

Workshop projektu NAKI II, Brno, 20. 9. 2019

**Cihly v historických objektech a možnosti jejich náhrady,
dosavadní výsledky probíhajícího výzkumu projektu NAKI II
v oblasti materiálové analýzy historických cihel**

Vzorový příklad výběru cihel pro obnovu památkově chráněného mostu

doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D., Mgr. Petr Holub

Přednáška je realizována v rámci projektu Projekt NAKI II DG18P02OVV068

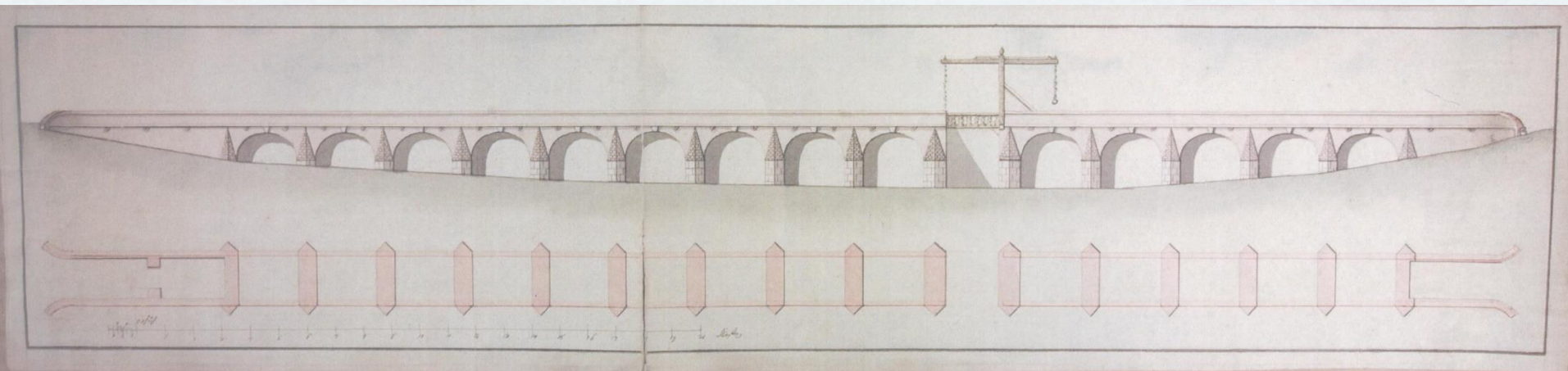
„Komplexní diagnostika pálených zdících prvků historických objektů z pohledu stáří, původu a fyzikálně-mechanických vlastností v závislosti na vlhkosti, a jejich náhrada v historických objektech“

Barokní most na ostrov Portz



MZA, F18, mapa 12

MZA, F18, mapa 107











Náhrada a doplnění chybějících cihel

Porovnávání vlastností:

- 1) Původních cihel ze 17. století, značených „N“
- 2) Náhradních cihel z konce 19. století (z „bouraček“)
- 3) Náhradních cihel nově vyrobených.

Požadována zejména mrazuvzdornost, dále pevnost

Původní cihly:

- 17. století, „N“, odlišný formát 309 x 161 x 64 mm (pravděpodobně 12½ x 6½ x 2½ moravského palce!);
- Vizuálně velmi kvalitní,
- zkoušeno 6 + 6 ks (zmrazované, srovnávací).



A. Výsledky zkoušek – původní cihly „Nikolsburg“ 17. stol.

Rozměry:

- 309 x 161 x 64 mm;

Objemová hmotnost:

- 1600 kg/m³;

Nasákavost:

- 16,6 %;



Rozptyl všech hodnot malý
(na dobu vzniku)

Tab.1 Rozměry,objemová hmotnost a nasákavost cihel

Vzorek č.	Šířka w_u	Výška h_u	Délka l_u	Objemová hm. $\rho_{d,u}$	Nasákavost NV
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[%]
N 1	156,7	64,8	306,2	1546	16,9
N 2	161,7	64,0	309,5	1622	15,4
N 3	164,1	63,0	307,8	1576	17,2
N 4	163,2	65,5	313,2	1582	16,0
N 5	164,6	62,3	308,7	1591	17,1
N 6	155,5	61,5	307,9	1641	16,6
N 7	164,5	61,0	312,1	1602	17,0
N 8	159,5	65,2	308,2	1638	15,8
N 9	155,3	62,0	308,2	1598	16,2
N 10	163,1	63,1	309,0	1599	16,5
N 11	161,8	65,2	304,9	1617	15,9
N 12	155,5	66,8	307,7	1630	18,1
Průměr	161	64	309	1600	16,6
<i>min</i>	<i>155</i>	<i>61</i>	<i>305</i>	<i>1546</i>	<i>15,4</i>
<i>max</i>	<i>165</i>	<i>67</i>	<i>313</i>	<i>1641</i>	<i>18,1</i>

A. Výsledky zkoušek – původní cihly „Nikolsburg“ 17. stol.

Rozdělení cihel:

- 2 srovnatelné skupiny
- Pořadí podle příčných rezonančních frekv.
- Hodnoty podobné



Tab.2 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel - vysušený stav

Vzorek č.	0 cyklů, vysušený stav			Pořadí
	F_L [Hz]	F_F [Hz]	F_T [Hz]	podle F_F
N 1	4441	1634	1851	4
N 2	4560	1665	1848	3
N 3	4135	1478	1769	10
N 4	3771	1477	1670	11
N 5	4519	1586	1801	7
N 6	4363	1584	1804	8
N 7	4337	1529	1733	9
N 8	4550	1688	1886	1
N 9	4346	1413	1732	12
N 10	4455	1613	1819	6
N 11	4452	1634	1801	5
N 12	4293	1688	1900	2

A. Výsledky zkoušek – původní cihly „Nikolsburg“ 17. stol.

Výsledky NDT rezonančních zkoušek před a po zmrazování

Tab.3 *Vlastní frekvence kmitání vzorků a relativní dynamické moduly po 25 zmrazovacích cyklech*

Vzorek č.	M0 cyklů, nasycené			M25 cyklů, nasycené			Relativní dynamický modul RDM [%]		
	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	$RDM(L)$	$RDM(F)$	$RDM(T)$
N 1	4055	1482	1672	4030	1473	1662	98,8	98,8	98,8
N 3	3681	959	1259	3203	957	1243	75,7	99,7	97,5
N 5	4090	1403	1610	4046	1384	1588	97,9	97,3	97,3
N 7	3962	1392	1577	3938	1379	1560	98,8	98,1	97,9
N 10	4076	1473	1652	4057	1463	1645	99,1	98,6	99,2
N 12	3909	1520	1713	3873	1503	1696	98,2	97,8	98,0

Poznámka: Pokud je relativní dynamický modul RDM nižší než 85 %, pak je mrazuvzdornost diskutabilní, při poklesu RDM pod 75 % vzorek jednoznačně nevyhovuje na daný počet cyklů mrazuvzdornosti.

A. Výsledky zkoušek – původní cihly „Nikolsburg“ 17. stol.

Tab. 4A Pevnost v tahu ohybem zdících prvků "S" srovnávacích

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 2	163,3	63,4	7,87	4,31
N 4	162,2	64,3	4,06	2,18
N 6	156,2	61,6	6,37	3,87
N 8	159,2	64,3	7,07	3,87
N 9	154,3	62,1	6,05	3,67
N 11	162,9	65,8	7,64	3,90
Průměr				3,60

Tab. 5A Pevnost v tlaku zdících prvků srovnávacích "S"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 2	151,0	154,1	564,7	24,3
N 4	137,8	153,2	404,3	19,2
N 6	155,2	154,7	508,0	21,2
N 8	150,7	158,4	603,0	25,3
N 9	155,8	169,6	626,7	23,7
N 11	149,9	159,9	535,0	22,3
Průměr				22,6

Tab. 4B Pevnost v tahu ohybem zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 1	155,0	59,9	8,25	5,34
N 3	165,0	60,9	1,60	0,94
N 5	159,4	60,9	6,90	4,20
N 7	163,5	60,9	8,85	5,25
N 10	162,4	60,4	9,00	5,47
N 12	156,7	68,8	8,98	4,36
Průměr				4,30

Tab. 5B Pevnost v tlaku zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 1	156,1	136,7	524,2	24,6
N 3	146,5	117,7	456,6	26,5
N 5	164,7	156,1	775,0	30,1
N 7	155,1	157,0	584,0	24,0
N 10	154,2	138,2	530,7	24,9
N 12	154,6	133,6	383,4	18,6
Průměr				24,8

Cihly náhradní, staré:

- Konec 19. století, „ZV“, formát 284x138x65 mm (metrický, u části smrštění výpalem);
- Vizuálně i tvarově velmi různorodé kvality;
- Zkoušeno 6+6 ks (zmrazované, nezmrazované)



B. Výsledky zkoušek – náhradní cihly „Olomouc“ 19. stol.

Rozměry:

- 284 x 138 x 65 mm;

Objemová hmotnost:

- 1780 kg/m³;

Nasákavost: 14,1 %;



Rozptyl všech hodnot značný
(i s ohledem na dobu vzniku)

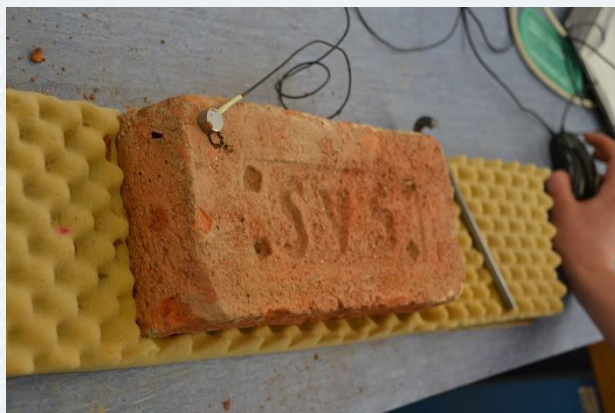
Tab.1 Rozměry, objemová hmotnost ve stavu vysušeném a nasákavost cihel

Vzorek č.	Šířka w_u	Výška h_u	Délka l_u	Objemová hm. $\rho_{d,u}$	Nasákavost hmotn. NV
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[%]
O 1	140,3	70,0	288,1	1655	18,2
O 2	131,5	62,8	282,8	1739	16,5
O 3	150,4	65,5	297,0	1591	17,3
O 4	142,8	67,7	286,5	1645	16,2
O 5	133,6	64,5	274,9	2013	6,8
O 6	135,8	67,2	287,5	1658	19,4
O 7	137,6	63,2	272,6	2002	8,2
O 8	142,5	64,8	288,2	1634	18,9
O 9	127,5	58,7	275,8	2193	2,1
O 10	137,2	59,6	286,4	1823	15,5
O 11	141,1	62,4	282,7	1753	12,8
O 12	139,5	67,5	289,6	1655	17,9
Průměr	138	65	284	1780	14,1
<i>min</i>	128	59	273	1591	2,1
<i>max</i>	150	70	297	2193	19,4

B. Výsledky zkoušek – náhradní cihly „Olomouc“ 19. stol.

Rozdělení cihel:

- 2 srovnatelné skupiny
- Pořadí podle příčných rezonančních frekv.
- Hodnoty rozdílné



Tab.2 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel - vysušený stav

Vzorek č.	0 cyklů, vysušený stav			Pořadí
	F_L [Hz]	F_F [Hz]	F_T [Hz]	podle F_F
O 1	4393	1770	1986	3
O 2	4417	1601	1893	5
O 3	3583	1380	1530	9
O 4	3929	1480	1830	7
O 5	3753	1018	2056	11
O 6	1724	687	887	12
O 7	6378	2573	2735	2
O 8	3829	1543	1717	6
O 9	6706	2667	3060	1
O 10	3612	1293	1611	10
O 11	4939	1705	3129	4
O 12	3589	1449	1661	8

B. Výsledky zkoušek – náhradní cihly „Olomouc“ 19. stol.

Výsledky NDT rezonančních zkoušek před a po zmrazování

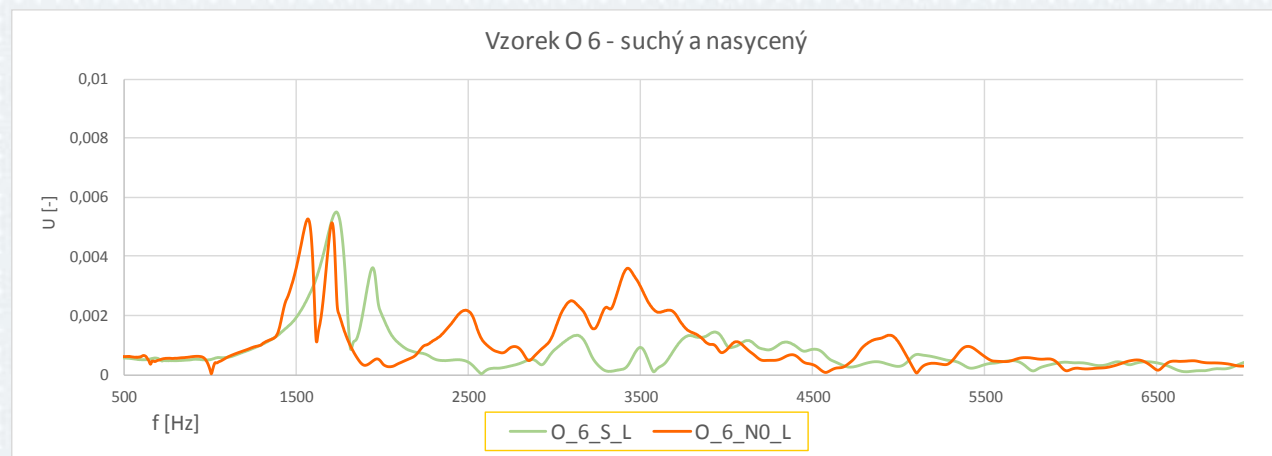
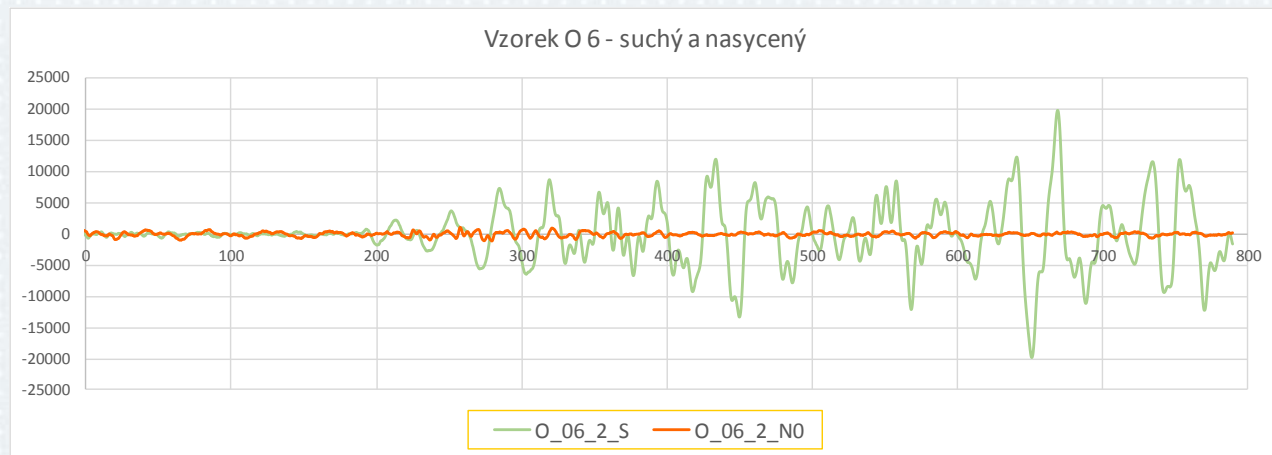
Tab.3 *Vlastní frekvence kmitání vzorků a relativní dynamické moduly po 25 zmrazovacích cyklech*

Vzorek č.	M0 cyklů, nasycené			M25 cyklů, nasycené			Relativní dynamický modul RDM [%]		
	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	$RDM(L)$	$RDM(F)$	$RDM(T)$
O 2	3993,0	1445,0	1706,0	3848	1408	1651	92,9	94,9	93,7
O 3	3225,0	1233,0	1373,0	3150	1208	1343	95,4	96,0	95,7
O 6	1568,0	643,0	772,0	/	165	267	0,0	6,6	12,0
O 9	6307,0	2463,0	2824,0	6268	2446	2808	98,8	98,6	98,9
O 11	4431,0	1530,0	1686,0	4370	1500	1658	97,3	96,1	96,7
O 12	3116,0	1237,0	1429,0	3051	1208	1397	95,9	95,4	95,6

Poznámka: Pokud je relativní dynamický modul RDM nižší než 85 %, pak je mrazuvzdornost diskutabilní, při poklesu RDM pod 75 % vzorek jednoznačně nevyhovuje na daný počet cyklů mrazuvzdornosti.

B. Výsledky zkoušek – náhradní cihly „Olomouc“ 19. stol.

Vzorek O6 –
indicie již před
zmrazováním
(ultrazvuk,
rezonance)



B. Výsledky zkoušek – náhradní cihly „Olomouc“ 19. stol.

Tab. 4A Pevnost v tahu ohybem a v tlaku zdících prvků "S" srovnávacích

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 1	140,5	72,9	7,78	3,75
O 4	141,9	68,6	3,12	1,68
O 5	133,2	68,5	4,99	2,87
O 7	137,5	65,9	15,80	9,53
O 8	142,0	68,8	5,00	2,68
O 10	135,8	63,4	2,55	1,68
Průměr				3,70

Tab. 5A Pevnost v tlaku zdících prvků srovnávacích "S"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 1	143,0	133,6	338,8	17,7
O 4	135,3	118,9	253,6	15,8
O 5	129,4	115,6	368,1	24,6
O 7	124,1	107,8	358,0	26,8
O 8	137,4	127,7	328,5	18,7
O 10	150,6	137,4	271,8	13,1
Průměr				19,5

Tab. 4B Pevnost v tahu ohybem a v tlaku zdících prvků zmrazovaných "M

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 2	133,2	59,7	4,85	3,68
O 3	149,3	63,3	5,40	3,25
O 6	139,9	62,2	0,12	0,08
O 9	125,4	60,6	11,25	8,79
O 11	142,7	55,1	5,55	4,61
O 12	144,2	66,7	3,00	1,68
Průměr				3,70

Tab. 5B Pevnost v tlaku zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 2	135,1	131,6	331,1	18,6
O 3	151,3	146,4	304,7	13,8
O 6	141,2	101,0	91,8	6,4
O 9	131,1	117,2	610,7	39,7
O 11	142,1	104,9	330,5	22,2
O 12	144,0	133,3	262,7	13,7
Průměr				19,1

Náhrada a doplnění chybějících cihel

Cihly náhradní, nové:

- Současná výroba, dodal dodavatel stavby;
- Vizuálně podobné, vypálené zřejmě na nižší teplotu;
- Zkoušeno 6+6 ks (zmrazované, nezmrazované)



C. Výsledky zkoušek – náhradní cihly nové, současné

Rozměry:

- 299 x 149 x 61 mm;

Objemová hmotnost:

- 1690 kg/m³;

Nasákavost:

- 18,0 %;



Rozptyl všech hodnot malý

Tab.1 Rozměry, objemová hmotnost a nasákavost cihel

Vzorek č.	Šířka w_u	Výška h_u	Délka l_u	Objemová hm. $\rho_{d,u}$	Nasákavost NV
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[%]
Š 1	149,6	61,2	300,3	1756	16,0
Š 2	148,4	61,6	297,8	1741	17,1
Š 3	149,3	60,6	299,0	1671	17,7
Š 4	149,3	63,1	299,5	1666	18,1
Š 5	148,7	62,4	299,1	1743	17,5
Š 6	148,9	60,7	298,7	1659	19,5
Š 7	148,6	60,8	299,1	1712	17,0
Š 8	148,2	62,6	299,5	1681	18,0
Š 9	148,6	61,7	299,5	1705	16,4
Š 10	148,9	60,6	299,8	1658	19,9
Š 11	149,2	59,6	299,2	1684	18,9
Š 12	149,6	62,0	298,9	1632	19,8
Průměr	149	61	299	1690	18,0
<i>min</i>	<i>148</i>	<i>60</i>	<i>298</i>	<i>1632</i>	<i>16,0</i>
<i>max</i>	<i>150</i>	<i>63</i>	<i>300</i>	<i>1756</i>	<i>19,9</i>

C. Výsledky zkoušek – náhradní cihly nové, současné

Rozdělení cihel:

- 2 srovnatelné skupiny
- Pořadí podle příčných rezonančních frekv.
- Hodnoty podobné



Tab.2 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel - vysušený stav

Vzorek č.	0 cyklů, vysušený stav			Pořadí
	F_L [Hz]	F_F [Hz]	F_T [Hz]	podle F_F
Š 1	3494	1322	1446	6
Š 2	3165	1219	1338	12
Š 3	3500	1311	1441	7
Š 4	3668	1414	1565	3
Š 5	3397	1311	1446	9
Š 6	3798	1392	1538	1
Š 7	3284	1224	1354	11
Š 8	3268	1295	1435	10
Š 9	3754	1457	1586	2
Š 10	3489	1284	1403	8
Š 11	3641	1365	1484	5
Š 12	3624	1408	1554	4

C. Výsledky zkoušek – náhradní cihly nové, současné

Výsledky NDT rezonančních zkoušek před a po zmrazování

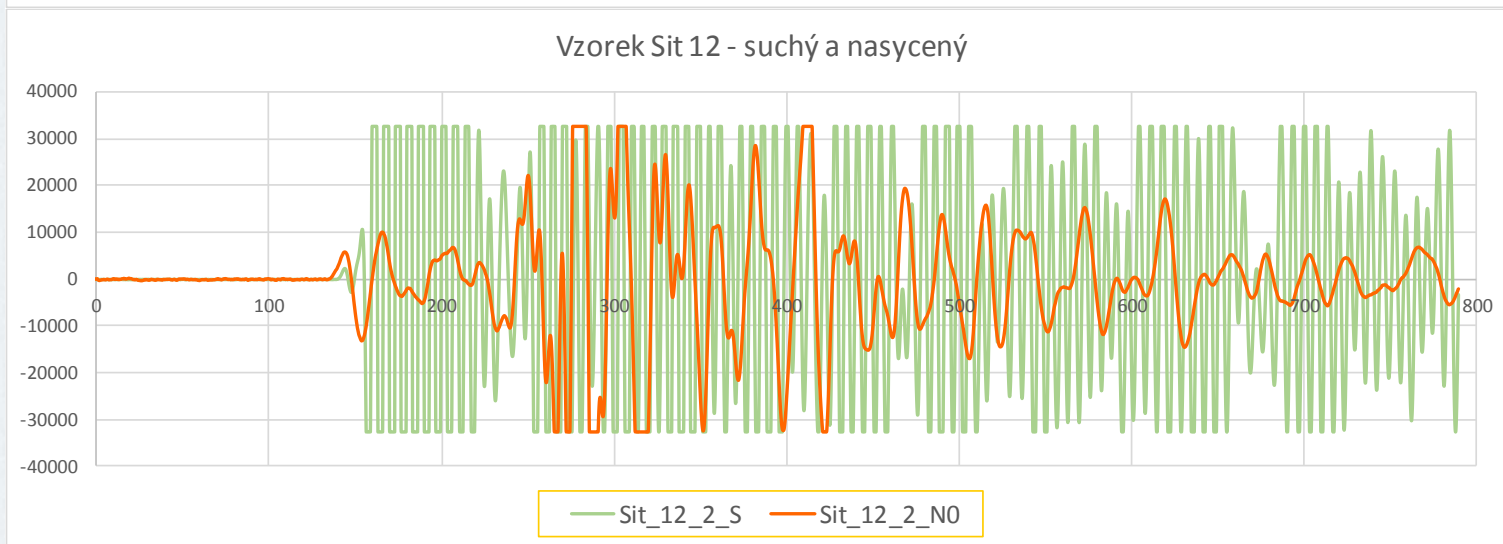
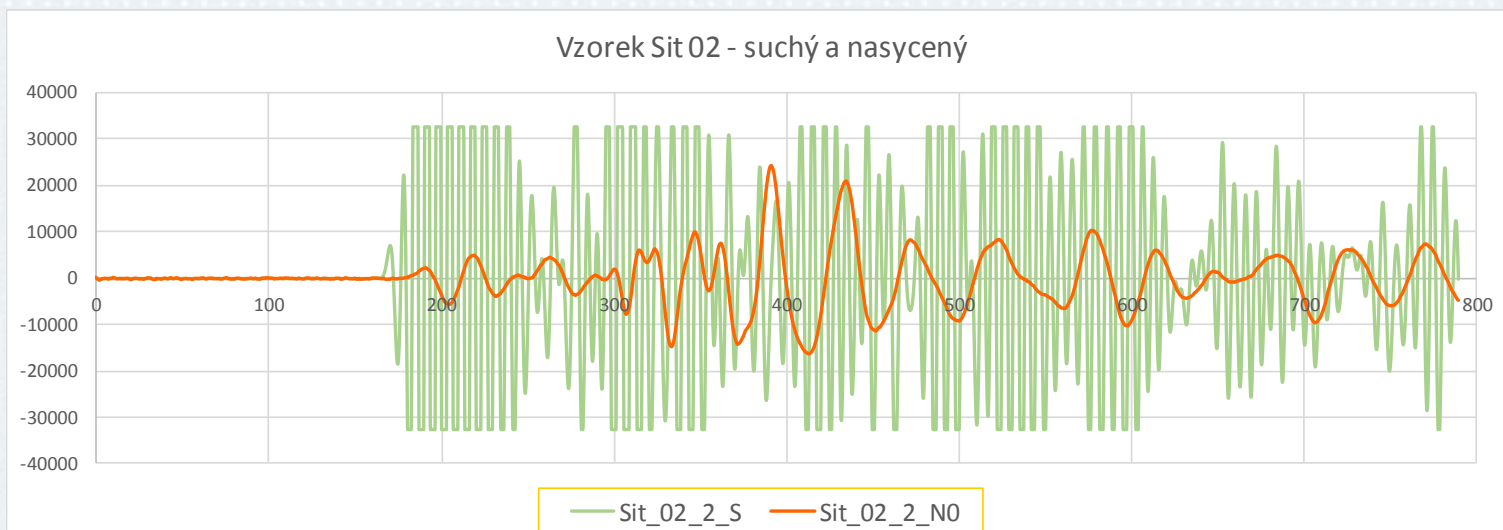
Tab.3 *Vlastní frekvence kmitání vzorků a relativní dynamické moduly po 25 zmrazovacích cyklech*

Vzorek č.	M0 cyklů, nasycené			M25 cyklů, nasycené			Relativní dynamický modul RDM [%]		
	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	$RDM(L)$	$RDM(F)$	$RDM(T)$
Š 2	2422	918	1023	1856	758	858	58,7	68,2	70,3
Š 5	2925	1121	1235	2248	960	1034	59,1	73,3	70,1
Š 6	3754	1352	1499	3545	1321	1491	89,2	95,5	98,9
Š 10	3473	1287	1401	3335	1192	1288	92,2	85,8	84,5
Š 11	3388	1274	1378	3383	1259	1376	99,7	97,7	99,7
Š 12	3489	1365	1489	3420	1321	1428	96,1	93,7	92,0

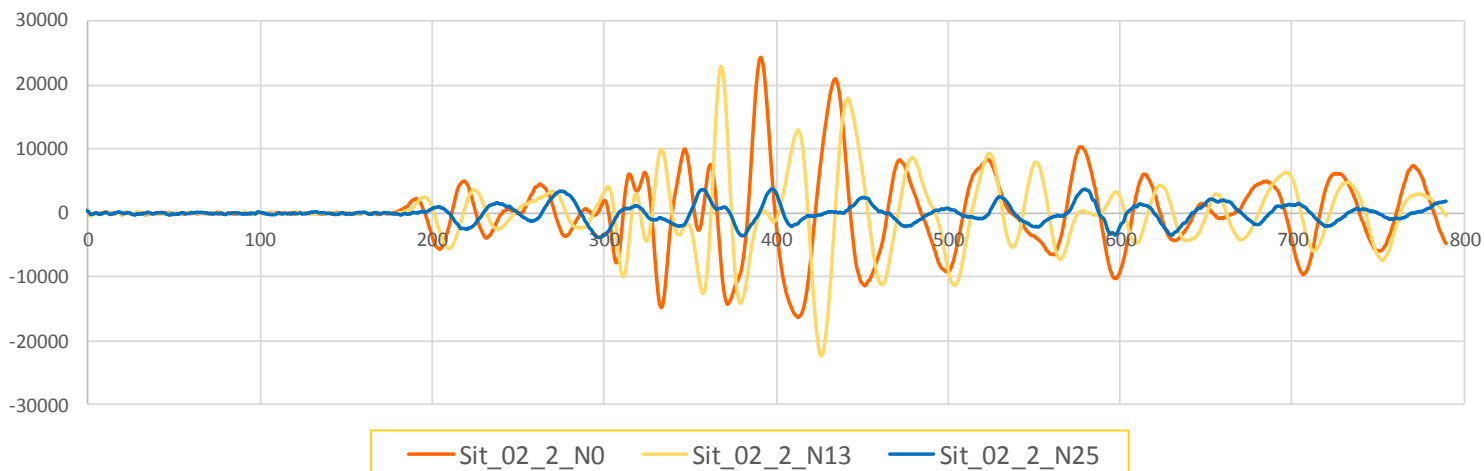
Poznámka: Pokud je relativní dynamický modul RDM nižší než 85 %, pak je mrazuvzdornost diskutabilní, při poklesu RDM pod 75 % vzorek jednoznačně nevyhovuje na daný počet cyklů mrazuvzdornosti.

C. Výsledky zkoušek – náhradní cihly nové, současné

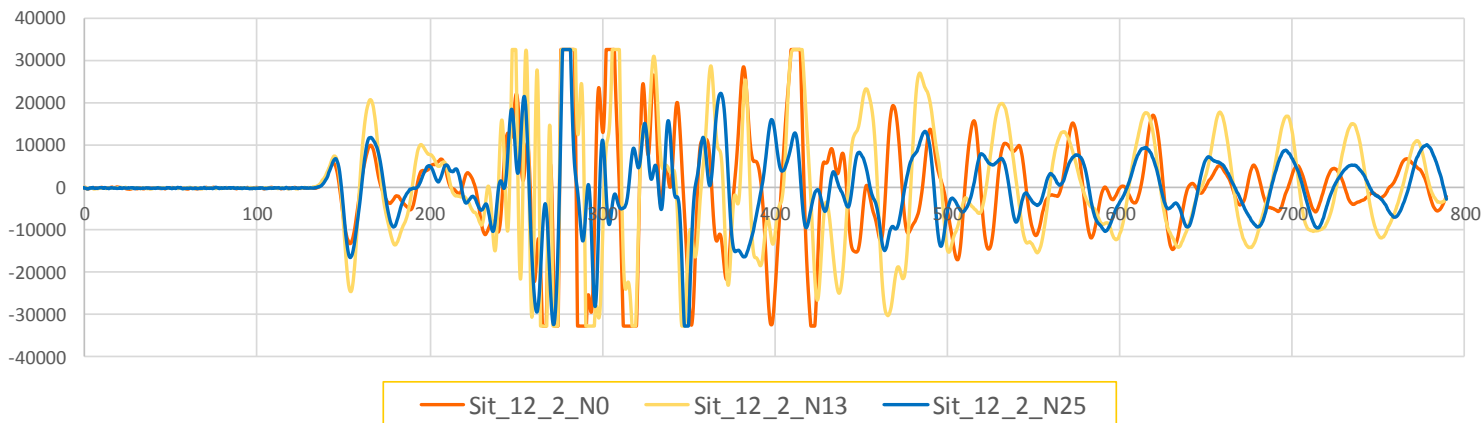




Vzorek Sit 02 - nasycený N0, N13, N25 (cyklů)



Vzorek Sit 12 - nasycený N0, N13, N25 (cyklů)



C. Výsledky zkoušek – náhradní cihly nové, současné

Výborná NDT predikce odolnosti cihel proti zmrazování:

- Pořadí cihel **Š2** (12.), **Š5** (9.), **Š10** (8.), Š11 (5.) Š12 (4.) a Š6 (1.)
- Po M 25 poškozené **pouze cihly Š2 a Š5**, počínající poškození Š10
- Tzn., že ze souboru podobných cihel lze vybrat lepší a horší

Tab. Porovnání F_F ve vysušeném a nasyceném stavu

Vzorek č.	F_F [Hz]		
	S (0)	N (0)	N - S
Š 2	1219	918	-301
Š 5	1311	1121	-190
Š 6	1392	1352	-40
Š 10	1284	1287	3
Š 11	1365	1274	-91
Š 12	1408	1365	-43

Tab.3 Vlastní frekvence kmitání vzorků a relativní dynamické moduly po 25 zmrazovacích cyklech

Vzorek č.	M0 cyklů, nasycené			M25 cyklů, nasycené			Relativní dynamický modul RDM [%]		
	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	RDM(L)	RDM(F)	RDM(T)
Š 2	2422	918	1023	1856	758	858	58,7	68,2	70,3
Š 5	2925	1121	1235	2248	960	1034	59,1	73,3	70,1
Š 6	3754	1352	1499	3545	1321	1491	89,2	95,5	98,9
Š 10	3473	1287	1401	3335	1192	1288	92,2	85,8	84,5
Š 11	3388	1274	1378	3383	1259	1376	99,7	97,7	99,7
Š 12	3489	1365	1489	3420	1321	1428	96,1	93,7	92,0

Poznámka: Pokud je relativní dynamický modul RDM nižší než 85 %, pak je mrazuvzdornost diskutabilní, při poklesu RDM pod 75 % vzorek jednoznačně nevyhovuje na daný počet cyklů mrazuvzdornosti.

C. Výsledky zkoušek – náhradní cihly nové, současné

Tab. 4A Pevnost v tahu ohybem zdících prvků "S" srovnávacích

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
Š 1	148,9	62,4	4,54	2,82
Š 3	149,3	60,1	7,17	4,79
Š 4	149,0	63,4	7,02	4,22
Š 7	148,4	61,3	6,82	4,40
Š 8	148,0	63,0	9,80	6,01
Š 9	148,8	61,3	8,45	5,44
Průměr				4,60

Tab. 5A Pevnost v tlaku zdících prvků srovnávacích "S"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
Š 1	148,3	143,2	348,2	16,4
Š 3	152,8	141,0	475,3	22,1
Š 4	148,3	138,5	473,6	23,1
Š 7	170,5	146,4	483,5	19,4
Š 8	143,3	147,9	483,0	22,8
Š 9	154,2	147,3	568,7	25,0
Průměr				21,5

Tab. 4B Pevnost v tahu ohybem zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
Š 2	147,1	59,5	3,28	2,27
Š 5	147,2	61,2	3,20	2,09
Š 6	149,2	60,5	5,75	3,79
Š 10	148,7	60,8	6,55	4,29
Š 11	149,0	59,8	6,27	4,24
Š 12	149,5	62,3	6,55	4,06
Průměr				3,50

Tab. 5B Pevnost v tlaku zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
Š 2	144,7	131,4	236,3	12,4
Š 5	147,7	144,4	212,4	10,0
Š 6	148,0	139,5	481,2	23,3
Š 10	148,1	147,5	418,6	19,2
Š 11	150,5	148,7	473,2	21,1
Š 12	147,2	141,0	456,6	22,0
Průměr				18,0

Závěr

Obnova barokního mostu ze 17. stol. na ostrov Portz:

- Pilotní ověření metodiky zkoušení cihelného zdiva při obnově památek;
- Doplnění cca 30.000 chybějících cihel;
- Původní cihly „N“: nepřekonatelné, P 20, M 25 (navíc prověřeno 380 lety za mrazu ve vodě nebo v bahně)
- Cihly náhradní – „z bouraček“: přes počáteční nedůvěru dodán poměrně vhodný soubor, P 15, M 25;
- Cihly náhradní – nová výroba: dodány cihly vypálené na nižší teplotu, P 20, 2 ze 6 nevyhověly na M 25.

Závěr 2

Provedena řada experimentů s cílem definovat **metodiku pro zkoušení cihel určených pro obnovu památek**.

- Požadována mrazuvzdornost, ale co řekne zkoušení 5 cihel ze 100.000 ks (různé stavby, výrobci, výpal, technologie)?
- Vizuální hodnocení – jen částečně úspěšné.
- Důležitý předvýběr pomocí NDT zkoušek (dříve ).
- O trvanlivosti hodně napoví porovnání vysušený x nasycený stav, případně 1. cyklus zmrazování (pojistka viz Bochner).
- Objevila se řada nových otázek a problémů k řešení
- Predikce trvanlivosti nikdy nebude 100%, minimalizace rizik