

Sbor. geol. věd	Hydrogeologie, inž. geologie, 19	Str. 135—154	— obr.	2 tab.	4 příl.	Praha 1991 ISSN 0036-5289
--------------------	-------------------------------------	-----------------	-----------	-----------	------------	------------------------------

Dlouhodobé zkoušky přírodních kamenů v městském ovzduší

Long-term exposure tests of natural stones in urban atmosphere

Irena Dudková¹

Předloženo 3. září 1987

*Natural stone
Sandstone
Marble
Granite
Air pollution
Weathering
Surface features
Mechanical properties*

Dudková, I. [1991]: Dlouhodobé zkoušky přírodních kamenů v městském ovzduší. — Sbor. geol. Věd, Hydrogeol. inž. Geol., 135—154. Praha.

V ý t a h: Experiment dlouhodobého pozorování vlivu městského ovzduší na vlastnosti přírodních kamenů byl zahájen na ČVUT Praha již v letech 1931 až 1933. Jedině zde byly také z pěti původně navržených pozorovacích stanic v ČSSR zčásti zachovány zkušební vzorky hornin. Po padesátileté expozici vzorky ukázaly zřetelné změny barvy, estetického vzhledu i morfologie povrchu. Povrch pískovce se souvislou tmavou krustou je místy rozbrázděn erozivními rýhami. Degradace se projevuje počínající ztrátou soudržnosti křemenných zrn s pojivem. U mramoru vyvolalo částečné rozpouštění kalcitové hmoty na povrchu vystupující reliéf úlomků organických zbytků; degradace postupuje vzhledem k relativně nízké pórovitosti v počátečním stadiu pomalu a projevuje se nápadným zdrsněním povrchu a jeho zbělením. U žul jsou místy na povrchu znečištěném nánosem sazí a prachu z ovzduší v bezprostředním sousedství biotitu rezavé skvrny a náznaky alveolárního [dolíčkovitého] povrchu po jeho vyvětrávání. Degradace je díky jejich hutné a kompaktnější struktuře méně zřetelná. Její další postup může být predisponován rozloženými živci ze subatomistérických přeměn. Fyzikálně mechanické vlastnosti ve srovnání s výchozími parametry ukázaly zmenšení objemové hmotnosti, zvýšení nasákavosti a pokles pevnosti v tlaku, který je výraznější především po nasáknutí vzorků vodou a po zmrazovacích cyklech. Zvláště nápadné jsou rozdíly u pískovce.

¹ *Stavební fakulta ČVUT, Thakurova 7, 166 29 Praha 6*

Úvod

Kameny v památkových objektech nebo ve stavebních konstrukcích jsou vystaveny během své existence vlivům povětrnosti, tzn. jsou podro-

beny kumulativním účinkům četných činitelů (kromě tradiční teploty, vlhkosti a mrazu přistupují průmyslové exhalace), jejichž výsledkem je více či méně rychlá přeměna kamenů. Kámen stárne, zvětrává a ztrácí své dobré mechanické i estetické vlastnosti. Stárnutí kamenů je komplikovaný proces interakce jejich složek s negativně působícími činiteli prostředí.

Racionální metodou pro získání podrobnějších informací a hodnocení trvanlivosti kamenů (mechanismu zvětrávání) je vzájemná korelace laboratorních experimentů — urychlených zkoušek v klimatizační skříni (weatherometru) — s pozorováními skutečného chování in situ.

Studium trvanlivosti hornin ve volné atmosféře

Zvětrávání vzorků hornin (desek o rozměrech 6—10×4—7 cm) vystavených účinkům volné atmosféry se pokusil sledovat jako jeden z prvních již v roce 1869 Pfaff na základě měření úbytku jejich povrchu (*in Hirschwald 1912*).

Zajímavý nápad využívat jako měřítka rychlosti zvětrávání hornin intenzitu rozpadu náhrobních kamenů z různých hornin se datuje z roku 1882 (*Geikie in Konta 1984*).

Pro studium zvětrávání kamenů jsou často využívány poznatky o jejich trvanlivosti ve vnějším plášti historických staveb (*Hirschwald 1912, Kieslinger 1932*). Hodnocením trvanlivosti dekoračních kamenů Karélie (granitoidů, kvarcitu a mramoru) na památkových objektech se zabýval Pudovkin (1977).

Vhodnými objekty pro pozorování zvětrávání kamenů jsou také zděné přehrady z lomového kamene, které se začaly budovat na začátku tohoto století. Z pozorování a posuzování současného stavu kamenného zdiva z několika nejstarších kamenných hrází u nás vyplývá podle Dvořáčkové (1987), že kamenný líc předčí svými vlastnostmi a trvanlivostí ostatní druhy vnějších plášťů. Tato zkušenost se shoduje z poznatky z Itálie, Francie a Norska.

Přírodní kameny v městském ovzduší zvětrávají rychleji. Jejich petrologické studium je v současné době předmětem výzkumného úkolu „Zvětrávání kamenů historických památek a soch v podmínkách městských aglomerací“ řešeného na přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze.

V poslední době se stále častěji projevuje trend zřizovat pro studium trvanlivosti stavebních materiálů experimentální základny ve volné atmosféře.

Pokusná zeď se vzorky vápenců je instalována od roku 1971 asi 30 km

iz. od Paříže. Představuje maketu obkladového zdiva s deskami obkladových kamenů velikosti 80×50×25 cm pro pozorování a měření změn chování v čase (M a m i l l a n 1985).

Podobná základna se vzorky kamenů o rozměrech 20×8×8 cm je zřízena 25 km j. od Bruselu při Centre Scientifique et Technique de la Construction (G e r a r d 1985).

Od roku 1983 existují tři pozorovací stanice ve Vídni (na svatoštěpánské katedrále a na budově „Arsenálu“) a další dvě stanice k nim přibýly v roce 1985; jsou zde vystaveny vzorky pískovce, mramoru, kompaktního a pórovitého vápence o rozměrech 60×60×6 mm. Z dvojice vzorků každé horniny je jeden vystaven účinkům deště, druhý je chráněn před deštěm (W e b e r 1985).

Na pozorovacích stanicích v Londýně a jihovýchodní Anglii je porovnáváno zvětrávání oolitového portlandského vápence (B u t l i n et al. 1985).

Na zkušebních základnách ve v. části USA je zjišťováno rozpouštění dvou význačnějších druhů vápenců (vápence Indiana a mramoru Vermont) kyselým deštěm (R e d d y et al. 1985).

Na Slovensku existuje přes 10 let vysokohorská laboratoř Technického a skúšobného ústavu stavebného v Tatranské Štrbě, kde je sledováno přirozené stárnutí stavebních materiálů.

Problematice atmosférické koroze stavebních a dekoračních kamenů (žuly, arkózy, opuky, mramoru) na pěti různých stanovištích se nedávno začali věnovat v Projektovém ústavu dopravních a inženýrských staveb v Praze (L a n g 1986).

Prvenství s experimentováním tohoto druhu má nesporně ČVUT Praha. Zde již před více než 50 lety zahájil profesor ing. K. Špaček průkopnický a velkorysý experiment dlouhodobých zkoušek hornin. Jeho prozíravý nápad zasluhuje velký obdiv a ocenění.

Experiment dlouhodobých zkoušek hornin v ČSFR

Myšlenka dlouhodobého sledování vlivu mrazu a povětrnosti na vlastnosti kamene na experimentálních základnách byla u nás propagována již v roce 1922 v bývalém Svazu pro výzkum a zkoušení technicky důležitých látek a konstrukcí. Tehdejší iniciativní návrh ing. dr. R. Bárty se vzhledem k rozsáhlosti experimentálních prací i k finančním možnostem jen velmi pomalu uskutečňoval; bylo to teprve v letech 1931 až 1933 ve skupinách „Praktická geologie“ a „Přirozené kameny“ citovaného Svazu. Zasloužil se o to především prof. ing. K. Špaček, který byl v čele Výzkumného a zkušebního ústavu přirozených kamenů při stolici stavitelství silničního na ČVUT, za vydatné pomoci tehdejšího ředitele Státní

sochařské a kamenické školy v Hořicích (příprava zkušebních těles) a za spolupráce Mineralogického ústavu Univerzity Karlovy v Praze při petrografických rozbořech a chemické analýze (prof. dr. Josef Kratochvíl a doc. dr. Alexandr Orlov).

Podle původního záměru bylo zvoleno několik experimentálních základů:

Praha — České vysoké učení technické

Brno — Vysoké učení technické

Hořice — Státní průmyslová škola sochařská a kamenická

Ondřejov — Státní hvězdárna

Bratislava — Krajská silniční správa.

Na těchto základnách měl být dlouhodobě sledován účinek povětrnosti na mechanické vlastnosti vybraných typů hornin:

1. žuly v technickém slova smyslu z lokalit Požáry, Lipnice a Černá Voda;
2. hořický pískovec — lokalita „Na Doubravě“, Hořice;
3. slivenecký mramor — lom „Na Cikánci“, Slivenec.

Předpokládalo se též postupné doplnění dalšími význačnějšími horninami z Moravy, Slovenska a tehdy i z Podkarpatské Rusi.

V laboratořích Státní sochařské a kamenické školy v Hořicích bylo nařezáno z každé z pěti studovaných hornin 252 zkušebních krychlí (celkem 1 260 krychlí). Pro stanovení výchozích parametrů při zahájení experimentu bylo upotřebeno po 42 zkušebních krychlích z každé horniny, tj. celkem 210 kusů. Na výše vyjmenované experimentální základny bylo rozesláno po 210 zkušebních krychlích, tj. celkem 1 050 kusů.

Bohužel z pěti navržených experimentálních základů se v průběhu let vzorky dochovaly pouze na stanovišti ČVUT v Praze. Zkušební tělesa byla však z větší části během válečných let nebo při různých opravách střechy a jiných stavebních úpravách objektu buď zcizena nebo jiným způsobem znehodnocena. Mezi zbylými vzorky jich byla část mechanicky poškozena (ulámané rohy a hrany) nebo znečištěna asfaltem. Na vzorcích zcela zaniklo jejich označení, lze rozlišit jednotlivé typy vzorků (vápenec, pískovec, žula), avšak určení příslušnosti žul k jednotlivým lokalitám je obtížné. Vzorky v neúplném počtu (asi 100 zkušebních krychlí) byly zachovány díky porozumění ing. J. Živného, po němž jsem později vzorky uchránila pro technické zkoušky.

Původní zkušební program zahrnoval počáteční vyšetření fyzikálně mechanických vlastností hornin a dále počítal s opakovaným vyšetřením po padesáti letech a ve stoletých intervalech až do roku 2380 (Š p a ě k 1936).

Z výchozích počátečních parametrů hornin byly provedeny: petrografický rozbor, chemická analýza, stanovení objemové hmotnosti, stanovení

pevnosti v tlaku (za sucha, po nasátí, po zmrazení) a posouzení prolínání barviva kamenem.

Tato barvicí zkouška zavedená Hirschwaldem (1912) přispívá k rozlišení nehomogenit a pórovitějších partií horniny na základě více nebo méně intenzivnějšího zbarvení a prolnutí barviva do nitra horniny.

Z hlediska současných poznatků o mrazuvzdornosti a odolnosti hornin vlivům povětrnosti nebyla věnována pozornost studiu pórového systému hornin, který má důležitý význam. Údaje o pórovém systému hornin v původním stavu nejsou k dispozici.

Pro stanovení změn fyzikálně mechanických parametrů cyklickým střídáním teploty, vlhkosti a zmrazovacích cyklů, tj. faktorů povětrnosti, jsou v současné době aplikovány různé metody nedestruktivního charakteru. Jsou to především ultrazvuková vyšetření rychlosti podélných a příčných vln a dále sklerometrické metody. Využití těchto nedestruktivních metod je v daném případě sporné vzhledem k menším rozměrům zkušebních těles (krychle o velikosti hrany 5 cm).

Při zkouškách fyzikálně mechanických vlastností po padesáti letech exponování vzorků bylo použito a tím i zlikvidováno asi 45 zkušebních krychlí. Zprvu se s ohledem na malý objem dochovaných vzorků a ve snaze zachovat jejich určitý nepatrný počet pro zkoušky v dalším stoletém období uvažovalo o omezeném rozsahu zkoušek pevnosti v tlaku, a to pouze v suchém stavu. Nakonec byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku i po nasátí a po zmrazení, což se ukázalo opodstatněné a prospěšné.

Pozorovací stanice v Praze

Experimentální stanoviště dlouhodobých zkoušek hornin nebylo situováno v extrémních podmínkách. Nacházelo se na střeše dvoupatrového dvorního křídla budovy ČVUT v Praze-Dejvicích, tedy v nepříliš průmyslové části Prahy, stranou bezprostředního přímého účinku emisí intenzivní automobilové dopravy; rovněž výšková poloha vzorků poněkud zmírňovala působení destruktivních činitelů.

Celkově však ovzduší pražské aglomerace je zatíženo škodlivým vlivem smogu a kyselého deště. Na znečištění městské atmosféry se podílejí různé průmyslové emise, především kyselinotvorné nečistoty ovzduší a jejich následné produkty. Významný je oxid siřičitý, i když bez vlivu nejsou ani kyselinotvorné škodliviny jako oxidy dusíku a chlorovodík, obsažené zpravidla v menších koncentracích. Též škodliviny emitované automobilovým provozem se uplatňují v podstatné míře na znečištění.

Praha patří k nejvíce znečištěným územím vedle severočeské a ostravsko-karvinské oblasti, kde je v centrech dosahováno koncentrací oxidu

siřičitého v ročním průměru 120 až 180 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Na území Prahy je maximální vypočtené znečištění (podle registru emisí zdrojů a znečišťování ovzduší — REZZO) ve středu města, v oblasti Starého a Nového Města, s koncentracemi přes 120 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, druhé výrazné maximum o hodnotě 110 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ je v Libni. K okraji města koncentrace klesají s gradientem 1,3 až 4,5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ na vzdálenost 1 km, na okraji města se pohybují od 35 do 50 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Roční přípustná koncentrace 60 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ je překračována v celé zastavěné části Prahy (B u b n í k 1986).

Velikost prašného spadu se v Praze pohybuje v dlouholetém průměru mezi 200—250 t. km^{-2} za rok; mez stanovená hygienickými předpisy je 150 t. km^{-2} za rok (M o l d a n 1986). Podle P a v l í k o v é (1984) prašný spad činí 226,4 t. km^{-2} za rok.

Ze suspendovaných částic, které se usazují jako prach nebo saze, nebo zůstávají v suspenzi jako aerosoly, jsou za nejdůležitější pro rozpad kamene považovány částice velikosti 10^{-1} až 10^{-5} μm . Jejich vymývání z atmosféry deštěm závisí na jeho intenzitě. Počet a velikost těchto částic klesá s výškou nad zemí, ale vzrůstá se stoupající relativní vlhkostí (B e r h a n e 1985).

Koncentrace škodlivin, jak vyplývá z četných literárních údajů, kolísá i výškově v různých úrovních nad terénem (K e p p e n s et al. 1985).

Makroskopický vzhled vzorků

Povrch vzorků ukazuje, že horniny podlehly během dlouholetého exponování v městské atmosféře zřetelným změnám: změně barvy, estetického vzhledu i morfologie povrchu (příl. I).

Hořický p í s k o v e c v čerstvém stavu (příl. II/1) má převážně středozrnnou psamitickou strukturu, proměnlivé barevné odstíny od bělošedavých až do okrově béžových s lokálními limonitickými skvrnami. Podle původního popisu je to „hornina zažloutlá, pórovitá, s drobnými skvrnkami hydroxidu železnatého“ (Š p a č e k 1936).

Po dlouhodobé expozici v městské atmosféře lze u pískovce na celém povrchu všech zkušebních těles pozorovat tmavě šedočernou pevnou krustu, která je souvislá a zcela zakrývá původní světle šedavě žlutou barvu pískovce. Odlupování povrchové krusty není znatelné. Makroskopické trhlinky nebo porušení vzorku mrazem nejsou patrné. Hrany a rohy některých zkušebních krychlí jsou mírně porušeny, nelze však vyloučit jejich mechanické poškození při nešetrné manipulaci během válečného období, při opravách střechy objektu a jiných zásazích lidské činnosti. Přitom zřejmě docházelo i k pootočení exponovaných ploch. Na některých plochách pískovce je patrné rýhování povrchu (příl. II/2); paralelní

rýhy jsou asi 1,0 mm hluboké, 1,0 až 1,5 mm široké a jsou navzájem od sebe vzdáleny 1 až 4 mm, nejčastěji 2 až 4 mm. Vznik těchto erozních rýh je pravděpodobně vyvolán stékající dešťovou vodou [tzv. stružková eroze]. Rýhy mohly být predisponovány původní vrstevnatostí pískovce.

Při prohlídce binokulárním mikroskopem lze pozorovat, že se v místech porušení krusty jednotlivá klastická zrna křemene následkem korozní ztráty pojiva vydrolují z povrchu. Přítomny jsou drobné póry.

Slivenecký mramor má v čerstvém stavu (příl. III/1) hnědavě červenavou barvu s bělavými skvrnami různé velikosti; je nerovnoměrně zrnitý, bývá protkán bohatě zklípacenými stylolity vyplněnými tmavě červenou hmotou a řídkěji kalcitovými žilkami. Vzorek na začátku experimentu představoval „vápeneč (mramor červený) drobně, však nestejně velikého krystalického zrna. Hornina je kompaktní, neobsahuje ani pyrit ani jílové znečištění. Barva je načervenalá, s hnědým podbarvením“ (Š p a č e k 1936).

Dlouhodobé vystavení sliveneckého mramoru povětrnostním vlivům se projevuje částečným rozpouštěním kalcitové hmoty, takže úlomky krinoidů a jiných organických zbytků mají vystupující reliéf. Povrch vápence je tak výrazně zdrsněn (příl. III/2). Podobný jev je popisován u kompaktního sapropelitového vápence známého pod jménem „petit granit“ (N i j s 1985). Zřetelná je ztráta typické hnědočervené barvy mramoru a jeho zbělení. Krusta na povrchu mramoru není souvisle vyvinuta, je přítomna jen místy ve zbytcích. Ojedinele byly pozorovány trhlinky a odrolení na rozích.

Pod binokulárním mikroskopem jsou na povrchových plochách sliveneckého mramoru patrné rozevřenější štěpné trhliny některých krystalovaných individuí kalcitu; u shluků kalcitových zrn jsou zřetelné i intergranulární trhlinky. Povrch kalcitové hmoty je zčásti matný, někdy má velmi jemnou škrapovitou skulpturu, nebo jsou v něm vyvinuty velmi jemné kaverny.

Slezská žula (podle sbírkového materiálu katedry geotechniky stavební fakulty ČVUT) je v čerstvém stavu (příl. IV/1) všesměrně zrnitá, drobnozrná, s velikostí minerálních součástí kolem 1 až 2 mm. Je světle bělošedavé barvy, v jednotné barvě se často objevují tmavé až 4 mm velké skvrny shluků biotitu. Makroskopicky je rozeznatelný křemen, živce, biotit, zřídka muskovit. Původní vzorek byl popsán jako „normální žula do mlékové bílá, řídká a drobně černě kropenatá, jemného zrna, na lomné ploše se trpytem štěpných ploch živců“ (Š p a č e k 1936).

U převážné většiny vzorků žul je po padesáti letech relativně dobře zachován jejich makroskopický vzhled, se zrnitou texturou; jen některé plochy ukazují lokální povrchové znečištění nánosem sazí, špíny a prachu z ovzduší, který vytváří na povrchu tmavě šedočernou vrstvičku. Změ-

na barvy horniny se projevuje místy vznikem rezavých nebo růžově červenavých skvrn v bezprostředním sousedství biotitu. Působením vlhkosti se v biotitu oxiduje Fe^{2+} na Fe^{3+} ; část Fe se uvolňuje z krystalové struktury a tvoří skvrny Fe-oxidu na štěpných plochách a na povrchu minerálních zrn. Po vyvětrávání tmavých minerálů zůstává někdy náznak alveolárního (dolíčkovitého) povrchu (příl. IV/2).

Při pozorování binokulárním mikroskopem žula ukazuje pod sazemi znečištěným povrchem místy přítomnost jemných trhlinek subparalelních s povrchem; lze je sledovat na krátkou vzdálenost a mohly by přispívat k exfoliačnímu odprýskávání povrchu horniny.

Mikroskopický popis hornin

Mikroskopické popisy informativně charakterizují vnitřní část horniny. Výbrusy neumožňují spolehlivě studovat profil degradace horniny od povrchu do hloubky, protože při běžné přípravě výbrusu se vnější nebo podpovrchové zvětralé a narušené partie zpravidla nepodaří vybrusit.

Výbrusy hornin v původním stavu pro vzájemné porovnání změn nejsou zachovány.

Pískovec hořícký

Pískovec má středozrnnou psamitickou strukturu. Mezi klastickými komponentami převládají křemenná zrna velikosti od 0,12 do 0,36 mm. Stupeň zaoblení je nepatrný, zrna jsou ostrohranná až poloostrohranná. Některá zrna křemene undulózně zhášejí. Často uzavírají jehličky sagenitu. Zrnka křemene se místy navzájem dotýkají, místy se mezi nimi objevují dutinky a póry nepravidelného tvaru o velikosti 0,08 až 0,2 mm. Dále je přítomen muskovit v podobě protáhlých lupínek a vzácně biotit. Ojedinelý je glaukonit. V akcesorickém množství byly pozorovány zirkon, rutil, turmalín, plagioklas. Tmel je jílové povahy, místy obsahuje oxidický železitý pigment. Je zastoupen v malém množství a je nerovnoměrně rozptýlen.

Vápenec — slivenecký mramor

Hornina obsahuje hojné skelety organismů a sparitového kalcitu proměnlivé velikosti od 0,06 do 2,0 mm. Vzácně jsou přítomna drobná zrna klastického křemene velikosti kolem 0,12 mm. Zbytky organismů jsou zčásti nebo zcela nahrazeny kalcitem, místy jsou patrna větší zrna kalcitu s lamelárním rýhováním a zachovávající tvar původních živočišných

forem; často jsou prosyceny limonitovým pigmentem. Mezerní hmota je tvořena sparitovým kalcitem, který se též uplatňuje v krustifikačních lemech skeletů. Vápenec je protkán jemnými, bohatě zklíkáčenými stylolity, zdůrazněnými limonitovým pigmentem. Linie stylolitů někdy protínají žilky druhotného kalcitu. Příměs hypautomorfního dolomitu je zcela nepatrná. Otevřené póry nebyly pozorovány. Horninu lze označit jako bioklastický vápenec.

Žula — Černá Voda

V mikroskopu se vyznačuje rovnoměrně zrnitou strukturou s velikostí zrna nejčastěji od 0,55 do 0,70 mm. V minerálním složení převažují světlé součástky, které jsou zastoupeny hlavně živci a křemenem. Alotriomorfní zrna křemene velikostí 0,35 až 0,50 mm místy slabě undulózně zhášejí a jsou popraskaná. Hypidiomorfně omezené živce patří převážně draselnému živci a dále plagioklasu oligoklas-andezínového složení. Jejich velikost je nejčastěji mezi 0,5 až 0,7 mm, výjimečně dosahují 1 mm. Živce jsou intenzívně zakaleny rozkladnými produkty hlavně jílové povahy, méně sericitem. Zonálnost i lamelování plagioklasů je jimi zastřeno. Útržkovitý pleochroický biotit je v ploše výbrusu řidce rozptýlen, vzácně tvoří drobné shluky; někdy bývá podél štěpných trhlin chloritizován. Z akcesorií je přítomen apatit, zirkon, místy epidot, vzácně muskovit.

Degradace hornin

Degradace hořického pískovce ve volné atmosféře se projevuje počínající částečnou ztrátou soudržnosti křemenných zrn s pojivem jako důsledek vyluhování pojiva. Tmel pískovců, zvláště jílové nebo karbonátové povahy (s výjimkou křemitého tmelu), bývá všeobecně nejslabší složkou pískovců a je velmi snadno atakován. Postupné vyluhování tmele představuje v konečném stadiu rozpad na jednotlivá klastická zrna. Tento mechanismus rozpadu, nazývaný minerální disagregace nebo zpískovatění, patří k nejčastěji pozorovaným u pískovců (M o o s - Q u e r v a i n 1948, B l a e u e r 1985).

Ve zvětrávání sliveneckého mramoru se uplatňuje zejména chemická koroze agresivními složkami ovzduší. Všeobecně má ve zvětrávání vápenců a mramorů v městském prostředí dominantní úlohu chemická koroze vyvolaná kyselým deštěm nebo rozstříkem posypových solí z vozovky. I když slivenecký mramor je tvořen téměř výhradně kalcitem, postupu je vzhledem k jeho relativně nízké pórovitosti koroze v počátečním stadiu pomalu; projevuje se nápadným zdrsněním povrchu.

Degradace žul je díky jejich hutné a kompaktnější krystalické struktuře, malé porózitě a nízké nasákavosti méně zřetelná. Další postup degradace může být predisponován rozloženými živci ze subatmosférických přeměn. V důsledku hydratace se mohou postupně rozšiřovat jejich štěpné trhliny a přispívat k rozvolnění struktury. Významná může být i hydrolyza živců. Kromě vyluhování Na- a K-iontů z krystalové mřížky živců žul bylo potvrzeno atomovou absorpční analýzou též vyluhování K-iontů z biotitu. Uvolňování K-iontů z krystalové struktury biotitu a příjem vodíkových a jiných iontů jsou provázány rozpínáním biotitu a jeho následným rozpukáním podle bazální štěpnosti; tak je vystaven další povrch chemickému ataku (H e l m i 1985).

Ze studovaných hornin projevuje nejmenší stálost vůči povětrnostním vlivům hořický pískovec; může to být vysvětleno interakcí několika faktorů — látkového složení (jílový tmel), velmi jemnozrnné struktury, velké pórovitosti (přes 20 %) s nepříznivým poměrem mikropórů, vysokou vzájemnou spojitostí pórů a značnou nasákavostí (10 hmot. %).

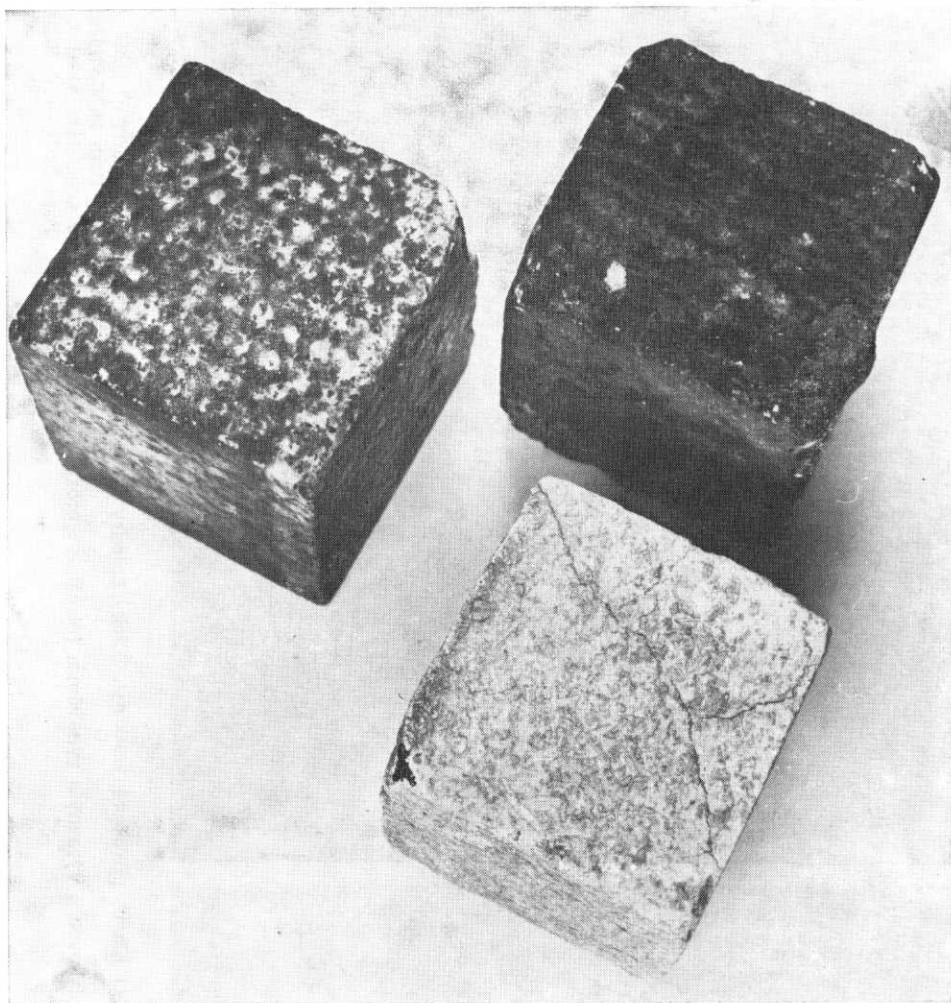
Vliv dlouhodobého účinku městské atmosféry na fyzikálně mechanické vlastnosti hornin

Zkoušky fyzikálně mechanických vlastností vzorků hornin po padesáti letech vystavení účinkům městské atmosféry byly provedeny na pracovišti stavební fakulty ČVUT. Zahrnuly stanovení objemové hmotnosti, nasákavosti a pevnosti v tlaku za sucha, po nasátí a po zmrazení. Výsledky provedených zkoušek a původní údaje (Š p a č e k 1936) jsou uvedeny v tabulkách 1a a 1b. Srovnání hlavních parametrů je uvedeno v tabulce 2.

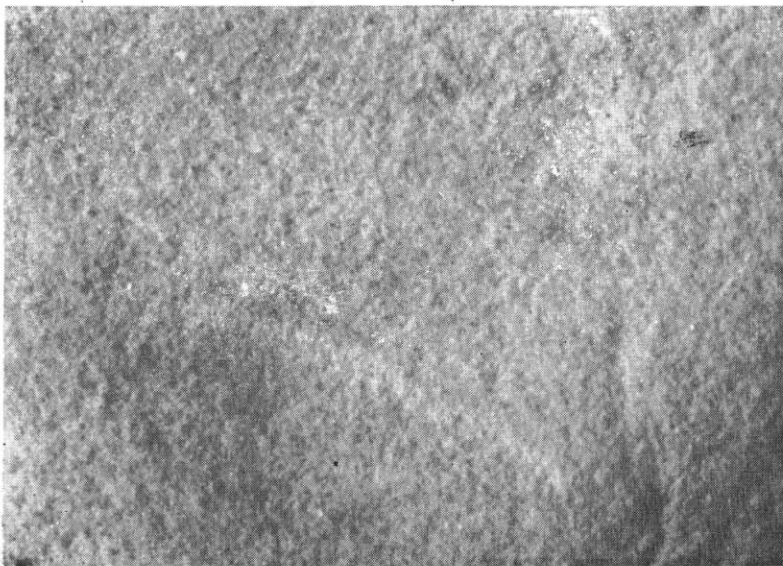
Při interpretaci výsledků zkoušek musíme vzít v úvahu určitou heterogenitu horniny v rámci téže lokality, popř. mechanické porušení zkušebních těles (skryté vady, vlasové trhliny ap.), které se projevují rozptylem nebo anomálním charakterem hodnot fyzikálně mechanických vlastností. Anomálně rozdílné hodnoty se zpravidla vylučují při výpočtu průměru.

Průměrná objemová hmotnost vzorků hornin po padesáti letech se oproti průměrné objemové hmotnosti stanovené na začátku experimentu zmenšila u pískovce o 4 %, u vápence o 3 % a žula ukazuje prakticky stejné hodnoty; rozdíly se mohou překrývat s výkyvy způsobenými heterogenitou materiálu. Změny vyplývají patrně z částečného povrchového narušení vzorků atmosférickými vlivy. Vyšší objemová hmotnost poukazuje na vyšší stupeň hutnosti a nižší pórovitost.

Nasákavost hornin nebyla u původních vzorků stanovena. K dispozici jsou pouze archívní údaje o nasákavosti neporušených hornin z identických lokalit, zjišťované opakovaně v pozdějších letech pro jiné účely.

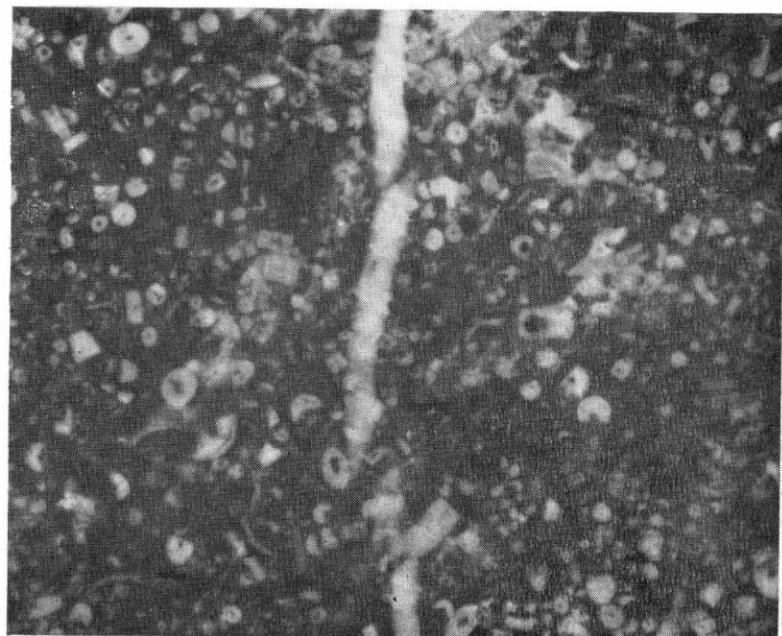
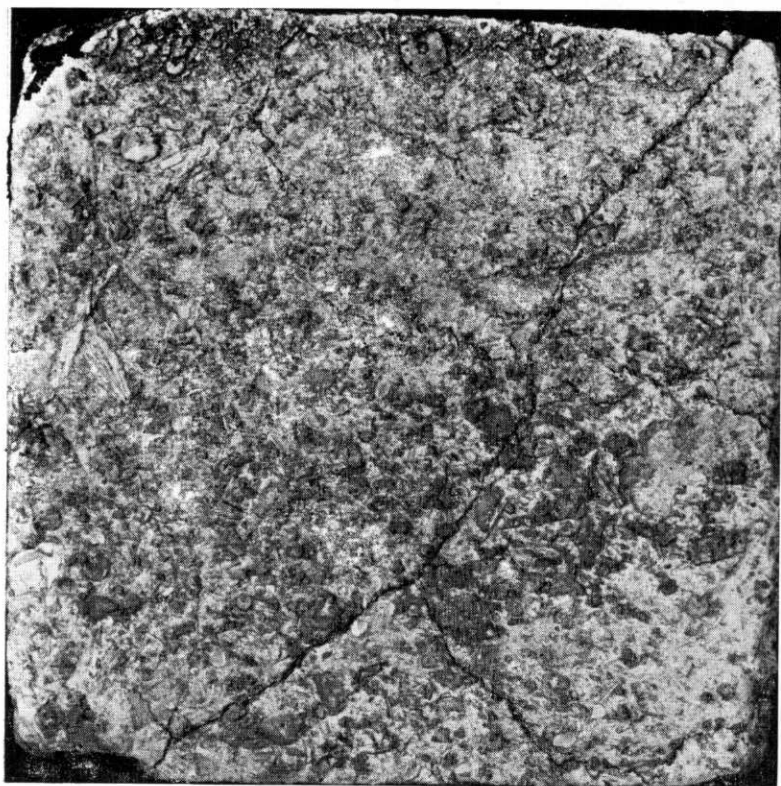


Vzhled zkušebních těles žuly, pískovce a mramoru po padesátileté expozici v znečištěném ovzduší. Zmenšeno na 4/5
Foto ÚÚG — V. Skala

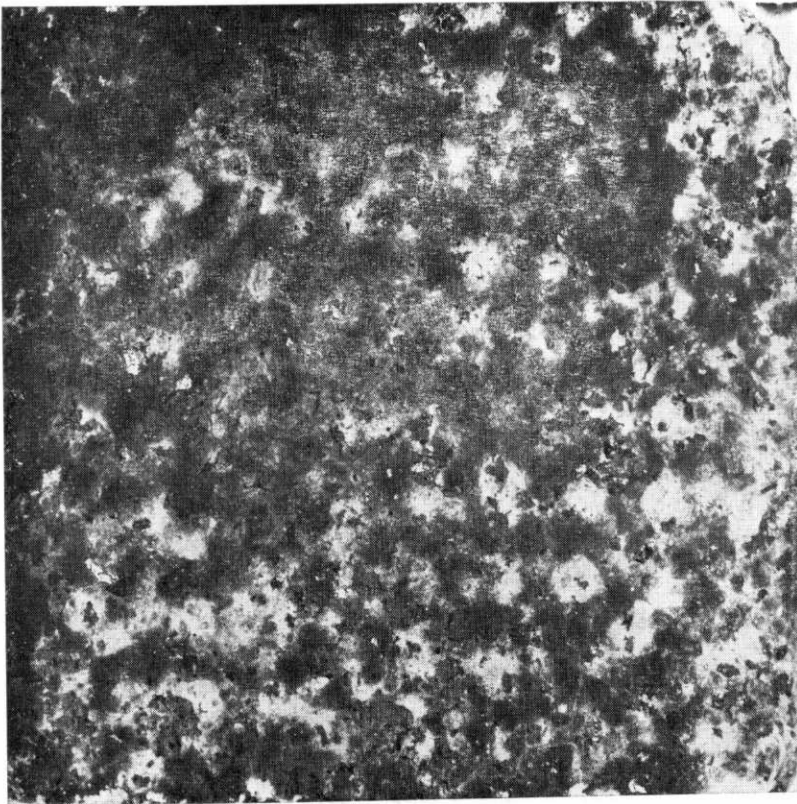
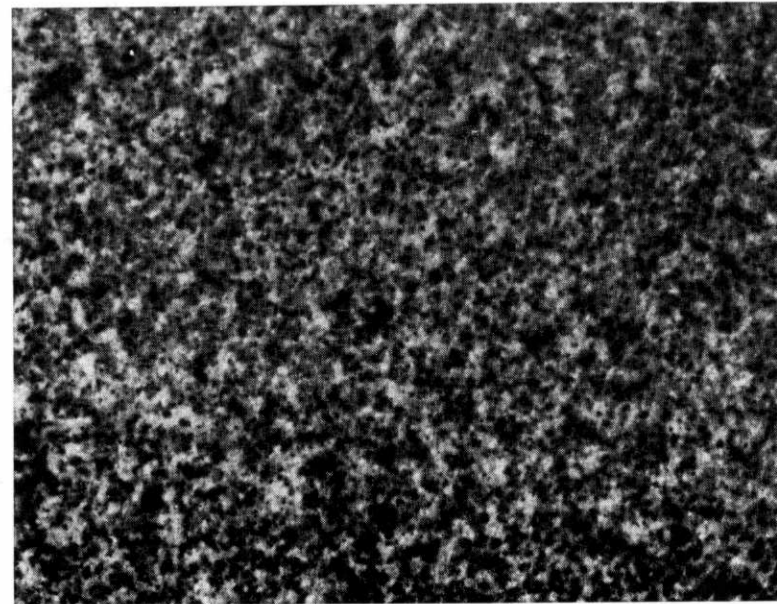


1. Vzhled hořčického pískovce v čerstvém stavu, přirozená velikost. Sbírkový materiál geotechniky stavební fakulty ČVUT. Foto M. Sedláček
2. Povrch zkušební krychle hořčického pískovce s výrazným rýhováním (stružková eroze). V levém rohu stopy znečištění asfaltem. Foto ÚÚG — V. Skala

Zvětšeno 2X



1. Vzhled sliveneckého mramoru v čerstvém stavu, přirozená velikost. Sbírký katedry geotechniky stavební fakulty ČVUT
Foto M. Sedláček
2. Zdrsněný povrch zkušební krychle sliveneckého mramoru se zřetelně vystupujícím reliéfem organických zbytků. Zvětšeno 2X
Foto ÚUG — V. Skala



1. Vzhled čerstvé žuly, Černá Voda, přirozená velikost. Sbírký katedry geotechniky stavební fakulty ČVUT

Foto M. Sediáček

2. Povrch zkušební krychle žuly (Černá Voda) znečištěný nánosem sazí, špíny a prachu z ovzduší. Zvětšeno 2X

Foto ÚÚG — V. Skala

Tabulka 1a

Fyzikálně mechanické vlastnosti vzorků po padesátileté expozici
v městském ovzduší

objemová hmotnost [kg.m ⁻³]		nasákavost [% hmot.] [% objem.]		pevnost v tlaku [MPa]		
				za sucha	po nasátí	po zmrazení
žula	2 636			196,1		
	2 611			196,8		
	2 567			190,9		
	2 575			199,0		
	2 582			184,9		
	2 582	0,38	0,97		168,1	
	2 588	0,41	1,06		163,8	
	2 574	0,40	1,04		171,6	
	2 620	0,22	0,58		171,6	
	2 601	0,20	0,53		158,6	
	2 597	0,34	0,89			170,2
	2 620	0,17	0,46			162,2
	2 602	0,17	0,45			167,4
	2 573	0,36	0,92			189,9
2 580	0,33	0,86			188,0	
mramor	2 635			118,5		
	2 605			122,5		
	2 573			112,7		
	2 613			127,0		
	2 615	0,14	0,37		113,6	
	2 583	0,17	0,45		105,5	
	2 605	0,20	0,50		104,9	
	2 632	0,20	0,53		109,5	
	2 606	0,10	0,26			72,7
	2 606	0,12	0,32			110,6
	2 597	0,10	0,27			114,9
	2 623	0,35	0,91			102,6
pískovec	1 851			28,0		
	1 873			30,9		
	1 882			36,2		
	1 931			33,8		
	1 922			30,5		
	1 867	11,12	20,77		22,7	
	1 831	11,25	20,60		6,8	
	1 868	11,22	20,96		25,7	
	1 899	11,07	21,10		23,1	
	1 925	9,84	18,94		14,2	
	1 945	11,40	22,17			11,9
	1 845	12,67	23,37			17,7
	1 837	12,56	23,07			14,5
	1 956	11,69	22,86			9,3
	1 840	12,34	22,71			10,0

V porovnání s nimi je nasákavost po padesáti letech vyšší hlavně u pískovce, v průměru asi o 15 %. Vzrůst nasákavosti lze vysvětlit rozšířením původních i nově vzniklých kapilár v důsledku pozorovaného rozvojení

Tabulka 1b

Fyzikálně mechanické vlastnosti původních vzorků

objemová hmotnost [kg.m ⁻³]		pevnost v tlaku [MPa]		
		za sucha	po nasátí	po zmrazení
žula	2 622	200,8	198,7	187,9
	2 614	200,3	241,9	220,9
	2 610	241,0	203,0	213,4
	2 607	237,2	174,2	212,8
	2 601	204,5	208,3	214,8
	2 627	205,9	211,2	203,1
	2 618	189,4	202,0	223,6
	2 618	189,7	190,5	208,4
	2 617	201,3	198,3	211,6
	2 615	216,6	196,3	202,1
		219,1	183,2	205,8
mramor	2 700	119,3	119,3	104,5
	2 700	130,3	108,8	133,1
	2 700	103,3	127,1	116,7
	2 700	143,1	124,7	124,2
	2 720	120,5	136,2	115,7
	2 725	134,7	127,2	122,6
	2 686	134,6	119,7	121,1
	2 711	154,6	106,8	98,8
	2 726	106,9	96,5	122,3
	2 708	150,7	96,2	104,9
		113,6	114,8	123,6
pískovec	1 970	34,9	30,6	37,2
	1 930	29,1	32,5	23,1
	1 970	39,6	34,9	27,0
	1 970	35,6	31,6	23,8
	1 950	35,6	27,8	28,5
	2 119	32,5	20,8	29,5
	2 097	37,0	23,0	30,7
	2 125	36,6	26,4	33,0
	2 131	33,7	22,1	26,3
	2 092	35,4	31,6	29,2
		29,5	33,3	30,0

Údaje převzaté z práce K. Špačka(1936)

struktury a spojitosti součástí. U vápence a žuly jsou rozdíly zanedbatelné. Nasákavost těchto kompaktních hornin je menší než 0,5 % hmotnosti a odpovídá jí též jejich malá pórovitost.

Hodnoty pevnosti v tlaku, představované aritmetickým průměrem ze čtyř nebo pěti stanovení, naznačují nízký pokles u pevnosti za sucha; pokles činí 6 až 8 % původní průměrné hodnoty pevnosti. Výraznější snížení pevnosti v tlaku se projevuje po nasáknutí vzorků vodou (1. hodnota) a po zmrazovacích cyklech (2. hodnota): u mramoru představuje 7 a 14 %, u žuly 17 a 16 %. Nejnápadnější je ztráta pevnosti u pískovce —

Tabulka 2

Korelace fyzikálně mechanických vlastností původních a exponovaných vzorků

		objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	nasákavost		pevnost v tlaku [MPa]		
			[% hmot.]	[% obj.]	za sucha	po nasátí	po zmrazení
žula	\bar{x}	2 611	—	—	210,0	201,0	210,0
		2 594	0,30	0,78	193,5	168,8	175,5
	s	7,9	—	—	17,2	17,3	9,8
		20,7	0,1	0,2	5,7	3,7	12,6
	n	5	0	0	11	11	11
15		10	10	5	4	5	
mramor	\bar{x}	2 704	—	—	128,3	116,1	117,0
		2 608	0,17	0,45	120,2	108,4	100,2
	s	8,9	—	—	17,1	12,9	10,3
		18,1	0,1	0,2	6,1	4,0	19,0
	n	5	0	0	11	11	11
12		8	8	4	4	4	
pískovec	\bar{x}	1 958	—	—	34,5	28,6	28,9
		1 885	11,52	21,66	31,9	18,5	12,7
	s	17,9	—	—	3,1	4,9	4,0
		42,0	0,8	1,4	3,1	7,8	3,4
	n	5	0	0	11	11	11
15		10	10	5	5	5	

\bar{x} — aritmetický průměr, s — směrodatná odchylka, n — počet vzorků
v prvním řádku vždy hodnoty původních vzorků, v druhém hodnoty vzorků po padesátileté expozici

35 a 56 %; souvisí zřejmě s počínající minerální disagregací, pozorovanou na zbytcích zkušebních těles po zkoušce pevnosti v tlaku.

Srovnání výsledků se změnami kamenů ve stavebním díle

Zjištěné výsledky jsou v relaci s pozorováním jiných autorů. V a c h t l (1948) zjistil u silně zvětralých žul 40 % a u méně navětralých žul 60 až 75 % hodnoty pevnosti čerstvé žuly. Veniale a Zezza (1985) uvádějí, že zvýšená nasákavost zeslabuje mechanické parametry v degradovaných vzorcích až o 40 %. Pevnosti v tlaku, tahu za ohybu a nepřímém tahu mohou v degradovaných vzorcích klesnout o 75 %.

Pro zajímavost lze srovnat fyzikálně mechanické vlastnosti stavebních kamenů z konstrukce a lomového vzorku.

Nasákavost např. polských žul je pro lomový kámen a pro vzorek ze zdiva dosti rozdílná (podle Hirschwald a 1912):

Janowice Wielkie u Jelení Góry

lomový kámen	0,49 %
zřícenina Bolzenschloß (stáří ca 600 let)	1,52 %

Strzelin

lomový kámen	0,83 %
městské hradby (stáří ca 200 let)	3,22 %

Sobótka u Vratislavi

lomový kámen	0,91 %
Blücherův pomník ve Vratislavi (stáří ca 80 let)	1,15 %

Biotitický granodiorit z obezdívky vinohradského tunelu postaveného roku 1871 ukázal při kontrolních zkouškách v roce 1946 průměrnou pevnost v tlaku za sucha 125 MPa, po nasátí 101 MPa a po zmrazení 95 MPa. Zjištěné hodnoty pevností jsou nižší, než je standardní pevnost biotitických granodioritů středočeského plutonu (180 až 200 MPa), tj. předpokládané provenience. Objemová hmotnost ($2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a nasákavost (0,66 hmot. %) odpovídají běžným hodnotám.

Pískovec z okenní římsy chrámu sv. Barbory v Kutné Hoře při opravách v roce 1948 vykázal asi 15 % původní pevnosti; mikroskopicky ukazoval vyloužení vápnitého tmelu, zachovaného jen sporadicky.

Oba citované údaje o pevnostních zkouškách jsou převzaty z archivních záznamů Stavebního ústavu ČVUT.

Velmi nízkými pevnostmi se vyznačoval intenzívně zvětralý pískovec zdiva kostela sv. Kateřiny v Praze 2 — 19,5 až 37,1 MPa (Vaněk - Hrdoušek 1971).

Kámen v konstrukci je vystaven drsnějším podmínkám (působení vápna, vyluhování alkálií ze spojovací malty ap.), působícím v mnohem delším časovém měřítku. V nosných prvcích konstrukce jsou kameny též namáhány zatížením od konstrukce; to může urychlit proces porušování oživením reziduálních napětí v kameni (Winkler 1981). Také při opracování kamenů může na jejich povrchu vzniknout porušená vrstvička značné tloušťky s mikrotrhlkami; ta predisponuje degradaci kamene následkem ztráty koheze a umožněním absorpce vody.

Koroze kamenů účinky volné atmosféry se v současné době jeví intenzivnější zvláště za přispění znečištěného městského ovzduší.

Pfaff (in Hirschwald 1912) uvádí ztrátu povrchu vzorků ve volné atmosféře pro

vápenec, Solenhofen	po 2 letech	0,0137 mm
	po 3 letech	0,0400 mm

žulu, Fichtelgebirge po 2 letech 0,0022 mm
po 3 letech 0,0062 mm.

Výsledky naznačují určitý nepatrný vzestup, ale rozdíly jsou velmi malé a mohou se pohybovat v mezích chyb měření.

Vzorky portlandského vápence po dvou letech exponování v prostředí velkoměsta, města, venkova a mořského pobřeží v Anglii ukázaly rychlost koroze kamenů v Londýně asi o 25 % větší než na venkově. Úbytek kamene vypočtený ze současných experimentálních měření rozpouštění odpovídá 0,27 mm, při měření in situ na katedrále sv. Pavla v Londýně v minulých letech činil 0,139 mm a ještě dříve v minulosti byla zjištěna hodnota 0,078 mm (Butlin et al. 1985).

Také rychlost koroze schlaitdorfského pískovce s dolomitickým tmelem z katedrály v Kolíně nad Rýnem je údajně asi 8× rychlejší než před 100 lety (Kraus in Krejčí 1985);

v letech 1861—1833 (22 let) byla	5,8 mm ³ ,
1883—1919 (36 let)	10,7 mm ³ ,
1919—1972 (53 let)	41,2 mm ³ .

Vybrané vzorky hornin exponované v městské atmosféře Vídně ukázaly zřetelnou korelaci jejich koroze s mírnou imisí SO₂. Ze zjištěných úbytků hmotnosti byla vypočtena teoretická povrchová eroze 6,2 mm za dobu 100 let, která odpovídá pozorování na památkových objektech (Weber 1985).

Závěr

Zřetelné změny povrchu zkušebních těles žuly, mramoru a pískovce a jejich fyzikálně mechanických vlastností zjištěné po padesáti letech exponování vzorků ve volné atmosféře pražské městské aglomerace ukázaly nepříznivý účinek znečištěného městského ovzduší na zvětrávání kamenů. Z hornin se nejvíce vzhledově změnil pískovec.

Zkoušky fyzikálně mechanických vlastností hornin po dlouhodobém exponování v městském ovzduší ukázaly, že po padesáti letech:

- průměrná objemová hmotnost je proti průměrné objemové hmotnosti skoro stejná u žuly (2 594 kg · m⁻³), nepatrně nižší (o 3 %) u mramoru (2 608 kg · m⁻³) a u pískovce se zmenšila o 4 % (1 885 kg · m⁻³);
- nasákavost je v relaci s objemovou hmotností. Vzhledem k přibývajícím pórovitostí následkem rozvolnění spojitosti součástí se zvýšení projevuje u pískovce (asi o 15 %);
- hodnoty pevnosti v tlaku, představované aritmetickým průměrem ze čtyř nebo pěti stanovení, naznačují u všech zkoušených vzorků malý pokles (6—8 %) jen při zkoušce pevnosti za sucha. Snížení pevnosti

po nasátí a po zmrazení je výraznější: u mramoru představuje 7 a 14 %, u žuly 17 a 16 % a nejnápadnější je u pískovce — 35 a 56 %.

Kámen ve zdivu bývá často vystaven ještě drsnějším podmínkám (působení vápna, vyluhování alkálií ze spojovací malty ap.), působícím v mnohem delším časovém měřítku. V nosném zdivu a částech stavebního díla jsou kameny též namáhány zatížením od stavby; to může urychlit proces porušování oživením reziduálních napětí v kameni. Také při opravování kamenů se může povrch kamene porušit mikrotrhlkami, které predisponují degradaci kamene následkem ztráty koheze a umožněním absorpce vody.

Dříve podle zkušeností kameníků se odhadovala životnost kamenů zpravidla na 200 let; v současné době je reálné uvažovat o jejich podstatně kratší trvanlivosti.

K tisku doporučil Z. Kukal

Literatura

- Berhane, Z. (1985): Industrialization has two edges: a warning to developing countries. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. 1, part 2, 205—211. Laussane.
- Blaeuer, C. (1985): Weathering of Bernese sandstones. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part 2, 381—390. Laussane.
- Bubník, J. (1986): Analýza výsledků modelování znečištění ovzduší v postižených oblastech ČSR. — Meteorolog. Zpr. 39, 5/6, 164—170. Praha.
- Butlin, R. N. - Cooke, R. U. - Jaynes, S. M. - Sharp, A. S. (1985): Research on limestone decay in the United Kingdom. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part 3, 537—545. Laussane.
- Dvořáčková, J. (1987): Zděné přehrady u nás. — Vod. Hospod., 37, 1, 3—7. Praha.
- Gerard, R. (1985): Determination de la durabilité au gel par une méthode de capillarité. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part 1, 157—166. Laussane.
- Helmi, F. M. (1985): Deterioration of some granite in Egypt. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part 1, 421—429. Laussane.
- Hirschwald, J. (1912): Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. — Verl. Gebr. Borntraeger. Berlin.
- Keppens, E. - Roekens, E. - van Grieken, R. (1985): Effect of pollution on sandy limestones of a historical cathedral of Belgium. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part 3, 499—508. Laussane.
- Kieslinger, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten. — Franz Deuticke. Leipzig — Wien.
- Konta, J. (1984): Die Verwitterung der Bau- und Bildhauersteine an historischen Baudenkmalern. — Acta Univ. Carol., Geol., 2, 137—165. Praha.
- Krejčí, Z. (1985): Působení znečištěného ovzduší na stavební materiály. — Pozem. Stavby, 33, 8, 374. Praha.
- Lang, M. (1986): Působení znečištěného ovzduší v hl. m. Praze na zvětrávání stavebního a dekorativního kamene. — Dipl. práce přírodověd. fak. Univ. Karlovy. Praha.

- Mamillan, M. (1985): Tendances internationales vers une nouvelle approche pour l'interpretation des essais de durabilité des matériaux. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part 1, 141—150. Laussane.
- Moldan, B. (1986): Sestup látek z atmosféry na zemský povrch. — Památ. a Přír., 11, 3, 163—168. Praha.
- Moos, A. von - Quervain, F. de (1948): Technische Gesteinskunde. — Verl. Birkhäuser, Basel.
- Nijs, R. (1985): Petrographical characterization of calcareous building stones in northern Belgium. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part 1, 13—21. Laussane.
- Pavlíková, R. (1984): Petrologické studium zvětralých kamenů na budově Národního divadla. — Dipl. práce přírodověd. fak. Univ. Karlovy, Praha.
- Pudovkin, V. G. (1977): O dolgovečnosti oblicovočnykh kamnej Karelii. — In: Minerálnoje syr'je Karelii, 57—64. Petrozavodsk.
- Reddy, M. M. - Sherwood, S. - Doe, B. (1985): Limestone and marble dissolution by acid rain. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part. 3, 517—525. Laussane.
- Špaček, K. (1936): Dlouhodobé zkoušky československých hornin. — Zpr. veř. Služ. techn., 18, 1/2, 1—22. Praha.
- Vachtl, J. (1948): Vliv větrání na mechanické vlastnosti a stavební jakost žulových hornin. — Sbor. Vys. Šk. inž. Stavitel., 4, 1—36. Praha.
- Vaněk, T. - Hrdoušek, V. (1971): Stanovení pevnosti kamenného zdiva věže kostela sv. Kateřiny v Praze. — MS fak. staveb. ČVUT, Praha.
- Veniale, F. - Zezza, U. (1985): Use and decay of "ceppo" stone in monuments of Lombardy (Italy). — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part, 2, 351—360. Laussane.
- Weber, J. (1985): Natural and artificial weathering of Austrian building stones due to air pollution. — Vth Int. Congr. on deterioration and conservation of stone, Vol. I, part. 3, 527—536. Laussane.
- Winkler, E. M. (1981): The effect of residual stresses in stone. — Int. Symp. on conservation of stone, part A, 3—11. Bologna.

Long-term exposure tests of natural stones in urban atmosphere

(Summary of the Czech text)

Irena Dudková

Received September 3, 1987

A provident experiment of long-term monitoring of the effects of urban atmosphere polluted with smog and acid rain on the properties of natural stones in open air was started already in 1931—1933 in the Technical University, Prague. It is the only place out of five originally selected observation stations where the test rock samples were partly preserved. The most frequently used building stones were studied — the Hořice sandstone, Slivenec marble (petrologically limestone) and granite from Černá Voda.

Surface of the samples shows distinct changes after fifty-year exposure to urban atmosphere — changes in colour, aesthetic appearance and surface morphology (plate I).

A coherent dark crust has developed on the sandstone surface. A distinct striation of the surface (plate II, fig. 2) was probably caused by running down rain water (so called rill erosion); the grooves may be predisposed by sandstone bedding. Degradation of sandstone manifests itself by gradual loss of cohesion between quartz grains and the matrix resulting from matrix outwash. In the final stage gradual loss of binder leads to disintegration into individual clastic grains — mineral disaggregation.

Selective dissolution of calcite mass on marble surface leaves a relief of organic debris fragments (plate III, fig. 2). Aggressive atmosphere pollutants play a significant role; in the initial stage the corrosion proceeds slowly due to a relatively low porosity. It manifests itself by a conspicuous roughening of the surface and its bleaching.

Granite surface, locally contaminated with a layer of soot and dust from the atmosphere, exhibits rusty or reddish stains in some places located close to biotite and indications of alveolar (pitted) surface after biotite weathering (plate IV, fig. 2). Granite degradation is less apparent

due to its more dense texture. Its further progress may be predisposed by disintegrated feldspar as a result of subatmospheric changes.

Of the studied rocks sandstone exhibits the least resistance to weathering; this may be explained by an interaction of several factors such as nature and quantity of clay matrix, type of texture, great porosity (over 20 %) with unfavourable ratio of interconnected micropores and considerable water absorption (10 %).

Tests of physical and mechanical properties of the rocks after 50-year exposure showed in comparison with initial mean values:

- decrease in mean bulk density in sandstone by 4 %, in marble by 3 %; granite exhibits practically the same values. Changes in bulk density probably result from partial surface degradation of the sample by weather effects. A higher bulk density indicates a greater compactness and lower porosity;
- increase in water absorption especially in sandstone, on average by 15 %. The increase in water absorption may be explained by widening of primary as well as newly originated capillary pores resulting from the observed texture and component loosening. The water absorption of granite and marble is less than 0.5 % and is in agreement with their low porosity;
- decrease in average compression strength is low only in case of strength under dry conditions — 6 to 8 %. Its decrease after the samples got soaked with water (first value) and after freezing cycles (second value) is more pronounced: 7 and 14 % in marble, 17 and 16 % in granite. The most conspicuous decrease is that in sandstone — 35 and 56 %; it is probably associated with mineral disaggregation observed in remnants of test rocks after the compression strength test.

Formerly, the service life of stones was estimated at 200 years according to stone dressers experience. Our results indicate accelerating effects of polluted atmosphere on stone weathering. Therefore it is justifiable to consider decrease in the stones durability at the present.

Preložila T. Hlavatá

Explanation of tables

Table 1a. Physicomechanical properties of the samples after 50-year exposure to urban atmosphere.

Table 1b. Physicomechanical properties of the original samples.

Table 2. Correlation of physicomechanical properties of the original and exposed samples.

Explanation of plates

Pl. I

Appearance of granite, sandstone and marble test cubes after 50-year exposure to polluted urban atmosphere. Reduced to 4/5. Photo ÚÚG, V. Skala

Pl. II

1. Appearance of the Hořice sandstone in fresh state, full-size. Photo by M. Sedláček
2. Surface of the Hořice sandstone test cube with conspicuous striation (rill erosion). organic remnants. $\times 2$. Photo ÚÚG, V. Skala

Pl. III

1. Appearance of the Slivenec marble in fresh state, full-size. Photo by M. Sedláček
2. Roughened surface of the Slivenec marble test cube with clearly manifest relief of In the left corner traces after asphalt defilement. $\times 2$. Photo ÚÚG, V. Skala

Pl. IV

1. Appearance of fresh granite, Černá Voda, full-size. Photo by M. Sedláček
2. Surface of the Černá Voda granite test cube contaminated with a layer of soot, dirt and dust from the atmosphere. $\times 2$. Photo ÚÚG, V. Skala

Долговременные опыты с естественными камнями в городской атмосфере

Экспериментальные работы, направленные на долговременные наблюдения над влиянием городской атмосферы на свойства естественных камней, начались на Чешском высшем техническом учебном заведении в Праге уже в 1931—1933 гг. Из пяти первоначально проектированных наблюдательных пунктов в ЧССР только здесь отчасти сохранились подлинные опытные образцы горных пород. После пятидесятилетнего выставления на воздухе проявились четкие изменения цвета, эстетического внешнего вида и морфологии поверхности образцов. Поверхность песчаника со связанной темноцветной корой местами разрыта эрозионными бороздами. Деградация проявляется начинающейся потерей вязкости зерен кварца со связующим веществом. Частичным растворением кальцита на поверхности мрамора обусловлено образование выдающегося рельефа обломков органических остатков; деградация продвигается из-за относительно низкой пористости в начальной стадии лишь медленно, проявляясь только резкой шероховатостью поверхности и ее выцветанием. На поверхности гранитов, загрязненной налетом сажи и пыли из воздуха, в непосредственной близости биотита местами наблюдаются ржавые пятна и признаки альвеолярной (рябой) поверхности после ее выветривания. Деградация гранитов из-за их плотной и более компактной структуры менее выразительна. Дальнейшее ее продвижение, возможно, предопределено разложенными вследствие субатмосферных преобразований полевыми шпатами. В области физико-механических свойств в сравнении с исходными параметрами проявилось уменьшение объемной массы, увеличение влагоемкости и понижение прочности при сжатии, проявляющееся более выразительно, прежде всего, после насыщения водой образцов и после циклов замораживания. Особенно резкие разности наблюдаются в песчанике.

Preložil A. Kříž