

**OPTIMALIZACE MONITORINGU PŘI SANACI NÁSLEDKŮ PO BÝVALÉ TĚŽBĚ URANU
V SEVEROČESKÉ KŘÍDĚ**

Abstrakt

Od roku 1996 provádí státní podnik DIAMO, odštěpný závod Těžba a úprava uranu, sanaci následků po bývalé těžbě uranu v severočeské křídě, především pak po chemické těžbě uranu. Nedílnou a důležitou součástí sanace je monitoring horninového prostředí, který dokládá průběh sanačních prací. V rámci vývojových a ověřovacích prací je průběžně prováděna optimalizace monitoringu, jejíž hlavním cílem je přizpůsobení současného monitoringu požadavkům norem, metodickým pokynům a současným moderním trendům.

Úvod

Během aktivní chemické těžby (použita metoda podzemního loužení „in situ“) bylo v oblasti vyluhovacích polí a jejich blízkém okolí odvrtno několik tisíc vrtů. Může se zdát, že z takto velkého počtu vrtů není problém vybrat ty vhodné pro vytvoření ideální monitorovací sítě, ale při detailnějším zkoumání problematiky narazíme na několik omezujících faktorů.

Prvním z nich je samotná konstrukce vrtů. Většina vrtů tzv. první generace na vyluhovacích polích byla odvrtna pro potřeby chemické těžby a tomu odpovídala i jejich konstrukce. Tyto vrty měli polyethylenovou pažnici ukončenou na patu vrtu, bez perforací. Tyto vrty nejsou pro monitoring kvality podzemních vod vhodné. Další vrty, které byly vrtány později, již mají úseky s perforacemi. Tyto perforace jsou však v mnohých případech otevřeny jen v krátkých úsecích, a to v polohách, kde se nacházelo nejvyšší zrudnění. Vzorky z těchto vrtů tak reprezentují jen určitou hloubkovou část dané zvodně. Nejnovější odvrtné vrty pak již mají perforace přes velkou část celého zájmového horizontu dané zvodně. Z celkového množství všech odvrtných vrtů se tak v současnosti pro potřeby monitoringu využívá asi 400 vrtů pro sledování stavu kontaminace a hodnocení postupu sanačních prací v cenomanském a turonském kolektoru a sledování

kvality podzemních vod v coniackém kolektoru. Vysoký počet monitorovaných vrtů je dán velikostí plochy, která se sleduje a v současnosti činí cca 27 km². Tento počet rovněž vede k velké časové náročnosti prováděného monitoringu a je tedy nutné pro monitoring využívat postupy a techniky, které tuto časovou náročnost minimalizuje.

Dalšími faktory, které ovlivňují především možnosti odběru vzorků a používanou techniku, jsou průměr vrtu, hloubka vrtu (respektive hloubka hladiny podzemní vody) a pH podzemní vody. Naprostá většina monitorovaných vrtů má vnitřní průměr 90 mm. Vrty s větším průměrem se většinou používají při monitoringu turonské a především coniacké zvodně. Hloubka cenomanských vrtů se pohybuje od 150 do 350 m, hloubka turonských vrtů se pohybuje od 20 do 230 m a hloubka coniackých vrtů pak od 20 do 100 m. Hladina podzemní vody se nachází v extrémních případech až 200 m pod terénem. Vzhledem k použité metodě podzemního loužení kyselinou sírovou se pH podzemní vody cenomanské zvodně pohybuje od velmi nízkých hodnot okolo 0,9 až po neutrální pH ve vrtech monitorujících těžbou neovlivněnou cenomanskou zvodně. Hodnoty pH ve vrtech turonské a coniacké zvodně se pak pohybují v rozmezí od 4 do 8.

Optimalizace vzorkování

Vzhledem k výše uvedeným omezením je velmi problematické zajistit v některých vrtech odběr vzorků. V mělkých a nekontaminovaných vrtech turonské a coniacké zvodně je pro odběr vzorků s úspěchem používáno čerpadlo Grundfos MP1. V mělkých vrtech coniacké zvodně pak byla, pro jejich nízké pořizovací náklady, používána membránová čerpadla typu RUCHE.

Problematické je však vzorkování štíhlých (vnitřní průměr vrtu do 90 mm) hlubokých kontaminovaných vrtů cenomanské zvodně a štíhlých turonských vrtů se zakleslou hladinou podzemní vody. Je totiž velmi obtížné najít čerpadlo, které by bylo ke vzorkování těchto vrtů vhodné. Buď nevyhovují svojí velikostí, výkonnostními parametry nebo odolností vůči kyselému prostředí. Z tohoto důvodu je k monitorování těchto vrtů stále používáno metody airliftového čerpání, které bylo používáno i v době aktivní těžby a jsou s ním tedy spojeny praktické zkušenosti a dostupné dlouhé časové řady analýz v odebraných vzorcích. Je nutné poznamenat, že pro většinu úkolů řešených v o. z. TÚU je přesnost výsledků analýz ze vzorků odebíraných airliftem postačující.

Schválení Aktualizované analýzy rizik v roce 2011 a potřeba intenzivnějšího využívání matematického modelování klade vyšší nároky na přesnost prováděných analýz a s tím souvisejí i požadavky na zkvalitnění prováděného monitoringu. Z tohoto důvodu byla

navázána spolupráce s firmou Forsapi s.r.o. a hlavním cílem prací je najít alternativní technické prostředky pro vzorkování štíhlých cenomanských vrtů a vhodnější vzorkovací zařízení místo airliftového čerpání a membránových čerpadel.

Relativně rychlé bylo hledání náhrady za membránová čerpadla typu RUCHE. Hlavními nevýhodami tohoto typu čerpadel je nemožnost regulovat čerpaný průtok a nutnost přerušovat čerpání z důvodu ochlazování čerpadla. Vibrace při provozu těchto čerpadel rovněž poškozovaly obsyp vrtů a v některých případech tak nebylo možné odebrat vzorek, který by byl bez zákalu. Prvním testovaným čerpadlem, které by mohlo membránová čerpadla nahradit bylo ponorné čerpadlo Gigant s regulátorem průtoku GR4 (Obr. 1). Čerpadla Gigant se skládají z pouzdra a vrtulky z nerez oceli. Pohon je zajištěn malým motorem o napájecím napětí 12 V a proudu cca 3 A (jedno čerpadlo). Odstředivé síly tlačí vodu pouzdrem okolo motoru do hadice, připojené k horní části pouzdra čerpadla. Testování mělo ověřit, zda méně invazivním čerpáním s nižším průtokem lze dosáhnout vyčištění vrtu a získat vzorek bez zákalu. Test čerpadla byl proveden na vrtu, který byl den předem vzorkován čerpadlem typu RUCHE a kdy se podařilo odebrat jen zakalený vzorek. Při použití čerpadla Gigant a nastavení průtoku $1,2 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ byl po 155 minutách čištění vrtu odebrán čirý vzorek. Druhým testovaným čerpadlem bylo čerpadlo Calpeda 4SDF 5405 (Obr. 2). Čerpadlo je konstruované jako oddělitelný motor s hydraulikou (samotné čerpadlo). Díky této konstrukci je možné čerpadlo použít i ve vodě s příměsí písku (do $150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), protože v případě opotřebení se vymění pouze čerpací část a motor zůstává nepoškozen. Čerpadlo lze použít v sestavě s frekvenčním měničem, který umožňuje regulovat počet otáček a tím i výkon čerpadla. S tímto technickým řešením jde čerpat i s vydatností srovnatelnou s čerpadlem Gigant, ale maximální výkon čerpadla přitom dosahuje až hodnot $8 \text{ m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$.

Při hledání alternativních technických prostředků pro vzorkování štíhlých vrtů se zakleslou hladinou podzemní vody cenomanské zvodně se do popředí zájmu dostaly vzorkovací zařízení, které dokáží odebrat bodový (prostý) vzorek, a to s přihlédnutím k vertikálnímu rozložení kontaminace v cenomanské zvodni. Při odběru vzorku pomocí airliftového čerpání je vždy odebírán směsný vzorek reprezentující celý perforovaný interval monitorovacího vrtu. Odběr bodového vzorku naopak dokumentuje konkrétní polohu zvodně a vystihuje tak přirozené vlastnosti horninového prostředí pro distribuci kontaminace. Z několika možností odběru bodového vzorku byl zvolen přístup pasivního vzorkování, protože klade nejmenší ekonomické nároky, neboť nevyžaduje instalaci složitějšího technického zařízení do vrtu, dlouhé čerpání a umožňuje využití současné monitorovací sítě. Samotný odběr vzorku probíhá pomocí objemového vzorkovače, který

je zapuštěn do požadované hloubky odběru. Po ustálení proudění ve vrtu je vzorkovač otevřen a uzavřený vyjmut z vrtu.

Prvním z pasivních vzorkovačů, který byl vyvinut a vyzkoušen ve spolupráci s firmou Forsapi s.r.o., byl vzorkovač typu „Hydrasleeve“. Princip vzorkování pomocí tohoto vzorkovače je pak uveden na Obr. 3. Hlavním smyslem prvotního testování bylo ověření použitelnosti vzorkovače typu „Hydrasleeve“ a jeho modifikací pro získání vertikálně zonálních vzorků z vybraných monitorovaných vrtů cenomanské zvodně. Prototyp Hydrasleeve (Obr. 4) byl tvořen PE hadicí o délce 60 - 80 cm, která byla opatřena zátěžkou ze skleněné tyčoviny. Tento prototyp byl pak následně testován k ověření schopnosti odběru vzorku v požadovaném bodu odběru a průchodnosti různými typy vrtů. Z prvních výsledků testování se ukázalo, že během zapouštění dojde v některých vrtech k rozčeření usazeného sedimentu, který se pak postupně usazoval do ponechaného zapuštěného vzorkovače. Tento materiál pak následně může do jisté míry zkreslovat výsledky analýz. Omezená vhodnost prototypu Hydrasleeve vedla k jeho úpravě. Upravený prototyp Hydrasleeve byl umístěn do PE sáčku a zavěšen na dva závěsy. Jeden závěs slouží pro zapouštění uzavřeného vzorkovače a druhým závěsem je zajištěno otevření vzorkovače v požadované hloubce, jeho naplnění a následné vytažení. Zapletení těchto závěsů však může zabránit otevření vzorkovače a znemožnit tak odběr vzorku. Pro odstranění tohoto nedostatku byla navržena vhodnější konstrukce zátěžky a upevněna další zátěžka nad poslední pozici vzorkovače. Takto upravený vzorkovač byl otestován na skupině 4 vrtů. Hloubka umístění vzorkovače byla vždy volena podle výsledků karotážního měření. Doba ponechání vzorkovače ve vrtu se pohybovala od 20 do 36 dní. Výsledky chemických analýz ze vzorků odebraných upraveným prototypem Hydrasleeve vykazovaly velmi dobrou shodu s výsledky analýz ze vzorků odebíraných standardním monitoringem. Při zhodnocení vertikální zonálnosti se však neprojevíly zásadní rozdíly mezi jednotlivými hloubkovými etážemi. Tyto výsledky jsou pravděpodobně důsledkem problematického vytahování vzorkovače. I přes provedené úpravy se totiž nepodařilo zcela vyřešit zaplétání dvojice závěsů při zapouštění vzorkovače a následný bezproblémový odběr vzorku. Z tohoto důvodu byla proto pozornost zaměřena na testování jiného typu vzorkovače.

Nový doposud testovaný pasivní vzorkovač (Obr. 5) byl vyvinut pracovníky střediska monitorování a karotáže. Základem pro vzorkovač se stala stará karotážní sonda na které je umístěn elektromotorem poháněný uzavíratelný ventil. Ke vzorkovači lze pak připojit vzorkovnici ve 3 variantách objemu (0,2 l, 1 l a 2 l). Celé zařízení lze připojit na karotážní vrátek, který umožní bezpracné zapuštění vzorkovače do přesně stanovené hloubky a

jeho vytažení. Průměr vzorkovače je dán průměrem karotážní sondy a je tedy možné ho použít i do štíhlých vrtů. Vzorkovač byl otestován na skupině vrtů. Výsledky monitorování jsou uvedeny v Tab. 1. Smyslem testování bylo opět ověřit, zda je možné odebrat vertikálně zonální vzorky ve vrtech, kde je jiné vertikální rozložení kontaminace podle karotážních měření jasně patrné. Z tohoto důvodu byl vzorkovač vždy zapuštěn do vrtu, kde byl poté cca 15 minut ponechán. Následně byl odebrán vzorek a vzorkovač vytažen. Celý postup se pak v rámci jednoho vrtu opakoval při vzorkování poloh z různých hloubek. I přes relativně krátkou dobu ponechání vzorkovače ve vrtu se podařilo z jednotlivých hloubkových úrovní odebrat chemicky odlišné vzorky. Chemické složení vzorků z jednotlivých etáží se velmi shoduje i s provedenými karotážními měřeními metodou indukční karotáže.

Optimalizace karotážního měření

Pro stanovení vertikálního rozložení kontaminace a jejího přesného hloubkového vymezení se používá karotážních metod, z nichž největší význam má metoda indukční karotáže. Indukční karotáž je metoda měření elektrické vodivosti, která na rozdíl od elektrických odporových metod nevyžaduje přímý kontakt s horninovým prostředím. Proto ji lze s výhodou využít u vrtů s polyethylenovými pažnicemi, které tvoří základní monitorovací síť. Ještě před zahájením monitoringu byly na středisku karotáže využívány indukční sondy AK-2. Do r. 1996 sloužily především pro indikaci rozšíření vtláčených kyselin v ploše ložiska, v období 1996 až 2012 pak pro monitorování průběhu sanace. Princip funkce sondy AK-2 lze zjednodušeně popsat podle Obr. 6. V sondě je umístěn generátor o frekvenci 1 MHz, jehož koncový stupeň budí vysílací cívku. Ve vzdálenosti 1 m od vysílací cívky je umístěna přijímací cívka připojená na vstup citlivého laděného zesilovače. Přímá vazba mezi vysílací cívku a přijímací cívku je eliminována kompenzační cívku umístěnou v ose ve vzdálenosti 30 cm od vysílací cívky. Pokud by se sonda nacházela v nevodivém prostředí, pak je přijímaný signál nulový. Jestliže horninové prostředí vykazuje určitou vodivost, pak střídavé magnetické pole vysílací cívky vybudí v horninovém prostředí proud (soustředné prstence). Následně každý proudový element indukuje magnetické pole a nakonec střídavé elektrické napětí v přijímací cívce. Indukované napětí v přijímací cívce je přímo úměrné vodivosti prostředí, které obklopuje indukční sondu. Napětí z přijímací cívky je zesíleno dvoustupňovým selektivním zesilovačem s laděnými obvody. Následuje detekce a usměrněné výstupní napětí je po kabelu přivedeno do povrchového panelu karotážní soupravy. Díky geometrickému uspořádání cívek má sonda AK-2 největší efektivní dosah ve vzdálenosti 50 cm od osy

sondy. Ve vzdálenosti 2 m od osy sondy je příspěvek horninového prostředí prakticky nulový. Efektivní účinek klesá i při zmenšení vzdálenosti pod 0,5 m, z čehož vyplývá, že příspěvek vodivosti kapaliny ve vrtu je téměř nulový (vodivost kapaliny ve vrtu výsledky měření prakticky neovlivňuje). To však platí pouze pro štíhlé vrty s pažnicemi o vnitřním průměru 90 mm. Při větších průměrech se musí počítat s určitým ovlivněním měření vodivostním příspěvkem kapaliny ve vrtu. Hranicí použitelnosti sondy AK-2 je průměr vrtu 500 mm.

S měrnou elektrickou vodivostí pískovců má nejužší vazbu koncentrace rozpuštěných látek, pro niž jsou cílovými parametry sanace mediánová hodnota 7 g.l^{-1} , resp. maximální hodnota 21 g.l^{-1} . Podle dosavadních zkušeností se slaběji mineralizovanými roztoky tomu přibližně odpovídají měrné elektrické vodivosti pískovců 50 mS.m^{-1} , resp. 150 mS.m^{-1} . Při takto nízkých hodnotách vodivosti již sondy AK-2 vykazovali velmi nízkou stabilitu měření. V této souvislosti bylo nutné nahradit méně stabilní sondy AK-2 novým typem sondy, která bude jednak dostatečně citlivá, ale i stabilní zejména v oblasti nízkých vodivostí. V rozmezí let 2011 a 2012 byla navázána spolupráce s firmou W&R Instruments, s.r.o. Brno a byly zakoupeny 2 sondy HI-453 (Obr. 7).

Byl proveden experiment na vybrané skupině 100 vrtů, kde byla srovnávána měření polskou sondou AK-2 a českou sondou HI-453, která má vzdálenost vysílací a přijímací cívky 80 cm. Výsledky měření v zasaženém cenomanském kolektoru byly naprosto shodné, česká sonda HI-453 však vykazovala velmi dobrou dlouhodobou stabilitu, a to i v oblasti nízkých hodnot vodivostí. Je to dáno i tím, že konstrukce elektronické části je řešena s využitím nové generace elektronických součástek SMD (surface mount device), což významně ovlivňuje i provozní spolehlivost sondy v náročných terénních podmínkách. Jediným nedostatkem sondy HI-453 je to, že může být využita pouze ve štíhlých vrtech (efektivní dosah do okolí vrtu je nižší než u sondy AK-2).

Závěr

I přes existující omezení se velmi rychle podařilo najít náhradu za čerpadla typu RUCHE. Čerpadlo Gigant nebylo nasazeno do plošného použití, a to z důvodu malých nastavitelných průtoků a z toho plynoucí velké časové náročnosti na odčerpání vzorku z větších hloubek. Naopak čerpadlo Calpeda bylo po úspěšném otestování na několika vrtech nasazeno k plošnému použití. Při hledání nových technických možností odběru vzorků ze štíhlých cenomanských vrtů se ukázalo, že první prototyp vzorkovače Hydrasleeve je možné použít jen pro jednorázový odběr (zapuštění a vyzvednutí v krátkém čase) z více poloh najednou. Velmi nadějně výsledky z prvních měření

testovaného vzorkovače vyrobeného z karotážní sondy ukazují, že tento vzorkovač splňuje požadavky pro pasivní odběr vertikálně zonálních vzorků, nicméně je třeba ho ještě dále testovat při odlišných podmínkách. Dále je nutné vyřešit způsob a technickou proveditelnost ponechání tohoto vzorkovače ve vrtu na delší časové období a možnost připojení několika vzorkovačů nad sebe. Celkově pozitivní výsledky testů vedly k uvedení sond HI-453 do běžného provozu a byla rovněž provedena i jejich kalibrace na Kamencovém jezeře u Chomutova, kde má slabě mineralizovaná voda měrnou elektrickou vodivost kolem 100 mS/m. I přes řadu problémů se v několika bodech podařilo vylepšit kvalitu prováděného monitoringu. Optimalizace monitoringu je však dlouhotrvající a prakticky nikdy nekončící proces a tak se na dalším zlepšování pracuje neustále.

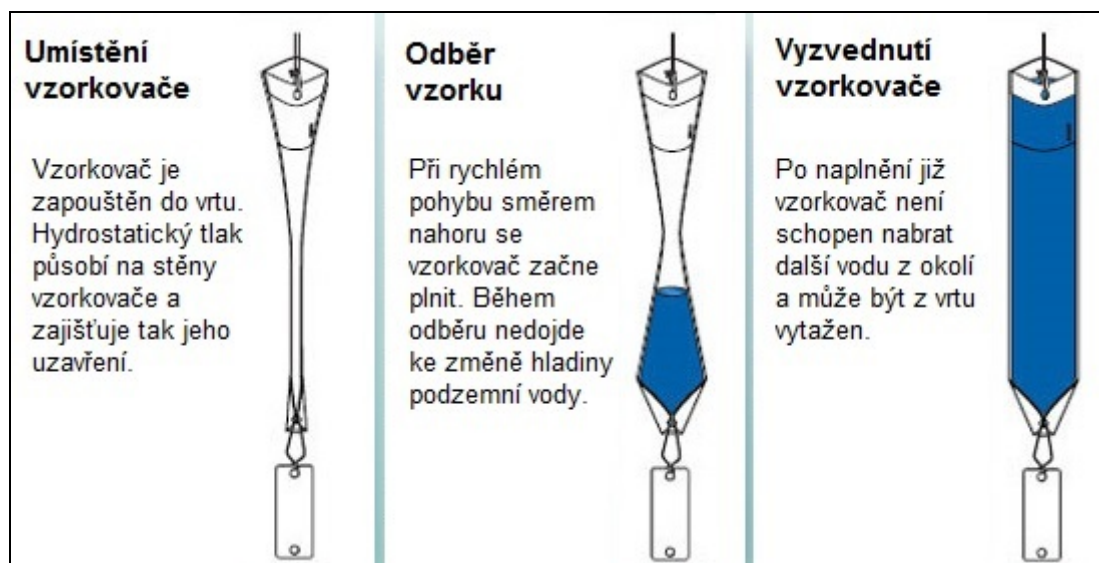
Obr. 1: Čerpadla Gigant a regulátor průtoku GR4



Obr. 2: čerpadlo Calpeda



Obr. 3: Princip vzorkování vzorkovačem typu „Hydrasleeve“



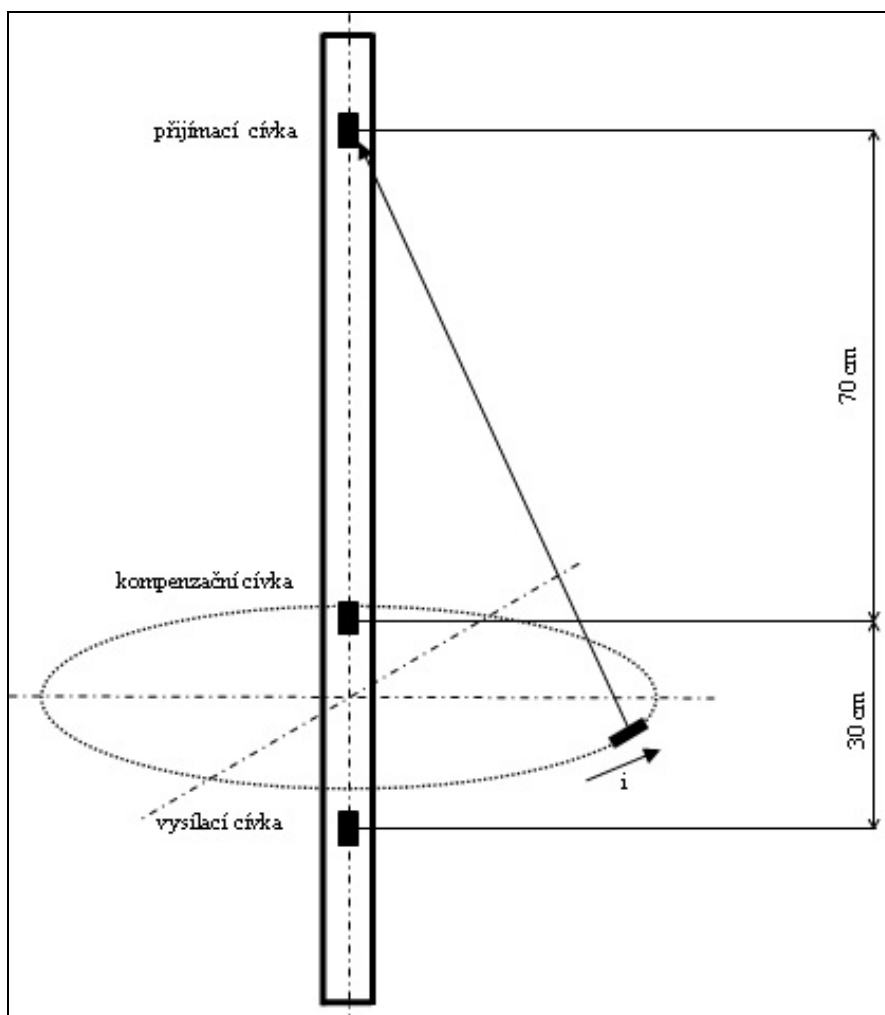
Obr. 4: Prototyp Hydrasleeve



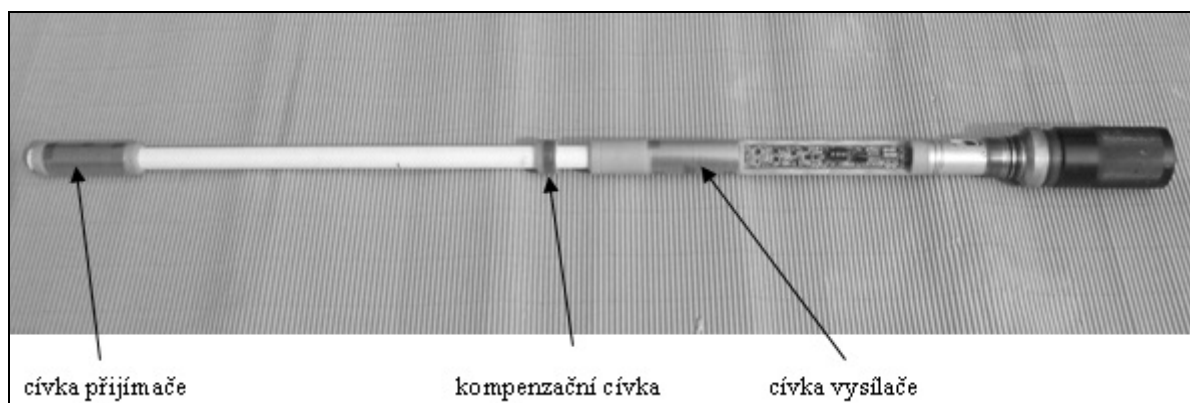
Obr. 5: Vzorkovač SMK se vzorkovnicí o objemu 2 l



Obr. 6: Princip činnosti sondy AK-2



Obr. 7: Sonda HI-453



Tab. 1: Výsledky monitoringu pomocí vzorkovače SMK

složka	jednotka	STPC-119		STPC-207			STPC-210		STPC-217			VP 4-7105		
		4.7.2013		26.6.2013			4.7.2013		4.7.2013			4.7.2013		
		201 m	212 m	223 m	233 m	236 m	127 m	131 m	123 m	134 m	137 m	140 m	145 m	162 m
pH		1,76	1,68	4,09	2,70	2,15	2,72	2,16	2,71	2,35	2,31	2,82	2,79	2,85
Eh	[mV]	568	532	381	668	536	671	649	676	785	791	496	508	493
S	[mS.m ⁻¹]	2330	2610	83	575	1446	359	1032	429	656	698	1242	1537	2090
Cl ⁻	[mg.l ⁻¹]	12,0	16,9	6,9	8,6	14,8	9,4	9,7	7,3	5,3	5,3	8,5	9,6	13,3
SO ₄ ²⁻	[mg.l ⁻¹]	32529	37509	555	6410	20291	2901	11258	3832	6120	6673	16126	20970	33679
NH ₄ ⁺	[mg.l ⁻¹]	579,3	678,7	16,4	138,2	381,3	98,3	385,5	121,3	196,0	219,5	636,8	839,8	1272,0
As	[μg.l ⁻¹]	7444	6242	<500	<500	<500	<50	439	<50	275	352	2495	2858	4030
Be	[μg.l ⁻¹]	658	839	<20	183,0	181,0	97	224	150	198	213	474	557	755
Co	[μg.l ⁻¹]	7494	6616	290	2160	2160	968	2576	1485	2172	2333	3353	4242	5878
V	[μg.l ⁻¹]	12019	13736	190	3840	3810	570	3252	664	92	106	6282	7302	10403
Al	[mg.l ⁻¹]	5050	5999	<10	1110	3210	474,7	1566	574,7	885,8	1050	2202	3373	5595
Ca	[mg.l ⁻¹]	227,3	315,1	33,4	66,5	156,0	184,8	217,2	120,2	136,4	142,4	519,1	480,4	434,3
Fe	[mg.l ⁻¹]	1022	894,9	11,3	108,0	391,0	113,1	441,4	175,7	301,0	328,3	1598	1600	2161
K	[mg.l ⁻¹]	51,9	73,8	<5	11,7	31,3	4,74	15,1	5,11	1,36	1,29	35,9	45,2	60,3
Mg	[mg.l ⁻¹]	56,6	134,3	5,3	17,0	42,0	17,0	21,8	21,6	22,2	23,5	62,6	63,2	73,5
Na	[mg.l ⁻¹]	16,5	33,3	4,9	9,0	25,1	10,6	11,6	9,71	9,57	9,62	7,9	9,3	10,2
F ⁻	[mg.l ⁻¹]	164,0	217,6	24,6	74,2	188,0	22,4	60,0	30,3	31,9	33,7	112,0	154,0	218,0
Mn	[mg.l ⁻¹]	16,4	20,1	<0,8	1,80	4,40	3,14	3,29	3,65	8,47	11,11	67,1	63,9	76,5
Ni	[mg.l ⁻¹]	24,4	22,7	<0,5	4,6	13,0	2,90	7,06	4,09	4,90	5,19	9,7	12,1	17,9
Zn	[mg.l ⁻¹]	166,6	136,3	3,0	24,0	69,0	8,4	16,9	12,1	10,7	11,6	29,3	33,3	43,8