



Projekt „*Budování excelentního vědeckého týmu pro experimentální a numerické modelování v mechanice tekutin a termodynamice*“

Registrační číslo projektu: **CZ.1.07/2.3.00/20.0139**

Zpráva ze stáže na University of Leeds

Zpráva ze stáže realizované v rámci projektu

Ing. David Krčmařík, Ph.D

2015

Zpráva o výzkumném pobytu na Univerzitě v Leedsu

Osnova:

1. Obecně
2. Informace o hostující instituci, historie a současnost výzkumu
3. Před příjezdem, administrativní záležitosti a ubytování
4. Informace a popis vlastní činnosti
5. Možnosti spolupráce a možnosti výměny studentů
6. Souhrn výsledků

1. Obecně

Účastník: Ing. David Krčmařík, Ph.D.

Termín: 28. února 2015 – 28. března 2015

Destinace: Univerzita v Leedsu, Institut částicového výzkumu a techniky

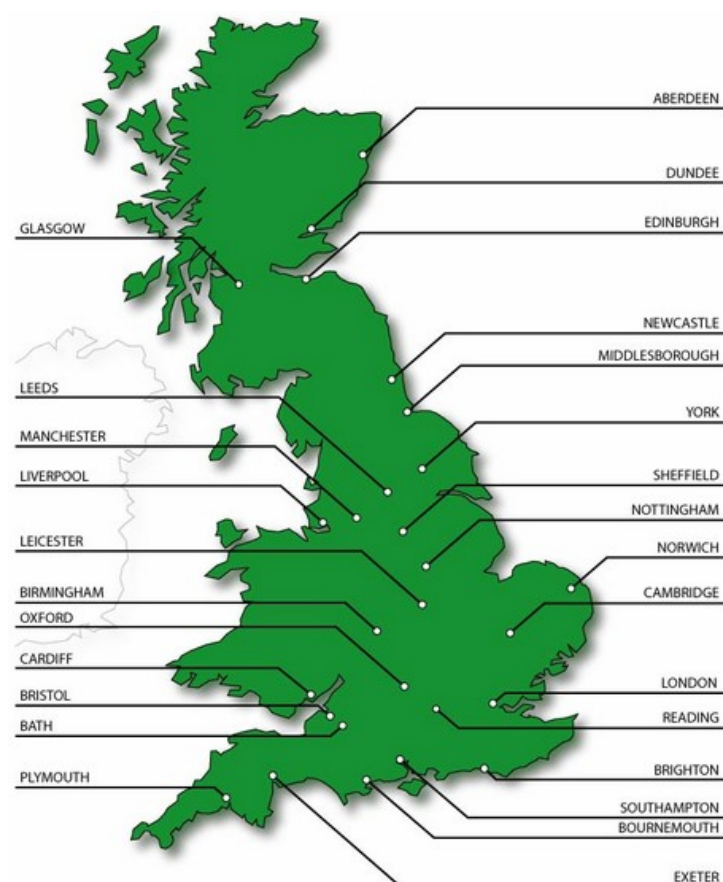
Školitel: prof. Mi Wang

Téma: Elektrická impedanční tomografie

2. Informace o hostující instituci, historie a současnost výzkumu

Univerzita v Leedsu (University of Leeds) byla založena roku 1904 a jedná se tedy o poměrně novou školu. Navzdory svému stáří si vydobyla velmi dobrou pověst a patří do první stovky nejvýznamnějších univerzit v oblasti technických věd

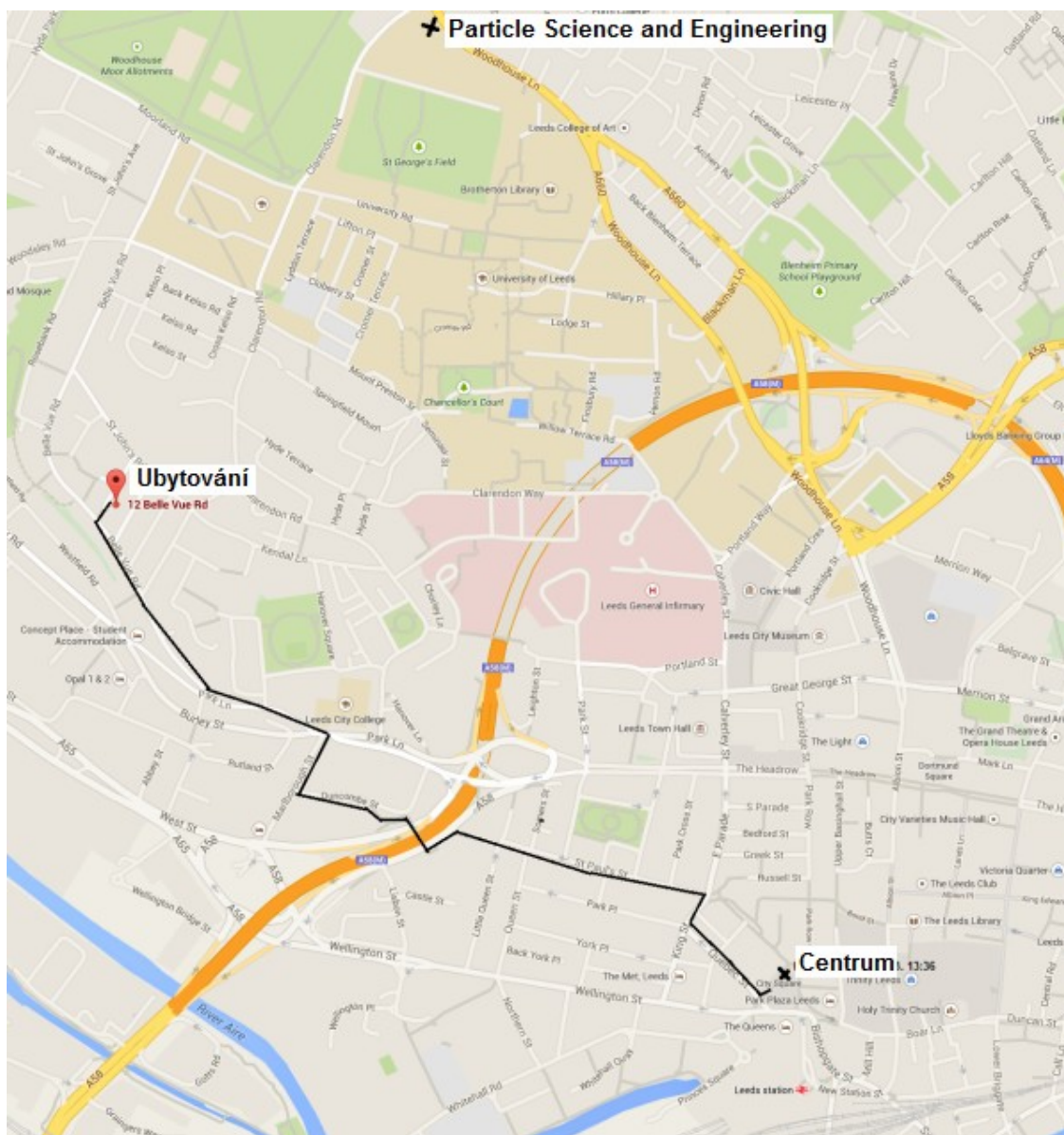
(<http://www.timeshighereducation.co.uk/world-university-rankings/2014-15/subject-ranking/subject/engineering-and-IT>).



Obr. 1: Univerzity Velké Británie

Univerzita má 9 fakult (umění, biologie, ekonomická, humanitní, technická, životního prostředí, matematicko-fyzikální, lékařská a nakonec obdoba AMU). Já jsem působil na Technické fakultě (Faculty of engineering) po dobu 4 týdnů. Konkrétně jsem působil u p. prof. Mi Wanga (<http://www.engineering.leeds.ac.uk/people/ipse/staff/m.wang>) v rámci institutu Částicového výzkumu a techniky (Institute of Particle Science and Engineering - <http://www.engineering.leeds.ac.uk/ipse/>).

Tento institut je situován v centrální oblasti Leedsu, kde se nachází většina budov Univerzity v Leedsu.



Obr. 2: Situační mapka Leedsu (z místa ubytování do místa práce Particle Science and Engineering to je cca 10 min pěšky)

Univerzita v Leedsu je jednou z předních institucí na poli elektrické impedanční tomografie (rezistanční, kapacitanční). Byla jednou z prvních, která vyvinula funkční elektrický impedanční tomograf (EIT). Hlavní postavou je bezesporu prof. Mi Wang (<http://www.engineering.leeds.ac.uk/people/ipse/staff/m.wang>), který byl u zrodu mnoha principů a vlastní množství patentů na poli EIT. Jak jsem pochopil tak jedním z hlavních úspěchů skupiny kolem prof. Wang je založení společnosti ITS (<http://www.itoms.com/>), která úspěšně prodává přístroje založené na vědeckém bádání prof. Wang. Dva přístroje jsme na Technickou univerzitu Liberec (TUL) zakoupili také: p2+ (rezistanční) a m3000 (kapacitanční). O tom, že zdejší univerzita má významnou historii v odvětví EIT svědčí i množství článků o této problematice:

- 1) Zhao Y; Wang M; Hammond RB Characterisation of nano-particles in colloids: relationship between particle size and electrical impedance spectra. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 13, pp.808-812. 2013.
- 2) Khan JI; Wang M; Schlager HI; Guan P Effect of ion vibration potential for 1-1 electrolytes. Chemical Physics, vol. 425, pp.14-18. 2013.
- 3) Ramskill NP; Wang M Boolean logic analysis for flow regime recognition of gas-liquid horizontal flow. Measurement Science and Technology, vol. 22, 2011.
- 4) Guan P; Wang M; Schlager HI; Khan JI; Speirs V Towards a-scan imaging via Ultrasonic Vibration Potential measurements. Nuclear Engineering and Design, vol. 241, pp.1994-1997. 2011.
- 5) Wang M; Ma Y; Holliday NT; Dai YF; Williams RA; Lucas G A high performance EIT system. IEEE Sensors Journal, vol. 5, pp.289-299. 2005.
- 6) Wang M; Jones TF; Williams RA Visualization of asymmetric solids distribution in horizontal swirling flows using electrical resistance tomography. Chemical Engineering Research & Design, vol. 81, pp.854-861. 2003.
- 7) Wang M Inverse solutions for electrical impedance tomography based on conjugate gradients methods. Measurement Science and Technology, vol. 13, pp.101-117. 2002.
- 8) Wang M; Dorward A; Vlaev D; Mann R Measurements of gas-liquid mixing in a stirred vessel using electrical resistance tomography (ERT). Chemical Engineering Science, 2000.
- 9) Dickin FJ; Wang M Electrical resistance tomography for process applications. Measurement Science and Technology, vol. 7, pp.247-260. 1996.

V současné době se výzkum soustřeďuje na:

- 1) Pokročilé technologie vícefázového měření proudění pro těžbu ropy a zemního plynu s možností jak kvantitativního měření tak i vizualizace.
- 2) Nové formy zobrazovacích metod pro procesní technologie a pro lékařství včetně ultrazvukových vibračních potenciálových zobrazování a elektrické impedanční tomografické spektroskopie.
- 3) Specifické aplikace procesního měření a zobrazování včetně aplikací ve vesmíru a v hlubinách moře.

3. Před příjezdem, administrativní záležitosti a ubytování

Před příjezdem je nutné zajistit jednak administrativní náležitosti a jednak i věci týkající se samotného pobytu (ubytování, doprava). Projekt, z kterého byl placen výjezd, byl formulován na Západočeské univerzitě v Plzni (ZUP). Mezi hlavní navrhovatele (jak jsem alespoň pochopil) patřil pan doc. Jiří Polanský a Roman Čermák, PhD ze ZUP. Na TUL se o tento projekt staral pan doc. Karel Fráňa a paní Marcela Válková. Projekt mi nabídl můj vedoucí pan prof. Václav Kopecký. Cílem bylo osvojení si pokročilých znalostí při ovládání námi zakoupených přístrojů p2+ a m3000.

Administrativní náležitosti sestávali z těchto dokumentů:

- 1) Nepojmenovaná smlouva
- 2) Cestovní příkaz
- 3) Zdravotní pojištění
- 4) Závazek důvěrnosti (Confidentiality undertaking)
- 5) Souhlas se stáží (Agreement for internship)

Nepojmenovaná smlouva byla smlouva mezi TUL a mnou samotným o financování celého výjezdu (neboli peníze na ubytování, dopravu a diety).

Cestovní příkaz byl standardní zahraniční cestovní příkaz s uvedením destinace a časového rozmezí. V cestovním příkazu si člověk musí dát hlavně pozor na to, aby zaškrtl položku, že žádá cestovní zdravotní pojištění na dobu pobytu. Bez cestovního zdravotního pojištění by ho totiž Univerzita v Leedsu nepřijala.

Poslední dva dokumenty jsou také velmi důležité. Je nutné vyžadovat od administrativy na TUL, aby tyto dva dokumenty (poslané z hostitelské univerzity od prof. Wanga) měl účastník při příjezdu do Leedsu podepsané od patřičných osob z TUL. Závazek důvěrnosti pak stanovuje povinnost nešířit získané vědomosti z Univerzity v Leedsu bez upozornění dále. Souhlas se stáží dále upravuje povinnost TUL zaplatit Univerzitě v Leedsu peněžní částku za odborné vedení stážisty na univerzitě.

Druhá část náležitostí nutných k zařízení bylo ubytování a doprava. S ubytováním mi laskavě pomohl p. Polanský, který mi nabídl pronájem ubytování ve volném pokoji v bytě, kde si sám pronajal pokoj. Dopravu jsem volil leteckou konkrétně Praha-Dublin-Leeds. Drobná komplikace nastala pouze při přesedání v Dublinu, kde jsem se dozvěděl, že můj let byl zrušen a na místo toho mi letecká společnost nabídla let do Manchesteru s následným autobusovým odvozem do Leedsu (což jsem samozřejmě přijal). Rád bych zdůraznil, že pro cesty do Velké Británie je vhodné si sebou vzít cestovní pas. Na cestu do Leedsu jsem si mimo osobních věcí vzal pouze pracovní notebook. Dopravce mimo příručního zavazadla dovozoval max. 20 kg zavazadlo.

Při balení věcí do Anglie je nutné počítat i s nějakými penězi navíc, kvůli nákupu potravin, dopravě a například pro drobné výlety o víkendech do okolí. Jídlo je během pobytu plně v kompetenci účastníka pobytu.

Po příjezdu v odpoledních hodinách jsem vyhledal adresu mého ubytování. Zde je nutno podotknout, že ve Velké Británii je značení ulic a domu z mého pohledu velice nahodilé a proto je nutné velmi důkladně si předem na mapě vyhledat cílovou adresu. Důležité je v této adrese především PSČ (narozdíl od České republiky např. LS3 1EU) pomocí něhož je možno jednoznačně identifikovat hledanou budovu.



Obr. 3: Ubytování (bílé dveře)

Druhý den jsem s panem Polanským (který na zdejší univerzitě působil již nějakou dobu) šli do našeho institutu, kde jsme měli smlouvenou schůzku s prof. Wangem. Během schůzky jsme probrali vhodné oblasti, kterých bych se během svých čtyřech týdnů mohl věnovat. Dohodli jsme se, že prozkoumám možnost použití EIT v oblasti odstraňování ekologických škod po těžbě uranu. Jednalo se konkrétně o monitorování koncentrace kyselin v zamořeném území a toto téma bylo přímo vybráno v návaznosti na ekologické škody způsobené v oblasti Ralsko nedaleko Liberce.

Na druhý den jsme se dohodli s prof. Wangem na vyřešení administrativních úkonů. Zároveň mi slíbil klíč od kanceláře, kde jsem pracoval s ostatními kolegy. V kanceláři na mě čekal volný pracovní stůl. Připojení k internetu se dělo pomocí sítě eduroam. Nastavení sítě jsem provedl ještě před odjezdem do Anglie (používá se nastavení pro TUL).

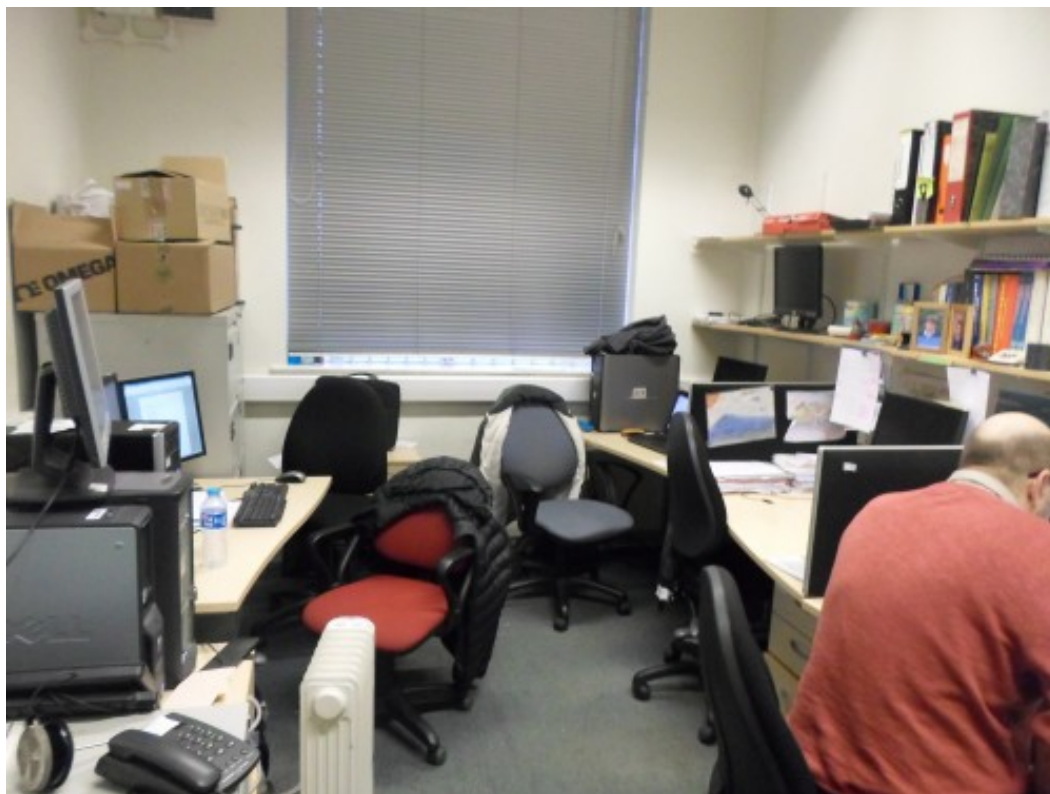
Elektrická síť používá 230V/50Hz, ale narozdíl od České republiky se používá jiný tvar vidlice. Redukce jsou zde poměrně běžné.



Obr. 4: Budova institutu



Obr. 5: Situační plánec univerzity (pro zvětšení klikněte)



Obr. 6: Kancelář s místem vpravo vzadu pro stážistu

4. Možnosti spolupráce a možnosti výměny studentů

Během svého pobytu jsem poznal pouze pracoviště zabývající se impedanční a kapacitanční tomografií, takže mohu komentovat pouze toto pracoviště. Možnosti spolupráce tu jistě jsou (forma a zaměření záleží na konkrétních dohodnutých podmínkách). Pokud by spolupráce měla přinést nějaké nové vědomosti na TUL tak bych spíše doporučoval spolupráci s univerzitou v Manchesteru (impedanční tomografie), univerzitou v Bathu (elektromagnetická tomografie), univerzitami v Polsku (např. Varšava a Łódź se specializací na kapacitanční tomografii), nebo se soustředit na spolupráci s lidmi okolo projektu EIDORS (<http://eidors3d.sourceforge.net/>).

Možnosti výměny studentů vidím také reálně. Záleží samozřejmě na zájmu studentů z ČR a z Anglie. Při pobytu v Anglii je však nutné počítat s poměrně značnou vyžadovanou peněžní částkou za vstup do tamějších laboratoří.

5. Informace a popis vlastní činnosti

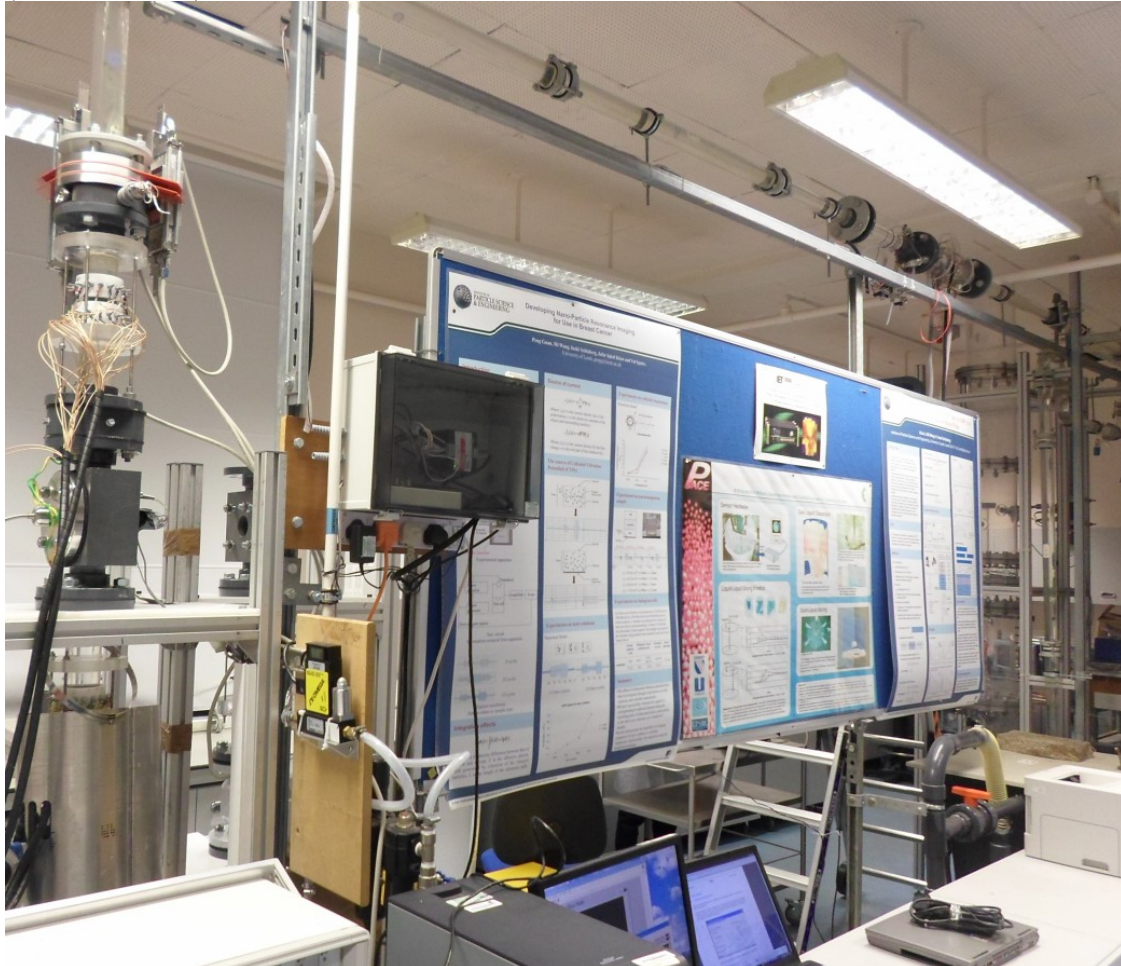
Pročetl jsem několik zpráv týkajících se oblasti Ralska a likvidace zbylých kyselin v podzemí. Navíc jsem kontaktoval několik lidí na univerzitě s žádostí o informaci, zda se nějaký tým na TUL nezabývá problematikou likvidace kyselin v oblasti Ralska. Zjistil jsem, že na TUL je skupina lidí zabývající se touto problematikou s webovou stránkou <http://artec.tul.cz>.

Chtěl bych se také zúčastnit měření na horizontálním potrubí při studiu proudění vody a pevných částic.

2.3.2015 uvítání s prof. Wangem a vytyčení cílů studijního pobytu

3.3.2015 s kolegou jménem Yousef Faraj jsme vedli dlouhou diskuzi o příčinách nepřesného měření pomocí ITS systému v případě měření na UHD v Praze na podzim 2013 (příspěvek byl odprezentován na konferenci v Ráji na jaře 2014).

4.3.2015 měření s Yousefem a Changem dvousložkového proudění v horizontální potrubí (voda a vzduch)



Obr. 7: Laboratoř s horizontálním potrubím pro studium dvousložkového proudění (voda a vzduch)

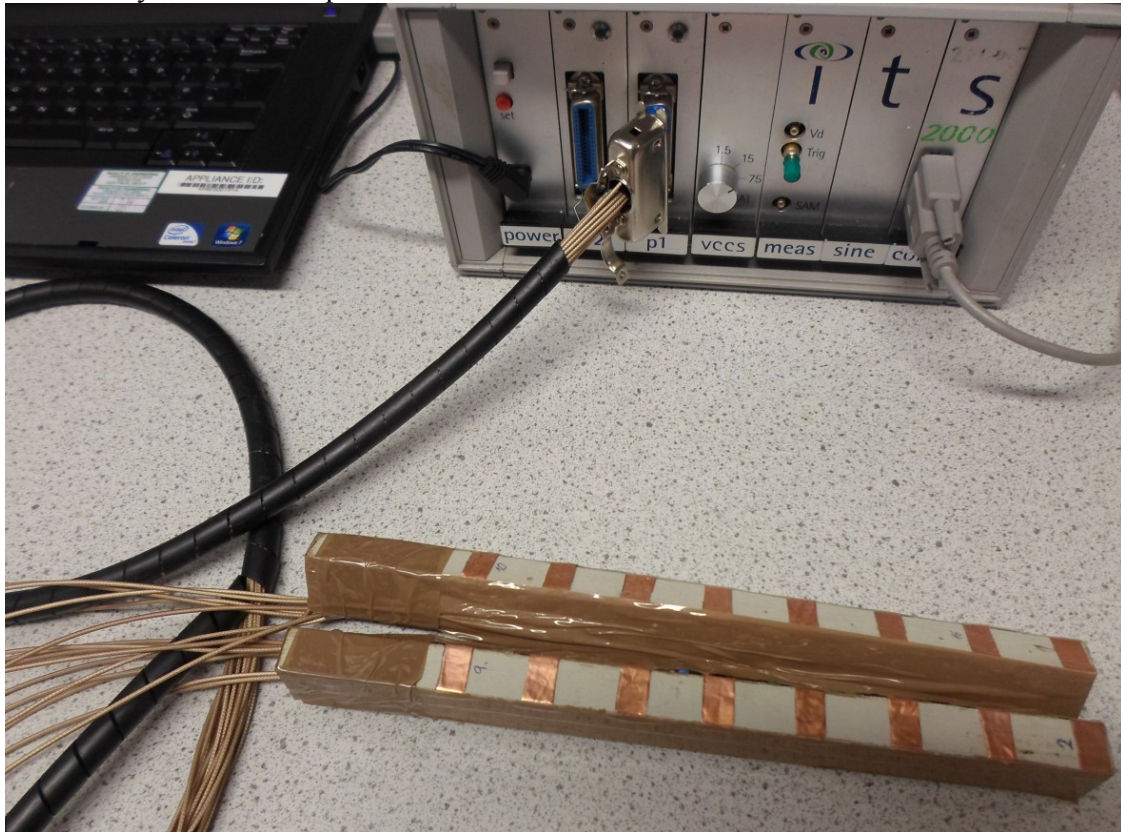
5.3.2015 studium článků dodaných prof. Wangem ohledně měření sedimentu pomocí EIT a ohledně použití EIT pro charakterizaci ropných polí

Prostudované články:

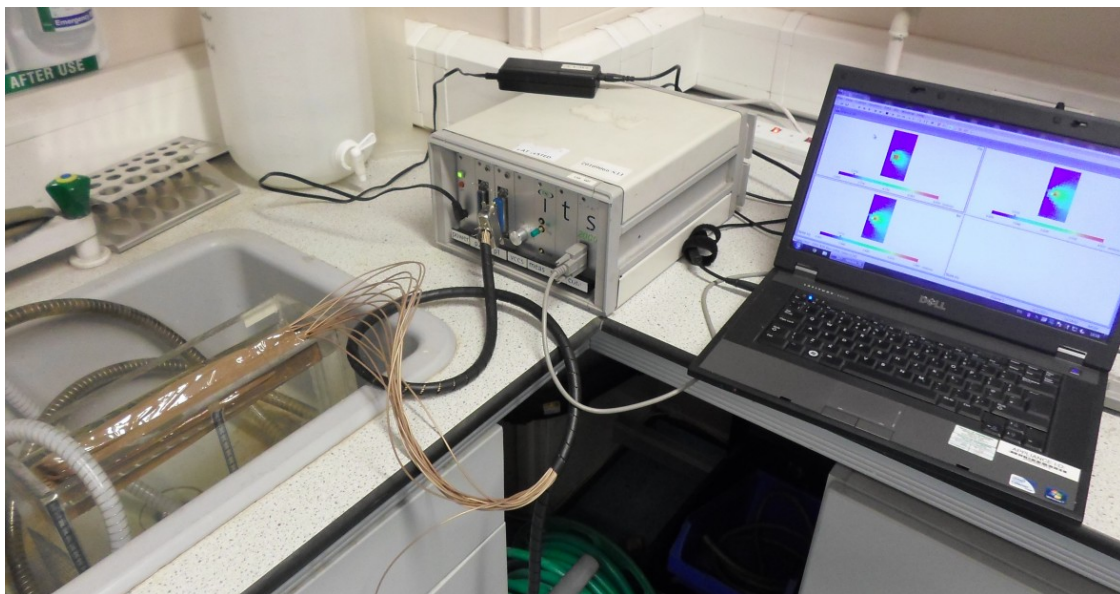
- 1) Schlager: Parallel Array Sensors for Process Visualisation (možnost použití paralelního senzoru pro detekci kruhově symetrického pohybu předmětu)
- 2) Ramskill: Investigation into the Feasibility of the use of Process Tomography for Carbon Capture and Storage (použití ECT m3000 pro monitorování stupně nasycenosti vody CO_2)
- 3) Xie: Imaging technologies in oilfield applications (popis zařízení FloSan Imager a porovnání s EM metodou pro zjišťování velikosti a pozice ložisek)
- 4) Cullivan: Linear EIT for Sedimentation and Sediment Bed Characterization (studium optimálního schématu měření pro charakterizaci rozhraní dvou fází)

- 5) Qiu: Electrical resistance tomography for imaging sub-seabed sediment porosity: initial findings from laboratory-scale experiments using spherical glass beads (popis algoritmu a experiment, při kterém se zjišťovala pórovitost sedimentů na mořském dně)
- 6) Qiu: Electrical Resistance Tomography for Imaging Porosity In Marine Sediments (stručný popis algoritmu jako hlavně popis dvou experimentů, kde se zjišťovala pórovitost sedimentů, avšak bez důležitých obrázků)

6.3.2015 výroba elektrod pro lineární měření



Obr. 8: Lineární elektrody



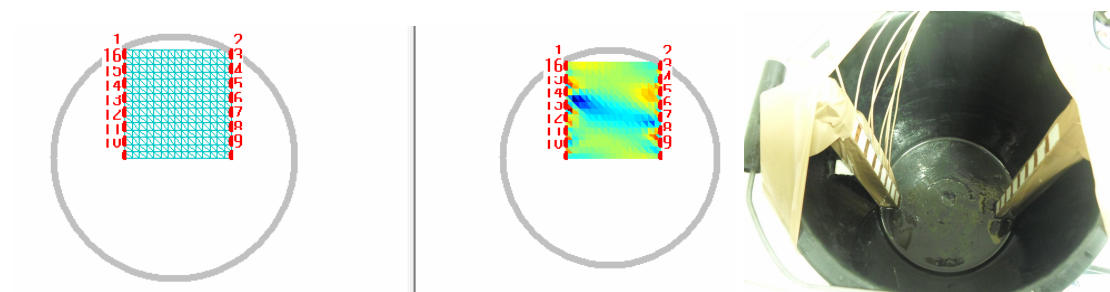
Obr. 9: Měření s akváriem naplněným vodou

9.3.2015 měření na horizontálním potrubí, měření s dvěma tyčemi elektrod v akváriu s vodou

10.3.2015 studium knihovny EIDORS

(<http://eidors3d.sourceforge.net/tutorial/tutorial.shtml>)

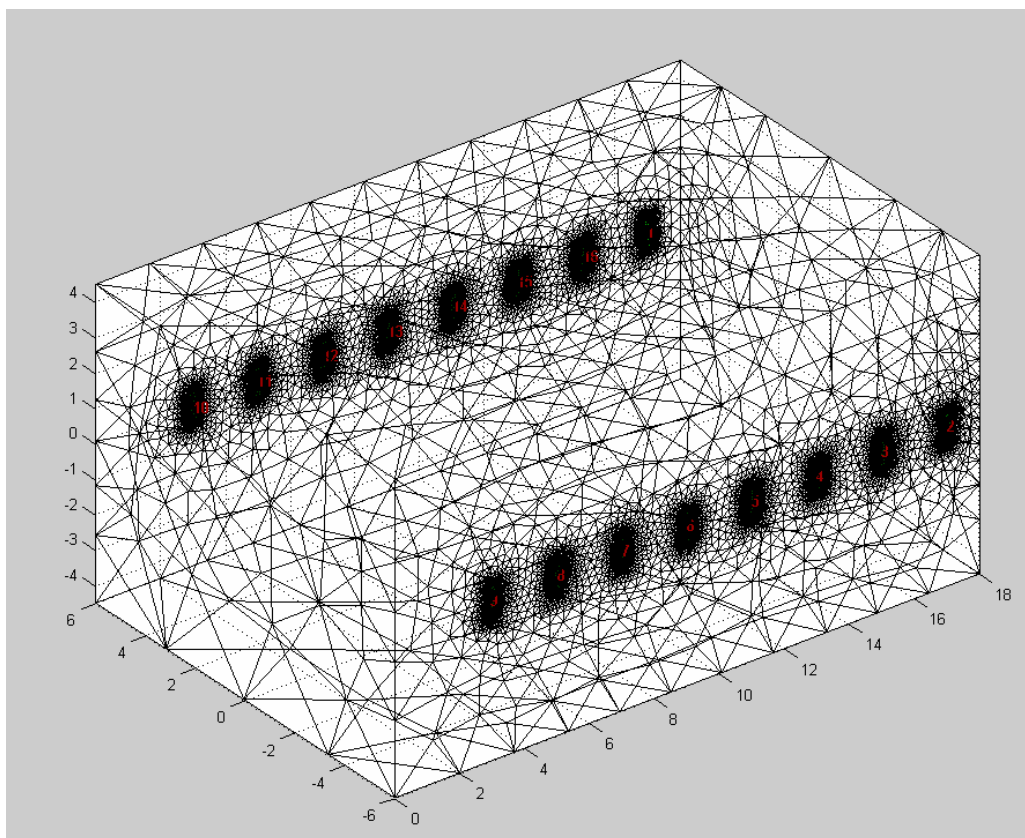
11.3.2015 studium článků z konference o tomografii (<http://wcip7.kis.p.lodz.pl/>), měření dvou tyčí elektrod v kbelíku s vodou



Obr. 10: Rekonstrukce obrazu (evidentně špatné měření, výpočetní mřížka a rekonstrukce), experiment s dvěma elektrodami

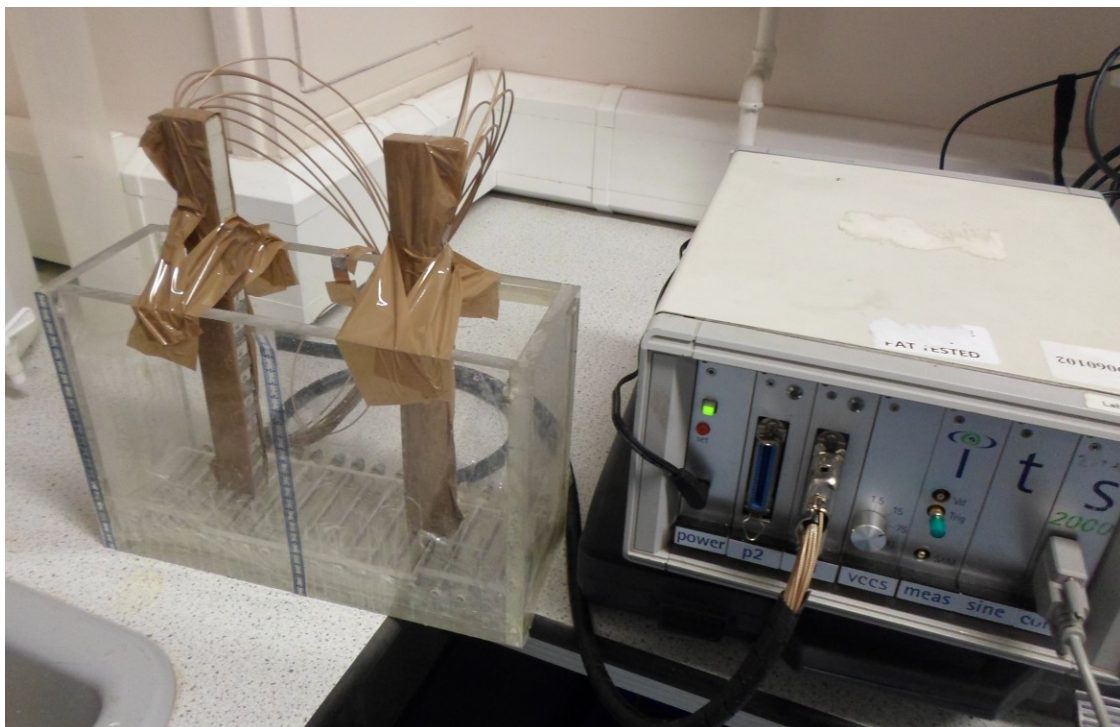
12.3.2015 opětné proměřování experimentu z předešlého dne

13.3.2015 vytváření výpočetního síťování modelu

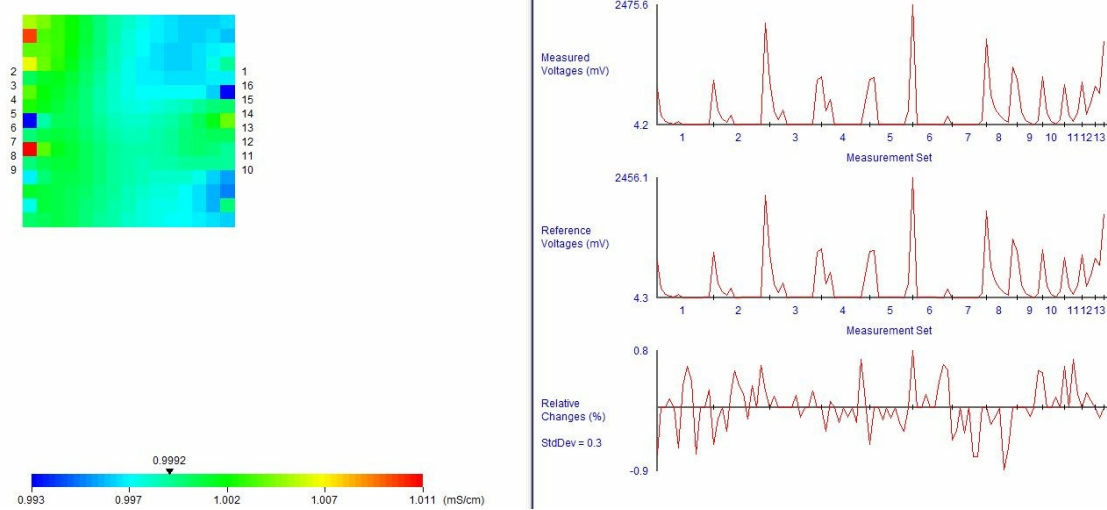


Obr. 11: Síťování modelu

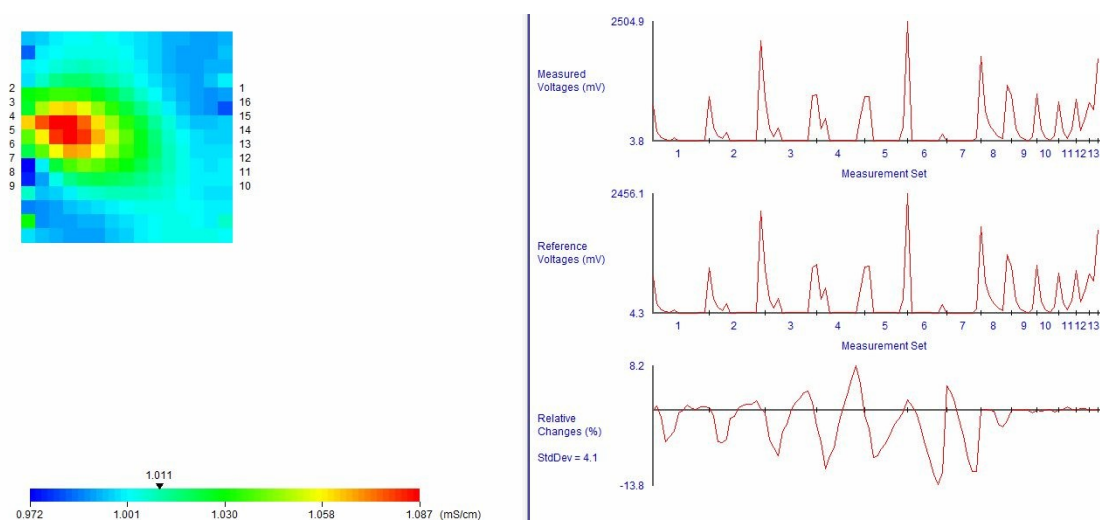
16.3.2015 výroba nových elektrod a měření s ITS ($\sigma=287,3\mu\text{S}/\text{cm}$, $T=18,6^\circ\text{C}$, vzdálenost obou tyčí s elektrodami 12cm, elektrody začínají 0,5 cm nad dnem a jejich výška x šířka je 1x1,5cm, mezi elektrodami je prostor na výšku 1cm bez elektrody, rozměry nádoby xyz je 30cmx9cmx18cm, voda byla čerstvá z kohoutku, zemění bylo na vrchní straně nádoby přesně mezi oběma tyčemi, použitá frekvence 9600Hz a amplituda proudu 15mA, delay cycle byl 20), výsledky v newmeas56.p2k



Obr. 12: Nový přípravek

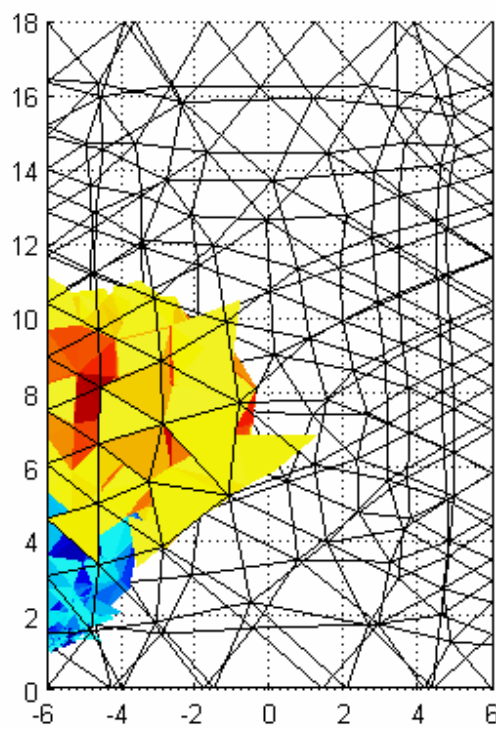


Obr. 13: Měřená reference (relativní změna se držela do $\pm 3\%$)



Obr. 14: Měření předmět ve vodě (kov) – frame 64

17.3.2015 algoritmus pro porovnání naměřených hodnot s očekávanými – Obr. 15
 (@prior_noser, hyperparametr = 1), proměřování soli ve vodě s dvěma tyčemi elektrod



Obr. 15: Výsledek simulace (data z Obr. 15) – rozměry v cm

18.3.2015 proměřování soli ve vodě s dvěma tyčemi elektrod
 19.3.2015 účast na experimentu s horizontálním potrubím (voda s pískem)



Obr. 16: Experimentální zařízení pro měření proudění vody s pískem

20.3.2015 sepisování zprávy o výsledcích

23.3.2015 měření s lineárními elektrodami

24.3.2015 studium modelu v EIDORS – základní zobrazení

25.3.2015 opakované měření s nádobou naplněnou pískem – příprava experimentu



Obr. 18: Detail of soldered electrodes within the tank

26.3.2015 účast na měření proudění vody s pískem, provedení opakovaného měření
s nádobou naplněnou pískem
27.3.2015 závěrečné zhodnocení výsledků



Obr. 18: Měření studentů vody s pískem

6. Souhrn výsledků

Feasibility study of using process tomography for detection of underground contamination

David Krčmařík, Mi Wang
Institute of Particle Science and Engineering

Abstract

This research was aimed to find out the possibility of using Electrical Resistance Tomography (ERT) for a monitoring the underground acid contents. Nowadays this problem is pronounced since on many sites the ground is penetrated with environmental hazardous substances after mining. Hence it is desirable to monitor levels of such contaminants using some low-cost and reliable methods.

Introduction

In many countries there was an intensive extraction of various ores over past decades. One of the extracted ores in the Czech republic was an uranium. There were several locations of uranium extraction. In Fig. 1. there is a situation map of mines in the Czech republic. The mines at Jáchymov and Příbram are already empty.



Fig. 1: Mines of uranium ore in the Czech republic

Overall there are several techniques of extraction uranium. They can be classified into 3 categories: standard mining, heap leaching and in-situ leaching (ISL). Nowadays most of the extraction is done by ISL. The biggest producers of uranium are Kazakhstan, Canada, Australia, Niger and Namibia with total of about 75%.

Uranium ores are normally processed by grinding the ore materials to a uniform particle size and then treating the ore to extract the uranium by chemical leaching. The milling

process commonly yields dry powder-form material consisting of natural uranium which is sold on the uranium market as U_3O_8 .

In-situ leaching (ISL) involves leaving the ore where it is in the ground, and recovering the minerals from it by dissolving them and pumping the pregnant solution to the surface where the minerals can be recovered. Consequently there is little surface disturbance and no tailings or waste rock generated. However, the orebody needs to be permeable to the liquids used, and located so that they do not contaminate ground water away from the orebody.

Uranium ISL uses the native groundwater in the orebody which is fortified with a complexing agent and in most cases an oxidant. It is then pumped through the underground orebody to recover the minerals in it by leaching. Once the pregnant solution is returned to the surface, the uranium is recovered in much the same way as in any other uranium plant (mill).

Ralsko area

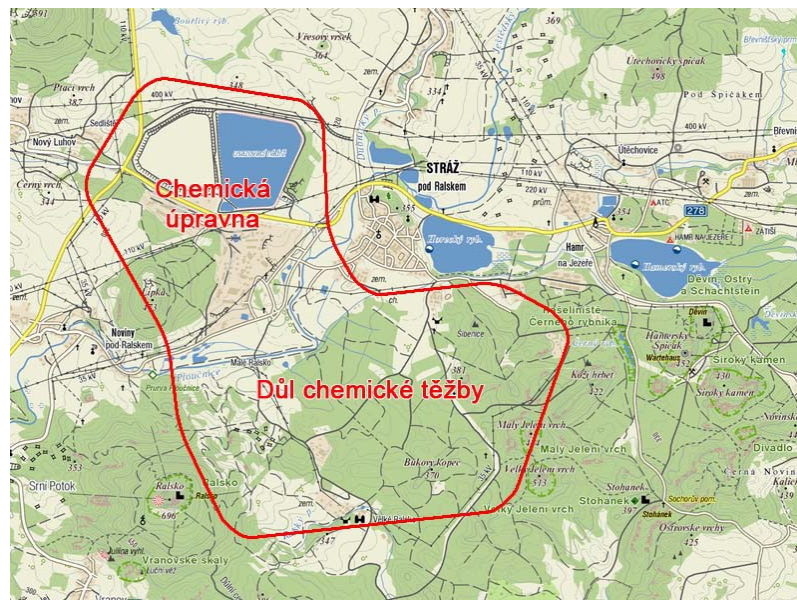


Fig. 2: Ralsko area

In the Ralsko region (Stráž pod Ralskem, northern Czech republic – Fig. 2) mining took place between 1967 and 1996. Since 1996, uranium is exploited as a byproduct of redevelopment of deposit Stráž. 2210 exploration and 7684 mining wells were drilled on the site of deposit. 35 leaching fields on an area of 700 ha were established. Mining area is 24.1 square kilometers. By 1996 total of 15562 tons of uranium was mined. Depth extraction was roughly around 220 m below the surface.

The extraction used was a chemical extraction of uranium - a method of underground leaching of uranium ore from surface boreholes (ISL) - acid leaching (leaching agent: H_2SO_4 , oxidant: HNO_3).

Currently there is an ongoing disposal and reclamation of leaching fields and extensive rehabilitation of the affected geological environment in order to remove residual uranium

enriched technological solutions from the underground and revitalize the rock environment and the environment in the area affected by chemical mining. Nowadays after chemical extraction of uranium about 186 mil. m³ of cenomanian residual technological solutions and 80 mil. m³ of turonian residual technological solutions remained in rocks. To underground during mining was injected with 4100 kt of H₂SO₄ (80% of which reacted with the rock and 800 kt is in the form of free H₂SO₄), followed by 312 kt of HNO₃, 112 kt NH₃, 26 kt HF and 1.5 kt HCl. For the case of the mine in Stráž pod Ralskem a total of 369 mil. m² of underground waters was contaminated on the area of 27 km². Acid solutions (H₂SO₄ sulfuric acid) which were used to extract the uranium are being sucked up from the ground. The process was started in 1996 with the expected end in 2035. At the end of extraction there was about 4.5 mil. ton of acid solutions. The situation of acid solutions is monitored by bored wells. Remediation is solved using controlled pumping and cleaning of residual technological solutions at the station for liquidation and by neutralization of acidic solutions at decontamination station. The technology of water evaporation capacity of about 5.5 cubic meters per minute is used followed by crystallization, recrystallization (crystalline alum - ammonium aluminum sulfate), and neutralization technology of precipitation of salts and metals (maximum capacity of 5.5 cubic meters per minute with reprocessing into usable or unusable safely deposited products). The treated water is discharged into the stream of the river Ploučnice. The geological situation of Ralsko region is in Fig. 3.

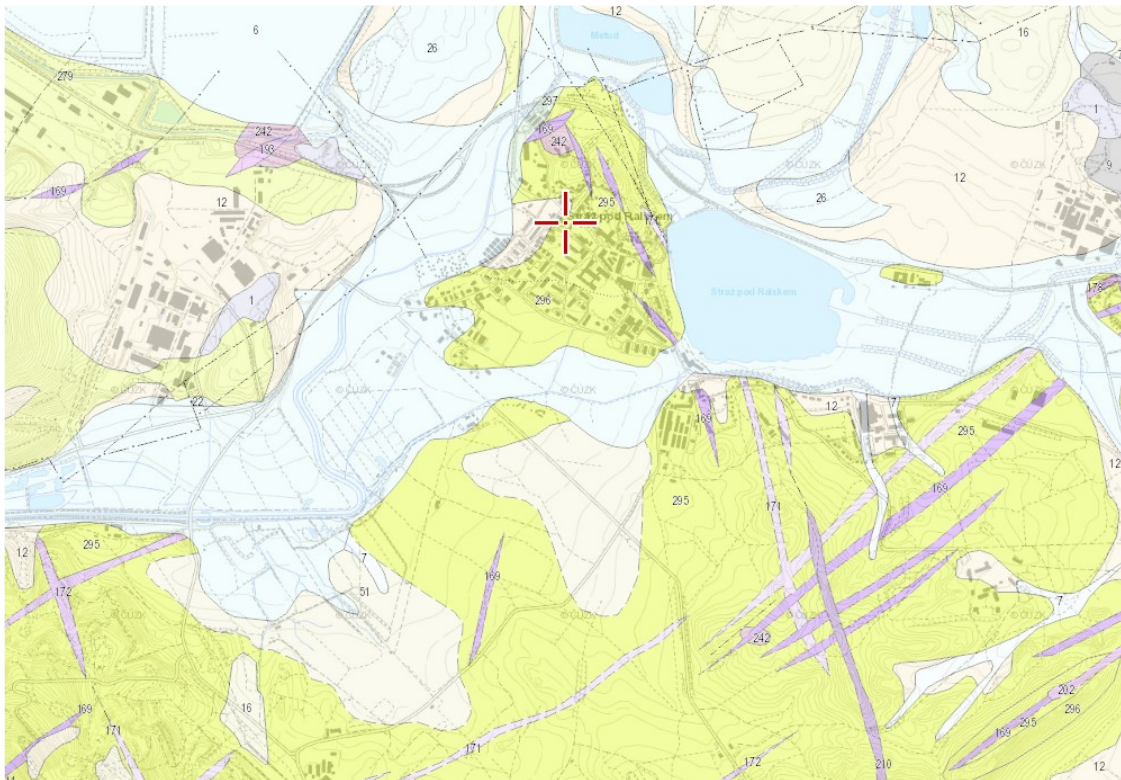


Fig. 3: Area south from Stráž with two soils (12-sandy alumina to aluminum sandy sediment and 295-quartz sandstone)

Conductivity of water and acids

In order to monitor the current content of acid (made mostly of sulfuric acid) the conductivity of H_2SO_4 and H_2O was examined. It was assumed that the Electrical resistance tomography can be used for such monitoring since it can describe the matter using its conductivity.

Conductivity of water

In many cases, conductivity is linked directly to the total dissolved solids (T.D.S.). High quality deionized water has a conductivity of about $5.5 \mu\text{S}/\text{m}$, typical drinking water in the range of $5\text{--}50 \text{ mS}/\text{m}$, while sea water about $5 \text{ S}/\text{m}$ (i.e., sea water's conductivity is one million times higher than that of deionized water).

The SI unit of conductivity is S/m and, unless otherwise qualified, it refers to 25°C . Often encountered in industry is the traditional unit of $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($10^6 \mu\text{S}/\text{cm} = 10^3 \text{ mS}/\text{cm} = 1 \text{ S}/\text{cm}$). The values in $\mu\text{S}/\text{cm}$ are lower than those in $\mu\text{S}/\text{m}$ by a factor of 100 (i.e., $1 \mu\text{S}/\text{cm} = 100 \mu\text{S}/\text{m}$). Occasionally a unit of EC (electrical conductivity) is found on scales of instruments: $1 \text{ EC} = 1 \mu\text{S}/\text{cm}$. Sometimes encountered is mho (reciprocal of ohm): $1 \text{ mho}/\text{m} = 1 \text{ S}/\text{m}$. Historically, mhos antedate Siemens by many decades; good vacuum-tube testers, for instance, gave transconductance readings in micromhos.

The commonly used standard cell has a width of 1 cm , and thus for very pure water in equilibrium with air would have a resistance of about 10^6 ohm , known as a megohm, occasionally spelled as "megaohm". Ultra-pure water could achieve 18 megohms or more. Thus in the past, megohm-cm was used, sometimes abbreviated to "megohm". Sometimes, conductivity is given in "microSiemens" (omitting the distance term in the unit). While this is an error, it can often be assumed to be equal to the traditional $\mu\text{S}/\text{cm}$.

The conversion of conductivity to the total dissolved solids depends on the chemical composition of the sample and can vary between 0.54 and 0.96. Typically, the conversion is done assuming that the solid is sodium chloride, i.e., $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ is then equivalent to about 0.64 mg of NaCl per kg of water.

Molar conductivity has the SI unit $\text{S m}^2 \text{ mol}^{-1}$. Older publications use the unit $\Omega^{-1} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$.

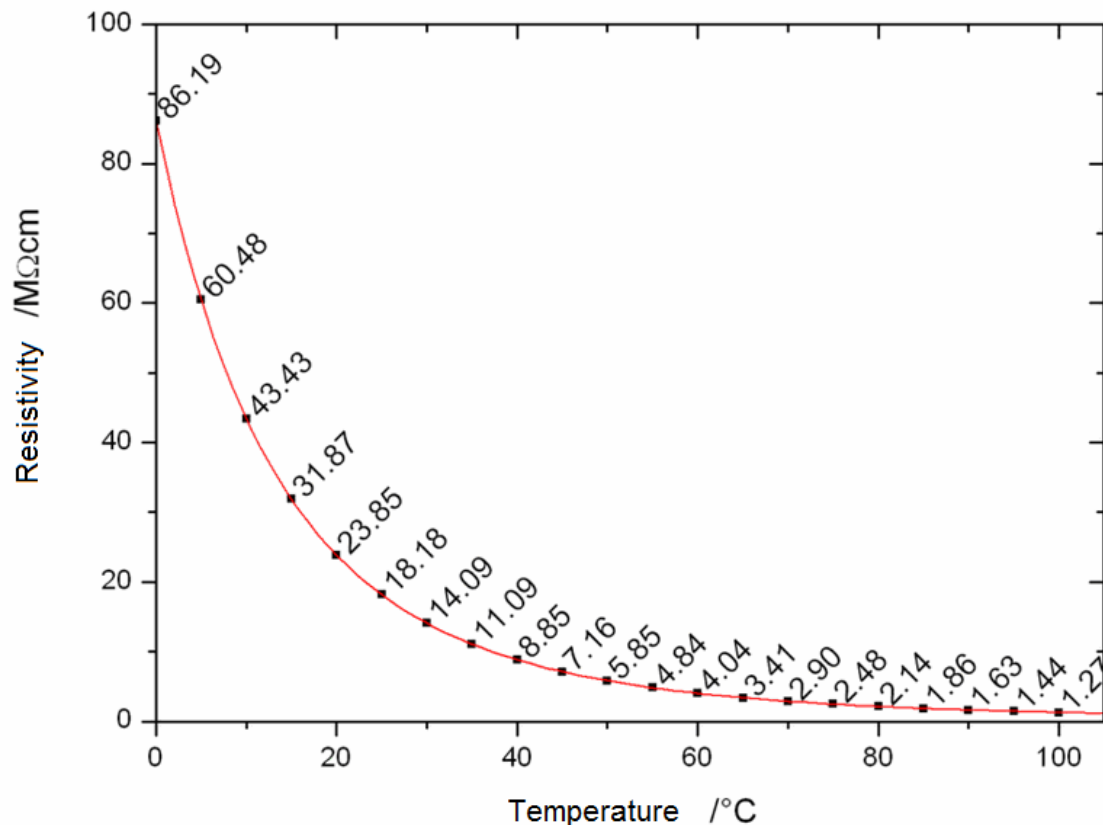


Fig. 4: Resistivity of pure water

Conductivity of water depends on the temperature – Fig. 4. Basic compensation is normally done by assuming a linear increase of conductivity versus temperature of typically 2% per degree.

Conductivity of sulfuric acid (H_2SO_4)

Anhydrous sulfuric acid has a very high electrical conductivity, which is caused by internal ionization – autoprotolysis and by so called mechanism of proton transfer, which allows the rapid passage of current through a viscous fluid with hydrogen bonds.

The specific conductance of a solution containing one electrolyte depends on the concentration of the electrolyte. Therefore it is convenient to divide the specific conductance by concentration. This quotient, termed molar conductivity, is denoted by Λ_m

$$\Lambda_m = \kappa / c.$$

Strong electrolytes are believed to dissociate completely in solution. The conductivity of a solution of a strong electrolyte at low concentration follows Kohlrausch's Law

$$\Lambda_m = \Lambda_m^0 - K \cdot \sqrt{c}$$

where Λ_m^0 is known as the limiting molar conductivity, K is an empirical constant and c is the electrolyte concentration. (Limiting here means "at the limit of the infinite

dilution".) In effect, the observed conductivity of a strong electrolyte becomes directly proportional to concentration, at sufficiently low concentrations i.e. when

$$\Lambda_m^0 > K \cdot \sqrt{c}.$$

As the concentration is increased however, the conductivity no longer rises in proportion. Moreover, Kohlrausch also found that the limiting conductivity of anions and cations are additive: the conductivity of a solution of a salt is equal to the sum of conductivity contributions from the cation and anion

$$\Lambda_m^0 = \nu_+ \lambda_+^0 + \nu_- \lambda_-^0$$

where ν_+ and ν_- are the number of moles of cations and anions, respectively, which are created from the dissociation of 1 mole of the dissolved electrolyte;

λ_+^0 and λ_-^0 are the limiting molar conductivities of the individual ions.

The following table gives values for the limiting molar conductivities for selected ions.

Limiting ion conductivity in water at 298 K

Cations	$\lambda_+^0 / \text{mS m}^2 \text{mol}^{-1}$	anions	$\lambda_-^0 / \text{mS m}^2 \text{mol}^{-1}$
H ⁺	34.96	OH ⁻	19.91
Li ⁺	3.869	Cl ⁻	7.634
Na ⁺	5.011	Br ⁻	7.84
K ⁺	7.350	I ⁻	7.68
Mg ²⁺	10.612	SO ₄ ²⁻	15.96
Ca ²⁺	11.900	NO ₃ ⁻	7.14
Ba ²⁺	12.728	CH ₃ CO ₂ ⁻	4.09

Tab. 1: Limiting ion conductivity in water

An interpretation of these results was based on the theory of Debye and Hückel

$$\Lambda_m = \Lambda_m^0 - (A + B \cdot \Lambda_m^0) \cdot \sqrt{c}$$

where A and B are constants that depend only on known quantities such as temperature, the charges on the ions and the dielectric constant and viscosity of the solvent. As the name suggests, this is an extension of the Debye–Hückel theory, due to Onsager. It is very successful for solutions at low concentration.

Electrical resistance tomography

The measurements at each electrode can be simulated also using a theoretical forward problem. The solution to the forward problem is solved, for an ohmic and isotropic object, by applying the appropriate electromagnetic equations and boundary conditions to the meshed model of the object, using the finite element method. The equation to be solved is Laplace's equation, for a potential $\phi(x,y,z)$, shown below in Eq. 1, with the boundary conditions that the current density on the object surface under the electrodes is of the form shown in Eq. 2 where σ is the conductivity and J is the current density. J is equal to zero on object surface not under the electrodes. Eq. 3 shows the potential V , when measured at an electrode is the sum of the potential on the surface under the electrode and the voltage drop due to the contact resistance, z , of the electrode.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (1)$$

$$\sigma \frac{\delta \varphi}{\delta n} = J \quad (2)$$

$$\varphi + z \sigma \frac{\delta \varphi}{\delta n} = V \quad (3)$$

Experiments

I have decided to make a feasibility experiment with an experimental tank filled with a sand and two linear arrays of electrodes. The experimental setup is visible in Fig. 5.

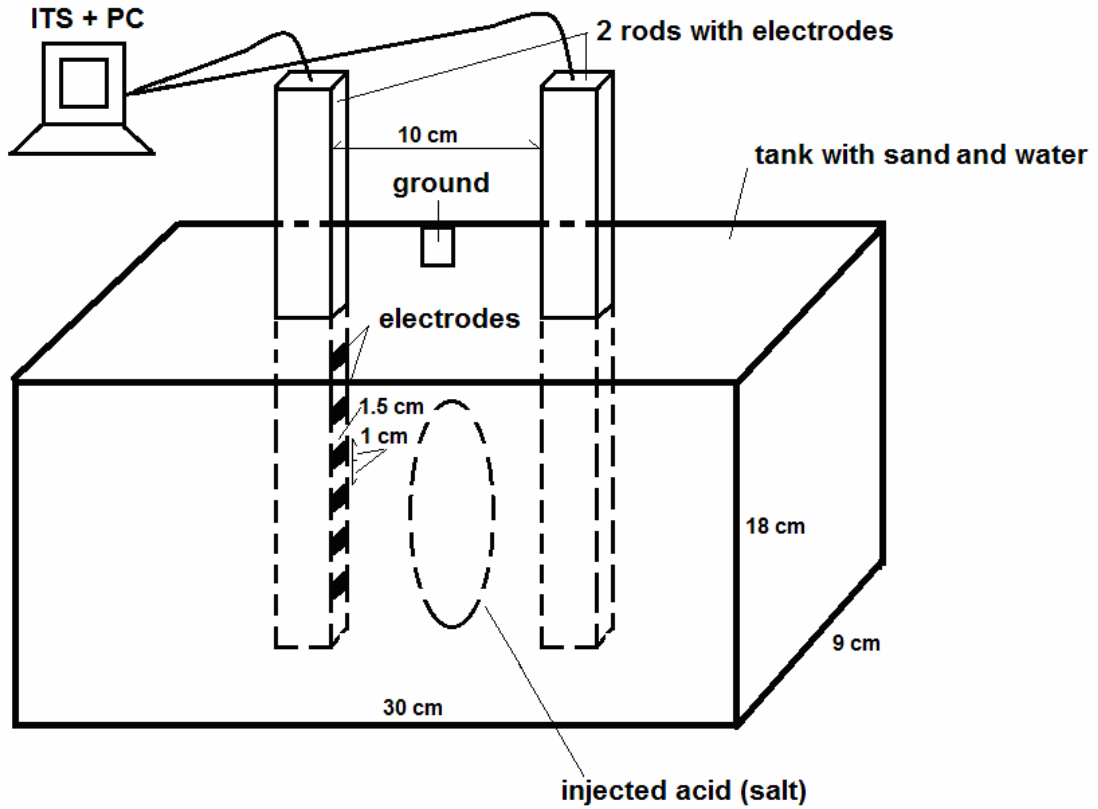


Fig. 5: Experimental setup

In the laboratory was a functional electrical impedance tomograph (ITS 2000) and I could also use the p2+ and SCG software. I had to manufacture the two rods with electrodes (on each rod there were 8 electrodes – it means total number of electrodes was 16). Each electrode had dimensions of 1x1.5 cm and the distance between the edges of electrodes was 1 cm. Each electrode was soldered in order to achieve better contact impedances. The experiment is shown in Fig. 6.

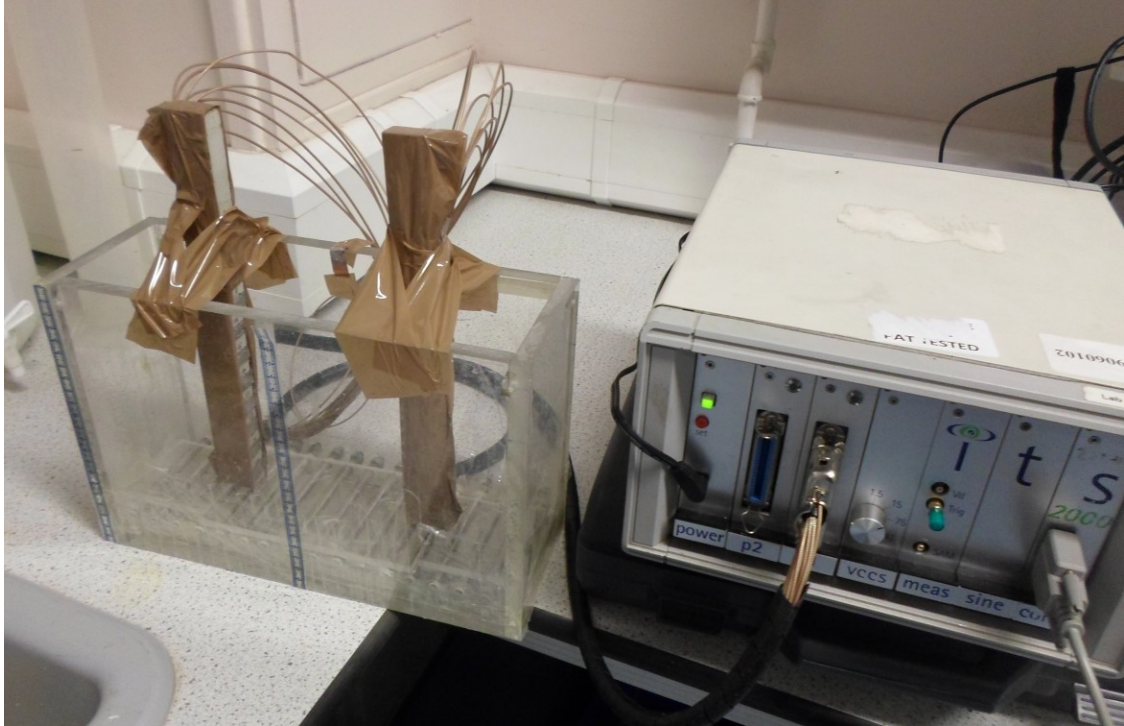


Fig. 6: Experimental preparation with the measuring device ITS 2000.

At the beginning the vessel was filled with tapped water ($\sigma=287,3\mu\text{S}/\text{cm}$, $T=18,6^\circ\text{C}$, used driving frequency 9000 Hz, current amplitude 15 mA) and a mettalic object was merged between the electrodes. The electrodes were arranged in a manner shown in Fig. 7a (deformed circular ring).

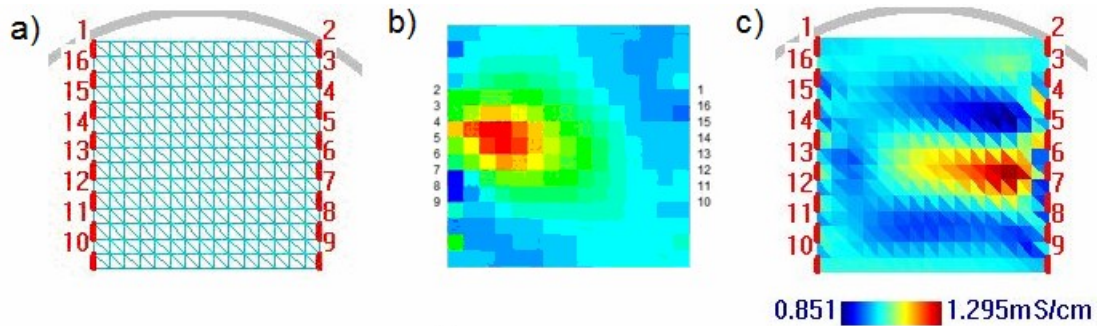


Fig. 7: a) Electrode arrangement, b) reconstruction from p2+, c) reconstruction from SCG (careful with flipped sides)

It is important to note that usable images coming from reconstruction are only in the middle of the image (within the area roughly 15-4-7-12 – see Fig. 7). The result with an mettalic object is shown in Fig. 7b.

After that the vessel was filled with sand (Fig. 8). Then the sand was saturated with tapped water and after about 10 minutes when the majority of water left the vessel though the holes in the bottom a reference was taken.

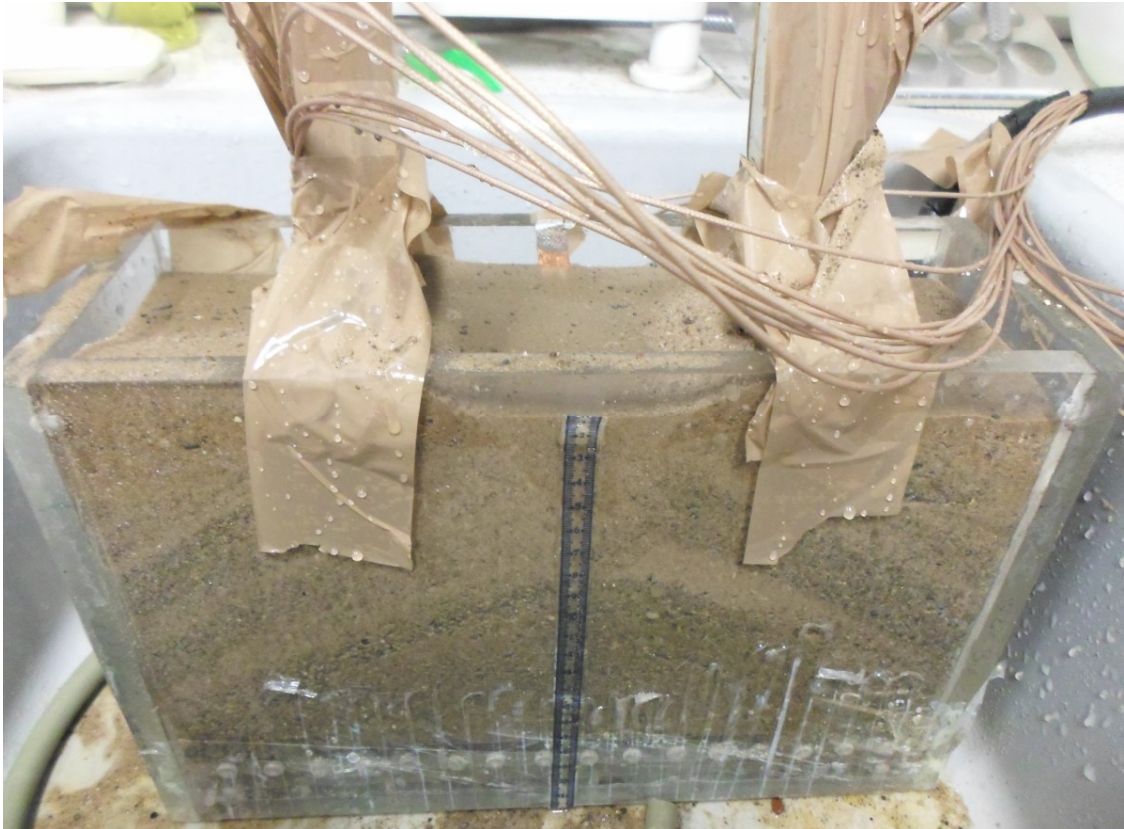


Fig. 8: Experimental setup with vessel filled with sand

I have also prepared a half saturated solution of salt and water (18 g of salt filled up to 100 ml of water, solubility of salt is 36 g/100 ml @ 25°C). The results processed by SCG are visible in Fig. 9 for various time moments (the speed of acquisition was 1 frame/s and the solution was added during the 12th frame). The injected current was 8 mA and driving current frequency was 9600 Hz.

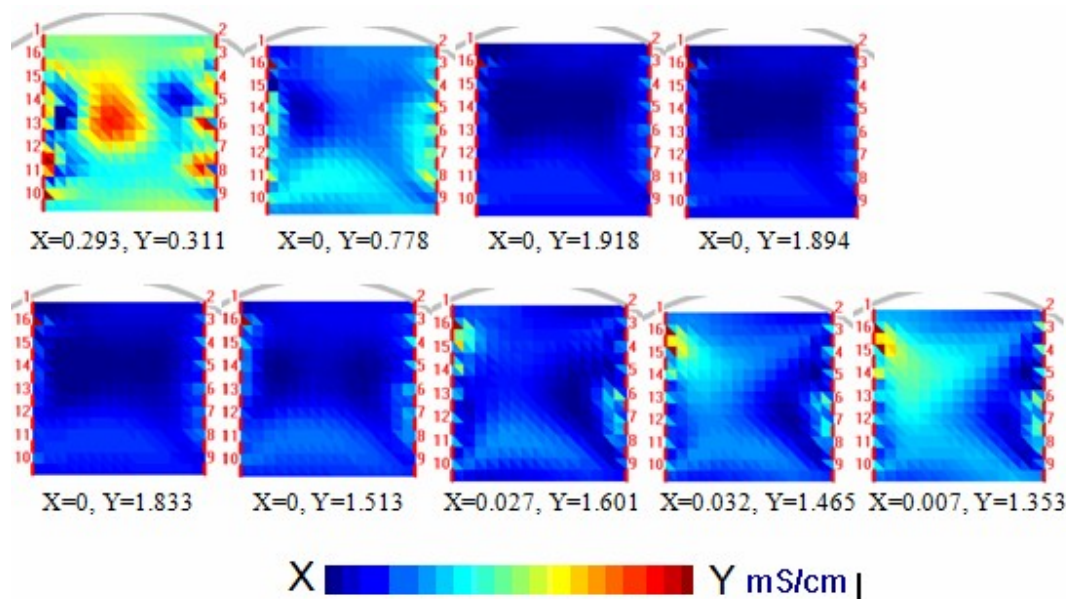


Fig. 9: Results from measuring salt water in a tank filled with sand (from left to right) a) noise before a salt water was added – frame 10, b) immediately when salt water added – frame 13, c) frame 16, d) frame 18, e) frame 50 (bottom row), f) frame 200, g) frame 500, h) frame 800, i) frame 1000

Overall resistivity (conductivity) was also measured. The results are depicted in Fig. 10. The initial resistivity of $19,68 \Omega\text{m}$ very quickly drops after adding salt water to $15,12 \Omega\text{m}$ and then as the time proceeded there was a steady decrease in resistivity down to $12,46 \Omega\text{m}$ (@1000 frame).

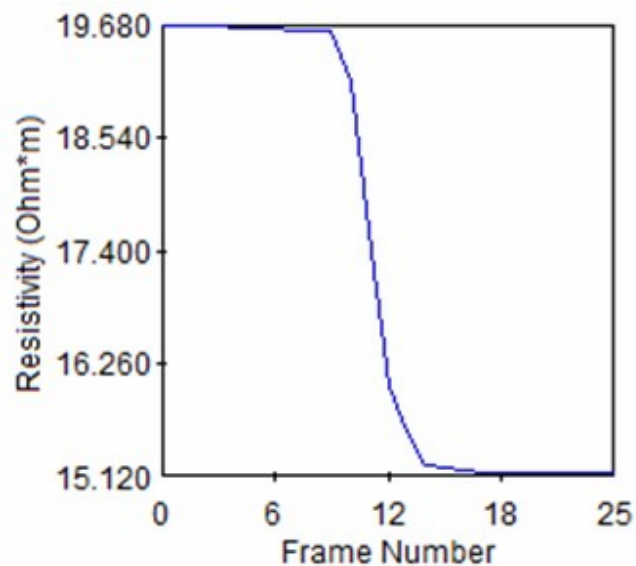


Fig. 10: Resistivity change when salt water added.

The overall resistivity dropped to $9.7 \Omega\text{m}$ after 3 days and to $8.4 \Omega\text{m}$ after 6 days. A tomographic measurement was performed again with the result shown in Fig. 11.

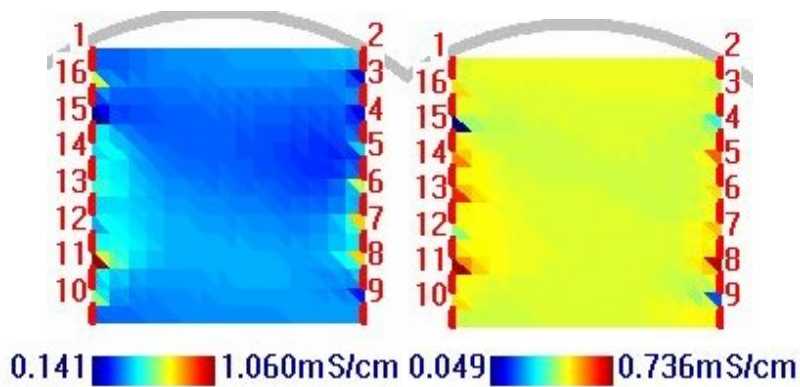


Fig. 11: Left - reconstruction after 3 days, right – reconstruction after 6 days.

Repeated measurement with solution of cca 30ml of water with sand (conductivity 30 mS/cm) was prepared. Frames were taken every 30 s. Anyway during setup of the measurement the initial relative change was always down to -100% - Fig. 12.

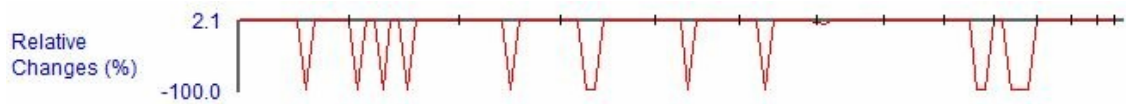


Fig. 12: Problems with probably bad reference

I have tried to compare the exported results in Matlab but the reference and measured data was identical – Fig. 13.

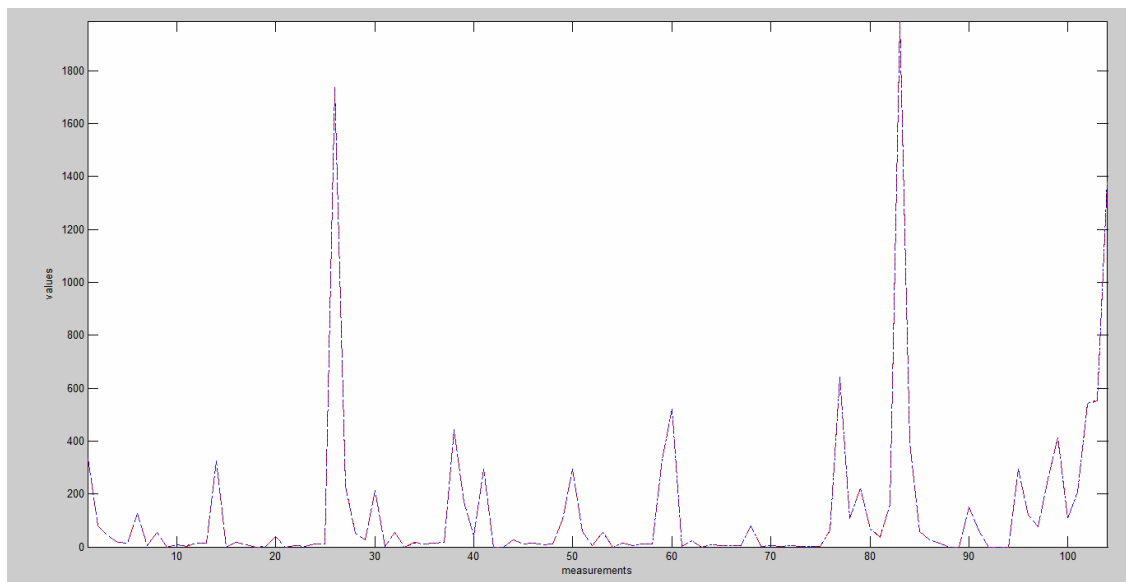


Fig. 13: Reference and measured data

Hence I have decided to perform the experiment. The number of frames acquired was 490. At frame 3 the 30 ml of water with salt was added (it was poured in cca 15 s), again at frame 240 (after 2 hours) this was repeated with another 30 ml of water with salt. The results were not satisfactory – Fig. 14. The results were processed with SCG software. Each time after adding the solution of water with salt the conductivity after

reconstruction dropped to 0. Then approximately after 0.5-1 hour the reconstruction started to show some non zero results. Overall resistivity was also measured – on this plot it is nicely visible when I have added for the first time the solution (frame 3) and for the second time the solution (frame 240) – Fig. 15.

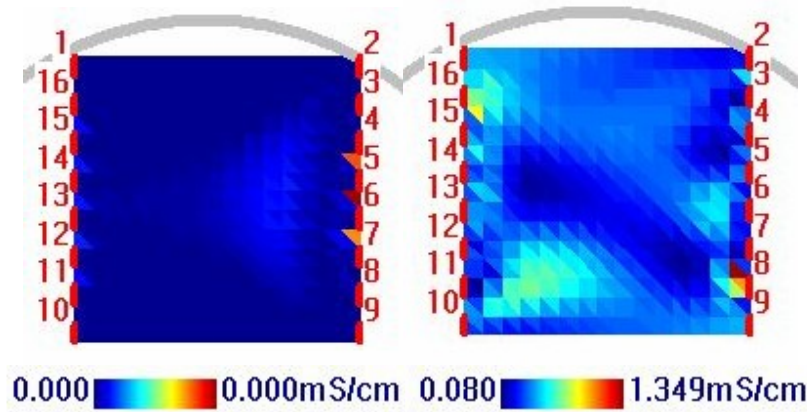


Fig. 14. Left – reconstruction after adding a solution, right reconstruction approximately sudden change after 0.5-1 hour

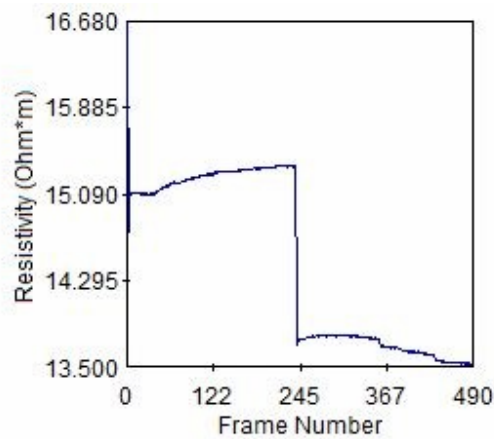


Fig. 15. Measured overall resistivity

Before the experiment the solution of water with salt was tinted in order to see the propagation of the solution through the tank but without any success – Fig. 16.



Fig. 16: Left – photograph of a tank before pouring the solution, right – after pouring the solution (only very small color change is visible at the top)

Conclusion

In this study I was trying to investigate the feasibility of using ERT for acid concentration monitoring. Generally this approach is feasible. The results showed certain dependencies but for further confirmation it will be necessary to build better models and mainly find the optimal electrodes in terms of design and material.