

Městské hradby v Českém Brodě

Stanovení obsahu vlhkosti a vodorozpustných solí

Objekt: Městské hradby v Českém Brodě

Zadání průzkumu:

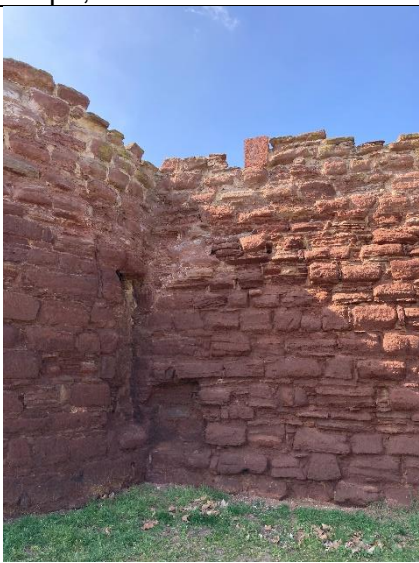
- stanovení obsahu vlhkosti a vodorozpustných solí
- identifikace výkvětů solí
- stanovení hygroskopické nasákavosti

Místa odběru vzorků:



Obr.1. Označení míst odběru na hradbách – osy A,B,C a D

Vzorek	Popis	Foto místa odběru
Bastion, vnitřní strana, severně od vstupu; osa A a B		
A1/1	Spára, výška = 30 cm; hloubka = 0-2 cm	
A1/2	Spára, výška = 30 cm; hloubka = 2-5 cm	
A1/3	Spára, výška = 30 cm; hloubka = 5-10 cm	
A2/1	Spára, výška = 130 cm; hloubka = 0-2 cm	
A2/2	Spára, výška = 130 cm; hloubka = 2-5 cm	
A2/3	Spára, výška = 130 cm; hloubka = 5-10 cm	
B1/1	Kámen, výška = 30 cm; hloubka = 0-2 cm	
B1/2	Kámen, výška = 30 cm; hloubka = 2-5 cm	
B1/3	Kámen, výška = 30 cm; hloubka = 5-10 cm	
B2/1	Kámen, výška = 130 cm; hloubka = 0-2 cm	

Vzorek	Popis	Foto místa odběru
Zdivo vedle bastionu, vnější strana, jižně od vstupu; osa C a D		
C1/1	Spára, výška = 30 cm; hloubka = 0-2 cm	
C1/2	Spára, výška = 30 cm; hloubka = 2-5 cm	
C1/3	Spára, výška = 30 cm; hloubka = 5-10 cm	
C2/1	Spára, výška = 160 cm; hloubka = 0-2 cm	
C2/2	Spára, výška = 160 cm; hloubka = 2-5 cm	
C2/3	Spára, výška = 160 cm; hloubka = 5-10 cm	
C3/1	Spára, výška = 290 cm; hloubka = 0-2 cm	
C3/2	Spára, výška = 290 cm; hloubka = 2-5 cm	
C3/3	Spára, výška = 290 cm; hloubka = 5-10 cm	
D1/1	Kámen, výška = 30 cm; hloubka = 0-2 cm	
D1/2	Kámen, výška = 30 cm; hloubka = 2-5 cm	
D2/1	Kámen, výška = 160 cm; hloubka = 0-2 cm	
D2/2	Kámen, výška = 160 cm; hloubka = 2-5 cm	
D3/1	Kámen, výška = 290 cm; hloubka = 0-2 cm	
D3/2	Kámen, výška = 290 cm; hloubka = 2-5 cm	
D V01	Výkvět na kameni; výška = 290 cm; povrch	
D V02	Výkvět na kameni; výška = 290 cm; povrch	

Metody průzkumu:

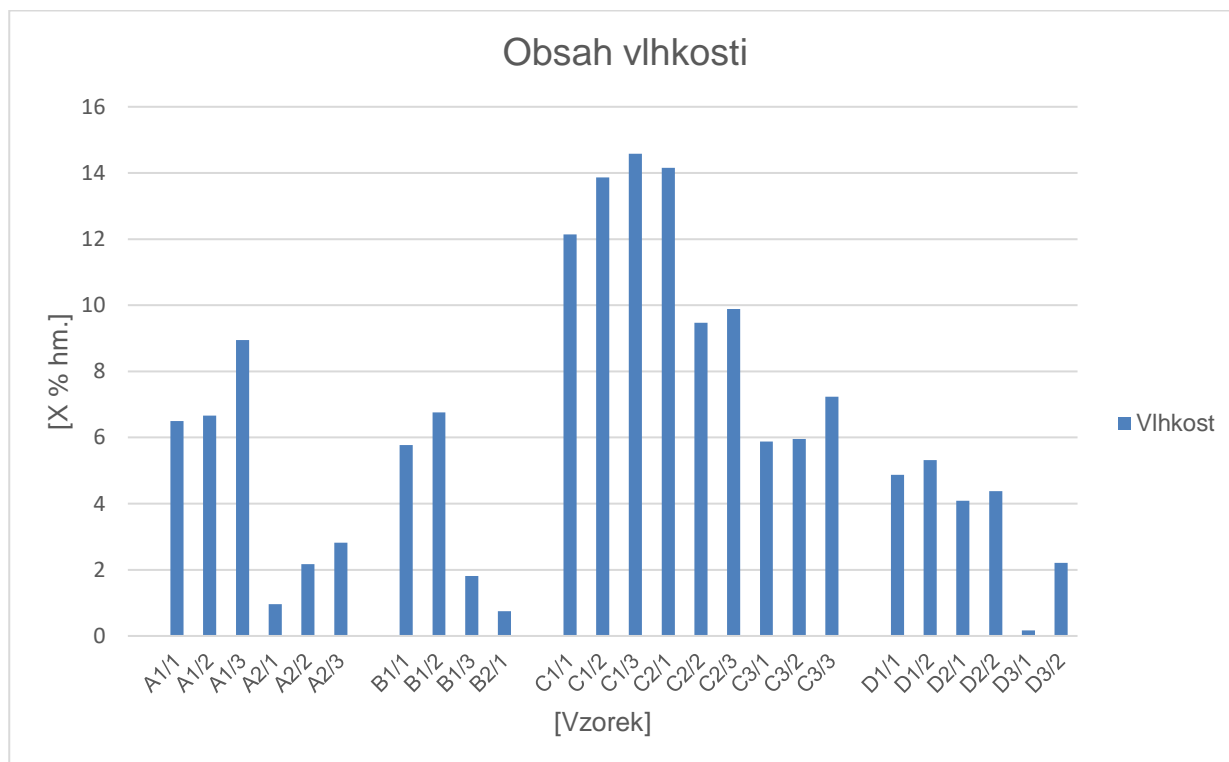
- rastrovací elektronová mikroskopie s energo-disperzní analýzou (elektronový mikroskop Tescan MIRA 3 s analyzátozem Bruker Quantax)
- VIS spektrofotometrie (Beckmann-Coulter DU®720) – stanovení obsahu anionů vodorozpustných solí (sírany, dusičnany, chloridy)
- gravimetrické stanovení obsahu vlhkosti a hygroskopické nasákavosti

Výsledky analýz:

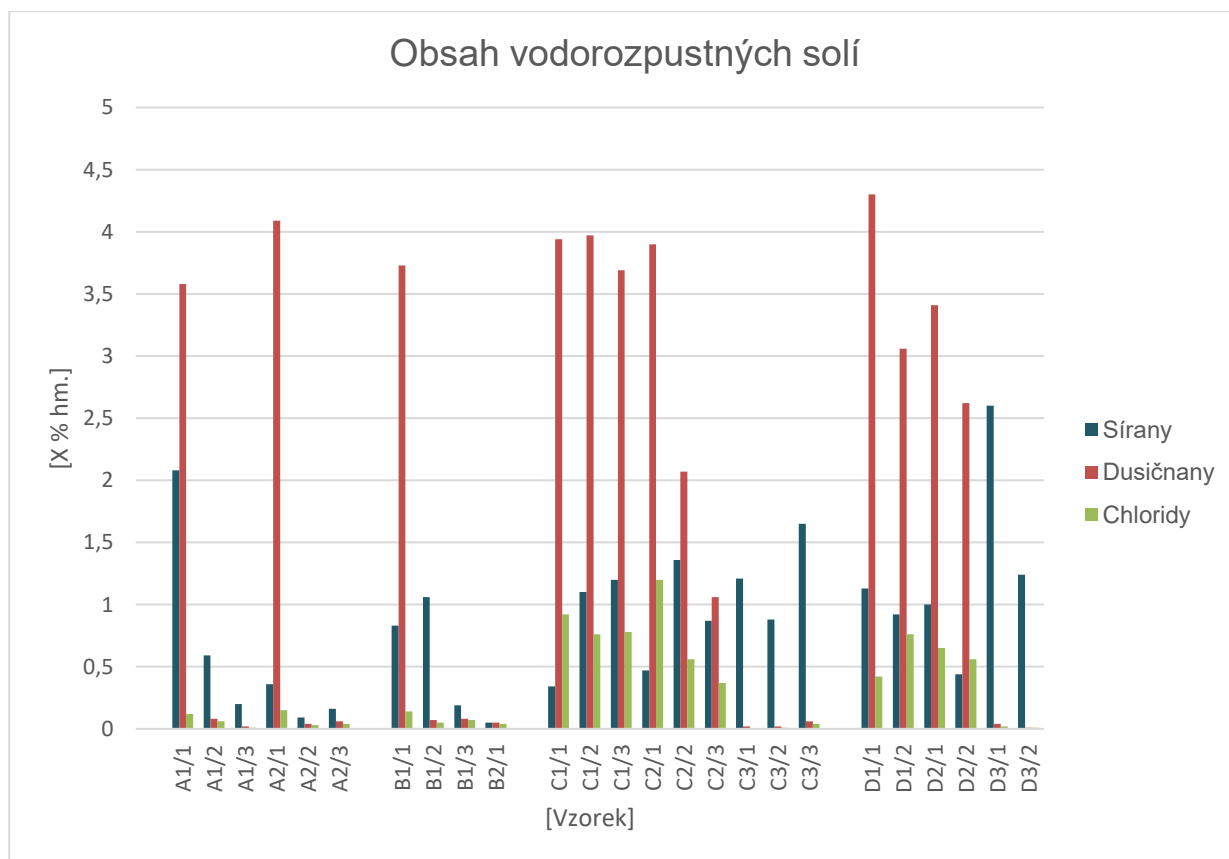
3

Tab. 1. Obsah vlhkosti a vodorozpustných solí ve vzorkách odebraných z jednotlivých os v různých výškách a hloubkách

Vz.č.	Výška / hloubka (cm)	Vlhkost	Sířany		Dusičnany		Chloridy	
		W (%hm.)	X (%hm.)	C (mmol/kg)	X (%hm.)	C (mmol/kg)	X (%hm.)	C (mmol/kg)
A1/1		6,50	2,08	217	3,58	578	0,12	34
A1/2		6,66	0,59	62	0,08	12	0,06	18
A1/3		8,95	0,20	20	0,02	3	0,01	4
A2/1		0,96	0,36	38	4,09	660	0,15	43
A2/2		2,17	0,09	9	0,04	7	0,03	10
A2/3		2,82	0,16	16	0,06	9	0,04	11
B1/1		5,77	0,83	87	3,73	602	0,14	39
B1/2		6,76	1,06	111	0,07	12	0,05	15
B1/3		1,81	0,19	20	0,08	13	0,07	19
B2/1		0,75	0,05	5	0,05	7	0,04	10
C1/1		12,14	0,34	35	3,94	636	0,92	258
C1/2		13,86	1,10	114	3,97	640	0,76	213
C1/3		14,58	1,20	125	3,69	595	0,78	219
C2/1		14,15	0,47	49	3,90	630	1,20	339
C2/2		9,47	1,36	142	2,07	334	0,56	157
C2/3		9,89	0,87	90	1,06	170	0,37	104
C3/1		5,88	1,21	127	0,02	3	0,00	1
C3/2		5,96	0,88	91	0,02	3	0,01	2
C3/3		7,23	1,65	172	0,06	10	0,04	11
D1/1		4,87	1,13	118	4,30	694	0,42	117
D1/2		5,32	0,92	96	3,06	494	0,76	214
D2/1		4,09	1,00	104	3,41	551	0,65	182
D2/2		4,38	0,44	46	2,62	422	0,56	157
D3/1		0,17	2,60	271	0,04	7	0,02	6
D3/2		2,21	1,24	130	0,01	1	0,01	2



Graf 1. Obsah vlhkosti v jednotlivých vzorcích



Graf 2. Obsah vodorozpustných solí v jednotlivých vzorcích (obsah vyjádřen jako hmotnostní koncentrace anionů vodorozpustných solí)

Tab. 3. Hygroskopická nasákavost při různých relativních vlhkostech vzduchu

Vz	Hygroskopická nasákavost	
	T=22°C, RH=60%	T=22°C, RH=90%
	X (%hm.)	X (%hm.)
A1/1	3,43	8,95
A1/2	1,25	4,13
B1/1	3,17	7,99
B1/2	2,08	6,21
C1/1	4,77	9,58
C1/2	4,94	9,13
D1/1	4,02	8,25
D1/2	3,86	8,02

Tab. 3. Prvkové složení výkvětů solí na povrchu kamene

Vz	Výsledky prvkové analýzy REM-EDS
D V01	K, N , Na, (Ca, Mg, Cl, S)
D V02	K, N , Na, (Ca, Mg, Cl, S)

Vyhodnocení:

Už při vizuální obhlídce středověkých městských hradeb je patrné, že zdivo na mnoha místech dochází k erozi a postupným ztrátám původní hmoty. Nejčastějšími projevy poškození je zejména uvolňování spárové malty a v důsledku toho na koruně zdiva i kamenných kvádrů. Velmi časté je také drobení povrchu spár i kamene, lokálně do hloubky několika mm až cm. Dále lze především na vnější straně, která je pod úrovní terénu z vnitřní strany hradeb jsou viditelné rozsáhlejší vlhké „mapy“. Zdivo není izolované vůči vztlínání i průsakům vlhkosti a z jedné strany je ca. do dvou třetin až tří čtvrtin pod úrovní terénu. Na základě charakteru poškození i popsaného kontaktu neizolovaného zdiva s okolním terénem bylo možné při hodnocení vizuálního průzkumu na místě předpokládat, že jednou z významných příčin poškození zdiva by mohlo být působení vodorozpustných solí.

Výsledky analýz ukazují, že spodní části zdiva jsou zatíženy vlhkostí. Vyšší hodnoty byly zcela logicky zjištěny z vnější strany hradeb, tam kde je vnitřní strana pod úrovní terénu. K neustálému zavlhčování zdiva v těchto místech dochází nejen v důsledku vztlínání, ale také prosakováním z půdy na vnitřní straně hradeb.

Zásadním zjištěním z hlediska příčin eroze zdiva hradeb je velmi vysoký až extrémně vysoký obsah vodorozpustných solí. V povrchových vrstvách spár i kamene překračuje jejich koncentrace na mnoha místech hodnoty uváděné normami jako vysoké velmi výrazně. Vysoké hodnoty obsahu solí jsou v tab. 1 zvýrazněny tučným písmem, extrémně vysoké hodnoty červeně. Bílé výkvěty na povrchu jsou tvořeny hlavně dusičnanem draselným. Měření hygroskopické nasákavosti (příjem vlhkosti z okolního vzduchu bez kontaktu s kapalnou vodou) ukázala, že soli při zvýšené relativní vzdušné vlhkosti přispívají k zavlhčení zdiva. Kolísání relativní vzdušné vlhkosti a teploty vede k opakované krystalizaci případně hydrataci solí a tím k postupnému narušování spár i kamene. Vzhledem k velmi vysoké míře zasolení zdiva lze předpokládat, že vodorozpustné soli jsou klíčovou příčinou eroze zdiva. K rozpadu horní části zdiva a jeho koruny zřejmě významně přispívají i tzv. mrazové cykly (mrznutí vody v pórech nebo prasklinách).

Vzhledem k vysokému obsahu solí nelze v současnosti zdivo efektivně konsolidovat, protože účinek zpevnění by měl velmi krátkou životnost a mohl by mít spíše negativní vliv (např. krystalizace solí pod konsolidovanou vrstvou). Ze stejné důvodu je nutné varovat před hydrofobizací zdiva. Účinné snížení obsahu solí a omezení prosakování i vztlínání vlhkosti je základním předpokladem pro konzervaci zdiva hradeb, resp. jeho povrchových vrstev. Současně je nutné vzít v potaz skutečnost, že opatření tohoto typu jsou obvykle velmi zdlouhavá i nákladná. Platí to zejména pro vertikální hydroizolaci zdiva ze zadní strany a redukci obsahu solí odsolováním.

Litomyšl, 10. 04. 2022

Ing. Karol Bayer

Příloha: Orientační hodnocení míry zavlhnutí a zasolení

1. Orientační hodnocení vlhkosti (platí pro cihelné zdivo nebo vápennou maltu) podle ČSN P 73 0610: Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva.

Vlhkost zdiva (% hm.)	Hodnocení vlhkosti
< 3	Velmi nízká
3-5	Nízká
5-7,5	Zvýšená
7,5-10	Vysoká
> 10	Velmi vysoká

2. Orientační hodnocení míry zasolení podle rakouské normy Önorm B 3355-1

Hodnocení stupně zasolení	Sírany (%hm.)	Chloridy (%hm.)	Dusičnany (%hm.)
Nejsou nutná žádná opatření	< 0,10	< 0,03	< 0,05
Je nutné zvážit dílčí opatření	0,10 – 0,25	0,03 – 0,10	0,05 – 0,15
Opatření jsou nezbytná	> 0,25	> 0,10	> 0,15