

Vladimír Feranec \*

## VETERNÉ INŽINIERSTVO V 21 STOROČÍ

### WIND ENGINEERING IN THE 21<sup>ST</sup> CENTURY

*Článok uvádza rozvoj veterného inžinierstva za ostatných 3-5 desaťročí, od existencie veterných tunelov so simulovanou atmosférickou hraničnou vrstvou a od zavedenia náhodných procesov do zaťaženia vetrom na budovy a stavebné konštrukcie, alebo lepšie od prvej medzinárodnej konferencie o účinkoch vetra na budovách a stavbách vo V. Británii (1963), s niektorými víziami do budúcnosti. Niekoľko poznámok článok uvádza tiež o výskume vo veternom inžinierstve na Katedre stavebnej mechaniky Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline [1] - [31].*

#### Úvod

Veterné inžinierstvo je podľa J. E. Cermaka najlepšie definované ako racionálne pojednanie o interakcii medzi vetrom v atmosférickej hraničnej vrstve a ľudskou činnosťou na povrchu Zeme. Toto tvrdenie bolo umožnené vykonať syntézou poznatkov z tradičných odborov mechaniky tekutín, meteorológie, stavebnej mechaniky a fyziológie na vytvorenie nového odboru. Hoci aerodynamika má ústrednú dôležitosť v tejto novej disciplíne, aplikácie sú vo väčšej časti neleteckej aerodynamiky, atmosférickom roznášaní nečistôt vzduchu, účinkoch vetra na budovách a stavbách, modifikácii vetra na zastavených plochách budovami, stavbami a ulicami, čo sú dôležité príklady interakcií s ktorými inžinier veterného inžinierstva prichádza do styku [1], [2].

Účinky vetra na budovách a stavbách vytvárajú dôležitú skupinu problémov, ktorá je záujmom rýchlo sa rozvíjajúcej disciplíny veterného inžinierstva.

Prvý veterný tunel postavený výhradne pre simulovanie prirodzeného vetra bol navrhnutý J. E. Cermakom v roku 1958 [2], a jeden z prvých veľkých tunelov s hraničnou vrstvou bol navrhnutý a postavený v novembri 1965 na Univerzite v Západnom Ontariu v Kanade [4].

Správna modelová skúška pre javy vo vetre musí sa vykonať v turbulentnej hraničnej vrstve, modelový zákon vyžaduje, aby táto hraničná vrstva bola v mierke podľa rýchlostného profilu. (Martin Jensen, 1958). [3] M. Jensen v svojom dôležitom experimente vykonal porovnanie stredných zložiek tlakov na malých budovách v skutočnej mierke a na modeloch týchto budov vo veternom tuneli.

*Progress in wind engineering during last 3-5 decades is described in this paper, from the existence of wind tunnels with the simulated atmospheric boundary layer and introducing random processes in wind load on buildings and structures. State of the art is presented from the First International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures in U. K. (1963) together with some visions for the future. Some remarks are also devoted to wind engineering research in the Department of Structural Mechanics, Civil Engineering Faculty, University of Žilina [1] - [31].*

#### Introduction

According to J. E. Cermak wind engineering is best described as the rational treatment of interactions between wind in the atmospheric boundary layer and human activity on the surface of Earth. A rational treatment of wind effects has been made possible by a synthesis of knowledge from the traditional fields of fluid mechanics, meteorology, mechanics of structures, and physiology to form a new discipline. Although aerodynamics is of central importance in this new discipline, applications are mostly non-aeronautical in nature; atmospheric transport of air pollutants, wind effects on buildings and structures. Modifications of wind in urban areas by buildings, structures and streets are important examples of interactions a wind engineer deal with [1], [2].

Wind effects on buildings and structures create an important class of problems that is embraced by the rapidly developing discipline of wind engineering.

The first wind tunnel constructed specifically for simulating natural winds was designed by J. E. Cermak in 1958 [2], and one of the first large boundary layer wind tunnels was designed and constructed in November 1965 at the University of Western Ontario in Canada [4].

The correct model test for phenomena in the wind must be carried out in a turbulent boundary layer and the model-law requires this boundary layer be scaled in compliance with the velocity profile (Martin Jensen, 1958). [3]. M. Jensen in his important experiment undertook a comparison of the mean pressures on small buildings in full scale and in wind tunnel model experiments.

\* Prof. Ing. Vladimír Feranec, DrSc.

Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Komenského 52, SK-01026 Žilina, Slovak Republic  
Tel.: ++421-89-763 48 18, Fax: ++421-89-723 35 02, E-mail: feranec@fstav.utc.sk

Použitie veterných tunelov uvedeného typu na získanie veľkosti účinkov vetra bolo publikované A. G. Davenportom a N. Isyumovom [4].

Je treba zdôrazniť, že predpoveď účinkov vetra môžeme vyjadriť len štatisticky (A. G. Davenport, [5] M. F. Barstein [6]). Veterný tunel na Žilinskej univerzite bol navrhnutý M. Pirnerom [7] a atmosférická hraničná vrstva v tomto tuneli bola nasimulovaná v minulých sedemdesiatych rokoch, [8] – [10] pozri obr. 1.

Pokrok vo veternom inžinierstve bol urobený počas 4 - 6 desaťročí od zrútenia Tacoma Narrows Bridge, na ktorom kmitania od pomerne nízkych rýchlostí vetra zničili tento most s veľkým rozpätím, alebo presnejšie od prvej medzinárodnej konferencie o účinkoch vetra na budovách a stavbách v Teddington vo V. Británii v r. 1963. Teraz sú každé štyri roky organizované medzinárodné konferencie Medzinárodnou asociáciou pre veterné inžinierstvo (Ottawa, Kanada - 1967, Tokyo, Japonsko - 1971, Heathrow v Londýne V. Británia - 1975, Fort-Collins Colorado USA - 1979, Gold Coast a Auckland Austrália - 1983, Aachen Germany - 1987, London, Ontario Kanada - 1991, Delhi India 1995, Kodaň Dánsko - 1999, budúca konferencia bude v Lubbocku v Texase USA - 2003). Desiatu medzinárodnú konferenciu o veternom inžinierstve v Kodani (1999) ako aj časopis Journal on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (vydávaný od r. 1975) prezentujú veľmi dobre minulosť, prítomnosť a budúcnosť veterného inžinierstva a stručne tento pokrok sa uvádza v tomto článku vrátane niektorých výsledkov výskumu v aerodynamickom tuneli Žilinskej univerzity v Žiline [1] – [31].



Obr. 1. Veterný tunel Žilinskej univerzity  
Fig. 1. Wind tunnel of the University of Žilina

How wind tunnels of this type are used to obtain quantitative wind-effect data have been published by A. G. Davenport and N. Isyumov [4].

It is emphasized that the prediction of the effects of the wind can only be expressed statistically (A. G. Davenport, [5] M. F. Barstein, [6]).

The wind tunnel at the University of Žilina was designed in 1965 by M. Pirner [7]. The atmospheric boundary layer in this wind tunnel was simulated in 1970's [8], [9], [10] see Fig.1.

The progress in wind engineering has been achieved during the 4-6 decades, since the collapse of Tacoma Narrows Bridge when the oscillations at comparatively low wind speeds destroyed the long span bridge, or more exactly since the First International Conference on Buildings and Structures in Teddington, U. K. 1963. International conferences are organized in the interval of 4 years by the International Association of Wind Engineering (Ottawa Canada-1967, Tokyo Japan-1971, Heathrow in London G. B.-1975, Fort-Collins Colorado USA-1979, Gold Coast and Auckland Australia-1983, Aachen Germany-1987, London Ontario Canada-1991, Delhi India-1995, Copenhagen Denmark-1999. Next Conference will be in Lubbock Texas USA -2003). The 10th International Conference on Wind Engineering in Copenhagen (1999) as well as the Journal on wind engineering and Industrial aerodynamics (since 1975) presented very well the past, present and future of wind engineering and this progress is briefly presented in this paper with some research results obtained in the University of Žilina wind tunnel laboratory [1] – [31].

## Veterné inžinierstvo, prítomnosť a budúcnosť

Podľa A. G. Davenporta je názorné uvažovať proces zafarbenia vetrom ako reťaz zloženú s navzájom spojených článkov: veterná klíma, vystavenie vetru, aerodynamické sily, ohlas stavieb ako aj kritéria ohlasu [11], [12].

### 1. Chýbajúce články

Existujú nepresnosti pri definovaní každého článku, tieto nepresnosti čiastočne vznikajú z chaotického, štatistického charakteru javov ako je napríklad veterná klíma a turbulencia. V prípade turbulencie postupy môžu redukovať nepresnosti pomocou monitoringu, alebo odhadu meraných chýb.

Veterná klíma je kritickým článkom. Extrémne rýchlosti vetra používané v mieste sú jedinou požiadavkou. V súčasnosti sa vyžaduje pre búrku jej čas trvania, smer a priestorové tvary, aby sa ohodnotila nahromadená škoda a spoločný výskyt námrazy a vetra.

## Wind engineering, present and future

According to A.G. Davenport it is instructive to regard the wind loading process as a chain of interconnected links: the wind climate, the exposure, the aerodynamic forces, the structural reaction and response criteria itself [11], [12].

### 1. Missing links

There is uncertainty in defining each link, this uncertainty arises partly from chaotic, statistical character of the phenomena, for example, the wind climate and the turbulence. In the latter case, the uncertainties can be reduced through improved monitoring or assessment of the measurement errors.

Wind climate is a critical link. Extreme wind speeds used at a point are the only requirement. Now there is the need for storm duration, direction and spatial pattern to evaluate cumulative damage and at joint occurrence of ice and wind.

*Faktor vystavenia vetru, ktorý závisí od terénu a topografie, veľmi vplyva na strednú zložku tlaku od rýchlosti a intenzity turbulencie.*

*Aerodynamické tlaky taktiež majú nepresnosti, najmä keď uvažujeme vnútorné tlaky.*

*Fyzikálne vlastnosti stavby a odborná kvalita práce mala by sa poznať presnejšie na mostoch s väčším rozpätím, alebo komínoch ako na budovách.*

*V mnohých prípadoch skutočné mechanizmy chýb sú nedostatočne pochopené, či už od vplyvu únavy alebo stálych deformácií.*

*Fyzikálne vlastnosti stavby prinášajú veľa prekvapení. Návrh stavieb, alebo odhad ohlasu na vietor, nevyhnutne zdôvodnený modelmi či už fyzikálnymi vo veternom tuneli, alebo analyticky pomocou počítačových modelov, prináša v oboch prípadoch veľkú možnosť chybných predpokladov. Podľa sympózia o skúškach na skutočných konštrukciách: „Teória bez podpory pozorovaní na skutočných konštrukciách je nebezpečná komodita pri inžinierskom návrhu“. Existuje veľa príkladov: Zrútenie mosta cez Tacomaú úžinu, havária chladiacich veží vo Ferrybridge ako aj veľa ďalších.*

*Ďalšie chýbajúce články sú: Topografické účinky, štruktúra vetra v intenzívnych lokálnych búrkach, nesprávne odhadnuté sily od vetra na ostrých hranách telies, ktoré sú len slabé závislé od mierky alebo Reynoldsovo čísla, zaťaženie na prenosových vežiach v turbulentnom vetre, sústredenie sa na modelové nepresnosti, monitoring na skutočných stavbách (vodorovné kmitanie stavieb, ich tlmenie, frekvencie a pod.), výmena základných informácií, počítačové veterné inžinierstvo, ktoré nemusí byť len doplnkom skúšok vo veterných tuneloch, ale tiež v niektorých otázkach, ako sú modelovania silných lokálnych búrok a tornád, umožňuje jediný praktický prístup k riešeniu.*

*Zvyšovanie počtu prírodných katastrof v dôsledku veterných búrok ukazuje, aby sa významne hodnotilo vytváranie tímov pre bádanie týchto katastrof. Táto činnosť sa stane takou, ako predpokladáme, ktorá bude stimulovať výskum vo veternom inžinierstve.*

*Bez posledných 10 medzinárodných konferencií z veterného inžinierstva, úspechy v bezpečnosti stavieb vysokých budov a mostov s veľkým rozpätím by neboli možné, a aj napriek tomuto sú medzery, ktoré je treba doplniť: poisťovacia štatistika, bádanie na skutočných stavbách ako základ porovnania pre modelovanie vo veternom tuneli a počítačovom veternom inžinierstve, údaje zo skutočných konštrukcií na organizovaných experimentoch, alebo z prehliadok katastrof veterných búrok a ďalšie [11] – [17].*

## 2. Atmosférická hraničná vrstva

Technický rozvoj rýchlych senzorových systémov, zariadení pre vzorkovanie dát a počítačové spracovanie urobili enormný vplyv na tempo, počas ktorého sa dosahujú nové výsledky.

Napriek tejto skutočnosti sú ešte úplne základné problémy, ktoré očakávajú teoretický rozbor ako aj experimentálne prebádanie.

*The exposure factor which depends on the terrain and topography, profoundly affects the mean velocity pressure and the turbulence intensity.*

*The aerodynamic pressures also contain uncertainty, particularly, if internal pressures are included.*

*The structural behavior and the quality of the workmanship may be known more accurately for a long span bridge or chimney than for a house.*

*In many cases the actual failure mechanism should be poorly understood – whether through the influence of fatigue or permanent deformation.*

*Structural behaviour can have many surprises. The design of structures or the assessment of response to wind inevitably accomplished through models either physical, as a wind tunnel, or analytical through computational models, is in either both cases the ample opportunity for erroneous assumptions. According to the Symposium on Full Scale Testing: “A theory without full-scale observations to back it up is a dangerous commodity in engineering design”. There are many examples: Tacoma Narrows Bridges Collapse, the failure of the Ferrybridge cooling towers and many others.*

*Other missing links are: topographic effects, wind structure in intense local storms, wrongly assumed wind forces on sharp edges bodies, which are only weakly dependent on scale or Reynolds number, wind load on transmission towers in turbulent wind, focusing on the uncertainties in the models, full scale monitoring (the sway of the structure, its damping, its frequencies and so on), exchange of basic information, computational wind engineering, which may not be only supplement to wind tunnel testing but also in some problems such as the modeling of severe local storms and tornadoes, provide the only practical approach.*

*The increase in the number of natural disasters due to wind storms suggests that there would be great value in establishing natural disaster investigation teams. Such an activity is hopefully, to stimulate wind engineering research.*

*Without the previous 10 international wind engineering conferences, the achievements in the safe construction of tall buildings and long span bridges would not have been possible, nevertheless, there are gaps to be filled: insurance statistics, full scale testing as a benchmark for both wind tunnel and computational wind engineering modeling, full scale data through organized experiments or from wind storm damage surveys and others [11] – [17].*

## 2. Atmospheric boundary layer

The technical development in fast sensor systems, data sampling and acquisition equipments and computing has influenced enormously on the pace at which new results are made available.

However, there are still quite fundamental problems waiting for a theoretical analysis as well as experimental verification.

Niektoré problémy naliehavého záujmu o aplikáciu vo veternom inžinierstve sú: Pozdĺžna koherencia, tvary a profily nárazov a nestacionárne javy [11] – [14].

### 3. Aerodynamika budov

Pružné stavby ako sú vysoké budovy, vysoké veže a mosty s veľkým rozpätím niekedy majú aerodynamické kmitanie, ktoré v niektorých prípadoch môže spôsobiť osudnú katastrofu, vážne poškodenie stavieb alebo obťažovanie ľudí, dôsledkom čoho skúška vo veternom tuneli musí byť jedným z najúčinnějších prostriedkov na vyjasnenie ich aerodynamických charakteristík.

Najlepší spôsob ako efektívne stabilizovať aerodynamické kmitanie je presné pochopenie ich budiacich mechanizmov. Z dôvodov zložitých charakteristík polí prúdenia okolo hranatých telies, budiace mechanizmy týchto polí nie sú ešte v súčasnosti dostatočne vyjasnené (generovanie vírov a vírmi indukované budenie, galloping, flutter, buffeting a účinky turbulencie na aerodynamiku hranatých telies).

Nedávny rozvoj počítačového veterného inžinierstva je, alebo sa určito stáva výkonným nástrojom na riešenie týchto problémov, potom obe aplikované skúšky, konvenčná vo veternom tuneli a počítačová, boli by žiadané v budúcnosti viac ako v prítomnosti. [12], [20].

### 4. Vysoké budovy a stavby

Niektoré stavby a budovy vyžadujú osobitné bádanie z veterného inžinierstva, pretože zaťaženie vetrom a vetrom vybudené ohlasy vysokých budov a ďalších stavieb pozemného staviteľstva nemôžu byť spoľahlivo určené analyticky alebo postupmi podľa noriem.

Okrem toho aerodynamické údaje v stavebných normách sú najmä pre samostatné budovy a stavby situované v homogénnom teréne. Také údaje nemôžu byť pre budovy a stavby na zložitom teréne alebo topografii, alebo pre prípad, kde môžu byť aerodynamické interferencie v dôsledku prítomnosti ďalších blízky budov.

Hoci modelové skúšky vo veterných tuneloch nie sú bez ťažkostí, pretože sú obmedzené vzhľadom na stupeň podobnosti, ktorý sa môže dosiahnuť v redukovanej geometrickej mierke a počítačové veterné inžinierstvo a ďalšie numericko-analytické bádania získavajúce priestor, predsa modelové bádania vo veterných tuneloch pre uvedené situácie sú teraz akceptované väčšinou stavebných noriem ako alternatívne postupy potrebné pre dodržanie technologických zmien [12], [16], [18], [30].

### 5. Mosty veľkých rozpätí

Aeroelastická stabilita je prevládajúce kritérium na návrh mostov s veľkým rozpätím. Aerodynamika mostov sa tradične za-

Some problems of immediate interest for application in wind engineering are as follows: longitudinal coherence, gust shapes or profiles, non-stationary phenomena [11] – [14].

### 3. Building aerodynamics

Flexible structures such as tall buildings, tall towers and long span bridges show sometimes aerodynamic vibration, which would, in some cases, cause a fatal collapse, serious damage of structures or man annoyance. In consequence, a precise evaluation of the aerodynamic characteristics and their proper countermeasure should be carefully investigated. However, the geometrical shape of these structural sections are usually complicated and their aerodynamics must be diverse, in consequence, a wind tunnel test must be one of the most powerful tools to clarify their aerodynamic characteristics.

The best way to effectively stabilize the aerodynamic vibration is a precise understanding of their generation mechanism. Because of the complicated, behaviour of flow fields around bluff bodies, their generation mechanism is not always sufficiently clarified even at present (vortex generation and vortex induced excitation, galloping, flutter, buffeting and the effect of turbulence on bluff body aerodynamics).

Recent development of computational wind engineering is surely becoming a powerful tool to solve these, problems. Then, both utilization of the conventional wind tunnel test and CWE would be required in the future more than at present [12], [20].

### 4. Tall buildings and structures

Some structures and buildings require special wind engineering studies because, wind forces and wind induced responses of tall buildings and other civil engineering structures cannot be reliably predicted by analytical and/or code based procedures.

Furthermore aerodynamic data in building codes are mainly for individual buildings and structures located in homogeneous terrain. Such data may not be representative for buildings and structures in complex terrain and/or topography or in situations where there may be aerodynamic interference due to the presence of other nearby buildings.

Although wind tunnel model tests are not without difficulties, as there are limitations to the degree of similitude which can be achieved at a reduced geometric scale, and CWE and other numerical/analytical studies are rapidly gaining the ground. Nevertheless, wind tunnel model studies for such situations are now accepted by most building codes as alternative procedures necessary to keep up with technological change [12], [16], [18], [30].

### 5. Long-span bridges

Aeroelastic stability is a governing criterion for the design of long span bridges. Traditionally, bridge aerodynamics has been

oberá pôsobením vetra na nosníky visutých a zavesených mostov so zameraním na aeroelastickú stabilitu, buffetingový ohlas, kmitanie vybudené vírmi, sú témy, ktoré aj dnes vytvárajú množstvo práce v rozsahu odboru.

Za ostatné roky pozornosť sa venuje cestnej bezpečnosti a komfortu osôb cestujúcich na moste, bádaniam spojených s mostom ako aerodynamika automobilov a ochranným účinkom mostných pylónov a ochranným krytom proti vetru [9], [12], [18], [28].

## 6. Budovy a mosty v skupinách

Účinky susedných budov na zaťaženie vetrom ďalších budov a stavieb sa extenzívne v minulosti nebádali. Zaťaženie vetrom na tieto budovy a stavby špecifikované súčasnými predpismi a normami pre prax majú svoj pôvod z bádania vo veterných tuneloch na samostatných stavbách a neudávajú žiadny smer pre odhad zaťaženia za podmienok buffetingu.

Výsledky poukazujú na podstatné rozličné účinky pre samostatnú stavbu a stavbu v skupine. Zložitosť problému poukazuje, že je veľmi ťažko spracovať tieto účinky s istým stupňom všeobecnosti. Ako alternatíva sa odporúča poradiť sa s odborníkom a umožniť vykonať odbornú skúšku vo veternom tuneli.

Všeobecne je známe, že rozdelenie tlakov od vetra na stavbe môže byť prudko zmenené, ak nová (nové) stavba sa postaví v susedstve. Je len samozrejmé, že toto prináša komplexný problém už aj pre samostatnú ďalšiu stavbu, pretože existuje veľa parametrov, ktoré musí inžinier brať do úvahy, vrátane tvaru a veľkosti stavieb, ich pozíciu a smer vetra [12], [16], [17], [21], [30].

## 7. Počítačové veterné inžinierstvo (PVI)

Teraz už je viac ako 15 rokov od zavedenia počítačovej dynamiky tekutín (PDT) do problémov veterného inžinierstva (PVI) alebo počítačová dynamika tekutín (PDT) bola rozvíjaná hlavne v odboroch strojného a leteckého inžinierstva. Veľké úspechy sa dosiahli v určovaní takých pomerne jednoduchých prúdení ako je prúdenie v kanáloch, prúdenie vzduchu okolo krídla a pod. Na druhej strane problémy vzdušného prúdenia vo veternom inžinierstve sú oveľa viac zložitejšie.

Veľa skúšok sa vykonalo a pozoruhodný pokrok sa dosiahol od prvého sympózia konaného v Tokiu (1992). Priestor pre praktické uplatnenie sa významne rozšíril. V súčasnosti je výskumný odbor PVI dobre zriadený ako účinný nástroj vo výskume veterného inžinierstva.

Napriek uvedenému zostáva ešte veľa otázok, ktoré treba riešiť, aby mohli byť na širšiu aplikáciu: Rozšíriť PVI aplikácie a postarať sa o presnosť, presnosť experimentálnych údajov, potvrdiť odhad presnosti pri rozličných nepresnostiach, návrh siete pri postupoch v blízkosti steny a makroskopické hraničné podmienky, hraničné

concerned with wind actions on the girders of cable supported bridges focusing on aeroelastic stability, buffeting response and vortex induced oscillations, topics which also today constitute the bulk of the work within the field.

In recent years attention has been given to road safety and comfort of persons travelling on the bridge, leading to bridge related studies of vehicular aerodynamics and shelter effects of bridge pylons and wind screens [9], [12], [18], [28].

## 6. Buildings and structures in groups

The effects of nearby structures on wind loading of other buildings and structures has not been extensively examined in the past. Wind loads for these buildings and structures, specified by current standards and codes of practice originate from wind tunnel studies on isolated structures and give no guide for the assessment of loads under conditions of buffeting.

Results show significant different effects for a single structure and a structure in group. The complexity of the problem, however, indicates that it is very difficult to treat these effects with any degree of generality. Alternatively, it is suggested to get a specialist's advice and possibly to perform special wind tunnel tests.

It is well known, however, that the wind pressure distribution on a structure may change drastically when a new structure(s) is built in its neighborhood. Obviously, this is a complex problem even for a single additional structure, since there are many parameters that a designer must consider, including the shape and size of the structures, their relative positions, and the wind direction [12], [16], [17], [21], [30].

## 7. Computational wind engineering (CWE)

It has now been for over 15 years since the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique was first applied to a problem of wind engineering. Computational Wind Engineering (CWE) or Computational Fluid Dynamics (CFD) was developed mainly in the fields of mechanical and aeronautical engineering. Great success has been achieved in predicting such relatively simple flows as channel flow, air flow around a wing, etc. However, problems concerning air flow in wind engineering are far more complicated.

Many trials have been carried out and remarkable progress has been achieved since the 1st Symposium in Tokyo (1992). The scope of practical application has also spread greatly. The research field of CWE is today well established as a powerful tool in wind engineering research.

However, there still remain many problems to be solved to allow for wider applications: Spread of CWE applications and their prediction accuracy, accuracy of experimental data, confirmation of prediction accuracy under various uncertainties, grid design near wall treatment and macroscopic boundary conditions,



podmienky pri nasávaní pre aplikácie simulácie veľkých vírov. Ďalšie smery sú vyvinúť nový koncept pre integrovanie PVI simulácií s rozličnými mierkami [9] – [17], [20], [27].

## 8. Veterné prostredie okolo budov

Výskum a skúsenosti počas ostatných 2 - 3 desaťročí vo veľa laboratórií – vrátane veterného tunela so simulovanou atmosférickou hraničnou vrstvou na Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline ukazujú – že otvorené priestranstvá okolo budov a moderné urbanistické miesta sú často neprijemne veterné. Podmienky môžu byť neprijemné a hazardné pre chodcov na miestach, ktoré boli zamýšľané aby poskytovali otvorené vzdušné prostredie.

Aké veterné podmienky sú prijateľné je ťažko definovať, pretože sú viac-menej subjektívne a závisia od aktivity, teploty, vlhkosti prostredia a nárazovej rýchlosti vetra, komplikujú tento problém. Veľa autorov v zahraničí a v našej krajine vyvinulo kritéria rýchlosti vetra, Wise, Melbourne, Davenport a ďalší.

Hoci niektoré skúsenosti sa získali zo skutočných veterných podmienok z okolia rozličných budov je treba sa obracať na modelové skúšky v tuneloch, ak sa vyžadujú dôveryhodné odhady veterného prostredia vybudenej okolo navrhovanej budovy.

Významná časť budovy by nemala byť vystavená priamo veternému prúdeniu. Ochranný účinok náveterých budov je jeden z najdôležitejších faktorov. Niektoré konfiguračné faktory a pravoúhlé budovy narastajúce z terénu spôsobujú environmentálne veterné problémy [21] – [23], [27], [29].

## 9. Aerodynamika nečistôt vo vzduchu

Od priemyselnej revolúcie ľudstvo sa musí zaoberať dôsledkami znečisťovania z priemyslu, baníctva, dopravy a produkcie energie. Aerodynamika nečistôt vo vzduchu sa venuje interakcii škodlivín, plynov a častíc vypúšťaných do atmosféry s okolitými stavbami, terénom a vegetáciou. Táto interakcia môže odchyliť nečistoty smerom k citlivým plochám, koncentrovať nečistoty nad akceptovateľné úrovne, alebo i zmierniť koncentračné úrovne a zvýšiť rozptyl prúdenia.

Prvoradou úlohou modelovania tekutín počas nastávajúceho storočia nebude vždy priame meranie údajov, aby sa použilo počas inžinierskeho návrhu špeciálnych zariadení, ale namiesto modelovania tekutín malo by sa aplikovať:

- Badať atmosférickú disperziu interakcie, ktorá nie je úplne preskúmaná.
- Zladiť a overiť modely turbulencie prenášané do PDT modelov.
- Navrhovať nové analytické modely vhodné na pojatie do väčších numerických systémov.
- Potvrdiť platnosť počítačových modulov, keď budú začlenené do návrhových noriem [12], [23], [27].

inflow boundary condition for LES (Large eddy simulation) application. Future direction is to develop a new concept for integration of CWE simulations with various scales [9] – [17], [20], [27].

## 8. Wind environment around buildings

Research and experience during last 2-3 decades at many laboratories including Wind tunnel laboratory with simulated atmospheric boundary layer in the Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering at the University of Žilina have shown that open spaces around buildings on modern urban sites are often unpleasantly windy. Conditions can be uncomfortable and hazardous for pedestrians in places which were intended to provide a pleasant open-air environment.

What wind conditions are acceptable is difficult to define because it is much more subjective and dependent on the activity concerned and the temperature and humidity of the environment concerned and gust speed complicate this problem too. Many authors abroad and in our country developed wind speed criteria (Wise, Melbourne, Davenport and others).

Although some experience has been gained from assessing full scale wind conditions about a variety of buildings it is necessary to turn to wind tunnel model testing if a confident prediction of the wind environment induced around a specific building proposal is required.

A significant part of the building should not be exposed to direct wind flows. The shielding effect of upstream buildings is one of the most significant factors. Some configuration factors, rectangular buildings rising from ground level cause environmental wind problems [21] – [23], [27], [29].

## 9. Air pollution aerodynamics

Since the Industrial Revolution man has to deal with the polluting consequences of manufacturing, mining, transportation, and power production. Air polluting aerodynamics concerns the interaction of noxious aerosols, gases and particles emitted into the atmosphere by surrounding structures, terrain and vegetation. This interaction can deflect pollution materials toward sensitive areas, concentrate species above the acceptable levels or even mitigate concentration levels and enhance diffusion and dispersion.

The primary role of fluid modeling during the next century will not always be the direct measurement of data to be used during engineering design of specific facilities. Instead a fluid modeling there the following activities should be preferred.

- To explore atmospheric dispersion interaction that has not been completely investigated,
- To tune and justify turbulence models incorporated into CFD models,
- To device new analytical models suitable for inclusion into larger numerical systems and
- To validate computational models after they are to be incorporated into design codes [12], [23], [27].

## 10. Meranie v skutočných mierkach

Veterní inžinieri pokladajú merania v skutočných mierkach za doplnenie a rozšírenie ich poznatkov o chovaní sa budov a stavieb pri pôsobení vetra a potvrdenie alebo kalibrovanie oboch procedúr, numerickej a experimentálnej.

Nedávne programy merania v skutočných mierkach majú tendenciu sa zamerať na merania dynamických vlastností skutočných budov a stavieb. Tieto informácie sú cenné pre pomoc pri ich oprávení alebo modifikácii, podporiť rozhodnutie a zhodnotiť účinnosť takých vylepšujúcich zariadení, ako sú tlmiče s naladiteľnou hmotou alebo tekutinou [12], [16], [23], [30].

## 11. Merania vo veternom tuneli

Hoci skúšky na modeloch vo veternom tuneli sú široko akceptované, je treba zdôrazniť, že vplyvy vetra v mnohých prípadoch sú adekvátne uvedené v súčasných stavebných normách. Je preto dôležité aby sa identifikovali situácie, v ktorých sa bádania vo veterných tuneloch vyžadujú, alebo sú nevyhnutné.

*Čakateľmi na skúšky vo veterných tuneloch* sú budovy a stavby, ktoré majú veľkú citlivosť na vplyvy vetra, alebo sú zaradené mimo existujúce skúsenosti. Ako príklady sú vysoké, štíhle a pružné budovy, výhľadkové veže, stožiare a komíny, mosty so stredným a veľkým rozpätím, mosty pre chodcov, vedenia prenosových systémov a rôzne špeciálne stavby, ako sú poddajné strechy s veľkým rozpätím, chladiace veže, veľké žeriavy a pod. Budovy a stavby neobvyklých aerodynamických tvarov, na ktorých možno pozorovať veľké vetrom indukované celkové sily, alebo lokálne tlaky majú dôvod pre osobitnú pozornosť.

*Ďalšia oblasť potenciálnej pozornosti* zahŕňa existenciu netypického terénu a okolia a blízkej vzdialenosti k väčším budovám a stavbám, alebo s vyčnievajúcimi topografickými tvarmi. Postupy, ktoré sa používajú pri modelovom bádani vo veterných tuneloch sú veľmi rozmanité, závisia od osobitných cieľov a možných zdrojov.

*Veľmi bežné skúšky a ich výsledky sú:* Miestne tlaky, celkové a plošné zaťaženie vetrom, vysokofrekvenčná silová rovnováha, sekciová modelová skúška (mosty), aeroelastické skúšky, vietor pre chodcov, kvalita vzduchu, skúšky terénov a topografie.

Dôležitá miera praktickej hodnoty všetkých modelových údajov je ich vzťah k poznatkom získaným na skutočných konštrukciách [1] – [5], [7] – [10], [12], [22], [27].

## 12. Bázy údajov z veterného inžinierstva

S vytvorením novej bázy údajov vo veternom inžinierstve nie každý súhlasí, pravdepodobne z dôvodov existencie už jestvujúcich databáz a tiež z ťažkostí zahrnutých pri novom usporiadaní prirodzených dát do užitočnej formy.

*Existujúce bázy údajov.* Rôzne formy báz už sú teraz dostupné. Napríklad ESDU (Engineering Science DATA Unit – Jednotka dát pre inžinierske vedy vo V. Británii), the Library of the ASME

## 10. Full scale measurements

Wind engineers regard full scale measurements as supplement and extension of their knowledge of the performance of buildings and structures under wind action and verification and/or calibration of both numerical and experimental procedures.

The recent full scale measuring programs have tendency to obtain the dynamic properties of buildings and structures. Such information is valuable to assist in their rehabilitation or modification, to facilitate decision making and to evaluate the effectiveness of mitigation devices such as tuned mass and/or tuned liquid dampers [12], [16], [23], [30].

## 11. Wind tunnel measurements

Although wind tunnel model testing has gained wide acceptance, it is important to stress that the action of wind in many cases is adequately dealt with in the existing building codes, therefore, important to identify situations in which wind tunnel studies are desirable or necessary.

*Candidates* for wind tunnel tests are buildings and structures that have an unusual sensitivity to the action of wind or that fall outside the existing experience. As examples are tall, slender, and flexible buildings, observation towers, masts and chimneys, intermediate and long-span bridges, pedestrian bridges, transmission line systems, and various special structures, such as large-span flexible roofs, cooling towers, large cranes, etc. Building and structures of unusual aerodynamic shape, which may experience large wind-induced overall forces or local pressures, also warrant special attention.

Another area of potential concern includes the presence of unusual terrain and surroundings, and close proximity to major buildings and structures or prominent topographic feature. Procedures used in wind tunnel model studies vary widely, depending on particular objectives and available resources. The more commonly used tests and their results are the following: Local pressures, area and overall wind loads, high frequency force balance, sectional model tests (bridges), aeroelastic studies, pedestrian winds, air quality, terrain and topographic studies. The important measure of practical value of all model test data is their relation to full-scale experience [1] – [5], [7] – [10], [12], [22], [27].

## 12. Wind engineering database

Not everybody agrees with the need for a new wind engineering database, probably because there are of some already certain databases and also because the difficulties involved in rearranging raw data into a useful form.

*The existing database.* Various forms of database have already been available so far. For example, ESDU (Engineering Science DATA Unit in U.K.), the Library of the ASME in USA and raw laboratory data stored in the University of Western Ontario. Various

a údaje laboratória v prirodzenom stave na University of Western Ontario.

Rôzne národné a mnohonárodné výbory pre šandardizáciu noriem zhromaždili údaje pre ich vlastné publikácie, ale konečné výsledky sú niekedy ovplyvnené faktorom iným ako technickým, napríklad politickým a ekonomickým.

*Budúcnosť databáz.* Numerické simulácie aerodynamiky mohli by byť použité na vytvorenie databáz, ale simulačná technika musí byť ešte zlepšená a jej výsledky nemôžu byť ešte vhodné pre databázu.

Vývoj Európskej normy, ktorá bola publikovaná v r. 1993, bude pokračovať v tomto procese ako aj nové národné normy v Európe vrátane v Slovenskej republike.

*Veterný tunel* je faktorom, ktorý má spoľahlivé zdroje dát.

Pre bežný stavebný návrh, spoľahlivosť a presnosť aerodynamických súčinitelov zdá sa byť spoľahlivo dostatočná, oveľa väčšia variabilita v zaťažení vetrom, môže byť z takých realít, ako sú zmeny okolia budov. Tieto faktory nemôžu byť zahrnuté v normách so všetkými detailmi [12] – [14], [27].

### 13. Veterné katastrofy

Každoročne vietor poškodzuje stavby, hoci v niektorých rokoch sú len malé škody, ale priemer ročných nákladov na veterné poškodenie na stavbách je pomerne veľký. Napríklad relatívne malá veterná búrka v Žiline (jún 1998) zničila veľa striech, stromov a trolejových vedení, čo ukazuje na adekvátne ukotvenie na hlavnú stavbu.

*Niektoré neúspešné situácie sa objavujú sústavne.* Pomerne rozsiahle škody na moderných stavbách mohli by byť vylúčené, pri riadnom zvážení účinkov vetra a konštrukcie. Veterné katastrofy striech a stien, sú pravdepodobne viac-menej v dôsledku chýb v normách, alebo konštrukcii a inšpekčných prehliadok, ako v nedostatku základných znalostí z veterného inžinierstva.

*Veľké rozsahy škôd* súčasných stavieb by mohli byť odstránené pri minimálnych ďalších nákladoch, s dôkladným uvážením vplyvov vetra a primeranej pozornosti kritickým detailom pri návrhu a výstavbe.

*Výkonanie skúšky vo veternom tuneli* môže byť veľmi užitočné a ekonomické pre špeciálne a veľké stavby [12] – [14], [24], [25], [27].

### 14. Veterné inžinierstvo na Žilinskej univerzite

*Veterný tunel na Žilinskej univerzite* v Žiline bol navrhnutý a postavený v r. 1965 M. Pirnerom a atmosférická hraničná vrstva v tomto tuneli bola nasimulovaná v sedemdesiatych rokoch vrátane merania rýchlosti vetra a tlakov ako náhodných procesov [8], [9], [10], (Obr. 2).

Katedra stavebnej mechaniky Žilinskej univerzity organizovala v spolupráci UTAM ČSAV v Prahe prvé tri konferencie o zaťažení

national, and multi-national code standard committees have collected data for their own publications but the end results are sometimes influenced by factors other than technical, such as political and economic.

*Future of database.* Numerical simulation of aerodynamics could be utilized to provide some database. However, simulation techniques still have to be improved and so the results from it may not be appropriate for the database yet.

The development of the EUROCODE, which was published in 1993 like ENV prestandard will be a continuation of this process as well as new national codes in Europe, in the Slovak Republic included.

Wind tunnel as a source of reliable data. However, in the ordinary structural design, the reliability or accuracy of aerodynamic coefficient seems to be fairly sufficient, much greater variation in wind loading can arise from such factors, as the change of surrounding of buildings is. These factors cannot be included in standards with all details [12] – [14], [27].

### 13. Wind disasters

Every year the wind damages some structures. Some years damages light, but the average annual costs of wind damage to structures is relatively large. For example, relatively small wind storm in Žilina (June 1998) destroyed many roofs, trees and trolley lines. Adequate anchoring to the main structure is, therefore, necessary.

Several failure situations occur hours and again. A large proportion of damage to modern structures could be avoided by a proper appreciation of wind action and construction.

Wind disasters of the roofs and walls are much more likely to be due to faults in codes or construction and inspection practices than to lack of basic wind engineering knowledge.

A large proportion of damage to modern structures could be avoided at minimum extra construction cost by a proper appreciation of wind action and write appropriate attention to the critical details of design and construction.

Performing wind tunnel test can be very useful and economic in case of a special and large structures [12] – [14], [24], [25], [27].

### 14. Wind engineering at the University of Žilina

The wind tunnel at the University of Žilina was designed in 1965 by M. Pirner [7]. The atmospheric boundary layer in this wind tunnel was simulated in 1970's including measurements of wind velocity and pressures as random processes, see Fig. 2. [8], [9], [10].

The department of Structural Mechanics, Civ. Engng. Faculty, University of Žilina organized in cooperation with ITAM Prague the first three conferences on Wind Load on Buildings and Struc-



vetrom na budovách a stavbách (P. Bystrica 1980, Žilina 1984 a Žilina 1988). Konferencia O dynamike stavieb a veterné inžinierstvo bola organizovaná tiež Katedrou stavebnej mechaniky vo Vyhniach (september 2000).

*Pozoruhodnejšie experimentálne bádania vo veternom tuneli pre stavebnú inžiniersku prax sú tieto: Určenie zaťaženia vetrom na televíznu vežu v Bratislave, zaťaženie na strednú časť televíznej veže Buková hora v ČR, statické zaťaženie vetrom na cestný most pre Vitkovické železiarne v Ostrave, zaťaženie vetrom na žeriav pre Železiarne v Brezne a ďalšie.*

Aerodynamické sily na nákladných autách a šetrenie energiou v cestnej doprave boli predmetom spolupráce medzi Katedrou stavebnej mechaniky a automobilovým priemyslom (Obr. 3).

*Prednášky z veterného inžinierstva na doktorandskom štúdiu na Katedre stavebnej mechaniky Žilinskej univerzity začali v r. 1992.*

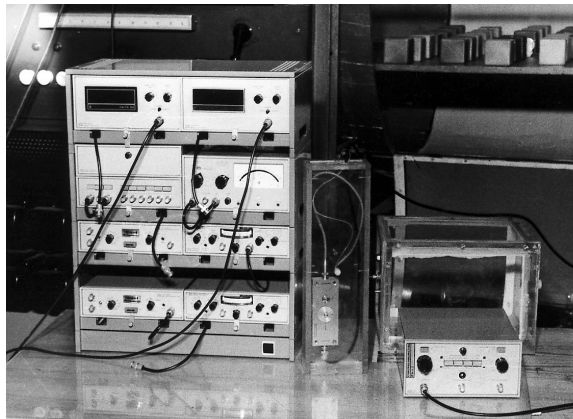
Počas viac ako tridsať rokov skupina veterného inžinierstva na Katedre stavebnej mechaniky je aktívna vo viacerých teoretických a experimentálnych bádaniach zo zaťaženia vetrom na budovách a stavbách a veterného prostredia na skutočných konštrukciách a vo veternom tuneli [8], [9], [10], [15], [16], [17], [30], [31].

## Podakovanie

Štúdia bola vypracovaná vďaka sponzorovaniu Žilinskou univerzitou v Žiline a Ministersvom školstva SR, VEGA Grant: No 1/7312-2000 Problémy veterného inžinierstva v stavebníctve, doprave a životnom prostredí.

## Literatúra - References

- [1] CERMAK, J. E.: *Applications of Fluid Mechanics to Wind Engineering*. A Freeman Scholar Lecture. Journal of Fluid Engineering, March 1975, Volume 97.
- [2] PLATE, E. J. and CERMAK, J. E.: *Micro-meteorological wind tunnel facility*. Tech. Rep. CER 63.
- [3] JENSEN, M.: *The model law for phenomena in natural wind*. Ingenioren, Inter. Edn., 2, 1958.
- [4] DAVENPORT, A. G. and ISYUMOV, N.: *The Application of the Boundary Layer Wind Loading*. Proceedings of the International Research Seminar on Wind Effects on Building and Structures. University of Toronto Press, Ottawa, Canada. September 1967.



Obr. 2. Prístroje na meranie rýchlosti vetra a tlaku vetra  
Fig. 2. Wind velocity and pressure measurement equipment  
(Civ. Engng. Faculty Univ. Žilina)



Obr. 3. Model auta s karavanom vo veternom tuneli  
Fig. 3. Model of automobile with caravan in a wind tunnel  
of DSM CEF UZ

tures (P. Bystrica 1980, Žilina 1984 and Žilina 1988). The conference on Dynamic of Structures and Wind Engineering was organized also by the Department of Structural Mechanics in Vyhne, September, 2000.

The following main experimental wind tunnel investigations for civil engineering industry have been done: Wind load determination on Television Tower (TV) in Bratislava, wind load on the central part of the TV Buková hora in the Czech Republic; static wind load on a road bridge for the Steel Works in Ostrava; wind load on a steel crane for The Steel Works in Brezno and others.

The aerodynamics forces on lorries and saving energy in road transportation have been also the subject of the cooperation between the Department of Structural Mechanics and car industry, see Fig. 3.

The Department of Structural Mechanics has started (1992) to teach the subject wind engineering at the University of Žilina at postgraduate (PhD) level.

For over thirty years, wind engineering group at the Department of Structural Mechanics has been actively engaged in many theoretical and experimental studies of wind load on buildings and structures and wind environment, in full scale and wind tunnel scale [8], [9], [10], [15], [16], [17], [30], [31].

## Acknowledgements

This study was supported by the University of Žilina and the Ministry of Education of the Slovak Republic, VEGA Grant: No 1/7312-20 Wind Engineering Problems in Civil Engineering, Transport and Environment. University of Žilina, 2000.

- [5] DAVENPORT, A. G.: *The prediction of statistical concepts to the wind loading of structures*. Proc. Of the wind loading of structures. Proc. of Instn. Of Civil Engineers, London, Vol. 19, august 1961.
- [6] BARSTEIN, M. F.: *Wind effects on tall buildings*. Structural mechanics and analyze of structures. 1/59. Moscow. In Russian.
- [7] FISCHER, O. – KOLOUSEK, V. – PIRNER, M. – NÁPRSTEK, J.: *Wind Effects on Civil Engineering Structures*. Academia-Elsevier, Prague 1983.
- [8] FERANEC, V.: *The Application of the Small Wind Tunnel to Determination Wind Load on Structures*. Proc. of the Inter. Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. London-Heathrow 1975. Cambridge University Press. 1976.
- [9] FERANEC, V.: *Wind engineering as a part of civil engineering*. Proceedings of the TRANSCOM 95. University of Žilina, Žilina, June 28-30,1995.
- [10] FERANEC, V.: *Atmospheric boundary layer simulation in a wind tunnel and wind effects on buildings and structures*. Veda Bratislava. Building Journal 2/1986, No. 4. In Slovak.
- [11] DAVENPORT, A. G.: *The missing links*. Proceedings of the Tenth International Conference on Wind Engineering. Copenhagen/Denmark. 21-24 June 1999. Edited by A. Larsen, G. L. Larose and F.M. Liversy
- [12] Proceedings of the Tenth International Conference on Wind Engineering. Copenhagen/Denmark. 21-24 June 1999. Edited by A. Larsen, G. L. Larose and F.M. Liversy.
- [13] Proceedings of the East European Conference on Wind Engineering. Warsaw 4-8 July 1994.
- [14] Proceedings of the 2nd East European Conference on Wind Engineering, Prague 7-11 Sept. 1998.
- [15] FERANEC, V.: *The present state-of the art of Wind engineering*. Proc. of the RILEM Conference 1995. Dynamic behaviour of concrete structures. 5-8 Sept. 1995. TU Košice.
- [16] FERANEC, V.: (2000-2002) VEGA Grant, No: 1/7312/20, *Wind Engineering Problems in Civil Engineering*, Transport and Environment. University of Žilina 2000.
- [17] FERANEC, V.: *Dynamic (unsteady) and steady local wind pressures on structures in group*. Proceedings of the Fourth European Conference on Structural Dynamics. EURO DYN 99, Prague 7-10 June 1999. A. A. Balkena, Rotterdam 1999.
- [18] DYRBYE, C. – HANSEN, S. O.: *Wind Load on Structures*. J. Wiley, 1996.
- [19] MORIKAWA, H. – MARUYAMA T.: *Theory of Conditional Random Field and its Application to Wind Engineering*. Kyoto University, Japan 1999.
- [20] MURAKAMI, S.: *Current Status of Computational Wind Engineering*. JWE and IA Vol. 35, 1990.
- [21] STATHOPOULOS, T.: *Adverse wind load on low building*. Journal of Str. Eng. Vol. 110. No. 10. October 1984.
- [22] MELBOURNE, W. H.: *Problems of wind flow at the base of tall buildings*. Proc. of the third Inter. Conf. on Wind effect [17s on buildings and structures. Tokyo 1971. pp. 105-114.
- [23] AYNLEY, R. M. – MELBOURNE, W. – VICKERY, B. J.: *Environmental Wind Forces around Buildings*. pp. 150-179. Architectural Aerodynamics, A.S.P. London 1977
- [24] Annual review of natural catastrophes 1998. M.R.C. Munich 1999. (Dr. G. Bertz, C. P.)
- [25] Guide to making your home hurricane resistance. United Insurance Company Limited. Bridgetown, Barbados, (Tony Gibbs, C. P.)
- [26] Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European & African Conference on Wind Engineering. Genova, Italy, June 22-26, 1997. SGE Padova 1997.
- [27] ISYUMOV, N. (Editor): ASCE, *Manual of practice for wind tunnel studies of buildings and structures*, Manual No. 67, Wind tunnel studies of buildings and structures. American Society of Civil Engineers, 1999.
- [28] TESÁR, Alexander: *Tuned vibration control of slender structures*. Int. J. Numer. Meth. Engng. 45, 1243-1255 (1999).
- [29] BIELEK, M. – ČERNÍK P. – TAJMÍR M.: *Aerodynamics of Buildings*. STU Bratislava. 1989. In Slovak.
- [30] FERANEC, V. – FERANEC, T.: *Local wind pressures on structures in groups*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on wind engineering. Copenhagen, 21-24 June 1999. Wind Engineering into the 21st Century. A. A. Balkena, Rotterdam 1999.
- [31] FERANEC, V.: *Wind load on low-rise buildings and structures*. Inter. Conference Dyn-Wind 2000. 18-21 September 2000, Vyhne.