

# Modelování účinků prostředí v klimatickém větrném tunelu

**Stanislav Pospíšil, Miloš Drdáký**

Aerodynamické a zvláště klimatické větrné tunely s modelovanou mezní atmosférickou vrstvou představují v současné době velmi pokročilý nástroj ke zkoumání klimatických vlivů na stavební konstrukce, a to buď jednotlivě, nebo v synergickém režimu. Experimentální zařízení tohoto typu je v Evropě ojedinělé a je využíváno pro studium vlivu kombinovaných klimatických faktorů působících v reálných podmínkách. Tunel je zaměřen především na testování stavebních konstrukcí, konstrukčních prvků a dopravních prostředků. Zatímco působení jednotlivých klimatických parametrů, jako teploty, slunečního záření, srážek, vlhkosti, sněhu, mlhy na různé materiály izolovaně, je poměrně dobře popsáno, efekty způsobené větrem v kombinaci s působením dalších klimatických faktorů nejsou dostatečně prozkoumány. Jedinečnost větrného klimatického tunelu spočívá v možnosti experimentálního odzkoušení vlivu větru na sledované konstrukce jak izolovaně, tak v kombinaci s dalšími klimatickými parametry. Ve světě takových zařízení existuje jen málo, což je pochopitelně dáno i mnohdy velkými náklady na jejich vybudování, udržování a provoz. Uvádíme stručnou charakteristiku jednoho z nich, patrně největšího:

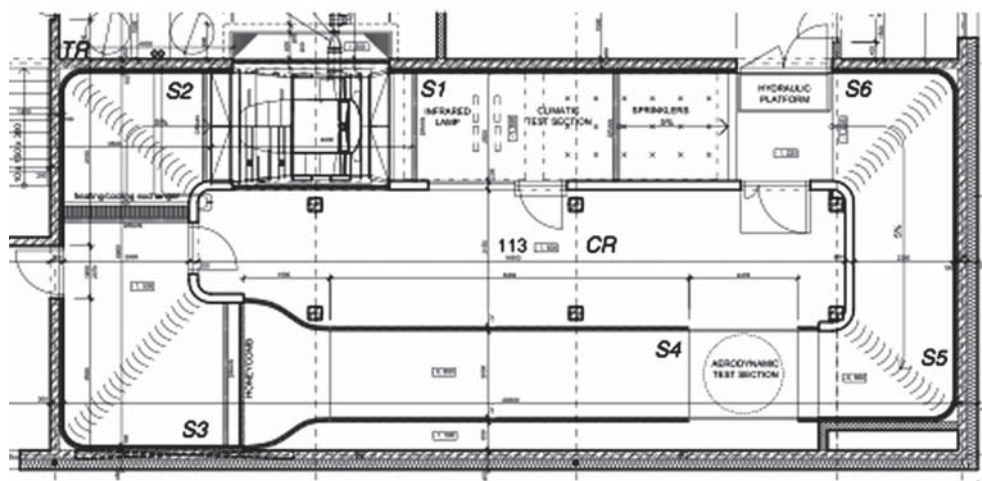
## Klimatický tunel CSTB

Větrný tunel ve francouzském městě Nantes se jménem Jules Verne provozuje laboratoř Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB). Využití tunelu je mnohačetné v základním i aplikovaném výzkumu a klade si za cíl rozvíjet fyzikální znalosti a chápání vlivu větru a dalších klimatických parametrů na budovy, fasády budov, konstrukční detaily, průmyslové výrobky a také vozidla.

Hlavní vlastnost zařízení je možnost simulovat a plně kontrolovat kombinace klimatických parametrů, provádět zkoušky celých konstrukcí nebo modelů, což je často jediným relevantním experimentálním postupem. Tunel obsahuje dva okruhy s cílem nabídnout co nejširší škálu možností simulace:

Vnější okruh, zvaný též dynamický, umožňuje reprodukci prostorové a časové evoluce přírodního větru až do rychlosti 100 km/h (proud může být modelován společně s deštěm až do 250 mm/h) nebo písečné bouře (koncentrace písku může dosáhnout až 10 g/m<sup>3</sup> v průřezu 10 m<sup>2</sup>). Nejvyšší rychlost proudění vzduchu je pak 280 km/h. Celkový výkon ventilátoru je účtyhodných 3200 kW.

Vnitřní okruh, zvaný také termální, může reprodukovat tepelné prostředí od -25 °C až +50 °C a relativní vlhkost od 30 do 100% ve zkušební komoře, jejíž průřez je 70 m<sup>2</sup>.



**OBRAZEK 210:** Půdorysné prováděcí vyobrazení tunelu v suterénu jedné z budov CET. V rozích tunelu jsou umístěny usměrňovací lopatky. Tunel je vybaven klimatickými a aerodynamickými prvky, jež za předpokladů splnění hlavních podobnostních kritérií vytvářejí dostatečně realistický obraz proudění vzduchu v atmosféře.

Maximální rychlost proudění vzduchu je možné nastavit v rozmezí od 90 km/h až do 140 km/h. V jednotce je možné i zasněžování, k čemuž se používají silná sněžová děla s kapacitou 15 cm/h na 200 m<sup>2</sup> podlahy zkušební komory. Kvalita sněhu se dá upravit podle obsahu vody. Je možné reprodukovat i ostatní klimatické parametry jako mráz, mlhu, krupobití a sluneční záření.

### Klimatický tunel CET

V České republice se pracovišti Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR podařilo vytvořit podmínky pro stavbu klimatického tunelu v Telči. Tunel byl vybudován v letech 2011–2012 v rámci výstavby Centra excelence Telč (CET) a otevřen v lednu 2013, nese jméno významného českého fyzika Vincence (Čeňka) Strouhala. Tunel je uzavřený ovál; část, která je základem pro klimatickou sekci, je vestavěna do suterénu přímo, druhou tvoří vestavěný ocelový tubus (v něm se především provádí aerodynamická měření) (**obr. 210**).

Základním vybavením tunelu je 200kW ventilátor, který vyrábí vítr o rychlosti až 180 km/h. Tunel je dále vybaven mechanickými, horko-drátkovými i optickými snímači a vysoce vyvinutým systémem optického zobrazování proudu s využitím trasovacích částic. Tunel je též opatřen simulátory klimatických vlivů, tedy především tepelným výměníkem pro simulaci cyklických teplot s minimální prostorovou hodnotou  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V této části se provádějí zejména experimenty týkající se výzkumu v oblasti inženýrských problémů ve stavebnictví, architektuře, památkové péči a v jiných oblastech, kde se sledují účinky větru spolu s dalšími faktory, jako jsou mráz, sálavé teplo a déšť (**obr. 211**). Klimatická část je obdélníkového průřezu  $2,5 \times 3,9\text{ m}$  s délkou  $9,0\text{ m}$  (**obr. 212**). V této části je možné dosáhnout rychlosti větru až  $18\text{ m/s}$  (v závislosti na poloze vertikálně pohyblivém stropu a pohyblivé klapky). Intenzita deště spolu s velikostí kapek je regulována tak, aby byly simulovány podmínky odpovídající mrholení nebo hustému dešti. K dispozici je rovněž radiační systém se čtyřmi infračervenými



**OBRÁZEK 211:** Příklad námrazy na úseku mostního lana vytvořené v klimatické části klimatického větrného tunelu CET. Problematika kmitání lan s námrazou nebo vlivem kombinace větru a deště je velmi významná s ohledem na celkovou bezpečnost a spolehlivost konstrukcí s lanovými prvky



**OBRÁZEK 212:** Klimatická komora s 200kW ventilátorem. Komora je připravena pro uchycení vzorků do otvorů v podlaze. Pohyblivý strop umožňuje operativní manipulaci s vodními tryskami či se sálavými lampami.

lampami s celkovým výkonem 8 kW a maximálním úhlem 60°. Výkon je regulován v plném rozsahu, a v případě potřeby je možné využít jen jednu lampu.

V aerodynamické části tunelu se řeší problémy především spojené s určováním zatížení konstrukcí od větru, které se s velkou přesností modeluje na menších replikách vysokých budov, stadionů nebo mostů, dále se studuje vliv proudění vzduchu na dynamickou stabilitu konstrukcí a zkoumá vliv proudění větru v zástavbě či v otevřeném terénu s cílem stanovit rozptyl škodlivin nebo analyzovat komfort chodců. Řeší se i problémy aeroelastické odezvy konstrukce,

difuze, rozptylu znečišťujících látek, vlivu proudění na tepelné ztráty budov a větrání a účinků větru na dopravní systémy. Pracovní prostor aerodynamické sekce je obdélníkového průřezu 1,9 (šířka) × 1,8 m (výška). Celková délka aerodynamické části je 11,0 m, včetně části pro vývoj turbulentní mezní vrstvy. Simulace mezní vrstvy atmosféry s požadovanými charakteristikami vychází z použití prvků, jako jsou mříže, výměnné generátory turbulence, bariéry a podlahové desky s různou drsností. Rozsah rychlosti větru v prázdné pracovní sekci je 0,2–33 m/s.

### ***Vybavení používaná při experimentech***

Experimentální činnost v aerodynamických a klimatických tunelech vyžaduje velmi pokročilé měřicí zařízení a vyhodnocovací metody. Současný technologický vývoj již nabízí přístroje, jejichž použití bylo před 20 lety nepředstavitelné, či neexistovaly. V CETu existuje velmi pokročilé vybavení, skládající se z následujících přístrojů:

- *CTA (Constant Temperature Anemometry)* – drátková anemometrie měření rychlosti a turbulence v 1, 2 nebo 3rozměrném proudění vzduchu.
- *PIV (Particle Image Velocimetry)* – neinvazivní metoda založená na laserovém osvětlování a kamerovém snímání proudu. Využívá se k měření obtékání konstrukcí, turbulence apod.
- *DEWETRON* – moderní systém určený ke sběru dat za současného multikanálového vzorkování. Využívá 24bitový A/D převodník s anti-aliasingem a umožňuje zpracování signálů. Zařízení je použitelné jak pro analogový, tak pro digitální signál s pokročilými metodami zpracování.
- *Traverse System Dantec* – pomocný nástroj pro přesné skalární a vektorové mapování proudového pole založené na měření tlaku a složek rychlosti větru.
- *Tlakový Scanner Scanivalve* – k měření hodnot tlaku za přímého měření na povrchu modelu, rychlé vzorkování.
- *Environmentální měření* – termo-kamery, anemometry, termo-anemometry, teploměry, termo-vlhkoměry, tlakové senzory, laserový snímač velikosti kapiček.
- *Pětivotrová sonda* – slouží k získání skalárních a vektorových vlastností složitých proudových polí, měření třísložkové rychlosti větru.

## **PŘÍKLADY EXPERIMENTŮ V KLIMATICKÝCH TUNELECH**

### **Studie expozice vápencových fiál chrámu sv. Barbory**

Během čtyřdenní expozice gotických fiál z kutnohorského chrámu sv. Barbory ve větrném tunelu byl experimentálně ověřován efekt vodoodpudivé úpravy povrchu kamene (hydrofobizace), efekt větru ve spojení s deštěm na průnik srážkové vody do struktury kamene a proměření teplotních a vlhkostních změn v různých partiích kamenného prvku v závislosti na měnícím se klimatu vnějšího prostředí. Experiment se uskutečnil v klimatickém větrném tunelu „Jules Verne“ v Nantes (Francie) (Pospíšil et al. 2006).

Exponovány byly dvě fiály z kutnohorského vápence, které byly během restaurování chrámu sejmuty z důvodu havarijního stavu a nahrazeny kopiemi. Oba prvky pocházejí z jižní strany chrámu, z míst prvního a druhého opěrného pilíře (**obr. 213**).

Příčinou poškození kamenných prvků jsou korozní a erozní procesy. Vzhledem k souvislosti mezi umístěním prvků (na jižní fasádě) a mírou jejich poškození můžeme konstatovat,

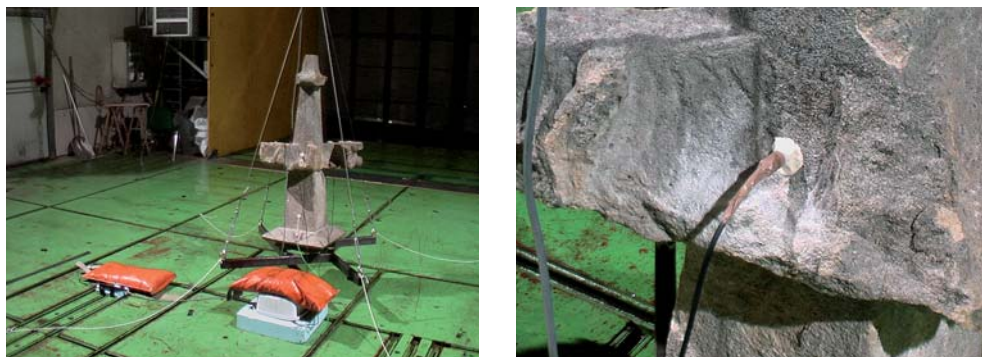


**OBRÁZEK 213:** *Fialy z kutnohorského vápence, které byly během restaurování chrámu sejmuty*

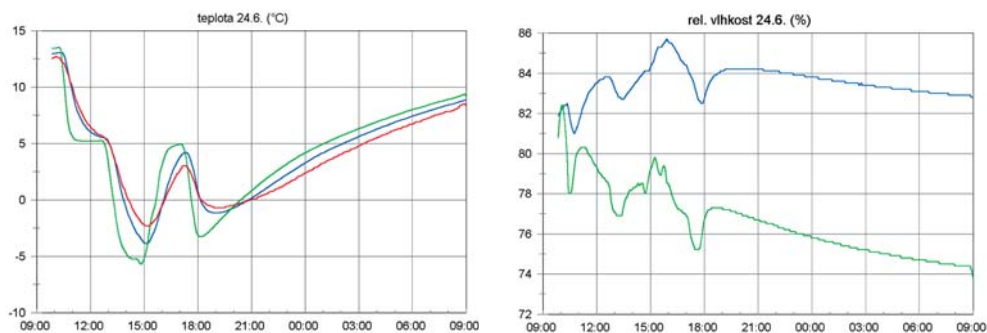
že mezi dominantní degradační procesy patří s největší pravděpodobností tepelné namáhání materiálu. V důsledku reaktivity materiálu s oxidy síry a oxidem uhličitým v ovzduší můžeme za další z příčin degradace materiálu označit úbytek nebo transformaci uhličitánových složek horniny a v důsledku chemických přeměn materiálu v povrchových vrstvách i lokální změny jeho fyzikálních vlastností. Chemická koroze kamene je vedle kvality ovzduší ovlivňována zejména přítomností vody jako reakčního i transportního média. Průnik vody do materiálu, vysychání, mechanické poškození horniny mrazem, krystalizací novotvořených minerálů nebo prudkými teplotními a vlhkostními změnami okolního prostředí jsou z hlediska degradace konkrétního materiálu stěžejní otázky, které považujeme za důležité studovat v reálných i simulovaných podmínkách. Aerodynamický klimatický tunel poskytl příležitost získat nové informace, které mohou být využity pro kvalitnější způsob ochrany historicky i výtvarně cenného materiálu.

### ***Popis experimentu, metodika***

Jedna ze dvou fiál byla před započítím experimentu konsolidována postupem, který byl reprezentativní pro restaurování chrámu sv. Barbory, které v té době probíhalo: kámen byl restaurátory očištěn, lokálně ošetřen zpevňovacím prostředkem, poškozená místa a praskliny byly vytmeleny anorganickým tmelem na bázi bílého cementu nebo hmotou pojenou esterem kyseliny křemičité, na závěr byl povrch celoplošně ošetřen hydrofobizačním organo-křemičitým prostředkem. Druhá fiála byla pro experiment ponechána jako srovnávací vzorek v původním stavu bez jakýchkoli konzervačních zásahů.



**OBRÁZEK 214:** Zavěšení fiály na váhu ve zkušebním prostoru klimatického tunelu a příklad umístění teplotního a vlhkostního čidla



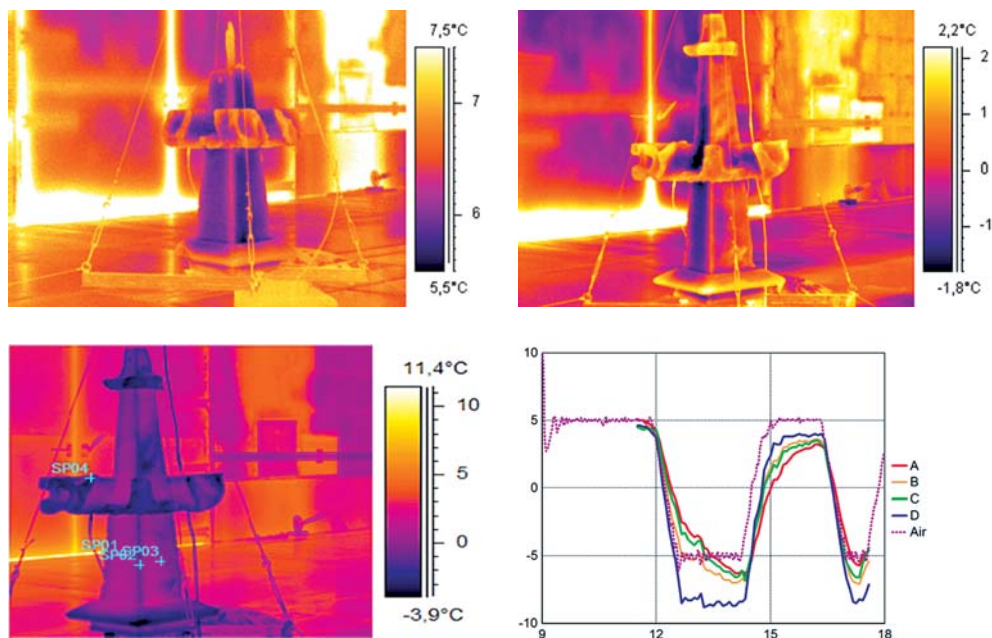
**OBRÁZEK 215:** Hodnoty teploty (vlevo) a vlhkosti (pravý graf) získané během cyklovacího experimentu v rozmezích  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  teploty okolního vzduchu

V průběhu expozice každé fiály v tunelu byly kontinuálně měřeny a zaznamenávány vlhkost a teplota uvnitř materiálu pomocí jednoho teplotního (termočlánek NiCr) a dvou teplotně-vlhkostních čidel (**obr. 214**). Byly použity kombinované senzory Ahlborn FHA 6461, které obsahují kapacitní vlhkostní čidlo v rozsahu 0–100 % R.H. s přesností 2 % R.H. a teplotní čidlo Ntc typu N s přesností 0,1 °C v rozsahu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jeden senzor byl umístěn do křížové kytky a byly jím sledovány teplotně-vlhkostní parametry v subtilní partii fiály, několik centimetrů pod povrchem. Zbylé senzory byly umístěny na centrální jehlan fiál a proměřovaly sledované charakteristiky v místech několik centimetrů pod čelně exponovaným povrchem fiál. Teplota a vlhkost v kameni byla snímána a ukládána. Změny povrchové teploty materiálu v závislosti na změnách okolního klimatu byly sledovány také infračervenou (IR) kamerou.

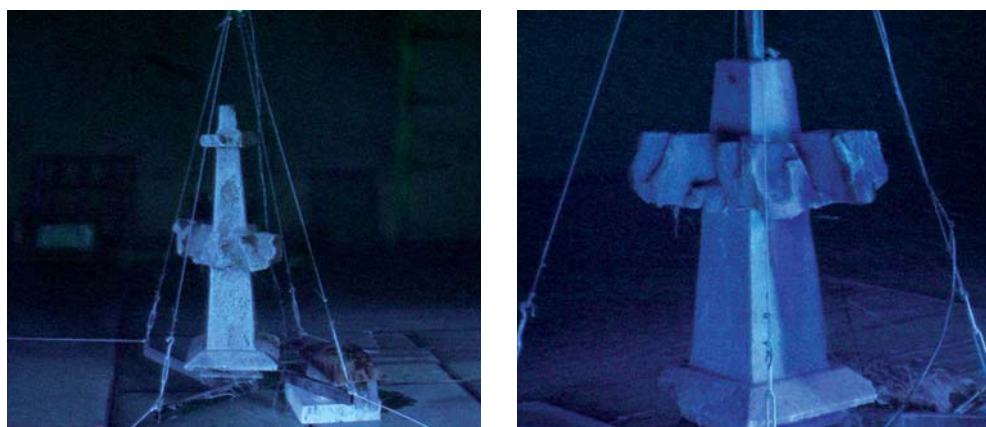
Hmotnost obou kamenných prvků byla v průběhu experimentu zjišťována pomocí závěsné váhy. Pro snadnou orientaci byla čelní – ke směru deště kolmo orientovaná – strana fiál označena červenou značkou.

### **Režim klimatických parametrů prostředí**

Fiály nebyly před experimentem vysušeny za zvýšené teploty, byly pouze přirozeně vyschlé s obsahem rovnovážné vlhkosti odpovídající teplotě a vlhkosti okolního prostředí. Před



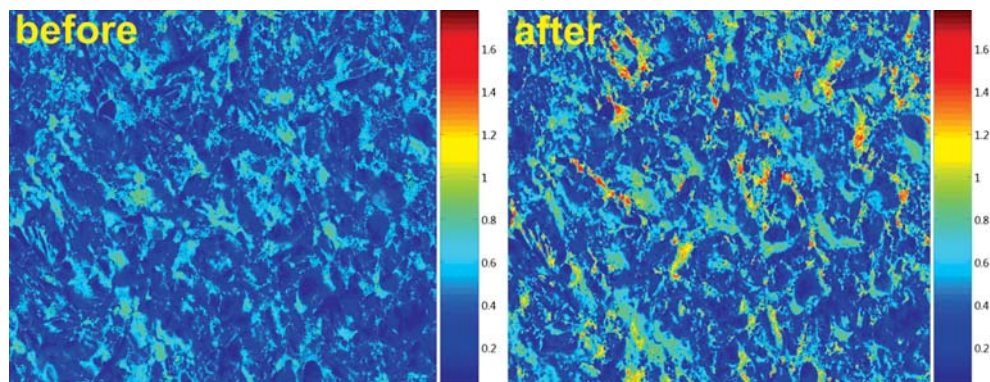
**OBRÁZEK 216:** Sledování změny povrchové teploty materiálu v závislosti na okolním klimatu pomocí termovize. Tmavé části jsou chladnější, ovívané větrem. Graf zobrazuje teplotní rozdíly na smáčeném a suchém povrchu.



**OBRÁZEK 217:** Metodika použití fosforeskující přísady v dešťových kapkách a vizualizace smáčení deštěm. Vlevo – hydrofobizovaná fiála, vítr 10 m/s, vpravo – fiála bez ošetření, vítr 10 m/s. Světlá barva značí plochy, které jsou intenzivně smáčené deštěm.

experimentem byly uloženy v hale při teplotě 18 °C a relativní vlhkosti 90%. Z hmotnostních změn byla vypočtena vlhkost materiálu v čase vážení a vyjádřena v % hmotnostních.

Bylo zjištěno, že i nasákavost neošetřené fiály měřená Karstenovými trubicemi je velmi nízká. Po 18 minutách byl zjištěn koeficient vodní absorpce  $w = 0,93 \text{ kg/m}^2$  hod. Uzavřením povrchu kamene a minimální nasákavostí povrchové vrstvy fiál lze vysvětlit proti očekávání



**OBRAZEK 218:** Praktická ukázka poškození vzorku povrchu fiály před (vlevo) a po (vpravo) umělem smáčení. Barevná stupnice označuje vzdálenost povrchu od referenční roviny v milimetrech

poměrně malý hmotnostní přírůstek neošetřené fiály po dešti při experimentu ve větrném tunelu a poměrně malý rozdíl v hmotnostních přírůstcích ošetřené a neošetřené fiály v důsledku deště. Povrch neošetřené fiály byl však na rozdíl od hydrofobizované fiály dobře smáčivý vodou.

Některé výsledky jsou zobrazeny na demonstračních obrázcích a grafech (**obr. 215–218**).

Účinky hydrofobní ochranné impregnace materiálu jsou přehledně vypsány v **tabulce 10**. Údaje o množství absorbované vody jednoznačně ukazují vhodnost zvolené metody.

**TABULKA 10:** Shrnutí účinnosti hydrofobního ošetření

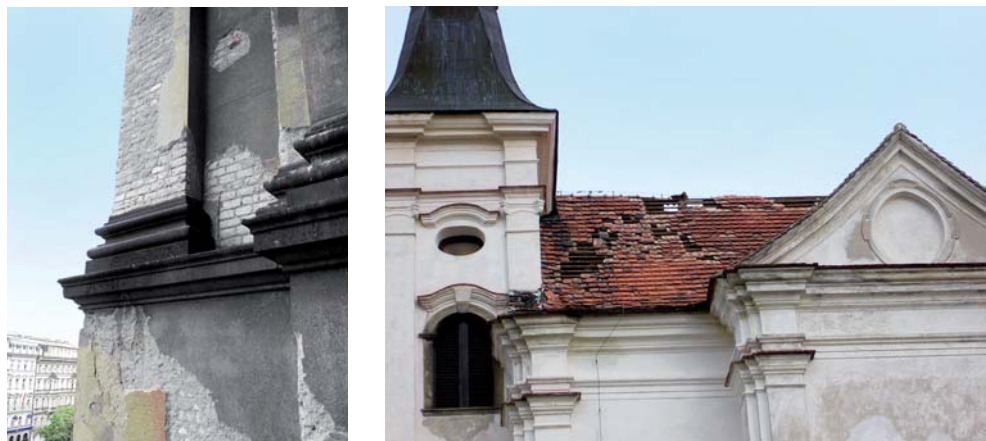
Rychlost větru 10 m/s	Množství absorbované vody (hmotnost v % suchého vzorku)	
	Bez impregnace	Hydrofobní impregnace
Trvání deště		
60 min.	0,92	0,20
+135 min.	1,86	0,82
+60 min.		0,93
+60 min.		0,98

## Numerická a experimentální studie proudění, poškození a depozice znečištění na stavbách kulturního dědictví

Vítr primárně způsobuje tlakové zatížení a může být příčinou mechanického poškození konstrukcí. Za vyšších rychlostí větru, např. při vichřicích, jsou škody způsobené tímto zatížením skutečným problémem v celé Evropě a přináší prakticky největší finanční ztráty vyjádříme-li je v pojistných výdajích. V průběhu devadesátých let se například vyskytlo osm velkých vichřic, které způsobily rozsáhlé škody v nejméně 10 zemích. Celková ztráta v jednom roce byla odhadnuta na 20 miliard eur.

Účinky větru na konstrukce jsou velmi rozličné. I za normálních podmínek může proudění větru kolem budov vést k jednorázovému poškození nebo ke kumulativním škodám (**obr. 219**). Poznáním chování větru v okolí konstrukce, podpořené experimentálním výzkumem v aerodynamickém tunelu, je možné škody podstatně omezit. Nejen při silných větrných bouřích dochází k poškození staveb, každý rok je v Evropě značný počet budov a staveb





**OBRAZEK 219:** Vlevo – poškození fasády historického objektu od vlivu synergického působení větru, hnaného deště a usazování chemických zplodin. Vpravo – „drobné“ poškození střechy od větru

poškozen v důsledku relativně mírných vichřic. Vysoké škody způsobené větrem představují těžkou finanční zátěž na národní hospodářství obecně, ale také na podniky a veřejnost, která musí platit za opravy.

Mezi škody je potřebné zařadit i vady způsobené procesy depozic škodlivých zplodin na fasádách historických budov a na objektech kulturního dědictví. Tyto nezpůsobují jen estetické „poškození“, usazováním chemicky škodlivých látek dochází k chemickým procesům, které jsou katalyzovány rovněž vlivem vlhkosti a deště. Proudění kolem objektů podstatně ovlivňuje ukládání znečišťujících látek, biologickou korozi, cykly vysychání a smáčení, jakož i mechanické opotřebení napadených ploch. Vítr transportuje do materiálu vodu, soli, prach a plyny, nebo přímo způsobuje mechanické poškození.

Vzhledem k výše uvedeným synergickým účinkům mohou být náklady na opravy a údržbu zvláště vysoké v případě historických objektů.

### **Metodika, popis experimentů**

Ke studiu větru se v současnosti využívá i numerických metod. Analýza a efektivní návrhy opatření ke zmírnění dopadů účinků větru jsou mnohdy závislé na vhodné kombinaci experimentální analýzy v aerodynamickém tunelu a numerických modelů. Analýza proudění kolem budovy a identifikace nebezpečných míst na konstrukci je obecně velmi náročný úkol i pro konstrukce s relativně jednoduchým geometrickým tvarem. Numerické řešení závisí na mnoha parametrech, k nejvýznamnějším z nich patří vektor rychlosti větru a rozměry konstrukce. Uvádíme zde studii, která reprezentuje výsledky numerické analýzy repliky typické historické věže srovnávané s měřeními v aerodynamickém tunelu (**obr. 221**). Takováto validace numerických modelů aerodynamickými experimenty je velmi důležitá z hlediska věrohodnosti matematických modelů proudění a podnětů k jejich dalším úpravám. **Obrázek 222** ukazuje příklad simulace proudění v počítači. Pochopení proudění ukáže na nejvíce ohrožená místa na konstrukci z hlediska mechanického i chemického poškození.



**OBRÁZEK 220:** *Gotická věž s ostrými hranami slouží jako vzor věže pro numerický výpočet i pro experimentální model. Uprostřed - balsový model umístěný v aerodynamickém tunelu. Vpravo - detail věžičky s drobným otvorem ke snímání tlaku. Tlaky na povrchu modelu jsou přenášeny hadičkami až ke snímačům, umístěným obvykle uvnitř modelu či pod měřicím prostorem.*

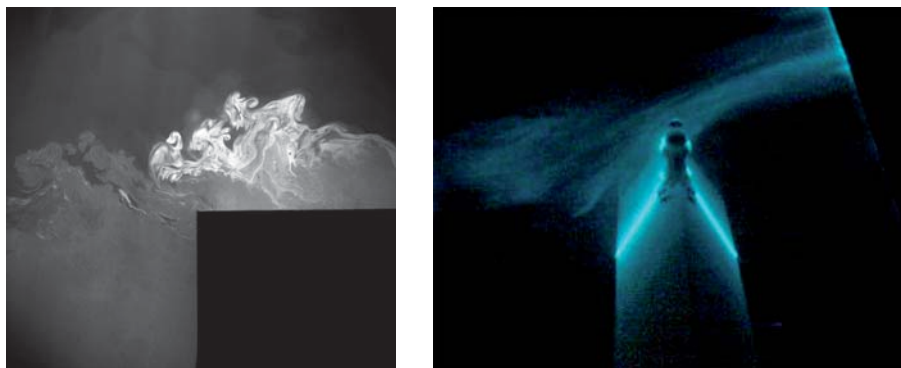
### **Modelování proudění vzduchu kolem věže**

Bylo vybráno několik typických tvarů historických střech a konstrukcí, především starých městských věží. Počítačový model proudění vzduchu kolem těchto typických věžových staveb včetně konkrétních a nejvíce ohrožených detailů byl vytvořen ve dvourozměrném i třírozměrném prostoru. Model je založen na předpokladu ustáleného proudění s nízkou flukuační složkou (Pospíšil et al. 2007).

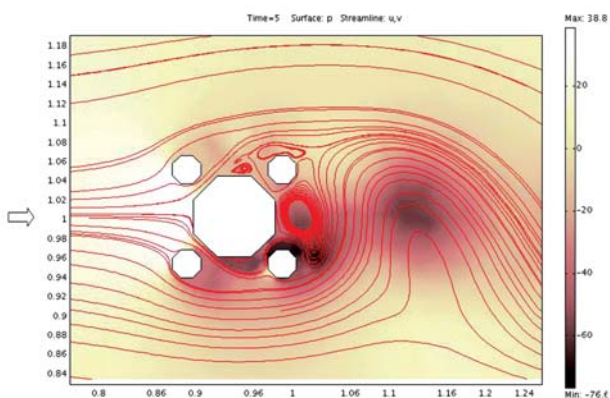
Fyzický model věže Týnského chrámu ze Staroměstského náměstí v Praze byl vytvořen v měřítku 1:25. Měřicí systém se skládal z 16 citlivých nízkotlakých snímačů. Ty odečítají tlaky prostřednictvím systému malých trubek a hadiček, vedoucích vzduch ze speciálně vrtaných miniaturních otvorů na povrchu modelu (**obr. 220**).

Výsledky analýzy ukazují významné změny charakteru proudnic a rozložení tlaku. Tmavé a světlé oblasti odpovídají nízkým a vysokým rychlostem proudu a tudíž vysokým, respektive nízkým tlakům. Takto lze identifikovat například oblasti se sáním vzduchu, což je kritické zejména pro skládanou střešní krytinu, která odolává lépe tlaku. Dalším modelovaným případem byla analýza rozložení tlaků větru na historické věži a střeše a její změny v důsledku odlišného uspořádání geometrie střechy a též v závislosti na přítomnosti menších věžiček. Přítomnost věží zřejmě ovlivňuje rozložení zatížení větrem. Obecně lze říci, že vznikají zóny s vysokým tlakem a sáním. V některých případech zapříčiňuje přítomnost věžiček vznik nízkého tlaku kvůli vzniku takzvaného zpětného proudění. Výsledky porovnání numerického a experimentálního řešení v ustáleném stavu jsou na **obrázku 223**.

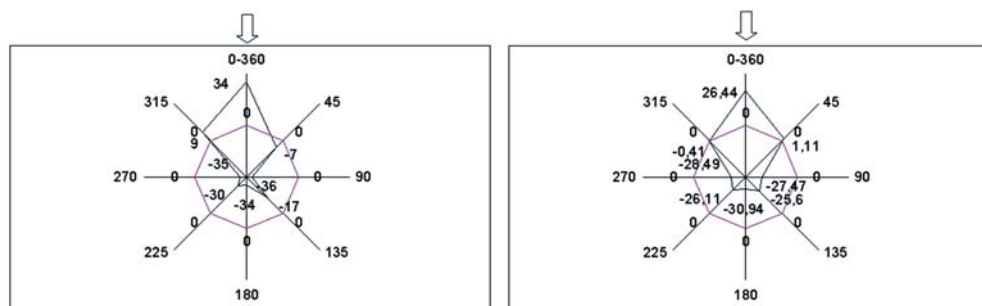
Tento příklad demonstruje použitelnost numerické simulace z kvalitativního hlediska a navíc ukazuje, které numerické postupy mohou být vhodné pro modelování fyzikálního jevu a přitom poskytují spolehlivé kvantitativní výsledky (Yates et al. 2009).



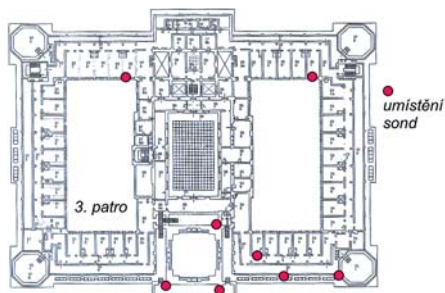
**OBRÁZEK 221:** Vizualizace proudů v okolí hrany objektu (tmavý čtverec) rozptýlenou mlhou (vlevo), kouřem a zkoumáním proudnic metodou laserového zobrazování částic (vpravo)



**OBRÁZEK 222:** Vlevo – sledování proudění vzduchu kolem věže pomocí kouře. Vpravo – výsledek numerické simulace proudění vzduchu kolem vrcholu staré historické věže s věžičkami. Tmavá barva představuje nižší rychlost.



**OBRÁZEK 223:** Porovnání experimentálních hodnot středního tlaku (vlevo) s numerickými výsledky (vpravo) v jednom z vodorovných řezů střešní částí věže



**OBRÁZEK 224:** Pohled na průčelí muzea (vlevo) s patrnými stopami po silném znečištění a plánec rozmístění sběrných terčů ve skutečnosti (vpravo)

## Měření depozice škodlivin

Šíření zplodin a jejich depozice na stavbách jsou silně ovlivňovány klimatickými a povětrnostními podmínkami. Ty lze do jisté míry realizovat v klimatickém tunelu a sledovat usazování částic v modelovém měřítku.

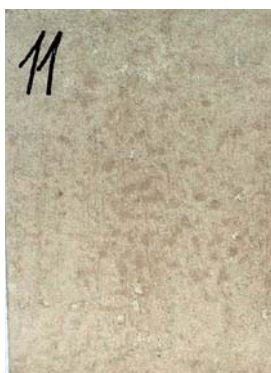
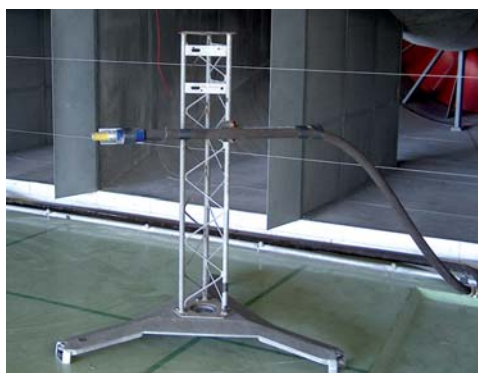
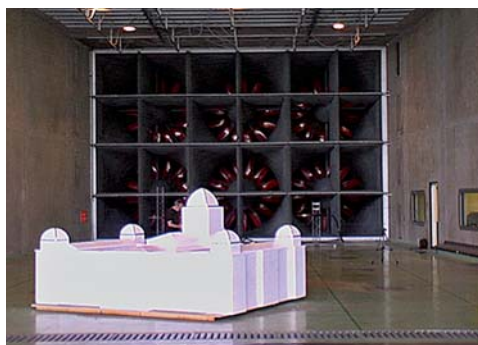
Vliv proudění vzduchu kolem budovy Národního muzea na špinění jeho fasády byl modelově zkoumán v klimatickém větrném tunelu „Jules Verne“ v CSTB Nantes (Francie). Pro zkoušky byly postaveny dva modely budovy – jeden v měřítku 1:40 a druhý v měřítku 1:80. Cílem měření bylo provést zrychlenou studii vlivu směru větru na usazování prachu na fasádě a vlivu geometrie objektu. Na experimentu spolupracovali pracovníci ÚTAM AV ČR a SVÚOM Praha. Na **obrázku 224** je pohled na hlavní průčelí budovy Národního muzea a plánec rozmístění filtračních čidel na skutečné budově.

Při zkoušce byl ve vzdušném proudu rozptýlován modelový prach, který měl částice o velikosti okolo 80 mikronů, tvořené směsí oxidu křemíku a hliníku s nízkým obsahem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{CaO}$ . Prach byl do vzdušného proudu vháněn čtyřmi tryskami se stlačeným vzduchem, které byly umístěny na těžkých sloupech v blízkosti tunelových větráků. Koncentrace prachu byla určena minimální hodnotou, závislou na rychlosti větru tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného rozptýlení prachu kolem modelu budovy. Oba modely byly umístěny ve střední části tunelu a menší model stál před větším modelem ve vzdálenosti neovlivňující proudění kolem velkého modelu. Před zkouškou s prachem byla provedena vizualizace proudění kolem modelů klasickým způsobem pomocí kouře.

V jednotlivých modelových situacích byly použity následující charakteristiky:

- Sekvence 1: směr větru – západ, rychlost 5 m/s, koncentrace  $0,41 \text{ g/m}^3$ , 15 min.
- Sekvence 2: směr větru – západ, rychlost 5 m/s, koncentrace  $0,44 \text{ g/m}^3$ , 15 min.
- Sekvence 3: směr větru – západ, rychlost 10 m/s, koncentrace  $0,2 \text{ g/m}^3$ , 15 min.
- Sekvence 4: směr větru – západ, rychlost 10 m/s, koncentrace  $0,2 \text{ g/m}^3$ , 15 min.
- Sekvence 5: směr větru – jihozápad, rychlost 5 m/s, koncentrace  $0,37 \text{ g/m}^3$ , 10 min.
- Sekvence 6: směr větru – jihozápad, rychlost 10 m/s, koncentrace  $0,19 \text{ g/m}^3$ , 10 min.

Prach byl zachycován na modelu dvěma způsoby. Nejprve pomocí celulózo-křemičitých destiček o rozměru  $100 \times 150 \text{ mm}$ , které byly jednostranně potřeny lékárnickou vazelinou pro zvýšení lepivosti (**obr. 225**). Destičky byly na model upevněny pomocí suchých zipů, aby mohly být pro jednotlivá měření vyměňovány. Před zkouškou byly zváženy i s vazelinou



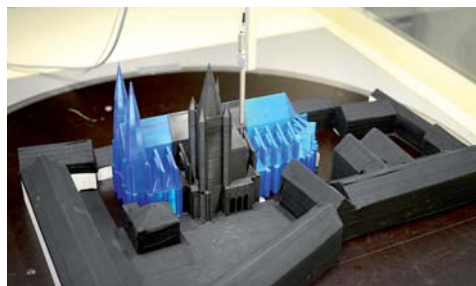
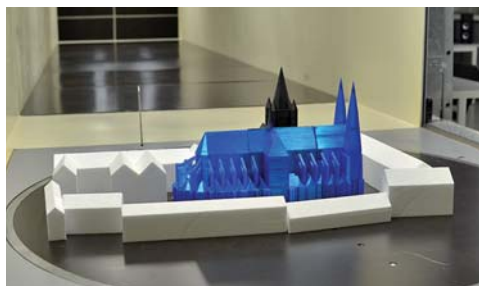
**OBRÁZEK 225:** Umístění modelů muzea v aerodynamickém tunelu, ve kterém je možné provádět rozptylové zkoušky. K rozptylu je využívána možnost otevření aerodynamického tunelu do venkovního prostoru a vstříknutí prachových částic (vlevo dole) do prostoru za silnými ventilátory. Volba prachových částic vychází z modelových zákonů, které respektují měřítko, rychlost větru, hustotu a další relevantní parametry. K zachytávání prachu na modelu budovy byly použity destičky s adhesivním povrchem.

a úchytkami v plastovém sáčku, do kterého byly po expozici prachem opět po opatrném sejmutí vloženy a posléze opět zváženy ve SVÚOM Praha<sup>1</sup>. Desky byly porovnány i vzhledově pomocí spektrofotometrického měření změny odstínu. Vedle tohoto měření bylo fotograficky dokumentováno znečištění celého povrchu modelů po natření bezbarvou vazelinou. Stav modelů byl zaznamenáván i na videu a fotograficky.

Na dalších obrázcích je vyobrazeno umístění modelu muzea v aerodynamickém tunelu, ve kterém je možné provádět rozptylové zkoušky.

Při experimentech byla zjištěna dobrá korelace mezi měřením na skutečné budově a měřením na modelech při zachování určitých modelových podmínek a při velmi krátkých intervalech působení simulovaných povětrnostních faktorů. To prakticky vylučuje možnost úspěšně modelovat integrální poškození dlouhodobými testy. Měření na skutečné budově probíhalo v rámci projektu MULTIASSESS, podporovaného Evropskou komisí, kdy byl na několika místech Národního muzea sledován stav znečištění ovzduší a usazování polutantů.

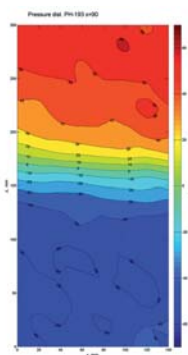
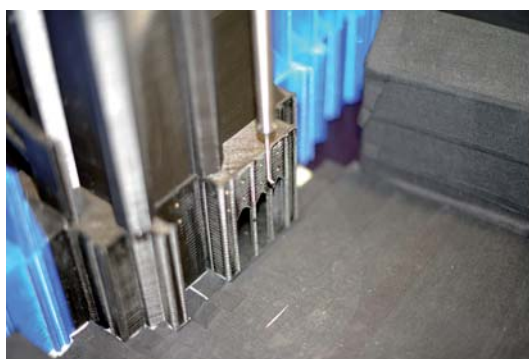
<sup>1</sup> Dagmar Knotková, Kateřina Kreislová: Povrchové znečištění složitých architektonických forem vyvolané znečištěním ovzduší, Zpráva SVÚOM, 35 s., listopad 2004.



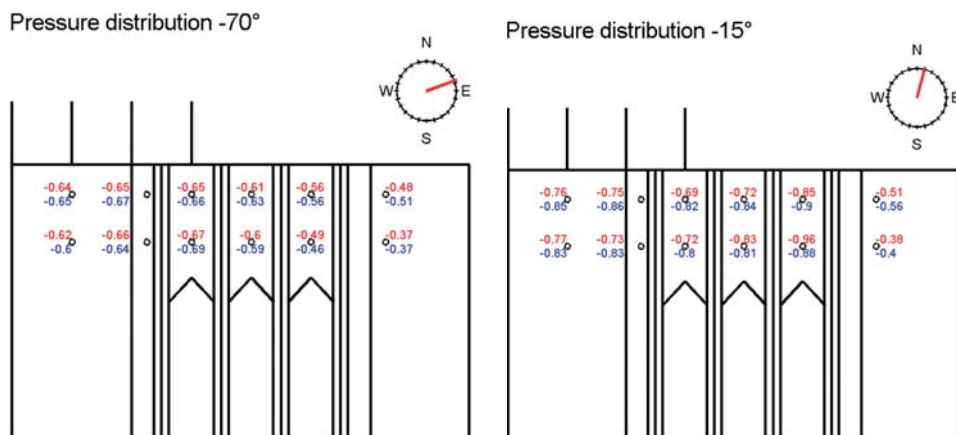
**OBRÁZEK 226:** Model katedrály s okolní zástavbou Pražského hradu umístěný v aerodynamickém tunelu. Černá část katedrály je s mozaikou a tlakovými snímači. Před modelem (směrem do obrázku) je umístěna Prandtlůva trubice měřící rychlost větru.



**OBRÁZEK 227:** Vizualizace proudění v blízkém okolí vzácné mozaiky Posledního soudu na katedrále sv. Víta na Pražském hradě. Otočný stůl umožňuje měření tlaků na modelu ze všech možných směrů větru a tudíž jeho komplexní analýzu.



**OBRÁZEK 228:** Detail modelu s umístěnými tlakovými odběry (vlevo). Rozložení rychlosti větru na nádvoří katedrály (vpravo). Střední rychlost větru na nádvoří byla zjišťována s použitím metodiky konstantní termické anemometrie (CTA).



**OBRAZEK 229:** Tlaky v jednotlivých bodech mozaiky pro dva směry větru 70° severovýchodně (vlevo) a -15° (vpravo) severovýchodně

## Studie expozice mozaiky Posledního soudu v klimatickém tunelu

Mozaika Posledního soudu na katedrále sv. Víta Pražského hradu je vystavena celoročnímu působení větru v kombinaci s hnaným deštěm a střídáním teplot. Všechny tyto faktory včetně teplotních cyklů ovlivňují povrch mozaiky, přičemž jejich synergické působení se může vzájemně zesilovat. Byl postaven model katedrály s okolím a byly vytvořeny modelové podmínky, které simulují větrnou zátěž místa s mozaikou. Cílem studie a zkoušek bylo:

- vytvořit mezní vrstvu proudění odpovídající místním podmínkám;
- stanovit charakteristiky proudového pole v okolí mozaiky;
- stanovit tlakové poměry přímo na mozaice v závislosti na směru větru.

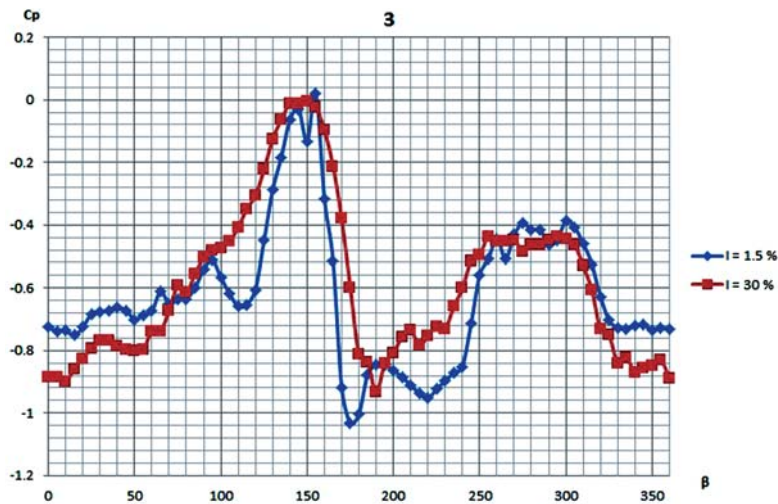
V aerodynamické části tunelu byla vytvořena mezní vrstva proudění, která respektuje okolní (hustou) zástavbu v okolí Pražského hradu. Intenzita turbulence se pohybuje okolo 28 %. Dále byl vytvořen výškově závislý rychlostní profil větrného proudění, který odpovídá podmínkám v reálném terénu.

### Model katedrály

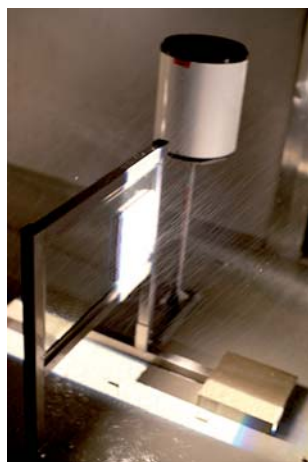
Model Svatovítské katedrály v měřítku 1:200 byl vyroben po částech na 3D tiskárně převedením digitalizovaných geodetických dat do formátu STL. Jde o největší měřítko modelu, který je ještě možné do klimatického tunelu umístit, mají-li být experimentálně zjišťovány zvláštnosti vzdušného proudění na nádvoří v okolí katedrály v závislosti na převládajícím směru větru. Tvorba modelu na 3D tiskárně nabízí nebývale výhodný poměr mezi dosažitelným detailem modelu a náklady na pracovníka tvořícího model. Pohled na vývoj modelu nabízí **obrázek 226**. Model samotné katedrály byl doplněn o modely okolních budov.

### Testy v tunelu, vizualizace proudu, získané výsledky

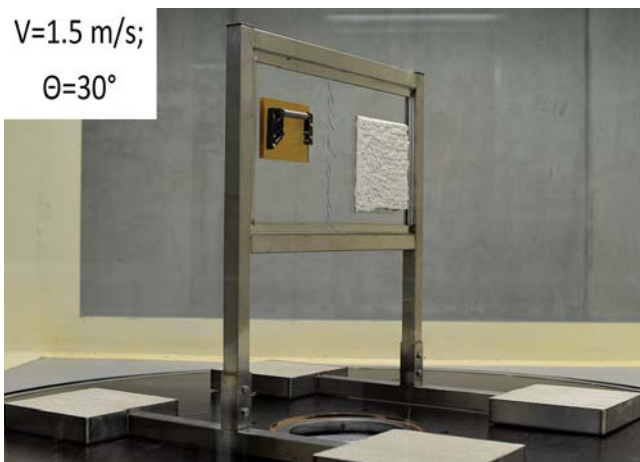
Analýza proudění spočívala v měření rychlosti větru na úrovni nádvoří a mozaiky a také v měření tlaků přímo na mozaice. Toto standardní měření bylo doplněno o vizualizaci proudu v okolí místa mozaiky, která identifikuje místa s opakovanými vírovými nárazy a tedy silnější expozicí větru s deštěm (**obr. 227**).



**OBRÁZEK 230:** Tlaky větru ve vybraném bodě na mozaice v závislosti na směru proudy. Negativní hodnoty za určitého natočení představují sání větru v daném místě, které může způsobit například „odtrhávání“ pojiva mezi dílky mozaiky apod.



$V=1.5 \text{ m/s};$   
 $\Theta=30^\circ$



**OBRÁZEK 231:** Panel s mozaikou umístěný v klimatickém tunelu. Na tomto zkušním prvku byla zkoušena rezistence dílků a pojiva proti větru s hnaným deštěm. Intenzita deště byla měřena laserovým srážkoměrem. Byla též zkoumána varianta, kdy je část mozaiky vystavena negativním tlakům, tedy sání v kombinaci s deštěm.



Další **obrázek 228** ilustruje detail modelu s rozmístěním tlakových senzorů, právě na úrovni měřítkové mozaiky. Model byl pootáčen po 15°, což umožnilo sledovat změnu tlaků s ohledem na proudění větru. Barevně je vyznačen rychlostní profil a ve spodní části obrázku je naznačeno proudové pole s proudnicemi, které ukazují, kde je nejvíce atakované místo od větru. Je zřejmé, že se vytvářejí víry, které mohou způsobovat záporné tlaky na mozaice. To je zřejmé i z **obrázku 229**, na kterém jsou vyznačeny tlakové koeficienty  $C_p$  (maximální hodnota je  $C_p = 1$ ) vyjadřující bezrozměrné charakteristiky, kterými je třeba násobit rychlost větru v daném místě a čase, abychom dostali skutečný tlak, nebo popřípadě sání v daném místě. **Obrázek 229** ukazuje tlaky v jednotlivých místech mozaiky (z celkového počtu 12). Na **obrázku 230** jsou uvedeny tlaky na vybrané *měřítkové sondě*, tedy v *místě na mozaice* v závislosti na směru větru. Sonda odpovídá určitému místu na skutečné mozaice, které lze určit z měřítka.

Měření je vstupní informací pro kvalifikované odhady a porovnání s reálným prouděním dle informací ČMHÚ. Vyhodnocení údajů z klimatického tunelu je posléze obvykle zaměřeno na odhad expoziční doby mozaiky v průběhu jednoho roku nebo více let a na extrapolaci a odhadu extrémních hodnot.

Ukázalo se, že mozaika je významně zatížena i negativními tlaky, tedy sáním, které působí jinak než přímé tlaky. To je důležitý poznatek především z hlediska expozice na hnaný déšť. Z tohoto důvodu byl do klimatické sekce umístěn zkušební panel zaměřený na analýzu veličnosti a působení negativních tlaků působících na mozaiku a především na pojivo (**obr. 231**).

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI „Technologie údržby a konzervace mozaiky Posledního soudu a metody restaurování-konzervování středověkého a archeologického skla“ DF12 P01 OVV 017, dále podpory evropského projektu CULTSTRAT a projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Pospíšil, S., M. Drdácký, Z. Slížková, D. Knotková a P. Delpěch. Surface degradation of complex architectural form due to atmospheric pollution. In: Fort, R., M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras a C. Vazquez-Calvo (eds.). *Heritage, Weathering and Conservation*, London: Taylor and Francis, 2006, 447-452. ISBN 0-415-41272-2.
- Pospíšil, S., M. Drdácký, Z. Slížková, J. Lesák a D. Knotková. Wind tunnel modelling in conservation. In: Drdácký M. a M. Chapis (eds.). *Safeguarded Cultural Heritage: understanding and viability for enlarged Europe*. Praha: ITAM, 2007, 397-408. ISBN 978-80-86246-29-1.
- Yates, T., M. Drdácký, S. Pospíšil a T. Grønftoft. Risk assessment and management strategies at local level, Chapter 8. In: Watt, J., J. Tidblad, V. Kucera a R. Hamilton (eds.). *The effects of air pollution on cultural heritage*. Boston: Springer, 2009, 215-267. ISBN 978-0-387-84892-1.