenká písčité lamina, která by mohla odpovídat dávným korytovým sedimentům. Pod touto laminou můžeme nalézt písčitou půdu.



Obrázek 32 - Litologický popis a hloubkový profil prvků ve vrtu MHP12, Mimoň.

#### 4. Diskuze

Lokalita Stráž pod Ralskem leží v krásné přírodě geologické jednotky České křídové tabule. Ve skutečnosti však byla a dosud je velmi ovlivněna antropogenní činností, především v 70. a 80. letech uranovým průmyslem. Všeobecná informovanost o rozsahu znečištění a tedy případném environmentálním riziku je nedostatečná, snad proto, že už je považována za minulost. Platí ale, že tato minulost není příliš dobře zdokumentována. O smyslu dalších podrobných analýz stavu nivy Ploučnice svědčí i nedávný plán Povodí Ohře realizovat de-regulaci (revitalizaci) toku Ploučnice v blízkosti Mimoně, tedy vrácení alespoň části toku do starých koryt řeky, odstavených při regulačních pracích v 70. a 80. letech minulého století. Jak se ukazuje při pracích, v současnosti probíhajících pod vedením T. Matyse Grygara (ÚACH Řež a UJEP Ústí nad Labem), právě ve „staré nivě“ v okolí Mimoně jsou místa se značně zvýšenými koncentracemi mnoha těžkých kovů včetně gamazářičů podobně, jako je tomu u mimoňského koupaliště (profil MHP12). Pozoruhodné je, že plán revitalizace Ploučnice se neuskutečnil jen díky nesouhlasu soukromých vlastníků dotčených pozemků, nikoli v důsledku zvážení environmentálních rizik. Díky této revitalizaci rozhodně mohlo dojít k opětovné mobilizaci kontaminantů a jejich dalšímu postupu tokem.

V námi studované lokalitě v okolí obce Boreček je možné definovat tři základní geomorfologické úrovně. Nejvyšší z nich jsou časně holocenní říční terasy, tedy sedimenty člověkem prakticky neovlivněné, *preindustriální*. Tyto sedimenty jsou ideálním materiálem pro získání pozad'ových hodnot pro výpočet koncentrací prvků a faktorů nabožení (Matys Grygar a kol., 2014). Další výškovou úroveň mají zbytky terasy formované paleokoryty z průběhu holocénu, útvary mnohem mladší, které je při dostatečné hloubce vrtu v nich provedeném taktéž možné použít pro získání pozad'ových hodnot (z této úrovně byl získán vrt MHP5 popisovaný i v této práci). Třetí úroveň, v nejvyšší míře zasažené těžbou uranu, jsou sedimenty aktivní nivy, tedy sedimenty recentní, nejlépe dokládající antropogenní činnost posledních desítek let.

Naše práce se snažila ověřit možnou spojitost mezi zvýšenými obsahy kovů Zn, Ni, U, Ba,  $^{226}\text{Ra}$  a poskytnout k nim adekvátní vysvětlení jejich přítomnosti a to za použití laboratorních analýz XRF, terénní i laboratorní gamaspektrometrii k plošnému rozšíření polutantů vyzařujících gama záření, jako je především  $^{226}\text{Ra}$  a mělkou gama karotáž pro hloubkového rozvrstvení prvků s gama zářením.

#### 4.1. Srovnání metod analýzy distribuce znečištění v nivní výplni

Pro zjištění míry kontaminace v říční nivě Ploučnice jsme používali různé metody, viz Metodika (část 2). Každá z nich se ideálně hodí pro jiný účel a každá má také svá pro a proti.

Největšími výhodami povrchové gamaspektrometrie je jednak cena analýzy, kdy nejsou, kromě počáteční investice do přístroje, potřeba žádné další náklady, a jednak bezkonkurenční rychlost analýzy. Konkrétně v našem případě, tedy měření na Borečku na území velkém cca 1,5 km<sup>2</sup>, šlo o analýzu trvajících pouhých několik hodin, díky které jsme získali prvotní přehled o rozložení kontaminace. Takto získaná data, podpořená GPS souřadnicemi, je dále žádoucí zpracovat ve vhodném programu – my jsme použili Surfer 8, v kterém je možné vytvořit lokální mapku pro lepší zobrazení. Slabinou povrchové analýzy gama aktivity je mimo omezení na prvky vyzařující gama záření, tedy <sup>226</sup>Ra, především hloubkový dosah metody. Pokud byly radionuklidy během sedimentace/depozice mladší, než období vlastního (primárního) znečišťování, překryty dalším sedimentem, mladším a tedy většinou méně aktivním, signál aktivity na povrchu slábne a gamaspektrometr vyhodnotí tuto oblast tedy jako (zdánlivě) méně znečištěnou. Z tohoto důvodu je tedy velmi vhodné podpořit gamaspektrometrii i mělkou gama karotáží, jejíž aplikace je sice časově náročnější, avšak hloubkový dosah, alespoň námi používané sondy KS20, byl až 175 cm, což bylo pro konkrétní studovanou nivu zcela dostatečné. Díky delším časům měření a především aplikace gama karotáže hluboko do sedimentu trvá jedno karotážní měření cca půl hodiny. Proto je vhodné si předem vytipovat body vhodné pro karotáž pomocí měření povrchové gama aktivity. Stejně jako povrchová gamaspektrometrie je pochopitelně i mělká gama karotáž citlivá pouze na gama zářiče, lze jí tedy použít nejlépe v případě, kdy tyto polutanty slouží i jako stopovače.

Poslední námi používaná metoda, XRF analýzy vrtaných jader z nivy, byla časově nejnáročnější, poskytla ale nejpodrobnější a nejspolehlivější data a především nebyla omezená na gama zářiče. Bohužel samotné vrtání je časově velmi náročné. Při vhodných podmínkách, tedy pokud nenarazíme na příliš mocnou vrstvu písku či na matrix s vysokým obsahem velkých klastů, je maximální hloubkový dosah ručního vrtání až cca 4-5 m, a trvá pak i více než hodinu. V nivě Ploučnice jsou povodňové sedimenty ve vrstvách mocných do 2 m. Následné zpracování vzorků odebraných z vrtáku v laboratoři, tedy sušení, mletí na analytickou jemnost a XRF analýzy, je nicméně práce trvajících několik týdnů pro jeden vrtný

profil. Výsledkem je však celková geochemická analýza napříč sedimentárním záznamem a nivou s velmi dobrým prvkovým rozsahem, a především s možností zjistit obsahy prvků v jednotlivých vrstvách, případně vzorky použít k dalším dodatečným analýzám. Dalším přínosem XRF analýzy vzorků z vrtů je rozpoznání sedimentárních facií, jednak díky terénnímu popisu samotné hmatatelné hmoty z vrtáku, jednak i pomocí poměru Al/Si z následných analýz, případně lze ze vzorků odebraných žlábkovým vrtákem provést i laserovou granulometrickou analýzu (ta byla využita i v naší práci Matys Grygar a kol., 2014). Díky časové náročnosti jsme v našem zájmovém území provedli řez vrtů nivou, dlouhý asi 100 m, a další tři samostatné, v polohách vytipovaných na základě terénní gamaspektrometrie.

Pro vhodné mapování znečištění v našem zájmovém území nelze tedy vybrat pouze jednu „nejlepší“ metodu, protože největší předností našeho přístupu se ukázala jejich vzájemná kombinace. Pro prvotní orientaci a zvolení dalších měřících bodů je jednoznačně nejvhodnější (nejrychlejší a nejnázornější) povrchová gamaspektrometrie, ideálně operativně porovnávaná s mapou letecké gama aktivity, vytvořené firmou Miligal (Gnojek a kol., 2005). Nám tato celková letecká mapa povrchové gama aktivity posloužila pro vytipování vhodné lokality - okolí Borečku podle ní vykazovalo jedno z největších gama znečištění v oblasti těsně po proudu pod mostem silnice 270, dosud prakticky nestudované. Na místě však musela být doplněna právě pozemní povrchovou gamaspektrometrií, aby mohla posloužit pochopení sedimentačních procesů v nivě. Prostorové rozlišení letecké mapy gama aktivity totiž bylo jen 250 m/bod, tedy velmi hrubé vzhledem k morfologii nivy Ploučnice. Doplnění metody podrobného terénního měření povrchové gama aktivity mělkou gama karotáží a vrtanými profily s XRF analýzami nám poskytlo představu o pravděpodobných pochodech v nivě a tedy o distribuci zájmových prvků v nivní výplni.

#### 4.2. Znečištění aktivní nivy vzhledem k nivní architektuře

Po zpracování XRF analýz všech profilů MHP, které byly v nivě Ploučnice na její levobřežní straně odebrány v linii po cca dvaceti metrech a na straně pravobřežní bodově, podle vyhodnocení gamaspektrometrie, je zjevné, že rozšíření znečištěné vrstvy je velmi nerovnoměrné, a to jak pokud jde o plošný rozsah, tak i mocnost a hloubku. Pokud se nejprve zaměříme na profily MHP1 - MHP6, jdoucí od V k Z ke korytu řeky v pořadí 5, 1, 2, 4, 6, 3 (viz mapka na obr. 6), je patrné, že se MHP5 nachází na zbytku staré

říční terasy. Litologický profil ukazuje, že je v celé délce vrtu stejný, tedy hrubozrnnější materiál s většími klasty vulkanických hornin, naprosto odlišný od současné aktivní nivy. Faktor nabohacení sledovaných rizikových prvků (LEF) je zde velmi nízký, u většiny prvků se pohybuje v hodnotách 1 až 1,5. Pouze Zn v hloubce 20-25 cm dosahuje LEF 2,5, přesto pořád hovoříme o převážně nízkých, v podstatě pozad'ových hodnotách. Na DMT je velmi dobře vidět vyšší polohu říční terasy (nivního stupně) oproti současné aktivní nivě, s výškovým rozdílem 0,5 až cca 2 m (obr. 33).

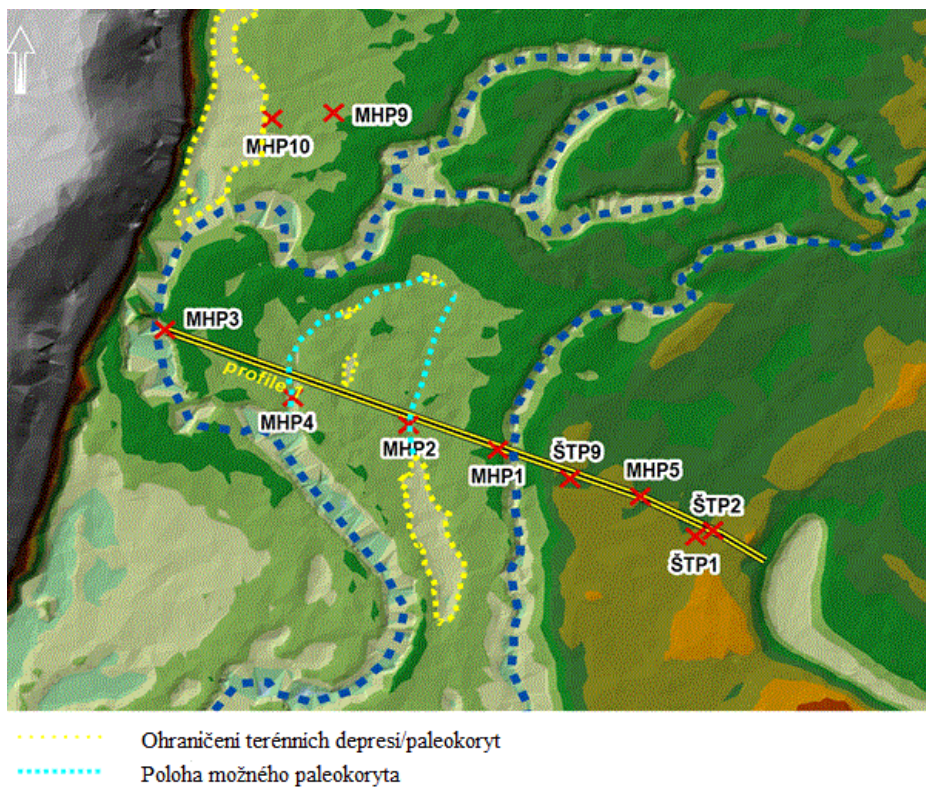
MHP1 už se nachází pod terasou, podle DMT dokonce v blízkosti starého koryta, při povodních pravděpodobně stále aktivního. Sediment z tohoto vrtu je charakteristický značnými mocnostmi jemnozrnného povodňového materiálu a ve srovnání se sedimenty ležící na spodně holocenní terase vysokými koncentracemi sledovaných rizikových prvků a to do hloubky až 80 cm. To by mohlo svědčit o mnohem rychlejší sedimentaci povodňového materiálu než ve zbytku studovaných profilů. Do hloubky 65 cm je průběh LEF velmi podobný u U a Ba, je zde možné pozorovat tvarově téměř totožné křivky. To se však mění mezi 65-80 cm, kde U dosahuje maxima, naopak Ba kontinuálně klesá. Na levém břehu Ploučnice na Borečku je zinkem nejvíce znečištěn profil MHP1, a to do hloubky cca 75 cm.

Protože se (k našemu překvapení) ukázalo, že hloubkové profily znečištění (LEF) v linii MHP1 - MHP6 stratigraficky nekorelují, museli jsme se zamyslet nad příčinou. Aktivní niva v tomto studovaném území musela být v minulosti velmi heterogenní, protože na jednotlivých místech nivy se uložily velmi různě mocné vrstvy znečištěných sedimentů, někdy kryté méně znečištěnými, patrně mladšími sedimenty, někdy s maximem znečištění přímo na povrchu. K pochopení této rozmanitosti nám pomohlo hodnocení struktury nivní výplně pomocí ERT a morfologie povrchu nivy pomocí nástrojů GIS (DMT).

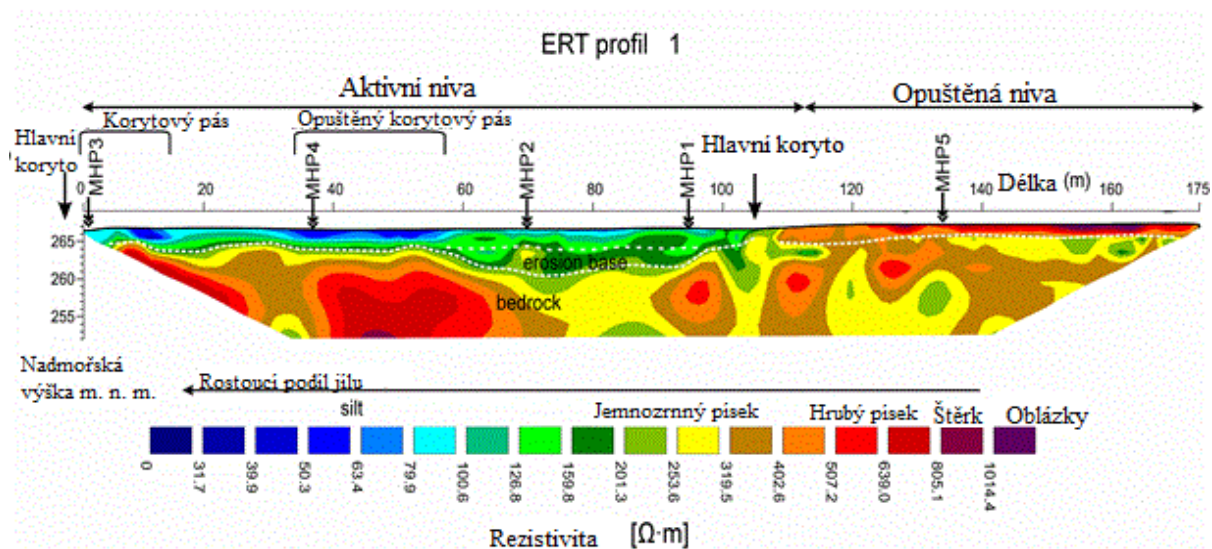
Podrobnější průzkum nivy v okolí Borečku ukázal, že rozložení znečištění je značně vázáno na nižší morfologické útvary, především na aktivní nivu, jež je pokryta povodňovými sedimenty z posledních desítek let. V rámci nivy je pak možné nalézt mírné deprese, často několik desítek metrů dlouhé, pouhým okem však těžko odhalitelné. Pomocí DMT jsme ale schopni tyto útvary rozlišit (obr. 33). Pokud se zaměříme na řez vedený aktivní nivou na levém břehu Ploučnice, takovýchto depresí objevíme hned několik. Vzhledem k faktu, že Ploučnice velmi rychle bočně eroduje (vyvíjí a zaškrcuje meandry) a s velkou ochotou překládá koryto (dochází k avulzím), jedná se v případě lineárních depresí v nivě s největší pravděpodobností o paleokoryta. Tomu odpovídají i litologické profily MHP2 a MHP4 nacházející se přímo na takovémto útvaru: mocná vrstvou jemných sedimentů,

sedimentujících zde při povodňových stavech, je uložena na hrubých fluvialních štěrkopiscích. Shodně u obou profilů je v prvních cca 30- ti cm nejvyšší míra znečištění. V linii řezu nivou pomocí profilů MHP1 - MHP6, bylo provedeno i zobrazení vnitřní stavby nivy geofyzikální metodou elektrického odporového profilování ERT (obr. 34), který v okolí MHP2 a MHP4 skutečně ukazuje nejjemnější sedimenty v tělese, tvarem odpovídající pohřbenému korytu. S ERT modelem korelují i výsledná měření mělké gama karotáže, kde empirickým způsobem předpokládáme úzký vztah mezi povodňovými sedimenty a polutanty s gama zářením. Také zde jsou velmi dobře patrné pohřbené meandry, které na řezu kolmém na deprese mají zhruba kruhový tvar s průměrem srovnatelným s šířkou koryta Ploučnice. Z výsledků mělké gama karotáže (obr. 11, 12, 13) je také vidět, že díky překládání koryta a následně bočně ukládaným sedimentům navíc dochází na jesepech k pohřbívání kontaminace do větších hloubek.

Na pravém břehu Ploučnice je v okolí vrtů MHP9 - MHP10 podobný depresní útvar (na obr. 33 je mezi MHP10 a severozápadním okrajem aktivní nivy). V MHP10 jsme našli sediment rašelinného charakteru a mnoho organických zbytků, které s největší pravděpodobností vznikly zazemněním bývalého koryta (např. opuštěného meandru). Zazemňování probíhalo patrně velmi rychle díky většímu přínosu materiálu, daného jednak posazením místa na výplavové plošině nedaleko současného toku, a také celkovým zúžením nivy, která je ze západní strany ohraničená pískovcovými horninami a z velké části zarostlá křovinami, nejjemnější materiál zde při povodních rychle vypadáva ze suspenze a sedimentuje ve velkých mocnostech. Z poměrů  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  (obr. 19 a 20) je možno navíc usuzovat, že zde nedocházelo k dalšímu přepracování materiálu a sedimenty se usazovaly především při zvýšených hydrologických stavech.



Obrázek 33 - Srovnání míst znečištění ve vztahu ke geomorfologii nivy. Upraveno podle obrázku z publikace Matyse Grygara a kol. (2014).



Obrázek 34 – ERT - zobrazení nivní architektury pomocí odporového řezu. Upraveno podle obrázku z publikace Matyse Grygara a kol. (2014).

### 4.3. Dosažené výsledky ve vztahu k historii těžby uranu

Jak již bylo uvedeno v přechozích kapitolách, říční systém Ploučnice byl ovlivňován uranovým průmyslem již od jeho samotného počátku (viz obr. 4) a to především úniky kyselých důlních vod jak z těžby hlubinné, tak chemické, případně z kombinace obou způsobů těžby v těsné blízkosti (Slezák 2000). Konkrétně můžeme jmenovat haldu pod šachtou Hamr I, z které se přímo do Ploučnice dostávaly srážkové i průsakové vody, úložiště balastního rmutu z úpravy, produktů z chemického čištění důlních vod a kontaminovaných materiálů z hornické činnosti, umístěné v prostoru Sedlišťského rybníka, kde byly vlivem nedostatečné izolace dna a propustného podloží odkaliště znečištěny podzemní vody. Na začátku těžby nebyla zajištěna izolace oblastí důlní a chemické těžby, takže již při přípravě hlubinné těžby došlo k průsakům roztoku z chemické těžby do dolu Hamr I a k nutnosti čerpat tyto roztoky v objemech větších, než aby bylo možné tyto čerpané vody čistit. Jejich část se dostala do vodoteče Ploučnice např. v roce 1971 podle zprávy z Povodí Ohře. Teprve po těchto incidentech bylo v roce 1977 zahájeno vytváření hydraulických bariér (1977), jejich optimální funkce bylo dosaženo po roce 1985 (Slezák 2000). Podle Kafky (2003) tyto čerpané důlní vody zejména před zprovozněním hydrobariéry obsahovaly množství volných kyselin, těžkých kovů a radioizotopů a byly velmi pravděpodobně hlavním zdrojem pro kontaminaci sedimentů Ploučnice dokumentovanou naším výzkumem. Ve všech námi zkoumaných profilech je totiž zjevná asociace rizikových prvků U, Ni, Zn, případně Ba a  $^{226}\text{Ra}$  a především si můžeme všimnout nárůstu znečištění těchto prvků ve stejných vrstvách sedimentů, tedy patrně ve stejném období, s největší pravděpodobností tedy vlivem stejného spouštěče (zdroje).

Nárůst průmyslové činnosti se v oblasti projevil nejen samotným znečištěním, ale i odlesňováním, zemními pracemi, a především úpravou samotného toku a tedy změnou vodního režimu řeky, která byla především v oblasti těžby uranu velmi brzy po začátku těžby napřímena a zbavena podstatné části meandrů, pro Ploučnici tolik charakteristických. Díky tomu se kontaminace uvolněná do prostředí nedistribuovala rovnoměrně, ale až na místech se sníženou průtočností, například tedy v meandrech po proudu pod regulačními pracemi mezi Stráží pod Ralskem a ústím Ploužnického potoka. Začaly vznikat „aktivní skvrny“ (*hot spots*), tedy místa, kde se suspendovaný materiál ukládal v obzvlášť mocných vrstvách a s obzvlášť vysokými koncentracemi těžkých kovů (Obr. 5). Takovým místem se stal i Boreček (Kühnova

dizertace a tato práce), který je vlastně prvním místem pod dnes existujícím úsekem s regulací toku.

Ze získaných dat je možné vyčíst několik fází kontaminace, jednak tedy jasně rozpoznatelný počátek těžby a čerpání důlních vod z chemické těžby, provázených pomalým zvyšováním  $^{226}\text{Ra}$  ve vodě (viz. Obr 4) a stejně tak ostatních zájmových prvků v sedimentech (U, Ni, Zn), jdoucích společně, což je dáno jejich zvýšenými průměrnými koncentracemi v cenomanských pískovcích uranového ložiska (viz Tabulka 4). Na profilu MHP9 (obr. 30) je vidět, že po prvotním nástupu si kontaminace drží podobné hodnoty, v průběhu času dokonce mírně slábnoucí, pravděpodobně v důsledku buď zlepšených bezpečnostních opatření při těžbě či dokonalejšímu způsobu dekontaminace důlních vod. Nad touto vrstvou dochází k prudkému nárůstu především U, doprovázený maximem Ba a  $^{226}\text{Ra}$ ; oba tyto prvky dosahují svá maxima ve shodných hloubkách, což je velmi dobře vidět např. v MHP10 (obr. 31). Baryum je v této vrstvě, nacházející se v povodňových hlínách, s největší pravděpodobností vázáno jako radiobaryt, tedy jako velmi stabilní minerální fáze s vysokou hustotou, vzniklá při odstraňování  $^{226}\text{Ra}$  z důlních vod chloridem barnatým. Domníváme se tedy v souladu s již dříve publikovanými a diskutovanými názory Hanslíka (2010), Kühna (1996) a Kafky (2000), že tyto maxima U a Ba jsou vázána na povodeň z roku 1981, která jako jediná měla dostatečnou sílu k fyzickému odnosu pevných částic ze sedimentační nádrže, kterou byl v době povodně i bývalý rybník Pustý. Výsledky z laboratorní gamaspektrometrie, prováděné na profilech MHP2, 9, 10 a 12 umožňují porovnání obsahu Ba vůči  $^{226}\text{Ra}$ , které je vždy průběhem shodné se zmiňovanými prvky (obr. 16), což je s hypotézou o radiobarytu jako zdroji znečištění Ba a velké povodni v souladu. Poměr  $^{226}\text{Ra}/\text{U}$  (obr. 17) navíc ukazuje, že znečištění exportované z oblasti těžby a uložené do nivy bylo ochuzeno o uran jakožto zájmový prvek těžby a jasně odkazuje na kontaminaci prostředí právě těžební činností. Tyto sedimenty jsou dále, s výjimkou profilu MHP12, překrývány naředěnějším materiálem, což je patrné mimo jiné na MHP8 (obr. 29). Pokud dále srovnáme vzorky námi odebraných říčních sedimentů s Uvolňovacími úrovněmi pro uvádění radionuklidů do životního prostředí podle §57 vyhlášky 307/2002 Sb. ve znění pozdějších předpisů, zjistíme, že pro radionuklid  $^{226}\text{Ra}$  v podstatě všechny vzorky z kontaminovaných horizontů překračují limit této normy, který byl stanoven na 0,3 kBq/kg.

MHP12 se ode všech ostatních profilů liší, nejen svou polohou v Mimoní u koupaliště, ale především stratigrafií kontaminovaných vrstev. Nejvyšší gama aktivitu lze totiž nalézt již v povrchových 15 cm, tzn že není překryta žádným čistějším sedimentem a hodnoty

zájmových prvků jsou v hloubce 30 cm blízké pozadovým hodnotám. Poměr  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  nám bohužel díky nedostatku vzorků o této lokalitě nic víc neprozradí. Podle Kühna (1996) bylo severně od koupaliště umístěno několik hydrogeologických a průzkumných vrtů uranového průmyslu, čemuž by odpovídal i přibližně kruhový tvar „aktivní skvrny“ s největší gama aktivitou. Vrt MHP12 byl však proveden nejen kvůli vysoké gama aktivitě, ale i pro zjištění množství Zn nad soutokem Ploučnice s Panenským potokem. V povodí Panenského potoka byl totiž jeden z možných zdrojů kontaminace Ploučnice zinkem (zinkovna v Brništi), uváděný Kühnem (1996) a Buňatovou (1996). Domněnka, že by bylo Brniště zásadním zdrojem Zn, se však nepotvrdila, protože sedimenty MHP12 jsou tímto kovem taktéž výrazně nabohacené. Podobnou skutečnost (vysoký obsah Zn) uvádí ve své práci i Kühn (1996), který analyzoval podobnou kruhovou „aktivní skvrnu“ položenou několik desítek metrů západně od MHP12. Naopak v sedimentech Panenského potoka (probíhající práce Bc. Štěpánky Tůmové, UJEP Ústí nad Labem) jsou tyto hodnoty nižší – nejvyšší obsahy Zn v sedimentech Panenského Potoka na severním okraji Pertoltic p.R. byly 200 ppm, zatímco v MHP12 to bylo 350 ppm.

Tabulka 4 - Průměrné obsahy vybraných rizikových prvků ve světových pískovcích, v pískovcích v místech zrudnění i mimo ně ve studované oblasti a v průměrných půdách.

prvek (mg/kg)	profil MHP9 (rozsah)	profil MHP12 (rozsah)	průměrné pískovce (1)	pískovce ložisko (2)	pískovce mimo ložisko (3)	půdy průměr (4)	půdy na pískovcích (5)
Cu	7,3-34,3	2,1-35,6	X,0	38	8	23	12,3
Ni	6,8-162,9	19,5-321,5	2	49	7	50	4
Pb	11,2-116,2	19-190,3	7	11,6	14	35	37,8
U	1,37-344,8	776,7	0,45	825	2,3	1	1,54
Zn	8,1-1004	37,1-350,4	15	58	-	90	37

(1) Průměrné světové hodnoty pro pískovce (Turekian a Wedepohl, 1961);

(2) složení cenomanských pískovců v prostoru uranového ložiska Stráž pod Ralskem (Lepka, nepublikováno);

(3) složení cenomanských pískovců mimo U ložisko Stráž pod Ralskem (Lepka, nepublikováno; in Kúhn 1996);

(4) průměrné (median) světové hodnoty pro půdy (Bowen, 1979);

(5) průměrné hodnoty pro půdy ČR (Beneš, 1993)

#### 4.4. Výhledy na další práce v oblasti

Na Ploučnici jsme provedli velké množství vrtů a analýz, které spolu s výsledky z odběrových míst, umístěných dále po proudu, byly využity v článku Matyse Grygara a kol. (2014). V souhrnu profilů po toku Ploučnice lze pozorovat společné trendy v hloubkových profilech zájmových prvků v sedimentech, které jsou v souladu s chemostratigrafickým schématem znečištění, popsaným v části 4.3. V další práci by bylo účelné se zaměřit nejprve na místa, nacházející se několik km daleko pod zkoumaným místem na Borečku po proudu Ploučnice.

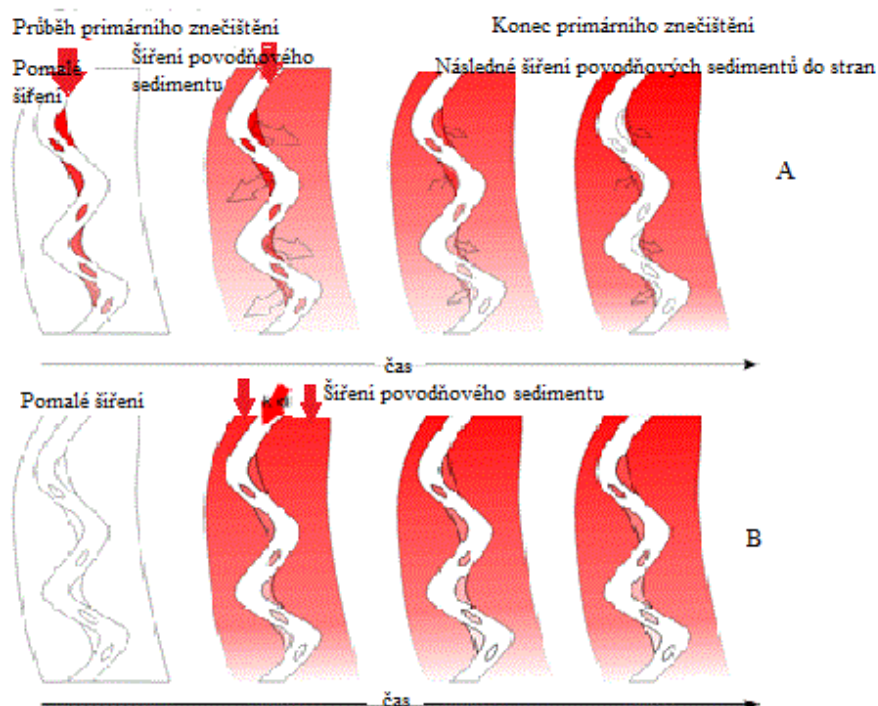
Například na vrtu LMP12 (Lucie Majerová Ploučnice; Majerová a kol., 2013), ležícím ještě níže po proudu, cca 1,5 km od zkoumaného místa na Borečku, kontaminace U a Zn ve svrchních centimetrech dokonce stále roste, není zde patrné žádné zlepšení, resp. překrytí čistším sedimentem (Matys Grygar a kol., 2014). Z toho plyne hypotéza, že v říčním systému Ploučnice dochází nadále k sekundárnímu znečištění v důsledku šíření kontaminantů dále po proudu od Borečku. Může se tak dít buď recyklací a následnou fyzickou remobilizací sedimentů či remobilizací chemickou, tedy migrací prvků v propustných sedimentech. S největší pravděpodobností se zde uplatňují oba tyto mechanismy. Jejich pochopení je další velmi zajímavé téma pro budoucí práci.

Možným vysvětlením pro vývoj obsahu Zn a U v nejmladších sedimentech je přepracování starších sedimentů, proces typický pro střední a spodní úseky říčních toků. Podle Hanslíka a kol. (1995), bylo na přelomu 80. a 90. let největší znečištění koncentrováno v litorálním pásmu, naše analýzy však ukázaly, že dnes je největší znečištění naopak v nivě. Kupříkladu MHP3, odpovídající sedimentům korytového pásu, vykazují znatelně nižší hodnoty než vrty v ploše nivy.

Domníváme se, že můžeme na Ploučnici pozorovat důsledky dvou mechanismů šíření kontaminace. První mechanismus je založen na tom, že se primární kontaminace šířila po proudu řeky i při nízkých průtocích v řece (např. při čerpání důlních vod z šachty na Hamru od začátku 70. let), kdy se přechodně ukládala v korytových pásech, což je proces pomalý, leč

probíhající kontinuálně. Jakmile se průtok zvýšil, např. při povodni, docházelo k vyplavování polutantů z přechodných uloženin v korytě do nivy, především tedy ve formě suspenze. Postupem času se po ukončení primárního znečišťování korytový pás tímto mechanismem v podstatě pořád čistí (obr. 35 A). Druhý mechanismus šíření kontaminace je založen na tom, že se primární znečištění transportuje pouze vlivem hydrologických extrémů, v našem případě při povodni, jako byla na Ploučnici ta v roce 1981, s transportem především v suspenzi od samého počátku, kdy se díky srážkám i větší unášecí schopnosti toku vymývaly i zanesené terénní deprese v povodí, technologické i přírodní vodoteče a podobně a kontaminace se dostala dále po toku přímo do nivy (obr. 35 B). Tyto dva velmi odlišné mechanismy šíření kontaminace by měly vytvořit poněkud jiné sedimentární záznamy v korytovém páse (kde se ukládá i mimo povodňových stavů) a v nivě (kde se ukládá jen při vyběžení toku) a hlavně s podstatně odlišnou trvanlivostí v čase. Obecně lze říci, že distální povodňové sedimenty jsou vhodné pro rekonstrukci historie regionálního znečištění, kdežto korytové a břehové sedimenty regulovaného říčního koryta kvalitativně odrážejí spíše aktuální lokální kontaminaci říčních systémů (Faměra a kol., 2013).

V dostupných pracech se však, až na několik výjimek, těmito možnými mechanismy šíření znečišťování nikdo nezabýval, přestože získané výsledky ukazují, že jde o zcela zásadní procesy, jejichž pochopení by bylo využitelné i na dalších řekách. Ploučnice se jeví jako ideální objekt pro další výzkum a pro odhalení mechanismů sekundárního znečištění, jež může být v budoucnu relativně nebezpečné nejen při regulacích toku.



Obrázek 35 - Znázornění principu primárního a sekundárního znečištění

(Matys Grygar a kol., 2014).

Dalším obecnějším poznatkem, plynoucím z této práce, je značná prostorová proměnlivost uložení znečištění v aktivní říční nivě. Tu jsme zjistili i na Borečku, kde celkem jednoznačně souvisí s dřívějším vývojem říční nivy. Největší znečištění v nejmocnějších vrstvách jsme našli v místech, která jsme pomocí DMT a integrovaným využitím všech použitých metod interpretovali jako bývalá koryta, zazemňovaná obzvláště rychle v období primárního znečišťování nivy Ploučnice. Tento výsledek je v souladu s dalšími pracemi, prováděnými v této době v nivě Ploučnice v oblasti Mimoně (E. Slabá, UJEP Ústí nad Labem) a Hradčan (M. Sikora, UJEP ústí nad Labem a A. Tipanová, UP Olomouc). Ve všech těchto případech se ukazuje, že klíčem k pochopení ukládání znečištění je pohled s prostorovým rozlišením na úrovni metrů až prvních desítek metrů – typicky takové rozměry mají aktivní místa, v nichž je až několikanásobně víc kontaminantů než průměrně v ploše nivy. K odhalení takových „aktivních“ míst je nutné používat terénní analytické nástroje – například právě mobilní gamaspektrometr, který se nám osvědčil v této práci. Tento přístup umožní dosažení pokroku v popisu procesů, které vedou k uložení a případně i přepracování znečištění v říčních nivách, a to v mikroměřítku (prostorovém i časovém), které se dosud vymykalo experimentálním možnostem fluviaální geomorfologie.

## 5. Závěr

Tato diplomová práce se věnovala především kontaminantům jako důsledku uranového průmyslu ve Stráži pod Ralskem a sledování jejich osudu v povodí řeky Ploučnice. Ukázala, jak lze využít znečištění jako „stopovače“ pro sedimentární pochody uvnitř nivy za použití řady instrumentálních metod. V průběhu práce se ukázalo, že podpoření geochemických metod moderními geoinformačními přístupy a geofyzikou velmi ulehčuje, zrychluje a především zpřesňuje interpretaci výsledků chemických analýz znečištěných sedimentů.

Pro vyjádření koncentrace našich zájmových prvků jsme v této práci používali *lokální faktor nabohaceni* (LEF), tedy poměr aktuální koncentrace prvku vzhledem k místnímu litogennímu pozadí. Tato funkce se pro určení bází znečištěných horizontů osvědčila jako nejúčinnější. Téměř identický průběh hloubkových profilů LEF našich zájmových prvků Ba, U, Zn a Ni a  $^{226}\text{Ra}$  v sedimentárním záznamu naznačuje, že pocházejí ze stejného zdroje.

Po detailní analýze hloubkových profilů je jasné, že rozšíření kontaminace v nivě je nerovnoměrné, a to jak do hloubky, tak plošně. Většina znečištění je vázána na terénní deprese vyplněné jemným, povodňovým sedimentem. Pomocí ERT zobrazení a DMT jsme tyto deprese vyhodnotili jako paleokoryta, jež jsou díky častému překládání koryta či zaškrcování meandrů zazeměné.

Po srovnání hloubkových profilů, odebraných o několik km níže po proudu (Majerová a kol., 2013), se ukazuje, že v povodí dochází k přepracování kontaminovaného materiálu a k následné sekundární kontaminaci, která pravděpodobně probíhá buď díky transportu v suspenzi nebo v korytových sedimentech. Zjištěná fakta ukazují Ploučnici jako řeku vhodnou pro další studium, jehož výsledky by pak bylo možné využít i na dalších meandrujících řekách.

## 6. Literatura:

- Beneš S.; 1993. Obsahy a bilance prvků ve sférách životního prostředí. I. Část – Obsahy, akumulace a kritéria hodnocení prvků v zemědělských půdách. MŽP ČR, Praha.
- Bowen H. J. M., 1979. Environmental chemistry of the elements. Academic Press, New York.
- Brandenberger J. M., Crecelius E. A., Louchouart P. 2008. Historical inputs and natural recovery rates for heavy metals and organic biomarkers in Puget Sound during the 20th century. *Environ Sci Technol* 42: 6786–6790
- Buňatová V., 1996. Kontaminace říčních a nivních sedimentů řeky Ploučnice těžkými kovy. Diplomová práce, Praha
- Datel J. V., Ekert, V., 2008. Environmental impact of mine water from chemical extraction and underground uranium mining—Straz pod Ralskem, Czech Republic. In: Rapantova, N., Hrkal, Z. (Editors), *Mine Water and the Environment, Proceedings*, pp. 197–200.
- Dědáček, K., Zabadal, S., 1991. Letecký výzkum radiační situace v okolí Stráže pod Ralskem. Nepublikováno, Geofyzika a.s. Brno, Česká republika
- Dung T. T. T., Cappuyens V., Swennen R., Phung N. K., 2013. From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2(4), 335-353.
- Faměra M., 2013. Facie a antropogenní znečištění recentních sedimentů řečiště Dřevnice a středního toku Moravy v úseku Kvasice až Spytihněv. Disertační práce, Přírodovědecká fakulta, Masarykova Univerzita, Brno, 161 str.
- Fiedler J., Novák J., 1995. Analýza chemické těžby uranu na ložisku Stráž se zvláštním zřetelem na přípravu sanace a sanaci přírodního prostředí. Díl 1: Přírodní prostředí, jeho ovlivnění, metody a postupy sanace; Kniha 1: Úvod, dobývací metoda, Diamo s.p. Stráž pod Ralskem
- Gnojek I., Dědáček K., Zabadal S., Sedlák J., 2005. Letecké geofyzikální mapování radioaktivních zátěží Liberecka. Závěrečná zpráva - Geofond Praha
- Grygar T., Světlík I., Lisá L., Koptíková L., Bajer, A., Wray D. S., Ettler V., Mihaljevič M., Nováková T., Koubová M., Novák J., Máčka Z., Smetana M., 2010. Geochemical tools for

the stratigraphic correlation of floodplain deposits of the Morava River in Straznicke Pomoravi. Czech Republic from the last millennium, *Catena* 80(2), 106-121.

Hanslík E. J., Mansfeld A. M., Šimonek P. J., 1995. Impact of the Straz uranium mine (northern Bohemia) on the river Ploucnice (pp. 604–605). Vienna: In International Atomic Energy Agency (group author), Environmental Impact of Radioactive Releases IAEA.

Hanslík E., 2010. Contamination of the Ploučnice watershed by radioactive materials from uranium mining and its change in 1992–2009 (pp. 91–104). In Hanslík E. (Ed), Proceedings of the XXI. Conference Radionuclides and Ionizing Radiation in Water Management. Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost: České Budějovice.

Hanslík E., Kalinová E., Brtvová M., Ivanovova D., Sedlářová, B., Svobodová, J., 2005. Radium isotopes in river sediments of Czech Republic. *Limnologica*, 35(3), 177–184.

Hanslík E., Mansfeld, A., Justýn, J., Moucha, V., Šimonek, P. 2002. Vliv těžby uranových rud na vývoj kontaminace hydrosféry Ploučnice v období 1966–2000. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka.

Heim S., Schwarzbauer J., 2013. Pollution revealed by sedimentary records: a review. *Environ Chem Lett*, 11:255-270

Heim S., Schwarzbauer J., Littke R., Woda C., Mangini A., 2004. Geochronology of anthropogenic pollutants in riparian wetland sediments of the Lippe River (Germany). *Org Geochem* 35(11–12):1409–1425

Hostomská V., Hostomský J., 2007. Recovery of ammonium alum from waste solutions with a varying ratio of NH<sub>4</sub> to Al in groundwater remediation after underground uranium leaching. *Journal of Hazardous Materials* 147: 342–349

Hrdoušek F., 2005. Těžké kovy v sedimentech Panenského potoka a středního toku. Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta v Praze, Univerzita Karlova, 60 str.

Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z., 2011. Geologická minulost České republiky. Academia, Praha, 436 str.

IAEA; 1976. Radiometric Reporting Methods and Calibration in Uranium Exploration. TRS No. 174, IAEA, Vienna, 72 str.

Kafka J., (Editor), 2003. Rudné a uranové hornictví České republiky. Anagram, Ostrava, Česká republika, 647 str.

Kachlík V., 2003. Geologický vývoj území České republiky; Doplněk k publikaci „Příprava hlubinného úložiště radioaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva“, SÚRAO, 65 str.

Kolář J., 2004. Distribuce vybraných těžkých kovů v sedimentech horního toku Ploučnice. Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta Praha, Univerzita Karlova, 33 str.

Kříbek B., Borovec Z., Tolar V., Podlaha J., Podlahová J., Juška L., Adam I., Blažková J., 1979. Sorpce radionuklidů na přírodní sorbenty. Nepublikovaná zpráva. Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha

Kühn J., 1996. Distribuce uranu a vybraných těžkých kovů v sedimentech údolní nivy Ploučnice. Disertační práce, Přírodovědecká fakulta Praha, Karlova Univerzita, 356 str.

Kühn P., 1997. Radioaktivní znečištění údolní nivy Ploučnice v bývalém VVP Ralsko; Bezděz 5, Okresní vlastivědné museum Česká Lípa, Czech Republic, ISBN 80-900896-4-X.

Lepka F., bez data vydání. Složení ložiskových a mimoložiskových pískovců severočeské křídové pánve. Nepublikovaný materiál ÚL ČSUP, Stráž pod Ralskem

Macklin M. G., Ridgway J., Passmore D. G., Rumsby B. T., 1994. The use of overbank sediment for geochemical mapping and contamination assessment—Results from selected English and Welsh floodplains. *Applied Geochemistry*, 9(6), 689–700.

Majerová L., Matys Grygar T., Elznicová J., Strnad L., 2013. The Differentiation between Point and Diffuse Industrial Pollution of the Floodplain of the Ploučnice River. Czech Republic, *Water Air Soil Pollut*, 224(9), DOI: 10.1007/s11270-013-1688-9.

Matys Grygar T., Elznicová J., Bábek O., Hošek M., 2014. Obtaining isochrones from pollution signals in a fluvial sediment record: A case study in a uranium-polluted floodplain of the Ploučnice River. Czech Republic. *Applied Geochemistry*, 48, 1-15.

Matys Grygar T., Nováková T., Bábek O., Elznicová J., Vadinová N., 2013. Robust assessment of moderate heavy metal contamination levels in floodplain sediments: A case study on the Jizera River, Czech Republic. *Science of the Total Environment*, 233–245.

Notebaert B., Houbrechts G., Verstraeten G., Broothaerts N., Haeckx J., Reynders M., a kol. 2011. Fluvial architecture of Belgian river systems in contrasting environments: Implications for reconstructing the sedimentation history. *Netherlands Journal of Geosciences-Geologie en Mijnbouw*, 90(1), 31–50.

Nováková T., Matys Grygar T., Bábek O., Faměra M., Mihaljevič M., Strnad L., 2013. Distinguishing regional and local sources of pollution by trace metals and magnetic particles in fluvial sediments of the Morava River. Czech Republic, *Journal of Soils and Sediments*. 13, 460–473.

Slezák J., 2000. Historie těžby uranu v oblasti Stráže pod Ralskem v severočeské křídě a hydrogeologie, Sborník geologických věd; Hydrologie, inženýrská geologie, 21. 5-36

Turekian K. K., Wedepohl K. K., 1961. Distribution of the Elements in Some Major Unies of the Earths crust. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 72, 172-202.

Vyhláška SÚJB O radiační ochraně č.307/Sb., 2002

## 7. Přílohy- primární data

Vrt MHP1:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U
MHP1 0-3	1,3	51,4	3,1	409,5	9,2	1,4	65,2	56,9	2,3	25,4	8,7
MHP1 3-6	1,9	48,9	2,8	471,4	10,0	1,5	67,8	59,8	2,4	30,3	10,1
MHP1 6-8	1,8	63,6	3,8	530,2	11,9	1,4	65,2	62,8	2,4	34,2	11,7
MHP1 8-11	1,8	64,4	3,7	553,2	11,6	1,5	68,4	67,4	2,6	33,2	11,0
MHP1 11-14	2,9	68,7	3,4	462,9	7,8	1,3	78,5	79,9	2,7	183,2	54,4
MHP1 14-17	3,3	65,2	3,1	442,2	7,1	1,4	81,1	84,2	2,8	200,4	58,1
MHP1 17-20	2,3	104,7	5,5	844,1	15,7	1,6	74,0	91,9	3,2	66,9	20,8
MHP1 20-23	3,0	101,9	5,2	702,9	12,6	1,4	75,5	92,3	3,2	152,0	46,5
MHP1 23-26	3,8	98,8	5,1	639,4	11,5	1,4	75,5	91,1	3,2	198,6	60,8
MHP1 50-52	1,9	36,0	1,9	193,5	3,6	1,1	73,3	62,9	2,1	57,7	18,1
MHP1 52-54	2,1	43,1	2,2	187,1	3,4	1,2	75,2	65,1	2,2	73,9	22,7
MHP1 54-56	1,7	32,5	1,7	171,8	3,2	1,1	73,8	64,8	2,1	46,8	14,6
MHP1 56-58	2,4	47,7	2,4	244,3	4,4	1,2	75,6	67,5	2,2	109,3	33,4
MHP1 58-60	2,1	43,1	2,2	201,4	3,7	1,1	74,3	63,2	2,1	82,2	25,4
MHP1 60-62	2,2	43,4	2,3	217,6	4,0	1,1	74,1	66,7	2,2	93,7	29,1
MHP1 62-64	2,1	42,5	2,2	206,7	3,9	1,2	73,3	59,6	2,0	74,7	23,4
MHP1 64-66	2,2	36,7	1,9	189,1	3,5	1,2	73,6	64,1	2,2	69,8	21,8
MHP1 66-68	2,6	49,6	2,5	236,8	4,2	1,3	76,1	69,8	2,4	127,1	38,6
MHP1 68-70	1,5	25,2	1,4	115,2	2,4	1,1	69,0	44,1	1,5	20,1	6,6
MHP1 70-72	1,4	23,8	1,3	105,9	2,1	1,1	70,8	46,6	1,6	22,7	7,3
MHP1 72-74	1,6	30,9	1,7	116,6	2,3	1,2	70,7	48,5	1,7	32,6	10,5
MHP1 74-76	1,5	32,0	1,7	117,1	2,3	1,2	71,1	45,9	1,6	34,1	10,9
MHP1 76-78	1,4	26,0	1,4	111,8	2,3	1,2	69,8	47,0	1,6	30,9	10,0
MHP1 78-80	1,5	54,1	2,8	162,1	3,0	1,3	74,3	56,6	2,1	207,1	64,2
MHP1 80-82	1,7	33,6	1,8	128,8	2,5	1,1	71,7	54,2	1,8	48,5	15,5
MHP1 82-84	1,5	25,1	1,3	121,1	2,3	1,1	72,1	56,0	1,9	21,5	6,8
MHP1 84-86	1,5	25,6	1,4	89,2	1,8	1,1	70,9	43,6	1,5	14,8	4,8
MHP1 86-88	1,3	24,6	1,3	103,1	2,0	1,1	72,5	53,3	1,8	9,9	3,1
MHP1 88-90	1,3	23,1	1,2	97,8	1,9	1,0	73,1	51,1	1,7	4,2	1,3
MHP1 90-92	1,2	29,5	1,5	89,0	1,7	1,0	73,8	47,1	1,6	4,0	1,2
MHP1 92-94	1,4	29,6	1,5	114,9	2,1	1,0	75,3	55,1	1,8	7,4	2,3
MHP1 94-96	1,1	25,1	1,3	91,1	1,7	1,1	72,8	49,4	1,6	4,6	1,4
MHP1 96-98	1,0	22,0	1,2	65,9	1,3	1,1	72,0	44,0	1,6	2,2	0,7
MHP1 98-100	1,0	18,9	1,0	72,3	1,4	0,9	72,5	40,1	1,4	3,0	1,0
MHP1 100-102	1,2	21,0	1,1	68,9	1,4	1,0	71,0	39,7	1,4	2,0	0,6
MHP1 102-104	1,2	20,3	1,2	61,2	1,3	1,1	67,0	39,0	1,4	2,4	0,8
MHP1 104-106	1,0	15,6	1,0	38,6	1,0	1,0	59,4	27,4	1,1	3,3	1,2
MHP1 106-108	0,7	18,3	1,0	68,4	1,3	1,0	71,3	42,4	1,4	2,1	0,7
MHP1 108-110	1,2	23,0	1,3	60,2	1,3	1,0	66,5	39,6	1,4	2,1	0,7
MHP1 110-112	0,9	14,8	1,0	36,8	1,0	1,1	58,1	25,0	1,1	2,3	0,9
MHP1 112-114	1,1	15,8	1,0	35,7	0,9	0,9	61,6	23,3	1,0	2,9	1,0
MHP1 114-116	0,8	15,3	0,9	45,9	1,0	1,1	65,4	30,7	1,2	3,9	1,3
MHP1 116-118	0,9	10,7	0,6	29,0	0,7	0,9	64,6	20,3	0,8	2,7	0,9
MHP1 118-120	1,2	11,1	0,6	32,4	0,7	1,0	68,1	20,5	0,9	2,0	0,7
MHP1 120-122	0,9	9,3	0,6	26,0	0,6	0,8	63,0	18,6	0,8	3,3	1,2
MHP1 122-124	1,0	12,3	0,7	24,5	0,5	0,9	65,7	19,1	0,8	2,2	0,8
MHP1 124-126	0,9	12,1	0,7	26,1	0,6	0,9	67,5	18,1	0,8	3,1	1,0
MHP1 126-128	0,9	9,6	0,6	19,5	0,5	0,6	61,8	15,9	0,7	2,9	1,0
MHP1 128-130	1,0	12,6	0,7	25,7	0,5	0,8	69,2	21,0	0,9	2,0	0,6
MHP1 130-135	1,1	13,2	0,8	28,7	0,7	0,9	62,7	19,0	0,8	2,8	1,0
MHP1 135-140	0,9	12,9	0,8	27,0	0,7	0,8	60,1	17,3	0,8	1,7	0,6
MHP1 140-145	1,0	9,1	0,5	31,4	0,7	1,0	67,4	20,9	0,9	2,7	0,9
MHP1 145-150	0,8	12,2	0,7	30,8	0,6	0,8	68,1	19,1	0,8	1,7	0,6
MHP1 150-155	0,9	9,6	0,6	35,3	0,8	1,0	67,5	19,5	0,8	4,0	1,3
MHP1 155-160	0,9	9,9	0,5	27,6	0,5	0,9	71,9	17,5	0,7	4,1	1,3
MHP1 160-165	0,7	8,2	0,5	29,3	0,6	0,8	69,5	17,3	0,7	3,9	1,3
MHP1 165-170	1,0	10,7	0,6	31,5	0,7	1,1	64,9	18,1	0,8	3,5	1,2
MHP1 170-175	1,3	16,2	1,0	34,2	0,9	1,0	60,8	16,7	0,7	4,2	1,5
MHP1 175-180	0,9	13,4	0,8	38,2	0,8	1,2	67,2	21,4	0,9	4,0	1,3
MHP1 180-185	0,9	16,2	0,9	45,8	0,9	1,4	71,7	20,7	0,8	5,2	1,7
MHP1 185-190	1,0	9,2	0,5	45,0	0,9	1,7	68,2	22,0	0,9	1,7	0,5
MHP1 190-195	1,4	13,7	1,0	36,7	1,1	1,3	54,8	17,9	0,8	3,2	1,2
MHP1 195-200	1,0	20,5	1,7	58,6	2,2	1,0	45,9	16,3	0,8	2,2	1,0
MHP1 200-205	0,9	48,0	5,1	86,0	4,3	1,2	36,8	23,2	1,5	3,0	1,5
MHP1 205-210	1,2	19,4	4,3	10,0	1,3	1,4	17,7	13,7	1,2	2,6	1,9
MHP1 212-219	0,8	31,4	4,6	21,9	1,7	1,4	26,3	20,7	1,6	2,7	1,7

## Vrt MHP2:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U	<sup>210</sup> Pb (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (ppm eU)
MHP2 0-3	2,4	105,8	4,9	442,8	6,9	1,9	83,0	90,3	3,0	167,3	47,6	1907,8	175,0
MHP2 3-6	3,7	112,4	4,9	405,9	5,7	1,3	88,3	97,7	3,0	240,8	65,2		
MHP2 6-9	3,8	124,4	5,5	438,3	6,2	1,2	87,8	95,7	3,0	293,4	79,8	3929,0	422,3
MHP2 9-12	6,2	135,4	5,7	487,8	6,5	1,1	91,4	97,6	3,1	461,5	121,6	6739,7	670,3
MHP2 12-15	5,2	100,9	4,5	315,1	4,5	1,2	87,3	102,3	3,2	334,1	91,3		
MHP2 15-17	1,5	68,7	3,5	168,7	3,0	0,9	76,4	70,0	2,3	31,6	9,6	386,8	43,9
MHP2 17-20	1,3	65,5	3,3	148,1	2,6	1,2	76,3	73,4	2,3	14,6	4,4	221,9	20,3
MHP2 20-25	4,1	96,4	4,4	493,4	7,3	1,9	85,8	97,2	3,2	309,9	85,9	4780,9	474,5
MHP2 25-30	3,5	93,9	4,1	482,6	6,9	1,3	87,8	96,2	3,0	244,3	66,5	3346,3	363,7
MHP2 30-35	3,7	86,2	3,9	424,5	6,2	1,4	86,5	94,2	2,9	243,5	67,0		
MHP2 35-40	2,8	90,5	4,2	543,3	8,3	1,8	84,2	84,1	2,9	157,3	44,2	2878,4	289,5
MHP2 40-45	3,6	109,2	5,9	426,5	8,4	1,2	71,3	83,0	2,6	150,4	48,1		
MHP2 45-50	2,6	78,2	3,7	368,0	5,8	1,4	82,4	84,7	2,7	151,7	43,4		
MHP2 50-55	3,0	65,7	3,0	309,0	4,6	1,4	84,9	83,1	2,6	175,2	48,9	2641,7	255,5
MHP2 55-60	1,7	37,7	1,8	148,5	2,5	1,3	79,4	64,4	2,1	60,7	17,9	202,3	19,9
MHP2 60-65	1,4	26,3	1,3	97,7	1,6	1,1	80,0	55,6	1,8	8,3	2,4		
MHP2 65-70	1,3	28,7	1,4	106,2	1,7	1,0	80,4	61,7	2,0	2,8	0,8	46,7	6,3
MHP2 70-75	1,1	29,3	1,3	81,6	1,2	1,1	85,0	40,0	1,2	4,6	1,3		
MHP2 75-80	1,0	16,6	1,0	36,0	0,8	0,7	66,9	24,6	0,9	3,2	1,1		
MHP2 80-85	0,8	15,1	0,9	24,7	0,6	0,6	63,3	17,6	0,7	0,2	0,1		
MHP2 85-90	1,0	12,1	0,9	20,9	0,6	0,7	52,7	17,7	0,8	0,2	0,1		
MHP2 90-95	0,9	10,5	0,8	21,9	0,7	0,8	53,0	19,5	0,9	0,8	0,3		
MHP2 95-100	0,9	11,5	0,7	32,5	0,8	0,8	60,1	19,6	0,9	1,6	0,6		
MHP2 100-105	0,9	15,7	0,9	44,0	0,9	0,8	67,0	22,9	0,9	3,0	1,0		
MHP2 105-110	1,0	14,2	0,9	33,7	0,8	0,7	63,1	20,3	0,8	2,4	0,8		
MHP2 110-115	0,9	9,9	0,6	36,2	0,8	0,9	65,5	21,3	0,9	4,3	1,5		
MHP2 115-120	0,9	16,0	0,9	39,3	0,8	0,8	71,0	19,4	0,7	2,5	0,8		
MHP2 120-125	0,9	17,7	1,0	39,5	0,8	1,1	69,5	23,4	0,9	2,0	0,7		
MHP2 125-130	1,1	18,2	0,9	45,1	0,8	1,0	76,9	22,7	0,8	3,8	1,2		
MHP2 130-135	0,9	14,5	0,7	51,7	0,8	1,3	83,6	24,5	0,9	2,6	0,7		
MHP2 135-140	0,9	14,0	0,7	45,4	0,8	1,4	75,9	27,1	1,0	4,9	1,5		
MHP2 140-145	0,8	15,3	0,8	52,1	0,9	1,2	75,5	24,1	0,9	3,3	1,0		
MHP2 145-150	0,9	13,9	0,8	56,8	1,2	1,3	69,3	23,6	0,9	4,6	1,5		
MHP2 150-155	1,1	18,9	1,3	57,5	1,7	0,9	54,5	16,1	0,8	4,3	1,7		
MHP2 155-160	1,0	33,2	2,3	70,2	2,0	0,9	55,1	19,0	0,9	2,6	1,0		
MHP2 160-165	1,2	50,6	4,4	51,3	2,0	0,5	44,8	16,7	0,9	1,2	0,5		
MHP2 165-170	0,5	16,0	3,2	6,2	0,7	0,6	19,6	10,9	0,9	1,0	0,7		
MHP2 170-175	1,2	27,1	2,5	30,6	1,3	0,6	41,4	15,3	0,9	1,4	0,6		
MHP2 175-180	1,0	7,6	1,3	8,6	0,8	0,5	22,5	11,2	0,9	1,1	0,7		
MHP2 180-185	0,9	19,8	1,8	29,1	1,2	0,6	41,7	14,8	0,9	1,1	0,5		
MHP2 185-190	0,8	7,6	1,0	12,2	0,9	0,6	28,0	11,6	0,8	0,8	0,5		
MHP2 190-195	0,7	12,7	1,2	19,5	0,9	0,5	39,8	13,5	0,8	2,8	1,3		
MHP2 195-200	1,1	15,4	1,6	19,9	1,0	0,6	37,7	14,0	0,9	1,3	0,6		

## Vrt MHP3:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U	Rb ppm
MHP3 0-5	1,4	19,7	2,0	179,4	8,4	1,6	36,1	2,1	5,2	2,6	38,9
MHP3 0-10	1,5	22,5	2,6	181,8	10,2	1,4	32,3	1,8	6,8	3,6	34,1
MHP3 5-10	0,9	26,3	3,1	181,7	10,9	1,5	33,0	1,9	11,0	6,0	32,5
MHP3 10-15	2,9	50,4	3,5	385,3	10,7	1,5	59,8	2,5	64,2	24,4	56,4
MHP3 15-20	4,0	46,5	3,0	280,1	7,1	1,5	59,4	2,5	94,4	34,3	60,1
MHP3 20-25	0,9	19,6	2,0	90,1	4,4	1,4	40,3	2,1	4,8	2,4	37,6
MHP3 25-30	1,5	13,3	1,6	56,7	3,4	1,6	36,7	2,1	1,5	0,8	32,2
MHP3 30-35	0,9	13,5	1,6	49,3	3,0	1,3	34,6	2,0	3,0	1,6	32,3
MHP3 35-40	1,1	14,1	1,6	55,4	3,1	1,0	36,2	1,9	2,3	1,2	34,2
MHP3 40-45	1,2	14,7	1,8	31,1	2,0	1,1	32,1	2,0	3,3	1,8	31,0
MHP3 45-50	1,2	12,6	1,6	23,6	1,5	1,1	32,9	2,0	1,3	0,7	30,4
MHP3 50-55	1,2	6,4	1,0	26,9	2,2	1,3	25,3	1,6	1,3	0,8	25,5
MHP3 55-60	1,6	8,7	1,3	18,3	1,5	2,1	23,9	1,6	2,2	1,4	25,2
MHP3 60-65	1,0	11,5	1,9	15,7	1,4	1,6	24,3	1,6	1,9	1,2	23,7
MHP3 65-70	1,1	10,4	1,6	16,7	1,4	2,1	22,8	1,5	1,8	1,1	24,8
MHP3 70-75	0,6	13,4	2,1	14,7	1,3	1,8	22,0	1,4	1,9	1,2	24,5
MHP3 75-80	2,2	7,8	0,9	19,2	1,1	2,7	35,5	2,1	2,3	1,2	32,8
MHP3 80-85	1,1	10,9	1,7	16,8	1,4	1,6	25,4	1,6	1,6	1,0	25,7
MHP3 85-90	1,3	11,6	1,3	24,5	1,3	1,6	30,5	1,6	2,0	1,0	35,7

Vrt MHP4:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U	Rb ppm
MHP4 0-3	2,0	99,4	4,6	582,9	8,9	1,4	79,5	2,1	92,5	26,0	84,1
MHP4 3-6	2,4	142,3	6,9	763,7	12,7	1,5	87,8	2,4	153,0	45,0	79,5
MHP4 6-9	3,0	165,7	7,7	819,3	12,7	1,5	100,7	2,3	223,1	63,2	83,4
MHP4 9-12	3,4	170,8	7,2	757,7	9,9	1,5	108,1	2,5	304,5	79,4	92,6
MHP4 12-15	3,3	129,4	6,3	613,5	10,1	1,5	97,5	2,4	203,8	59,6	80,0
MHP4 15-18	2,1	80,9	3,9	329,4	5,4	1,1	89,2	2,1	118,5	34,5	80,5
MHP4 18-21	1,3	47,8	2,4	222,3	4,0	0,9	83,4	1,9	31,6	9,6	75,8
MHP4 21-24	1,9	70,5	3,5	278,4	4,8	0,9	78,5	1,9	112,8	33,6	78,1
MHP4 24-27	2,0	55,9	3,0	247,8	4,8	1,3	76,2	2,0	118,2	37,6	71,7
MHP4 27-30	2,4	83,4	4,2	351,2	6,1	1,3	84,5	2,0	422,5	126,9	77,4
MHP4 30-33	1,1	30,3	1,8	101,7	2,2	1,2	44,2	1,1	4,6	1,6	66,3
MHP4 55-60	1,1	21,4	1,2	55,0	1,1	0,9	32,3	0,8	3,0	1,0	69,0
MHP4 60-65	0,9	22,9	1,3	59,3	1,2	1,0	35,3	0,9	2,1	0,7	70,1
MHP4 65-70	1,2	24,0	1,3	61,4	1,2	1,0	36,0	0,9	3,8	1,2	70,5
MHP4 70-75	1,0	21,2	1,2	55,2	1,2	1,1	34,4	0,9	3,0	1,0	66,5
MHP4 75-80	0,9	18,5	1,0	65,7	1,3	1,1	34,8	0,8	3,5	1,1	71,2
MHP4 80-85	1,3	18,5	1,0	60,1	1,2	1,0	37,3	0,9	3,0	1,0	69,5
MHP4 85-90	1,2	19,3	1,1	64,1	1,3	1,1	35,7	0,9	2,5	0,8	70,1
MHP4 90-95	1,0	18,1	1,0	54,4	1,1	1,0	31,7	0,8	2,2	0,7	70,6
MHP4 95-100	1,3	14,8	0,8	46,6	1,0	0,8	29,9	0,8	3,2	1,0	68,1
MHP4 100-105	1,3	16,5	0,9	64,0	1,4	2,0	40,6	1,0	2,7	0,9	67,9
MHP4 105-110	1,1	25,5	1,3	64,0	1,1	1,4	48,3	1,1	3,7	1,1	77,8
MHP4 110-115	1,0	22,1	1,1	58,7	1,0	1,3	41,8	1,0	3,5	1,0	78,0
MHP4 115-120	0,9	24,0	1,1	64,9	1,0	1,0	28,1	0,7	3,8	1,1	83,4
MHP4 120-125	1,0	27,4	1,2	71,4	1,0	0,9	30,0	0,7	1,9	0,5	86,2
MHP4 125-130	1,2	22,1	1,0	79,6	1,2	0,9	29,2	0,7	3,0	0,8	86,0
MHP4 130-135	0,9	29,4	1,2	85,4	1,1	0,7	28,5	0,6	5,4	1,4	94,2
MHP4 135-140	0,9	25,8	1,2	76,1	1,1	0,7	27,7	0,7	2,5	0,7	86,2
MHP4 135-140	1,1	30,9	1,3	76,7	1,0	0,7	27,6	0,6	2,7	0,7	90,2
MHP4 140-145	0,9	26,7	1,1	72,6	0,9	0,7	29,5	0,7	2,6	0,7	92,8
MHP4 150-155	0,9	27,1	1,2	79,4	1,1	0,7	28,5	0,7	3,7	1,0	90,9
MHP4 155-158	1,2	26,7	1,2	72,6	1,1	0,7	27,0	0,7	1,3	0,4	84,3
MHP4 158-161	1,0	25,5	1,1	72,1	1,0	0,7	30,0	0,7	2,3	0,6	89,3
MHP4 161-170	1,1	17,2	1,2	60,7	1,6	0,8	21,9	0,8	2,3	0,9	57,3
MHP4 170-175	0,6	10,9	1,0	33,1	1,4	0,8	19,9	1,0	2,9	1,3	42,5
MHP4 175-180	1,5	7,3	1,1	16,6	1,3	0,7	21,0	2,0	4,3	2,7	25,7
MHP4 180-185	1,0	6,9	1,2	5,2	0,5	0,5	14,5	1,4	3,3	2,3	21,5
MHP4 185-190	1,0	4,4	1,0	10,3	1,3	0,9	12,0	1,3	3,2	2,4	17,8
MHP4 190-195	0,9	4,6	0,6	14,8	1,0	0,6	13,9	0,9	1,9	1,1	29,2
MHP4 195-200	1,0	10,2	1,5	14,0	1,1	0,8	23,7	2,4	7,3	4,4	27,0
MHP4 200-205	0,9	12,3	1,6	29,8	1,9	1,0	16,8	1,3	3,3	1,8	30,8
MHP4 205-210	0,6	9,2	1,3	16,3	1,2	0,8	17,5	1,3	2,7	1,6	27,4
MHP4 210-215	1,3	6,3	1,8	5,9	1,0	0,9	20,5	2,8	6,9	5,6	14,0
MHP4 215-220	0,9	9,6	1,2	18,4	1,2	0,9	18,9	1,3	3,5	1,9	31,4
MHP4 220-225	1,0	10,2	1,5	13,4	1,0	0,8	20,7	1,8	4,8	2,9	27,2
MHP4 225-230	1,1	25,0	1,3	91,6	1,7	0,9	29,6	0,9	3,0	0,9	73,8

### Vrt MHP5:

Hlubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	LEF Fe	U ppm	LEF U
MHP5 0-3	0,8	12,7	1,1	36,8	1,3	46,7	39,9	2,0	0,8	1,7	0,7
MHP5 3-6	1,5	11,4	1,0	34,3	1,3	45,6	36,4	1,8	0,8	2,2	1,0
MHP5 6-9	0,9	10,8	0,9	34,7	1,2	47,8	36,3	1,8	0,8	1,7	0,7
MHP5 9-12	0,7	7,1	0,6	37,9	1,3	49,2	33,1	1,6	0,7	2,7	1,1
MHP5 12-15	0,9	8,4	0,7	35,7	1,4	45,0	31,2	1,5	0,8	1,8	0,8
MHP5 15-18	1,1	11,3	1,0	40,5	1,6	43,4	29,0	1,4	0,7	2,1	1,0
MHP5 18-21	0,8	10,7	1,1	48,5	2,4	36,9	25,4	1,4	0,8	1,6	0,8
MHP5 21-24	1,3	13,0	1,5	48,5	2,7	34,0	22,1	1,2	1,0	1,5	0,8
MHP5 24-27	1,6	11,3	1,3	29,4	1,7	33,9	20,8	1,1	0,8	1,3	0,7
MHP5 27-30	1,3	9,1	0,9	27,9	1,4	37,6	19,5	1,0	0,8	2,1	1,0
MHP5 30-33	1,0	12,4	1,5	24,7	1,4	32,9	18,2	1,0	1,1	2,0	1,1
MHP5 33-36	1,2	10,8	1,3	27,0	1,6	32,6	17,5	0,9	0,7	1,5	0,8
MHP5 36-39	0,8	20,8	2,5	32,0	1,9	32,7	17,5	0,8	0,7	1,5	0,8
MHP5 39-42	0,8	7,4	0,9	24,5	1,5	31,7	15,4	0,8	0,9	1,9	1,1
MHP5 42-45	1,2	10,0	1,2	19,0	1,1	33,5	15,2	0,8	0,7	1,4	0,8
MHP5 45-50	1,6	11,3	1,5	16,7	1,1	30,1	13,8	0,8	1,1	1,7	1,0
MHP5 50-55	0,6	9,8	1,2	18,0	1,2	30,3	13,7	0,8	0,7	2,1	1,2
MHP5 55-60	1,4	12,4	1,4	17,1	1,0	33,5	12,8	0,8	1,0	1,7	0,9
MHP5 60-65	0,7	11,6	1,3	16,5	0,9	34,6	14,6	0,8	0,9	1,5	0,8

### Vrt MHP6:

Hlubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U
MHP6 0-2	1,6	47,1	3,0	390,6	9,8	1,4	60,4	51,3	2,2	32,9	11,9
MHP6 2-4	1,5	49,0	3,1	412,2	10,0	1,4	61,8	55,2	2,3	45,9	16,3
MHP6 4-6	1,8	61,4	3,7	442,7	10,3	1,5	63,6	56,7	2,3	52,6	18,3
MHP6 6-8	2,6	67,1	4,0	512,9	11,4	1,4	65,7	63,0	2,5	59,2	20,1
MHP6 8-11	1,7	59,1	3,7	468,3	11,1	1,4	62,8	59,0	2,4	48,1	16,9
MHP6 11-14	4,9	64,7	3,9	445,1	10,2	1,4	64,2	61,0	2,4	50,8	17,5
MHP6 14-17	7,9	86,2	4,5	624,8	11,3	1,5	75,0	82,5	2,9	122,3	37,6
MHP6 17-20	5,8	103,9	4,6	714,3	10,4	1,2	86,8	79,2	2,5	168,5	46,2
MHP6 20-23	4,9	116,6	5,8	728,5	12,6	1,2	77,4	73,2	2,5	189,4	56,9
MHP6 23-26	5,2	94,6	4,4	595,4	9,3	1,2	82,8	72,5	2,4	276,7	78,8
MHP6 26-29	1,2	32,0	2,3	155,0	4,7	1,4	53,3	40,3	1,7	26,2	10,4
MHP6 29-32	2,3	28,2	1,6	161,3	3,4	1,3	67,4	57,1	2,2	13,3	4,4
MHP6 32-35	1,0	26,5	1,5	124,2	2,6	1,3	68,2	52,8	1,9	4,2	1,4
MHP6 35-38	1,4	32,4	1,9	124,9	2,7	1,3	67,7	53,8	1,9	3,7	1,2
MHP6 53-60	0,9	19,5	1,2	72,3	1,7	1,3	62,5	43,7	1,6	2,8	1,0
MHP6 60-65	0,9	17,1	1,4	39,8	1,4	1,5	48,0	31,4	1,4	1,3	0,6
MHP6 65-70	2,3	19,6	1,2	73,8	1,8	1,1	61,1	42,3	1,6	2,8	1,0
MHP6 70-75	0,9	22,4	1,3	64,7	1,5	1,2	65,0	39,3	1,5	3,7	1,3
MHP6 75-80	1,2	10,8	1,2	26,2	1,4	2,6	34,7	30,6	1,6	1,3	0,7
MHP6 80-85	0,8	9,9	1,0	24,9	1,2	1,4	38,2	23,0	1,2	4,1	2,0
MHP6 85-93	0,5	12,9	1,2	21,5	0,9	1,3	41,2	19,9	1,1	1,8	0,8
MHP6 93-97	0,8	13,3	1,0	36,6	1,2	1,1	50,2	24,8	1,1	3,1	1,3
MHP6 97-104	1,9	17,5	1,2	50,7	1,4	0,8	57,9	21,4	0,8	0,4	0,2
MHP6 104-110	1,0	19,2	1,2	57,0	1,4	0,7	62,0	21,8	0,8	1,7	0,6
MHP6 110-116	1,7	26,5	1,4	71,1	1,3	0,8	74,2	24,2	0,9	0,0	0,0
MHP6 116-122	1,0	5,1	1,1	12,8	1,6	11,6	18,2	11,1	0,8	2,5	1,9
MHP6 122-128	0,4	13,3	1,4	19,4	1,0	1,2	37,5	16,7	0,9	2,7	1,4
MHP6 128-134	0,4	15,7	1,5	17,5	0,8	0,8	40,9	16,8	0,8	0,9	0,4
MHP6 136-146	0,6	10,7	1,8	10,3	0,9	0,8	23,7	12,9	0,8	1,9	1,3
MHP6 146-156	1,1	11,2	1,9	10,5	1,0	1,0	22,9	12,9	0,9	0,8	0,6
MHP6 156-166	0,4	8,4	1,5	9,4	1,0	1,1	21,4	13,2	1,0	1,4	1,0
MHP6 166-176	0,5	11,1	1,8	13,6	1,2	0,9	23,5	13,9	1,0	1,2	0,8
MHP6 208-214	0,8	17,1	1,6	31,1	1,3	0,9	42,0	16,9	1,0	0,5	0,2

## Vrt MHP7:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U
MHP7 0-2	1,0	46,4	4,1	301,0	12,1	1,6	43,5	42,2	2,1	22,2	10,1
MHP7 2-4	1,2	46,3	4,6	265,8	12,4	1,6	39,1	38,1	2,0	16,4	8,0
MHP7 4-6	1,0	50,9	4,4	354,5	13,8	1,7	44,5	48,1	2,4	22,8	10,2
MHP7 6-8	2,0	56,6	4,2	448,5	13,7	1,6	52,8	54,6	2,3	37,6	15,0
MHP7 8-10	1,9	67,4	5,0	464,4	14,4	1,7	52,4	57,1	2,5	40,9	16,4
MHP7 10-12	2,9	79,3	5,5	497,7	13,9	1,7	56,2	62,0	2,7	52,7	20,1
MHP7 12-14	3,1	85,2	5,3	596,7	14,2	1,6	62,7	65,7	2,6	103,9	36,6
MHP7 14-17	2,9	102,7	6,6	615,2	15,4	2,1	60,7	73,3	2,9	91,7	33,1
MHP7 17-20	4,3	102,2	5,0	558,6	9,5	1,3	78,5	68,8	2,4	142,9	42,5
MHP7 20-23	8,8	76,1	3,9	354,8	6,3	1,2	76,1	81,9	2,9	299,7	91,1
MHP7 23-26	6,3	56,1	2,7	297,3	4,7	1,2	81,9	91,0	3,0	215,5	62,0
MHP7 26-29	3,0	33,7	2,1	164,4	3,8	1,4	63,5	77,3	2,9	51,2	17,9
MHP7 29-32	1,6	28,8	1,8	99,9	2,4	1,0	61,9	56,7	2,2	3,6	1,3
MHP7 32-35	1,0	21,1	1,2	92,9	2,1	1,0	65,5	55,5	2,0	2,5	0,9
MHP7 35-38	1,6	28,4	1,6	83,4	1,8	0,9	67,8	50,8	1,8	2,8	0,9
MHP7 38-42	1,3	23,0	1,5	94,8	2,4	1,5	61,0	58,5	2,3	6,0	2,1
MHP7 42-46	1,2	23,7	1,4	80,8	1,8	1,2	65,2	56,8	2,1	3,2	1,1
MHP7 46-50	1,5	23,8	1,3	80,7	1,6	0,9	69,8	55,0	2,0	1,5	0,5
MHP7 50-54	1,1	21,8	1,2	71,0	1,4	0,7	71,6	49,4	1,8	2,3	0,7
MHP7 54-58	1,1	32,7	2,0	72,0	1,7	1,1	64,2	48,8	1,8	3,2	1,1
MHP7 54-58	1,2	33,2	1,9	82,3	1,7	1,0	68,2	52,6	1,9	3,3	1,1
MHP7 58-62	1,0	21,9	1,3	61,9	1,4	1,1	64,5	49,1	1,8	3,1	1,1
MHP7 58-62	1,4	20,9	1,2	66,4	1,4	1,0	69,0	45,0	1,7	3,2	1,1
MHP7 62-65	1,1	25,4	1,5	90,8	2,1	1,1	64,5	53,0	2,0	3,0	1,0
MHP7 62-65	1,0	17,4	1,1	50,1	1,2	1,0	62,3	30,1	1,1	3,4	1,2
MHP7 65-68	1,3	22,8	1,4	73,0	1,6	1,1	65,3	50,1	1,9	2,7	0,9
MHP7 68-71	1,2	30,0	1,7	75,3	1,6	1,0	66,8	48,7	1,8	4,1	1,4
MHP7 71-74	1,4	21,8	1,3	71,2	1,6	1,1	64,8	47,7	1,7	2,5	0,8
MHP7 74-77	1,2	20,6	1,2	73,7	1,6	1,1	65,6	48,6	1,8	4,3	1,5
MHP7 77-81	1,3	21,0	1,2	68,1	1,5	1,0	65,5	46,6	1,7	2,6	0,9
MHP7 81-85	1,4	24,2	1,5	61,4	1,4	1,0	64,5	41,6	1,5	3,3	1,1
MHP7 85-89	1,2	24,1	1,3	77,1	1,5	0,9	72,2	50,8	1,8	2,0	0,6
MHP7 89-94	1,4	19,4	1,1	60,6	1,3	1,0	66,1	43,8	1,6	2,9	1,0
MHP7 94-99	1,2	29,2	1,7	58,1	1,3	1,0	65,7	38,4	1,4	3,0	1,0
MHP7 99-104	1,5	28,3	1,7	50,4	1,2	1,1	62,9	33,6	1,2	4,5	1,6
MHP7 104-107	1,1	20,3	1,3	44,6	1,1	1,0	62,3	31,7	1,2	3,0	1,0
MHP7 110-116	1,0	18,5	1,1	46,9	1,1	1,0	62,5	25,7	1,0	2,5	0,9
MHP7 116-122	0,7	17,9	1,2	20,5	0,6	0,8	55,5	21,9	0,9	2,0	0,8
MHP7 122-128	1,0	11,8	1,0	20,9	0,7	1,0	47,8	20,3	0,8	2,7	1,2
MHP7 128-134	0,6	31,3	2,4	16,9	0,6	0,8	49,9	21,2	0,9	2,3	1,0
MHP7 134-140	0,5	12,1	1,1	15,8	0,7	0,6	40,9	13,7	0,7	1,7	0,8

## MHP8:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U
MHP8 0-4	1,7	60,7	3,5	475,5	10,3	1,4	66,6	59,0	2,3	52,9	17,8
MHP8 4-7	1,7	59,2	3,4	500,9	10,7	1,4	67,5	59,0	2,3	53,8	17,9
MHP8 7-10	1,8	70,8	3,8	581,4	11,2	1,4	72,1	69,4	2,6	81,9	26,0
MHP8 10-13	2,2	74,3	4,1	584,1	11,6	1,4	70,7	63,4	2,3	81,4	26,2
MHP8 13-16	3,5	108,2	5,5	751,9	13,3	1,5	76,3	76,3	2,6	170,5	51,8
MHP8 16-19	2,9	85,0	4,4	603,4	11,0	1,3	75,0	75,7	2,5	127,4	39,2
MHP8 19-22	3,6	88,5	4,6	552,7	10,0	1,4	75,2	72,6	2,4	149,9	46,0
MHP8 22-25	8,2	147,9	7,8	816,2	15,2	1,7	73,9	81,0	2,6	303,9	94,5
MHP8 25-30	3,9	79,2	3,8	417,1	6,7	1,3	81,0	80,1	2,6	166,5	48,3
MHP8 47-52	1,3	24,5	1,2	104,0	1,8	1,0	76,2	65,5	2,1	3,5	1,1
MHP8 52-57	1,3	29,3	1,5	98,2	1,8	1,0	75,5	66,7	2,2	3,8	1,2
MHP8 57-62	1,2	28,1	1,4	93,9	1,7	1,1	76,5	68,8	2,2	3,1	0,9
MHP8 62-67	1,2	25,5	1,3	109,3	2,0	1,0	74,1	65,4	2,1	2,5	0,8
MHP8 67-70	0,9	25,8	1,3	97,4	1,7	1,0	76,1	63,6	2,0	2,9	0,9
MHP8 70-75	1,2	30,7	1,6	101,2	1,8	1,1	74,7	62,0	2,0	2,9	0,9
MHP8 75-80	1,3	24,1	1,3	75,5	1,4	1,2	73,4	63,0	2,1	1,8	0,6
MHP8 80-85	0,9	19,3	1,1	77,4	1,5	1,3	70,9	57,4	1,9	3,0	1,0
MHP8 85-90	1,2	23,2	1,2	81,7	1,5	1,1	76,2	68,5	2,2	2,5	0,8
MHP8 90-95	1,2	26,7	1,4	70,0	1,3	1,2	74,9	73,3	2,4	3,5	1,1
MHP8 95-100	0,9	23,5	1,2	64,8	1,1	1,1	78,5	71,6	2,3	4,5	1,3
MHP8 100-105	1,1	27,9	1,4	63,2	1,1	1,2	76,3	52,9	1,7	3,0	0,9
MHP8 105-110	1,0	20,7	1,2	55,8	1,1	1,5	69,4	47,1	1,6	2,5	0,8
MHP8 110-115	1,1	18,3	1,1	53,0	1,2	1,7	65,8	48,1	1,7	3,7	1,3
MHP8 115-120	1,0	22,8	1,1	65,7	1,1	1,1	79,1	33,9	1,1	3,6	1,1
MHP8 120-125	1,1	21,6	1,0	66,8	1,1	1,0	81,3	31,8	1,0	3,1	0,9
MHP8 125-131	1,3	24,1	1,1	69,5	1,1	1,0	83,8	35,5	1,2	3,8	1,1
MHP8 131-136	1,2	26,7	1,2	89,0	1,3	0,7	88,0	26,8	0,9	3,8	1,0
MHP8 136-141	1,3	26,1	1,1	77,9	1,1	0,6	90,6	23,9	0,8	2,3	0,6
MHP8 141-146	1,4	20,2	0,9	60,5	0,8	0,6	89,1	22,7	0,7	2,5	0,7

Vrt MHP9:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U	<sup>210</sup> Pb [Bq/kg]	<sup>226</sup> Ra [ppm eU]
MHP9 0-3	3,2	144,8	7,2	1004,1	17,0	1,6	78,5	79,1	2,6	158,1	46,9	2664,1	301,9
MHP9 3-6	3,7	146,9	7,0	1096,7	17,5	1,6	81,6	86,6	2,8	190,0	54,8	3272,5	350,2
MHP9 6-9	3,9	153,4	7,3	1080,8	17,4	1,5	81,3	86,4	2,7	191,8	55,4	2847,5	285,2
MHP9 9-12	4,1	162,9	8,0	1118,6	18,7	1,6	79,3	88,7	2,8	205,4	60,5	3797,9	383,9
MHP9 12-15	4,6	154,1	7,7	950,8	16,4	1,6	77,6	95,3	3,0	248,7	74,5	5198,2	558,6
MHP9 15-18	7,5	148,7	7,8	829,0	15,3	1,7	74,2	116,2	3,6	344,8	107,0	8461,0	871,1
MHP9 18-21	3,0	101,9	4,7	562,0	8,6	1,1	84,2	84,3	2,7	138,5	39,0	3408,1	354,7
MHP9 21-24	1,1	58,9	2,9	365,2	6,1	1,1	79,0	74,5	2,4	6,5	1,9	146,0	12,6
MHP9 24-27	1,3	38,8	1,9	225,2	3,9	1,1	77,6	65,3	2,1	3,8	1,1	86,1	8,0
MHP9 30-33	1,1	30,0	1,6	189,2	3,5	1,1	73,5	74,6	2,4	2,1	0,7	66,5	8,1
MHP9 33-36	1,1	27,1	1,4	170,6	3,2	1,3	73,6	81,7	2,7	3,1	1,0	85,6	6,9
MHP9 36-39	1,0	29,0	1,5	182,1	3,5	1,6	72,9	88,1	2,9	3,9	1,2	58,9	6,2
MHP9 39-41	1,2	33,6	1,7	274,4	5,0	1,3	74,6	53,0	1,8	5,0	1,5		
MHP9 41-46	1,2	36,9	1,9	225,3	4,1	1,2	75,4	77,4	2,5	3,4	1,0		
MHP9 46-51	1,2	35,9	2,0	198,6	4,2	1,4	67,9	48,5	1,6	3,0	1,0	40,4	5,2
MHP9 51-56	1,4	29,9	1,6	196,4	3,8	1,5	72,3	66,4	2,1	3,7	1,2		
MHP9 56-61	1,3	16,3	0,9	131,1	2,6	1,7	70,3	108,0	3,4	3,5	1,1		
MHP9 61-66	1,4	18,2	1,0	63,5	1,4	1,4	67,5	85,8	2,8	3,1	1,0		
MHP9 66-71	1,5	12,3	0,6	58,8	1,0	1,8	76,7	40,4	1,3	5,1	1,6		
MHP9 71-76	1,1	19,1	0,8	60,4	0,8	1,4	89,0	36,7	1,1	3,6	1,0		
MHP9 76-81	1,2	25,9	1,0	72,4	0,9	0,9	96,2	31,5	0,9	5,7	1,4		
MHP9 81-86	1,1	25,4	1,0	83,3	0,9	0,6	102,7	29,2	0,9	3,8	0,9		
MHP9 86-91	1,1	30,5	1,2	93,4	1,1	0,6	101,6	28,8	0,8	3,8	0,9		
MHP9 91-96	1,2	33,8	1,3	100,4	1,1	0,7	103,6	30,9	0,9	5,4	1,3		
MHP9 96-101	1,1	42,4	1,6	93,2	1,0	0,7	104,1	33,0	1,0	2,9	0,7		
MHP9 101-106	0,9	20,0	0,9	70,8	1,0	0,5	86,7	19,2	0,6	3,6	1,0		
MHP9 106-111	1,2	29,1	1,2	78,4	1,0	0,6	93,7	26,2	0,8	3,8	1,0		
MHP9 111-116	1,0	22,6	1,1	62,1	1,0	0,5	82,3	19,8	0,6	3,4	1,0		
MHP9 116-121	1,0	17,3	0,8	51,7	0,9	0,5	79,4	17,1	0,6	2,9	0,9		
MHP9 121-126	0,9	17,5	0,8	44,9	0,7	0,5	80,7	17,3	0,6	2,8	0,8		
MHP9 126-131	0,9	18,7	0,8	69,2	1,0	0,5	87,3	22,5	0,7	3,3	0,9		
MHP9 131-136	1,0	18,0	0,8	48,8	0,8	0,5	83,1	18,6	0,6	3,4	1,0		
MHP9 136-141	0,8	20,2	0,9	58,5	0,9	0,5	84,9	19,1	0,6	3,4	0,9		
MHP9 146-151	1,1	15,5	1,0	41,7	1,0	0,5	62,1	16,0	0,7	2,6	0,9		
MHP9 151-156	1,0	12,5	0,8	46,6	1,1	0,5	64,5	17,0	0,7	2,7	0,9		
MHP9 156-161	1,0	14,3	1,0	35,5	0,9	0,5	58,4	17,2	0,8	1,4	0,5		
MHP9 161-166	1,0	16,4	1,1	46,2	1,3	0,4	56,2	17,9	0,8	3,9	1,5		
MHP9 166-171	0,9	15,5	0,9	38,8	0,9	0,5	65,0	18,8	0,8	1,8	0,6		
MHP9 171-176	0,9	17,5	1,1	38,3	0,9	0,5	63,5	17,5	0,7	1,8	0,6		
MHP9 176-181	1,2	29,7	2,5	32,9	1,2	0,5	46,5	17,8	1,0	2,1	0,9		
MHP9 181-186	0,7	17,4	1,3	34,9	1,1	0,5	51,4	16,5	0,8	1,7	0,7		
MHP9 186-191	1,0	13,1	1,1	24,2	0,9	0,4	45,1	14,8	0,7	1,6	0,7		
MHP9 191-196	1,4	11,9	1,4	18,0	1,0	0,5	34,3	12,9	0,8	1,3	0,7		
MHP9 196-201	0,6	10,4	1,1	20,7	1,1	0,4	36,2	14,2	0,8	2,9	1,5		
MHP9 201-206	1,0	10,8	1,2	13,1	0,7	0,5	35,3	13,9	0,9	1,8	0,9		
MHP9 206-211	0,7	6,8	0,9	9,7	0,7	0,4	29,3	12,4	0,8	2,2	1,3		
MHP9 211-216	1,3	9,5	1,4	8,1	0,7	0,6	25,4	11,3	0,8	1,5	0,9		

## Vrt MHP10:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U	<sup>210</sup> Pb [Bq/kg]	<sup>226</sup> Ra [ppm eU]
MHP10 0-4	3,4	184,5	10,3	966,7	19,7	1,7	69,5	92,4	3,0	116,3	37,9	1539,0	155,4
MHP10 4-7	3,4	147,2	8,1	793,8	15,9	1,5	70,2	87,0	2,9	130,1	42,1	2345,0	246,6
MHP10 7-10	3,8	142,1	7,9	600,2	12,2	1,5	69,5	92,2	3,2	185,0	60,3	2195,2	222,7
MHP10 10-13	3,9	129,9	6,5	512,2	8,8	1,1	77,8	86,8	2,9	319,8	95,7	3780,5	377,7
MHP10 13-16	4,7	109,9	5,4	395,5	6,7	1,2	78,6	82,4	2,7	308,9	91,6	4483,2	491,5
MHP10 16-19	11,4	101,5	4,3	483,3	6,4	1,1	91,9	87,2	2,6	586,6	154,0	15183,6	1397,8
MHP10 19-22	11,0	122,5	5,0	518,7	6,5	1,0	94,8	95,1	2,8	564,7	144,5	15727,4	1698,5
MHP10 27-31	3,3	160,3	8,1	775,3	13,5	1,2	77,2	99,2	3,2	165,0	49,7		
MHP10 31-34	3,7	133,4	7,4	582,7	11,7	1,6	70,3	98,2	3,4	188,5	60,9	2144,6	197,2
MHP10 34-37	4,1	136,4	7,4	538,9	10,4	1,3	71,9	92,4	3,1	280,0	88,9	2991,3	292,2
MHP10 40-45	10,6	99,8	4,2	348,6	4,7	1,2	91,5	86,1	2,5	525,0	138,2		
MHP10 45-50	12,1	93,3	4,1	427,7	6,0	1,1	88,5	88,9	2,6	587,6	158,9	15758,5	1575,6
MHP10 50-55	1,5	63,6	3,2	510,7	8,8	1,2	77,7	92,5	2,9	13,4	4,0	383,5	35,8
MHP10 55-60	1,4	28,2	1,4	84,9	1,5	1,3	75,6	82,9	2,6	3,3	1,0	47,2	2,8
MHP10 60-65	1,1	26,4	1,2	71,0	1,1	1,2	83,3	51,4	1,5	3,1	0,9		
MHP10 65-70	1,1	18,8	1,0	68,6	1,2	1,5	75,6	59,0	1,8	3,8	1,2	33,1	1,4
MHP10 70-75	1,1	21,4	1,0	61,9	1,0	0,9	83,6	33,8	1,0	3,3	0,9		
MHP10 75-80	1,0	26,5	1,0	83,2	0,8	0,9	108,3	36,6	1,0	4,7	1,1		
MHP10 80-85	0,9	26,8	0,9	95,6	0,9	0,7	110,6	33,1	0,9	4,6	1,0		
MHP10 85-90	0,9	33,0	1,2	98,5	1,0	0,7	110,8	31,6	0,9	5,2	1,2		
MHP10 90-95	1,1	30,2	1,1	112,4	1,2	0,6	105,9	31,8	0,9	4,7	1,1		
MHP10 95-102	0,8	29,3	1,1	92,1	1,1	0,6	99,6	30,3	0,9	5,6	1,4		
MHP10 100-105	0,9	13,4	0,8	38,0	0,8	0,5	65,9	18,8	0,7	4,4	1,5		
MHP10 105-110	0,9	8,1	0,7	20,6	0,8	0,5	45,0	14,9	0,8	2,5	1,1		
MHP10 110-115	1,2	9,8	1,3	17,6	1,2	0,5	30,3	16,2	1,0	4,0	2,3		
MHP10 115-120	0,8	11,8	1,1	18,9	0,8	0,5	42,4	13,5	0,7	1,9	0,9		
MHP10 120-125	1,0	13,8	1,0	16,9	0,5	0,5	51,5	15,4	0,8	2,8	1,1		
MHP10 125-130	1,0	13,2	0,8	28,3	0,7	0,4	62,0	15,1	0,6	1,6	0,6		
MHP10 130-135	1,0	14,4	0,8	37,8	0,7	0,5	71,0	18,0	0,7	1,9	0,6		
MHP10 135-140	0,9	11,8	0,7	35,6	0,7	0,4	68,4	16,6	0,7	2,3	0,8		
MHP10 140-145	1,2	17,2	1,0	55,1	1,1	0,4	69,3	18,3	0,7	2,9	0,9		
MHP10 145-150	0,7	19,1	1,0	42,9	0,7	0,4	77,7	18,6	0,7	2,6	0,8		
MHP10 150-155	1,1	17,2	1,2	35,8	1,0	0,4	56,8	15,9	0,7	1,9	0,7		
MHP10 155-160	0,9	12,2	1,0	24,4	0,8	0,5	48,9	14,9	0,8	2,6	1,1		
MHP10 160-165	0,7	13,5	1,1	33,6	1,2	0,4	48,3	17,0	0,9	2,3	1,0		
MHP10 165-170	1,1	10,6	0,9	14,7	0,6	0,4	43,4	14,4	0,8	2,6	1,2		
MHP10 170-175	1,1	7,4	0,8	11,7	0,7	0,4	34,2	13,0	0,8	2,6	1,3		
MHP10 175-180	0,6	6,4	1,1	6,9	0,7	0,4	22,2	10,7	0,8	2,2	1,4		
MHP10 180-185	0,6	5,7	1,4	5,3	0,7	1,0	16,5	11,8	1,0	2,9	2,2		
MHP10 195-200	1,2	15,5	1,1	34,0	1,0	0,5	54,8	20,0	0,9	2,7	1,1		

## Vrt MHP12:

Hloubka:	Ba LEF	Ni ppm	LEF Ni	Zn ppm	LEF Zn	LEF Fe	Rb ppm	Pb ppm	LEF Pb	U ppm	LEF U	<sup>210</sup> Pb [Bq/kg]	<sup>226</sup> Ra [ppm eU]
MHP12 0-5	13,3	167,7	8,8	325,9	6,0	1,4	74,0	69,0	2,3	3410,1	1059,9		
MHP12 5-10	16,2	200,0	9,4	350,4	5,5	1,3	82,9	72,9	2,2	5634,6	1604,7	16745,3	1667,0
MHP12 10-18	17,5	182,4	7,9	338,2	4,7	1,2	89,8	75,6	2,2	7247,6	1937,2	22729,1	2417,8
MHP12 18-27	2,4	321,5	26,6	532,1	19,3	4,0	46,9	190,3	7,1	233,2	100,6	1028,5	89,3
MHP12 27-35	1,0	34,3	2,1	124,0	2,9	1,8	62,9	101,0	3,4	3,2	1,1	151,3	15,8
MHP12 35-40	2,3	24,3	1,2	88,4	1,5	1,1	79,6	56,8	1,6	3,9	1,2		
MHP12 40-45	1,7	33,4	1,4	74,8	1,0	0,7	91,0	34,6	1,0	5,4	1,4		
MHP12 45-50	1,3	27,7	1,1	78,1	0,9	0,6	102,2	30,3	0,8	4,2	1,0	66,5	6,4
MHP12 50-60	1,1	36,0	2,0	80,6	1,6	1,5	70,8	74,8	2,3	5,1	1,6		
MHP12 60-70	1,3	38,4	1,3	126,7	1,2	0,6	112,7	32,4	0,9	4,9	1,1		
MHP12 70-80	1,2	39,9	1,2	150,1	1,2	0,7	128,4	31,8	0,9	6,9	1,4		
MHP12 80-90	1,7	46,9	1,7	123,6	1,3	0,9	106,4	33,3	1,0	4,1	1,0		
MHP12 85-100	1,4	48,8	2,2	123,7	1,9	0,9	85,0	33,7	1,2	2,2	0,6		
MHP12 100-110	1,0	31,8	1,4	90,0	1,2	0,7	90,0	24,8	0,8	3,5	0,9		
MHP12 110-120	1,4	23,9	1,2	48,9	0,9	0,7	74,8	22,5	0,9	2,4	0,7		
MHP12 120-130	0,7	19,7	1,1	53,7	1,0	0,5	72,2	19,8	0,8	2,9	0,9		
MHP12 130-140	0,9	16,0	0,9	37,1	0,8	0,5	69,7	17,8	0,7	3,1	1,0		
MHP12 140-150	0,8	24,4	1,3	54,8	1,0	0,6	74,3	21,5	0,8	2,6	0,8		
MHP12 150-160	0,9	22,2	1,3	60,0	1,4	0,7	64,5	19,5	0,8	2,3	0,8		
MHP12 160-170	0,7	26,6	2,3	69,5	2,7	0,7	45,0	20,0	1,1	2,4	1,1		
MHP12 170-180	1,1	19,5	1,5	43,6	1,4	0,6	51,9	19,1	0,9	2,1	0,8		

## GPS souřadnice vrtů MHP:

GPS souřadnice vrtů	MHP1	MHP2	MHP3	MHP4	MHP5	MHP6
	N 50°37,838'	N 50°37,840'	N 50°37,842'	N 50°37,849'	N 50°37,858'	N 50°37,855'
	E 014°42,620'	E 014°42,594'	E 014°42,590'	E 014°42,577'	E 014°42,569'	E 014°42,559'
odchylka: +/-	4m	5m	5m	4m	4m	6m
GPS souřadnice vrtů	MHP7	MHP8	MHP9	MHP10	MHP12	
	N 50°37,868'	N 50°37,890'	N 50°37,892'	N 50°37,891'	N 50°39,719'	
	E 014°42,622'	E 014°42,591'	E 014°42,581'	E 014°42,567'	E 014°43,964'	
odchylka: +/-	5m	3m	6m	6m	5m	

## GPS souřadnice mělké gama spektrometrie:

### PLP1:

GPS souřadnice vrtů	PLP1/0	PLP1/10	PLP1/20	PLP1/30	PLP1/40	PLP1/50
	N 50°37,858'	N 50°37,852'	N 50°37,847'	N 50°37,841'	N 50°37,838'	N 50°37,840'
	E 014°42,569'	E 014°42,572'	E 014°42,576'	E 014°42,588'	E 014°42,620'	E 014°42,624'
odchylka: +/-	4m	5m	4m	4m	5m	5m
GPS souřadnice vrtů	PLP1/60	PLP1/70	PLP1/80	PLP1/90	PLP1/100	PLP1/110
	N 50°37,843'	N 50°37,840'	N 50°37,846'	N 50°37,847'	N 50°37,849'	N 50°37,853'
	E 014°42,588'	E 014°42,594'	E 014°42,597'	E 014°42,594'	E 014°42,577'	E 014°42,583'
odchylka: +/-	4m	5m	5m	5m	4m	
GPS souřadnice vrtů	PLP1/120	PLP1/130	PLP1/140			
	N 50°37,855'	N 50°37,851'	N 50°37,842'			
	E 014°42,559'	E 014°42,567'	E 014°42,590'			
odchylka: +/-	6m	4m	5m			

### PLP2:

GPS souřadnice vrtů	PLP2/0	PLP2/1	PLP2/2	PLP2/3	PLP2/4
	N 50°37,887'	N 50°37,881'	N 50°37,873'	N 50°37,867'	N 50°37,864'
	E 014°42,649'	E 014°42,642'	E 014°42,635'	E 014°42,633'	E 014°42,635'
odchylka: +/-	3m	3m	4m	5m	4m

### PLP3:

GPS souřadnice vrtů	PLP3/1	PLP3/2
	N 50°37,903'	N 50°37,895'
	E 014°42,729'	E 014°42,743'
odchylka: +/-	4m	3m

### PLP4:

GPS souřadnice vrtů	PLP4/1	PLP4/2
	N 50°37,890'	N 50°37,873'
	E 014°42,574'	E 014°42,582'
odchylka: +/-	4m	3m