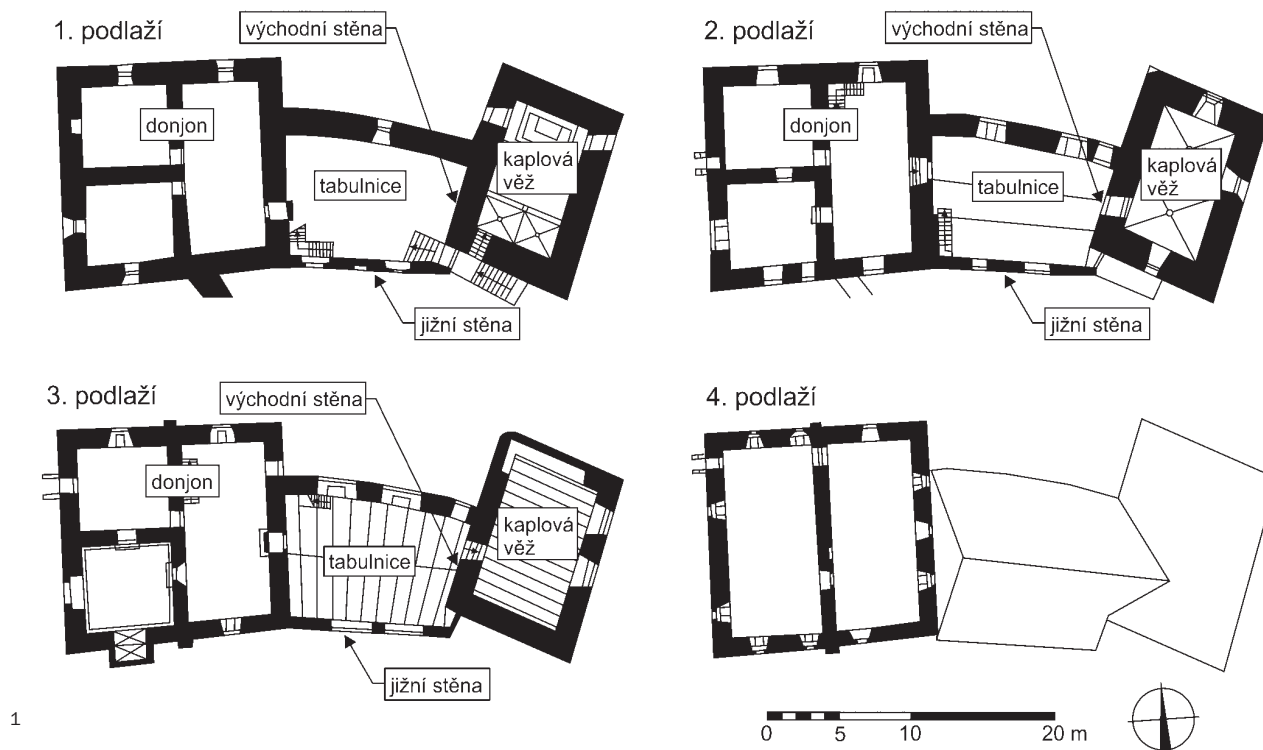


Hrad Bečov. Analýza narušení a návrh sanace jižní kamenné stěny spojovacího křídla

Jiří WITZANY; Klára KROFTOVÁ; Tomáš ČEJKA; Radek ZIGLER

ANOTACE: V rámci probíhající obnovy hradu Bečov proběhla mj. konzervace a restaurování vybraných částí jižní stěny spojovacího křídla.¹ Toto spojovací křídlo s pozdně gotickým sálem, nejprve dvoupodlažní, propojilo v roce 1524 dříve samostatnou věž, tzv. kaplovou, vystavěnou v roce 1352, s mohutným obytným donjonem z roku 1356.² Dříve samostatný donjon byl ve třetí čtvrtině 14. století upraven vestavěním kaple (odtud tzv. kaplová věž).³ Spojovací křídlo bylo v poslední čtvrtině 16. století v rámci renesančních úprav budov hradu zvýšeno o další patro (tzv. tabulnice). Zdivo jižní stěny spojovacího křídla bylo ve značném rozsahu narušeno výraznými trhlinami, z nichž některé se prokreslovaly z vnější strany na vnitřní stranu opatřenou degradovanou, zvětralou vápennou omítkou. Nalezení pravděpodobných příčin vzniku a rozvoje trhlin je jedním z rozhodujících předpokladů pro zajištění požadované životnosti provedené opravy. Technologie a materiál použitý na konzervaci a restauraci povrchu zdiva, zejména na opravu stávajících tzv. pasivních trhlin (ustálený stav narušení konstrukce), jsou odlišné od případu aktivních trhlin a zvýšené intenzity degradačních procesů, během nichž dochází k dalšímu rozvoji a šíření mechanických narušení. V prvé řadě je nutné posoudit, vzhledem k poloze hradu v seismicky aktivní oblasti (centrum Nový Kostel, odkud se šíří tzv. seismické roje), zda příčinou trhlin a narušení nejsou účinky přírodní seismicity. V článku jsou uvedeny výsledky provedených analýz a návrh sanace trhlin.



1. Stručný popis historického vývoje kamenné konstrukce jižní a východní stěny

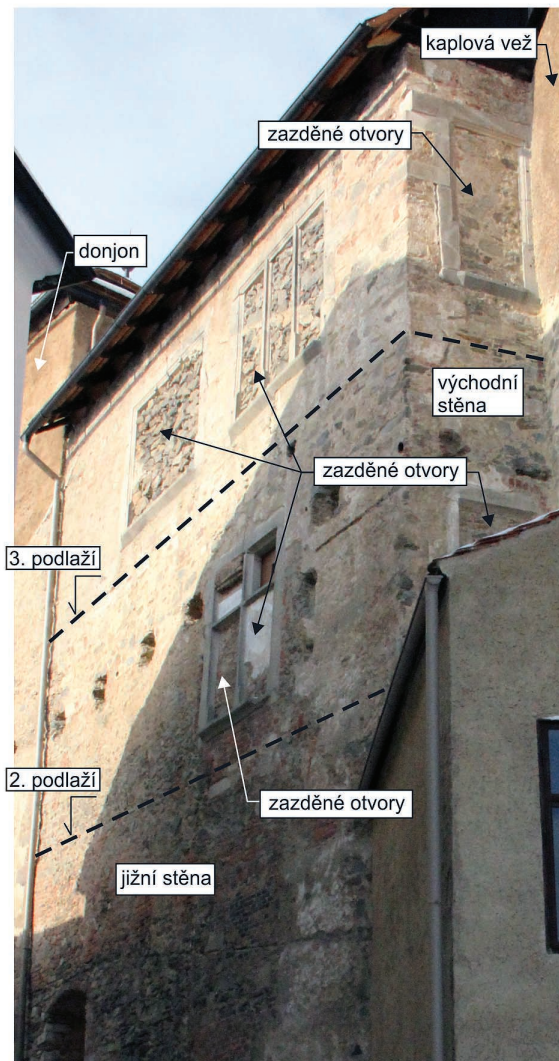
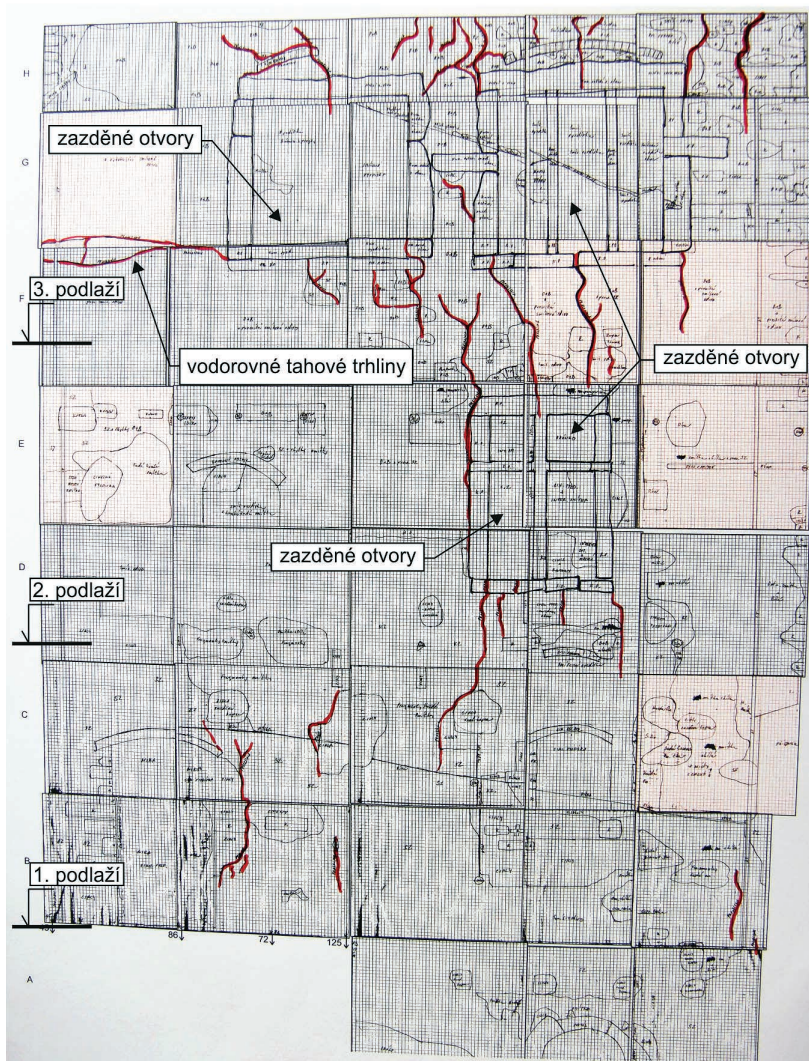
Obě věže hradu Bečov – kaplová a tzv. donjon (čtyřpatrová obytná věž), jejichž zdivo pochází převážně z první (kaplová věž) a z druhé (donjon) poloviny 14. století, byly v polovině 16. století vzájemně propojeny objektem spojovacího křídla (tzv. tabulnice, obr. 1).⁴

■ Poznámky

1 Viz Obnova hradu [online], dostupné na: <https://www.castlebecov.eu/cs/proces-obnovy/obnova-hradu>, citováno 14. 11. 2017.

2 Tomáš Durdík, *Ilustrovaná encyklopedie českých hradů*, Praha 2000. – Jan Anderle – Josef Kyncl, *Vývoj horního hradu v Bečově nad Teplou, Průzkumy památek IX*, 2002, č. 2, s. 75–108.

Obr. 1. Bečov nad Teplou, schéma půdorysu věží a spojovacího křídla hradu Bečov. Zpracovali: autoři článku, 2017.



Obr. 2. Hrad Bečov, schéma porušení zdiva jižní stěny tahovými a smykovými trhlinami (pohled z exteriéru) a pohled na jižní a východní stěnu spojovacího křídla. Přes značný rozsah narušení jižní stěny spojovacího křídla převážně tahovými trhlinami nebyl stav jižní stěny hodnocen jako havarijný, a proto nebyly provedeny žádné zabezpečovací konstrukce zajišťující její stabilitu. Schéma zpracoval: Václav Štochl, Terrigena Art, s. r. o., 2016. Foto: autoři článku, 2017.

Jižní stěna spojovacího křídla je provedena převážně z kamenného zdiva, v některých částech ze smíšeného zdiva. Pozdně gotické zdivo v 1. a 2. nadzemním podlaží tloušťky 0,75–0,85 m, které pochází z období před první polovinou 16. století, je provedeno z hrubě opracovaných lomových kamenných bloků rozdílné velikosti a tvaru místní proveniencce (granitoidní magmatická hornina) na maltu vápenou.⁵ Renesanční zdivo 3. nadzemního podlaží

z druhé poloviny 16. století je kamenné, v některých částech smíšené, zejména v dodatečně prováděných vysprávkách a úpravách, které s původním kamenným zdivem nejsou řádně provázané.⁶

Zdivo jižní stěny nese řadu dokladů pozdějších stavebních zásahů, zejména později prováděné, popř. zazdívané okenní otvory, vysprávky narušených částí zdiva apod. Tyto pozdější etapy obsahují různé fáze stavebních zásahů v období od renesance do baroka.

Na vnější i vnitřní straně jižní stěny byla provedena dnes již z části degradovaná a zvětralá

■ Poznámky

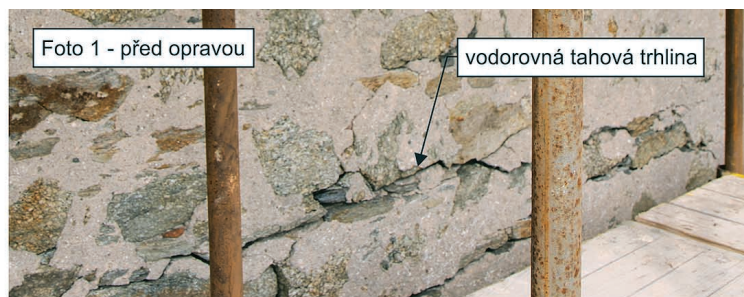
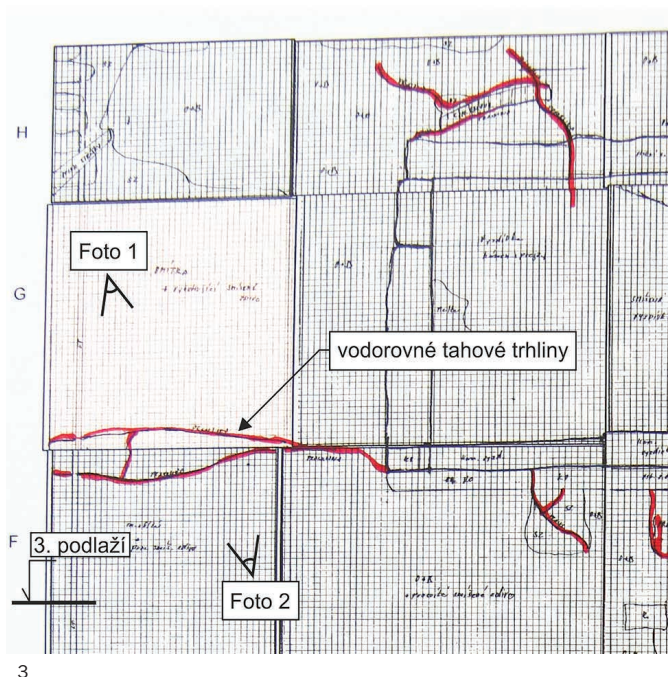
3 Jan Royt, *Uměleckohistorický průzkum nástěnných maleb v hradní kapli na Bečově* (nepublikovaný strojopis uložený v archivu SZ Bečov) – materiál vznikl pro potřeby projektu „Bečov nad Teplou – Příkladná obnova hradu a přílehlých objektů pro prezentaci památkové péče formou

vzdělávacích programů“, hrazeno z programu SMVS 134 V112000027 MK ČR.

4 Václav Girsá – Miloslav Hanzl – Dagmar Michoinová et al., *Hrad Bečov – projekt konzervace a prezentace*, Praha 2009.

5 Jaromír Beneš, *Výzkum horního hradu v Bečově nad Teplou v roce 2001*, *Zprávy České archeologické společnosti, Supplément XLV*, 2001, s. 30–31.

6 Eva Holanová – Marie Heroutová, *Bečov nad Teplou, hrad, Stavebně-historický průzkum* (nepublikovaný elaborát SÚRPMO, uložený ve sbírce plánů, stavebněhistorických průzkumů a restaurátorských zpráv NPÚ, GnŘ), Praha 1964. Eadem, *Bečov nad Teplou, hrad, Stavebně-historický průzkum. Doplnky* (nepublikovaný elaborát SÚRPMO, uložený ve sbírce plánů, stavebněhistorických průzkumů a restaurátorských zpráv NPÚ, GnŘ), Praha 1968. – Eva Holanová – Marie Heroutová – Dobroslav Libal, *Bečov nad Teplou, hrad, stavebně historický průzkum. Doplněk II* (nepublikovaný elaborát SÚRPMO, uložený ve sbírce plánů, stavebněhistorických průzkumů a restaurátorských zpráv NPÚ, GnŘ), Praha 1969.



Obr. 3. Hrad Bečov, tahová vodorovná trhлина ve zdivu jižní stěny na úrovni 3. nadzemního podlaží. Schéma trhlin a foto: Václav Štochl, Terrigena Art, s. r. o., 2016.

renesanční vápenná omítka, na vnějším povrchu hrubší, na vnitřním povrchu je provedena vápenná omítka s rozetřeným povrchem s tenkou vápennou vrstvou se zbytky vápenných náterů.

Zdivo jižní stěny není provázáno se zdivem obou věží, od kterého je odděleno průběžnou spárou. Původní velká okna ve 2. a 3. podlaží s kamennými rámy byla v minulosti při barokní přestavbě zazděna. Na jižní stěně jsou v kapsách uloženy a obezděny stropnice, bez znatelných vzduchových mezer, na kterých je uložen jednoduchý záklop z dřevěných fošen. V 1. a 2. nadzemním podlaží jsou příčně orientované stropnice, v 1. nadzemním podlaží podporované středním průvlakem (podvlakem), ve 2. nadzemním podlaží dvěma průvlakem (podvlakem). Stropní trámová konstrukce pochází ze 17. století.

Není doložen způsob provedení kamenného (14. století) a později kamenného a smíšeného zdiva (16. století),⁷ tj. zda je zdivo provedeno jako jednovrstvé, popř. vícevrstvé. Vzhledem k tloušťce zdiva 0,75–0,85 m, rozměru a uspořádání kamenných bloků se pravděpodobně jedná o zdivo jednovrstvé, nepravidelné, převážně z lomových neopracovaných kamenných bloků bez řádné vazby, mechanicky narušené, s řadou v čase následných dílčích výprávek a zásahů. Kamenné zdivo je provedeno převážně z granitoidní magmatické horniny (granit,

granodiorit, popř. křemenný diorit) s pojivem z vápenné malty s vysokým obsahem vápna a z písku pocházejícího ze zvětralých vrstev místních hornin. Dále jsou ve zdivu zastoupeny metamorfity (ortoruly), tmavší magmatické horniny (gabrodiority) a v malé míře i sedimentární horniny (pískovce).⁸

2. Stavebně-technický stav zdiva jižní a východní stěny

Na vnějším povrchu (z exteriéru) je zdivo jižní stěny ve značném rozsahu narušeno výraznými, převážně svisle uspořádanými tahovými, popř. smykovými trhlinami. V částech stěny prolomené velkými okenními otvory s kamennými rámy z jemnozrnné granitoidní horniny vytvářejí hustou síť svislé trhliny, které směřují do míst svislých sloupků kamenných okenních ráků (obr. 2). Okenní kamenné rámy jsou porušené – částečně uvolněné jsou rohové spoje, narušené jsou sloupky, parapetní a nadokenní příčle. Průběh, uspořádání a charakter porušení zdiva, nadpraží a sloupků kamenných ráků dokládá rozdílné dotlačování (dotvarování) kamenného zdiva v částech jižní stěny prolomených okenními otvory s vloženými kamennými rámy a v částech zdiva mimo okenní rámy.

V části jižní stěny spojovacího traktu přiléhající v úrovni spodních okenních ráků v 3. nadzemním podlaží k donjonu je zdivo narušené vodorovně uspořádanými tahovými trhlinami, z nichž některé procházejí přes celou tloušťku zdi a dosahují šířky od několika mm do 20 mm (obr. 3).

Východní stěna, spojující jižní stěnu se zdí kaplové věže, je obdobně porušena tahovými svislými a šikmo skloněnými trhlinami v úrovni 3. podlaží. V úrovni 2. podlaží prochází na celou výšku podlaží svislá tahová trhлина na levém okraji zazděného, původně dveřního otvoru.

Průběh a sklon trhlín ve zdivu jižní a východní stěny je dán jednak průběhem tlakových trajektorií a jednak nehomogenitou zdiva – skladbou kamenných bloků rozdílné velikosti ve zdivu („obcházení“ rozměrných kamenných bloků), koncentrací trhlín do míst zdiva s menší pevností v tahu. Některé trhliny procházejí přes celou tloušťku zdiva a propisují se z vnějšího na vnitřní povrch jižní stěny.

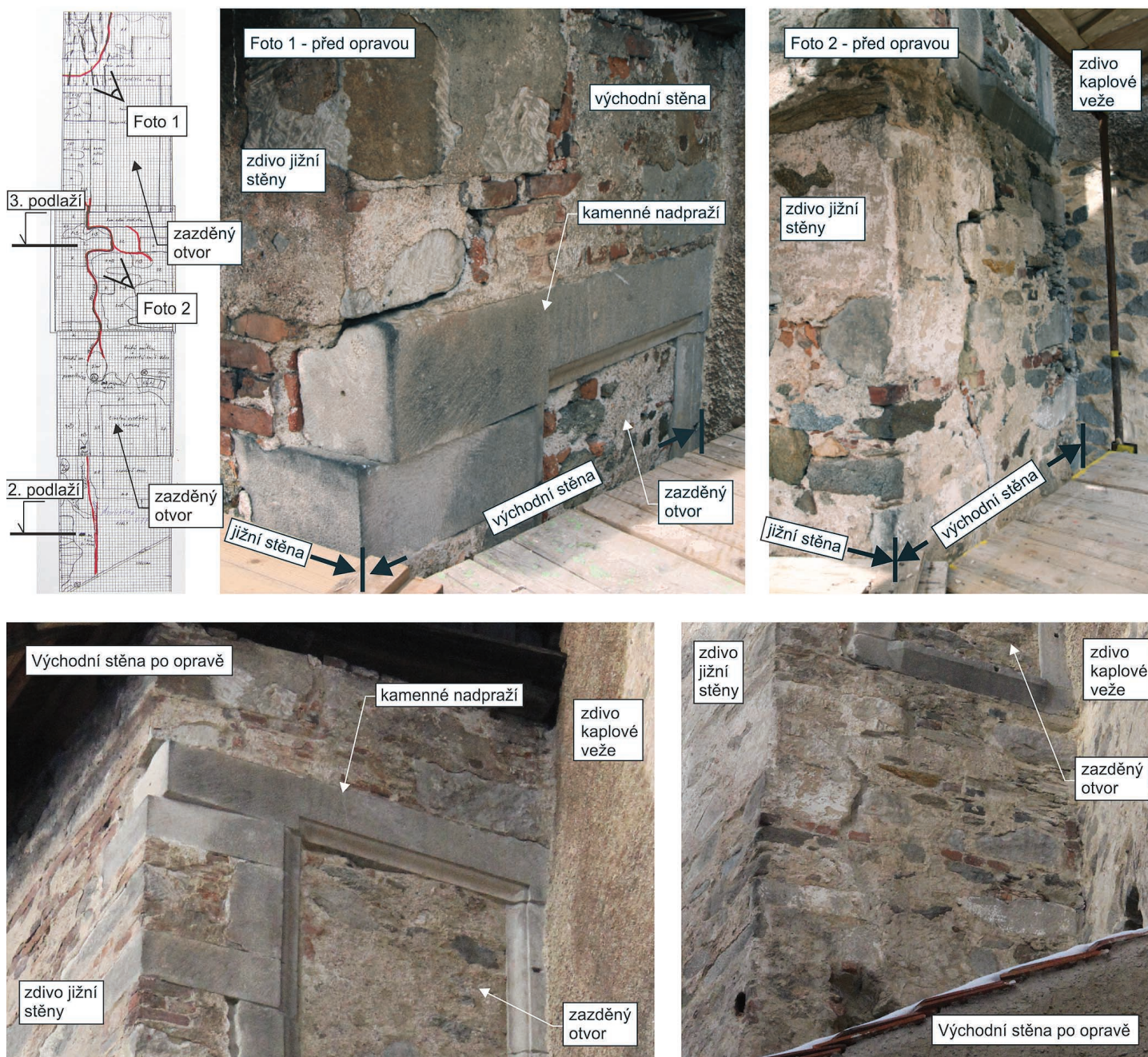
Na výprávkách trhlín na vnitřní straně v nadpraží zazděných okenních otvorů ve 3. podlaží, které byly zatřeny hrubou vápennou maltou, je

■ Poznámky

7 Kvalita zdiva v uvedeném historickém období byla velmi rozdílná. Závisela především na provedení zdiva – od řádkového zdiva z opracovaných pravidelných kamenů až po nepravidelné zdivo z neupravených lomových kamenů rozdílné velikosti a tvaru, závisela také na kvalitě malty a v neposlední řadě na kvalitě kamenů – magmatické horniny, sedimentární horniny apod. Všechny uvedené činitele ovlivňovaly výslednou kvalitu zdiva, především jeho pevnost a přetvárné vlastnosti, které se pohybovaly v poměrně značném rozsahu. Zdivo spojovacího křídla hradu Bečov lze spíše řadit do kategorie méně kvalitního zdiva z nepravidelných kamenných zdicích prvků různé provenience s nepravidelnou vazbou.

8 Beneš (pozn. 5).

Východní stěna spojovacího křídla



4

Obr. 4. Hrad Bečov, schéma a foto porušení zdiva východní stěny tahovými a smykovými trhlinami (pohled z exteriéru) a foto zdiva východní stěny po opravě. Schéma zpracoval: Václav Štochl, Terrigena Art, s. r. o., 2016. Foto: autoři článku, 2017.

patrné obnovení původních trhlín. Část těchto trhlín v nadpraží otvorů v 2. a 3. podlaží navazuje na místa, kde jsou uloženy stropní, popř. vazné trámy.

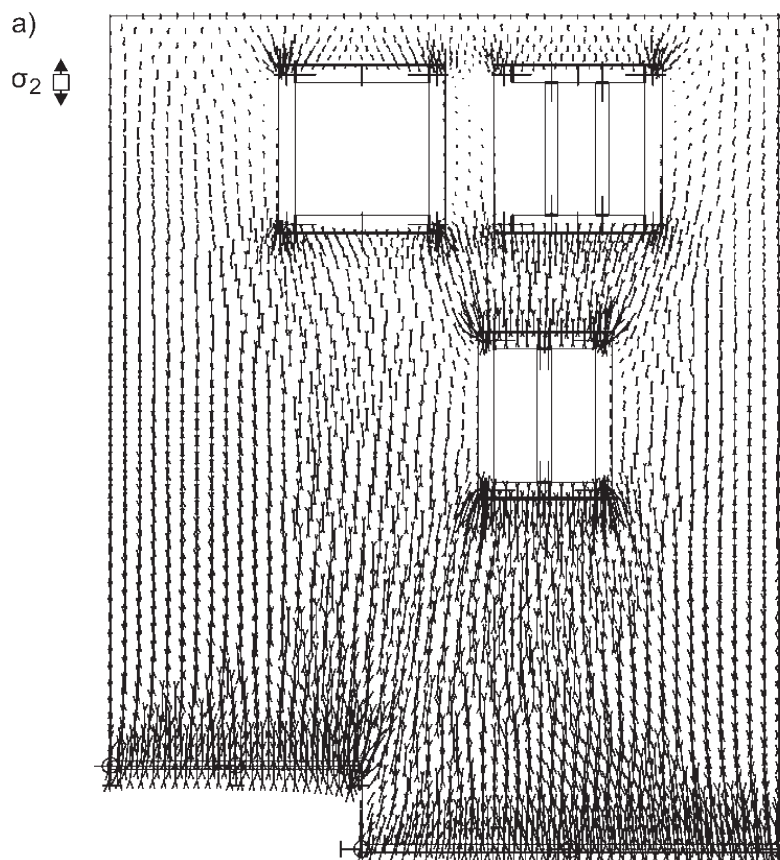
Východní spojovací stěna, oslabená ve 2. a 3. podlaží otvory, v současnosti zazděný

mi, je narušena výraznou svislou (v místech kamenných sloupků původních dveřních otvorů) a šikmou trhlinou „oddělující“ zdivo východní stěny od zdiva kaplové věže (obr. 4). Přirozeně drsné a zalomené styčné spáry mezi zdívem východní stěny a zdivem donjonu, které nejsou vzájemně provázány a které jsou zatřené vápennou maltou, jsou místy narušené („otevřené“) výraznou trhlinou (rovněž obr. 4).

Vedle uvedeného narušení zdiva jižní stěny trhlínami lze na vnějším povrchu jižní stěny nalézt řadu dílčích trhlín šířky do 1 až 2 mm

„lokálního významu“ a řadu míst se zvětřelou a degradovanou omítkou a kameny vystupujícími do líce jižní stěny. Jedná se převážně o trhliny v místech oslabení zdiva, v nadpraží okeních otvorů a v místech dodatečně provedených vyzdívek a oprav zdiva.

Řada dílčích trhlín a narušení kamenného zdiva dokládá tendenci zdiva k rozdílné deformaci způsobené nepravidelností styčných a ložných spár (tloušťka a jejich uspořádání), rozdílnou velikostí a tvarem kamenných bloků a zdicích prvků a v neposlední řadě jejich rozdílnou kvalitou (pevnost a modul pružnosti). V souhrnu jsou ty



5a



5b

Obr. 5. Hrad Bečov, průběh trajektorií tlakových napětí σ_2 , (5a) a porušení zdiva jižní stěny tahovými trhlinami (5b). Foto: Václav Štochl, Terrigena Art, s. r. o., 2016.

to nepravidelnosti kamenného a smíšeného zdiva jižní a východní stěny, způsobující extrémní hodnoty lokálních napětí v kamenném zdivu, příčinou poruch zdiva, které snižují pevnost a tuhost zděné konstrukce a v určitých případech mohou být zdrojem vzniku a následného šíření a rozvoje výrazných trhlin ve zdivu.

3. Rozbor příčin poruch a narušení jižní a východní stěny spojovacího křídla

Narušení jižní stěny výraznými svislými tahovými trhlinami

Na vnějším povrchu jižní stěny je největší koncentrace trhlin v oblastech nad a pod okenními otvory ve 3. a 2. podlaží s vloženými kamennými okenními rámy z jemnozrnné granitoidní horniny (granit až granodiorit, případně granitické aplity).

Charakter trhlin – převážně svisle uspořádané tahové otevřené trhliny šířky od několika mm až do 40 mm – odpovídá vzniku vodorov-

ných tahových napětí v oblastech kamenných okenních rámců.

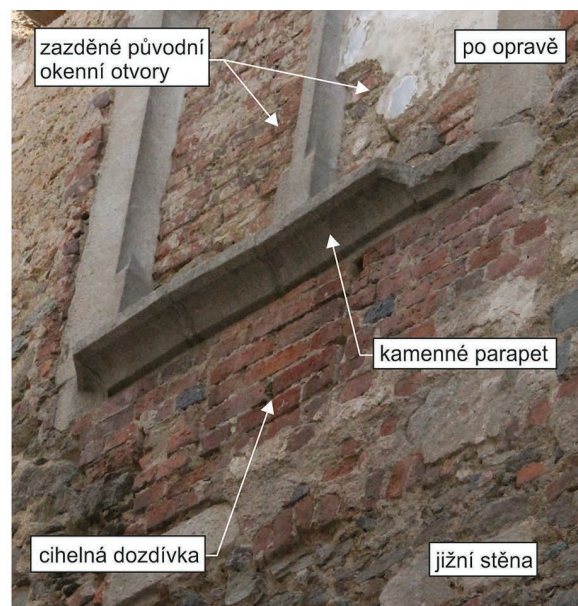
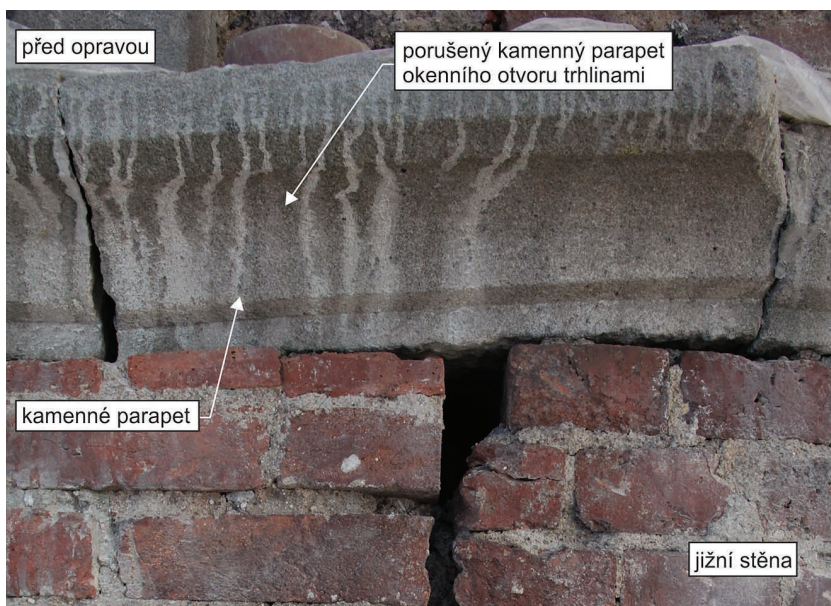
Narušení konstrukce okenních rámců, zejména jejich vodorovných částí, nadpraží a parapetů je dokladem tendence zdiva ke svislé deformaci – dotlačení účinkem dotvarování zdiva s větším obsahem vápenného pojiva. Charakteristickým znakem trhlin je určitá souvislost polohy tahových trhlin a především sloupků kamenných okenních rámců. Relativně tužší okenní kamenné rámy, zejména v místě svislých sloupků, tvoří „fyzickou překážku“ dotvarujícímu se kamennému zdivu.⁹ Rozdílná hodnota dotlačení (dotvarování) kamenného zdiva v oblasti okenních otvorů s vloženými kamennými rámy a v oblasti mimo okenní otvory je hlavní příčinou koncentrace tlakových napětí do oblasti sloupků kamenných okenních rámců (obr. 5, obr. 6).

V souladu s touto hypotézou jsou i výsledky teoretické a numerické analýzy MKP¹⁰ napjatosti jižní stěny od účinku vlastní tíhy kamen-

■ Poznámky

9 O závažnosti dotvarování (dotlačování) zdiva svědčí např. i příslušné ustanovení Stavebního řádu pro město Prahu (1886). Podle řádu se uvažovalo sednutí kamenné zděné stěny z lomového kamene na vápennou maltu v hodnotách 1/180 až 1/130 výšky zdiva. Uvedenému rozmezí by odpovídalo dotlačování na 1 m kamenného zdiva 5,5 mm až 7,7 mm a na celou výšku stěny, tj. na cca 13 m, deformace 72 mm až 100 mm. Uvedené hodnoty dotlačování, tj. v rozmezí od 0,0055 do 0,0077 m výšky zdiva, nemohly být realizovány v místě okenních rámců. Názorný obraz o tomto procesu ukazuje např. narušení spodní vodorovné parapetní části okenního rámu v 2. podlaží (viz. obr. 8). Pravděpodobně kamenné rámy byly do zdiva jižní stěny zabudovány v době, kdy ještě neproběhlo konečné dotvarování zdiva a spára mezi nadpražím, popř. parapety byla vyplněna tak, že neumožňovala kompenzaci probíhajících deformací od účinků dotvarování zdiva.

10 Lineární výpočet a MKP analýza poskytly především základní informace o vlivu vzájemné interakce zdiva s nepřiliš-



6

Obr. 6. Hrad Bečov, porušení vodorovných kamenných parapetů ve spodní části okenních otvorů ve 2. podlaží a jižní stěna po opravě. Foto: autoři článku, 2017.

ného zdiva a liniového zatížení od krovu. Proces postupného porušování a šíření svislých tahových trhlin lze popsat čtyřmi stádii odezvy zděné konstrukce na uvedená zatížení:

I. stádium – výchozí stav, neporušené zdivo

Z obr. 7 je patrná koncentrace hlavních napětí σ_1 a σ_2 v úrovni nadpraží okenních otvorů, zejména v oblasti svislých sloupků kamenných okenních rámu. Tahová napětí σ_1 dosahují nejvyšších hodnot o velikosti od cca 40 kPa do 90 kPa v úrovni nadpraží okenních otvorů ve 3. podlaží, tj. přibližně 25–55 % průměrných tlakových napětí σ_2 (o velikosti cca 160 kPa) v patě stěny od účinku vlastní tíhy kamenného zdiva a liniového zatížení od krovu.¹¹

Tahová napětí σ_1 o velikosti až 90 kPa, způsobená účinkem vlastní tíhy kamenného zdiva a liniového zatížení od krovu, překračují pevnost zdiva v tahu, která se pohybuje v rozmezí od 40 do 80 kPa, a jsou pravděpodobnou příčinou vzniku a následného rozvoje převážně svislých tahových trhlin v úrovni nadpraží okenních rámu ve 3. podlaží. Tyto trhliny vznikly v počátečním stádiu narušování zdiva jižní stěny spojovacího křídla.

II. stádium – rozvoj a šíření trhlin

Po vzniku prvních tahových trhlin v nadpražích kamenných okenních rámu ve 3. podlaží dochází k redistribuci hlavního napětí σ_1 do oblasti jižní stěny vymezené nadpražím okenního rámu ve 2. podlaží a parapety okenních rámu ve 3. podlaží (obr. 8). Hlavní tahová napětí σ_1 dosahují ve II. stádiu působení zdiva jižní stě-

ny, narušené tahovými trhlinami v nadpraží okenních otvorů 3. podlaží, velikosti v rozmezí od 20 kPa do 110 kPa, tj. relativních hodnot od 13 do 63 % průměrných hodnot tlakových napětí σ_2 v patě jižní stěny. Tahová napětí o velikosti až 110 kPa jsou obdobně jako v prvním stádiu příčinou vzniku a rozvoje tahových trhlin v nadpraží kamenného okenního rámu ve 2. podlaží. Lze předpokládat, že vznik svislých tahových trhlin v oblasti mezi nadpražím okenního rámu ve 2. podlaží a parapety okenních rámu ve 3. podlaží následoval bezprostředně po narušení a rozvoji tahových trhlin v oblasti nadpraží okenních otvorů ve 3. podlaží.

III. stádium – rozvoj a šíření trhlin

Po vzniku a rozvoji svislých tahových trhlin v oblasti nadpraží kamenných okenních rámu ve 3. a 2. podlaží dochází ke vzniku – k přelivu – extrémních vodorovných hlavních tahových napětí σ_1 do oblasti pod parapetní částí kamenného okenního rámu ve 2. podlaží (obr. 9). Vodorovná tahová napětí σ_1 v této oblasti dosahují hodnot v rozmezí od 25 kPa do 90 kPa, které leží v intervalu od cca 15 až do 50 % průměrných tlakových napětí (σ_2) v patě jižní stěny zatížené vlastní tíhou a konstrukcí krovu. I v tomto případě část vodorovných tahových napětí překračuje pevnost kamenného zdiva v tahu.

IV. stádium – po narušení jižní stěny výraznými tahovými trhlinami

V časovém rozmezí od 16. století do současné doby se na celkovém rozvoji trhlin a narušení podílely dlouhodobé degradační účinky a vlivy, zejména mechanické (teplota, vlhkost) a chemické (zvětvávání a vyplavování pojiva).

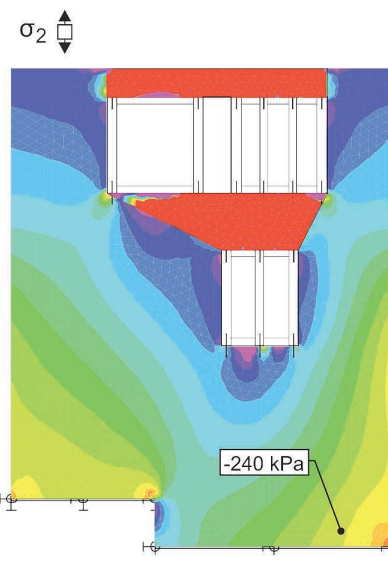
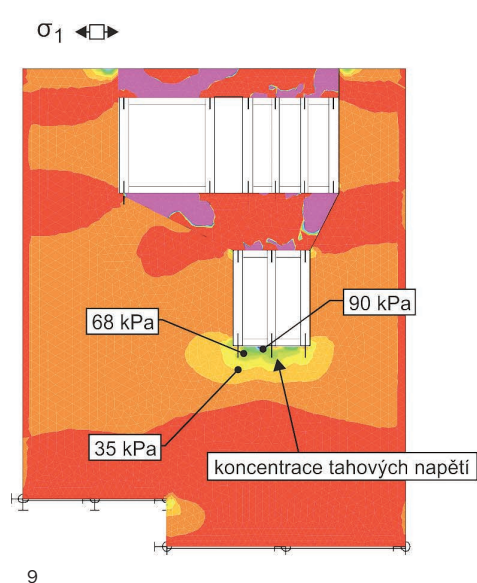
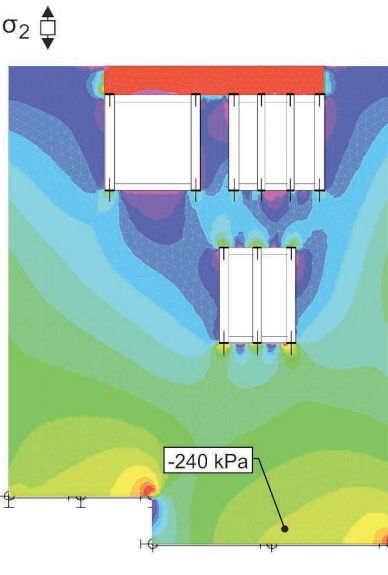
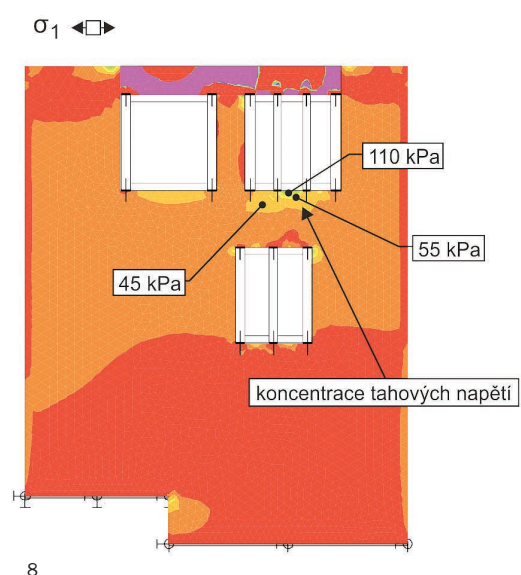
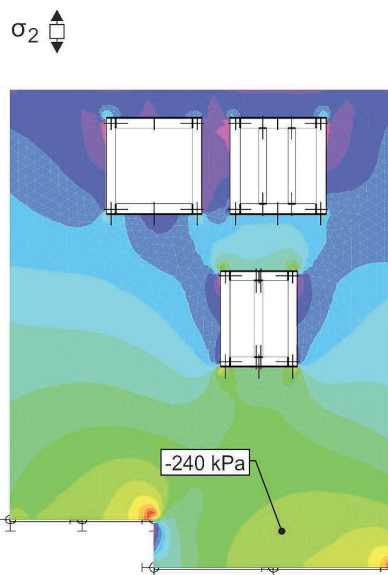
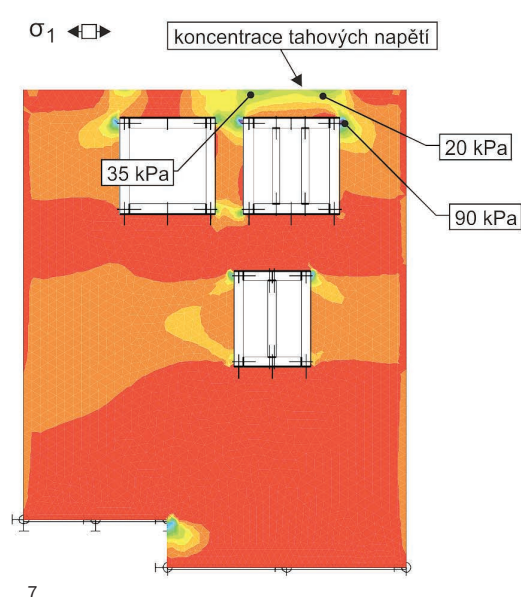
Hrad Bečov a spolu s ním spojovací křídlo se nachází v oblasti výskytu přírodní seismicity. Průběh trhlin na jižní stěně (založené na skále)

neodpovídá charakteristickému průběhu při porušení, k němuž dochází seismickými účinky a který by dokládal vliv seismicity na stávající narušení stěny. Nelze však vyloučit, že případné otřesy, kterým byla narušená zděná konstrukce jižní stěny v průběhu času vystavena, a její nepružná odezva na seismické účinky nepřispěly k dalšímu rozvoji narušení a trhlin, jak byly popsány v I. až III. stádiu.

■ Poznámky

kvalitní vazbou a větším obsahem pojivové složky s relativně tuhými kamennými rámy okenních otvorů na rozložení napjatosti (směr a velikost hlavních napětí) ve zdivu jižní stěny. Dílčí upřesnění výpočtu poskytla víceokrová – několikastupňová analýza zohledňující pokles tuhosti zdiva narušeného výraznými převážně tahovými, popř. smykovými trhlinami. Vzhledem k charakteru, průběhu a místu výskytu trhlin na jižní stěně nebyla ve výpočtu uvažována změna tvaru základové spáry.

¹¹ V horní části jižní stěny (v koruně) bylo zdivo dlouhodobě narušováno zvětváváním a degradačními procesy převážně fyzikálního charakteru v období, kdy nebylo chráněno střechou. Současný stav (vysprávka koruny zdiva) je výsledkem pouze provizorní ochrany a doplnění původního kamenného zdiva cihelným zdivem pro uložení pozednic krovové konstrukce. Pevnost kamenného zdiva v tlaku pro případ pevností zdících prvků v rozmezí od 10 do 40 MPa a pro případ pevnosti spojovací vápenné malty v rozmezí od 0,4 do 2,5 MPa se pohybuje v intervalu 0,24 až 0,7 MPa (ČSN 731101, změna b). Pevnost zdiva v tahu leží obvykle v intervalu 0,08–0,11 pevnosti zdiva v tlaku. Podle ČSN 731101 (čl. 36, tab. 3) je pevnost malty v tlaku v rozmezí od 0,4 do 1,0 MPa pevnost zdiva v tahu 40 až 80 kPa.



Obr. 7. Průběh hlavních napětí v tlaku σ_1 a hlavních napětí v tahu σ_2 – I. stádium, výchozí stav, neporušené zdivo. Zpracovali: autoři článku, 2017.

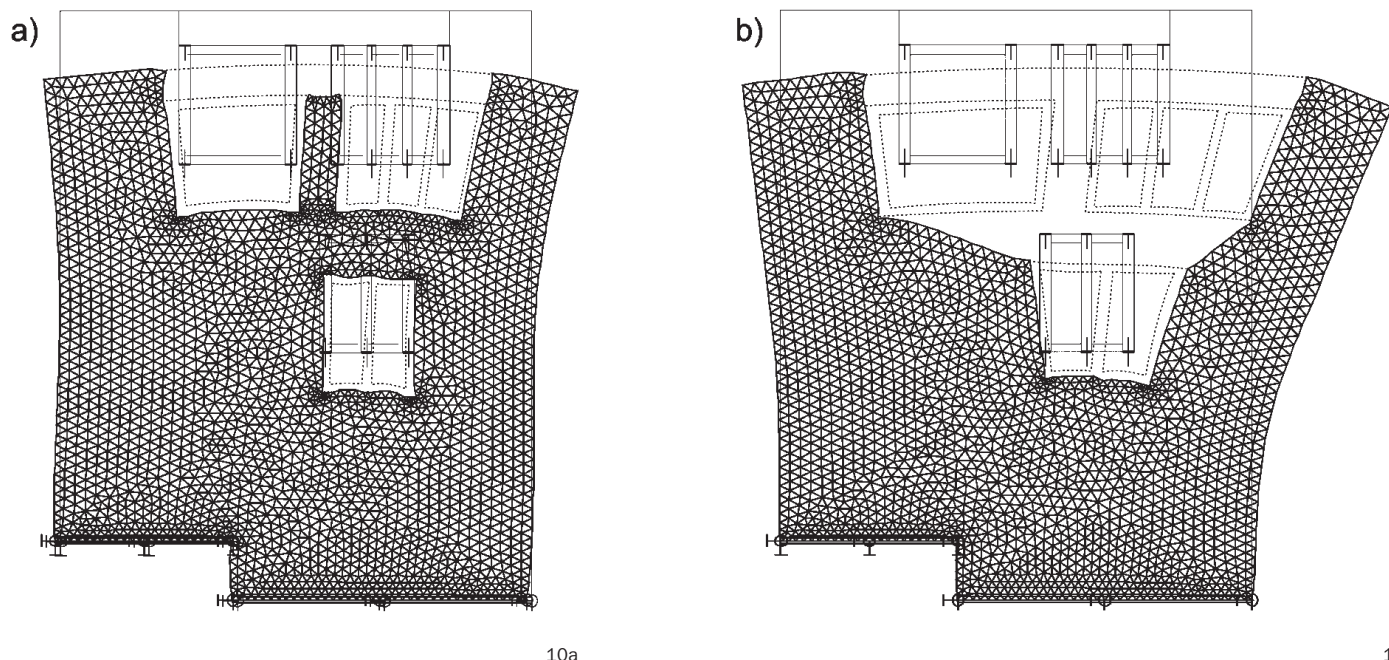
Obr. 8. Průběh hlavních napětí v tlaku σ_1 a hlavních napětí v tahu σ_2 – II. stádium, rozvoj a šíření trhlin, po vzniku tahových trhlin v nadpraží okenních otvorů ve 3. podlaží. Zpracovali: autoři článku, 2017.

Obr. 9. Průběh hlavních napětí v tlaku σ_1 a hlavních napětí v tahu σ_2 – III. stádium, rozvoj a šíření trhlin, po vzniku tahových trhlin v nadpraží okenních otvorů ve 2. a 3. podlaží. Zpracovali: autoři článku, 2017.

Narušení jižní stěny vodorovnými tahovými trhlinami

Na vnitřním povrchu zdiva jižní stěny (v interiéru) ve 3. podlaží se vyskytuje několik vodorovně uspořádaných trhlin přibližně v úrovni 0,6 až 1,2 m nad podlahou. Trhlina ve zdivu na straně donjonu má šířku až 20 mm a klínovitý tvar, který se zužuje směrem k okenním otvorům. Tato trhlina prochází celou tloušťkou jižní stěny až na vnější povrch (viz obr. 3). Jak prokázala numerická analýza po vzniku tahových trhlin v nadpraží okenních otvorů ve 3. a následně ve 2. podlaží, dochází k výraznému poklesu tuhosti zdiva v oblasti nadpraží okenních otvorů. Účinkem vodorovných sil vyvolaných odklonem tlakových trajektorií ve zdivu v místech zabudovaných okenních rámců má levá a pravá část jižní stěny tendenci k vodorovné deformaci směrem k donjonu, popř. ke kaplové věži (obr. 10). V důsledku této vodorovné deformace – náklonu krajních částí jižní stěny – dochází účinkem tlakových sil a tření ve spáře „jižní stěna – donjon“ k interakci mezi zdivem jižní stěny a zdivem donjonu, která účinkem tření (smykových sil) „brání“ svislé deformaci (stlačení) jižní stěny a vede ke vzniku svislých tahových napětí v kamenném zdivu, které jsou po překročení pevnosti zdiva v tahu příčinou následného narušení (přetržení) kamenného zdiva vodorovnou trhlinou procházející celým průřezem této části jižní stěny. V souladu s tím má vodorovná trhlina částečně klínový charakter s největší šířkou u donjonu (10 až 20 mm) a zužuje se směrem ke střední části jižní stěny (viz obr. 3 a obr. 11). Této deformaci také odpovídá porušení omítky překrývající v interiéru ve 3. podlaží spáru mezi zdivem donjonu a jižní stěny.

Obdobný proces náklonu části jižní stěny na stranu kaplové věže ovlivnil charakter narušení zdiva východní stěny. Charakter trhlin mezi východní stěnou a kaplovou věží, zejména ve 3. podlaží (obr. 12), a zmenšující se šířka trhlin směrem k patě východní stěny naznačují tendenci východní stěny k důlčímu náklonu, jehož



Obr. 10. Schéma deformace jižní stěny po vzniku tahových trhlin v nadpraží okenních otvorů ve 3. podlaží (10a) a po vzniku tahových trhlin ve 3. podlaží (10b). Zpracovali: autoři článku, 2017.

příčinou by mohla být mimo uvedenou tendenci pravé části (z exteriéru) jižní stěny k náklonu vodorovná složka síly od zatížení krovem v důsledku částečné neúčinnosti vazných trámů v této části spojovacího traktu (obr. 13).¹²

Shrnutí analýzy příčin poruch a narušení kamenného zdiva jižní a východní stěny spojovacího křídla

Na základě vizuální prohlídky, kvalitativního rozboru, dílčích numerických analýz (lineárních) a celkového zhodnocení stavebně-technického stavu jižní stěny lze za hlavní příčiny vzniku a následného rozvoje trhlin a narušení kamenného zdiva jižní a východní stěny spojovacího křídla považovat:

- účinky dlouhodobého přetváření – dotvarování, dotlačování kamenného zdiva nepravidelné skladby s pojivem z vápenné malty,
- náhlou změnu tuhosti kamenného zdiva (EU) v oblastech zabudovaných kamenných granitových okenních rámců (pravděpodobně současně s prováděním zdiva 2. a 3. podlaží),
- interakce kamenného zdiva jižní a východní stěny se zdivem kaplové věže a donjonu po narušení zdiva v oblastech nadpraží okenních otvorů ve 2. a 3. podlaží tahovými trhlinami (účinek přirozeně drsné a zalomené spáry),
- účinky vodorovné složky síly od zatížení krovem v důsledku částečné neúčinnosti vazných trámů ve střešní konstrukci spojovacího traktu.

Na základě uvedených sledování lze konstatovat, že působením nesilových účinků teploty a vlhkosti, popř. účinků větru nedochází k výrazným deformacím, které by se projevíly změnou šířek trhlin, popř. jejich dalším rozvojem, a současný stav kamenných konstrukcí, tj. i jižní stěny, lze označit jako stabilizovaný a stávající trhliny jako trhliny pasivní.¹³

4. Sanace trhlin a narušení kamenného zdiva jižní a východní stěny

Na základě výsledků předběžného vizuálního průzkumu a získaných informací, které dokládají stabilizovaný stav zdiva jižní stěny (pasivní trhliny), se doporučuje provést sanaci trhlin nízkotlakou injektáží. Pro injektáž se doporučují směsi na traso-vápenné bázi, např. Oxal VP I T nebo Oxal VP TK pro injektáž trhlin větších šířek a Oxal VP I T flow v případě větších injektážních vzdáleností nebo pro injektáž mikrotrhlin. Pro uzavření (utěsnění) trhlin na povrchu zdiva před vlastní injektáží se doporučuje použít traso-vápennou maltu, např. Oxal SM TK. Vlastní injektáž se doporučuje nízkotlaká (tlak do 5–7 bar) pomocí injektážních pakrů vložených do předvrtaných otvorů.

V případě přípravy injektážních směsí in situ se doporučuje použití vápenocementové směsi (v poměru 2 : 1, hydraulické vápno : bílý cement 52,5 R) s obsahem písku 6–8 dílů. Zrnitost plniva a hustota směsi je potřeba upravit

vazného trámu. Nová krytina byla provedena v 80. letech minulého století na porušený a neopravený krov napadený dřevokaznými činiteli. Podle dříve provedeného mykologického průzkumu byla většina prvků krovu zařazena do kategorie C-D-E, což dle legendy odpovídá oslabení průřezů napadených dřevěných prvků o více než 30 %. Jako nevhovující a špatný byl vyhodnocen stav pozednic a na ně navazujících prvků (konce krokví, námětky, vazné trámy). Poruchy byly zjištěny zejména v oblasti pozednic a souvisejících částí krovu. Jedná se o prvky uložené na zdivu, popř. do zdiva. Střední podvlak nad vaznými trámy byl v místě zhlaví (uložení do zdiva) zcela narušený. Lze tedy oprávněně předpokládat, že až do doby, kdy byla provedena oprava konstrukce krovu, tj. počátku 21. století, byla část vodorovné složky výslednice reakce krokví přenášena do pozednic v důsledku nedostatečné tuhosti narušeného systému vazných trámů, včetně selhání podvlaku apod., vnášena do obvodového zdiva. V tomto stádiu zatížení zdiva jižní stěny, tj. při nedostatečném zachycení vodorovné síly od krovu, mohla tahová napětí ve zdivu jižní stěny dosahovat hodnot, které ohrožovaly její stabilitu. Po následné sanaci a zpevnění krovové konstrukce lze předpokládat plnou funkci vazného trámu a zajištění stability jižní stěny.

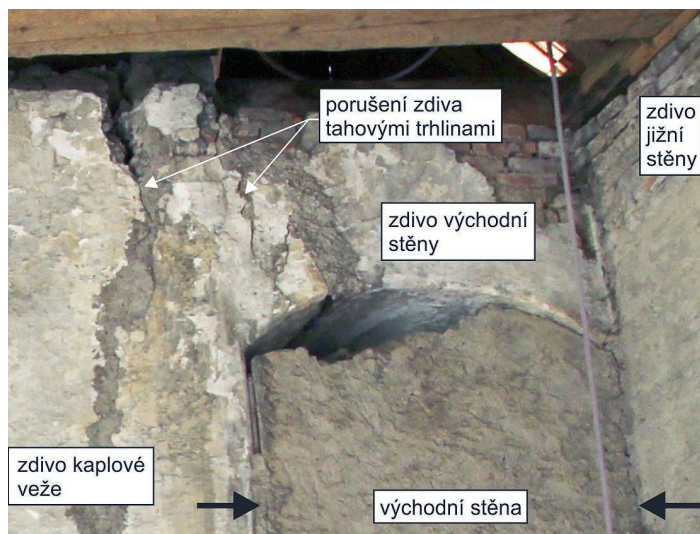
13 V období přibližně necelých 3 let (26 měsíců – od 5/2005 do 9/2007) bylo prováděno měření deformetrických, klinometrických a konvergenčních (INSET) deformací a pohybů zdiva kaplové věže, spojovacího křídla a donjonu, včetně měření teplot. Podle informací, které byly zpracovatelům tohoto článku sděleny ústně, nebyly zjištěny žádné výrazné pohyby a deformace sledovaného zdiva. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozmezí několika desetin mm kolem původní hodnoty. U žádného měřicího bodu nebyl prokázán nárůst odchylek v čase. Přesto byla v rámci vyhodnocení výsledků měření konstatována jistá závislost naměřených hodnot na ročním období, tedy na teplotě a vlhkosti.

■ Poznámky

12 Jak ukázala teoretická analýza napjatosti a deformace (vychýlení) jižní stěny, může být příčinou narušení jižní stěny ve 3. podlaží vodorovná síla od nedostatečně funkčního



11



12



13

Obr. 11. Hrad Bečov, narušení jižní stěny vodorovnou tahovou trhlinou, pohled z interiéru. Foto: autoři článku, 2016.

Obr. 12. Hrad Bečov, trhliny oddělující východní stěnu od kaplové věže (3. podlaží). Foto: autoři článku, 2016.

Obr. 13. Hrad Bečov, krov spojovacího křídla, stav po rekonstrukci. Foto: autoři článku, 2017.

Závěr

Na základě vizuální prohlídky, provedených analýz a hodnocení lze stávající stav označit jako stabilizovaný a stávající trhliny jako trhliny pasivní. S ohledem na tuto skutečnost lze doporučit v souladu s požadavky památkové péče jako základní opatření pro obnovu a restauraci zdiva jižní a východní stěny injektáž.¹⁵

vat dle šířky injektovaných trhlín. Před injektáží je nutné uzavřít (utěsnit) trhliny na povrchu zdiva. Aplikaci se doporučuje provádět nízkotlakým způsobem (např. pomocí ručních aplikátorů) do předem připravených otvorů.

V průběhu injektáže je nutné průběžně kontrolovat míru proinjektování zděné konstrukce (např. pomocí sousedních injektážních otvorů, ze kterých injektážní látka vytéká).¹⁴

■ Poznámky

14 Probíhající oprava kamenných konstrukcí spojovacího křídla, kaplové věže a donjonu je realizována společností Terrigena Art, s. r. o. pod vedením MgA. Václava Štochla.

15 Otázkou však zůstává již zmíněná odezva kamenného zdiva jižní a východní stěny na dynamické účinky způsobené občasnými projevy přírodní seismicity (seismické roje), popř. technickou seismicitou. Z tohoto hlediska doporučují zpracovatelé článku trvalé sledování vybraných měřících bodů osazených na jednotlivých objektech (kaplová věž – spojovací křídlo – donjon).