FORUM / 2021 / ROČ. XI / Č. 1

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY
FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2021 / Vol. XI / No. 1
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:
Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.
Ing. Radka Šefců
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open acces since 2019 available for free
on https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:
Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:
fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2021
ISSN (Online) 2571-4384
ISSN (Print) 1805-0050

TECHNICKÉ MUZEUM V BRNĚ

METODICKÉ CENTRUM KONZERVACE

MONITOROVÁNÍ LÁTEK ZNEČIŠŤUJÍCÍCH OVZDUŠÍ V OBLASTI PEVNOSTNÍCH OBJEKTŮ SLEZSKÉHO ZEMSKÉHO MUZEA

Martin Polášek • Miloš Zapletal

Slezské zemské muzeum

Bc. Martin Polášek je restaurátorem Slezského zemského muzea. Zaměřuje se na konzervaci a restaurování předmětů z materiálů organického původu. Odborně se zabývá preventivní péčí o historické artefakty, metodikou působení škodlivých látek na dlouhodobě deponované muzejní sbírkové předměty a ochranou kulturního dědictví v rámci muzeí a galerií České republiky. (polasek@szm.cz)

Historické objekty čs. opevnění z let 1935–1938 mají v oblasti českého Slezska specifické postavení. Území, do kterého jsou zasazeny, sloužilo po dobu desítek let především pro hospodářské potřeby a samotné objekty, především ty drobné, byly většinou ponechány svému osudu. Malá část opevnění v katastru obce Hlučín-Darkovičky byla však již od 80. let 20. století postupně a v celku rekonstruována jako významná kulturní a krajinotvorná památka. Postupná obnova tohoto areálu stále probíhá a v současnosti je mimo jiné věnována pozornost otázkám komplexní muzejní péče nejen o jednotlivé objekty a prvky opevnění, ale také o předměty, které jsou zde uloženy. Studie prezentuje tento jedinečný muzejní areál a přístupy k jeho kvalitnější preventivní ochraně prostřednictvím monitorování látek znečišťujících ovzduší a následného zpracování dat pro výpočty korozního úbytku historických materiálů.
Klíčová slova: historické objekty čs. opevnění, monitoring látek znečisťujících ovzduší, korozní úbytky materiálů, preventivní péče

MONITORING OF AIR POLLUTANTS IN THE AREA OF BORDER FORTIFICATIONS ADMINISTERED BY THE SILESIAN MUSEUM

Historical objects of the Czechoslovak fortifications from 1935–1938 have a specific position in the region of Czech Silesia. For decades, the area in which they are embedded served mainly for farming and the objects themselves, especially the small ones, were mostly left to their chance. However, a small part of the fortifications in the cadastre of the Hlučín-Darkovičky village has been gradually reconstructed as an important cultural and landscape monument since the 1980s. The gradual restoration of the site is still ongoing, and attention is currently being paid, among other things, to the issues of comprehensive museum care not only for the individual buildings and elements of the fortifications, but also for the objects that are stored in them. The study presents this unique museum site and approaches to better preventive protection through monitoring of air pollutants and subsequent data processing for calculation of corrosion loss of historical materials.
Keywords: historical objects of the Czechoslovak fortofocations, monitoring of air pollutants, corrosion loss of materials, preventive protection

Československé opevnění budované mezi dvěma světovými válkami tvoří v krajině nepřehlédnutelný a jedinečný stavebněhistorický prvek. V České republice se péčí o objekty československého opevnění teoreticky zabývají státní instituce z oblasti vojenské historie a památkové péče, ale prakticky je kompletní péče o tyto objekty v rukou soukromých subjektů, především pak klubů vojenské historie a zapsaných spolků orientovaných na historické vojenství. Jakákoliv spolupráce v památkové, muzejní či jiné oblasti je rozvíjena pouze v rámci spolupráce na konkrétních lokálních projektech bez širší návaznosti. Institucionální spolupráce v současnosti probíhá pouze mezi dvěma komplexy opevnění, kterými jsou Areál čs. opevnění Hlučín-Darkovičky ve správě Slezského zemského muzea a Areál čs. opevnění v Šatově, který spravuje Technické muzeum v Brně. Tyto dva areály je možné klasifikovat jako muzea v přírodě zaměřená na péči o vojensko-technické památky obranné linie československé hranice. Opevnění nebylo svými tvůrci zamýšleno jako esteticky krásný doplněk krajiny, ale jako prvek čistě účelný a typizovaný, bez předem definované kompozice. Stavbou těchto objektů byl významně pozměněn charakter kulturní krajiny pohraničí a v současnosti tak představuje důležitou součást kulturního dědictví, které je nutné chránit ve svém celku. Právě ochrana těchto památek jako celku vnáší do problematiky muzejní preventivní konzervace nový pohled. Nestačí se zabývat pouze standardní péčí a ochranou jednotlivých sbírkových předmětů a historických objektů, ve kterých jsou předměty uloženy. Zásadní je nahlížet na péči o opevnění vcelku, a to nejen na ochranu železobetonových staveb/pevností, bunkrů a řopíků, ale také na ochranu okolní krajiny, krajinného rázu, drobných stavebních prvků, betonových, kovových a krajinných překážek a upravených technických ploch v okolí. Aby bylo možné takovou péči provádět, je důležité vhodné nastavení strategie preventivní konzervace pro konkrétní areál, jehož součástí jsou kvalitní vstupní data získaná průběžným monitorováním klimatických a technických parametrů v okolí památek. Vyhodnocením těchto dat je pak možné získat základní informace o množství znečišťujících látek z ovzduší působících na stavební a výrobní materiály, jejich korozivní potenciál, rychlost přenosu do vnitřního prostředí a degradačním vlivu na jednotlivé materiály.

V této studii je představena metoda sledování environmentální situace v okolí sledovaného areálu a systém monitorování klimatických parametrů, které mají zásadní vliv na degradaci materiálů, ze kterých jsou tvořeny jednotlivé prvky opevnění. Výzkum je prováděn v rámci Areálu čs. opevnění Hlučín-Darkovičky (dále jen AOD) a je součástí dlouhodobého výzkumu monitorování vlivu polutantů na sbírkové předměty Slezského zemského muzea. Pro hodnocení vlivu látek znečišťujících ovzduší a klimatických parametrů na materiály opevnění byly využity metodické postupy doporučené mezinárodním programem Mapování účinků znečištěného ovzduší na materiály (UN ECE ICP effects on materials, including historic and cultural monuments [Knotková – Kreislová, 2000]), jehož experimentální výstupy nacházejí uplatnění v oblasti ochrany kulturního dědictví a v různých technických a technologických oborech [Watt a kol., 2009]. Zároveň jsou testovány standardní modely pro výpočet korozních úbytků pro požití na stanovení korozních úbytků u historických materiálů.

Obr. 1 *Pěchotní srub MO-S 18 „Obora“ v typickém umístění na okraji lesa (zdroj: autor) / Infantry Cabin MO-S 18 „Obora“ in a typical location at the edge of a forest*

Obr. 2 *Pěchotní srub MO-S-19 „Alej“ krytý uměle vybudovaným vyvýšeným valem (zdroj: autor) / Infantry Cabin MO-S-19 „Alej“ covered by an artificially built elevated earthen rampart*

Obr. 3 *Protitankový příkop s následnou drátěnou protipěchotní překážkou v blízkosti Pěchotního srubu MO-S-19 „Alej“ v AOD (zdroj: autor) / Anti-tank trench with a subsequent wire anti-infantry barrier near the Infantry Cabin MO-S-19 „Alej“ in the area of the Czechoslovak border fortifications Hlučín-Darkovičky*

Obr. 4 *Hradba ocelových rozsocháčů v blízkosti Pěchotního srubu MJ-S 3 „Zahrada“ v Šatově (zdroj: autor) / A wall of steel of „Czech Hedgehogs“ near the Infantry Cabin MJ-S 3 „Zahrada“ in Šatov*

SLEDOVANÉ TYPY OPEVNĚNÍ

Při výstavbě opevnění nebylo jasně definováno, jakým způsobem se mají stavby komponovat do okolní krajiny. Plánovači opevnění se řídili logickými postupy, které odpovídaly danému místu, reliéfu a typu krajiny, a především konkrétními potřebami pro obranu okolních objektů a lokalit. Při přípravě plánů opevňovacích prací byly zohledněny vhodné charakteristiky krajiny a geomorfologické útvary, které byly špatně dostupné, a tím pádem ideální pro obranu. Linie opevnění často vede tak, aby bylo využito co nejvíce přírodních překážek, především účinných proti tankům [Svoboda – Lakosil – Čermák, 2011]. Prochází tak skrze skalnaté útvary, vrcholy kopců, ostrohy, vodní toky a různé drobné náhorní plošiny a přírodní vyvýšeniny. V obecné rovině je patrný vztah mezi objektem a reliéfem, objektem a krajinným pokryvem a použitým typem objetu a reliéfu [Slabochová, 2014]. Díky velkému množství variant objektů lehkého opevnění se tak dařilo vybudovat dostatečné palebné pokrytí i v tom nejkomplikovanějším terénu. V otevřené krajině bylo často využito umístění opevnění na hraně lesa, jelikož se snadno maskovalo a poskytovalo výborný výhled do okolní krajiny, jako to je i v případě námi sledovaného AOD.

Pokud odhlédneme od nejviditelnějších prvků opevnění, kterými jsou betonové bunkry, byl nedílnou součástí opevnění také promyšlený komplex přírodních a umělých překážek různé vydatnosti, které se budovaly jako intervalové nebo obvodové. Právě tyto lehké nebo těžké překážky tvoří nedílnou součást památky. Všechny tyto prvky opevnění tvoří konkrétní militární antropogenní tvar, kdy se lidskou činností zásadně změnil reliéf terénu, který je nezbytné chránit stejně, jako mnohem viditelnější objekty, kterými jsou bunkry.
Těžké protitankové překážky byly tvořené zpravidla betonovým příkopem v délce do 100 metrů (Obr. 3), dutými ocelovými sloupy vsazenými do železobetonového pásu, krycími maskami pro ochranu střílen, železobetonovými ježky a ocelovými rozsocháči (Obr. 4) [Aron a kol., 1990]. Tento typ překážek byl zhotoven z betonového hranolu, do kterého byly zabetonovány ocelové špičaté tyče s oky. Skládáním těchto hranolů vedle sebe a následným natažením ostnatého drátu byla vytvořena stabilní protipěchotní překážka. Mezi lehké překážky je možné zařadit i tzv. španělský jezdec, což je ocelová rozsocha s nosnou přepážkou. Tyto překážky se zpravidla používaly pro přehrazení cest a průjezdů [Ráboň a kol., 1995].

MATERIÁLY SLEDOVANÝCH PAMÁTEK A PŘÍČINY JEJICH DEGRADACE

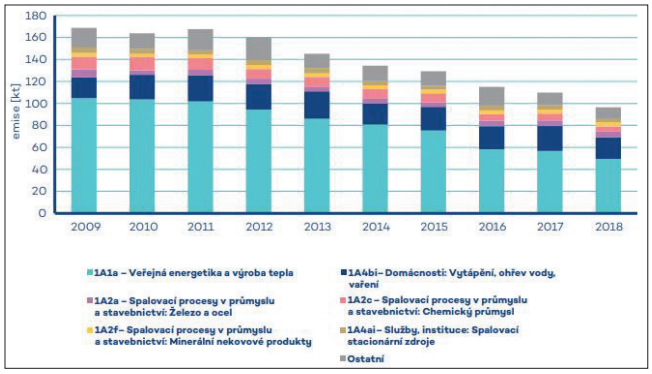
Každý materiál mění v průběhu své životnosti svůj vzhled, tvar a chemickou strukturu. Postupná degradace je nevyhnutelná a ve venkovním prostředí, které je zatíženo mimo jiné vzdušnými polutanty, dochází zpravidla k rychlejší degradaci než v lépe kontrolovaném prostředí vnitřním. Pro muzejní a památkovou praxi má tento zdánlivě prostý fakt zásadní platnost, protože naší snahou je tento proces co nejvíce zpomalit, případně alespoň dočasně zastavit.

Rozlišujeme několik druhů degradace, z nichž všechny primárně snižují schopnost materiálů plnit svoji funkci a vedou k postupnému, často velice rychlému a nevratnému rozkladu materiálů. Jedná se o degradaci fyzikální (vliv teploty a vlhkosti, klimatických procesů a působení krystalizačního tlaku), chemickou, tedy korozivní a také biologickou (vliv vyšších organismů a mikroorganismů, plísní, hub, bakterií, řas a lišejníků) [Lasek, 2012]. Vzhledem k materiálovému složení sledovaných objektů, je pozornost zaměřena právě na korozi betonu a nízkouhlíkové oceli, která tvoří jeho výztuž.

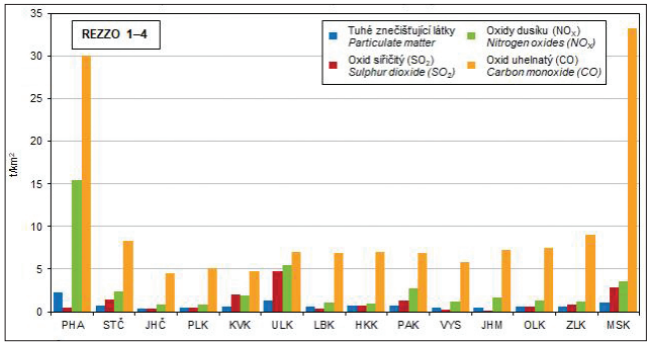
Vojenský pevnostní beton v kombinaci s ocelovou výztuží tvoří primární materiálové složení všech venkovních objektů v AOD. Železobeton byl jako hlavní konstrukční materiál pro výstavbu opevnění vybrán na základě francouzských předpisů, které doporučovaly využití tzv. tuhé betonové směsi. Tato v principu suchá směs však neobstála v pevnostních zkouškách, a proto přikázalo v roce 1935 Ředitelství opevňovacích prací (ŘOP) používat vlastní technologii výroby betonu, kterou vyvinul tým předních československých stavebních odborníků na ČVUT Praha pod vedením prof. Bechyněho [Vojenský svět, 1935]. Betonová směs byla připravována dle ČSN 1093–1935 pro pevnost v tlaku minimálně 400 kg/cm^2 a tvořila ji kamenná drť, písek, dva druhy štěrku, portlandský cement a voda [Hobst, Zwettlerová, 2003].

Klimatické faktory a látky znečišťující ovzduší (oxid siřičitý, sírany, chloridy, oxidy dusíku, polétavý prach a další těkavé organické látky) jsou pak společně s vlhkostí hlavní příčinou atmosférické koroze a degradace stavebních materiálů. Železobeton je ve venkovním prostředí poškozován především vysokým zavlhčením, klimatickými výkyvy, krystalizací solí a dalšími chemickými procesy. V případě oceli je degradace dána především rychlostí a druhem koroze, které tento materiál přirozeně podléhá. U železných předmětů může atmosférická koroze až za 80 % degradace [Schütze, 2000]. Koroze ocelové výztuže způsobuje zvětšování objemu původního materiálu vlivem vzniku nerozpustných krust, které vyvolávají napětí v betonu a vznik trhlin. Reakcí atmosférického oxidu uhličitého se složkami cementového tmelu v betonu dochází k tzv. karbonataci betonu, a tím narušování ochranné vrstvy povrchu vnitřních ocelových výztuží [Teplý – Chromá – Rovnaník – Rovnaníková, 2006]. Reakcí kyselých složek atmosféry, především oxidu siřičitého, pak dochází k růstu kalcitových krust a narušování mikrostruktury betonu. Tradičním problémem na tak exponovaných místech, jako v případě AOD je také vliv polétavého prachu, který narušuje kvalitu materiálů a ten je pak více náchylný k další degradaci [Kopecká, 2002]. U všech železobetonových prvků jsou největším problémem místa, která nejsou přímo vystavena srážkové vodě přímo a produkty, které vznikají chemickými reakcemi tak nejsou z povrchu smývány (Obr. 5).

Obr. 5 Poškození železobetonového pláště pěchotního srubu MO-S 20 „Orel" (zdroj: autor) / Damage to the reinforced concrete shell of the Infantry Cabin MO-S 20 "Orel"



Obr. 6 Vývoj celkových emisí SO_2 v letech 2009–2018 ve sledované oblasti (zdroj: Český hydrometeorologický ústav[1]) / Development of total SO_2 emissions from 2009 to 2018 in the monitored area



Obr. 7 Měrné emise hlavních znečišťujících látek do ovzduší podle krajů v roce 2018 (zdroj: Český statistický úřad[2]) / Specific emissions of main air pollutants in individual regions in 2018

MATERIÁL A METODY

Environmentální situace v okolí AOD

Environmentální faktory jsou primárním činitelem, který ovlivňuje degradaci materiálů, což má v důsledku vliv nejen na samotné památky, ale také na zdraví návštěvníků. Nejčastějším projevem degradace je koroze kovových materiálů, ale věnovat pozornost je nutné také degradaci betonu, kamene a dalších anorganických materiálů, které jsou v přímém kontaktu s venkovním prostředím.

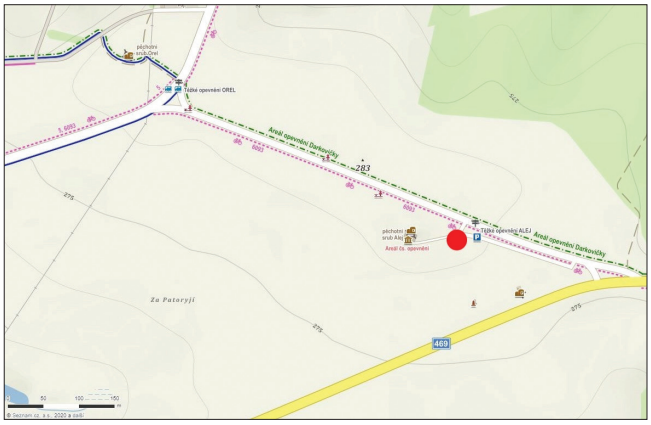
Pozitivním trendem je skutečnost, že se díky velkým změnám na blízkém Ostravsku a polsko-českém pohraničí od konce 90. let 20. století významně snižuje celkový objem emisí znečišťujících látek SO_2 v ovzduší (Obr. 6). Za primární zdroje znečištění v okolí AOD je možné označit především spad z průmyslových podniků a lokálních topenišť. Nezanedbatelná je však také emisní zátěž pocházející ze sousedního Polska.[1]

Abychom mohli identifikovat emisní zdroje v okolí sledované oblasti, je ideální využití kombinace vlastní monitorovací stanice s verifikací prostřednictvím volně dostupných informací, které je možné vyhledat především v Registru emisí a zdrojů znečištění, tzv. REZZO.[2] V registru jsou uloženy zdroje znečišťujících látek dle zákona č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a zastoupeny jsou jak stacionární, tak mobilní zdroje. Stacionární zdroje znečištění (REZZO 1–3) jsou rozděleny dle tepelného výkonu a technologických procesů, které mají dopad na znečištění ovzduší. Mobilní (REZZO 4) jsou pak data ze zdrojů monitorujících leteckou, silniční, železniční a vodní dopravu, emise ze stavebních, zemědělských, vojenských a ostatních zdrojů (Obr. 7). Díky těmto informačním zdrojům, které jsou volně dostupné pro celou Českou republiku, je možné snadno zjistit, z jakých zdrojů pochází největší znečištění v okolí sledované oblasti (Tab. 1).

Tab. 1 *Největší znečišťovatelé ve sledované oblasti v roce 2019 – Rezzo 1–4 (Zdroj: EMIS[4]) / The Largest polluters in the monitored area in 2019 – Rezzo 1–4*

Zdroj znečištění	NOx (t)	SO_2 (t)	CO (t)	TZL (t)
ArcelorMittal s.r.o. – Ostrava	7,896	6,008	16,330	1,628
Elektrárna Dětmarovice, a.s.	2 314,775	1 355,253	104,835	99,715
Energocentrum Vítkovice, a.s. – kotelna I	345,019	482,128	43,626	5,602
OKK Koksovny, a.s. – Koksovna Svoboda	197,460	73,437	122,778	30,326
TAMEH Czech s.r.o. – Teplárna společnosti	1 854,316	2 794,693	227,739	59,073
Veolia Energie ČR, a.s. – Elektrárna Třebovice	2 593,442	2 252,052	118,566	74,010
Veolia Energie ČR, a.s. – Teplárna Přívoz	271,728	343,744	24,921	11,150
VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s.	68,168	4,417	247,859	2,285

Obr. 8 *Zakázková monitorovací stanice Envitech použitá při měření (zdroj: autor) / Envitech monitoring station used for the measurement*



Obr. 9 *Areál, ve kterém bylo prováděno vlastní monitorování ovzduší, s vyznačeným umístěním měřicí stanice (zdroj: www.mapy.cz) The site where the actual air monitoring was carried out, the location of the measuring station being marked*

Pro potřeby vlastního monitorování byl využíván monitorovací systém, sestavený pro tyto potřeby firmou Envitech z přístrojů pro měření jednotlivých látek znečišťujících ovzduší (Obr. 8). Stanice je opatřená senzory Cairpol na měření koncentrace oxidu siřičitého (SO_2), oxidů dusičitého (NO_2), částic PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10}, přízemního ozonu (O_3) a amoniaku (NH_3) v ovzduší a je vybavena interním dataloggerem, který umožňuje ukládat data přímo v zařízení a následně stahovat a vizualizovat data pomocí připojení USB periferie. Opatřena je také meteorologickými senzory pro měření teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, rychlosti a směru větru a globálního záření. Pro výpočet průměrného srážkového úhrnu byly využity údaje z nejbližší automatické stanice ČHMÚ, kterou je stanice Ostrava-Mošnov.[3] Metodika měření vychází z evropského standardu pro měření částic obsažených ve vzduchu [Brueggerhoff, 2008].

Na základě dat získaných z vlastní měřicí stanice je možné provést výpočet aktuálních korozních úbytků materiálů (Tab. 2). Měření prostřednictvím prezentované stanice probíhalo ve dvou třicetidenních kampaních v červenci 2019 a 2020 (Obr. 9). Pro získání více relevantních dat by bylo vhodné, kdyby měření probíhalo v exponovaných měsících na jaře a na podzim, nebo ideálně po celý rok. Tato měření jsou v plánu v následujících letech, ale v rámci tohoto pilotního projektu bylo zásadní otestovat funkčnost nově vyvinuté měřicí stanice a využití dat pro výpočet korozních úbytků. Zásadním omezením také byla nutnost měřit pouze přes prázdniny, kdy je v areálu trvale přítomen hlídač a v provozu je elektrický rozvaděč, bez kterého by bylo měření možné pouze s použitím mobilní elektrické centrály.

Výpočet korozního úbytku materiálů

Postupů a metod, kterými je možné určit degradaci materiálů je velké množství, od osobních zkušeností založených na vlastnostech jednotlivých materiálů, přes stanovení životnosti pomocí urychlené zkoušky, až po matematické modelování nebo další stochastické metody. S ohledem na dlouhodobě probíhající výzkum účinků znečišťujících látek na objekty a muzejní sbírkové předměty v rámci Slezského zemského muzea bylo jedním z cílů této kampaně ověřit možnost využití získaných dat pro stanovení míry poškození materiálů opevnění látkami znečišťujícími ovzduší při použití rovnic znehodnocení, vyjadřující závislost materiálu na znečištění povrchu a klimatických faktorech [UBA, 1996].

Pro výpočet korozního úbytku byly použity rovnice pro portlandský vápenec a pro nízkouhlíkovou ocel. Rovnice pro nízkouhlíkovou ocel vstupními parametry odpovídají výpočtům korozní odolnosti dle ČSN ISO 9223 (038203), ovšem jsou vyvinuty přímo pro oblast ochrany památkových objektů.

Vápenec: $ML = 34{,}4 + 5{,}96*(TOW)*(SO_2) + 388*Rain*(H^+)$

Ocel: $ML = 85 + 0{,}26*(TOW)*(SO_2)*(O_3) + 432*(TOW)$

$TOW = (-1{,}24) + 0{,}014*T + (0{,}02*Rh)$

Kde: ML = hmotnostní úbytek (g/m^2), R = hmotnostní úbytek (µm/rok), $Rain$ = srážkový úhrn (mm), Rh = relativní vlhkost (%), T = teplota (°C), SO_2 = průměrná koncentrace oxidu siřičitého (µg/m^3), H^+ = vodíkový kationt (mg/1), O_3 = průměrná koncentrace ozonu (µg/m^3). Doba vlhkosti (*TOW*) byla stanovena podle rovnice obsahující průměrné hodnoty vlhkosti vzduchu a teploty (Tab. 2).

VÝSLEDKY A DISKUZE

Korozní úbytek materiálů

V Tab. 2 je uvedena průměrná vlhkost vzduchu (%), průměrná teplota (°C), průměrná koncentrace SO_2 (µg/m^3), průměrná koncentrace O_3 (µg/m^3), úhrn srážek (mm) a průměrné pH srážek v červenci 2019 a 2020.

Tab. 2 *Průměrná relativní vlhkost vzduchu (%), průměrná teplota (°C), průměrná koncentrace SO_2 (μg/m³), průměrná koncentrace O_3 (μg/m³), úhrn srážek (mm) a průměrné pH srážek v červenci 2019 a 2020[4] / Average humidity (%), average temperature (°C), average SO_2 concentration (μg/m³), average O_3 concentration (μg/m³), total precipitation (mm) and average pH in July 2019 and 2020*

Areál opevnění Hlučín-Darkovičky						
Měsíc/Rok	Vlhkost vzduchu (%)	Teplota (°C)	SO_2 (μg/m³)	O_3 (μg/m³)	Úhrn srážek (mm)	pH
7/2019	76,2	20,5	5,5	44,2	66,8	5,04
7/2020	82,1	19,2	8,2	45,1	82,3	5,1

U materiálů památkových objektů nelze zcela přesně definovat kritickou úroveň znečištění. Koroze je nevratný proces a probíhá i v případě, kdy v okolí nejsou žádné znečišťující látky. Proto byl stanoven korozní úbytek materiálu, který je z hlediska technického i ekonomického ještě přijatelný. Přijatelná korozní rychlost byla vypočtená podle rovnice $K_a = n*K_b$, kde hodnota K_a je definovaná jako přijatelná korozní rychlost, hodnota K_b je korozní rychlost na pozadí a proměnná n nabývá hodnoty 1,5, 2 a 2,5 v závislosti na znečištění dané oblasti. Vzhledem k úrovni znečištění v oblasti AOD byla stanovena hodnota $n = 2$ [podle Spranger – Lorenz Gregor, 2004]. To podle ČSN ISO 9223 (038203) odpovídá stupni korozní agresivity atmosféry C3, s ročním úbytkem hmotnosti oceli 200–400 g/m² (Obr. 10).
V Tab. 3 je uveden korozní úbytek na pozadí a přijatelný korozní úbytek pro lokalitu AOD. V Tab. 4 je uveden aktuální korozní úbytek vápence pro lokalitu AOD v červenci 2019 a 2020 (g/m²). V Tab. 5 je uveden aktuální korozní úbytek oceli pro lokalitu AOD v červenci 2019 a 2020 (g/m²).

Tab. 3 *Korozní úbytek na pozadí (g/m²) a přijatelný korozní úbytek (g/m²) pro lokalitu AOD / Background corrosion loss (g/m²) and acceptable corrosion loss (g/m²) for the area of Czechoslovak border fortifications Hlučín-Darkovičky*

Materiál	Korozní úbytek na pozadí (Kb)	Přijatelný korozní úbytek (Ka; n = 2)
Vápenec	44	88
Ocel	202	404

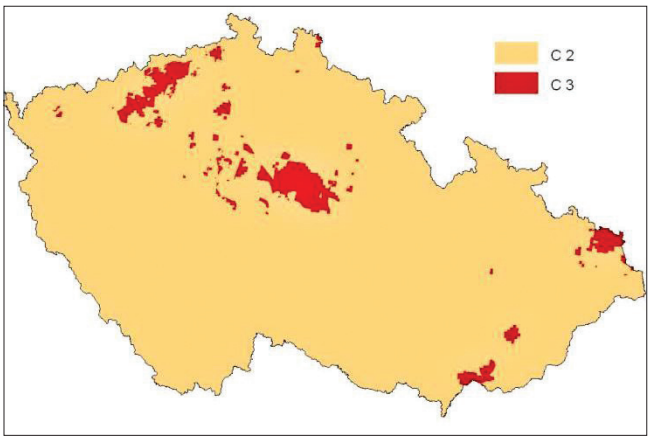
Tab. 4 *Aktuální korozní úbytek vápence (g/m²) pro lokalitu AOD v červenci 2019 a 2020 / Current corrosion loss of limestone (g/m²) for the area of Czechoslovak border fortifications Hlučín-Darkovičky in July 2019 and 2020*

Vápenec	7/2019	7/2020
Aktuální korozní úbytek	58,68	71,85
Přijatelný korozní úbytek	88	88

Tab. 5 *Aktuální korozní úbytek oceli (g/m²) pro lokalitu AOD v červenci 2019 a 2020 / Current corrosion loss of steel (g/m²) for the area of Czechoslovak border fortifications Hlučín-Darkovičky in July 2019 and 2020*

Ocel	7/2019	7/2020
Aktuální korozní úbytek	364,28	438,86
Přijatelný korozní úbytek	404	404

Na základě uvedených výpočtů korozních úbytků je zřejmé, že je znečištěné ovzduší společně s přirozenou biologickou a fyzickou degradací významným faktorem degradace sledovaných materiálů u vybraných památek a je pravděpodobné, že v budoucnu se situace nebude zlepšovat. Vápenec vykazoval ve sledovaných kampaních aktuální korozní



Obr. 10 *Mapa korozní agresivity pro uhlíkovou ocel (zdroj: www.svuom.cz) Corrosion aggressiveness map for carbon steel*

úbytek 58,68 g/m² v roce 2019, respektive 71,85 g/m² v roce 2020, což je pod hranicí přijatelného korozního úbytku, který byl stanoven na 88 g/m². Tento výpočet je však pouze orientační, protože samotný vápenec je pouze výchozí surovinou pro výrobu cementu a materiálovou součástí betonu není vápenec, ale již hydroxid vápenatý, jako výsledný produkt hydratace cementu. Naopak ocel vykazovala v roce 2020 velmi vysoký aktuální korozní úbytek (438,86 g/m²), který je vyšší, než přijatelný korozní úbytek stanovený na 404 g/m². Příčinou tohoto jevu je pravděpodobně vysoký úhrn srážek, který je zásadním akcelerátorem koroze. V roce 2019 byla situace příznivější, a tak dosáhl aktuální korozní úbytek hodnoty 364,28 g/m², což bylo pod hranicí přijatelného korozního úbytku.

Preventivní konzervace

Z představených výsledků je patrné, že zásadním problémem je v rámci sledovaného areálu koroze povrchu kovových materiálů a právě té je nutné při návrhu strategie preventivní konzervace věnovat zvýšenou pozornost. Exteriérové kovové prvky popsané výše je vhodné, pokud je to možné, průběžně opatřovat bariérovými nátěry a v případě rozsáhlejších výskytů korozních produktů celý povrch konzervovat. U betonových konstrukcí je pak důležitá především pravidelná kontrola stavu a poctivá údržba jednotlivých objektů, aby bylo možné identifikovat a již v počátku zastavovat předpoklady koroze. Přestože se zde potkáváme s vysoce kvalitními a dobře zhutněnými betony, za téměř 90 let je již jejich porozita vysoká (nehledě na mechanické poškození), a agresivní voda a látky z ovzduší (především CO_2 a Cl) tak mohou lépe pronikat do vnitřní struktury materiálu a způsobovat karbonataci. Tu je následně možné efektivně řešit pouze sanačními metodami, často s nutností odstranění původního materiálu a jeho nahrazením. Základním preventivním nástrojem u objektů tohoto typu by tedy mělo být především využití bariérových zábran, drenáží, systémů odvodnění a ochrany před srážkovou a spodní vodou. V praxi se také osvědčila ochrana vnějšího pláště bunkrů prostřednictvím použití organokřemičitanů, které povrch betonu konsolidují. Zásadní je ale v tomto případě ošetřený povrch dále sledovat a aplikaci organokřemičitanů pravidelně opakovat [Gláser, Nejedlý, 2008].
Je zřejmé, že uvedené výpočty jsou pouze základním východiskem pro další výzkum degradace jednotlivých materiálů v areálu AOD. Každopádně pro potřeby nastavení režimu preventivní konzervace a jednotlivých opatření pro prodloužení životnosti představených památek tvoří dobrý základ. Díky navržené monitorovací stanici je možné jednoduše získat všechna potřebná data, na základě kterých je možné provádět výpočty a zpřesňující modelování nejen u železobetonu, ale také u dalších materiálů, které se v areálu nachází a je zásadní je chránit [Polášek – Zapletal, 2019].

ZÁVĚR

Cílem této studie bylo prezentovat systém monitorování meteorologických parametrů a látek znečišťujících ovzduší, který je v současné době testován v rámci areálů Slezského zemského muzea, a možnost využití získaných dat pro výpočet korozního úbytku materiálů. Prostřednictvím kombinace vlastních měřicích kampaní přímo na dané lokalitě a volně dostupných dat ČHMÚ byly vypočítány aktuální korozní úbytky, které je možné dále aplikovat na obdobné materiály v areálu. Pilotní měření ukázalo, že především v roce 2020 aktuální korozní úbytek významně překročil přijatelnou hranici u nízkouhlíkové oceli. V areálu, kde právě ocel tvoří více než 50 % materiálu všech objektů, je tato informace zcela zásadní pro přípravu kvalitní strategie preventivní konzervace i pro další postup v oblasti preventivní i sanační konzervace. Bez znalosti příčin poškození a degradace materiálů objektů a předmětů, které se snažíme chránit, není možné provádět kvalitní a dlouhodobě udržitelnou péči o tyto historicky hodnotné prvky naší krajiny.

PODĚKOVÁNÍ

Předložená studie vznikla za finanční podpory Ministerstva kultury v rámci institucionálního financování na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace Slezské zemské muzeum (DKRVO, MK000100595).

POZNÁMKY

[1] Portál ČHMÚ: [online]. [cit. 7. 6. 2021] Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/19groc/gr19cz/04_7_SO2_v1.pdf).

[2] ČSÚ: [online]. [cit. 7. 6. 2021] Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/xt/zivotni_prostredi-xt).

[3] Emise – Ostrava. [online]. [cit. 20. 1. 2021]. Dostupné z: https://zdravaova.cz/category/kvalita-ovzdusi/

[4] EMIS. Portál ČHMÚ: Český hydrometeorologický ústav. [online] [cit. 20. 1. 2021]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/plants/moravskoslezsky_CZ.html.

[5] Portál ČHMÚ: [online]. [cit. 20. 1. 2021] Dostupné z: http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/ostrava-mosnov

[6] Vlhkost vzduchu, teplota, koncentrace SO_2 a O_3 měřeny vlastní měřicí stanicí, úhrn srážek a pH jsou data z Portálu ČHMÚ: [online]. [cit. 20. 1. 2021] Dostupné z: http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/ostrava-mosnov

LITERATURA

- ARON, L. a kol. *Československé opevnění 1935–1938*. Náchod: Karlov, 1990.
- BRUEGGERHOFF, S. (ed). Konzervace průmyslových památek v kriticky klimatickém prostředí – ukázkový důl Německého důlního muzea. In: *Sborník z Konference konzervátorů-restaurátorů*. Brno: Technické muzeum v Brně, 2008. s. 23–32.
- ČSN EN 206 + A1 (732403) + ČSN P 732404 *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*.
- ČSN EN ISO 8044 (038001) *Koroze kovů a slitin – Základní termíny a definice*.
- ČSN ISO 9223 (038203) *Koroze kovů a slitin. Korozní agresivita atmosfér. Klasifikace*.
- DIBELKOVÁ, I. *Pevnosti a opevnění v Čechách, na Moravě ve Slezsku*. Praha: Libri, 2007.
- GLÁSER, P. – NEJEDLÝ, V. *Organokřemičitany v české památkové péči*. Sborník z konference padesát let používání organokřemičitanů na území České republiky, konané pod záštitou ICOMOS, Národního památkového ústavu a Národního muzea 16. dubna 2008. Praha: Národní památkový ústav, ústřední pracoviště, 2008.
- HOBST, L. – ZWETTLEROVÁ, Y. Betony vojenských opevnění. In: *Stavební konstrukce*. 6/2003. s. 24–27.
- LASEK, S. *Základy degradačních procesů* [online]. Ostrava: Technická univerzita, 2012. [cit. 10. 11. 2020] PDF formát. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/
- KOPECKÁ, I. *Preventivní péče o historické objekty a sbírky v nich uložené*. Praha: Laurus press servis, 2002.
- KOPECKÁ, I. – NEJEDLÝ, V. *Průzkum historických materiálů: analytické metody pro restaurování a památkovou péči*. Praha: Grada Publishing, 2005.
- KREISLOVÁ, K. – KNOTKOVÁ, D. *Korozní agresivita atmosfér a metody predikce atmosférické koroze*. SVUOM, Praha, 2014.
- SCHÜTZE, M. (ed). *Corrosion and environmental degradation*, Vol. 1 and 2, Weinheim: Wiley-VCH, 2000.
- KNOTKOVÁ, D. – KREISLOVÁ, K. Mezinárodní program UN ECE ICP effects on materials, including historic and cultural monuments a účast České republiky v programu, IUAPPA: Section C, 2000, s. 280.
- NOVOTNÝ, J. *Metodika: Dlouhodobá péče o sochařská díla a díla uměleckých řemesel v krajině*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015.
- POLÁŠEK, M. – ZAPLETAL, M. Základní východiska metodiky monitorování vlivu látek znečišťujících ovzduší na sbírkové předměty uložené v pevnostních objektech z 2. světové války. In: *Časopis Slezského zemského muzea*, Série B, 68, 3. Opava: Slezské zemské muzeum, 2019. s. 269–279.
- RÁBOŇ, M. *Československé opevnění z let 1935–1938: Muzea a památníky*. Brno: Spolek přátel československého opevnění, 2003.
- RÁBOŇ, M. a kol. *Val na obranu republiky: Československé opevnění z let 1935–1938 na Kralicku*. Brno: Spolek přátel čs. opevnění Brno, 2005.
- SLABOCHOVÁ, E. *Československé opevnění (1936–1938) jako součást krajiny*. Lednice, 2014. Diplomová práce.
- SPRANGER, T. – LORENZ GREGOR U. Manual on Methodologies and Critera for Modelling and Mapping Critical Loads a Levels and Air Pollution Effects, Risk and Trends, Berlin: Umweltbundesamt, 2004.
- SVOBODA, T. – LAKOSIL, J. – ČERMÁK, L. *Velká kniha o malých bunkrech: československé lehké opevnění 1936–1938*. Praha: Mladá fronta, 2011.
- TEPLÝ, B. – CHROMÁ, M. – ROVNANÍK, P. – ROVNANÍKOVÁ, P. Karbonatace betonu, druhy cementů a doporučení ČSN EN 206-1. In: *Beton TKS*, 2006, No. 1. s. 39–41.
- UBA. *Manual on Methodologies and Criteria for mapping critical levels/loads and geographical area where they are exceeded*. UN / ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Texte 71/96, Berlin, 1996.
- Význam betonu pro opevňovací stavby. In: *Vojenský svět*, 3/1935, r. VI. s. 105-107.
- WATT, J. – TIDBLAD, J. – Vladimir KUCERA, V. – HAMILTON, R. Ed. *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*, 2009, 305 s.
- ZAPLETAL, M. – DVOŘÁK, F. Mapování zátěže znečištěným ovzduším na vybrané objekty městského hřbitova v Opavě. In: *Časopis Slezského zemského muzea*, Série B, 66, 1–2. Opava: Slezské zemské muzeum, 2017. s. 57–71.