

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Aplikovaná geologie se zaměřením
Studijní obor: Geologie a geochemie životního prostředí



Mgr. Zuzana Vařilová

**Komplexní studium porušování pískovcových
skalních objektů (případová studie: Pravčická brána,
Národní park České Švýcarsko)**

**Comprehensive study of the sandstone rock forms deterioration
(Case study: Pravčická brána Arch,
Bohemian Switzerland National Park)**

Disertační práce

Vedoucí práce/Školitel: Doc. Mgr. Richard Přikryl, Dr.
Školitel-konzultant: RNDr. Jiří Zvelebil, CSc.

Praha, 2011

Název práce: Komplexní studium porušování pískovcových skalních objektů (případová studie: Pravčická brána, Národní park České Švýcarsko)

Autor: Mgr. Zuzana Vařilová

Katedra / Ústav: Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy Praha

Vedoucí disertační práce: Doc. Mgr. Richard Příkryl, Dr., Přírodovědecká fakulta UK Praha

Školitel-konzultant: RNDr. Jiří Zvelebil, CSc.; Česká geologická služba, Z Geokonsult

Abstrakt

Předkládaná disertační práce obsahuje výsledky souborného výzkumu Pravčické brány a okolních pískovcových masivů se zaměřením na poznání přirozené dynamiky a vývoje tělesa, jeho aktuální stabilitu a projevy zvětrávacích procesů.

Ke komplexnímu studiu bylo použito nedestruktivních metod, počínaje detailní terénní dokumentací, přes využití geofyzikálního průzkumu, kontrolního sledování deformačního chování tělesa brány a sledování jeho teplotního režimu. Provedeny byly laboratorní zkoušky pevnostních parametrů i analýzy chemického složení solných výkvětů a zvětrávaním postižených pískovců. Souběžně byly sledovány hlavní působící faktory - zejména změny vnější teploty, míra oslunění a chemické složení srážkových vod. Při syntéze a interpretaci získaných dat byly využity zavedené i zcela nové postupy vyhodnocování (včetně znalostí nelineární dynamiky komplexních systémů). Realizovaný průzkum byl koncipován tak, aby plně respektoval ochranné podmínky dané lokality, bylo na něj možné v budoucnu navázat a sledovat případné negativní změny v horninovém masivu.

K hlavním výsledkům náleží popis blokové stavby tělesa a charakteru kontaktní zóny mezi trámcem brány a jižním pilířem, objevení relativně čerstvých sekundárních trhlin a identifikace pevnostně oslabených zón uvnitř pískovcového masivu. Dlouhodobým sledováním byly prokázány pomalé nevratné pohyby tělesa a vratné kvazi-cyklické pohyby související s teplotními změnami v měřítkách dnů až let. Bylo zjištěno rozdílné chování východní a západní strany trámce a potvrzeno jeho obloukovité ohýbání, obohacené navíc o nerovnoměrné namáhání torzí a smykem. Dále byla získána data objasňující časový a hloubkový průběh teplot uvnitř skalního masivu a stanoven režim jeho přirozeného odvodňování. Zvláštní pozornost byla věnována procesům solného zvětrávání, které byly studovány z hlediska popisu jejich distribuce v prostoru a čase, a geochemické charakteristiky vstupních zdrojů (srážkových vod), průsakových vod i koncových složek ve formě destruktivních solí.

Ze získaných informací byl vytvořen strukturně-deformační model tělesa brány, včetně popisu charakteru porušování a posouzení míry a způsobu uplatnění vnějších vlivů (včetně vlivů antropogenních). Výsledky komplexního studia poskytují cenné informace o současném stavu skalního objektu, napomohly k rozpoznání potenciálně rizikových partií a budou využity nejenom pro účely modelace budoucího vývoje, ale také pro případný návrh nejvhodnějšího sanačního opatření.

Klíčová slova: pískovce, skalní brána, komplexní výzkum a monitoring, zvětrávání, stabilita, model porušování

Title: Comprehensive study of the sandstone rock forms deterioration (Case study: Pravčická brána Arch, Bohemian Switzerland National Park)

Autor: Mgr. Zuzana Vařilová

Department: Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources
Faculty of Science, Charles University in Prague

Supervisor: Doc. Mgr. Richard Příkryl, Dr., Faculty of Science, Charles University in Prague

Supervisor-consultant: RNDr. Jiří Zvelebil, CSc.; Czech Geological Survey, Z Geokonsult

Abstract

This PhD thesis contains the results of comprehensive research into the Pravčická brána Arch and surrounding sandstone massifs with focus on gaining more knowledge about natural dynamics and evolution of this rock formation, its current level of stability and the weathering processes it displays.

Non-destructive methods were used for this comprehensive study; these ranged from detailed field documentation to monitoring temperature regime of the rock and included application of a geophysical survey and control monitoring of the course of arch body deformation. Laboratory testing was carried out for strength parameters and salt efflorescences together with weathered sandstones were analysed for chemical compounds. Main operating factors were monitored simultaneously, which particularly involved changes in external temperature, degree of sunlight and chemical composition of rainfall. Conventional as well as entirely new assessment procedures were used in synthesis and interpretation of the data collected, including knowledge of nonlinear dynamics of complex systems. The survey was designed to fully respect the protective conditions of the site, to make follow-up activities possible in future and to monitor any possible negative changes in the rock massif.

The main results incorporate description of the block fabric of the body and the nature of the contact zone between the arch beam and the southern pillar, discovery of relatively fresh secondary fissures and identification of zones with weakened strength within the sandstone massif. Long-term monitoring has demonstrated slow and irreversible body movements and reversible quasi-cyclical movements associated with changes in temperature at the level of days up to years. Differences in actions of the eastern and the western side of the beam were found and the fact that the beam displays curved bending was attested, the latter being additionally intensified by unequal stress via torsion and shear. Furthermore, data were obtained that clarify the development of temperatures inside the rock massif in terms of time and depth and the mode of natural drainage of the massif was determined. Particular attention was paid to the processes of salt weathering that were being studied from the aspect of describing their distribution in space and over time and from the light of geochemical characteristics of the input sources (rainwater), seepage water and end components in the form of destructive salts.

The collected information was used for developing a structural deformation model of the arch body, including description of the nature of desintegration and assessment of the extent and the involvement of external factors (including anthropogenic influences). Results of this comprehensive study provide valuable information about the current condition of the rock body. Helping to identify potentially hazardous parts, these are to be used not only for modelling future development, but also to design the best possible remediation measures.

Keywords: sandstones, rock arch, comprehensive research and monitoring, weathering, stability, model of deterioration

Prohlášení:

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

V Praze, dne 25.6.2011

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému školiteli Doc. Mgr. Richardu Přikrylovi, Dr. a konzultantovi RNDr. Jiřímu Zvelebilovi, CSc. za odborné vedení v průběhu studia a zejména za podporu při publikování výsledků. Velký dík za pomoc při získávání terénních dat náleží pracovníkům skalní čety, poděkování náleží i všem ostatním kolegům ze Správy NP České Švýcarsko za součinnost a dobré pracovní podmínky. Za cenné rady a možnost využití laboratorního zázemí vděčím prof. Bernardu Smithovi z Queen's University of Belfast. Poděkování za spolupráci v rámci zpracování pestré škály dat náleží všem spoluautorům odborných publikací, zejména pak RNDr. Tomášovi Navrátilovi, PhD.; Mgr. Františku Hubatkovi; RNDr. Václavu Cílkovi, CSc.; Mgr. Martinovi Brčkovi, PhD. a Doc. RNDr. Janu Vlčkovi, CSc.

Většina terénních prací komplexního výzkumu byla realizována v rámci činnosti oddělení geologie – skalní četa při Správě NP České Švýcarsko a byla financována z jejího provozního rozpočtu. Sledování chemického složení vod a hlavních klimatických činitelů v období 2008 až 2010 bylo součástí projektu hrazeného z Finančních mechanismů EHP/Norsko „*Komplexní monitoring stavu přírodního prostředí v NP české Švýcarsko*“, část laboratorních analýz srážkových vod byla pak součástí Výzkumného záměru GLÚ AV ČR: AV0Z30130516. Analýzy solí a pískovců byly hrazeny z výzkumného záměru geologické sekce PřF UK: MSM 0021620855 „*Mechanismy transportu látek ve svrchních částech Země*“, výzkumného projektu GAČR 205/08/0676 „*Trojrozměrné uspořádání pórového prostoru sedimentárních hornin: souvislost s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi*“ a výzkumného projektu GAAV IAA3046401 „*Teoretické a empirické souvislosti mezi propustností a pórovitostí*“. Automatický kontrolní monitoring deformací Pravčické brány byl v letech 2005–2008 financován z projektu AVO/1E-1ET110190504 „*Integrovaný informační systém pro monitoring, analýzy a predikce dynamiky deformací v geosystémech*“. Sledování teplotních změn v tělese brány bylo spolufinancováno Komenského universitou v Bratislavě. Data digitálního modelu terénu byla pořízena v roce 2005 v rámci projektu Technické university v Drážďanech EU Interreg IIIA: „*Geoinformační síť pro přeshraniční region národních parků České a Saské Švýcarsko*“.

Obsah

1. Úvod.....	1
1.1. Zaměření a cíle práce.....	1
1.2. Struktura práce.....	2
2. Koncepce ochrany a výzkumu geologicky cenných lokalit.....	3
2.1. Skalní ekosystémy.....	3
2.2. Geneze a klasifikace skalních bran.....	4
2.3. Národní park České Švýcarsko.....	6
2.4. Modelové území – Pravčická brána.....	7
2.4.1. Geomorfologický vývoj a potenciální ohrožení.....	7
2.4.2. Ochranné podmínky.....	8
2.4.3. Dosavadní výzkumné aktivity.....	9
3. Metodika výzkumu a výsledky.....	13
3.1. Geologická, tektonická a geomorfologická dokumentace.....	13
3.1.1. Laserové scanování tělesa a jeho okolí (makroměřítko).....	13
3.1.2. Klasický terénní průzkum (mezoměřítko).....	15
3.1.3. Dokumentace a sledování intenzity zvětrávání (mikroměřítko).....	17
3.1.4. Stanovení základních fyzikálně-mechanických vlastností.....	18
3.2. Geofyzikální průzkum.....	22
3.3. Studium zvětrávacích procesů.....	24
3.3.1. Složení srážkových vod.....	24
3.3.2. Složení průsakových vod.....	25
3.3.3. Studium skalních krust a solných výkvětů.....	27
3.4. Kontrolní sledování deformačního chování.....	29
3.4.1. Metodika sledování a vyhodnocování dat.....	29
3.4.2. Zhodnocení stability tělesa.....	30
3.5. Sledování tepelného režimu.....	31
3.5.1. Hodnocení denních a ročních teplotních měn.....	32
3.5.2. Teplotní změny povrchu.....	33
4. Komplexní fenomenologický model porušování PB.....	34
4.1. Základní koncepce a vlastnosti modelu.....	34
4.2. Stavba a rozložení pevnosti masivu.....	37

4.3. Uplatnění zvětrávacích procesů	39
4.3.1. Kvantitativní analýza zvětrávání (teorie zpětné vazby).....	39
4.3.2. Hydrodynamický režim tělesa.....	42
4.3.3. Sekundární úbytek pevnosti zvětráváním.....	42
4.4. Porušování a deformační chování.....	46
4.4.1. Hlavní příčiny nárůstu pole napětí.....	46
4.4.2. Aktualizovaný strukturně-deformační model.....	47
5. Diskuze.....	52
5.1. Užitá metodika a návaznost výzkumu.....	52
5.2. Otázka sanačních opatření.....	58
6. Závěr.....	60
7. Seznam literatury.....	62

Přílohy – soubor č. 1:

Příloha I – Část plánu péče o NPP Pravčická brána 2005 – 2014

Příloha II – Limity studované lokality

Příloha III – Pravčická brána - fotodokumentace

Příloha IV – Laserové skenování

Příloha V – Doplnující tabulkové přílohy

Příloha VI – Fotodokumentace vzorků a studijních ploch

Příloha VII – Výsledky laboratorních (pevnostních a vlhkostních) zkoušek

Příloha VIII – Geofyzikální průzkum - odporová tomografie a mikroprofily

Příloha IX – Doplnující výsledky laboratorního studia zvětrávacích procesů

Příloha X – Měření mikronivelačních změn povrchu skal

Příloha XI – Doplnující výsledky monitoringu teplotních změn

Přílohy – soubor č. 2 (vybrané publikační výsledky):

Příloha A

Vařilová, Z., Zvelebil, J. (2005): *Sandstone Relief Geohazards and their Mitigation: Rock Fall Risk Management in the Bohemian Switzerland NP, Czech Republic*. Mus. Natur., Luxembourg, Ferrantia, 44, 51-56.

Příloha B

Cílek, V., Adamovič, J., Vařilová, Z. (2006): *Pravčická brána a vznik pískovcových skalních bran*. Minulosti Českého Švýcarska III., sborník příspěvků historické konference, Krásná Lípa, 5-19.

Příloha C

Vařilová, Z., Zvelebil, J. (2007): *Catastrophic and episodic events in sandstone landscapes: slope movements and weathering*. – In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*, Academia, Praha, 115-128.

Příloha D

Příkryl, R., Melounová, L., Vařilová, Z., Weishauptová, Z. (2007): *Spatial relationships of salt distribution and related physical changes of underlying rocks on naturally weathered sandstone exposures (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic)*. *Environmental Geology*, 52, 409-420.

Příloha E

Vlčko, J., Brček, M., Vařilová, Z., Zvelebil, J. (2009): *Deformation Monitoring at Cultural and Natural Heritage Sites*. World Danxia, 2nd Coll., First International Symposium on Danxia Landform, Danxiashan, Guangdong China, 317-324.

Příloha F

Zvelebil, J., Vařilová, Z. (2010): *Třicet let bezpečnostního monitoringu pohybů v pískovcových stěnách Děčínské vrchoviny*. *Polní geotechnické metody 2010*, Sborník 30. mezinárodní konference, Ústí n.L., 65-80.

Příloha G

Vařilová, Z., Zvelebil, J. (2010): *Monitoring pohybů Pravčické brány - hodnocení výsledků kontrolního sledování tělesa Pravčické brány za období 2003 – 2009 / 1.etapa*. MS, Správa NP České Švýcarsko, 50 s.

Příloha H

Brček M., Vařilová Z., Greif V., Vlčko J. (2010): *Stanovenie teplotného poľa pieskovcového masívu Pravčickej brány (ČR) na základe zhodnotenia denných a ročných teplotných cyklov*. *Mineralia Slovaca*, 42, 205-216.

Příloha I

Vařilová, Z., Zvelebil, J., Paluš, M. (2010): *Complex System Approach to Interpretation of Monitoring Time Series: two case histories from NW Bohemia*. *Landslides*, vol. 8, Issue 2, 207-220.

Příloha J

Vařilová, Z., Navrátil, T., Dobešová I. (2011): *Recent atmospheric deposition and its effects on sandstone cliffs in Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic*. *Water, Air & Soil Pollution* doi: 10.1007/s11270-010-0739-8

Příloha K

Vařilová, Z., Příkryl, R., Cílek, V. (2011): *Pravčice Rock Arch (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic) deterioration due to natural and anthropogenic weathering*. *Environmental Earth Science* doi: 10.1007/s12665-010-0881-z

Příloha L

Vařilová, Z., Hubatka, F., Beneš, V., Frolka, J. (submitted): *The application of non-destructive geophysical methods to assess the stability of the national nature monument of the Pravčická brána rock arch*. – *Landslides*

Seznam obrázků

- Obr. 1. Schéma znázorňující metodický postup v rámci realizovaného komplexního studia tělesa PB, od klasických metod průzkumu až po úzce tématicky pojaté nadstavby, jež umožnily vhodně doplnit původní základní výzkum a rozšířit pole pro stanovení vzájemných interakcí, včetně souborných interpretací.....14
- Obr. 2. Základní interakční schéma makro-porušování stability tělesa PB zobrazující funkční vztahy mezi primárními podmínkami panujícími v systému a hlavními působícími vlivy. Dominuje zde opakující se smyčka postupného porušování mezí pevnosti horniny končící kolapsem celého systému. Každá úroveň tohoto modelu obsahuje dílčí úrovně - procesy v různých měřítkách popsané dále v textu.....35
- Obr. 3. Model blokové stavby tělesa PB: 1a) pohled na těleso brány ze západní strany, 1b) pohled na PB z východu; 2a) půdorysný řez trámecem brány v hloubce 2,5 m od povrchu, d) půdorysný řez v oblasti kontaktu trámce s jižním pilířem brány v hloubce 5m od povrchu.....38
- Obr. 4. Schéma funkční struktury zvětrávacích procesů na lokalitě PB. Zpětnovazebné smyčky (kauzální působení od prvku systému A směrem k prvku B) se skládají jak z pozitivních, tak i negativních příčinných vazeb (znaménka vyjadřují relativní směr změny na sebe vázaných prvků systému: plus značí stejný směr změny, minus směr opačný). Celkový charakter této smyčky je samozesilující, neboť obsahuje sudý počet negativních spojení (samovyrovnávající by byl v případě lichého počtu negativních spojení). Charakter se nemění ani v současnosti (se zohledněným přímým i nepřímým vlivem působení člověka).....40
- Obr. 5. Schéma zobrazující samoorganizující distribuci na modelu zvětrávání pískovcových hornin v NPČŠ. Podobné samozesilující fenomény se v přírodě vyskytují jen zřídka, protože je obvykle vyrovnávají negativní zpětnovazebné smyčky (např. Capra 2002). V ekosystémech ovlivněných člověkem jsou však tyto jevy mnohem častější.....41
- Obr. 6. Oslabení masivu Pravčické brány potvrzené dvěma nezávislými geofyzikálními metodami: a) seismickou tomografií, b) metodou DEMP (vytvořeno s využitím údajů Beneše 2008 a Frolky 2009 – pohledy od západu). K nejvíce rizikovým partiím z hlediska budoucí stability náleží zóny vyznačené oranžovo-žlutou barvou - tedy trojúhelníkový blok jižního pilíře, spodní strana trámce brány postižená zvětráváním své a kontakt trámce s pilířem severním.....45
- Obr. 7. Model kinematiky vratných a nevratných pohybů PB: a) pohled na těleso brány ze západní strany, b) půdorysný pohled na trámec shora (s vyznačením jednotlivých měřicích bodů automatického i ručního kontrolního sledování). Šipky naznačují zjištěné směry deformací (nevratné pohyby označeny růžovou barvou, vratné teplotní dilatace a způsoby kvazi-cyklického namáhání tělesa černě).....50

Seznam tabulek

Tab. 1. Hlavní procesy současného porušování tělesa Pravčické brány (se zaměřením na studované faktory).....	36
Tab. 2. Interakce hlavních podmínek, faktorů a procesů v rámci zvětrávání pískovcových hornin („a“ představuje pozitivní, negativní a nulové (tj. zanedbatelné) vlivy jednotlivých složek systému); z matice byl vyjmut důsledek ve formě sekundárního oslabení a nestability horniny, který je koncovou složkou systému a reprezentuje pouze pozitivní vazby	40
Tab. 3. Hlavní podmínky a vnější faktory ovlivňující proces zvětrávání pískovcových hornin na PB.....	41
Tab. 4. Obecný model vzniku a stádia vývoje Pravčické brány.....	48
Tab. 5. Teoretické varianty dalšího možného vývoje tělesa PB vytvořené na základě zjištěných údajů.....	57
Tab. 6. Plánovaná nadstavba provedeného výzkumu směřující k vytvoření aktuálního geomechanického modelu a stabilitního vývoje skalní brány.....	58

Seznam použitých zkratk

ČKP – česká křídová pánev
ČR – Česká republika
CHKO – chráněná krajinná oblast
CHPV – chráněný přírodní výtvar
GLÚ AVČR – Geologický ústav Akademie věd ČR
MNV – místní národní výbor
MŽP – Ministerstvo životního prostředí
NP – národní park
NP ČŠ – Národní park České Švýcarsko
NPP – národní přírodní památka
PB – Pravčická brána
SOC – sebeorganizující se kritičnost
SOP – státní ochrana přírody
SÚPPOP – Státní ústav památkové péče a ochrany přírody
UNESCO – United Nations Education, Scientific and Cultural Organization
ÚSMH AVČR – Ústav struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR
ZCHÚ – zvláště chráněné území

1. Úvod

1.1. Zaměření a cíle práce

Jedním z klíčových faktorů, podmiňujících vyhlášení Národního parku České Švýcarsko (NPČŠ), je ochrana specifické geomorfologie, vyvíjející se v celém spektru prostorových a časových měřítek na masivních, tzv. kvádrových pískovcích svrchnokřídového stáří, jež jsou součástí České křídové pánve (ČKP). Současná podoba pískovcového reliéfu je důsledkem dlouhodobého dynamického vývoje, na kterém se spolupodílely exogenní přirozené i antropogenně ovlivněné procesy. Disertační práce byla zaměřena na získání znalostí, potřebných pro holisticky pojatou ochranu jednotlivých skalních útvarů a návazně specifických krajinných rysů v rámci NPČŠ. Výzkumné aktivity byly soustředěny na plošně relativně malé, avšak svým významem klíčové území - chráněný skalní útvar, NPP Pravčickou bránu, a jeho blízké okolí (Křídelní stěny). Vedle zásadního významu Pravčické brány jako největší evropské pískovcové brány a tudíž jednoho z nejcennějších skalních útvarů tohoto regionu, byla při její volbě zohledněna i velmi aktuální ochranná potřeba, vyplývající z obavy o její krátkodobou, v létech až desítkách let posuzovanou stabilitu. Rozsah odborného záberu byl účelově zúžen na vybrané oblasti geochemie, dynamické geomorfologie a dynamické inženýrské geologie. Stěžejním úkolem se stalo stanovení hlavních destrukčních, či destrukci podmiňujících procesů, jejich vzájemných interakcí a zpětných vazeb na základě komplexního studia, sběru dat z dlouhodobého sledování a s využitím šetrných metod. Pozornost byla věnována především faktorům, které nejvýznamněji přispívají ke změnám geomechanických parametrů pískovců (a odnosu materiálu), a stávají se tak významně se uplatňujícím vlivem při vývoji pískovcového reliéfu a vzniku svahových pohybů říťivého typu. Role fyzikálního a chemického zvětrávání při jejich vzniku byla již v literatuře v minulosti částečně diskutována. Pro území NPČŠ se vyskytovaly i názory o urychlování těchto procesů lidskou činností, nicméně dosud chyběly hlubší znalosti, vycházející z objektivně získaných dat. Jedním z cílů práce bylo proto stanovit zákonitosti prostorově-časové distribuce zvětrávacích procesů, jejich produktů a kontrolních faktorů, a zejména posoudit míru jejich spolupůsobení na snižování stability skalních stěn.

Poznání přirozené dynamiky modelového skalního objektu i potenciálních rizik je základem nejen pro jeho efektivní individuální ochranu, ale také cennou informací k pochopení současného vývoje celého krajinného systému včetně antropogenních vlivů.

1.2. Struktura práce

Disertační práce je koncipována jako **soubor publikací, shrnujících jednotlivé dílčí výsledky komplexního výzkumu**, doplněného o vysvětlující úvodní kapitoly. Tento výzkum byl prováděn v úzké spolupráci s odborníky potřebných specializací z vědeckých ústavů, universit i soukromých firem, za finanční podpory Správy NPČŠ a několika výzkumných projektů. Práce se skládá z celkem 12 odborných výstupů zveřejněných v českých a zahraničních periodikách, monografiích či sbornících z konferencí, které představují širokou škálu výsledků, nutných pro souborné pojetí studované problematiky. Publikace samotné jsou řazeny chronologicky dle data vydání v Příloze A až L. Stručné shrnutí publikovaných výsledků je nedílnou součástí hlavní kapitoly 3 (Metodika výzkumu a výsledky), která je dále členěna na podkapitoly podle tématických okruhů. V celém textu práce je rovněž průběžně na autorské publikace odkazováno.

Dvě publikace jsou věnovány zvětvování pískovcových hornin a vývoji skalního reliéfu na území NPČŠ (včetně distribuce těchto procesů v čase a prostoru) – příloha C, D. Tři publikace obsahují hodnocení porušování stability skalních svahů na území NPČŠ s využitím standardních geomorfologických postupů, systematického kontrolního sledování (v časovém měřítku od minut až po první desítky let) a nelineárních numerických metod vyhodnocování dat - příloha A, F a I. Šest samostatných článků je pak zaměřených přímo na studium a monitoring Pravčické brány z různorodých odborných pohledů, jež se vzájemně metodicky doplňují – příloha B, E, H, J, K a L. V tomto tématickém oddíle je rovněž zařazena nepublikovaná závěrečná zpráva (příloha G), vyhotovená pro Správu NPČŠ a Ministerstvo životního prostředí ČR (MŽP), jejíž obsah a zejména interpretace výsledků mají zásadní význam pro správné hodnocení všech aspektů dané problematiky.

Disertační práce byla rozšířena o dosud nepublikované části dílčích projektů, které mají charakter pouhé dokumentace či základní databáze; ty jsou uvedeny v rámci samostatných příloh I až XI. Na ostatní autorské publikace a manuskripty (např. Vařilová 2002a, 2010a,b, Vařilová et al. 2005), které s tématem NPP Pravčická brána a geomorfologie NPČŠ úzce souvisí, avšak nejsou nedílnou součástí této práce (zejména z důvodu jejich naučně-populárního pojetí či staršího data vydání), je v textu rovněž průběžně odkazováno.

Významnou součástí práce je kap. 4 (Komplexní fenomenologický model porušování PB), která obsahuje syntézu všech získaných výsledků, a rovněž kap. 5 s diskuzí zaměřenou na zvolenou metodiku a plánovanou nadstavbu realizovaných prací.

2. Koncepce ochrany a výzkumu geologicky cenných lokalit

2.1. Skalní ekosystémy

V rámci Evropy hrají středoevropské pískovcové oblasti soustředěné na širším území ČKP (v severních Čechách s přesahem do Saska a polského Slezska) mimořádnou roli (Härtel et al. 2007, Landová 2009) a geodiverzita zde představuje významnou součást přírodního bohatství (např. Ložek 2006). Nejcennější oblasti byly vyhlášeny jako zvláště chráněná území (Härtel et al. 2007, Landová 2009) a reprezentují specifický typ ekosystému – tzv. pískovcový fenomén (např. Ložek 2006, Cílek et al. 2007, Adamovič et al. 2010).

Přírozené skalní ekosystémy jsou, v závislosti na geologické a morfologické stavbě, překvapivě zranitelným typem prostředí a proběhlé negativní změny jsou zde zpravidla nevratné. Zachování přírodního vývoje skal, ochrana jedinečných geomorfologických forem (včetně zachování typického vzhledu a tradičních funkcí krajiny) a vytvoření podmínek pro co nejmenší antropogenní ovlivnění patří proto k důležitým úkolům novodobé péče o chráněná území (např. Martini & Zouros 2001, Marková et al. 2007, McKeewer et al. 2010, Farsani et al. 2011). V porovnání s jinými horninovými celky (např. s krasovým územím) byla však právě pískovcům dosud věnována menší pozornost v rámci interdisciplinárního výzkumu i mezinárodní odborné spolupráce – zejména v oblasti získávání kvalitativních dat o rychlosti a způsobu jejich vývoje. Předkládaná disertační práce se proto snaží přispět k trendu řešit problematiku ochrany neživé přírody v širším, nadčasovém a nad-oborovém konceptu a v praxi se věnovat nejenom obecně dlouhodobě definovaným tématům, ale hlavně aktuálním otázkám v zájmovém regionu i na jednotlivých lokalitách. Pro efektivní ochranu krajiny je nutná znalost všech nepříznivých (příp. rizikových) geologických faktorů a procesů, a to včetně těch, které se uplatňují s plouživým účinkem. Výsledky komplexního výzkumu přitom představují mozaiku informací sloužící jako důležitý podklad nejenom pro detailní znalost svěřeného území ale rovněž jako podklad pro vytváření strategických dokumentů a opatření pro nejvhodnější péči o krajinu.

Celé skalní ekosystémy i jednotlivé skalní formy jsou obvykle v ČR i v zahraničních chráněných územích v převážné většině ponechány jejich přírodnímu vývoji se všemi jevy a procesy, které s tím souvisí v rámci jednotlivých etap modelace skalního reliéfu. Výjimku tvoří pouze případy potenciálního rizika – ohrožení lidského zdraví a majetku (zejména v osídlených či turisticky exponovaných, nebo historicky cenných lokalitách), či ohrožení samotných lokalit jako unikátních, přírodně cenných objektů. Ohrožení takovýchto lokalit

bylo ve světě řešeno multidisciplinárními týmy například v rámci zvláštních projektů UNESCO (Margottini 2007 a 2009 či Vilímek et al. 2005, 2007 a 2009) či v rámci samostatných studií (např. Krippel 2005, Häfner & Böhler 1987, Zvelebil & Moser 2001, Zvelebil & Hartvich 2006, Vlčko et al. 2009). Zvolená modelová lokalita – Pravčická brána v NPČŠ je případem jedinečného útvaru v evropském měřítku a stala se tedy jednou ze skalních forem, která byla podrobena detailnímu průzkumu a dlouhodobému sledování, a kterou z důvodu geomorfologické a estetické hodnoty nelze ponechat zcela přirozenému rozpadu (Vařilová et al. 2005).

2.2. Geneze a klasifikace skalních bran

Skalní brány jsou považovány za největší tvary ve skupině skalních perforací. V dostupné literatuře obvykle převažuje geomorfologický popis skalních bran a jejich deskriptivní klasifikace (např. Blair et al. 1975, Sitenký 1994, Vreeland 1994, Stevens & McCarrick 1988, Barnes 1987), případně sledování změn celkového tvaru těles s využitím morfometrických metod (např. Wilbur 2004, 2006). Ucelené rozdělení přírodních skalních bran bylo vytvořeno společností Natural Arch and Bridge Society (www.naturalarches.org). Spíše výjimkou jsou studie zabývající se podrobnou genezí skalních bran (např. Blair 1987, Cruikshank & Aydin 1994) či jejich stabilitou a prognózování dalšího vývoje (např. Ohnishi et al. 1993). Skalní brány vznikají za speciálních podmínek, které jsou dány jednak geologickou a tektonickou stavbou, a jednak probíhajícími procesy. Co se týká vývoje skalních bran v pískovcích, převažuje obecně (např. Young et al. 2009) názor, že se jedná o komplexní proces, který nelze oddělit od specifických morfostrukturních a klimaticko-morfogenetických podmínek a vlivů. V určení, které vůdčí faktory to jsou, se názory autorů částečně liší v závislosti na regionálních podmínkách jejich terénní práce. Nicméně, pro základní vývoj skalních bran můžeme z literatury odvodit následující všeobecné informace a podněty.

Přestože pískovce nepatří k velmi pevným horninám (např. McNally & McQueen 2000), výskyt skalních bran není v pískovcích ojedinělý (The Natural Arch and Bridge Society). Deset z nejdelších skalních bran ve světě bylo dokonce vytvořeno právě v nich (Young et al. 2009). V některých pískovcových regionech lze navíc zjistit zvláště vysoké hustoty výskytů pískovcových skalních bran – např. Tassili National Park v Alžírsku (490 bran; Debossens 2007) a oblast jv. Utahu, zejména NP Arches (300 bran vázaných na souvrství Entrada a Cedar Mesa Sandstones; Blair 1984 či Doelling 2000). Ačkoli území

nejbohatší na skalní brány jsou dnes charakteristická (semi)aridním klimatem, většina bran zde vznikla pomocí rychlého výzdvihu horninových ker a erozi jejich dílčích částí během posledního glaciálu (resp. pluviálu); přírodní skalní brány nejsou tedy starší než 30 000 let (nejčastěji pravděpodobně 5 až 15 000 let staré - The Natural Arch and Bridge Society, Blair 1984). Formovaly se postupně intenzivním odnosem a charakteristickou modelací pískovců v oblastech vyšších četností paralelních poruchových pásem působením hloubkové vodní eroze (např. Young 1977, Baker & Pickup 1987, Zvelebil 1989, Alexandrowicz & Urban 2005) a selektivní eroze (např. Gregory 1950, Gerber & Scheidegger 1973, Doelling 1985). Na jejich tvorbě se v závislosti na klimatu podílela také eroze větrná (např. Rubín & Balatka et al. 1986, Barnes 1987, Stevens & McCarrick 1988).

Pískovcová území, a zvláště pískovce kvádrové, jsou charakteristické relativní homogenitou hornin v rámci makroměřitek (narušenou zpravidla jedním systémem paralelních puklin – Adamovič et al. 2010) a ostrými přechody v rámci mikroměřitek. Kombinují relativní litologickou stejnorodost ve směru průběhu vrstev (velmi často subhorizontálně) s nehomogenitou horniny ve směru kolmo k vrstvám. Tyto charakteristické vlastnosti souvisí s podmínkami jejich sedimentace (např. Skoček & Valečka 1983, Adamovič & Kidston 2007, Graham 2004). Jako významná iniciální podmínka pro vývoj skalních bran je uváděn výskyt dlouhých a štíhlých skalních žeber/skalních zdí (např. Cruikshank & Aydin 1994, Young et al. 2009, Adamovič et al. 2010). Jedná se o masivnější partie pískovců vypreparované mezi zhruba paralelně probíhajícími puklinovými pásmy. Charakteristický je zejména podélný průběh vrstev, vrubovitě zdůrazňující selektivní zvětvování, jež souvisí s anizotropií a hydrogeologickými vlastnostmi pískovcových masivů.

Častý výskyt obloukovitého tvaru pískovcových skalních bran (viz databáze The Natural Arch and Bridge Society) souvisí s tlakovou elipsou. Skalní brány se nejčastěji tvoří v křehkých pískovcích se sklonem k praskání a odlupování (viz souvrství Entrada Sandstones – např. Harris et al. 1997, Petřů 2008, Doelling 2000) a nejsou naopak typické pro pevné silicifikované pískovce, kde se obtížně uplatňuje vznik úpatních převisů i obloukovitých puklin (Adamovič et al. 2010). Tlakově ovlivněná (tzv. exfoliační) klenba pak obvykle určuje vývoj brány i její morfologickou odolnost. Z hlediska stability je důležitý zejména tvar elipsy napjatosti, poměr mocnosti oblouku a výšky otvoru brány (Young et al. 2009), a též poměr mezi napětím v tahu a tlaku, určující celkový model pole napětí podél skalního oblouku (Hoek & Brown 1980).

2.3. Národní park České Švýcarsko

NPČŠ představuje vzorové území, neboť na rozdíl od ostatních českých národních parků se zde hlavním předmětem ochrany stala právě unikátní geomorfologie pískovcového reliéfu (Vařilová 2002a,c, Mikuláš et al. 2007) a na ni navázaná rozmanitost ekosystémů, rostlinných a živočišných druhů (viz zákon č. 161/1999 Sb.). Charakter krajiny je zde předurčen výrazně členitým skalnatým reliéfem. Tato vertikální členitost krajiny (reprezentovaná několikastupňovými skalními etážemi, velkou četností hlubokých údolí a roklí lemovaných vysokými skalními stěnami – Balatka & Sládek 1984, Valečka 1997, příloha C) ovlivňuje lokální mikroklimatické poměry (např. Glöckner 1995, Riebe et al. 1999, Tolasz et al. 2007, Hostýnek 2010).

Vývoj zdejších skalních svahů je komplexním procesem s uplatňováním jednotlivých morfogenetických režimů (Zvelebil 1989, příloha C). Procesy zvětrávání a eroze spolu s procesy gravitačního porušování jsou při modelaci reliéfu v kvádrových pískovcích NPČŠ významnými procesy odnosu materiálu z povrchu skalních masivů, avšak poměr a způsob jejich působení (spolupůsobení), jakož i výsledné formy se v daném regionu v čase a prostoru měnily (Kalvoda & Zvelebil 1983, Zvelebil 1989, příloha C). V minulosti to byly svahové pohyby, jež připravovaly podmínky pro uplatnění zvětrávacích procesů v opakovaně odhalovaných partiích pískovcových masivů. V současnosti se naopak zvětrávání stává jedním z hlavních faktorů, který nejenom ovlivňuje tvorbu mezo- a mikroforem skalního reliéfu (a související změny geometrie skalních stěn a svahů), ale rovněž vytváří podmínky pro další výskyt svahových pohybů, způsobených rozpadem skalních masivů a řícením jejich částí (příloha C). Vše probíhá v závislosti na charakteristických prostorově-časových měřítkách (viz Viles 2001).

Proces fyzikálního a chemického zvětrávání je obvykle uvažovaný v rozsahu mikroměřítek (např. Turkington & Paradise 2005), ačkoli může mít kumulativní dopad na velmi rozlehlé oblasti. V tom případě se však stávají důležité i faktory, které se uplatňují v rámci mezo- a makroměřítek (např. stratigrafie, geologická struktura či dynamika proudění podzemních vod), protože kontrolují prostor a dobu působení procesu zvětrávání a zároveň i vliv mikroměřítek na průběh těchto procesů (tedy jak konkrétně se bude zvětrávání uplatňovat - Viles 2001).

Území NPČŠ je navíc případem, kde je třeba se systematicky zabývat nejenom ochranou vybraných, z přírodovědného hlediska cenných skalních objektů na straně jedné, ale

zároveň degradací skalního reliéfu z hlediska bezpečnosti místních obyvatel i návštěvníků parku na straně druhé. V roce 2002 byla proto zavedena, v chráněných územích ČR svým plošným rozsahem ojedinělá prevence rizik skalního řícení, která obsahuje inženýrsko-geologické mapování rizikových skalních svahů a stěn, pravidelné kontrolní sledování vybraných skalních masivů s využitím moderních systémů i metod vyhodnocování dat (Zvelebil 1989, Zvelebil et al. 2005, příloha A, příloha F).

2.4. Modelové území – Pravčická brána

2.4.1. Geomorfologický vývoj a potenciální ohrožení

Tektonická predispozice území NPCŠ, v tomto případě ustupující okraj strukturní plošiny rozbrázděný systémem souběžných puklin v převažujícím směru SV – JZ (viz obr. 1 v příloze IV), umožnila vytvoření přes sto metrů dlouhého úzkého výběžku defilé Křídelních stěn, a stala se základním předpokladem pro tvorbu a vývoj Pravčické brány (dále jen PB). Skalní brána vznikala poté na bázi původní skalní zdi prohlubováním oboustranného převisu v úrovni dnešní základny brány, postupným rozšiřováním otvoru vypadáváním bloků a skalních šupin podél obloukovitých exfoliačních puklin za spolupůsobení selektivní boční eroze a procesů zvětrávání až do dnešní podoby (popis vzniku brány v širších souvislostech uvádí Zvelebil et al. 2002 či příloha B). Z hlediska dosavadního geomorfologického vývoje a předpokládané životnosti náleží PB ke zralým formám (dle znaků uváděných The Natural Arch and Bridge Society) a nachází se ve druhé polovině své existence.

Celková výška skalního ostrohu, zahrnujícího těleso PB, je asi 70 m; přičemž těleso brány se nachází v jeho nejvyšším stupni. Skalní brána je v geomorfologické klasifikaci (Balatka & Sládek 1984, Vitek 1981 a 1983) řazena k mezofarmám zdejšího reliéfu a dosahuje výšky 16 m a délky 26,5 m. Vzhledem ke své geometrii a expozici je v současnosti ohrožována nejen namáháním od vlastní tíže, ale také extrémními mikroklimatickými vlivy. Ty působí jednak ve formě dynamických účinků objemových změn, jednak jako hnací síla fyzikálního i chemického zvětrávání. Vlastní geologická a tektonická stavba tělesa spolu s externími vlivy se pak komplexně projevují v postupném snižování kvality horniny, včetně jejích fyzikálně-mechanických vlastností. Klíčovými partiemi je samotný skalní oblouk a jeho styk s masivy obou podpěrných pilířů (Zvelebil et al. 2002, Vařilová et al. 2005).

Pravčická brána byla v posledních 200 až 250 letech vystavena také nezanedbatelným vlivům antropogenním (Vařilová et al. 2005 či Vařilová 2010a). Ty svým působením přímo i

nepřímo ovlivňují zvětrávání a erozi pískovcového materiálu, čímž dochází k narušení přirozeného vývoje a urychlení postupující destrukce skalních forem. K přímému antropogennímu působení došlo vlivem intenzivního turistického využívání dané lokality. K hlavním doloženým negativním vlivům, jež měly v minulosti za následek narušení či nevratné poškození PB a jejího blízkého okolí, náležel nekontrolovaný pohyb osob. Vysoká návštěvnost tělesa Pravčické brány způsobila extrémní mechanickou erozi jeho svrchní partie. Vlivem pohybu velkého počtu návštěvníků došlo za přibližně 250 let k denudaci 60 až 80 cm mocné vrstvy pískovce (viz archivní kniha NPP PB, obr. 6a v příloze III), nejpoškozenější část horní partie trámce byla dokonce v minulosti zpevněna vyzděním (obr. 6b v příloze III).

Zejména zkoumanou otázkou v posledních desetiletích je pak ohrožení zdejších skalních masivů antropogenně nepřímo vyvolanými, či ve svých účincích posilovanými procesy solného zvětrávání (Cílek & Langrová 1994, Zvelebil et al. 2002). Předchozími studii bylo na základě izotopického složení síry prokázáno, že nejběžnější sole jsou produkty reakce kyselých dešťů s horninovým podkladem (např. Buzek et al. 1991, Buzek 1995, Soukupová et al. 2002, Sadílková 2003, Holeček 2004, Schweigstillová et al. 2009). Solné výkvěty se zde v závislosti na stupni jejich rozpustnosti, na okolní teplotě a vlhkosti rozpouštějí a krystalizují v opakovaných cyklech (Winkler 1994). V rámci širšího území NPČŠ, i v rámci samotné skalní brány se však intenzita uplatnění zvětrávacích procesů liší. Z hlediska geomorfologické odolnosti skalních útvarů a tvorby mezo- a mikrotvarů je podstatný vzájemný poměr mezi dvěma antagonistickými procesy – poškození pískovce vlivem krystalizace vodorozpustných solí a povrchového zpevnění tvorbou ochranných skalních krust (Winkler 1994, Goudie & Viles 1997, Cílek 1998b, Young et al. 2009).

2.4.2. Ochranné podmínky

Těleso Pravčické brány a její bezprostřední okolí bylo v roce 1963 vyhlášeno chráněným přírodním výtvořem (CHPV) a roku 1992 překlasifikováno na **národní přírodní památku (NPP)**. Získalo tak statut nejpřísnějšího stupně ochrany maloplošných území v České republice. Přírodní výtvoř - skalní brána je v současné době chráněna jednak podle § 35 zákona č.114/1992 Sb. (o ochraně přírody a krajiny) a jednak dle zákona č. 161/1999 Sb. (kterým se vyhlášíje NP ČŠ) – viz pozn.* Chráněny jsou rovněž skalní masivy v bezprostředním okolí, hřbety a pilíře s ukázkově vyvinutými tvary povrchu, jež jsou hojně využívány jako vyhlídky do okolní krajiny.

V rámci plánu péče o NPP Pravčická brána, navrženého vždy pro desetileté období (aktuálně pro 2005 – 2014), byly stanoveny hlavní zásady péče a managementová opatření (Friml 1994, Vařilová et al. 2005). V areálu NPP PB by měl být **zachován a ochrannými prostředky zabezpečen přirozený vývoj skalních forem a útvarů**. Zvláštní pozornost je poté věnována snaze **minimalizovat možné negativní antropogenní vlivy**. Nezbytnou součástí schváleného plánu péče se stal stručný rozbor potenciálních rizik, plán zásahů a opatření, a rovněž návrhy na geologický průzkum území a systematické sledování vybraných složek přírodního prostředí (viz Vařilová et al. 2005 - tab. v příloze I).

2.4.3. Dosavadní výzkumné aktivity

Součástí péče o NPP Pravčická brána byly v minulosti pouze nepravidelné vizuální prohlídky stavu (viz zápisy z místních šetření za účelem kontroly stavu NPP - archivní kniha PB). V březnu roku 1982 zajistil zástupce SÚPPOP prohlídku, včetně přešetření stability CHPV PB a srovnání jejího stavu s posledním dochovaným písemným kontrolním záznamem z roku 1977. Ten, mimo jiné, již tehdy obsahoval prvotní návrhy na konzervační zásah, jenž měl být realizován po zaměření tělesa, dokumentaci významných puklin či jejich osazení hlavními kontrolními skličky, a rovněž návrh na potah povrchu skalní brány jako ochrany před ošlapem (viz Skřivánek & Vulterin 1977).

Z důvodu intenzivní antropogenní eroze horní partie tělesa a identifikace příčné trhliny na spodní části oblouku Pravčické brány (Skřivánek 1982) byl **vstup na oblouk brány v roce 1982** z podnětu někdejšího okresního konzervátora SOP Severina Jungbauera a MNV Hřensko **zakázán**.

* Pozn. - zákonná omezení v NPP Pravčická brána:

Přírodní výtvar (skalní brána) je v současné době chráněn jednak podle § 35 zákona č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů. Není dovoleno ohrožovat nebo měnit dochovaný stav přírodního výtvaru ani jeho okolí, jakékoli úpravy chráněného objektu (včetně sanačních zásahů) lze provádět pouze se souhlasem orgánu státní ochrany přírody. Výjimku z tohoto zákazu povolovala v minulosti (podle § 43 zákona č. 114/1992 Sb., v platném znění), v každém jednotlivém případě vláda, od konce roku 2009 je to v kompetenci přímo Správy NPČŠ (viz novela zákona o ochraně přírody krajiny - zákon č. 349/2009 Sb.). Zároveň platí na celém území NPČŠ zákaz zasahovat do přirozeného vývoje skalních útvarů z jiných důvodů, než je bezprostřední ohrožení lidského života či zdraví nebo bezprostředně hrozící škoda značného rozsahu na majetku (dle § 3 odst. 1 písm. a) zákona č. 161/1999 Sb. Výjimku z tohoto zákazu může vydat příslušný orgán ochrany přírody (dle § 2 odst. 3 zákona č. 161/1999 Sb.), a to zejména v nezbytných a odůvodnitelných případech, kdy je možné zaručit, že z hlediska ochrany přírody nebude realizace plánovaných zásahů představovat podstatnou změnu v přirozeném vývoji skalních útvarů v dané lokalitě, ani podstatnou změnu dochovaného stavu přírody.

V osmdesátých letech minulého století byl vyhotoven první, velmi stručný inventarizační průzkum chráněného skalního výtvaru (Blažková 1986), jenž shrnoval spíše obecné informace o geologii a geomorfologii dané oblasti, včetně geologických poměrů na území CHPV a v jeho blízkém okolí. Stabilitní průzkum skalního útvaru byl zahájen až v letech devadesátých (rovněž z důvodu objevení další trhliny ve spodní části stropu trámce brány v roce 1992, která se po detailnějším průzkumu ukázala být jen okrajem povrchové šupiny, nemající vliv na stabilitu). V té době vznikly také **obavy o relativně krátkou (tj. v měřítkách lidského života) trvanlivost tělesa brány**, strach z jejího možného zřícení a možného ohrožení turisticky využívaného prostoru pod ní (Zvelebil et al. 2002; příloha B). Českým ústavem ochrany přírody v Praze (dále jen ČÚOP) byl vyhotoven půdorysný a bokorysný náčrt tělesa, vycházející z fotogrammetrického zaměření z roku 1978, na jehož základě byla vypracována jednoduchá geometrická a inženýrsko-geologická dokumentace objektu – viz Stemberk (1993) a Stemberk et al. (1993). Srovnáním fotodokumentace nebyly shledány rozdíly mezi tehdejšími aktuálním stavem (1992) a zobrazením z let 1975 a 1982 (viz archivní kniha - zápis z jednání k problematice zabezpečení NPP PB, 1992). Ani porovnáním stavu brány v roce 1993 s původním fotogrammetrickým náčrtem nebyly zjištěny žádné vizuální rozdíly, svědčící o rozšiřování zachycených trhlin (Stemberk 1993). Rovněž byly provedeny dva orientační stabilitní výpočty, každý založený na jednom ze dvou možných zatěžovacích schémat (Košťák et al. 1993). Šlo jednak o prostý model nosníku (trámového mostu), vetknutého ze severu do mateřského masivu, který jen lehce spočívá na odděleném jižním pilíři a působí zde namáhání tahem za prostého ohybu. Druhý pak předpokládal složitější kombinaci zatížení spolu s vratnými teplotními dilatacemi, případně i pohybů nevratných, jež byly interpretovány jako naklánění vnitřní části údolního pilíře do volného prostoru okna brány za vzniku klenbového efektu (blíže viz Zvelebil et al. 2002). Výsledky výpočtu podle prvního modelu ukázaly na kritická tahová napětí, tedy vysokou míru nestability brány a nebezpečí jejího zřícení. Výsledky druhého, realističtějšího výpočtu byly o něco příznivější - vykazaly mírnou stabilitní rezervu. Oba modely však využívaly nízký stupeň znalosti geometrie tělesa v místech nepřístupných přímému ohledání. Byly provedeny pouze na základě vizuálně zhodnocené stavby tělesa a předpokládaného průběhu hlavních ploch nespojitosti, bez jejich ověření a přesné dokumentace.

Na klíčová místa potenciální nestability byla již v roce 1993 **instalována síť dilatometrického kontrolního sledování** (Stemberk et al. 1993). Zjištění charakteru pohybů mezi jednotlivými částmi brány by totiž podstatně zvýšilo pravděpodobnost správnosti výběru

mezi oběma zátěžovými modely. Získání řady dlouhodobých údajů a zjištění vývojových trendů pohybů brány by pak umožnilo pokus o časový model vývoje nestability tělesa. Základní popis a monitoring brány byl iniciován a financován z prostředků tehdejšího ČÚOP (prostřednictvím Správy CHKO Labské pískovce). První výsledky dilatometrického sledování (Stemberk et al. 1994, Stemberk et al. 1995) naznačovaly existenci vratných i nevratných deformací, vedoucích ke druhé, stabilitně příznivější, prognóze (Zvelebil et al. 2002). Vzhledem k malé četnosti ručních měření však nebylo možné tuto skutečnost dostatečně přesvědčivě prokázat. V roce 1997 bylo proto přikročeno k prvnímu pokusu o zřízení automatizovaného systému se 6 dilatometrickými čidly pro kvazi-kontinuální sledování s frekvencí měření 1x za hodinu (výsledky publikovány v práci Zvelebil et al. 2002). Tato automatizovaná kontrolní sledování však byla pro nedostatek finančních prostředků na časté a nákladné opravy předčasně ukončena (Zvelebil - ústní sdělení). Nicméně, analýza i těchto relativně krátkých, pouhých dvou měsíčních časových řad významně posílila větší reálnost optimističtějšího stabilitního scénáře (zejména zásluhou zjištění skokových deformací s povahou tzv. stick-slip efektu v posunech trámce stropu brány po údolním pilíři - Zvelebil et al. 2002). Krátkost získaných kvazi-kontinuálních časových řad však neumožnila rigorózní průkaznost.

Počáteční studium bylo také zásadně omezeno **nedostatkem informací o dlouhodobém poklesu pevnosti kvádrových pískovců zvětráváním**, včetně neznalosti pravděpodobnosti stupňování působení zvětrávacích procesů přímo na tělese PB. Existovala pouze sporadická pozorování zachycující tuto problematiku, přičemž nejstarší z nich pocházejí z osmdesátých let minulého století (viz Skřivánek 1982). Dle zachovaného kontrolního zápisu byl stav brány shledán v hlavních rysech stejný jako v roce 1977, pouze na jižní stěně severního pilíře brány byl popsán intenzivnější opad povrchových partií horniny. Problém povrchového zvětrávání pískovce v zóně vymezené otvorem brány byl poprvé řešen až letech 1992 - 1994 v rámci korespondence zástupců CHKO Labské pískovce s odbornými institucemi k možnosti zabezpečení NPP PB (viz korespondence - archivní kniha NPP PB). Orgány ochrany přírody v té době opět zvažovaly eventuality statického zajištění skalního útvaru či konzervaci skalního masivu syntetickými pryskyřicemi (viz korespondence - archivní kniha NPP PB).

Pro odpovědné posouzení případné nutnosti záchrany skalního objektu a nalezení optimálního způsobu sanace (včetně zhodnocení jejího krátko- i dlouhodobého účinku) bylo v první řadě žádoucí rozšíření výzkumu jednak o zachycení deformačního chování objektu v jeho odezvách na působení vnějších faktorů (zejména teploty), a jednak o studium

zvětrávání vlivem krystalizace solí, které bylo nejvíce patrné právě na tělese brány. První orientační odběry vzorků a laboratorní analýzy solných výkvětů na tělese brány byly provedeny v roce 1997 v rámci probíhajícího projektu MŽP ČR (PPŽP 610-6-96; výsledky uvedeny v dílčích závěrečných zprávách Zvelebil & Cílek 1996, 1997, publikaci Cílek & Langrová 1994 a Příkryl et al. 2001). Nejvýznamnějším výstupem, shrnujícím data kontrolního sledování do roku 2001 spolu s výsledky geochemického studia, je publikace Zvelebil et al. (2002). Výsledky chemických analýz vzorků solí, odebraných přímo z tělesa PB, byly v minulosti prezentovány také v publikacích, srovnávajících produkty krystalizace solí z různých částí ČKP (Soukupová et al. 2002, Schweigstilllová & Hradil 2007, Schweigstilllová et al. 2009).

3. Metodika výzkumu a výsledky

Zde prezentovaný souhrnný výzkum úzce navázal na předchozí výzkumné aktivity započaté v devadesátých letech minulého století. Přináší tedy syntézu všech, za 18 let o Pravčické bráně nahromaděných dat, především však informací, získaných v letech 2002 až 2009 buď přímo vlastním systematickým výzkumem, či během výzkumných aktivit s danou problematikou přímo souvisejících, které byly za tímto účelem iniciovány a odborně koordinovány. Došlo tak k doplnění nesourodých informací z lokality NPP PB o výsledky detailního průzkumu a dlouhodobého sledování vybraných procesů s využitím souboru finančně dostupných a převážně nedestruktivních vědeckých postupů. Byla zvolena kombinace metod, postihující nejenom základní informace o samotném tělese PB a jeho chování, vlastnostech horninového masivu, intenzitě a projevech zvětrávání, ale rovněž o hlavních působících externích faktorech. Výčet metodických postupů (včetně tématických návazností) zobrazuje schéma níže (obr. 1).

Znalost vnitřní stavby a míry oslabení horninového masivu, spolu s pochopením procesů zde probíhajících, je základem pro posouzení současného stavu, budoucího vývoje i pro navržení optimálního způsobu ochrany této přírodní památky. Proto je většina prioritních výzkumných aktivit rovněž uvedena ve schváleném Plánu péče o NPP Pravčická brána 2005 – 2014 (Vařilová et al. 2005, tab. v Příloze I). Pravčická brána však není běžnou studijní lokalitou z důvodu mnohých (nejenom zákonných) omezení, která různou měrou komplikovala naplánovaný výzkum. Hlavní limity studované lokality i využitých metod jsou uvedeny v Příloze II.

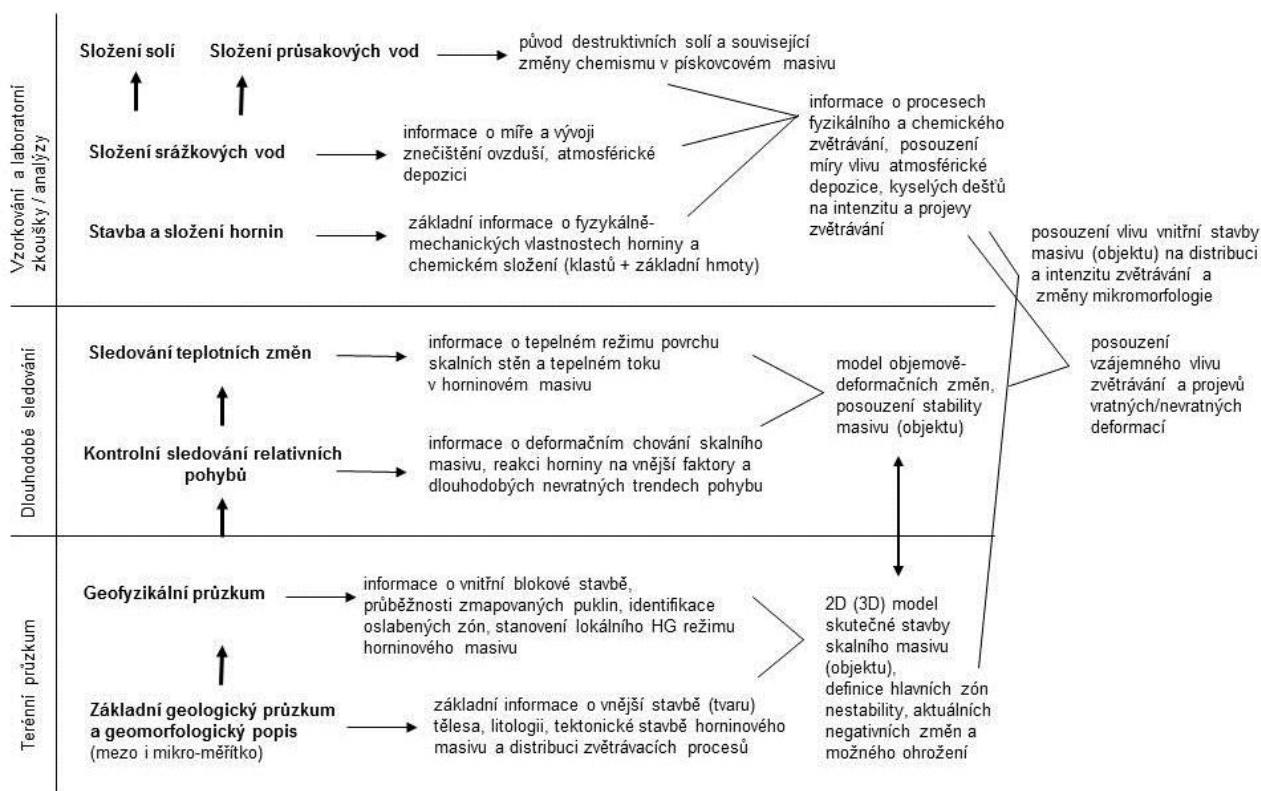
3.1 Geologická, tektonická a geomorfologická dokumentace

Pro studium pískovců z NPP PB a jejího okolí bylo využito jednak **běžné geologické dokumentace v terénu** (rozdělené dle měřítek geomorfologické klasifikace – Vítek 1979, Balatka & Sládek 1984, Rubín & Balatka et al. 1986) **a zároveň doplňujících laboratorních metod**. Oba soubory metod nelze od sebe oddělit a společně vytváří základ souboru informací, potřebných pro posouzení vlastností sedimentárních hornin.

3.1.1. Laserové skenování tělesa a jeho okolí (makroměřítko)

Velkou výhodou dnešní doby je použití moderních dokumentačních a zaměřovacích metod, které umožňují reálné zobrazení prostorového uspořádání, vzdáleností a dispozic skalního reliéfu i vybraných forem a jeho následné využití pro znázornění sledovaných parametrů či modelování probíhajících procesů.

Kromě výstupů z **leteckého snímkování (Air Laser Scanning)**, reprezentujících soubor referenčních dat velkého měřítka (digitální ortofotomapa, digitální model terénu NPČŠ a jeho širokého okolí – Csaplovics 2007, příklady na obr. 1, 2, 3, 4 v příloze IV), bylo již na počátku komplexního studia (v roce 2003) provedeno také **detailní prostorové skenování skalního útvaru Pravčická brána** (obr. 4, 5, 6 a,b v příloze IV). Potenciál uplatnění výstupů z laserového snímkování nebyl prozatím plně využit. Data velkého měřítka přinesla nové možnosti jejich zpracování ve víceúrovňové aplikaci geografického informačního systému (GIS) - využitelná jsou zejména pro plošnou tektono- či morfostrukturní analýzu širšího okolí brány. Prostorový model tělesa PB posloužil pro účely této práce jako podklad pro zpracování sledovaných parametrů, zejména pro zobrazení výsledků měření teplot a geofyzikálního průzkumu.



Obr. 1. Schéma znázorňující metodický postup v rámci realizovaného komplexního studia tělesa PB, od klasických metod průzkumu až po úzce tématicky pojaté nadstavby, jež umožnily vhodně doplnit původní základní výzkum a rozšířit pole pro stanovení vzájemných interakcí, včetně souborných interpretací.

3.1.2. Klasický terénní průzkum (mezoměřítko)

Skalní hřbet a těleso brány byly posuzovány z nejprve z hlediska celkové stavby a poté rovněž se zřetelem na současné projevy povrchového zvětrávání (viz mikroměřítko – kap. 3.1.3.). Úzký skalní hřbet (skalní zeď – např. Rubín & Balatka et al. 1986 či Adamovič et al. 2010) s bránou je tvořen třemi subhorizontálními etážemi, oddělenými od sebe litologicky podmíněnými stupni, jež tvoří výrazné převisy. Přítomnost těchto stupňů umožnila pracovní rozdělení skalního hřbetu na 3 hlavní vertikální celky (A, B, C – viz obr. 1, 2 v příloze III či příloha K), přičemž největší pozornost byla věnována dokumentaci jeho nejvyšší části (A). Sedimentologická charakteristika skalního hřbetu byla provedena s ohledem na stabilitní poměry skalní brány, tedy za účelem rozpoznání primárních, litologicky predisponovaných zón snížené pevnosti (a naopak poloh s potenciálně vyšší odolností) a posouzení možného odlišného chování trámce brány a jejích pilířů. Litologie úpatí skalních stěn (v úseku podél Gabrieliny stezky – příloha D) byla popsána s ohledem na možnost srovnání rozsahu a míry zvětrávacích procesů v různě exponovaných částech skalního defilé.

Pravčická brána i skalní věže v jejím okolí jsou tvořeny nejvyšší částí jizerského souvrství, řazeného do středního až svrchního turonu (Valečka 1997, Čech et al. 1980). Pro skalní masivy v místě NPP PB je typická **subhorizontální vrstevnatost s kvazi-cyklicky proměnnou zrnitostí** (např. Valečka 1989, Uličný et al. 2009), pouze v určitých úsecích s mírně ukloněnými vrstevními plochami (tzv. klinofomy tvořící vrcholy nahoru hrubnoucích sekvencí se sklonem do 5° k JJZ ve výšce 14 až 17,5 m profilu brány – příloha B). Úpatí skal v úrovni báze skalního oblouku Pravčické brány tvoří jemnozrnné až středně zrnité pískovce s ostře nasedajícími slepencovými polohami, větší část skalního oblouku (tj. jižní a severní pilíř) se pak vytvořila ve středně až hrubě zrnitých pískovcích. Z hlediska hydrodynamického režimu je významná poloha měkkého žlutavého pískovce, obsahující až 2% živce (Zvelebil et al. 2002) a vyšší podíl kaolinitu v základní hmotě. Kompletní litologii a sedimentologii profilu skalní brány popisuje práce v příloze B. Na tělese PB je rovněž zřejmá stratigrafická podmíněnost kavernozy pískovce. Méně odolné polohy v rámci profilu skalní brány (obvykle slepencové polohy či šikmo zvrstvené polohy jemno- až středně zrnitého pískovce s příměsí křemenných valounů) tvoří horizontální skalní římsy a rozdělují těleso na dílčí výškové sekvence (viz tab. 2 v příloze V). Další popsané strukturní znaky hornin (příloha B) nemají zásadní vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti posuzovaného celku. Nejvyšší část perforace brány leží již v úrovni intervalu hrubozrnného pískovce, nahoře zakončeného polohou slepence s podpůrnou strukturou matrix a valouny do 1 cm. Tato nesoudržná poloha

slepence tvoří hlavní vodorovné rozhraní (ložní spáru, značenou L0) mezi trámcem a jižním pilířem brány ve výšce 17,5 m a byla již v minulosti identifikována jako poloha významně ovlivňující stabilitu Pravčické brány (Košťák et al. 1993). Původní zprávy však předpokládaly (na základě vizuálního zhodnocení) její průběžnost v celé šíři tělesa (Košťák et al. 1993, Zvelebil et al. 2002).

Samotný trámec brány je relativně subtilní (v nejužším místě oblouku dosahuje jeho šířka 7,5 m a mocnost je přibližně 2,5 m), jeho osa má orientaci SV - JZ a je materiálově odlišný od spodní části tělesa. Tvoří ho deska jemnozrnného až středně zrnitého pískovce, v jejíž nejspodnější vrstvě mocné 4,5 m nejsou žádné slepencové polohy. Zajímavostí je přítomnost železitých klastů (tzv. ferolitů) ve dvou výrazných slepencových polohách ve výšce 21,5 a 22 m, přičemž vyšší poloha tvoří svrchní část skalního hřbetu v jeho nejjižnější části (viz Vařilová 2002b či příloha B).

Příčnou stavbu reprezentují **subvertikální pukliny** orientované v převažujícím sz. – jv. (lokálně i ssz. – jjv) směru, které nejenom rozdělují úzký skalní ostroh na jednotlivé dílčí části, ale rovněž ovlivňují cirkulaci roztoků v horninovém masivu i rozložení vnitřního napětí. Blokovaná stavba samotné PB je v celkovém měřítku charakterizována dvěma hlavními celky, oddělenými puklinami, které lze pozorovat po obou stranách skalního objektu (tak, jak byly popsány již v minulosti – Stemberk 1993). Nejvýraznější je otevřená, napříč celým tělesem průběžná (ve vrcholové partii i průchodná), do podloží pokračující příčná subvertikální spára (T0 na obr. 3). Ta tvoří jižní (tj. údolní) ukončení trávce brány a rovněž formální hranici většiny probíhajících výzkumných aktivit.

Skalní brána netvoří klasický celistvý oblouk. Na první pohled kompaktní celek vytváří severní pilíř spolu s nevýraznou klenbou (trámcem), oddělenou od jižního pilíře vertikální ložní spárou. Samotný jižní pilíř je pak druhým samostatným celkem. Na severním pilíři se nachází výrazná obloukovitá trhlina, kopírující ve vzdálenosti přibližně 5,5 m jeho okraj (a částečně zasahující do nejspodnější polohy pískovce tvořící trámec), která by mohla představovat základ další etapy exfoliačních opadů v rámci vývoje skalní brány. Její možná průběžnost napříč masivem (uváděná Stemberkem 1993) je však prozatím pouhou spekulací. Další významnou sekundární poruchou, procházející napříč vrstevnatostí (s možným vlivem na stabilitu brány), je šikmá puklina, oddělující trojúhelníkový blok v jižním pilíři (T2 na obr. 3). V minulosti byl předpokládán její šikmý průběh napříč masivem spolu s vizuálním projevem na východní straně brány – viz T3 na obr. 3 (Stemberk 1993). Její průběh směrem nahoru do trávce brány je naznačen pouze morfologicky. Ostatní zdokumentované sekundární trhliny jsou vyznačeny v publikaci v příloze L, nejedná se však o nově (v rádech

posledních let) vzniklé poruchy a jejich vliv na celkovou stabilitu není významný. Ani na spodní straně trámce Pravčické brány nebyla od roku 1993 identifikována žádná nová trhлина, jediná stávající v příčném směru nejeví znaky čerstvé aktivace (obr. 4 přílohy III). Další linie ve stropu brány jsou již pouhé povrchové projevy zvětrávacích procesů, jež jsou morfologicky zvýrazněné podél rozhraní vrstevnatosti.

Na skalním hřbetu byly popsány mnohé mezofomy (např. skalní okna, pseudoškrapy, ad. – Vařilová 2010b) i lokální zajímavosti (např. fulgurity – Cílek 1997, Vařilová 2010b), které však nemají žádnou tématickou návaznost na studovanou problematiku, proto jim v této práci není věnován další prostor.

3.1.3. Dokumentace a sledování intenzity zvětrávání (mikroměřítko)

Hlavní pozornost byla věnována **popisu míry, rozsahu a rozmístění antropogenně podmíněných projevů zvětrávání** a změnám barevnosti povrchu skal, včetně srovnání změn mikromorfologie téhož místa v delších časových odstupech. Dokumentace povrchového zvětrávání byla přednostně prováděna v reprezentativních úsecích ve vrcholových partiích a na bázi skalní brány, dále v převisu, tvořícím hranici mezi partiemi B a C a na úpatí skalního defilé podél Gabrieliny stezky (viz úsek I až VI v příloze K a příloze III). Mocnost a charakter skalních (opálových) krust se na tělese PB liší v závislosti na výšce i expozici vůči klimatickým vlivům (viz příloha K). Nejrozsáhlejší projevy fyzikálního zvětrávání, spojené s poškozením a opady skalní krusty byly zjištěny na úpatí tělesa, tedy v polohách hrubozrnějších sedimentů nad méně propustnou vrstvou (s vyšším obsahem jílovité základní hmoty). Zde dochází k hromadění vlhkosti a krystalizaci solí na povrchu skal či pod rigidní opálovou skalní krustou, následkem je pak její perforace a intenzivní drolivý rozpad pískovce s vylouženou základní hmotou obvykle do hloubky několika cm (max. prvních desítek cm). V rámci jednotlivých studovaných profilů byly však projevy solného zvětrávání obvykle dokumentovány již nezávisle na vrstevním sledu hornin (viz příloha K).

Z hlediska zvětrávání pískovců jsou velmi důležité exfoliační trhliny/mikrotrhliny orientované rovnoběžně s horninovým povrchem (méně často pak kolmo k horninovému povrchu), které jsou dokladem působení krystalizačního tlaku růstem krystalů solí a mrznoucí vody (příloha D, příloha K). Právě přítomnost těchto trhlin způsobuje odlupování celých šupin či tenkých desek (až několik cm mocných) bez ohledu na původní mikromorfologii skalních stěn. Cílek & Langrová (1994) pozorovali na skalních výchozech v blízkosti PB dokonce odlupování skalních ploten 2 až 10 cm mocných. Původně popisované sekundární

trhliny ve stropu trámce brány (např. Stemberk 1993) jsou také pouhé projevy přípovrchového zvětrávání, které mají však od osmdesátých let 20. století mírně progradující charakter (viz srovnání fotodokumentace v obr. 5 přílohy III). O relativní rychlosti tvorby opálových skalních krust i míře solného zvětrávání přímo na Pravčické bráně svědčí uměle otesané povrchy stěn (max. 150 let staré). Na nich se vyvinuly až 15 mm silné opálové kůry, které jsou však na jižní, více exponované stěně již opět výrazně destruovány krystalizací solí. Příkladem je několik vybraných studijních ploch, které byly průběžně dokumentovány s cílem kvantifikovat míru opadu povrchových krust na tělese PB (viz příloha K).

Dalším pokusem o sledování míry a rychlosti zvětrávání povrchu a odnosu pískovcových hornin bylo zavedení **sledování pomocí mikronivelačních změn povrchu terénu** (více k metodice in Jánová & Liščák 2002). Aplikované postupy se však ukázaly jako nevyužitelné pro tento typ sedimentárních hornin, tedy zvětráváním postižené pískovce jizerského souvrství ve zvoleném měřítku (vysvětlení v příloze X). Výsledky sledování z této části výzkumu nebyly proto publikovány.

K nepřírozeným vizuálním projevům náleží tmavě šedé až černé zbarvení, projevující se rovněž jako důsledek dlouhodobého znečištění ovzduší (viz příloha K). Výrazné změny barevnosti v relativně dlouhodobém měřítku (v řádech desítek až stovek let) byly prokázány srovnáním současných a historických vyobrazení tělesa (Zvelebil et al. 2002). Přírozená barva skalních povrchů je dnes patrná pouze na samém vrcholu trámce či ve spodní - vegetací více chráněné části skalního hřbetu (v etáži B a C), lokálně i na oblých plochách pseudoškrapů či na šikmých hranách skalní stěny, kde dochází k mechanické erozi povrchu. Změny barevnosti v krátkodobém měřítku (v řádech několika posledních let) nebyly zaznamenány (příloha K).

Těleso PB se také výrazně liší od ostatních studovaných míst v NPČŠ s ohledem na přítomnost vegetace. Na skalních stěnách jsou pouze ojediněle přítomny vyšší rostliny, i nižší rostliny (mechy či lyšejníky), na rozdíl od skalních masivů v hlubokých roklích NP, kde často téměř souvislý organický pokryv udržuje vlhkost a brání tak odpařování z otevřených konců pórů či trhlin (např. Winkler 1994).

3.1.4. Stanovení základních fyzikálně-mechanických vlastností

Při výzkumu NPP PB a jeho okolí nebylo možné stanovit všechny parametry studovaných pískovců v rozsahu předepsaném pro standardní zkušebnictví. Velkým omezením v případě tohoto výzkumu byla nemožnost využití běžných destruktivních metod pro odebrání vzorků pískovců. Z důvodu extrémní rozpadavosti hornin (spolu s projevem zpevnění tenké

povrchové krusty) nebyl úspěšný ani pokus o odběr vzorků s využitím maloprůměrových vrtů z výchozů mimo oblast NNP, avšak v souvrství odpovídajícím profilu PB. Z uvedených důvodů **nebylo reálné nejenom shromáždit reprezentativní sadu vzorků** ze všech litologických vrstev v rámci studovaného defilé, omezena byla také velikost odebraných vzorků (což dále limitovalo výběr laboratorních metod, jejich opakování a tedy i objem využitelných výsledků). Pro laboratorní zkoušky malého množství odebraných hornin byly proto **vybrány jen nejpodstatnější parametry hornin** z hlediska studia zvětrávacích procesů a základních pevnostních charakteristik.

Pro mikroskopii a laboratorní zkoušky byly využité části volných bloků či desek v minulosti opadaných z různých částí skalního hřbetu (včetně samotného tělesa brány), u nichž byla známa jejich původní výšková pozice a orientace. Jako srovnávací vzorky byly použity přípovrchové části horninového masivu odebrané v místech, kde probíhaly intenzivní procesy zvětrávání a předpokládalo se jejich brzké mechanické zničení přirozenými procesy (stejným způsobem byly odebrány i vzorky pískovce pro chemické analýzy – viz kap. 3.3.3.). Seznam všech odebraných horninových vzorků je uveden v tab. 3 přílohy V, vybrané fotografie vzorků jsou uvedeny na obr. 1, 2, 3 v příloze VI. Vzorky hornin byly charakterizovány s využitím optické mikroskopie a pevnostních laboratorních zkoušek.

a) Mikroskopie a složení pískovců:

Informace o fyzikálních vlastnostech, složení a struktuře hornin byly vhodně doplněny o výsledky dokumentace skalních výchozů podél Gabrieliny stezky (v rámci studovaného profilu značení jako partie C). I zde se jedná o středně až hrubě zrnitý pískovec, který se litologicky velmi podobá vyšším souvrstvím - viz Melounová (2006) či příloha D. Studium všech dostupných vzorků bylo potvrzeno, že hlavním horninotvorným minerálem pískovců je klastický křemen (SiO_2), ve vzorcích z okolí PB představuje 93 až 98 obj. % klastické složky. Vedlejším horninotvorným minerál je draselný živec ($\text{KAl Si}_3\text{O}_8$), který tvoří 2 až 7 obj. % klastů (příloha D). Muskovit, biotit a rovněž turmalín jsou v pískovcích akcesorickými minerály. Základní hmotu tvoří jílové minerály (kaolinit $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) a místy oxyhydroxidy Fe, na povrchu horniny rovněž novotvořený amorfni SiO_2 (vzniklý druhotnou silicifikací) (příloha D, příloha K). Tato povrchová silicifikace ve formě skalních kůr (v širším okolí PB i lokální přítomnost železitých inkrustací – Vařilová 2007) způsobuje snížení celkové pórovitosti, zároveň se výrazně zvyšuje tahová a tlaková pevnost dané partie horniny (např. Winkler 1994).

Pískovce turonského stáří byly již v minulosti statisticky vyhodnoceny jako nejvíce pórovité sedimenty Českého masivu, dosahující průměrných hodnot kolem 23 % (Kobr et al. 1997). Celková pórovitost je i ve zdejších středně až hrubě zrnitých pískovcích skutečně vysoká (pohybuje se mezi 25,6 a 43,9 obj.%, nejčastěji se pohybuje od 30 – 35 obj.%, u třech vzorků z PB mezi 25,6 – 30,2 obj.%), vlhkost pak mezi 3 a 14 hm.% a nasákavost dosahuje až 14 hm.% (viz příloha D). V důsledku přípovrchového zvětrávání dochází ke změnám velikostního rozdělení pórů a vzorky odebrané na povrchu skalních výchozů vykazují jiné vlastnosti než vzorek odebraný v nitru skalního masivu. V pískovcích, odpovídajících bázi skalního defilé byl prokázán nárůst objemu pórů ve velikostním rozmezí 3 500 – 4000 nm u vzorků s vyšší koncentrací solí oproti méně porušeným vzorkům (detaily in Melounová 2006, příloha D). Nárůst pórovitosti obvykle způsobuje snížení pevnostních parametrů (Goodman 1980, Příkryl 2006) a vede ke zvýšení vlhkosti a nasákavosti hornin, jež obvykle souvisí s dalším zhoršením mechanických vlastností. Takové pískovce mají pak typický drolivý rozpad s velmi nízkou soudržností.

Silikátové analýzy nebyly z časových a kapacitních důvodů na vzorcích odebraných v okolí PB prováděny, jako srovnávací údaje (zejména pro geochemické studium probíhajících zvětrávacích procesů) byly použity údaje z databáze ČGS - vybrané složky a jejich typické zastoupení v pískovcích jizerského souvrství jsou uvedeny v tab. 1 přílohy V.

b) Vlhkostní a pevnostní charakteristika:

Popis vzorků a metodika zátěžových laboratorních zkoušek je popsána v příloze VII, vzhledem k omezenému počtu vzorků je nutné brát výsledky pouze jako orientační údaje. Z laboratorních zkoušek je patrné, že **pevnost v prostém tlaku** u vzorků hornin z NPČŠ (kromě vzorků ze Hřenska) dosahuje velmi nízkých hodnot od 0,5 do 8 MPa (s průměrnou hodnotou 3,36 MPa za přirozené vlhkosti). Hodnoty pískovců jizerského souvrství se pohybují v rozmezí 1,1 až 4,2 MPa. Jde o poměrně nízké hodnoty v porovnání s pevnostmi v prostém tlaku 7,6 - 9,4 MPa, uváděnými předchozími studii z regionu děčínské vrchoviny (např. Zajíc et al. 1975). Pevnosti v prostém tlaku se následkem změny vlhkosti u některých vzorků mění pouze nepatrně - v některých případech pevnost stoupá se zvyšující se vlhkostí (viz vzorky s přirozenou vlhkostí), někde je trend opačný (viz vzorky s max. vlhkostí), u části vzorků nebyla zjištěna výraznější závislost. Uvedené údaje neodpovídají obvyklé a experimentálně prokázané závislosti rostoucí míry nasycení a poklesu pevnosti (až o několik desítek MPa – např. Hawkins & McConnell 1992, Vásárhelyi & Ván 2006, Yilmaz 2010).

Samostatnou skupinu pak tvoří pískovce z obce Hřensko, reprezentující bělohorské souvrství, které vykazují výrazně vyšší pevnost v tlaku než všechny ostatní studované lokality (zjištěné hodnoty mezi 19 až 42 MPa) a je zde patrná přímá závislost mezi vyšší pevností a menším nasycením horniny vodou (viz obr. 1 přílohy VII). Extrémně nízké hodnoty pevnosti byly naopak prokázány na zkoušeném vzorku PB-A/1a, který byl odebrán v úzkém převisu, v zóně intenzivního zvětrávání úseku IV, a při zkoušce pevnosti v prostém tlaku (při běžné laboratorní vlhkosti) dosáhl průměrné hodnoty pouhých 0,9 MPa (na rozdíl od pískovce ze střední úrovně skalního hřbetu s průměrnou hodnotou 6,6 MPa či pevnosti 2,78 MPa uváděné Brčkem 2010). Vyšší pevnosti v prostém tlaku byly naopak prokázány u vzorku ČS/blok_1 s vyšším obsahem železitých příměsí, a to při všech stupních nasycení vodou. Ve srovnání s totožným vzorkem bez proželeznění (ČS/blok_2) byl největší rozdíl (až 3,1 MPa) indikován při nasycení minimálním. Oproti tomu **pevnost v příčném tahu** (stanovenou brazilskou zkouškou) se v rámci studovaných lokalit zásadně nemění (u obou souvrství dosahují hodnot 0,3 – 2,4 MPa nezávisle na stupni nasycení). Nejnižší pevnost v tahu má opět vzorek pískovce PB-A/1, zkoušený za přirozené laboratorní vlhkosti – více v tab.1 a obr. 2 přílohy VII.

Při zkoušce rozpadavosti (slake durability test – příloha VII) bylo potvrzeno, že odolnost zkoumaných pískovců jizerského souvrství je nejčastěji velmi nízká až nízká (dle klasifikace Goodmana 1980). Zajímavé je srovnání drobnozrnného slepenec a vzorku jemnozrnného pískovce (PBA/1a) - oba dosáhly ve zkoušce nejvyšších hodnot, slepenec je však rozpadavější v podmínkách za sucha na rozdíl od jemnozrnného pískovce, který je nejméně odolný za mokra (v tomto případě však nejsou rozdíly tak výrazné – viz tab. 3 přílohy VII). Výsledky této zkoušky je třeba považovat pouze za doplňkový údaj, neboť počet vzorků nebyl zcela reprezentativní a podobné laboratorní zkoušky nezohledňují podmínky a procesy, kterým jsou skalní výchozy vystaveny v přírodním prostředí (Turkington & Paradise 2005).

Z provedených zkoušek vyplynulo, že pískovce z PB a jejího okolí lze celkově charakterizovat jako horniny s nízkou až extrémně nízkou pevností. Navětrání pískovců a jeho vliv na pevnost v prostém tlaku je zde významnější než například snížení pevnosti následkem změny vlhkosti. Podstatnou roli v rozložení pevnosti hraje povrchové zpevnění hornin tmelem (nejenom běžná silicifikace ale i např. přítomnost příměsí železa v tmelu ve formě hematitu).

3.2 Geofyzikální průzkum

Dosavadní interpretace kontrolního sledování pohybů i zátěžové modely Pravčické brány byly prováděny na základě pouhého vizuálního zhodnocení morfologické a tektonické stavby. Nezbytným krokem pro korektnost dalších úvah proto musela být znalost skutečné blokové stavby tělesa. K tomu bylo využito souboru geofyzikálních metod, které jsou sice nepřímým, avšak jediným nedestruktivním způsobem, jak horninový masiv popsat i dlouhodobě sledovat jeho změny. Aktuální stav horninového masivu byl charakterizován několika nezávislými parametry, které vhodně doplňují sporadické výsledky laboratorních zkoušek. Na rozdíl od nich ale nehodnotí vlastnosti hornin v omezeném detailu, ale jako celek s možností zobrazení výsledků ve dvojrozměrných řezech i trojrozměrném modelu.

Realizovaný geofyzikální průzkum byl zaměřen na potenciálně rizikové partie a místa nestability Pravčické brány - pozornost byla věnována vnitřní stavbě oblouku (s cílem ověření průběžnosti hlavních puklin, identifikace nových porušení či nehomogenit horninového masivu) a jižnímu, povrchově porušenému pilíři (se zvláštním zřetelem na způsob odvodňování oblasti a projevy intenzivního solného zvětrávání). V případě PB byla zvolena kombinace geofyzikálních měření, která sledují různé fyzikální parametry skalního masivu - **opakované měření georadarem, průzkum s využitím seismiky, odporového profilování a dipólového elektromagnetické profilování**, vše s ohledem na zákonem stanovené ochranné podmínky NPP, charakter studovaných hornin i nestandardní morfologii (včetně nutnosti modifikace zavedených postupů – viz Beneš 2008, Frolka et al. 2009). Vyhodnocování a interpretace získaných dat probíhaly v úzké součinnosti s geofyziky, s využitím speciálních programů a moderních postupů. Detailní výsledky průzkumu ze tří hlavních metod (georadar, seismická tomografie a DEMP) jsou shrnuty v příloze L.

Měření georadarem, poprvé realizované v roce 2002 (Svoboda 2002), bylo opakováno po šesti letech (Beneš 2008) navíc s rozšířenou sítí profilů, tak aby lépe postihly sledované parametry. S využitím georadaru byly v tělese PB zaznamenány **projevy puklin**, dokumentované na výchozech v příčném i podélném směru, jež nepravidelně rozdělují jižní pilíř brány na několik dílčích skalních bloků (ve většině případů byla prokázána jejich průběžnost skalním masivem). Nejintenzivnější postižení masivu a silné rozvolnění horniny je v hloubce odpovídající poloze výrazné vrstevní plochy, oddělující trámeč od jižního pilíře. Tato plocha je však průběžná a intenzivně zvětralá pouze ze západní strany (přílohu L srovnej se Zvelebil et al. 2002). Rovněž byly zjištěny drobnější sekundární trhliny uvnitř horninového masivu, srovnáním výsledků měření 2002 a 2008 pak objevena dokonce čerstvá lineární

porušení (zejména v oblasti jižní části trámce brány). Jako nejvýznamnější byla vyhodnocena otevřená podélná spára procházející trámcem v jeho jižní polovině (souběžná s jeho osou, v obr. 3 označena T0). Místo jejího předpokládaného ukončení (vyznívání) je stěžejní z pohledu možného oslabení skalního masivu i jeho budoucí stability. Hloubkový dosah viditelné příčné stropní trhliny, původně předpokládaný pouze do hloubky nejspodnější polohy pískovců v klenbě (Stemberk 1993), se jeví z výsledků georadaru jako výrazně mocnější. Byla také zdokumentována narůstající intenzita zvětrávání v přípovrchové části spodní strany trámce prokazatelná opakovaným měřením georadarem, a to již po šesti letech (příloha L).

Seismika ověřila rozsáhlé **oblasti oslabení nitra horninového masivu** v okolí klenby brány - v místech, kde byly již dříve vizuálně dokumentovány intenzivní projevy zvětrávacích procesů na povrchu horniny (Zvelebil et al. 2002, Vařilová et al. 2005, příloha K). Nejvíce oslabeným místem je trojúhelníková část jižního pilíře, která je navíc dle výsledků z měření pomocí georadaru nevelkým samostatným blokem odhraničeným průběžnými trhlinami uvnitř skalního masivu (viz obr. 3 a 6a). Získaná data jednoznačně neprokázala předpokládaná obloukovitá rozhraní v místech kontaktu trámce s oběma pilíři, která by dokladovala přípravu další fáze vývoje brány postupnými opady podél klenbové exfoliace. Pouze částečně jsou naznačena na seismickém tomografickém řezu, kde v prostoru jižního pilíře sledujeme šikmo upadající zónu vyšších rychlostí, odpovídající ohraničení trojúhelníkového bloku (viz obr. 4a).

Pomocí metody dipólového elektromagnetického profilování (DEMP) byly dále popsány rychlé změny saturace horninového masivu a stanoven lokální hydrodynamický režim jeho odvodňování (infiltrační oblast a akumulační oblast severního a jižního pilíře – viz příloha L).

Ostatní geofyzikální metody (odporová tomografie a mělká refrakční seismika) mají v rámci lokálních podmínek určitá metodická omezení. Přestože se v případě odporové tomografie jedná o metodu využívanou k posouzení míry vlhkosti hornin (např. Mol & Viles 2010), na lokalitě PB nebyly její výsledky zcela jednoznačné. Získaná data (i přes opakování vybraných měření a snahu neposuzovat absolutní hodnoty měřených parametrů ale pouze jejich relativní změny) nebylo možné při komplexním hodnocení prozatím jednoznačně interpretovat (více v příloze VIII).

V rámci realizovaného geofyzikálního průzkumu bylo snahou postihnout skalní těleso ve dvou měřítkách – tedy zhodnotit nejenom celkový stav brány (s využitím profilů vedených přes trámec brány), ale rovněž v rámci jednotlivých mikroprofilů. Ani výsledky těchto

mikroseismických a odporových měření, prováděných za účelem posouzení míry zvětrání svrchní partie skalních výchozů (do hloubky cca 40 cm), nevykazují jednoznačné závislosti, a nebylo je proto bohužel možné publikovat. Příklady dílčích výsledků uvedeny v příloze VIII, srovnání výsledků pak v tab. 2 této přílohy (kompletní výstupy geofyzikálního měření jsou k dispozici ve zprávě Beneše 2008).

3.3. Studium zvětrávacích procesů

Pro lepší pochopení reakcí probíhajících v pískovcovém masivu v rámci procesu zvětrávání byly studovány **tři hlavní fáze chemických změn**. Jako vnějšího vstupu (antropogenně ovlivněného zdroje) bylo využito složení atmosférických srážek, to dále porovnáváno se složením infiltrovaných a následně vykapávajících roztoků (reprezentované průsakovými vodami) a v neposlední řadě rovněž chemickým složením pevné fáze, tedy solných výkvětů (jako konečného produktu). Hlavní pozornost byla věnována porovnání pH, koncentraci hlavních vybraných sloučenin v roztocích (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) a posouzení jejich vlivu na acidifikaci horninového prostředí i projevy chemického a fyzikálního zvětrávání, probíhající v přípovrchové zóně skalních masivů.

3.3.1. Složení srážkových vod

Systematické studium srážkových vod, sledující aktuální stav kvality ovzduší i dlouhodobé změny atmosférické depozice, probíhalo na území NPCŠ od roku 2002 do 2006. Nová etapa sledování pak navazovala od května 2008 do konce roku 2010 (důvodem přerušeni bylo hledání zdroje financování projektu). Kumulativní vzorky vod byly odebírány v měsíčních intervalech na třech lokalitách na volné ploše (Stříbrné stěny/SS, Kuní vrch/KV a rašeliniště Dolský mlýn/DM) a jedné lokalitě pod korunami stromů (tzv. smrkový throughfall – Kuní vrch/KVthsf). Získané údaje poukazují pouze na relativně malé, v rámci dlouhodobého měřítka nevýznamné změny chemického složení srážek od roku 2002 do současnosti. Výrazné rozdíly nejsou ani mezi jednotlivými sledovanými lokalitami (viz [příloha J](#)), což je důležitý fakt z hlediska reprezentativnosti údajů z jednotlivých lokalit pro širší oblast NP. Pro účely této práce (zejména studium procesů chemického zvětrávání) byly přednostně použity výsledky z nejbližší zájmové lokality Stříbrné stěny, která je vzdušnou čarou vzdálena 2 km od NPP Pravčická brána.

Mezi základní sledované parametry náležely **látkové (depoziční) toky sloučenin - zejména vybraných acidifikačních činitelů**. Metodika terénních odběrů a analytické zpracování vzorků za účelem stanovení pH, obsahu rozpuštěných látek, vodivosti, koncentrací všech hlavních složek (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{n+} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- , HCO_3^-) a stopových prvků (Fe, Mn, Pb, Cu, Rb, Sr, Zn, As, Cd) bylo prováděno dle zavedených metodických postupů s využitím běžných laboratorních metod (viz Fottová 1995 a příloha J). V rámci vyhodnocení dat byly pro sledované období stanoveny měsíční a roční srážkové úhrny, a roční depoziční toky analytů. Z průměrného molárního zastoupení anionů ve srážkových vodách převládá NO_3^- spolu s SO_4^{2-} ($\text{Cl}^- > \text{F}^-$), a mezi kationty pak NH_4^+ (spolu s $\text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$). Statistickou korelací koncentrací bylo zjištěno, že více než 93 % SO_4^{2-} obsaženého ve srážkových vodách pochází z antropogenních zdrojů (a jen 2 až 7% z depozice mořských sprejů - viz příloha J). Depoziční toky SO_4^{2-} byly během sledovaného období sníženy z 23 na 16 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Depozice hlavních sledovaných acidifikantů (S a N) v letech 2002 až 2009 koresponduje s obecným trendem pro celou ČR, přesto NPČŠ stále zůstává oblastí s nejvyššími hodnotami (i přes razantní snížení emisí v posledních desetiletích 20. století – např. Kopáček & Veselý 2005).

Výsledky dlouhodobého sledování srážkových vod byly porovnávány s údaji zjištěnými sledováním chemického složení průsakových vod i solných výkvětů (více v následující kap. 3.3.2. a 3.3.3.). Pomocí opakovaných odpařovacích experimentů byl ze srážkových vod druhotně vysrážen hojný sádrovec ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), v minoritním množství pak i další sole (např. nitratin NaNO_3). Získaný údaj korespondoval s výsledky starších odpařovacích experimentů (Schweigstilllová & Hradil 2007 či Schweigstilllová 2008).

3.3.2. Složení průsakových vod

Průsakové vody (tj. vody z nenasycené zóny pískovcových hornin) reprezentují svým složením chemické složení srážek i reakce s pískovcem během jejich pohybu skalním masivem. Na území NPČŠ jsou průběžně odebrány již od roku 2002 na 10 až 15 místech (dílčí výsledky uvádí Patzelt 2007), obvykle v převislých částech skal, kde sezónně vykapává z horninového masivu voda. Jednou ze studovaných lokalit je také Pravčická brána (místo v převisu pod obloukem /úsek 0). Odběry v tomto místě jsou velmi reprezentativní nejenom pro studium chemického zvětrávání, ale také z důvodu minimálního ovlivnění chemického složení těchto vod dalšími procesy vzhledem k jednoduché geologické stavbě (tj. prosakování roztoků přes cca 5 m mocnou vrstvou středně zrnitého pískovce s vložkami slepence), rovněž

pak minimálnímu půdnímu a vegetačnímu pokryvu nad sběrným místem. Nevýhodou je naopak časově omezená možnost odběru vzorků, která je obvykle vázána na krátká období extrémní saturace masivu vodou (nejčastěji v jarních měsících a omezeně během roku po intenzivních deštích - příloha J, Bruthans & Schweigstilllová 2009). Dochází zde k relativně rychlému transportu roztoků tělesem PB (v řádech dnů až prvních týdnů), přičemž minimální míra vlivu evaporace na studované vzorky vod byla prokázána s využitím izotopů kyslíku a vodíku (příloha J).

Metodika odběru vzorků i způsob jejich analytického zpracování je popsána v příloze J. Sledovány byly **stejně parametry jako u vod srážkových** (včetně všech hlavních a stopových prvků i jejich detekčních limitů tak, aby byly výsledky srovnatelné). Průsakové vody z NPCŠ jsou charakteristické velmi nízkým pH (3,28 – 4,85, u PB 3,28 – 4,41) a relativně vysokým obsahem Al^{n+} (0,83 – 35 mg/l, u PB 1,46 – 10,1 mg/l). Vzorky vod na PB tvoří navíc samostatnou skupinu, která se výrazně odlišuje od ostatních sledovaných lokalit v NPCŠ, a to zejména extrémním navýšením NH_4^+ , dále vyšším obsahem NO_3^- a některých prvků stopových (např. Cu, As, Zn) a naopak nízkým obsahem Mn (viz vybrané grafy v příloze IX). Průměrná koncentrace SO_4^{2-} v průsakových vodách skalní brány je 27,5 mg/l (tedy devětkrát více než ve vodách srážkových), koncentrace NO_3^- dosahují hodnot mezi 7,8 a 42 mg/l (nabohaceno až 13krát oproti srážkám). Průměrný obsah Al^{n+} je v těchto vodách dokonce navýšen 160krát, a podobné platí i pro ostatní sledované prvky a sloučeniny s výjimkou NH_4^+ (viz příloha J). Předpokládané zdroje nabohacení sledovaných složek jsou rovněž diskutovány ve výše uvedené publikaci. Přestože je PB izolovaným skalním hřbetem nad úrovní lesa, důležitou složkou průsaků je rozpuštěný organický materiál (analyzovaný COD-Mn), který může také přispívat k loužení jílových minerálů v hornině. Jeho zdrojem je pravděpodobně sporadický půdní pokryv části vrcholu brány nebo nižší rostliny ve spárách a trhlinách horniny (včetně sporů hub identifikovaných mezi zrny křemene – více viz příloha K). Celkový **obsah rozpuštěných látek** je v těchto vodách relativně vysoký (až 190 mg/l), což indikuje druhotné nabohacení vod opětovným rozpuštěním solí, akumulovaných uvnitř horniny (zejména v přípovrchové zóně pískovcového masivu). V příloze IX je v obr. 7 uveden příklad srovnání vzorků z PB se dvěma dalšími lokalitami, jež rovněž reprezentují tzv. čistý průsak. Zhodnocení a interpretace chemického složení vzorků všech studovaných míst bude součástí zvláštní studie; vzhledem k velkému objemu dat není proto předmětem této disertační práce.

V neposlední řadě byly také realizovány zkušební odpařovací experimenty průsakových vod, které potvrdily výsledky Schweigstilllové (2008) a předpoklad tvorby

běžných solí (sádrovce a kamence $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) současně dokumentovaných v areálu NPP PB (Schweigstilllová et al. 2009, příloha K) i na dalších místech NPČŠ (Cílek & Langrová 1994, příloha D).

3.3.3. Studium skalních krust a solných výkvětů

Solné výkvěty na povrchu nebo těsně pod povrchem horniny byly na tělese Pravčické brány dokumentovány v méně či více převislých stěnách na úpatí jižního a severního pilíře (podél vrstevnicové stezky a v místě vyhlídkové terasy pod klenbou brány – úseky I, II a IV), rovněž pak v nižších skalních patrech (úseky V a VI). Nejnápadnější je působení krystalizujících solí na žlutém jemnozrnném pískovci u báze severního pilíře brány (ve výšce 1,7 – 3 m v rámci úseku IV). Sole místy pokrývají souvislejší plochy, častější je však jejich závislost na stávající mikromorfologii, projevující se v krystalizaci v rámci menších, plošně izolovaných a chráněných zón - přednostně ve voštinách a drobných dutinách, místech opadu povrchových krust, podél drobných trhlin či v místech mechanického antropogenního poškození skalního povrchu (příklady na obr. 5a,b v příloze VI). V horní části tělesa brány (okolo 20 m výšky - v rámci úseku 0, včetně spodní části klenby) jsou naopak povrchy jen vzácně pokryté nepřiliš výraznými povlaky solí. Jejich výskyt je v této partii výhradně sezónní záležitostí, závislý na aktuálních mikroklimatických podmínkách. Téměř žádné solné povlaky nebyly pozorovány ve středně zrnitých a hrubozrnných pískovcích mezi 8 m a 17,5 m profilu (více viz příloha K).

Nadstavbou základní popisné dokumentace byly **odběry a chemické analýzy přítomných solí i zvětráváním postiženého pískovce**. Vzorky hornin pocházejí z přípovrchové zóny skalních stěn (od 1 cm do max. 5 cm hloubky) s návazností na starší publikované i nepublikované údaje - více k metodice viz příloha K. Výčet všech vzorků solí a hornin je uveden v příloze V, tab. 3, 4. Solné výkvěty byly odebrány na zvětráváním nejvíce postižených partiích skalní brány, a to nejenom opakovaně z míst odpovídajících staršímu výzkumu. Byly doplněny o další, dosud nestudovaná místa skalního defilé s rozdílnou směrovou i výškovou expozicí (a to jak v lokálním tak i v celkovém měřítku). Sole a vzorky pískovců byly studovány s využitím vhodných laboratorních metod – **práškové RTG difrakce** (za účelem stanovení hlavních fází a chemického složení solných výkvětů), **iontově-výměnné chromatografie** (pro stanovení vodorozpustných solí přítomných v pórovém prostředí pod povrchem) a **elektronové mikroskopie s mikroanalýzou SEM/EDS** (pro mikropopis strukturních znaků skalních krust a solných výkvětů). Data získaná z Pravčické brány a okolí práškovou RTG difrakcí dokládají naprostou převahu novotvořených

síranových solí nad ostatními fázemi. Reprezentují je dvě dominantní sole – sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a kamenec ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Výrazně méně hojné jsou dusičnany zastoupené např. nitrátem (NaNO_3) či nitramitem (NH_4NO_3), nebo chloridy (např. hydrophilit (CaCl_2)). Ve srovnání s ostatními oblastmi ČKP (např. Sadílková 2003, Holeček 2004, Schweigstillová et al. 2009), jsou solné výkvěty na horninách NPČŠ charakteristické hojnými fázemi s amonnou skupinou (příloha D, příloha K). Srovnáním výsledků se staršími údaji (Zvelebil et al. 2002, Cílek - nepubl. výsledky z r. 1997) vyplývá, že fázové složení solí nalezených v 90. letech 20. století, se neliší od nově studovaných vzorků. Výsledky studia solných výkvětů z PB se také výrazně neodlišují od údajů zjištěných z úpatí Křídelních stěn, které výškově odpovídají úseku VI (více příloha D). Výjimku tvoří výskyt čermikitu ($\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), který byl relativně hojně identifikován v horní polovině skalního defilé (přímo na úpatí PB v úseku I, II a III), zatímco v nižších úrovních (úsecích V a VI) nebyl nalezen (a v případě Křídelních stěn byl zjištěn pouze ve dvou vzorcích – viz příloha D), což by mohlo poukazovat na určitou výškovou zonalitu v závislosti na míře působení přítomné organické hmoty (a možnost zastupování kationtů NH_4^+ a K^+ v rámci jednoho profilu).

Rozložení solí v masivu je ovlivněno jak kapilárním vztlínáním, tak i vlhkostí prosakující z vyšších partií skalního masivu (ta dominuje v případě samotného tělesa brány). Na PB nebyla zjištěna zásadní závislost přítomnosti méně či více rozpustných solí na geografické orientaci skalních stěn (tak jak tomu bylo na Křídelních stěnách tvořících vegetací skrytou bázi celého skalního defilé – více v příloze IX a v příloze D). Vysvětlením může být opět netypický tvar tělesa, jeho subtilnost a exponovanost v prostoru, kterou lze jen těžko srovnávat s běžným skalním masivem. Nejvyšší koncentrace solí na úpatí skalního defilé byly zjištěny ve dvou úrovních od báze profilu: ve výšce 1–1,5 metru nad zemí a ve výšce 2–2,5 metru (příloha D). Z výsledků iontově-výměnné chromatografie je zřejmý rozdíl v obsahu solí na povrchu studované horniny a v hlubších částech masivu, rovněž pak výrazné nabožení sírany na úpatí skal oproti vyšším patřům (obr. 3 přílohy IX, více příloha K). Přímo na skalní bráně byl prokázán výskyt více typů solných výkvětů na jednom studovaném místě, vzájemné prorůstání různých generací fází a dokonce i jejich generační hloubková zonalnost (více viz příloha K). Právě kombinace sádrovce s kamencem, spolu s identifikovanými dusičnany a chloridy, mohou mít zásadní vliv na míru poškození horniny (Williams & Robinson 1998, 2001).

V případě tělesa PB se jedná o specifický model vícezdrojového **původu solí** (Přikryl 2005). S ohledem na geometrii a extrémní výškovou expozici zde můžeme zcela vyloučit

jeden z obvyklých zdrojů „nepůvodních“ prvků a sloučenin - kapilární vztlínání z půdních roztoků (a rovněž pak kontaminaci zemědělskými hnojivy). Pomocí výše popsaných odpařovacích experimentů (s využitím dat z monitoringu srážkových a průsakových vod – kap. 3.3.1. a 3.3.2.) bylo prokázáno, že možným zdrojem Ca^{2+} v solných výkvětech je atmosférická depozice. Pro tvorbu solí s příměsí Ca^{2+} není tedy třeba dalšího zdroje - jako například obsahu vápnité příměsi v pískovci (např. Goudie & Viles 1997, Cílek et al. 2003, ad.). Nepřítomnost kamence v odparku srážkových vod a jeho přítomnost v odparku z vod průsakových naopak indikuje, že zdrojem Al^{3+} je samotná pískovcová hornina (resp. chemické reakce zde probíhající spočívající v rozpouštění jílových minerálů ze základní hmoty horniny – viz Schweigstillová 2008, [příloha J](#)).

3.4 Kontrolní sledování deformačního chování

Jedním z hlavních přínosů disertační práce je vyhodnocení a interpretace dat sledování deformačního chování stropního trámce Pravčické brány. Pravidelné kontrolní sledování zde bylo prováděno s ohledem na obavy o krátko- až střednědobou stabilitu tělesa, s využitím kombinace všech metod pozorování, aplikovaných na území NPCŠ v rámci prevence rizik skalního řízení (viz [příloha A](#)). Pomocí existující sítě bezpečnostního monitoringu je totiž možné získat kvantitativní informace o nevratných deformacích, spojených s přípravou velkých skalních řízení, a využít je k oceňování stupně okamžité nestability svahu i předpovědi dalšího vývoje. Měření absolutně zachycuje časový aspekt vratné a nevratné deformace pískovcových masivů (v časovém měřítku od minut až po několik let), a stalo se tak prostředkem k detailnímu studiu kinematického chování vybraných skalních objektů. Matematicky a fyzikálně rigorózní numerické metody nového typu umožňují navíc včasnější rozpoznání kritického stavu než běžné empirické metody (např. Zvelebil 1985), a staly se tak efektivním nástrojem k zajištění bezpečnosti (Zvelebil et al. 2008, [příloha F](#), [příloha I](#)).

3.4.1. Metodika sledování a vyhodnocování dat

Správa NPCŠ od roku 2003 pokračovala v již dříve započatém ručním **dilatometrickém měření** PB, přidala další metody sledování a provedla prvé integrované vyhodnocení všech dosud získaných dat. S vědomím důležitosti získání co nejdokonalejšího obrazu deformačního chování PB se nejprve znovu pokusila obnovit automatizovaná, kvazi-kontinuální kontrolní sledování za pomoci aparatury se 4 snímači posunu. Od roku 2006 do poloviny roku 2010 byl

navíc souběžně uveden do provozu **system automatického kontrolního sledování s dálkovým přenosem dat** (12 měřících čidel s odečty dilatací a teplot prováděnými po 5 minutách). Soubor měřících metod byl v letech 2002 až 2006 doplněn rovněž o náklonoměrné sledování. Podrobné informace o použitých způsobech sledování (včetně přesného umístění měřících bodů) i zpracování dat uvádí příloha G.

Zpracovány byly časové řady ručního sledování o délkách 16,5 (a 14,5) roku, což je významné z hlediska zjištění nevratných deformací. Toto celkové, v lidském měřítku dlouhodobé chování, bylo konfrontováno s údaji o chování trámce v měřících relativně detailních (v rádech minut až měsíců), které byly získány z časových řad automatického kontrolního sledování na vzájemně si prostorově a geometricky odpovídajících stanovištích. Při hodnocení časových řad byly využívány nejenom léty prověřené **standardní, kvalitativně-empirické metody** (např. Zvelebil 1994, 1995) ale rovněž využity nové a na PB dosud nepoužité **postupy založené na teorii komplexních systémů** (Shalizi 2006, Sivakumar 2004), jež byly teprve v nedávné minulosti úspěšně prakticky využity pro sledování kvádrových pískovců na Děčínsku (Zvelebil et al. 2008; příloha I). Tyto speciální metody napomohly zohlednit předpokládanou nelineární dynamiku chování komplexního systému skalní brány v jeho mnohonásobných interakcích se systémem vnějších, zejména klimatických vlivů, jakož i umožnily numerické zpracovávání velkých objemů dat (např. Zvelebil et al. 2008). Pro zachycení spektra vztahů mezi chody homogenizovaných časových sérií pohybů a teplot bylo použito histogramů a grafických korelogramů (příloha F a příloha G). Pro rigorosní zachycení kvazi-cyklických rysů chování skalního masivu a rozpoznání přechodů mezi jednotlivými typy dynamik (resp. fázových změn) pohybů byly pro vybrané případy použita i metoda vizuální rekurenční analýzy (VRA – např. Marwan et al. 2007) (viz příloha F, příloha I).

3.4.2. Zhodnocení stability tělesa

Výsledky dlouhodobého sledování prokázaly, že v tělese Pravčické brány dochází jednak opakovaně ke kvazi-cyklickým (vratným) pohybům, a jednak se zde odehrávají pomalé nevratné deformace, které jsou projevem porušování skalního masivu.

Vratné pohyby zde tvoří hierarchický systém ve vzájemných interakcích působících dílčích kvazi-cyklů (jde o 20, 15 a 10-11ti leté cykly, dále se zde projevuje cyklus sezónní, a konečně pak i čtvrtedenní až dvaapůldenní cykly). Většinu cyklů lze příčinně spojit s objemovými reakcemi pískovcového masivu v závislosti na kolísání vzdušné teploty (příp. i

slapové variace tíže) nebo na cyklech lunární aktivity (příloha G). Tyto vratné deformace v řádech milimetrů způsobují opakované změny napětí uvnitř skalního masivu. Z aktuálních údajů je navíc zřejmé, že nezohledněním víceletých cyklů ve starších hodnoceních došlo k podstatnému zkreslení informace o existenci a míře aktivity nevratných pohybů (zejména na stanovišti PB2 a PB3 – srovnej Zvelebil et al. 2002 a příloha G).

Během letních až podzimních měsíců dochází k opakovanému zdvihu trámce v místě převisu (a to na západní i východní straně – průměrně o 2,31 mm) a naopak k poklesu v místě jeho jižního konce (průměrně o 0,95 mm), což spolu s rozdíly v rozložení maxima a minima pohybu během roku u jednotlivých měřených míst potvrzuje hypotézu **obloukovitého ohýbání trámce** vlivem teplotních dilatací (tzv. klenbový efekt).

Důležitým zjištěním je **rozdílné chování východní a západní části brány** (zejména jejího stropního trámce) jak ve vratném, tak nevratném deformačním režimu. V detailních denních až sezónních měřítkách je možné sledovat, že dochází k rozdílným nástupům (a vyznívání) vratných deformačních reakcí na oslunění, což indikuje přenos nerovnoměrné deformace napříč masivem mezi oběma boky. Dopolední oslunění východního boku PB má za následek dosahování denních maxim deformací v dopoledních hodinách, zatímco na západním boku se tak děje až v pokročilých odpoledních hodinách. To je pravděpodobně příčinou nerovnoměrného **namáhání trámce brány torzí a smykem** (viz příloha G či příloha E).

V makro-měřítcích dlouhodobého sledování se rovněž projevuje prostorová asymetrie - zatímco západní strana trámce brány dlouhodobě nevratně poklesá s rychlostí okolo 0,036 mm/rok, na východní straně dochází k velmi pomalému, sub-horizontálnímu podélnému posunu trámce směrem k jihu o 0,019 mm/rok. Kontrolní sledování prokázalo rovněž velmi pomalé uzavírání průchozí spáry mezi jižním koncem trámce a nejvyšší částí masivu jižního pilíře (až o 0,037 mm/rok). Detailní statistické analýzy dat v různých sledovaných měřítkách (včetně paralelizace sezónních či denních chodů teplot a pohybů, statistiky rozložení výskytů maxim denních změn pohybů a teplot, ad.) uvádí příloha G.

3.5. Sledování tepelného režimu

V této části projektu se hodnotí vliv teploty jako permanentně (a kumulativně) působícího faktoru, který se významně podílí jak na procesech svahového rozvolňování a snižování stability skalních masivů, tak při zvětrávání jednotlivých horninových těles. Problematika tepelného toku pískovcovými skalními tělesy nebyla dosud systematicky studována, i když

má význam z hlediska objemových změn a projevů vratné i nevratné teplotní deformace (např. Zvelebil 1995, Vlčko et al. 2005, Ježný et al. 2007, Vlčko et al. 2009). Základem pro pochopení teplotně-mechanických procesů je stanovení teplotního režimu, zejména rychlosti a hloubkového dosahu tepelného toku v horninovém masivu.

3.5.1. Hodnocení denních a ročních teplotních změn

Souběžně se sledováním deformací (viz kap. 3.4.) bylo prováděno pravidelné měření teplotních změn v tělese Pravčické brány. Sledování bylo zahájeno v roce 2006 ve spolupráci s Universitou Komenského v Bratislavě v návaznosti na obdobný výzkum, realizovaný na Spišském hradě (např. Vlčko et al. 2009). Měření probíhalo s využitím teplotních snímačů ve třech hloubkách skalního masivu (10, 45 a 90 cm), instalovaných ze západní i východní strany v nejvyšším patře skalního hřbetu odpovídající úrovni trámce brány, v poloze středně zrnitých pískovců – obr. 1 v příloze XI (včetně lokalizace doplňkových míst). Časový záznam teplot posloužil k numerickému modelování hloubkového dosahu a fázového posunu kvazi-periodických (denních a ročních) teplotních změn, a rovněž pak pro simulaci teplotních cyklů, kterým byly vystaveny vzorky pískovce v laboratorních podmínkách za účelem určení jejich základních tepelných vlastností (více k metodice viz Brček 2010, [příloha H](#)).

V první fázi vyhodnocování dat byla zaměřena pozornost na poznání průběhu teplotního pole v čase i prostoru za sledované období, tedy od poloviny roku 2006 do poloviny roku 2009, s pomocí analytických a statistických výpočtů. Při porovnání max. denních i ročních teplotních amplitud v různých hloubkách skalního masivu byl zjištěn výrazný útlum vlivu teploty zonálně směrem do skalního masivu. Průběh teplotního intervalu se rovnoměrně a exponenciálně zužuje s přibývajícím hloubkou. Je tedy zřejmé, že největší teplotní změny a s nimi související objemové namáhání horniny je nejvýraznější u povrchu skalních stěn. Průměrné denní a roční teplotní amplitudy pro jednotlivé sledované hloubky (včetně časového zpoždění postupného průniku teplotních změn) jsou souborně uvedeny v [příloze H](#).

Dosah **denních teplotních změn** se na tělese PB projevuje přibližně do hloubky 150 cm. Detailní analýzou dat bylo zjištěno, že projevy denních teplotních změn v hornině (tj. rozdíly mezi max. a min. teplotami) jsou nejvýraznější v letních, a naopak nejmenší v zimních měsících. S rostoucí hloubkou směrem do masivu dochází v určitém bodě (od hloubky přibližně 90 cm) ke stírání těchto rozdílů. To opět potvrzuje důležitost denních teplotních

změn pro přípovrchovou zónu horniny oproti nitru pískovcového masivu, kde se uplatňují teplotní změny za delší časové období (např. v rámci ročních cyklů).

Dosah **ročních teplotních změn** se projevuje do hloubky 9,5 m (příloha H; daný údaj byl později upřesněn Brčkem (2010) až na 13,5 m). Ze statistických údajů (a laboratorně vypočtené hodnoty teplotní vodivosti pískovců) vyplynulo výrazné snížení roční teplotní amplitudy v hloubce 0,9 metru o více než 11°C a v 5ti metrech dokonce téměř o 24,5°C (na hodnotu pouhých 1,35°C – příloha H). Rovněž bylo prokázáno sezónní promrzání pískovcového skalního masivu do největší sledované hloubky 0,9 metru, což je velmi podstatné z hlediska procesů zvětrávání i hodnocení celkové stability skalního objektu.

Za účelem posouzení případného zatížení výsledků (zejména stanoveného průběhu teplotního pole) chybou, bylo provedeno porovnání výstupů numerického modelování z přímých měření *in situ* s analytickým výpočtem na základě laboratorních údajů (více příloha H). Prvotní pokus o dvojrozměrný model distribuce teplotních změn, založený na výsledcích měření vytvořený s využitím softwaru UDEC, je uveden v příloze E. Další výsledky numerického modelování teplotní deformace tělesa PB prostřednictvím softwaru UDEC byly provedeny na Komenského universitě v Bratislavě (viz samostatná studie - Brček 2010).

3.5.2. Teplotní změny povrchu

Nad rámec publikovaných výsledků byly během měření *in situ* sledovány také rozdíly v režimu teplot povrchu samotného tránce brány (s využitím čidel instalovaných v přirozených stinných dutinách). Pozornost byla věnována zejména denním změnám teplotního pole v závislosti na expozici skalních stěn či rozdílům mezi létem a zimou (příklady uvedeny v příloze XI). V případě osvětlení skalních stěn sluncem byl popsán výrazný nárůst teploty v přípovrchové zóně horniny (v hloubce 10 cm) v letním období, který se od teploty vzduchu liší až o 9°C (v případě čidla v mělké skalní dutině v západní expozici činil rozdíl 7°C). V období zimním se naopak teplota horniny výrazně neliší od okolní teploty (viz obr. 3 přílohy XI).

V rámci prostorového mezo- a mikroměřítko byla popsána nejenom rozdílná barevnost částí PB (viz kap. 3.1.3.), ale bylo sledováno s ní související intenzivní a zároveň nerovnoměrné zahřívání povrchu pískovce vlivem slunečního osvětlení. K tomu posloužila laboratorní zkouška, z jejíchž výsledků vyplývá zřejmý rozdíl v intenzitě zahřátí povrchu horniny mezi světle a nepřírodně tmavě zbarveným povrchem pískovce o 7 až 8°C (viz příloha K).

4. Komplexní fenomenologický model porušování PB

Pro chování skalních svahů jsou obecně charakteristické nelineární vztahy mezi napětím a deformací (např. Hoek & Bray 1974 či Zvelebil 1984), a zejména vzájemné prolínání různých mechanismů jejich porušování (např. Kliche 1999, příloha C). Jak bylo řečeno v úvodních kapitolách, je i porušování objektu PB výsledkem dějů ve složité interakční síti geologicko-geomorfologických procesů, které se odehrávají v širokém spektru prostorových a časových měřítek. Je tedy nutné zdůraznit, že typologie i relativní významnost jednotlivých podmínek, faktorů a způsobů jejich interakcí může být tudíž platná pouze v rámci měřítek, které byly ke zjištění jejich působení použity (viz metodika v obr. 1).

4.1. Základní koncepce a vlastnosti modelu

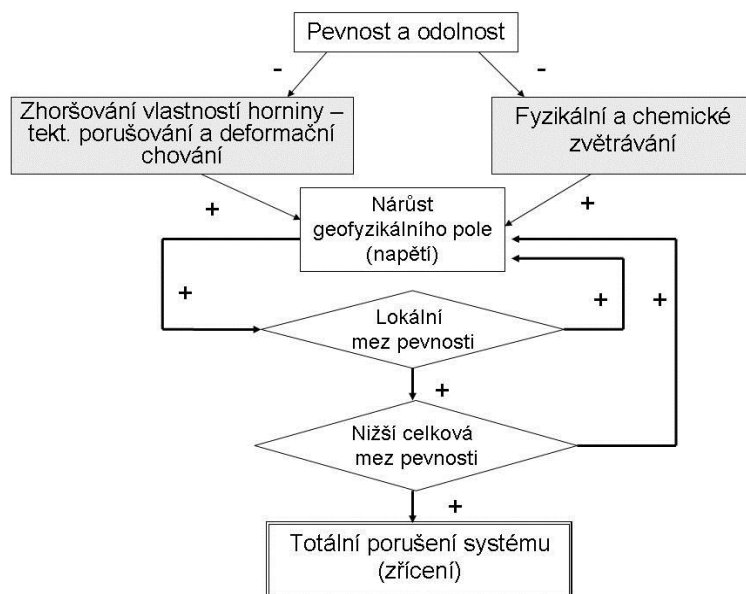
Model porušování PB byl vytvořen formou hierarchického modelování cestou dílčích schémat. Jedná se o model otevřený, jehož strukturace má zachycovat hlavní interakce zájmového skalního objektu s prostředím – tj. toky energie a hmoty, jakož i následky těchto interakcí. Díky hierarchické struktuře může však proces porušování v sobě zahrnovat celé **skupiny dějů (sub-modelů) odehrávajících se na nižších úrovních**. Příkladem je složité deformační chování skalní brány či procesy fyzikální a chemického zvětrávání (viz tab. 1).

Základní schéma porušování PB je znázorněno na obr. 2. Makro-dynamika porušování je produktem lokálních mezo- a mikro-dynamik vzájemně působících hierarchicky odpo-
vzhůru i opačně, tedy odshora-dolů. Kromě mechanismu „**vliv/vnější příčina - odezva**“, může existovat i **mechanismus vnitřního vývoje**, tj. prostorové a časové organizace probíhající nezávisle na vnějším vlivu. Příkladem může být kolísání deformační aktivity, vyplývající z okamžitých stavů vnitřní dynamiky systému skalního masivu (srv. Zvelebil 1989) nebo samoorganizující se kritičnost (SOC - ve smyslu Bak 1996) uspořádání výkyvů deformační aktivity trámce PB zjištěná automatickým kontrolním sledováním (příloha F).

Schéma vychází ze stávajících vlastností skalního systému, resp. vnitřních podmínek (např. litologické a tektonické stavby, hydrogeologického režimu, geometrie a expozice vůči působení klimatu) a ze známých vnějších vlivů/faktorů (např. změny teploty, intenzity srážek, míry oslunění, působení gravitačních sil, antropogenních vlivů, ad.). **K hlavním podmínkám** v případě modelového tělesa PB náleží pevnostní charakteristika skalního masivu a jeho geomorfologická odolnost. Fyzikálně-mechanické vlastnosti masivu jsou ovlivněny litologií, typem a mírou navětrání pískovců, jejich okamžitou vlhkostí, geometrií oslabených zón

(především diskontinuit), a charakterem interakcí jednotlivých, těmito zónami oddělených partií. Geomorfologická odolnost je dlouhodobá odolnost vůči zvětrávání, erozi a denudaci. Výrazným rysem pískovců je jejich vysoká citlivost na modelaci vnějšími vlivy a souvisejícími geomorfologickými procesy, přičemž dochází k rychlému zesilování i nevýrazných rozdílů primárních vlastností horninového masivu.

Významnými vlastnostmi tělesa PB je jeho nízká homogenita a anizotropie. Z hlediska mechanického chování a způsobů porušování jej proto můžeme paralelizovat s kompozitním materiálem. Ten je složen z více součástí s rozdílnými vlastnostmi, jež dohromady dávají výslednému celku vlastnosti nové, které nemá sama o sobě žádná z jeho částí. Tato paralelizace má pak zásadní teoreticko-metodické důsledky pro modelování procesů porušování. Změny vnitřní napjatosti jsou díky tomu odlišné v každém dílčím bloku i na kontaktních plochách. Integrovaným působením jednotlivých faktorů je ve skalním objektu PB vytvářeno a dále ovlivňováno pole napětí.



Obr. 2. Základní interakční schéma makro-porušování stability tělesa PB zobrazující funkční vztahy mezi primárními podmínkami panujícími v systému a hlavními působícími vlivy. Dominuje zde opakující se smyčka postupného porušování mezi pevností horniny končící kolapsem celého systému. Každá úroveň tohoto modelu obsahuje dílčí úrovně - procesy v různých měřítkách popsané dále v textu.

Tab. 1. Hlavní procesy současného porušování tělesa Pravčické brány (se zaměřením na studované faktory).

Faktor způsobující namáhání a porušení pískovcových hornin		potenciální ohrožení	konkrétní projevy	přímý vliv na další procesy/jevy	nepřímý vliv na další negativní procesy/jevy	riziko	působení faktoru v rámci časových měřítek	působení faktoru v rámci prostorových měřítek
Gravitace		namáhání masivu vlastní tíží	nevratné deformace dílčích bloků	sekundární tektonické porušení, vznik trhlin, drčení kontaktních zón	vznik oslabených zón ovlivňujících lokální hydrodynamický režim, distribuci a intenzitu zvětrávacích procesů	přímý vliv na celkovou stabilitu, změny pole napjatosti v dílčích částech masivu	dlohodobé, relativně stálé	mikro - mezo - makro
Klima	vnější teplota	teplotní kvazi-cykly	opakované dynamické namáhání související s objemovými změnami hornin	zkrutné namáhání trámce brány	pokles pevnosti, kumulativní skládání mikrodeformací – mechanické porušení hornin za vzniku nevratné deformace	změny pole napjatosti v dílčích částech masivu, vliv na celkovou stabilitu	cykly denní (krátkodobé), sezónní (střednědobé), s dlouhodobým účinkem (v řádech let až desítek let)	mezo
				asymetrické namáhání trámce brány - obloukovitý efekt	kumulativní skládání mikrodeformací za vzniku nevratné deformace skalního masivu (a sekundárního porušení hornin)	změny pole napjatosti v dílčích částech masivu, vliv na celkovou stabilitu		mezo - makro
		mrazové zvětrávání	namrzání přípovrchové (roztoky nasycené) zóny skalního masivu	opakované mikrodynamické namáhání související s objemovými změnami	mechanické porušení hornin, pokles pevnosti	změny pole napjatosti v dílčích částech masivu, vliv na celkovou stabilitu	sezónní (střednědobé), nepravidelné	mikro
				klínování otevřených puklin a trhlin v masivu	sekundární tektonické porušení - otevírání puklin a trhlin	nevratné deformace dílčích bloků		přímý vliv na celkovou stabilitu
	oslunění	nerovnoměrné oslunění povrchu hornin	napětí vznikající teplotním gradientem v přípovrchové části masivu	objemové změny, vznik mikrotrhlin, exfoliace a následné odprýskávání povrchu	degradace přípovrchové zóny hornin – změny mikromorfologie, úbytek povrchových partií skal	nepřímý vliv na stabilitu, míra rizika v závislosti na ostatních faktorech, expozici a morfologii (tvaru) tělesa	mikrocykly působící v dlouhodobých měřítkách, nepravidelné	mikro
	srážky - úhrny, míra znečištění	chemické a fyzikální zvětrávání	fyzikální zvětrávání vlivem opakované krystalizace solí	destrukce povrchových krust, rozvolnění horniny a odnos materiálu v přípovrchové zóně	degradace přípovrchové zóny hornin – změny mikromorfologie, úbytek povrchových partií skal, snížení smykové pevnosti podél ploch diskontinuit	nepřímý vliv na stabilitu, míra rizika v závislosti na ostatních faktorech a morfologii (tvaru) tělesa	krátko- až střednědobé	mikro
„loužení“ pískovců (resp. chemické procesy uvnitř masivu, stabilita minerálních fází za daných podmínek pH, Eh ad.)			chemismus průsakových vod, chemismus solí	zhoršení fyz.- mech. vlastností horninového masivu	nepřímý vliv na celkovou stabilitu	dlohodobé (v řádech let až desítek let)	mikro – mezo (makro)	

Vnější vlivy jsou síly, které na celý systém působí (s různou intenzitou v čase i prostoru). Systém se vyrovnává s působením sil (tedy klade pasivní odpor), v závislosti na pevnosti horniny a velikostech napětí pak může docházet k lokálnímu porušení – tedy ztrátě schopnosti napětí dále přenášet. V důsledku této ztráty se napětí přesunuje na zbývající, dosud neporušené partie, čímž v nich redistribuované napětí dále narůstá. V krajním případě - když napětí přesáhne práh citlivosti systému - je odezvou aktivace specifického procesu a dochází k tzv. progresivnímu porušení celého systému (např. Hoek & Bray 1974, Muller 2007). Jedná se o princip opakujících a samozesilujících se interakcí mezi podmínkami a procesy až po krizi makro-stability systému, což v případě PB představuje stádium jejího finálního zřícení (viz obr. 2).

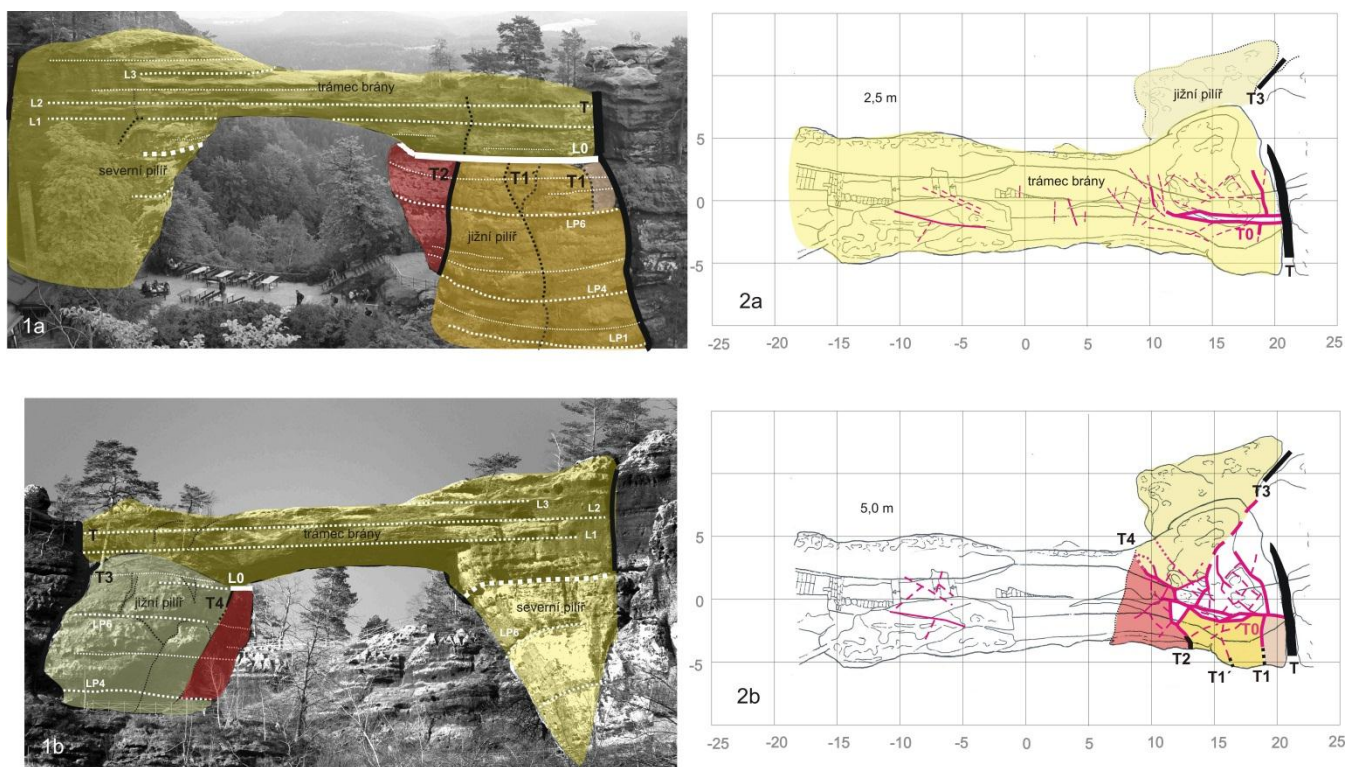
4.2. Stavba a rozložení pevnosti masivu

Z litologického hlediska byly jako nejméně odolné části profilu PB vyhodnoceny polohy hrubozrnných pískovců až slepenců, tvořící hlavní subhorizontální úroveň selektivní eroze a zvětrávání. Jako stěžejní se pak jeví kontaktní zóna mezi trámcem brány a jižním pilířem, která byla vytvořena podél vrstvy slepence s podpůrnou strukturou matrix (L0 v obr. 3). Pomocí dat získaných z měření georadarem byla prokázána pouze částečná průběžnost této ložní spáry, a to v západní polovině tělesa (tedy ne v celé ploše, jak předpokládala původní interpretace dle Zvelebila et al. 2002) – více v kap. 4.4.2. Geomorfologická odolnost tělesa je naopak pozitivně ovlivněna sekundární opálovou krustou (Winkler 1994, Cílek & Langrová 1994, Cílek 1998a, Young et al. 2009), která tvoří povrchovou ochranu relativně rozpadavého pískovce s nízkou laboratorní pevností. Funkce této „ochranné“ krusty je pak druhotně porušena v místech intenzivních projevů krystalizace solí.

Pevnost pískovcového skalního masivu jako celku i jeho fyzikální vlastnosti závisí však více na distribuci, charakteru a vzájemném uspořádání diskontinuit než na pevnostních parametrech samotné horniny (např. Giani 1992). **Primární i sekundární pukliny** definují vnitřní blokovou stavbou tělesa a jsou základní predispozicí, ovlivňující nestabilitu zdejších skal (např. Zvelebil 1989, příloha C). Z hlediska dynamiky a nesouvislého přenosu napětí napříč tělesem jsou podstatné hlavní tektonické linie, rozdělující skalní hřbet PB do samostatných horninových bloků (viz obr. 3). Nejintenzivnější tektonické postižení uvnitř skalního masivu, včetně silného rozvolnění horniny, bylo identifikováno v oblasti jižního pilíře, v hloubce odpovídající kontaktu s trámcem brány. Rovněž byly zjištěny zóny sekundárního porušení horninového masivu v místech, kde nebyly původně předpokládány

Zásadní je objevení zcela nových trhlin v jižním pilíři i samotném trámci brány. Jako nejrizikovější se jeví zcela čerstvá (max. 6 let stará) subvertikální trhлина v trámci, která je navíc zónou intenzivního zasakování srážkových vod (v obr. 6b označena T5). Dále pak místo křížení příčné pukliny, oddělující trojúhelníkový blok v jižním pilíři (T2) s podélnou osní spárou (T0), kde se podložní masiv rozpadá do několika dílčích bloků (viz obr. 3). Tato trojúhelníková část je tedy nejenom samostatným blokem odhraničeným průběžnými trhlinami, ale navíc i materiálově nejvíce oslabeným místem (viz obr. 6a). Jedná se tedy pravděpodobně o jedno z kritických míst z hlediska posuzování celkové stability. I ostatní, relativně nevýrazné poruchy (viz příloha L) mohou, při existující subtilnosti trámce brány, hrát významnou roli v budoucím vývoji Pravčické brány.

Změna vlhkosti rovněž generuje změnu hmotnosti pískovce a přímo ovlivňuje změny jeho původní pevnosti (viz kap. 3.1.4., Hawkins & McConnell 1992 či Vásárhelyi & Ván 2006). Vzhledem k vysoké pórovitosti pískovců zde dochází k rozsáhlé plošné infiltraci a přednostnímu transportu roztoků v masivu (více v kap. 4.3.2.).



Obr. 3. Model blokové stavby tělesa PB: 1a) pohled na těleso brány ze západní strany, 1b) pohled na PB z východu; 2a) půdorysný řez trámcem brány v hloubce 2,5 m od povrchu, 2b) půdorysný řez v oblasti kontaktu trámce s jižním pilířem brány v hloubce 5m od povrchu.

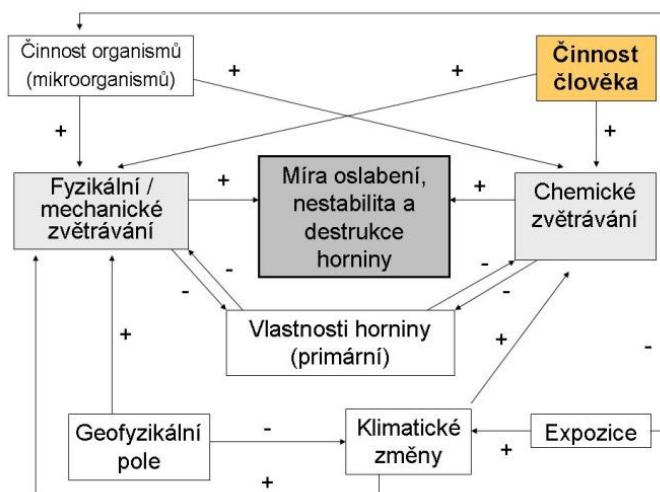
4.3. Uplatnění zvětrávacích procesů

Zvětrávání skalních objektů je komplikovaný proces, který probíhá v závislosti na vzájemném dynamickém působení vlastního horninového masivu a vnějších vlivů (Turkington & Paradise 2005). Jak bylo ukázáno výše, těleso PB je třeba považovat za **komplexní, nelineárně se chovající systém** (Zvelebil 1989). Pro posouzení charakteru tohoto systému a vlivu faktorů, ovlivňujících jeho stabilitu (včetně antropogenních vlivů) je tedy v první řadě nutné definovat správná měřítka a vazby (včetně vazeb zpětných). Proto byla v rámci této práce nejprve vytvořena teoretická kvantitativní analýza procesů zvětrávání.

4.3.1. Kvantitativní analýza zvětrávání (teorie zpětné vazby)

Zpětnovazebné smyčky jsou přítomné všude v dynamických přírodních systémech (které se neustále mění a vyvíjí), neboť jsou zvláštním znakem nelineární struktury sítě, jež charakterizuje živé i neživé systémy (např. Capra 2004, Turkington & Phillips 2004, Phillips 2005). Charakteristickým rysem chování komplexního nelineárního systému je mimo jiné vznik hodnot, které se navzájem zdají být antagonistické (Capra 2004). Z hlediska zvětrávání pískovců jde o nelineárně probíhající procesy povrchového zpevnování versus porušování (Viles 2005), tedy souběžnou tvorbu ochranné opálové krusty a krystalizaci solí (např. Winkler 1994, Goudie & Viles 1997, Cílek 1998b, Young et al. 2009).

Teorie zpětné vazby (Phillips 1999, 2005) byla aplikována na destruktivní projevy zvětrávání kvádrových křemenných pískovců (v terénu doložené na modelové lokalitě Pravčická brána) pro období desítek až stovek let a v kontextu porušování hornin za tvorby typických mezo- a mikro-tvarů skalního reliéfu podle Viles (2001). Z vytvořeného modelového schématu (obr. 4) je zřejmé, že oslabení a destrukce pískovcových hornin vlivem zvětrávání je nevratným procesem, který je výhradně závislý na působení vnějších faktorů. Jde o **nelineární dynamický systém se samoorganizující se distribucí** (vlivem funkčních zpětnovazebných smyček). Externí vlivy jsou zde aktivně přímo či nepřímo působící faktory (viz tab. 3), mající účinek jednorázově i dlouhodobě systematicky (či v určitém časovém období). Není možné je z teoretického schématu zvětrávání vynechat, neboť jsou hlavním „motorem“ fungování studovaného cyklu.



Obr. 4. Schéma funkční struktury zvětrávacích procesů na lokalitě PB. Zpětnovazebné smyčky (kauzální působení od prvku systému A směrem k prvku B) se skládají jak z pozitivních, tak i negativních příčinných vazeb (znaménka vyjadřují relativní směr změny na sebe vázaných prvků systému: plus značí stejný směr změny, minus směr opačný). Celkový charakter této smyčky je samozesilující, neboť obsahuje sudý počet negativních spojení (samovyrovňavající by byl v případě lichého počtu negativních spojení). Charakter se nemění ani v současnosti (se zohledněným přímým i nepřímým vlivem působení člověka).

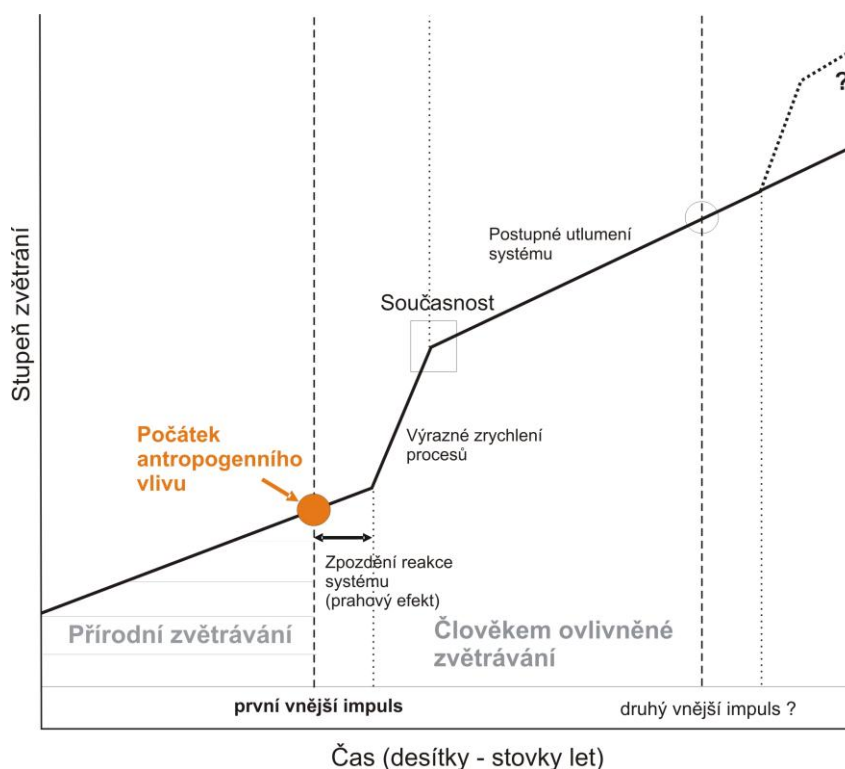
Tab.2. Interakce hlavních podmínek, faktorů a procesů v rámci zvětrávání pískovcových hornin („a“ představuje pozitivní, negativní a nulové (tj. zanedbatelné) vlivy jednotlivých složek systému); z matice byl vyjmut důsledek ve formě sekundárního oslabení a nestability horniny, který je koncovou složkou systému a reprezentuje pouze pozitivní vazby.

	čl	org	klim	exp	geof	vl	chem zv	fyz zv
Činnost člověka (čl)	0	0	0	0	0	0	a17	a18
Činnost organismů (org)	0	0	0	0	0	0	a27	a28
Klimatické změny (klim)	a31	0	0	0	0	0	a37	a38
Expozice (exp)	0	-a42	a43	0	0	0	0	a48
Geofyzikální pole (geof)	0	0	0	0	0	-a56	0	a58
Primární vlastnosti hornin (vl)	0	0	0	0	0	0	-a67	-a68
Chemické zvětrávání (chem zv)	0	0	0	0	0	-a76	0	0
Fyzikální zvětrávání (fyz zv)	0	0	0	0	0	-a86	0	0

Obecně platí, že externí vlivy často působí pouze krátkodobě a mizí rychleji než vnitřní cykly systému. V případě zvětrávání pískovců je naopak systém charakterizován samozesilujícími se zpětnými vazbami. V daném systému tedy neustále sílí odezvy způsobené vnějšími vlivy a vytváří se tak lavinový efekt. Působení člověka, zejména dlouhodobý nepřímý vliv znečištění ovzduší, je faktorem, který z hlediska existujících vazeb charakter celého systému neovlivní, pouze znásobí působící pozitivní vazby a celý proces zvětrávání urychluje (viz obr. 4, 5). V současné době je za podmínky pokračující minimalizace antropogenních vlivů předpokládáno počínající postupné utlumování systému.

Tab. 3. Hlavní podmínky a vnější faktory ovlivňující proces zvětrávání pískovcových hornin na PB.

Antropogenní aktivity	Externí faktor	a) přímý vliv - mechanické poškození pískovce (těžba, otesávání, odlamování částí či jiná mechanická poškození) způsobující destrukci povrchových částí a obnažení vnitřních, méně odolných částí skalního masivu b) nepřímý vliv - emise v ovzduší a acidifikace srážkových vod způsobující destruktivní fyzikální a chemické zvětrávání , zvýšené fyzikální zvětrávání vlivem pálení ohňů, ad.
Činnost živých organismů	Externí faktor	mechanický rozpad, chemické rozpouštění a následný rozklad horniny
Klimatické změny	Externí faktor	intenzita srážek, kvazi-teplotní cykly, míra slunečního záření, mrazové zvětrávání, působení větru, ad.
Geofyzikální pole	Externí faktor	stále či nárazově působící vnější síly - např. zemětřesením, gravitace, slapovými variacemi tíže, (způsobující změny napjatosti horniny a její následnou destrukci)
Primární vlastnosti horniny	Podmínka	stupeň odolnosti horninového materiálu / původní kvalita geologického podloží: petrografické složení hornin (typická velikost zrn, množství odolných minerálů, odolnost základní hmoty či tmelu, zrnitost, porositá), stupeň tektonického porušení - množství, směr a charakter přítomných nehomogenit /zlomy, pukliny, zóny drcení, mikrotrhliny,...)
Expozice (morfologie)	Podmínka	morfologická stavba a expozice vůči klimatickým vlivům (orientace vůči světovým stranám vůči slunečnímu osvětlení či větru, výška skalních stěn, ad.)



Obr. 5. Schéma zobrazující samoorganizující se distribuci na modelu zvětrávání pískovcových hornin v NPČŠ. Podobné samozesilující fenomény se v přírodě vyskytují jen zřídka, protože je obvykle vyrovnávají negativní zpětnovazebné smyčky (např. Capra 2002). V ekosystémech ovlivněných člověkem jsou však tyto jevy mnohem častější.

4.3.2. Hydrodynamický režim tělesa

Míra nasycení horniny vodou a usměrněný transport infiltrovaných roztoků je jedním z faktorů přímo přispívajících ke snížení pevnosti a nepřímo podporujících procesy zvětrávání (Goudie & Viles 1997, Matsukura & Takahashi 1999, Vásárhelyi & Ván 2006, Summer & Loubser 2008, Naghadehi et al. 2010). Hydrogeologický režim PB kombinuje průlinovou a puklinovou propustnost v podmínkách nesaturované zóny, kde většina vlhkosti, průběžně obsažené v hornině, pochází z infiltrace atmosférických srážek, případně tání sněhové pokrývky.

Rozdílná propustnost litologických horizontů se uplatňuje při selektivním zvětrávání, především v rámci mezo-měřítek (v distribuci subhorizontálních říms a převisů – např. Kulič 1982, Rubín & Balatka et al. 1986, Mikuláš 2007). I přes predisponovanou subhorizontální stavbu masivu PB je však rozmístění vlhkosti v tělese brány zásadně ovlivněno přítomností **subvertikálních zón gravitační infiltrace**, které souvisí s existencí sekundárních trhlin a mikrotrhlin, sloužících jako preferenční dráhy pohybu roztoků za postupného oslabování jejich okolí (Young et al. 2009). Ty spolu s velkým objemem propojených a kapilárních pórů v hornině (Melounová 2006), umožňují intenzivní a relativně rychlý pohyb roztoků horninovým masivem (v řádech dnů až prvních týdnů).

Největší nasycení roztoky bylo zjištěno uvnitř skalního masivu na úpatí jižního pilíře brány. Výrazná vlhkost na bázi jižního pilíře je zde dotována několika zónami infiltrace. Nad méně propustnou vrstvou jemnozrnného pískovce zde dochází k zadržování roztoků a jejich odvodňování na lici stěn či v místech tvořících se převisů. Ve stejné výškové úrovni je předpokládáno i nasycení nitra pilíře severního, který navíc může drénovat skalní masivy v jeho pozadí. Pro potvrzení dané teorie však prozatím neexistují geofyzikální údaje.

4.3.3. Sekundární úbytek pevnosti zvětráváním

Lokální **expozice vůči mikroklimatickým podmínkám spolu s hydrodynamickým režimem** způsobuje, nezávisle na vrstevním sledu hornin tělesa PB, intenzivní projevy krystalizace solných výkvětů a opady povrchových krust (viz kap. 3.1.3., příloha K). Důsledky zvětrávacích procesů se projevují nejvíce na úpatí PB jako proces porušování, působící v mikro-měřítku (mající přímý vliv na dynamiku změn mikroreliefu) a s tím související zrychlený úbytek přípoверхových partií skalní stěny. Schopnost pískovce snadno nasáknout vodu i velmi rychlé odpařování, prokázané geofyzikálním měřením (DEMP), které vede k opětovnému vysychání, způsobuje nárůst pórovitosti (Summer & Loubser 2008) a

mnohonásobně urychluje procesy rekrystalizace solí oproti méně exponovaným částem skalního hřbetu. Podoblouková stěna severního pilíře, vystavená slunečnímu osvětlení a převažujícím jihozápadním větrům, je typickým místem, kde dochází k opakovanému střídání nasycení roztoky a vysoušení přípovrchové části horniny.

Na tělese PB dochází ke krystalizaci solí na povrchu formou solných výkvětů (Schaffer 1932) převážně v místech vyšší či opakované relativní vlhkosti (Rodriguez-Navarro & Doehne 1998), kde poté dochází k odlupování povrchové vrstvy horniny. Vzhledem k rychlému odparu (viz příloha L) by naopak ve vyšších, exponovaných partiích brány měla převazovat spíše krystalizace solí v pórovém prostoru pod povrchem horniny (Rodriguez-Navarro & Doehne 1998), která může zapříčinit vznik exfoliačních trhlin, způsobujících opad i několik cm silné vrstvy horniny (např. Winkler 1994). Obsah solí v přípovrchové zóně horniny i v místech, kde nejsou prozatím vizuální projevy zvětrávání, byl prokázán nejenom chemickými analýzami samotné horniny (příloha K), ale rovněž i chemickým složením průsakových vod (kap. 3.3.2, příloha J). Vzorky dlouhodobě opakovaně odebírané ve stropě převisu pod obloukem brány (tj. na jediném místě, kde dochází k sezónnímu odvodňování jedné ze subvertikálních zón při přesycení horninového masivu roztoky), dokládají nejen rychlý pohyb roztoku horninou, ale i jeho obohacení látkami, souvisejícími s chemickými reakcemi uvnitř masivu a s akumulací solí v přípovrchové zóně. Studium byla zjištěna rovněž těsná souvislost mezi opakující se gravitační infiltrací (tedy opakovaným „vymýváním“/loužením složek základní hmoty a rozpouštěním méně stabilních minerálů) a postupným oslabováním vnitřních partií skalního masivu (příloha J a příloha L).

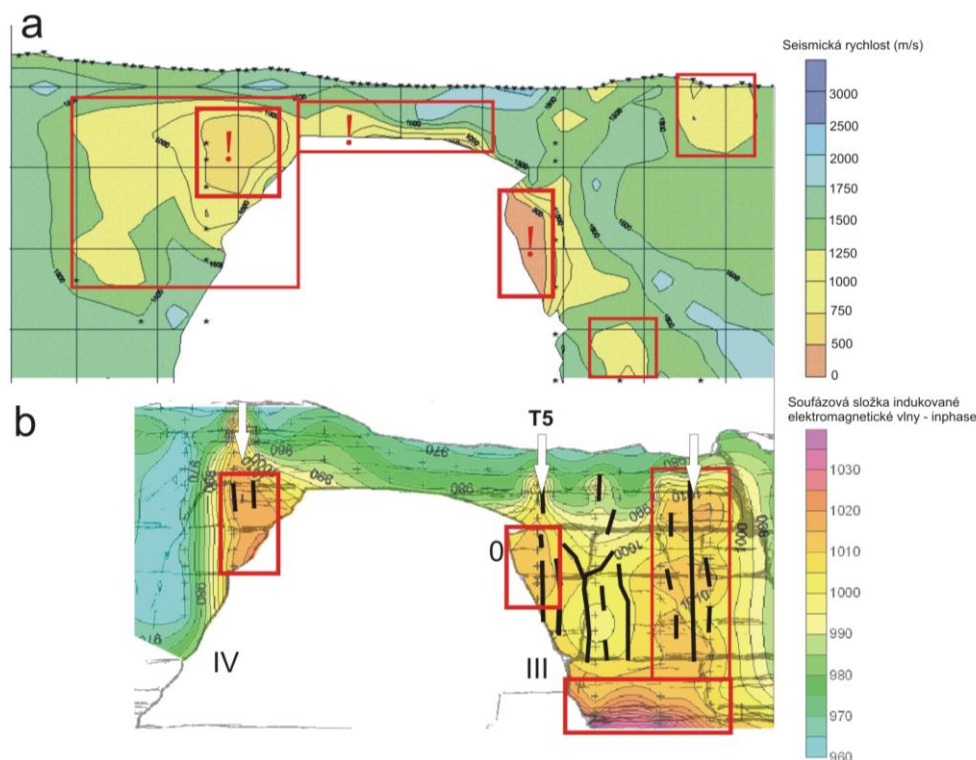
Kdyby trámec brány povrchově zvětrával stejnou měrou jako její úpatí, docházelo by pravděpodobně ke stranově několikanásobné destrukci povrchu, což by výrazně zhoršilo pevnostní parametry (zejména pevnost v tahu) a v blízké době by reálně hrozilo zřícení skalní brány. Přestože byly na trámci brány zjištěny, v porovnání se stavem v 90. letech 20.stol., pouze minimální vizuální projevy povrchové krystalizace solí (což by mohlo být dokladem pomalého ústupu destruktivního procesu), opakovaným georadarovým měřením (příloha L) byla potvrzena frekvenční a dynamická změna radarového signálu indikující nárůst zvětrávání směrem do skalního masivu, zejména z jeho spodní strany a podél subhorizontální ložní spáry.

Procesy fyzikálního i chemického zvětrávání (např. krystalizace solí – Johannesen et al. 1982) jsou **ovlivňovány také tepelnými kvazi-cykly a zjištěným teplotním gradientem**. Ten je spolu s rychlostmi teplotních změn důležitým vlivem zejména při zvětrávání několika prvních centimetrů horniny (např. Hall & Hall 1991, Warke et al. 1996, Warke & Smith 1998,

Hall et al. 2005). Výrazné tepelné oscilace působí především v aridních oblastech (např. Sancho et al. 2003, Molaro & McKay 2010). I naším sledováním v mírných klimatických podmínkách bylo potvrzeno, že téměř k 50 % poklesu denních teplotních změn a teplotního napětí dochází na PB právě v přípovrchových částech skalního masivu v hloubce kolem 10 cm. Důležitou roli zde hraje také intenzita slunečního záření, která při povrchu může způsobovat výrazný teplotní gradient. Rozdílné zahřívání hornin osluněním v závislosti na expozici a na odraznosti povrchu (Clark & Small 1982, McGreevy 1985, Warke et al. 1996 či Hall et al. 2005, 2007), tedy intenzitě tmavého zbarvení pískovců vlivem antropogenního znečištění – příloha K, se může rovněž projevat jako plošně nerovnoměrné objemové změny, které mají vliv na oddělení klastických součástí od základní hmoty, tvorbu mikrotrhlin (např. Jenkins & Smith 1990 či Hoerlé 2006) a následné přetváření mikromorfologie. Terénní měření teplot (příloha H) dokládá max. roční amplitudu povrchové teploty PB dosahující téměř 54°C, denní teplotní amplitudu 8,9°C (na východní straně) a 4,1°C (na straně západní). Předpokládané teplotní napětí vypočítané z hodnot denních a ročních teplotních změn povrchu přesahuje dle Brčka (2010) laboratorně zjištěnou mez pevnosti v prostém tlaku o 50%. U zvětralých partií skalního masivu, reprezentujících ještě nižší pevnosti, by pak mohl působit nepříznivý účinek teplotního namáhání i při menších rozdílech teplotních změn.

Negativní roli hraje také prokázané **opakované hloubkové promrzání** pískovcového masivu, které navíc výrazně zvyšuje rozpad hornin za přítomnosti solných roztoků (např. Turkington & Paradise 2005, Matsuoka 1994, Warke et al. 2006 či Ruedrich & Siegesmund 2007). V případě všestranně exponovaného trámce brány dosahuje měřením prokázané promrzání horniny hloubky 90 cm, v nejužším místě tedy až jedné čtvrtiny jeho objemu. Během srážkově bohatých zimních sezón lze tedy uvažovat rovněž o působení mrazového zvětrávání. Negativní efekt lze předpokládat zejména v obdobích maximálního nasycení vlivem opakovaného tání a znovuzamrzání (Thomachot & Jeannette 2002, Saad et al. 2010).

Opakující se zesilování i velmi malých primárních rozdílů v odolnosti vůči zvětrávání ve vertikálních profilech svahů (např. Gregory 1938, Holtedahl 1960, Young & Young 1992) bylo potvrzeno i na studované modelové lokalitě. Většina námi popisovaných dějů se odehrává na mikro-úrovni (tepelné dilatace, solné zvětrávání, ad.), v některých případech se ale jejich kumulativní účinek časem projeví konkrétními důsledky ve vyšší prostorové úrovni (tj. mezo- až makrotvarech dle klasifikace Turkington & Paradise 2005). Selektivní působení zvětrávacích procesů v závislosti na obrazu napjatosti v masivu (tzv. stress erosion) se nejčastěji uplatňuje v zónách koncentrací napětí či podél trhlin, vzniklých při uvolňování



Obr. 6. Oslabení masivu Pravčické brány zvětráváním, potvrzené dvěma nezávislými geofyzikálními metodami: a) seismickou tomografií, b) metodou DEMP (vytvořeno s využitím databáze Beneše 2008 a Frolky 2009 – pohledy od západu). K nejvíce rizikovým partiím z hlediska budoucí stability náleží zóny vyznačené oranžovo-žlutou barvou - tedy trojúhelníkový blok jižního pilíře, spodní strana trámce brány postižená zvětráváním a místo spojení trámce s pilířem severním.*

napjatosti (např. Gerber & Scheidegger 1969, Kalvoda & Zvelebil 1983, Kalkani 1981). Snížené pevnosti horniny, odpovídající vyšší pórovitosti či tektonickému porušení, jsou shodné se zónami povrchového zvětrávání a cyklického vsakování (viz obr. 6b). Podél klenby brány, zejména na vnitřní straně jižního pilíře a rovněž v nesvrchnější poloze pilíře severního, byly seismickým měřením prokázány oblasti výrazného oslabení nitra horninového masivu (tj. oblastí s nízkou hodnotou rychlosti seimických vln do 500 m/s, reprezentující dle standardů písky či jíly – např. Gruntorád et al. 1985). Těleso brány navíc celkově vykazuje relativně nízké hodnoty seimických rychlostí, nepřekračující 2 500 m/s, což poukazuje na pískovec postižený zvětráváním (viz obr. 6a), čemuž by nasvědčovaly i nízké hodnoty pevnosti zjištěné laboratorními zkouškami. Uvnitř tělesa brány tedy zákonitě **dochází k redistribuci napjatosti pomocí progresivního porušování a oslabení dílčích partií skalního masivu zvětráváním**. Výše zjištěné je významným faktem nejenom z hlediska

* Pozn. Inphase je parametr měřený současně se zdánlivou vodivostí metodou DEMP. Jednotkou inphase je bezrozměrná fyzikální veličina, která je definována jako relativní množství v ppm. V běžných geologických prostředích lze složku inphase považovat za úměrnou magnetické susceptibilitě prostředí. V podmínkách Pravčické brány se magnetické vlastnosti pravděpodobně mění v závislost na výskytu trojmocného železa ve zvětralé hornině.

morfologického, ale zejména stabilitního (Zvelebil 1989) ve srovnání s procesy přípovrchového zvětrávání, které působí pouze v rámci prostorových mikroměřitek (nejčastěji ve formě opadávání zrn a úlomků).

4.4. Porušování a deformační chování

Aby bylo možné rekonstruovat napjatostní pole v tělese PB, je třeba nejdříve určit hlavní působící procesy porušování a popsat kinematiku deformačního chování. Prokázané vratné i nevratné deformační projevy proto byly, spolu s údaji zjištěnými dalšími, zejména geofyzikálními metodami, vzájemně příčinně i kinematicky integrovány v jednotném deformačním modelu.

4.4.1. Hlavní příčiny nárůstu pole napětí

Pole napjatosti je nutné posuzovat v rámci dvou rozdílných prostorových měřitek – v první řadě jako faktoru, způsobujícího lokální změny mikromorfologie a v řadě druhé, mnohem významnější, jako faktoru, ovlivňujícího deformaci a následné porušování (zhoršení fyzikálních vlastností) celého skalního masivu.

Převážně, v makro-měřítcích času i prostoru relativně ustálené (pouze s nevýznamnými výchyly vlivem variací slapových sil) je **namáhání od vlastní tíže**. Ta působí na každý bod tělesa PB a závisí na schopnosti skalního masivu napětí přenášet – tj. na jeho hmotnosti a uspořádání dílčích bloků v masivu tělesa PB, průběhu oslabených zón, diskontinuit a celkové geometrii tělesa. Ostatní vlivy mohou měnit obraz napjatosti, ve srovnání s tíhou mají však omezenější význam, co se týče intenzity a lokalizace jejich působení.

Změny teploty mají dopad nejenom na mikro-dynamiku povrchu, ale rovněž na diferenciaci vnitřního napětí v různých hloubkách masivu a rozdílné chování skalní brány v závislosti na změnách oslunění v denních cyklech, obojí s nepřímým vlivem na celkovou stabilitu skalního oblouku. Data z kontrolního sledování relativních pohybů a teplotních změn umožnila stanovit základní rysy **opakovaného dynamického namáhání masivu** brány v rámci krátkodobého (denního) i dlouhodobého (ročního) měřítka. Deformačně výrazné vratné teplotní kvazi-cykly mohou výrazně přispívat k porušování horniny, a to opakovaným dynamickým namáháním, souvisejícím s objemovými změnami tělesa brány. Toto namáhání se v čase i prostoru projevuje v hierarchickém systému.

Posledním způsobem namáhání tělesa, které je důsledkem vnitřních podmínek i výše uvedených procesů a má přímý vliv na celkovou stabilitu, jsou **nevratné deformace**, tedy nevratné pohyby jednotlivých skalních bloků a otevírání měřených puklin.

4.4.2. Aktualizovaný strukturně-deformační model

Trámec brány je nosník vetknutý do hlavního masivu, který je na severu pevně spjat s pilířem a na údolní straně spočívá pouze zčásti na své podpěře, jižním pilíři. Genetickou predispozicí, historickým rozšiřováním otvoru brány podél exfoliačních puklin (Cílek et al. 2010), vznikla přirozená skalní klenba, která je (i přes současný „lichoběžníkový“ tvar otvoru) zachována dodnes. V blokové stavbě tělesa hraje významnou roli málo odolná, subhorizontální poloha slepenců, tvořící kontakt mezi trámcem a jižním pilířem. Ta způsobila také dvoufázovou modelaci tvaru brány (kombinaci typu „Shelter Natural Arch“ s „Caprock Natural Arch“ dle klasifikace The Natural Arch and Bridge Society), spočívající nejprve ve tvorbě klasického půlkruhového otvoru, v druhé fázi pak docházelo k přednostnímu zvětrávání a opadům bloků podél svrchního ukončení výrazné subhorizontální slepencové polohy. V následné modelaci se pak uplatňovaly především převažující procesy selektivního zvětrávání. Detailní, aktualizovaný popis předpokládaného vývoje skalní brány je uveden v tab. 4. Dnešní pozice tělesa PB v tomto modelu odpovídá vyzrálé až staré formě. Stabilita brány bude v dalších fázích vývoje zásadně ovlivněna procesy zvětrávání a rozložením napětí ve skalním masivu.

Původní model kvazi-cyklického zatěžování stropního trámce vzpěrem za jeho podélného vyklenování působením změny objemu ve směru S-J (Zvelebil et al. 2002) je navíc třeba obohatit o další děje. Východní a západní část tělesa brány se totiž chová rozdílně jak ve vratném, tak nevratném deformačním režimu. Působením vnější teploty **dochází k nejenom k ohybovému (obloukovitému), ale částečně i torznímu namáhání trámce**. Teplotní změny se na PB projevují do hloubky 1,5 m v rámci denních cyklů, a do hloubky až 13,5 m v rámci ročních cyklů (hodnoty byly získány teoretickým výpočtem, uvažujícím s klasickým poloprostorem - příloha H, Brček 2010). Při stávajících rozměrech trámce brány a jeho geometrii by tedy roční teplotní změny patrně zasahovaly celou jeho šíři a většinu jeho mocnosti. Při objemovém nabývání horniny v letním období (směrem do boků a limitovaně do údolí), dochází k nárůstu tlakového napětí v trámcí. Na západní straně trámce (PB 5) byla zjištěna vyšší sezónní amplituda pohybu oproti straně východní (PB 4), což poukazuje na rozdílné odezvy dílčích částí trámce. Uvedené zjištění odpovídá interpretaci geofyzikálních dat - východní polovina trámce se pravděpodobně deformuje spolu s podložím, zatímco

západní se chová jako samostatný, od pilíře oddělený celek. Tím roste **význam subvertikální pukliny T0**, probíhající souběžně s osou trámce v jeho jižním konci. Puklina je velmi pravděpodobně sekundární, dodatečně vzniklá jako lineární prvek. Podél této „dělicí linie“ pravděpodobně dochází ke kompenzaci napětí mezi dvěma, vzhledem ke své expozici odlišně se chovajícími partiemi východního a západního boku trámce. Z hlediska budoucího vývoje brány je důležitá zejména orientace osní pukliny a případné aktivity jejího rozšiřování (vlivem smykového pohybu). Dosud bylo potvrzeno pouze velmi pomalé nevratné svírání počátku dané pukliny (tj. stanovišti PB2 dle přílohy G), avšak georadarovým měřením byla zjištěna podélná trhlinka v navazujícím směru, která by se mohla v budoucnu stát jejím přímým pokračováním v samém středu trámce (detaily v příloze L).

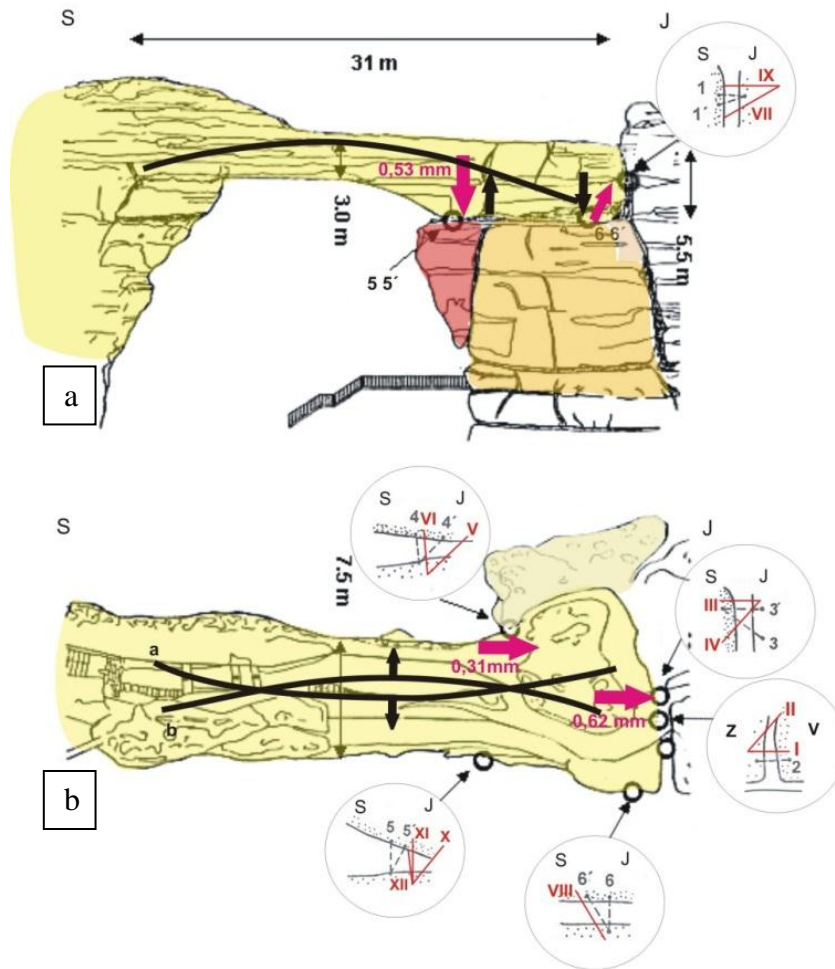
Tab. 4. Obecný model vzniku a stádia vývoje Pravčické brány.

Úvodní podmínka	Vypreparování tenkého a dlouhého žebra (resp. skalní zdi)
Embrionální forma	Obloukovitá dutina , později převis s tendencemi rozšiřovat se do stran (vlivem distribuce vlhkosti v masivu dochází k nasycení podél bazálního izolátoru a zóny vyšší propustnosti) a rovněž směrem nahoru (vlivem průsaku vody shora dolů, který koncentruje porušování v zóně intenzivnějšího odvodňování ve stropě). Probíhá oboustranné selektivní vyvětrávání vrubu při spodní straně žebra a redistribuce napětí, sledujícího zvětrávání nad vyvětranou dutinou.
Mladá forma	Perforované žebro – převisy se dále postupně rozšiřují, stávají se vyššími a hlubšími až dojde k perforaci skalního žebra. Podél otvoru působí klenbový efekt, tvoří se exfoliační trhliny. Brána postupně vzniká opakovaným opadem skalních desek z vnitřní části jejího oblouku za spolupůsobení procesů zvětrávání a eroze.
Vyzrálá forma	Změna otvoru brány z oblouku na lichoběžník s výrazným stropním trámcem. Postup rozšiřování perforace do stran a šířky tak dlouho, dokud se otvor neprořízne k výrazné zóně odlučnosti reprezentující změnu fyzikálně-mechanických vlastností (viz štěrková poloha pod hmotou trámce PB). Protože je oblouk dostatečně široký, ve smykové zóně oblouku se uplatní ona odlučná zóna jako nová plocha porušení a přednostního vypadnutí hmot. Dochází k postupnému rozšiřování planárního tvaru trámce do obou stran díky poruchám v jižním i severním pilíři. Rozšiřování do stran selektivním vyvětráváním vrubu se postupně zpomaluje vlivem nižšího nasycení průsakovou vodou z důvodu zmenšené infiltrační oblasti nad pilíři a vzniku nových subvertikálních puklin jako přednostních odvodních cest snižujících průlinový tok. Dochází k postupnému zhlazování ostrých hran otvoru procesy zvětrávání a tvorbě typického mikroreliefu.
Stará forma	Reprezentována „dlouhou“ bránou tvaru lichoběžníku . Délka oblouku je podmíněna rozměry masivu, neporušeného trhlinami podél vrstevních ploch (pro jednoduchost není uvažováno se „samosvorným/klenákovým“ efektem působícím na několik bloků ve středu trámce). Pokračuje intenzivní zvětrávání a porušování opadáváním ze stropu trámce, způsobující ztenčování tak, že spodní strana se stále více blíží linii maximálního smykového napětí (nad tím je navíc možný přechod napětí do tahu). Rovněž dochází k porušování vnitřních částí pilířů tahu a smyky do volného prostoru otvoru brány, kde hlavní roli hrají nové subvertikální a šikmé pukliny a vypadávání lichoběžníkovitých, nahoře širších částí vnitřních boků (dané změnami pole napětí).

Zajímavé je srovnání vratných deformací u dvou bodů v průchozí spáře (PB1 a PB3'). Výrazně vyšší sezónní amplituda na východní expozici nezapadá do uvedeného deformačního modelu, který předpokládá opačné chování. Její příčinou může být buď měření menšího horninového bloku či dostatek prostoru k rozpínání, který u západně exponovaného bodu chybí.

Teplotní roztažnost zhoršuje fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin, způsobuje vznik mikrotrhlin mezi minerálními zrny a další otevírání existujících puklin a trhlin (např. Glamheden & Lindblom 2002). Mnohonásobně opakované denní a sezónní deformačně-napěťové pulzy tak vedou k postupnému zmenšování pevnosti v namáhaných partiích pískovcového masivu a kumulativnímu skládání mikro-deformací, pocházejících z hystereze pružného deformačního cyklu. Extrémní denní výkyvy teploty, přesahující 20°C, zde mohou dokonce iniciovat taková teplotní napětí, která reprezentují 50 až 70% meze pevnosti v prostém tlaku a přibližují se hodnotám nevratného porušení horniny (viz Brček 2010). Teplotní dilatace za sledované období 2006 – 2009, zjištěné pomocí nadstavbové simulace teplotně-dynamického chování jižního konce trámce PB, dosahují max. rozpětí 1,2 mm (Brček 2010). Při srovnání s výsledky ručního kontrolního měření je zřejmé, že průměrná max. amplituda změřených ročních dilatací skalního tělesa za stejné období je 1,3x a 1,8x větší než jeho „pouhé“ vodorovné rozpínání vlivem změn vnější teploty (v případě měření PB1 činí průměrná amplituda za 3 roky 1,63 mm, u PB3' dosahuje hodnoty 2,19 mm – příloha G; max. amplituda je pak 1,6 x až 1,8 x vyšší). Z uvedených výsledků je zřejmé, že do vratných pohybů vstupují ještě další, dosud nepopsané vlivy.

Z prostorové asymetrie, projevující se v makro-měřících dlouhodobých sledování, vyplynulo, že západní strana trámce brány dlouhodobě nevratně poklesá (PB5), zatímco na východní straně převažuje pomalý subhorizontální posun trámce směrem k jihu (PB4'). Na západě je tedy trámec brány již zcela oddělen od jižního pilíře a dnes dochází k drcení, olamování nerovností povrchu při pohybu podél kontaktní plochy a souvisejícímu intenzivnímu zvětrávání přípovrchových partií masivu. Na východě ještě k úplnému oddělení nedošlo, takže pohyby v uvedené zóně mají směsný, pružně-tvárný charakter. Zřejmě zde tedy dochází k velmi pomalému prořezávání a postupné tvorbě celoplošně průběžné vodorovné ložní spáry L0. Poklesání středové partie trámce (PB5) je navíc kompenzováno nevýrazným zdvihem jeho koncové části (PB6), což by - spolu s opačným charakterem SCSA - mohlo svědčit o dosud neuvažovaném chování jižního konce trámce, které by se mohlo



Obr. 7. Model kinematiky vratných a nevratných pohybů PB: a) pohled na těleso brány ze západní strany, b) půdorysný pohled na trámec shora (s vyznačením rozměrů skalního objektu a umístění jednotlivých měřicích bodů automatického/červeně i ručního kontrolního sledování/černě). Šipky naznačují zjištěné směry deformací - nevratné pohyby jsou označeny růžovou barvou, vratné teplotní dilatace a způsoby kvazi-cyklického namáhání tělesa černě.

připodobnit k pohybu dvoustranné páky. Aktuální vyhodnocení dat z kontrolního sledování nepotvrdilo dříve uvažované vyklánění podobloukové stěny jižního pilíře (tedy trojúhelníkového bloku) ani nevratné otevírání příčné průchozí spáry, ohraničující konec trámce (Zvelebil et al. 2002), jež bylo podkladem pro upřednostnění kinematického modelu namáhání trámce vzpěrem za vytváření klenby. Naopak zjištěným nevratným zužováním průchozí spáry (PB3) a zejména poklesem trámce v bodě PB5 dochází k velmi pomalému zplošťování oblouku, což může v budoucnu (z dlouhodobého hlediska) způsobit snížení účinnosti klenbového efektu a vyšší zatížení v tahu za ohybu.

Změny pole napjatosti, které lze pozorovat v mezo- až mikro-měřítkách ve všech výše popisovaných způsobech namáhání, probíhají v dílčích partiích skalního masivu v důsledku

redistribuce napětí. Ztráta schopnosti přenášet napětí je pak vyvolána tehdy, překročí-li v daném bodě koncentrace napětí od vlastní tíže či dynamických pulzů mez pevnosti masivu, nebo je tato mez snížena zvětráváním. S ohledem na výše uvedené se jako zásadní riziko jeví: a) možné vypadnutí oslabeného trojúhelníkového bloku v jižním pilíři skalní brány spolu s následnou aktivací svislé trhliny T5; b) rozšíření osní pukliny T0 směrem k severu (tedy do středu trámce) či její progradace v jiném směru v závislosti na změnách napětí v masivu. Tyto dvě oblasti jsou považovány za kritické zóny z hlediska dalšího stabilitního vývoje.

5. Diskuze

5.1. Užitá metodika a návaznost výzkumu

K rigorosnímu stanovení celkového vývoje a navržení opatření ke snížení či eliminaci případného ohrožení stability PB je naše poznání prozatím neúplné. Obsahem této kapitoly jsou oblasti, které budou nadále vyžadovat systematickou pozornost, jakož i pokusy o zobecnění získaných poznatků. Provedený komplexní výzkum je tedy také pomyslným odrazovým můstkem pro navazující aktivity s cílem vybudovat soubornou databázi informací s využitím detailního průzkumu a dlouhodobého kontrolního sledování, která se stane základem nejenom pro charakteristiku konkrétního skalního tělesa, ale zejména pro lepší pochopení vývojových změn pískovcových skalních bran.

Sestavení konceptu porušování skalní brány bylo poněkud odlišné oproti běžnému inženýrsko-geologickému postupu. Důvodem je zvláště vysoký stupeň ochrany, který znemožňuje přímé stanovení většiny potřebných fyzikálně-mechanických a pevnostně-napjatostních parametrů. Místo toho musela být využita syntéza nepřímých dat získávaných převážně nedestruktivními metodami.

Ochranná opatření ve studované lokalitě omezila zásadním způsobem výběr metod i jejich rozsah. Nejmarkantněji se to projevilo u laboratorních zkoušek, které obvykle vyžadují opakování pokusu na velkém počtu vzorků. Při interpretaci výsledků a při dalším využití získaných dat (zejména u výsledků pevnostních zkoušek) je nutno zohlednit fakt, že měření, realizovaná na objemově malých částech horniny, nejsou dostačující z hlediska statistického zpracování ani plnohodnotně reprezentativní ve vztahu k posouzení vlastností horninového masivu jako celku. Některé z metod mají zase určitá omezení, vyplývající z nelinearity procesů (nelineární dynamiky systému) a komplexního chování systému. Například zjištění rozložení pole napětí pomocí stávajících geomechanických numerických modelů (např. script FLAC firmy Itasca), vycházejících ze skládání stavů a interakcí dílčích prvků systému, nezahrnuje nové vznikající vlastnosti, které nevyplývají z vlastností jednotlivých interagujících prvků. Zaměřila jsem se proto na stanovení této skutečnosti nepřímými a pozorovacími metodami (zejména s využitím geofyziky a dokumentace porušování na povrchu), které umožňují částečně postihnout i emergentní složku zájmového jevu. Zároveň se v tomto ohledu jako podstatné zdají být informace pouze v řádech makro- až mezoměříték. Pro včasnou identifikaci možného ohrožení skalního tělesa proto pravděpodobně nemá smysl dělat doplňující, ještě detailnější průzkum či monitoring. Velmi podstatné je ale pokračování

v navržené metodice za účelem potvrzení podaných hypotéz i ověření časové platnosti dosavadních zjištění.

V rámci dlouhodobého sledování vývoje skalní brány doporučuji opakovat zejména **geofyzikální měření** vždy po 3 až 5 letech. Největší výpovědní hodnotu mají data získaná opakovaně georadarem, doplněná o výsledky seismické tomografie. Jde o nedestruktivní metody aplikované *in-situ*, které podávají informaci o celkové vnitřní stavbě tělesa, vybraných fyzikálně-mechanických parametrech horniny, a v dané lokalitě tak částečně nahrazují chybějící laboratorní údaje. Ověřené výsledky seismické tomografie bude případně možné převést na informace, odpovídající geotechnickým parametrům (a doplnit tak sporadická data z běžných zatěžovacích zkoušek). Pro stanovení vlhkosti horniny spolu s intenzitou zvětrání skalního masivu byla, i přes potvrzení účinnosti předchozími studiemi (např. Matsukura & Takahashi 1999, Beauvais et al. 2004, Matouš & Pícha 2005, Sass 2005, Sass & Viles 2006, či Mol & Viles, 2010), překvapivě málo využitelná data z odporové tomografie (vysvětlení v kap. 3.2 a příloze VIII). Naopak velmi zajímavé výsledky pro tento účel poskytla metoda DEMP, která je běžně aplikována spíše pro vyhledávání mělce uložených a značně vodivých struktur (např. Kroová et al. 1999) a vhodnost jejího použití pro studované pískovce mohla být z metodického hlediska diskutabilní (zejména s ohledem na výsledky odporových metod). Přínosná jsou však nejenom data, vypovídající o změnách nasycení horniny v čase a rozložení vlhkosti v masivu, ale také korelace oblastí zasakování se zónami porušení, zjištěnými georadarem. Pro upřesnění interpretace výsledků metody DEMP by bylo vhodné provést doplňková měření při co nejmenší saturaci skalního masivu roztoky a naopak při maximálním nasycení vodou, aby byly získány mezní hodnoty pro studovanou lokalitu. Původní georadarová data (Svoboda 2002) nebyla bohužel zachována v digitální podobě. Teprve dalším opakovaným měřením bude možné porovnat získané záznamy dat s využitím tzv. interferogramů, které ukáží přesný obraz fyzikálních změn v tělese brány. Pro ověření možné existence významných deformačních zón v obou pilířích (viz příloha L), jsou naplánována přímá měření rychlostí georadarového signálu (CMP).

Geofyzikální data se stala výchozími údaji pro sledování průběhu změn v časových měřítcích let až desítek let, neboť veškeré vztažné body těchto geofyzikálního průzkumu byly zaměřeny, eventuálně dlouhodobě vyznačeny přímo na místě. Limitujícím faktorem byla nestandardní geometrie skalního tělesa (více v příloze L), kterou je nutné zohlednit jak při měření, tak při interpretaci dat. Základním předpokladem pro navazující sledování je také detailní geodetické zaměření povrchu trámce. V rámci opakovaného měření je nezbytné volit

stejnou měřicí aparaturu a dodržet nastavení identických parametrů; pro následné numerické zpracování geofyzikálních dat je třeba využít stejné programové vybavení z důvodu poskytnutí srovnatelného zobrazení výsledků. Při plánování dalších etap průzkumu je rovněž nutné zohlednit roční období a časový horizont prováděných měření z důvodu ovlivnění míry využitelnosti metod externími klimatickými vlivy (zejména srážkovými úhrny).

Geofyzika se osvědčila v rámci studovaných makroměřitek (ve smyslu Turkington & Paradise 2005) a zejména pro účely zjištění distribuce a rozsahu míry zvětrání nitra skalního masivu. Zvolenou kombinovanou metodikou, způsobem zpracování dat i získanými výsledky jde o jedinečný postup, který bude možné aplikovat i na dalších pískovcových objektech.

System automatického **kontrolního sledování relativních pohybů**, zkoušený v posledních letech na území NPCŠŠ (např. Zvelebil et al. 2005, Anonymous 2010, Vařilová & Zvelebil 2007), poskytl přímo na tělese PB cenné informace o kvazi-cyklických reakcích skalního masivu na denní změny teploty a míru oslunění, i možnost aplikace zcela nových postupů vyhodnocování dat s využitím nelineárních metod (Zvelebil et al. 2005, Zvelebil et al. 2008). Vzhledem k problematické dlouhodobé udržitelnosti systému v této lokalitě (ve smyslu velmi časté poruchovosti systému zásahy externích vlivů, vysokých provozních nákladů i náročnosti zpracování velkých objemů dat), byl jeho provoz ukončen již v polovině roku 2010. Doporučuji však i nadále pokračovat v systematickém ručním kontrolním sledování PB s cílem lépe zachytit zjištěné procesy a poskytnout datový základ v časem neměnné kvantitativní podobě. Posledně uvedené je totiž jedinou možností, jak rigorosně ověřit předpoklady o aktivitě procesů porušování v časových měřících desítek let, které jsou základem Plánu péče a ochrany tělesa. Stávající síť kontrolních bodů navrhuji doplnit o místa stěžejní z hlediska modelace budoucího vývoje – tzn. osadit měřením trojúhelníkový blok jižního pilíře (za účelem sledování jeho případného poklesu či vyklánění) a podélnou osní puklinu v trámci brány ve směru předpokládaného smykového pohybu.

Velký potenciál má také započaté **studium teplotního chování tělesa brány**, které navíc vyplňuje mezeru ve znalostech závislosti mikroklimatických změn a teplot nitra pískovcového masivu, získaných měřeními *in-situ* (Turkington & Paradise 2005) a řadí se tím k několika málo existujícím studiím podobného charakteru (např. Kerr et al. 1984 či Jenkins & Smith 1990). Stávající výzkum je nutné doplnit o dosud neuvažovanou rozdílnou míru oslunění a změny tepelné vodivosti, ovlivněné okamžitou vlhkostí pískovce, specifický tvar skalního objektu a litologickou heterogenitu tělesa brány. Zaměřit bychom se měli zejména na dlouhodobé sledování míry nasycení skalního masivu roztoky, výsledky pak korelovat se

změnami teplot i pevnostními vlastnostmi horniny (bude-li to ovšem prakticky reálné). Z důvodu nemožnosti odebrat reprezentativní množství vzorků hornin se totiž prozatím nepodařilo ani kvantifikovat nebezpečí postupu destrukce brány s využitím zkoušek fyzikálního porušování pískovce teplotními cykly (resp. modelovat oscilace napětí v trámci brány působením objemových změn v důsledku ohřívání a související poklesy pevnosti za vzniku nevratné deformace). Nadstavbou všech dosavadních znalostí by pak mělo být trojrozměrné analytické řešení, spočívající ve vytvoření teplotně-deformačního modelu (využívající prostorové zobrazení tělesa a jeho skutečnou blokovou stavbu) a posouzení míry vlivu trvalé teplotní deformace na zjištěné nevratné pohyby tělesa brány.

Antropogenně ovlivněné zvětrávání hornin a jeho projevy v městském i přírodním prostředí byly popsány mnohými autory v zahraniční i české odborné literatuře (např. Schaffer 1932, McGreevy et al. 1983, Goudie & Viles 1997, Smith 1996, Williams & Robinson 1998, Turkington & Smith 2000, Turkington et al. 2003, Siedel & Klemm 2000 a 2001, Warke & Smith 2000, Charola 2000, McKinley et al. 2001, Bai et al. 2003), jejich výsledky však zohledňovaly vždy pouze dílčí část dané problematiky. Geochemické studium zvětrávání na lokalitě PB částečně potvrdilo údaje existujících regionálních studií, zejména chemické složení přítomných solných výkvětů (Beyer 1911, Breiter 1976, Cílek & Langrová 1994, Zvelebil et al. 2002, Soukupová et al. 2002, Schweigstilllová & Hradil 2007, Schweigstilllová et al. 2009). V realizovaném rozsahu však navíc pokrylo danou problematiku z hlediska celého procesu (tedy počínaje možnými zdroji, přes meziprodukty až po koncové produkty s destrukčním účinkem na horninu). Spolu s popisem důsledků krystalizace solí, a hledáním příčin jejich distribuce v prostoru i čase, jde o souborné a netradiční pojetí. Zvětrávání bylo také doposud málo studovaným faktorem z hlediska ovlivnění stability pískovcových skalních masivů. Nejpodstatnějšími výsledky se v dané souvislosti jeví zjištění v rámci celého skalního tělesa - především korelace geochemických a geofyzikálních dat, která prokázala zóny snížené odolnosti skalního masivu PB, související s opakovanou infiltrací vod podél sekundárních porušení a probíhajícím fyzikálním a chemickým zvětráváním. Při studiu zvětrávacích procesů je tedy důležité odlišit přípovrchové procesy (ve smyslu „z vnějšku do nitra masivu“) probíhající formou drolení pískovce, opadávání skalních krust, apod., od pochodů porušení probíhajících v jeho nitru, které mohou mít mnohem větší účinek z hlediska ovlivnění celkové odolnosti a destabilizace větších skalních celků.

Hlavním omezením sledování rychlosti zvětrávání v terénu bývá často metoda jeho stanovení (Turkington & Paradise 2005). Původně navrhované, nejběžnější metody s využitím vážení materiálu opadaného z nadefinované plochy skalní stěny (např. Rögner 1988) byly

vzhledem k místním podmínkám a mnohým praktickým komplikacím zamítnuty. Metodika sledování mikromorfologických změn (dle Jánové & Liščáka 2002) aplikovaná v areálu NPP PB byla bohužel rovněž vyhodnocena jako nedostačující. Pro specifické podmínky lokality by bylo optimální zavedení pravidelného sledování s využitím fotogrammetrických metod za účelem stanovení dostatečného (tedy statisticky zpracovatelného) množství údajů souvisejících s procesy zvětrávání - zejména získání dat o opadech povrchových kust v jednotce plochy. Pro kvantitativní, v dlouhodobém měřítku využitelný monitoring relativní rychlosti úbytku materiálu v čase (a souvisejících změn mikromorfologie) by bylo vhodné využití nedotykové, nejlépe laserové metody (více k metodice např. Williams et al. 2000).

Jsem si vědoma skutečnosti, že zpracování výsledků je zásadně závislé na úspěšných transformačních přechodech (Urban 2005) mezi používanými časovými a prostorovými měřítky, která se od sebe liší až o několik řádů. Již v rámci prezentovaného modelu (obr. 2) byla zjištěna velká řada interakcí, které způsobují vznik a změny vlastností či struktur, jež nelze prozatím metodicky rozpoznat. I přes výše diskutovaná omezení jsou použité metody a získané výsledky velmi užitečným krokem. Podstatně **napomohly jednak k interpretaci deformačního chování tělesa PB; jednak ke kvantifikaci procesů připovrchového, ale i hloubkového porušování masivu dynamicko-deformačními pulzy a procesy zvětrávání.** Neúspěšné metodické pokusy napomohly definovat limity studované lokality i rozsah možného využití konkrétních metod.

Geomorfologové (např. Young et al. 2009) často poukazovali na souvislosti mezi vývojem skalních forem a geomechanickými poznatky o stabilitě skalních tvarů a způsobech jejich porušování (s odkazem na práce Terzaghiho 1962 či McNally & McQueen 2000). Z hlediska další kontroly stability brány je důležitá zejména znalost: a) kinematiky vratného i nevratného pohybu vymezující způsob zatížení tělesa brány, tedy obraz napjatosti (zda převažuje namáhání tahem za ohybu či vzpěrem /namáhání převážně tlakové), b) rychlosti nevratného poklesání, která udává rychlost změn namáhání trámce; c) narůstu deformace vlivem dlouhodobého opakovaného dynamického zatěžování (formou mikropulsů vyvolávajících pomalou deformaci materiálu typu „creep“ – viz Chigira 1992), d) okamžité odolnosti skalního masivu vůči aktuálnímu namáhání, které může pomalu narůstat a které může být i jednorázově negativně ovlivněno vnějším faktorem. Prezentovaný koncepční model procesů porušování PB ukázal zásadní význam charakteru pole napjatosti v horninovém tělese. Stanovení jeho změny v prostoru a čase bylo však již nad rámec časových možností studia. Dané téma si vyžaduje samostatnou studii, tedy zahájení

spolupráce s příslušnými odborníky za účelem **vytvoření aktuálního stabilitního (geomechanického) modelu**. Stabilitou tělesa PB, i obecným problémem vývoje skalních bran je třeba se dále zabývat na základě shromážděných vstupních dat - skutečné blokovitosti masivu a stupně zhoršení fyzikálně-mechanických vlastností. Pro podobnou analýzu, uvažující více způsobů porušení skalního masivu, složitou geometrii a komplikovanou vnitřní strukturu, hydrogeologické podmínky a proměnné pevnostní parametry, budou vyžadovány pokročilejší numerické metody (Stead et al. 2001). Míru nestability brány, resp. aktuálnost bezpečnostních opatření bude poté možné odvodit na základě parametrických citlivostních studií, ve kterých vstupní vlastností bude pevnost pískovce, definovaná tahovým a tlakovým namáháním (Hoek & Brown 1980) spolu s modelem rozložení osního tlaku (např. Heyman 1982 či Young et al. 2009), určujícím celkové pnutí podél otvoru brány. V případě PB budou však rozhodující nejenom existující tektonické linie a zvětráváním oslabená místa, ale i předpokládané smykové zóny (zejména jejich orientace v trámci).

Zásadní z hlediska určení stádia vývoje PB a rizika jejího zřícení je především existence subvertikální spáry ve středu stropu trámce spolu se stavem pole napětí v trámci a opěrných pilířích - zejména pak otázka, kde leží křivka maximálního smykového namáhání. Dále jsou podstatné klíčové skalní bloky – v našem případě omezené lichoběžníky

Tab.5. Teoretické varianty dalšího možného vývoje tělesa PB vytvořené na základě zjištěných údajů.

Varianty vývoje Pravčické brány	Popis předpokládaného porušování
Varianta 1	Působením nerovnoměrného dlouhodobého pohybu a rozdílného napětí v místě kontaktu s jižním pilířem, spolu se zvětráváním oslabených zón nitra skalního masivu, dojde k porušení trámce podél oslabných zón a šířících se trhlin (viz rizikové partie v místě křížení, progradace osní pukliny T0 či sekundární svislé trhliny v trámci); případně dojde nejdříve k opadu spodní vrstvy trámce v důsledku přípovrchového zvětrávání, což způsobí snížení napjatosti v oblouku a tím se výrazně zvýší se riziko jeho prolomení (zejména v souvislosti s existujícími trhlínami).
Varianta 2	Dojde k definitivnímu celoplošnému oddělení trámce od jižního pilíře , tím vznikne prostor pro kvazi-cyklické mikrodeformace (vzroste tedy amplituda vratných teplotních cyklů), způsobující intenzivní zvětrávání a pomalý odnos materiálu z kontaktní plochy, tím postupně poroste napětí v klenbě vlivem předpokládaného nevratného poklesu trámce v oblasti jižního pilíře; v tomto případě by byla zásadní místa oslabení v ohybu trámce a v místě „srůstu“ trámce se severním pilířem, může však dojít i k vytvoření zcela nové smykové trhliny kdekoli v nejtěsnější části trámce a jeho prolomení /zřícení.
Varianta 3	Dojde k oddělení trojúhelníkového bloku a jeho vypadnutí, pak nebude již pravděpodobně dostatečná opora jižní poloviny trámce; největší napětí vznikne v trámci v místě původního převisu a na opačné straně v místě „srůstu“ se severním pilířem – nejpravděpodobnější je zřícení trámce podél aktivovaných svislých trhlin (nejspíše T5).
Varianta 4	Případná kombinace výše zmiňovaných dílčích procesů a jejich důsledků.

(trojúhelníky) porušení vnitřních partií pilířů a s nimi související hypotéza, jak se projeví případná ztráta podepření na změnu napjatosti konců trámce brány. Navržené varianty stabilitního vývoje brány i další možné variace lze například simulovat s využitím metod numerické analýzy (Ohnishi et al. 1993).

Tab. 6. Plánovaná nadstavba provedeného výzkumu, směřující k vytvoření aktuálního geomechanického modelu a stabilitního vývoje skalní brány.

Nové elementární znalosti	Vnější rámec	Plánovaný výstup	Nadstavba	Aplikace
Základní bloková stavba tělesa	3D model tělesa	Aktuální geomechanický model tělesa	→	Využití pro případný návrh optimálního bezpečnostního a stabilitního opatření
Sekundární trhliny, zóny oslabení a deformace		Numerický výpočet stability		
Litologická stavba a fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin bloků	Geodetické zaměření		Modelace budoucího vývoje	
Hydrodynamický režim				
Kvazi-cyklické pohyby tělesa				
Nevratné dlouhodobé pohyby				

5.2. Otázka sanačních opatření

V souvislosti s nápadnými mikromorfologickými změnami, způsobenými povrchovým zvětráváním pískovce, zazněly v minulosti odborné i laické názory na záchranu tělesa. Ve snaze o zastavení další povrchové destrukce byla navržena různá opatření – omývání povrchu horniny, impregnace speciálními látkami (např. syntetickými pryskyřicemi) či ochranný nátěr celého tělesa brány. Z dosud zjištěných informací i z analogického chování přírodního kamene na památkách, kde byly obdobné postupy využity (např. Příkryl et al. 2004, 2011), je zřejmé, že intenzivní krystalizaci solí v přípořechové zóně skalních stěn by podobné zásahy nevyřešily, naopak spíše stávající situace zhoršily. Probíhající procesy zvětrávání nelze z pohledu dlouhodobého účinku zastavit ani zmírnit přímým zásahem na studované lokalitě. Proces přirozené acidifikace byl na území NPČŠ (v tzv. černém trojúhelníku) umocněn v důsledku antropogenní činnosti a související extrémní imisní zátěže. Desetiletí trvající neutralizace kyselých srážek způsobila extrémní produkci solí a jejich akumulaci v horninovém prostředí. Jedinou účinnou variantou řešení je proto minimalizace či úplně zastavení přísunu kontaminantů z ovzduší, které započalo již v 80. letech minulého století odsířením hnědouhelných elektráren (dle Kopáčka & Veselého (2005) došlo od roku 1985 do roku 2000 ke snížení emisí SO₂ o celých 87%). I přes existující samozesilující zpětné vazby procesů zvětrávání je - dle zjištěných indicií - pravděpodobné, že se v současnosti nacházíme

na počátku období postupného zmírňování jejich účinku (viz obr. 5). Vzhledem k přirozené setrvačnosti přítomnosti solí v hornině však bude, i přes realizovanou radikální redukci zdrojů, působit na PB i dalších podobných skalních útvarech pravděpodobně další roky až desetiletí.

Pozitivním krokem bylo rovněž pasivní opatření, spočívající v uzavření vstupu na oblouk brány v roce 1982, jež se stalo nejenom zásadním krokem k pozastavení intenzivní mechanické eroze na vrcholu trámce, jež by dnes znamenala další úbytek minimálně 8 cm mocné vrstvy (vzhledem k rapidně rostoucí návštěvnosti v posledních letech však pravděpodobně mnohem více), ale i předpokladem, kterým se nepřímo usnadnila obnova přirozené tvorby ochranné opálové krusty. Ta by, při neměnnosti stávajících ochranných podmínek, mohla v budoucnu přirozeným způsobem napomoci k poklesu propustnosti svrchní strany trámce (namísto jiných zásahů typu umělých nátěrů či ochranného zastřešení – např. Kotlík et al. 1997), a tím ke snížení zasakování srážkových i tavných vod, které mají prokázaný vliv nejenom na postupné oslabování infiltračních „kanálů“ v hornině, ale i na probíhající procesy fyzikálního a chemického zvětrávání.

Nezodpovězenou otázkou zůstává, zda v budoucnu přistoupit k sanačním opatřením v případě hrozby zřícení PB či ponechat těleso jeho přirozenému vývoji. Jedním z příkladů nevměšování se do přírodních procesů je NP Arches (v Utahu, USA), kde je možné najít stovky skalních bran v různých fázích jejich geomorfologického vývoje (Graham 2004). V posledních desetiletích byl v této oblasti zaznamenán pád dílčích bloků v důsledku tektonického porušení, gravitačního a smykového namáhání a působení eroze - např. odtržení bloku z brány Skyline Arch v listopadu roku 1940 (Cruikshank & Aydin 1994) či odlomení části pilíře brány Landscape Arch v roce 1991 a 1995 (Wilbur 2004 či The Natural Bridge and Arch Society 2008), dokonce i čerstvá zřícení celých skalních bran (např. Wall Arch - Anonymous 2008). Řada pískovcových skalních bran se zde během následujících několika set let nejspíš podstatně změní nebo zanikne docela. Rozpad některých z nich bude ovšem v dlouhodobém měřítku kompenzován přírodním vznikem jiných podobných útvarů (příloha B). Můžeme si však podobný přístup dovolit v případě největší pískovcové brány v Evropě, která je symbolem NP ČŠ a hlavním turistickým lákadlem zdejšího regionu? Ať už v budoucnu rozhodnou kompetentní osoby spolu s odbornými experty jakkoli, posouzení nutnosti i optimálního způsobu případných konzervačních či sanačních opatření by mělo být provedeno pouze na základě dostatečného množství odborných podkladů a znalosti všech rizikových faktorů.

6. Závěr

Předkládaná dizertační práce shrnuje výsledky komplexně pojatého studia procesů zvětrávání pískovcových hornin spolu s posouzením geodynamického vývoje, stability i potenciálních zdrojů možného ohrožení modelového skalního tělesa - Pravčické brány. Ke studiu bylo využito nedestruktivních metod průzkumu a údajů získaných dlouhodobým systematickým sledováním vybraných jevů buď přímo v zájmové lokalitě či jejím blízkém okolí. Práce obsahuje výsledky sledování deformačního chování skalní brány – relativních pohybů a jejího teplotního rozpínání, průzkumu s využitím geofyzikálních metod (aplikovaných rovněž jako nový způsob hodnocení dlouhodobých negativních změn v horninovém masivu), geochemického studia procesů zvětrávání v širším pojetí (včetně vstupů a mezifází), a rovněž souběžného sledování změn vnějších, převážně klimatických faktorů. Při syntéze a interpretaci dat bylo využito moderních (i zcela nových) metod hodnocení, včetně poznatků nelineární dynamiky komplexních systémů a modelace procesů ve dvojrozměrném zobrazení.

V prvé řadě byly upřesněny znalosti o vnitřní stavbě tělesa brány, o kinematice vratných i nevratných pohybů (a posouzena jejich závislost na expozici a mikroklimatických podmínkách) a rozmístění partií postižených zvětráváním, včetně posouzení nárůstu míry zvětrávání v čase. V rámci studia byla získána data, objasňující časový a hloubkový průběh teplot uvnitř skalního masivu a stanoven lokální hydrodynamický režim. Byla objevena nová stabilitní rizika souvisejí s intenzivním tektonickým postižením skalního masivu a uplatněním epizodických zvodní. Na tělese PB byl tak prokázán dosud neuvažovaný způsob selektivního zvětrávání, způsobující nejenom poškození přípovrchových partií, ale i oslabení pevnosti vnitřních partií masivu se zásadním vlivem na celkovou stabilitu objektu.

Ze získaných informací byl následně vytvořen aktualizovaný strukturně-deformační model tělesa PB (včetně popisu zjištěných způsobů porušování a posouzení míry uplatnění jednotlivých procesů a vlivů), který by měl být základním podkladem pro navazující geomechanické modelování stability brány i jejího dalšího vývoje. V budoucnu by měla být pozornost věnována zejména průběhu podélné trhliny v trámci brány, dále geometrii trámce ve skrytých místech se zvláštní pozorností na charakter jeho kontaktu s údolním pilířem, i prostorovému rozložení pevnosti pískovců jako indikátoru rozdělení napjatosti.

Výsledky disertační práce napomohly k pochopení složitosti systému porušování pískovcových skalních objektů a přispěly k obecným vědomostem o závislostech vývoje skalních bran v pískovcových horninách. Rigorosně definované jevy a pojmy umožňují

efektivně zodpovědět otázky, tvořící samý základ ochranné práce a snížit tak možnost vzniku rozsáhlých škod způsobených zdánlivě malým, dobře míněným, avšak v komplexních dynamických souvislostech neposouzeným lidským zásahem. Získané znalosti se tak stanou nejenom nezbytným podkladem pro plán péče a k plánování nejvhodnějších způsobů stabilitně-bezpečnostních opatření ve studované lokalitě. Bude jich navíc možné využít i pro podobná maloplošná chráněná území, zpracování koncepce praktické ochrany pískovcového reliéfu studovaného regionu (a potažmo i v rámci širší oblasti skalních měst ČKP).

7. Seznam literatury

- Adamovič J., Kidston J. (2007): *Sandstones and their attributes*. – In: Härtel H., Cílek V., Herben T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*. Academia, Praha, 13-24.
- Adamovič, J., Mikuláš, R., Cílek, V. (2010): *Atlas pískovcových skalních měst České a slovenské republiky*. Academia, Praha, 460 s.
- Alexandrowicz Z., Urban J. (2005): *Sandstone regions of Poland – geomorphological types, scientific important and problems of protection*. Mus. Natur., Luxembourg, Ferrantia, 44: 131-136.
- Anonymous (2008): *Sandstone arch collapses in national park in Utah*. New York Times. Databáze online [cit. 2011-02-15]: http://www.nytimes.com/2008/08/10/world/americas/10iht-arches.5.15150301.html?_r=1
- Anonymous (2010): *Výroční zpráva za rok 2010. – Monitoring geodynamických jevů s využitím automatického systému kontrolního sledování pohybů pískovcových skalních masivů s dálkovým přenosem dat*. MS, i-Development, Děčín, 28 s.
- Arnold A., Zehndler K. (1990): *Salt weathering on monuments*. Advanced Workshop. analytical methodologies for investigations of damage stones. Pavia, Italy, 58 s.
- Bai Y., Thomson G.E., Martinez-Ramirez S., Brüeggerhoff S. (2003): *Mineralogical study of salt crusts formed on historic building stones*. The Science of Total Environment, 302, 247-251.
- Bak P. (1996): *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. Springer Verlag, New York.
- Baker V.R., Pickup G. (1987): *Flood geomorphology of the Katherine Gorge, Northern Territory, Australia*. Geol. Soc. America Bull., v. 98, 635-646.
- Balatka B., Sládek J. (1984): *Typizace reliéfu kvádrových pískovců české křídové pánve*. Rozpravy ČSAV, ř. MPV, 94, 6, Praha, 1–80.
- Barnes F.A. (1987): *Canyon Country Arches and Bridges*, self-published.
- Beauvais A., Ritz M., Parisot J.C., Bantsima C., Dukhan M. (2004): *Combined ERT and GPR methods for investigation two-stepped lateritic weathering systems*. Geoderma, 199, 121-132.
- Beneš V. (2008): *Geofyzikální průzkum stavu horninového masivu Pravčické brány*. - Technická zpráva o geofyzikálním průzkumu. MS, G IMPULS Praha, 15 s. (11 s. příloh).

- Beyer O. (1911): *Alaun und Gips als Mineralneubildungen und als Ursachen der chemischen Verwitterung in den Quadersandstein des sächsischen Kreidegebiets*. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft (Journal of the German Geological Society), 63, 429-467.
- Blair R.W. Jr. (1984): *Development of natural sandstone arches in southeastern Utah*. Australian and New Zeland Geomorphology Group Second Conference, Broken Hill 1984, 7-12.
- Blair R.W. Jr. (1987): *Development of natural sandstone arches in southeastern Utah*. – In: Gardiner V. (ed): *International Geomorphology*, 1986, University of Manchester, 597-604.
- Blair R.W. Jr., Mann J.N., McFee C., Rothwell G.A., Thenhaus L.M., Thenhaus P.C., Wyant C. (1975): *Origin and classification of natural arches in southern Utah*. – In: Fassett J. (ed.): *Canyonlands Country: Four Corners Geological Society Guidebook 8th Field Conference*, 81-86.
- Blažková M. (1986): *Pravčická brána*. Inventarizační geologický průzkum chráněného přírodního výtvaru. MS, CHKO Labské pískovce, Děčín, 8 s.
- Brček M. (2010): *Vplyv teplotných cyklov na zvetrávanie hornín*. MS, Disertačná práca, Katedra inžinierskej geológie, Universita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta. 105 s.
- Breiter K. (1976): *Výskyt sulfátů na kvádrových pískovcích svrchní křídly v severních Čechách*. Sborník Severočeského Musea Ser. Natur., 8, 99–107.
- Bruthans J., Schweigstillová J. (2009): *Hliníkem bohaté vody z nenasycené zóny pískovců: atmosférickou depozicí nejvíce acidifikované prostředí v ČR?* Sborník 1. Národního inženýrskogeologického kongresu, Esmedia DTP s.r.o., Ostrava, 4 s.
- Buzek F. (1995): *Identifikace zdrojů a popis mechanismů tvorby sulfátových krust na povrchu historických objektů pomocí stabilních izotopů síry a kyslíku*. Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR 203/94/0624, ČGÚ Praha, 15 s.
- Buzek F., Černý J., Šrámek J. (1991): *Sulphur isotope studies of atmospheric S and corrosion of monuments in Prague. Czechoslovakia*. – In: H.R. Krouse & V.A. Grinenko (eds.): *Stable isotopes, natural and anthropogenic sulphur in the environment*. SCOPE 43, J.Wiley & Sons, Chichester, 399-405.
- Capra F. (2002): *The Hidden Connections: Integrating The Biological, Cognitive, And Social Dimensions Of Life Into A Science Of Sustainability*. Doubleday, New York, 292 s.
- Capra F. (2004): *Tkáň života. Nová syntéza mysli a hmoty*. Academia. Praha, 290 s.

- Čech S., Klein V., Kříž J., Valečka J. (1980): *Revision of the Upper Cretaceous stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin*. Věstník ÚÚG, 55, 277-296.
- Cílek V. (1997): *Fullereny i na Pravčické bráně? O různých stopách po úderu blesku*. Vesmír, 76, 628, 1997/11.
- Cílek V. (1998a): *Fyzikálně-chemické procesy vzniku pískovcového pseudokrasu*. – In: V. Cílek & J. Kopecký (eds.): *Pískovcový fenomén: Klima, život a reliéf*. Knihovna České speleologické spol., svazek 32. Praha - Broumov, 134-153.
- Cílek V. (1998b): *Sandstone phenomenon: antagonism between surface hardening and salt weathering*. – In: Sulovský P., Zeman J. (eds.): ENVIWEATH 96, Environmental Aspects of Weathering Processes, Masarykova univ. Brno, 33-38.
- Cílek V., Langrová A. (1994): *Skalní kůry a solné zvětrávání v CHKO Labské pískovce*. Ochrana přírody 49 (8), 227-231.
- Cílek V., Baroň I., Langrová A. (2003): *Skalní kůry a povlakové minerály pískovců magurského flyše na Vsetínsku*. Geol. výzk. Mor. Slez., 2002, Brno, 22-24.
- Cílek V., Williams R., Osborne A., Migoň P., Mikuláš R. (2007): *The origin and development of sandstone landforms*. – In: Härtel H., Cílek V., Herben T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*. Academia, Praha, 34-43.
- Cílek V., Vařilová Z., Adamovič J. (2010): *Pravčická brána: zrozená z písku*. – In: Vařilová, Z., Belisová N. (eds.): *Pravčická brána - Velká kniha o velké bráně*, Academia, Praha, 37-58.
- Clark M.J., Small J.R. (1982): *Slopes and Weathering*. Cambridge University Press, Cambridge, England, 112 s.
- Cruikshank K.M., Aydin A. (1994): *Role of fracture localization in arch formation, Arches National Park, Utah*. GSA Bulletin; July 1994; v. 106; no. 7, 879-891.
- Csaplovics E. (2007): *Digital terrain models of the sandstone landscapes in the Sächsische Schweiz (Saxon Switzerland) National Park and their value for conservation and ecological monitoring (Germany)*. - In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*: Academia, Praha, 61-65.
- Čech S., Klein V., Kříž J., Valečka J. (1980): *Revision of the Upper Cretaceous stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin*. Věstník ÚÚG, 55, 277-296.
- Debossens G. (2007): *The Natural Arches of Tassili National Park, Tassili N'Ajjer, Algeria*. Databáze online [cit. 2011-05-20]: <http://www.naturalarches.org/tassili/index.htm>
- Doelling H.H. (1985): *Geologic map of Arches National Park and vicinity, Grand County, Utah*: Utah Geological and Mineral Survey Map 74, scale 1:50 000, 15 s.

- Doelling H.H. (2000): *Geology of Arches National Park, Grand County, Utah*. – In: Sprinkel D.A., Chidsey, T.C. Jr., Anderson P.B. (eds.): *Geology of Utah's Parks and Monuments*, Utah Geological Association Publication 28, 11-36.
- Farsani N.T., Coelho C., Costa C. (2011): *Geotourism and Geoparks as Novel Strategies for Socio-economic Development in Rural Areas*. *Int. J. Tourism Res.* 13, 68-81.
- Fottová D. (1995): *Regional evaluation of mass element fluxes: GEOMON network of small catchments*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 34, 215-221.
- Friml V. (1994): *Plán péče na období 1995–2004, Pravčická brána*. MS, CHKO Labské pískovce, Děčín, 1-3.
- Frolka J., Hubatka, F., Kuda F. (2009): *Geologická stavba, Pravčická brána - Dipólové elektromagnetické profilování (technická zpráva)*. MS, KOLEJ CONSULT & servis, Brno. 12 s.
- Gerber E., Scheidegger, A.E. (1969): *Stress-induced weathering of rock masses*. *Eclog. Geol. Helv.* 62, 401-416.
- Gerber E., Scheidegger A.E. (1973): *Erosional and stress-induced features in steep slopes*. *Z. Geomorphol. Suppl.* 18, 38–49.
- Giani G.P. (1992): *Rock slope stability analysis*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1992. 361 s.
- Glamheden R., Lindblom U. (2002): *Thermal and mechanical behaviour of refrigerated caverns in hard rock*. *Tunnelling and Underground space Technology*, 17, 341-353.
- Glöckner P. (1995): *Fyzickogeografické a geologické poměry okresu Děčín*. *Vlastivěda okresu děčínského, ř. Příroda. Děčín.* 194 s.
- Goodman R.E. (1980): *Introduction to rock mechanics*. John Wiley&Sons, New York, 561 s.
- Goudie A., Viles H.A. (1997): *Salt weathering hazards*. John Wiley&Sons, Chichester, 235 s.
- Graham J. (2004): *Arches National Park, Geologic Resource Evaluation Report*. - In: Convington S., Norby L. (eds.), NPS D-197, Geologic Resources Division, National Park Service, 2004. Databáze online [cit. 2011-05-20]:
http://www.nature.nps.gov/geology/inventory/publications/reports/arch_gre_rpt_print.pdf
- Gregory H.E. (1938): *The San Juan Country, A Geog. and Geol. reconnaissance of south eastern Utah*. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 188, 9.
- Gregory, H.E. (1950): *Geology and Geography of the Zion Park Region Utah and Arizona*. Geological Survey professional paper, 220, 1-110.
- Gruntorád J., Marek F., Mareš S., Matolín M., Skopec J. (1985): *Principy metod užitých geofyziky*. SNTL Praha, Alfa Bratislava, s. 124.

- Häfner F., Böhler W. (1987): *Der Teufelstisch bei Hinterweidenthal. Ein Beitrag zu seiner Geologie, Morphologie, Verwitterung and Standsicherheit*. Mainzer geowiss.Mitt., 16, 21 Abb, Mainz, 67-90.
- Hall K., Hall A. (1991): *Thermal Gradients and Rock Weathering at Low Temperatures: Some Simulation Data*. Permafrost and Periglacial Processes, 2, 103-112.
- Hall K., Lindgren S.B., Jackson P. (2005): *Rock albedo and monitoring of thermal conditions in respect of weathering: some expected and some unexpected results*. Earth Surf. Processes and Landforms, 30, 801-811.
- Hall K., Meiklejohn I., Arocena J.(2007): *The Thermal Responses of Rock Art Pigments: Implications for Rock Art Weathering in Southern Africa*. Geomorphology, 91, 132-145.
- Harris A.G., Tuttle E., Sherwood D. (1997): *Geology of National Parks*. 5th edition, Kenkall/Hunt Publishing Company, 80-91.
- Härtel H., Adamovič J., Mikuláš R. (2007): *Central overview of evropan sandstone landscapes*. – In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*, Academia, Praha, 321-324.
- Hawkins A.B., McConnell B.J. (1992): *Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content*. Quarterly Journal of Engineering Geology 25, 115-130.
- Heyman J. (1982): *The Masonry Arch*. Chichester, Ellis Harwood.
- Hoek E., Bray J.W. (1974): *Rock Slope Engineering*. 1st ed., Institute of Mining and Metallurgy, London, 353 s.
- Hoek E., Brown E.T. (1980): *Underground Excavations in Rocks*. Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Hoerlé S. (2006): *Rock temperature as an indicator of weathering processes affecting rock art*. Journal of Earth Processes and Landforms, 31, 383-389.
- Holeček J. (2004): *Zvětrávací procesy sedimentárních hornin východočeské křídý*. MS, Diplomová práce ÚGMNZ, PřFUK, 62 s.
- Holtedahl H. (1960): *Mountain, fiord, strandflat: geomorphology and general geology of parts of Western Norway*. Guide to excursions, 46 and C3. Int. Gcol. Congr.
- Hostýnek J. (2010): *Klimatologická studie. – Studie klimatických poměrů lokality Tokaň (období 2009/11 – 2010/10 a celkové zhodnocení). Část I (Text)*. MS, ČHMÚ, Plzeň. 7 s.
- Charola A.E. (2000): *Salts in the deterioration of porous materials: An overview*. Journal of the American Institute for Conservation, Vol. 39, no. 3, 327-343.
- Chigira M. (1992): *Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep*. Engineering Geology, 32, 3, 157-184.

- Jánová V., Liščák P. (2002): *Monitorovanie procesov zvetrávania*. Geologické práce, Správy 106, Štátny geologický ústav D.Štúra, Bratislava, 53-60.
- Jenkins K.A., Smith B.J. (1990): *Daytime rock surface temperature variability and its implications for mechanical rock weathering: Tenerife, Canary Islands*. Catena 17, 449-459.
- Ježný M., Vlčko J., Hvožd'ara M. (2007): *Teplota ako faktor štruktúrneho oslabenia horninových masívov*. Geotechnika, 10, 3, 8-15.
- Johannesen C.L., Feiereisen J.J., Wells A.K., (1982): *Weathering of ocean cliffs by salt expansion in mid-latitude coastal environment*. ShoreBeach, 50, 26-34.
- Kalkani E.C. (1981): *Comparison of zero-stress contours to surface erosion for excavated slopes in stratified rock*. Engineering Geology, 17, 1-2, March 1981, 55-60.
- Kalvoda J. Zvelebil J. (1983): *Dynamika a typy porušování svahů při vývoji údolí Labe v Děčínské vrchovině*. Acta Montana, 63, Praha, 5-73.
- Kerr A., Smith B.J., Whaley W.B., McGreevy J.P. (1984): *Rock temperatures from south-east Morocco and their significance for experimental rock weathering studies*. Geology 12, 306-309.
- Kliche Ch.A. (1999): *Rock Slope Stability*. Society for Mining, Metalurgy, and Exploration, Inc., USA.
- Kobr M. et al. (1997): *Petrofyzika*. Karolinum, Praha, 134 s.
- Kopáček J., Veselý J. (2005): *Sulfur and nitrogen emissions in the Czech Republic and Slovakia from 1850 till 2000*. Atmospheric Environment, 39, 2179-88.
- Košťák B., Zvelebil J., Stemberk J., Novotný J. (1993): *Stabilita Pravčické brány. Inženýrskogeologický výzkum a kontrolní sledování, dílčí zpráva I.etapy*. MS, Ústav geotechniky AVČR, Praha. 6 s.
- Kotlík P., Bayer K., Heidingsfeld V., Kaše J., Váňa J., Vaněček I., Weber J. (1997): *The Sandstone Sculptures by M.B.Braun in Betlém near Kuks*. Enviweath 96, Environmental Aspects of Weathering Processes, Brno 1998, 128-140.
- Krippel Y. (2005): *Is the conservation of the natural and cultural heritage of sandstone landscapes guaranteed? Case study of the Petite Suisse area in Luxembourg*. Mus. Natur., Luxembourg, Ferrantia, 44, 147-152.
- Kroová H., Gruntorád J., Karous M. (1999): *Možnosti použití geofyzikálních metod při ověřování nejasných strukturně geologických, popř. jiných vztahů na lokalitách při průzkumu a nápravě starých ekologických zátěží*. Edice Planeta '99, roč. VII, 1/99. MŽP ČR, Odbor ekologických škod, Praha, 38 s.

- Kropáčková D. (1988): *Petrologické studium křemenných pískovců z údolí labe severně od Děčína*. MS, Diplomová práce, PřF UK Praha, 93 s.
- Kulič V. (1982): *Úloha litologie ve stabilitních poměrech pískovců labského kaňonu mezi Děčínem a Hřenskem*. MS, SVOČ, Kat. hydrogeol. a inž.geol. PřF UK. Praha.
- Landová B. (2009): *Ochrana pískovcových krajín: střední Evropa v porovnání se světem*. MS, Bakalářská práce, Ústav pro životní prostředí PřF UK Praha, 44 s.
- Ložek V. (2006): *Pískovcový ekofenomen Českého ráje*. - In: Jenč P., Šoltysová L. (eds.): *Pískovcový fenomen Českého ráje*. ZO ČSOP Křižánky, Správa CHKO Český ráj, Turnov, 11-16.
- Margottini C. (2007): *Engineering Geology and Cultural Heritage: the Conservation of Remaining Bamiyan Buddhas (Central Afghanistan)*. – In: Sassa K., Fukuoka H., Wang F., Wang G. (eds.): *Progress in Landslide Science*, Springer, 319-346.
- Margottini C. (2009): *Recovery of the Buddha's Niches and Cliff in Bamiyan (Central Afghanistan) after the Taliban Destruction of 2001*. – In: Sassa K., Canuti P. (eds): *Landslides – disaster Risk Reduction*, Springer, 191-210.
- Marková I., Vařilová Z., Trýzna M. (2007): *Zásady péče o přirozené nelesní ekosystémy*. – In: Härtel, Šteflová, Drozd (eds): *Plán péče o Národní park České Švýcarsko 2006-2016*, MS Správa NP České Švýcarsko, Krásná Lípa, 89-93.
- Martini G., Zouros N. (2001): *European Geoparks: Geological Heritage & European Identity – Cooperation for a Common Future*. – In: Frey M.L. (ed): *European Geoparks Magazine*. Issue 1 (2001), 4.
- Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. (2007): *Recurrence plots for the analysis of complex systems*. *Physical Reports*, 438 (5-6), 273-329.
- Matouš J., Pícha B. (2005): *Metoda odporové tomografie a odporového profilování při vyhledávání puklinových zvodní*. Přednáška na XII. národním hydrogeologickém kongresu v Českých Budějovicích 19.-22. září 2005: Databáze online [cit. 2011-02-05]: http://www.geolog.cz/odborne_clanky/matous-picha.htm
- Matsuoka N. (1994): *Diurnal freeze-thaw depth in rockwalls: Field measurements and theoretical considerations*. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 19, 423-435.
- Matsukura Y., Takahashi K. (1999): *A New Technique for Rapid and Non-destructive Measurement of Rock Surface Moisture Content; Preliminary application to Weathering Studies of Sandstone Blocks*. *Engineering Geology*, 55, 113-120.

- McGreevy J.P. (1985): *Thermal properties as control on rock surface temperature maxima and possible implications for rock weathering*. Earth Surf. Processes and Landforms, 10, 125-136.
- McGreevy J.P., Smith B.J., McAlister J.J. (1983): *Stone decay in an urban environment, examples from south Belfast*. Ulster J. Archaeol., 167-171.
- McKeever P., Zouros N., Patzak M. (2010): *The UNESCO global network of national geopark*. In Geotourism: The tourism of geology and landscape, Newsome D., Dowling R. (eds). Good Fellow Publishers: Oxford; 225.
- McKinley J.M., Curran J.M., Turkington A.V. (2001): *Gypsum formation in non-calcareous building sandstone: a case study of Scrabo sandstone*. Earth Surf. Processes and Landforms, 26 (8), 869-875.
- McNally G., McQueen L. (2000): *The geomechanical properties of sandstone and what they mean*. Sandstone City, Monograph No 5. Environmental, Engineering and Hydrogeology Specialist Group, Geological Society of Australia.
- Melounová L. (2006): *Solné zvětrávání svrchnokřídových pískovců Křídelních stěn (NP České Švýcarsko)*. – MS, Diplomová práce, PřF UK Praha, 48 s.
- Mikuláš R. (2007): *Microforms of the sandstone relief*. – In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson A., Williams R. (eds.): Sandstone Landscapes, Academia, Praha, 66-75.
- Mikuláš R., Adamovič J., Härtel H., Benda P., Trýzna M., Kučerová L. (2007): *Elbe Sandstones (Czech Republic/Germany)*. – In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson A., Williams R. (eds.): Sandstone Landscapes, Academia, Praha, 66-75.
- Mol L., Viles H.A. (2010): *Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: Implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa*. Geomorphology 118 (3-4), 280-287.
- Molaro J.L., McKay C.P. (2010): *Processes controlling rapid temperature variations on rock surfaces*. - Earth Surf. Processes and Landforms, vol. 35, 5, 501-507.
- Muller G. (2007): *What is a Process?* Databáze online [cit. 2011-04-20]: <http://www.gaudisite.nl/WhatIsAProcessPaper.pdf>
- Naghadehi M.Z., KhaloKakaie, R., Torabi, S.R. (2010): *The influence of moisture on sandstone properties in Iran*. Proc. of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, vol. 163, Issue 2, 91-99.
- Ohnishi Y., Katsuhiko A., Nakagawa M. (1993): *Stability Analysis of a Natural Rock Arch*. – In: Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering (International

- Symposium, Istanbul, April 1993), A. G. Pasamehmetoglu et al., Ed. Rotterdam: Balkema, 537-542.
- Patzelt Z. (2007): *Groundwater chemistry of the Bohemian Switzerland National Park (Czech Republic)*. – In: Härtel H., Cílek V., Herben T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*. Academia, Praha, 93-96.
- Pauli J., Holoušová T. (1991): *Mechanika hornin - Laboratorní zkoušky hornin*. ČVUT, Fakulta stavební, Ediční středisko ČVUT, Praha, 123 s.
- Petrů M. (2008): *Fieldwork – aridní geomorfologie Jihozápadu USA*. MS, Diplomová práce, Masarykova universita v Brně, Pedagogická fakulta, katedra geografie. 131 s.
- Phillips J.D. (1999): *Earth Surface Systems. Complexity, Order, and Scale*. Blackwell, Oxford, 2-32.
- Phillips J.D. (2005): *Weathering instability and landscape evolution*. Elsevier Publishing and Geomorphology Special Issue 67(1-2), 255-272.
- Příkryl R. (2005): *Petrografický rozbor hornin ze stěn kaple sv. Máří Magdaleny v chrámu sv. Víta na Pražském hradě*. MS, Nepubl. výzkumná zpráva pro kancelář presidenta republiky, odbor památkové péče, Praha, 19 s.
- Příkryl R. (2006): *Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitation and possible source of misintepretations*. *Engineering Geology*, 87, 149-162.
- Příkryl R., Zvelebil J., Engel Z. (2001): *Pravčická brána Rock Arch*. – In: Příkryl R. (ed.): *Excursion Guide to the International Conference Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network (SWAPNET 2001)*, Inst. Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Faculty of Science, Charles University, Prague, 35-36.
- Příkryl R., Svobodová J., Žák K., Hradil D. (2004): *Anthropogenic origin of salt crusts on sandstone sculptures of Prague's Charles Bridge (Czech Republic): Evidence of mineralogy and stable isotope geochemistry*. *European Journal of Mineralogy* 16(4), 609-617.
- Příkryl R., Novotná M., Příkrylová J., Weishauptová Z., Šťastná A. (2011): *Modern repairs of facing masonry of the Charles bridge in Prague and their effect on its long-term stability*. *Environmental Earth Science* doi: 10.1007/s12665-010-0819-5
- Riebe H., Härtel H., Bauer P., Benda P. (1999): *Přírodní poměry Českosaského Švýcarska*. Nationalpark Sächsische Schweiz, Bad Schandau, 3, 20-57.

- Rodriguez-Navarro C., Doehne E. (1998): *Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern*. Earth Surf. Processes and Landforms, 24 (3), 191-209.
- Rögner K. (1988): *Measurements of cavernous weathering at Machtesh Hagadol (Negev, Israel) a semiquantitative study*. Catena, Suppl.12, 67-76.
- Ruedrich J., Siegesmund S. (2007): *Salt and ice crystallization in porous sandstones*. Environ. Geol., 52, 2, 225-249.
- Rubín J., Balatka B. et al. (1986): *Atlas skalních, zemních a půdních tvarů*. 1. vyd. Academia, Praha, 388 s.
- Saad A., Guedon S., Martineau F. (2010): *Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters*. Comptes Rendus Geoscience, vol. 342, Issue 3, 197-203.
- Sadílková K. (2003): *Zvětrávání klastických sedimentárních hornin terciéru karpatské soustavy (východní okraj České republiky)*. MS, Diplomová práce, PřF UK Praha, 52 s.
- Sancho C., Fort R., Belmonte A. (2003): *Weathering rates of historic sandstone structures in semiarid environments (Ebro Basin, NE Spain)*. Catena, vol. 53, Issue: 1, 53-64.
- Sass O. (2005): *Rock Moisture Measurements: Techniques, Results, and Implications for Weathering*. Earth Surface Processes and Landforms, 30, 359-374.
- Sass O., Viles H. A. (2006): *How Wet are These Walls? Testing a Novel Technique for Measuring Moisture in Ruined Walls*. Journal of Cultural Heritage, 7(4), 257-263.
- Shalizi C.R. (2006): *Methods and Techniques of Complex Systems Science: An Overview*. – Complex Systems Science in Biomedicine, Topics in Biomedical Engineering International Book Series, 2006, Part II, 33-114.
- Schaffer R.J. (1932): *The Weathering of Natural Building Stones*. Garston (reprinted 1972), 149 s.
- Schweigstilllová J. (2008): *Mechanismus vzniku síranových výkvětů na pískovcích České křídové pánve*. – MS, Disertační práce, PřF UK Praha, 92 s.
- Schweigstilllová J., Hradil (2007): *Salt formation on the Cretaceous sandstones in the North and Northwest Bohemia (Czech Republic)*. – In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*, Academia, Praha. 76-79.
- Schweigstilllová J., Přikryl R., Novotná M. (2009): *Isotopic composition of salt efflorescence from the sandstone castellated rocks of the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic)*. Environmental Geology, 58, 217-225.

- Siedel H., Klemm W. (2000): *Evaluation of the environmental influence on sulphate salt formation at monuments in Dresden (Germany) by sulphur isotope measurements*. Proceedings of 9th International Congress on deterioration and Conservation of Stone, Venice (Italy), 401-409.
- Siedel H., Klemm W. (2001): *Sulphate salt efflorescence at the surface of sandstone monuments and at the sandstone bedrock in outcrops - natural or anthropogenic reasons?* Geologica Saxonica, 46/47, 203-208.
- Sitenský L. (1994): *Skalní brány v Čechách*. Nakl. Dita, Praha. 230 s.
- Sivakumar B (2004): *Chaos theory in geophysics: past, present and future*. Chaos, Solitrons and Fractals, 19 (2), Pergamon Press, 441-462.
- Skoček V., Valečka J. (1983): *Paleogeography of the Late Cretaceous Quadersandstein of Central Europe*. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecol., 44, 71-92.
- Škopek J., Ťavoda O., Drozd K. (1986): *Mechanika hornin I.* – PřF UK, Státní pedagogické nakl., Praha. 242 s.
- Skřivánek F. (1982): *CHPV Pravčická brána, prošetření stability*. MS, SÚPP a OP Praha – dopis č.j. 1430/82 adresovaný Správě CHKO Labské pískovce, (archivní kniha NPP PB), Děčín, 3 s.
- Skřivánek F., Vulterin Z. (1977): *CHPV Pravčická brána, prošetření stability*. MS, SÚPP a OP Praha – dopis č.j. 4291/77 adresovaný Správě CHKO Labské pískovce, (archivní kniha NPP PB), Děčín, 2 s.
- Smith B.J. (1996): *Scale problems in the interpretation of urban stone decay*. In: Smith BJ, Warke PA (eds): *Processes of Urban Stone Decay*. Donhead Publishing Ltd., London, 3-18.
- Sornette D., Johansen A. (1998): *A hierarchic model of financial crashes*. Physica, A 261, 581-598. oc. XIX, 391-406.
- Soukupová J., Hradil D., Přikryl R. (2002): *Chemical weathering of sandstone matrix – controls and case studies*. In: Přikryl R., Viles H.A. (eds.): *Understanding and managing stone decay*, SWAPNET 2001. Karolinum, Praha, 263-271.
- Stead D., Eberhardt E., Coggan J., Benko B. (2001): *Advanced Numerical Techniques in Rock Slope Stability Analysis*. Landslides, Davos, Switzerland.
- Stemberk J. (1993): *Dokumenace Pravčické brány s ohledem na její stabilitní poměry. Posudek vypracovaný na základě požadavku Českého ústavu ochrany přírody v Praze*. MS, CHKO Labské Pískovce, Děčín. 10 s.

- Stemberk J., Košťák B., Zvelebil J. (1993): *Stabilita Pravčické brány. Inženýrskogeologický výzkum a kontrolní sledování, dílčí zpráva I.etapy*. MS, Ústav geotechniky AVČR, Praha.
- Stemberk J., Košťák B., Zvelebil J. (1994): *Kontrolní sledování stability Pravčické brány. Etapa II*. MS pro ČÚOP Praha, ÚSMH AV ČR, Praha.
- Stemberk J., Košťák B., Zvelebil J. (1995): *Kontrolní sledování stability NPP Pravčická brána. Etapa III*. MS pro ČÚOP Praha, ÚSMH AV ČR. Praha. MS pro Správu CHKO, Praha, ÚSMH AV ČR. Praha.
- Stevens D.J., McCarrick J.E. (1988): *The Arches of Arches National Park*, self-published.
- Summer P.D., Loubser M.J. (2008): *Experimental Sandstone weathering using different wetting and drying Moisture Amplitudes*. Earth Surf. Processes and Landforms, 33(6), 985-990.
- Svoboda M. (2002): *Znalecký posudek č. 76/02 o geologickém průzkumu georadarem pro zjištění nehomogenit. Lokalita: Skalní most - Pravčická brána u Hřenska*. MS, Geodyn s.r.o., Praha, 12 s.
- The Natural Arch and Bridge Society: Databáze online [cit. 2011-04-20]: <http://www.naturalarches.org/archinfo/classification.htm>
- Terzaghi K. (1962): *Stability of steep slopes on hard unweathered rock*. Geotechnique. Vol. 12, No. 4, 251-270.
- Thomachot C., Jeannette D. (2002): *Evolution of the petrophysical properties of two types of Alsatian sandstone subjected to simulated freeze-thaw conditions*. In: Siegesmund S., Weiss T., Vollbrecht A. (eds): *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Geological Society, London, Special Publications 205,19-32.
- Tolasz R., Míková T., Valeriánová A., Voženílek V. (2007): *Climate Atlas of the Czech Republic*. Czech Hydrometeorological Institute, Prague & University Olomouc, 255 s.
- Turkington A.V., Smith B.J. (2000): *Observation of three-dimensional salt distribution in building sandstone*. Earth Surf. Processes and Landforms, 25(12), 1317-1332.
- Turkington A.V., Martin E., Viles H.A., Smith B.J. (2003): *Surface change and decay of sandstone samples exposed to a polluted urban atmosphere over a six-year period: Belfast, Northern Ireland*. Building and Environment & Pergamon, 38, 1205-1216.
- Turkington A.V., Phillips J.D. (2004): *Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization*. Earth Surf Process Landforms, 29, 665-675.
- Turkington A.V., Paradise T.R. (2005): *Sandstone weathering: a century of research and innovation*. Geomorphology 67(1-2), 229-253.

- Uličný D., Laurin J., Čech P. (2009): *Controls on clastic sequence geometries in a shallow-marine, transtensional basin: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic*. *Sedimentology*, 56, No. 4, 1077-1114.
- Urban D.L. (2005): *Morphotectonics*. *Ecology*, 86(8), 2005, 1996–2006.
- Valečka J. (1989): *Sedimentology, stratigraphy and cyclicity of the Jizera Formation (Middle-Upper Turonian) in the Děčín area (N Bohemia)*. *Věst. Ústř. Úst. geol.*, 64, 2, Praha, 77-90.
- Valečka J. (ed.) (1997): *České Švýcarsko. Geologická a přírodovědná mapa 1 : 25 000*. ČGÚ, Praha.
- Vařilová Z. (2002a): *A Review of Selected Sandstone Weathering Forms in the Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic*. – In: Prikryl, R. Viles, H.A. (eds.): *Understanding and managing of stone decay*, The Karolinum Press, Prague, 233-242.
- Vařilová, Z. (2002b): *Proželeznění v pískovcích v Národním parku České Švýcarsko* - In: Adamovič, J., Cílek, V. (eds.): *Železivec*. Pseudokrasový sborník, sv.2., 37, Knihovna ČSS, Praha, 53-56.
- Vařilová Z. (2002c): *České Švýcarsko*. In: Adamovič, J. Cílek, V. (eds.): *Pseudokrasový Sborník*, Knihovna ČSS, Praha, 73-95.
- Vařilová Z. (2007): *Occurrences of Fe-mineralization in sandstones of the Bohemian Switzerland National Park (Czech Republic)*. – In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone Landscapes*, Academia, Praha, 25-33.
- Vařilová, Z. (2010a): *Pravčická brána: poklad nejcennější*. – In: Vařilová, Z., Belisová N. (eds.): *Pravčická brána - Velká kniha o velké bráně*, Academia, Praha, 59-84.
- Vařilová Z. (2010b): *Pravčická brána: symbol národního parku*. – In: Vařilová, Z., Belisová N. (eds.): *Pravčická brána - Velká kniha o velké bráně*, Academia, Praha, 23-36.
- Vařilová Z., Šteflová D., Härtel H., Marková I., Trýzna M., Mauricová J., Holešinský O., Votápek A., Marek J., Belisová N. (2005): *Plán péče o Národní přírodní památku Pravčická brána na období 2005–2014*. MS, Správa NP České Švýcarsko, Krásná Lípa, 22 s. (14 s. příloh).
- Vařilová Z., Zvelebil J. (2007): *Kontrolní sledování na skalním svahu nad prodejnou Duty Free-shop Unimex, závěrečná zpráva za období červenec 2005 - červenec 2007*. MS, Správa NP České Švýcarsko, 8 s. (47 příloh).
- Vásárhelyi B., Ván P. (2006): *Influence of Water Content on the Strength of Rock*. *Engineering Geology*, 84, 70-74.
- Viles H. (2001): *Scale issues in weathering studies*. *Geomorphology*, 41, 63-72.

- Viles H. (2005): *Can stone decay be chaotic?* Geological Society of America, Special Paper 390, 11-16.
- Vilímek V., Zvelebil J., Klimeš J., Vlčko J., Astete F.V. (2005): *Geomorphological investigations at Machu Picchu, Peru*. In: Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., Wang, G. (eds): *Landslides - Risk analysis and sustainable disaster management*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 49-54.
- Vilímek V., Zvelebil J., Klimeš J., Patzelt Z., Astete F.V., Kachlík V., Hartvich F. (2007): *Geomorphological research of large-scale slope instability at Machu Picchu, Peru*. *Geomorphology*, 50, 7, 1041-1052.
- Vilímek V., Klimeš J., Zvelebil J., Astete F.V. (2009): *Dilatometric and Extensometric Monitoring of Rock Blocks Displacements Within Machu Picchu Archaeological Site, Peru*. – In: Sassa K, Canuti P. (eds): *Disaster Risk Reduction*. Springer, Berlin, Heidelberg, 259-263.
- Vítek J. (1979): *Pseudokrasové tvary v kvádrových pískovcích sv. Čech*. Rozpravy ČSAV. C.MPV, 89, 4, Praha, 1-57.
- Vítek (1981): *Morfogemetická typizace pseudokrasu v československu*. Sborník Čs. geograf. spol. Praha 89(4), 1-58.
- Vítek J. (1983): *Classification of Psudokarst forms in Czechoslovakia*. *Int. J. Speleol.*, 13, 1-18.
- Vlčko J., Ježný M., Pagáčová Z. (2005): *Influence of Thermal Expansion on Slope Displacements*. In: Sassa K., Fukuoka H., Wang F., Wang G. (eds.): *Landslides: Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides, Washington, Springer Verlag, 7, 71-74.
- Vlčko J., Greif V., Grof V., Ježný M., Petro L., Brček M. (2009): *Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia*. *Environmental Geology*, 58, 1727-1740.
- Vreeland R.H. (1994): *Nature's Bridges and Arches*. Volume 1 – General Information. Self-published 1976, 2nd Edition.
- Warke P.A., Smith B.J., Magee R.W. (1996): *Thermal response characteristics of stone: implications for weathering of soiled surfaces in urban environments*. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 21, 295-306.
- Warke P.A., Smith B.J. (1998): *Effect of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests*. *Geomorphology*, 22, 347-357.

- Warke P.A., Smith B.J. (2000): *Salt distribution in clay-rich weathered sandstone*. Earth Surf. Processes and Landforms, 25(12), 1333-1342.
- Warke P.A., McKinley J., Smith B.J. (2006): *Variable weathering response in sandstone: factors controlling decay sequences*. - Earth Surf. Processes and Landforms, 31, 6, 715-735.
- Wilbur J.H. (2004): *The Dimensions of Landscape Arch: Removing the Uncertainty*. Databáze online [cit. 2011-04-20]: <http://www.naturalarches.org/archinfo/landscape.htm>
- Wilbur J.H. (2006): *The Dimensions of Kolob Arch*. Databáze online (revised 2007) [cit. 2011-04-21]: <http://www.naturalarches.org/archinfo/kolob.htm>
- Williams R.B.G., Robinson D.A. (1998): *Weathering of sandstone by alunogen and alum salts*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 31, 369-373.
- Williams R.B.G., Robinson D.A. (2001): *Experimental frost weathering of sandstone by various combinations of salts*. Earth Surf. Process Landforms 26, 811-818.
- Williams R.B.G., Swantesson J.O.H., Robinson D.A. (2000): *Measuring rates of surface downwearing and mapping microtopography: The use of micro-erosion meters and laser scanners in rock weathering studies*. Z.G geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 120, Berlin–Stuttgart, 51-66.
- Winkler E.M. (1994): *Stone in Architecture. Properties, Durability*. 3rd Completely Revised and Extended Edition., Springer-Verlag, 313 s.
- Yilmaz I. (2010): *Influence of water on the strength and deformability of gypsum*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 47, 342-347.
- Young R.G. (1977): *Landscape development in the Shoalhaven River catchment of southeastern New South Wales*. Zeitschrift für geomorphologie, 21, 268-283.
- Young R.W, Young A.R.M. (1992): *Sandstone landforms*. Springer-Verlag, Berlin.
- Young R.W., Wray R.A.L., Young A.R.M. (2009): *Sandstone landforms*. Cambridge University Press, New York, 304 s.
- Zajíc J., Král J., Daniel J. (1975): *Průzkum skalních stěn a svahů na Děčínsku*. Sb. geol. Věd, ř. HIG, 12, 137-170. Praha.
- Zehndler K. (1996): *Gypsum efflorescence in the zone of rising damp. Monitoring of slow decay processes caused by crystallizing salts on wall paintings*. In: Proceedings 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Ernst und Sohn, Berlin, 1669-1678.
- Zvelebil (1984): *Svahové pohyby a evoluce skalních svahů*. MS, Výzkumná zpráva II-6-1/03.05.2, ÚÚG ČSAV, Praha, 125 s.

- Zvelebil J. (1985): *Time prediction of a rock fall from a sandstone rock slope*. Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, 3, Toronto University Press, Toronto, 93-96.
- Zvelebil J. (1989): *Inženýrskogeologické aspekty vývoje skalních svahů v Děčínské vrchovině*. MS, Kandidátská disertační práce, USMH AV ČR, Praha, 282 s.
- Zvelebil J. (1994): *Optimization of Monitoring of Rock Slopes for Prediction of Catastrophic Displacements*. Acta Montana, 93 [1], 15-28.
- Zvelebil J. (1995): *Determination of characteristic features of slope movements present day activity by monitoring in thick-bedded sandstones of the Bohemian Cretaceous Basin*. Acta Universitatis Carolinae, Geographica, Supp., Prague, 79-113.
- Zvelebil J. (2008): *Posouzení rizikových geofaktorů na skalním objektu „Falkenštejn“, obec Jetřichovice, Ústecký kraj*. MS, Zdiby, 10 s.
- Zvelebil J., Cílek V. (1996): *Sledování aktivity procesů porušování stability NPP Pravčická brána. – Dílčí zpráva 1. etapy*. MS, PPŽP/610/6/96-DÚ 04, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.
- Zvelebil J., Cílek V. (1997): *Sledování aktivity procesů porušování stability NPP Pravčická brána. – Dílčí zpráva 2. etapy*. MS, PPŽP/610/6/96-DÚ 04, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.
- Zvelebil J., Moser M. (2001): *Monitoring Based Time-Prediction of Rock Falls: Three Case-Histories*. Phys. Chem. Earth (B), 26, 2, 1, Pergamon, 59-67.
- Zvelebil J., Cílek V., Stemberk J. (2002): *Partial results of monitoring of stability deterioration on Pravčice Rock Arch, NW Bohemia*. In: Příkryl R., Viles H.A. (eds.): Understanding and managing stone decay, SWAPNET 2001. Karolinum, Praha, 243-261.
- Zvelebil J., Vařilová Z., Paluš M. (2005): *Tools for Rock Fall Risk Integrated Management in Sandstone Landscape of the Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic*. In: Sassa, K. Fukuoka, H., Wang, F., Wang, G. (eds): Landslides. Risk Analysis and Sustainable Disaster Management, chap. 14, Springer, 119-126.
- Zvelebil J., Hartvich F. (2006): *Site-friendly dilatometric slope monitoring at Celtic Mountain Citadel of Obří Hrad, S. Bohemia*. Proceedings of the ICL Symposium, 22.- 24. 11. 2006, Paris.
- Zvelebil J., Vařilová Z., Paluš M. (2008): *New Challenges in Safety Monitoring of Rock Slopes: The Third Wave*. The first world landslides forum, United Nations University, Tokyo, Japan, 705-708.