ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Katedra technických zařízení budov K11125

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

Diplomová práce

ANALÝZA VLIVU VĚTRU NA PŘIROZENÉ VĚTRÁNÍ CHRÁNĚNÉ ÚNIKOVÉ CESTY

WIND IMPACT TO NATURAL VENTILATION
OF PROTECTED ESCAPE ROUTES

Bc. Václav Brezík
vedoucí práce: Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Daniela Adamovského, Ph.D. Všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu podkladů použitých pro zpracování.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 6.1.2019 ……

Bc. Václav Brezík

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Danielovi Adamovskému, Ph.D. za vedení této práce. Dále mému zahraničnímu konzultantovi na Univerzitě v Lublani doc. Ing. Tomaži Hozjanovi, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat Ing. arch. Petru Hejtmánkovi a Ing. Vojtěchu Trskovi za odborné konzultace, týkající se simulace v programu FDS. Zároveň bych chtěl poděkovat společnosti Thunderhead Engineering Consultants, Inc. za poskytnutí studentské licence softwaru Pyrosim 2018.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Brezik Jméno: Václav Osobní číslo: 423008

Zadávající katedra: katedra technických zařízení budov

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza vlivu větru na přirozené větrání chráněné únikové cesty

Název diplomové práce anglicky: Wind impact to natural ventilation of protected escape routes

Pokyny pro vypracování:
Zpracujte rešerši stávajícího stavu poznání. Vytvořte model zadané geometrie CHÚC. Proveďte ověření dostupnými prostředky (normové postupy). Výpočtem posuďte účinky větru na přirozené větrání CHÚC s ohledem na různé směry působení a rychlosti větru. Výsledky analyzujte a diskutujte v souvislosti bezpečné evakuace osob chráněnou únikovou cestou.

Seznam doporučené literatury:
Węgrzyński, W. Krajewski, G. Influence of wind on natural smoke and heat exhaust system performance in fire conditions, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 164, p. 44-53, 2017, ISSN 0167-6105.
Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., Li, B. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, p. 698-726, 2016, ISSN 1364-0321.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 19.9.2018 Termin odevzdání diplomové práce: 6.1.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

19. 9. 2018

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je analýza vlivu větru na přirozené větrání chráněné únikové cesty. Teoretická část se zabývá především vymezením významných pojmů pro tuto práci. Nejprve jsou popsány druhy a základní charakteristiky chráněných únikových cest, včetně možností větrání těchto chráněných únikových cest, dále je podrobněji řešeno přirozené větrání. Zde je pozornost zaměřena na vliv větru na účinnost přirozeného větrání a zjednodušený postup výpočtu tohoto větrání dle ČSN 73 0802 [1]. Následně je popsána problematika hoření včetně jeho průběhu a identifikace pojmů jako je pásmo hoření či dalších nebezpečí, které s požáry souvisí. V praktické části je provedena analýza vlivu větru na přirozené větrání chráněné únikové cesty pro konkrétní objekt. Řešený objekt je nejprve stručně charakterizován a následně jsou provedeny dva způsoby ověření účinnosti jeho větrání. Pro první variantu, kterou je zjednodušený výpočet, je v tabulkovém procesoru Excel vypracován výpočetní postup, dle kterého lze snadno ověřit účinnost přirozeného větrání včetně vlivu větru na toto větrání. Jako druhá metoda ověření účinnosti navrženého větrání je použita modelace pomocí programů využívajících CFD simulace, konkrétně FDS 6 (Fire Dynamics Simulator) a Pyrosim 2018. Závěrem jsou uvedena hlavní zjištění, které tato analýza přinesla. Konkrétně se jedná především o rozpor mezi výsledky jednotlivých variant a zjištění, že vyšší rychlost větru nemusí vždy působit na větrání negativně.

Klíčová slova

vítr; přirozené větrání; viditelnost; tlakové rozdíly; chráněná úniková cesta; požár; CFD model

Abstract

The aim of this diploma thesis is to analyse the impact of wind on natural ventilation of protected escape routes. The theoretical part deals mainly with the definition of concepts important for this work. In the first part types and basic characteristics of protected escape routes, including the option of ventilation possibilities are described. Furthermore, natural ventilation is described in more detail. The attention is focused on the influence of wind on the efficiency of natural ventilation and the simplified procedure of calculation of this ventilation according to ČSN 73 0802 [1]. Subsequently, the issue of burning process, the identification of terms such as the burning zone or other hazards associated with fires are described. The practical part analyses the influence of wind on natural ventilation of the protected escape route on a specific building. The object in question is briefly characterized and then two ways to verify the effectiveness of its ventilation are presented. The computational procedure is developed in Excel, which makes it easy to verify the efficiency of natural ventilation, including the effect of wind on this ventilation. The second method of verifying the efficiency of the designed ventilation is by using CFD simulation software, FDS 6 (Fire Dynamics Simulator) and Pyrosim 2018. In the conclusion, the main findings of this analysis are presented. Specifically, the thesis presents the conflict between the results of the verification methods and concludes that higher speeds of wind may not negatively affect ventilation in all scenarios.

Keywords

wind; natural ventilation; visibility; pressure differences; protected escape route; fire; CFD model

Nomenklatura

V textu jsou použity následující značky:

I	intenzita větrání [hod^{-1}]
V	objemový průtok přívodního vzduchu [$m^3.hod^{-1}$]
O	objem prostoru [m^3]
ρ	atmosférický tlak vzduchu [Pa]
T	absolutní teplota vzduchu [K]
x	měrná vlhkost vzduchu [$kg.kg_{s.v.}^{-1}$]
dp_1	tlakový rozdíl vzniklý v dolním větracím otvoru [Pa]
dp_2	tlakový rozdíl vzniklý v horním větracím otvoru [Pa]
dp_{celk}	celkový tlakový rozdíl mezi větracími otvory vzniklý rozdílem teplot [Pa]
h_1	osová vzdálenost dolního větracího otvoru od neutrální roviny [m]
h_2	osová vzdálenost horního větracího otvoru od neutrální roviny [m]
H	osová vzdálenost větracích otvorů [m]
ρ_e	hustota venkovního vzduchu [$kg.m^{-3}$]
ρ_i	hustota vnitřního vzduchu [$kg.m^{-3}$]
g	tíhové zrychlení [$m.s^{-2}$]
A_{odv}	geometrická plocha odváděcího otvoru [m^2]
$A_{př}$	geometrická plocha přívodního otvoru [m^2]
$p_{d,w}$	dynamický tlak větru [Pa]
w	rychlost větru [$m.s^{-1}$]
$M_{př}$	hmotnostní průtok přiváděného vzduchu [$kg.s^{-1}$]
M_{odv}	hmotnostní průtok odváděného vzduchu [$kg.s^{-1}$]
$C_{př}$	výtokový součinitel přívodního otvoru [-]
C_{odv}	výtokový součinitel odváděcího otvoru [-]
$v_{př}$	rychlost vzduchu v přívodním otvoru [$m.s^{-1}$]
v_{odv}	rychlost vzduchu v odváděcím otvoru [$m.s^{-1}$]
ρ_e	hustota venkovního vzduchu [$kg.m^{-3}$]
ρ_i	hustota vnitřního vzduchu [$kg.m^{-3}$]
$dp_{w,\ nav}$	rozdíl tlaků na vnějším povrchu návětrné strany vyvolaný účinkem větru [Pa]
$dp_{w,zav}$	rozdíl tlaků na vnějším povrchu závětrné strany vyvolaný účinkem větru [Pa]
$dp_{př}$	tlakový rozdíl pro překonání odporu vzduchu přívodním otvorem [Pa]
dp_{odv}	tlakový rozdíl pro překonání odporu vzduchu odváděcím otvorem [Pa]

τ_e	teplota vzduchu v exteriéru [K]
τ_i	teplota vzduchu v interiéru [K]
Q	teplo, které je šířeno prouděním [W]
c_p	měrná tepelná kapacita [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
$dp_{souč,odv}$	přetlak v odváděcím otvoru [Pa]
$dp_{souč,př}$	podtlak v přívodním otvoru [Pa]
$dp_{souč,př,f}$	přetlak na fasádě [Pa]
$dp_{souč,odv,f}$	podtlak na fasádě [Pa]
HRR	heat release rate – rychlost uvolňování tepla [kW]
h	výška [m]

V textu mohou být použity následující zkratky:

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
CHÚC	Chráněná úniková cesta
ČCHÚC	Částečně chráněná úniková cesta
PP	Podzemní podlaží
NP	Nadzemní podlaží
EPS	Elektrická požární signalizace
PÚ	Požární úsek
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
WHO	World Health Organization – Světová zdravotnická organizace
ČSN	Česká technická norm

Obsah

Úvod ... 3
1 Současný stav poznání ... 5
1.1 Požární ochrana ... 5
1.2 Požár a jeho průběh ... 8
1.3 Bezpečnost osob při požáru – Únikové cesty ... 9
1.4 Větrání chráněných únikových cest ... 11
1.4.1 Možnosti větrání jednotlivých typů CHÚC ... 12
1.4.2 Přirozené větrání ... 13
1.4.3 Nucené větrání ... 18
1.4.4 Přetlakové větrání ... 19
1.5 Vliv větru na přirozené větrání chráněných únikových cest ... 19
1.5.1 Rozložení tlaků vzniklých účinkem větru na objekt ... 20
1.5.2 Základní polohy větracích otvorů a směru větru ... 21
1.6 Postup návrhu pomocí výpočtu ... 24
1.6.1 Vstupní hodnoty pro výpočet: ... 24
1.6.2 Okrajové podmínky pro výpočet dle ČSN 73 0802 ... 24
1.6.3 Výpočet tlakového rozdílu vzduchu ... 24
1.6.4 Tlakový účinek od větru ... 25
1.6.5 Tlaková ztráta schodištěm ... 26
1.6.6 Zákon zachování hmoty ... 26
1.6.7 Neutrální rovina ... 28
1.7 Vítr ... 29
1.7.1 Rychlost větru ... 29
1.7.2 Směr větru ... 31
1.7.3 Druhy proudění větru ... 31
1.7.4 Měření meteorologických dat v ČR ... 32
1.8 Vliv větru na vnitřní prostředí budovy ... 32
1.8.1 Viditelnost ... 33
1.8.2 Koncentrace oxidu uhelnatého (CO) ... 34
1.9 Nebezpečí spojená s procesem hoření ... 36
1.9.1 Nebezpečí vyplývající ze zplodin hoření ... 36
1.9.2 Nebezpečí vyplývající z hořlavosti zplodin hoření ... 39
2 Řešený příklad ... 41
2.1 Popis objektu ... 41
2.2 Výpočet pomocí softwaru Excel ... 42
2.2.1 Obecná analýza dat z ČHMÚ ... 42
2.2.2 Analýza dat ČHMÚ pro rok 2017 ... 44
2.3 Vyhodnocení výsledků získaných výpočtem v softwaru Excel ... 47
2.4 CFD model ... 48
2.4.1 Výpočetní síť ... 49
2.4.2 Požární scénář, výpočetní čas ... 49

2.4.3 Požár, dispozice místnosti, materiály ... 50
2.4.4 Varianty výpočtu ... 51
2.5 Výsledky pro jednotlivé varianty ... 52
2.5.1 Varianta A ... 52
2.5.2 Varianta B ... 57
2.5.3 Varianta C ... 61
Závěr ... 64
Seznam obrázků ... 66
Seznam tabulek ... 68
Literatura ... 69
Příloha 1 – Zdrojový kód FDS ... 72
Příloha 2 – Výpočtová část ... 77

Úvod

Tématem diplomové práce je analýza vlivu větru na přirozené větrání chráněné únikové cesty. Chráněné únikové cesty jsou v objektech navrhovány za účelem zajištění bezpečného východu na volné prostranství a jejich cílem je v případě nebezpečí přispět k zamezení počtu ztrát na životech osob či zvířat, ublížení na zdraví a ztrátám na majetku. Zároveň slouží i pro přístup jednotek požární ochrany do prostorů zasažených požárem. Jedná se o druh únikové cesty, na který jsou kladeny nejvyšší požadavky. Obecně tak únikové cesty v současné době představují jeden ze základních návrhových prvků, který musí být i dle ČSN řady 73 08xx při projektování staveb vždy zohledňován.

Hlavním cílem diplomové práce je porovnání výsledků získaných výpočtem dle normového postupu a dle simulace vlivu větru na přirozené větrání CHÚC v programu. Pro naplnění tohoto hlavního cíle je zpracován řešený příklad a naplněno několik dílčích cílů. Mezi dílčí cíle diplomové práce patří analýza současného stavu poznání, analýza jednotlivých metod navrhování přirozeného větrání CHÚC a analýza účinků různých směrů působení a rychlostí větru na přirozené větrání CHÚC.

V úvodu teoretické části jsou uvedeny statistiky související s požáry v České republice a ve světě. Nejen z těchto statistik je patrné, jak velkou roli při návrhu staveb může mít správně vypracované požárně bezpečnostní řešení. Nejprve je proto pozornost zaměřena na charakterizování požární ochrany. Dále je z hlediska požární ochrany specifikován požár a jeho jednotlivé fáze. Hlavní pozornost je v rámci teoretické části zaměřena na již zmíněné únikové cesty, především pak na možnosti jejich větrání a vliv větru na jejich přirozené větrání. Je zde uveden i obecný postup při navrhování větrání únikových cest pomocí výpočtu. Jelikož byl jako předmět této práce zvolen vliv větru, následuje teoretické vymezení a analýza vlivu větru. Závěrem jsou uvedena nebezpečí související s procesem hoření.

Úvodem praktické části práce je popis objektu bytového domu, na kterém bude ověřena funkčnost navrženého větrání CHÚC. Objekt byl zvolen pro své specifické dispoziční řešení. Pro jednotlivé simulace je posouzeno několik variant s různými povětrnostními podmínkami. Účinnost větrání je nejprve ověřena výpočtem na základě tabulkového procesoru Excel. Výchozí zdroj pro tento výpočetní postup je publikace „Požární větrání: větrání chráněných únikových a zásahových cest“ [2]. Jako vstupní data byly použity hodnoty naměřené Českým hydrometeorologickým ústavem.

Druhou metodou ověření účinnosti přirozeného větrání CHÚC je simulace modelu konkrétní požární situace pomocí programů PyroSim 2018 a FDS 6. Jedná se o běžně používané softwary, které jsou založeny na principu dynamického proudění tekutin. Obě varianty ověření účinnosti přirozeného větrání CHÚC budou použity, neboť každá z nich má svá specifika. Ověření pomocí normového výpočtu by mělo vždy být na straně bezpečnosti a nemělo by docházet k poddimenzování návrhu. Naopak ověření pomocí simulace může více odpovídat reálným situacím. I tak je ale působení větru během roku značně rozdílné. Z tohoto důvodu byly zvoleny jednotlivé varianty modelu, kdy se odlišují podmínky jak pro směr, tak pro rychlost větru. Závěrem jsou výsledky pro veškeré varianty shrnuty a porovnány.

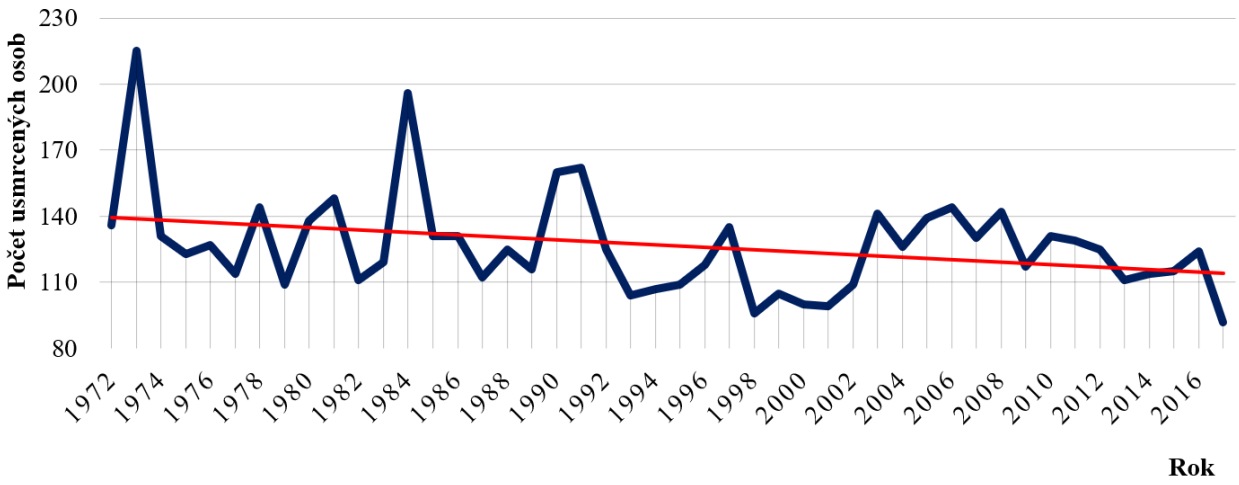
1 Současný stav poznání

Tato kapitola slouží jako teoretický základ diplomové práce. Jejím cílem je analýza současného stavu poznání a nalezení východisek pro řešený příklad.

1.1 Požární ochrana

V projektovaných objektech musí být zajištěny takové podmínky, aby v běžném provozu i při neočekávaných událostech, kterými může být např. požár, nedocházelo ke ztrátám na životech osob či zvířat, ublížení na zdraví a ztrátám na majetku. Stavba musí být navržena s ohledy na to, aby se zamezilo vzniku požáru, jeho šíření uvnitř objektu i mimo něj. Z tohoto důvodu se objekty člení do **požárních úseků**. Každý požární úsek je ohraničen požárně dělícími konstrukcemi, které zajišťují požadovanou požární odolnost, určenou projektantem požárně bezpečnostního řešení. Požární odolnost určuje dobu v minutách, po kterou musí navržené konstrukce odolávat účinkům požáru při zachování požadovaných vlastností a mezních stavů. Díky tomuto dělení dochází k minimalizaci škod a zvýšení bezpečnosti evakuovaných osob [1].

Na následujícím grafu (obrázek 1) jsou zobrazeny počty usmrcených osob v souvislosti s požáry. Hodnoty jsou převzaty ze statistických ročenek HZS ČR [3] z let: 1991, 1996 a 2017.

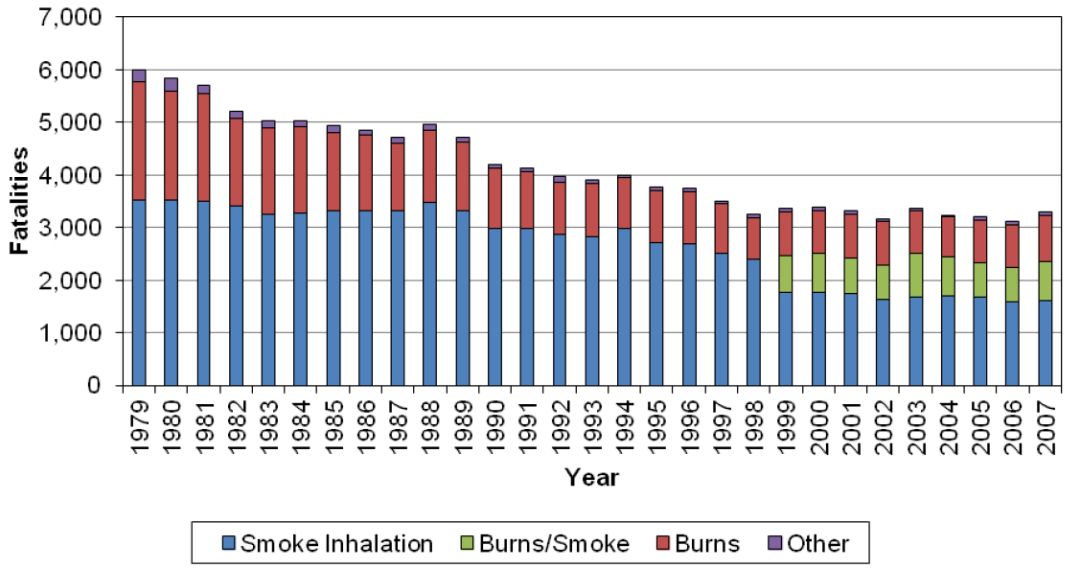


Obrázek 1 – Počet usmrcených osob v souvislosti s požáry mezi lety 1972–2017 + spojnice trendu

Počet osob usmrcených v souvislosti s požáry má dlouhodobě mírně klesající tendenci. Červenou křivkou je vyznačena spojnice trendu. Lze předpokládat, že tento jev je způsoben nejen lepší technickou a technologickou vybaveností hasičského záchranného sboru, ale především neustále se zpřísňujícími požadavky v oblasti požární bezpečnosti staveb. Dle „Analýzy usmrcených osob při požárech“ [4], která pozoruje hodnoty mezi lety 2005 až 2009, lze říci, že téměř 50 % osob usmrcených v souvislosti s požáry bylo v domácnostech [4].

Téměř ve všech případech jsou osoby při požárech usmrceny **zplodinami hoření**, nikoliv přímým kontaktem osob s plameny. Dle studie „What kills people in a fire? Heat or smoke?“ [5] je více než 75 % osob usmrcených vlivem požáru uvnitř budov.

Kouř se často přesouvá do částí budovy, které jsou vzdáleny zdroji hoření, a může tak ničit majetek a ohrožovat životy i v místech, kde by k přímému kontaktu s plameny ani nemohlo dojít. Pokud kouř pronikne do výtahové nebo schodišťové šachty, je poté evakuace z budovy téměř nemožná a požární zásah značně zkomplikován [6]. Na následujícím grafu (obrázek 2) je zobrazen celkový počet obětí při požárech mezi lety 1979 a 2007. Na tomto grafu lze pozorovat poměr příčin usmrcení v souvislosti s požáry v USA dle amerického národního úřadu pro zdravotnické statistiky (National Center for Health Statistics – NCHS) [5].

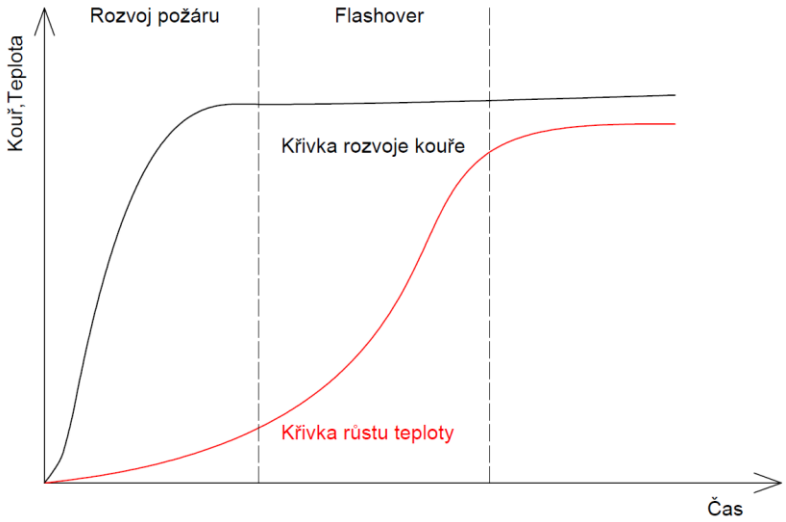


Obrázek 2 – Počet usmrcených osob při požárech ve Spojených státech amerických mezi lety 1979–2007; modrá – inhalace kouře, zelená – popálení/kouř, červená – popálení, fialová – ostatní [5]

Ve Velké Británii mezi lety 1955 a 1979 počet obětí při požárech vzrůstal. V 80. letech nastal zlom a obětí při požárech začalo ubývat, což je přisuzováno převážně tomu, že v roce 1988 vznikly nové předpisy – *The Furniture and Furnishings (Fire) (Safety) Regulations 1988* [7]. Součástí těch byl např. zákaz pronajímání prostorů, které obsahovaly nábytek, bez tzv. „zpomalovačů hoření“ (fire retardants). Nábytek obsahující tyto zpomalovače hoří pouze, pokud je v přímém kontaktu s ohněm, pokud plameny zmizí, hořet přestane. Byly stanoveny určité požadavky na materiálové vlastnosti, bez kterých nemohl být nábytek nadále prodáván. Mezi ty patřila např. odolnost čalouněných materiálů proti zapálení cigaretami nebo opatření každého nového nábytku (s výjimkou matrací a roštů postelí) trvalým štítkem prokazujícím požadované vlastnosti. Zároveň se v tomto roce na trhu objevily nové, levnější detektory kouře [5].

S ohledem na výše popsané riziko musí projektant požárně bezpečnostního řešení stanovit požadavky na celou řadu stavebních konstrukcí, použitých materiálů a dle předpokládané mimořádné obsazenosti objektu určit požadavky na únikové cesty. Při návrhu je nutno zohlednit celou řadu okolností, a to zejména účel využití objektu, maximální možný počet osob, které se mohou v objektu vyskytnout, výšku objektu, počty nadzemních a podzemních podlaží, hořlavost konstrukcí a použitých materiálů a vybavení objektu. Na základě těchto skutečností musí projektant navrhnout potřebné požadavky na požární ochranu. Tuto ochranu lze dále dělit na pasivní požární ochranu a aktivní požární ochranu. **Pasivní požární ochranu** je možné definovat jako schopnost objektu odolávat účinkům požáru díky vhodnému konstrukčnímu, materiálovému a dispozičnímu řešení. **Aktivní požární ochrana** představuje dodatečnou požární ochranu zajištěnou součinností požárně bezpečnostních zařízení, díky vhodnému návrhu PBŘ [8].

Do prvků aktivní požární ochrany patří mimo jiné **požární větrání**, jehož aktivace je zajištěna např. pomocí kouřové detekce od čidel EPS nebo tlačítkovými hlásiči. Při požáru vznikají 4 hlavní nebezpečí, jimiž jsou: **snížený obsah kyslíku, kouř, toxicita vznikajících plynů a par a zvýšená teplota prostředí**. Tato rizika jsou podrobněji popsána v kapitole 1.9. Ztrátu vědomí a následnou smrt osob mohou zapříčinit již dvě až tři vdechnutí toxických zplodin hoření. V prostoru, kde vznikl požár, je obvykle rozvoj kouře velice rychlý a během pár minut se razantně snižuje viditelnost a orientace osob. Správně navržené požární větrání je ve fázi rozvoje požáru jedním z nejdůležitějších aspektů pro bezpečnost osob. Projektanti vzduchotechniky a požárně bezpečnostního řešení by pro docílení nejlepších výsledků a co možná nejvíce bezpečného návrhu svých projektů měli spolupracovat [9]. Na následujícím grafu (obrázek 3) lze vidět, že rozvoj kouře je ve většině případech daleko rychlejší než rozvoj teploty [10].



Obrázek 3 – Křivky rozvoje kouře a teploty při požáru [10]

1.2 Požár a jeho průběh

„Pro účely požární ochrany se za požár považuje každé nežádoucí hoření, při kterém došlo k usmrcení či zranění osob nebo zvířat, anebo ke škodám na materiálních hodnotách. Za požár se považuje i nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata nebo materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy“ [11].

Požár je tedy soubor fyzikálně chemických dějů, při kterých dochází ke změnám teplot a následně proměnám hmoty. U každého hořícího materiálu dochází chemickými změnami k látkové přeměně. Součet hmotností veškerých uvolněných produktů před a po tomto procesu zůstává vždy zachován. Základními produkty hoření jsou teplo, světlo, kouř, hořlavé nespálené plyny a nespálený tuhý zbytek (popel). Nebezpečí, která mohou nastat v oblasti vzniku požáru, vyplývají ze zplodin hoření a jsou popsána v následujících kapitolách [12].

Pro vznik požáru jsou důležité tři prvky, které tvoří tzv. **trojúhelník hoření** (obrázek 4). Pokud dojde k odstranění jedné z těchto veličin, nemůže dojít k požáru. Obvykle je tento způsob využíván k potlačení požáru i v praxi [12].

Obrázek 4 – Trojúhelník hoření [13]

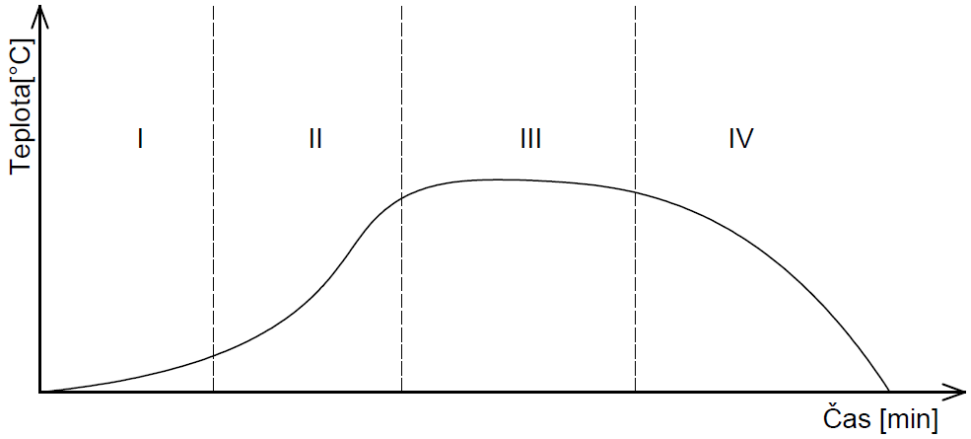
- Hořlavá látka – látky v pevném, kapalném a plynném skupenství, které za určitých podmínek reagují s oxidovadlem a tím se podílí na rozvoji hoření
- Oxidační činidlo – nejčastěji vzdušný kyslík, ale patří sem i látky kyslík uvolňující, dále např. chlor, některé kyseliny apod.
- Iniciační zdroj – plamen, jiskra, zdroje vzniklé přeměnou jiné energie na tepelnou (např. mechanická, chemická, světelná nebo elektrická energie)

[14]

I přestože je každý požár jiný a záleží na okolních vlivech, lze jeho průběh obecně rozdělit do těchto 4 fází (viz obrázek 5) [12]:

- I – Iniciační fáze
- II – Fáze rozvoje
- III – Plně rozvinutá fáze (flashover efekt viz kapitolu 1.9.2)
- IV – Fáze útlumu

Iniciační fáze nastává poté, co mezi hořlavou látkou, iniciačním zdrojem a kyslíkem dojde k chemické reakci. Při této fázi lze ve většině případech utlumit požár vhodným hasicím přístrojem [15]. **Fáze rozvoje** je časový úsek od doby, kdy nastává intenzivní hoření, než dojde k flashover efektu. Likvidace požáru v této fázi je velmi náročná a vyžaduje lepší technické vybavení a organizaci zásahu. Kovové konstrukce v této fázi začínají ztrácet svou pevnost a mohou ztratit i stabilitu. Ve **třetí fázi** dochází k nejvyšší intenzitě hoření a k narušení únosnosti u ostatních nosných konstrukcí. Požár v této fázi nemusí být ani ekonomické potlačovat a může se nechat přejít do poslední fáze, kterou je **fáze útlumu**, kdy dochází k úplnému vyhoření veškerých hořlavých látek. Tyto 4 fáze vznikají za předpokladu, že není prováděn účinný zásah [12].



Obrázek 5 – Průběh teplot v jednotlivých fázích požáru [12]

1.3 Bezpečnost osob při požáru – Únikové cesty

K zajištění bezpečné, snadné a včasné evakuace se navrhují únikové cesty. Při požáru slouží pro vedení zásahu jednotek hasičského záchranného sboru. Únikové cesty jsou děleny podle míry ochrany, kterou zabezpečují. Dle kodexu českých technických norem existují 3 druhy únikových cest, kterými jsou: **nechráněné, částečně chráněné a chráněné** [1].

Nechráněné únikové cesty

Nechráněnou únikovou cestu (NÚC) tvoří *trvale volný komunikační prostor*[1] vedoucí na volné prostranství nebo do chráněné únikové cesty (CHÚC), popř. do částečně chráněné únikové cesty (ČCHÚC). Nechráněná úniková cesta nemusí tvořit samostatný požární úsek a není nutné ji od okolního provozu oddělovat požárně dělícími konstrukcemi. Tento typ únikové cesty **nemusí** být požárně odvětrán [1].

Částečně chráněné únikové cesty

Částečně chráněná úniková cesta je trvale volná komunikace nebo trvale volný komunikační prostor, který vede na volné prostranství nebo do CHÚC. Zpravidla ji tvoří prostor či PÚ bez požárního rizika, avšak za dodržení podmínek, které vyžadují normy ČSN 73 0804 [16] a ČSN 73 0834 [17] ji lze vést sousedním požárním úsekem [16].

Tento typ únikové cesty je využíván převážně ve výrobních objektech a u změn staveb. Větrání částečně chráněných únikových cest není vždy požadováno, avšak pokud z příslušných norem vyplývají podmínky pro jeho zřízení, požadavky jsou velmi podobné jako u CHÚC typu A [1].

Chráněné únikové cesty

Chráněná úniková cesta je trvale volný komunikační prostor vedoucí k východu na volné prostranství. CHÚC musí vždy tvořit samostatný PÚ. Unikající osoby a jednotky hasičského záchranného sboru, jsou zde chráněny proti účinkům požáru, jako jsou např. vysoké teploty a zplodiny hoření. Na chráněné únikové cesty jsou kladeny požadavky z hlediska použitých konstrukcí – jejich materiálů a povrchových úprav [1].

Chráněné únikové cesty se dělí dle způsobu větrání a doby, po kterou je bezpečný pobyt osob na jednotlivých typech únikových cest [1]. Doby bezpečného pobytu osob během evakuace na jednotlivých typech CHÚC jsou následující:

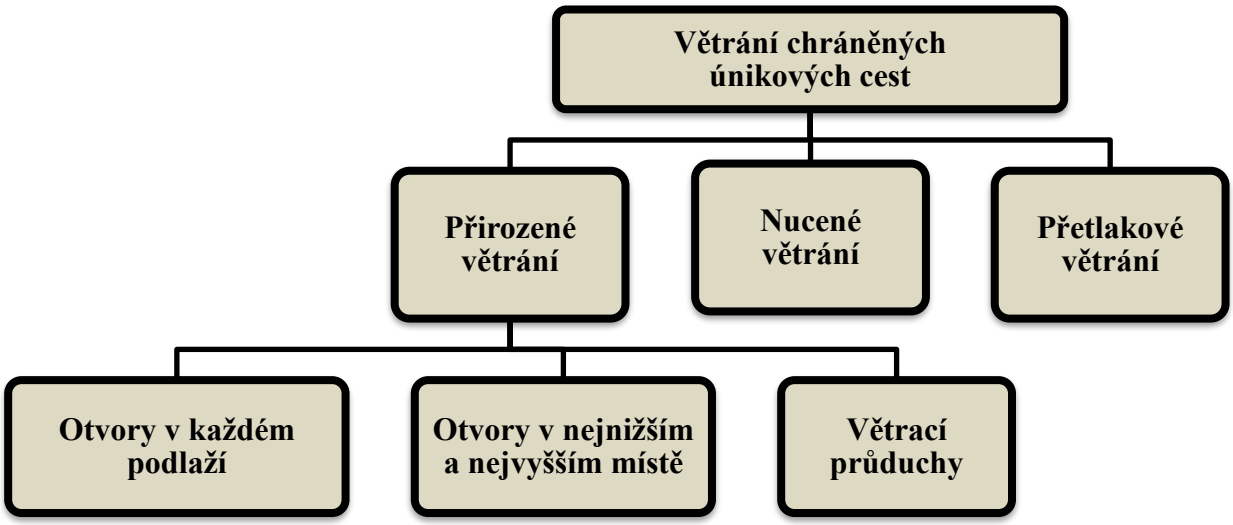
- CHÚC typu A: **4 minuty**
- CHÚC typu B: **15 minut**
- CHÚC typu C: **30 minut** [1]

[1] Za trvale volný se považuje komunikační prostor, v němž není umístěn žádný materiál nebo zařízení bránící úniku osob [1].

Aby byla dodržena předepsaná bezpečná doba pobytu uvnitř CHÚC musí být zajištěno jejich požární větrání. Jednou z možností je zajistit takové **tlakové poměry**, aby byl omezen průnik zplodin hoření a kouře do CHÚC. Druhým způsobem je **zředění** přitékajících zplodin hoření na koncentraci 1–2 %. První řešení – omezení přítoku zplodin hoření, lze zajistit pouze u větrání přetlakového. U ostatních typů dochází pouze k zředění produktů hoření na požadovanou koncentraci [2].

1.4 Větrání chráněných únikových cest

Větrání chráněných únikových cest je jedním z nejdůležitějších prvků aktivní požární bezpečnosti a jeho návrh musí zohlednit řadu okolností a nesmí být podceňován. Na konkrétním řešení se podílí dva obory, a to požární bezpečnost staveb a technika prostředí staveb. Projektant PBŘ navrhuje koncepci únikových cest, jejich druh, typ, počet, kapacity, provedení a vybavení a způsob jejich větrání. Na projektantu vzduchotechniky je poté, aby splnil veškeré požadované parametry a navrhnul vhodné technické řešení [2]. **Mezi nejdůležitější úkoly** požárního větrání patří: zamezit šíření požáru horkým kouřem, obnovit viditelnost v zásahovém prostoru, snížit teplotu v zásahovém prostoru, omezit možné ohrožení obyvatel budovy zplodinami hoření, omezit riziko vzniku flashover efektu, snížit škody způsobené požárem, snížit riziko přenosu požáru na sousední objekty, snížit riziko přenášení požáru uvnitř objektu šířením vrstvy hořlavých plynů [11]. Požární větrání CHÚC lze zajistit více způsoby, jak je patrné z následujícího obrázku (obrázek 6).



Obrázek 6 – Členění větrání chráněných únikových cest [1]

1.4.1 Možnosti větrání jednotlivých typů CHÚC

V tabulce 1 jsou popsány možné způsoby větrání CHÚC pro nevýrobní objekty dle ČSN 73 0802 [1]:

*Tabulka 1 – Způsoby větrání u **nevýrobních** objektů*

Typ CHÚC	Podlaží	Způsob větrání		
		Přirozené	Nucené	Přetlakové
CHÚC – A	NP a 1.PP	ano	ano	ne
	2. a další PP	ne	ano	ne
CHÚC – B s požárními předsíněmi	NP	ano	ano	ne
	PP	ne	ano	ne
CHÚC – B bez požárních předsíní	NP i PP	ne	ne	ano
CHÚC – C	NP i PP	ne	ne	ano

V tabulce 2 jsou popsány možné způsoby větrání CHÚC pro výrobní objekty dle ČSN 73 0804 [16]:

*Tabulka 2 – Způsoby větrání u **výrobních** objektů*

Typ CHÚC	Podlaží	Způsob větrání		
		Přirozené	Nucené	Přetlakové
CHÚC – A	NP a 1.PP	ano	ano	ano
	2. a další PP	ne	ano	ano
CHÚC – B s požárními předsíněmi	NP a 1.PP	ano	ano	ano
	2. a další PP	ne	ano	ano
CHÚC – B bez požárních předsíní	NP i PP	ne	ne	ano
CHÚC – C	NP i PP	ne	ne	ano

1.4.2 Přirozené větrání

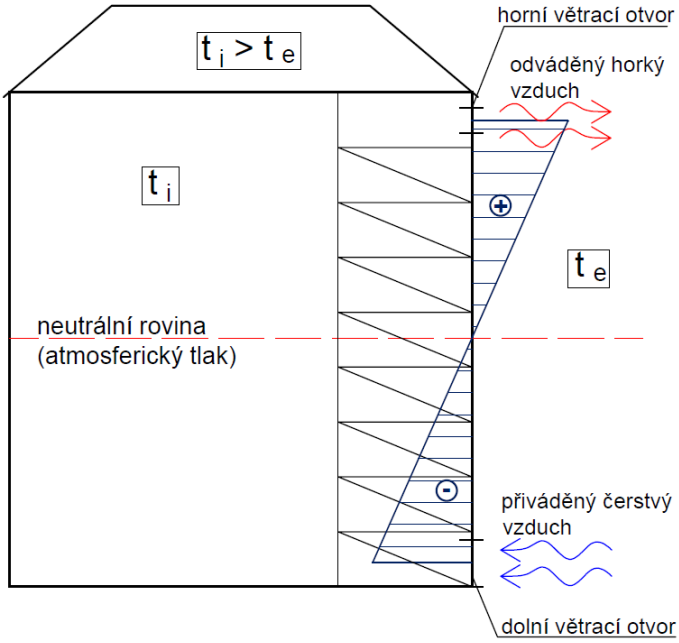
Chráněné únikové cesty, které je možné větrat tímto způsobem, jsou popsány v kapitole 1.4.1. Přirozené větrání je založeno na principu tzv. komínového tahu. V podstatě jde o rozdíl hustot vzduchu přiváděného z exteriéru a vzduchu ohřátého v požárem zasaženém prostoru. Čerstvý vzduch, který je přiváděn do objektu má obvykle nižší teplotu (τ_e), než vzduch uvnitř budovy (τ_i). Hustota vzduchu se určuje výpočtem ze **stavové rovnice ideálního plynu** [11].

$$\rho = \frac{p}{461{,}5 \cdot T} \cdot \frac{(1+x)}{(0{,}622+x)}$$

Atmosférický tlak je konstantní a za předpokladu, že vliv měrné vlhkosti vzduchu je při výpočtu přirozeného větrání téměř zanedbatelný (průměrná celoroční hodnota x = 0,005 $kg.kg_{s.v.}^{-1}$), má na hustotu vzduchu vliv pouze jeho teplota. Z rovnice tedy vyplývá, že se vzrůstající teplotou klesá hustota vzduchu. Vzduch obsahující zplodiny hoření má tendenci stoupat vzhůru. Z fyzikální podstaty tohoto typu větrání je logické, že jeho účinnost je v průběhu dne a ročních období značně proměnlivá, a z hlediska větrací ochrany únikové cesty je nejméně spolehlivou variantou. Bezpečná doba pobytu pro přirozené větrání je v porovnání s ostatními typy velmi nízká (4 minuty) viz kapitolu 1.3. Tlakový diagram vznikající účinkem rozdílu teplot na **vnitřní straně obvodové stěny** je znázorněn na obrázku 7. Na tomto principu je přirozené větrání založeno [2].

Předpoklady:

- Venkovní vzduch má nižší teplotu než vzduch v CHÚC
- Neuvažuje se vliv větru

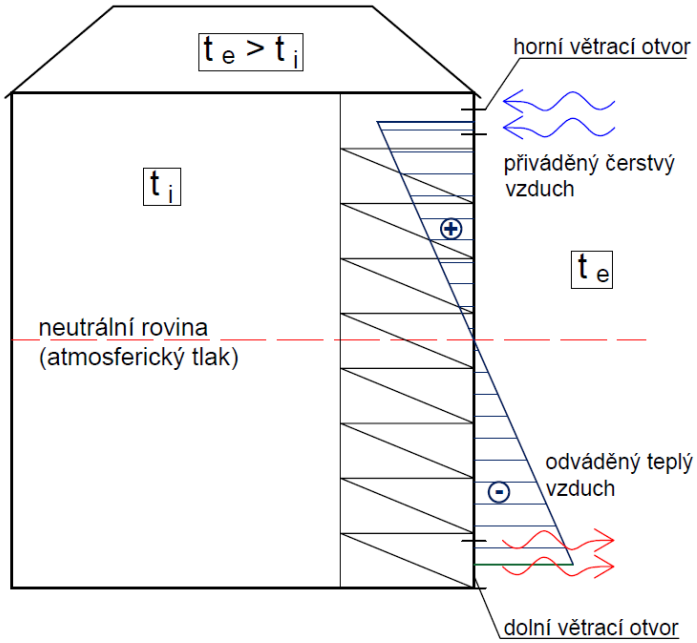


Obrázek 7 – Princip přirozeného větrání CHÚC [2]

Pokud nastane situace, kdy má venkovní vzduch vyšší teplotu než vzduch uvnitř budovy (obrázek 8), tak bude mít větrání tzv. reverzní charakter [2].

Předpoklady:

- Venkovní vzduch má vyšší teplotu než vzduch v CHÚC
- Neuvažuje se vliv větru



Obrázek 8 – Reverzní charakter komínového tahu [2]

Okolní vlivy

Požární větrání je značně ovlivňováno okolními podmínkami a na jeho účinnost mají dopad následující jevy:

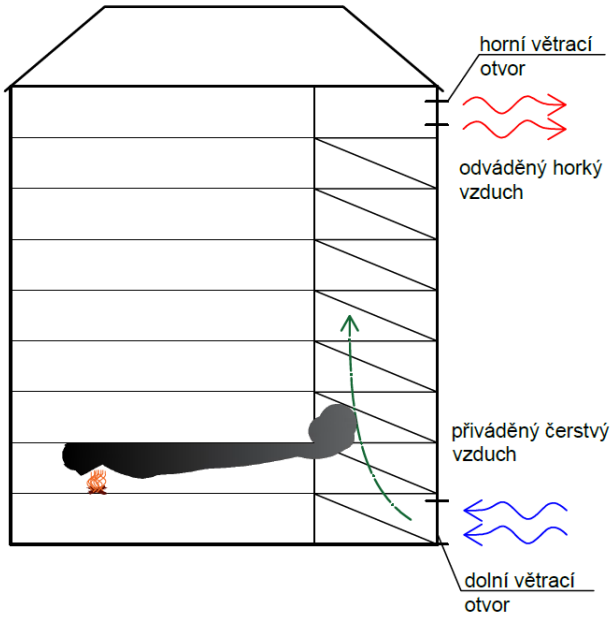
- vzdálenost horního a spodního větracího otvoru
- velikost větracích otvorů
- směr a rychlost větru – vliv větru je podrobně řešen v kapitole 1.5
- rozdíl teplot mezi interiérem a exteriérem
- výšková poloha vzniku požáru
- tvar budovy
- aerodynamický součinitel budovy
- místo s vyšší nebo nižší teplotou (vznik reverzního komínového efektu)
- poloha větracích otvorů vůči větru
- hodnoty vtokových a výtokových součinitelů větracích otvorů [2]

Typy přirozeného větrání

V této kapitole jsou popsány jednotlivé typy a druhy přirozeného větrání. Podle způsobu proudění tepla a zplodin hoření je lze obecně dělit na větrání **vertikální** a **horizontální**. Horizontální větrání není projektovaný způsob větrání, ale lze využít např. u menších požárů, kdy je ohnisko požáru poblíž okenních otvorů nebo dveřích na volné prostranství. Za předpokladu, že se požár nerozšířil do šachtových prostorů či jiných „dutých " stavebních konstrukcí, lze toto větrání zajistit otevřením, popř. vybouráním těchto oken či dveří. U vertikálního větrání se využívá již výše zmíněného komínového tahu, kdy ohřátý vzduch včetně kouře stoupá vzhůru. Vždy je nutné zajistit dostatečně velké otvory pro přívod a odvod vzduchu. Při správně navrženém větrání stoupá kouř svisle vzhůru a přirozeně objekt opouští [11]. Pokud není zajištěno správné odvětrání CHÚC, dochází ke snižování viditelnosti (viz kapitolu 1.8.1), na které záchrana osob při evakuaci velmi závisí, především na viditelnosti značek únikových cest, dveří a oken [18].

- **Větrání otvory v nejnižším a nejvyšším místě (obrázek 9)**

Jedná se o nejúčinnější typ přirozeného větrání CHÚC. Větrání je zajištěno pomocí dvou větracích otvorů. Oba otvory musí mít zajištěné samočinné otevření. To lze zajistit pomocí EPS a čidel reagujících na kouř, popř. vyhlášením poplachu pomocí ručních tlačítek, kdy dojde k okamžitému spuštění požárního větrání. Odváděcí otvor musí být proveden z materiálů třídy reakce na oheň A1 až C. Třída C smí být použita pouze pokud otvor není v požárně nebezpečném prostoru jiného požárního úseku. Při návrhu otevíratelných světlíků, je nutno počítat i se zatížením sněhem a větrem [2]. Pro CHÚC typu A musí mít oba větrací otvory velikosti geometrických ploch alespoň 2 m^2. U CHÚC typu B musí mít odváděcí i přívodní otvor geometrickou plochu alespoň 2,5 m^2. Poslední možností, jak navrhnout tento typ větrání je výpočet. Pokud jsou součástí CHÚC chodby a další přilehlé prostory, je nutné toto větrání posoudit výpočtem [1]. Postup výpočtu je popsán v kapitole 1.6.

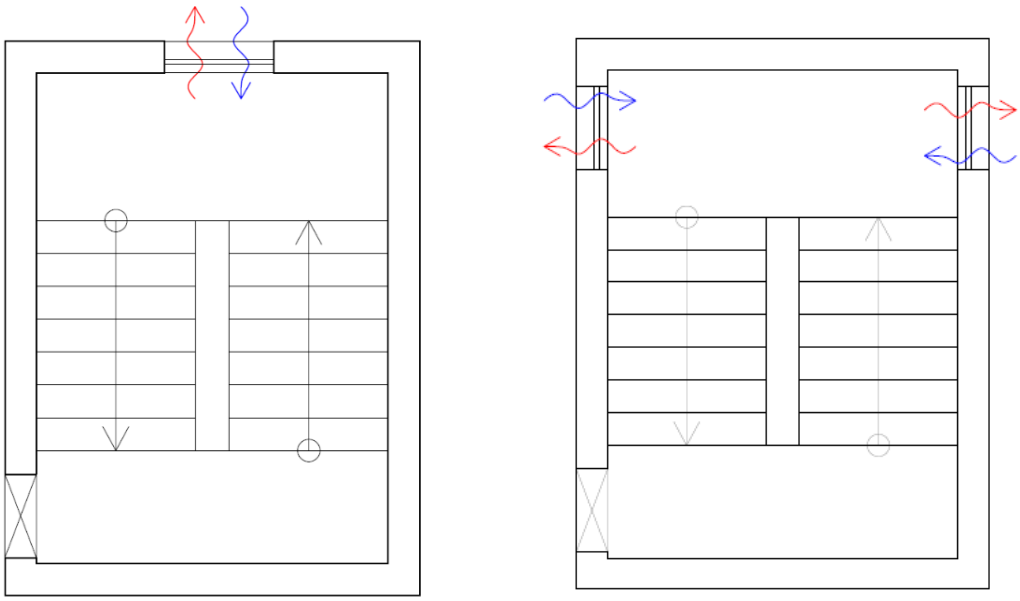


Obrázek 9 – Větrání otvory v nejnižším a nejvyšším místě [2]

Větrání otvory v nejnižším a nejvyšším místě je považováno za nejúčinnější ze všech typů přirozeného větrání [2], z tohoto důvodu bude jeho účinnost ověřena na konkrétním objektu ve druhé části této diplomové práce.

- **Větrání otvory na každém podlaží (obrázek 11)**

Tento typ větrání je možné členit na dva základní případy. Prvním z nich je větrání jednostranné, toho se užívá, pokud dispozice neumožňuje větrání příčné. Návrh této varianty je možný pomocí dodržení minimálních ploch větracích otvorů. Pro CHÚC typu A musí být plocha otvorů min. 2 m^2, pro situaci, kdy je podlahová plocha CHÚC v podlaží menší než 20 m^2. Pokud je plocha CHÚC v podlaží větší než 20 m^2 musí být plocha otvorů u jednostranného větrání (obrázek 10a) min. 10 % z této celkové plochy. Ve stejném případě u příčného větrání (obrázek 10b) musí být geometrická plocha otvorů alespoň 5 % z celkové podlahové plochy. Při využití větrání pro nadzemní podlaží CHÚC typu B se velikosti otvorů zvětšují o 25 % oproti CHÚC A [2]. Otevření větracích otvorů u této varianty není požadováno samočinně, ale předpokládá se jejich otevření, osobami unikajícími po schodišti [11].

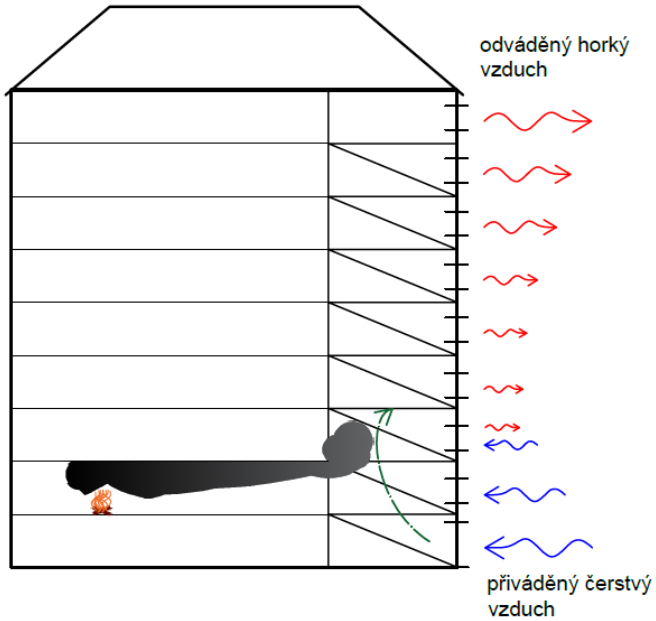


(a) *(b)*

Obrázek 10 – Větrání otvory na každém podlaží; (a) Jednostranné větrání; (b) Příčné větrání [2]

Výhodou větrání otvory na každém podlaží jsou jeho nízké pořizovací náklady a jednoduchost. Jeho účinnost je ovšem ovlivněna především lidským faktorem, pokud unikající osoby neotevřou okna, k žádnému větrání nedochází. Lidé ve vyšších podlažích kouř při poplachu nemusí registrovat a nenapadne je okna otevírat, tím se neutrální rovina (viz kapitolu 1.6.7) posouvá níž a spolu s ní i vrstva obsahující zplodiny hoření [2].

Další faktor ovlivňující tento typ větrání je správná poloha větracích otvorů, vítr, aretace otevřených okenních křídel a počet podlaží objektu společně s jeho výškou. Rovněž dochází ke snížení průchodnosti CHÚC, protože obvykle jsou okenní křídla otevíratelná směrem dovnitř schodiště [2].

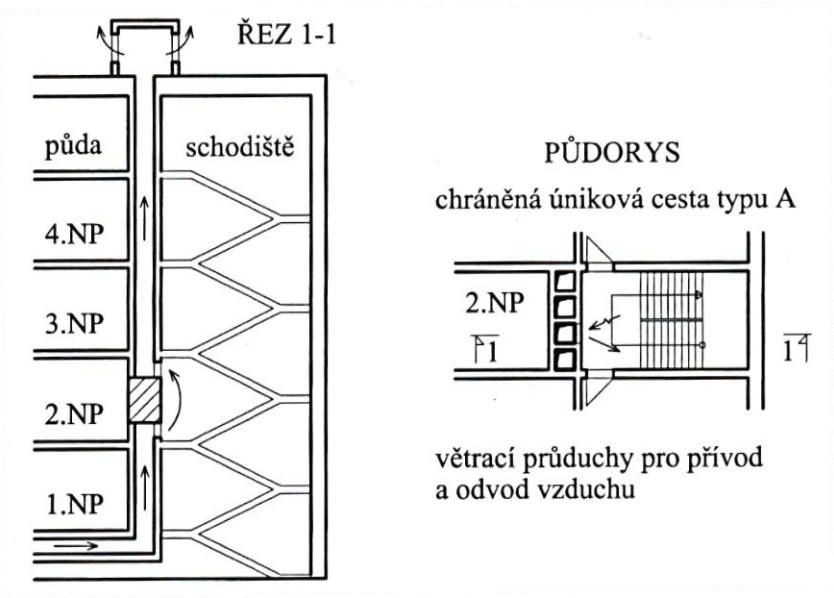


Obrázek 11 – Větrání otvory na každém podlaží; Princip [2]

- **Větrání pomocí větracích průduchů**

Nejméně účinnou a používanou variantou je větrání pomocí větracích průduchů. Využívá se především u nízkopodlažních objektů se schodištěm ve vnitřní dispozici budovy. V každém podlaží se nachází přívod vzduchu u podlahy a odvod vzduchu u stropu (viz obrázek 12). Stavební provedení větrání pomocí průduchů neefektivně zabírá vnitřní prostory budovy a jeho větrací účinnost je nízká. Dnes se již tento typ větrání téměř nevyužívá. Návrh spočívá v dimenzování průřezové plochy větracích průduchů. Tato plocha musí být min. 1 % z příslušné podlahové plochy CHÚC. Pokud lze zajistit uzavření průduchu v každém podlaží takovým způsobem, aby nedocházelo k šíření kouře skrze průduch mezi ostatní podlaží, mohou být přívodní i odváděcí otvory společné pro více podlaží. Přívodní i odváděcí potrubí musí být opatřeno mřížkou proti vnikání nečistot a živočichů a musí mít průtočnou plochu, alespoň takovou, jakou má svislý větrací průduch [2].

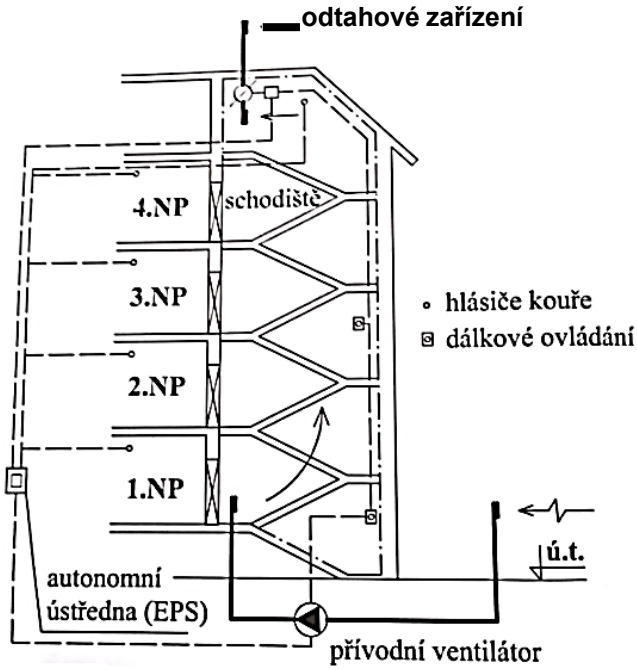
Jedním z největších nedostatků tohoto typu větrání je skutečnost, že vzduch, který je do prostoru přiváděn proudí trasou, na které má nejnižší odpor. V praxi dochází k tomu, že proudící vzduch neprovětrá celý prostor, ale pouze část a zbytek CHÚC zůstane neprovětrán [2].



Obrázek 12 – Přirozené větrání větracími průduchy v CHÚC A [2]

1.4.3 Nucené větrání

Pomocí nuceného větrání (obrázek 13) je zajištěn konstantní přívod venkovního vzduchu do prostoru CHÚC pomocí ventilátoru. Odvod je nejčastěji přirozený (např. samotížnou žaluzií, šachtami, průduchy). V prostoru CHÚC vzniká mírný přetlak, který pomáhá omezovat průnik kouře a zplodin hoření. Velikost přetlaku se u nuceného větrání nenavrhuje ani nesleduje. Sledovaným a návrhovým parametrem je objemový průtok větracího vzduchu. U CHÚC A se musí zajistit 10násobná výměna vzduchu za hodinu. Pro CHÚC B se tato hodnota navyšuje o 25 % [2].



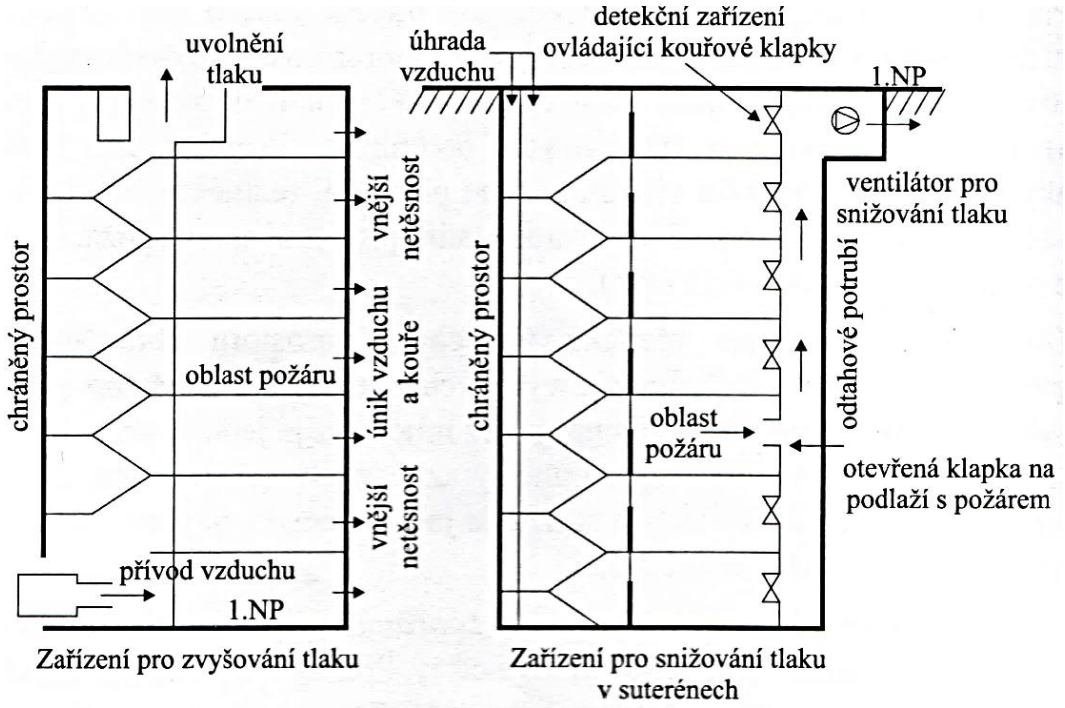
Intenzita větrání se spočítá jako:

$$I = \frac{V}{O} \quad [\text{hod}^{-1}]$$

Obrázek 13 – Nucené větrání [2]

1.4.4 Přetlakové větrání

Chráněné únikové cesty, které je možné větrat tímto způsobem, jsou popsány v kapitole 1.4.1. Přetlakové větrání je technicky podobné jako větrání nucené (viz obrázek 14). Přívod vzduchu je zajištěn pomocí ventilátoru. Hlavním sledovaným parametrem je zajištění potřebného přetlaku v prostoru CHÚC, aby se zcela zabránilo, případně významně omezilo, pronikání kouře do prostoru, ve kterém probíhá evakuace osob [2]. Návrhové parametry jsou popsány v evropské normě ČSN EN 12 101-6 [19].



Obrázek 14 – Přetlakové větrání [2]

1.5 Vliv větru na přirozené větrání chráněných únikových cest

Projektant požární bezpečnosti staveb by měl dle příslušných norem a vyhlášek navrhnout takový systém větrání CHÚC, který bude co možná nejvíce efektivní a spolehlivý. Na spolehlivost přirozeného větrání má vliv celá řada jevů (viz kapitolu 1.4.2) a v průběhu roku i samotného dne může být jeho účinnost proměnlivá. Při návrhu přirozeného větrání se může projektant dle norem rozhodnout pro 2 možnosti. **První možností** je navrhnout otvory pro přívod i odvod vzduchu o určité velikosti, kterou předepisují normy. Pak již není nutné ověřovat účinnost takového větrání na konkrétních podmínkách (zajištění bezpečné koncentrace proniklého kouře 1–2 %, vliv rozdílných teplot, větru, výšky budovy ani polohy vůči směrům větru). **Druhou možností** je výpočet. V normě ČSN 73 0802 [1] jsou dvě varianty, první z nich je postup podle přílohy H,

která ovšem slouží pro návrh ZOKT, a pro projektanta PBŘ, může být tento postup bez potřebných znalostí nesrozumitelný a složitý. Druhou možností je zjednodušený výpočet v souladu s článkem 9.4.3. V tomto článku se mimo jiné píše, že je nezbytné posoudit možnost proniku zplodin hoření do chráněné únikové cesty. Musí se zejména omezit vznik podtlaku v horním odvětracím otvoru způsobujícího přisávání zplodin hoření do chráněné únikové cesty. Při tomto postupu se doporučuje vycházet z požadavku **patnáctinásobné** výměny vzduchu u CHÚC typu A a **dvacetinásobné** výměny u CHÚC typu B. Další podmínkou je, že teplotní rozdíl mezi exteriérem a interiérem je **max. 10 °C** a zvýšená teplota nad úrovní požáru v prostoru CHÚC je nejvýše **o 20 °C** oproti teplotě v interiéru. Maximální rychlost větru na závětrné straně je **5 m.s^{-1}**. Po prokázání účinnosti větrání za těchto podmínek nemusí být splněny požadavky na minimální velikosti přívodního a odvětracího otvoru [1].

U přirozeného větrání dochází k pohybu a výměně vzduchu na základě fyzikálních principů, kterými jsou účinek rozdílu hustot vzduchu a kinetická energie větru. Přirozené větrání, ovlivněné účinkem větru, vzniká v důsledku přeměny kinetické energie větru v tlakovou energii. Tato energie vyvolává v budově pohyb vzduchu netěsnostmi stavebních konstrukcí [2].

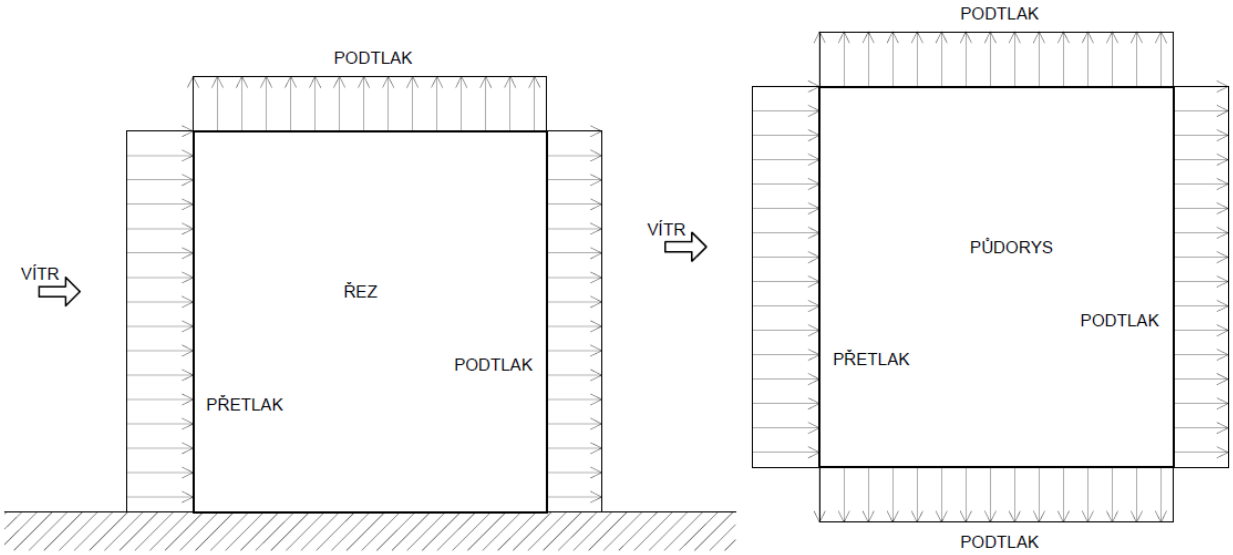
1.5.1 Rozložení tlaků vzniklých účinkem větru na objekt

Rozložení tlaků na stěnách/střeše budovy závisí na směru větru, rychlosti větru, tvaru budovy a situování řešeného objektu v zástavbě. Tlak vznikající účinkem větru se na jednotlivých stěnách budovy vypočítá z následující rovnice:

$$p = p_a + A \cdot p_{d,w}$$

Velikosti tlaků na povrchu budovy lze experimentálně určovat měřením na modelu v aerodynamickém tunelu, popř. CFD modely. Pro výpočty při návrhové praxi se uvažují zjednodušené tvary a průběhy, ze kterých jsou odvozeny aerodynamické součinitele budovy (viz kapitolu 1.6.4).

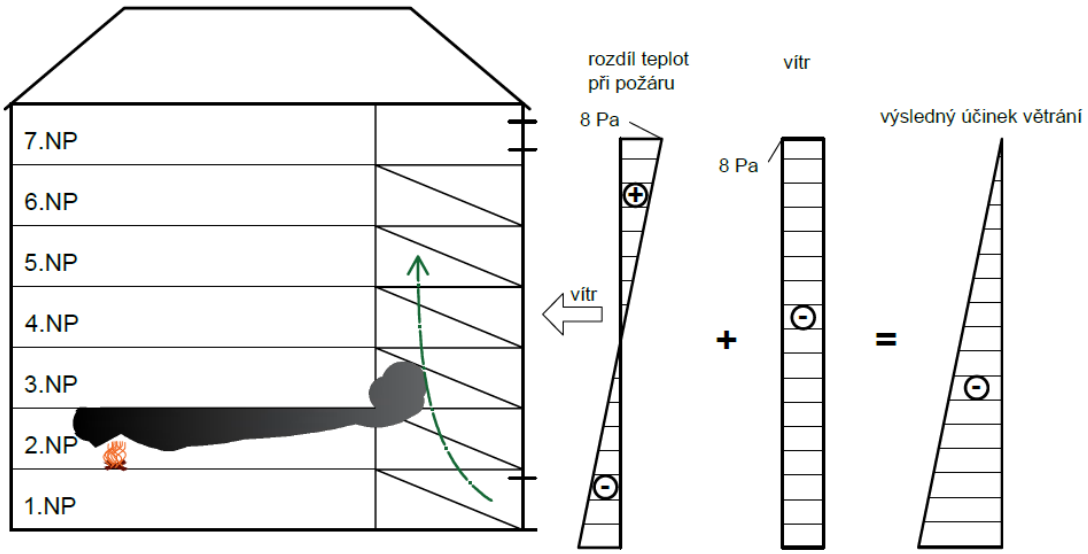
Při působení větru na pravoúhlou budovu s plochou střechou je **idealizované** rozložení tlaků znázorněno na obrázku 15. Z obrázku je patrné, že u budovy s plochou střechou vzniká přetlak pouze na návětrné straně. Na bočních stěnách i na střeše vzniká podtlak. Opačná situace je u střech sedlových, valbových a podobných typů střech, kde se na návětrné straně vytváří přetlak [2].



Obrázek 15 – Idealizované rozdělení tlaku vyvolaného účinkem větru na budovu – půdorys a řez

1.5.2 Základní polohy větracích otvorů a směru větru

Existuje mnoho variant pro umístění větracích otvorů v závislosti na směru větru [2]. Jednou z obvyklých situací v praxi je, že se oba větrací otvory nachází na návětrné straně (obrázek 16).



Obrázek 16 – Rozdělení tlaků na obvodové stěně budovy s otvory na návětrné straně

Při působení větru na tyto otvory může nastat např. situace, kdy tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot v exteriéru a interiéru, je přetlačen účinkem větru. Do budovy je díky kinetické energii větru nasáván vzduch, který se v budově ohřívá a spolu se zplodinami hoření je přirozeným vztlakem vytlačován k odvětracímu otvoru. Ta samá kinetická energie zároveň vytvoří přetlak v úrovni otvoru, který je vyšší než přetlak od účinného vztlaku. Kouř je poté kumulován uvnitř schodiště.

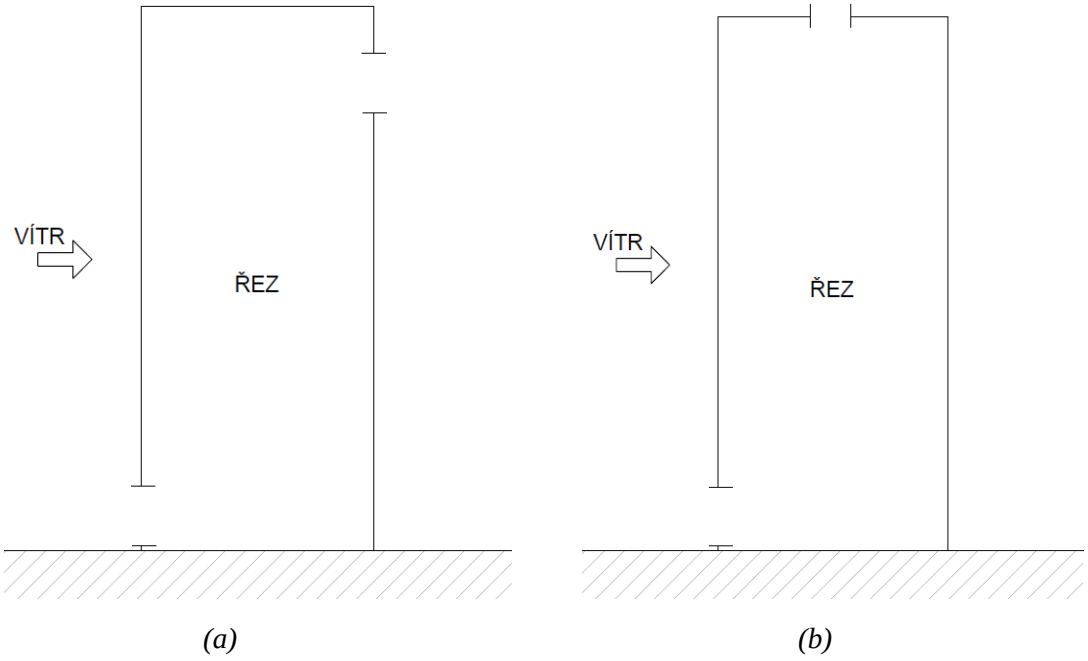
Zplodiny hoření v prostoru CHÚC jsou velmi nebezpečné jak pro evakuující se osoby, tak pro jednotky HZS [2].

Příklady poloh větracích otvorů

V této kapitole jsou porovnány **vhodné, rizikové** a **nevhodné** polohy větracích otvorů vůči směru větru. Ve všech případech se předpokládá kolmý směr působení větru na budovu.

- **Vhodné (obrázek 17)**

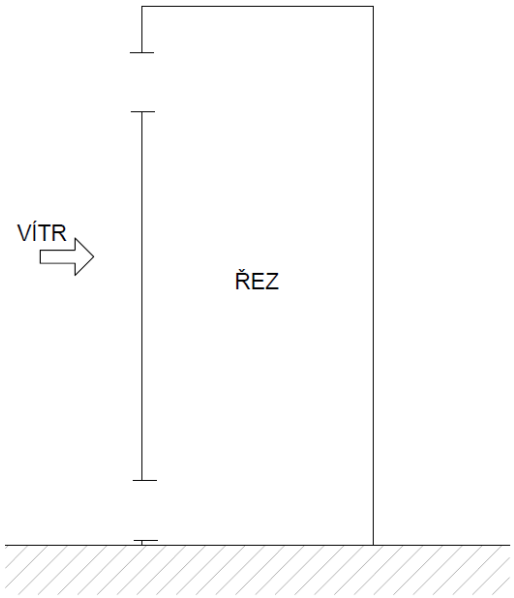
V těchto případech je přívodní otvor na návětrné straně a odváděcí otvor na straně závětrné, popř. na ploché střeše, kde vzniká podtlak a napomáhá odvodu kouře a zplodin hoření [2]. U šikmých střech může být součástí střešních oken např. větrný spojler, který brání proti zpětnému zafoukání kouře vlivem větru do CHÚC [20]. Pokud podle výpočtu není větrání účinné za situace, kdy jsou oba větrací otvory na shodné (návětrné) straně budovy, je posunutí odvětracího otvoru na závětrnou stranu často vhodným řešením [2].



Obrázek 17 – Ideální poloha větracích otvorů
(a) odváděcí otvor na závětrné straně, (b) odváděcí otvor na střeše [2]

- **Rizikové (obrázek 18)**

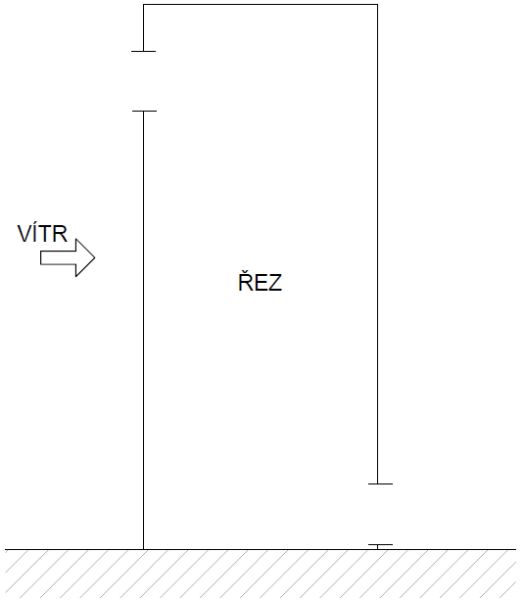
V tomto případě jsou otvory pro přívod i odvod vzduchu na návětrné straně, tato poloha je často používána, ale může při ní dojít k situaci, která je popsána výše viz obrázek 16 [2]. Z toho důvodu, že u polohy větracích otvorů na návětrné nelze jednoznačně určit, zda je efektivní či nikoliv, bude právě tento typ větrání posouzen ve druhé části této diplomové práce (viz kapitolu 2).



Obrázek 18 – Riziková poloha větracích otvorů [2]

- **Nevhodné (obrázek 19)**

Pokud je otvor pro přívod vzduchu na závětrné straně a odváděcí otvor na straně návětrné, vítr působí negativně jak na přivádění, tak na odvádění vzduchu z objektu. Při této poloze větracích otvorů nemůže vznikat komínový tah a k přirozenému větrání by nedocházelo. Tento způsob rozmístění otvorů by neměl být nikdy navrhován [2].



Obrázek 19 – Nevhodná poloha větracích otvorů [2]

1.6 Postup návrhu pomocí výpočtu

V následující kapitole je popsáno, jak je nutné postupovat při zjednodušeném výpočtu přirozeného požárního větrání dle ČSN 73 0802 [1].

1.6.1 Vstupní hodnoty pro výpočet:

- Teplota venkovního vzduchu – **T_e [°C]**
- Teplota vnitřního vzduchu nad prostorem požáru – **Ti [°C]**
- Rychlost větru (průměrná hodnota pro danou oblast) – **w [m.s^{-1}]**
- Rozměry půdorysné plochy CHÚC – **A [m^2]**
- Objem vzduchu v CHÚC – **O [m^3]**
- Tlaková ztráta schodištěm na patro (+ počet pater) **[Pa]**
- Osová vzdálenost větracích otvorů – **H [m]**
- Rozměry větracích otvorů – **délka, výška [m]**
- Poloha větracích otvorů vůči směru větru (návětrná/závětrná strana)
- Vtokový a výtokový součinitel otvorů – **C [-]** [2]

1.6.2 Okrajové podmínky pro výpočet dle ČSN 73 0802

Jedná se o zjednodušený výpočet a lze ho použít při zadání těchto okrajových podmínek:

- Teplotní rozdíl mezi CHÚC a vnějším prostředím do 10 K
- Zvýšená teplota v CHÚC nad úrovní požáru do 20 K
- Rychlost větru na závětrné straně do 5 m.s-1 [2]

1.6.3 Výpočet tlakového rozdílu vzduchu

Nejprve je nutné spočítat hustoty vzduchu v interiéru a exteriéru na základě jejich teplot. Výpočet je proveden dle stavové rovnice ideálního plynu.

$$\rho = \frac{p}{461{,}5 \cdot T} \cdot \frac{(1 + x)}{(0{,}622 + x)}$$

kde:

461,5 plynová konstanta vodní páry [J.kg^{-1}.K^{-1}]

0,622 poměr plynové konstanty suchého vzduchu k plynové konstantě vodní páry [-]

Měrnou vlhkost vzduchu lze zanedbat, nicméně pro tento výpočet bude uvažována průměrná celoroční hodnota x = 0,005 $kg.kg_{s.v.}^{-1}$. Hodnotu atmosférického tlaku lze uvažovat jako průměr v České republice: 98 000 Pa [2].

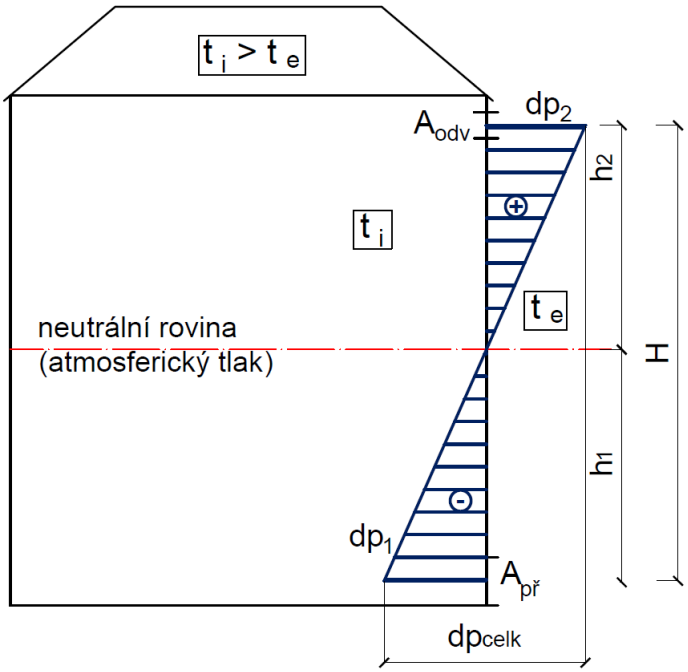
Tlakové rozdíly (obrázek 20) vzniklé rozdílnými hustotami lze popsat následujícími rovnicemi:

$$dp_1 = h_1 \cdot (\rho_e - \rho_i) \cdot g$$

$$dp_2 = h_2 \cdot (\rho_i - \rho_e) \cdot g$$

$$dp_{celk} = H \cdot (\rho_e - \rho_i) \cdot g$$

$$dp_{celk} = |dp_1| + |dp_2|$$



Obrázek 20 – Tlakové rozdíly vzniklé rozdílem teplot na vnitřní straně obvodové stěny

[2]

1.6.4 Tlakový účinek od větru

Dynamický tlak větru lze vyjádřit následovně:

$$p_{d,w} = \frac{w^2}{2} \cdot \rho_e$$

Hodnota rychlosti větru se dle normového výpočtu uvažuje jako celoroční průměrná hodnota pro danou lokalitu. Dynamický tlak větru je teoretická hodnota, ve které není zohledněno na jakou stranu budovy vítr působí. Pomocí **aerodynamického součinitele budovy „A“** se upřesní, zda vítr působí na návětrnou, závětrnou či boční stěnu, popř. střechu. Hodnoty v tabulce 3 jsou uvedeny pro pravoúhlou dispozici budov. Po vynásobení dynamického tlaku větru $p_{d,w}$ např. součinitelem pro návětrnou stranu se získá hodnota $dp_{w,\,nav}$, což je rozdíl tlaků na vnějším povrchu návětrné strany vyvolaný účinkem větru [2].

$$dp_{w,nav} = A_{nav} \cdot p_{d,w}$$

Tabulka 3 – Hodnoty aerodynamických součinitelů budovy		
Část budovy	**Aerod. součinitelé A_{nav}, A_{zav}, A_{str} [-]**	**Standardně užívané aerod. součinitelé A_{nav}, A_{zav}, A_{str} [-]**
Návětrná strana	0,5 až 0,9	0,6
Závětrná strana	-0,3 až -0,6	-0,3
Ploché a mírně skloněné střechy	-0,1 až -0,9	-0,5
Návětrná strana sedlových střech	0,2 až 0,3	
Závětrná strana sedlových střech	-0,5 až 0,7	
Boční stěny		-0,5

1.6.5 Tlaková ztráta schodištěm

Při výpočtu tlakových rozdílů vzniklých různými teplotami a působením větru je nutné zohlednit i tlakovou ztrátu způsobenou prouděním vzduchu schodišťovou šachtou. Schodiště klade proudícímu vzduchu určitý odpor, který je nutné od celkových tlakových rozdílů odečíst. Při stanovení lze vycházet např. z výsledků experimentálních modelových zkoušek ze zahraničních výzkumných pracovišť (např. Technische Universität München). Velikost této ztráty se určuje dle velikosti a tvaru schodišťového prostoru, šířce jeho ramen, provedení zábradlí a ostatních specifik posuzovaného schodiště. Rozpětí doporučených hodnot je od 0,5–6 Pa na jedno podlaží. Pro panelovou výstavbu se doporučují hodnoty od 2 do 5 Pa/podlaží [2].

1.6.6 Zákon zachování hmoty

Další z fyzikálních podstat přirozeného větrání je podmínka větrací rovnováhy. Hmotnostní průtoky v obou otvorech se musí rovnat.

$$M_{př} = M_{odv}$$

$$C_{př} \,.\, A_{př} \,.v_{př} \,.\, \rho_{př} = C_{odv} \,.\, A_{odv} \,.\, v_{odv}\, \rho_{odv}$$

Větrací otvory vytvářejí odpor, který musí proudící vzduch překonat pomocí tlakových rozdílů $dp_{př}$ a dp_{odv}. Tento odpor se ve výpočtu vyjadřuje pomocí výtokového součinitele „C“. Tento součinitel se stanovuje experimentálně a v praxi nabývá hodnot od 0,1 do 0,65 (teoreticky 0–1). Pokud se geometrická plocha otvoru vynásobí tímto součinitelem, získá se plocha aerodynamická [2].

U plně bočně otevíravých oken (obrázek 21a) se musí zohlednit např. vliv dělících sloupků, šířky rámů a křídel. U výklopných oken (obrázek 21b) se musí uvažovat hlavně to, že nebudou plně otevřena (na 90°), ale na úhel o mnoho stupňů menší, tím vzniká menší průtočná plocha, a tu je nutno zohlednit právě výtokovým součinitelem. Pokud nejsou k dispozici přesné hodnoty pro daný otvor, lze uvažovat hodnotu C = 0,6 [21].

(a) *(b)*

Obrázek 21 – Aerodynamická plocha (modře vyšrafovaná) (a) plně bočně otevíravé okno, (b) výklopné okno [21].

Rychlost proudění vzduchu ve větracích otvorech se určuje z rovnic, vyjadřujících podmínku, při níž se tlaková ztráta v otvorech zcela přemění na dynamický tlak.

$$v_{př} = \sqrt{\frac{2dp_{př}}{\rho_e}} \qquad v_{odv} = \sqrt{\frac{2dp_{odv}}{\rho_i}}$$

Dosazením do původní rovnice získáme novou rovnici pro rovnovážnou bilanci.

$$C_{př} \cdot A_{př} \cdot \sqrt{\frac{2dp_{př}}{\rho_e}} \cdot \rho_{př} = C_{odv} \cdot A_{odv} \cdot \sqrt{\frac{2dp_{odv}}{\rho_i}} \cdot \rho_{odv}$$

Dále je možné odvodit rovnice pro přímé stanovení tlakových rozdílů ve větracích otvorech.

$$dp_{t,př} = \frac{dp_{celk}}{1 + \left(\frac{C_{př} \cdot A_{př}}{C_{odv} \cdot A_{odv}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_e}{\rho_i}}$$

$$dp_{t,odv} = \frac{dp_{celk}}{1 + \left(\frac{C_{odv} \cdot A_{odv}}{C_{př} \cdot A_{př}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_i}{\rho_e}}$$

Pokud budeme uvažovat stejný výtokový součinitel u přívodního i odváděcího otvoru, lze odvodit následující rovnice pro výpočet hmotnostního průtoku vzduchu větracími otvory [2].

$$M_{př} = C_{př}.A_{př.}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_e}{\rho_i}\cdot\left(\frac{C_{př}\cdot A_{př}}{C_{odv}.A_{odv}}\right)^2}\right]^{0,5}$$

$$M_{odv} = C_{odv}.A_{odv.}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_i}{\rho_e}\cdot\left(\frac{C_{odv}\cdot A_{odv}}{C_{př}.A_{př}}\right)^2}\right]^{0,5}$$

[2]

1.6.7 Neutrální rovina

Neutrální rovina tvoří rozhraní mezi horkými plyny a čerstvým vzduchem. Pojem „rovina“ není tak zcela přesný, většinou se jedná o jakési pásmo, jehož tvar a sklon se mění podle meteorologických podmínek a procesu hoření. V prostoru nad neutrální rovinou dochází k nárůstu tlaku a kumulaci kouře a zplodin hoření. Pod neutrální rovinou je nižší tlak a pro evakuaci se tento prostor považuje za bezpečný. Při použití zařízení pro odvod kouře a tepla se kladou požadavky na výšku neutrální roviny. Uvnitř budovy se tlak pod neutrální rovinou projevuje jako podtlak ($-dp_1$), a naopak tlak vzniklý nad neutrální rovinou jako přetlak ($+dp_2$) (viz obrázek 22). Velikost těchto tlaků je ovlivněna jejich vzdáleností od neutrální roviny. V nejnižším místě vzniká nejvyšší podtlak a v nejvyšším místě největší přetlak. Na úrovni neutrální roviny je tlak atmosférický. Tlakový diagram na vnější straně budovy představuje opačné hodnoty [11].

Poloha neutrální roviny se pohybuje v závislosti na ploše větracích otvorů a teplotě vnitřního a venkovního vzduchu. Její polohu lze odvodit na základě podobnosti trojúhelníků.

$$\frac{H}{dp_{celk}} = \frac{h_1}{dp_{př}}$$

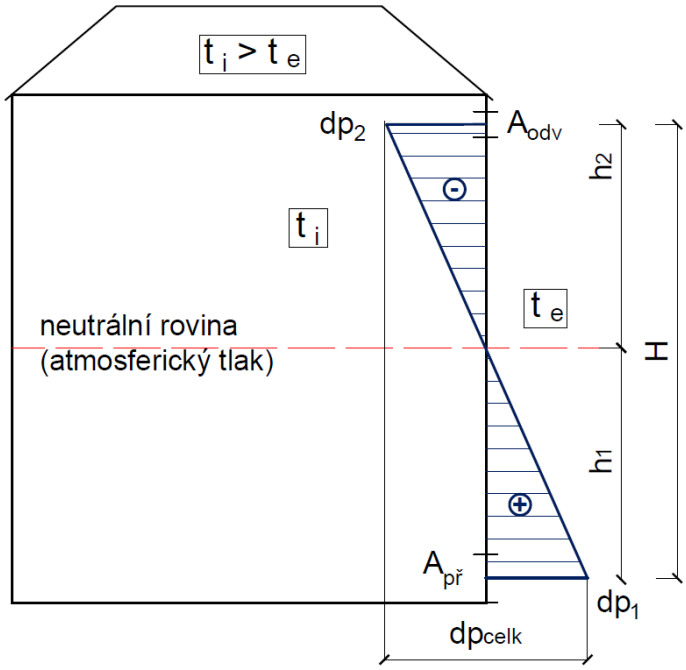
popř. z rovnice

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{C_{odv}.A_{odv}}{C_{př}.A_{př}}\right)^2.\frac{T_e}{T_i}$$

[2]

Následně už je možné spočítat výpočtovou výměnu vzduchu, která musí mít vyšší hodnotu, než je normou požadovaná hodnota (CHÚC A – 15.h^{-1}, CHÚC B – 20.h^{-1})

$$I_{VYP} = \frac{\frac{M.3600}{\rho_\emptyset}}{O}$$



Obrázek 22 – Tlakové rozdíly vzniklé rozdílem teplot na vnější straně obvodové stěny [2]

Pokud je výpočtová výměna vzduchu menší než normou požadovaná, je nutné upravit vstupní parametry např. zvětšit plochy otvorů, popř. změnit jejich polohu vůči větru. Pokud tato opatření nepomohou, je nutné navrhnout jiný typ větrání, aby byla zachována bezpečnost evakuovaných osob [2].

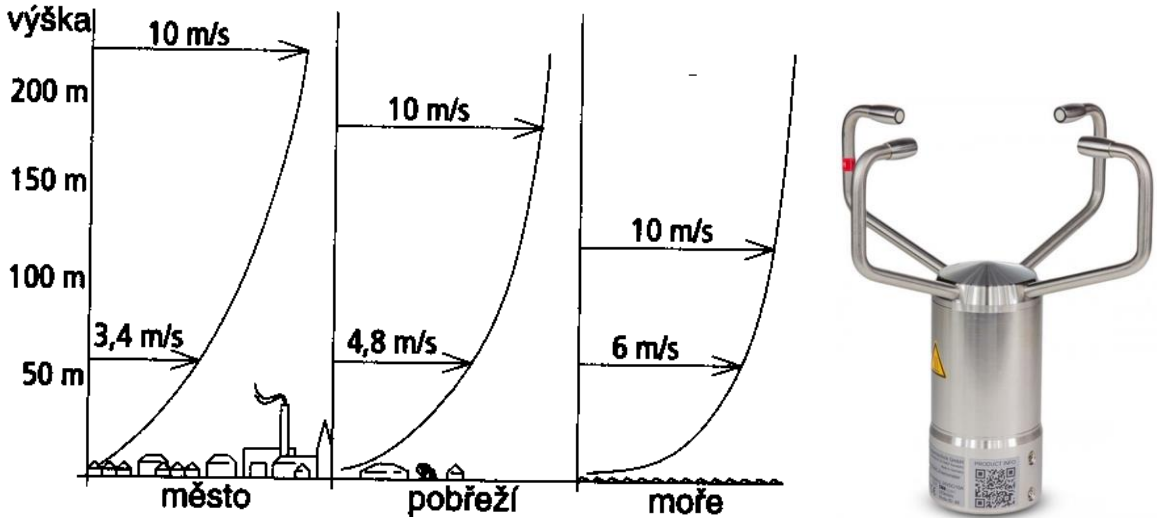
1.7 Vítr

Vítr je vzduch proudící v přírodě, jehož směr a rychlost se neustále mění. Zemský povrch je nerovnoměrně ohříván slunečním zářením. Současně se ohřívá i přilehlá vrstva vzduchu a teplý vzduch následně stoupá vzhůru [22]. Celý děj je silně ovlivněn rotací Země a střídáním dne a noci. To má za důsledek vznik tlakových rozdílů v zemské atmosféře. Vyrovnáním tlakových rozdílů vzniká vítr, který proudí z míst s vyšším tlakem do míst s tlakem nižším [23]. Za vítr se tedy považuje vzduch v pohybu, obvykle proudící v přízemní vrstvě. Označuje se pomocí dvou základních veličin – **směru** odkud vane a jeho **rychlosti** [11].

1.7.1 Rychlost větru

Rychlost větru má rozhodující vliv na výkonnost větru. Běžně se udává v $m.s^{-1}$, $km.h^{-1}$, popř. v Beaufortově stupnici [11]. Veškeré rychlosti v této diplomové práci jsou udávány v $m.s^{-1}$. Čím blíže je vítr zemskému povrchu, tím nižších hodnot jeho rychlost nabývá.

Vítr je zpomalován různými překážkami, jako např. stavbami, nerovným terénem, druhem povrchu (tráva, voda, les, sníh). S rostoucí výškou se rychlost větru logaritmicky zvyšuje (obrázek 23a). Proudění vzduchu v přírodě je vždy turbulentní (viz kapitolu 1.7.3), což znamená, že rychlost i směr větru se neustále mění. Z tohoto důvodu se naměřené hodnoty směru a rychlosti větru uvádí jako průměrné za určitý časový interval (nejčastěji 1 rok). Tento interval se nazývá „vzorkovací doba“ [24]. Rychlost větru se měří pomocí anemometru (obrázek 23b), nejčastěji ve výšce 10 m nad zemí, aby byly omezeny vedlejší vlivy, např. zástavba, stromy [23].



(a) *(b)*

Obrázek 23 – (a) Rychlost větru [m.s^{-1}]; zdroj obrázku [23]
(b) Ultrazvukový anemometr FIEDLER 4310; zdroj obrázku[25]

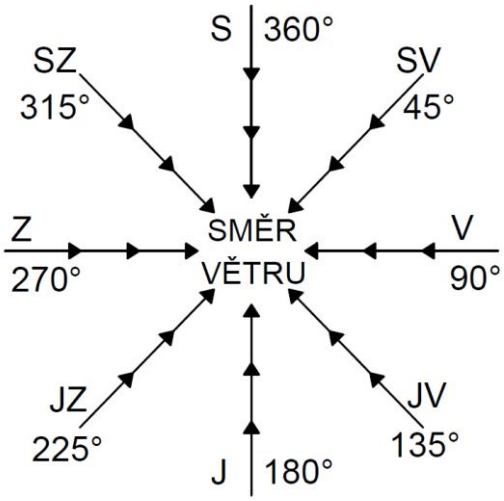
V tabulce 4 je vyjádřen převod Beaufortovy stupnice na m.s^{-1} a zároveň slovní popis síly větru.

Tabulka 4 – Beaufortova stupnice, přepočet na m.s^{-1} a slovní vyjádření síly větru [11]

Stupně Beauforta	[m.s^{-1}]	Slovní vyjádření
0	0,0–0,5	Bezvětří
1	0,6–1,7	Vánek
2	1,8–3,3	Slabý vítr
3	3,4–5,2	Mírný vítr
4	5,3–7,4	Dosti čerstvý vítr
5	7,5–9,8	Čerstvý vítr
6	9,9–12,4	Silný vítr
7	12,5–15,2	Prudký vítr
8	15,3–18,2	Bouřlivý vítr
9	18,3–21,5	Vichřice
10	21,6–25,1	Silná vichřice
11	25,2–29,0	Mohutná vichřice
12	nad 29,0	Orkán

1.7.2 Směr větru

Směr větru je udáván v úhlových stupních od 1° do 360°. Pokud je směr větru 360° znamená to, že vane vítr přímo ze severu, nikoliv směrem na sever [26]. Souhrn základních směrů a mezisměrů je označován jako větrná růžice (viz obrázek 24) [11]. K měření směru větru se používají různé snímače k přesnějším patří např. ultrazvukové anemometry či snímače větru od značky FIEDLER pracující na principu snímání polohy magnetického pole rotoru (oba typy s přesností měření ±1°) [26]. K méně přesnému určení směru se také dají používat např. větrné rukávy nebo korouhvičky [27].

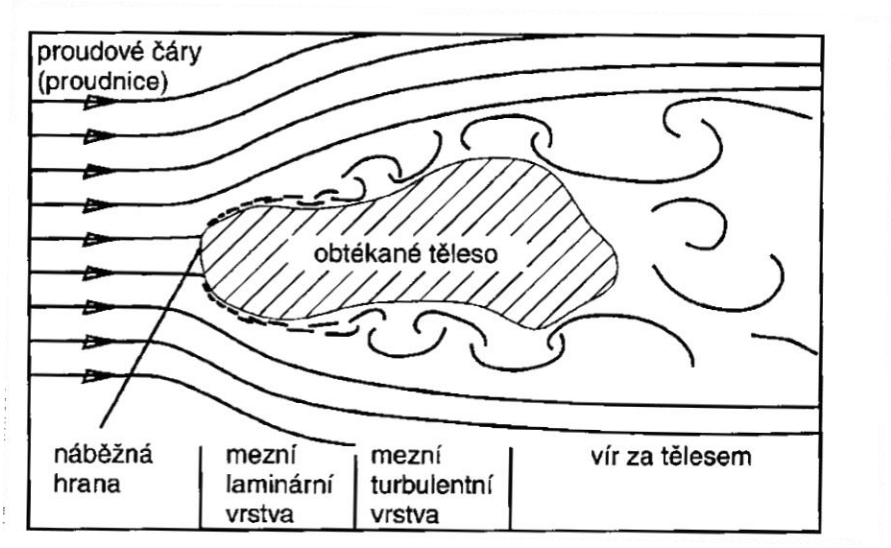


Obrázek 24 – Větrná růžice [°]

1.7.3 Druhy proudění větru

Existují dva základní druhy proudění – laminární a turbulentní (obrázek 25):

U **laminárního proudění** se vrstvy s rozdílnou rychlostí proudění vzájemně paralelně posouvají bez tvoření vírů. V přírodě k tomuto typu proudění vzduchu nedochází. U **turbulentního proudění** se molekuly vzduchu nepohybují jen souběžně, vyskytují se zde i složky směřující napříč nebo i proti směru hlavního proudění. Turbulentní složky nelze měřit běžným anemometrem [23].



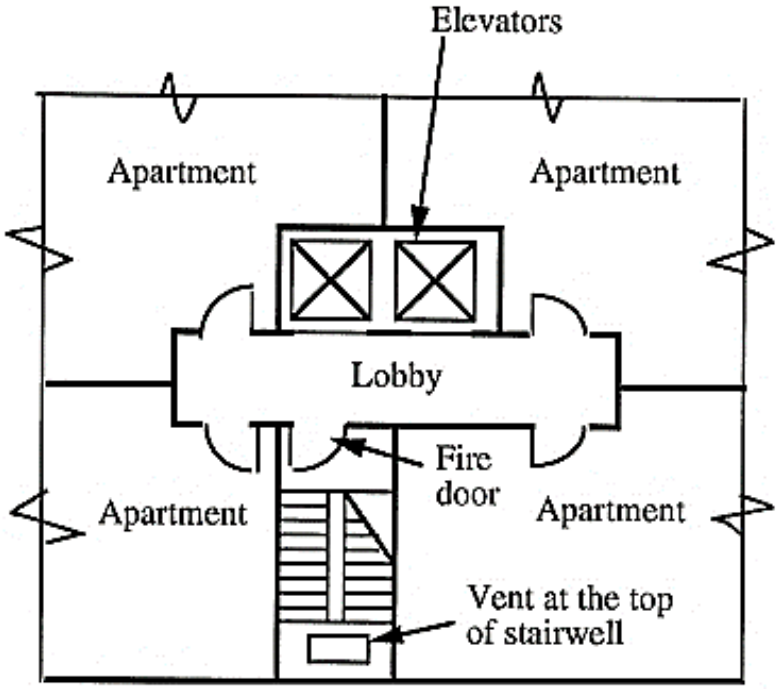
Obrázek 25 – Proudové čáry větru [23]

1.7.4 Měření meteorologických dat v ČR

Měření rychlosti a směru větru v ČR provádí Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Na území České republiky se nachází cca 200 meteorologických stanic. Výsledky měření jsou k dispozici za úhradu buď ve formě nezpracovaných dat, nebo ve formě výsledků analýzy těchto dat prováděných pro různé účely. Pro základní výpočet průměrných ročních rychlostí větru vznikl v Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd České republiky počítačový program VAS. Pomocí tohoto programu lze na libovolném místě v ČR určit průměrnou rychlost větru. Výpočet je prováděn interpolací a umožňuje teoretické rozlišení pro oblast o velikosti 2 x 2 km [24].

1.8 Vliv větru na vnitřní prostředí budovy

Na základě studie z článku „Wind effects on smoke motion in buildings“ [6] byly pozorovány různé hodnoty viditelnosti a koncentrace CO při zvyšující se rychlosti větru a zároveň s různou teplotou venkovního prostředí. Jedná se o dispozici, ve které se nachází před jednotlivými byty chodba a v případě požáru kouř neproniká přímo do CHÚC, ale nejdříve do této chodby. Chodba je oddělena kouřotěsnými a samozavíracími dveřmi od schodiště. Dveře do bytu, ve kterém hoří, jsou zablokovány v otevřené poloze (obrázek 26). V řešeném příkladu (viz kapitolu 2) se dispozice objektu liší. Nevyskytuje se v něm chodba, která by zadržovala kouř a ten tedy proniká z místnosti přímo do CHÚC [6].



Obrázek 26 – Schematický půdorys budovy [6]

Primárními faktory, které ovlivňují viditelnost v budově, jsou geometrické charakteristiky budovy a budov v okolní zástavbě, rychlost a směr větru, termická konvekce vyvolaná požárem, přenos tepla do okolních konstrukcí [6]. Dále viditelnost závisí na rozptylu a absorpci kouře, osvětlení v místnosti, vlnové délce světla, osvětlení značek signalizujících evakuaci a samozřejmě individuální rozlišovací schopnosti lidského zraku, včetně její adaptibility [18].

Přenos tepla do okolních konstrukcí

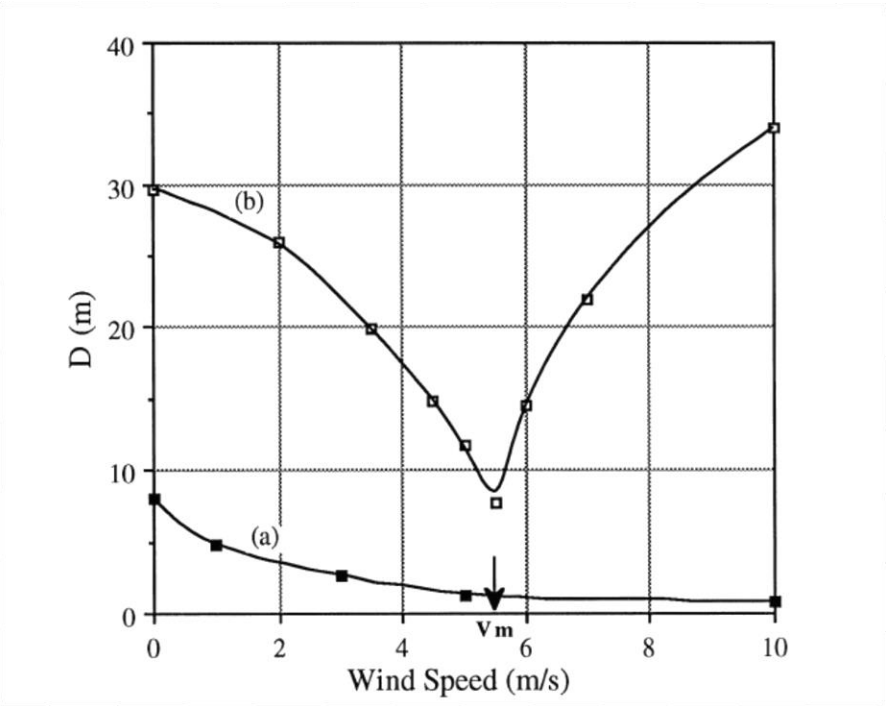
Na přenos tepla do okolních konstrukcí má vliv součinitel tepelné vodivosti (vzduchu a obvodových konstrukcí) a kinematická viskozita vzduchu. Vzhledem k tomu, že viskozita (vnitřní tření) s rostoucí teplotou u plynů roste, lze mírný pokles v proudění pozorovat. Hodnoty kinematické viskozity s rostoucí teplotou jsou uvedeny v následující tabulce [6].

Tabulka 5 – Hodnoty kinematické viskozity vzduchu při tlaku 100 kPa [28]

Teplota [°C]	Kinematická viskozita [$m^2.s^{-1}$]
0	$1{,}35.10^{-5}$
60	$1{,}92.10^{-5}$
100	$2{,}33.10^{-5}$
160	$2{,}79.10^{-5}$
200	$3{,}52.10^{-5}$
250	$4{,}24.10^{-5}$
300	$4{,}88.10^{-5}$
400	$6{,}38.10^{-5}$
500	$8{,}03.10^{-5}$

1.8.1 Viditelnost

Jednou z pozorovaných hodnot v této studii byla viditelnost **„D“**. Výsledky pro obě varianty jsou vyneseny v následujícím grafu (obrázek 27). Ve variantě **(a)** byl pouze otvor pro odvod kouře – světlík v nejvyšším bodě schodiště o celkové ploše (pravděpodobně se jedná o geometrickou plochu) 1 m^2. Venkovní teplota pro variantu (a) T = 20 °C. Varianta **(b)** uvažuje i s otvorem pro přívod vzduchu o ploše 0,5 m^2. Tento otvor je v nejnižším podlaží. Venkovní teplota pro tuto variantu je T = 10 °C [6].



Obrázek 27 – Viditelnost v prostoru schodiště v závislosti na rychlosti větru [6]

Hodnoty viditelnosti a rychlostí větru v grafu jsou z 24. minuty výpočtu. Tepelný výkon požáru jsou 3 MW. Předpokládá se, že kouř z apartmánu pronikne skrz chodbu do prostoru CHÚC. Na křivce (a) lze při vyšších rychlostech větru pozorovat snižování viditelnosti v prostoru schodiště téměř na nulovou hodnotu. U křivky (b) se vyskytuje kritická hodnota větru **"Vm"**. Viditelnost znatelně klesá do té doby, než rychlost větru dosáhne této hodnoty, poté opět vzrůstá. Jednak dochází k většímu naředění kouře v prostoru CHÚC a zároveň je tlakový rozdíl způsobený dynamickým tlakem od větru tak vysoký, že zvětšuje komínový tah a pomáhá odvádět kouř z prostoru schodiště. Pokud se hodnota rychlosti větru přiblíží k hodnotě Vm, je viditelnost nejnižší [6].

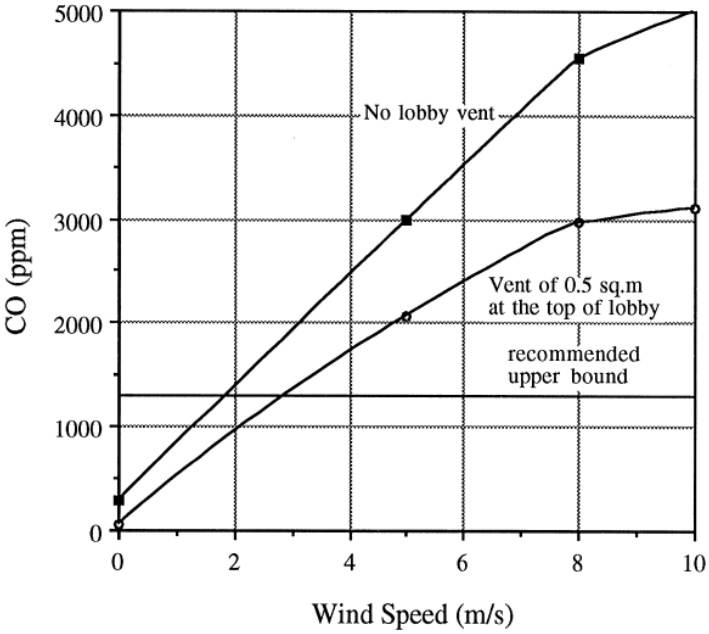
1.8.2 Koncentrace oxidu uhelnatého (CO)

Nebezpečné hodnoty koncentrace CO, které mohou v určitých hodnotách a po určitém času vést až k usmrcení osob, se dle různých zdrojů liší. Hodnoty, které jsou uvedeny níže v tabulce 6, jsou převzaty z webového portálu Working RE Magazine [29]. Jednotka ppm (parts per million) označuje miliontinu z celku. Používá se k označení koncentrace dané látky, ovšem dle článku 6.5.5 ČSN ISO 80000-1 [30] je vyjádření v jednotkách ppm zakázané a je doporučeno používat mocniny deseti [30]. Článek je převzatý ze zahraniční literatury a pro znázornění jsou přesto použity jednotky ppm. Způsob, jakým CO ovlivňuje organismus je popsán v kapitole 1.9.1.

Tabulka 6 – Symptomy po kontaktu osob s CO [29]		
Koncentrace CO [ppm]	Symptomy	Doba vystavení účinkům
200	Nevolnost, únava, bolest hlavy	2–3 hodiny
400	Ohrožení života	3 hodiny
800	Křeče, nevědomá smrt	2–3 hodiny
1600	Smrt	1–2 hodiny
6 400	Smrt	30 minut
12 800	Smrt	1–3 minuty

V České republice zemře na otravu CO, nejen v souvislosti s požáry, přibližně 140–150 osob ročně [31]. V mnoha případech je při požáru doporučeno, aby obyvatelé své byty neopouštěli do příjezdu hasičského záchranného sboru, protože chodba může být velice rychle zaplněna zplodinami hoření. Předpokládaný příjezd HZS je v souladu s článkem „Wind effects on smoke motion in buildings“ [6] 30 minut. Během této doby může při vysoké rychlosti větru do přilehlých bytů proniknout značná koncentrace CO (viz obrázek 28), která může být po 30 minutách i smrtelná [6].

Na následujícím grafu lze pozorovat dvě měření. Křivka s vyššími hodnotami zobrazuje výsledky pro situaci, ve které chodba není odvětrána. Při odvětrání chodby otvorem o velikosti 0,5 m^2 jsou hodnoty o téměř třetinu nižší [6].



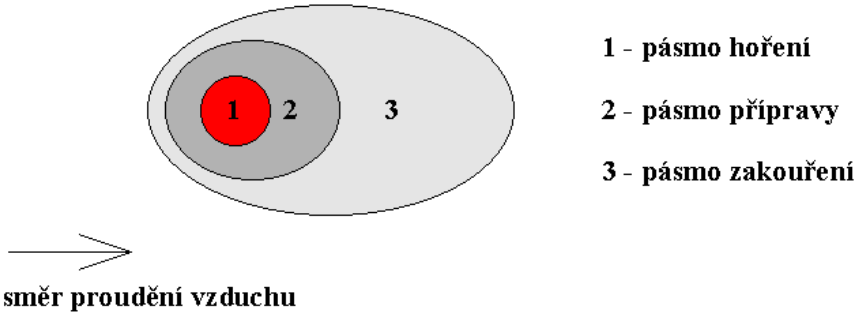
Obrázek 28 – Koncentrace CO v přilehlých apartmánech v závislosti na rychlosti větru (24. minuta) [6]

1.9 Nebezpečí spojená s procesem hoření

Při požárech vznikají dvě hlavní skupiny nebezpečí, nejprve ty, které vyplývají přímo z požáru a zplodin hoření a dále rizika vyplývající z hořlavosti těchto zplodin, která představují riziko převážně pro jednotky HZS.

1.9.1 Nebezpečí vyplývající ze zplodin hoření

Jak již bylo řečeno, nejvíce osob při požárech umírá po vdechnutí zplodin hoření. Prostor, který je požárem ovlivněn se rozděluje na 3 pásma (obrázek 29). Tato pásma se v průběhu času a rozvoje požáru mění a vzájemně ovlivňují [12].



Obrázek 29 – Pásma hoření [12]

- Pásmo hoření

V tomto pásmu probíhá „vlastní hoření“. Jedná se o hoření plynů a par, které ohraničuje povrch plamene a hořících předmětů či látek. Charakterizuje jej plocha požáru, což je půdorysný průmět povrchu hořících látek. Teploty v tomto pásmu mohou dosahovat teplot vyšších než 1000 °C.

- Pásmo přípravy

V tomto pásmu jsou vhodné podmínky pro hoření a pokud zde nejsou provedena žádná opatření, stane se z něj po určitém čase pásmo hoření. Hranice tohoto pásma bývá často určena dosahem sálavého tepla – radiace.

- Pásmo zakouření

V tomto prostoru dochází k pohybu kouře a zdraví ohrožujících plynů spojených s procesem hoření. Zároveň teplota či snížená viditelnost brání činnosti HZS. Nebezpečnost tohoto pásma je zároveň v rychlosti a nepředvídatelnosti jeho šíření.

[12]

Snížený obsah kyslíku v ovzduší

Během hoření dochází ke spalování kyslíku a zároveň k vytlačování vzduchu zplodinami hoření. Za běžných podmínek je obsah kyslíku v ovzduší 21 %, ale již při 18% koncentraci pociťuje lidský organismus nedostatek kyslíku [32].

V následující tabulce jsou shrnuty účinky na organismus při snížené koncentraci O_2 [32].

Tabulka 7 – Účinky na lidský organismus při snížené koncentraci O_2 [32]

Koncentrace O_2	Příznaky
21 %	Žádné – normální podmínky
17 %	Zhoršená koordinace svalové činnosti, zrychlené dýchání kvůli kompenzaci sníženého množství O_2
12 %	Bolesti hlavy, závratě, rychlá únava (malátnost)
9 %	Bezvědomí
6 %	Smrt po několika minutách následkem udušení a selhání srdce

U různých osob se mohou jednotlivé symptomy projevovat odlišně při nižších či vyšších koncentracích kyslíku v ovzduší. Zároveň záleží na délce výskytu v tomto prostředí a neuvažuje se přítomnost dalších zplodin hoření [12].

Vysoká teplota

Při vdechnutí horkých zplodin hoření (již u cca 50 °C) může dojít k nenávratnému poškození dýchacích cest. Pokud je horký vzduch nasycen vodní parou, bývá poškození výraznější [12].

Kouř

Kouř nelze definovat jednotně. V západní Evropě se pod pojmem kouř označuje aerosol či kondenzovaná fáze komponentu produktů při spalování. Americká společnost ASTM (American Society for Testing and Materials) zahrnuje do pojmu kouř rovněž plyny, vyvinuté při procesu hoření [18]. Pro tuto diplomovou práci se kouř dále uvažuje jako směs částic uhlíku, dehtu, prachu a hořlavých plynů a par vznikající při požáru. Tyto částice dráždí dýchací cesty a mohou mít až smrtelné účinky při vdechnutí do plic. Jaké účinky na lidský organismus budou mít, závisí především na jejich velikosti. Množství uvolněného kouře snižuje viditelnost a komplikuje v první řadě evakuaci osob a v druhé řadě zásah HZS [12]. Nespálené tuhé částice nejčastěji nabývají velikostí od 10^{-3} do 10^{-7} cm [11] . Velikosti kouřových částic některých plastů a druhů dřeva jsou uvedeny např. v článku „Kouř jako nebezpečný faktor požáru s obsahem škodlivin“ [18].

Toxicita vznikajících plynů a par

Mezi nejčastější toxické plyny vznikající při požáru patří:

Oxid uhelnatý (CO)

Hlavní nebezpečí CO spočívá v jeho schopnosti vázat se na červené krvinky (hemoglobin). Červené krvinky jsou za běžných podmínek po okysličení krví přenášeny do celého těla. Jelikož se oxid uhelnatý váže až 200x snadněji než kyslík, dojde k tvorbě karboxyhemoglobinu a kyslíku je znemožněno se na červené krvinky navázat. Tímto dochází u postižené osoby k bezvědomí, a pokud není zajištěn přístup čerstvého vzduchu, dochází po krátké době k úmrtí.

- Bezbarvý, bez zápachu, lehčí než vzduch, vzniká při každém požáru
- Způsobí nejvíce úmrtí při požárech
- Nebezpečná koncentrace > 0,05 %

Oxid uhličitý (CO_2)

Oxid uhličitý se zároveň používá i jako hasební látka, má tzv. zřeďovací efekt.

- Bezbarvý nehořlavý, bez zápachu, těžší než vzduch, vzniká převážně při dokonalém hoření
- Nebezpečná koncentrace: 10–12 %

Chlorovodík (HCl)

Nebezpečnost je při kontaktu s vodou, kdy dochází ke vzniku kyseliny chlorovodíkové. Vzniká při hoření všech látek, které obsahují chlór (např. PVC, izolace elektrických kabelů)

- Bezbarvý, silně dráždivé účinky pro dýchací cesty, těžší než vzduch
- Po likvidaci požáru je stále přítomný ve vzduchu

Nitrozní plyny – oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2)

Vznik při skladování zemědělských produktů, při hoření umělých hnojiv a při požárech v kancelářích (např. pravítka, filmy). Při vdechnutí těchto plynů dochází k dráždivému kašli, který vede až ke smrti udušením.

[12]

Jednotlivé produkty nejčastěji používaných plastů, které vznikají po tepelném nebo termo-oxidačním rozkladu při určité teplotě jsou podrobně vypsány v článku „Kouř jako nebezpečný faktor požáru s obsahem škodlivin“ [18]. Jedná se o údaje převzaté z literatury nebo výsledky získané z domácích pracovišť [18]. Ostatní plyny, které velmi často vznikají při hoření, jsou např. **kyanovodík** (HCN), **fosgen** ($COCl_2$) nebo **ultrajedy** [12].

1.9.2 Nebezpečí vyplývající z hořlavosti zplodin hoření

V následující kapitole jsou popsána nebezpečí, která mohou nastat v nedostatečně odvětraných prostorech v případě požáru. Tato nebezpečí představují riziko hlavně pro jednotky HZS.

Flashover – Náhlé vzplanutí v celém prostoru

K flashover efektu (obrázek 30) dochází v případě, kdy místnost není dostatečně odvětraná, ale zároveň je v ní stále dostatek kyslíku pro rozvoj hoření. Teplota postupně narůstá na cca 700 °C a v jeden moment dojde k náhlému vzplanutí veškerých hořlavých materiálů v místnosti [12].

Obrázek 30 – Flashover [33]

Backdraft – Explozivní hoření

Pokud není v místnosti dostatek kyslíku pro plamenné hoření, nastane situace, kdy je místnost zcela zaplněna kouřem (vysoký obsah CO). Dojde k jevu, který se nazývá explozivní hoření (obrázek 32), jehož teplota může dosahovat až 500 °C. V místnosti se vlivem sálavého tepla uvolňují výbušné plyny (např. metan), které zvyšují riziko vzniku backdraftu [12].

Rollover – Žíhavé plameny

Rollover (obrázek 31) nastává v počáteční fázi požáru a jedná se o nashromáždění většího množství hořlavých plynů pod stropem v hořící místnosti. Zplodiny hoření postupně vytlačují tyto plyny do okolních místností, kde se mísí s kyslíkem, pokud jejich koncentrace dosáhne meze hořlavosti, dojde k jejich vznícení a požár se rychle šíří dál. Toto šíření probíhá do té doby, kdy nevyhoří veškeré hořlavé plyny [12].

Pokud dojde k náhlému přívodu čerstvého vzduchu do místnosti (např. otevřením dveří jednotkami HZS) dochází k naředění směsi horkých plynů pod jejich horní mez výbušnosti a dochází k jejich explozi [12].

Obrázek 31 – Rollover [34]

Obrázek 32 – Backdraft [35]

2 Řešený příklad

V následující části diplomové práce bude na konkrétním příkladu ověřena funkčnost navrženého větrání CHÚC bytového domu. Provedeny budou dvě varianty ověření účinnosti větrání. První variantou je celoroční analýza funkčnosti větrání, která je provedena výpočtem na základě fyzikálních vztahů za využití tabulkového procesoru Excel. Pro tuto analýzu bylo vycházeno z dat ČHMÚ, konkrétně z rychlostí a směrů větru mezi lety 2013 a 2017. Druhou variantou je simulace modelu konkrétní požární situace pomocí programů PyroSim 2018 a FDS. Ověřeno bude přirozené větrání v bytovém domě Budulínek, který je pro účely této diplomové práce umístěn v Praze na Karlově. Tato lokace byla zvolena s ohledem na umístění měřící stanice ČHMÚ Praha – Karlov, na které byly naměřeny hodnoty rychlostí a směrů větru. Jedná se o projekt ve stupni dokumentace pro stavební povolení. Identifikační údaje o objektu nejsou reálné a vychází se pouze ze stavební dispozice a dokumentace PBŘ.

2.1 Popis objektu

Bytový dům má 7 nadzemních podlaží a nachází se na Praze 2 na Karlově. V 1.NP se nachází hromadné garáže, ostatní podlaží slouží jako bytové prostory. Na každém podlaží se nachází 7 bytových jednotek, společná chodba a schodiště. Schodiště je navrženo jako CHÚC typu A, chodba tvoří samostatný PÚ a slouží jako nechráněná úniková cesta vedoucí přímo do CHÚC. Jednotlivé byty tvoří samostatné PÚ. Požární výška objektu je 18 m. Větrání CHÚC je přirozené pomocí otvorů v nejnižším a nejvyšším místě. Pro přívod vzduchu slouží vstupní dveře o geometrické ploše 3 m^2. Pro odvod vzduchu slouží okno v posledním NP o geometrické ploše 2 m^2. Otevření těchto otvorů bude v případě vyhlášení poplachu zajištěno pomocí elektrické požární signalizace, která se v objektu nachází.

Teploty a povětrnostní podmínky

Povětrnostní podmínky jsou různé podle jednotlivých posuzovaných variant. Ve výpočtu pomocí tabulkového procesoru Excel jsou posuzovány hodnoty získané z celoročního měření ČHMÚ a pro porovnání je ověřena i varianta bez působení větru. V simulacích pomocí CFD modelů je nejprve posouzena varianta bez působení větru **(varianta A)**, následně celoroční průměrná hodnota rychlosti větru pro rok 2017 s různými směry **(varianta B).** Ve **variantě C** je konstantní směr větru s různými rychlostmi větru. Teploty interiéru a exteriéru jsou pro výpočet i modelaci stejné. Teplota v exteriéru je 7,3 °C a teplota v interiéru je 17 °C. Ve výpočtu se k teplotě interiéru připočítává 20 °C, což je teplota, o kterou požár interiér ohřeje (viz kapitolu 1.6.2).

2.2 Výpočet pomocí softwaru Excel

Pro rychlé a jednoduché ověření funkčnosti přirozeného požárního větrání CHÚC byl vytvořen výpočetní postup v softwaru Excel. Postup byl zvolen dle rovnic a vzorců z publikace „Požární větrání chráněných únikových a zásahových cest“ [2].

Hodnota rychlosti větru, se kterou se provádí normový výpočet, je celoroční průměrná hodnota pro danou oblast. Jelikož se při výpočtu vyskytují okrajové podmínky (viz kapitolu 1.6.2), ke kterým v průběhu celého roku téměř nedochází, získané hodnoty jsou zkreslené. Nejprve se provede výpočet pro průměrnou hodnotu v daném roce a následně se stanoví kritická hodnota rychlosti větru, při které je větrání stále účinné a splňuje normové požadavky ČSN 73 0802 [1]. V následující kapitole bude nejprve provedena obecná analýza dat poskytnutých ČHMÚ. Následně bude provedeno vyhodnocení celoroční analýzy účinnosti větrání. Postup výpočtu je konkrétně popsán v kapitole 1.6. Veškeré výpočty s konkrétními hodnotami jsou uvedeny v **příloze 2 – „Výpočtová část“.**

2.2.1 Obecná analýza dat z ČHMÚ

Data, která jsou poskytnuta ČHMÚ byla měřena 3x denně v lokalitě Praha, Karlov mezi lety 2013 a 2017. Rychlosti a směry větru byly zaznamenány v časech 7:00, 14:00 a 21:00. Rychlosti větru jsou udávány v celých číslech a směry větru v desítkách stupňů. Data jsou následně zpracována pomocí softwaru Excel a v následující tabulce je uvedena četnost proudění větru na jednotlivé světové strany a průměrná rychlost v jednotlivých letech.

Tabulka 8 – Četnost proudění větru na světové strany + průměrná rychlost větru

Rok	SV 0–90°	JV 90–180°	JZ 180–270°	SZ 270–360°	Průměrná rychlost větru [m.s^{-1}]
2013	157	203	444	291	4,05
2014	140	265	436	254	3,7
2015	126	198	469	302	4,44
2016	145	177	482	291	4,1
2017	105	172	526	292	4,59
2013–2017	673	1015	**2359**	**1431**	4,18

Z tabulky vyplývá, že vítr v průběhu let 2013–2017 nejvíce proudí ze **západu**. Ideální umístění větracích otvorů je proto na východní stranu.

Určení kritické rychlosti větru

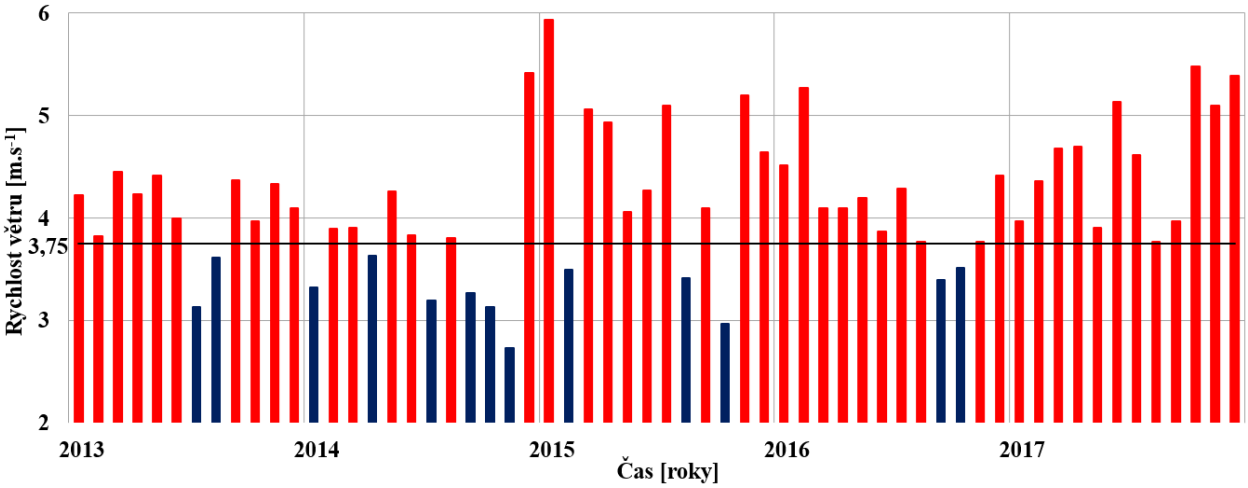
Pro rychlé posouzení funkčnosti větrání pro danou dispozici objektu a CHÚC je pomocí výpočetního „programu“ stanovena kritická hodnota rychlosti větru. To je hodnota, při které je velikost tlaku v odváděcím otvoru rovna nule (0 Pa). Kritická hodnota rychlosti větru je dle získaných výsledků 3,76 m.s^{-1}. Pro veškeré rychlosti větru nižší, než je 3,76 m.s^{-1} je větrání účinné a naopak. Přestože při nižších rychlostech blízkých kritické hodnotě nabývá přetlak v odváděcím otvoru téměř nulových hodnot, v souladu s normovými postupy se větrání považuje za vyhovující. Jelikož se ve výpočtu nijak nezohledňuje úhel, pod kterým vítr na budovu působí, je ve všech variantách uvažován vítr, který na budovu působí pod úhlem 90°. Ve výpočtové části je přiložen výpočet pro rychlost větru 3,76 m.s^{-1}.

Průměrné roční hodnoty mezi lety 2013–2017

V posouzení z normového hlediska (dle celoročních průměrných hodnot) by normovému výpočtu vyhovoval pouze rok 2014, při kterém je průměrná rychlost větru 3,7 m.s^{-1}. Na druhou stranu v roce 2017 jsou hodnoty průměrné rychlosti větru nejvyšší a návrh dle výpočtu by nebyl možný. Výsledky pro rok 2017 budou v kapitole 2.2.2 analyzovány podrobněji pro každý den.

Průměrné měsíční hodnoty

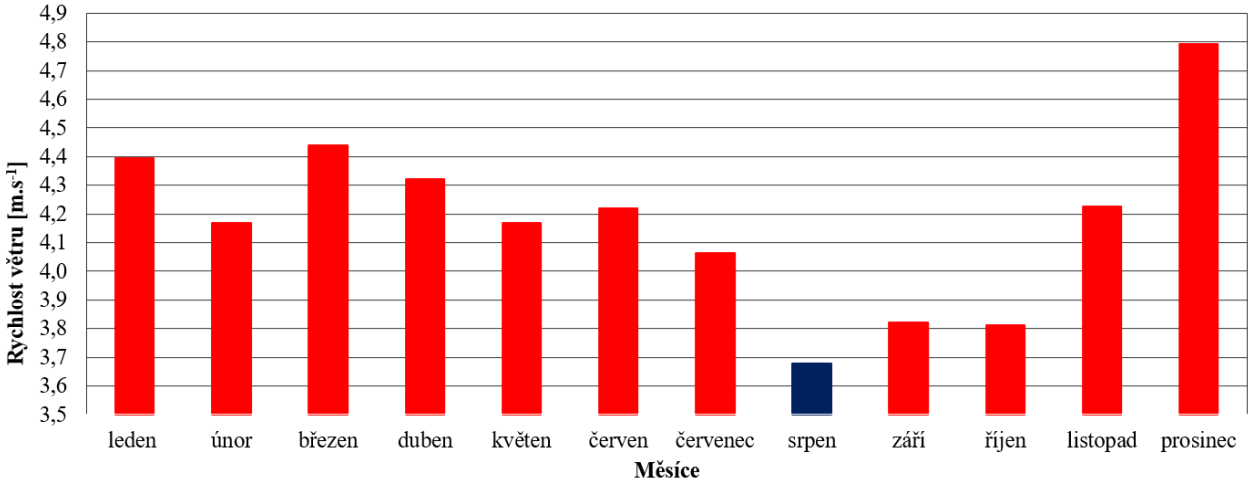
Na následujícím grafu (obrázek 33) jsou znázorněny průměrné měsíční hodnoty rychlosti větru v průběhu let 2013 a 2017. V grafu je černou křivkou vyznačena kritická hodnota rychlosti větru. Červenou barvou jsou vyznačeny měsíce, při kterých by větrání v souladu s výpočtem nevyhovovalo, a modrou barvou jsou označeny měsíce, při kterých by větrání vyhovělo. Při posouzení tímto způsobem lze říci, že větrání vyhoví v 21,6 % (13 měsíců z 60).



Obrázek 33 – Průměrné měsíční hodnoty rychlosti větru mezi lety 2013 a 2017 + kritická rychlost větru

Průměrné hodnoty pro jednotlivé měsíce v letech 2013–2017

Na grafu (obrázek 34) lze pozorovat, ve kterých měsících mezi lety 2013 až 2017 dosahují rychlosti větru v průměru vyšších a nižších hodnot. Průměrná hodnota pro měsíc prosinec, kdy je proudění větru nejsilnější je 4,79 m.s^{-1}. Naopak nejslabší hodnoty jsou naměřeny v srpnu, kdy je hodnota 3,68 m.s^{-1}. Jedná se o jediný měsíc, při kterém je hodnota rychlosti větru nižší, než hodnota kritická – 3,76 m.s^{-1} a větrání by dle normového výpočtu vyhovovalo.



Obrázek 34 – Průměrné rychlosti větru pro jednotlivé měsíce v letech 2013 až 2017

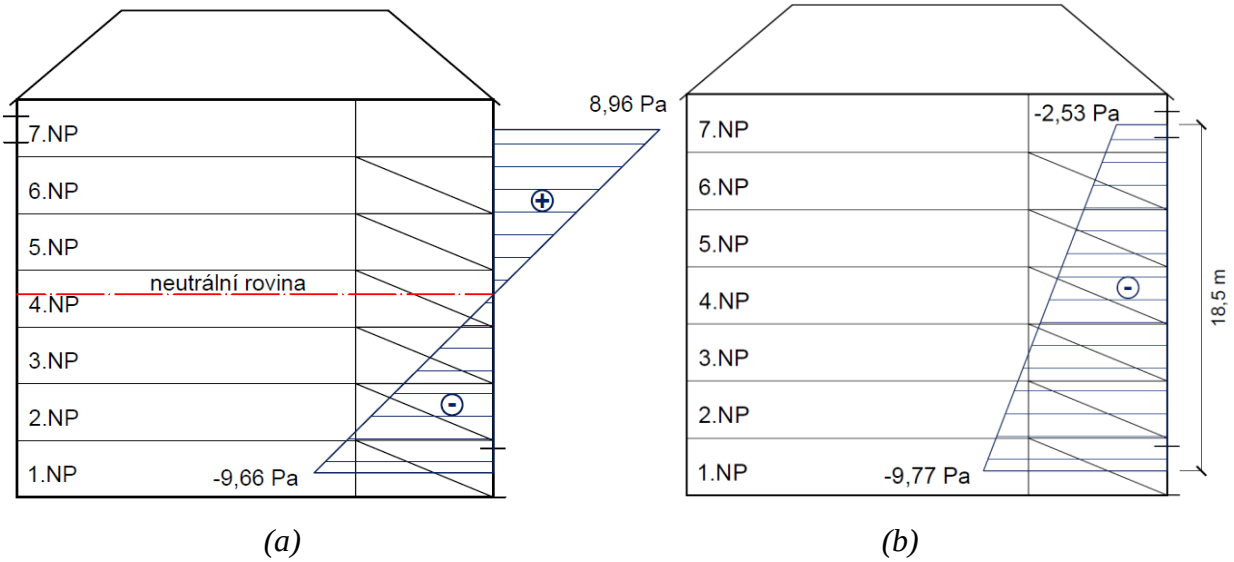
Průměrné denní hodnoty

Při zanedbání směrů větru a uvažování pouze průměrných denních rychlostí větru je mezi pozorovanými lety **438 dní**, kdy je hodnota rychlosti větru vyšší než 3,76 m.s^{-1}. Jedná se o 24 % ze všech pozorovaných hodnot. Nelze konstatovat, že by v tolika případech větrání nevyhovělo, protože není uvažováno umístění větracích otvorů vůči směru proudění větru. Ovšem dle postupu zjednodušeného normového výpočtu, který směry větru příliš nezohledňuje, by téměř ve čtvrtině případů větrání nemuselo být účinné. Přesnější analýza pro rok 2017 je provedena v následující kapitole, kdy jsou zanalyzovány směry i rychlosti větru z jednotlivých světových směrů.

2.2.2 Analýza dat ČHMÚ pro rok 2017

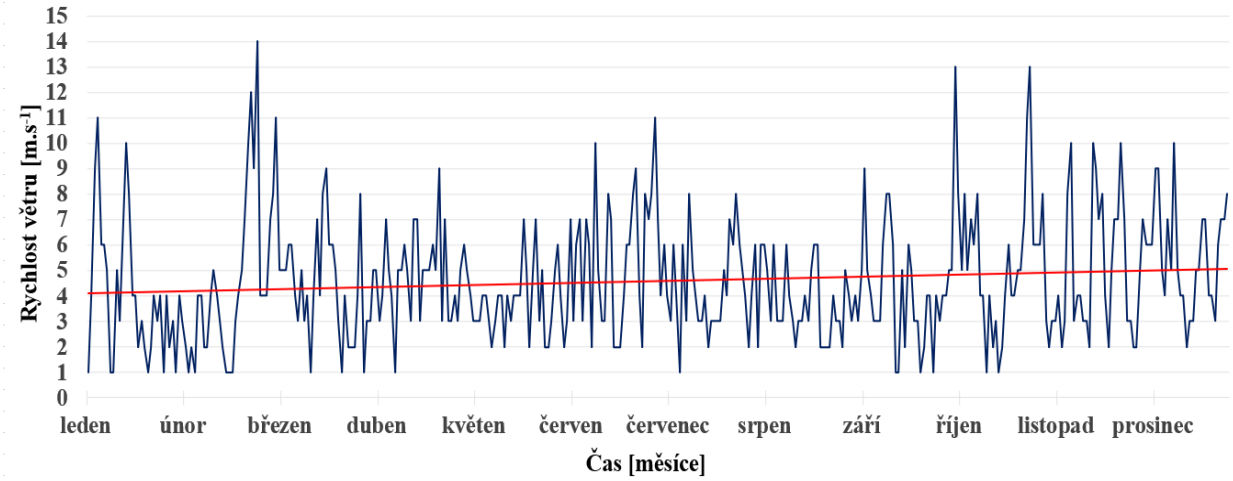
Rychlosti větru nabývají v roce 2017 hodnot v rozmezí 1–14 m.s^{-1}. Celoroční průměrná hodnota je 4,59 m.s^{-1}. Po posouzení pro kritickou hodnotu 3,76 m.s^{-1} lze konstatovat, že toto větrání je neúčinné a jeho návrh by tímto postupem nebyl možný. V odváděcím otvoru vzniká na vnitřní straně obvodové stěny podtlak. Při této situaci nedochází k odvětrání zplodin hoření a kouře z prostoru CHÚC a toto větrání je považováno za **nevyhovující**. V této situaci zvětšení větracích otvorů nepomůže, bylo by nutné posunout odváděcí otvor na závětrnou stranu, aby v prostoru

schodiště vznikl potřebný vztlak a tlakové poměry se zlepšily (obrázek 35). Výpočet s otvorem na závětrné straně je v Příloze 2 – Výpočtové části.



Obrázek 35 – Tlakový diagram na vnitřní straně obvodové stěny pro rychlost větru 4,59 m.s^{-1}
(a) Odvětrací otvor na závětrné straně; (b) Odvětrací otvor na návětrné straně

Na grafu (obrázek 36) jsou znázorněny maximální hodnoty rychlosti větru v průběhu roku 2017. Červenou čarou je zvýrazněna spojnice trendu, na které lze pozorovat nárůst cca o 1 m.s^{-1} pokles v průběhu roku.

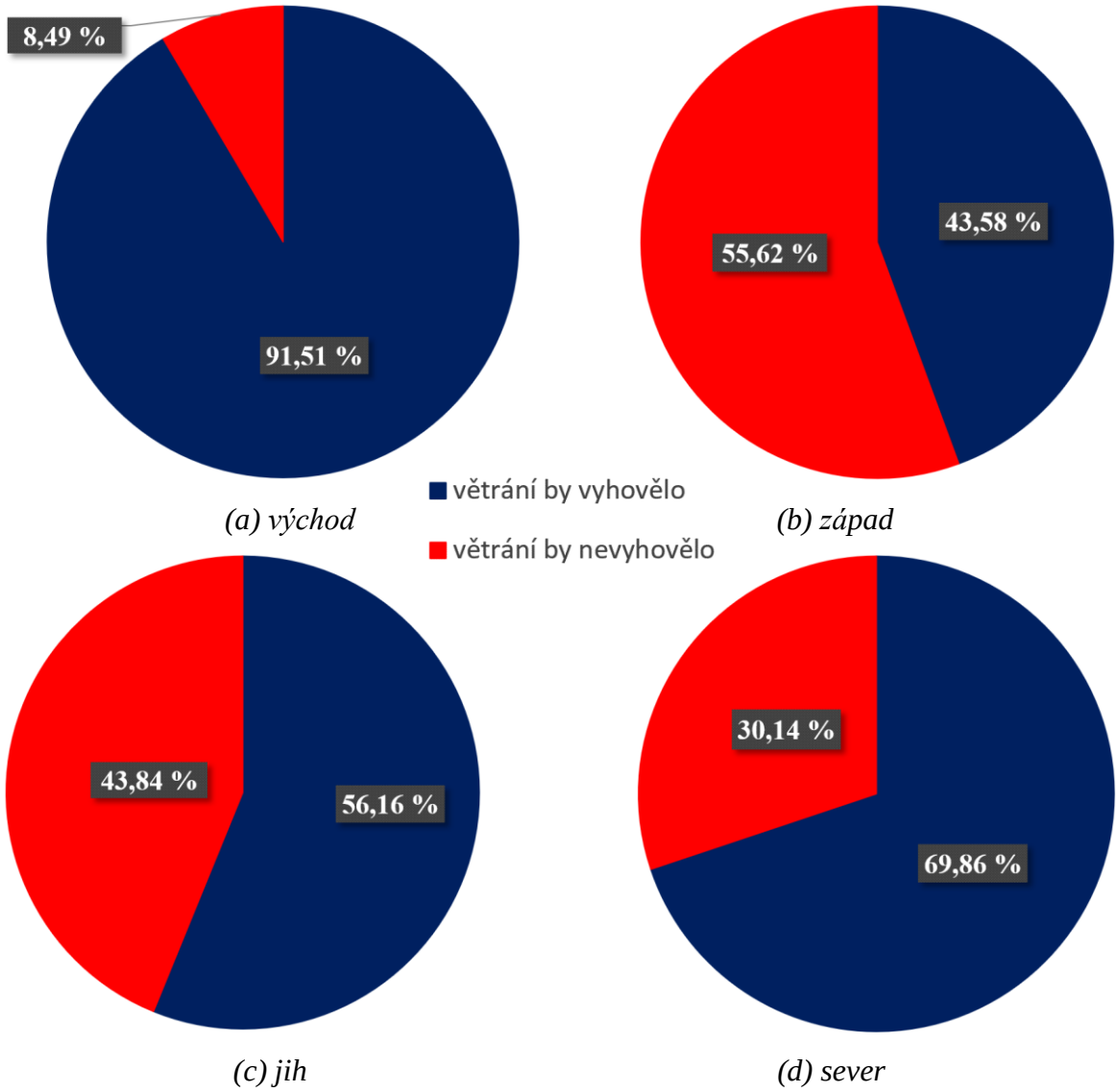


Obrázek 36 – Rychlosti větru v roce 2017 [m.s^{-1}]; Maximální naměřené denní hodnoty + spojnice trendu

Vyhodnocení účinnosti větrání pro rok 2017

Vzhledem k tomu, že kritická rychlost větru je dle výpočtu 3,76 m.s^{-1}, považuje se každá vyšší hodnota za nevyhovující (viz Příloha 2 – Výpočtová část). V rámci vyhodnocení účinnosti větrání není posuzována pouze jedna denní maximální hodnota, ale jsou zahrnuty veškeré rychlosti větru působící různým směrem. Je tedy možné, že pokud vítr v 7 hodin foukal směrem na jihozápad

o síle 5 m.s^{-1} a ve 21 hodin na severovýchod o síle 4 m. s^{-1}, tak budou započteny v ten samý den obě dvě hodnoty, protože se jedná pro různé směry. V případě, že vítr fouká ve všech třech měřených časech stejným směrem, je započítána pouze hodnota maximální. Na následujících grafech (obrázek 37) je zpracována analýza účinnosti větrání pro polohu větracích otvorů na každou světovou stranu.



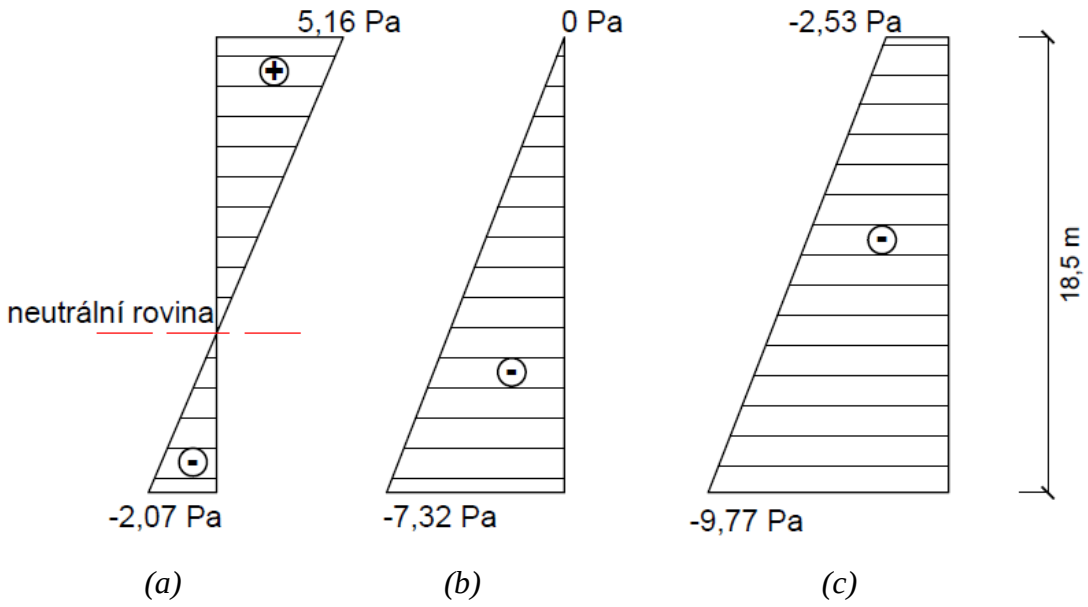
Obrázek 37 – Účinnost větrání v roce 2017 v závislosti orientace větracích otvorů na různé světové strany (a) na východ; (b) na západ; (c) na jih; (d) na sever

Požární větrání by v souvislosti s naměřenými hodnotami nebylo účinné minimálně 31 dní v roce při orientaci větracích otvorů na východ. Pokud by byly otvory orientovány na západní stranu, nevyhovělo by větrání 203x, na jižní 160x a na severní 110x.

2.3 Vyhodnocení výsledků získaných výpočtem v softwaru Excel

Ve variantě, kdy na budovu působí vítr o rychlosti menší než **3,76 m.s^{-1}** dochází k výpočtové výměně vzduchu cca 33 x za hodinu, což je v souladu s českými technickými normami vyhovující hodnota. Dle ČSN 73 0802 je požadavek na minimální výměnu vzduchu pro CHÚC A 15 x za hodinu. Hodnota výpočtové výměny vzduchu nezávisí na rychlosti větru, jiné hodnoty by bylo dosaženo např. při změně teploty, velikosti nebo poloze větracích otvorů vůči větru, hodnotě vtokových a výtokových součinitelů, hodnotě aerodynamických ploch otvorů, popř. velikosti schodišťového prostoru. Takto navržené přirozené větrání je dle výpočtu **vyhovující.** Při vyšších rychlostech větru než **3,76 m.s^{-1}** dochází k podtlaku na vnitřní straně obvodové stěny a větrání je v souladu s českými technickými normami považováno za neúčinné.

Na obrázku 38 jsou porovnány výsledné tlakové diagramy pro variantu bez působení větru, variantu s kritickou hodnotou 3,76 m.s^{-1} a poslední varianta je pro celoroční průměrnou hodnotu 4,59 m.s^{-1}.

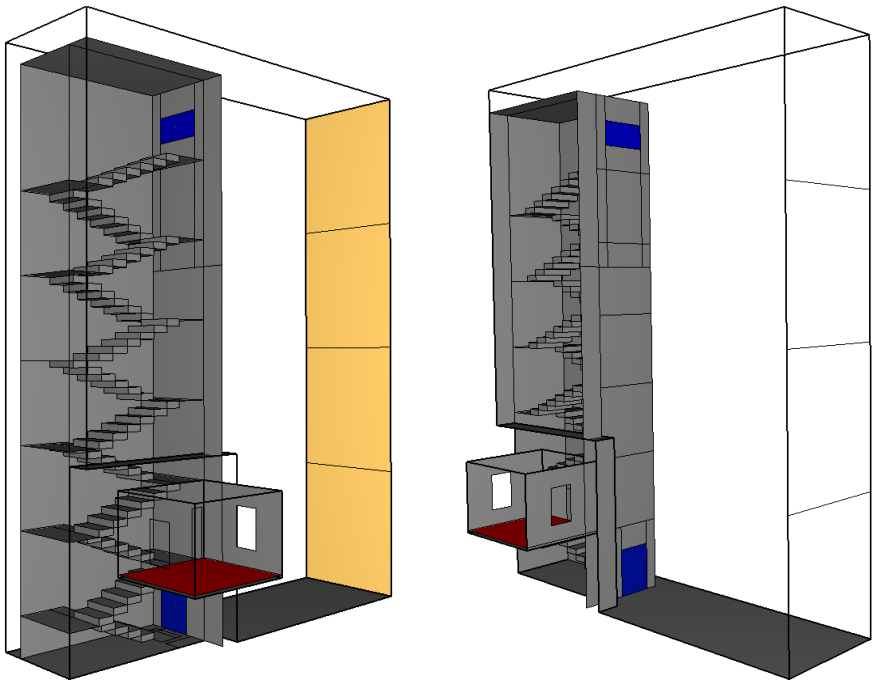


Obrázek 38 – Porovnání výsledných tlakových diagramů na vnitřní straně obvodové stěny pro jednotlivé varianty (a) w = 0 m.s^{-1}; (b) w = 3,76 m.s^{-1};(c) w = 4,59 m.s^{-1}

2.4 CFD model

CFD modely (Computational Fluid Dynamics) jsou založeny na principu dynamického proudění tekutin. Za tekutinu lze považovat v řešeném příkladu proudící směs vzduchu, která je poháněna požárem a účinkem větru. Pro modelaci byl použit software Pyrosim 2018, což je grafické uživatelské rozhraní pro program FDS (Fire Dynamics Simulator). FDS je jeden z významných CFD simulátorů, který byl vyvinutý v Národním Institutu Standardů a Technologií (NIST) v USA.

Větrání v CHÚC je navrženo normovým postupem v souladu s ČSN 73 0802 [1]. Jsou dodrženy zásady uvedené v kapitole 1.6.2, lze tedy předpokládat, že větrání by mělo být účinné a evakuace touto CHÚC bezpečná. Pomocí softwaru Pyrosim 2018 byl vytvořen model (viz obrázek 39) na základě výkresů bytového domu Budulínek. Pro zjednodušení výpočtu je pro simulaci uvažován pouze prostor jednoho bytu a schodišťového prostoru. Ostatní místnosti (chodby, byty, technické místnosti a komerční prostory v 1NP) nejsou v modelu obsaženy. Jelikož je provedeno pro analýzu velké množství simulací s různými směry a rychlostmi větru musela být z časových důvodů zvolena hrubší výpočetní síť. Její rozměry jsou popsány v kapitole 2.4.1. Bezpečná doba evakuace na CHÚC A je po dobu 4 minut (viz kapitolu 1.3). Pro tento model se předpokládá vyhlášení požárního poplachu v 60. sekundě od počátku výpočtu. Požární větrání tedy musí být funkční minimálně po dobu 300 s.

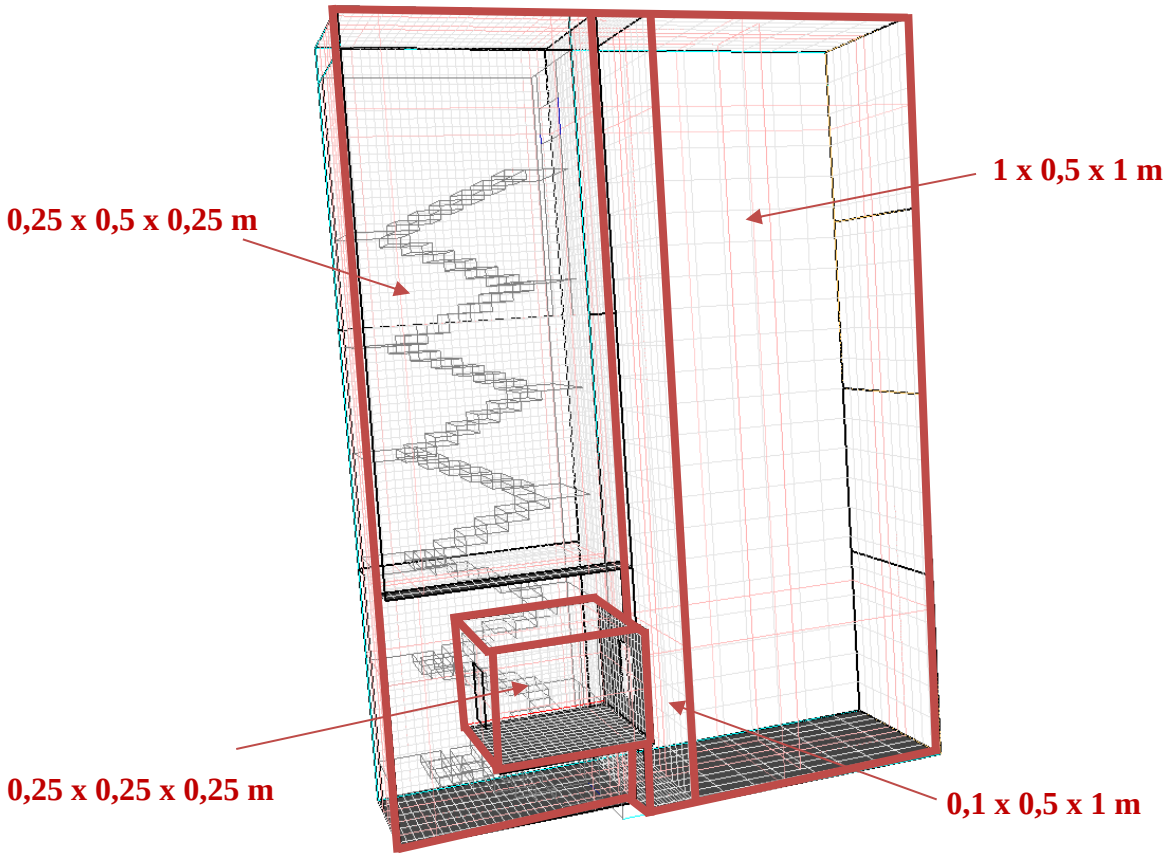


(a) *(b)*

Obrázek 39 – Stavební dispozice bytového domu Budulínek;
(a) pohled zleva, větrací otvory zavřeny; (b) pohled zprava, větrací otvory otevřeny

2.4.1 Výpočetní síť

Výpočetní síť je rozdělena do čtyř částí s různými velikostmi buněk (obrázek 40). První z nich je prostor schodiště, zde je velikost výpočetní buňky **250 x 500 x 250 mm**. Místnost, ve které hoří je rozdělena do buněk o velikostech **250 x 250 x 250 mm**. Pro dosažení reálnějších výsledků, je proudění větru uvažováno ve vzdálenosti 10 m od budovy. Tímto dochází k situaci, která se více podobá skutečnosti. Venkovní prostor je rozdělen na dvě oblasti, dochází tak k plynulejšímu výpočtu v blízkosti budovy. Buňky ve vzdálenosti 1 m od objektu mají velikost **100 x 500 x 1000 mm** a buňky vzdálenější **1000 x 500 x 1000 mm**.



Obrázek 40 – Rozměry výpočetních buněk

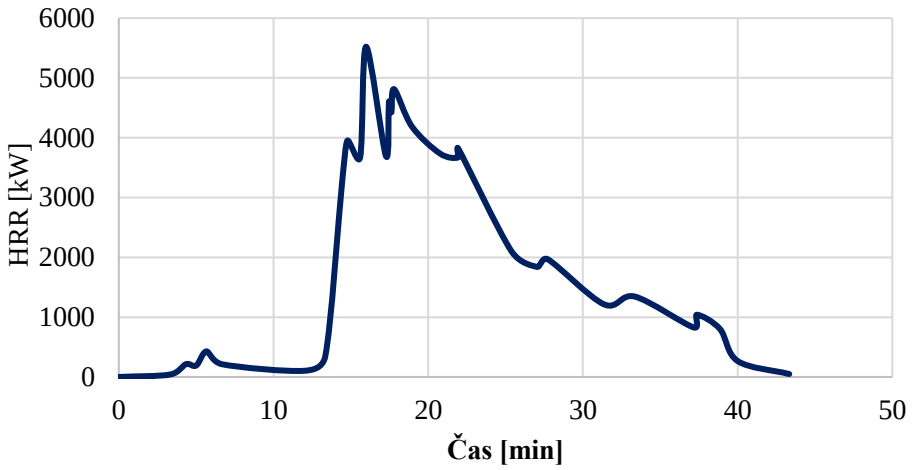
2.4.2 Požární scénář, výpočetní čas

Předpokládá se, že po uplynutí jedné minuty od počátku hoření dojde k vyhlášení všeobecného poplachu. Osoby se evakuují z místnosti, kde hoří a tlačítkovým hlásičem poplach vyhlásí. Tímto tlačítkem zároveň dochází k aktivaci požárního větrání a k otevření větracích otvorů. Přívodním otvorem jsou vstupní dveře do objektu s rozměry 2 x 1,5 m a jako odváděcí otvor slouží okno v posledním podlaží s rozměry 2 x 1 m.

2.4.3 Požár, dispozice místnosti, materiály

Požár, výpočetní doba

V souladu s publikací „Design Fires for Fire Safety Engineering“ [36] byl jako modelový požár vybrán obývací pokoj o rozměrech 4 x 4 m. Požár je v modelu definovaný jako hořící plocha, která uvolňuje stejné množství tepla jako obývací pokoj z požární zkoušky. Plocha je umístěna 10 cm nad podlahou místnosti. Rychlost uvolňovaného tepla byla zadaná hodnotami získanými při požární zkoušce. Pro ověření funkčnosti větrání jsou sledovány hodnoty po dobu 300 s (viz kapitolu 1.3). Výpočetní čas simulace je přesto nastaven na hodnotu dvojnásobnou – 600 s, aby mohly být pozorovány hodnoty i po předpokládané evakuaci. Křivka rychlosti uvolňování tepla je na následujícím grafu (obrázek 41). **Maximální** hodnota uvolňovaného tepla nastává v 16. minutě od počátku hoření a je rovna 5521,2 kW. Během průběhu simulace dochází ovšem k maximální hodnotě rychlosti uvolňování tepla **HRR = 191,8 kW** v 5. minutě.



Obrázek 41 – Rychlost uvolňování tepla z hořící místnosti [36]

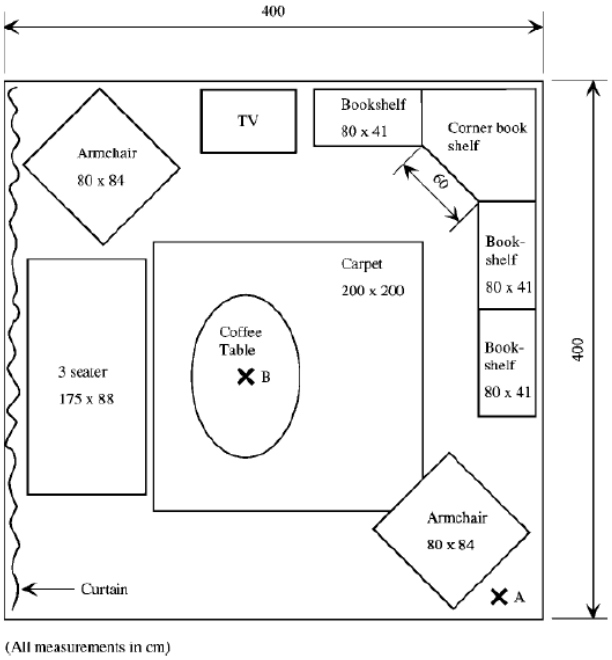
Materiály

Veškeré konstrukce jsou z železobetonu o objemové hmotnosti ρ = 2300 kg.m^{-3}, měrné tepelné kapacitě c = 1,02 kJ.(kg.K)$^{-1}$, součiniteli tepelné vodivosti λ = 1,43 W.(m.K)$^{-1}$ a emisivitě 0,9.

Dispozice místnosti

V místnosti jsou proti sobě umístěna dvě okna, aby bylo zajištěno dokonalé spalování a průběh hoření nebyl limitován nedostatkem kyslíku. Obě okna mají stejné rozměry 2 x 1 m a leží v ose a zároveň ve směru kolmého působení větru na budovu. Místnost je od začátku výpočtu propojena otvorem s prostorem schodiště. Velikost otvoru 500 x 2000 mm představuje pootevřené dveře, které zůstávají zablokované v této poloze po celou dobu výpočtu. Tím pádem nic nebrání průniku

kouře do CHÚC. Dispozice místnosti je zobrazena na obrázku 42. V místnosti se nachází stůl, televizor, 3 malé knihovny, 2 křesla, pohovka, záclony a koberec. Rozměry místnosti jsou 4 x 4 m, hodnoty na následujícím obrázku jsou uvedeny v centimetrech.



Obrázek 42 – Půdorys obývacího pokoje, ve kterém se předpokládá požár [36]

2.4.4 Varianty výpočtu

Pro posouzení účinnosti větrání v průběhu roku byly provedeny následující varianty. Varianta A je bez působení větru a na jejích výsledcích jsou popsány fyzikální jevy a změny v jednotlivých veličinách, ke kterým v průběhu času dochází. Ve variantě B je rychlost větru 4,59 $m.s^{-1}$, což je průměrná rychlost pro rok 2017. Tato rychlost dle zjednodušeného výpočtu (viz kapitolu 2.3) nevyhovuje normovým požadavkům. Pro tuto variantu je posouzeno mnoho simulací s různými směry větru. Ve variantě C jsou posouzeny různé rychlosti větru, které působí na budovu pod úhlem 90°.

Tabulka 9 – Přehled jednotlivých variant modelů

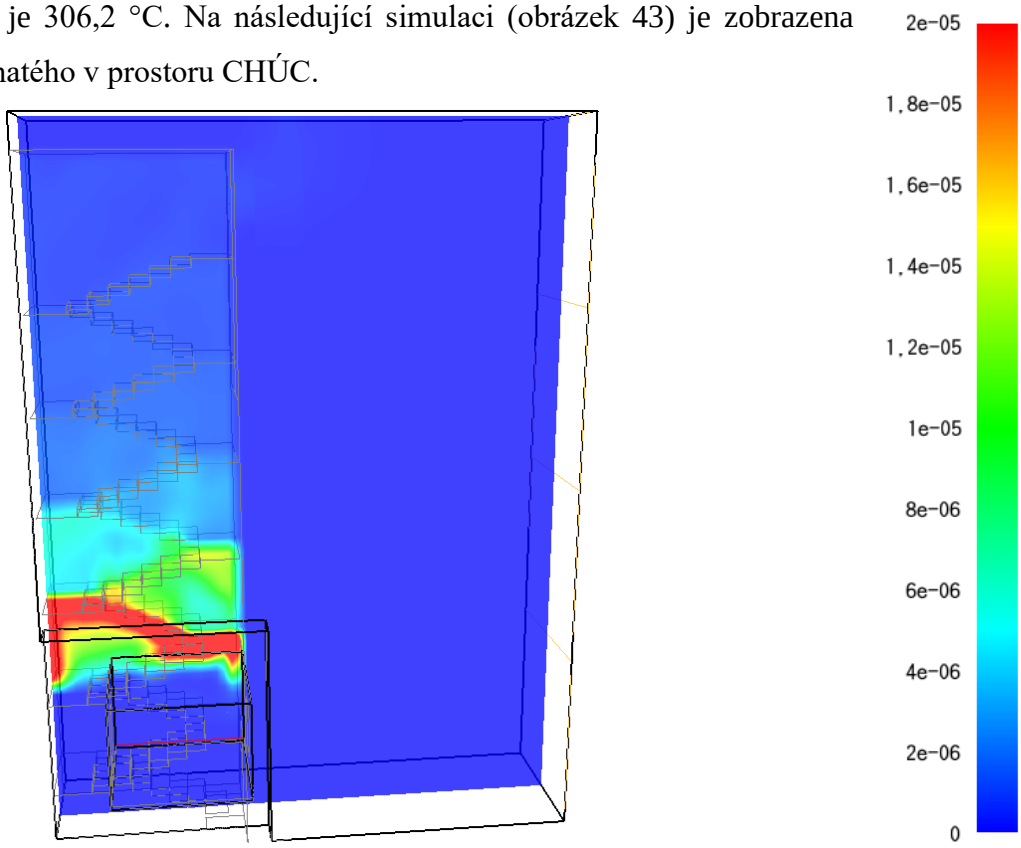
Varianta	Specifikace	Hlavní pozorované veličiny
A	Varianta bez působení větru	Koncentrace kouře, teplota, viditelnost, tlakové poměry, rychlost proudění vzduchu
B	Posouzení pro různé úhly větru	Překročení 2 % koncentrace kouře
C	Posouzení pro různé rychlosti větru, při stejném směru působení	Viditelnost

2.5 Výsledky pro jednotlivé varianty

V této kapitole jsou popsány výsledky jednotlivých variant. Ve **variantě A** jsou podrobněji popsány fyzikální jevy a jsou zobrazeny na jednotlivých simulacích veličiny jako je koncentrace oxidu uhelnatého, teplota, viditelnost, tlak a rychlost proudění vzduchu v prostoru CHÚC. Ve **variantě B** je provedena analýza pro konstantní rychlost větru s různými směry působení větru. Sledována je převážně limitní **2% koncentrace produktů hoření** v prostoru CHÚC. Ve **variantě C** působí na budovu vítr pod stejným úhlem a vyhodnoceny jsou hodnoty viditelnosti s měnící se rychlostí větru. Pro lepší přehlednost jsou některé stěny zobrazeny jako transparentní, popř. použito pouze „čárové“ schéma zobrazení (wireframe render).

2.5.1 Varianta A

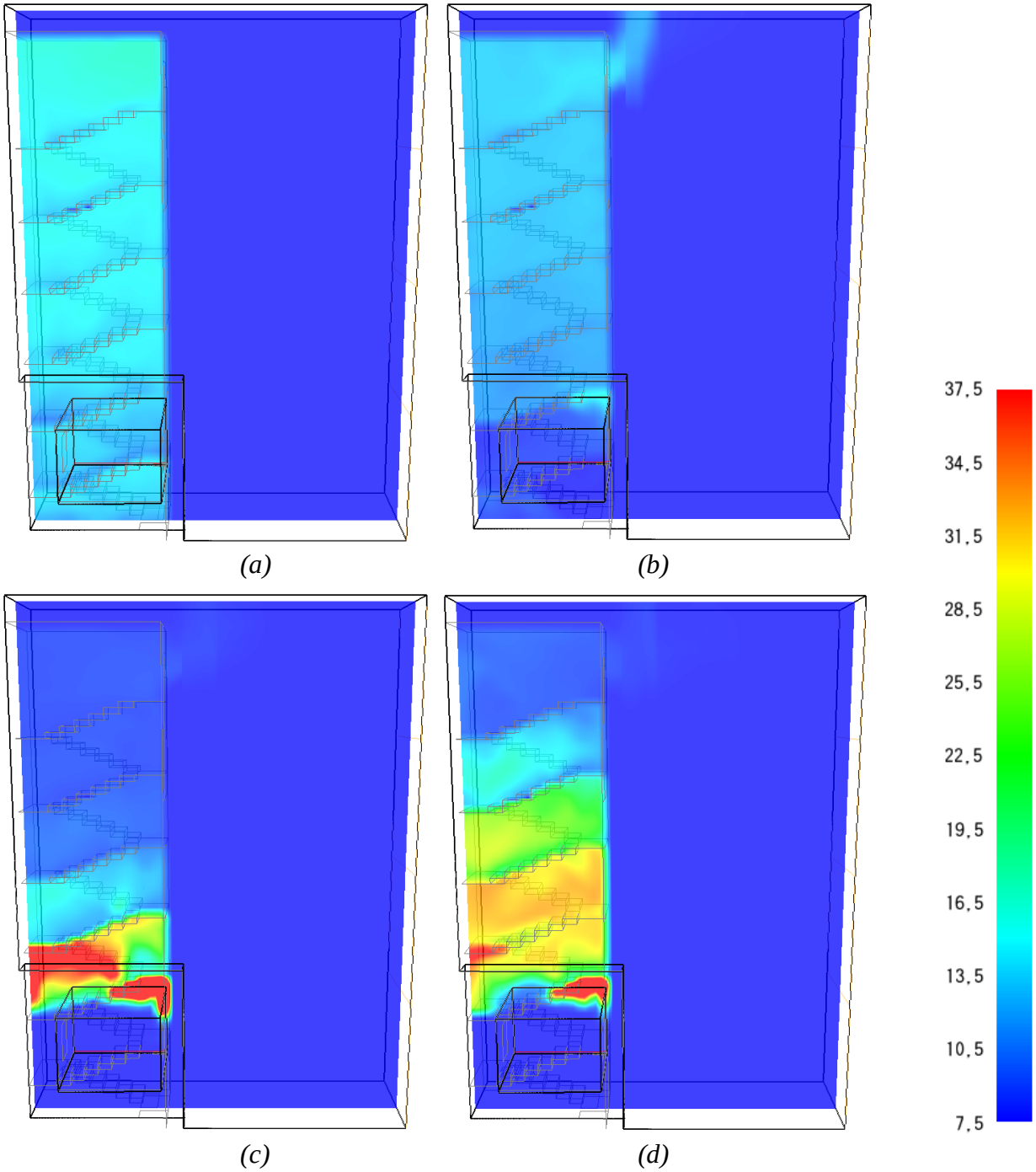
Ve variantě A je ověřena funkčnost větrání bez působení větru. Mezi 290. a 300. sekundou dochází k překročení 5% koncentrace produktů hoření v prostoru CHÚC. Limitní hodnota koncentrace kouře, která může být pro zdraví unikajících osob přímým nebezpečím, je 2 % dle ČSN 73 0802 [1]. Maximální teplota v prostoru schodiště je 37,62 °C. Maximální teplota stěny sousedící s CHÚC je 306,2 °C. Na následující simulaci (obrázek 43) je zobrazena hustota oxidu uhelnatého v prostoru CHÚC.



Obrázek 43 – Varianta A; Hustota oxidu uhelnatého (CO) [kg/m^3]

Teplota uvnitř CHÚC

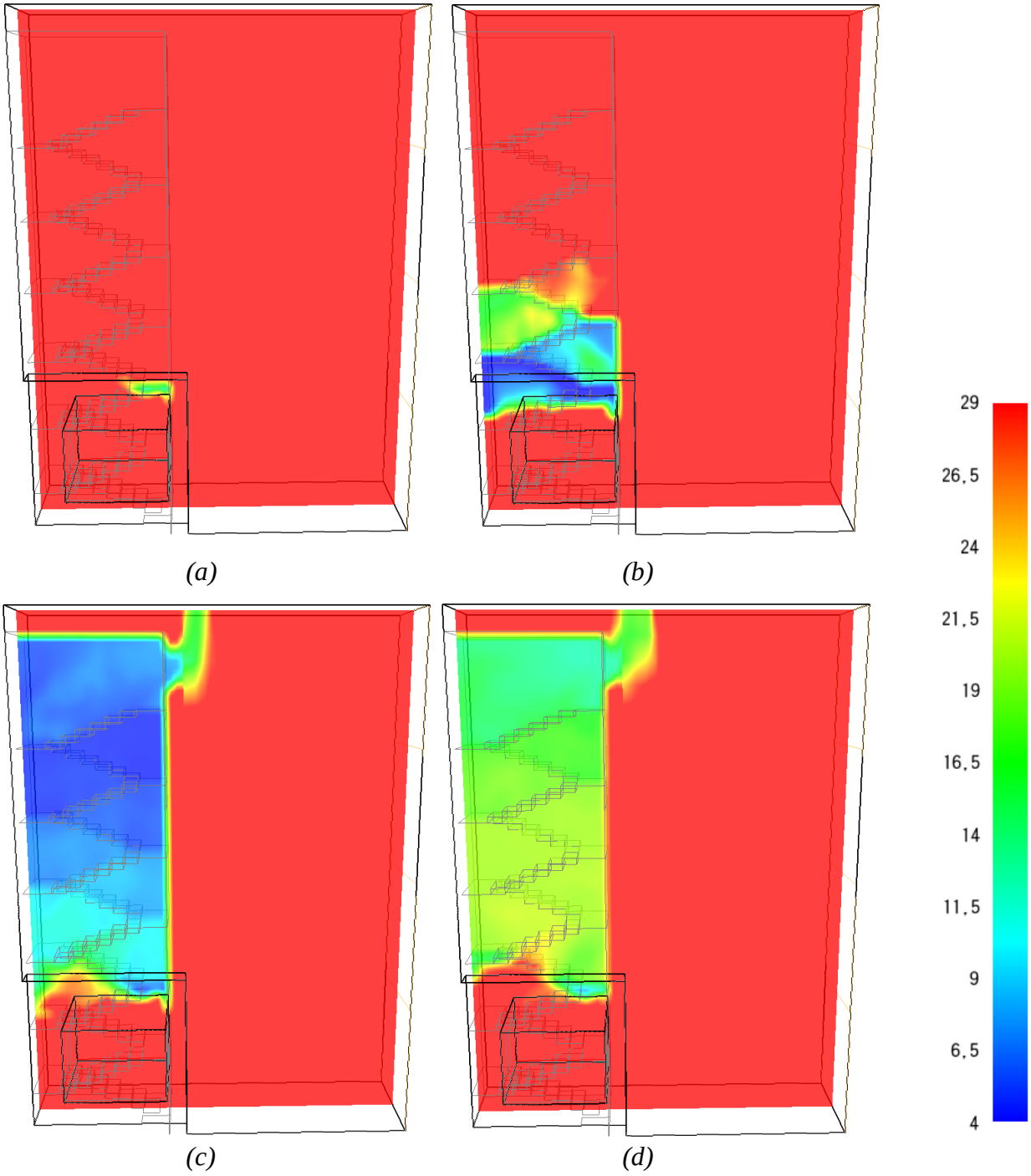
Teplota v prostoru CHÚC je po dobu 300 s bezpečná pro evakuaci osob (obrázek 44). Po otevření větracích otvorů v 60. sekundě dochází k plynulému vyrovnávání teplot mezi vnitřním a vnějším prostředím. Vzhledem k tomu že od cca 200. sekundy je rozdíl teplot 2–3 °C, nevzniká potřebný tlakový rozdíl, který by vyvolal komínový efekt.



Obrázek 44 – Varianta A; Průběh teploty v čase v prostoru CHÚC [°C]; (a) T = 60 s; (b) T = 100 s; (c) T =300 s; (d) T = 340 s;

Viditelnost v prostoru CHÚC

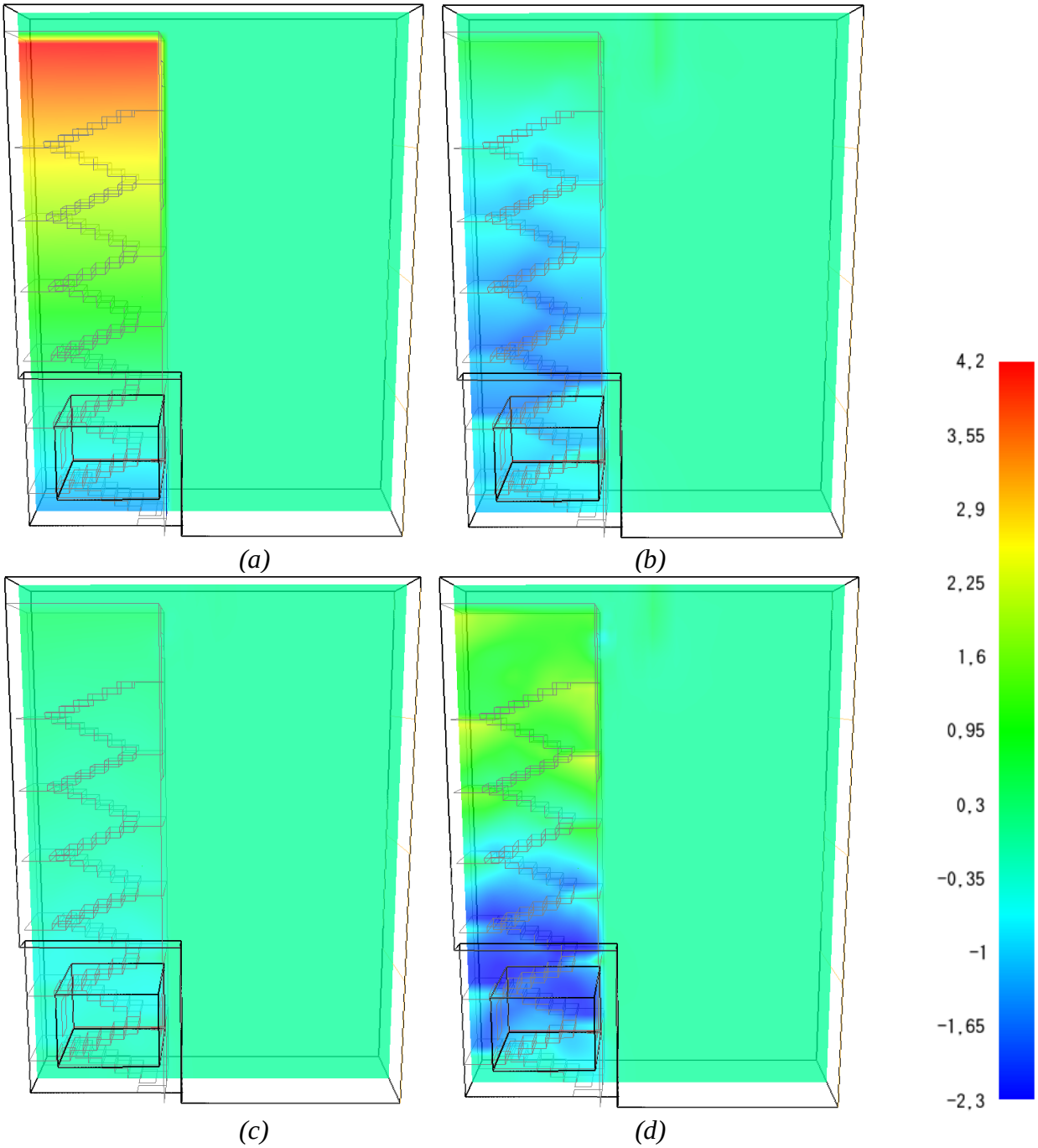
Hodnoty viditelnosti se začínají výrazně snižovat cca v 280. sekundě. Délka schodiště od jedné podesty k druhé činí 6 m a šířka schodiště jsou 3 m. Nejnižší hodnota viditelnosti v prostoru CHÚC v čase 300 s nabývá hodnoty 4 m (viz obrázek 45). Viditelnost je pozorována v řezu Y = 1,5 m, tj. v ose mezi jednotlivými schodišťovými rameny po celé výšce budovy.



Obrázek 45 – Varianta A; Viditelnost v prostoru CHÚC [m]
(a) T = 250 s; (b) T = 300 s; (c) T = 380 s; (d) T = 500 s;

Tlakové poměry uvnitř CHÚC

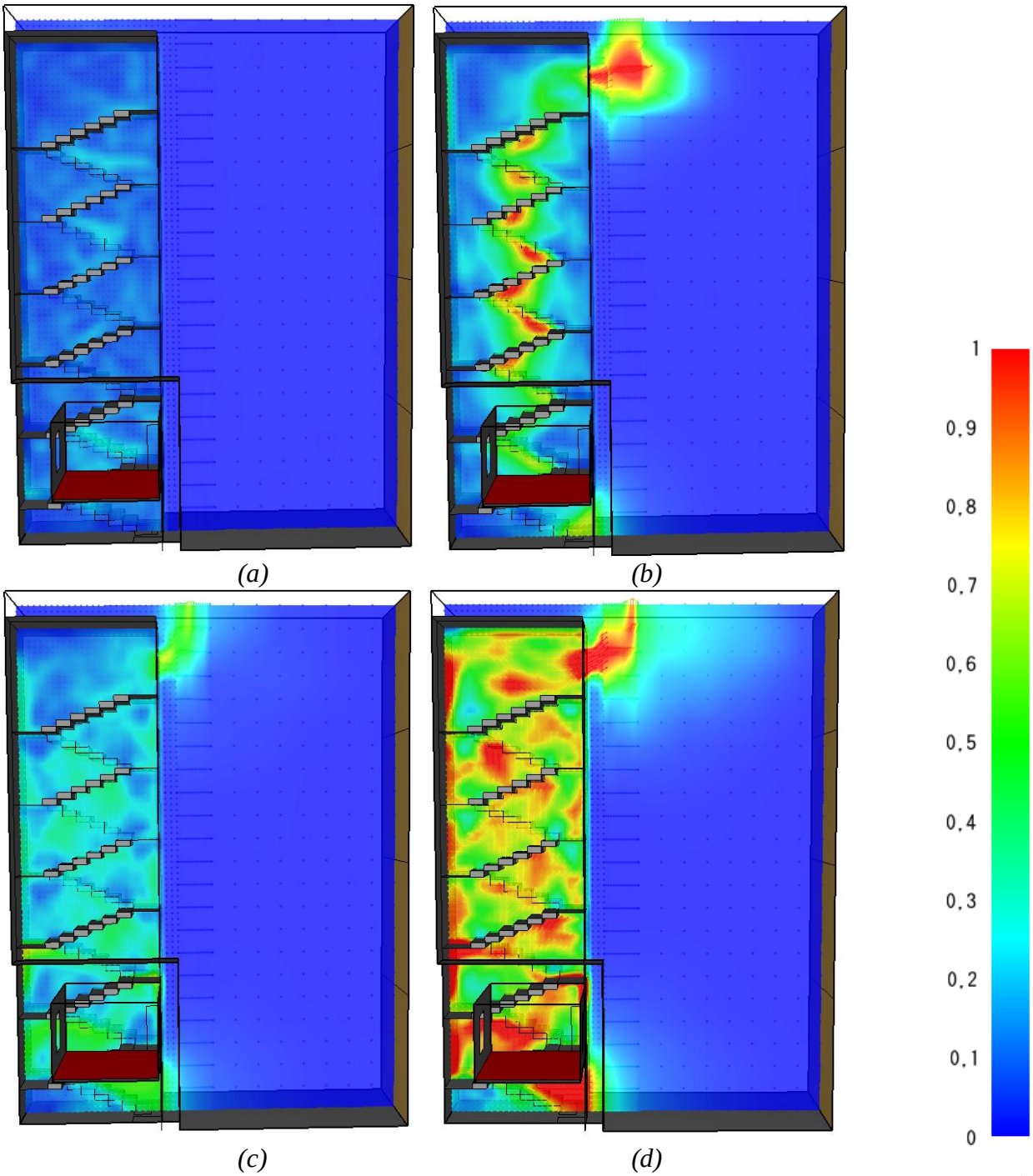
Před otevřením větracích otvorů je v 60. sekundě patrný tlakový rozdíl mezi horním a spodním podlažím. Po otevření otvorů dojde k uvolnění přetlaku horním otvorem a vzhledem k tomu, že od tohoto okamžiku dochází k vyrovnávání teplot (viz obrázek 46) nevzniká zde až do doby, kdy do CHÚC pronikne kouř téměř žádný tlakový rozdíl. Zároveň na budovu nepůsobí vítr, který by tlakové poměry na schodišti změnil.



Obrázek 46 – Varianta A; Tlakové poměry uvnitř CHÚC [Pa]
(a) T = 60 s; (b) T = 65 s; (c) T = 250 s; (d) T = 350 s

Rychlost proudění vzduchu uvnitř CHÚC

Vzhledem k tomu, že v přívodním otvoru nevzniká podtlak, nemůže docházet k potřebnému naředění koncentrace kouře v prostoru CHÚC. Vzduch z exteriéru není přiváděn v dostatečném množství a komínový efekt není podporován ani od tlaku větru, který zde nepůsobí (obrázek 47c). Z těchto důvodů jsou rychlosti proudění vzduchu uvnitř CHÚC nízké a zplodiny se v prostoru CHÚC vyskytují i ve vyšších, než 2 % koncentracích a mohou ohrozit evakuaci osob.



Obrázek 47 – Varianta A; Rychlost proudění vzduchu [m.s^{-1}]; (a) T = 60 s; (b) T = 65 s; (c) T =250 s; (d) T = 350 s;

Vyhodnocení varianty A

Ve variantě A (bez působení větru) byly očekávány nejlepší podmínky pro evakuaci. Objevilo se ovšem několik faktorů, kvůli kterým větrání nelze považovat za zcela vyhovující. Vzhledem k tomu, že těsně před prvním výraznějším rozvinutím kouře jsou teploty mezi interiérem a exteriérem téměř vyrovnány, kouř po nějakou dobu proniká do prostoru CHÚC a dojde k překročení 2% koncentrace zplodin hoření. Po navýšení teploty uvnitř schodiště opět dochází ke vzniku komínového tahu. Kouř, který se mezitím ve schodišti nahromadil, následně prochází celou komínovou šachtou a podmínky pro evakuaci nejsou ideální.

Při porovnání koncentrace CO uvnitř CHÚC – cca **20 mg/m^3** s bezpečnou hranicí podle Světové zdravotnické organizace (WHO) – **100 mg/m^3** [37] lze hodnotu považovat za vyhovující. Evakuaci lze po dobu 300 s vyhodnotit jako bezpečnou s částečným omezením. Situace, při které zejména starší osoby nevidí na konec místnosti v kombinaci se zvýšenou teplotou a koncentrací kouře, může být riziková.

2.5.2 Varianta B

V této variantě je ověřena účinnost větrání pro konstantní rychlost větru 4,59 m.s^{-1} s různými směry větru. V posuzovaném spektru není zohledněn každý jednotlivý úhel větru. Analýza je provedena pro úhly po 20° a okolo kritických hodnot, u kterých dochází k ohrožení osob během evakuace, jsou provedeny přesnější analýzy s přesností na 5°. Posuzován je převážně průnik vyšší než 2% koncentrace produktů hoření do prostoru schodiště. Překročení v přímé blízkosti dveří propojujících byt a CHÚC se neuvažuje jako zdraví ohrožující překročení a dále se hodnotí jako vyhovující. Sledovány jsou rovněž nebezpečné limity pro ostatní veličiny (teplota, viditelnost, koncentrace CO). Pokud nedochází k jejich překročení, nejsou dále v textu uváděny.

Bezpečná evakuace bez průniku kouře do prostoru CHÚC

V rozmezí úhlů **1–110°** nedochází k žádnému průniku kouře do prostoru CHÚC. V prostoru schodiště nedochází ke změnám viditelnosti ani teploty. Vítr proudí ze schodiště směrem do bytu a pomáhá v něm kouř udržovat. Zároveň nepropustí žádný kouř do prostoru schodiště. Zplodiny jsou odvětrávány do exteriéru přímo z místnosti, ve které vznikl požár. Při foukání větru pod úhlem **90°** (s několika stupňovou odchylkou do obou směrů) dochází k minimální výměně vzduchu mezi prostorem CHÚC a místností, ve které vznikl požár. Díky vysoké rychlosti větru a vzniklému dynamickému tlaku jsou zplodiny hoření odváděny okny přímo z bytu a nedochází k jejich průniku do CHÚC.

Bezpečná evakuace s částečným průnikem kouře do prostoru CHÚC

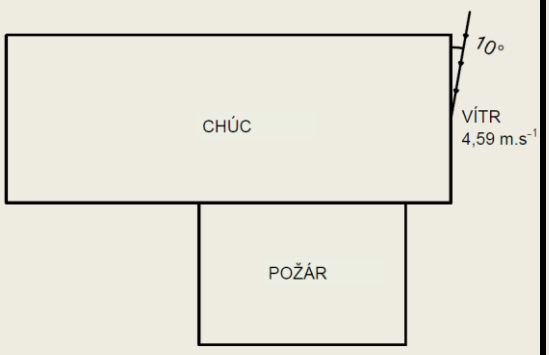
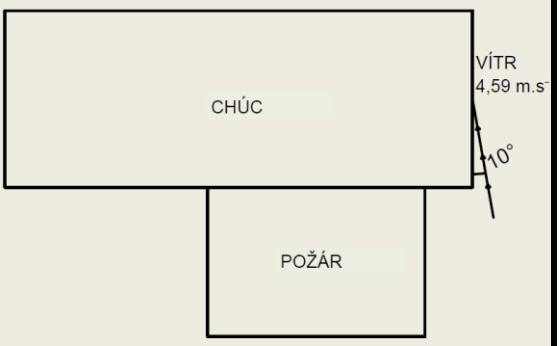
Mezi úhly **110–135°** dochází po dobu maximálně 10 s k průniku koncentrace kouře vyšší než 2 % do prostoru CHÚC. Množství kouře je ovšem téměř zanedbatelné a nebezpečná koncentrace se vyskytuje pouze v přímé blízkosti otvoru, který propojuje byt a schodiště. Při úhlu větru 135° dochází ke zvýšení teploty na max. teplotu 42,64 °C. Nejnižší hodnota viditelnosti je 5,5 m, což znamená, že je stále téměř vidět z hlavní podesty schodiště na obě mezipodesty.

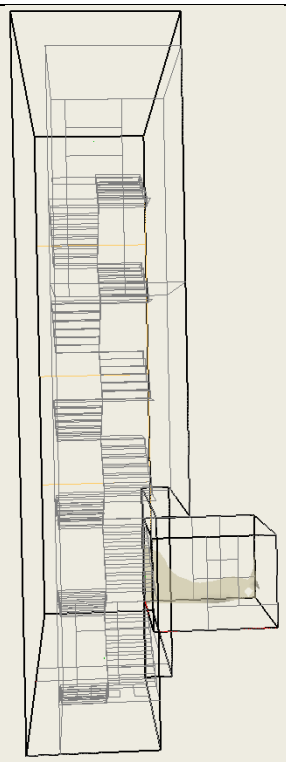
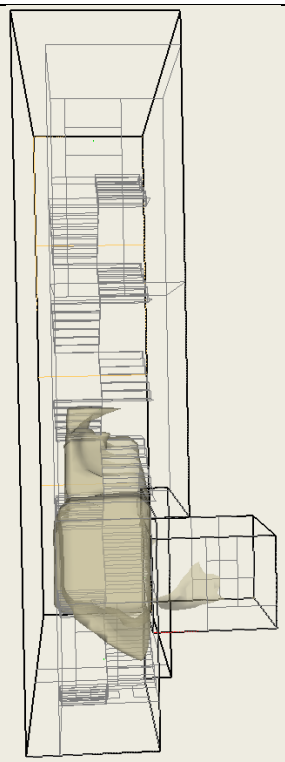
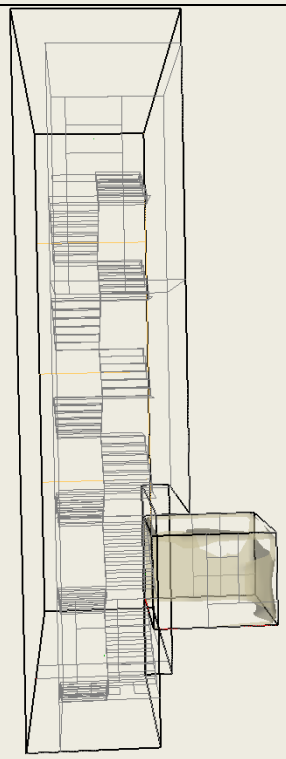
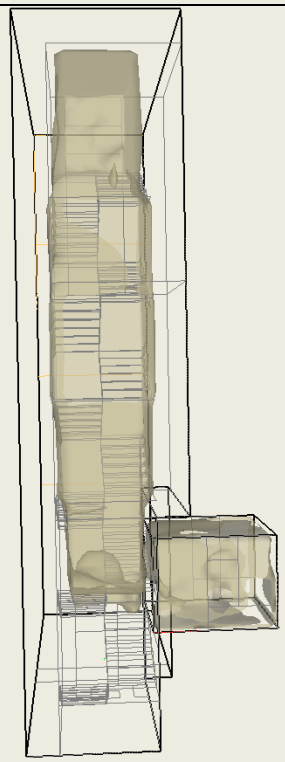
Evakuace není bezpečná

V rozmezí úhlů **135–179°** dochází k výraznému průniku kouře do prostoru CHÚC, jehož koncentrace je vyšší než 2 %. Minimální hodnoty viditelnosti bylo dosaženo při úhlu větru 150°. Její hodnota je 3 m v rozsahu téměř přes 3 podlaží v čase 300 s. Maximální dosažená teplota v prostoru schodiště je 67,74 °C (pro úhly 150 i 170°).

V tabulce 10 jsou výsledky dvou směrů, které působí na budovy pod stejným úhlem, ale každý v opačném směru.

Tabulka 10 – Porovnání úhlu 10° a 170°

Varianta	Varianta B_1 – úhel 10°	Varianta B_2 – úhel 170°
	 *Obrázek 48 – Varianta B_1; Půdorys (rychlost a směr větru)*	 *Obrázek 49 – Varianta B_2; Půdorys (rychlost a směr větru)*
Maximální teplota v CHÚC	17,3 °C	67,74 °C
Maximální teplota stěny bytu, která sousedí s CHÚC	306,2 °C	205,8 °C

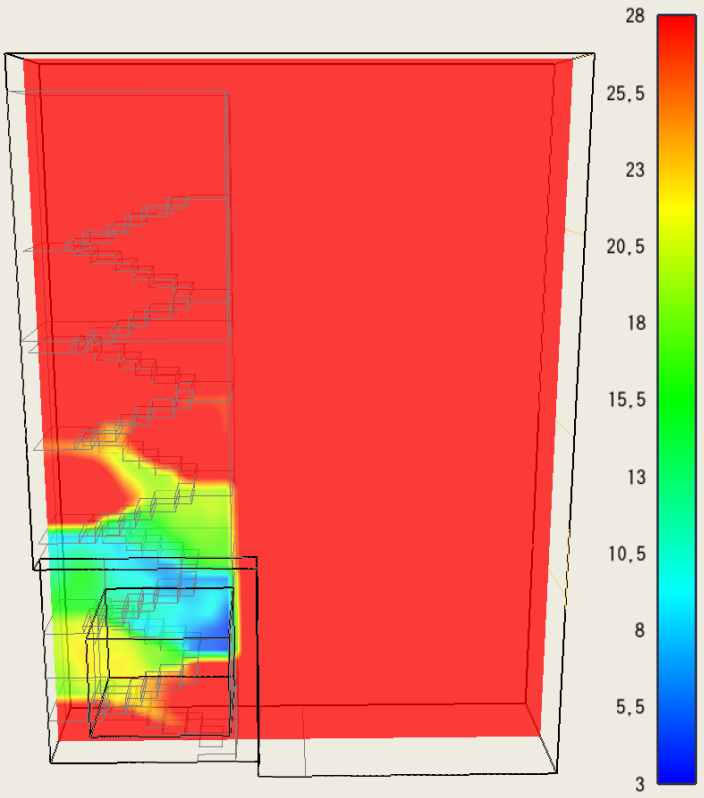
Čas: 300 s Ve variantě B_2 je v prostoru CHÚC vysoká koncentrace zplodin hoření, zatímco ve variantě B_1 je překročena 2% koncentrace pouze v bytě. U varianty B_1 začíná do prostoru schodiště pronikat v malém množství kouř již ve 272. sekundě. U druhé varianty nedochází k průniku kouře po celou sledovanou dobu – 600 s.	 *Obrázek 50 – Varianta B_1; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 300 s*	 *Obrázek 51 – Varianta B_2; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 300 s*
Čas: 350 s Ve variantě B_2 je zaplněn téměř celý prostor schodiště koncentrací kouře minimálně 2 %.	 *Obrázek 52 – Varianta B_1; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 350 s*	 *Obrázek 53 – Varianta B_2; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 350 s*

Čas: 277 s

Na následující simulaci (obrázek 54) jsou zobrazeny hodnoty viditelnosti ve variantě B_2.

Již v čase 277 s je v některých místech na schodišti hodnota viditelnosti pouze 3 m.

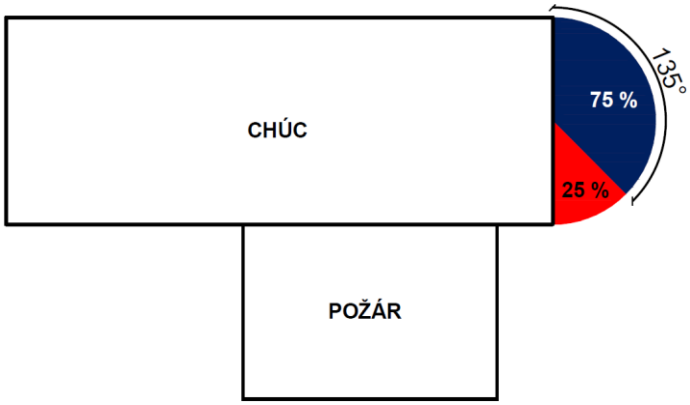
V tomto čase je zároveň v některých částech CHÚC teplota vzduchu 64 °C.



Obrázek 54 – Varianta B_2; Viditelnost v prostoru CHÚC v čase 277 s [m]

Vyhodnocení varianty B

Účinnost větrání je vyznačena na obrázek 55. Modrou barvou je znázorněno rozmezí úhlů, ve kterých byly splněny bezpečné podmínky pro evakuaci a v červeném rozmezí jsou úhly, kde naopak evakuace bezpečná není.



Obrázek 55 – Směry větru, při kterých je větrání účinné (modrá barva) a neúčinné (červená)

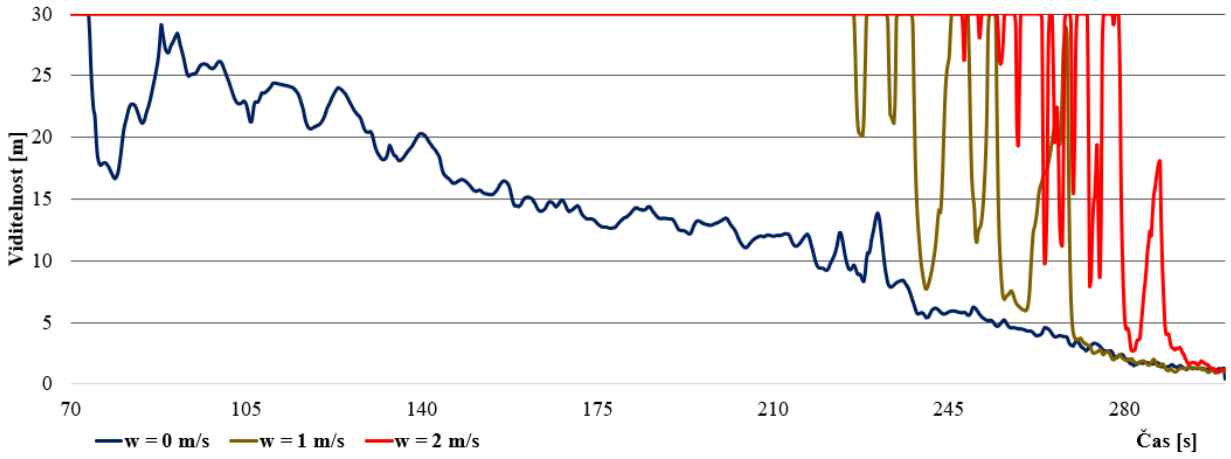
2.5.3 Varianta C

V této variantě jsou pozorovány minimální hodnoty viditelnosti při různých rychlostech větru. Vítr na budovu působí pod 90° úhlem. Na následujících grafech je porovnána viditelnost v prostoru schodiště ve dvou pozorovaných oblastech. Viditelnost je sledována v prostoru CHÚC ve dvou oblastech v různých výškových polohách. **První výšková oblast** (h = 0–7 m) zahrnuje první, druhé a část třetího podlaží. Druhé podlaží je přímo propojeno s bytem, kde hoří, proto budou hodnoty viditelnosti nižší, vlivem přímého pronikání vyšší koncentrace kouře pootevřenými dveřmi. Část třetího podlaží (1 m nad podestou) je zvolena do této oblasti, protože při evakuaci schodištěm mezi druhým a třetím podlažím mohou mít osoby hlavu až v této výšce. **Druhá výšková poloha** vede od třetího do části pátého podlaží (h = 7–14 m).

Výšková poloha 0–7 m

Jelikož je tato oblast přímo propojena s bytem, ve kterém vznikl požár, jsou výsledky negativně ovlivněny. Kouř okolo dveří má velmi vysokou koncentraci zplodin hoření, což souvisí s velmi nízkou výslednou minimální viditelností. Kouř v tak vysoké koncentraci dále do prostoru CHÚC neproniká a získané hodnoty viditelnosti neodpovídají hodnotám, ze kterých by měla být posuzována bezpečnost evakuace.

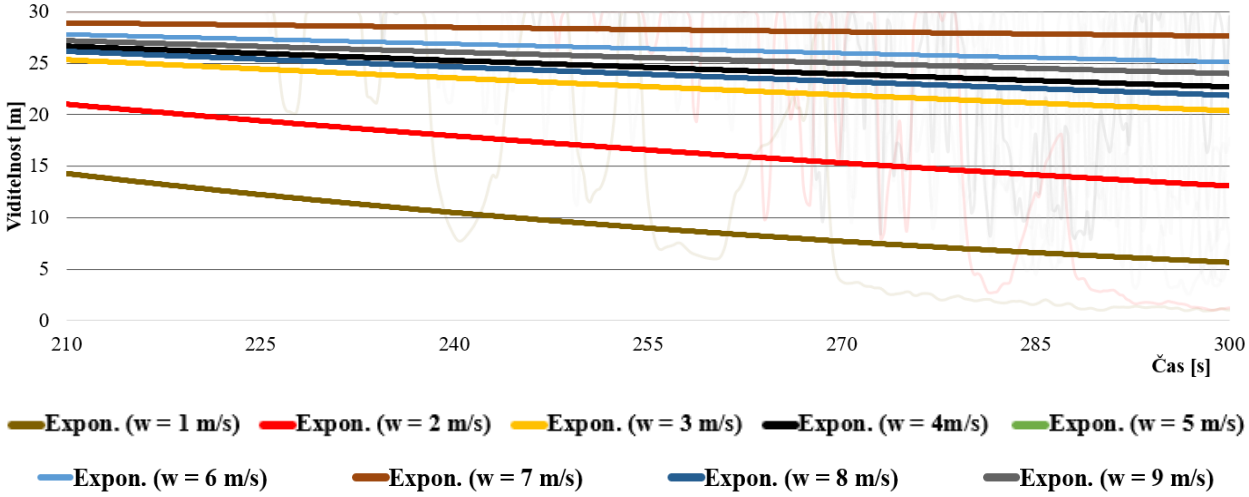
Při nižších rychlostech (do w = 2 m.s^{-1}) lze na obrázku 56 pozorovat zpočátku výkyvy ve viditelnosti a poté lineární pokles k hodnotám blížícím se téměř nule.



Obrázek 56 – Hodnoty viditelnosti; výšková poloha 0–7 m;

U variant s vyššími rychlostmi větru jsou vzhledem ke kolísavým hodnotám viditelnosti výsledky zobrazeny pomocní exponenciální spojnice trendů jednotlivých variant.

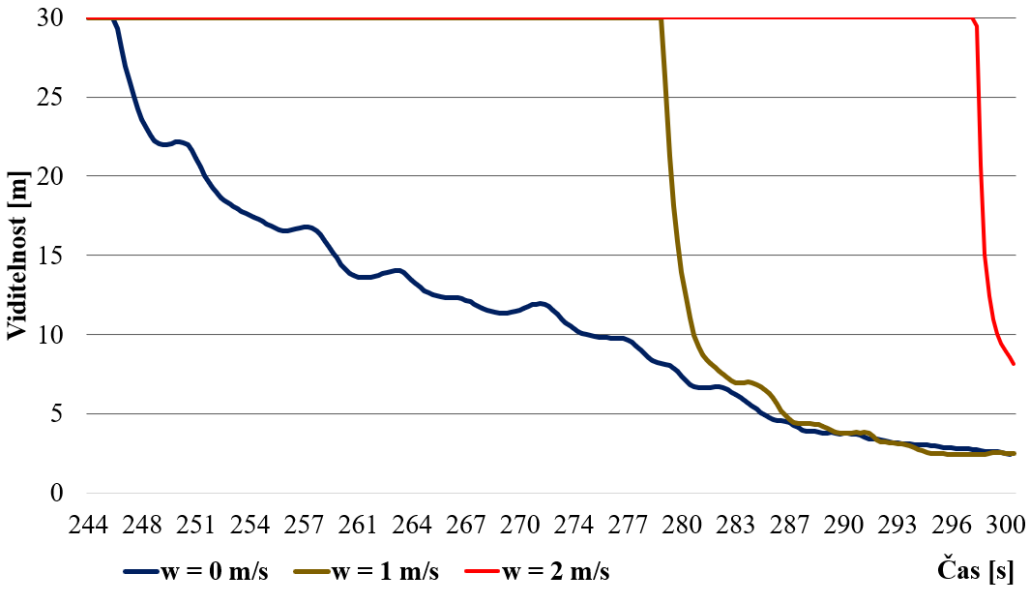
Na křivkách na obrázku 57 lze pozorovat (až na některé výjimky), že s rostoucí rychlostí větru dochází k poklesu viditelnosti později. Tyto hodnoty nemají vypovídající hodnotu pro bezpečnost evakuace, jelikož nemusí být snížena viditelnost v prostoru schodiště, jedná se spíše o všeobecný trend. Křivky spojující trend viditelností pro rychlosti větru 5 a 6 m.s^{-1} jsou téměř shodné.



Obrázek 57 – Exponenciální spojnice trendu viditelnosti v CHÚC pro různé rychlosti větru

Výšková poloha 7–14 m

V této oblasti jsou hodnoty viditelnosti **sníženy** pouze při působení větru s rychlostmi nižšími než 2 m.s^{-1} a bez působení větru. U variant s vyššími rychlostmi větru nedochází v posuzovaném čase (300 s) ke snížení viditelnosti (obrázek 58). Dle trendu křivek v nízkých rychlostech lze konstatovat, že čím vyšší je rychlost větru, tím později dojde ke snížení viditelnosti.



Obrázek 58 – Hodnoty viditelnosti; výšková poloha 7–14 m;

Pro vyhodnocení bezpečnosti evakuace osob pro **variantu C** je nutné posoudit prostor, ve kterém mohou osoby přijít do kontaktu se sníženou viditelností. Byly proto posuzovány hodnoty viditelnosti uprostřed schodišťových ramen v řezu Y = 1,5 m. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 11. Vyhodnocení ostatních veličin je velmi podobné jako pro variantu A (viz kapitolu 2.5.1). Varianty bez působení větru se nijak neliší a u ostatních situací dochází díky **zvyšující se rychlosti větru** (působícího pod úhlem 90°) ke **zlepšení podmínek evakuace.** Dle získaných hodnot viditelnosti lze konstatovat, že již při rychlosti vyšší než 2 $m.s^{-1}$ nejsou hodnoty viditelnosti v prostoru CHÚC nijak ovlivněny a nedochází ke komplikacím z hlediska bezpečnosti evakuace osob.

Tabulka 11 – Vyhodnocení vlivu rychlostí větru na viditelnost uvnitř CHÚC

Rychlost větru [$m.s^{-1}$]	Nejnižší hodnota viditelnosti [m]	Vyhodnocení
0	4	Vyhovující s komplikacemi
1	16,5	Vyhovující
2-9	30	Vyhovující

Závěr

Výsledky, které jsou získány CFD simulacemi nelze zobecňovat a dělat z nich všeobecné závěry. Jedná se pouze o posouzení jedné konkrétní dispozice budovy, na které bylo ověřováno větrání s různými směry a rychlostmi větru za konstantních počátečních teplot. Hlavní specifikou tohoto modelu je poloha oken v místnosti, kde vznikl požár. Při jiném umístění těchto oken a např. větracích otvorů by mohlo být dosaženo naprosto odlišných výsledků.

Dle obecně užívaných standardů se předpokládá, že návrhové výpočty pomocí vzorců jsou vždy na straně bezpečnosti. Výsledky z jednotlivých modelací, které se více podobají realitě, jsou zpravidla méně konzervativní, ale mohou více odpovídat reálným situacím. Jak vyplývá z této diplomové práce, výsledky získané pomocí zjednodušeného výpočtu a simulace CFD modelu mohou být velmi rozdílné. Zatímco dle výpočtu splňuje větrání veškeré požadavky norem, dle výsledků z programu FDS 6 a není zajištěno odvětrání zplodin z prostoru CHÚC a dochází zde k hromadění kouře. Naopak v některých případech, kdy dle výpočtu vzniká podtlak v odvětracím otvoru, nemusí být dle modelu vždy evakuace touto CHÚC nebezpečná.

Pro vyhodnocení bezpečnosti evakuace výpočtem jsou nejdůležitější tři zásady – **přetlak v odvětracím otvoru**; **podtlak v přívodním otvoru** a **výpočtová výměna vzduchu** uvnitř CHÚC, která musí být vyšší než normou požadovaná hodnota. Pro vyhodnocení správně navrženého větrání dle jednotlivých simulací neexistuje jednoznačný postup. Výsledkem této diplomové práce je ověření funkčnosti větrání konkrétních situací s konkrétními vstupními hodnotami, nikoliv popírání či potvrzování normových postupů.

Jedním z důvodů, proč se výsledky modelace odchylují od výpočtu, je **vyrovnání teplot v interiéru a exteriéru** těsně před nejvyšším rozvojem kouře v pozorovaném čase. Pokud rozdíly hustot vzduchu nabývají nulových hodnot, nemůže vzniknout komínový tah, na jehož principu je přirozené větrání CHÚC založeno. Dalším důvodem je již zmíněná poloha otvorů v bytě, kde vznikl požár. Tato okna jsou po celou dobu simulace otevřena a jejich umístění je rovnoběžné s působením větru pod úhlem 90°. Závěry z výsledků při zvyšování rychlostí jsou u obou variant v podstatě opačné. Při zvyšování rychlosti větru u **výpočtu**, dochází ke snižování přetlaku v odvětracím otvoru a po překročení kritické rychlosti větru dochází k narůstání podtlaku v odvětracím otvoru, což je situace, při které není návrh možný. Výsledky **modelu** naopak ukázaly, že se zvyšující se rychlostí větru je větrání při **kolmém** působení větru na budovu účinnější.

Jak již bylo řečeno, při posouzení stejných situací oběma způsoby často docházelo k opačným výsledkům. Například pro roční průměrnou hodnotu 4,59 m.s^{-1} při kolmém působení větru by větrání dle výpočtu navrhnout možné nebylo, a naopak pomocí CFD simulace byly výsledky pro tuto variantu vhodnější než bez působení větru. V tabulce 12 jsou porovnány varianty se shodnými vstupními hodnotami.

Tabulka 12 – Závěrečné porovnání shodných variant výpočtu a simulace – při působení větru kolmo na budovu

Rychlost větru [m.s^{-1}]	Výsledek dle výpočtu	Výsledek dle simulace
0	Vyhovující	Vyhovující s komplikacemi
0-1	Vyhovující	Vyhovující s komplikacemi
1-3,75	Vyhovující	Vyhovující
>3,75	Nevyhovující	Vyhovující

Pro zadanou dispozici jsou výsledky při rychlostech větru vyšších než 3,75 m.s-1 obou variant protichůdné. Dle mého názoru není bezpečné navrhovat přirozené větrání v CHÚC typu A postupem, který povoluje ČSN 73 0802, a to zvolit velikosti přívodního a odváděcího otvoru alespoň 2 m^2 a situaci dále neposuzovat. Toto větrání může být při požáru účinné a evakuace CHÚC bezpečná, ale při posouzení konkrétní situace např. zjednodušeným výpočtem se může ukázat, že tato varianta **není vyhovující**. Projektant PBŘ má k dispozici při navrhování CHÚC téměř veškeré potřebné údaje pro provedení, alespoň tohoto výpočtu. Informace, kterou sám není schopen zjistit je průměrná rychlost a směr větru pro danou lokalitu. Tyto údaje mohou být poskytnuty za poplatek na webu ČHMÚ, popř. lze zakoupit program VAS (viz kapitolu 1.7.4).

Během návrhu může nastat situace, při které pomocí zjednodušeného výpočtu nejsou splněny požadavky ČSN a z dispozičních důvodů není možné zajistit ideální rozměry či polohu otvorů. V tomto případě je možné konkrétní situaci posoudit pomocí CFD modelu a požárně inženýrským přístupem prokázat funkčnost větrání, popř. navrhnout větrání nucené a být na straně bezpečnosti.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo porovnání výsledků získaných výpočtem dle normového postupu a dle modelace vlivu větru na přirozené větrání CHÚC v programu. Tento cíl byl naplněn v rámci řešeného příkladu, kdy byla na konkrétním objektu bytového domu ověřena funkčnost navrženého větrání CHÚC. Mezi hlavní zjištění diplomové práce patří nalezení rozporu mezi výsledky jednotlivých variant a zjištění, že vyšší rychlost větru nemusí působit na větrání negativně.

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Počet usmrcených osob v souvislosti s požáry mezi lety 1972–2017 5
Obrázek 2 – Počet usmrcených osob při požárech ve Spojených státech amerických mezi lety 1979–2007 6
Obrázek 3 – Křivky rozvoje kouře a teploty při požáru 7
Obrázek 4 – Trojúhelník hoření 8
Obrázek 5 – Průběh teplot v jednotlivých fázích požáru 9
Obrázek 6 – Členění větrání chráněných únikových cest 11
Obrázek 7 – Princip přirozeného větrání CHÚC 13
Obrázek 8 – Reverzní charakter komínového tahu 14
Obrázek 9 – Větrání otvory v nejnižším a nejvyšším místě 15
Obrázek 10 – Větrání otvory na každém podlaží 16
Obrázek 11 – Větrání otvory na každém podlaží 17
Obrázek 12 – Přirozené větrání větracími průduchy v CHÚC A 18
Obrázek 13 – Nucené větrání 18
Obrázek 14 – Přetlakové větrání 19
Obrázek 15 – Idealizované rozdělení tlaku vyvolaného účinkem větru na budovu 21
Obrázek 16 – Rozdělení tlaků na obvodově stěně budovy s otvory na návětrné straně 21
Obrázek 17 – Ideální poloha větracích otvorů 22
Obrázek 18 – Riziková poloha větracích otvorů 23
Obrázek 19 – Nevhodná poloha větracích otvorů 23
Obrázek 20 – Tlakové rozdíly vzniklé rozdílem teplot na vnitřní straně obvodové stěny 25
Obrázek 21 – Aerodynamická plocha 27
Obrázek 22 – Tlakové rozdíly vzniklé rozdílem teplot na vnější straně obvodové stěny 29
Obrázek 23 – (a) Rychlost větru (b) Ultrazvukový anemometr FIEDLER 4310 30
Obrázek 24 – Větrná růžice 31
Obrázek 25 – Proudové čáry větru 31
Obrázek 26 – Schematický půdorys budovy 32
Obrázek 27 – Viditelnost v prostoru schodiště v závislosti na rychlosti větru 34
Obrázek 28 – Koncentrace CO v přilehlých apartmánech v závislosti na rychlosti větru 35
Obrázek 29 – Pásma hoření 36

Obrázek 30 – Flashover ... 39
Obrázek 31 – Rollover ... 40
Obrázek 32 – Backdraft ... 40
Obrázek 33 – Průměrné měsíční hodnoty rychlosti větru mezi lety 2013 a 2017 ... 43
Obrázek 34 – Průměrné rychlosti větru pro jednotlivé měsíce v letech 2013 až 2017 ... 44
Obrázek 35 – Tlakový diagram na vnitřní straně obvodové stěny pro w = 4,59 m.s^{-1} ... 45
Obrázek 36 – Rychlosti větru v roce 2017 ... 45
Obrázek 37 – Účinnost větrání v roce 2017 v závislosti orientace větracích otvorů na různé světové strany ... 46
Obrázek 38 – Porovnání výsledných tlakových diagramů na vnitřní straně obvodové stěny pro jednotlivé varianty ... 47
Obrázek 39 – Stavební dispozice bytového domu Budulínek ... 48
Obrázek 40 – Rozměry výpočetních buněk ... 49
Obrázek 41 – Rychlost uvolňování tepla z hořící místnosti ... 50
Obrázek 42 – Půdorys obývacího pokoje, ve kterém se předpokládá požár ... 51
Obrázek 43 – Varianta A; Hustota oxidu uhelnatého (CO) ... 52
Obrázek 44 – Varianta A; Průběh teploty v čase v prostoru CHÚC ... 53
Obrázek 45 – Varianta A; Viditelnost v prostoru CHÚC ... 54
Obrázek 46 – Varianta A; Tlakové poměry uvnitř CHÚC ... 55
Obrázek 47 – Varianta A; Rychlost proudění vzduchu ... 56
Obrázek 48 – Varianta B_1; Rychlost a směr větru ... 58
Obrázek 49 – Varianta B_2; Rychlost a směr větru ... 58
Obrázek 50 – Varianta B_1; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 300 s ... 59
Obrázek 51 – Varianta B_2; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 300 s ... 59
Obrázek 52 – Varianta B_1; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 350 s ... 59
Obrázek 53 – Varianta B_2; Překročení 2% koncentrace produktů hoření; T = 350 s ... 59
Obrázek 54 – Varianta B_2; Viditelnost v prostoru CHÚC v čase 277 s ... 60
Obrázek 55 – Směry větru, při kterých je větrání účinné a neúčinné ... 60
Obrázek 56 – Hodnoty viditelnosti; výšková poloha 0–7 m ... 61
Obrázek 57 – Exponenciální spojnice trendu viditelnosti v CHÚC pro různé rychlosti větru 62
Obrázek 58 – Hodnoty viditelnosti; výšková poloha 7–14 m ... 62

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Způsoby větrání u nevýrobních objektů 12
Tabulka 2 – Způsoby větrání u výrobních objektů 12
Tabulka 3 – Hodnoty aerodynamických součinitelů budovy..... 26
Tabulka 4 – Hodnoty aerodynamických součinitelů budovy..... 30
Tabulka 5 – Hodnoty kinematické viskozity vzduchu 33
Tabulka 6 – Symptomy po kontaktu osob s CO 35
Tabulka 7 – Účinky na lidský organismus při snížené koncentraci O_2..... 37
Tabulka 8 – Četnost proudění větru na světové strany + průměrná rychlost větru 42
Tabulka 9 – Přehled jednotlivých variant modelů 51
Tabulka 10 – Porovnání úhlu 10° a 170° 58
Tabulka 11 – Vyhodnocení vlivu rychlostí větru na viditelnost uvnitř CHÚC 63
Tabulka 12 – Závěrečné porovnání shodných variant výpočtu a simulace 65

Literatura

[1] *ČSN 73 0802 – Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

[2] POKORNÝ, Jiří a Stanislav TOMAN. *Požární větrání: větrání chráněných únikových a zásahových cest*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2011. ISBN 978-80-7385-104-0.

[3] *Statistické ročenky Hasičského záchranného sboru ČR – Hasičský záchranný sbor České republiky* [online]. [vid. 2018-03-31]. Dostupné z: http://www.hzscr.cz/clanek/statisticke-rocenky-hasicskeho-zachranneho-sboru-cr.aspx

[4] POKORNÝ, J a kol. Analýza usmrcených osob při požárech. nedatováno, 11.

[5] ALARIFI, Abdulaziz, Roth PHYLAKTOU a Gordon ANDREWS. What Kills People in a Fire? Heat or Smoke? nedatováno, 11.

[6] POREH, M a S TREBUKOV. Wind effects on smoke motion in buildings. *Fire Safety Journal* [online]. 2000, **35**(3), 257–273. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-7112(00)00017-5

[7] *The Furniture and Furnishings (Fire) (Safety) Regulations 1988* [online]. [vid. 2018-11-24]. Dostupné z: http://www.legislation.gov.uk/uksi/1988/1324/contents/made

[8] Požární bezpečnost staveb. *TZB-info* [online]. [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb

[9] Požární větrání chráněných únikových cest, navrhování a některé problémy. *TZB-info* [online]. [vid. 2018-03-31]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/7575-pozarni-vetrani-chranenych-unikovych-cest-navrhovani-a-nektere-problemy

[10] TOMAN, Stanislav. Požární minimum pro vzduchotechniku (I). *TZB-info* [online]. 2005 [vid. 2018-12-13]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/2725-pozarni-minimum-pro-vzduchotechniku-i

[11] ŠENOVSKÝ, Michail, Pavel PROKOP a Petr BEBČÁK. *Větrání objektů*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2007. ISBN 978-80-7385-008-1.

[12] ČESKO a HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR. *Konspekty odborné přípravy jednotek PO.* V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 978-80-86111-89-6.

[13] Šíření plamene po vrstvě prachu tvořené dřevní biomasou. *TZB-info* [online]. [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou

[14] *Proces hoření | GUARD7* [online]. [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.guard7.cz/lexikon/proces-horeni

[15] FENNELLY, Lawrence J., ed. *Effective physical security*. Fourth edition. Amsterdam: Butterworth-Heinemannis an imprint of Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-415892-4.

[16] *ČSN 73 0804 – Požární bezpečnost staveb – výrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[17] *ČSN 73 0834 – Požární bezpečnost staveb – Změny staveb*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[18] KUPILÍK, Václav. *Kouř jako nebezpečný faktor požáru s obsahem škodlivin*. B.m.: ČVUT v Praze. falulta stavební. 18. prosinec 2007

[19] DUFEK, Jaroslav a Jan ŠKRDLE. *ČSN EN 12101-6 Zařízení pro usměrňování pohybu kouře a tepla – Část 6: Technické podmínky pro zařízení pracující na principu rozdílu tlaků – Sestavy*. B.m.: Český normalizační institut, 2006.

[20] Zařízení pro odvod kouře a tepla od VELUXU. *TZB-info* [online]. [vid. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/114300-zarizeni-pro-odvod-koure-a-tepla-od-veluxu

[21] TŮMOVÁ, Simona. *Přirozené požární větrání chráněných únikových cest – Diplomová práce*. 2014

[22] KOMRSKA, Bc Tomáš. Větrná elektrárna jako zdroj pro vytápění obce – Diplomová práce. 2015, 83.

[23] CHLUBNÝ, Jaroslav. *Energie větru*. 12. září 2010

[24] *Větrná energie* [online]. [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru

[25] *4310 Přesný ultrazvukový anemometr | FIEDLER* [online]. [vid. 2018-12-14]. Dostupné z: https://www.fiedler.company/cs/produkty/meteorologick-stanice-senzory/rychlost-sm-r-v-tru/p-esn-ultrazvukov-anemometr-typ-4310

[26] *Snímače rychlosti a směru větru | FIEDLER* [online]. [vid. 2018-12-14]. Dostupné z: https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace/rychlost-smer-vetru

[27] Instruments Used to Determine Wind Direction. *Sciencing* [online]. [vid. 2018-12-14]. Dostupné z: https://sciencing.com/instruments-used-determine-wind-direction-7265614.html

[28] Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa. *TZB-info* [online]. [vid. 2019-01-06]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa

[29] Carbon Monoxide: Keeping Safe. *Working RE Magazine* [online]. 15. říjen 2013 [vid. 2018-11-08]. Dostupné z: http://www.workingre.com/carbon-monoxide-keeping-safe/

[30] *ČSN ISO 80000-1 Veličiny a jednotky – Část 1: Obecně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[31] *Česká společnost hyperbarické a letecké medicíny ČLS JEP – Upozornění obyvatelům ČR na nebezpečí otravy oxidem uhelnatým* [online]. [vid. 2018-11-08]. Dostupné z: http://www.cshlm.cz/aktualne/upozorneni-obyvatelum-cr-na-nebezpeci-otravy-oxidem-uhelnatym-95

[32] SIKORA, Henryk. *Toxikologie zplodin hoření – Diplomová práce*. 2007

[33] *zimmer2.jpg (800×600)* [online]. [vid. 2018-12-03]. Dostupné z: https://www.ffb.kit.edu/img/content/zimmer2.jpg

[34] *KU-Fire-and-Rescue-Training-Rollover-Fire-Image4.jpg (820×488)* [online]. [vid. 2018-12-03]. Dostupné z: http://kupce.ku.edu/sites/kupce.ku.edu/files/styles/slideshow-template1-fullsize/public/images/slideshow/KU-Fire-and-Rescue-Training-Rollover-Fire-Image4.jpg?itok=emLFBVTJ

[35] *Free Image on Pixabay – Fire, Explosion, Training* [online]. [vid. 2018-12-03]. Dostupné z: /en/fire-explosion-training-backdraft-621029/

[36] HIETANIEMI, Jukka a Esko MIKKOLA. Design Fires for Fire Safety Engineering. nedatováno, 103.

[37] WORLD HEALTH ORGANIZATION, ed. *Who guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. Copenhagen: WHO, 2010. ISBN 978-92-890-0213-4.

Příloha 1 – Zdrojový kód FDS

Pro kontrolu je zde uveden zdrojový kód varianty B, kde působí vítr o síle 4,59 m.s^{-1} pod úhlem 110°. Ostatní zdrojové kódy jsou totožné, pouze se změnami ve směrech větru, rychlostech větru, popř. pozorovaných hodnotách důležitých pro vyhodnocení jednotlivých variant.

Varianta B – Rychlost větru 4,59 m.s-1, úhel větru 110°

```
B.fds
Generated by PyroSim - Version 2018.3.1210
15.12.2018 10:53:51

-------------User Section (not generated by PyroSim)-------------

&DEVC ID='V', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=1.0000000E-001,1.5000000E000,1.0000000E000,
ORIENTATION=1.0000000E000,0.0000000E000,0.0000000E000/
&DEVC ID='VF_SOOT', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='SOOT',
XYZ=1.0000000E000,1.5000000E000,1.0000000E001/
&DEVC ID='V', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=1.0000000E-001,1.5000000E000,1.9500000E001,
ORIENTATION=1.0000000E000,0.0000000E000,0.0000000E000/


--------------------PyroSim-generated Section--------------------

&HEAD CHID='B'/
&TIME T_END=600.0/
&DUMP RENDER_FILE='B.ge1', DT_RESTART=30.0, NFRAMES=1200/
&MISC TMPA=7.3/
&WIND SPEED=4.59, DIRECTION=290.0/

&MESH ID='1', IJK=27,8,28, XB=-0.75,6.0,-1.0,3.0,0.0,7.0/
&MESH ID='2', IJK=16,16,12, XB=0.0,4.0,3.0,7.0,3.0,6.0/
&MESH ID='3', IJK=27,10,28, XB=-0.75,6.0,-1.0,4.0,7.0,14.0/
&MESH ID='4', IJK=27,10,32, XB=-0.75,6.0,-1.0,4.0,14.0,22.0/
&MESH ID='5', IJK=15,10,22, XB=-2.25,-0.75,-1.0,4.0,0.0,22.0/
&MESH ID='6', IJK=8,10,22, XB=-10.25,-2.25,-1.0,4.0,0.0,22.0/


&REAC ID='WOOD_OAK',
    FYI='SFPE Handbook, 3rd Ed',
    FUEL='REAC_FUEL',
    C=1.0,
    H=1.7,
    O=0.72,
    N=1.0E-3,
    CO_YIELD=4.0E-3,
    SOOT_YIELD=0.015/

&PROP ID='T_01 props', BEAD_DIAMETER=1.5E-3/
&CTRL ID='invert', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='TIMER->OUT-
>OUT->OUT->OUT'/
&DEVC ID='V', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.5,3.0,4.0, ORIENTATION=1.0,0.0,0.0/
&DEVC ID='VF_SOOT', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='SOOT', XYZ=1.0,1.5,9.0/
&DEVC ID='T_01', PROP_ID='T_01 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.5,19.5/
&DEVC ID='TIMER->OUT->OUT->OUT->OUT', QUANTITY='TIME', XYZ=-0.75,-1.0,0.0, SETPOINT=60.0/

&MATL ID='CONCRETE',
    SPECIFIC_HEAT=1.02,
    CONDUCTIVITY=1.43,
```

```
    DENSITY=2300.0/

&SURF ID='KCE',
    COLOR='GRAY',
    DEFAULT=.TRUE.,
    MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.2/
&SURF ID='VITR'/
&SURF ID='POZAR',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=345.0,
    RAMP_Q='POZAR_RAMP_Q'/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=200.0, F=7.574E-3/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=260.0, F=0.038669/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=300.0, F=0.34731/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=341.0, F=0.077533/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=400.0, F=0.038518/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=720.0, F=0.018696/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=801.0, F=0.061455/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=865.0, F=0.583328/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=887.0, F=0.715737/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=936.0, F=0.665048/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=959.0, F=1.0/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1036.0, F=0.6688/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1048.0, F=0.8324/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1057.0, F=0.8012/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1068.0, F=0.8713/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1137.0, F=0.7583/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1246.0, F=0.6764/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1316.0, F=0.6646/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1316.4, F=0.6919/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1523.0, F=0.3801/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1623.0, F=0.3332/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1663.0, F=0.3565/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=1882.0, F=0.22/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=2002.0, F=0.2432/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=2231.0, F=0.1495/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=2242.0, F=0.1884/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=2331.0, F=0.1455/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=2400.0, F=0.048/
&RAMP ID='POZAR_RAMP_Q', T=2600.0, F=8.9E-3/

&INIT ID='Init Region', TEMPERATURE=17.0, XB=0.0,6.0,0.0,3.0,0.0,22.0/

&OBST ID='Obstruction #2', XB=0.0,4.0,3.0,3.0,3.0,6.0, RGB=128,128,128, TRANSPARENCY=0.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #3', XB=1.2,1.8,0.0,1.5,0.0,0.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #4', XB=1.8,2.4,0.0,1.5,0.25,0.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #5', XB=2.4,3.0,0.0,1.5,0.5,0.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #6', XB=3.0,3.6,0.0,1.5,0.75,1.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #7', XB=3.6,4.2,0.0,1.5,1.0,1.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #8', XB=4.2,4.8,0.0,1.5,1.25,1.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #9', XB=4.2,4.8,1.5,3.0,1.5,1.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #10', XB=3.6,4.2,1.5,3.0,1.75,2.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #11', XB=3.0,3.6,1.5,3.0,2.0,2.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #12', XB=2.4,3.0,1.5,3.0,2.25,2.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #13', XB=1.8,2.4,1.5,3.0,2.5,2.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #14', XB=1.2,1.8,1.5,3.0,2.75,3.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #15', XB=1.2,1.8,0.0,1.5,3.0,3.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #16', XB=1.8,2.4,0.0,1.5,3.25,3.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #17', XB=2.4,3.0,0.0,1.5,3.5,3.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #18', XB=3.0,3.6,0.0,1.5,3.75,4.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #19', XB=3.6,4.2,0.0,1.5,4.0,4.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #20', XB=4.2,4.8,0.0,1.5,4.25,4.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
```

```
&OBST ID='Obstruction #21', XB=4.2,4.8,1.5,3.0,4.5,4.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #22', XB=3.6,4.2,1.5,3.0,4.75,5.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #23', XB=3.0,3.6,1.5,3.0,5.0,5.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #24', XB=2.4,3.0,1.5,3.0,5.25,5.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #25', XB=1.8,2.4,1.5,3.0,5.5,5.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #26', XB=1.2,1.8,1.5,3.0,5.75,6.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #27', XB=1.2,1.8,0.0,1.5,6.0,6.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #28', XB=1.8,2.4,0.0,1.5,6.25,6.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #29', XB=2.4,3.0,0.0,1.5,6.5,6.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #30', XB=3.0,3.6,0.0,1.5,6.75,7.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #31', XB=3.6,4.2,0.0,1.5,7.0,7.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #32', XB=4.2,4.8,0.0,1.5,7.25,7.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #33', XB=4.2,4.8,1.5,3.0,7.5,7.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #34', XB=3.6,4.2,1.5,3.0,7.75,8.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #35', XB=3.0,3.6,1.5,3.0,8.0,8.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #36', XB=2.4,3.0,1.5,3.0,8.25,8.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #37', XB=1.8,2.4,1.5,3.0,8.5,8.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #38', XB=1.2,1.8,1.5,3.0,8.75,9.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #39', XB=1.2,1.8,0.0,1.5,9.0,9.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #40', XB=1.8,2.4,0.0,1.5,9.25,9.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #41', XB=2.4,3.0,0.0,1.5,9.5,9.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #42', XB=3.0,3.6,0.0,1.5,9.75,10.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #43', XB=3.6,4.2,0.0,1.5,10.0,10.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #44', XB=4.2,4.8,0.0,1.5,10.25,10.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #45', XB=4.2,4.8,1.5,3.0,10.5,10.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #46', XB=3.6,4.2,1.5,3.0,10.75,11.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #47', XB=3.0,3.6,1.5,3.0,11.0,11.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #48', XB=2.4,3.0,1.5,3.0,11.25,11.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #49', XB=1.8,2.4,1.5,3.0,11.5,11.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #50', XB=1.2,1.8,1.5,3.0,11.75,12.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #51', XB=1.2,1.8,0.0,1.5,12.0,12.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #52', XB=1.8,2.4,0.0,1.5,12.25,12.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #53', XB=2.4,3.0,0.0,1.5,12.5,12.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #54', XB=3.0,3.6,0.0,1.5,12.75,13.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #55', XB=3.6,4.2,0.0,1.5,13.0,13.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #56', XB=4.2,4.8,0.0,1.5,13.25,13.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #57', XB=4.2,4.8,1.5,3.0,13.5,13.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #58', XB=3.6,4.2,1.5,3.0,13.75,14.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #59', XB=3.0,3.6,1.5,3.0,14.0,14.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #60', XB=2.4,3.0,1.5,3.0,14.25,14.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #61', XB=1.8,2.4,1.5,3.0,14.5,14.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #62', XB=1.2,1.8,1.5,3.0,14.75,15.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #63', XB=1.2,1.8,0.0,1.5,15.0,15.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #64', XB=1.8,2.4,0.0,1.5,15.25,15.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #65', XB=2.4,3.0,0.0,1.5,15.5,15.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #66', XB=3.0,3.6,0.0,1.5,15.75,16.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #67', XB=3.6,4.2,0.0,1.5,16.0,16.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #68', XB=4.2,4.8,0.0,1.5,16.25,16.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #69', XB=4.2,4.8,1.5,3.0,16.5,16.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #70', XB=3.6,4.2,1.5,3.0,16.75,17.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #71', XB=3.0,3.6,1.5,3.0,17.0,17.25, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #72', XB=2.4,3.0,1.5,3.0,17.25,17.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #73', XB=1.8,2.4,1.5,3.0,17.5,17.75, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #74', XB=1.2,1.8,1.5,3.0,17.75,18.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #76', XB=0.0,1.2,0.0,3.0,3.0,3.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #77', XB=0.0,1.2,0.0,3.0,6.0,6.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #78', XB=0.0,1.2,0.0,3.0,9.0,9.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #79', XB=0.0,1.2,0.0,3.0,12.0,12.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #80', XB=0.0,1.2,0.0,3.0,15.0,15.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #81', XB=0.0,1.2,0.0,3.0,18.0,18.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #82', XB=4.8,6.0,0.0,3.0,1.5,1.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #83', XB=4.8,6.0,0.0,3.0,4.5,4.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #84', XB=4.8,6.0,0.0,3.0,7.5,7.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #85', XB=4.8,6.0,0.0,3.0,10.5,10.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #86', XB=4.8,6.0,0.0,3.0,13.5,13.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
```

```
&OBST ID='Obstruction #87', XB=4.8,6.0,0.0,3.0,16.5,16.5, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #75', XB=0.0,1.25,0.0,0.75,0.0,0.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #75', XB=0.0,1.25,2.25,3.0,0.0,0.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction #75', XB=0.25,0.5,0.5,2.0,0.0,0.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE', CTRL_ID='invert'/
&OBST ID='Obstruction #75', XB=0.5,1.25,0.5,2.0,0.0,0.0, COLOR='GRAY', SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.0,4.0,6.0,14.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,6.0,0.0,4.0,21.0,21.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.5,2.0,0.0,2.0, RGB=0,14,153, SURF_ID='KCE', CTRL_ID='invert'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.5,2.5,19.0,20.0, RGB=0,0,182, SURF_ID='KCE', CTRL_ID='invert'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.0,0.5,0.0,3.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.5,2.0,2.0,3.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.5,2.5,14.0,19.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.0,0.5,14.0,21.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,2.5,4.0,14.0,21.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.5,2.5,20.0,21.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.0,0.0,3.0,0.0,21.0, RGB=240,240,240, TRANSPARENCY=0.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,4.0,7.0,7.0,3.0,6.0, RGB=240,240,240, TRANSPARENCY=0.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,4.0,3.0,7.0,3.0,3.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,4.0,3.0,7.0,6.0,6.0, RGB=240,240,240, TRANSPARENCY=0.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,6.0,0.0,3.0,0.0,0.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,2.0,4.0,0.0,3.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.0,4.0,3.0,7.0,3.0,6.0, RGB=240,240,240, TRANSPARENCY=0.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.0,0.0,0.0,7.0,3.0,6.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction stena', XB=0.0,6.0,3.0,3.0,0.0,21.0, RGB=240,240,240, TRANSPARENCY=0.0, SURF_ID='KCE'/
&OBST ID='Obstruction stena', XB=0.0,6.0,0.0,0.0,0.0,21.0, SURF_ID='KCE'/

&HOLE ID='Hole #1', XB=0.1,0.6,2.9,3.1,3.0,5.0/
&HOLE ID='Hole #1', XB=3.75,4.25,4.75,5.75,3.75,5.25/
&HOLE ID='Hole #1', XB=-0.25,0.25,4.75,5.75,3.75,5.25/

&VENT ID='Vitr_stena', SURF_ID='VITR', XB=-10.25,-10.25,-1.0,4.0,0.0,5.5/
&VENT ID='Vitr_stena', SURF_ID='VITR', XB=-10.25,-10.25,-1.0,4.0,5.5,11.0/
&VENT ID='Vitr_stena', SURF_ID='VITR', XB=-10.25,-10.25,-1.0,4.0,11.0,16.5/
&VENT ID='Vitr_stena', SURF_ID='VITR', XB=-10.25,-10.25,-1.0,4.0,16.5,22.0/
&VENT ID='Vent #3', SURF_ID='POZAR', XB=0.0,4.0,3.0,7.0,3.1,3.1/
&VENT ID='Vent2', SURF_ID='OPEN', XB=-10.25,6.0,-1.0,4.0,22.0,22.0/
&VENT ID='Vent3', SURF_ID='OPEN', XB=-10.25,0.0,4.0,4.0,0.0,22.0/
&VENT ID='Vent3', SURF_ID='OPEN', XB=6.0,6.0,-1.0,0.0,0.0,21.0/
&VENT ID='Vent02', SURF_ID='OPEN', XB=-10.25,6.0,-1.0,-1.0,0.0,22.0/
&VENT ID='Vent03', SURF_ID='OPEN', XB=6.0,6.0,-1.0,4.0,21.0,22.0/
&VENT ID='Vent04', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,6.0,4.0,4.0,21.0,22.0/
&VENT ID='Vent05', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,4.75,5.75,3.75,5.25/
&VENT ID='Vent06', SURF_ID='OPEN', XB=4.0,4.0,4.75,5.75,3.75,5.25/

&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=50.0/
&ISOF QUANTITY='VISIBILITY', SPEC_ID='AIR', VALUE=5.0/
&ISOF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='PRODUCTS', VALUE=0.02/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=1.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=-1.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=2.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=1.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=-5.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=5.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=-0.25/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=-0.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=19.5/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=4.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=1.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=1.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=3.0/
```

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=3.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=4.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=5.25/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBY=1.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBY=3.0/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBY=1.5/
&SLCF QUANTITY='PRESSURE', PBY=3.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., XB=-6.0,6.0,0.0,3.0,0.0,22.0, FYI='Temperature'/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., XB=-6.0,6.0,0.0,3.0,0.0,22.0, FYI='Temperature01'/

&DEVC ID='Gas Temperature_MEAN', QUANTITY='GAS TEMPERATURE', STATISTICS='MEAN',
XB=0.0,0.0,0.5,2.5,19.0,20.0/
&DEVC ID='Gas Temperature_MAX', QUANTITY='GAS TEMPERATURE', STATISTICS='MAX',
XB=0.0,0.0,0.5,2.5,19.0,20.0/
&DEVC ID='Velocity-up_MASS MEAN', QUANTITY='VELOCITY', STATISTICS='MASS MEAN',
XB=0.0,0.0,0.5,2.5,19.0,20.0/
&DEVC ID='Velocity-up_VOLUME MEAN', QUANTITY='VELOCITY', STATISTICS='VOLUME MEAN',
XB=0.0,0.0,0.5,2.5,19.0,20.0/
&DEVC ID='Velocity-down_MASS MEAN', QUANTITY='VELOCITY', STATISTICS='MASS MEAN',
XB=0.0,0.0,0.75,2.25,0.0,2.0/
&DEVC ID='Velocity-down_VOLUME MEAN', QUANTITY='VELOCITY', STATISTICS='VOLUME MEAN',
XB=0.0,0.0,0.75,2.25,0.0,2.0/


&TAIL /
```

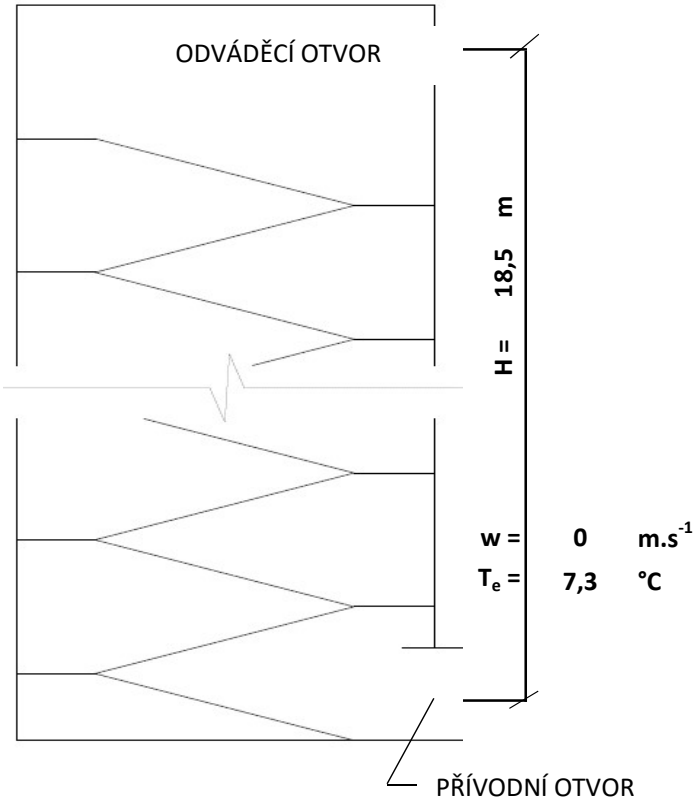
Příloha 2 – Výpočtová část

Výpočtová část obsahuje následující přílohy:

1. Výpočet pro variantu bez působení větru
2. Výpočet pro variantu s kritickou rychlostí větru w = 3,76 $m.s^{-1}$
3. Výpočet pro variantu s rychlostí větru w = 4,59 $m.s^{-1}$ (poloha odvětracího otvoru na závětrné straně)

Příloha 2 - Výpočtová část 1) Varianta bez působení větru		
Vstupní hotnoty pro výpočet dle ČSN 73 0802		
Teploty		
T_e =	7,3	°C
T_i =	37	°C
Rychlost větru		
w =	0	$m.s^{-1}$
Rozměry CHÚC		
Délka =	6	m
Šířka =	3	m
Plocha =	18	m^2
Objem vzduchu =	378	m^3
Tlaková ztráta schodištěm		
Počet pater:	7	
Tlaková ztráta [Pa] /patro:	2	
Osová vzdálenost větracích otvorů		
H =	18,5	m
Rozměry větracích otvorů		
Přívodní otvor		
Výška =	2,0	m
Šířka =	1,5	m
Odváděcí otvor		
Výška =	1,0	m
Šířka =	2,0	m
Poloha větracích otvorů		
Přívodní otvor:	návětrná strana	
Odváděcí otvor:	návětrná strana	
Typ CHÚC:	CHÚC A	

CHÚC A



Vtokový a výtokový součinitel otvorů jsou uvažovány s normovou hodnotou C = 0,6

Okrajové podmínky pro výpočet dle ČSN 73 0802:

- teplotní rozdíl mezi CHÚC a vnějším prostředím do 10 K
- zvýšená teplota v CHÚC nad úrovní požáru do 20 K
- rychlost větru na závětrné straně do 5 $m.s^{-1}$

Hustota vzduchu v exteriéru ($_e$) a interiéru ($_i$) na základě teploty	
$\rho = \frac{p}{461{,}5 \cdot T} \cdot \frac{(1+x)}{(0.622+x)}$	p … atmosferický tlak [Pa] T … Absolutní teplota vzduchu [K] x … měrná vlhkost vzduchu [$kg.kg_{s.v.}^{-1}$]

Hustota vzduchu v exteriéru			Hustota vzduchu v interiéru		
p =	98 000	Pa	p =	98 000	Pa
T_e =	280,45	K	T_i =	310,15	K
x =	0,005	$kg.kg_{s.v.}^{-1}$	x =	0,005	$kg.kg_{s.v.}^{-1}$
ρ_e =	1,217	$kg.m^{-3}$	ρ_i =	1,100	$kg.m^{-3}$

Celkový tlakový rozdíl mezi větracími otvory vzniklý rozdílem teplot... Dpt					
$dp_t = H \cdot (\rho_e - \rho i) \cdot g$	ρ_e... hustota venkovního vzduchu ρ_i... hustota vzduchu uvnitř H... Osová vzdálenost větracích otvorů g... gravitační zrychlení				
H =	18,50	m	ρ_e =	1,22	$kg.m^{-3}$
g =	9,81		ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$
			dp_t =	**21,23**	**Pa**
Tlaková ztráta schodiště => 7 pater . 2 Pa			$\Delta pz_{sch} =$	**14**	**Pa**
Celkový tlakový rozdíl vlivem rozdílu teplot včetně tlakové ztráty od schodiště			**$dp_{t,s}$ =**	**7,23**	**Pa**

Tlakový rozdíl pro překonání odporu přívodním otvorem					
$dp_{t,př} = \frac{dp_{t,s}}{1 + \left(\frac{C_{př} \cdot A_{př}}{C_{odv} \cdot A_{odv}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_e}{\rho_i}}$	$C_{př}$... výtokový součinitel přívodního otvoru C_{odv}... výtokový součinitel odváděcího otvoru $A_{př}$... geometrická plocha přívodního otvoru A_{odv}... geometrická plocha odváděcího otvoru				
$dp_{t,s}$ =	7,23	Pa	A_{odv} =	2 m^2	(1 x 2 m)
$C_{př}$ =	0,6	-	$A_{př}$ =	3 m^2	(2 x 1,5 m)
C_{odv} =	0,6	-	ρ_e =	1,217 $kg.m^{-3}$	
ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$	**$dp_{t,př}$ =**	**2,07**	**Pa**

Tlakový rozdíl pro překonání odporu odváděcím otvorem					
$dp_{t,odv} = \frac{dp_{t,s}}{1 + \left(\frac{C_{odv} \cdot A_{odv}}{C_{př} \cdot A_{př}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_i}{\rho_e}}$	$C_{př}$... výtokový součinitel přívodního otvoru C_{odv}... výtokový součinitel odváděcího otvoru $A_{př}$... geometrická plocha přívodního otvoru A_{odv}... geometrická plocha odváděcího otvoru				
$dp_{t,s}$ =	7,23	Pa	A_{odv} =	2 m^2	(1 x 2 m)
$C_{př}$ =	0,6	-	$A_{př}$ =	3 m^2	(2 x 1,5 m)
C_{odv} =	0,6	-	ρ_e =	1,22 $kg.m^{-3}$	
ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$	**$dp_{t,odv}$ =**	**-5,16**	**Pa**

Dynamický tlak větru	
$p_{d,w} = \frac{w^2}{2} \cdot \rho_e$	w… rychlost větru ρ_e… hustota venkovního vzduchu $p_{d,w}$… dynamický tlak větru
w = 0 $m.s^{-1}$	**$p_{d,w}$ = 0,00 Pa**

Účinek větru na návětrnou/závětrnou stranu budovy

Aerodynamický součinitel budovy pro návětrnou stranou A_{nav} = 0,6	**$dp_{w,nav}$ = 0,00 Pa**
Aerodynamický součinitel budovy pro závětrnou stranou A_{zav} = -0,3	**$dp_{w,zav}$ = 0,00 Pa**

Výsledný rozdíl tlaků na vnější straně fasády v přívodním otvoru vyvolaný současným účinkem rozdílu teplot a větru se zohledněním tlakové ztráty schodiště

Přetlak na fasádě	
$dp_{souč,př,f} = dp_{t,př} + dp_{w,nav}$ =	2,07 Pa
Podtlak na fasádě	
$dp_{souč,odv,f} = dp_{t,př} + dp_{w,nav}$ =	-5,16 Pa

Hodnoty uvnitř CHÚC jsou zápornou hodnotou tlaků na vnější straně fasády

Přetlak v odváděcím otvoru uvnitř CHÚC	**Vzniká přetlak => Dochází k odvodu kouře z prostoru CHÚC.**
$dp_{souč,odv}$ = 5,16 Pa	
Podtlak v přívodním otvoru uvnitř CHÚC	**Vzniká podtlak => Dochází k přívodu kouře do prostoru CHÚC.**
$dp_{souč,př}$ = -2,07 Pa	
Celkový rozdíl tlaků větracího zařízení	
$dp_{celk} = \lvert dp_{souč,př} \rvert + \lvert dp_{souč,odv} \rvert$ =	7,23 Pa

Podle zákona o zachování hmoty musí být hmotnostní toky v přívodním a odváděcím otvoru stejné

$$M_{př} = C_{př}.A_{př}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_e}{\rho_i}\cdot\left(\frac{C_{př}\cdot A_{př}}{C_{odv}.A_{odv}}\right)^2}\right]^{0,5}$$

$M_{př}$… hmotnostní průtok vzduchu přívodním otvorem

$M_{př}$ = 4,043 $kg.s^{-1}$

$$M_{odv} = C_{odv}.A_{odv}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_i}{\rho_e}\cdot\left(\frac{C_{odv}\cdot A_{odv}}{C_{př}.A_{př}}\right)^2}\right]^{0,5}$$

M_{odv}… hmotnostní průtok vzduchu přívodním otvorem

M_{odv} = 4,043 $kg.s^{-1}$

Hmotnostní průtoky v obou otvorech se rovnají.

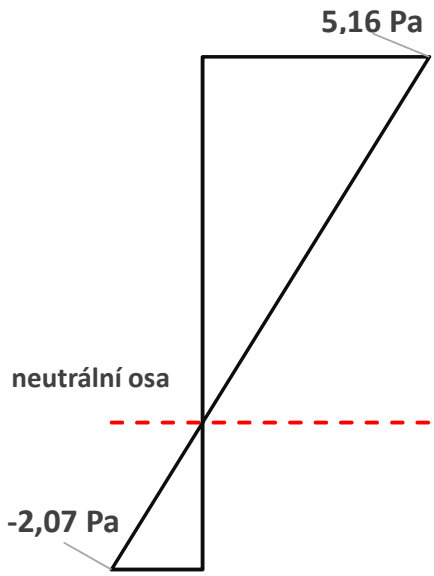
Objemový průtok přívodním otvorem	**Rychlost vzduchu v přívodním otvoru**
$V_{př} = \frac{M_{př}}{\rho_e} =$ **11 961** **$m^3.h^{-1}$**	$v_{př} = \sqrt{\frac{dp_{souč,př}}{\rho_e}} =$ **1,8** **$m.s^{-1}$**
Objemový průtok odváděcím otvorem	**Rychlost vzduchu v odváděcím otvoru**
$V_{odv} = \frac{M_{odv}}{\rho_i} =$ **13 233** **$m^3.h^{-1}$**	$v_{odv} = \sqrt{\frac{dp_{souč,odv}}{\rho_i}} =$ **3,1** **$m.s^{-1}$**

Orientační rychlost proudění vzduchu v CHÚC			
$v_{CHUC} = \frac{\frac{M}{\rho_{\emptyset}}}{A_{CHÚC,50}}$	$\rho_{\emptyset}$ … aritmetický průměr venkovní a vnitřní hustoty $A_{CHÚC,50}$ … 50 % půdorysných rozměrů plochy CHÚC		
	$v_{CHÚC}$ =	0,39	$m.s^{-1}$
Poloha neutrální roviny			
$h_1 = H.\frac{dp_{souč,př}}{dp_{celk}}$	h_1 … osová vzdálenost neutrální roviny od dolního otvoru		
	h_1 =	5,30	m
$h_2 = H.\frac{dp_{souč,odv}}{dp_{celk}}$	h_2 … osová vzdálenost neutrální roviny od horního otvoru		
	h_2 =	13,20	m
Výpočtová výměna vzduchu			
$I_{VYP} = \frac{\frac{M.3600}{\rho_{\emptyset}}}{O}$	O … Objem vzduchu v prostoru CHÚC		
	I_{VYP} =	33,24	h^{-1}
Normová výměna vzduchu			
	I_N =	15,00	h^{-1}

$I_{VYP} > I_N$

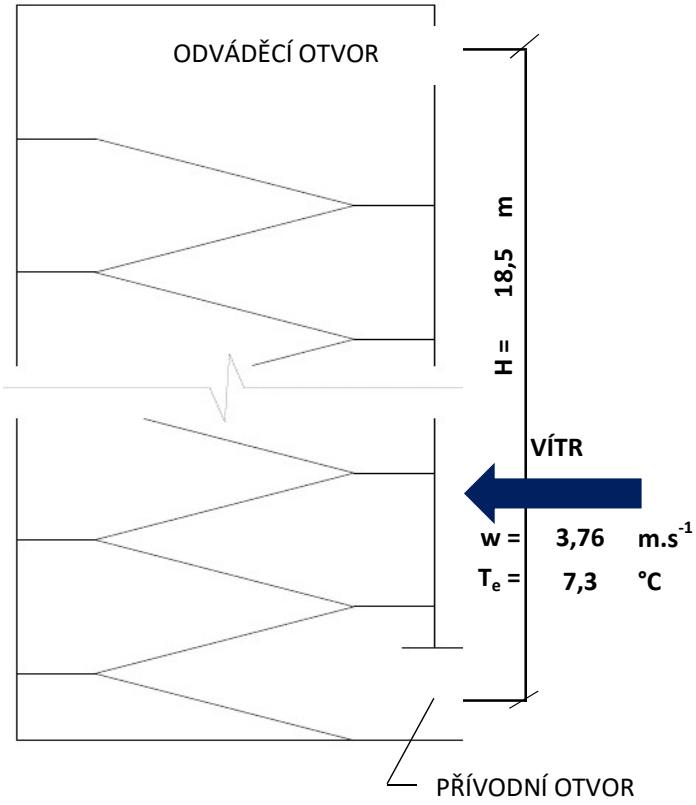
Větrací otvory a jejich poloha splňují požadavky ČSN 73 0802 na zajištění normové výměny vzduchu v CHÚC.

Tlakový diagram na vnitřní straně obdovové stěny



Příloha 2 - Výpočtová část		
2) Kritická rychlost; návětrná strana		
Vstupní hotnoty pro výpočet dle ČSN 73 0802		
Teploty		
T_e =	7,3	°C
T_i =	37	°C
Rychlost větru		
w =	3,76	$m.s^{-1}$
Rozměry CHÚC		
Délka =	6	m
Šířka =	3	m
Plocha =	18	m^2
Objem vzduchu =	378	m^3
Tlaková ztráta schodištěm		
Počet pater:	7	
Tlaková ztráta [Pa] /patro:	2	
Osová vzdálenost větracích otvorů		
H =	18,5	m
Rozměry větracích otvorů		
Přívodní otvor		
Výška =	2,0	m
Šířka =	1,5	m
Odváděcí otvor		
Výška =	1,0	m
Šířka =	2,0	m
Poloha větracích otvorů		
Přívodní otvor:	návětrná strana	
Odváděcí otvor:	návětrná strana	
Typ CHÚC:	CHÚC A	

CHÚC A



Vtokový a výtokový součinitel otvorů jsou uvažovány s normovou hodnotou C = 0,6

Okrajové podmínky pro výpočet dle ČSN 73 0802:

- teplotní rozdíl mezi CHÚC a vnějším prostředím do 10 K
- zvýšená teplota v CHÚC nad úrovní požáru do 20 K
- rychlost větru na závětrné straně do 5 $m.s^{-1}$

Hustota vzduchu v exteriéru ($_e$) a interiéru ($_i$) na základě teploty	
$\rho = \frac{p}{461{,}5 \cdot T} \cdot \frac{(1+x)}{(0.622+x)}$	p … atmosferický tlak [Pa] T … Absolutní teplota vzduchu [K] x … měrná vlhkost vzduchu [$kg.kg_{s.v.}^{-1}$]

Hustota vzduchu v exteriéru			Hustota vzduchu v interiéru		
p =	98 000	Pa	p =	98 000	Pa
T_e =	280,45	K	T_i =	310,15	K
x =	0,005	$kg.kg_{s.v.}^{-1}$	x =	0,005	$kg.kg_{s.v.}^{-1}$
ρ_e =	1,217	$kg.m^{-3}$	ρ_i =	1,100	$kg.m^{-3}$

Celkový tlakový rozdíl mezi větracími otvory vzniklý rozdílem teplot... Dpt					
$dp_t = H \cdot (\rho_e - \rho i) \cdot g$	ρ_e... hustota venkovního vzduchu ρ_i... hustota vzduchu uvnitř H... Osová vzdálenost větracích otvorů g... gravitační zrychlení				
H =	18,50	m	ρ_e =	1,22	$kg.m^{-3}$
g =	9,81		ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$
			dp_t =	**21,23**	**Pa**
Tlaková ztráta schodiště => 7 pater . 2 Pa			$\Delta pz_{sch} =$	**14**	**Pa**
Celkový tlakový rozdíl vlivem rozdílu teplot včetně tlakové ztráty od schodiště			**$dp_{t,s}$ =**	**7,23**	**Pa**

Tlakový rozdíl pro překonání odporu přívodním otvorem					
$dp_{t,př} = \frac{dp_{t,s}}{1 + \left(\frac{C_{př} \cdot A_{př}}{C_{odv} \cdot A_{odv}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_e}{\rho_i}}$	$C_{př}$... výtokový součinitel přívodního otvoru C_{odv}... výtokový součinitel odváděcího otvoru $A_{př}$... geometrická plocha přívodního otvoru A_{odv}... geometrická plocha odváděcího otvoru				
$dp_{t,s}$ =	7,23	Pa	A_{odv} =	2 m^2	(1 x 2 m)
$C_{př}$ =	0,6	-	$A_{př}$ =	3 m^2	(2 x 1,5 m)
C_{odv} =	0,6	-	ρ_e =	1,217 $kg.m^{-3}$	
ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$	**$dp_{t,př}$ =**	**2,07**	**Pa**

Tlakový rozdíl pro překonání odporu odváděcím otvorem					
$dp_{t,odv} = \frac{dp_{t,s}}{1 + \left(\frac{C_{odv} \cdot A_{odv}}{C_{př} \cdot A_{př}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_i}{\rho_e}}$	$C_{př}$... výtokový součinitel přívodního otvoru C_{odv}... výtokový součinitel odváděcího otvoru $A_{př}$... geometrická plocha přívodního otvoru A_{odv}... geometrická plocha odváděcího otvoru				
$dp_{t,s}$ =	7,23	Pa	A_{odv} =	2 m^2	(1 x 2 m)
$C_{př}$ =	0,6	-	$A_{př}$ =	3 m^2	(2 x 1,5 m)
C_{odv} =	0,6	-	ρ_e =	1,22 $kg.m^{-3}$	
ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$	**$dp_{t,odv}$ =**	**-5,16**	**Pa**

Dynamický tlak větru	
$p_{d,w} = \frac{w^2}{2} \cdot \rho_e$	w… rychlost větru ρ_e… hustota venkovního vzduchu $p_{d,w}$… dynamický tlak větru
w = 3,76 $m.s^{-1}$	$p_{d,w}$ = 8,60 Pa

Účinek větru na návětrnou/závětrnou stranu budovy	
Aerodynamický součinitel budovy pro návětrnou stranou A_{nav} = 0,6	$dp_{w,nav}$ = 5,16 Pa
Aerodynamický součinitel budovy pro závětrnou stranou A_{zav} = -0,3	$dp_{w,zav}$ = -2,58 Pa

Výsledný rozdíl tlaků na vnější straně fasády v přívodním otvoru vyvolaný současným účinkem rozdílu teplot a větru se zohledněním tlakové ztráty schodiště	
Přetlak na fasádě	
$dp_{souč,př,f} = dp_{t,př} + dp_{w,nav}$ =	7,23 Pa
Podtlak na fasádě	
$dp_{souč,odv,f} = dp_{t,př} + dp_{w,nav}$ =	0,00 Pa

Hodnoty uvnitř CHÚC jsou zápornou hodnotou tlaků na vnější straně fasády	
Přetlak v odváděcím otvoru uvnitř CHÚC	**Nedochází k odvodu kouře z prostoru CHÚC.**
$dp_{souč,odv}$ = 0,00 Pa	
Podtlak v přívodním otvoru uvnitř CHÚC	**Vzniká podtlak => Dochází k přívodu kouře do prostoru CHÚC.**
$dp_{souč,př}$ = -7,23 Pa	
Celkový rozdíl tlaků větracího zařízení	
$dp_{celk} = \lvert dp_{souč,př} \rvert + \lvert dp_{souč,odv} \rvert$ =	7,24 Pa

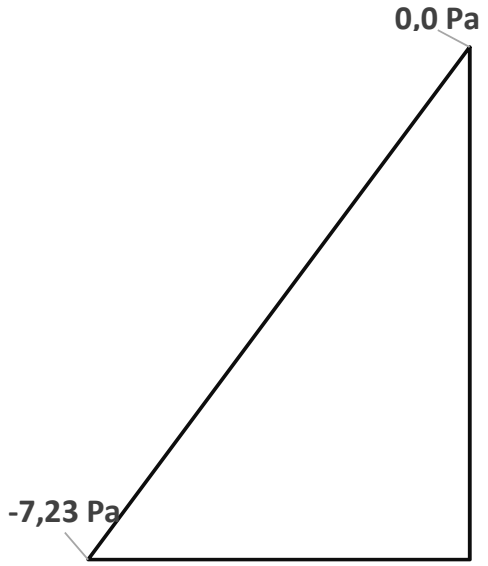
Podle zákona o zachování hmoty musí být hmotnostní toky v přívodním a odváděcím otvoru stejné	
$M_{př} = C_{př}.A_{př}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_e}{\rho_i}\cdot\left(\frac{C_{př}\cdot A_{př}}{C_{odv}.A_{odv}}\right)^2}\right]^{0,5}$	$M_{př}$… hmotnostní průtok vzduchu přívodním otvorem $M_{př}$ = 4,044 $kg.s^{-1}$
$M_{odv} = C_{odv}.A_{odv}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_i}{\rho_e}\cdot\left(\frac{C_{odv}\cdot A_{odv}}{C_{př}.A_{př}}\right)^2}\right]^{0,5}$	M_{odv}… hmotnostní průtok vzduchu přívodním otvorem M_{odv} = 4,044 $kg.s^{-1}$
Hmotnostní průtoky v obou otvorech se rovnají.	
Objemový průtok přívodním otvorem	**Rychlost vzduchu v přívodním otvoru**
$V_{př} = \frac{M_{př}}{\rho_e}$ = 11 962 $m^3.h^{-1}$	$v_{př} = \sqrt{\frac{dp_{souč,př}}{\rho_e}}$ = 3,4 $m.s^{-1}$
Objemový průtok odváděcím otvorem	**Rychlost vzduchu v odváděcím otvoru**
$V_{odv} = \frac{M_{odv}}{\rho_i}$ = 13 235 $m^3.h^{-1}$	$v_{odv} = \sqrt{\frac{dp_{souč,odv}}{\rho_i}}$ = 0,0 $m.s^{-1}$

Orientační rychlost proudění vzduchu v CHÚC			
$v_{CHUC} = \frac{\frac{M}{\rho_{\emptyset}}}{A_{CHÚC,50}}$	$\rho_{\emptyset}$ … aritmetický průměr venkovní a vnitřní hustoty $A_{CHÚC,50}$ … 50 % půdorysných rozměrů plochy CHÚC		
	$v_{CHÚC}$ =	0,39	$m.s^{-1}$
Poloha neutrální roviny			
$h_1 = H.\frac{dp_{souč,př}}{dp_{celk}}$	h_1 … osová vzdálenost neutrální roviny od dolního otvoru		
	h_1 =	18,50	m
$h_2 = H.\frac{dp_{souč,odv}}{dp_{celk}}$	h_2 … osová vzdálenost neutrální roviny od horního otvoru		
	h_2 =	0,00	m
Výpočtová výměna vzduchu			
$I_{VYP} = \frac{\frac{M.3600}{\rho_{\emptyset}}}{O}$	O … Objem vzduchu v prostoru CHÚC		
	I_{VYP} =	33,24	h^{-1}
Normová výměna vzduchu			
	I_N =	15,00	h^{-1}

$I_{VYP} > I_N$

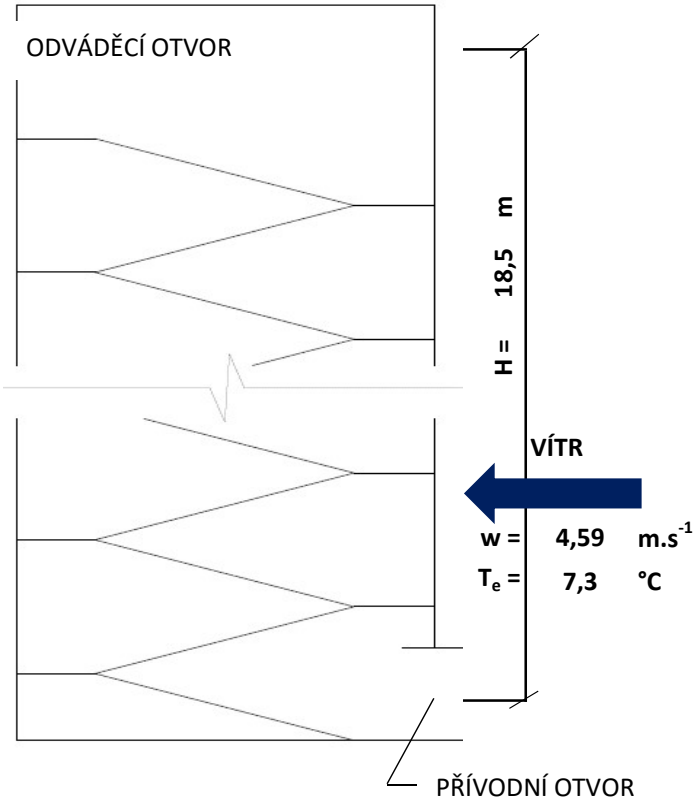
Větrací otvory nesplňují požadavky ČSN 73 0802 na zajištění normové výměny vzduchu v CHÚC

Tlakový diagram na vnitřní straně obdovové stěny



Příloha 2 - Výpočtová část 3) Průměrná rychlost pro rok 2017; závětrná strana		
Vstupní hotnoty pro výpočet dle ČSN 73 0802		
Teploty		
T_e =	7,3	°C
T_i =	37	°C
Rychlost větru		
w =	4,59	$m.s^{-1}$
Rozměry CHÚC		
Délka =	6	m
Šířka =	3	m
Plocha =	18	m^2
Objem vzduchu =	378	m^3
Tlaková ztráta schodištěm		
Počet pater:	7	
Tlaková ztráta [Pa] /patro:	2	
Osová vzdálenost větracích otvorů		
H =	18,5	m
Rozměry větracích otvorů		
Přívodní otvor		
Výška =	2,0	m
Šířka =	1,5	m
Odváděcí otvor		
Výška =	1,0	m
Šířka =	2,0	m
Poloha větracích otvorů		
Přívodní otvor:	návětrná strana	
Odváděcí otvor:	závětrná strana	
Typ CHÚC:	CHÚC A	

CHÚC A



Vtokový a výtokový součinitel otvorů jsou uvažovány s normovou hodnotou C = 0,6

Okrajové podmínky pro výpočet dle ČSN 73 0802:

- teplotní rozdíl mezi CHÚC a vnějším prostředím do 10 K
- zvýšená teplota v CHÚC nad úrovní požáru do 20 K
- rychlost větru na závětrné straně do 5 $m.s^{-1}$

Hustota vzduchu v exteriéru ($_e$) a interiéru ($_i$) na základě teploty	
$\rho = \frac{p}{461{,}5 \cdot T} \cdot \frac{(1+x)}{(0.622+x)}$	p … atmosferický tlak [Pa] T … Absolutní teplota vzduchu [K] x … měrná vlhkost vzduchu [$kg.kg_{s.v.}^{-1}$]

Hustota vzduchu v exteriéru			Hustota vzduchu v interiéru		
p =	98 000	Pa	p =	98 000	Pa
T_e =	280,45	K	T_i =	310,15	K
x =	0,005	$kg.kg_{s.v.}^{-1}$	x =	0,005	$kg.kg_{s.v.}^{-1}$
ρ_e =	1,217	$kg.m^{-3}$	ρ_i =	1,100	$kg.m^{-3}$

Celkový tlakový rozdíl mezi větracími otvory vzniklý rozdílem teplot... Dpt					
$dp_t = H \cdot (\rho_e - \rho i) \cdot g$	ρ_e... hustota venkovního vzduchu ρ_i... hustota vzduchu uvnitř H... Osová vzdálenost větracích otvorů g... gravitační zrychlení				
H =	18,50	m	ρ_e =	1,22	$kg.m^{-3}$
g =	9,81		ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$
			dp_t =	**21,23**	**Pa**
Tlaková ztráta schodiště => 7 pater . 2 Pa			$\Delta pz_{sch} =$	**14**	**Pa**
Celkový tlakový rozdíl vlivem rozdílu teplot včetně tlakové ztráty od schodiště			**$dp_{t,s}$ =**	**7,23**	**Pa**

Tlakový rozdíl pro překonání odporu přívodním otvorem					
$dp_{t,př} = \frac{dp_{t,s}}{1 + \left(\frac{C_{př} \cdot A_{př}}{C_{odv} \cdot A_{odv}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_e}{\rho_i}}$	$C_{př}$... výtokový součinitel přívodního otvoru C_{odv}... výtokový součinitel odváděcího otvoru $A_{př}$... geometrická plocha přívodního otvoru A_{odv}... geometrická plocha odváděcího otvoru				
$dp_{t,s}$ =	7,23	Pa	A_{odv} =	2 m^2	(1 x 2 m)
$C_{př}$ =	0,6	-	$A_{př}$ =	3 m^2	(2 x 1,5 m)
C_{odv} =	0,6	-	ρ_e =	1,217 $kg.m^{-3}$	
ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$	**$dp_{t,př}$ =**	**2,07**	**Pa**

Tlakový rozdíl pro překonání odporu odváděcím otvorem					
$dp_{t,odv} = \frac{dp_{t,s}}{1 + \left(\frac{C_{odv} \cdot A_{odv}}{C_{př} \cdot A_{př}}\right)^2 \cdot \frac{\rho_i}{\rho_e}}$	$C_{př}$... výtokový součinitel přívodního otvoru C_{odv}... výtokový součinitel odváděcího otvoru $A_{př}$... geometrická plocha přívodního otvoru A_{odv}... geometrická plocha odváděcího otvoru				
$dp_{t,s}$ =	7,23	Pa	A_{odv} =	2 m^2	(1 x 2 m)
$C_{př}$ =	0,6	-	$A_{př}$ =	3 m^2	(2 x 1,5 m)
C_{odv} =	0,6	-	ρ_e =	1,22 $kg.m^{-3}$	
ρ_i =	1,10	$kg.m^{-3}$	**$dp_{t,odv}$ =**	**-5,16**	**Pa**

Dynamický tlak větru	
$p_{d,w} = \frac{w^2}{2} \cdot \rho_e$	w… rychlost větru ρ_e… hustota venkovního vzduchu $p_{d,w}$… dynamický tlak větru
w = 4,59 $m.s^{-1}$	**$p_{d,w}$ = 12,82 Pa**

Účinek větru na návětrnou/závětrnou stranu budovy

Aerodynamický součinitel budovy pro návětrnou stranou A_{nav} = 0,6	**$dp_{w,nav}$ = 7,69 Pa**
Aerodynamický součinitel budovy pro závětrnou stranou A_{zav} = -0,3	**$dp_{w,zav}$ = -3,85 Pa**

Výsledný rozdíl tlaků na vnější straně fasády v přívodním otvoru vyvolaný současným účinkem rozdílu teplot a větru se zohledněním tlakové ztráty schodiště

Přetlak na fasádě	
$dp_{souč,př,f} = dp_{t,př} + dp_{w,nav}$ =	9,77 Pa
Podtlak na fasádě	
$dp_{souč,odv,f} = dp_{t,př} + dp_{w,zav}$ =	-9,01 Pa

Hodnoty uvnitř CHÚC jsou zápornou hodnotou tlaků na vnější straně fasády

Přetlak v odváděcím otvoru uvnitř CHÚC	**Vzniká přetlak => Dochází k odvodu kouře z prostoru CHÚC.**
$dp_{souč,odv}$ = 9,01 Pa	
Podtlak v přívodním otvoru uvnitř CHÚC	**Vzniká podtlak => Dochází k přívodu kouře do prostoru CHÚC.**
$dp_{souč,př}$ = -9,77 Pa	
Celkový rozdíl tlaků větracího zařízení	
$dp_{celk} = \lvert dp_{souč,př} \rvert + \lvert dp_{souč,odv} \rvert$ =	18,77 Pa

Podle zákona o zachování hmoty musí být hmotnostní toky v přívodním a odváděcím otvoru stejné

$$M_{př} = C_{př}.A_{př}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_e}{\rho_i}\cdot\left(\frac{C_{př}\cdot A_{př}}{C_{odv}.A_{odv}}\right)^2}\right]^{0,5}$$

$M_{př}$… hmotnostní průtok vzduchu přívodním otvorem

$M_{př}$ = 6,513 $kg.s^{-1}$

$$M_{odv} = C_{odv}.A_{odv}.\left[\frac{dp_{celk}}{1+\frac{\rho_i}{\rho_e}\cdot\left(\frac{C_{odv}\cdot A_{odv}}{C_{př}.A_{př}}\right)^2}\right]^{0,5}$$

M_{odv}… hmotnostní průtok vzduchu přívodním otvorem

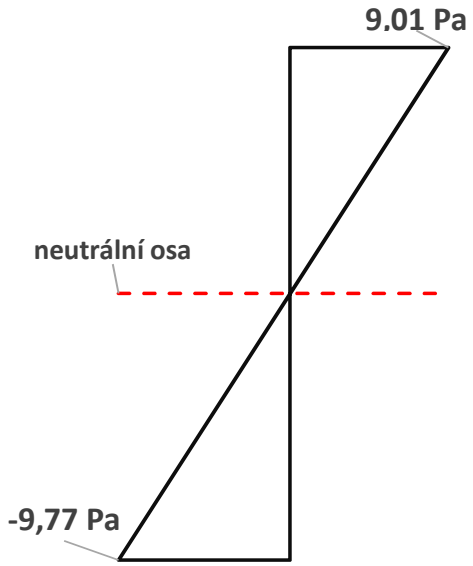
M_{odv} = 6,513 $kg.s^{-1}$

Hmotnostní průtoky v obou otvorech se rovnají.

Objemový průtok přívodním otvorem	**Rychlost vzduchu v přívodním otvoru**
$V_{př} = \frac{M_{př}}{\rho_e} =$ **19 268 $m^3.h^{-1}$**	$v_{př} = \sqrt{\frac{dp_{souč,př}}{\rho_e}} =$ **4,0 $m.s^{-1}$**
Objemový průtok odváděcím otvorem	**Rychlost vzduchu v odváděcím otvoru**
$V_{odv} = \frac{M_{odv}}{\rho_i} =$ **21 317 $m^3.h^{-1}$**	$v_{odv} = \sqrt{\frac{dp_{souč,odv}}{\rho_i}} =$ **4,0 $m.s^{-1}$**

Orientační rychlost proudění vzduchu v CHÚC			
$v_{CHUC} = \frac{\frac{M}{\rho_{\emptyset}}}{A_{CHÚC,50}}$	$\rho_{\emptyset}$ ... aritmetický průměr venkovní a vnitřní hustoty $A_{CHÚC,50}$ ... 50 % půdorysných rozměrů plochy CHÚC		
	$v_{CHÚC}$ =	0,62	$m.s^{-1}$
Poloha neutrální roviny			
$h_1 = H.\frac{dp_{souč,př}}{dp_{celk}}$	h_1 ... osová vzdálenost neutrální roviny od dolního otvoru		
	h_1 =	9,62	m
$h_2 = H.\frac{dp_{souč,odv}}{dp_{celk}}$	h_2 ... osová vzdálenost neutrální roviny od horního otvoru		
	h_2 =	8,88	m
Výpočtová výměna vzduchu			
$I_{VYP} = \frac{\frac{M.3600}{\rho_{\emptyset}}}{O}$	O ... Objem vzduchu v prostoru CHÚC		
	I_{VYP} =	53,55	h^{-1}
Normová výměna vzduchu			
	I_N =	15,00	h^{-1}

$I_{VYP} > I_N$

Větrací otvory a jejich poloha splňují požadavky ČSN 73 0802 na zajištění normové výměny vzduchu v CHÚC.

Tlakový diagram na vnitřní straně obdovové stěny