

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inž. geologie a užitá geofyziky

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geotechnologie



FRANTIŠEK BALÁK

**VÝRONY PŘÍRODNÍHO CO₂ A JEJICH VZTAH K TEKTONICKÝM
PROCESŮM**

**NATURAL CO₂ OUTBURSTS AND THEIR RELATION TO TECTONIC
PROCESSES**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Tomáš Fischer, Ph.D.

Praha, 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Veškerou literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Sobotce dne 11.05.2013

.....

František Balák

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé práce doc. RNDr. Tomáši Fischerovi, Ph.D. za vstřícnost, věnovaný čas, cenné odborné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Lee Paličkové za pomoc se stylistickou úpravou práce a za podporu během celého studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje probíhající geodynamické aktivitě v oblasti severozápadních Čech kde se jako dozvuk třetihorní riftové aktivity objevují časté zemětřesné roje a dochází zde k výronům přírodního CO₂. Cílem první části práce je shrnutí charakteru těchto geologických jevů se zaměřením na výrony CO₂ a jejich charakteristika. Jsou zde sledovány geologické poměry, chemické a izotopové složení, vliv zemských slapů, atmosférického tlaku a seismické aktivity. V další části práce jsou analyzovány záznamy dvou monitorovacích stanic z hlediska vlivu atmosférického tlaku a teploty.

Klíčová slova: severozápadní Čechy; CO₂; zemské slapy; zemětřesné roje

Abstract

This thesis is deals with the running geodynamic activity of NW Bohemia, where frequent earthquake swarms and natural CO₂ emanations occur as a possible fade-out of the Tertiary rift activity. The first part summarizes the nature of these geological phenomena with a focus on CO₂ escapes and its characteristics. These escapes are viewed from the viewpoint of geology and chemical and isotopic composition along with the effect of earth tides, barometric pressure and seismic activity. In the second part I analyse the records of two CO₂ monitoring stations in terms of atmospheric pressure and ambient temperature.

Keywords: NW Bohemia; CO₂; earth tides; earthquake swarms

Obsah

1 Úvod.....	4
2 Výrony plynu	5
2.1 Charakteristiky sledované oblasti	5
2.1.1 Geologie zájmové oblasti	5
2.1.2 Geografické vymezení území	6
2.1.3 Charakter geologické aktivity.....	6
2.1.4 Mapa zájmové oblasti.....	8
2.1.5 Měřicí stanice	9
2.1.6 Klasifikace stanic.....	10
2.2 Charakter unikajícího plynu	12
2.2.1 Chemické složení plynů	12
2.2.2 Průtok plynů geologickým prostředím	13
2.3 Původ plynů	15
2.3.1 Poměr izotopů $^3\text{He}/^4\text{He}$	15
2.3.3 Poměr izotopů ^{13}C	15
2.3.4 Anomálie hladiny podzemní vody.....	16
2.4 Zemské slapy.....	17
2.4.1 Zemské slapy – definice	17
2.4.2 Vztah slapů k zemětřesení	17
2.4.3 Vztah k anomáliím plynu	19
2.4.4 Vztah k anomáliím hladiny podzemní vody.....	19
2.5 Tlak vzduchu	21
2.5.1 Anomální působení tlaku vzduchu	21
2.5.2 Tlak vzduchu v ČR.....	21
2.6 Seismická aktivita v oblasti.....	23
2.6.1 Zemětřesné roje a mechanismus jejich vzniku	23

2.6.2 Pozorování zemětřesení a jejich časový průběh	23
2.6.3 Klasifikace zemětřesení	25
2.6.4 Příčiny a průběh zemětřesení.....	26
2.6.5 Vliv zemětřesení na CO ₂	26
3 Metodika a data.....	28
4 Sledování chování záznamu stanic	29
4.1 Porovnání záznamu atmosférického tlaku	29
4.2 Spektrální analýzy	30
4.3 Studium pulsů na stanici Prameny	32
5 Diskuse a Závěr	35
6 Použitá literatura a zdroje dat	36
7 Přílohy.....	39

Seznam obrázků

Obr.1: Mapa geologie zájmového území se zakreslenými vrty

Obr. 2: Komorní Hůrka, severní strana.

Obr. 3: Distribuce zemětřesných rojů a pramenů unikajícího plynu v oblasti severozápadní Čechy/ Vogtland s vyznačenými zlomy a vulkány.

Obr. 4: Mapa sledovaných vývěřů plynu CO₂ v oblasti severozápadní Čechy/Vogtland.

Obr. 5: Nákres geodynamické situace v oblasti severozápadních Čech/Vogtland.

Obr. 6: Nákres geodynamické situace v oblasti severozápadních Čech/Vogtland.

Obr. 7: Příklad vztahů mezi veličinami slapového působení.

Obr. 8: Srovnání HPV ve vrtu NK 2 a relativního objemové deformace indukované zemskými slapy.

Obr. 9: Desetidenní záznam hydrografu doplněný o záznam barometru a spočítané plošné deformace hornin.

Obr. 10: tlakový gradient zaznamenaný na stanici Cheb 7. – 10. prosince 1973.

Obr. 11: Prostorová distribuce ohnisek 3084 zemětřesení z období 1991 – 2001 a 143 vybraných zemětřesení z roje z období 1985/1986 v oblasti Nový Kostel.

Obr. 12: Distribuce mikro-rojů na hlavní zlomové ploše.

Obr. 13: Srovnání atmosférických tlaků na stanicích Prameny, Hartoušov a Cheb v září 2010.

Obr. 14: Srovnání rozdílů atmosférických tlaků na stanicích Prameny, Hartoušov a Cheb v září 2010.

Obr. 15 a-c: Spektrum záznamu tlaku na stanici Cheb v období od 15.6. do 22.10.2011.

Obr. 16: Závislost amplitudy 24- hodinové periody teploty a tlaku na stanici Hartoušov.

Obr. 17: Záznam anomálie z 23. a 24. února 2011.

Obr. 18: Záznam anomálie z 30.11. až 05.12. 2010.

Obr. 19: Závislost teploty a tlaku v čase počátku anomálie.

1 Úvod

Tato bakalářská práce se věnuje probíhající geologické aktivitě v oblasti severozápadních Čech. Jako dozvuk třetihorní riftové aktivity se zde objevují časté zemětřesené roje a dochází zde k výronům přírodního CO₂. Cílem práce je shrnutí charakteru těchto geologických jevů z hlediska výronů CO₂ a některých jejich známých souvislostí. Současný výzkum zemětřesení v oblasti severozápadních Čech ukazuje, že přítomnost CO₂ v horninovém prostředí může ovlivňovat průběh zemětřesení a dokonce může působit jako jeden ze spouštěcích mechanismů (Horálek a Fischer, 2008). Kromě těchto témat je zde věnován větší prostor vlivu působení slapových sil na geologické jevy v severozápadních Čechách. Slapové síly deformují povrch Země a tím mohou uvolňovat plyn uzavřený v puklinách (Weinlich et al., 2006). Jejich silové působení může rovněž v kombinaci s dalšími vlivy působit jako jeden ze spouštěcích mechanismů zemětřesení (Fischer et al., 2006).

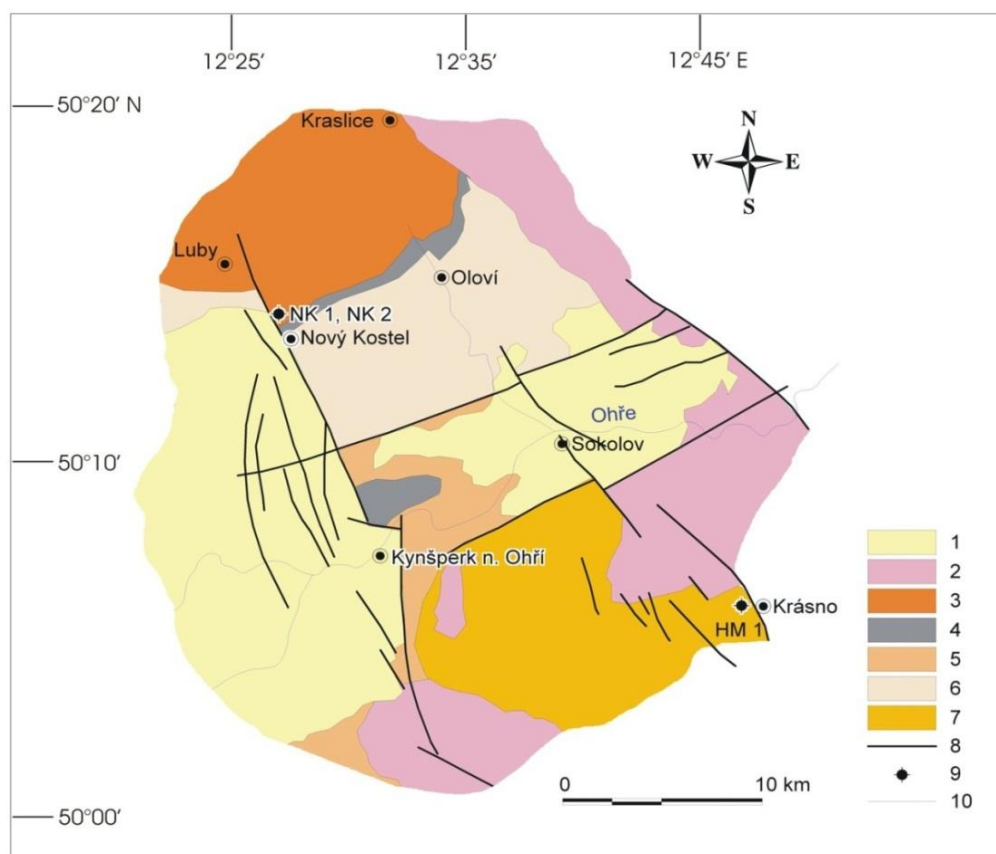
Dalším cílem práce je zhodnocení spolehlivosti záznamu některých sledovaných stanic. Práce je rozdělena na šest kapitol, každá se zabývá aktivitou plynu CO₂ z hlediska různých problematik: Geologických a geodynamických poměrů, chemického a izotopového složení, zemských slapů, atmosférického tlaku a seismické aktivity.

2 Výrony plynu

2.1 Charakteristiky sledované oblasti

2.1.1 Geologie zájmové oblasti

Oblast severozápadních Čech, kterou se práce zabývá, je součástí geologického celku Český Masiv, který se formoval v období před 500 až 250 miliony let, a dnes tvoří jeden z největších pevných celků ve střední a západní Evropě. Region severozápadních Čech leží v přechodové zóně tří varijských struktur. Severní blok – Oloví je tvořen především svorem a fylitem. Jihozápadní Kynšperský blok je tvořen svorem, fylitem a kvarcitem. Jeho východní část je překryta tercierními sedimenty Sokolovské pánve. Jižní Svatavské krystalinikum je odděleno Sokolovským a Mariánskolázeňským zlomem (Stejskal *et al.*, 2003).



Obr.1: Mapa geologie zájmového území se zakreslenými vrty, které používá k monitorování Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR (Stejskal *et al.*, 2006). 1-neogenní sedimenty; 2-granity a granodiority; 3 – fylity; 4 – kvarcitem; 5 – svory a fylity bloku Kynšperk; 6 - svory a fylity bloku Oloví; 7 – slavkovské krystalinikum; 8 – tektonické zlomy; 9 - pozorovací vrty ; 10 – vodní toky

2.1.2 Geografické vymezení území

Seismicky aktivní část Českého masivu je na území Čech přibližně vymezena těmito městy: Kraslice, Aš, Cheb, Lázně Kynžvart a Sokolov, na německé straně pak městy Plauen a Marktreudwitz (Stejskal *et al.* 2005). Z hlediska výronů plynů jsou v oblasti severozápadních Čech nejvýznamnější čtyři hlavní centra: Chebská pánev (~90 m³/hod), Mariánské Lázně a okolí (~156 m³/hod), Karlovy Vary a okolí (~356 m³/hod) a menší centrum Konstantinovy Lázně (~2.7 m³/hod), podle Weinlicha *et al.*, (2003). Obec Nový Kostel a její blízké okolí, které se vyznačuje jako nejméně aktivní epicentrum zemětřesných rojů, leží na severním konci Mariánskolázeňského zlomu. Na německé straně leží pramenné oblasti Vogtland a Oberpfalz (Bräuer *et al.*, 2007). Německým pramenům je rovněž potřeba věnovat pozornost, protože představují pokračování zlomové oblasti, obvykle označované „severozápadní Čechy/Vogtland“.

2.1.3 Charakter geologické aktivity

Třetihorní vulkanickou aktivitu v oblasti dokazují vulkány Komorní Hůrka, Železná Hůrka a maarový vulkán Mýtina, ležící u hranic s Německem (Mrlina *et al.*, 2009). Geodynamická aktivita, která se omezuje na mofety a slabá zemětřesení, je považována za poslední fázi vulkanické činnosti (Koch *et al.*, 2008).



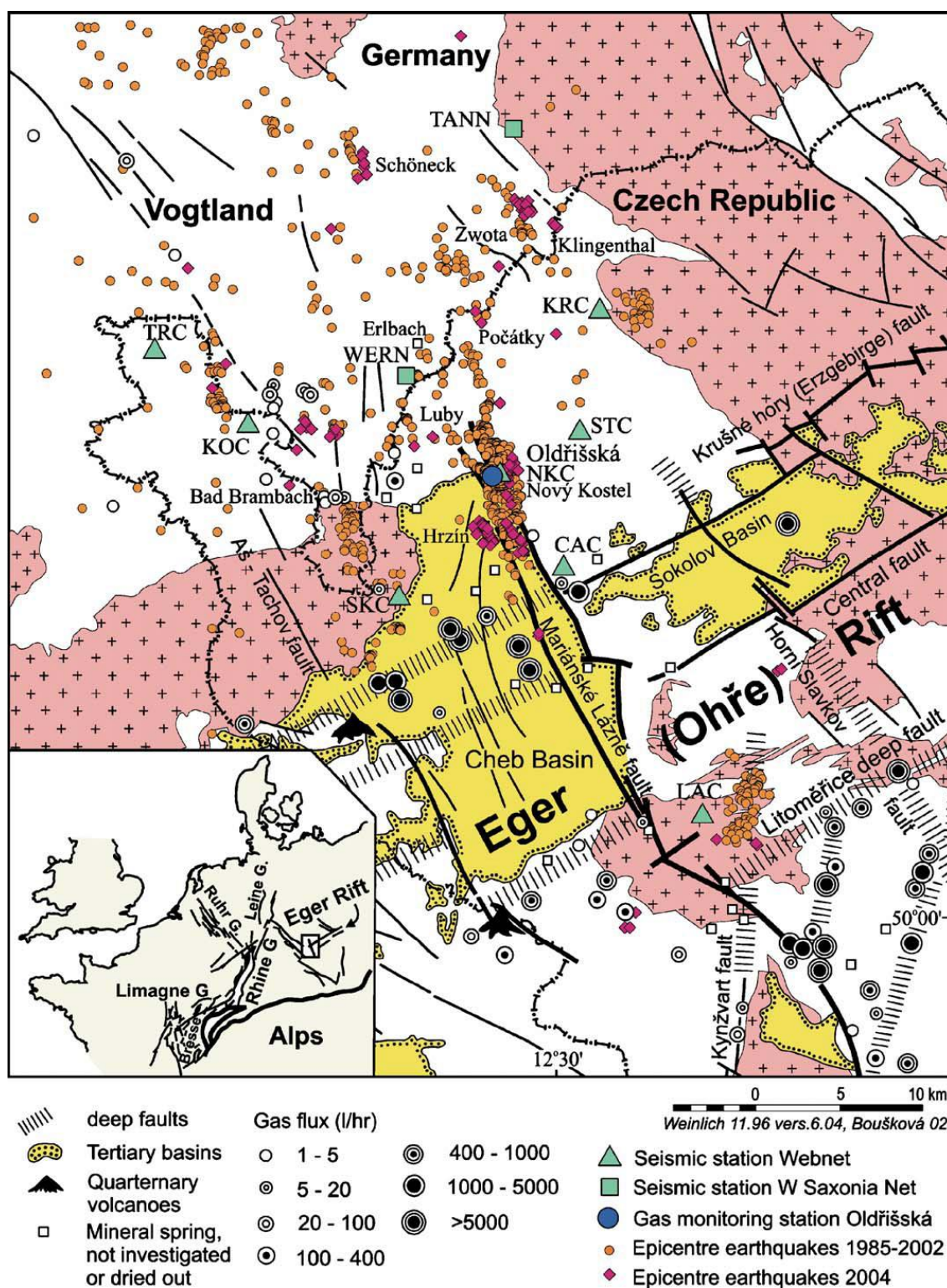
Obr. 2: Komorní Hůrka, severní strana. Foto: František Balák

Seismické roje jsou v oblasti dokumentovány od 19. po celé 20. století. Historické zmínky jdou však ještě mnohem dál. Jeden z nejméně intenzivnějších zemětřesných rojů nastal na přelomu let 1985 a 1986 (Stejskal *et al.*, 2005). Většina zpracovaných dat vychází ze záznamů zemětřesných rojů z ledna roku 1997 a intenzivního roje z období říjen – prosinec 2000 (Fischer a Horálek, 2003), kdy

už byly vybudovány stacionární seismické stanice a probíhal intenzivní výzkum výronů plynů (Weinlich *et al.*, 1998).

Bräuer *et al.* (2008) se domnívají, že magmatická akumulace v oblasti se nachází až na pomezí kůry a pláště a v případě nejnovějších intruzí se ještě nestačil rozvinout plynulý teplotní transport směrem k povrchu. Koch *et al.* (2008) na základě svého modelu a naměřených parametrů předpokládá, že se geologická aktivita přesouvá do Chebské pánve. V Česku napočítal třináctkrát více cest úniku plynu než v Bad Brambachu.

2.1.4 Mapa zámjové oblasti



Obr. 3: Distribuce zemětřesných rojů a pramenů unikajícího plynu v oblasti severozápadní Čechy/ Vogtland s vyznačenými zlomy a vulkány (převzato z Weinlich *et al.* 2006)

2.1.5 Měřicí stanice

Weinlich *et al.* (1998) napočítali v oblasti severozápadní Čechy/Vogtland 74 sledovaných lokalit, kde vyvěrá na povrch plyn, a to přirozenou nebo umělou cestou. K tomu navíc v mofetových polích, jako např. SOOS, Bublák, nebo Smrad'och evidují 50 až 500 vývěrů plynu.

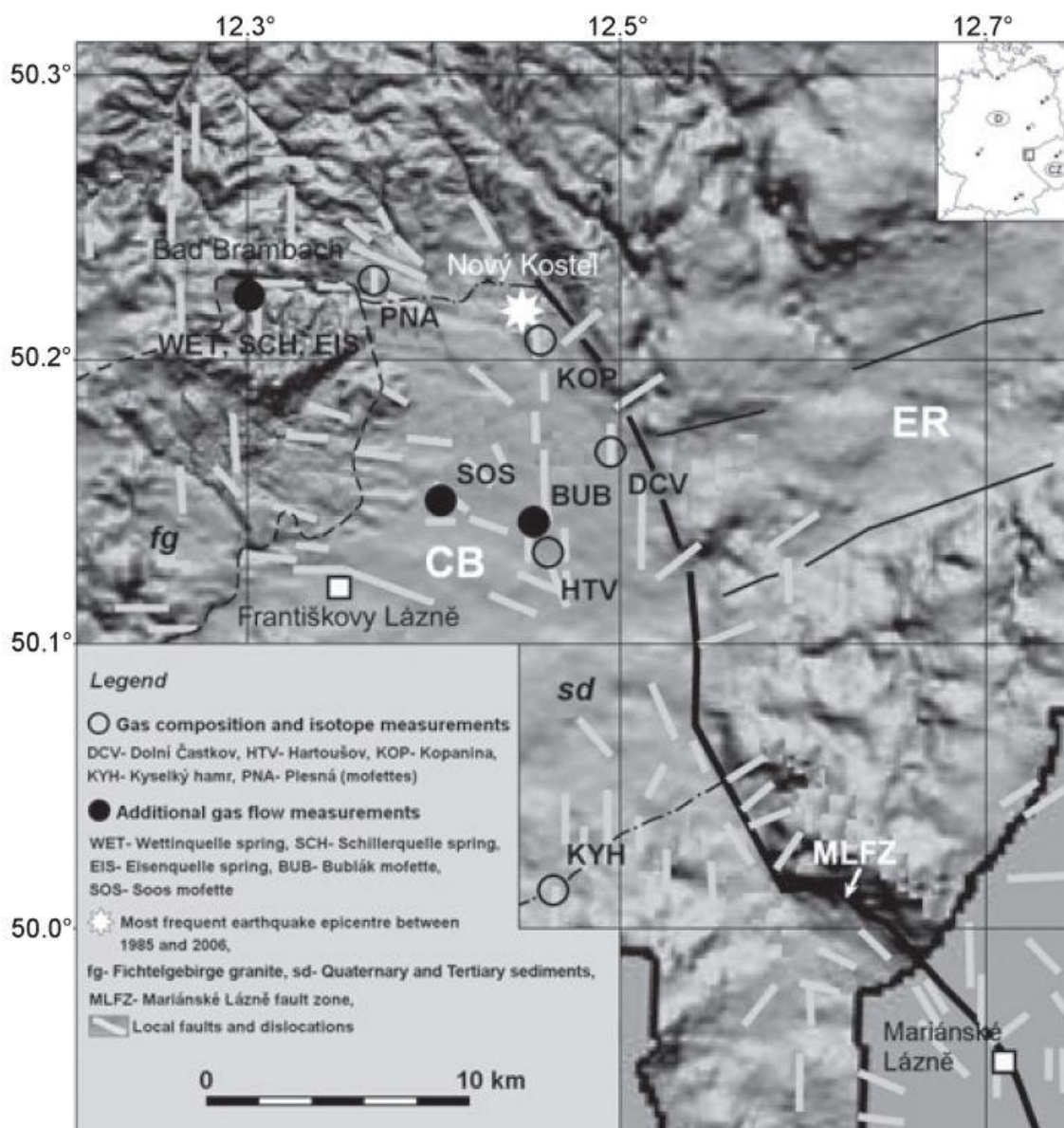
Mofeta Bublák, nacházející se 6 km jižně od obce Nový Kostel, je nejdéle monitorovanou lokalitou v severozápadních Čechách, která je v provozu již od roku 1994. V prosinci téhož roku byly zaznamenány první účinky zemětřeseného roje (Bräuer *et al.* 2007). Od roku 2000 probíhá sledování mofet také v lokalitách SOOS a Plesná.

V případě dalších pramenů a mofet začíná sledování po roce 2000 (Bräuer *et al.* 2007), z mnoha příkladů lze vybrat: Kopanina, Dolní Částkov, Hartoušov, Kyselecký Hamr, Farská Kyselka, Mariiny Prameny, Podhorní Vrch, Otročin. Tyto stanice jsou zobrazeny na obr. 4, přehled lokalit v celé oblasti severozápadní Čechy/Vogtland dává obr. 5.

V červnu 2000 bylo započato monitorování třech vrtů: NK1 a NK 2 jsou situovány v obci Nový Kostel, třetí je poblíž města Krásno. Cílem studie těchto stanic bylo objevit fluktuace hladiny podzemní vody (dále jen HPV) v závislosti na zemětřesení (Stejskal *et al.* 2005).

Stanice Oldřišská se nachází přímo na Mariánskolázeňském zlomu a je zde sledován plyn unikající půdou, který je odebírán z půl metru hlubokého vrtu. Bylo prokázáno, že zde unikající plyn má původ v zemském pláští. Aby byly odstíněny atmosférické vlivy, nachází se stanice ve sklepě budovy. (Weinlich *et al.* 2006)

Z německých pramenů v okolí Bad Brambach je nutno zmínit Wettinguele (známá jako Radonquelle), jeden z nejvíc radioaktivních pramenů na světě (Heinicke a Koch, 2000). Předmětem pozorování jsou ale i Schillerquelle a Eisenquelle (Bräuer *et al.* 2007).



Obr. 4: Mapa sledovaných vývěřů plynu CO₂ v oblasti severoápadní Čechy/Vogtland (Koch *et al.*, 2008)

2.1.6 Klasifikace stanic

Sledované vývěry plynu se dají zhruba dělit na dva druhy:

První případ jsou mofety. – suché vývěry CO₂, které vznikají tam, kde plyn při své cestě k povrchu nanarazí na podzemní vodu. Často se nacházejí v močálech, kde vznikají známé „bahenní sopky“. Do mofet proudí z geologického prostředí plyn, který se do směsi s vodou případně dostává až těsně při povrchu. Kromě velkých bahenních vývěřů můžeme obvykle najít opodál menší vývěry samotného plynu, vycházejícího například skulinami v půdě. Protože plyn tvořený téměř čistým CO₂ působí zástavu dýchání, můžeme někdy v okolí mofet spatřit uhynulý hmyz a jiné menší

živočichy. V případě anomálie průtoku může dojít k prudkému vytlačení sloupce vody k povrchu, čímž vzniká miniaturní gejzír. Takový jev můžeme pozorovat například v oblasti Bad Brambach (Heincke a Koch 2000).

V druhém případě proudí plyn geologickým prostředím ve směsi s minerální vodou. Tím plyn působí jako hnací síla pro vzestup vody z velkých hloubek, což je podle Weinlicha *et al.* (1998) dokázáno její vyšší teplotou oproti minerálním vodám bez příměsi CO₂.

Z hlediska metodiky zaznamenávání údajů o průtoku plynů můžeme stanice dělit na průtokové (otevřené) a tlakové (uzavřené), kde se plyn hromadí v tlakové nádobě a měří se jeho tlak (Fischer 2006). Tlakové stanice se ukazují jako důvěryhodnější, protože neobsahují pohyblivé průtokoměry, které se prokázaly jako nespolehlivé.

2.2 Charakter unikajícího plynu

2.2.1 Chemické složení plynů

Plyn, který vychází ze země v oblasti severozápadní Čechy/Vogtland, studovali např. Weinlich *et al.* (1998) a Bräuer *et al.* (2007) a výsledky svého výzkumu prezentovali v rozsáhlých tabulkách. Z těch je zřejmé, že jde o téměř čistý CO₂ (přes 99.5%) a jediné příměsi jsou dusík (0,1 – 0,3%) a kyslík (0,03 – 0,1%). Vzácně se objevuje argon, metan, helium a radon, jenž se v některých německých pramenech vyskytuje v extrémně vysokých koncentracích. Srovnáváním izotopů těchto plynů a pozorováním variací jejich poměru je možné získat informace o původu těchto plynů a především o tom, jakým způsobem reagují na tektonické procesy.

Weinlich *et al.*, (1999) zjistili, že příměs dusíku N₂ je vyšší u výronů plynů s malým průtokem. Podle Bräuer *et al.* (2007) je však velmi obtížné vyvozovat závěry z obsahu N₂ v mofetovém plynu, protože se během pronikání horninou tento plyn často mísí s atmosférickým vzduchem, a to ještě dříve než dosáhne povrchu.

Chemické složení plynu je ovlivněno jeho rozpouštěním ve vodě. Bräuer *et al.* (2007) vychází z Henryho zákona, který se týká rozpouštění plynů ve vodě, a konstatují, že při perkolaci podzemní vodou se plyn ochuzuje o CO₂ ve prospěch helia. Protože podzemní voda už je plynem saturovaná, helium se rozpouští pomaleji než CO₂. Velký vliv na tento děj má teplota, což může vést k ročním variacím koncentrací CO₂ a helia, a to především u pramenů s malým průtokem plynu.

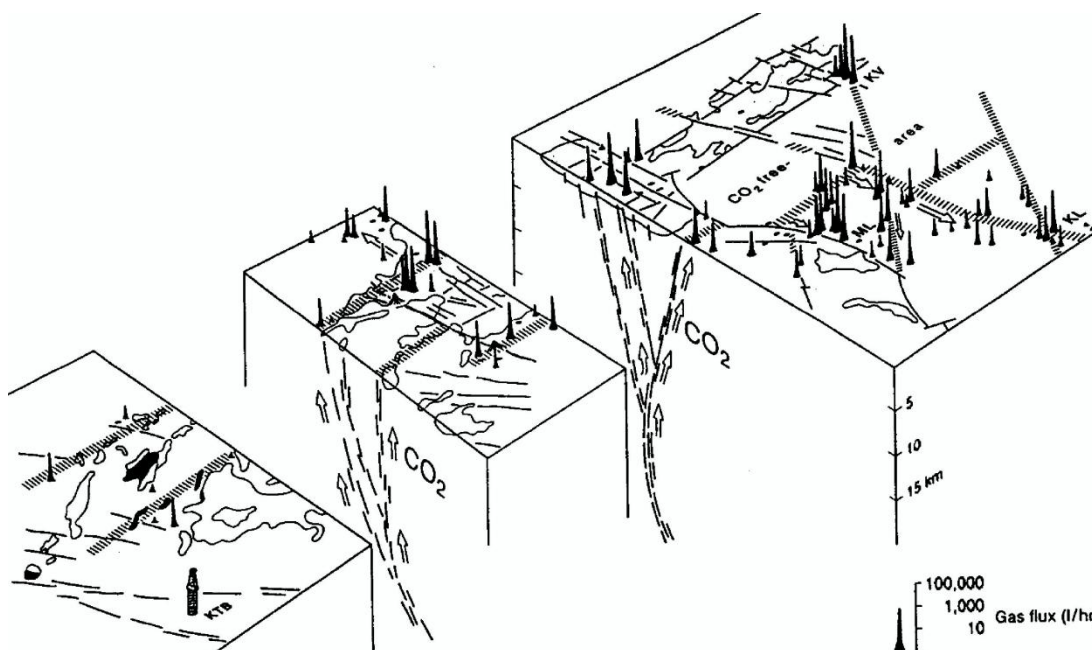
Co se týká teploty vycházejícího plynu, záleží na hloubce, z jaké plyn vychází, a také na tom, zda prochází horninou ve směsi s vodou. Teplota na výronech je poměrně stálá (Weinlich *et al.*, 1998), někdy však můžeme pozorovat krátkodobý nárůst v souladu s nárůstem seismické aktivity, při které dochází k uvolnění plynů zadržených v hloubkách. Tento děj popisují např. Koch *et al.* (2003) na případě zemětřeseného roje na podzim roku 2000. V tomto případě byla teplota vody v mofetovém poli o 2-3°C vyšší než teplota vzduchu, v porovnání s tímto teplotním rozdílem v jiných letech.

Bräuer *et al.* (2007) našli u některých pramenů CO₂ závislost chemického složení plynů na ročních teplotních změnách. Tento jev zdůvodňují různou rozpustností CO₂ ve vodě v závislosti na teplotě. Tento účinek na chemismus plynů pak částečně zakrývá skutečné variace, které se tím dostávají pod hranici měřitelnosti, s čímž se autorka vyrovnává tak, že jevy s vysokou frekvencí filtruje. Teplotní variace mají

v týdenním a měsíčním měřítku víceméně náhodný průběh. U pramenů suchého plynu v mofetách se však tento teplotní účinek výrazně neprojevuje.

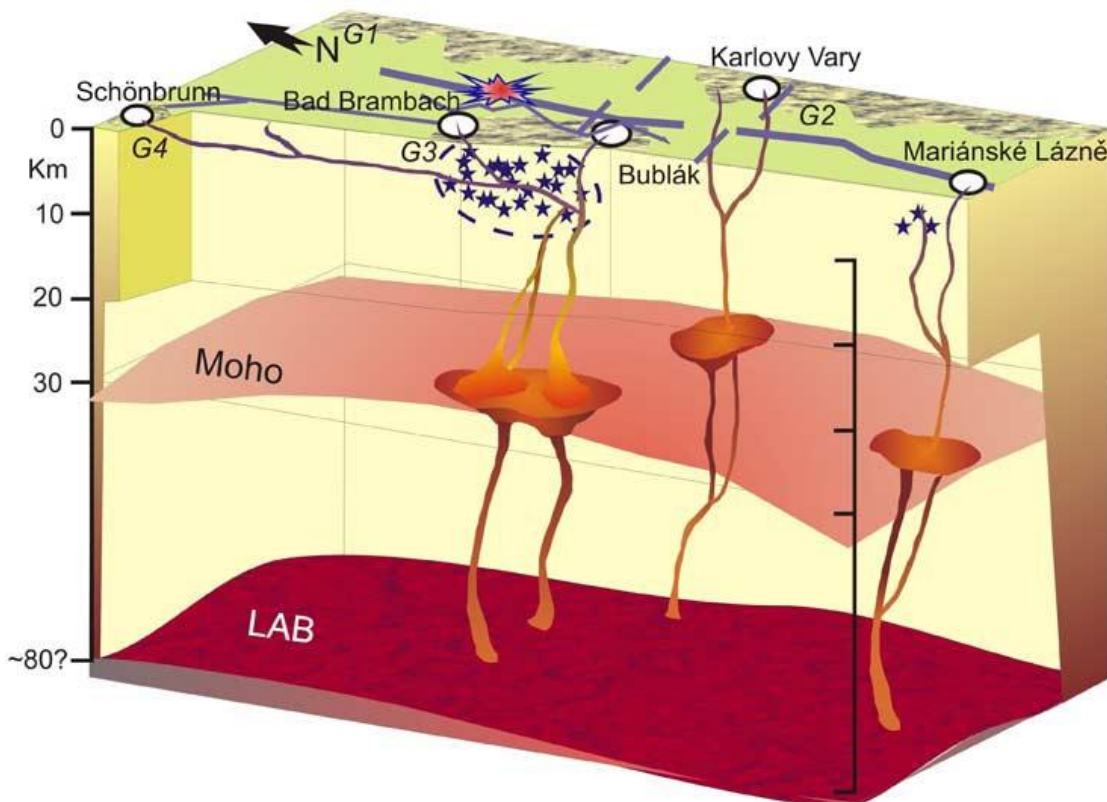
2.2.2 Průtok plynů geologickým prostředím

To, že plyny procházejí sérií puklin ze společného hluboko uloženého zdroje, vyvozují Heinicke a Koch (2000) na základě pozorované provázanosti anomálií plynu na většině pramenů v regionu. Předpokládají pohyb ve formě „slug flow“ – směsi plynů a kapalin. Průchod fluid horninou se omezuje na cesty s větší permeabilitou, jako jsou pukliny zlomových zón vzniklé v kompaktních vyvřelých či metamorfovaných horninách. Tento jev umožňuje zmapovat tyto zlomové zóny sledováním vývěrů plynu na povrchu. Weinlich *et al.*, (1998) jejich sledováním dospěli k závěru, že průtok magmatického plynu je v oblasti severozápadních Čech rozdělen zlomovou strukturou tvaru písmene Y. Její severní rameno vede od Karlových Varů po Františkovy Lázně a Komorní Hůrku, zatímco její jižní rameno vede mariánskolázeňskou oblastí k Železné Hůrce. V klínu mezi těmito rameny vzniká zóna bez vývěrů plynů.



Obr. 5: Nákres geodynamické situace v oblasti severozápadních Čech/Vogtland s vyznačenými cestami plynu a jeho výrony na povrch (Weinlich *et al.* 2003).

V novějším modelu se však Bräuer *et al.* (2008) na základě izotopových studií plynů domnívají, že každá ze tří výronových oblastí má vlastní magmatický rezervoár.



Obr. 6: Nákres geodynamické situace v oblasti severozápadních Čech/Vogtland. Modré hvězdy označují místa se zemětřesnou aktivitou (Bräuer *et al.* 2008).

Průchod plynu cestou více permeabilních zlomů prokazují Weinlich *et al.*, (1998) i na tom, že se v oblasti na západ od Mariánskolázeňského zlomu nevidují žádné větší výrony plynů. Zdá se tedy pravděpodobné, že tato zlomová struktura svede hlubinné přítoky plynu a vyvádí je k povrchu. Tím tvoří přírodní bariéru a kontroluje proudění plynů v celé oblasti.

2.3 Původ plynů

2.3.1 Poměr izotopů $^3\text{He}/^4\text{He}$

Studii poměru izotopů helia bylo prokázáno, že původ plynů můžeme hledat na hranici kůry a pláště (Bräuer *et al.*, 2005). Poměr $^3\text{He}/^4\text{He}$ je totiž u plášťových plynů mnohem vyšší než u plynů, které pocházejí z kůry. Korové plyny mají poměr $^3\text{He}/^4\text{He} < 0.1 R_a$ (R_a je jednotka poměru $^3\text{He}/^4\text{He}$ v atmosféře), avšak u plynů sledovaných v oblasti Chebské pánve je hodnota R_a až 6.2 na mofetě Bublák. Plyny, které pramení v blízkém okolí Mariánských Lázní, mají hodnotu R_a nižší, mezi 3 a 5. Podle Bräuer *et al.* (2008) může být rozdílnost hodnot R_a v Chebské a Mariánskolázeňské oblasti spojena s intenzivní seismickou činností v blízkosti Nového Kostela, ležícího v Chebské pánvi, zatímco v okolí Mariánských lázní je seismická aktivita poměrně nízká.

U poměru $^3\text{He}/^4\text{He}$ je v mofetách SOOS a Bublák pozorován dlouhodobý nárůst mezi 36 a 61 procenty v průběhu jednoho roku (Koch *et al.* 2008). Největší nárůst byl mezi roky 2004 a 2006. Bräuer *et al.* (2005; 2007) se domnívají, že se jedná o příznak vzniku nové magmatické intruze ve spodní kůře pod Chebskou pánví. Ta by mohla být příčinou opakujícího se výskytu zemětřesených rojů v oblasti Nový Kostel.

2.3.3 Poměr izotopů ^{13}C

Další z geochemických ukazatelů, jenž nám pomáhá určit původ CO_2 , je proměnnost poměru izotopů uhlíku v plynu. Koch *et al.* (2008) uvádějí, že $\delta^{13}\text{C}$ mofetového CO_2 je -4 až -5‰ PDB na německých mofetách (Pee Dee Belemnite je standard poměru $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). Na českých mofetách se hodnota $\delta^{13}\text{C}$ mofetového CO_2 pohybuje od -2 po -4‰ PDB (Bräuer *et al.*, 2007). Přímou na mofetě Bublák se hodnota $\delta^{13}\text{C}$ pohybuje kolem -2 ‰ PDB.

Podle Bräuer *et al.* (2007) je nižší $\delta^{13}\text{C}$ mofetového CO_2 příznakem plášťového původu plynů. Dále autoři uvažují, že kvůli dlouhé cestě od zdroje k povrchu (asi 150 dní) mohou být variace v poměru izotopů uhlíku spojeny se seismikou. Ta způsobuje uvolňování plynů, jež byly po dlouhou dobu zadrženy v uzavřených puklinách.

Weinlich *et al.* (2003) zjistili, že se zvyšujícím se průtokem CO_2 hodnota $\delta^{13}\text{C}$ pomalu narůstá. Vysvětlují to frakcionací s HCO_3^- , která izotopicky zlehčuje zbývající CO_2 . Další příčinou může být ředění s CO_2 biologického původu. Proti této hypotéze

ale mluví současný nárůst obsahu dusíku v plynu, protože tento jev nemá s biologickými procesy souvislost.

2.3.4 Anomálie hladiny podzemní vody

Protože plyn obvykle vyvěrá na povrch spolu s podzemní vodou, může nám pozorování HPV ve vrtech pomoci vytvořit si ucelený obraz prostředí. Výška HPV se odvíjí od stavu napětí v podloží (Stejskal *et al.* 2005). Jako jev předcházející zemětřesení popisují výrazný nárůst HPV před zemětřesným rojem v říjnu 2000 Koch *et al.* (2003). Autoři zde dále doplňují, že tento nárůst nebyl spojen s větším úhrnem srážek a s nástupem zemětřesení se úroveň HPV rychle vrátila na původní stav.

Hladinu podzemní vody ve čtyřech hlubokých vrtech (20; 23; 23; 97 metrů) analyzovali Gaždová *et al.* (2011). Na dvou zemětřesných rojích z let 2000 a 2008 pozorovali citelný pokles HPV ve všech vrtech, a to i přesto, že některé vrty byly od epicentra vzdálené až 30 km. Jako možný ukazatel si povšimli mírného vzestupu HPV před začátkem zemětřesného roje. Bohužel o výronech CO₂ se výše zmínění autoři nezmiňují, nicméně některé sledovaných vrtů (Krásno, Lázně Kynžvart) se nacházejí v Mariánskolázeňské výronové oblasti, kde lze saturaci vody plynem CO₂ předpokládat.

Příčiny kolísání HPV ve své práci shrnují Stejskal *et al.* (2005). Jako hlavní příčiny vidí hydrologické a atmosférické faktory, které se dají snadno vysledovat ze záznamů měření na meteorologických stanicích. Obtížněji měřitelné jsou deformace v zemské kůře, jejichž hodnoty můžeme pouze odhadovat pomocí matematických a fyzikálních modelů. Kromě faktorů způsobených lidskou činností (např. těžba) jsou to také změny tlakových poměrů v průběhu zemětřesení nebo účinkem působení slapových sil.

Význam působení slapů a atmosférického tlaku na variace výšky HPV předpokládají i Gaždová *et al.* (2011), mnohem větší význam ale autoři přikládají úhrnu srážek a zvláště pak oblevě. Proto se slapovému účinku výrazněji nevěnují.

2.4 Zemské slapy

2.4.1 Zemské slapy – definice

Zemské slapy jsou definovány jako deformace pevné hmoty Země způsobené gravitační přitažlivostí Slunce a Měsíce. Účinky ostatních vesmírných těles Sluneční soustavy se na zemských slapech podílejí zanedbatelně. Země a Měsíc obíhají společné těžiště Země-Měsíc a tento celek pak společně obíhá okolo Slunce. Měsíc a Slunce pak způsobují relativní pohyby částic Země, čímž ji deformují. Částice nejbližší Měsíci jsou přitahovány více než střed Země a naopak nejvzdálenější částice jsou přitahovány méně než střed Země. Částice, které se nacházejí v ose kolmé na osu Země-Měsíc, jsou elasticky vtahovány směrem do středu Země. Když odečteme od vektorů gravitačního zrychlení vektory, které působí na střed Země, zbudou reziduální vektory gravitačního zrychlení. Když tyto vektory vynásobíme hustotou materiálu, získáme síly, které deformují hmotu Země. Tak zemské slapy definuje Wahr (2011)

Stejskal *et al.* (2005) popisují vliv slapového napětí jako periodické objemové roztahování a smršťování, působící s opačnou fází na výšku HPV ve vrtu. Při odlivu tedy vzniká komprese, která způsobí nárůst výšky HPV a naopak. Tento děj se neděje náhodně, ale cyklicky, s danou periodicitou. Wahr (2009) udává slapové působení s periodou přibližně 12 hodin způsobených zemskou rotací, nekonstantních z důvodu proměnnosti hybnosti oběhu Měsíce a sklonu plochy jeho oběhu. Slapové účinky Slunce pak jmenuje s periodou půldenní, denní a delší. Kombinované působení obou těles na zemské slapy má periody 13,7 a 27,6 dní. Podle Fischera (2006) můžeme očekávat znatelný účinek na průtok CO₂ u 12ti - hodinové, denní a 14ti - denní periody.

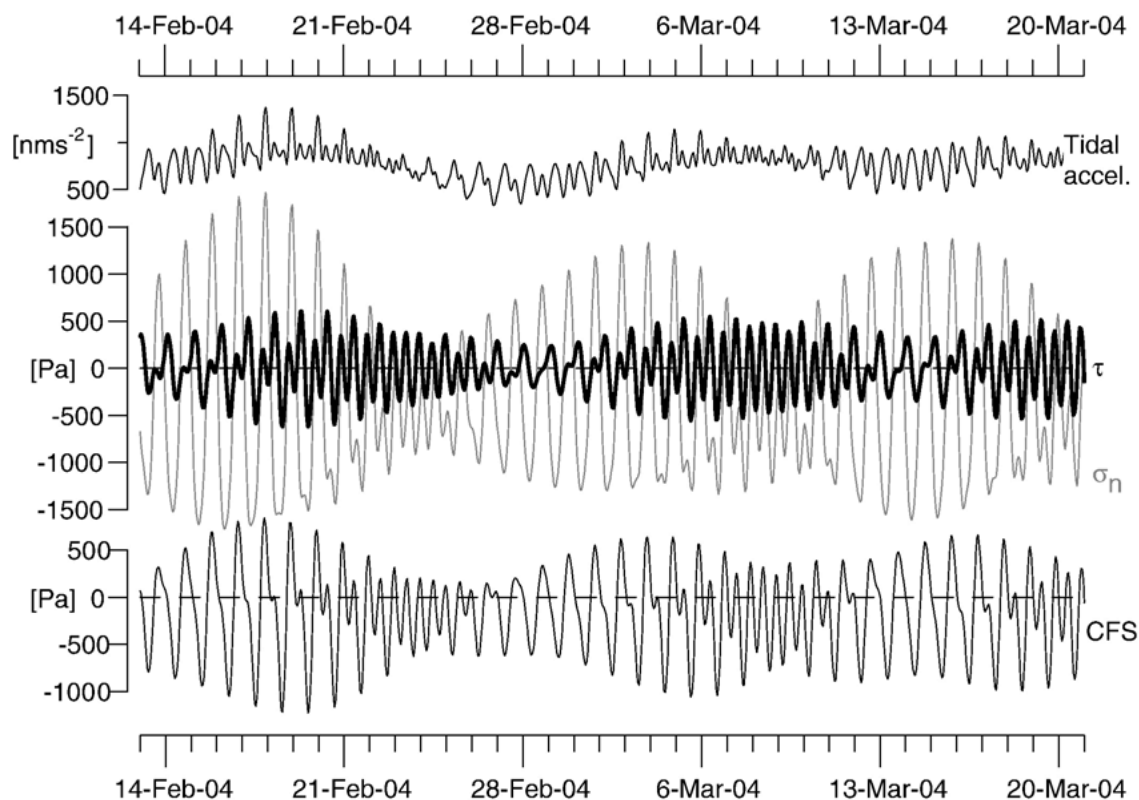
2.4.2 Vztah slapů k zemětřesení

Podle Fischera *et al.* (2006) není myšlenka slapového vlivu na vznik zemětřesení nijak nová. Předchozí studie ale vztah slapů k zemětřesení neprokázaly, což vedlo k rozšíření názoru, že vliv zemských slapů je příliš malý na to, aby zapříčinily vznik zemětřesení. Melchior (1983) ale soudí, že 12ti - hodinová a 24 - hodinová perioda slapového účinku by měla mít mnohem větší účinek než půlroční a roční, jejichž vliv na zemětřesení je uznávaný jako platný.

Fyzikálně se zemské slapy uplatňují tak, že indukované napětí v součtu s tektonickým tenzorem napětí budí síly působící v normálovém nebo střížném směru na zlomové plochy v horninách (Fischer *et al.*, 2006). Pokud nás zajímají jen horniny

u povrchu, což se týká případu mělkých zemětřesení, uplatňují se jen horizontální komponenty napětí, což je dáno okrajovou podmínkou volného vzduchu. Vertikální deformace se tedy blíží nule (Smith and Sammis, 2002). Ondovčín *et al.* (2011) poznamenávají, že slapové oscilace vznikají v místech oslabené partie pevné horniny, kde se část vzniklého tlaku přenáší do kapalné fáze.

Podle Fischera *et al.* (2006) může slapový účinek u 14ti - denní periody působit normálové napětí až 2 kPa, což je považováno na minimální napětí potřebné ke vzniku zemětřesení. Aby autoři prozkoumali možný vliv zemských slapů na zemětřesení, vybrali sadu 46 zemětřesných epizod s magnitudem menším než 3, u kterých pozorovali zvýšený výskyt v době 14ti - denního maxima působení slapových sil. Při studování souvislosti s periodickým účinkem slapových sil našli pouze statisticky nevýznamnou závislost.



Obr. 7: Příklad vztahů mezi veličinami slapového působení. Vrchní graf zobrazuje slapové zrychlení, prostřední graf zobrazuje normálové a sřížné napětí a spodní graf Coulombovo napětí. Na grafech je znatelný fázový posun mezi slapovým zrychlením a působícím napětím (Fischer *et al.*, 2006).

Zajímavé pozorování učinili Weinlich *et al.* (2006), kteří si v době před zemětřesným rojem povšimli absence typických variací způsobených denním slapovým

cyklem, což může být následek abnormálního tlakového režimu v systému puklin. S tím by mohl souviset i zaznamenaný prudký nárůst CO₂ a radonu v půdním vzduchu.

2.4.3 Vztah k anomáliím plynu

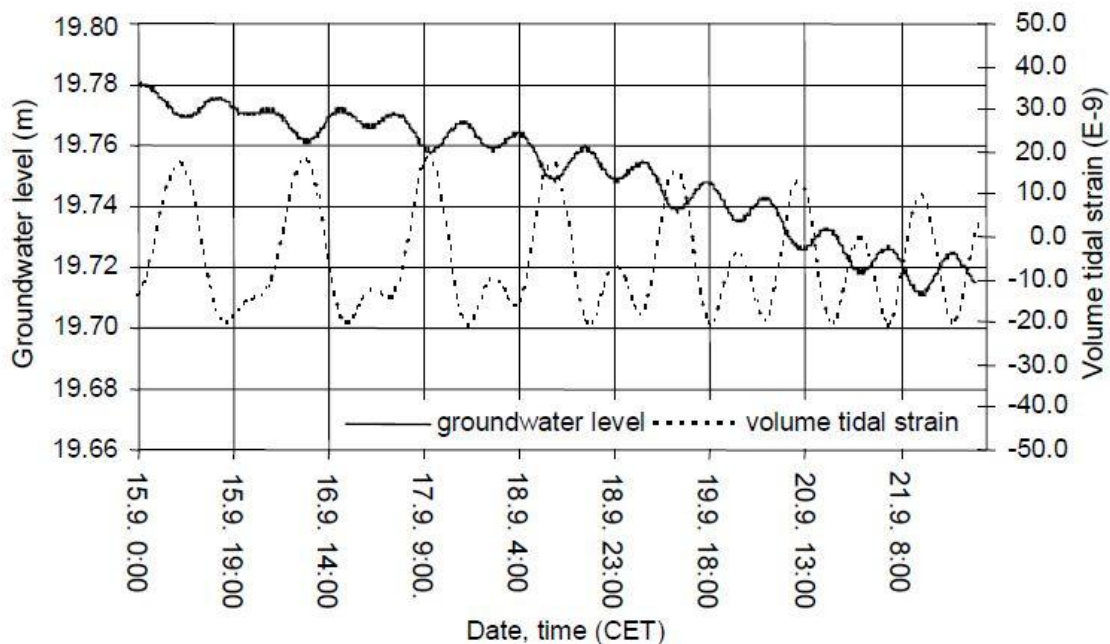
Podle Fischera (2006) je vliv slapového účinku patrný na stanicích Il Sano B , Il Sano C a Prameny, kde se na průtoku plynu projevuje 12ti - hodinová perioda. V některých obdobích ale naopak převládá 24 - hodinová amplituda, která značí vliv denních teplotních variací, jež se nejvíc projevují v letních měsících.

Účinky slapových sil na výrony plynu popsali Weinlich *et al.* (2006), kteří podrobně studovali složení a průtok odebíraného půdního vzduchu. Amplituda silového působení zemských slapů podle jejich výpočtů činí přibližně 52 cm. Taková míra rozvolnění rigidní horniny by mohla vést k uvolnění napjatého systému puklin, kterými pak může snáze procházet plyn. Působení slapových sil na zemský povrch v řádu několika desítek centimetrů potvrzuje ve své práci i Wahr (2009).

Podobný princip uvažují Kletetchka *et al.* (2013) pro teplejší vodu přitékající do zamrzlého jezera s jinak neměnnou teplotou. Jeden z jejich uvažovaných modelů počítá s rozvolňováním pórového prostoru silami zemských slapů. Tento model podporují jejich spektrální analýzy a výrazná korelace mezi teplotními změnami a modelovanými slapovými deformacemi.

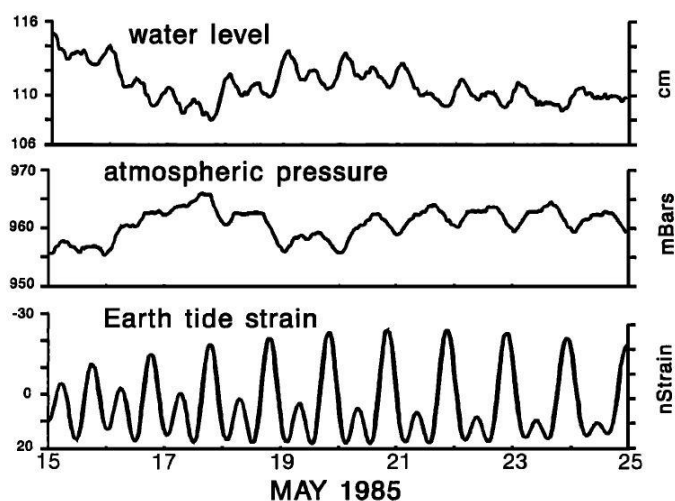
2.4.4 Vztah k anomáliím hladiny podzemní vody

Vliv zemských slapů na výšku HPV popsali Stejskal *et al.* (2005) na vrtech NK-1 a NK-2 v Novém Kostele. Objevíli závislost, která se v případě vrtu NK 2 projevuje amplitudou až 18,99 mm a 2,81 mm u vrtu NK 1. To, že je amplituda poměrně výrazná, vysvětluje tím, že zasažená zvodně je napjatá a tudíž mnohem citlivější vůči účinku zemských slapů. Pozorování slapových účinků tak může být použito k přibližnému určení hydraulických vlastností zvodně (Ondovčín *et al.* 2011). Melchior (1978) k tomu uvádí, že zemské slapy mohou působit objemové deformace řádu 10⁻⁸.



Obr. 8: Srovnání HPV ve vrtu NK 2 a relativního objemové deformace indukované zemskými slapy (Stejskal *et al.* 2005).

Rojstaczer a Riley (1990) pro studium změn výšky HPV ve studních u napjatých zvodní použili numerické modely. Působení slapového účinku je podle jejich výsledků podpořeno u hustých nekonsolidovaných formací s alespoň středně vysokou hydraulickou vodivostí.



Obr. 9: Desetidenní záznam hydrografu doplněný o záznam barometru a spočítané plošné deformace hornin (Rojstaczer a Riley, 1990).

2.5 Tlak vzduchu

2.5.1 Anomální působení tlaku vzduchu

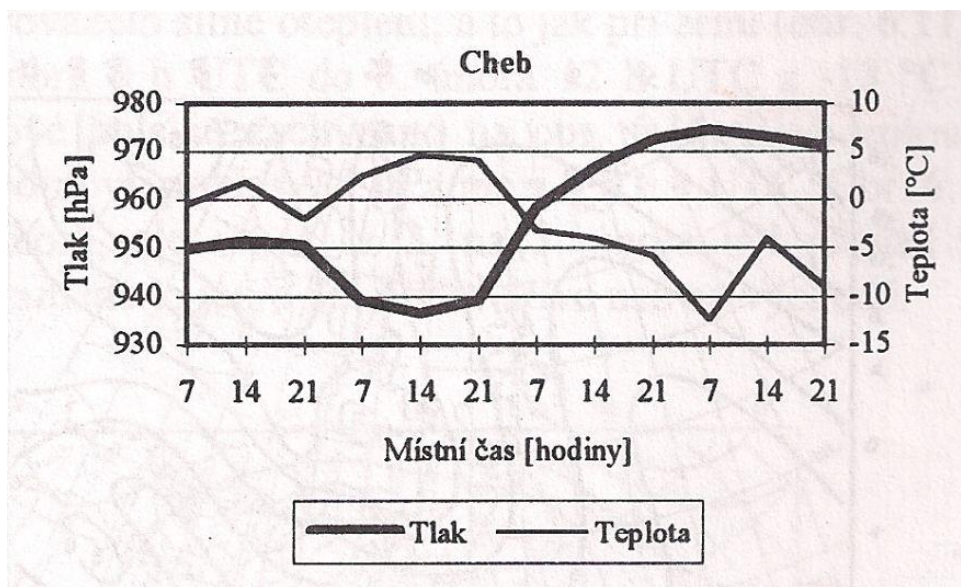
Kromě variací tlaku vzduchu způsobených slapovými silami existují samozřejmě i změny tlaku vzduchu spojené s atmosférickými jevy. Tyto změny jsou většinou neperiodické, víceméně náhodné. Periodicitu můžeme najít u roční a denní variace, oboje jsou totiž vyvolané oteplováním a ochlazováním vzduchu.

Vlivu tlaku atmosféry na výšku HPV se věnují Stejskal *et al.* (2005). Našli výraznou zápornou korelaci, která v případě vrtu HM 1 činí přibližně 10 cm na 10 hPa. Upozorňují na to, že hodnota tlaku je velmi proměnlivá a znatelný vliv mohou mít i lokální anomálie tlaku vzduchu. Podobnou zápornou korelaci potvrzují i Koch *et al.* (2003) svými pozorováními chování pramenů v Bad Brambachu.

Fischer (2006) uvažuje průtok plynu a jeho tlak jako přímo úměrné. Proto průtok i tlak klesají s rostoucím barometrickým tlakem, který silově působí proti nim. Původ variací autor spatřuje v nedokonalém přenosu napětí v horninovém prostředí. Další vliv na průtok plynu vidí v závislosti tlaku plynu na jeho teplotě. Předpokládá proto zvýšení průtoku měřeného plynu v souvislosti s rostoucí teplotou, a to z důvodu teplotní roztažnosti plynu. V souvislosti s těmito denními variacemi můžeme pozorovat fázové posuny u měřených veličin, které se na tlakových stanicích pohybují od -4 po +1 hodinu. Průtokové stanice mají posuv téměř nulový.

2.5.2 Tlak vzduchu v ČR

Statistiky chování tlaku vzduchu v České Republice zkoumali např. Míková a Coufal (1999). Z jejich poznatků lze vybrat některé zajímavé údaje. Zmiňují poměrně velký severojižní gradient atmosférického tlaku v severozápadních Čechách, zejména na podzim a v zimě. Co se týče ročního chodu tlaku vzduchu, pozorují průběh ve tvaru dvojité vlny, jež na stanici Cheb dosahuje minima v dubnu a maxima v září. Výraznější týdenní výkyvy tlaku pozorují v zimním období, zatímco v létě je průměrná týdenní hodnota ustálenější. V případě denního chodu tlaku vzduchu můžeme podle analýzy dat z Chebu předpokládat minimum tlaku vzduchu kolem 15. hodiny. Denní maximum tlaku vzduchu je v průběhu roku pohyblivé, od března do září je před 10. hodinou, v období od října do února se posouvá na 11. hodinu. Co se týká extrémních tlakových výkyvů, jsou úzce spojeny s extrémními teplotními situacemi. Pro názornost je na další stránce zobrazen nejvýraznější tlakový gradient zaznamenaný na stanici Cheb.



Obr. 10: Tlakový gradient zaznamenaný na stanici Cheb ze 7. – 10. prosince 1973. (Míková a Coufal 1999)

2.6 Seismická aktivita v oblasti

2.6.1 Zemětřesné roje a mechanismus jejich vzniku

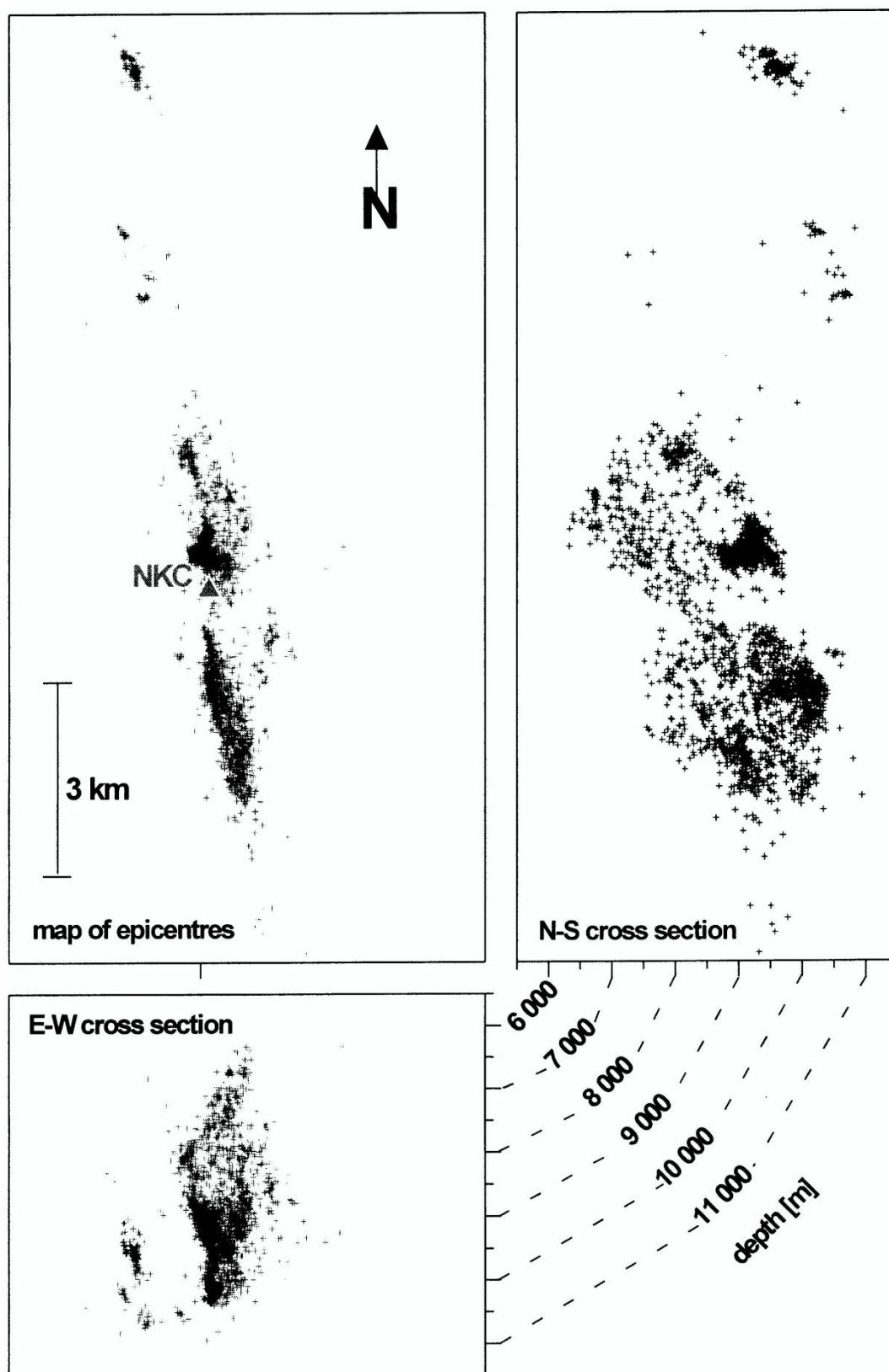
Horálek a Fischer (2008) popisují zemětřesné roje jako početné sekvence malých zemětřesení s malou hloubkou ohniska (obvykle 4-20 km), které se zřetelně seskupují v prostoru i čase. V rojích převažují zemětřesení s malými magnitudy, které několik intenzivnějších zemětřesení velikostí svého magnituda výrazně nepřevyšuje. Z tohoto důvodu nelze určit hlavní otřes a tak nemůžeme jednotlivá zemětřesení brát jako samostatná.

Příčinu vzniku zemětřesných rojů vidí Horálek a Fischer (2008) ve spojení heterogenního pole napětí s oslabenou kůrou porušenou mnoha zlomy. Takové prostředí nedokáže udržet dostatečné napětí pro vznik klasického zemětřesení. Horálek a Fischer (2008) považují zemětřesné roje s magnitudem 5,0 za hranici maximálního seismického potenciálu oblasti. Typické ohniskové mechanismy jsou horizontální posun, přesmyk nebo jejich kombinace.

Přirozené tlakové pole v oblasti dostává horniny do kritického stavu napětí. Začátek zemětřesného roje a překročení limitu únosnosti horniny může pak způsobit jen malá změna stavu tlaku nebo tření (Fischer *et al.*, 2006). Jako možné mechanismy vzniku zemětřesného roje autoři uvádějí průchod seismických vln, změnu pórového tlaku, slapové nebo atmosférické zatížení, popř. odlehčení.

2.6.2 Pozorování zemětřesení a jejich časový průběh

Fischer a Horálek (2003) definovali rozsah hlavního působišť zemětřesných rojů v oblasti Nový Kostel. Hypocentra zemětřesení tvoří jednu rovinu o rozměrech zhruba 3x3 km, kterou označili „hlavní zlomová plocha“. Plocha leží v azimutu 169° a uklání se k západu pod úhlem 80° v hloubce mezi 6 a 11 km. Většina zemětřesné aktivity je lokalizována průměrně do vzdálenosti 120 metrů podél této plochy. K tomu autoři uvádí, že některá místa na ploše vykazují častější reaktivaci zemětřesení než jiná, což by mohlo nahrávat teorii o indukci zemětřesení způsobenou injekcí fluid.



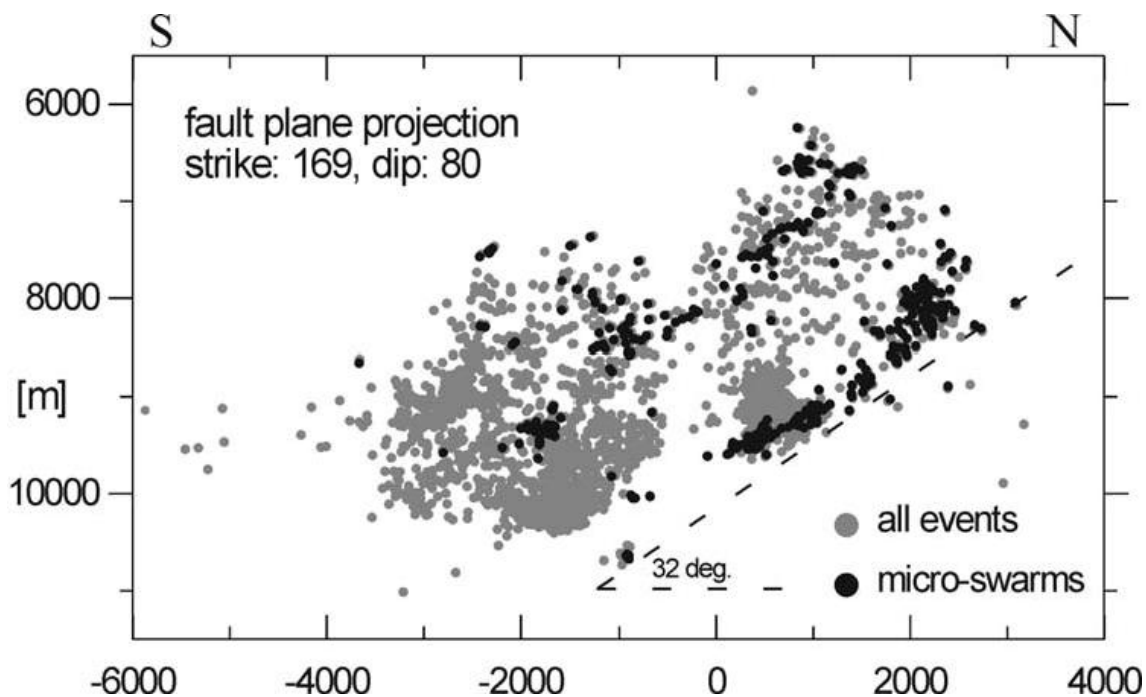
Obr. 11: Prostorová distribuce ohnisek 3084 zemětřesení z období 1991 – 2001 a 143 vybraných zemětřesení z roje z období 1985/1986 v oblasti Nový Kostel (Fischer a Horálek, 2003).

V období 1997 – 2000 byly v oblasti Nový Kostel zaznamenány dva zemětřesené roje a 27 mikro-rojů. Další případy tvořila „background aktivita“. Většinu seismické energie v oblasti uvolňují zemětřesené roje (Fischer a Horálek 2003). Dle statistik vyústila každá desátá aktivace zemětřesení v přesun aktivity mezi dvěma a více epicentrálními zónami. Autoři proto spekulují o působení společného spouštěcího mechanismu zemětřesení v regionu.

2.6.3 Klasifikace zemětřesení

Fischer a Horálek (2003) rozdělují v zájmové oblasti zemětřesení do tří skupin:

- Roje – velké sekvence zemětřesení, jejichž počet se pohybuje v tisících. Magnitudo dosahuje nejvyšší hodnoty 4,0 a v extrémních případech až 5,0. Zemětřesení se shlukují v prostoru a čase. Nejsilnější z nich často mívají makroseismické účinky.
- Mikro-roje – menší sekvence zemětřesení dosahující počtu prvních stovek. Magnitudo zemětřesení nepřekračuje hodnotu 2,5, a proto jsou zjištělná pouze přístroji. Jejich výskyt se většinou omezuje na dva paralelní pruhy, které mohou mít jiné mechanické vlastnosti, což umožňuje vyšší četnost mikro-rojů.
- „Background“ aktivita – samostatná zemětřesení s proměnným magnitudem menším než 2,0, která se neshlukují ani v prostoru ani v čase.



Obr. 12: Distribuce mikro-rojů na hlavní zlomové ploše (Fischer a Horálek, 2003).

2.6.4 Příčiny a průběh zemětřesení

Jeden z modelů mechanismu průběhu zemětřesného roje představil Yamashita (1999). Zemětřesením podle něj vzniká prázdný pórový prostor, který se začne plnit fluidy z blízkého okolí. To zapříčiní pokles pórového tlaku v daném prostoru, čímž přestane puklina narůstat. Další nárůst pórového tlaku ale obnoví proces frakturace a děj se opakuje. Migraci ohniska zemětřesení spojenou s aktivitou fluida popisují Fischer a Horálek (2008). Zdá se tedy, že jedna z příčin vzniku zemětřesného roje může být právě působení intruze fluid v kombinaci s působením tektonického napětí (Fischer *et al.*, 2006).

Tuto teorii by mohl potvrzovat i výzkum, který provedli Horálek a Fischer (2008) na zemětřesném roji z roku 2000. Většina zemětřesení byla způsobena střížným, nikoli tahovým napětím, jaké by hledali u působení pórového tlaku. Porovnáními se seismicitou indukovanou injektáží do vrtu v Alsasku však zjistili, že 90 % zemětřesení vyvolaných umělou injekcí fluida je způsobeno právě střížným napětím. Jejich závěr je takový, že v případě vhodně orientované zlomové plochy redukuje fluida normálové napětí a přivádějí zlom do kritického stavu.

Bräuer *et al.* (2007) se domnívají, že v epicentrální oblasti Nového Kostela se vyskytují málo permeabilní horniny, které zadržují plyn v hlubinách a znemožňují mu průnik k povrchu. To může vytvářet dostatečně velké napětí, které je následně uvolněno formou zemětřesného roje. Tuto teorii může potvrzovat i výzkum Gaždové *et al.* (2011), kteří sledovali chování HPV ve vrtech přímo v Novém Kostele. Zatímco velmi vzdálené vrty prokazovaly změny hladiny, vrty v Novém Kostele zůstávaly poměrně klidné. Tyto vrty pravděpodobně nejsou propojeny s hlavní sérií puklin.

2.6.5 Vliv zemětřesení na CO₂

Projevy zemětřesné aktivity na parametrech unikajícího plynu popisují např. Heinicke a Koch (2000) nebo Koch *et al.* (2003). Z hydrologických parametrů autoři uvádějí úroveň HPV a průtok na prameni (vody nebo plynu). Z geochemických parametrů uvádí variace koncentrací prvků v plynné fázi a změny poměru izotopů, proměnnost pH a Eh.

Změny parametrů plynů na pramenech v oblasti Bad Brambachu studovali Koch *et al.* (2003). Vzdálenost lázni od epicentra Nový Kostel je přibližně 10 km. Místní prameny se vyznačují vysokou objemovou aktivitou radonu, měření průtoku pramene

tedy spočívá ve měření radioaktivity vzduchu. Na prameni Wettingquelle zpozorovali zvýšený průtok plynu v období před zemětřesným rojem na podzim roku 2000.

Weinlich *et al.* (2006) popisují intervaly vyšší koncentrace CO₂ v půdním vzduchu, které jsou velmi často spojené s lokálním, nebo i vzdáleným zemětřesením. Bräuer *et al.* (2007) popisují pokles ³He/⁴He na lokalitách Chebské pánve před zemětřesnými roji v roce 2000 a následujících dvou letech. K tomuto poklesu stačí jen malé změny v tlakovém poli horniny, které uvolní dodatečný plyn, čímž dojde k izotopickému ředění. Proto k poklesu dochází ještě před vypuknutím zemětřesného roje.

Podle Bräuer *et al.* (2003) se „slug flow“ uvede do pohybu pouze po frakturaci horniny, do té doby je uvězněn v inkluzích fluida v hornině. To potvrzuje měřením Koch *et al.* (2003), který pozoroval zvýšený průtok plynu na mofetě Bublák, spojený se zemětřesným rojem. Anomální průtok začal 10 hodin po zemětřesení a vrcholil po dalších 8 nebo 15 hodinách. Díky časovému odstupu můžeme tuto anomálii považovat za ko-seismický jev.

Podle Weinlicha *et al.*, (2006) působí zemětřesný otřes vyloučení plynu CO₂ z vody, čímž se zvýší jeho koncentrace v plynné fázi a zvětší se objem. Způsobený tlakový puls může následně otevřít nové cesty k průchodu.

Koch *et al.* (2003) zaznamenal anomálie spontánní polarizace v oblasti SOOS spojené se zemětřesným rojem. Vysvětluje to tak, že chemické působení uvolněného CO₂ ve vodě zrychluje transport rozpuštěných minerálů solí směrem k povrchu, kde se ukládají ve formě sulfátových a chloritických solí. Tyto anomálie jsou ale překryté působením srážkové vody, která ředí nasycení povrchové vody, čímž výrazně mění hodnoty spontánní polarizace. Zvýšené průměrné hodnoty v období seismické aktivity ale dávají zapravdu účinku CO₂.

3 Metodika a data

Jako předmět výzkumu byly použity záznamy ze stanic Prameny, Hartoušov a Cheb. První dvě stanice byly ve sledovaném období provozovány Geofyzikálním ústavem AVČR, v.v.i. a Přírodovědeckou fakultou UK v rámci projektu CzechGeo/EPOS – síť CarbonNet, <http://web.natur.cuni.cz/uhigug/carbonnet>. Třetí stanice patří do sítě meteorologických stanic ČHMÚ a byla použita jako referenční pro ocenění kvality záznamu atmosférického tlaku na stanicích CarbonNet.

Na tlakové stanici Prameny je zaznamenáván čas, teplota vody ve vrtu, atmosférický tlak, teplota a tlak plynu v uzavřeném vrtu, výška hladiny a vlhkost půdy. Dostupné časové rozmezí je 03.06.2009 – 01.01.2012, interval mezi záznamy je 5 minut. Velké kompletní výpadky záznamu jsou 10.03.2010 – 23.04.2010 a 11.06.2011 – 25.08.2011. Ostatní výpadky jsou maximálně v řádu několika hodin a tedy málo významné.

Na průtokové stanici Hartoušov je zaznamenáván čas, teplota vody a plynu ve vrtu, atmosférický tlak, průtok plynu měřený Venturiho trubicí a vlhkost půdy. Dostupné časové rozmezí je 24.06.2010 - 06.11.2012, interval mezi záznamy je 5 minut. V zaznamenaném intervalu se neobjevují žádné velké kompletní výpadky, časté jsou ale výpadky záznamu z průtokoměrů a teplotních čidel.

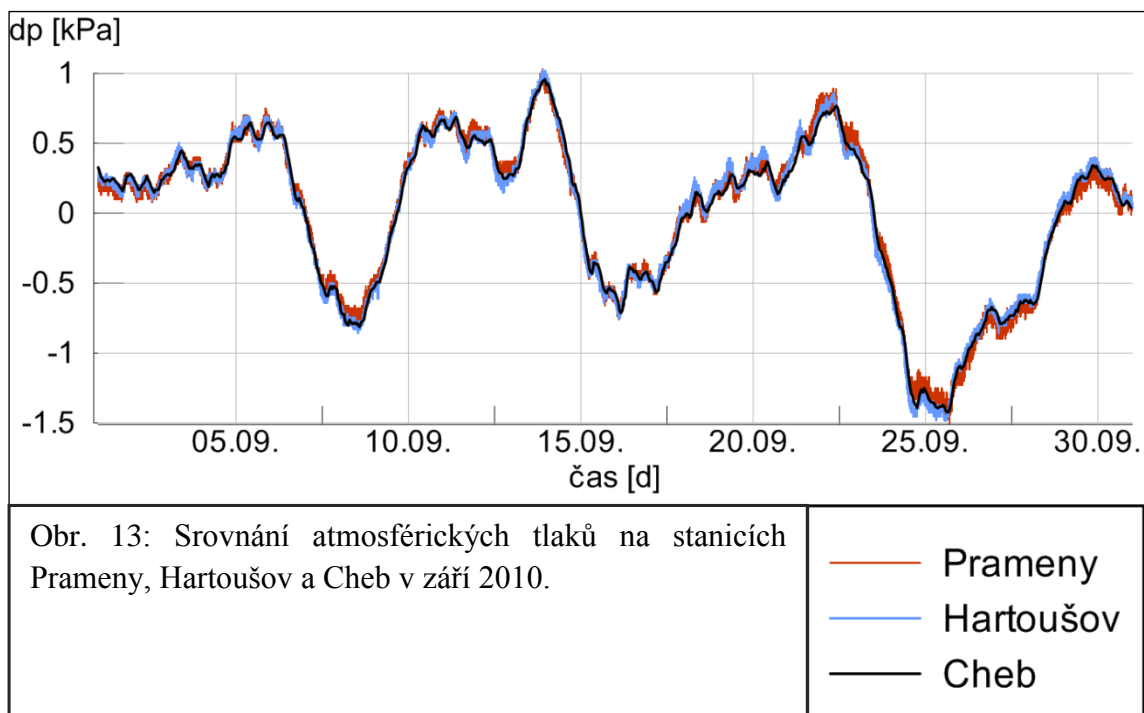
Na meteorologické stanici Cheb je zaznamenáván čas, atmosférický tlak a denní úhrn srážek. Dostupné časové rozmezí je 01.01.2000 - 01.01.2013, interval mezi záznamy tlaku je 60 minut.

Ke zpracování dat byly použity programy Microsoft Excel, Golden Software Grapher, MathWorks Matlab a GIMP.

4 Sledování chování záznamu stanic

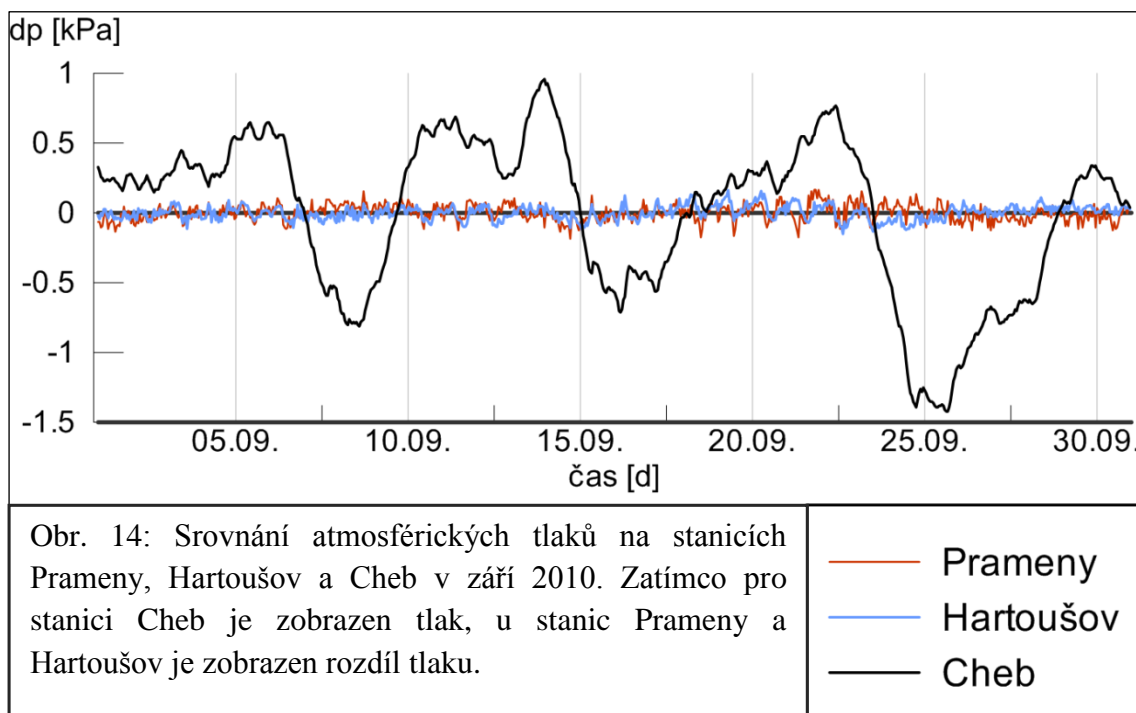
4.1 Porovnání záznamu atmosférického tlaku

Pro určení kvality měření atmosférického tlaku na sledovaných stanicích jsem vybral několik testů. První z nich je prosté vizuální porovnání časového průběhu záznamu tlaku s referenční stanicí Cheb. K tomuto účelu jsem vybral dlouhou časovou řadu od 01.09.2010 do 01.10.2010. K lepší přehlednosti jsem záznamy převedl na stejnou úroveň tak, že jsem od jednotlivých bodů odečetl průměr celé řady. Výsledek je uveden v obr. 13.



Z obr. 13 je zřejmé, že záznam tlakových čidel je v pořádku. Na grafu je znatelný malý fázový posun, který je způsoben vzdáleností stanic až 25 km. Viditelné výchylky jsou patrně dány laterálními variacemi v důsledku meteorologických podmínek.

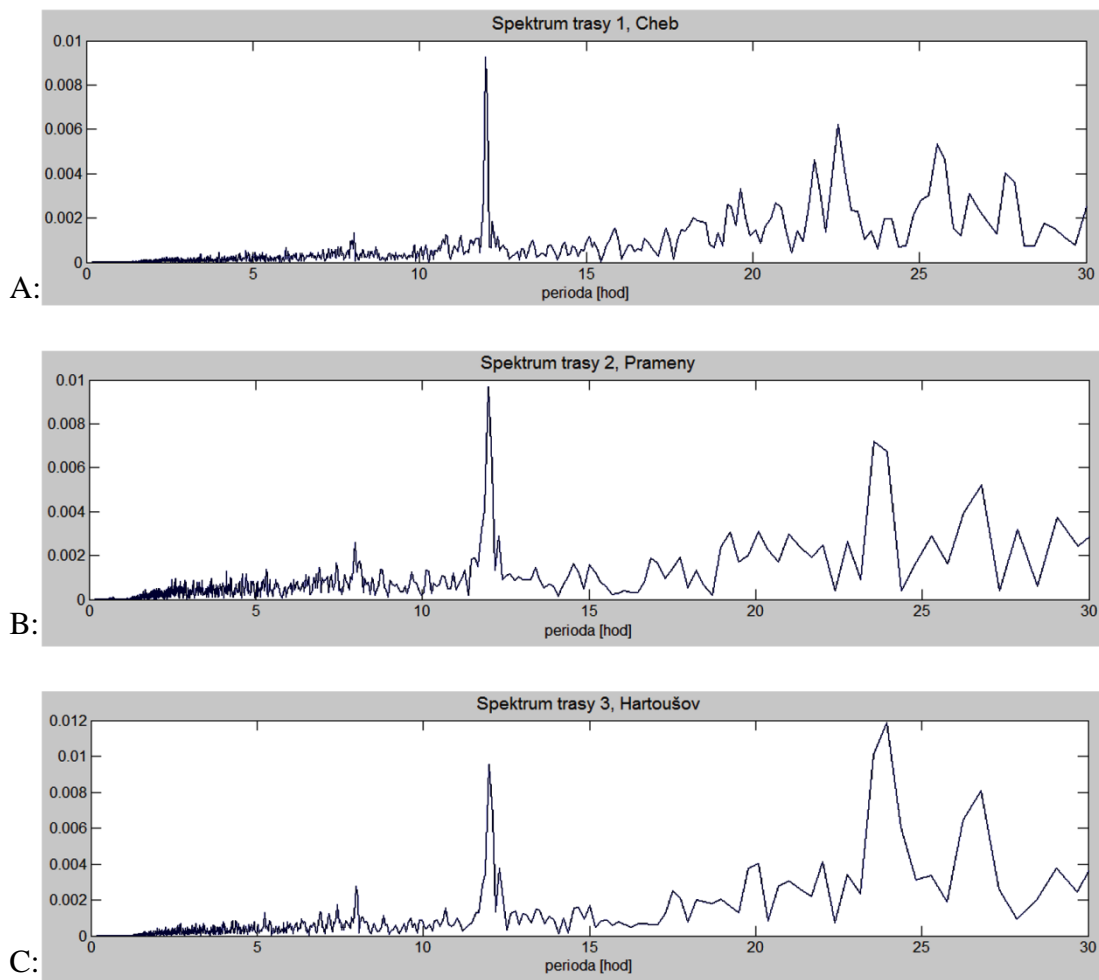
V dalším testu jsem data stanic ve stejném intervalu odečítal od záznamu stanice Cheb. Tím se zobrazí jejich rozdíl vůči meteorologické stanici Cheb.



Jak je vidět na obr. 14, odchylka záznamů v grafu nikde nezabíhá do vysokých hodnot, což znamená, že oba záznamy velmi těsně sledují záznam meteorologické stanice. Zdá se tedy, že můžeme hodnotit obě tlaková čidla jako spolehlivá.

4.2 Spektrální analýzy

Analýzou frekvenčního spektra záznamu je možné rozlišit jednotlivé komponenty záznamu. To potom umožňuje vyhledávat výrazné frekvenční složky, porovnat velikost amplitud s použitou teorií a případně spekulovat o možných vlivech. Obrázky 15 a-c ukazují, že stanice mají relativně velkou amplitudu spektra na 8, 12 a 24 hodinách. Zatímco vyšší amplituda na 12- hodinové periodě je způsobená teplotními slapy atmosféry (Kletetschka et al. 2013), 24- hodinová perioda může být ovlivněná denními variacemi teploty v místě měření a měla by být odfiltrována např. tepelnou izolací, jako tomu je na referenční stanici Cheb.



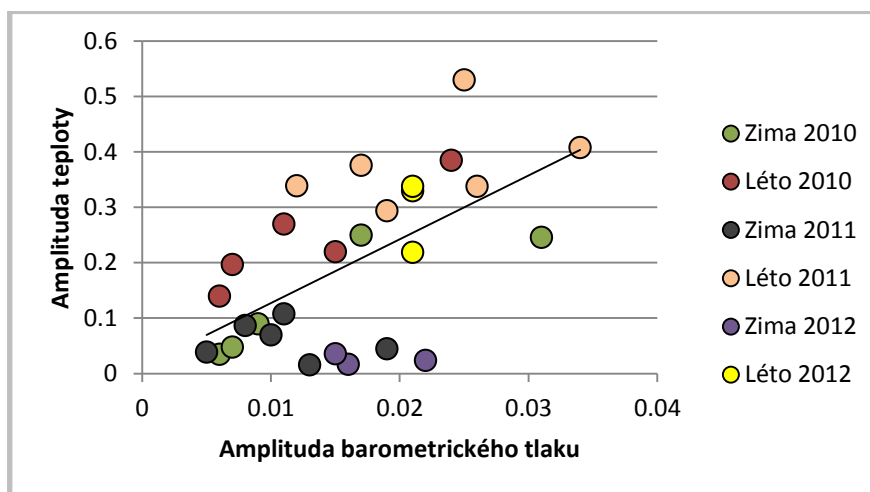
Obr. 15 a-c: Spektrum záznamu tlaku na stanicích Cheb, Prameny a Hartoušov v období od 15.6. do 22.10.2011.

Jak je vidno z porovnání spekter, stanice Prameny a Hartoušov mají mnohem výraznější 24- hodinovou amplitudu než stanice Cheb. To naznačuje přítomnost nežádoucího vlivu s touto periodou.

V průběhu roku se velikost amplitudy denních teplotních variací mění. V letních měsících, především ve dnech s teplotními maximy, jsou denní výkyvy teploty největší. Za účelem ověření možného vlivu denních variací teploty jsem vybral několik časových intervalů z období s velkými a malými teplotními změnami a na nich jsem měřil amplitudu 24- hodinové složky frekvenčního spektra. V případě, že denní variace tlaku je způsobena teplotou, měla by být pozorována korelace mezi tlakovým a teplotním záznamem.

Následující graf zobrazuje závislost amplitudy 24- hodinové periody teploty a tlaku na stanici Hartoušov, která se nachází na louce a není tedy chráněna před vlivem

slunečního záření. Zvýšené hodnoty v letních obdobích poukazují na nežádoucí teplotní vlivy, které narušují kvalitu záznamu.

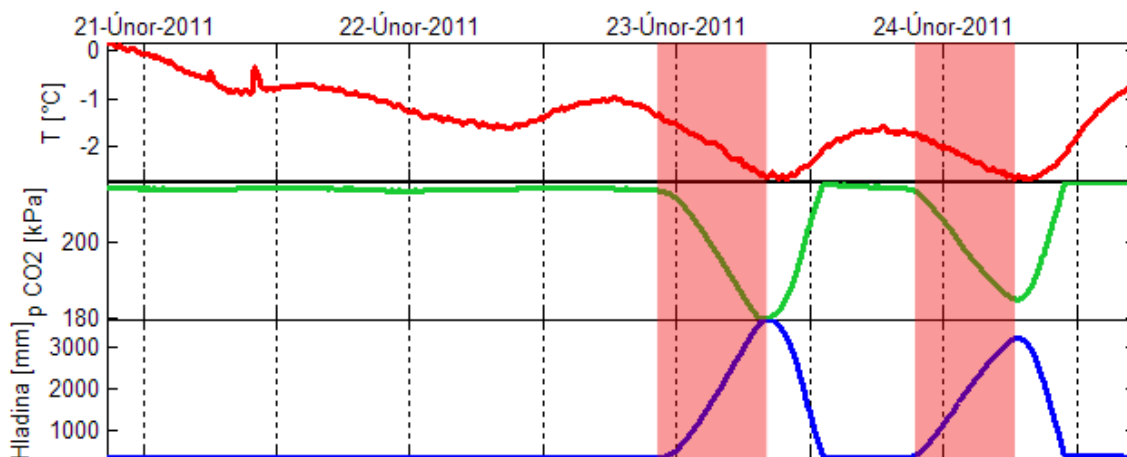


Obr. 16: Závislost amplitudy 24- hodinové periody teploty a tlaku na stanici Hartoušov.

Amplituda teploty se mění v důsledku denních teplotních změn, které jsou v letních měsících výraznější, data jsou proto rozdělena na letní a zimní. Na obr. 16 je vidět, že ve většině případů amplituda tlaku roste s amplitudou teploty. Výjimkou je zima 2011 a 2012, kdy se projevuje denní kolísání tlaku vzduchu bez souvisejících teplotních variací. Nalezení příčiny této anomálie je mimo rozsah této práce. Můžeme ale konstatovat, že záznam tlakového čidla na stanici Hartoušov je s největší pravděpodobností ovlivněn teplotou.

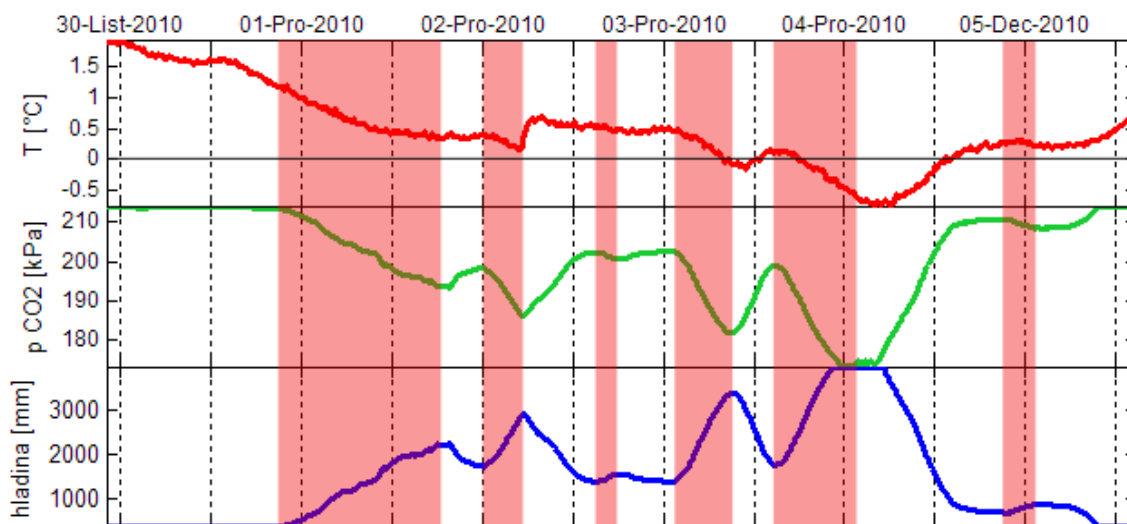
4.3 Studium pulsů na stanici Prameny

Na stanici Prameny je sledován uzavřený vrt, do kterého přitéká CO₂ ze země. Plyn se hromadí ve vrtu a s tím, jak narůstá jeho tlak, pomalu stlačuje vodu ve vrtu, zvýšení tlaku plynu je tak provázáno snížením hladiny, tuto anomálii označme jako typ I. Naopak pokud se zvýší HPV (např. v důsledku srážek), zvedne se hladina i tlak (anomálie typu II). Obě tyto anomálie vykazují poměrně dlouhodobý charakter. V záznamu se však objevují i krátkodobé anomálie typu I, které se můžeme spatřit podél celého zkoumaného úseku záznamu, zejména v zimních měsících. Spočívá v nenadálém poklesu tlaku plynu spojeného s nárůstem hladiny anomálního rozměru, který převyšuje běžné variace o několik řádů. Jeden z případů vypadá takto:



Obr. 17: Záznam anomálie z 23. a 24. února 2011. První stopa je teplota plynu ve vrtu [°C], druhá stopa je tlak plynu ve vrtu [kPa] a třetí stopa je relativní výška vodní hladiny vody [mm]. Anomálie jsou vyznačeny červenými pruhy.

Zběžným prohlédnutím obr. 18 si lze povšimnout, že se obě anomálie objevují s nápadným minimem teploty vzduchu. Nastalá situace tedy může souviset s poklesem teploty plynu ve zhlaví vrtu pod úroveň rosného bodu, kdy dojde ke srážení vody, která se ve vzduchu vyskytovala ve formě vodní páry. Vypadnutím této fáze z plynné směsi by pak došlo ke snížení tlaku, který následně vyvolá vzednutí hladiny vody. S oteplováním vzduchu se situace velmi rychle vrací do normálního stavu.

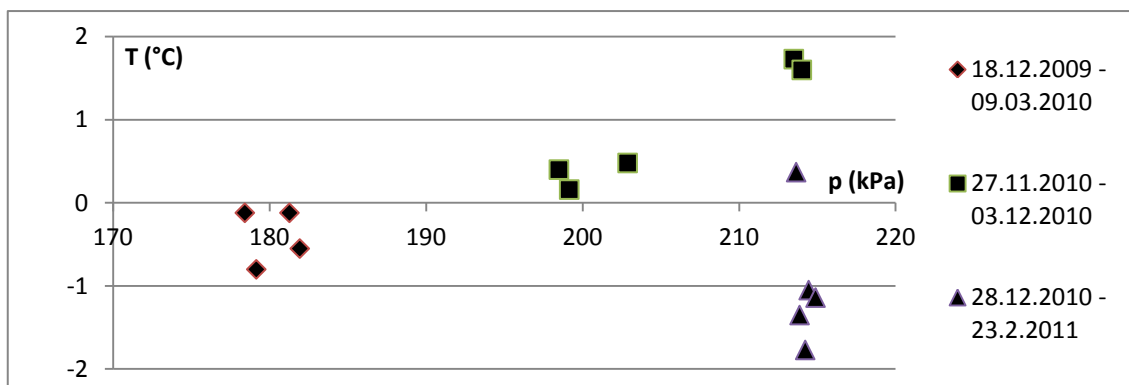


Obr. 18: Záznam anomálie z 23. a 24. února 2011. První stopa je teplota plynu ve vrtu [°C], druhá stopa je tlak plynu ve vrtu [kPa] a třetí stopa je relativní výška vodní hladiny vody [mm]. Anomálie jsou vyznačeny červenými pruhy.

To, že situace ale nejspíš nebude tak jednoduchá, ukazuje obr 19. Situace je podobná té z obr. 18, je však mnohem složitější, což se projevuje větším počtem pulsů tlaku a výšky HPV. Tím se nastoluje otázka, jaké podmínky jsou zapotřebí pro

vznik těchto anomálií. Pro ověření platnosti hypotézy jsem vyhledal větší množství těchto anomálií.

Aby bylo možné vyhledávat všechny anomálie v dlouhém záznamu automaticky, vytvořil jsem pomocí programu Excel jednoduchý program, který dokáže vyhledat nepřetržité 5- hodinové poklesy tlaku, což je doba dost dlouhá k odfiltrování šumu a běžného kolísání. Pomocí toho bylo možné vyhledat přesné časy počátků anomálií, a v těchto časech odečíst teplotu a tlak. Závislost teploty a tlaku plynu na počátku anomálií je vynesena na obr. 19. Ukazuje se, že se zde vydělují dvě hlavní skupiny bodů: Hlavní skupina ukazuje nárůst teploty s tlakem. Toto pozorování je v souladu se zákony termodynamiky, z kterých plyne, že s tlakem roste i teplota rosného bodu (Reichl, Vsetečka 2006). Otázkou zůstává příčina odlišného vztahu teploty a tlaku v zimě 2010 – 2011, kdy pozorujeme téměř konstantní tlak nezávisle na měnící se teplotě. Příčinou může být měnící se vlhkost vzduchu a pravděpodobně i složení plynu, tvořeného směsí CO_2 , H_2O a vzduchu.



Obr. 19: Závislost teplotních a tlakových podmínek v čase počátků anomálií. Řada je rozdělena na tři charakteristická období.

5 Diskuse a závěr

Práce se zabývala problematikou výronů plynu CO₂ v oblastech severozápadních Čech a Vogtland, které jsou na ně velmi bohaté. Dalšími typickými jevy v těchto oblastech jsou zemětřesené roje. Příčinou jmenovaných geodynamických jevů jsou pravděpodobně hluboko uložená magmatická tělesa, která při svém ochlazení produkují oxid uhličitý. Ten následně prochází horninovým prostředím a na povrch se dostává formou mofet nebo minerálních vod. Během průchodu horninou mohou být některé jeho parametry ovlivněny změnami napětí souvisejících se zemětřesnou činností. Změna napětí v hornině může být také způsobena působením slapových sil. Vliv slapových sil na zemětřesnou činnost je však problematický a těžko jednoznačně prokazatelný. Z rešerše literatury usuzují, že lokální zemětřesná činnost má několik spouštěcích faktorů a jeden z nejvýznamnějších by mohly být intruze plynu. Některé chemické faktory CO₂ a záznamy zemětřesení svědčí o tom, že se aktivita pomalu přesouvá do Chebské pánve.

Výzkumná část této práce se týká analýzy záznamů výstupu CO₂ na dvou stanicích v oblasti. Bylo zjištěno, že kontrolované čidlo atmosférického tlaku na stanici Hartoušov je ovlivněno denními změnami teplot a při analýze periodicity záznamu je třeba na toto zjištění brát ohled. Dále byly popsány anomálie tlaku plynu a výšky vodní hladiny v uzavřeném vrtu. Analýzou záznamů teplotních a tlakových podmínek bylo zjištěno, že tyto anomálie pravděpodobně souvisí s fázovými změnami některé komponenty plyné směsi. To znamená, že vznik anomálie spočívá v metodice měření, nikoliv v horninovém prostředí.

6 Použitá literatura a zdroje dat

BRÄUER, K., KÄMPF, H., STRAUCH, G., WEISE, S. M. Isotopic evidence (3He/4He, of fluid-triggered intraplate seismicity. *Journal of Geophysical Research*. 2003, vol. 108, no. B2, ESE 3-1 –ESE 3-11. ISSN 2156-2202

BRÄUER, K., KÄMPF, H., NIEDERMANN, S., STRAUCH, G. Evidence for ascending upper mantle-derived melt beneath the Cheb basin, central Europe. *Geophysical research letter*. 2005, vol 32, s. 1-4. ISSN 0094-8276

BRÄUER, K., KÄMPF, H., NIEDERMANN, S., STRAUCH, G., TESAŘ, J. Natural laboratory NW Bohemia: Comprehensive fluid studies between 1992 and 2005 used to trace geodynamic processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008, vol9, no.4. ISSN 1525-2027

FISCHER, T., HORÁLEK, J. Space-time distribution of earthquake swarms in the principal focal zone of the NW Bohemia/Vogtland seismoactive region: period 1985–2001. *Journal of Geodynamics*. 2003, vol. 35, no. 1-2, s. 125–144. ISSN 0264-3707

FISCHER, T., KALENDA, P., SKALSKÝ, L. Weak tidal correlation of NW-Bohemia/Vogtland earthquake swarms. *Tectonophysics*. 2006, vol.424, no. 3-4, s. 259-269. ISSN 0040-1951.

FISCHER, T. Periodické variace vztahy mezi veličinami měřenými na stanicích monitorujících tlakové pole CO₂ v západních Čechách, interní zpráva.

GAŽDOVÁ, R. NOVOTNÝ, O., MÁLEK, J., VALENTA, J., BROŽ, M., KOLÍNSKÝ, P. Groundwater level variations in the seismically active region of western bohemia in the years 2005-2010. *Acta geodynamica et geomaterialia*. 2011, vol. 8, no.1, s.17-27. ISSN: 1214-9705

HEINICKE, J., KOCH, U. Slug Flow – A possible explanation for hydrogeochemical earthquake precursors at Bad Brambach, Germany. *Pure and Applied geophysics*. 2000, vol.157, s. 1621-1641. ISSN: 0033-4553

HORÁLEK, J., FISCHER, T. Role of crustal fluids in triggering the West Bohemia/Vogtland earthquake swarms: Just what we know (a review). *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2008, vol. 52, no. 4, s. 455-478. ISSN 1573-1626

KLETETSCHKA, G., FISCHER, T., MLS, J., DĚDEČEK, P. Temperature fluctuations underneath the ice in Diamond Lake, Hennepin County, Minnesota. *Water resources research*. 2013, vol. 49, no. 1-8, (v přípravě). ISSN: 0043-1397

KOCH, U., HEINICKE, J., VOßBERG, M. Hydrological effects of the latest Vogtland-NW Bohemian swarmquake period (August to December 2000). *Journal of Geodynamics*. 2003, vol. 35, no. 1-2, s. 107-123. ISSN 0264-3707

KOCH, U. BRÄUER, K., HEINICKE, J., KÄMPF, H. The gas flow at mineral springs and moffetes in the Vogtland/NW Bohemia: an enduring long-term increase. *Geofluids*. 2008, vol.8, s.274-285. ISSN 1468-8123

MELCHIOR, P. The tides of the planet Earth, Oxford: Pergamon Press, 1983, 641 s. ISBN 0-08-026248-1

MÍKOVÁ, T., COUFAL, L. Tlak vzduchu na území České republiky v období 1961 – 1990. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČHMÚ, 66 s. Národní klimatický program ČR. 1999, vol. 28. ISBN 80-85813-71-8. ISSN 1210-7565.

ONDOVČIN, T., MLS, J., HERRMANN, L. Mathematical modeling of tidal effects in groundwater. *Transport in Porous Media*. 2012, vol. 95 no.2 s. 483-495. ISSN 0169-3913

REICHL, J., VŠETEČKA, M. *Encyklopedie fyziky* [online] 2006 [cit. 13-05-08] <<http://fyzika.jreichl.com/>>

ROJSTACZER, S. RILEY, F.S. Response of the water level in a well to earth tides and atmospheric loading under unconfined conditions. *Water Resources Research*. August 1990, vol. 26, no.8, s. 1803-1817. ISSN: 0043-1397

SMITH, S.W., SAMMIS, C.G. Revisiting the tidal activation of seismicity with a damage mechanics and friction point of view. *Pure and applied geophysics*. 2004, vol 161, no. 11-12, s. 2393-2404. ISSN 1420-9136

STEJSKAL, V., SKALSKÝ, L., BROŽ, M. Analysis of factors forming the groundwater regime in the west bohemian seismoactive region. *Acta geodynamica et geomaterialia*. 2005, vol. 2, no.4 (140) s. 23-37. ISSN 1211-1910

WAHR, J.M. Earth tides. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, Dordrecht: Springer, 2011, 1539 s. ISBN 978-90-481-8701-0. s.129-133.

WEINLICH, F.H., TESAŘ, J., WEISE, S.M., BRÄUER, K., KÄMPF, H. Gas flux distribution in mineral springs and tectonic structure in the western Eger Rift. *Journal of the Czech Geological Survey Society*. 1998, vol.43, no. 1-2 s.91-110. ISSN 1210-8197.

WEINLICH, F.H., BRÄUER, K., KÄMPF, H., STRAUCH, G., TESAŘ, J., WEISE, S.M. Gas flux and tectonic structure in the western eger rift, Karlovy Vary – Oberpfalz and Oberfranken, Bavaria. *Geolines*. 2003, vol.15 s.181-187. ISSN 1210–9606.

WEINLICH, F.H., FABER, E., BOUŠKOVÁ, A., HORÁLEK, J., TESCHNER, M., POGGENBURG, J. Seismically induced variations in Mariánské Lázně fault gas composition in the NW Bohemian swarm quake region, Czech Republic — a continuous gas monitoring, *Tectonophysics*. 2006, vol. 421, no. 1–2, s. 89-110. ISSN 0040-1951.

YAMASHITA, T. Pore creation due to fault slip in a fluid-permeated fault zone and its effect on seismicity: generation mechanism of earthquake swarm. *Pure and applied geophysics*. 1999, vol. 155, s. 625-647. ISSN 1420-9136

Data z terénních stanic pocházejí z projektu <http://www.czechgeo.cz>, k dispozici ke stažení jsou na adrese <http://web.natur.cuni.cz/uhigug/carbonnet>. [2013-05-08]

7 Přílohy



Příloha 1: Ukázka prostředí v mofetovém poli Soos. Zasolená křemelinová půda bez porostu a aktivní mofety. Vyfotografováno 13.05.2013. Foto: František Balák