

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná geologie

Studijní obor: Inženýrská geologie



Bc. Petr Vorlíček

Analýza svahových pohybů v severozápadní části Příhrazské plošiny a
vyhodnocení vlastností pískovce vzhledem ke stabilitní situaci

Slope movement analysis in the northwestern part of the Příhrazská platform and
evaluation of sandstone properties relative to the stability situation

Typ závěrečné práce

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Jan Blahůt, Ph.D.

Praha 2017

Charles University
Faculty of Science

Study programme: Applied geology

Branch of study: Engineering geology



Bc. Petr Vorlíček

Slope movement analysis in the northwestern part of the Příhrazská platform and
evaluation of sandstone properties relative to the stability situation

Analýza svahových pohybů v severozápadní části Příhrazské plošiny a
vyhodnocení vlastností pískovce vzhledem ke stabilitní situaci

Type of thesis

Diploma thesis

Supervisor: Mgr. Jan Blahůt, Ph.D.

Prague 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 12. 5. 2017

Podpis

Poděkování

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu diplomové práce Mgr. Janovi Blahůtovi, Ph.D., za jeho cenné rady a konstruktivní připomínky, které přispěly ke zdárnému dokončení této diplomové práce. Poděkování patří také Mgr. Martinovi Slavíkovi za pomoc při terénních zkouškách a Mgr. Monice Černíkové za pomoc při práci v laboratoři.

Obsah

Obsah.....	5
Abstrakt.....	8
Abstract.....	9
Úvod.....	10
1. Lokalita.....	11
1.1 Obecné informace.....	11
1.2 Přírodní poměry.....	12
1.3 Hydrogeologické poměry lokality.....	15
1.3.1 Vrtty PŘ-1 a PŘ-2.....	16
1.4 Geodynamické jevy.....	19
2 Monitoring.....	27
2.1 Sledovaná skalní věž.....	27
2.2 Trhlina s přístrojem TM-71.....	29
2.3 Pokračující měření.....	30
2.3.1 Vyhodnocení záznamu z automatického trhlinoměru na věžičce 24. 6. 2015–23. 1. 2017.....	32
2.3.2 Vztah mezi monitorovacími body na věži.....	34
2.3.3 Vztah mezi monitorovacími body na věži a srážkovým úhrnem na lokalitě.....	38
2.3.4 Vztah mezi monitorovacími body na věži a h.p.v. v okolních vrtech.....	39
2.3.5 Vztah mezi pohybem bodů na věži a teplotou.....	39
2.3.6 Dlouhodobý vývoj pohybu bodů na sledované skalní věži ...	39

2.3.7	Vývoj extenzometrických měření na bodech v puklině s přístrojem TM-71	40
2.3.8	Pohyb na přístroji TM-71	44
2.4	Souhrn a interpretace měření	46
2.5	Příčiny a možné spouštěcí faktory	49
2.6	Stabilita věže	50
3	Měření ve vrtech	54
4	Objasnění náchylnosti skalní věže ke zhoršeným stabilitním poměrům	55
4.1	Rentgenová difrakce - prášková	55
4.1.1	Způsob vyhodnocení	57
4.1.2	Příprava vzorku	58
4.1.3	Výsledky analýzy a hypotézy	59
4.2	Zrnitostní zkouška	65
4.3	Povrchové zvětrávání a eroze materiálu skalní věže	67
4.3.1	Vliv rozložení napětí ve věži	68
4.3.2	Vyplavený materiál v puklině – 3D modely	71
4.4	Zpevněné povrchy puklin a měření REI	77
5	Skalní kůry	84
5.1	Skalní kůry minerální	84
5.2	Biologické kůry	89
5.3	Ověření výskytu skalní kůry TOC analýzou	91
6	Zkoušky pevnosti a vliv biologických krust	92
6.1	Měření povrchové vlhkosti	92
6.2	Měření rychlosti infiltrace	94
6.3	Oslabení vlivem smáčení a vliv biologické krusty	102

6.4	Zjišťování kvality a relativní pevnosti povrchu	106
6.5	Měření tahové pevnosti pískovce	109
6.6	Měření pevnosti pomocí Schmidtova kladiva	114
7	Diskuse.....	118
8	Závěr	124
9	Použité zdroje	126

Abstrakt

Severozápadní část Příhrazské vrchoviny je známá výskytem svahových pohybů, první vědecky popsáný pohyb se zde odehrál v roce 1926 a měl katastrofické následky. Tato práce se zabývá vyhodnocením pokračujících vybraných svahových pohybů v severozápadní části Příhrazské vrchoviny a navazuje na předchozí měření. Naměřené pohyby porovnává s meteorologickými daty, daty s okolních hydrogeologických vrtů a v neposlední řadě porovnává pohyby ze dvou sledovaných míst vůči sobě. Ve druhé části se práce soustřeďuje na objasnění problému zvýšené náchylnosti monitorované skalní věže ke zvětrávání a porovnání vlastností pískovcového materiálu z této věže s okolními pískovci na sledované i jiných lokalitách. Pozornost je věnována zejména vlivu biologických skalních kůr, jejichž významný vliv potvrzuje. Pro objasnění využívá terénní i laboratorní metody v kombinaci s využitím počítačových programů.

Abstract

The Northwestern part of the Příhrazská platform is known for its processes, the first scientifically studied movement occurred here in 1926 and had catastrophic consequences. This work deals with the evaluation of the selected continuous slope movements in the north-western part of Příhrazská platform and builds on previous measurements. The measured movements are compared with meteorological data, with the surrounding hydrogeological borehole data, and compared with other monitoring site in the vicinity. In the second part, the work focuses on clarifying the problem of the increased susceptibility of the monitored rock tower for weathering and comparison of the properties of sandstone material from this tower with surrounding sandstones from the vicinity and other localities. Attention is especially paid to the influence of the biological crusts, whose significant influence is confirmed. For the investigation field and laboratory methods were used in combination with the use of computer programs.

Úvod

Diplomová práce byla zadána v prosinci roku 2014 na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze a vypracována ve spolupráci s Ústavem struktury a mechaniky hornin Akademie věd České republiky. Toto pracoviště se zabývá tématy blízkými tématu diplomové práce a zároveň disponuje potřebným vybavením pro její uskutečnění.

Cílem této diplomové práce byla analýza aktivity vybraných svahových pohybů v České křídové pánvi, přesněji v severozápadní části Příhrzaské vrchoviny, detailní rozbor příčiny nestability porušené pískovcové skalní věže v blízkosti Studeného průchodu v lokalitě Mužský a rozbor její zvýšené náchylnosti ke zvětrávání. Vybrané vlastnosti materiálu pískovcové věže byly porovnány s ostatními pískovcovými povrchy na lokalitě Mužský, ale i na jiných lokalitách české křídové pánve.

Práce má ve svém úvodu rešeršní charakter. V další části práce je kladen důraz na vlastní terénní i laboratorní výzkum. Podkladem pro získávání údajů a informací bylo prostudování odborných pramenů českých i zahraničních autorů, internetové články a publikace, normy, ale i odborné závěrečné zprávy a diplomová práce.

K analýze byla využita data z dlouhodobého monitoringu aktivních svahových pohybů a také data meteorologická z blízké meteorologické stanice. Dále byla provedena řada terénních i laboratorních zkoušek. V případě terénních zkoušek se jedná např. o použití vlhkoměru pro měření povrchové vlhkosti pískovce, Karstenových trubic pro stanovení nasákavosti, siloměru a Schmidtova kladiva pro stanovení tvrdosti povrchu. V laboratořích byly využity metody pro stanovení objemové hmotnosti a zrnitosti pískovce, jeho mineralogického složení metodou rentgenové difrakce a další metody.

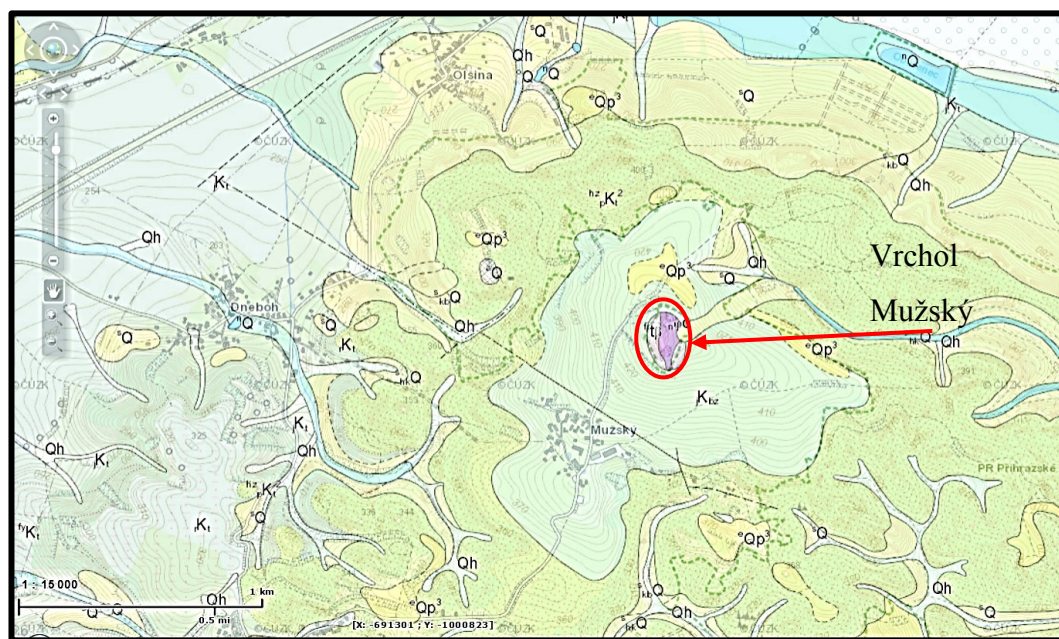
1. Lokalita

1.1 Obecné informace

Zájmová oblast je součástí České křídové pánve v severních Čechách. Česká křídová pánev se rozkládá na ploše téměř 15 000 km² v severní části Českého masivu, od Drážďan až po severozápadní Moravu (Chlupáč et al. 2002). V období druhohor byla tato oblast zaplavená po dobu přibližně deseti miliónů let mořem a docházelo zde k ukládání klastických sedimentů, jejichž mocnost může dosahovat až stovek metrů (Kyrianová 2004). Přesněji je lokalita situována v Pojizeří na severozápadním okraji Příhrazské vrchoviny, která vytváří krajinnou dominantu východně od města Mnichovo Hradiště a zároveň leží v chráněné krajinné oblasti Český ráj. Nadmořská výška Příhrazské vrchoviny se pohybuje převážně v rozmezí 320–400 m n. m, přičemž nejvyšší bod je vyhlídkové místo Mužský (obr. 1) s nadmořskou výškou 467,1 m n. m. Tento vrchol je geologickou výjimkou v dané lokalitě, protože je tvořen olivinickými nefelinity a bazaltickými brekciemi, na rozdíl od většiny zájmové lokality, která je tvořena kvádrovými pískovci, typicky velmi náchylnými na rozvolňování a skalní řícení (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005). Lokalita je turisticky hojně navštěvovaná díky zřícenině skalního hradu Drábské světničky v severozápadní části pískovcové vrchoviny. V oblasti Hrada byly nalezeny pozůstatky osídlení z mladší doby kamenné a s velkou pravděpodobností se jedná o pískovcový blok oddělený cca 60 m širokou trhlinou od centrální části vrchoviny (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005). Nestabilita pískovcových stěn mnohdy ohrožuje bezpečnost turistů, kteří zároveň danou oblast intenzivně narušují díky slabému zpevnění pískovců. Z obou těchto důvodů bylo Rybářem, Stemberkem a Hartvichem (2006) doporučeno omezení turistického ruchu na lokalitě.

Příhrazská vrchovina je oblastí bohatou na porušování stability svahů a je možno zde pozorovat mnoho typů svahových deformací. Jedná se o oblast, ve které bylo zpracováno množství inženýrskogeologických a geomorfologických studií, přičemž sledovat a podrobněji mapovat toto území začal již prof. Quido

Záruba po katastrofálním sesuvu 26. června 1926, kdy odlučná stěna sesuvu zasáhla až k patě věži skalního hradu Drábské světničky (Stemberk, Zvelebil 1999). Sesuvné a pomalé plouživé pohyby po plastickém podloží jsou typické pro severní a západní okraj vrchoviny. Kromě toho zde byly dokumentovány i další geologické jevy jako pseudozávrty, závrtové rýhy, eroze a blokové rozsedliny. (Stemberk, Zvelebil 1999; Rybář, Forczek-Kyrianová 2005).



Obrázek 1. Výřez z geologické mapy 1 : 25 000 – (Česká geologická služba)

1.2 Přírodní poměry

Příhrazská vrchovina jako součást Vyškeřské vrchoviny při okraji Turnovské pahorkatiny tvoří tabulovitou vyvýšeninu vystupující nad níže položenou Mnichovohradištskou kotlinu (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005). Na území se vyskytují Přírodní rezervace i Přírodní parky. Povrch Příhrazské vrchoviny je ukloněn od severozápadu k jihovýchodu, kde na severozápadním okraji je hrana vrchoviny ve výšce kolem 400 m n. m. a v jihovýchodní části je hrana ve výšce kolem 320 m n. m. (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005). Pro tuto práci je stěžejní severozápadní strana vrchoviny (obr. 2), která je bokem širokého pleistocenního údolí řeky Jizery.

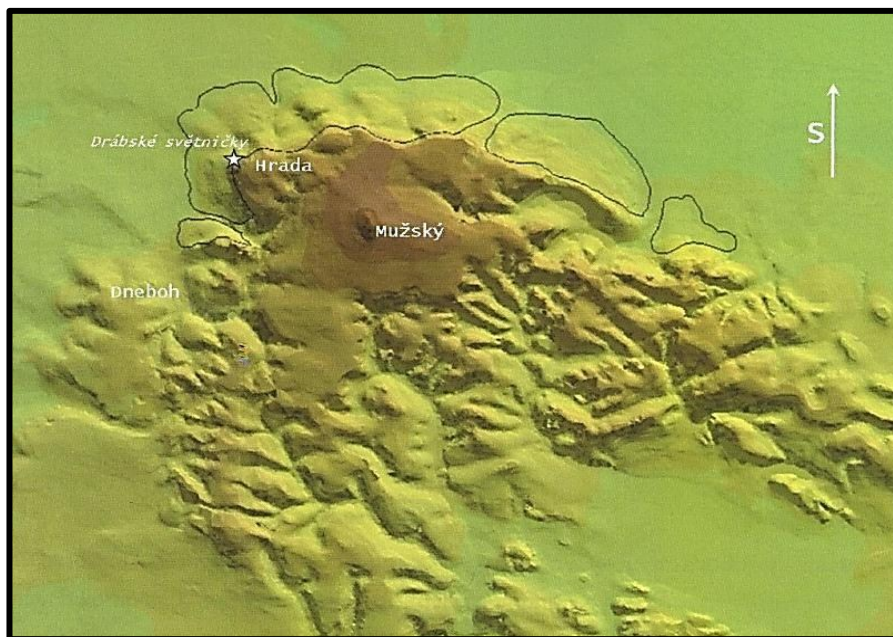
Území je částí jizerské litofaciální oblasti České křídové pánve a je tvořeno sedimenty prostoupenými tělesy neovulkanitů, přičemž nejvýznamnější postavení mají sedimenty křídové (Kyrianová 2004). Stratigraficky je křída zastoupena středním turonem až coniakem, přičemž nejstarší křídové vrstvy vystupují severozápadně od Příhrazské vrchoviny na břehu řeky Jizery (Rybář et al. 2007). V nadloží jizerského souvrství se setkáme převážně s vápnitými jílovci a slínovci teplického souvrství, které v oblastech mimo Příhrazskou vrchovinu tvoří předkvartérní podklad (v oblasti Příhrazské vrchoviny na jílovce a slínovce nasedají coniaké kvádrové pískovce) (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005). Slínovce mají šedou až žlutošedou barvu, a pokud nejsou zvětralé, lze u nich pozorovat deskovité zvrstvení (Kyrianová 2004). Zvětrávají do jílovitopísčité hlíny s obsahem plochých úlomků (tzv. placiček) (Matula, Pašek 1986). V jejich nadloží jsou coniaké sedimenty psamitické facie, jedná se hlavně o křemenné kvádrové pískovce rigidní povahy, které se vyznačují charakteristickou kvádrovitou odlučností podle systémů subvertikálních puklin a subhorizontálních vrstevních ploch a v prostoru skalních měst dosahují mocnosti až 120 m (Rybář et al. 2007).

Pískovce v některých polohách obsahují jílovitý tmel, který zhoršuje odolnost vůči zvětrávání. Kvádrové pískovce se uklánějí k JV až JJV pod mírným úhlem 1°. Jsou středně až jemně zrnité a jejich barva je žlutavá. V oblasti skalních měst na severovýchodě Příhrazské vrchoviny se vyskytují příkopové propadliny, které sledují krušnohorskou poruchu. Lze také pozorovat linie sudetského a jizerského zlomu. (Rybář et al. 2007).



Obrázek 2. Výřez z geologické mapy 1:10 000; čerchovaně je vyznačen předpokládaný průběh báze pískovců (Zvelebil, Stemberk, Hartvich 2001)

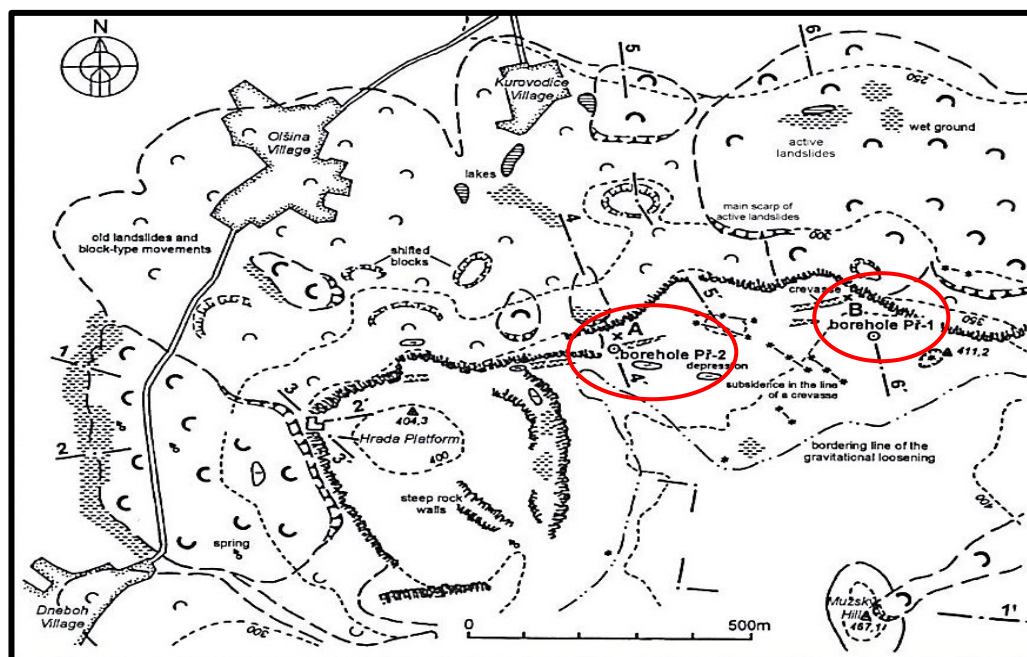
Křídové sedimenty byly v období miocénu proraženy produkty vulkanické činnosti. Tyto terciérní vulkanity se zde vyskytují především jako vypreparované přírodní komíny a žilná tělesa, na některých místech obnažená erozí (Kyrianová 2004). Najít je můžeme v jihovýchodní části Příhrazské vrchoviny, kde sledují zlomové linie krušnohorského směru (ZJZ – VSV) (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005). Produkty vulkanismu jsou odolné vůči zvětrávání. Kvartérní sedimenty jsou zastoupeny v podobě fluviálních a deluviofluviálních písčitých hlín, na určitých lokalitách také sprašemi (Kyrianová 2004).



Obrázek 3. Digitální model Píhrazské vrchoviny s viditelnými liniemi krušnohorského zlomu (Rybář et al. 2007)

1.3 Hydrogeologické poměry lokality

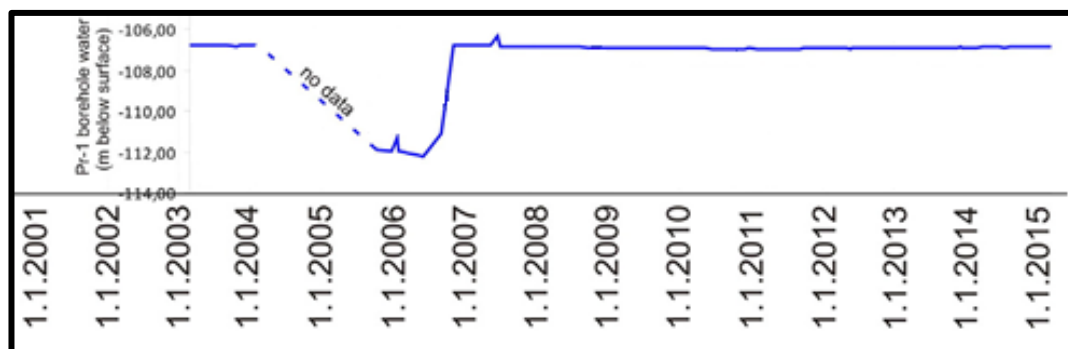
K monitorování hladiny podzemní vody slouží vrty PŘ-1 a PŘ-2 (obr. 4) zhotovené na základě požadavku Akademie věd České republiky (dále jen AV ČR). Vrt PŘ-1 byl vyvrtán v roce 2001 do hloubky 122 m, nachází se téměř 500 m východně od Drábských světniček a přibližně 200 m od hrany vrchoviny (Stemberk et al. 2016). Vrt PŘ-2 byl s hloubkou 65 m byl vyvrtán v roce 2002, aby doplnil monitorovací systém zahájený na lokalitě vrtem PŘ-1 a je situovaný v blízkosti rozsedliny Studený průchod, přibližně 250 m východně od Drábských světniček, 70 m od hrany vrchoviny a 20 m jižně pod sledovanou skalní věží (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006; Stemberk et al. 2016). Na základě provedených vrtů je zřejmé, že hlavní zvoď vrchoviny se nachází na kontaktu propustných pískovců a téměř nepropustných vápnitých jílovců, jejichž zvlhčení vede ke zhoršení jejich vlastností.



Obrázek 4. Mapa geodynamický jevů na Příhrázské plošině s vyobrazenými polohami vrtů PŘ-1 a PŘ-2 a monitorovacími body A, B (Rybář, Stemberk, Hartvích 2006)

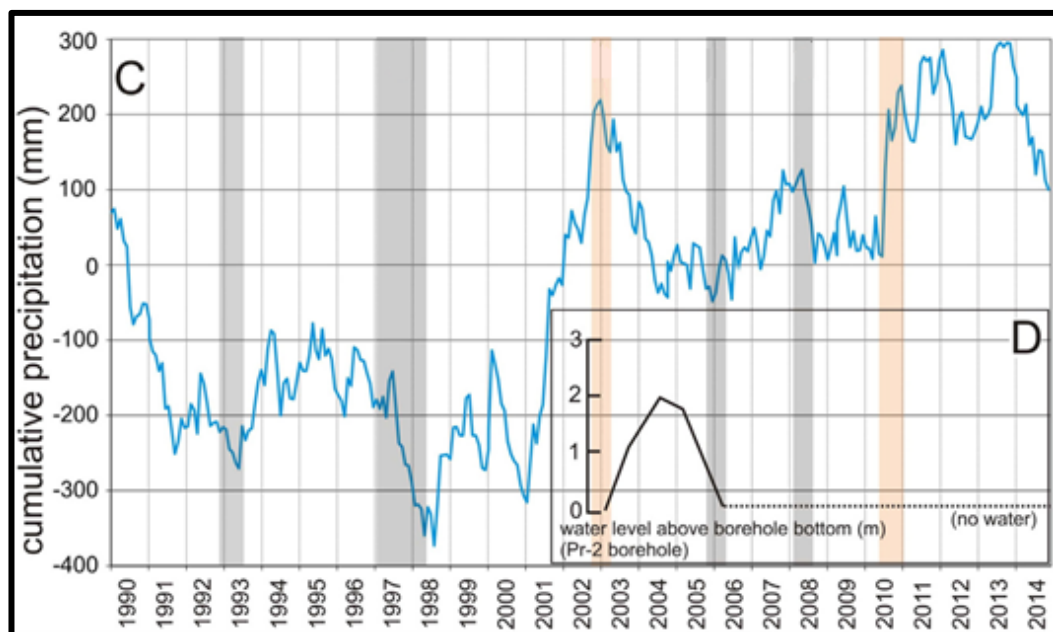
1.3.1 Vrtů PŘ-1 a PŘ-2

Ve vrtu PŘ-1 byla hranice mezi pískovci a slinitými jílovci teplického souvrství nalezena v hloubce 108 m a hladina podzemní vody (dále jen h.p.v.) v hloubce 106,5 m (Procházka 2001). Režimní sledování hladiny podzemní vody bylo vědci z AV ČR zahájeno na konci roku 2001 (Špaček 2001a, 2001b). K dispozici jsou data až do konce roku 2014 (obr. 5). Vrt má po většinu doby téměř konstantní výšku hladiny a zdá se, že na ní vůbec nemá vliv množství srážek, kolísání hladiny se většinou pohybovalo v rozmezí 21 cm (Stemberk et al. 2016). Během sledování do roku 2004 došlo jen k nepatrnému kolísání hladiny vody ve vrtu v rozsahu 0,3 m (Špaček 2003). Během roku 2004 a první poloviny roku 2005 měření neprobíhalo. Při obnovení měření v červnu 2005 byla zaznamenána hladina o 5 m nižší, ale vzhledem k výpadku v měření není jasné, jak rychle a kdy začala hladina vody ve vrtu klesat (Stemberk et al. 2016). Od června 2005 hladina rostla až na původní naměřenou hodnotu a na této úrovni zůstala až do konce roku 2014. Stemberk et al. (2016) předpokládají se, že výkyv hladiny mohl být spojen s naměřeným blokovým pohybem na dané lokalitě.



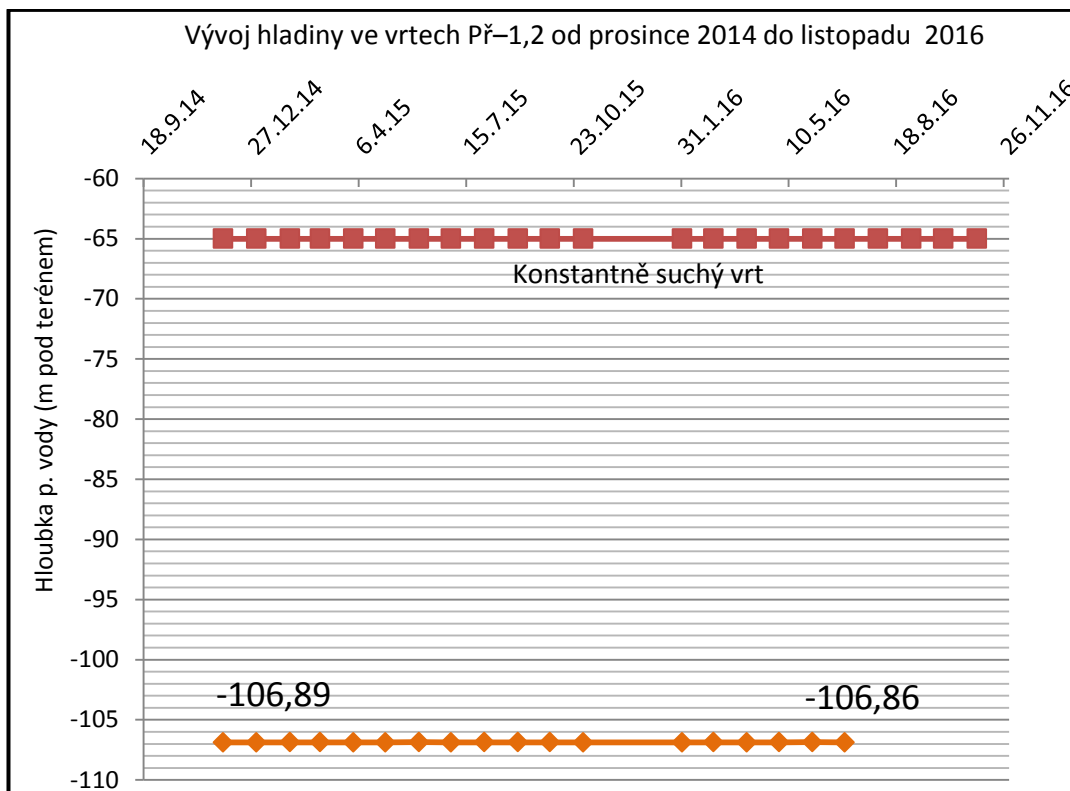
Obrázek 5. Modrá křivka zobrazuje časový průběh hladiny podzemní vody ve vrtu PŘ-1 (Stemberk et al. 2016)

Ve vrtu PŘ-2 byla hranice mezi pískovci a jílovcí identifikována v hloubce 61,7 m (Špaček 2002). Vrt zůstává až na výjimky prakticky neustále suchý bez ohledu na množství srážek (obr. 6) (Stemberk et al. 2016). Výjimku tvoří období v průběhu let 2003 až 2004, kdy hladina vzrostla až na hodnotu cca 1,9 m nad dnem vrtu (Špaček 2003, 2004), aby na začátku roku 2006 z vrtu opět zmizela a do konce roku 2014 se ve vrtu již neobjevila (Stemberk et al. 2016). Zajímavé je, že rok 2003 byl extrémně suchý (nejsušší minimálně od roku 1985). Toto skokové zvýšení hladiny podzemní vody se shoduje s náhlým 3 mm blokovým pohybem zaznamenaným v prosinci 2002 na monitorovacím bodě umístěným na blízké sledované věži.



Obrázek 6. C – Graf kumulativní křivky rozdílů mezi skutečným úhrnem srážek a 50. letým měsíčním průměrem na stanici Boseň – Mužský ; D – časový průběh hladiny podzemní vody ve vrtu PŘ-2 (Stemberk et al. 2016)

Vývoj hladiny v obou vrtech po roce 2014 zůstává téměř neměnný. Vrt PŘ-2 zůstává suchý. Ve vrtu PŘ-1 je výška h.p.v. prakticky konstantní bez vlivu srážkového úhrnu. Je ovšem nutné dodat, že od roku 2014 byly naměřené roční srážkové úhrny přibližně o 150 mm pod 30letým průměrem, který je 687 mm a jednalo se tedy o velmi suché roky. Hladina nereaguje ani na roky srážkově nadprůměrné, např. rok 2010 byl bohatý na srážky a to i v zimních a podzimních měsících (cca 200 mm nad 30letý průměr) a k žádnému výkyvu nedošlo.



Obrázek 7. Vývoj hladiny ve vrtech PŘ-1 a PŘ-2

1.4 Geodynamické jevy

Příhrazská vrchovina je oblastí rozsáhlých starých i současných svahových pohybů. Dle Rybáře, Stemberka a Hartvicha (2006) lze vymezit čtyři základní zóny nestabilních oblastí ve svazích. První je zóna hlubinného gravitačního rozvolňování, další je zóna rozsedlin a blokových polí, následovaná zónou suťových zvětralin při patě stěn a poslední je zóna starých sesuvů. Stěžejní pro geodynamické jevy Příhrazské vrchoviny je dvojvrstevná struktura hornin s odlišnými přetvárnými charakteristikami. Křehké křídové pískovce spočívají v nadloží plasticky se chovajících slínovců a jílovců. Tyto podložní vrstvy neposkytují dostatečnou oporu rozvolněným pískovcům. Tím dochází k jejich zaboření a vytlačení plastických vrstev z pískovcového podloží, čímž dochází k aktivaci blokových svahových pohybů, které se projevují vykláněním bloků a skalních věží po svahu, ale i zakláněním proti svahu. (Rybář, Forczek-Kyriánová 2005). Tyto formy gravitačních svahových deformací jsou znázorněny na řezu v

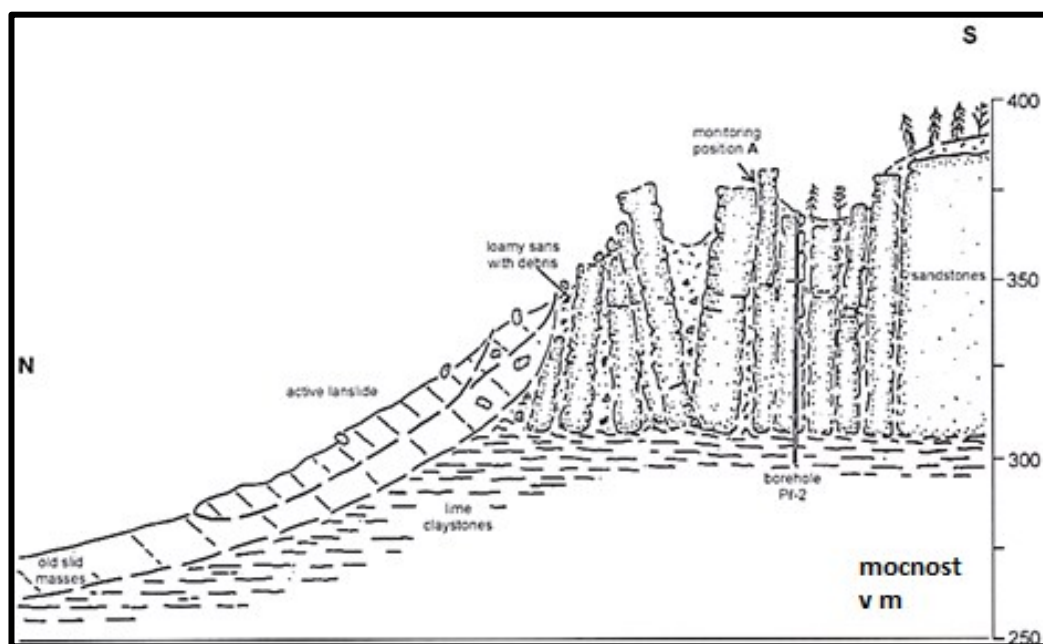
obr. č. 8, který byl sestaven z vrtů PŘ-1, PŘ-2, mělkých vrtů a kopaných rýh v oblasti sesuvu z roku 1926 (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006). Blokované pohyby jsou doprovázeny typickými průvodními jevy, jako jsou rýhy a trhliny, skalní řízení či blokované rozsedliny, jejichž příkladem je Studený průchod (Rybář et al. 2006). Rozsedliny také mohou vznikat vymytím snadno erodovatelného pískovce mezi tektonickými puklinami i bez účasti svahových pohybů (Kůrková, Bruthans 2013). Během vrtání vrtu PŘ-1 byla v hloubce 60 m nalezena rozsedlina vyplněná křídovými produkty. (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006) Rozvolňováním je postiženo území sahající až do vzdálenosti 400 m od hrany vrchoviny směrem k jejímu centru, viz obr. č. 9 (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006). Nejpříznivější strukturní podmínky pro vývoj hluboce založených sesuvných i plouživých pohybů jsou v severozápadní části vrchoviny, kde v pleistocénu docházelo k zahlabování řeky Jizery a pískovce zde plnily funkci ochranné desky nad méně odolnými slínovci, čímž si zachovávaly vysoký sklon. (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005).

Dále se podle Rybáře, Stemberka a Hartvicha (2006) setkáváme se sesuvy vlivem hromadění velkého množství sutí vznikajících řízením gravitačně se rozpadajících skalních stěn. K řízení dochází zejména u stěn vyšších než 10 m, jejich sutě pokrývají dna soutěsek a v předpolí skalních stěn působí přitížení měkkých hornin v podloží a následný pokles smykové pevnosti. Směrem k jihu a východu se snižuje výška skalních stěn i svahů a klesá rovněž pravděpodobnost vzniku řízení i sesuvů (Rybář, Forczek-Kyrianová 2005). Výrazným činitelem pro aktivaci takového sesuvu je dlouhotrvající déšť, který nasytí pískovcové sutě, čímž se zvýší pórové tlaky v podložních slínech a tím se sníží smyková pevnost horninového materiálu. Dle Záruby (1966) byl stanoven limitní srážkový úhrn 339 mm za 2 měsíce pro reaktivaci sesuvů na Příhrazské plošině. Záruba zároveň označil jako hlavní příčinu sesuvu z roku 1926 příliš velký sklon svahu a příliš velké dodatečné zatížení podložních slínovců opadávajícími pískovcovými sutěmi, jejichž vznik byl podporován sycením pískovců vyvěrajícími podzemními vodami. Bylo zjištěno, že slínovce jsou v oblasti sesuvů prohnětené a mají charakter potrhaných jílu až do hloubky 30 m (Kyrianová 2004).

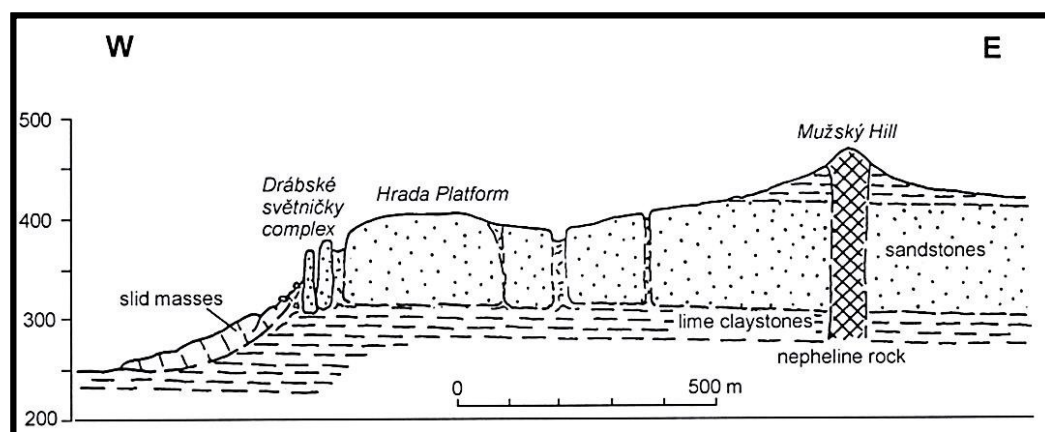
V roce 2002 byly z vrtu PŘ-2 odebrány vzorky jílovců v hloubkách 63–64 m a byl určen vysoký obsah smektitu (21–31 %) (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006). V letech 2006 a 2007 byly na severním úpatí Příhrázské vrchoviny vyvrtány dva průzkumné vrty s označením Olšina 1 a Olšina 2 (dále jen OL-1 a OL-2), viz obr. č. 11. Vrty jsou v akumulační oblasti dočasně uklidněného sesuvného území a mají hloubku 13 resp. 17 m (Šťastný 2007). Z těchto vrtů byly odebrány vzorky vápenných jílovců za cílem určení obsahu zejména jílových minerálů, analýzu provedl Šťastný (2007). Vápenné jílovce jsou charakterizovány obsahem uhličitánů vyšším než 10 %. Ve svrchní části souvrství měly tyto vzorky cca 20 % uhličitánů a ve spodním přibližně 30 %. Celkový obsah jílových minerálů byl stanoven na 40 % s převahou kaolinitu a smektitu a menším podílem illitu (do 10 %). Smektit může v období déle trvajících srážek bobtnat vlivem vázání vody a způsobovat nestabilitu svahů. V zimě voda v pórech mrzne a dochází k trhání jílovce a ztrátě soudržnosti. Naopak při nedostatku vody vysychá a smršťuje se. Záruba (1966) také analyzoval jílové minerály z jílovitých vrstev a výsledek ukázal převažující obsah kaolinitu a montmorillonitu.

Rybář, Stemberk a Hartvich (2006) označují jako další zónu nestabilit oblast závrťů podél severní hrany vrchoviny. Závrťům byla věnována velká pozornost při mapování v letech 2001 a 2004. Podél severní hrany vrchoviny bylo zdokumentováno několik desítek závrťů, často vyplněných kvartérními sedimenty. Závrty jsou typické pro více oblastí Českého ráje a jsou místem infiltrace srážkových vod do podzemí, čímž mohou ovlivňovat hydrogeologický režim oblasti a zároveň mít vliv na stabilitu oblasti v důsledku sycení podložních jílovců (Kůrková, Bruthans 2013). Tento vliv se na sledované lokalitě neprokázal, což dokazuje graf vývoje hladin ve vrtech Olšina 1,2, viz obr. č. 10, který ukazuje zejména sezónní závislost výšky hladiny podzemní vody v těchto vrtech. Existovaly dvě teorie vzniku závrťů (Kůrková, Bruthans 2013). Někteří autoři se přikláněli k sufozi, jiní uvažovali také vliv odsedání pískovcových ker vlivem svahových pohybů. Objasnění skutečného mechanismu vzniku závrťů přinesla detailní analýza v lomu Střeleč (Kůrková, Bruthans 2013). Tato analýza prokázala, že závrty vznikají nejpravděpodobněji odpadáváním, rozvolněním a odnosem deskovitých bloků pískovce proudící vodou vnikající do tektonických

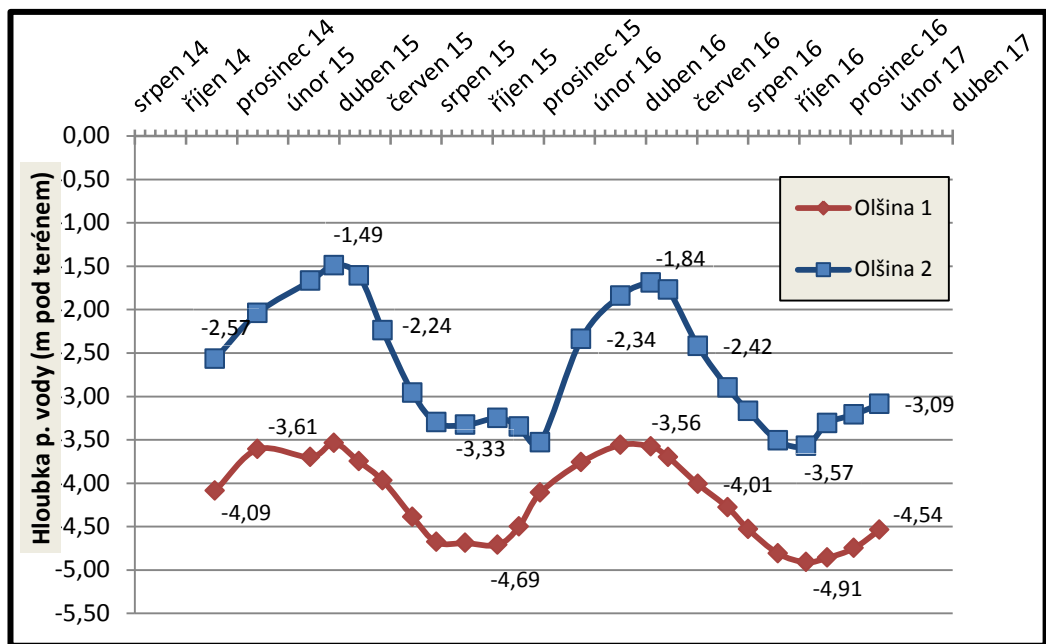
puklin z povrchu. Tímto dochází ke ztrátě blokového podloží, jednotlivé bloky se postupně řítí a vznikají tzv. puklinové jeskyně. Erozní původ závrtů je podpořen jejich výskytem v celé šířce plošin, nikoli jen při jejich okraji, kde dochází k nejintenzivnějším svahovým pohybům. Výjimku mohou tvořit závrtů blízko hrany vrchoviny, kde hlavním faktorem mohou být blokové pohyby.



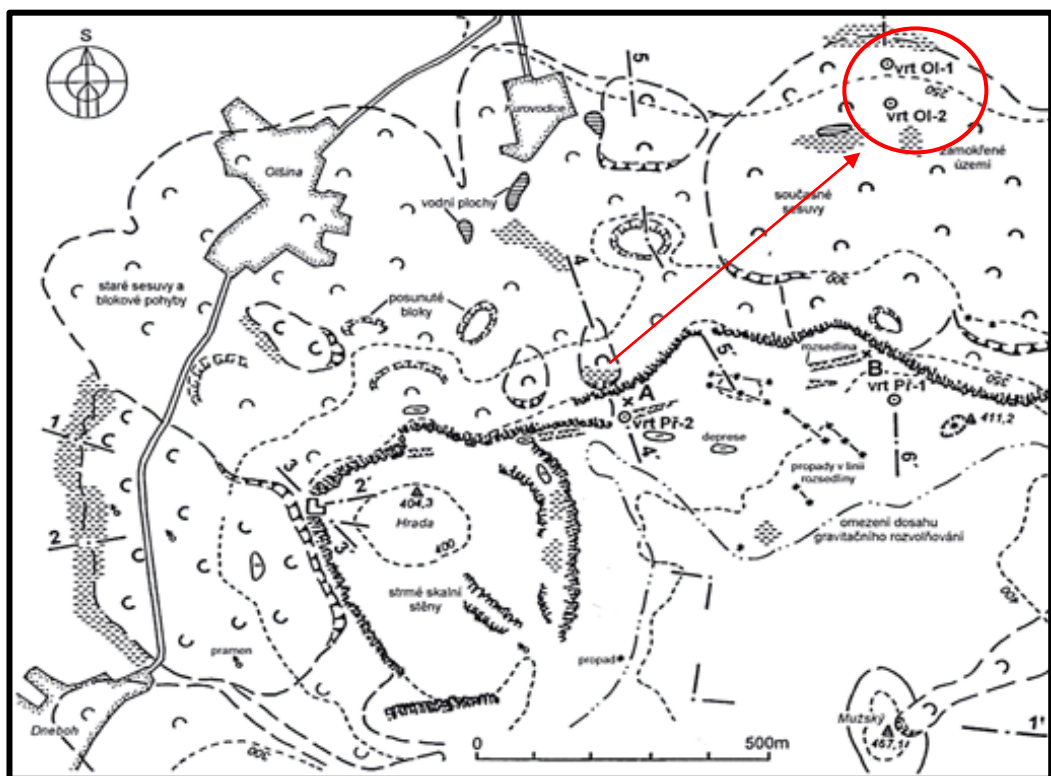
Obrázek 8. Geologický řez s vyobrazenými blokovými pohyby pískovců (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006)



Obrázek 9. Geologický řez s viditelným rozsahem zóny porušení (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006)



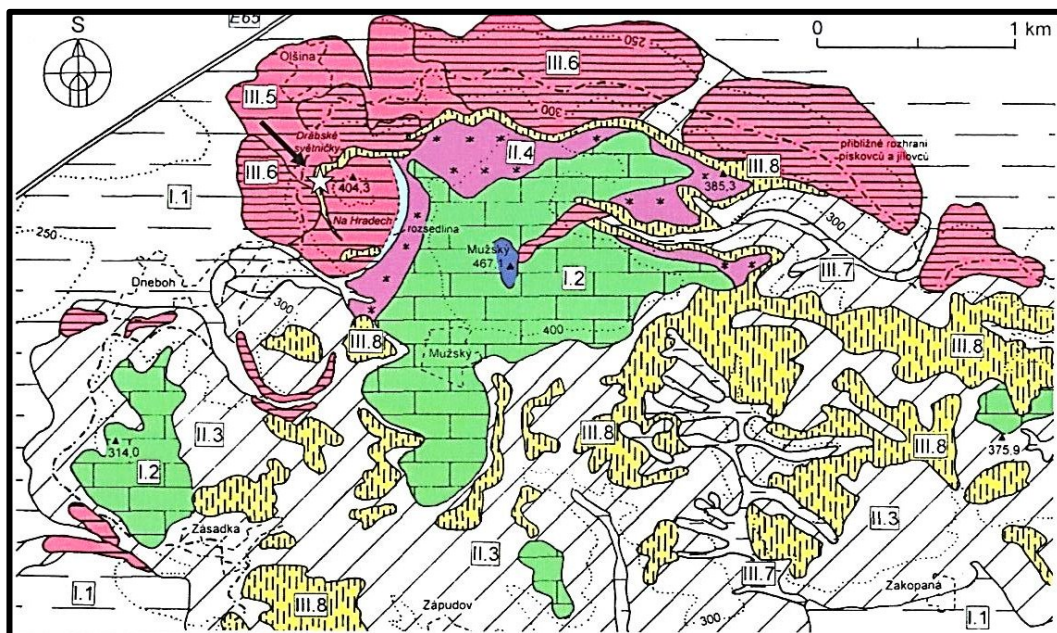
Obrázek 10. Vývoj hladiny ve vrtech Olšina 1,2 od prosince 2014 do ledna 2017 ukazuje závislost výšky hladiny podzemní vody na ročním období



Obrázek 11. Zobrazení vrtů OL-1 a OL-2 na mapě geodynamických jevů (Rybář et al. 2007)

V letech 1962–1964 byla lokalita detailně studována týmem prof. Záruby a od roku 1989 jsou svahové pohyby na této lokalitě sledovány Ústavem struktury a

mechaniky hornin Akademie věd České republiky (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006). V roce 2004 Rybář et al. (2004) sestavili prognostické mapy náchylnosti území k porušení stability svahů v měřítku 1 : 10 000. Obr. č. 12 představuje mapu hodnocení stabilitních podmínek v severozápadní části vrchoviny, která je nejpříznivější pro vývoj hluboce založených svahových pohybů. Zároveň je na mapě znázorněn předpokládaný směr pohybů pískovcových bloků.



Obrázek 12. Hodnocení stabilitních poměrů v severozápadní části Příhrazské vrchoviny; Oblast I = stabilní území; Oblast II = území, kde nelze vyloučit porušení stability; Oblast III = nestabilní území (Rybář, Stemberk, Hartvich 2005)

Před začátkem sledování lokality v roce 1989 nebyly v pískovcích shledány známky čerstvého porušování ani jakékoli jiné deformace, které by ukazovaly na aktivitu dané oblasti (Stemberk, Zvelebil 1999). Záruba (1966) předpokládal, že proces blokových pohybů byl aktivní zejména v periglaciálních podmínkách pleistocénu, kdy se kombinovalo opakované hluboké mrazové porušení s vlhkými obdobími interglaciálů a postglaciálů, což zhoršovalo vlastnosti masivu a podložních hornin. Území bylo považováno za stabilní a podléhající postupné fosilizaci. Tato hypotéza byla podpořena nálezem velkého bloku pískovce u paty stěny, který nesl známky konstrukčních prvků a evidentně odpadl ze skalního hradu v době kolem roku 1430 a dříve (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006). Záruba (1966) vyhodnotil, že blok je stále na stejném místě a to

považoval za důkaz, že od 15. století nedochází k vzájemnému pohybu bloků. Nevyrátil však možnost horizontálního posunu bloků.

Pašek a Košťák (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006) na základě příkladů série blokových pohybů zjištěných v bývalém Československu definovali tyto pohyby jako velmi pomalé, ale stále aktivní. To bylo podpořeno také výskytem ohýbání kmenů borovic (obr. 13), které byly nově vysázeny v horní části sesuvu z roku 1926. Tento les stojí na povrchu sesouvající se rotující kry. Předpoklad stabilního území byl zcela vyvrácen Stemberkem a Zvelebilem (1999), kdy bylo na jaře 1990 pozorováno čerstvé porušení skalní věže (obr. 14) nad obcí Olšina, které bylo pravděpodobně způsobeno kombinací zvětrávání a silovým působením kořenového systému blízkého stromu. Také za horní hranou vrchoviny bylo pozorováno čerstvé propadávání kvartérních pokryvů a projevy sufoze na pískovcových trhlinách, ke kterým začalo pravděpodobně docházet již v roce 1989 (Stemberk, Zvelebil 1999). Na lokalitě byla pozorována změna hydrogeologického režimu projevující se dlouhodobě zamokřenými depresiemi, pramennými mísami, ale i soustředěnými výrony podzemní vody vynášejících písčitojílovitý materiál. Tyto výrony byly pozorovány v blízkosti kontaktní zóny pískovců a jílovců. Vzhledem k těmto zjištěním bylo v létě roku 1990 zahájeno dilatometrické měření na vybraných místech lokality.



Obrázek 13. Ohnuté kmeny stromů vlivem plouživých pohybů (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006)

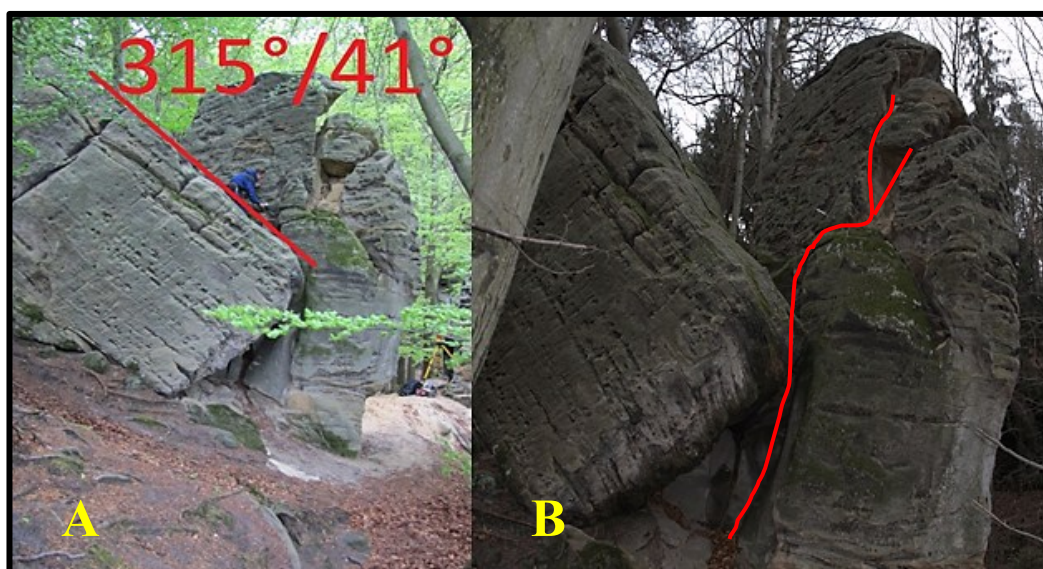


Obrázek 14. Porušená skalní věž (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006)

2 Monitoring

2.1 Sledovaná skalní věž

Rozpadající se pískovcová věž se nachází v blízkosti Studeného průchodu a přibližně 250 m východoseverovýchodně až východně od Drábských světniček, viz bod A na obr. č. 4. Jedná se přibližně o 8 m vysoký osamocený pískovcový útvar s půdorysnou plochou přibližně 25 m². Věž je výraznou puklinou rozdělena přibližně na dvě poloviny. V severní části se o její povrch opírá výrazně vykloněný sousední pískovcový blok (obr. 15). Západní část věže má tvar převisu s povrchem pokrytým voštinami. Celková mocnost skalní věže včetně hloubky v podloží je přibližně 73 m (ve vrtu Př-2, který je blízko věže, byla hranice mezi podložními jílovci a pískovci identifikována v hloubce 61,7 m a věž má výšku od vrtu cca 8 m + rozdíl v nadmořských výškách od zhlaví vrtu a okolním terénem u věže).

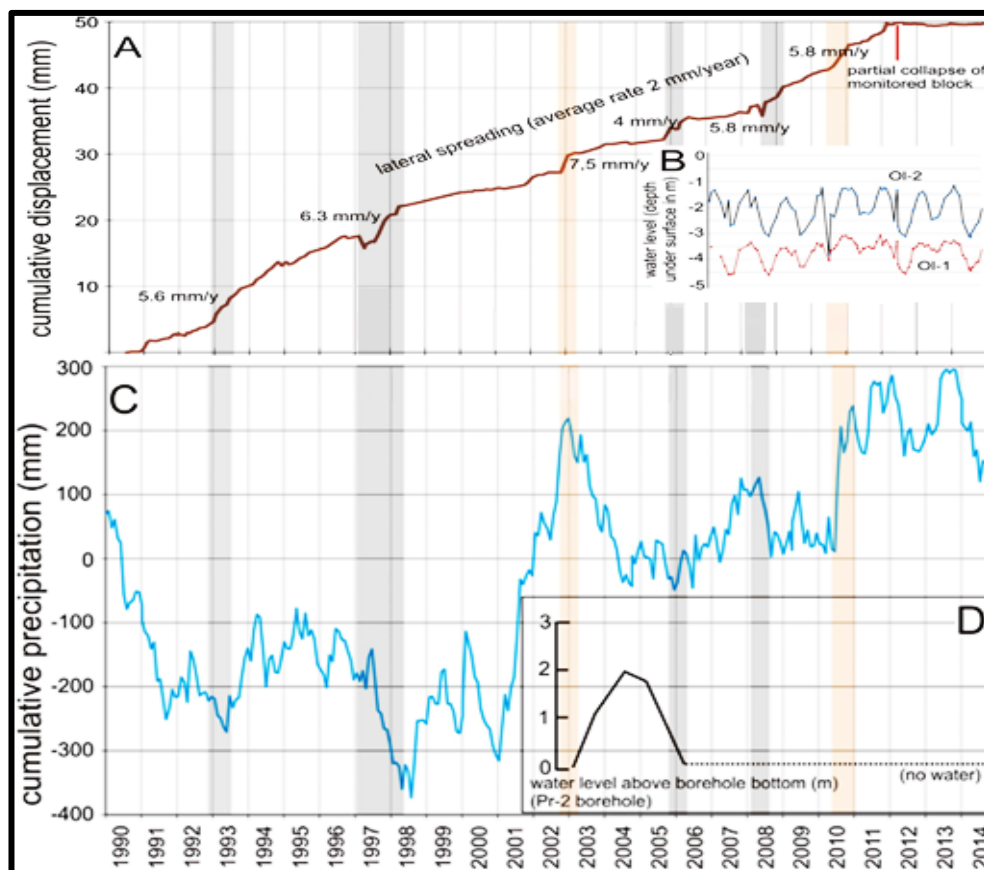


Obrázek 15. A - sousední ukloněný blok, který tlačí na věž; B - hlavní puklina rozdělující věž na dvě poloviny

Porušení věže bylo poprvé pozorováno již v roce 1990, viz kapitola 1.3. Věž se nachází na severozápadním okraji Příhrazské vrchoviny v místě morfologicky starého intenzivního porušení, avšak jak dokazuje nestabilita věže i

v místě s výskytem čerstvého porušování. V blízkosti věže je situován vrt PŘ-2. Svah pod touto věží je postižen velmi silnými blokovými svahovými pohyby a ve své spodní části je vyplněn několika generacemi sesuvů ve svahovinách, které byly v roce 1990 neaktivní, ale postupně začalo být patrné obnovení sesuvných pohybů (Stemberk, Zvelebil 1999; Rybář, Stemberk, Hartvich 2006). Na trhlinách porušujících skalní věž bylo instrumentováno 5 měřících bodů pro příložný dilatometr s cílem zjistit příčiny porušování, přičemž byly Stemberkem a Zvelebilem (1999) stanoveny dvě hypotézy. První považuje za hlavní příčinu přirozené zvětrávání s urychlováním procesu vlivem pákového efektu kořenů přilehlého buku. Druhá spojuje porušování skalní věže se vznikem hlouběji založených svahových pohybů. Měření byla prováděna pomocí tyčového dilatometru s přesností čtení 0,1 mm a s četností měření přibližně jednou za měsíc.

Nevratné deformace v řádu milimetrů za rok byly pozorovány na všech měřících zařízeních. Tyto deformace nebyly způsobeny pouze objemovými změnami v důsledku teplotních a srážkových výkyvů, ale byly řádově větší než objemové změny bloků (Stemberk et al. 2016; Rybář et al. 2007). Jednalo se tedy o zřetelnou evidenci svahových pohybů, viz křivka kumulativní deformace měřené na hlavní puklině na obr. č. 16 (Stemberk et al. 2016). Z křivky je patrné, že hlavní trhlina se od počátku měření v roce 1990 do konce roku 2014 otevřela o 50 mm s průměrnou rychlostí rozevření 2 mm/rok. Při pohledu na křivku je vidět, že pohyb není po celou dobu konstantní, ale lze vyčlenit několik období rychlejších a pomalejších pohybů. Zvýšená rychlost rozevírání byla zaznamenána v obdobích leden–září 1993, duben–listopad 1997, listopad 2002 až únor 2003, říjen 2005 až duben 2006, srpen 2008 až březen 2009 a červenec–prosinec 2010. Pohyb se zastavil v roce 2012, kdy došlo ke zhroucení části monitorovaného bloku (Stemberk et al. 2016). Všechna meziobdobí lze označit za úseky se středním, až nízkým nárůstem nevratné deformace.

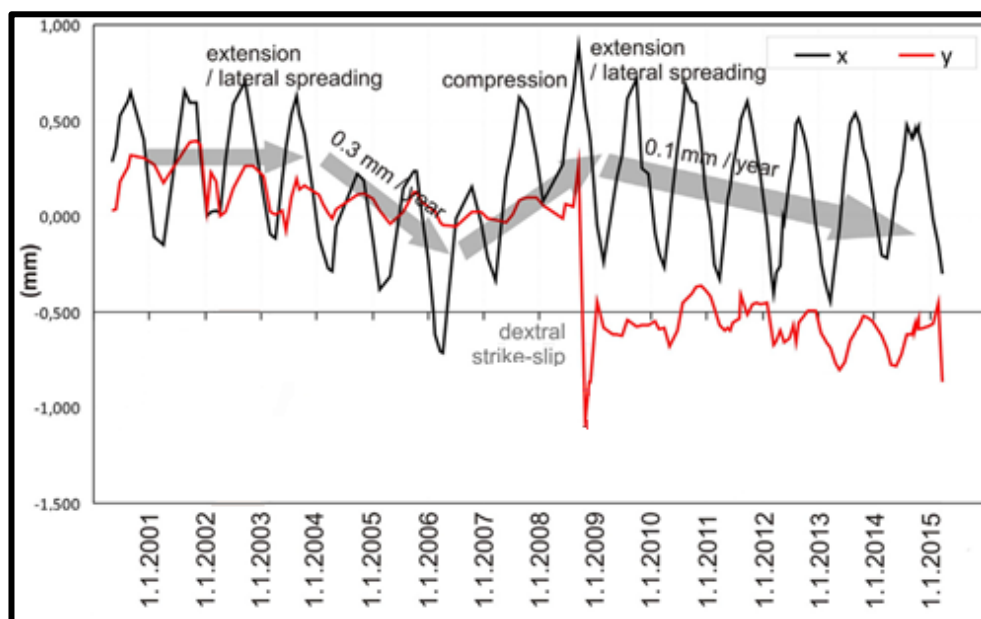


Obrázek 16. Záznam dilatimetrického měření na porušené skalní věži (část A); spodní graf (část C) zobrazuje křivku rozdílu mezi skutečným úhrnem srážek a průměrným měsíčním úhrnem za posledních 50 let (Stemberk et al. 2016)

2.2 Trhlina s přístrojem TM-71

V období mezi roky 1990–1998 a 2000–dosud probíhá na této lokalitě ještě další měření zaměřené na blokové pohyby pískovců. Toto měření bylo situováno do pole blokových rozsedlin, přesněji do konkrétní trhliny o šířce přibližně 30 cm, viz obr. č. 25 (Stemberk, Zvelebil 1999). Trhlina má orientaci VSV–ZJZ, je vzdálená přibližně 420 m východně od Drábských světniček a 50 m od hrany vrchoviny. Měření bylo prováděno optickým 3D dilatometrem TM-71 umístěným přibližně 3 m pod povrchem, kde teplota v průběhu roku kolísá nejčastěji v rozmezí 2–15 °C (Stemberk et al. 2016). Tento přístroj umožňuje sledování pohybů ve 3D s přesností až 0,007 mm. Přístroj byl umístěn kolmo na trhlinu, aby byla zachycena horizontální i vertikální složka pohybů mezi

jednotlivými pískovcovými bloky. Záznam měřených deformací zobrazuje obr. č. 17. Průměrná rychlost zde naměřených geodynamických pohybů je 0,1 mm/rok (Stemberk et al. 2016). Na rozdíl od pozorované skalní věže nelze tyto pohyby charakterizovat dlouhodobým lineárním trendem. Rybář et al. (2007) došli ze získaných dat k závěru, že pravděpodobně dochází k posunu bloků směrem k okraji vrchoviny. Ukázalo se, že se trhlina při jarním tání sněhu opakovaně rozevívá a na podzim zužuje. Tyto sezónní změny byly zaznamenány v rozsahu přibližně 1,2 mm.



Obrázek 17. Záznam měřených deformací na přístroji TM-71; osa x zobrazuje otevírání a zavírání pukliny v horizontálním směru; osa y zobrazuje kluzný pohyb v horizontálním směru (Stemberk et al. 2016)

2.3 Pokračující měření

V první polovině roku 2015 byl monitorovací systém na skalní věži doplněn o automatický indukční trhlinoměr (Gefran PZ 67–200) s automatickým odečtem hodnot posunů a přesností odečtu 0,05 mm. Přístroj byl umístěn do trhliny v severní části skalní věže, která se zdála být nestabilní, viz obr. č. 18. Cílem umístění bylo pomocí tohoto přístroje přesnější a kontinuální sledování pohybu skalní věže, které bylo umožněno díky častému automatickému odečtu

pohybů v intervalech 1 hodiny a současně záznamu teploty okolního vzduchu. Naměřená data byla přibližně jednou za měsíc shromažďována.



Obrázek 18. Umístění automatického extenzometru na věži

Měření také stále probíhalo na dalších 5 měřících bodech na skalní věži a v trhlině s přístrojem TM–71. V této trhlině jsou kromě přístroje TM–71 umístěny ještě další 3 monitorovací body. Všechna tato data nejen z posledních dvou let byla detailně prostudována, porovnána vzájemně, porovnána se srážkovými úhrny i pohyby podzemní vody ve vrtech OL–1,2 a Př–1,2.

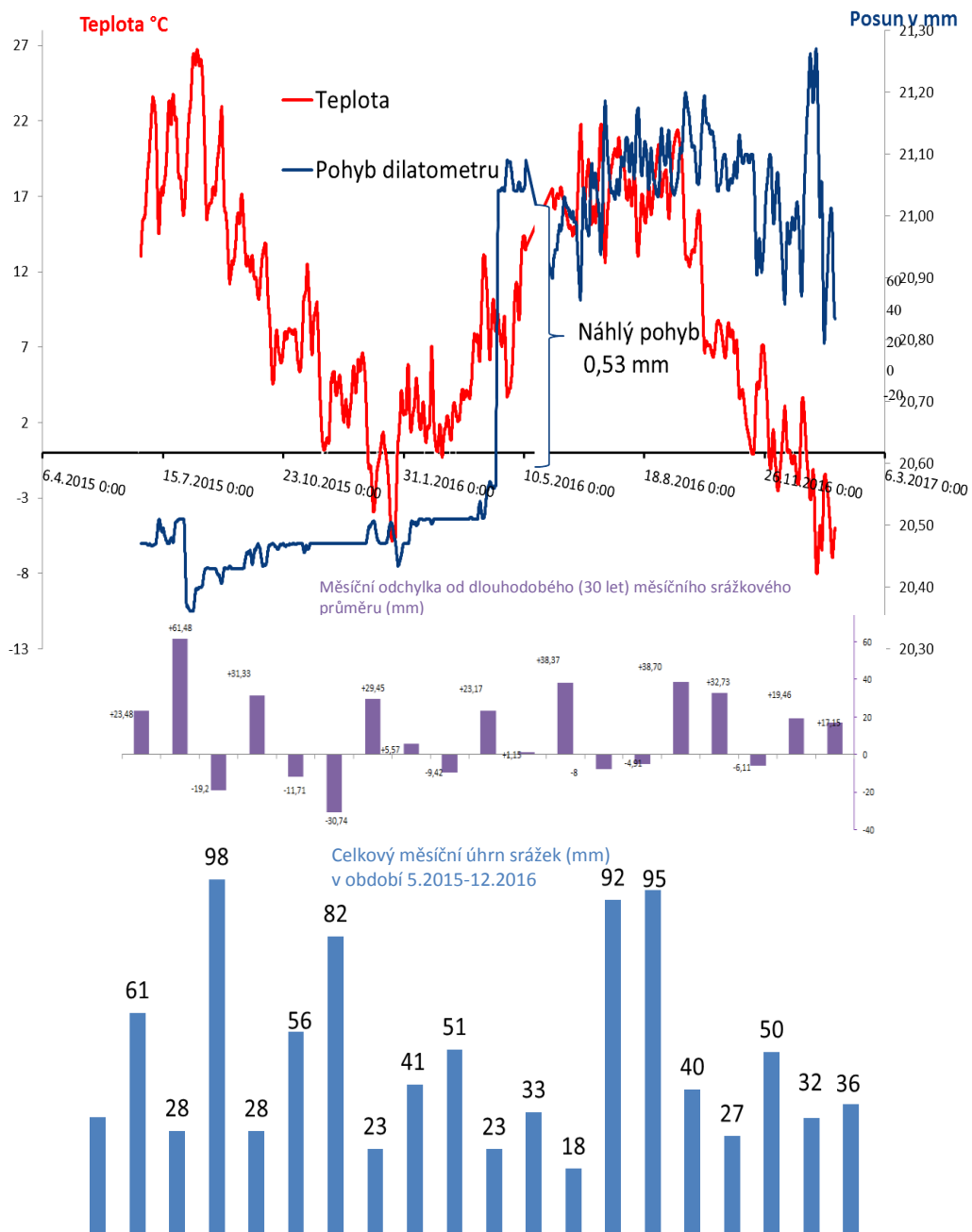
Pro interpretaci získaných dat bylo přistoupeno k vyhodnocení v následujících bodech:

- a) Vyhodnocení záznamu z automatického extenzometru na věžičce v období 24. 6. 2015–23. 1. 2017
- b) Vztah mezi jednotlivými monitorovacími body na věži
- c) Vztah mezi monitorovacími body na věži a srážkovým úhrnem na lokalitě
- d) Vztah mezi monitorovacími body na věži a h.p.v. v okolních vrtech
- e) Vztah mezi pohybem bodů na věži a okolní teplotou
- f) Dlouhodobý vývoj pohybů na sledované skalní věži
- g) Vývoj dilatometrických měření na bodech v puklině s přístrojem TM–71

h) Zaznamenané pohyby na přístroji TM–71

2.3.1 Vyhodnocení záznamu z automatického trhlinoměru na věžičce 24. 6. 2015–23. 1. 2017

Měření bylo prováděno od 24. 6. 2015 a vyhodnocená data končí dnem 23. 1. 2017. Odečet byl prováděn automaticky jednou za hodinu. Celkový zaznamenaný pohyb za toto období byl naměřen v rozsahu 0,93 mm. Prvních 10 měsíců se naměřený posun pohyboval v rozmezí 0,24 mm. Dne 16. 4. 2016 došlo k náhlému posunu o 0,53 mm. Ve zbytku sledovaného období se posun pohyboval v rozmezí přibližně 0,5 mm (obr. 19).



Obrázek 19. Záznam naměřeného pohybu a teploty na automatickém extenzometru; grafy srážkových úhrnů

Z křivek na obr. č. 19 je vidět, že pohyb trhlinoměru není ovlivněn množstvím srážek. Např. v srpnu a listopadu 2015, dále v červnu a červenci 2016 byl zaznamenán zvýšený měsíční srážkový úhrn a nelze vysledovat následnou reakci

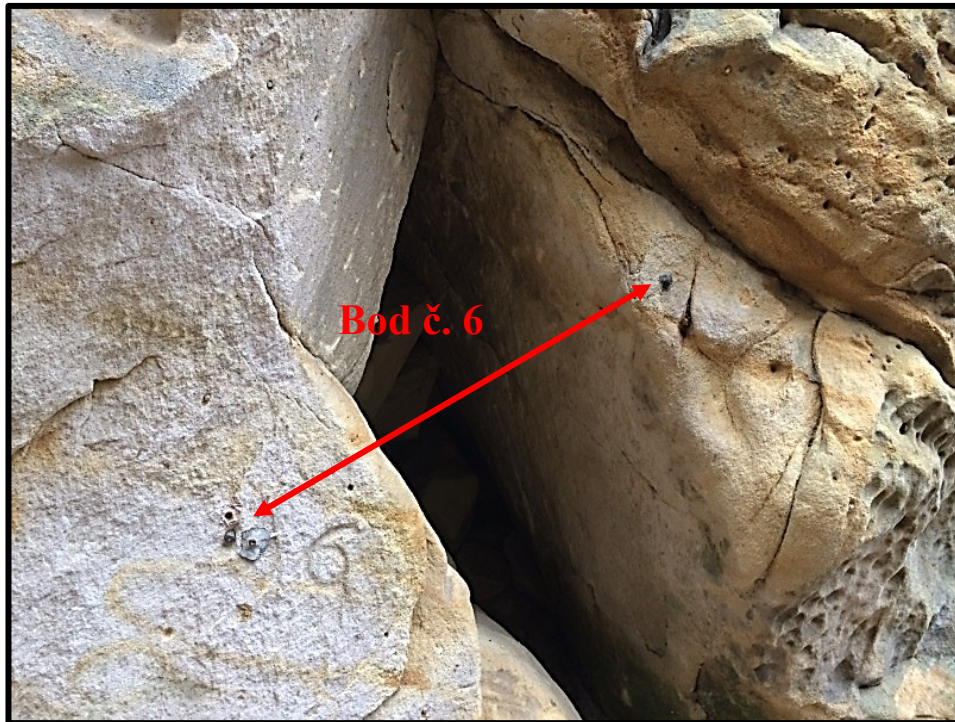
v pohybu na trhlině. Stejně tak při pohledu na graf měsíčních odchylek od dlouhodobého průměru nepozorujeme reakci trhlinoměru na tyto výkyvy.

Reakce na teplotní změny je malá, což je potvrzené z detailního rozboru jednotlivých naměřených hodnot v časové posloupnosti. Odezva na teplotní změny dosahuje cca 0,1 mm.

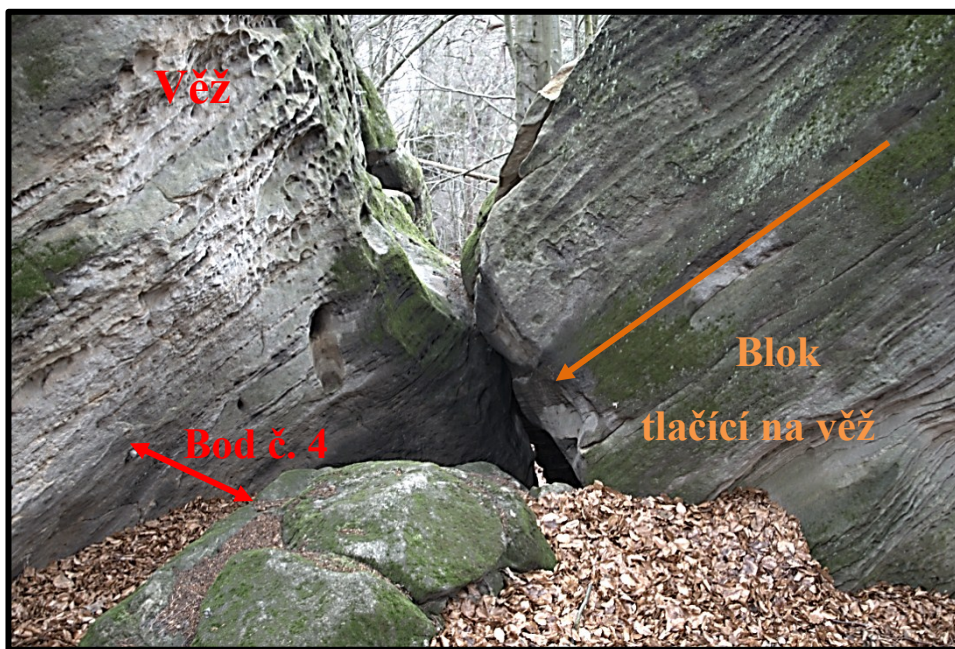
Před náhlým pohybem dne 16. 4. 2016 jsou hodnoty na trhlinoměru prakticky nulové. V tento den byl na meteorologické stanici Boseň–Mužský naměřen srážkový úhrn 2,4 mm, tedy slabé intenzity. Ani za předchozích 6 dní nepřesáhl celkový úhrn srážek v součtu 8,6 mm a nemohl tak mít vliv na pohyb sledovaného bloku. Teorie, že náhlý pohyb mohl být způsoben vnějším zásahem (např. turisty), není příliš pravděpodobná, neboť po tomto výrazném pohybu se aktivita pohybů zvýšila. Tento trhlinoměr je umístěn na samostatném odděleném horninovém bloku a autor přisuzuje náhlý pohyb ze dne 16. 4. 2016 celkovému posunutí tohoto bloku v puklině bez přímého vztahu ke srážkám. V tento den pravděpodobně došlo k „odblokování“ monitorovaného bloku po delším období klidu. Na dalších dvou monitorovacích bodech (body č. 1 a č. 3) v těsné blízkosti byla v tomto období sledována také mírně vyšší aktivita. Na přístroji TM-71 nebyla v tomto období zaznamenána zvýšená aktivita.

2.3.2 Vztah mezi monitorovacími body na věži

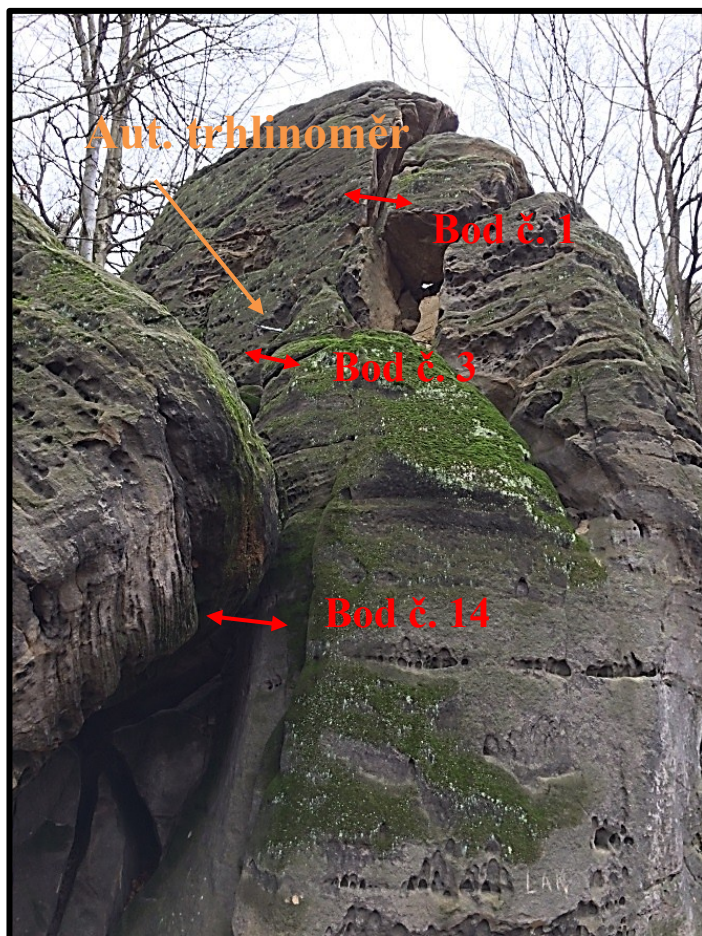
Byla porovnána data z dilatometrických měření na sledované skalní věži. Konkrétně se jednalo o body s číselným označením 1, 3, 4, 6, 14 a trhlinoměr s automatickým odečtem značky Gefran (obr. 20–22). Data byla porovnána v období červen 2015–leden 2017. Průměrná rychlost rozevírání byla u těchto bodů v rozmezí 0,2–0,5 mm/rok, tedy velmi nízká. V období posledních 5 let je tato průměrná rychlost pohybu nižší, maximálně do 0,2 mm/rok a v posledních 2 letech došlo tedy k nepatrnému zrychlení pohybů.



Obrázek 20. Bod č. 6 dilatometrického měření na věži, pohled z jižní strany

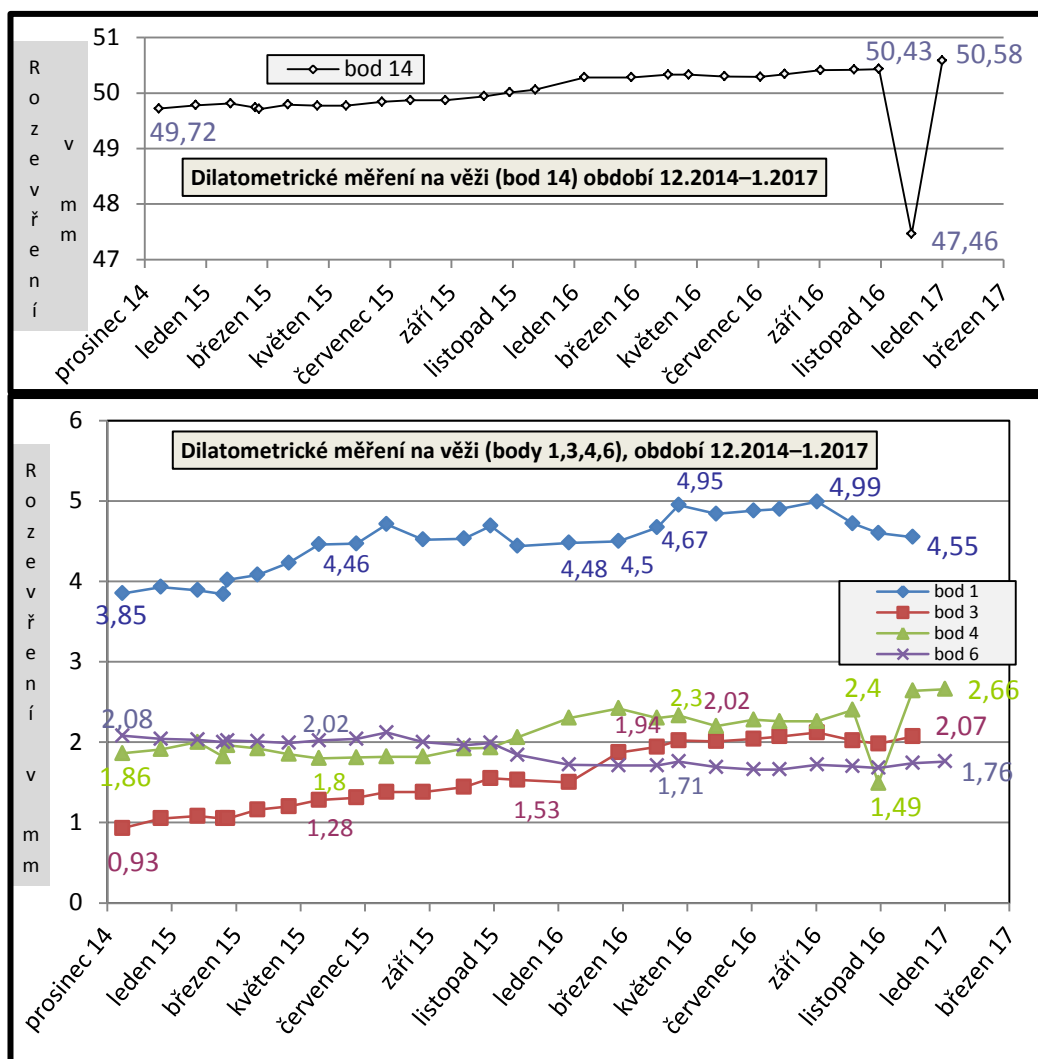


Obrázek 21. Bod č. 4 dilatometrického měření na věži, pohled ze západní strany



Obrázek 22. Body č. 1, č. 3 a č. 14 dilatometrického měření na věži + automatický trhlinoměr, pohled ze severozápadní strany

Zatímco automatický trhlinoměr od června 2015 do dubna 2016 nevykazuje téměř žádný pohyb (0,04 mm), body č. 1 a č. 3, které jsou velmi blízko u tohoto dilatometru, vykazují ve stejném období pohyb 0,21 mm resp. 0,66 mm (obr. 23). Shodu na bodech č. 1 a č. 3 lze pozorovat v období leden 2016–duben 2016, kdy v lednu 2016 začíná na všech bodech pozvolné rozevírání, které graduje skokovým pohybem na automatickém trhlinoměru (0,53 mm) a tento skokový pohyb může být reakcí na pozvolné pohyby bodů č. 1 a č. 3. V tomto období se všechny body rozevřely přibližně o 0,5 mm. Stejný trend lze mezi těmito body pozorovat i ve zbývajícím období.



Obrázek 23. Pohyby naměřené na monitorovacích bodech na sledované věži

Bod 6 (puklina s vyplaveným materiálem) se během pozorování postupně zavírá, což odpovídá teorii o vyklánění bloku, kdy se horní část vyklání (rozevívá) a spodní uzavírá. Celý blok pravděpodobně při pohybu ještě mírně rotuje (obr. 24).



Obrázek 24. Náčrt pohybu věže, horní část pukliny se rozevívá a spodní uzavírá, pohled z jihozápadní strany

Shodné trendy v naměřených datech pozorujeme také na bodech č. 4 a č. 14, na kterých došlo v listopadu resp. prosinci 2016 ke skokovému krátkodobému výkyvu, v bodě č. 4 o 1 mm, v bodě č. 14 dokonce o 3 mm (obr. 23). Tento skokový pohyb může být způsoben nepřesností ručního měření, ačkoli vzhledem ke shodné době naměřených skokových pohybů se to nezdá být pravděpodobné. Ve zbylém čase na obou těchto bodech sledujeme pomalé, téměř kontinuální rozevírání (od června 2015 shodně o 0,8 mm).

2.3.3 Vztah mezi monitorovacími body na věži a srážkovým úhrnem na lokalitě

Srážková data byla získána z meteorologické stanice Boseň–Mužský. Porovnáním celkových měsíčních srážkových úhrnů i odchylek od dlouhodobých měsíčních srážkových průměrů v období od června 2015 nebyl shledán vliv množství srážek na pohyb monitorovacích bodů na skalní věži, viz obr. č. 19 a č. 23.

2.3.4 Vztah mezi monitorovacími body na věži a h.p.v. v okolních vrtech

Vrt PŘ-2 byl po celou dobu měření suchý a ve vrtu PŘ-1 hladina vody kolísala jen v rámci prvních milimetrů viz obr. č. 7. Spojitost s pohyby se neprokázala ani při korelaci naměřených pohybů s výkyvy hladiny podzemní vody ve vrtech OI-1,2 viz obr. č. 28.

2.3.5 Vztah mezi pohybem bodů na věži a teplotou

U žádného z monitorovacích bodů na věži se nezdá být pohyb významně spjatý s teplotními výkyvy. Reakce na teplotní změny lze detekovat ve druhé polovině měřicího cyklu automatického trhlinoměru. Podle detailního autorova vyhodnocení bude odezva na teplotní změny dosahovat cca 0,1 mm. Dle ústního sdělení Blahůta, na základě jeho zkušeností i na jiných lokalitách vykazují měření na monitorovacích bodech vždy určitou reakci na teplotní změny. Po „odblokování“ monitorovaného bloku dne 16. 4. 2016 viz kap. 2.3.1, trhlinoměr kromě pohybu tohoto bloku také částečně reaguje na teplotní změny.

Při měření ručními dilatometry jsou teplotní změny detekovány méně přesně, než automatickým trhlinoměrem. Ruční dilatometry jsou před začátkem měření ručně kalibrovány pomocí ocelové tyče, čímž je odstraněn vliv okolní teploty na roztažnost vlastního dilatometru. U automatického trhlinoměru k takové kalibraci nedochází.

2.3.6 Dlouhodobý vývoj pohybu bodů na sledované skalní věži

Rychlost pohybu skalního bloku na základě dat získaných z automatického extenzometru lze vzhledem k jeho krátké činnosti předpokládat jen velmi obtížně. Pokud budeme počítat s průměrnou rychlostí rozevírání do 0,3 mm/rok, pak je v následujících letech možný posun maximálně v rozmezí prvních milimetrů. Takový posun by teoreticky mohl vést ke zřícení rozvolněných částí věže.

Body č. 1, 3, 4, 6 a 14 jsou monitorovány déle. Relevantní záznamy z těchto bodů lze datovat od srpna 2012, kdy došlo ke zřícení části věže. U všech těchto bodů je průměrná rychlost v posledních dvou letech až 3× vyšší, než je

průměr za posledních 5 let (tab. 1). Dochází tedy ke zrychlení pohybů, nicméně stále se nejedná o rychlosti vyšší než 0,6 mm/rok.

U bodu č. 14 lze porovnat data až do roku 1990, viz kapitola č. 2.1 (Stemberk et al. 2016). Do roku 2011 se průměrná rychlost pohybovala kolem 2 mm/rok a v současné době je tedy přibližně 5× pomalejší. Je nutné vzít v úvahu nepřesnost ručního měření příložným dilatometrem a proto jsou uvedené hodnoty spíše orientační. V praxi by však taková nepřesnost neměla být vyšší než v rozmezí desetin mm.

číslo bodu	1	3	4	6	14	extenzo– metr
Průměr za poslední 2 roky (mm/rok)	0,35	0,57	0,4	0,17	0,43	0,3
Průměr za posledních 5 let (mm/rok)	0,1	0,26	0,2	0,18	0,12	

Tabulka 1. Rychlost pohybů na sledované skalní věži

2.3.7 Vývoj extenzometrických měření na bodech v puklině s přístrojem TM–71

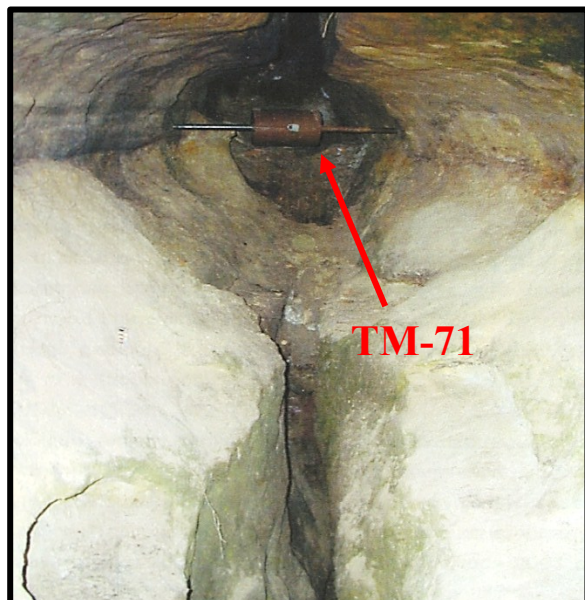
V puklině, která je osazena přístrojem TM–71 (obr. 26), jsou další 3 body dilatometrického měření č. 7, 8 a 9 (obr. 25). Na žádném z těchto bodů nebyla vysledována podobnost s pohybem bodů na zkoumané věži a to ani při porovnání dat od roku 2011.

Všechny tyto 3 body se pohybují stejně, jejich křivky se prakticky shodují, viz obr. č. 27. Při porovnání grafu hodnot od roku 1995 a grafu záznamu z posledních 2 let vidíme, že rozsah pohybů se cyklicky opakuje a to v rozmezí přibližně 1 mm. Detailním studováním pohybů hladin ve vrtech OL–1,2 a těchto 3 bodů je patrné, že pohyb všech bodů kopíruje výkyvy h.p.v. v těchto vrtech. Stejně tak vývoj teploty koreluje s vývojem pohybu na pozorovacích bodech (rozevírání začíná pravidelně kolem listopadu a končí kolem března až dubna) a

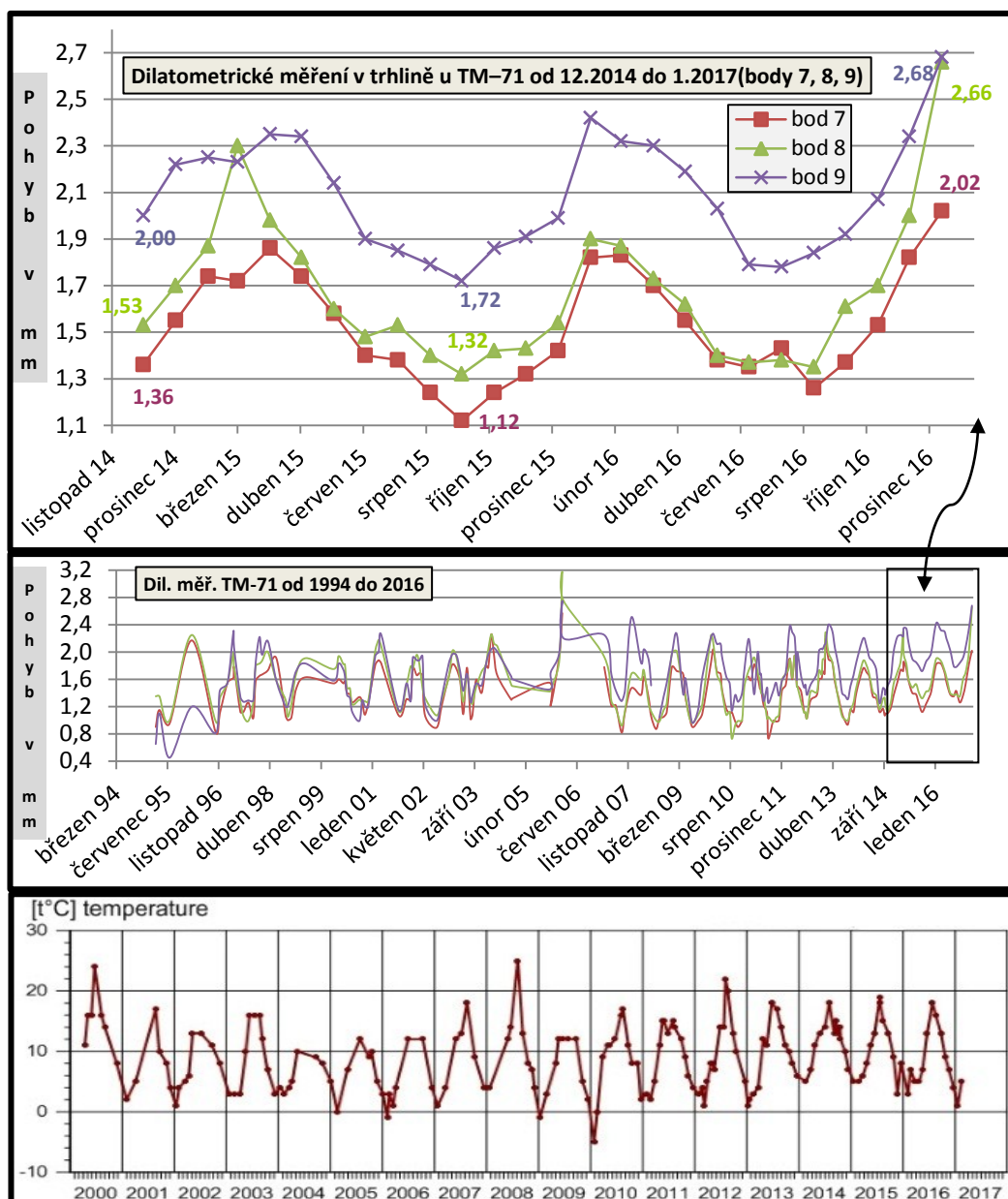
teplota má tedy velký vliv na vývoj pohybů, jak ukazuje obr. č. 27. Z grafu je patrné, že závislost pohybů na teplotě se pravidelně každoročně opakuje.



Obrázek 25. Monitorovaná bloková rozsedlina spolu s vyznačenými body měření; přístroj TM-71



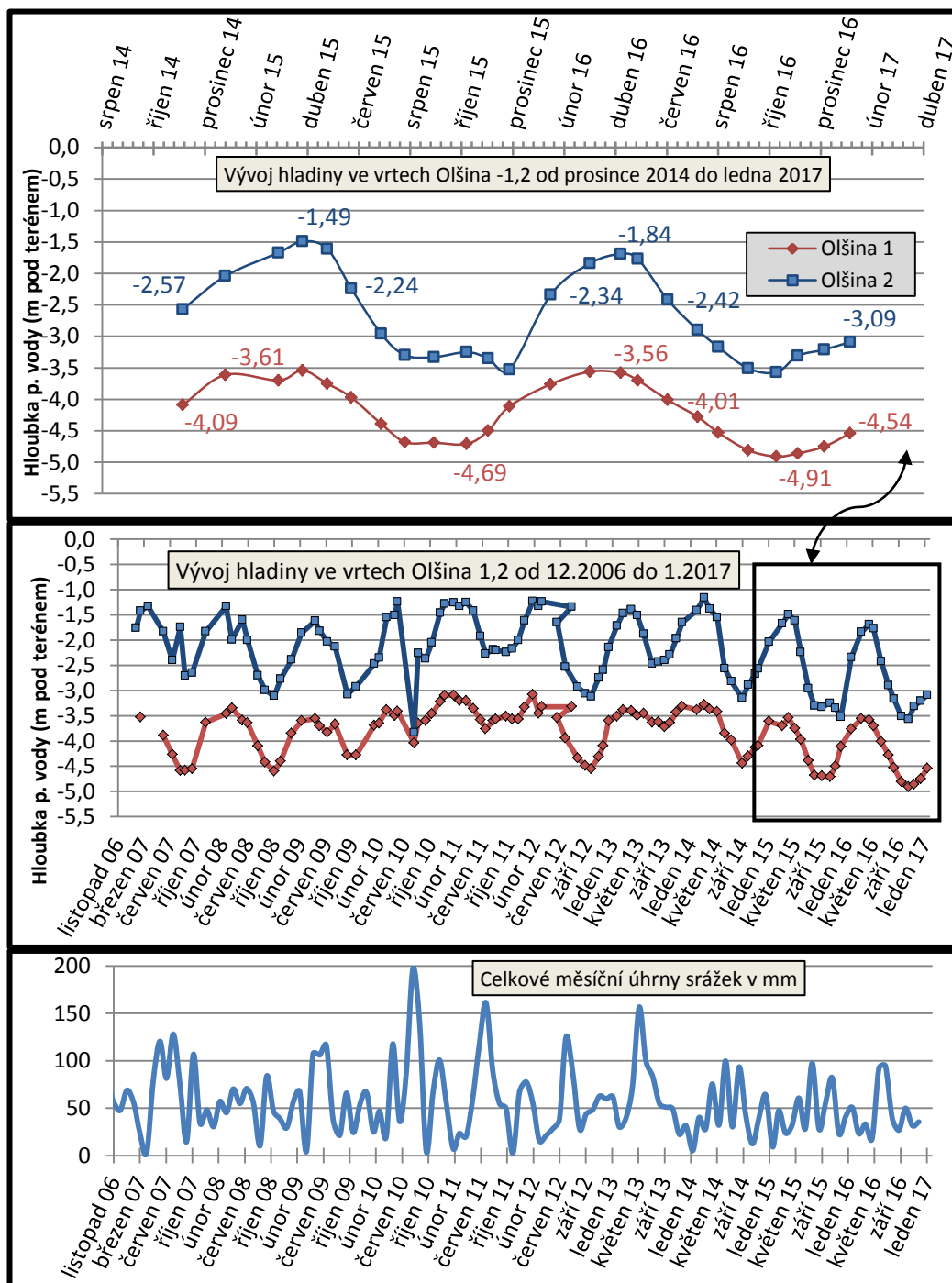
Obrázek 26. Přístroj TM-71 instalovaný v puklině



Obrázek 27. Záznam dilatometrického měření na bodech č. 7, 8, 9 a záznam průběhu teploty z meteorologické stanice Boseň-Mužský

Hladina podzemní vody ve vrtech OL-1,2 se pravidelně zvyšuje v zimních a jarních měsících, kdy jsou sice nižší srážkové úhrny, ale také je nižší výpar a od března taje sníh (obr. 28). Porovnání grafu celkového měsíčního srážkového úhrnu s grafem výkyvu hladin h.p.v. není možné, protože data o srážkových úhrnech jsou denní, zatímco měření ve vrtech OL-1,2 jsou data získávána jednou měsíčně. Podle ústního sdělení Blahůta jsou na základě jeho zkušeností zejména v mělkých vrtech (jako jsou vrty OL-1,2) po srážkách možné velmi

rychlé změny h.p.v. oběma směry v rozmezí prvních dní. Při odečtu dat jednou měsíčně není možné tyto krátkodobé výkyvy zaznamenat.



Obrázek 28. Záznam vývoje hladiny ve vrtech OL-1,2 v porovnání s měsíčními srážkovými úhrny na lokalitě Boseň – Mužský

Na základě nových i dlouhodobých dat nelze do budoucnosti předpokládat významný vývoj v pohybu na monitorovacích bodech v okolí přístroje TM–71. K tomu by mohlo dojít jen při velmi nadprůměrných ročních srážkách, zejména v zimních měsících, které by výrazně zvýšily hladinu podzemní vody, a tím by mohlo teoreticky dojít k dalšímu rozvoji blokových pohybů. V současné době nelze na této severní části Příhrazské vrchoviny v oblasti Mužského považovat pohyby za uklidněné, ovšem pohyby nemají progresivní charakter.

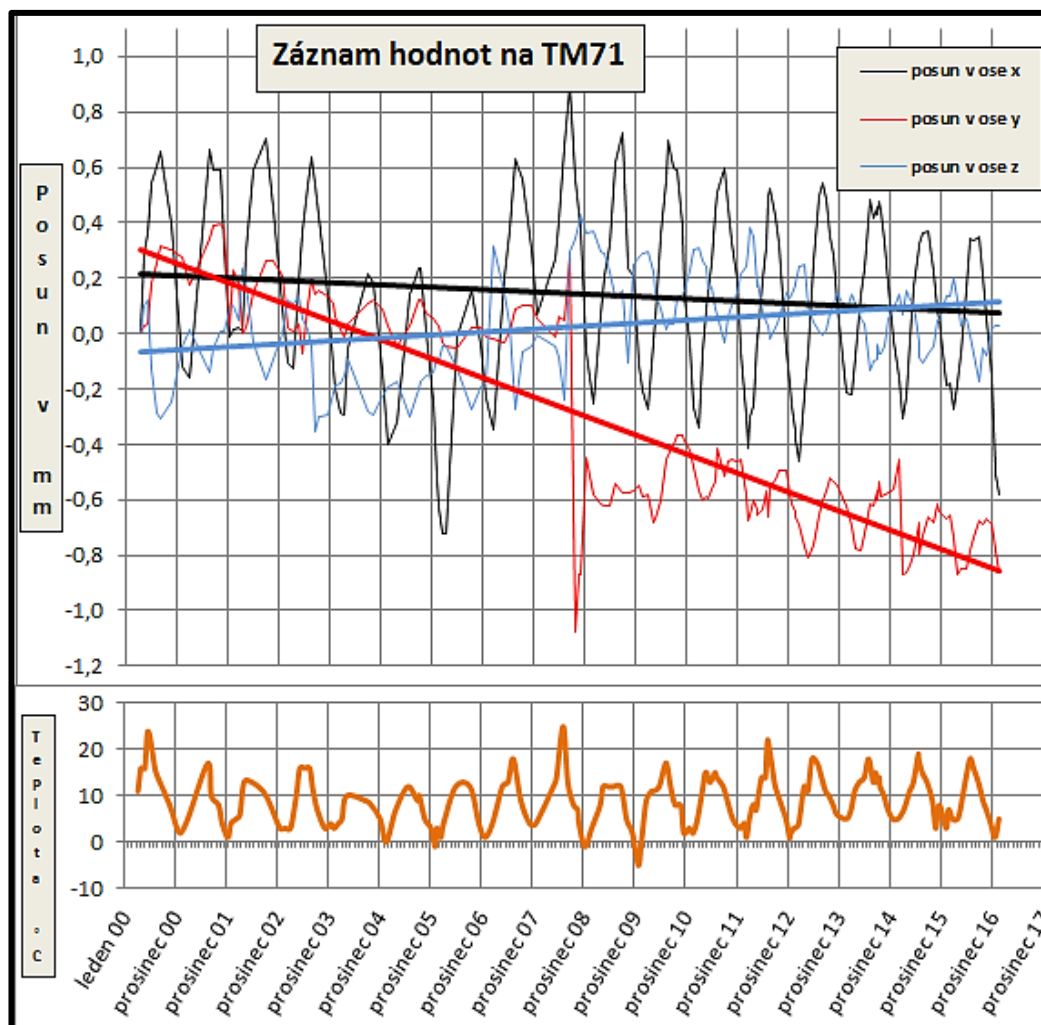
2.3.8 Pohyb na přístroji TM–71

Přístroj TM–71 je umístěn v puklině, ve které jsou také monitorovací body ručního dilatometrického měření č. 7, 8 a 9. Na všech těchto bodech včetně TM–71 je patrný vliv okolní teploty.

Při porovnání zaznamenaných pohybů na bodech č. 7, 8 a 9 s přístrojem TM–71 je vidět, že vývoj pohybů na těchto bodech je trochu jiný, než na přístroji TM–71, viz obr. č. 29. Přístroj TM–71 je vzhledem ke své konstrukci, na rozdíl od ručních dilatometrů, více náchylný na roztažnost vlivem změny okolní teploty. Proto je v grafu pohybu přístroje TM–71 patrná reakce zejména na změnu teplot, viz obr. č. 29 a pohyb masívu je díky tomu velmi obtížně detekovatelný, ačkoli určité trendy pozorovat lze.

Na základě pohybu podle osy y na přístroji TM–71, viz křivka trendu na obr. č. 29, lze usuzovat na velmi pomalý „klouzavý“ pohyb bloků vůči sobě. Náhlý posun na ose y zaznamenaný na konci roku 2008 si Stemberk et al. (2016) vysvětlují možným tektonickým pohybem, jelikož k výkyvu h.p.v. ve vrtech OL–1,2 nedošlo, stejně tak srážky (měsíční i roční) byly v tomto období nanejvýš průměrné a k teplotním výkyvům také nedošlo.

Křivka zaznamenaného pohybu na ose x téměř kopíruje teplotní výkyvy, viz Stemberk et al. (2016), kteří ve svém článku vyhodnocují pohyb až do konce roku 2014. Z křivky trendu viz obr. č. 29 je vidět zanedbatelný trend v postupném zmenšování trhliny.



Obrázek 29. Záznam z přístroje TM–71 a průběh okolní teploty; osy **x** a **y** kopírují zejména teplotní výkyvy; osa **z** (vertikální pohyb bloků) odpovídá výkyvům hladin ve vrtech OI–1,2; proložené křivky ukazují na dlouhodobé trendy ve vývoji pohybů na jednotlivých osách

Spojitost mezi vývojem hladiny podzemní vody ve vrtech na lokalitě a pohybem na přístroji TM–71 se prokázala pouze v souvislosti s vertikálním pohybem bloků (osa z), kdy s rostoucí hladinou bloky „stoupají“ a naopak. Tento pohyb je v rozsahu cca 0,4 mm, což odpovídá kolísání hladiny přibližně v rozsahu 1 m. Přesto lze z křivky trendu na obr. č. 29 vypočítat nepatrný výzdvih těchto bloků. Pohyby ve směru horizontálním jsou ve většině případů pouze reakcí přístroje TM–71 na teplotní změny, ačkoli při detailnějším zkoumání jsou patrné pohyby samotných bloků. Spojitost se srážkovými úhrny na lokalitě se neprokázala.

2.4 Souhrn a interpretace měření

Souhrnně lze říct, že na obou monitorovaných místech pohyby dále pokračují. Ačkoli se mohlo zdát, že po pádu části věže se její pohyb zastavil (viz kapitola 2.1), při detailním zkoumání je zřejmé, že pohyby pokračují. Pohyby na zkoumané skalní věži podle vyhodnocení téměř nesouvisí s výkyvy teplot ani se srážkovými úhrny. Spojitost s vývojem hladiny podzemní vody se dá předpokládat, ačkoli data z vrtů tomu přímo nenasvědčují. Nicméně vrty PŘ-1,2 nereagují zvýšením hladiny ani v obdobích zvýšených srážek, např. rok 2010 byl na podzim a v zimě bohatý na srážky.

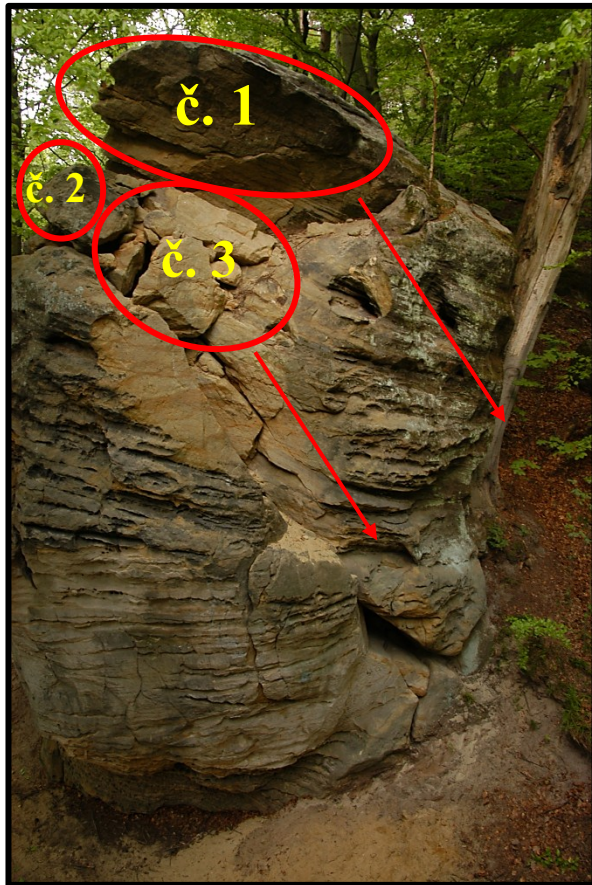
Křivka měřená na bodě č. 14 ukazuje velmi rychlé rozevírání od roku 1990 až do roku 2012, kdy došlo ke zřícení části věže. Poté se pohyby výrazně zpomalily. Část věže, která se v roce 2012 uvolnila, pravděpodobně vytvářela klínovitý efekt a rozevírání urychlovala. Uvolněný blok, který v puklině zůstal, zřejmě dále přispívá k rozevírání pukliny klínovitým efektem, ovšem tento vliv nejspíš není tak velký, jako u balvanu zříceného v roce 2012. V současné době se věž pohybuje pomalými rotačními pohyby, viz kap. 2.3.2 (horní část se vyklání a spodní uzavírá). Vzhledem k nedostatku množství měřících bodů v okolním terénu, nelze tvrdit, že se pohybuje plouživými pohyby po svahu směrem dolů, ačkoli je to pravděpodobné. Tento pohyb je dále ovlivněn vzájemnou interakcí jednotlivých částí věže a sousedního ukloněného bloku. V posledních dvou letech se rychlost pohybu nepatrně zvýšila. Ačkoli se jedná o pomalé pohyby, tak tyto přispívají k nestabilitě věže, která je dále podpořena zvětráváním, viz následující kapitoly. Hrozí zřícení další vrchní části věže (obr. 30–32) a pravděpodobnost zřícení se s rozevíráním a postupujícím zvětráváním zvyšuje.



Obrázek 30. Nestabilní blok č.1 na vrcholu věže; pohled ze severovýchodní strany



Obrázek 31. Nestabilní blok č. 1 (viz předchozí obrázek) a blok č. 2; pohled ze severní strany



Obrázek 32. Nestabilní bloky č. 1 a č. 2 (viz předchozí obrázek) a shluk bloků č. 3, které hrozí zřícením; červené šipky ukazují směr možného pádu; pohled z jihovýchodní strany

Měření v puklině na severní části Příhrazské vrchoviny se skládá z 3 monitorovacích bodů a přístroje TM-71. Zde naměřené pohyby se neshodují s pohybem naměřeným na sledované skalní věži a nelze je tedy spojovat. Pohyby 3 monitorovacích bodů jednoznačně souvisí s pohybem hladiny podzemní vody ve vrtech OI-1,2 a také jejich pohyby reagují na změnu teploty. Pohyb na přístroji TM-71 je též ovlivněn teplotou i kolísáním hladiny podzemní vody. Osy x, y kopírují svými pohyby změnu teploty a nesouvisí tedy přímo s jarním táním sněhu. S táním sněhu a sníženým výparem v zimním období souvisí naopak pohyb osy z, tento pohyb pravidelně začíná na podzim a polaritu obrací přibližně začátkem jara. Tento pohyb je pravděpodobně způsoben bobtnáním smektitu v podložních vrstvách a jeho smršťováním při vysoušení. Do budoucna by mohlo dojít ke zrychlení těchto pohybů při extrémních srážkách, zejména v období zimních měsíců.

2.5 Příčiny a možné spouštěcí faktory

Stemberk et al. (2016) se snažili vysvětlit příčinu a možné spouštěcí faktory naměřených pohybů na lokalitě Mužský. V České republice bývají hlavním impulsem pro počátek svahových pohybů nadprůměrné srážky a s tím související kolísání hladiny podzemní vody. Dále pomocí monitorovací sítě EU TecNet zkoumali možný vliv tektonických procesů a s tím související výskyt zemětřesení v lokalitách, které by mohly potenciálně studovanou oblast ovlivňovat.

Od roku 1990, kdy bylo zahájeno měření, bylo na lokalitě Mužský zaznamenáno několik extrémních srážkových úhrnů. Průměrný roční srážkový úhrn na lokalitě za posledních 30 let je 687 mm. Největší srážkové úhrny nad tento průměr (o více než 200 mm) byly zaznamenány v letech 2001, 2002 a 2010. Další významné roky, kdy došlo k překročení ročního průměru o více, než 65 mm jsou roky 1993, 2007 a 2013.

Stemberk et al. (2016) vyzorovali, že k pohybům na skalní věži došlo jak v období nadprůměrných srážek, tak v období podprůměrných srážkových úhrnů. Podle Stemberka et al. (2016) spojení mezi zrychlením pohybů a nadprůměrnými srážkami existuje v letech 1993, 2002 a 2010. Zajímavé je naměření pohybu během velmi suchého roku 1997 se srážkovým úhrnem 100 mm pod roční průměr.

Stemberk a Zvelebil (1999) se přiklání k názoru, že k plastickým deformacím v podloží dochází zejména vlivem změn hydrogeologického režimu dané oblasti, který byl ovlivněn změnou zemědělského využití infiltrační části vrchoviny. V této infiltrační části byl drnový kryt nahrazen ornou půdou, což vedlo přibližně ke 2–3 násobnému zvýšení infiltrace a následnému zhoršení geomechanických parametrů na kontaktu plastického podloží a pískovce.

Jako další mechanismus, který mohl mít vliv na rozvoj svahových deformací v lokalitě Mužský, byla Stemberkem et al. (2016) uvažována seismická aktivita a tektonická činnost. Vliv seismické aktivity byl na základě měření s největší pravděpodobností vyloučen, zatímco vliv tektoniky je na základě dat z monitorovací sítě EU TecNet v některých případech možný. Např. od dubna

1997 do listopadu 1997 a od října 2005 do dubna 2006 byly posuny zaznamenány i na jiných místech střední a jihovýchodní Evropy. Je tedy pravděpodobné, že svahové deformace na Mužském jsou ovlivněny jak srážkami, tak tektonikou. Tyto dva systémy se s největší pravděpodobností vzájemně doplňují.

Názor autora na pohyby zaznamenané na bodech č. 4 a č. 14 ke konci roku 2016 je takový, že mohou být také tektonického původu. Stejně tak náhlý posun ke konci roku 2008 na přístroji TM–71. Autor si nemyslí, že srážky mají zásadní vliv na pohyby skalní věže. Srážky velmi přispívají ke zvětrávání a ztrátě stability (viz další kapitoly) a v ostatních případech se pravděpodobně jedná hlavně o kontinuální plouživé pohyby v kombinaci se zvětráváním.

2.6 Stabilita věže

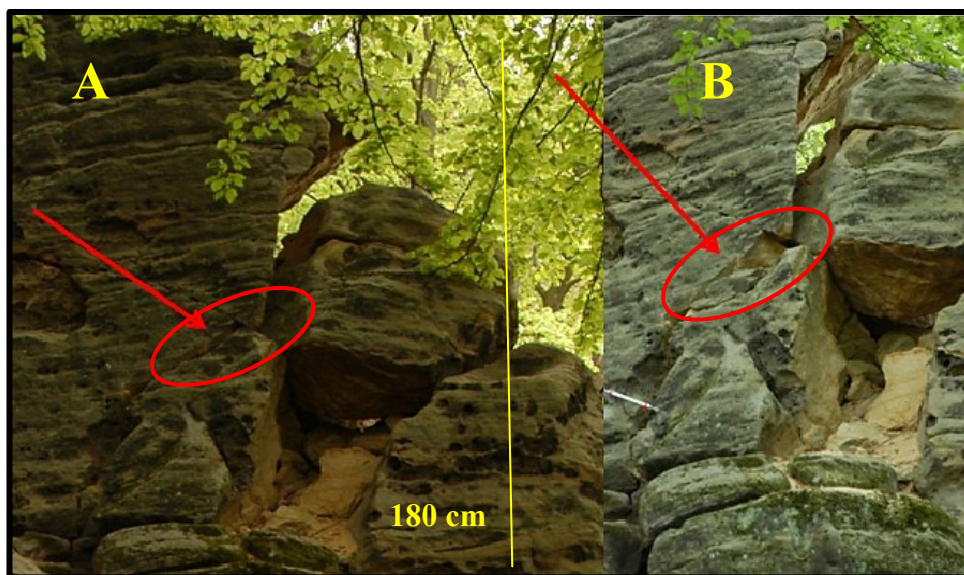
Z předchozích kapitol vyplývá, že těleso skalní věže je velmi nestabilní. V horní části věže došlo při prvotním porušení v roce 1990 k uvolnění bloku, který se v roce 2012 zřítíl. Autorova hypotéza je taková, že tento uvolněný blok mohl působit jako klínovitá rozpěra (obr. 33) v puklině a výrazně rozevírání pukliny urychlovat. Blok, který je v puklině dnes, může také působit jako klín, nicméně jeho vliv na rozevírání, vzhledem k jeho menším rozměrům oproti původnímu bloku, bude výrazně menší než v předchozím případě.



Obrázek 33. Klínovité působení bloku zříceného v roce 2012, pohled na věž z jižní strany (Rybář, Stemberk, Hartvích 2005)

V horní části věže hrozí zřícení dvou uvolněných bloků (č. 1 a č. 2) a celé řady menších kamenů (č. 3) viz obr. č. 30–32. Blok č. 1 má objem přibližně 5m^3 , blok č. 2 cca 1m^3 . Všechny tyto části podléhají velmi intenzivnímu zvětrávání a tím, jak je z nich odplavován materiál a zároveň se puklina rozevívá, se pomalu pohybují. Předpověď přesného, nebo jen přibližného času jejich uvolnění je pomocí současného měření téměř nemožná. V případě jejich úplného zvětrání na formu písku, nemusí teoreticky ke zřícení menších bloků nikdy dojít. Existuje předpoklad, že pokud dojde k odpadnutí příp. úplnému zvětrání shluku menších kamenů č. 3, je velmi vysoká pravděpodobnost zřícení bloku č. 2, který je shlukem kamenů č. 3 podepřen. Jako velmi nestabilní se jeví poloha bloku č. 1, který je částečně držen bloky č. 2 a shlukem kamenů č. 3. Ačkoli to bude velmi obtížné, bylo by vhodné, pokud to okolnosti dovolí, přidat další dilatometrické měření na puklině ohraničující blok č. 1 pro ověření pohybů tohoto bloku.

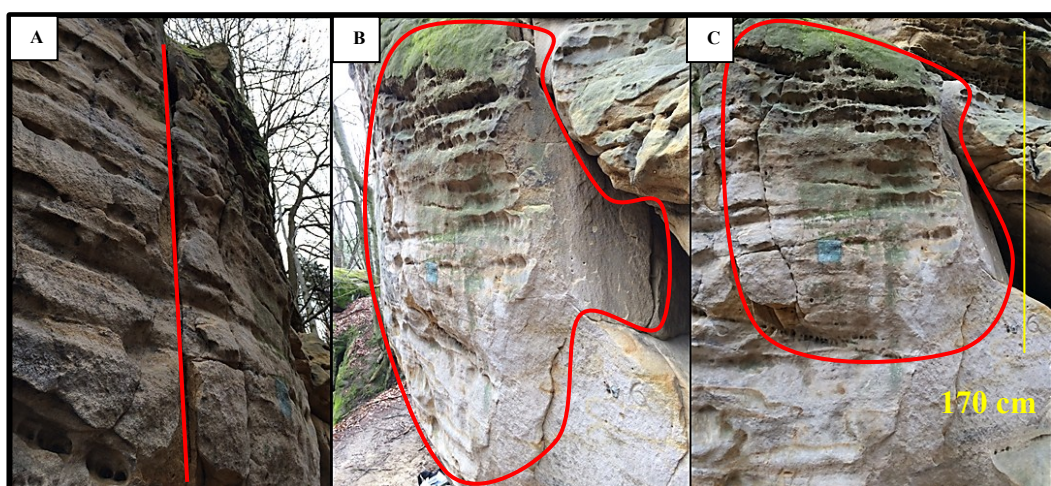
Nestabilitu a aktivní pohyby v horní části věže dokazuje porovnání fotek z dubna 2015 a srpna 2015. V tomto období došlo k odpadnutí části bloku mezi měřicím bodem č. 1 a automatickým extenzometrem. Porovnání nabízí obr. č. 34. Na bodě č. 1 a č. 3 byl v tomto období zaznamenán posun o 0,7 mm resp. o 0,4 mm.



Obrázek 34. Porovnání stavu pukliny v dubnu (A) a srpnu (B) 2015; pohled ze severní strany

Další nebezpečí představuje blok na jihovýchodní straně věže, viz obr. č. 35. Tento blok je součástí svislé stěny. Jeho šířka je cca 150 cm, výška přibližně 170 cm a hloubka v rozmezí 30–100 cm. Objem je tedy přibližně 0,8–2,5 m³. Tomuto bloku nebyla nejprve věnována pozornost, nicméně postupem času bylo pozorováno jeho pozvolné opadávání. Blok se nachází přímo nad turistickou stezkou a představuje nebezpečí pro okolo chodící turisty. Ačkoli je cesta oficiálně zavřená a neznačená, turisté zde stále chodí. Monitoring tohoto bloku by byl technicky komplikovaný, k rozevírání pukliny nedochází, spíše se jen zvětšuje směrem do hloubky. Blok se může zřítit jako celek nebo odpadávat po menších kusech s výrazně nižší mírou rizika pro okolí.

Věž obsahuje celou řadu nestabilních bloků a menších opadávajících kamenů, jejichž trajektorie většinou směřuje na stezku pod věží a představují tak riziko pro okolí. Stezka, na které se věž nachází, není oficiálně otevřena, přesto turistům nic nebrání pod touto věží volně procházet a zejména místní zde často chodí. Bylo by vhodné toto místo označit informační tabulkou s varováním.



Obrázek 35. Blok na JZ straně věže hrozící v budoucnu zřícením; A – pohled od severozápadu; pohled od jihozápadu; C – pohled od západu

V kapitole 2.1 jsou zmíněny dvě hypotézy vzniku porušení (přirozené zvětrávání + kořeny buku; hluboce založené pohyby). Autor dospěl k závěru, že vliv kořenů blízkého buku je velmi nepravděpodobný. Strom byl pokácen a pohyby dále pokračují. Primární prasknutí v roce 1990 bylo způsobeno obnovením hluboce založených plouživých sesuvných pohybů ve svahu. Tímto prasknutím došlo k odkrytí méně odolných pískovcových vrstev, bez vyvinuté skalní kůry. Tato nechráněná a méně odolná místa umožnila významnou infiltraci vody do tělesa věže a v kombinaci s mrazovým zvětráním intenzivní porušování materiálu, viz následující kapitoly. Tento materiál je odnášen srážkovou vodou a vyplavován do okolí, kde je snadno pozorovatelný.

3 Měření ve vrtech

Aktivní svahové pohyby byly také nepřímo indikovány měřením ve vrtech PŘ-1 a PŘ-2. Během opakovaného geofyzikálního měření pomocí seismické tomografie byly ve vrtu PŘ-1 registrovány seismické jevy, které byly pravděpodobně mikro otřesy přirozeného původu, jejichž zdroj byl v hloubce 25 až 30 m (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006). Otřesy byly vyhodnoceny jako doprovodný jev porušujících se pískovcových vrstev, ukazujících na vznik trhlin v masivu (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006).

Ještě před zhotovením vrtu PŘ-1 provedl Votoček (2001) v blízkosti jeho budoucí předpokládané polohy soubor geofyzikálních měření, která ukázala na velmi výraznou anizotropii masivu, a byly ověřeny dva navzájem kolmé směry usměrnění puklinových systémů. Procházka (2001) provedl v tomto vrtu karotážní měření a byly detekovány tři zóny vážného porušení. Jedná se o dvě otevřené pukliny v hloubkách 14–14,5 m a 31,5–32,5 m a poruchové pásmo na bázi pískovců v hloubce 104–109,3 m. Toto poruchové pásmo ve spodní části vrtu, kde dochází ke střídání čistých pískovců, jílovitých pískovců a slinitých jílovců, může mít význam z hlediska dlouhodobých posunů horninových bloků.

Ve stejném roce provedl Beneš (2001) seismický průzkum s cílem zmapovat pukliny v okolí vrtu PŘ-1. Výsledkem bylo určení četných puklin ve směru JZ – SV a to zejména v hloubkách 25–33 m, 49–59 m, 77–99 m a 106–110 m. Tyto výsledky též dokazují výskyt otevřených trhlin i pravděpodobný pohyb horninových bloků podél těchto poruchových zón. Příčinou vzniku těchto trhlin mohou být blokové pohyby, anebo mohou trhliny vznikat koncentrovaným proudem podzemní vody, který vzniká v důsledku vyššího vsaku a vymývá méně odolné horizontální polohy pískovce. Ve vrtu PŘ-2 byla zaznamenána zdánlivě nevysvětlitelná oscilace hladiny podzemní vody, která je ovšem interpretována jako důsledek střídajícího se otevírání a zavírání puklin, což lze považovat za nepřímý důkaz aktivních pohybů (Rybář, Stemberk, Hartvich 2006).

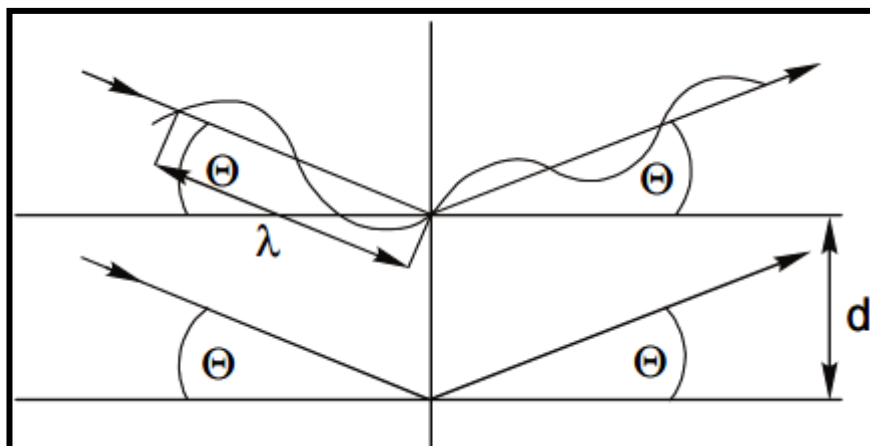
4 Objasnění náchylnosti skalní věže ke zhoršeným stabilitním poměrům

V předcházejících kapitolách byly detailně popsány příčiny a důsledky pohybů skalní věže. Nicméně nebyly vysvětleny příčiny velmi rychlého povrchového zvětrávání a porušování věže. Proto byla snaha autora tyto procesy lépe vysvětlit a objasnit. Byla provedena celá řada zkoušek pro pochopení pohybů skalní věže a příčiny její zhoršené stabilitní situace.

4.1 Rentgenová difrakce - prášková

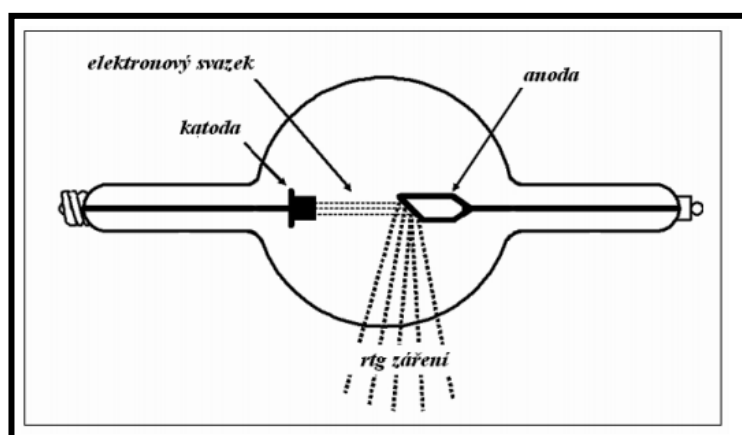
Prášková difrakce je nejpoužívanější metoda k identifikaci minerálů. V této diplomové práci byla provedena za účelem porovnání pískovce ze zkoumané skalní věže a pískovcových skal z okolních míst v rámci dané lokality. Pískovce mohou v některých polohách obsahovat jílovitý tmel, který zhoršuje jejich odolnost vůči zvětrávání. Cílem rentgenové difrakční analýzy bylo objasnit vyšší náchylnost skalní věže na zvětrávání v důsledku výskytu těchto anomálií v mineralogickém složení. Difrakce byla realizována na půdě Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze, kde mají studenti možnost přístupu k práškovému difraktometru Philips s vertikálním goniometrem.

Metoda rentgenové difrakce byla objevena v roce 1912 Maxem Launem a je založena na odrazu rentgenových paprsků od krystalové mřížky (Dolníček, Sulovský 2005). Rentgenové záření má vlnovou délku 10^{-8} m až 10^{-12} m (Martykánová, Navrátil 2007). Základní rovnicí pro tuto metodu je Braggova interferenční rovnice $n\lambda = 2d\sin\theta$, kde λ je konstanta, θ je úhel dopadu rentgenových paprsků na rovinu krystalové mřížky a d je vzdálenost 2 rovin krystalové mřížky, od kterých se paprsek odrazil, viz obr. č. 36 (Pospíšilová 2008). K difrakci může dojít jen při splnění Braggovy rovnice (Dolníček, Sulovský 2005).



Obrázek 36. Odvození Braggovy rovnice (Dolníček, Sulovský 2005)

Zdrojem záření je rentgenka, viz obr. č. 37. Je to skleněná trubice, uvnitř které jsou dvě elektrody. Mezi těmito elektrodami je rozdíl napětí až 60 kV. Z katody vyletují elektrony, které jsou urychlovány rodílem napětí mezi elektrodami a následně dopadají na anodu, kde se až 99 % jejich kinetické energie přemění na teplo (Hanno zur Loye 2013; Dolníček, Sulovský 2005). Pro analýzu v tomto případě byla použita anoda z kobaltového kovu, ale využívají se i měděné, molybdenové a další (Hanno zur Loye 2013; Pospíšilová 2008). Zbytek nepřeměněné energie se vrátí jako rentgenové záření, které je detekováno pomocí polovodičových detektorů (Dolníček, Sulovský 2005). Detektor se během měření pohybuje po půlkrohoové trajektorii a detekuje rentgenové záření při různých úhlech. V našem případě byl úhlový krok měření $0,05^\circ$ pro úhlový rozsah $2\theta = 4^\circ - 70^\circ$ s dobou expozice 4 s. Měření je zaznamenáno počítačem.

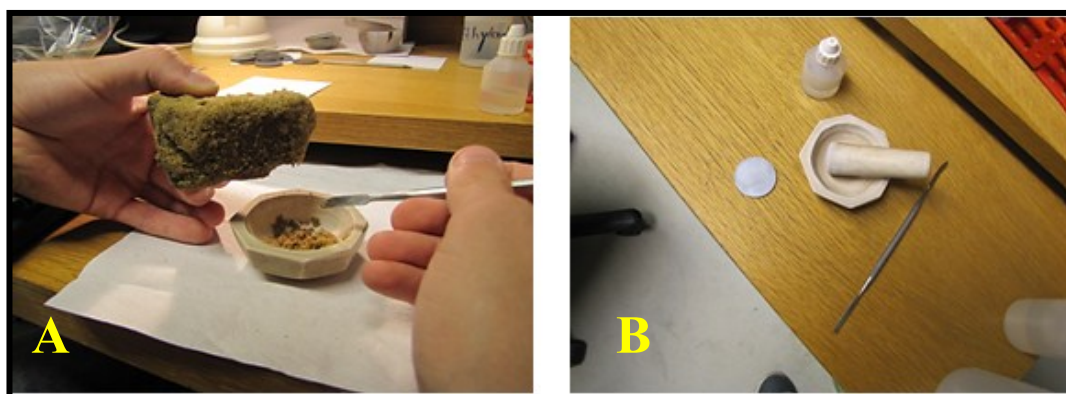


Obrázek 37. Schéma rentgenky (Martykánová, Navrátil 2007)

Kvantitativní analýza poskytuje informace o množství jednotlivých minerálů ve vzorku. Hodnotí se intenzita specifická pro daný minerál. Chyba může dosáhnout až 10 %.

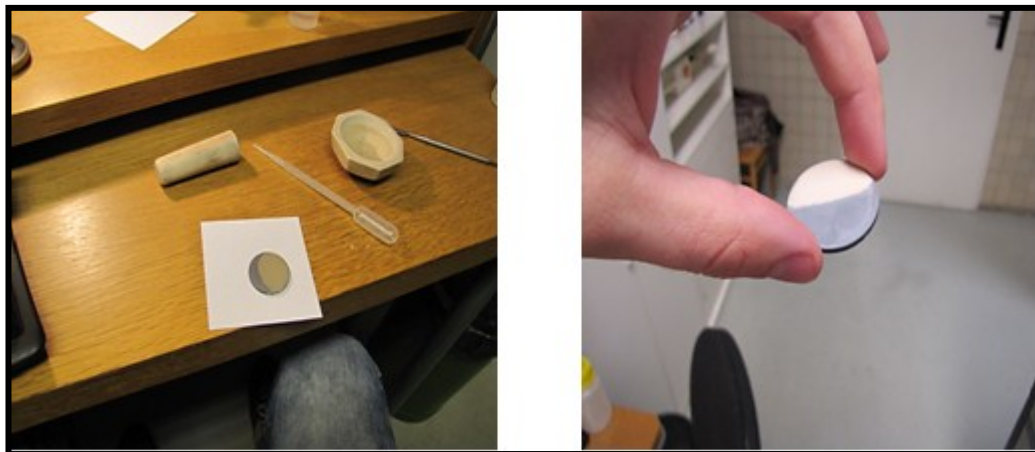
4.1.2 Příprava vzorku

Ze vzorku pískovce je nejdříve připraven jemný prášek ručním třením v misce pomocí paličky viz obr. č. 39. Při tření vzniká vysoká teplota, která může způsobit fázové změny, proto je nutné do misky během tření přidávat aceton (nebo líh) jako chladicí médium.

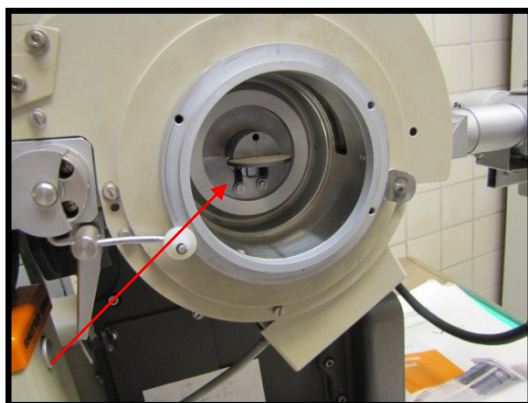


Obrázek 39. A - příprava vzorku; B – třecí miska s křemíkovou destičkou

V dalším kroku se rozemletý vzorek smíchaný s acetonem nasaje z misky pipetou a přenese na křemíkovou destičku (nosič), viz obr. č. 40. Následně se nechá odpařit aceton, aby vzorek na křemíkové destičce byl suchý. Poté se destička vloží do rentgenového přístroje a spustí se proces měření (obr. 41).



Obrázek 40. Rozemletý a vysušený vzorek na křemíkovém nosiči



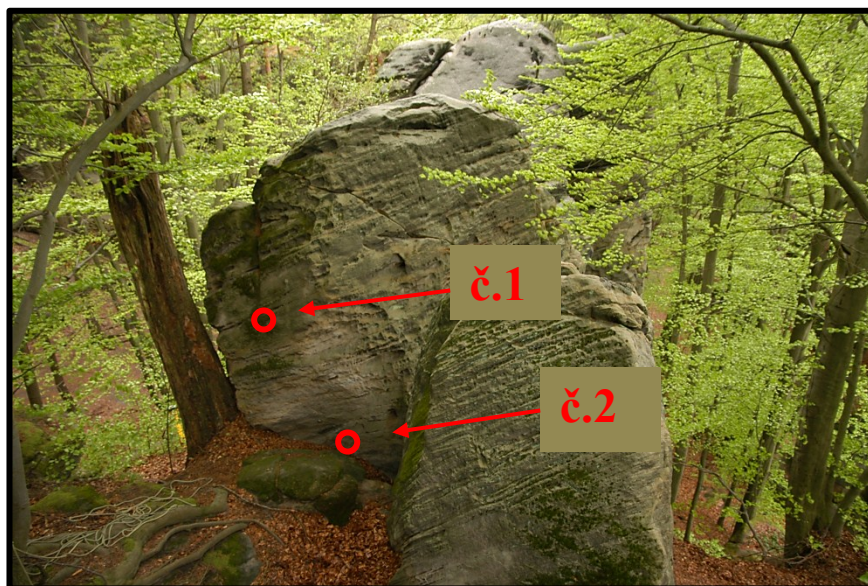
Obrázek 41. Křemíkový nosič se vzorkem v rentgenovém přístroji

4.1.3 Výsledky analýzy a hypotézy

Zkoumaný pískovcový útvar (pískovcová věž) je ve svém okolí obklopen několika podobnými útvary. Okolní pískovcové útvary však nepodléhají procesům zvětrávání tak intenzivně, jako zkoumaná věž. Cílem bylo ověřit mineralogické složení pískovců na lokalitě a případně potvrdit hypotézu, že vyšší intenzita zvětrávání je dána rozdílným mineralogickým složením zkoumaného útvaru oproti okolním útvarům.

Autor odebral jeden vzorek z pískovce vzdáleného přibližně 400 m od skalní věže. Čtyři vzorky byly odebrány ze zkoumané skalní věže (viz obr. č. 42–44) – dva z povrchu věže, jeden z pukliny ve sledované skalní věži a jeden z odvrtného otvoru, aby bylo ověřeno mineralogické složení na povrchu i uvnitř věže. Tyto vzorky byly připraveny pro rentgenovou (dále jen RTG) difrakci, viz kapitola 4.1. Vzorky z pukliny a z odvrtného otvoru byly kromě standartní

přípravy pro RTG difrakci ještě 24 hodin syceny ethanolom z důvodu prokázání hypotézy, že pískovec zkoumané věže obsahuje větší množství jílového minerálu náchylného na bobtnání, čímž by mohl způsobovat rozpad věže. Po provedení RTG difrakce byly vzorky analyzovány v programu High score plus.



Obrázek 42. Body odběru vzorků pro RTG; bod č. 1 = vzorek z povrchu; bod č. 2 = vzorek z odvrtného otvoru, pohled na věž ze severovýchodní strany



Obrázek 43. Bod odběru vzorku pro RTG; bod č. 3 = vzorek z pukliny; pohled na věž ze severní strany



Obrázek 44. Bod odběru vzorku pro RTG; bod č. 4 = vzorek z povrchu; pohled na věž ze západní strany

Vyhodnocení v programu High score plus bylo prováděno na základě výškové (semikvantitativní) i integrální (Rietveldovy) intenzity jednotlivých „peaků“. Program nabízí seznam možných minerálů, které mohou být správným řešením pro konkrétní analyzovaný vzorek. Tento seznam je řazen dle míry shody referenčních a naměřených hodnot pro daný minerál. Důležité je správné subjektivní vyhodnocení získaných dat.

Semikvantitativní analýza je v tomto případě méně přesná, výsledné hodnoty jsou jen málo pravděpodobné. Proto autor přistoupil k uvedení pouze výsledků z Rietveldovy analýzy, které jsou realističtější, viz tab. č. 2–6. Podle Rietveldovy analýzy je ve vzorcích jen minimální nebo nulový obsah montmorillonitu. To bylo ověřeno porovnáním se vzorkem nasyceným ethanolem. Pokud by se jednalo o montmorillonit, byl by difraktogram vzorku nasyceného ethanolem oproti nenasycenému vzorku posunutý vlevo (Černíková, Přf UK, ústní sděl.) Na obrázku č. 45 je vidět, že oba difraktogramy se téměř překrývají. Výsledek analýzy tedy nepotvrdil hypotézu o výskytu bobtnavého montmorillonitu, nelze ji však naprosto vyvrátit. V přiblížení obou překrývajících se difraktogramů lze v některých úsecích drobné posunutí vlevo pozorovat. Tyto drobné posuny mohou na obsah montmorillonitu ukazovat, s jistotou to ale

konstatovat nelze. Montmorillonit může být v rámci tmelu vyplňujícího prostor mezi zrny amorfní a pomocí RTG difrakce není možné tyto amorfní struktury bezpečně rozpoznat.

Na základě rozboru pískovce v lomu Střeleč (Bruthans et al. 2012a) byl ve vzorcích hledán také obsah illitu a kaolinitu. V lomu Střeleč byl při síťovém rozboru zjištěn 1,6% obsah zrn menších než 25 μm a z tohoto obsahu tvořil kaolinit 75 % a illit 1 %. Přítomnost kaolinitu nebyla v pískovci v lokalitě Mužský zjištěna. Vzhledem k tomu, že na lokalitě Mužský byl při síťovém rozboru zjištěn obsah jemnozrné frakce ($< 0,063 \text{ mm}$) pouze 0,48 %, je možné, že množství bylo příliš nízké, aby se ho podařilo detekovat.

Na rozdíl od kaolinitu byla prokázána přítomnost illitu, zejména ve vzorcích z povrchu skalní věže. Tento jílovitý minerál je pravděpodobně z největší části zachycován vlákny biologické krusty na povrchu při proudění větru, viz další kapitoly.

Nejvyšší obsah křemenných zrn byl nalezen v nejbližším pískovci a v pískovci odebraném z pukliny ve věži. Oba tyto pískovce mají nízký obsah jílovitých minerálů, což ukazuje na nízké zvětrání. Naopak nejnižší obsah křemenných zrn byl nalezen ve vzorcích odebraných z povrchu skalní věže a zároveň zde byl nalezen vysoký obsah jílovitých minerálů.

Rozbor dále ukázal na poměrně vysoký obsah živce (anortitu). Obsah tohoto minerálu se pohybuje ve všech vzorcích do 7 %, pouze v jednom vzorku z odvrtného prostoru byl detekován velmi vysoký obsah tohoto minerálu (36 %). Toto číslo se nezdá být pravděpodobné a autor nevyklučuje, že v případě toho vzorku mohlo dojít k chybě. Celá analýza je subjektivní proces, a proto je třeba brát získané výsledky spíše jako přibližné hodnoty.

Bruthans et al. (2014) rozděluje cementované pískovce do 3 základních kategorií. Na základě RTG analýzy lze tento typ pískovce zařadit mezi čistě křemenné pískovce s minimem nekřemenných zrn a nízkým obsahem jílu. Vzhledem k tomu, že pískovec na věži lze na některých místech drolit třením dlaně, lze předpokládat, že existují polohy, kde je díky procesům zvětrávání odplavována cementace a zrna zde drží při sobě jen díky kapilární kohezi, elektrochemické kohezi a uzamčení zrn viz kapitola 4. 2.

Vzorek z nejvzdálenějšího pískovce	minerál	výsledek Rietveldovi analýzy – obsah [%]
	křemen	89
	montmorillonit (skup. smektitu)	2
	nontronit (skup. smektitu)	0
	illit (skup. illitu)	1
	vermikulit (skup. vermikulitu)	4
	anortit	4

Tabulka 2. Vzorek z nejvzdálenějšího pískovce

Vzorek z povrchu věže	minerál	výsledek Rietveldovi analýzy – obsah [%]
	křemen	29
	montmorillonit (skup. smektitu)	0
	nontronit (skup. smektitu)	10
	illit (skup. illitu)	36
	vermikulit (skup. vermikulitu)	18
anortit	7	

Tabulka 3. Vzorek z povrchu věže

Vzorek z odvrtaného otvoru ve věži	minerál	výsledek Rietveldovi analýzy – obsah [%]
	křemen	48
	montmorillonit (skup. smektitu)	1
	nontronit (skup. smektitu)	0
	illit (skup. illitu)	1
	vermikulit (skup. vermikulitu)	16
anortit	34	

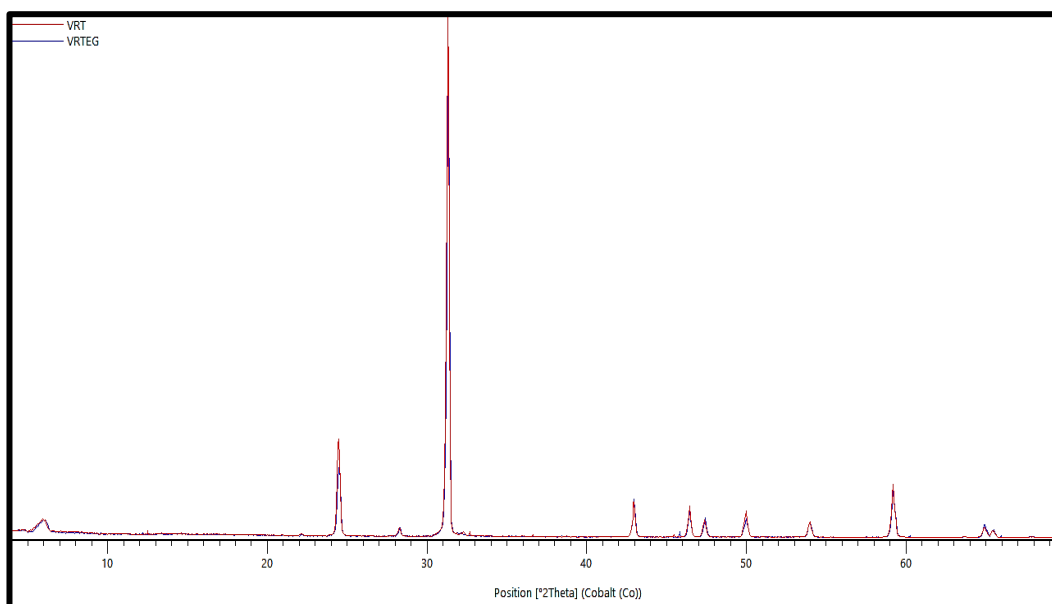
Tabulka 4. Vzorek z odvrtaného otvoru ve věži

	minerál	výsledek Rietveldovi analýzy – obsah [%]
Vzorek z pukliny ve věži	křemen	86
	montmorillonit (skup. smektitu)	1
	nontronit (skup. smektitu)	0
	illit (skup. illitu)	0
	vermikulit (skup. vermikulitu)	8
	anortit	5

Tabulka 5. Vzorek z pukliny ve věži

	minerál	výsledek Rietveldovi analýzy – obsah [%]
Vzorek skalní kůry	křemen	25
	montmorillonit (skup. smektitu)	2
	nontronit (skup. smektitu)	1
	illit (skup. illitu)	67
	vermikulit (skup. vermikulitu)	2
	anortit	3

Tabulka 6. Vzorek z pukliny ve věži



Obrázek 45. Porovnání difraktogramu vzorku syceného ethanolem a standardního vzorku

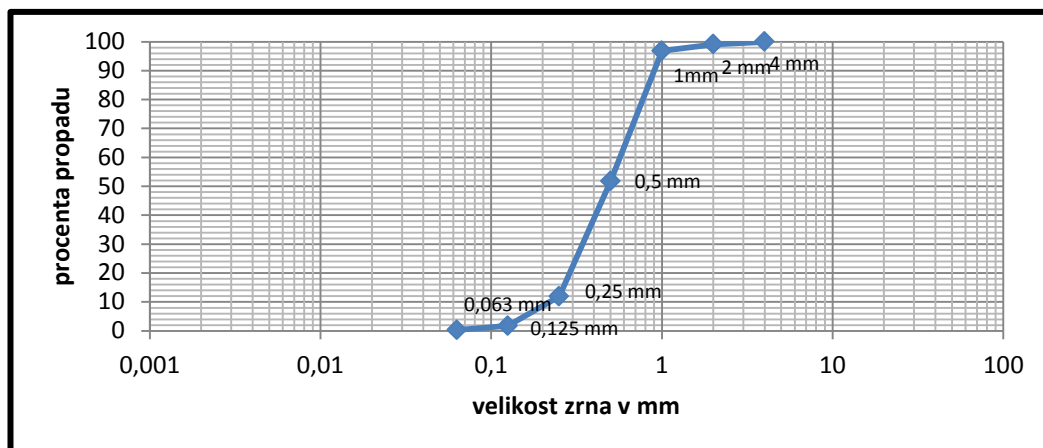
4.2 Zrnitostní zkouška

Pro stanovení zrnitosti pískovce byla provedena zrnitostní zkouška v laboratoři mechaniky zemin. Pro tuto zkoušku byl odebrán malý pískovcový blok nepravidelného tvaru o celkovém objemu přibližně 8 dm³. Jednalo se o volný balvan v puklině tak, aby se nemusel velký kus odebírat přímo ze skály a nedocházelo k jejímu zbytečnému porušování. Pískovec lze velmi snadno rozdrobit v dlani na jednotlivá zrna. Pro porovnání byly zvoleny dva způsoby stanovení zrnitosti. Prvním bylo pouze prosévání přes síta a druhým prosévání v kombinaci s promýváním. Pro obě varianty byla zvolena shodná velikost sít: 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm a 0,063 mm. Prosévání je vhodné pro čisté písky a šterky, zatímco prosévání v kombinaci s promýváním se používá pro stanovení zrnitosti písků a šterků obsahujících v malém množství (do 5%) jílové a prachové částice přilepené na hrubší zrna.

Z výsledků laboratorních zkoušek je pozorovatelné, že obě zrnitostní křivky jsou velmi podobné, viz obr. č. 46 a č. 47. Z křivek je patrné, že pískovec se skládá převážně z písku hrubé až střední zrnitosti (2 mm–0,2 mm). Obsah částic větších než 2 mm lze považovat za zanedbatelný. Obsah jemnozrné frakce do průměru 0,063 mm tvoří maximálně 0,48 % hmotnostního podílu. Při porovnání s výsledky síťových zkoušek pískovce z nedalekého lomu Střeleč (Bruthans et al. 2012a), je to přibližně 3× méně.

Prosévání	Velikost otvoru (mm)	Nadsítné (g)	celkové podsítné (g)	Hmotnostní podíl (%) menších než daný otvor
	4	0	452,28	100
	2	4,04	448,01	99,11
	1	10,34	437,44	96,82
	0,5	203,93	233,01	51,73
	0,25	180,2	52,71	11,89
	0,125	50,11	2,48	1,70
	0,063	2,38	0,02	0,28
	Podsítné	0,01		
	Součet	451,01		

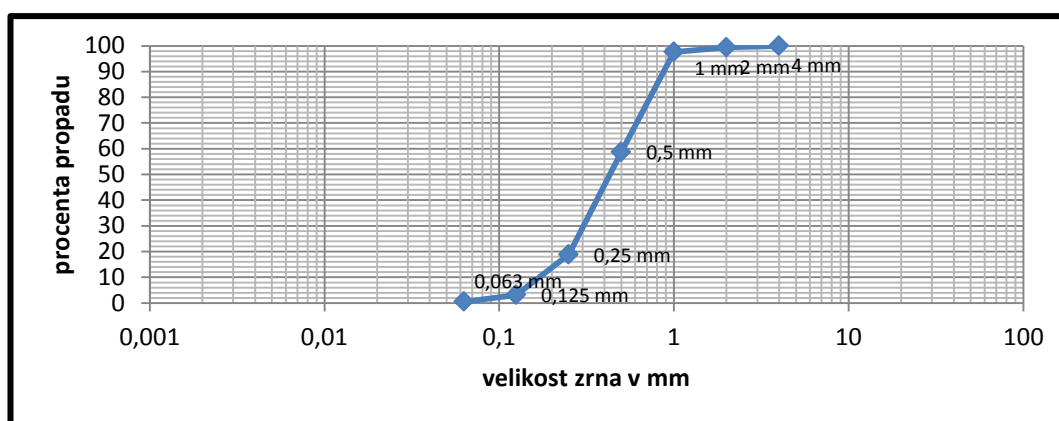
Tabulka 7. Výsledky prosévání bez promytí



Obrázek 46. Zrnitostní křivka při prosévání bez promytí

Prosévání + promývání	Velikost otvoru (mm)	Nadsítné (g)	celkové podsítné (g)	Hmotnostní podíl (%) menších než daný otvor
	4	0,16	323,72	100
	2	1,96	321,66	99,39
	1	5,84	315,67	97,59
	0,5	125,88	189,39	58,71
	0,25	128,96	60,04	18,87
	0,125	53,02	6,95	3,10
	0,063	6,49	0,46	0,48
	Podsítné	0,46		
	Součet	322,77		

Tabulka 8. Výsledky prosévání s promytím



Obrázek 47. Zrnitostní křivka při prosévání s promytím

4.3 Povrchové zvětrávání a eroze materiálu skalní věže

Zkoumaná skalní věž vykazuje oproti okolním pískovcovým objektům zvýšenou náchylnost k rychlému zvětrávání. Je otázkou, proč je v okolí tolik stabilních objektů rozmanitých tvarů stejného mineralogického složení a neprojevují se na nich žádné nebo jen minimální známky zvětrávání, což lze dokázat různými rytinami v pískovcových površích (obr. 48) vytvořenými nezodpovědnými turisty. V následujících kapitolách bude cílem alespoň částečně objasnit příčinu zvýšené náchylnosti ke zvětrávání. Je předpoklad, že mrazové, případně solné zvětrávání má zásadní vliv na rozpad skalní věže. Nicméně tyto faktory pravděpodobně působí stejnou intenzitou na všechny okolní pískovcové útvary, proto je třeba najít další ovlivňující faktory.



Obrázek 48. Povrch pískovce poškozený turisty

Podobný případ řešili Bruthans et al. (2012b) na arkózovo–slepencovém převisu Čertova kazatelna v Plzni, který extrémně rychle zvětrává s rychlostí ústupu převisu přibližně 40 mm/rok. Zároveň prokázali, že okolní skály jsou velmi odolné a erozi prakticky nepodléhají. Příčinou zde byl zejména lidský faktor, kdy docházelo k průsakům odpadní vody, která způsobuje sycení masívu

vodou. Tato voda v zimních měsících mrzne, led pískovec roztrhá a při tání tento rozvolněný materiál opadá. Dalším činitelem způsobujícím rozvolňování jsou krystalizující soli.

Jiným případem, který řešili Bruthans et al. (2012a, 2014) byla velmi nízká odolnost sklářského pískovce v lomu Střeleč. Jedná se o necementovaný pískovec, který je za nasyceného stavu velmi málo odolný a lze ho těžít vodním paprskem, ale zároveň v suchém stavu je potřeba pro jeho rozpojování použít trhavinu. Zrna tohoto pískovce při sobě drží jen díky vzájemnému zaklesnutí zrn do sebe (tzv. uzamčené písky). Podle Bruthanse et al. (2014) existuje předpoklad, že většina pískovců má určitý stupeň uzamčení zrn a bude tomu tak pravděpodobně i v lokalitě Mužský. Tyto články (Bruthans et al. 2012, 2014) byly inspirací pro provedení série zkoušek v dalších kapitolách.

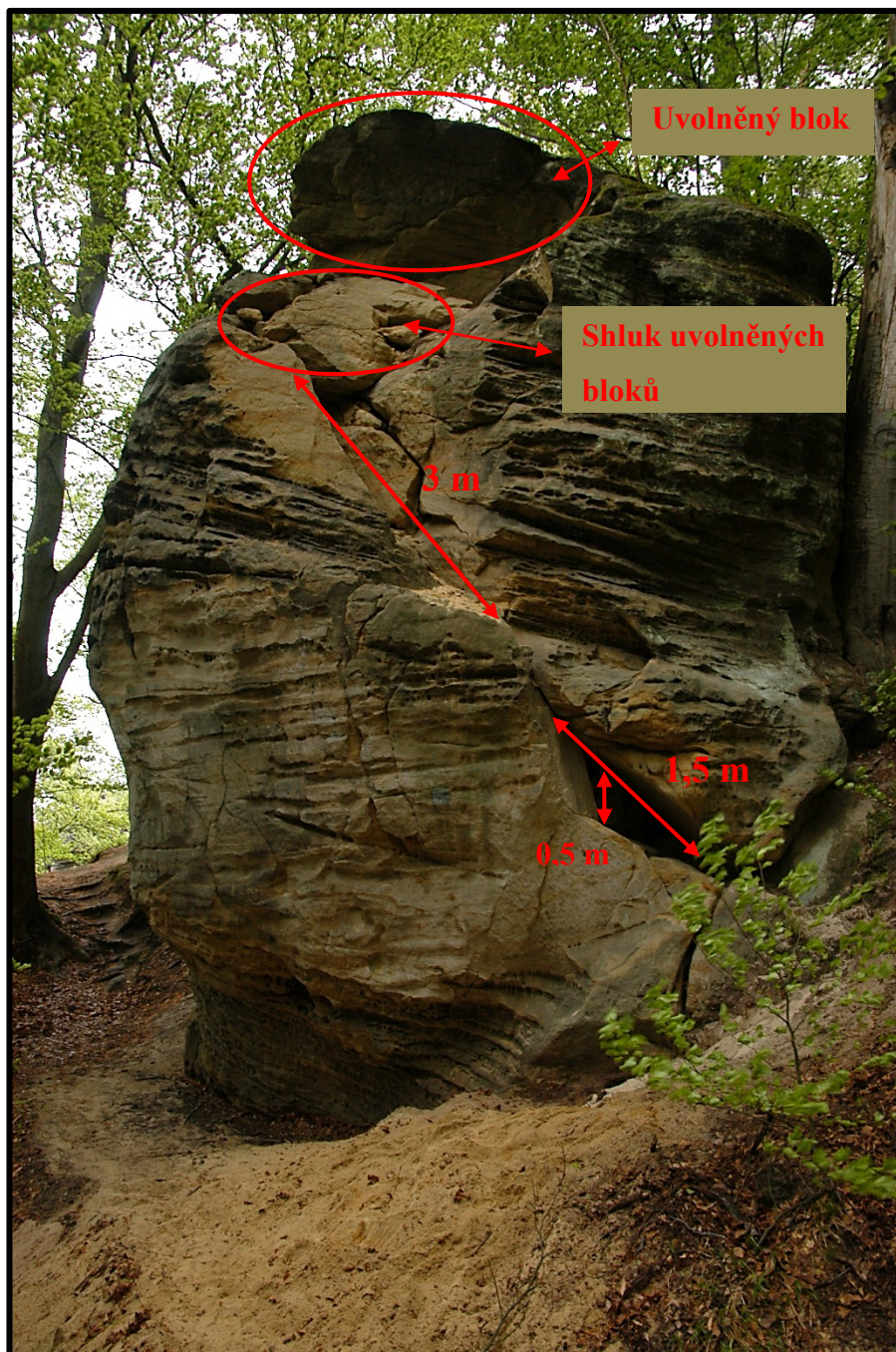
Nepochybně primárním impulsem pro další rozvolňování bylo vytvoření hlavní pukliny, která věž v její povrchové části rozdělila prakticky na dvě poloviny, jež se vůči sobě pohybují a způsobují nestabilitu věže. Průběh této hlavní pukliny nelze do hloubky zcela popsat, neboť se uklání pod úroveň okolního terénu. Z jižní strany ji lze rozdělit na vrchní část s délkou cca 3 m a viditelnou hloubkou přibližně 1 m, a spodní část s délkou blízkou se 1,5 m a stejně tak hlubokou, viz obr. č. 49. Vrchní část má směr sklonu 41° a sklon 64° . Spodní část má směr sklonu 47° a sklon 30° . Povrch spodní části je hladký až vyhlazený. Puklina je bez výplně a volně po ní stéká dešťová voda, která je pravděpodobně hlavním činitelem rozrušování. Vzájemným pohybem puklin vůči sobě dochází k drčení materiálu a jeho následnému odnosu srážkovou vodou, ale také k posunu těžiště.

4.3.1 Vliv rozložení napětí ve věži

Bruthans et al. (2014) se věnují vlivu rozložení napětí na výsledné tvary pískovcových útvarů. Tam, kde je materiál pod vysokým tlakem, není umožněna jeho eroze, neboť zrna jsou držena tlakem u sebe. Pokud vznikne ve skále nějaká diskontinuita, pak napětí tuto nehomogenitu obtéká, v blízkém okolí diskontinuity se napětí sníží, zrna přestávají být v kompresi a mohou začít odpadávat, což vede ke vzniku různých útvarů, např. skalních bran. Ačkoli rozložení napětí

v pískovcové věži není hlavním předmětem této práce, nelze nezmínit jeho pravděpodobně velký vliv na stabilitu věže v souvislosti s hlavní diskontinuitou.

Vznik diskontinuity na věži měl pravděpodobně zásadní význam pro rozvoj dalšího zvětrávání. Vlivem jejího vzniku pokleslo napětí v okolí trhliny a materiál začal být náchylnější na rozvolňování, zejména vlivem mrazového zvětrávání. Bruthans et al.(2014) provedli pokus pro ověření rozdílu náchylnosti na mrazové zvětrávání mezi pískovcem pod tlakem a zatíženým výrazně nižším napětím. Rozdíl byl jasně patrný v neprospěch nezatíženého pískovce. V kombinaci s dalšími faktory tak trhlina s největší pravděpodobností představuje počáteční impuls pro další zvětrávání.



Obrázek 49. Hlavní puklina na jižní stěně a uvolněné části věže

4.3.2 Vyplavený materiál v puklině – 3D modely

Ve spodní části pukliny dochází k postupnému hromadění vodou vyplaveného materiálu z její vrchní části. Tento materiál je dále vyplavován na okolní půdní pokryv. Je otázkou, jaký objem z tohoto nánosu představuje splavený materiál vzniklý erozí volně dopadající srážkové vody rozrušující její povrch a jaký podíl má materiál vzniklý pouze zvětráváním. Pro měření objemu takto vyplaveného materiálu byla nejprve zamýšlena instalace plachty, do které by se vyplavený materiál akumuloval, ale vzhledem k velmi vysokému turistickému ruchu by tato metoda nebyla dostatečně průkazná, neboť existovala vysoká pravděpodobnost, že někdo na plachtu písek nahází, apod. Navíc by na místě plachta musela být instalována velmi dlouhou dobu a tím se riziko nepřesnosti v měření zvyšovalo, např. odnosem větrem a odplavením vodou. Nakonec bylo přistoupeno ke složitější metodě pravidelného fotografického dokumentování pukliny. Tato dokumentace probíhala pravidelně v rozmezí 1 až 4 měsíců, podle stupně zaplnění pukliny.

Puklina byla fotograficky dokumentována pomocí zrcadlovky Pentax K-X s objektivem DAL 18-55 mm. Při focení byl objektiv vždy nastaven na minimální ohniskovou vzdálenost 18 mm, což je nutné pro následné zpracování fotografií do modelu. Fotografie byly pro co největší kvalitu následného zpracování pořizovány ve formátu RAW. Pro zanesení přesných souřadnic do následného modelu, bylo pracovníky ÚSMH AV ČR provedeno přesné geodetické zaměření pomocí totální geodetické stanice Geodimeter 640 servo. Puklina byla nejdříve vyfotografována zaplněná nahromaděným materiálem (obr. 50), poté byl nahromaděný materiál ručně odstraněn pomocí košťátka a štětců a puklina byla vyfotografována znovu (obr. 51).

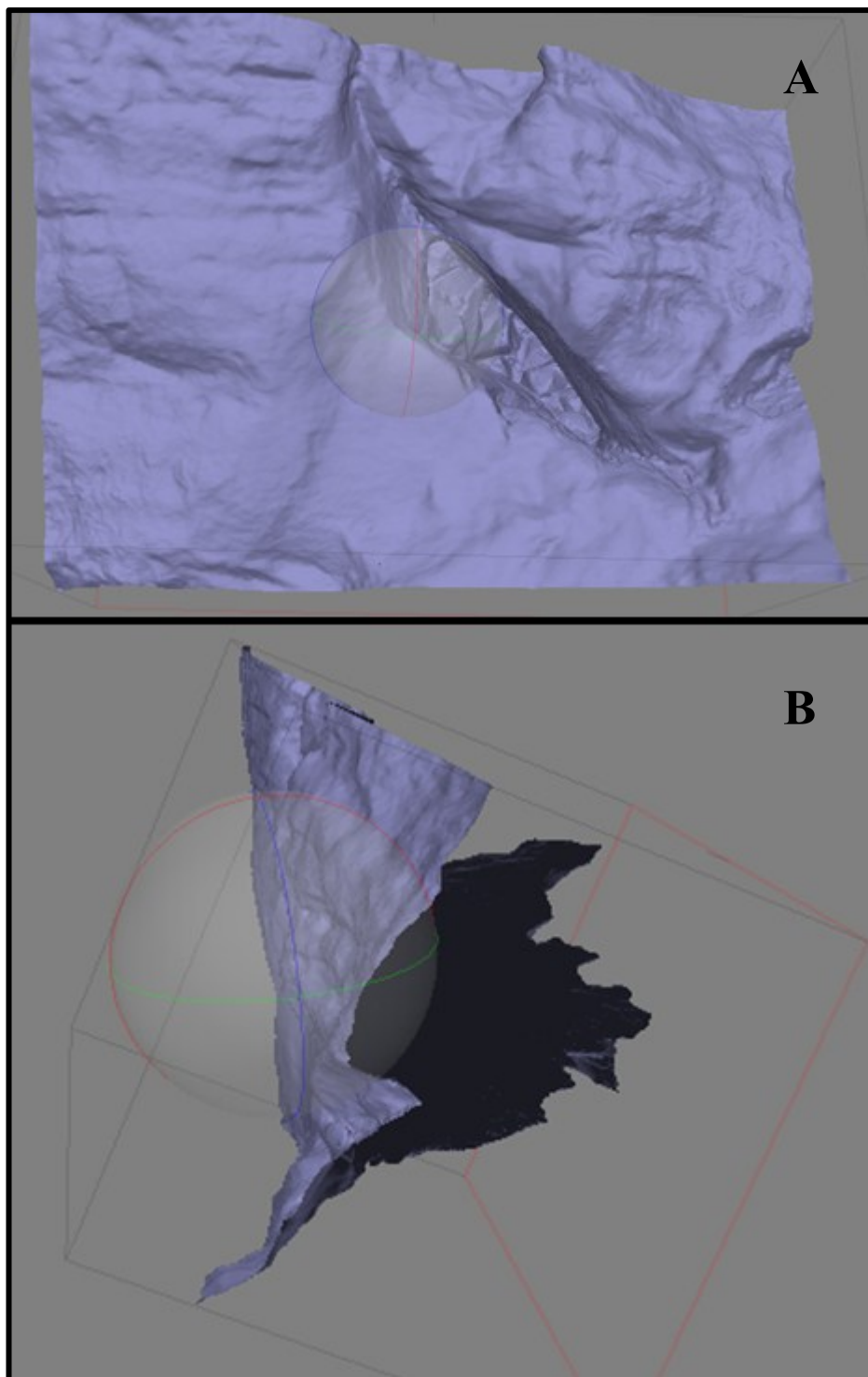


Obrázek 50. Puklina před vyčištěním



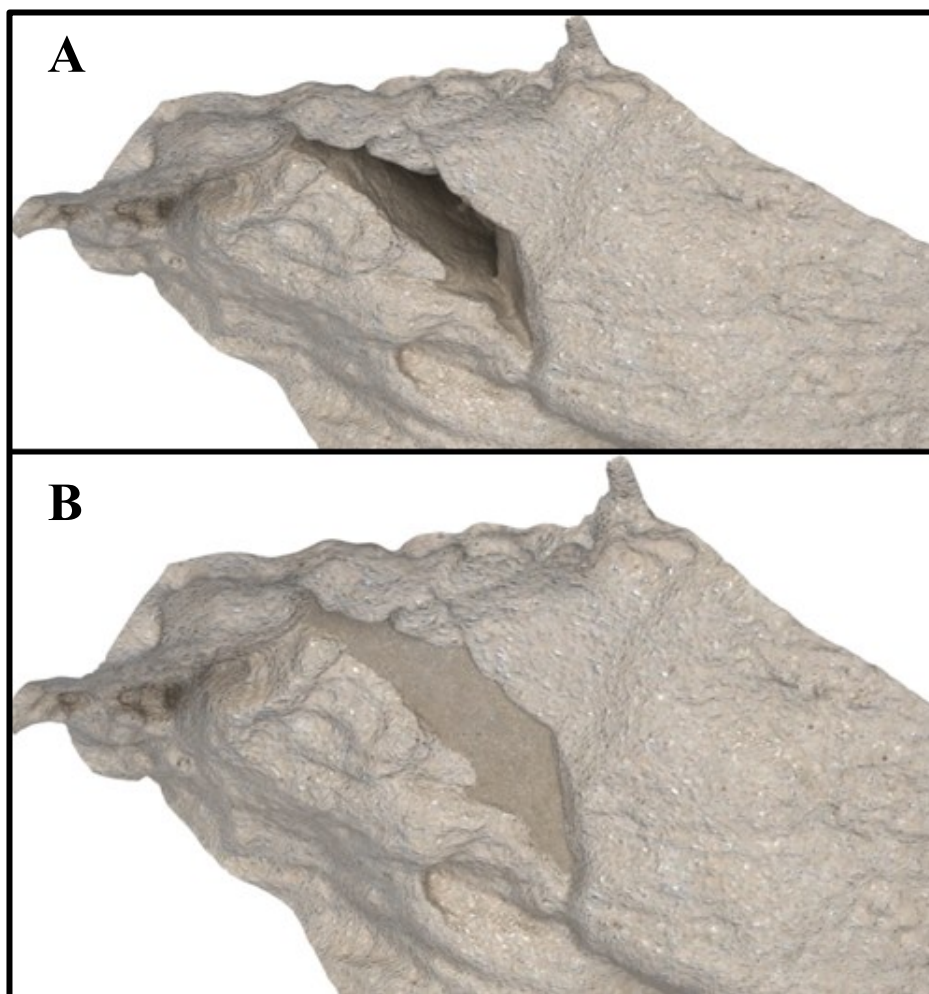
Obrázek 51. Puklina po vyčištění

Ze získaných fotografických snímků byl v softwaru Agisoft Photoscan sestaven 3D model (obr. 52) před vyčištěním pukliny a po vyčištění pukliny. V tomto softwaru byly do modelu zaneseny souřadnice získané pomocí totální stanice, viz předchozí text. Díky těmto souřadnicím model získal realistické měřítko. V softwaru byla dále vytvořena trojúhelníková síť (mesh) a model byl vyexportován ve formátu DXF pro zpracování v dalším softwaru.



Obrázek 52. 3D model pukliny v softwaru Agisoft, A – čelní pohled z jižní strany; B – pohled na model z profilu

K úpravě a výpočtu byl použit 3D CAD software Rhinoceros. V tomto programu byla každá plocha zrekonstruována a doplněna chybějícími polygony. To umožnilo správné překrytí jednotlivých modelů přes sebe. Následně se provedl průnik obou ploch, z kterých vzešel uzavřený útvar použitelný k výpočtu objemu. Z každého dne tedy vzešly dva různé výpočty objemu (obr. 53). Z uvedeného je tedy zřejmé, že objem před vyčištěním byl vždy menší než objem po vyčištění. Odečtením objemů byl získán celkový objem vyplaveného materiálu. Tento objem byl pomocí objemové hmotnosti pískovce přepočten na hmotnost vyplaveného materiálu. Objemová hmotnost byla stanovena v laboratoři vážením pod vodou na základě normy ČSN 721010 a podle této metodiky byla stanovena na $2,28 \text{ g.cm}^{-3}$.



Obrázek 53. 3D model pukliny v softwaru Rhinoceros; A – prázdná puklina; B – vyplněná puklina pro výpočet objemu

Dohromady bylo focení pukliny provedeno v 11 dnech, celkem tedy bylo vytvořeno 22 modelů. Z těchto modelů se podařilo celkové množství vyplaveného materiálu stanovit v 7 dnech (14 modelech). Ve zbylých dnech se z fotografií nepodařilo vytvořit dostatečně kvalitní model pro výpočet. V těchto modelech však podle odhadu nebylo množství materiálu nikdy vyšší než 1 dm³. Přehled naměřených hodnot nabízí tabulka č. 9.

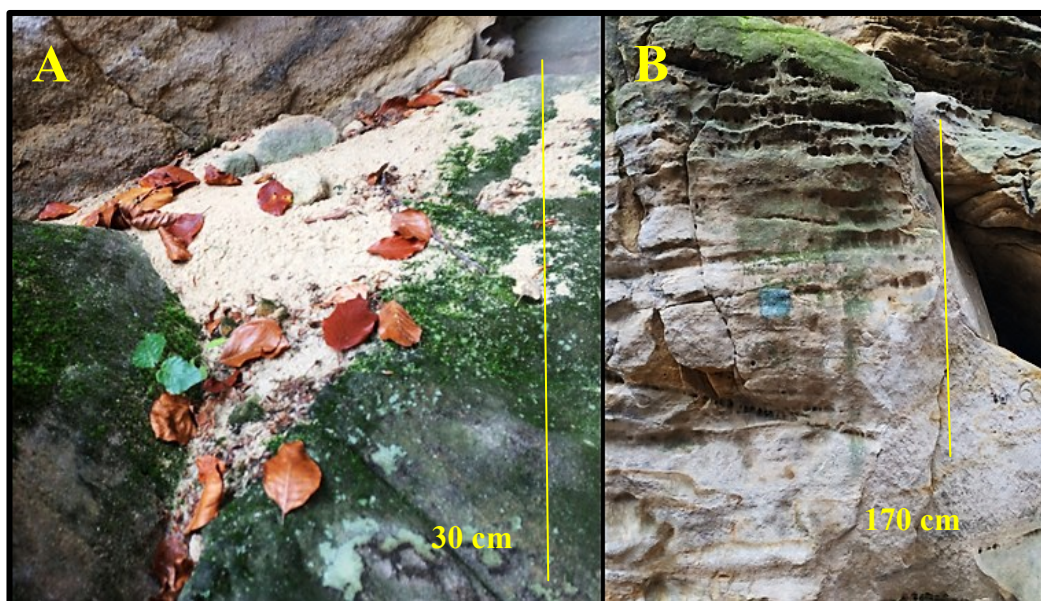
Datum	Množství vyplaveného materiálu v dm ³	Množství vyplaveného materiálu v kg	Množství srážek od posledního vyčištění v mm	Množství srážek od posledního vyčištění v mm přepočteno na 1 kg uvolněného materiálu
10. 7. 2015	7	16	první měření	první měření
7. 9. 2015	1	2,3	140	60
17. 10. 2015	5	11,4	64	6
21. 11. 2015	<1	< 2,3	60	26
3. 2. 2016	<1	< 2,3	94	40
5. 3. 2016	<1	< 2,3	53	23
23. 4. 2016	0,5	1,1	43	39
10. 6. 2016	3	6,8	35	5
7. 9. 2016	<1	< 2,3	89	38
13. 11. 2016	2.5	5.7	79	14
14. 1. 2017	0,3	0,7	cca 80 mm (lednová data nejsou k dispozici)	114

Tabulka 9. Přehled naměřených hodnot pomocí 3D modelování; červeně jsou označena odhadnutá data z nepovedených modelů

Z naměřených hodnot je patrné, že množství vyplaveného materiálu nekoreluje s celkovými srážkovými úhrny na lokalitě. Neplatí úměrnost mezi množstvím srážek a objemem vyplaveného materiálu. Množství srážkového vodního sloupce v mm na 1 kg vyplaveného materiálu kolísá od 5 mm do 114 mm. Celkem bylo za dobu sledování z věže vyplaveno přibližně 50 kg (cca 22 dm³) materiálu, včetně prvního měření a odhadnutých hodnot z neprovedených modelů.

Důvod, proč množství srážek nekoreluje s množstvím vyplaveného materiálu, si autor vysvětluje v několika příčinách. První příčinou je velmi krátká doba monitoringu (18 měsíců), pro zpřesnění dat by byla potřebná výrazně delší doba. Druhým důvodem jsou velmi suché poslední dva roky a pískovec potřebuje být pro svůj rozpad podle výzkumu (viz kap. 6.3) velmi nasycen. Třetím důvodem je pravděpodobně hlavní příčina rozpadu pískovce a to mrazové zvětrávání ve specifických dnech, kdy se pohybují teploty kolem nuly a pískovec střídavě zamrzá a rozmrzá (viz kap. 6.2). Důkazem je mnohem větší uvolněné množství v listopadu 2016, kdy těchto dní bylo několik. Uvolněný a poškozený pískovec se poté pravděpodobně během roku náhodně uvolňuje, opadáva a tyto opadané kusy jsou rozplaveny srážkovou vodou.

V posledních 5 měsících však bylo pozorováno drobné splavování materiálu i po bočních stěnách (obr. 54 B). Příčinou tohoto jevu může být ucpání odtokového prostoru horní pukliny naneseným materiálem (obr. 54 A), nebo prostě jen občasný větší objem srážkových vod, které není puklina schopna pojmout. Z toho důvodu bude celkové množství uvolněné materiálu ještě vyšší, než výpočty z vyplaveného materiálu v puklině. Je také potřeba počítat s určitou nepřesností modelů (Balek, Blahůt 2016), která by však neměla být příliš velká a při použití stejného typu fotoaparátu vždy stejná. Pro zjištění přesné chyby v měření by bylo třeba výsledky porovnat s měřením pomocí přesného laserového skeneru (Balek, Blahůt 2016).



Obrázek 54. A - naplavený materiál v horní puklině; B - dráhy stoku materiálu

4.4 Zpevněné povrchy puklin a měření REI

Pukliny a trhliny jsou hlavním formujícím faktorem skalních věží, roklí i celých skalních měst. Geology i geomorfology jsou obecně vnímány jako zóny snížené pevnosti a odolnosti vůči zvětrávání a erozi (Bruthans et al. 2013). Tento předpoklad přitom nemusí být vždy platný, jak dokazují Bruthans et al. (2013) při měření na puklinových površích v lomu Střeleč. Naopak pukliny mohou za určitých podmínek představovat odolnou a pevnou zónu odolávající erozi a proudění vody. Stejně tak mohou být povrchy skal a puklin obecně zpevněny různými formami skalních kůr (Cílek, Baroň, Langrová 2003).

Je pouhým okem pozorovatelné, že většina povrchů pískovcového materiálu v oblasti Mužského je pokryta nějakou formou skalní kůry. Je zřejmé, že většina povrchu je kolonizována pouhým okem viditelným lišejníkem a sinicemi, které zároveň vytváří zónu zpevnění na povrchu.

Bruthans et al. (2013) prováděli v lomu Střeleč výzkum vlastností povrchů puklin, kterými proudí voda, a porovnávali je s vlastnostmi povrchů puklin okolního pískovce, který není zpevněn skalními kůrami. Tyto pukliny

nevykazovaly ani při rychlém proudění vody známky eroze. Puklinový povrch je zde chápán jako rovný, plochý a převážně vertikální povrch na výchozech pískovce. Podobá se tedy puklinovému povrchu hlavní pukliny na studované věži, kde ovšem není puklina vertikální, ale má orientaci $47^\circ/37^\circ$. Nejedná se o kanál, kterým by proudilo velké množství vody, proudí zde jen voda srážková. Pomocí měření REI (relative erodibility index) byla Bruthansem et al. (2013) v lomu Střeleč dokázána vysoká odolnost povrchu puklin oproti pískovci v jejich podloží.

Měřicí zařízení (obr. 55) je speciálně upravená stříčka vybavená tlakovou pumpou a manometrem, aby bylo možné nastavit a udržovat konstantní hodnotu tlaku 180 kPa. Pod tímto tlakem byl paprsek o průměru přibližně 1 mm aplikován kolmo na povrch z konstantní vzdálenosti 10 cm po dobu 5 sekund. Hloubka otvoru ve skále vytvořeného tímto paprskem se zjišťovala pomocí posuvného měřítka (obr. 56). Pro tuto hloubku se používá zkratka REI = indikátor relativní erodovatelnosti.



Obrázek 55. Stříčka pro měření REI

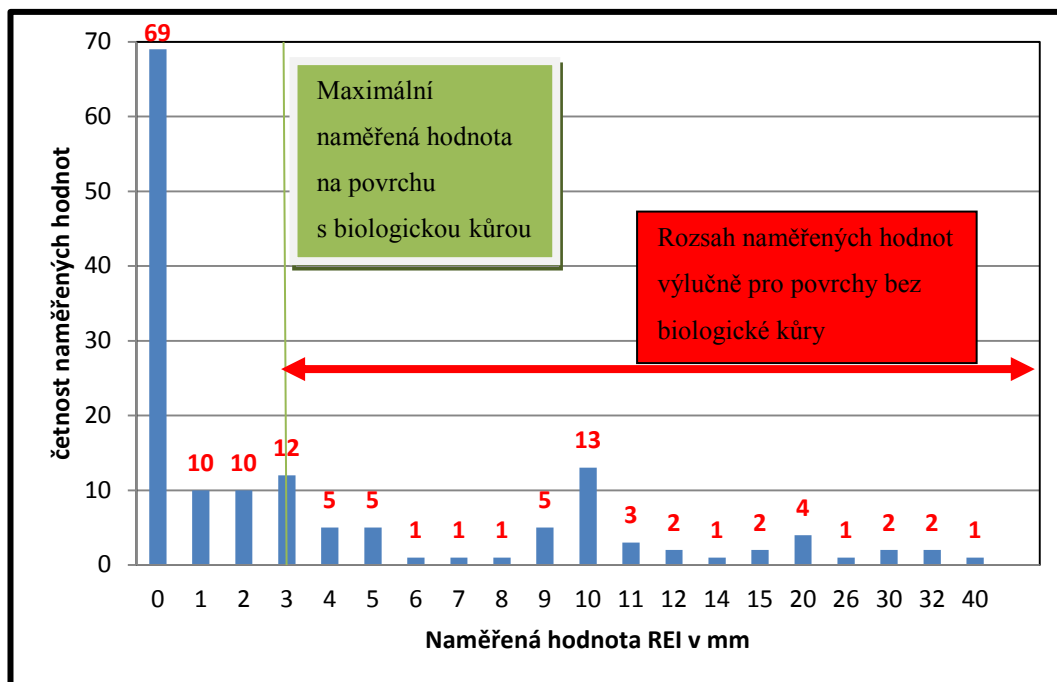
Měření pomocí metody REI bylo provedeno na studované skalní věži i na okolních pískovcových objektech. Hlavním úkolem nebylo měřit rozdíl pevnosti na povrchu a pod povrchem jako Bruthans et al. (2013), ale zejména prokázat

různou odolnost povrchů vůči povrchovému zvětrávání, jako je vítr a déšť. Proto bylo měření kromě puklin prováděno i na dalších různých místech věže, ale též na povrchu okolních skal. Pokus byl prováděn na různých místech skalního povrchu, jako jsou viditelné skalní kůry, povrchy bez skalních kůr, povrchy voštin, povrchy vertikální i horizontální.



Obrázek 56. Odečet hodnoty REI pomocí posuvného měřítka

Celkem bylo provedeno 150 měření. Podařilo se prokázat, že odolnost pískovce vůči zvětrávání je na různých površích vysoce proměnlivá. Výsledky naměřených hodnot lze rozdělit do dvou hlavních skupin podle toho, jestli mají biologickou krustu (dále jen b. krustu), či nikoliv. Hodnoty REI se měnily od 0 mm až po 40 mm. Četnosti naměřených hodnot jsou zobrazeny na obr. č. 57.



Obrázek 57. Četnost naměřených hodnot REI

Na povrchu s b. krustou nebyla nikdy naměřená hodnota vyšší než 3 mm. Hodnota 3 mm byla naměřena pouze ve třech případech, hodnota 2 mm v sedmi případech, hodnota 1 mm v devíti případech a hodnota 0 mm celkem v šedesáti případech a jedná se tak o nejčastěji naměřenou hodnotu.

Všechny naměřené hodnoty vyšší než 3 mm připadají výlučně na povrchy bez b. krust. V několika málo případech byly ovšem i na těchto typech povrchů naměřeny hodnoty typické pro povrchy s b. krustou, např. hodnota 0 mm byla naměřena celkem v 9 případech. Bruthans et al. (2013) uvádí rozhraní mezi erodovatelným a neerodovatelným pískovcem 20 mm. Hodnota vyšší než 20 mm byla naměřena celkem v devíti případech. Prvotní předpoklad, že se v profilu věže vyskytují horizontálně uložené vrstvy méně odolného pískovce, nebyl prokázán, hodnoty REI se měnily i v rámci velmi malých vzdáleností (první centimetry) na jednotlivých horizontálních polohách. Lze tedy předpokládat, že se v rámci skalní věže odolnost pískovce velmi mění a záleží zejména na tom, zda je povrch zrovna na daném místě krytý biologickou krustou, či nikoliv.

Měření na povrchu hlavní pukliny, která není pokryta b. krustou, vykazovalo ve všech případech nízké naměřené hodnoty ukazatele REI. Takto

naměřená maximální hodnota REI byla 2 mm. Tyto naměřené hodnoty vedly k myšlence o deformačních proužcích, kterým by tato puklina mohla být. Výzkumu deformačních proužků v lomu Střeleč se věnovali Bruthans et al. (2013). V tomto výzkumu přisuzují vyšší odolnost puklin nikoli skalním kůrám, ale tzv. deformačním proužkům, které jsou typické pro porézní sedimenty, kdy při smykovém namáhání masivu nejdříve vzniká tato lokalizovaná deformační zóna a teprve poté dochází ke vzniku pukliny (smykové zóny). Deformační proužky mají mocnost přibližně 1 mm a často se vyznačují zvýšenou soudržností, sníženou porozitou a výrazně nižší propustností (Schweigstilllová et al. 2013). Podle úvahy autora mohou být deformační proužky i v oblasti Mužského, a to zejména z důvodu zde přítomných blokových svahových pohybů a tedy teoretickým smykovým namáhání masivu. Vzhledem k tomu, že jsou zde skály pokryty skalní kůrou, tak je složité je objevit a ani nemají možnost se projevit, protože zde jimi voda neproudí.

Přítomnost deformačního proužku byla ověřena infiltrační zkouškou pomocí tzv. Karstenovy trubice, viz následující kapitoly. Přesné měření nebylo možné z důvodu nerovného povrchu provést, ale bylo jasně zřetelné, že povrch pukliny nemá výrazně sníženou propustnost. Teorie o smykovém proužku se tedy tímto měřením nepotvrdila.

Místem, kde byly naměřeny nejvyšší hodnoty REI, byla jižní stěna, tedy místo nejvíce náchylné na porušování. Hodnoty zde naměřeného ukazatele REI byly až 40 mm. Na této stěně jsou zastoupena všechna místa bez b. krusty na dané věži, ačkoli v minulosti byl jimi povrch pravděpodobně také pokryt. Pískovec zde má žlutavou až bělavou barvu a jednotlivá zrna lze rozlišit pouhým okem. Materiál lze velmi snadno drolit pouhým povrchovým třením dlaní.

Zajímavé měření proběhlo v tektonické puklině vzniklé blokovými pohyby, viz obr. č. 58. V této puklině je umístěn přístroj pro měření vzájemných pohybů pískovcových bloků TM-7. Puklina je na povrchu tvořena poměrně úzkým otvorem a v podloží se výrazně rozšiřuje. Právě v tomto rozšíření chybí povrchová kůra, a také zde došlo k naměření relativně vysokých hodnot indikátoru REI s maximální hodnotou až 30 mm. Toto místo je však velmi dobře chráněno před povětrnostními vlivy a vlhkostí a tudíž nedochází k jeho aktivnímu

rozrušování. Toto měření jen potvrdilo domněnku, že celá oblast je tvořena různě odolnými polohami pískovce a hlavní roli hraje b. krusta, případně cementace povrchu a klimatické vlivy.



Obrázek 58. Puklina s přístrojem TM-71

Měření probíhalo i po odstranění povrchové vrstvy pískovce v hloubce cca 6 cm. I v tomto případě bylo měření nevyrovnané. Většinou byla naměřena hodnota nulová, pouze v jednom případě bylo naměřeno REI 11 mm. Tím se opět potvrdil výskyt různě odolných poloh pískovce.

Důležitou otázkou výzkumu bylo, jaký faktor ovlivňuje proces rozvolňování a přítomnost, či nepřítomnost b. krusty. Na základě pozorování dospěl autor k závěru, že primárním faktorem bylo tektonické porušení skalního bloku, které odkrylo místa méně odolná a s vysokou schopností infiltrace (viz následující kapitola č. 5). Také došlo k uvolnění napětí, čímž mohla povrchová vrstva začít snáze opadávat. K tomu dále přispívá výraznější oslunění zejména v zimních měsících, kdy okolní vegetace nebrání průniku slunečních paprsků a dochází tak vlivem výrazného kolísání teploty k častému rozmrzání a zamrzání vody, zejména v období sněhové pokrývky. Další příčinou může být intenzivnější působení větru, který působí abrazivně, snižuje vlhkost skalního povrchu a zároveň v zimních měsících povrch ochlazuje, čímž přispívá k mrazovému

zvětrávání. Podle Sobíška (2000) spadá území do oblasti, kde byl v letech 1961–1990 převládající směr větru $217,1^\circ$, což přibližně odpovídá orientaci stěny nepokryté skalní kůrou (200°). Novější statisticky zpracovaná data nejsou k dispozici, nicméně lze předpokládat podobný trend. Jako poslední možný faktor ovlivňující nepřítomnost povrchové ochranné kůry je její prosté stárnutí a opadávání. Dle ústního sdělení Slavíka může být nižší vlhkost způsobena tvarem skalního útvaru, kdy výčnělky skály jsou přirozeně sušší a náchylnější na erozi, nicméně při detailním zkoumání se tato možnost nepotvrdila.

Měřením REI se potvrdilo, že v případech, kdy byl skalní povrch pokryt organickou kůrou, byla hodnota REI vždy velmi blízko nuly a nikdy nebyla vyšší než 3 mm. Naopak všechny hodnoty vyšší než 3 mm připadají výlučně na povrchy bez b. krust. Pokud je povrch pokryt b. krustou, lze téměř s jistotou konstatovat jeho vysokou odolnost proti povrchové erozi, pokud je bez krusty, bude jeho odolnost ve většině případů pravděpodobně výrazně nižší. V případě cementace povrchu tomu tak být nemusí (nulové naměřené hodnoty na povrchu bez b. krusty). Ukázalo se, že pískovec se pravděpodobně skládá z různě odolných poloh a přitom nelze říct, že by se jednalo přímo o vrstvy. Tyto polohy byly potvrzeny i při měření v trhlině TM–71, kde byly hodnoty místy dost vysoké. Toto místo je vzdáleno vzdušnou čarou přibližně 420 m od studované skalní věže a obě místa spojuje nepřítomnost skalní kůry. Na základě těchto měření vzniká domněnka, že různě odolné polohy pískovce existují pravděpodobně na celém území Mužského, ale vzhledem k tomu, že naprostá většina povrchů je kryta skalní kůrou, tak k jeho erozi nemůže docházet. Povrchy nekryté skalní kůrou zase většinou nejsou vystaveny intenzivním účinkům klimatických jevů, proto na nich k erozi nedochází.

5 Skalní kůry

V kapitole č. 4 byl prokázán významný vliv skalní kůry na povrchovou pevnost a odolnost pískovce zkoumané skalní věže, a právě proto jim bude věnována další pozornost. Kůry lze rozdělit na dvě základní skupiny a to kůry biologické a minerální.

5.1 Skalní kůry minerální

Velmi zjednodušeně lze vznik nebiologické skalní kůry popsat tak, že při kontaktu povrchu s vodou v podobě deště nebo sněhu, dochází k rozpouštění horninových minerálů a takto vzniklé roztoky proudí přes pískovcové těleso směrem dolů a k okrajům skály, kde se odpařují (Geologie Českého ráje 2016). Po odpaření vytvářejí specifickou povrchovou krustu složenou z různých minerálů. Skalní kůry chrání povrch pískovce před zvětráváním, anebo naopak v místě jejího porušení umožňují selektivní zvětrávání. (Cílek 2002). Tento zpevněný povrch o mocnosti nejčastěji 2–20 cm jim dává mnohem větší odolnost oproti okolnímu materiálu a díky tomu pomáhají vytvářet izolované skalní útvary, např. věže (Cílek, Baroň, Langrová 2003; Cílek 2002) Kůry bývají na povrchu rozmístěny nepravidelně, jejich výskyt závisí na litologii a klimatických podmínkách, ovšem nejčastěji se skalní kůry vyskytují na velmi propustných pískovcových površích (Schweigstilllová et al. 2013). Kůry také mohou opadávat procesem stárnutí, tím se otevírají nové povrchy pro erozní činitele, čímž často vznikají nepravidelné dutiny a útvary ve skále (Cílek 2002). Krystalizační a hydratační tlaky přírodních solí mohou produkovat síly srovnatelné s tlaky mrznoucí vody nebo je dokonce překračovat, běžně se při krystalizaci solí můžeme setkat s tlaky 50 až 70 MPa, ojediněle až 200 MPa (Cílek 1993).

Skalní kůry lze podle Cílka (2002) rozdělit na vnitřní (endokrusty) a vnější (exokrusty). Vnější kůry jsou typicky tvořené železitým tmelem vzniklým vysrážením z volně proudící vody na puklinách. Vnitřní kůry vznikají zpevněním pískovce, nejsou okem pozorovatelné, ale mají důležitější funkci a proto je jim většinou věnována větší pozornost. Vnitřní kůry lze pozorovat, pokud začnou

vystupovat na povrch vlivem eroze okolního pískovce (Schweigstilllová 2013). Kůry mohou být tvořeny různými minerály. Dle pozorování autora se v oblasti Mužského mohou vyskytovat kůry solné, železité, sádrovcové a kalcitové.

Cílek a Langrová (1994) popisují vznik solných krust tak, že roztoky SiO_2 proudí kapilárními drahami na povrch pískovce, kde vlivem odpaření vody zůstane opálová (opál je mikrokrytalický amorfni křemen) krusta, která vede ke zpevnění povrchu pískovce. Opálové kůry tvoří typicky zaoblené, přibližně 1 mm mocné začernalé povrchy (Cílek, Baroň, Langrová 2003). K tomuto procesu dochází na vertikálních, převislých i horizontálních stěnách (Cílek, Mikuláš 1998). Krystalizace solí vede ke snížení pórovitosti na povrchu pískovce a dochází tedy k vytvoření zpevňující krusty (Cílek, Mikuláš 1998). Pod povrchem krusty dále dochází ke krystalizaci, která vede k odlupování a odtlačování zrn křemene a tím dochází dalšímu porušování povrchu pískovce pod touto krustou (Cílek 2002). Pokud dojde k odpadnutí krusty vlivem mrznutí vody, zůstane porušený pískovec pod krustou a je potom velmi náchylný na erozi, která vede ke vzniku různých drobných útvarů (Cílek, Mikuláš 1998). Poté se může vytvořit další krusta a celý proces se opakuje. Cílek a Langrová (1994) dále uvádějí, že tyto opálové krusty jsou na velké většině pískovcových skalních věží v oblasti České křídové pánve. Mohou se tvořit velmi rychle, během prvních desítek až stovek let.

Pokud hornina obsahuje karbonáty, mohou vznikat sádrovcové kůry vlivem kyselých dešťů, kdy hornina reaguje s H_2SO_4 (Cílek 1995). Sírany sice vytvářejí povrchové kůry, ale mnohdy také krystalizují pod povrchem a způsobují tak vysokou náchylnost na zvětrávání (Cílek 1995). Obecně se sádrovec nachází zejména v čistších oblastech a to především na dobře chráněných místech převislých skalních stěn v nižších částech výchozů a v dosahu kapilární zóny (Cílek, Baroň, Langrová 2003). Autor podle normy ČSN EN ISO 14689–1 provedl zkoušku na obsah uhličitánů pokapáním 10% roztokem HCL. Hornina po nakapání HCL nešuměla, tudíž neobsahuje uhličitany a proto domněnka o výskytu sádrovcové kůry byla vyvrácena.

Na pozorované věži se solné kůry vyskytují na povrchu voštin pod převisem, viz obrázky č. 59 a č. 60. Mohou se tedy na vzniku voštin podílet.

Významnější opadávání pískovce nebylo pod tímto převisem za celou dobu pozorováno. Pokud ovšem došlo k odpadnutí solné krusty, pískovec pod ní byl vždy porušen a došlo k jeho opadávání. Jedná se však o zanedbatelné objemy, které jsou pozorovatelné v dlouhodobějším horizontu, a tento proces se pravděpodobně podílí na vzniku převisu. Do budoucna může být vznik voštin a převisu ovlivněn občasným povrchovým stokem vody v důsledku ucpání odtokové trhliny, viz kapitola 6.2. Podle Mikuláše, Adamoviče a Cílka (2011) může voda tekoucí po skále vést k odmyvání solí a zahlazování povrchu. Obecně na voštinách na věži lze pozorovat téměř všechny typy skalních kůr. Kůry solné a kalcitové se zde vyskytují výhradně jen na voštinách.



Obrázek 59. Solná kůra na voštinách



Obrázek 60. Voštiny mají většinou průměr a hloubku do 4 cm. Největší dosahují průměru i kolem 11 cm a hloubky až 10 cm.

Snadno pozorovatelné jsou kůry kalcitové, které tvoří sintrové povlaky s typicky černou barvou. Plocha, kterou zaujímají je běžně do 1 dm². Na skalní věži se vyskytují zejména na voštinách, viz obr. č. 61.



Obrázek 61. Sintrové povlaky na voštinách

Železité kůry jsou v českých pískovcových oblastech vázány na polohy zvětrávání a často na polohy neovulkanitů, což je i oblast Mužského (Cílek 1995; Cílek, Baroň, Langrová 2003). Zkoumaný objekt je vzdálen vzdušnou čarou cca 650 m od neovulkanitu Mužský. Železité povlaky jsou ze všech nejnapadnější a obvykle se vyskytují spolu se solemi a jsou typické pro pískovce ve vlhkých svahovinách (Cílek 1995; Cílek, Baroň, Langrová 2003). Většinou se jedná o kůry s obsahem do 8 % železitého hydroxidu a pravděpodobně vznikají mikrobiálním srážením (Cílek 1995; Cílek, Baroň, Langrová 2003). Tyto povrchy jsou díky jejich výraznému zbarvení velmi dobře viditelné na zkoumané pískovcové věži (obr. 62). Podle autora se nejedná o kůry, spíše je to povlak (zabarvení). Při měření REI na zkoumané věži byly na tomto povrchu naměřeny hodnoty až 10 mm. Navíc věž splňuje podmínky výskytu ve svahovinách a blízkou přítomnost neovulkanitu.



Obrázek 62. Železitý povlak

Obecně ve většině literatury je opál považován za hlavní zpevňovací prvek skalních kůr, např. Cílek (1994). Nicméně detailní studium osmi lokalit pískovců podle Schweigstillové et al. (2013), včetně lokality Českého ráje, neprokázalo výskyt opálu ani v jednom ze vzorků. Stejně tak i některé další práce odkazují na to, že opál pravděpodobně není nezbytný pro tvorbu skalních kůr (Schweigstillová et al. 2013). Na studované věži nebyly opálové kůry objeveny.

5.2 Biologické kůry

Dalším, neméně významným typem skalních kůr jsou ty biologického původu. Většinou se jedná o kůry v podobě lišejníků, sinic, mechů a hub. Povrchy kryté touto kůrou mají žlutavou, zelenou a tmavošedou barvu. Bez biologické kůry bývá pískovec bílý. Slavík et al. (v tisku–a) provedli mikroskopická měření na vzorcích z lomu Střeleč, ze kterých vyplývá, že mocnost této organicky obohacené zóny je 1–2 mm. Obecný názor na biologické krusty je takový, že přispívají k rozrušování a zvětrávání pískovce, ale na lokalitách, kde je pískovec velmi náchylný na erozi, ho mohou paradoxně zpevňovat a před erozí chránit

(Schweigstilllová et al. 2013). Měření Slavíka et al. (v tisku–b) prokázala, že b. krusta má při porušení pískovce mnohem významnější vliv, než cementace a pouze starší kůra ve stáří alespoň 10 let dokáže chránit povrch pískovce před erozí. Tento typ zpevnění je pouhým okem pozorovatelný na zkoumané lokalitě. Houbová vlákna lišejníků prorůstají mezi jednotlivá zrna, čímž je zpevňují a zároveň na svém povrchu zachycují větrem unášené jílové částičky. Vytvářejí tak slabou povrchovou cementaci. Kombinace jílové složky a organických vláken vede k rapidnímu snížení propustnosti a naopak zvýšení povrchové pevnosti (Slavík 2017), což bylo potvrzeno měřeními na zkoumané lokalitě, viz následující kapitoly. Lišejníky mohou ve vlhkém prostředí kolonizovat velmi rychle, a proto se mohou skalní kůry v ideálním prostředí vytvořit již během 6 let (Schweigstilllová et al. 2013).

Kurz a Netoff (2001) prováděli výzkum křehkých a na erozi velmi náchylných pískovců Navajo v Utahu a zjistili, že tyto slabě cementované pískovce jsou dočasně stabilizovány mikroorganismy, které pokrývají povrch a přispívají odolnosti pískovce vůči větrné a vodní erozi. V této studii tvrdí, že mikroorganismy stabilizují povrch pískovců vlivem produkce bakteriálních vláken a extracelulárními polymerními substancemi. Tyto polymerní substance mohou extrahovat ze vzduchu vlhkost i v suchém prostředí a vytvářet tak vhodné životní podmínky pro mikroorganismy, nicméně pokud vlhkost vzduchu klesne pod cca 10 %, tak už toho nejsou schopny. Nejenže tyto mikrobiální organismy zpevňují povrch, ale jsou schopny na svém povrchu lepit jílovité a siltovité částice, což umožňuje udržet uvnitř pískovce dlouhodobě vyšší vlhkost. Tento typ zpevnění byl také pozorován v oblasti Mužského, viz další kapitoly. Oblast, kterou Kurz a Netoff (2001) studovali má průměrné roční srážky 280 mm, průměrná teplota v červenci je 22 °C a v lednu –2,7 °C. Studovaná oblast Mužský má 30letý dlouhodobý průměrný srážkový roční úhrn 687 mm. Data průměrné teploty jsou k dispozici pouze z trhlino měru umístěného na studované skalní věži z let 2015–2017. V lednu byla naměřena průměrná teplota –2,7 °C a v červenci 18,9 °C.

5.3 Ověření výskytu skalní kůry TOC analýzou

Ověření výskytu biologické skalní kůry na pískovci zkoumané skalní věže bylo provedeno pomocí analýzy celkového množství organického uhlíku (TOC). Tato metoda určí množství organického uhlíku ve vzorcích, z čehož lze ověřit míru biokolonizace povrchu pískovce.

Pro ověření celkového obsahu organického uhlíku na povrchu a pod povrchem pískovce skalní věže byly odebrány 3 vzorky. Vzorky byly odebírány nasucho pomocí ruční akumulátorové vrtačky s jádrovnicí osazenou diamantovou korunkou. První vzorek byl odebrán přímo z biologické krusty, druhý byl odebrán z podloží pod touto krustou. Poslední vzorek byl odebrán z měkkého balvanu bez povrchové krusty uvnitř hlavní pukliny.

Analýza byla provedena v Laboratořích geologických výzkumů na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Celkový obsah organického uhlíku se určí jako rozdíl celkového obsahu uhlíku (v jednotkách ppm) a celkového obsahu anorganického uhlíku (v jednotkách ppm). K výpočtu je dále potřeba znát přesnou hmotnost navážky. Výsledky analýzy potvrdily očekávané výsledky, tedy o řád vyšší obsah organického uhlíku v povrchové biologické krustě, než pod ní a potvrdily tak významnou povrchovou kolonizaci mikroorganismy, které mají vliv na stabilitu povrchu (tab. 10).

	Obsah organického C v mg/kg (TOC)
Biologická krusta	3251
Podloží pod biologickou krustou	153
Měkký balvan v puklině	296

Tabulka 10. Obsah organického uhlíku

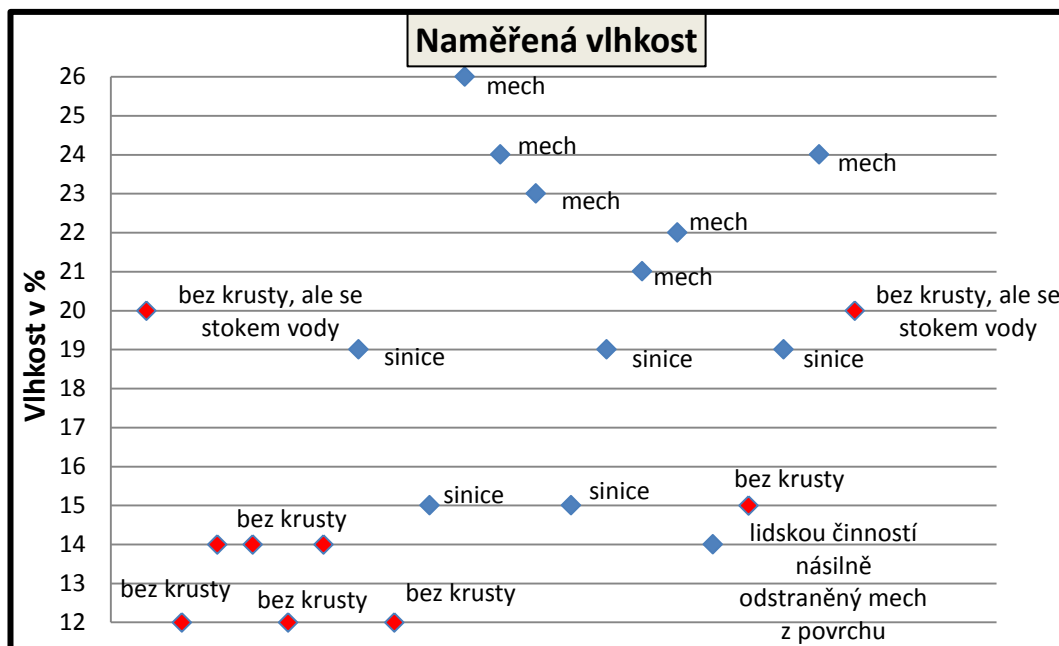
6 Zkoušky pevnosti a vliv biologických krust

Pro ověření vlastností pískovce popisovaných v předchozí kapitole byla provedena série různých zkoušek. Jednalo se o zkoušku měření vlhkosti povrchu, zkoušku rychlosti infiltrace, měření odporu při vrtání (tzv. DR), měření tahové pevnosti, měření pevnosti Schmidovým kladivem a pokus zaměřený na rozpouštění biologických krust pomocí roztoku peroxidu vodíku. Tyto zkoušky měly přispět k objasnění důvodu rychlejšího zvětrávání pískovce, popsat mechanické vlastnosti pískovce a celkově lépe pochopit poměry na lokalitě. Hlavním úkolem bylo potvrdit předpoklad, že povrchové biologické krusty zde mají zásadní vliv na stabilitu a odolnost pískovce.

6.1 Měření povrchové vlhkosti

Vlhkost pískovcového povrchu ukazuje na schopnost infiltrace vody i na rychlost vysychání povrchu a díky tomu velmi dobře ukazuje na povrchová místa vhodná pro biokolonizaci. Pro ověření povrchové vlhkosti skalního materiálu bylo provedeno měření pomocí vlhkoměru Greisinger GMR 110 s rozsahem měření od 0 % do 100 %. Měření probíhá prostým přiložením přístroje ke skalnímu povrchu. Na displeji přístroje se okamžitě zobrazí hodnota vlhkosti v procentech a měření je díky tomu velmi rychlé. Na základě ústního sdělení Slavíka jsou z jeho zkušeností běžně naměřené hodnoty ve volném vzduchu cca 4 %, maximálně vlhká pískovcová skála má vlhkost přibližně 28 % až 30 % a suchá cca do 10 %.

Celkem bylo na zkoumané věži provedeno 21 měření (obr. 63). Rozsah naměřených hodnot se pohyboval v rozmezí od relativně suchého materiálu s vlhkostí 12 % až po vlhký s hodnotou vlhkosti až 26 %, viz obr. č. 56.



Obrázek 63. Naměřené vlhkosti na studované skalní věži

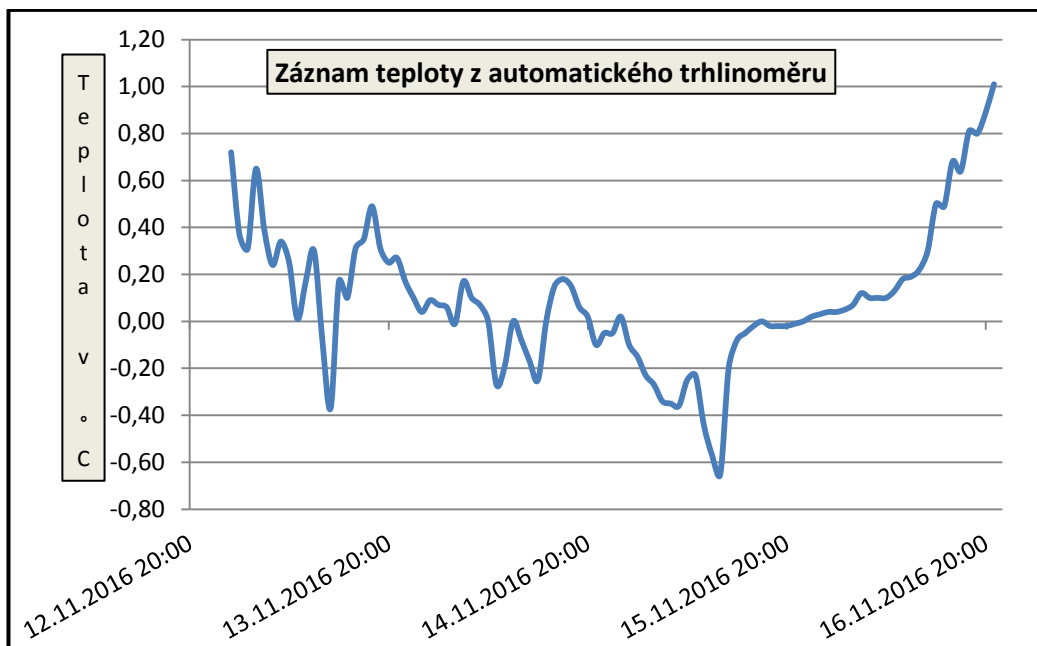
Měření bylo prováděno přibližně 12 hodin po intenzivním dešti na začátku listopadu 2016. To umožnilo sledovat množství zadržené vlhkosti na různých typech povrchů. Naměřené hodnoty potvrdily domněnku, že nejdéle je vlhkost zadržována v mechovém pokryvu. Na mechových površích byla naměřená vlhkost vždy vyšší než 21 %, a tedy přibližně dvakrát vyšší než na povrchu bez b. krusty. Následují povrchy pokryté sinicemi s rozsahem naměřených hodnot od 15 % do 19 %. Nejrychleji vlhkost ztrácejí místa bez povrchových b. krust s vlhkostí od 12 % do 15 %. V měření byla zahrnuta místa bez b. krust vystavená dešti i před ním chráněná a po 12 hodinách od deště vykazovaly oba povrchy podobné hodnoty naměřených vlhkostí. Potvrdilo se tedy, že b. krusty vytvářejí izolační vrstvu zpomalující ztrátu vlhkosti povrchem pískovce. Je však potřeba brát v úvahu malý hloubkový dosah měřicího přístroje. Toto chování přímo souvisí s rychlou infiltrací povrchové vody a důvodem, proč se na povrchu netvoří povrchová b. křusta, která potřebuje vlhkost ke svému přežití. Všechna místa aktivního rozrušování na věži jsou bez povrchových b. krust, ovšem ne všechna místa bez biologického povrchu zvětrávání podléhají. Tvzení Slavíka et al.(v tisku–a), že přítomnost biologické skalní kůry může být následkem stability povrchů, nikoliv

jejich příčinou se v tomto případě nepotvrdila, i povrchy bez biologické kůry jsou často velmi stabilní.

6.2 Měření rychlosti infiltrace

Měření bylo prováděno za účelem prokázat vliv různých povrchových krust na schopnost pískovce infiltrovat vodu a ověřit tak teorii o mrazovém zvětrávání působícím na pískovcové věži, které se schopností infiltrovat vodu úzce souvisí. Mrazové zvětrávání je pravděpodobně jedním z nejvýznamnějších erozních procesů způsobující rozpad skalní věže. Tato teorie je podpořena viditelně rychlejším rozvolňováním materiálu v období mrazových dní, viz následující text. K nejvyššímu porušení pískovce dochází vlivem krystalizace ledu, kdy led pískovec trhá, ale zároveň zpevňuje. Jakmile led roztaje, tak se zrna uvolní a opadávají. Pokud bude však velký, tak bude objem mrznoucí vody větší. Vlhkost má pravděpodobně zásadní vliv na snížení pevnosti pískovce.

Zřetelný nárůst množství rozvolněného materiálu byl zaznamenán v období od 12. do 16. listopadu 2016, kdy se teploty střídavě pohybovaly kolem hodnoty 0 °C (obr. 64), a přšelo. Infiltrovaná voda mrzla a trhala materiál. Tento zaznamenaný proces poskytl vysvětlení, kdy dochází k největšímu porušení pískovce. Jedná se právě o výše popsané dny, kdy přes den prší, případně taje sníh na povrchu skály a v noci tato voda mrzne. Z toho vyplývá, že v letních měsících k rozpadu prakticky nedochází, což bylo také pozorováno.



Obrázek 64. Záznam naměřených teplot z automatického trhlino měru na věži čce

Pro měření povrchové nasákavosti pískovce byly použity Karstenovy trubice (obr. 65). Jedná se o skleněné trubice s obsahem 5 ml umožňující měřit nasákavost na svislém i vodorovném povrchu. Účinná infiltrační plocha je 5,56 cm². Měření je možné provádět pouze na relativně rovném povrchu, proto často nelze měření provést na místě, kde by to bylo nejvíce žádoucí.



Obrázek 65. Karstenovy trubice; A – horizontální; B - vertikální

Jako nejlepší způsob přichycení trubice k podkladu se osvědčila plastická hmota na plakáty např. od výrobce Bantex, která zajišťuje dostatečnou těsnost spoje a zároveň je možno jí po ukončení měření snadno a beze zbytku z povrchu odstranit. Po přichycení k povrchu je baňka doplněna vodou z plastové stříčky a začíná se měřit rychlost nasákavosti v různých časových intervalech v závislosti na rychlosti infiltrace. V případě pomalé infiltrace není třeba vodu doplňovat, v případě rychlé infiltrace se voda ze stříčky musí do trubice doplňovat i několikrát za dobu pokusu a tímto procesem se do měření může vnést určitá nepřesnost. Nevýhodou představuje vodní sloupec, který působí proměnným hydrostatickým tlakem v závislosti na své výšce. Nicméně metodika je stejná pro všechna měření a proto jsou jednotlivé výsledky porovnatelné.

Pro měření byly vybrány dva základní typy povrchů, které reprezentují většinový povrch skalní věže. Prvním typem je pískovec viditelně bez biologických, solných, železitých i kalcitových krust. Druhým typem je povrch pokrytý nějakým typem biologické krusty (mech, lišejník, sinice). Měření na solných a kalcitových krustách nebylo možné provést z důvodu jejich výskytu pouze na voštinách, jejichž nerovný povrch neumožňuje přilepení trubic a zároveň tento povrchu netvoří významný podíl povrchového pokryvu. Celkem bylo provedeno 10 měření, přičemž délka každého byla 15 minut (Hendrix 2013).

Jejich výsledek ukazuje na značný rozdíl nasákavosti mezi pískovcem bez krust a s nimi.

Nejvyšší nasákavost na sledované věži byla naměřena na pískovci bez viditelné krusty (obr. 66). Jedná se o nejvíce porušenou jižní stěnu. Zároveň zde byla naměřena jedna z nevyšších hodnot DR (25 mm) a druhá nejnižší hodnota ukazatele Q (17), viz následující kapitoly, což ukazuje na velmi málo odolný pískovec. Hodnota REI byla pouze 3 mm, povrch má tedy slabé povrchové zpevnění. Z obrázku je patrný vytvořený tmavý kruh z infiltrované vody o průměru 13 cm, který se vytvořil během pouhých 15 minut. Naměřená průměrná rychlost infiltrace na tomto místě byla $1,26 \text{ ml/cm}^2/\text{min}$, což je druhá nejvyšší hodnota ze všech měřených povrchů. Na tomto povrchu není vodě vůbec umožněno volně stékat po povrchu, veškerá voda se okamžitě vsakuje, což bylo ověřeno pokusem se stříčkou. Stříčka byla vzdálena přibližně 1 m od stěny a povrch byl z této dálky intenzivně smáčen proudem vody. Ani při tomto intenzivním smáčení nedocházelo k tečení po této vertikální stěně a veškerá voda byla ihned zasáknuta. Pokud na tuto stěnu prší, lze předpokládat, že téměř všechna voda bude zasáknuta. Těchto extrémně nasákavých míst je na jižní stěně několik, nicméně měření pomocí Karstenových trubic nebylo možné na všech provést z důvodu jejich nerovného povrchu. Orientační odhad byl proveden měřením stříčkou.

Materiál s vysokou infiltrační schopností bude velmi náchylný na mrazové zvětrávání. K mrazovému zvětrávání zde bude docházet pouze za specifických podmínek. Nestací jen výše popsaná dotace vodou přes den a mráz v noci. Vody musí být velké množství, aby byl snadno infiltrovatelný materiál dostatečně nasycen a teplotní přechod mezi „zámrným“ a „nezámrným“ bodem relativně rychlý tak, aby při mrznutí byl materiál ještě dostatečně nasycený. Vertikální stěna běžným deštěm smáčená není, ale vzhledem k převládajícímu směru větru, viz kapitola 4.4, může déšť dopadat na stěnu pod nepříznivým úhlem a stěnu infiltrovat. V zimních měsících nebrání okolní vegetace proudění větru a tak může relativně často k těmto podmínkám docházet. K infiltraci může také docházet v důsledku povrchového stékání vody vlivem hromadícího se materiálu ve stokovém kanálu (obr. 67).



Obrázek 66. A - ukázka infiltrovaného povrchu v okolí K. trubice; B – místo infiltrace, pohled z jihu



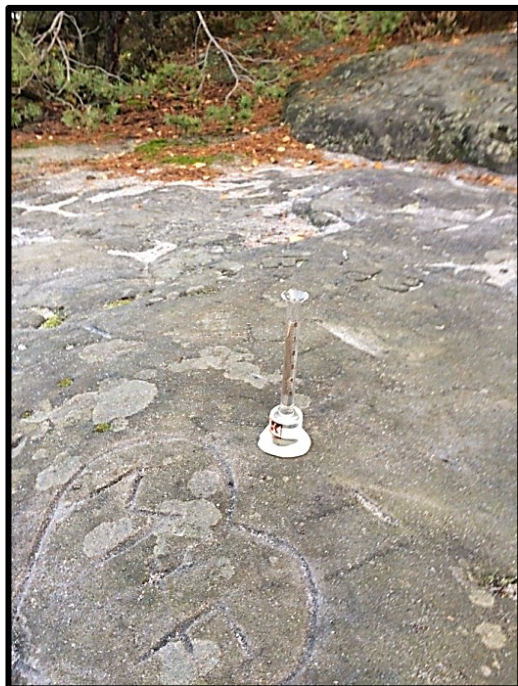
Obrázek 67. A - písek ve stokovém kanálu; B – viditelné stopy po stékajícím písku

Naopak nejnižší povrchová nasákavost na sledované věži byla naměřena na severní straně ve spodní části (obr. 68) a byla přibližně 10× nižší, než místo s největší infiltrací na věži. Jednalo se o povrch pokrytý sinicemi. Tato hodnota byla 0,13 ml/cm²/min. Při provedení pokusu se stříčkou jako v předchozím případě se povrch choval pro vodu odpudivě a téměř žádná voda se nevsákla. Podobné chování bylo pozorováno na všech typech povrchů pokrytých biologickou krustou.



Obrázek 68. Místo s nejnižší naměřenou infiltrací na skalní věži, pohled od severu

Celkově nejnižší hodnoty infiltrace byly naměřeny na vyhlídce (obr. 69) vzdálené cca 420 m vzdušnou čarou od skalní věže. Jednalo se o horizontální skalní povrch viditelně pokrytý biologickou kůrou ve formě lišejníků a sinic. Naměřené hodnoty byly 0,044 a 0,029 ml/cm²/min, tedy o dva řády nižší než maximální naměřené.



Obrázek 69. Místo s nejnižší naměřenou infiltrací na vyhlídce vzdálené přibližně 420 m od sledované skalní věže; severozápad Příhrazské vrchoviny

Zajímavá hodnota byla naměřena na povrchu s mechovým pokryvem, který byl pro měření odstraněn. Tento povrch nejevil žádné známky eroze. Na povrchu s mechovým pokryvem bylo měření provedeno pouze orientačně, neboť se nedařilo zajistit dostatečnou těsnost spoje mezi skleněnou trubicí a mechovým pokryvem. Bylo ovšem zřetelné, že docházelo k téměř nulovému vsaku. Po odstranění mechového povrchu docházelo k velmi rychlé infiltraci a to 1 ml/cm²/min. Pod mechovým pokryvem byl povrch pískovce velmi málo odolný s povrchem erodovatelným pouhým třením prsty. Hodnota DR zde byla naměřena 18 mm. Také naměřená vlhkost zde byla mnohem nižší, viz kapitola měření vlhkosti. Jasně se tedy ukazuje, že i velmi propustný a málo odolný materiál nemusí podléhat mechanickému rozpadu, pokud je pokrytý vrstvou, která ho zpevňuje, v tomto případě mechem. Rostliny mechu vzhledem k jejich fyziologii velmi ochotně absorbují vodu a po nasycení vodou již další vodu nepřijímají a pravděpodobně tak vytváří vrstvu se sníženou propustností, což velmi omezuje možnost infiltrace do podložního pískovce a mrazové zvětrávání. Zároveň kořenová vlákna jednotlivá zrna spojují a drží je pohromadě. Na základě tohoto pokusu se lze domnívat, že mech poskytuje materiálu výraznou ochranu před

povětrnostními vlivy. Pro ověření této hypotézy by však bylo vhodné provést celou sérii přesnějších měření, které Karstenova trubice neumožňuje.

Tabulka č. 11 zobrazuje souhrn všech naměřených hodnot. Z naměřených dat je zřetelně vidět rozdíl v infiltraci mezi povrchem s krustou a bez ní. Hodnoty naměřené na povrchu s krustou nikdy nepřesáhly infiltrační rychlost 0,8 ml/cm²/min. Na základě měření lze konstatovat, že povrch bez povrchové b. krusty bude infiltrovat vodu mnohem ochotněji, než povrch biologicky chráněný a zároveň tak bude mnohem náchylnější na mrazové zvětrávání. Tyto vlastnosti jsou pozorovány na sledované skalní věži.

							Průměr (ml/cm ² /min)
<u>bez biologické krusty</u> hodnoty infiltrace (ml/cm ² /min)	1,26	2,17	1,5	1			1,48
<u>s biologickou krustou</u> hodnoty infiltrace (ml/cm ² /min)	0,13	0,3	0,3	0,8	0,044	0,029	0,27

Tabulka 11. Souhrn naměřených hodnot

Slavík et al. (v tisku–b) prováděli v lomu Střeleč též měření nasákavosti pomocí Karstenových trubic. Na povrchu s b. krustou naměřili průměrnou hodnotu 0,288 ml/cm²/min, která se výrazně neliší od měření na pískovci v lokalitě Mužský (0,27 ml/cm²/min). Měření na povrchu bez b. krusty nahradili měřením nasákavosti pod povrchem (hloubka 30–80 mm) biologické krusty v laboratoři. Výsledkem tohoto laboratorního měření je, že nasákavost povrchu pískovce (povrch s b. krustou) v lomu Střeleč je v porovnání s jeho podložím (povrch bez b. krusty) 5,4× nižší (1,56 ml/cm²/min). Tyto hodnoty nemohou být

přímo porovnány s pískovcem ze studované lokality Mužský, protože měření pod povrchem nebylo možné z důvodu příliš destruktivního zásahu při odběru vzorků provést. Přesto jsou výsledky velmi podobné s měřením Slavíka et al. (v tisku–b), v lokalitě Mužský je nasákavost povrchu pískovce s b. krustou v porovnání s povrchem bez b. krusty 5,5× nižší.

Měření vlhkosti a rychlosti infiltrace lépe objasnilo proces mechanického rozpadu skalního materiálu. Původní teorie rozpadu způsobeného výskytem bobtnavého tmelu byla vyvrácena, což koreluje i s výsledkem měření RTG. Nejdůležitější pro odolnost pískovcového povrchu jsou skalní kůry, které povrch zpevňují a zároveň působí hydrofobně, což omezuje infiltraci a možnost mrazového zvětrávání. Na základě měření lze konstatovat, že v případě křemenných pískovců na lokalitě Mužský působí povrch s biologickou krustou pozitivně na jejich budoucí stabilitu a minimalizuje riziko jejich porušení. To je v rozporu s obecně uvažovanými názory na biologické pokrývy skalních povrchů (Schweigstillová et al. 2013, Paradise et al. 1997). Materiál bez biologické krusty představuje ve zkoumaném případě největší problém pro budoucí stabilitu věže.

6.3 Oslabení vlivem smáčení a vliv biologické krusty

Pokud pískovec podléhá zvětrávání, snižuje se jeho cementace a tím propojení zrn, což umožňuje povrchový rozpad materiálu. Bruthans et al. (2012a; 2014) prováděli výzkum pískovců v lomu Střeleč, které je možné těžít paprskem vody, nicméně v suchém stavu jsou velmi pevné a je nutné je těžít pomocí odstřelů. Střelečský pískovec se vyznačuje značným poklesem pevnosti při ponoření do vody, kdy dochází k jeho úplnému rozpadu. To je přisuzováno rostoucímu tlaku vzduchu v pórech vlivem pronikající vody. Tento tlak od sebe oddělí jednotlivá zrna, neboť mají velmi sníženou nebo dokonce žádnou cementaci.

Pro ověření, zda se pískovce ze zkoumané skalní věže při kontaktu s vodou chovají stejně, jako pískovce v lomu Střeleč, byl proveden pokus zaměřený na oslabení vlivem smáčení s pískovcem z lokality Mužský. Pokus je založen na ponoření pískovce do vody po dobu 7 dní. Tento pokus byl doplněn o

ponoření vzorků pískovce do 30% roztoku peroxidu vodíku též na dobu 7 dní. Pokus s peroxidem vodíku provedla rovněž Schweigstilllová et al. (2013) a byl zaměřen na prokázání zpevňovací schopnosti biologické kůry na povrchu pískovců, kdy během 7 dní došlo k rozpuštění tmavé biologické krusty na povrchu střelečského pískovce a pískovec se poté rozpadl.

Pro pokusy byly ze zkoumané skalní věže odebrány vzorky pískovce. Jednalo se o dva přirozeně oddělené a jeden ručně (kladivem) oddělený kus o maximálním rozměru 30 × 30 cm. První vzorek byl odebrán z horní části hlavní pukliny, druhý vzorek z vnitřní spodní části hlavní pukliny a poslední vzorek ze stěny pokryté sinicemi. Vzorek z horní pukliny byl tmavší a lehce pokryt skalní kůrou ve formě sinic, zatímco u vzorku ze spodní pukliny nebyla kůra na první pohled pozorovatelná a pískovec byl výrazně světlejší.

Pokus probíhal tak, že každý ze třech typů odebraných vzorků byl na týden vložen do skleněné nádoby (obr. 70) s 30% roztokem peroxidu vodíku nebo s obsahem vody, celkem tedy 6 vzorků. Poté se pozoroval rozpad materiálu. Množství opadaného a neporušeného materiálu bylo po vysušení zváženo. Jednotlivé hodnoty nabízí tabulka č. 12.



Obrázek 70. Vzorky pískovce ve vodě a v roztoku 30% peroxidu vodíku; dva vzorky zleva jsou ve vodě; vzorek na pravém okraji je v roztoku H₂O₂ a je zřetelně vidět jeho rozpad

Typ vzorku	Roztok	Počet dní v roztoku	Hmotnost rozvolněného materiálu [g]	Hmotnost nerozvolněného materiálu [g]	Celková původní hmotnost [g]	% rozvolněného materiálu
Z horní části pukliny, tmavší, bio kůra	H ₂ O	7	0,3	109	109,3	0,27
	H ₂ O ₂	7	0,6	108,4	109	0,65
Z dolní části pukliny, světlejší, kůra méně výrazná	H ₂ O	7	28,2	59	87,2	32,26
	H ₂ O ₂	7	80	0	80	100
Ze stěny silně pokryté sinicemi	H ₂ O	7	0,6	114,9	115,5	0,52
	H ₂ O ₂	7	50,3	64,6	114,9	43,9

Tabulka 12. Hodnoty při smáčení ve vodě a v roztoku peroxidu vodíku



Obrázek 71. Vzorek pískovce rozpadlý při vylévání roztoku H₂O₂

Vzorek odebraný z horní části hlavní pukliny měl více vyvinutou skalní kůru a po týdnu ve vodě došlo k prakticky nulovému opadu. I po vyjmutí z vody se nezdála být jeho pevnost snížena. Tento vzorek byl vysušen a na týden ponořen do 30% roztoku peroxidu vodíku. Po týdnu v tomto roztoku nedošlo k žádnému dalšímu výraznému opadu. V tomto případě se tedy neprokázal významných vliv povrchové biologické krusty na zpevnění povrchu pískovce. Mohlo se však jednat o pískovec z odolnější vrstvy.

Vzorek odebraný ze stěny s výrazným sinicovým pokryvem byl též na týden vložen do vody a do roztoku peroxidu vodíku. Po týdnu ve vodě došlo k zanedbatelnému uvolnění materiálu (0,52 %). Ten stejný vzorek byl opět vysušen a na týden ponořen do roztoku peroxidu vodíku. Je zajímavé, že skalní kůra v tomto případě nebyla úplně rozpuštěna. Rozpadl se materiál hlavně mimo skalní kůru a vnější strana s plochou pokrytou b. krustou byla porušena mnohem méně. Kůra tedy vytvořila na povrchu zónu zpevnění. Celkem se uvolnilo (43,9 %) materiálu. Nedošlo tedy k úplnému rozpadu jako v případě vzorku z dolní části pukliny a lomu Střeleč. Lze však předpokládat, že pokud by došlo k úplnému rozpuštění b. krusty, vzorek by se zcela rozpadl. Tím se potvrdila zpevňovací schopnost biologické skalní krusty.

Z výsledků měření je patrné to, co bylo prokázáno i dalšími pokusy. Pískovec na zkoumané věži může být v některých polohách velmi málo odolný. Odolnost je vyšší než v lomu Střeleč (Bruthans et al. 2012a, 2014), přesto je nízká, zejména tam, kde je méně rozvinutá skalní kůra. To dokazuje vzorek odebraný z dolní části hlavní pukliny, který se během týdne ve vodě z jedné třetiny rozpadl. V roztoku 30% peroxidu vodíku nebyl vzorek při ukončení pozorování zcela rozpadlý, nicméně při velmi malém mechanickém impulsu, ke kterému došlo při vylévání roztoku, se rozpadl zcela (obr. 71). Jednalo se o tak malý mechanický podnět, že zrna musela být držena pouze vlastním vzájemným zaklesnutím. Autor tedy považuje tento vzorek za zcela rozpadlý.

V případě zkoumané skalní věže na lokalitě Mužský nelze potvrdit takový zpevňující účinek biologické skalní kůry na povrchu pískovce, jako v případě střelečského pískovce (Bruthans et al. 2012a, 2014), kde při její absenci dojde k úplnému rozpadu pískovce.

6.4 Zjišťování kvality a relativní pevnosti povrchu

Provedení série těchto zkoušek bylo inspirováno článkem Bruthanse et. al. (2012a). Jedná se o velmi rychlou a účinnou metodu odporového vrtání pro zjišťování kvality a relativní pevnosti povrchu pískovce in situ. Tato metoda byla původně vyvinuta pro kontrolu pevnosti cihel a malty. Měření bylo prováděno pomocí na zakázku vyráběného zařízení PZZ-1 (obr. 72) osazeného vidiovým vrtákem o délce 70 mm a průměru 5 mm. Aby bylo možné porovnávat data z různých měření, byly všechny návrty prováděny se stejným nastavením přístroje, tedy vrtání na stupeň 1. Přístroj je vybaven ukazatelem aktuálního přítlaku a díky tomu lze mít při všech měřeních přítlak totožný. Bez toho by nebylo možné jednotlivá měření porovnávat. Počet otáček pro každý návrť je shodný a na přístroji přesně definovaný. Hloubka takto vzniklého návrťu byla měřena posuvným měřítkem.

Zatímco metoda REI zkoumá relativní odolnost pískovců vůči povrchové erozi, metoda DR má oproti měření REI výhodu průniku přes povrchovou vrstvu zpevnění a vypovídá tak lépe o pevnosti materiálu směrem do hloubky. Čím vyšší hodnota DR, tím nižší pevnost pískovec má a bude náchylnější na mrazové zvětrávání a mechanické porušení.

Z grafu naměřených hodnot (obr. 73) lze vypožorovat, že plochy bez krusty mají ve většině případů mnohem vyšší hodnoty DR. Průměrná naměřená hodnota na materiálu bez b. krusty je 20 mm, přičemž maximální naměřená hodnota je 33 mm. U materiálu s b. krustou je průměrná naměřená hodnota 12 mm a maximální naměřená je 22 mm. Zajímavostí je, že absolutně nejnižší hodnoty (5 mm) byly naměřeny na materiálu bez b. krusty. Jednalo se o vnitřní stěnu pukliny, viz obr. č. 74. Pokud z měření vynecháme tyto dvě nejnižší anomální hodnoty, byla hodnota DR naměřená na povrchu s b. krustou vždy vyšší, nebo rovna 17 mm. Podle měření Schweigstillové et al. (2013) má pískovec erodovatelný pouhým proudem vody nebo deštěm hodnotu DR alespoň 30 mm (3 body na lokalitě Mužský).

V porovnání s měřením v lomu Střeleč (Schweigstillová et al. 2013) je pískovec z lokality Mužský více odolný. Průměrná naměřená hodnota na povrchu bez b. krusty je v lomu Střeleč 51,3 mm (na lokalitě Mužský 20 mm). Průměrné naměřené hodnoty na povrchu pokrytém b. krustou se liší mnohem méně (16,7 mm v lomu Střeleč vs. 12 mm na lokalitě Mužský).



Obrázek 74. Hlavní puklina na věži

Shrnutím lze říct, že pískovec v lokalitě Mužský má bez b. krusty přibližně 1,6× vyšší hodnotu DR, než materiál s b. krustou. Z toho vyplývá, že místa nekrytá biologickou krustou mají mnohem nižší pevnost. V porovnání se střelečským pískovcem je pískovec z lokality Mužský více odolný.

6.5 Měření tahové pevnosti pískovce

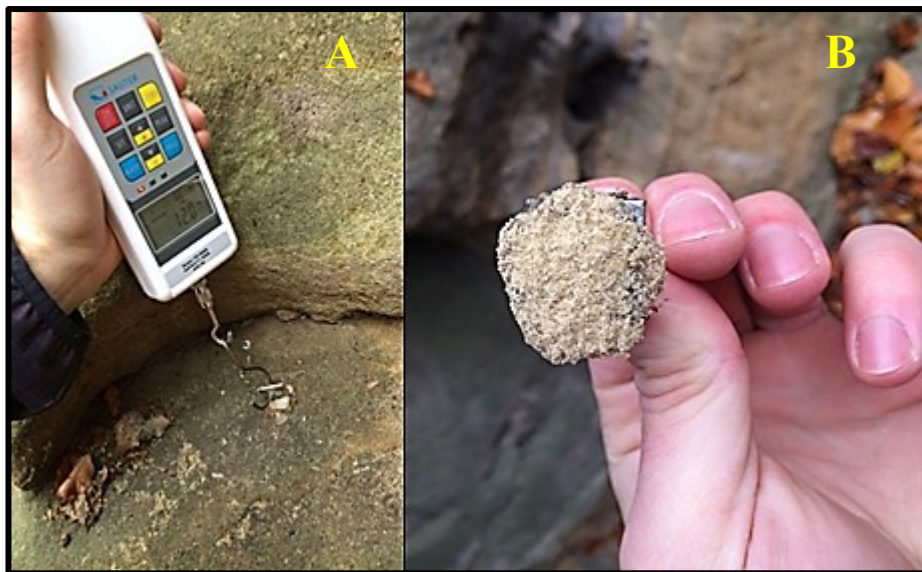
Měření tahové pevnosti kolmo na povrch pískovce bylo prováděno za účelem porovnání pevnosti naměřené na různých typech povrchů. Zejména se jednalo o to, zda bude naměřen rozdíl na povrchu s biologickou krustou a bez ní. Jako povrch s b. krustou je v tomto případě označen povrch pokrytý sinicemi a lišejníkem. Na povrchu pokrytém mechem nebylo možné měření provést. Měření bylo možné provést až po jejich odstranění, kdy se ovšem materiál chová jako povrch bez krusty.

K měření bylo potřeba hliníkových T–profilů o čtvercovém rozměru 2 x 2 cm (obr. 75), epoxidové lepidlo a siloměr. Hliníkové T–profily byly na povrch pískovce přilepeny pomocí epoxidového lepidla. Jako nejlepší se osvědčilo použití lepidla od značky Pattex, které není potřeba ručně míchat, ale obě složky se promíchají ve speciálním směšovači již při vytlačování z tuby, což výrazně urychluje aplikaci. Při prvním pokusu se vyskytl problém s tuhnutím lepidla, které potřebuje dostatečnou teplotu okolního vzduchu pro vytvrzení (alespoň 10 °C), neboť bylo prováděno za teploty okolního vzduchu cca 3 °C. Proces měření proto musel být opakován za vhodnějších klimatických podmínek. Po dostatečném vytvrzení lepidla byla pomocí siloměru Sauter FH 500 (obr. 76A) měřena tahová síla potřebná k odtržení T–profilu od skalního povrchu. Tato síla působící v kolmém směru byla postupně pomalu zvyšována, než došlo k odtržení profilu. Po odtržení byl na milimetrový papír obkreslen tvar odtrženého pískovce (obr. 76B), aby mohlo dojít k výpočtu plochy odtržení a následně ke stanovení tahové síly v kPa.

Pro měření byla vybrána místa vystavená klimatickým jevům i místa před nimi dostatečně chráněná. Naměřená data byla porovnána s výsledky měření v lomu Střeleč a skalním městě Apolena uskutečněnými Bruthansem et al. (2012a), kteří tuto metodu použili jako první.

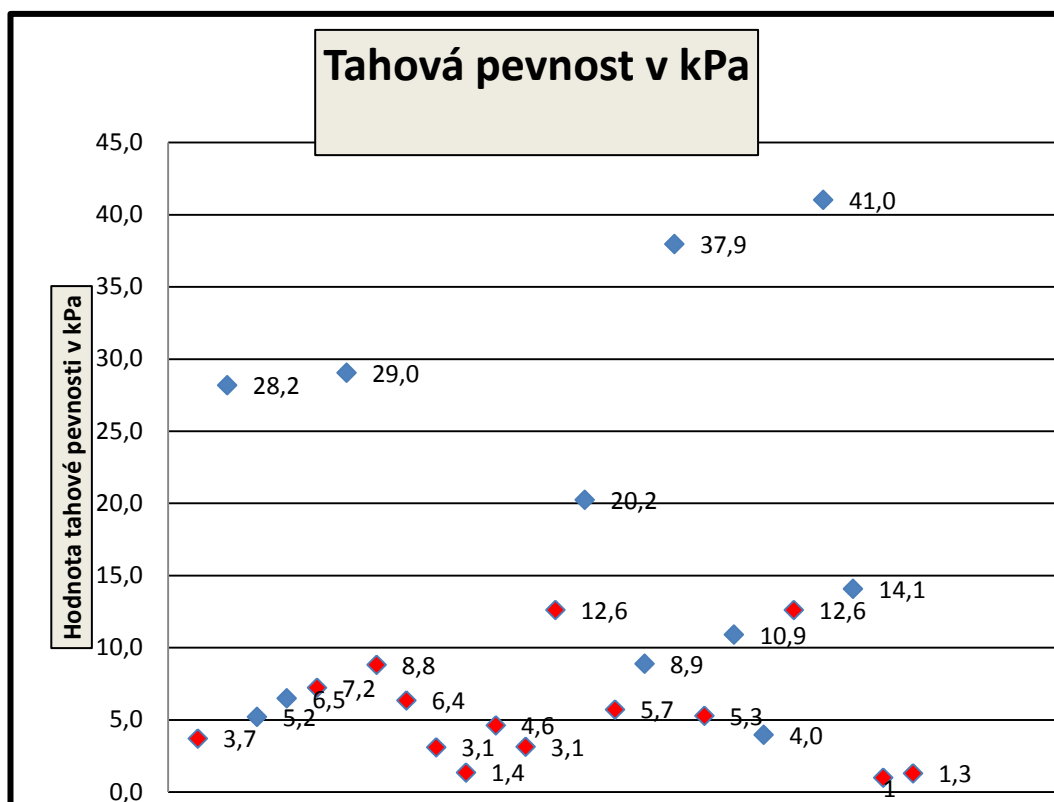


Obrázek 75. Hliníkový T–profil o rozměru 2 × 2 cm přilepený epoxidem ke skalnímu povrchu



Obrázek 76. A - měření tahové pevnosti pomocí přístroje Sauter FH 500; B - odtrhnutý štítek

Celkem bylo provedeno 25 měření na skalní věži i okolních objektech v okruhu vzdálenosti 5–420 m od skalní věže. Na povrchu bez krusty bylo provedeno 14 měření, na povrchu s krustou 11 měření. Celkové výsledky naměřených hodnot jsou zobrazeny na obr. č. 77.



Obrázek 77. Červené body jsou hodnoty tahové pevnosti na povrchu bez b. krusty, modré na povrchu s b. krustou

	průměr kPa	max. kPa	min. kPa
bez krusty	5,5	12,6	1,0
krusta	18,7	41,0	4,0

Tabulka 13. Rozsah a průměr naměřených hodnot tahové pevnosti pro jednotlivé typy povrchů

Rozsah naměřených hodnot je od 1 kPa do 41 kPa. Nejnižší naměřená hodnota byla na povrchu bez krusty, naopak nejvyšší naměřená pochází z povrchu krytého biologickou krustou, viz tabulka č. 13. Z tabulky je vidět, že pro povrch bez krusty jsou naměřené hodnoty ve většině případů nižší, než na povrchu s krustou. Průměrná naměřená hodnota na povrchu bez krusty je 3,4 × nižší, než na povrchu s krustou.

Při porovnání hodnot naměřených Bruthansem et al. (2012a), v lomu Střeleč a skalním městě Apolena jsou hodnoty naměřené v oblasti Mužského na povrchu bez skalních kůr velmi podobné, zatímco hodnoty z povrchu se skalní

kůrou jsou zde většinou výrazně nižší, zejména v porovnání s lomem Střeleč. Porovnání hodnot nabízí tabulka č. 14.

	kůra	bez kůry
Mužský	4 – 41	1 – 12,6
Střeleč	64 – 183	2 – 14
Apolena	23 – > 150	7 – 19

Tabulka 14. Hodnoty tahových pevností v kPa ze třech různých lokalit (Bruthans et al. 2012a)

Z naměřených hodnot vyplývá, že pískovec na zkoumané lokalitě je ve většině případů ještě méně odolný, než pískovec na lokalitách Střeleč a Apolena. Výsledek je tedy zcela opačný od měření DR, viz kap. 6.4. Tato odlišnost je pravděpodobně způsobena jinou odolností pískovce na povrchu a v podloží, protože každá metoda měří v jiné z těchto částí. Povrch pískovce na lokalitě Mužský bude pravděpodobně cementován pouze biologickou složkou s obsahem jílovitých částic přenášených větrem a zachyceného na povrchu. Obsah křemičitého, železitého a kalcitového tmelu bude pravděpodobně minimální. Dle Bruthanse et al. (2012a) má biologicky cementovaná zóna většinou mocnost 0,5–1 mm.

Vliv na měření mohly mít klimatické podmínky, zejména zvýšená vlhkost prostředí a nižší teplota v období, kdy bylo měření prováděno. Z výsledku měření Bruthanse et al. (2012a) vyplývá, že pokud je pískovec plně nasycený, dochází k výraznému poklesu tahové pevnosti až o 2 řády, např. v lomu Střeleč byla tahová pevnost erodibilního pískovce za přirozené vlhkosti v rozmezí 2–14 kPa, zatímco při plném nasycení to bylo jen 0,1–0,6 kPa. Vzhledem k tomu, že při měření na lokalitě Mužský pískovec zcela jistě plně nasycený být nemohl a jeho vlhkost se spíše blížila vlhkosti přirozené, lze předpokládat, že maximální naměřené hodnoty nebudou za příznivějšího počasí o moc vyšší. Této snížené odolnosti odpovídá také velmi snadná rýpatelnost pískovcového povrchu prakticky jakýmkoliv předmětem a s tím související poškozování turisty.

6.6 Měření pevnosti pomocí Schmidtova kladiva

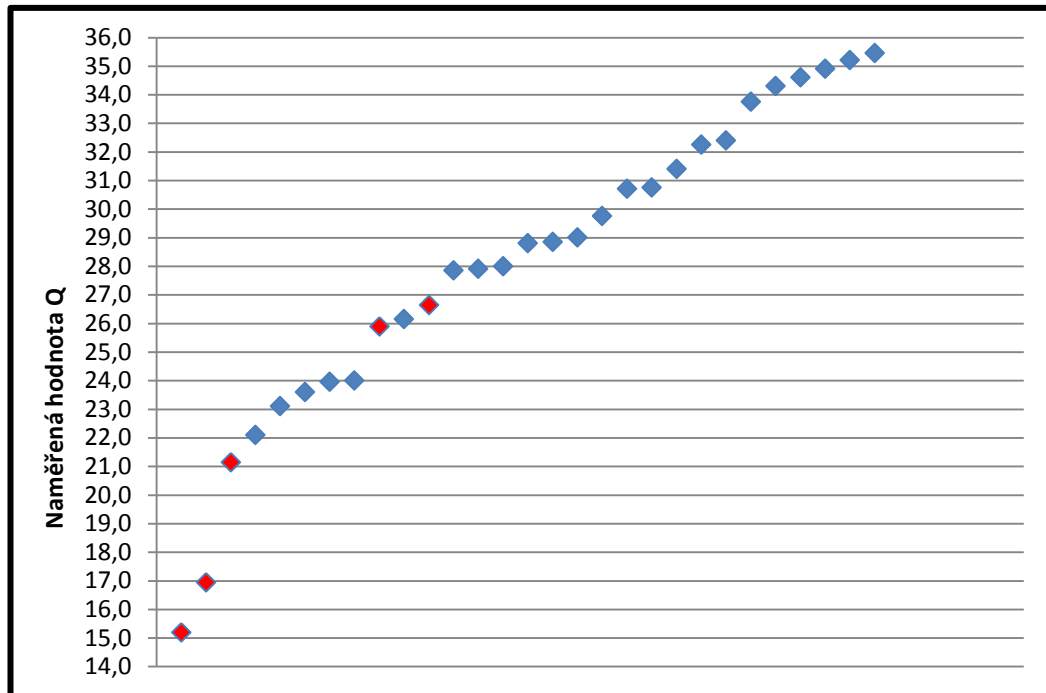
Schmidtovo kladivo bylo vyvinuto v roce 1948 pro nedestruktivní zkoušky tvrdosti betonu a později nalezlo uplatnění také v práci geomorfologů (Goudie 2006). Díky rychlosti, cenové dostupnosti, jednoduchému procesu kalibrace, snadné obsluze a nulovému vlivu teploty byla snaha kladivo používat i pro charakteristiky dalších horninových vlastností, jako je např. pevnost v tlaku. Nicméně se ukázalo, že přibližný odhad pevnosti v tlaku lze použít jen při vysokém počtu naměřených hodnot (Goudie 2006).

Měření tvrdosti pískovců na lokalitě Mužský bylo prováděno pomocí digitálního Schmidtova kladiva typu N značky SilverSchmidt, jehož hlavní výhodou oproti mechanickému kladivu je, že není nutné provádět korekce při měření proti směru gravitace, přístroj je zavede sám (Proceq 2007). Toto kladivo umožňuje rozsah měření 10–100 N/mm². V menu kladiva je možné nastavit požadované výstupní jednotky (Q; kg/cm²; N/mm²; psi; MPa). Pro měření byla zvolena první možnost, tedy hodnota Q, která představuje koeficient odrazu. Je počítána z rychlosti dopadu a odrazu bezprostředně před a po nárazu (Proceq 2007). Hodnota Q má přímý vztah s jednotkou R, která je odvozena pouze od odskoku kladiva při úderu a má řadu nevýhod. Je například ovlivněna gravitací, třením apod. Hodnota Q je očištěna o všechny tyto další vlivy a je tedy přesnější. (Proceq 2007)

V různých informačních zdrojích lze narazit na celou řadu možných postupů měření a vyhodnocení zkoušek prováděných Schmidtovým kladivem. V této práci byl aplikován systém, který je upraveným postupem doporučeným ASTM (C805/C805M – 13a). Dle ústního sdělení Blahůta se používá v ÚSMH AV ČR, tedy v každé sérii se provede 12 měření na jedné lokalitě, dvě nejnižší hodnoty se odstraní a se zbylými hodnotami se dále statisticky pracuje. Body měření by měly být vzdáleny nejméně o průměr pístu kladiva a pokus by měl být prováděn na blocích o hmotnosti alespoň 25 kg (Proceq 2007).

Celkem bylo na pískovcích v lokalitě Mužský provedeno 29 sérií měření, z toho zkoumané skalní věži náleží 13 sérií. Průměrné hodnoty Q jednotlivých sérií zobrazuje obr. č. 78 a tab. č. 15. Z naměřených hodnot je patrné, že se opět na

tvrdosti pískovce pozitivně projevuje vliv b. krusty. Hodnoty Q naměřené na povrchu bez biologického pokryvu se pohybují při spodní hranici rozsahu získaných hodnot. Minimální naměřená jednotlivá hodnota ($Q = 15$) byla získána na povrchu bez b. krusty v puklině, kde je instalován přístroj TM-71. Maximální naměřená jednotlivá hodnota ($Q = 35,5$) pochází z povrchu voštin na sledované skalní věži.



Obrázek 78. Naměřené hodnoty Q; červené hodnoty značí místa bez výskytu viditelného biologického pokryvu

Místo	Průměrná hodnota Q
Zkoumaná skalní věž	28,1
Puklina s TM-71	15,2
Voštinové povrchy na věži	29,5
Zbylá místa mimo skalní věž	28,9
Průměr povrchů bez viditelné bio krusty	21,2
Průměr ostatních povrchů	29,5
Maximální jednotlivá naměřená hodnota Q (na sledované věži)	42
Minimální jednotlivá naměřená hodnota Q (puklina s TM-71)	10
Průměrná hodnota v lomu Střeleč	18,1 [R]
Průměrná hodnota ve skalním městě Apolena	23 [R]

Tabulka 15. Přehled naměřených hodnot Q; ve skalním městě Apolena a v lomu Střeleč jsou hodnoty v R

Selby (1982) rozdělil horniny do 5 skupin podle dosahovaných hodnot ukazatele R (méně přesný ekvivalent Q) od nejměkčích po nejtvrďší (obr. 79). Ze získaných hodnot vyplývá, že na žádném povrchu v lokalitě Mužský nebyla hodnota Q větší než 30 a lze ji tak zařadit do skupiny nejměkčích horninových materiálů, ačkoli se pískovce běžně vyskytují ve třetí kategorii s hodnotou R v rozmezí 40–50. Měření prokázalo, že pískovec skalní věže není měkčí, než jiné pískovce na lokalitě, což potvrzuje závěry z předchozích kapitol, tedy vysoký vliv přítomnosti skalní kůry na stabilitu a odolnost povrchů. Na povrchu bez biologické krusty dochází k větší infiltraci a tím k rozpouštění cementace, což prokazatelně významně oslabuje pískovec a vede ke snadnějšímu zvětrávání.

Bruthans et al. (2012a) prováděli v lomu Střeleč a ve skalním městě Apolena také měření Schmidtovým kladivem. Dosahované hodnoty R v lomu Střeleč byly 10–35, přičemž téměř polovina naměřených hodnot R byla menších než 12. Ve skalním městě Apolena byl rozsah naměřených hodnot R 13–31, přičemž většina hodnota byla vyšších než 17. Při porovnání těchto hodnot s hodnotami naměřenými v lokalitě Mužský vyplývá, že pískovce z lokality Mužský mají blíže k pískovcům z lokality Apolena. Nepotvrdil se závěr měření pevnosti v tahu, že pískovec je méně odolný, než lokality Střeleč a Apolena. Naopak se potvrdil závěr z měření odporového vrtání (DR).

Table 2 Approximate strength classification of rock

Description	Uniaxial compressive strength, MPa	Point load strength $I_{s(50)}$, MPa	Schmidt Hammer N-type, 'R'	Characteristic rocks
Very weak rock – crumbles under sharp blows with geological pick point, can be cut with pocket knife	1–25	0.04–1.0	10–35	Weathered and weakly compacted sedimentary rocks – chalk, rock salt
Weak rock – shallow cuts or scraping with pocket knife with difficulty, pick point indents deeply with firm blow	25–50	1.0–1.5	35–40	Weakly cemented sedimentary rocks – coal, siltstone, also schist
Moderately strong rock – knife cannot be used to scrape or peel surface, shallow indentation under firm blow from pick point	50–100	1.5–4.0	40–50	Competent sedimentary rocks – sandstone, shale, slate
Strong rock – hand-held sample breaks with one firm blow from hammer end of geological pick	100–200	4.0–10.0	50–60	Competent igneous and metamorphic rocks – marble, granite, gneiss
Very strong rock – requires many blows from geological pick to break intact sample	>200	>10	>60	Dense fine-grained igneous and Metamorphic rocks – quartzite, dolerite, gabbro, basalt

Modified from Selby, 1993: Table 5.3.

Obrázek 79. Rozdělení hornin do 5 skupin podle dosahovaných hodnot ukazatele R (Selby 1982)

7 Diskuse

V části diplomové práce, která se zabývá analýzou svahových pohybů, byl výzkum zaměřen zejména na poslední dva roky vývoje a plynule navázal na výzkumy, které na lokalitě probíhají od roku 1990 pod vedením Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i. Výsledky výzkumu byly porovnány s tímto dlouhodobým pozorováním a doplněny o analýzu trendů současných i budoucích.

Byl sledován vývoj pohybů na porušené skalní věži v blízkosti Studeného průchodu a trhliny mezi dvěma pískovcovými bloky, která je od věže vzdálena vzdušnou čarou přibližně 420 m. V trhlíně byly analyzovány dlouhodobé záznamy pohybů na 3 dilatometrických bodech měření a pohyby na přístroji TM-71. Na porušené skalní věži byly vyhodnoceny pohyby na 5 dilatometrických bodech měření a na automatickém trhlinoměru, který byl nově instalován v rámci diplomové práce. Všechna data byla korelována s vývojem hladiny podzemní vody ve vrtech OL-1,2 a PŘ-1,2 i s daty meteorologickými.

Monitoring na skalní věži nepotvrdil závěry Stemberka et al. (2016) o zastavení pohybů. Ve zmiňované studii však chyběla nejnovější data, data z automatického trhlinoměru. Je pravda, že do roku 2012, kdy došlo ke zřícení části věže, byly pohyby věže mnohem dynamičtější, nicméně ani poté neustaly. Zároveň nebyla potvrzena hypotéza o vlivu kořenů sousedního stromu, ačkoli nepatrný vliv kořeny mít mohly.

Nebyl prokázán vztah mezi pohyby monitorovacích bodů na věži a srážkovými úhrny, stejně tak vliv teploty je minimální. Je zajímavé, že pohyby nekorelují s výkyvy h.p.v v okolních vrtech (PŘ-1,2 a OL-1,2), ačkoli to autor před začátkem výzkumu předpokládal. Měření ve vrtech však není kontinuální a proto nelze vyvodit jednoznačný závěr. V posledních 2 letech se aktivita věže mírně zvýšila, nejedná se však o dramatické změny. Horní část poloviny věže se pomalu vyklání a spodní část naopak uzavírá. Tyto pohyby jsou podle měření doprovázeny i pomalým rotačním pohybem. Je pravděpodobné, že věž se pohybuje pomalými plouživými pohyby po svahu směrem dolů, k ověření by však bylo potřeba pohyby věže porovnat se stabilními stacionárními body v okolním terénu a takové měření by pravděpodobně bylo velmi nákladné, neboť existuje

možnost pohybu celého svahu. Autor při současné rychlosti pohybů předpokládá rozevření trhlin v následujících letech maximálně o jednotky milimetrů. Tyto pokračující pohyby ohrožují stabilitu zejména vrchních partií věže, kde hrozí zřícení oddělených skalních bloků. K ověření stability těchto vrchních partií by bylo vhodné doplnit systém monitoringu o další body měření. Na jihozápadní stěně věže hrozí zřícením blok o objemu 0,8–2,5 m³, jehož monitoring je však prakticky nemožný. Je nutné uvědomit si možné nepřesnosti při ručním odečtu většiny dilatometrických dat.

V puklině na severozápadní straně Příhrazské vrchoviny, osazené třemi dilatometrickými body měření a přístrojem TM-71, pohyby pokračují od roku 1990 a za dobu monitoringu se vývoj nezměnil. Vývoj zde naměřených pohybů nesouvisí s pohybem na sledované skalní věži, oba systémy jsou na sobě nezávislé. Pohyby zde jednoznačně reagují na výkyvy h.p.v, srážkové úhrny i teplotní změny. Byl potvrzen závěr Rybáře et al. (2007), že dochází k posunu bloků směrem k okraji vrchoviny a opakovanému zavírání a otevírání trhliny s jarním táním sněhu. Detailní rozbor ukázal, že také dochází k pomalému výzdvihu bloků (vertikální pohyb), který je pravděpodobně způsoben bobtnáním a smršťováním smektitu v podložních vrstvách. Stejně jako na sledované skalní věži je nutné brát v úvahu možné nepřesnosti při ručním odečtu většiny dilatometrických dat.

Další část práce byla věnována objasnění zvýšené náchyllosti skalní věže ke zhoršeným stabilitním poměrům. Proto byly provedeny polní i laboratorní zkoušky. Hlavním předpokladem bylo působení mrazového zvětrávání, které se potvrdilo. Nejintenzivnější je za specifických klimatických podmínek, kdy se teplota pohybuje střídavě nad a pod bodem mrazu v krátkém časovém intervalu a zároveň je do pískovce infiltrována srážková voda. Nejdůležitější podmínkou mrazového zvětrávání je schopnost pískovce infiltrovat vodu, která je zde velmi vysoká. V souvislosti s tím se ukázala velmi významná role v přítomnosti či nepřítomnosti skalních kůr.

Pro objasnění mineralogického složení pískovcové věže byla provedena rentgenová difrakce, jejímž cílem bylo potvrdit hypotézu o zvýšeném výskytu bobtnavého jílového minerálu montmorillonitu, který by vlivem sycení vodou

rozpad materiálu urychloval. Tato hypotéza však byla zcela vyvrácena. Výsledky byly porovnány s pískovcem v lomu Střeleč (Bruthans et al. 2012a). Stejně jako ve Střelči byl v pískovci na porušené věži nalezen obsah illitu (většinou do 1 %). V povrchové vrstvě bylo množství illitu v pískovci věže mnohem vyšší (až 67 %), což si autor vysvětluje jako materiál zachycený větrem v povrchové biologické krustě, která má rozhodující význam na odolnost pískovce, jak ukázal následující výzkum. V lomu Střeleč nebyl obsah illitu vyšší než 1 %, je však možné, že nebyly analyzovány povrchové vzorky. Stejně tak na rozdíl od lomu Střeleč nebyl v pískovci z lokality Mužský detekován obsah kaolinitu. Celá analýza je subjektivní proces, což je nutné ve výsledcích zohlednit. Podle výsledku RTG difrakce lze pískovec zařadit mezi čistě křemenné pískovce s minimem obsahu jílových částic, což potvrdila i zrnitostní zkouška provedená v laboratoři. Na základě korelace těchto dvou zkoušek je pravděpodobně RTG difrakce vyhodnocena správně.

Velké úsilí bylo věnováno výpočtu množství vyplaveného materiálu z hlavní pukliny ve věži. K tomu bylo využito 3D modelů sestavených z detailních fotografií. Celkové množství vyplaveného materiálu spočítané na základě těchto modelů bylo určeno přibližně na 50 kg, což je za dobu cca 2 let vysoké číslo. Průměrné množství vyplaveného materiálu za rok je přibližně 25 kg, s měsíčním průměrem cca 2 kg. Nebyl potvrzen vztah přímé úměrnosti mezi množstvím srážek a množstvím vyplaveného materiálu. Všechny 3D modely se nepodařilo správně vytvořit, pravděpodobně z důvodu nekvalitních fotografií, nicméně vzhledem ke složitosti procesu tvorby modelů, nebylo možné tyto chyby zpětně napravit. Pro přesnější hodnoty by bylo třeba získat větší množství dat z dlouhodobějšího monitoringu. V poslední době dochází ke splavování materiálu po boční stěně věže, pravděpodobně vlivem ucpané pukliny. To komplikuje výpočet množství vyplaveného materiálu, který do sledované pukliny nepřitéká v takovém množství. Pro další monitoring i stabilitu věže by bylo vhodné tento ucpaný otvor vyčistit, stékající voda může v zimních měsících přispívat k mrazovému zvětrávání.

Rozhodující pro odolnost pískovce vůči zvětrávání je přítomnost biologické krusty na jeho povrchu. To bylo prokázáno řadou měření na

pískovcové věži i okolních pískovcích lokality Mužský. Kurz a Netoff (2001) prokázali stabilizující vliv mikroorganismů na slabě cementované pískovce a jejich vliv na ochranu před větrnou a vodní erozí. Stejně tak Slavík et al. (v tisku-a) prokázali významný vliv biologické krusty, dokonce větší než cementace. Ke stejným závěrům dospěl výzkum v lokalitě Mužský. Kolonizace povrchu pískovce zkoumané skalní věže mikroorganismy byla potvrzena analýzou zaměřenou na obsah organického uhlíku.

První metodou, která potvrdila výrazný rozdíl v odolnosti ve prospěch pískovce pokrytého biologickou krustou, bylo měření relativní erodovatelnosti (REI). Tento pokus byl inspirován Bruthansem et al. (2013), který stejný pokus provedl v lomu Střeleč, ovšem s nepatrně jiným záměrem. Povrch s b. krustou měl hodnotu REI vždy do 3 mm, zatímco povrch bez ní ve většině případů výrazně nad 3 mm. Stejně výsledky poskytlo měření REI v trhlině s přístrojem TM-71. Na základě toho se autor domnívá, že pískovce na lokalitě Mužský, včetně sledované skalní věže, jsou tvořeny různě odolnými polohami a přitom se nejedná o vrstvy. Většina povrchů je však pokrytá biologickou krustou a proto jsou před erozí chráněny. Místa bez krusty zase nebývají vystavena působení klimatických jevů, nebo mají nižší propustnost pro vodu vlivem povrchové cementace.

Klíčovou vlastností pro mrazové zvětrávání je schopnost povrchu infiltrovat vodu. Proto byly provedeny zkoušky zaměřené na rychlost infiltrace jednotlivých typů povrchů a také na rychlost ztráty jejich vlhkosti. Obě zkoušky prokázaly, že povrchy bez biologických krust snáze infiltrují vodu a zároveň na povrchu velmi rychle vysychají. To znemožňuje tvorbu nové b. krusty a zároveň činí tento materiál náchylnější k mrazovému zvětrávání. Všechna místa aktivního rozrušování na skalní věži jsou bez b. krusty. Rozdíl v rychlosti infiltrace v rámci sledované skalní věže byl až desetinásobný. Celkově byla infiltrační rychlost v rámci celé lokality Mužský na povrchu bez biologické krusty 5,5× vyšší oproti povrchu s krustou. Naměřené hodnoty se téměř shodují s pískovcem v lokalitě Střeleč (Slavík et al. v tisku-b). Byl prokázán pozitivní vliv b. krust na budoucí stabilitu a minimalizaci pravděpodobnosti porušení pískovců v lokalitě Mužský. Materiál bez této ochranné vrstvy představuje největší problém pro budoucí

stabilitu věže. Měření nasákavosti může být zatíženo chybou způsobenou nedokonalostí měření.

Další laboratorní pokus zaměřený na porovnání vlastností pískovce zkoumané skalní věže s pískovcem střelečským (Bruthans et al. 2012a, 2014) a na prokázání zpevňovací schopnosti b. krusty (Schweigstilllová 2013), byl pokus s ponořením pískovce do vody a roztoku peroxidu vodíku. Pokus nepotvrdil tak významnou roli b. krusty jako u střelečského pískovce, přesto však v souladu s ostatními pokusy dokázal její významný vliv při ochraně proti zvětrávání. Zároveň poukázal na vyšší odolnost pískovce ze zkoumané lokality oproti pískovci ze Střelče. Pro zvýšení vypovídající schopnosti výsledků by bylo vhodné pokus provést na dalších vzorcích.

Na základě předchozích měření autor dospěl k názoru, že primárním impulsem pro další rozvolňování skalní věže bylo vytvoření hlavní pukliny na věži v roce 1990 (Stemberk et al. 1999). Tato puklina odkryla méně odolné části pískovce s vysokou schopností infiltrace a umožnila tak intenzivní rozrušování pískovce působením mrazu. Vznik pukliny mohl vést k poklesu napětí kolem pukliny (Bruthans et al. 2014) a materiál kolem této pukliny začal být náchylnější na rozvolňování. K rozpadu dále přispívá intenzivnější proudění větru z této strany (Sobíšek 2000), který působí abrazivně na oslabený povrch, snižuje vlhkost skalního povrchu a v zimních měsících povrch ochlazuje, čímž přispívá k mrazovému zvětrávání. V zimních měsících je věž více osluněna a tím může docházet k časté změně teploty povrchu věže. Mrazové zvětrávání může být podpořeno povrchovým stékáním vody po stěně věže vlivem ucpání hlavní odtokové pukliny. Proto by měla být tato puklina vyčištěna.

Poslední série zkoušek byla zaměřena zejména na ověření mechanických vlastností pískovce a jejich porovnání s okolními lokalitami. Zkoušky byly inspirovány Bruthansem et al. (2012a) a Schweigstilllovou et al. (2013). Jednalo se o zjištění relativní pevnosti povrchu, jeho tahové pevnosti a tvrdosti.

Měřením relativní pevnosti povrchu metodou odporového vrtání (DR) byla opět prokázána vyšší mechanická odolnost pískovce s b. krustou. Průměrná naměřená hodnota hloubky vyvrtaného otvoru na povrchu bez b. krusty byla 1,66× vyšší než na povrchu s b. krustou (20 vs. 12 mm). Znovu se prokázala vyšší

odolnost pískovce na lokalitě Mužský v porovnání s lokalitou Střeleč (Schweigstilllová et al. 2013). V porovnání s lokalitou Střeleč je hodnota DR pískovce ze zkoumané lokality na povrchu bez b. krusty 2,6× nižší (51,3 vs. 20 mm) a na povrchu s b. krustou 1,4× nižší (16,7 vs. 12 mm). Rozdíl v hodnotách naměřených na povrchu s b. krustou je poměrně malý, při započtení nepřesnosti měření může být ještě nižší.

Značné množství počtu měření pomocí Schmidtova kladiva jednoznačně prokázalo větší tvrdost pískovců pokrytých biologickou krustou. Na základě škály Selbyho (1982) byl pískovec na lokalitě Mužský zařazen do skupiny nejměkčích horninových materiálů. Neprokázano se, že by pískovec na zkoumané skalní věži byl měkčí, než jiné pískovce v okolí na stejné lokalitě. Porovnání hodnot s lomem Střeleč a skalním městem Apolena (Bruthans et al. 2012a) ukázalo na vyšší odolnost mužského pískovce. Hodnoty se však příliš neliší od skalního města Apolena.

Jediným pokusem, který ukázal na nižší odolnost mužského pískovce oproti pískovci střelečskému, byl pokus zaměřený na zjišťování rozdílu v tahové pevnosti povrchu s b. krustou a bez ní. Jednoznačně potvrdil závěry předchozích pokusů ve vyšší odolnosti povrchu s b. krustou, jehož tahová pevnost byla oproti povrchu bez b. krusty 3,4× vyšší. Při porovnání hodnot z lomu Střeleč a skalního města Apolena (Schweigstilllová et al. 2013) jsou hodnoty naměřené v oblasti Mužského na povrchu bez b. krust velmi podobné, zatímco hodnoty na povrchu s b. krustou jsou výrazně nižší. Tato metoda však může být ze všech použitých metod nejvíce ovlivněna chybami v měření, vliv mohly mít klimatické podmínky, zejména pak zvýšená vlhkost v období, kdy bylo měření prováděno.

8 Závěr

Analýza svahových pohybů prokázala pokračující pohyby na obou vybraných místech Příhrazské vrchoviny, ačkoli oba systémy jsou na sobě nezávislé a každý z nich je ovlivněn jinými činiteli. V severovýchodní části vrchoviny, v puklině s přístrojem TM-71, se potvrdil pokračující pohyb podél všech monitorovaných os (x, y, z). Tento pohyb je ovlivněn výkyvy hladiny podzemní vody, s tím související srážkovou intenzitou a také mění se teplotou okolí.

Pohyb porušené skalní věže není přímo ovlivněn srážkami, teplotou ani kolísáním hladiny podzemní vody. Pohyb se nezastavil pádem její části v roce 2012, ale dále pokračuje, ačkoli se rychlost pohybů značně zpomalila. V dubnu 2016 došlo k „odblokování“ bloku hrozícího zřícením a tím k obnovení jeho pohybů. Věž se v současné době pohybuje pomalým vykláněním do svahu a tento pohyb doplňuje mírnou rotací. Pohyb pokračující rychlostí přibližně 0,6 mm/rok zvyšuje pravděpodobnost zřícení nestabilních částí věže, ačkoli tato rychlost nejspíše umožní v následujících letech rozevření pouze v řádu jednotek mm.

Byla vyvrácena hypotéza o negativním působení kořenového systému přilehlého stromu na stabilitu věže. Jako zcela zásadní pro stabilitu věže se ukázalo být zvětrávání v kombinaci s přítomností či nepřítomností biologických skalních krust a uvolnění napětí kolem hlavní pukliny. Pomocí 3D modelů se podařilo spočítat přibližný úbytek materiálu z věže, který je cca 20 kg za rok. Tento materiál je rozvolňován zejména vlivem mrazového zvětrávání a deštěm splavován do hlavní pukliny porušené skalní věže.

Rentgenová difrakce neprokázala obsah bobtnavého jílového minerálu montmorillonitu, který by podporoval zvětrávání, nicméně ukázala na vysoký obsah illitu v povrchové vrstvě. Tento materiál je zachycen na povrchu biologické krusty a snižuje propustnost pro vodu. Zkoušky prokázaly zcela zásadní význam biologických krust pro ochranu pískovce před zvětráváním a její přítomnost téměř s jistotou zaručí pískovci vysokou mechanickou odolnost. Vyšší odolnost pískovce pokrytého biologickou skalní krustou prokázaly bez výjimky všechny provedené zkoušky.

Důvod, proč na určitých místech skalní věže nejsou biologické krusty, prokázalo měření rychlosti infiltrace a povrchové vlhkosti. Místa s vysokou hodnotou infiltrace zároveň rychle ztrácejí povrchovou vlhkost a neumožňují tak vznik ochranné biologické skalní krusty. Tato místa jsou navíc na věži nepříznivě ovlivněna větrným prouděním a v zimě slunečním zářením.

Zkoušky mechanických vlastností těž prokázaly jasný rozdíl v odolnosti ve prospěch povrchů s biologickou krustou. Zároveň prokázaly vyšší odolnost mužského pískovce oproti pískovci z lomu Střeleč a skalního města Apolena. Neprokládala se předpokládaná nižší odolnost pískovce zkoumané skalní věže oproti jiným pískovcům na stejné lokalitě. Naopak měření ukázalo na pravděpodobný výskyt různě odolných pískovcových poloh v lokalitě Mužský, které nejsou závislé na zvrstvení.

Diplomová práce odpovídá na otázky položené v jejím úvodu. Zejména se podařilo provést analýzu vybraných svahových pohybů a odpovědět na otázku zvýšené náchylnosti skalní věže k nestabilitě. Některé metody se ukázaly být přesnější, jiné méně, ať už vlivem chyb v měření, či nepříznivých podmínek. Všechny metody však dospěly ke stejnému závěru.

Pro budoucí sledování by bylo vhodné doplnit systém monitoringu na lokalitě o stacionární měřicí body pro detekci potencionálního pohybu celého svahu s porušenou skalní věží. Vhodné by bylo osadit vrchol skalní věže dalšími monitorovacími body a vyčistit hlavní puklinu od naneseného materiálu, pro objektivnější měření množství vyplaveného materiálu do této pukliny.

9 Použité zdroje

- [1] ASTM C805/C805M – 13a. *Standard test method for rebound number of hardened concrete*. Norma, American Society for Testing and Materials, 2013.
- [2] BALEK J.; J. BLAHŮT. *A critical evaluation of the use of an inexpensive camera mounted on a recreational unmanned aerial vehicle as a tool for landslide research*. Landslides [online]. Springer Berlin Heidelberg 2016, [cit. 2017–05–07]. DOI 10.1007/s10346-016-0782-7. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-016-0782-7>
- [3] *Basics of X-ray Diffraction*. UMass Geosciences [online]. Cupertino, U.S.A., 1999 [cit. 2016–01–26]. Dostupné z: <http://www.geo.umass.edu/courses/geo311/xrdbasics.pdf>
- [4] BENEŠ, V. *Seismický průzkum okolí vrtu PŘ1*. Praha, 2001. Technická zpráva.
- [5] BRUTHANS, J.; J. SOUKUP; J. VACULIKOVA; M. FILIPPI; J. SCHWEIGSTILLOVÁ; A. L. MAYO; D. MASIN; G. KLETETSCHKA; J. RIHOSEK. *Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion*. Nature Geoscience [online]. 2014, [cit. 2017–01–09]. DOI: 10.1038/ngeo2209. ISSN 1752–0894. Dostupné z: http://www.nature.com/ngeo/journal/v7/n8/abs/ngeo_2209.html
- [6] BRUTHANS, J.; J. SOUKUP; D. SVĚTLÍK, J. SCHWEIGSTILLOVÁ; A. L. MAYO. *Zpevněné povrchy puklin v kvádrovém pískovci a jejich role při vzniku skalních měst*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2012: Kvartér, Inženýrská geologie. Praha: Česká geologická služba, 2013, str. 109–115. ISBN 0514–8057. ISSN 0514–8057

- [7] BRUTHANS, J.; D. SVETLIK; J. SOUKUP; J. SCHWEIGSTILLOVÁ; J. VALEK; M. SEDLACKOVA; A. L. MAYO. 2012a. *Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: Characterization, erosion processes and significance for the origin of sandstone landforms*. *Geomorphology* [online]. 2012, [cit. 2017-01-06]. str. 178–193. Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12003777>
- [8] BRUTHANS, J; J. SCHWEGSTILLOVÁ; P. BEZDIČKA; J. SOUKUP. 2012b. *Intenzivní rozpad karbonského pískovce ve skalním převisu Čertova kazatelna v Plzni*. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2011: Kvartér, inženýrská geologie*. Praha: Česká geologická služba, 2012, str. 70–74. ISBN 978-80-7075-793-2. ISSN 0514-8057.
- [9] CÍLEK, V.; I. BAROŇ; A. LANGROVÁ. *Skalní kůry a povlakové minerály pískovců magurského flyše na Vsetínsku*. *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*. Brno, 2003, č. 10, str. 22–24. ISSN 1212-6209
- [10] CÍLEK, V. *Skalní kůry a „hydrofobní“ skalní povrchy v Demänovské jeskyni svobody*. *Aragonit*. 2002, č. 7, str. 11–12.
- [11] CÍLEK, V. *Opálové inkrustace skalních povrchů*. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 1994*: Praha: Česká geologická služba, 1995, str. 21–21
- [12] CÍLEK, V.; A. LANGROVÁ. *Skalní kůry a solné zvětrávání v CHKO Labské pískovce*. *Ochrana přírody*. 1994, str. 227–231.
- [13] CÍLEK, V. *Solné výkvěty v pseudokrasových jeskynních výklencích na Dvořákově stezce u Nelahozevsí*. *Speleo*. 1993, č. 18,
- [14] Česká geologická služba [online]. [cit. 2016-02-26]. *Geologická mapa 1 : 25 000*. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_50/?center=-691877,-1000219&scale=15000
- [15] Český ráj - Klenot naší vlasti![online]. *Geologie Českého ráje* [cit. 2016-10-22]. Dostupné z: <http://cesky-raj-klenot-nasi-vlasti.webnode.cz/geologie-ceskeho-raje/>

- [16] ČSN 721010. *Stanovení objemové hmotnosti zemin. Laboratorní a polní metody*. Norma, Praha: 1989.
- [17] ČSN EN ISO 14689–1. *Geotechnický průzkum a zkoušení – pojmenování a zařídování hornin*. Norma, Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [18] DOLNÍČEK, Z.; P. SULOVSÝ. *Laboratorní metody výzkumu*. [online]. [cit.2015–07–05]. Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra geologie. Olomouc, 2005, 62 s. Dostupné z:
http://www.geology.upol.cz/upload/studijni_materialy/plne_texty_skript/2005_Do_lnicek_Zdenek_Metody_laboratorniho_vyzkumu.pdf
- [19] GOUDIE, A. S. *The Schmidt Hammer in geomorphological research*. Progress in Physical Geography [online]. 2006, [cit. 2016–10–11]. str. 703–718. Dostupné z <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0309133306071954>
- [20] HENDRIX, R. *Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials: the possibilities of analytical and numerical solutions*. Materials and Structures, 2013, č. 46, str. 1309–1320. ISSN 1359-5997
- [21] CHLUPÁČ, I. *Geologická minulost České republiky*. Praha: Academia, 2002, 436 str. ISBN 80–200–0914–0.
- [22] KURTZ, H; D. NETOFF. *Stabilization of friable sandstone surfaces in a desiccating, wind–abraded environment of south–central Utah by rock surface microorganisms*. Journal of Arid Environments, 2001, č. 48, str. 89–100.
- [23] KŮRKOVÁ, I.; J. BRUTHANS. *Otázka vzniku závrťů, jeskyní a vydatných pramenů v hruboskalském pískovci a implikace pro hydrogeologický konceptuální model kvádrového pískovce*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2012: Hydrogeologie. Praha: Česká geologická služba, 2013, str. 287–290. ISBN 0514–8057. ISSN 978–80–7075–843–4.

- [24] KYRIANOVÁ, I. *Mapování geodynamických jevů na severovýchodním okraji Příhrázské vrchoviny*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2003: Kvartér, Inženýrská geologie. Praha: Česká geologická služba, 2004, str. 69-70
- [25] LOYE , H. *Basics of X-Ray Diffraction: How it works what it can and what it cannot tell us*. [online]. University of South Carolina. South Carolina, 2013 [cit.2016-01-26]. Dostupné z:
http://www.chem.sc.edu/faculty/zurloye/xrdtutorial_2013.pdf
- [26] MARTYKÁNOVÁ, E.; V. NAVRÁTIL. *Rtg záření, jeho vlastnosti a využití*. [online]. [cit.2015-07-04]. Brno, 2007. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky. 48 s. Dostupné z:
https://is.muni.cz/th/84466/pedf_m/rtg_zareni_diplomka.pdf
- [27] MATULA, M; J. PAŠEK. *Regionálna inžinierska geológia ČSSR*. Bratislava: Alfa, 1986, 295 s.
- [28] MIKULÁŠ, R.; J. ADAMOVIČ; V. CÍLEK. *Vliv vody stékající po povrchu pískovců na mikrorelief pískovcových skalních útvarů*: Zprávy o geologických výzkumech v roce 2010: Regionální geologie a stratigrafie. Praha: Česká geologická služba, 2011, str. 31-35. ISBN 978-80-7075-769-7. ISSN 0514-8057.
- [29] MIKULÁŠ, R.; V. CÍLEK. *Terrestrial insect and the possibilities of its fossilization (Holocene to Recent)*. An International Journal of Plant & Animal. 1998, str. 325-333.
- [30] PARADISE , T. R. *Disparate sandstone weathering beneath lichens, Red Mountain, Arizona*: Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 1997, str. 177-184.
- [31] POSPÍŠILOVÁ, P. *Metodika kvantitativního stanovení sádrovce metodami RTG práškové difrakce*. [online]. [cit.2015-07-04] Brno, 2008. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. 27 s. Dostupné z:
https://is.muni.cz/th/104693/prif_b/BP-Petra_Pospisilova.pdf

- [32] Proceq SA. *The Original SCHMIDT fully integrated electronic concrete test hammer: SilverSchmidt*. Switzerland, 2007. Technická příručka.
- [33] PROCHÁZKA, M. *Mužský – průzkumný bezjádrový vrt HG–I, Karotážní měření*. Praha, 2001. Závěrečná zpráva.
- [34] RYBÁŘ, J.; I. FORCZEK; J. STEMBERK; F. HARTVICH; M. HLADKÁ. *Hodnocení svahových deformací na Příhrázské vrchovině na Mladoboleslavsku*. Praha: ÚSMH AV ČR, 2007, 56 s.
- [35] RYBÁŘ, J.; J. STEMBERK; F. HARTVICH. *Slope failures around the rock castle Drábské světničky, Czech Republic*. Acta Geodyn. Geomater, 2006, str. 51-65.
- [36] RYBÁŘ, J.; I. FORCZEK–KYRIANOVÁ. *Hodnocení stabilitních poměrů na území Příhrázské vrchoviny*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2004: Kvartér, Inženýrská geologie. Praha: Česká geologická služba, 2005, str. 70–72
- [37] RYBÁŘ, J.; I. KYRIANOVÁ; M. BRIESTENSKÝ; J. DRTINA; O. HAMPLOVÁ; F. HARTVICH; T. NÝDLT; J. STEMBERK. *Vývoj svahových deformací na Mladoboleslavsku*. Praha: ÚSMH AV ČR, 2004, 55 s.
- [38] SELBY, M. J.. *Hillslope materials and processes*. Oxford: Oxford university press, 1982, 264 str.
- [39] SCHWEIGSTILLOVÁ, J.; J. BRUTHANS; L. FALTEISEK; J. VÁLEK; J. SOUKUP. *Rychlá tvorba skalních kůr na povrchu hruboskalského pískovce: mikroskopický popis, tahová pevnost, odolnost vůči erozi, vznik a význam pro pískovcový reliéf*: Zprávy o geologických výzkumech v roce 2012: Mineralogie, petrologie. Praha: Česká geologická služba, 2013, str. 228-234. ISBN 0514–8057. ISSN 0514–8057.
- [40] SLAVÍK, M.; J. BRUTHANS; J. SCHWEIGSTILLOVÁ; L. FALTEISEK, L. v tisku-a. *Vliv biokolizace na erozi a odolnost různých typů pískovcových povrchů v lomu na přirozených výchozech*: Zprávy o geologických výzkumech v roce 2016. Praha: Česká geologická služba, (v tisku).

- [41] SLAVÍK, M.; J. BRUTHANS; A. KOBRLOVÁ; P. VORLÍČEK; M. PADĚRA . v tisku-b. *Hydraulické vlastnosti biogenní skalní kůry na pískovci: Zprávy o geologických výzkumech v roce 2016*. Praha: Česká geologická služba, (v tisku).
- [42] SLAVÍK, M.; J. BRUTHANS; M. FILLIPI; J. SCHWEIGSTILLOVÁ; L. FALTEISEK; J. ŘIHOŠEK. *Biologically–initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion*. *Geomorphology*, 2017, č. 278: str. 298–313.
- [43] SOBÍŠEK, B. *Rychlost a směr větru na území České republiky v období 1961–1990*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2000. Národní klimatický program České republiky. ISBN 80–858–1379–3.
- [44] STEMBERK, J.; F. HARTVICH; J. BLAHŮT; J. RYBÁŘ; O. KREJČÍ. *Tectonic strain changes affecting the development of deep seated gravitational slope deformations in the Bohemian Massif and Outer Western Carpathians*. *Geomorphology* [online]. 2016, [cit. 2017–01–11]. 15 str. Dostupné z http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ShoppingCartURL&_method=add&_eid=1-s2.0-S0169555X16305517&_originContentFamily=serial&_origin=article&_ts=1492591557&md5=25a6273845187ad285aaacdeeb3352d5
- [45] STEMBERK, J.; J. ZVELEBIL. *Změny aktivity svahových pohybů severozápadního okraje Příhrazské vrchoviny*. *Geotechnika*, 1999, č. 2, str. 15-20. ISSN 1211-913X
- [46] ŠPAČEK, P. *Režimní sledování 2004 PŘ–1 a PŘ–2*. Praha, Chemcomex Praha, a.s., 2004. Technická zpráva.
- [47] ŠPAČEK, P. *Režimní sledování PŘ–1 a PŘ–2*. Praha, Chemcomex Praha, a.s., 2003. Technická zpráva.
- [48] ŠPAČEK, P. *Zpráva o průzkumném vrtu PŘ–2*. Praha, Chemcomex Praha, a.s., 2002. Technická zpráva.

- [49] ŠPAČEK, P. 2001a. *Zpráva o průzkumném vrtu PŘ-1*. Praha, Chemcomex Praha, a.s., 2001. Technická zpráva.
- [50] ŠPAČEK, P. 2001b. *Hydrogeologický posudek – zpráva o režimním sledování*. Praha, Chemcomex Praha, a.s., 2001.
- [51] ŠŤASTNÝ, M. *Mineralogické zhodnocení sedimentů Příhrázské vrchoviny*. Praha, 2007, 5 str.
- [52] VOTOČEK, R. *Příhrázská vrchovina*. Praha, 2001. Geofyzikální měření. Technická zpráva.
- [53] ZÁRUBA, Q.; J. ŠIMEK; J. EISENSTEIN. *Rozbor sesuvu u Dnebohu*. Sborník geologických věd, 1966, str. 141–160.
- [54] ZVELEBIL, J.; J. STEMBERK; F. HARTVICH. *Svahové deformace v ČR: Účelová inženýrsko–geologická mapa svahových deformací a mapa náchylnosti území k sesouvání na listu 1 : 10 000, 03–34–01*. Hřensko, 2001.