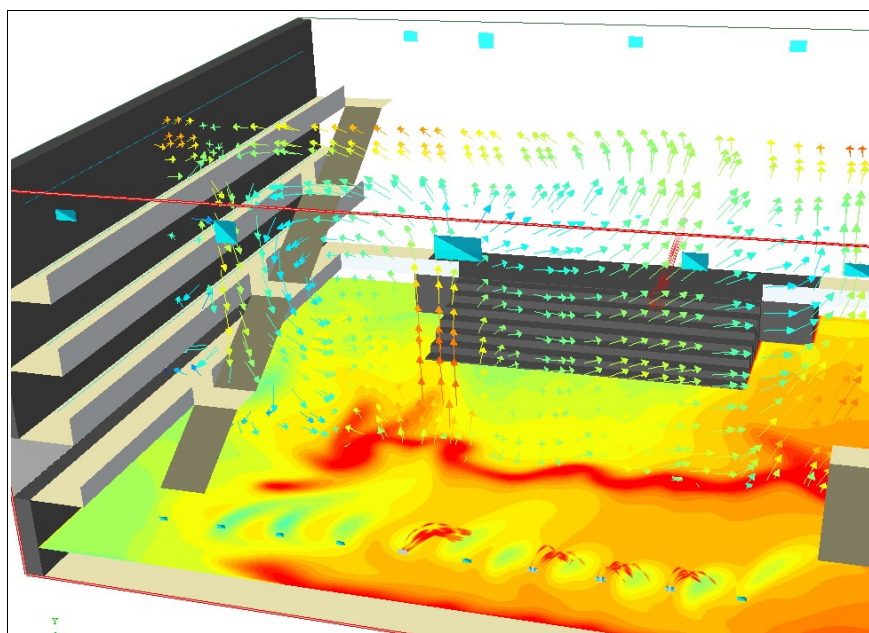


CFD SIMULACE INTERNÍHO MIKROKLIMATU ATRIA FAKULTY INFORMATIKY, MUNI, BRNO



Název akce: CERIT

Objednatel: Pelčák a partner, s.r.o.

Dodavatel: Klimakom spol. s r. o.
Zámecká 4
643 00 Brno - Chrlice

Řešitel: Ing. Peter Podoliak

Termín objednávky: 25.03.2010

Termín odevzdání: 28.05.2010

ÚVOD

Předmětem práce je zhodnocení vnitřního mikroklimatu prostoru atria Fakulty informatiky v Brně. Výsledky simulací jsou doporučujícím podkladem projektu VZT této stavby. Úkolem je optimalizovat a vyřešit distribuci vzduchu v prostoru atria.

1. CÍL ŘEŠENÍ

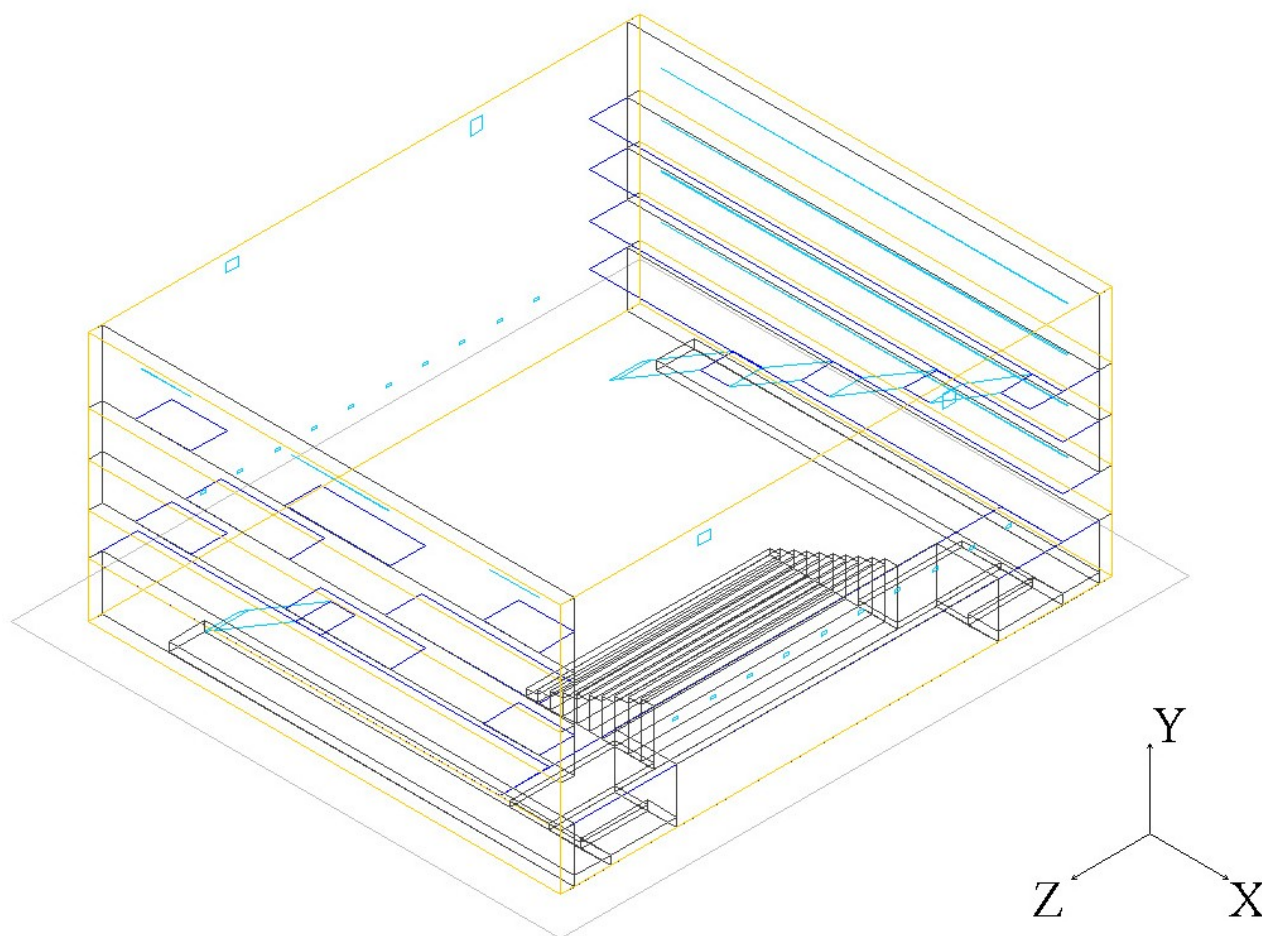
Obvodová konstrukce atria je řešena jako prosklená fasáda s prosklenou střechou. V letním období je možné očekávat vysoké tepelné zisky přes horizontální konstrukci střechy od oslunění. Cílem simulace bylo navrhnout distribuci větracího vzduchu tak, aby byli v pobytových zónách atria splněné požadavky na vnitřní mikroklima. Dále výsledky simulace zhodnocují a porovnávají použití různých prvků vplývajících na tvorbu optimálního mikroklimatu a odvod tepelné zátěže.

2. POPIS ŘEŠENÉHO PROSTORU

PODKLADY PRO ZPRACOVÁNÍ

Pro řešení byly použity zaslané stavební podklady – půdorysy a řezy. Na základě podkladů byl zpracován geometrický počítačový model atria v software-u Flovent (obr. 1). Řešené veličiny jsou simulované pro ustálený stav prostředí. Protože dynamika jevů v prostoru nebude jenom dvourozměrná, je nutné tento objekt řešit v 3D formátu. Model byl počítán na strukturované pravoúhlé síti v celém objemu atria. Řešení bylo vzhledem na velikost modelu časově náročné, ale postihuje všechny jevy, které mají vliv na vnitřní mikroklima. Pro zohlednění radiace byl použit radiační model surface-to-surface, proudění u povrchů bylo popsáno LVEL k-ε modelem turbulence.

Jednotlivé řešené veličiny jsou zobrazované v charakteristických rovinách vhodných pro zhodnocení jevů odehrávajících se v prostoru atria. Skalární veličiny jsou v řezech zobrazované jako barevné pole, vektorové veličiny se zobrazují jako vektory.



Obr. 1: Počítačový model atria

OKRAJOVÉ PODMÍNKY ŘEŠENÍ

Určení okrajových podmínek pro obvodové konstrukce vychází ze zadávací dokumentace projektu. Umístění distribučních prvků vzduchotechniky je dáno možnostmi a návrhem projektu vzduchotechniky. Úloha je řešena pro nejnepříznivější případ v létě, kdy bude vznikat tepelná zátěž od oslunění a od lidí nacházejících se v prostoru atria. V modelech je uvažováno s následujícími výpočtovými hodnotami prostředí:

$t_e = 32^\circ\text{C}$	venkovní výpočtová teplota vzduchu
$t_{r,\text{sol}} = 60^\circ\text{C}$	rovnocenní sluneční teplota pro horizontální povrch
$t_i = 26^\circ\text{C}$	teplota vnitřního vzduchu v zimním období
$\varphi = 50\% \text{ r.h}$	výpočtová relativní vlhkost vzduchu v interiéru

Tepelná zátěž vycházející ze zadání určující okrajové podmínky:

počet lidí uvažovaných v interiéru	280 (volný prostor v 1.NP) + 100 (pasáže)
tepelná produkce 1 člověka	100 W
solární faktor střešního prosklení	$g = 0,4$

3. SIMULAČNÍ ŘEŠENÍ – LETNÍ PROVOZ

Primární předpoklad pro správné řešení simulace proudění vzduchu v interiéru budov je správná volba vhodných okrajových podmínek. Kromě výše uvedených se mezi ně počítají také přívody a odtahy vzduchu.

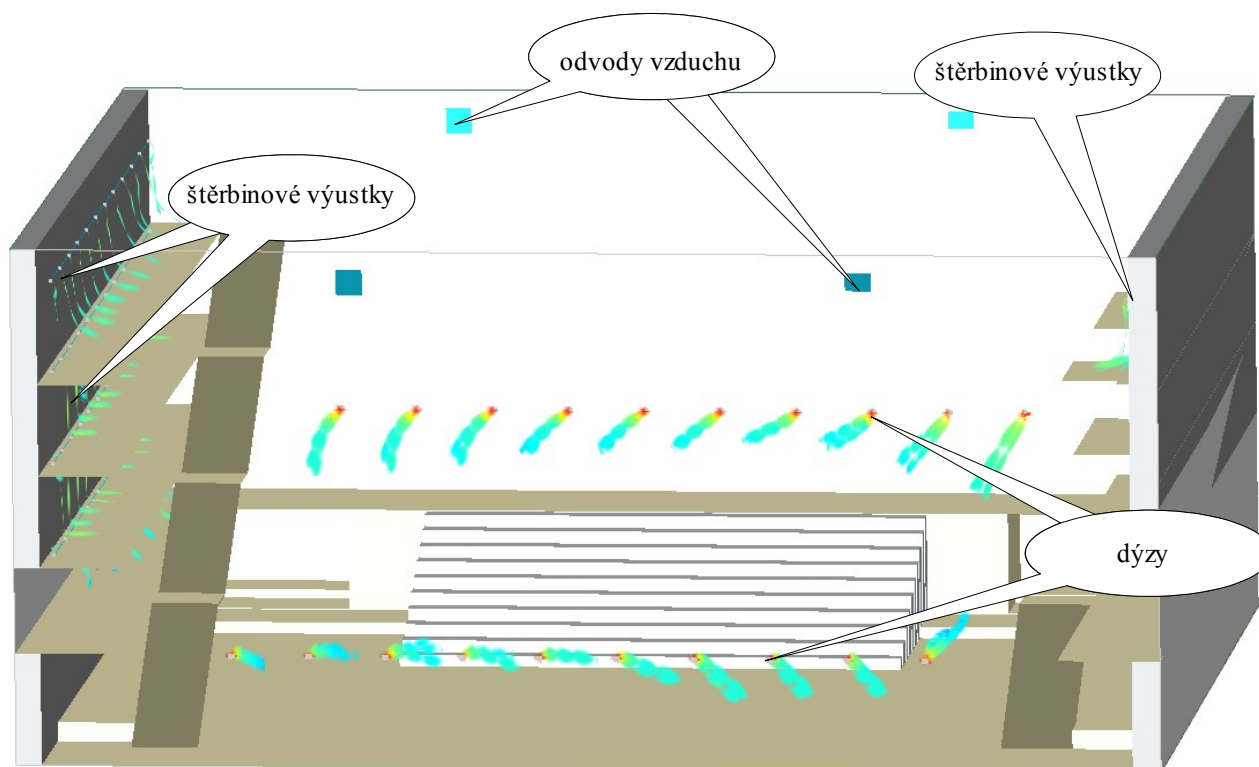
Sledováním a upravováním postupných řešení simulací dochází k optimalizaci proudění vzduchu tvořícího příznivé vnitřní mikroklima. V dalších bodech bude na vybraných řešeních zhodnocen vliv jednotlivých úprav na tvorbu vnitřního mikroklimatu.

DISTRIBUCE VZDUCHU

Projekt vzduchotechniky uvažuje při klimatizaci atria s teplotami vzduchu přiváděného do prostoru atria $t_{\text{vent}} = 18^\circ\text{C}$. Jako distribuční elementy byly použity (obr. 2):

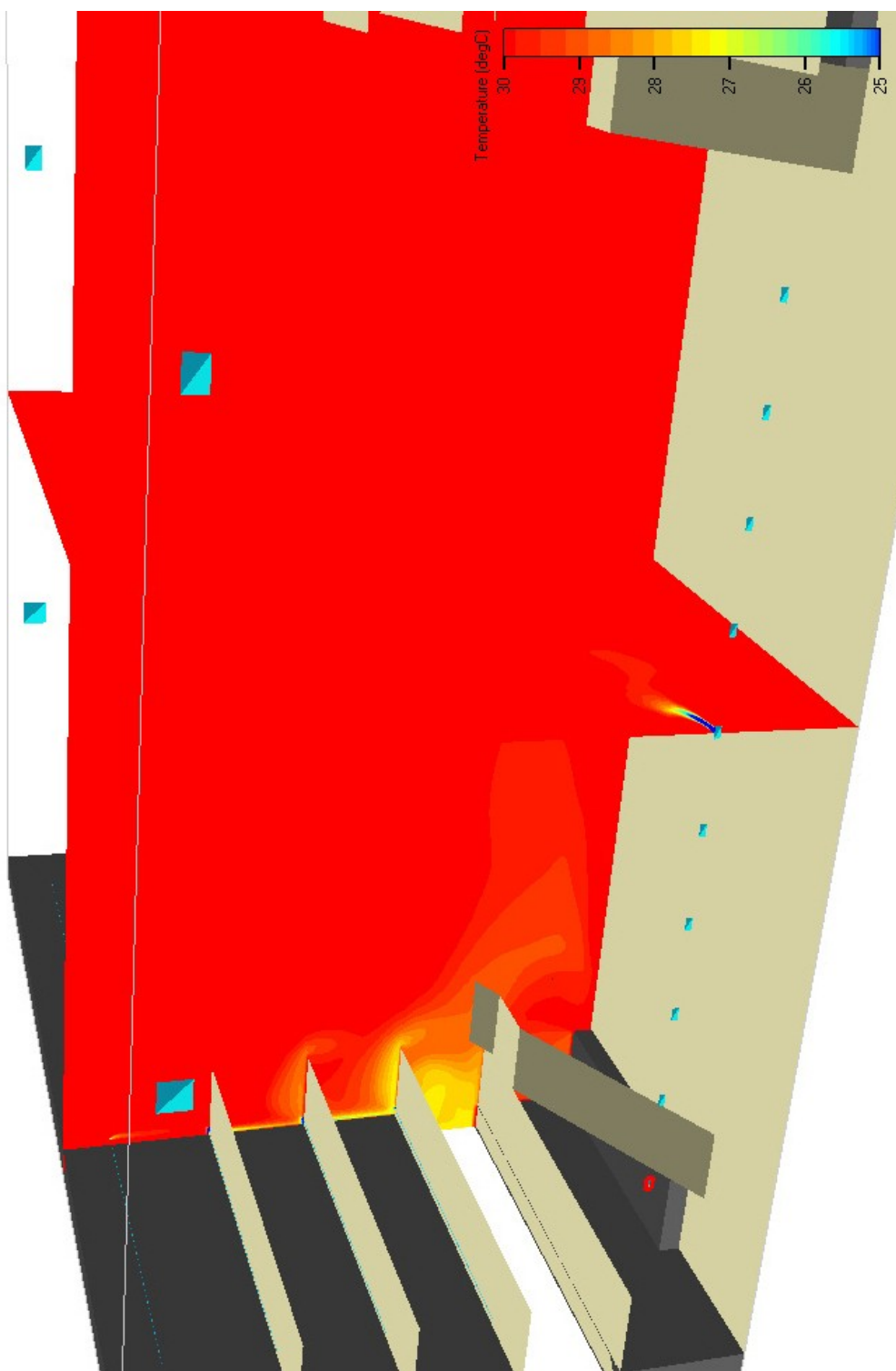
- 2×10 kusů dýz s dalekým dosahem umístěných proti sobě (v jiných výškách) zabezpečující přívod čerstvého vzduchu do prostoru před aulou a do volného prostoru atria
- do každé pasáže je přiváděn vzduch štěrbínovou výustí
- na balkóny v 5.NP je přiváděn vzduch pomocí štěrbínových výustí

- odvod vzduchu je realizován pod stropem odtahem pomocí VZT potrubí
- sumární přívod vzduchu byl před optimalizací 36000 m³/h v rovnotlaku s odvodem

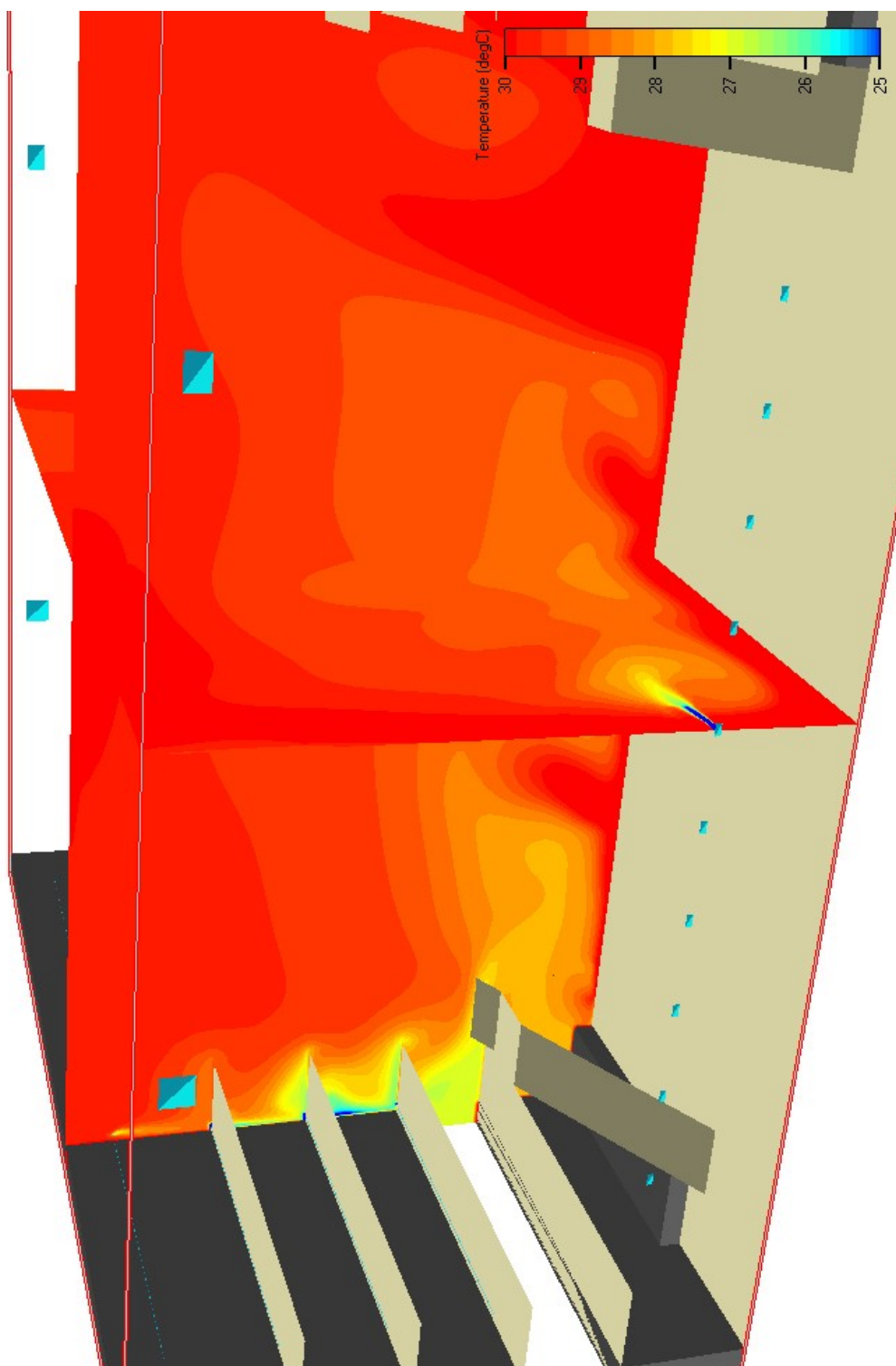


Obr. 2: Rozmístnění distribučních elementů v modelu

Nepříznivé výsledky prvních simulací vedli ke snaze odvést tepelnou zátěž vznikající v prostoru atria. Jednou z možností bylo navýšení větracího vzduchu. Sumární navýšení množství vzduchu bylo z 36000 m³/h na 42600 m³/h t.j. o necelých 20% (obr. 3a, 3b). Výsledkem bylo snížení teploty v prostoru. Otázkou je ekonomika dalšího navyšování množství větracího vzduchu, co by také mohlo vést k zásadním změnám umístění VZT potrubí a stupaček. Proto už nebylo simulováno další navýšení množství přiváděného vzduchu a tvorba vhodného mikroklimatu vedla jiným směrem. Doporučením je nutnost eliminovat maximální možnou mírou propustnost radiace střešním prosklením, která zvedá teploty povrchů, od kterých se následně vzduch v prostoru ohřívá.



Obr. 3a: Počáteční teplotní pole prostoru atria (přiváděno 30000 m³/h)



Obr. 3b: Teplotní pole atria po navýšení množství přivedeného vzduchu o 18% přivedeno 42600 m³/h)

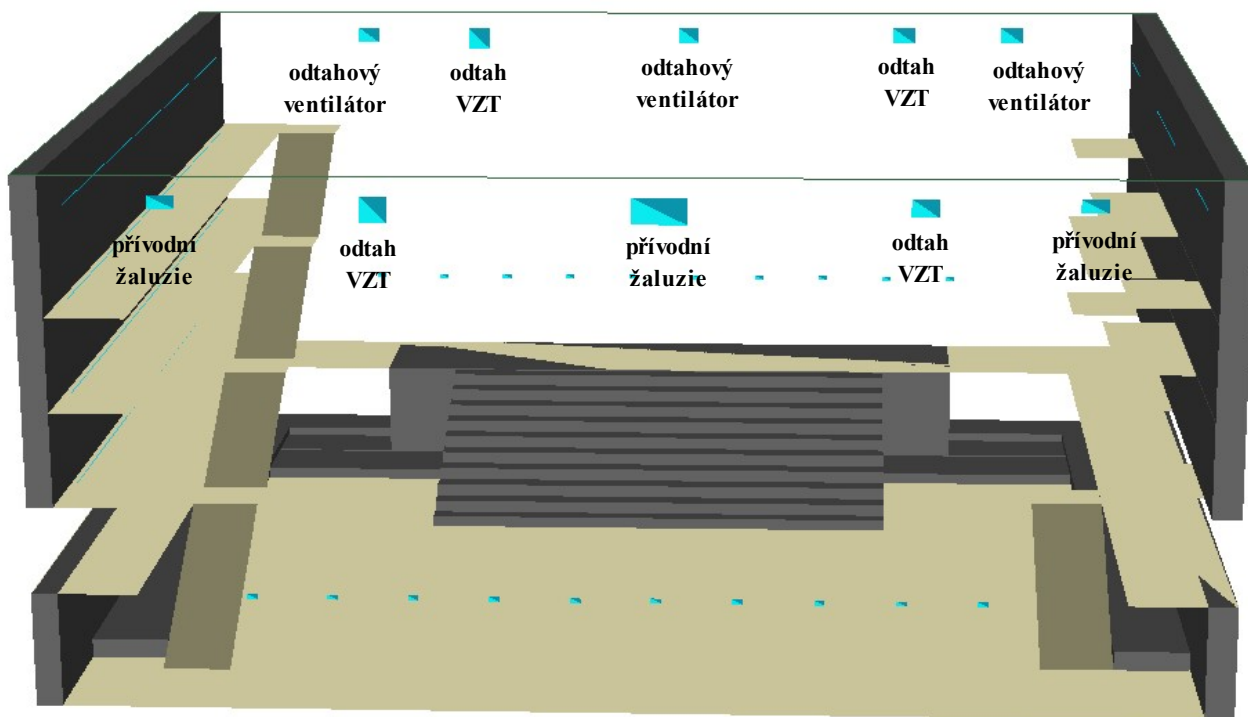
Rozložení množství přiváděného vzduchu (sumárně 42600 m³/h) bude v dalším uvažováno jako:

- | | |
|--|---------------------------|
| • 1500 m ³ /h každou dýzou | Σ 30000 m ³ /h |
| • 85,2 (m ³ /h)/m ² každou šterbinou v pasáži | Σ 11200 m ³ /h |
| • 89,2 (m ³ /h)/m ² každou šterbinou nad balkónem v 5.NP | Σ 1400 m ³ /h |

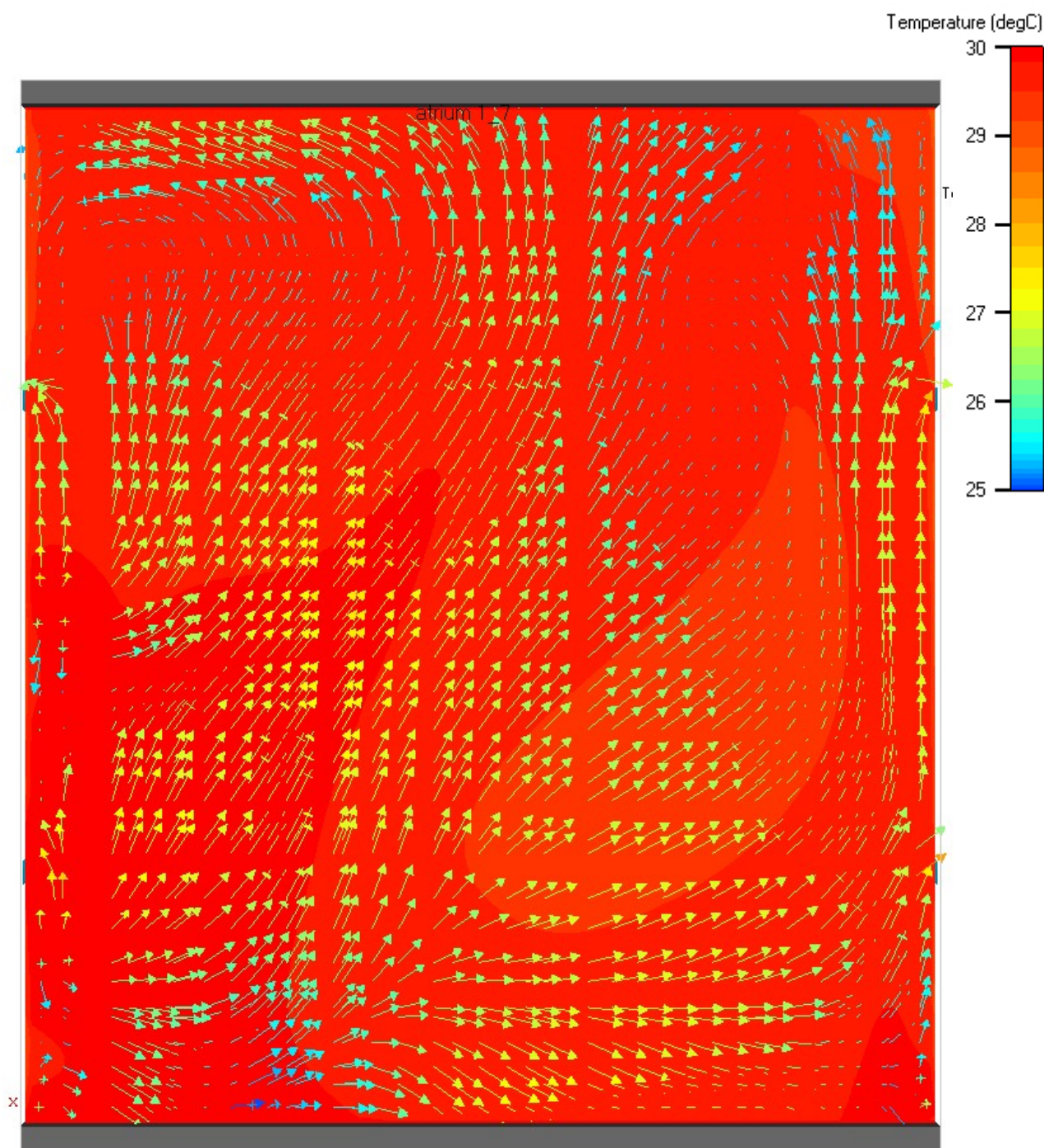
ODVĚTRÁNÍ TEPELNÉ ZÁTĚŽE

Návrhem pro řešení odvodu tepelné zátěže z prostoru atria se ukázalo jako výhodné odvádět vzniklou škodlivinu – teplo; dodatečným provětráním prostoru pod střechou. Teplý vzduch generovaný pobytem lidí v pobytové oblasti atria a účinkem sluneční radiace stoupá ke stropu. Odsud je odsáván vzduchotechnickými výustkami, kterým se účinnost odsávání se vzdálenosti snižuje. Dochází pak k indukci teplého vzduchu do prostoru atria, čím neprospívá vnitřnímu mikroklimatu.

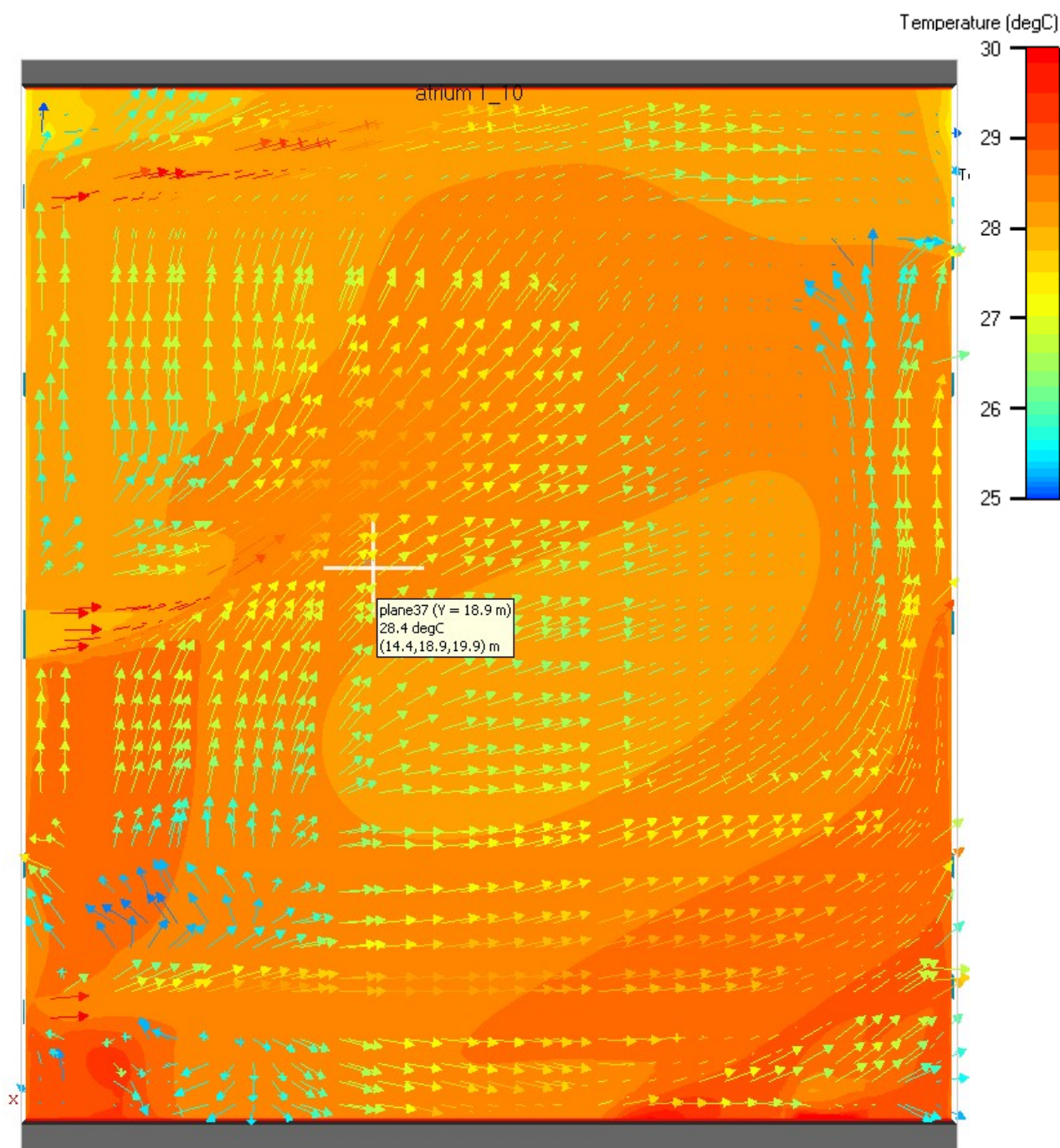
Proto byly navrženy odtahové ventilátory rozložené po jedné straně atria pod stropem s odvodem vzduchu na střechu. Naproti nim budou rozloženy otvory jako přívod větracího vzduchu, čím se zabezpečí provětrání podstropního prostoru (obr. 4a-c).



Obr. 4a: Rozmístnění prvků odvětrání podstropního prostoru atria

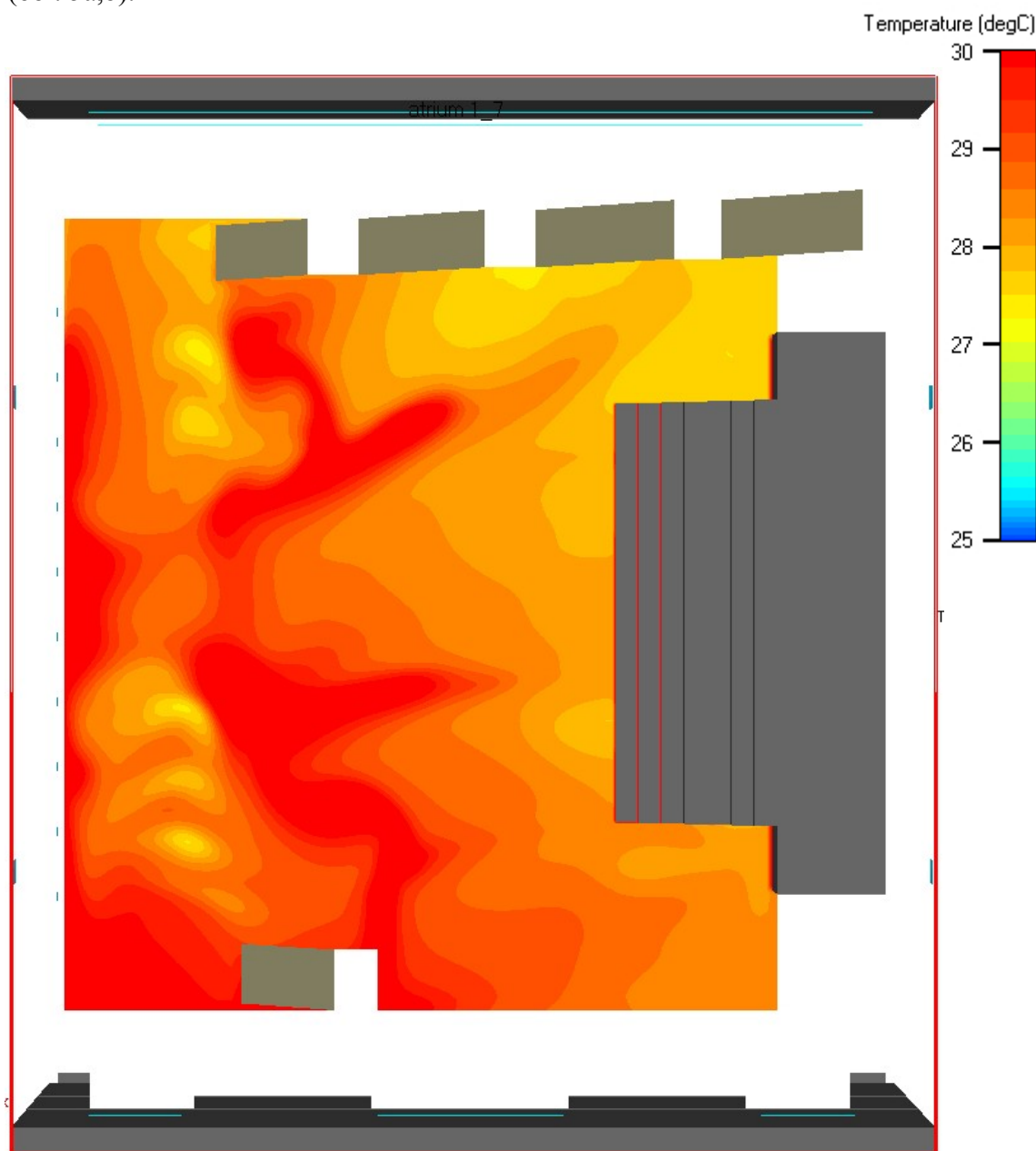


Obr. 4b: Pohled zhora na teplotní pole a vektory proudění vzduchu v podstropní oblasti ($H=19\text{m}$) v případě neodvětrávání

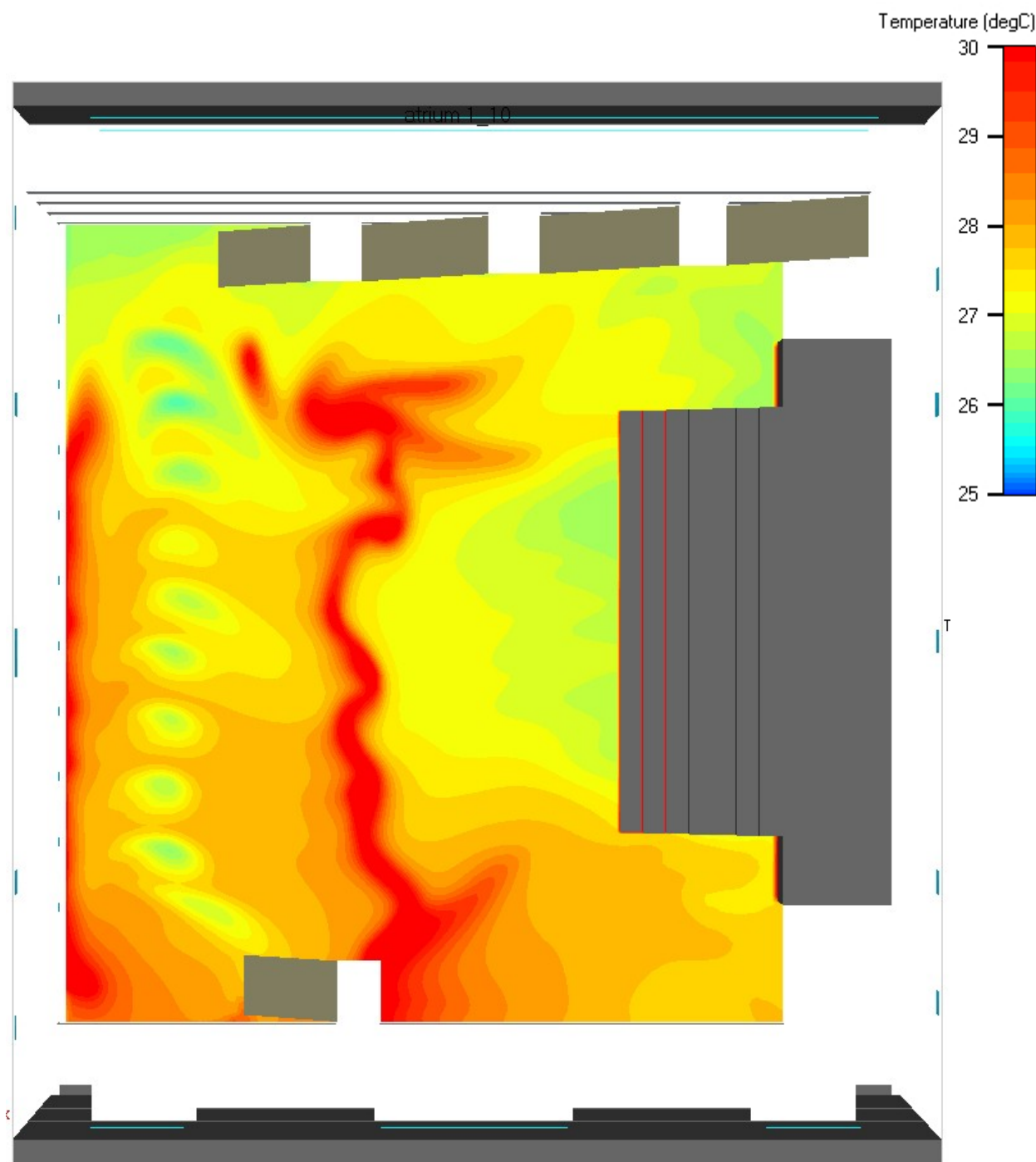


Obr. 4c: Pohled zhora na teplotní pole a vektory proudění vzduchu v podstropní oblasti ($H=19\text{m}$) v případě odvětrávání $20000\text{ m}^3/\text{h}$ venkovního vzduchu - odtahové ventilátory vpravo

V simulaci bylo počítáno s průtokem 20000 m³/h větracího venkovního vzduchu. Chod tohoto opatření v praxi by bylo řízené potřebou při nedostačujícím provětrání prostoru pomocí VZT. Odvětrání zátěže akumulované pod stropem má pozitivní vliv na tvorbu mikroklimatu v pobytových oblastech (obr. 5a,b).



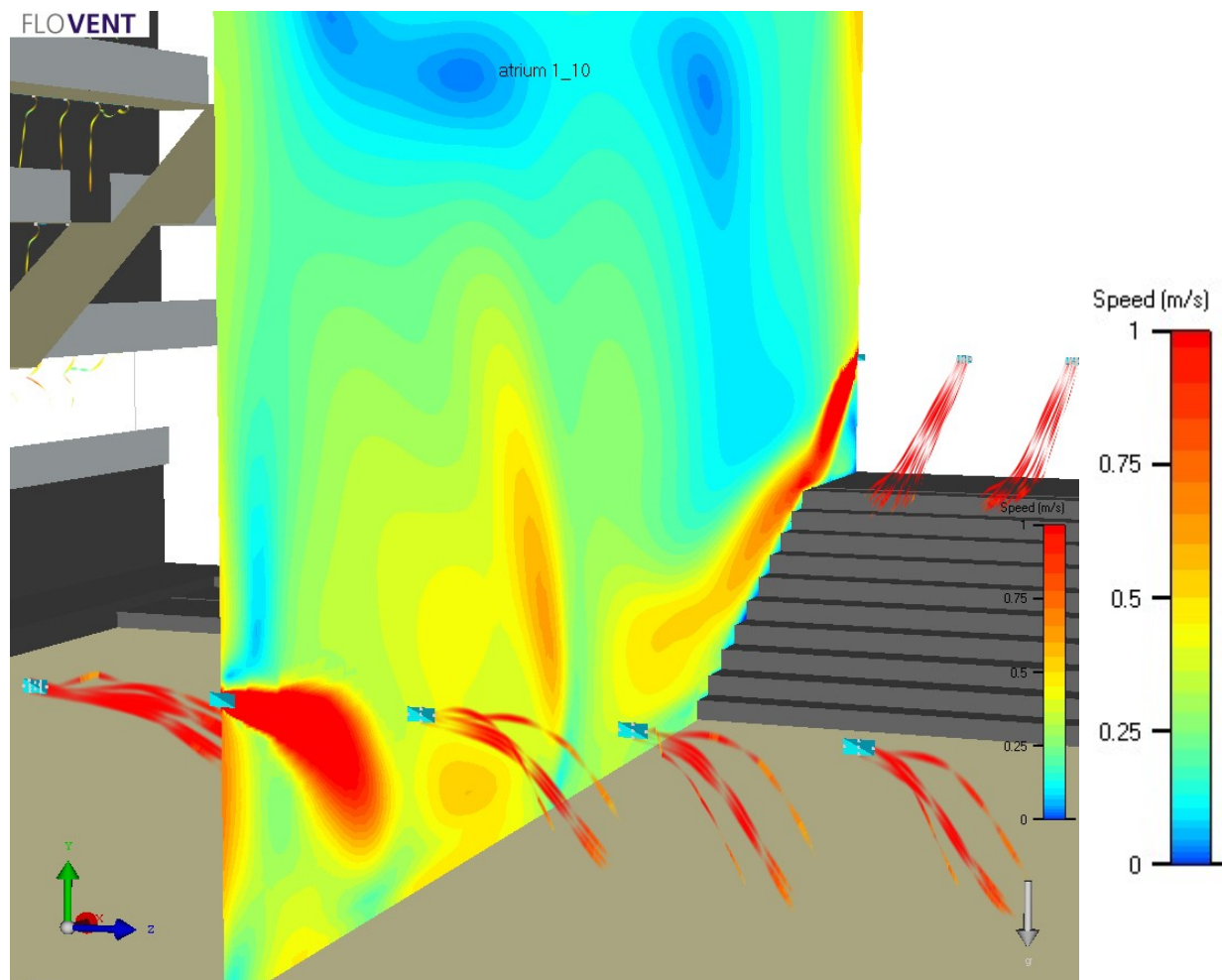
*Obr. 5a: Pohled zhora na teplotní pole v pobytové zóně atria (H=1,7m)
v případě neodvětrávání podstropní oblasti*



Obr. 5b: Pohled zhora na teplotní pole v pobytové zóně atria ($H=1,7m$)
v případě odvětrávání podstropní oblasti $20000\text{ m}^3/h$ venkovního vzduchu

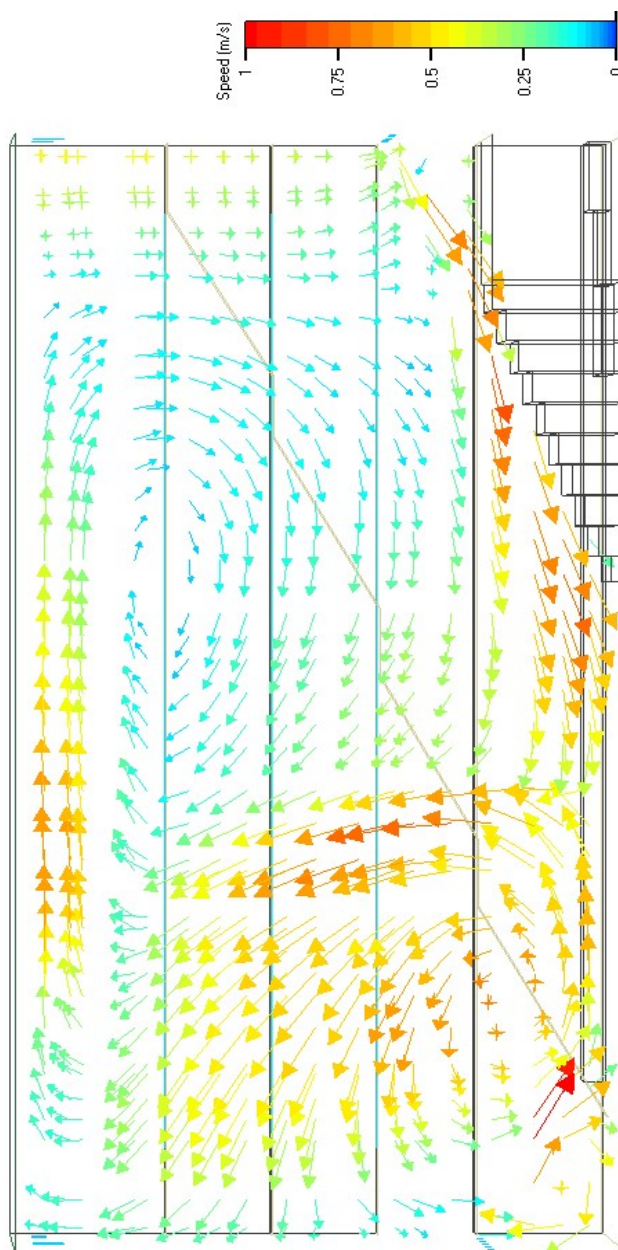
SMĚROVÁNÍ DÝZ

V průběhu procesu simulací bylo také optimalizováno nasměrování dýz tak, aby podporovali tvorbu příznivého mikroklimatu v pobytové zóně atria. Dosah proudu s optimální rychlosti společně s teplotou vzduchu a radiací okolí působí na tepelnou pohodu člověka v daném prostoru. Jako vhodné nastavení vypadá odklonění dýz v 1.NP od horizontální roviny o 15° a dýzy v 2.NP odkloněné o 20°. Takto nasměrované dýzy neobtěžují průvanem lidi v pobytové zóně a zabezpečují správnou distribuci v daném prostředí. Pro porovnání uvádím dosah proudu dýz nasměrovaných a nasměrovaných dle pokročilejšího simulačního řešení (obr. 6). Na výtoku z dýz byla rychlost 6,5 m/s při průtoku 1500 m³/h.



Obr. 6: Výsledek optimalizace nasměrování dýz; zobrazeno pomocí pole rychlostí a proudnic
13(46)

Ze simulací je zřejmé, že střetem těchto proudů vzduchu z protilehlých dýz se vytvoří stoupavé proudění (obr. 7), které odvádí tepelnou zátěž z pobytové oblasti směrem nahoru pod strop. Takový stav je příznivější a efektivnější - za předpokladu, že nedochází k obtěžování průvanem, než kdy by bylo teplo odváděno jenom přirozenou konvekcí, nebo by bylo rozptýleno do pobytové zóny mísením se s okolním vzduchem.



Obr. 7: Obráz proudění v prostoru atria ($z=16,8\text{m}$)
k vidění stoupavý proud vzduchu

HODNOCENÍ VNITŘNÍHO MIKROKLIMATU

Kritérii pro zhodnocení tepelně vlhkostní složky interního mikroklimatu, zejména pak její části tepelné pohody, je celá řada. Hodnocení mikroklimatu dle normy ČSN EN ISO 7730, 1997. *Mírné tepelné prostředí. Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody* umožňuje mikroklima jednotně hodnotit pomocí výpočtu ukazovatelů PMV, PPD a operativní teploty t_o .

- Ukazatel PMV (predicted mean vote = předpokládaný průměrný hlas) předpovídá střední tepelný pocit u velké skupiny lidí vystavených těmtož prostředí. Je založen na tepelné rovnováze lidského těla, které je dosaženo, je-li vnitřní tepelná produkce lidského těla rovna tepelné ztrátě do okolního prostředí.

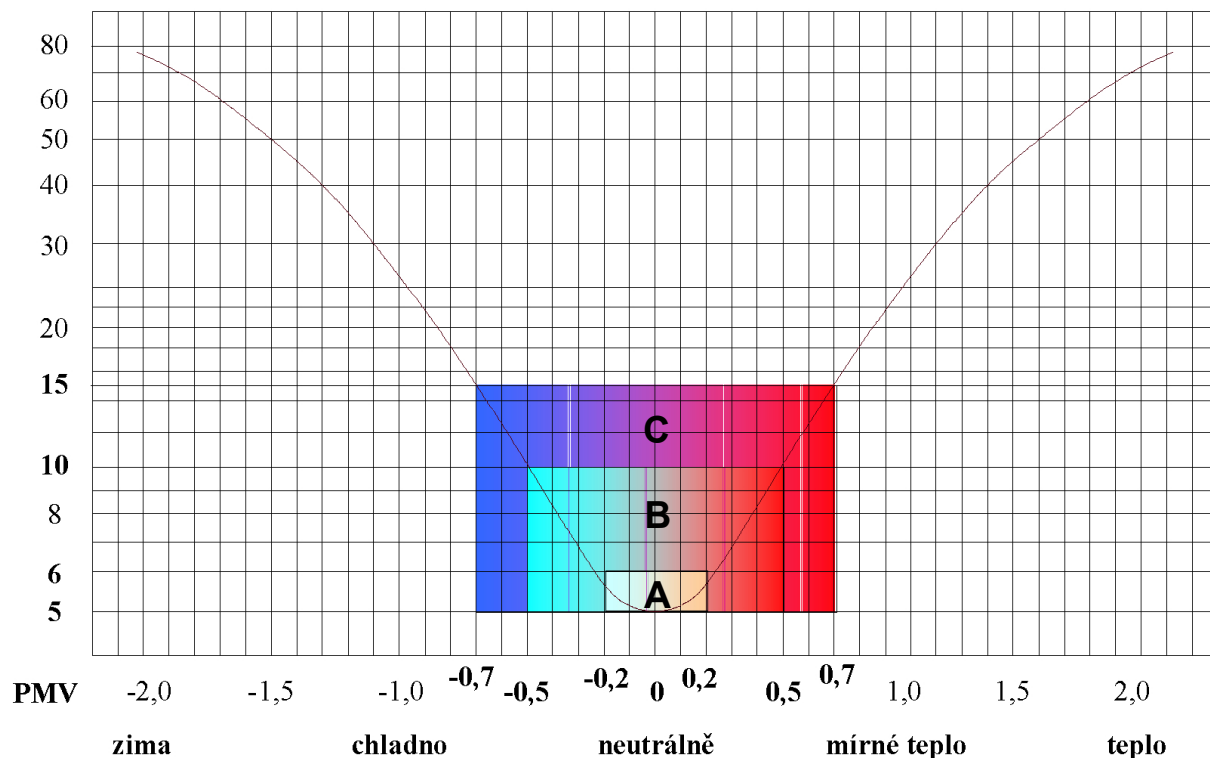
Ukazatel PMV nabývá hodnot v rozmezí -2 až +2, kde:

- 0 je neutrální pocit (optimální stav tepelné rovnováhy)
- *záporné hodnoty* úroveň pocitu chladu až zimy
- *kladné hodnoty* úroveň pocitu tepla až horka

Ukazatel PMV je pak výchozí pro určení procentuálního podílu nespokojených osob s daným typem prostředí, který se označuje PPD. Vzájemná závislost ukazatelů PMV a PPD je zobrazena na obr. (obr. 8).

- *Ukazatel PPD* (predicted percentage of dissatisfied) předpovídá procentuální podíl osob z velké skupiny lidí, kteří budou v daném prostředí pravděpodobně pociťovat přílišné teplo nebo chlad. Statisticky dáno je minimální možné procento nespokojených 5%.

PPD (%)



Obr. 8: Funkční závislost mezi ukazovateli PMV a PPD

Tepelná pohoda je závislá nejenom na fyzikálních podmínkách daného prostředí, ale odvíjí se také podle fyzických, psychických a ostatních vlivů, které působí na lidský organismus. Předpokladem dosažení tepelné pohody je rovnováha tepelného režimu člověka, která je funkcí:

M – energetický výdej	(met) (1met = 58,2W/ m ²)
I _{cl} – tepelný odpor oděvu	(clo) (1clo = 0,155m ² .K/W)
p _w – parciální tlak vodní páry	(Pa)
t _a – teplota vzduchu	(°C)
t _r – střední radiační teplota okolních ploch	(°C)
v _{ar} – relativní rychlost proudění vzduchu vůči lidskému tělu	(m/s)

Podle parametrů tepelně vlhkostní složky interního mikroklimatu a její části tepelné pohody, lze vnitřní prostředí rozdělit do tří základních kategorií:

- Kategorie A** – z hlediska tepelně vlhkostního mikroklimatu prostředí zcela vyhovující
- Kategorie B** – z hlediska tepelně vlhkostního mikroklimatu prostředí vyhovující s lokálními pocity mírného chladu nebo mírného tepla.
- Kategorie C** – tepelně vlhkostní mikroklima s přípustnými parametry, kde osoby pociťují převážně mírný chlad popř. mírné teplo.

Při hodnocení mikroklimatu pomocí ukazatelů PMV a PPD byli v simulaci při jejich výpočtu použity následující předpoklady:

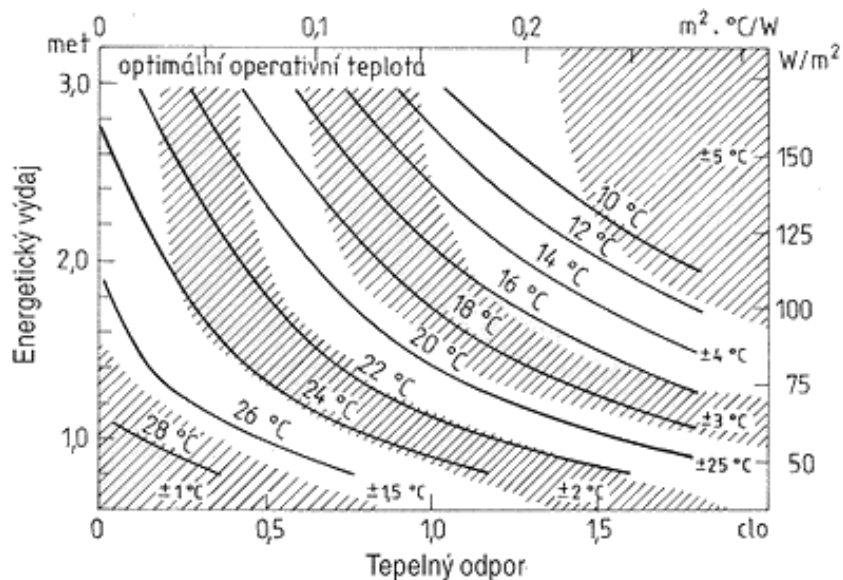
kategorie práce – lehká	produkce tepla = 75 W/m ²
druh oděvu – jednovrstvý	tepelný odpor oděvu = 0,078 m ² K/W (0,5 clo)

- **Operativní teplota t_o [°C]** je vypočtená hodnota a je definována jako jednotná teplota uzavřeného prostoru (tj. prostoru o stejné teplotě vzduchu i stejné střední radiační teplotě), černého z hlediska radiace, ve kterém by lidské tělo sdílelo konvekcí i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném, teplotně nesourodém prostředí [ČSN EN ISO 7730]. Z hlediska fyzikálního je operativní teplota veličina, která vyjadřuje sálavou a konvekční složku sdílení tepla mezi člověkem a okolním prostředím.

Norma ČSN EN ISO 7730 pro hodnocení tepelné pohody popisuje, mimo jiné, podmínky tepelného mikroklimatu přijatelného pro tepelnou pohodu člověka. Mezi tyto podmínky patří i doporučené operativní teploty pro 90% spokojenost lidí v daném interiéru, které jsou patrné z tabulky níž a též

z obr. 9, kde jsou znázorněny optimální operativní teploty (odpovídající $PMV = 0$) jako funkce tělesné aktivity a oděvu.

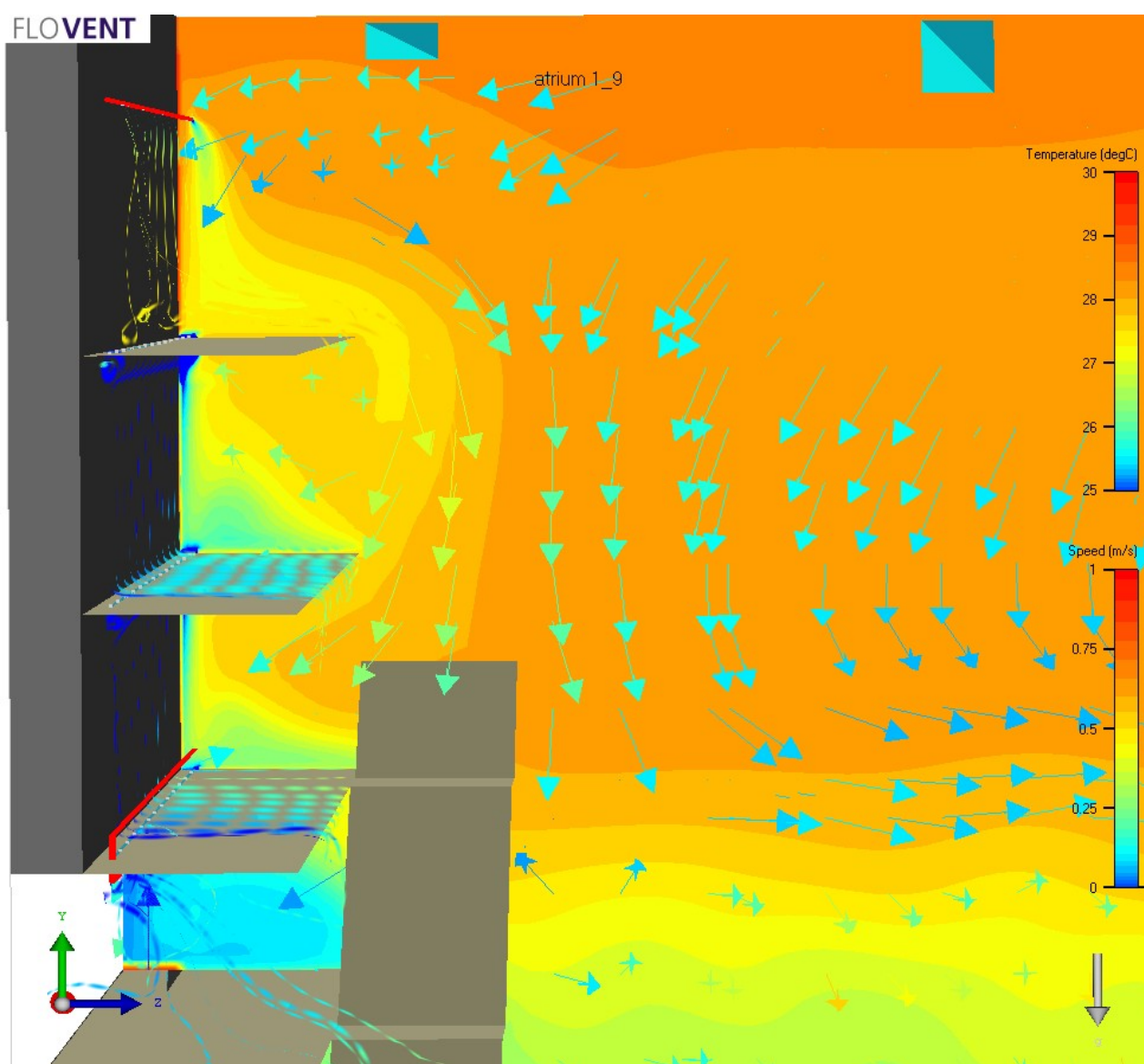
Období	Izolace oblečení [clo]	Stupeň aktivity [met]	Optimální operativní teplota [°C]	Přípustné rozmezí operativní teploty [°C]
Zima	1	1,2	22	20 až 24
Léto	0,5	1,2	24,5	23 až 26



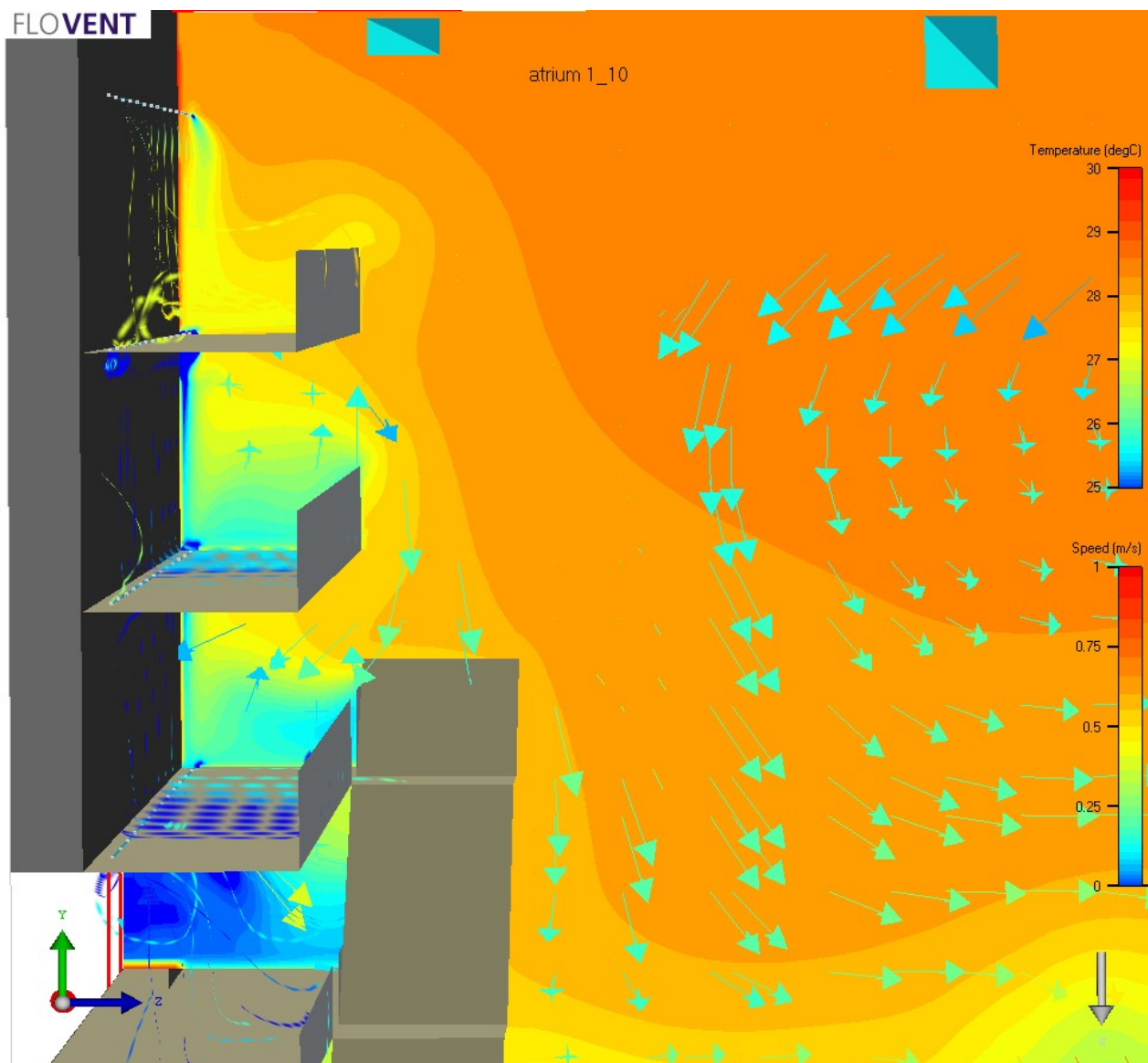
Obr. 9: Optimální operativní teploty jako funkce tělesné aktivity a oděvu

FUNKČNOST ZÁBRADLÍ

V simulacích bylo z počátku uvažováno kolem pochozích pasáží se zábradlím dokonale průvzdušným. Vzduch přiváděn do pasáží volně odcházel pryč a padal dál do pobytové zóny atria. Ve smyslu vytvořit vhodnější mikroklima také v pasážích je možné použít neprůvzdušné, plnější zábradlí, které oddělí prostory a vytvoří tak jiný obraz proudění. Čerstvý vzduch v pasážích se tak prosadí lépe, než bude indukovan hlavním proudem z atria (obr. 10a,b).

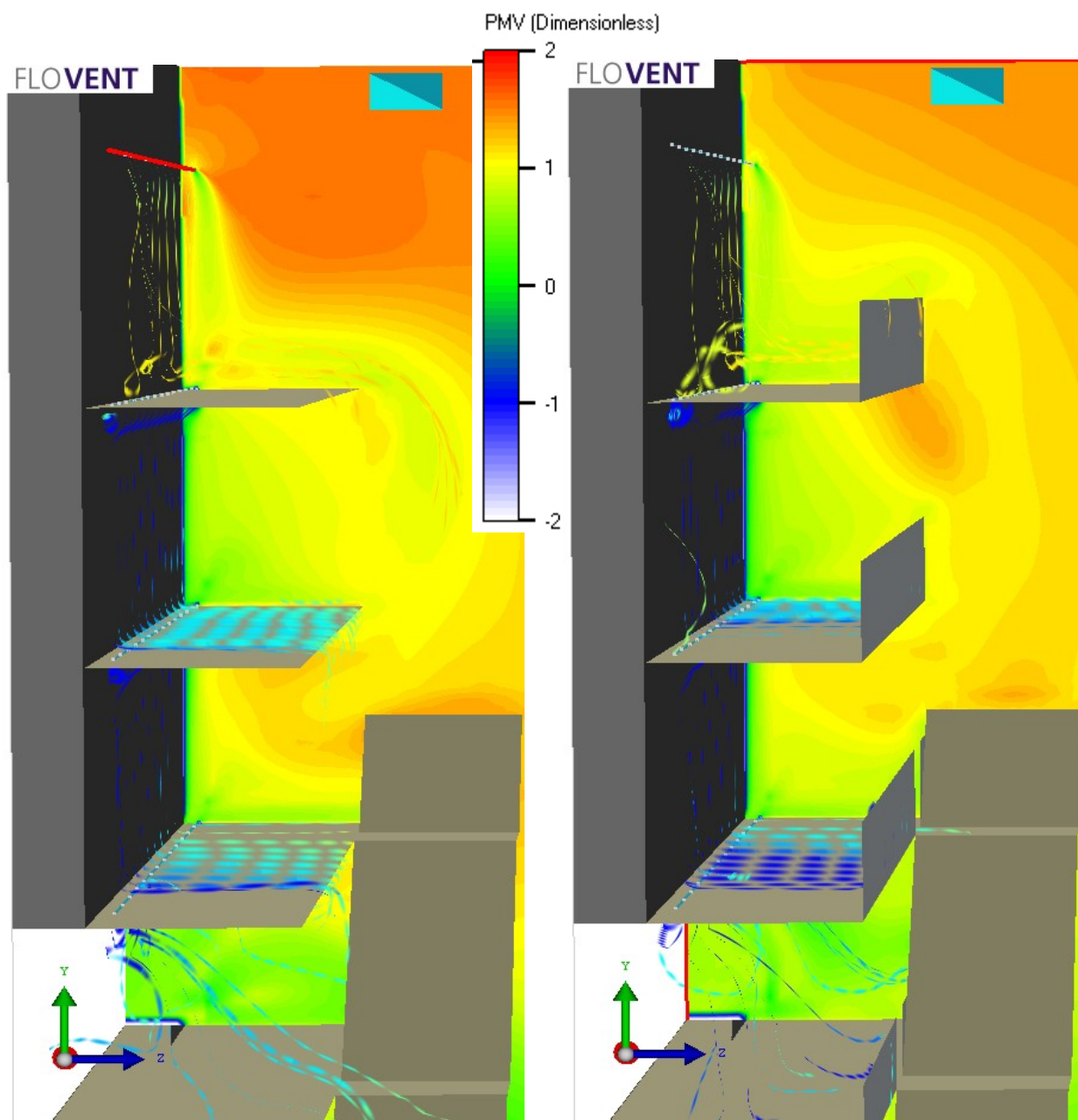


Obr. 10a: Proudové a teplotní pole v pasážích v případě průvzdušného zábradlí

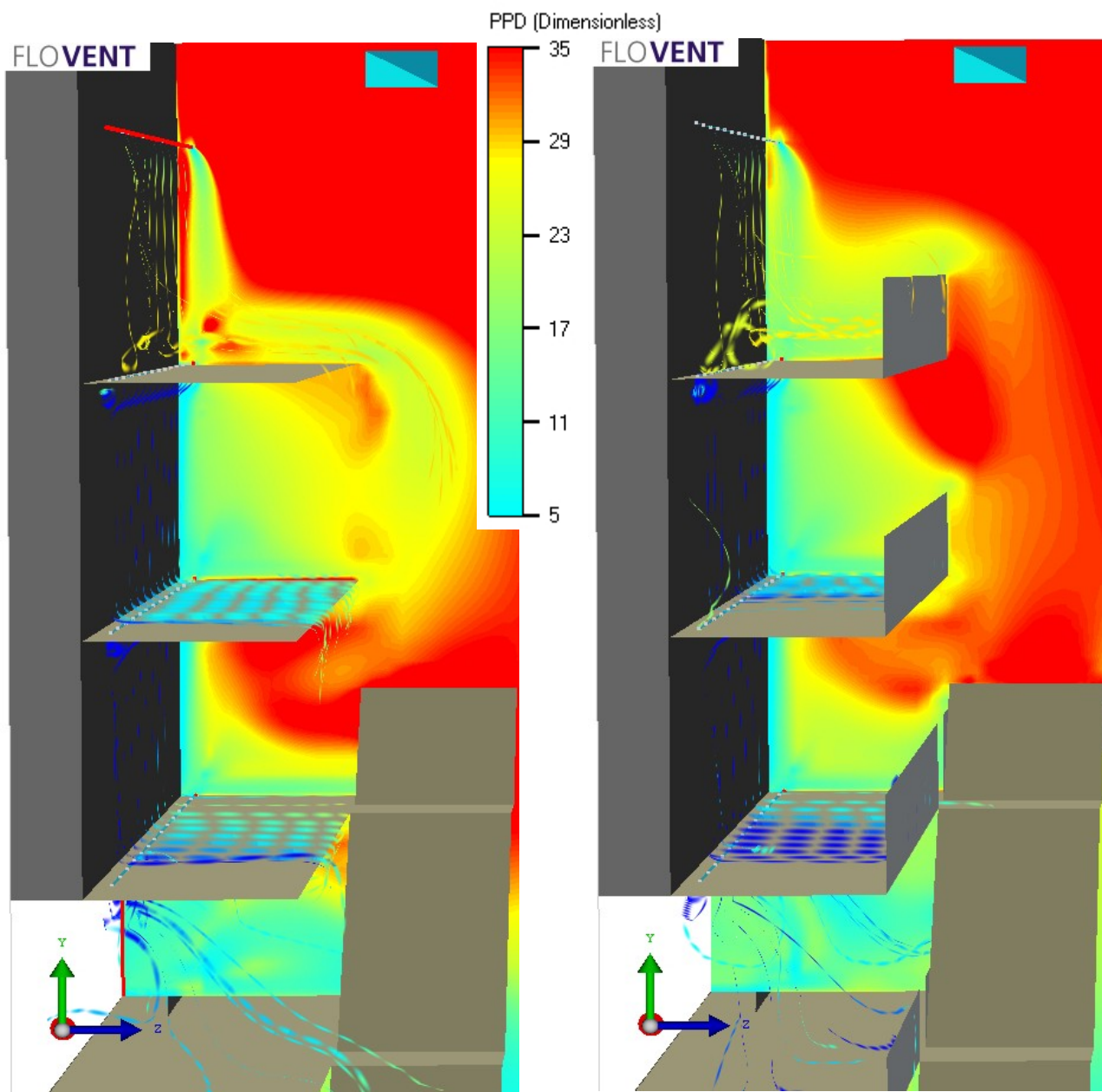


Obr. 10b: Proudové a teplotní pole v pasážích v případě neprůvzdušného zábradlí

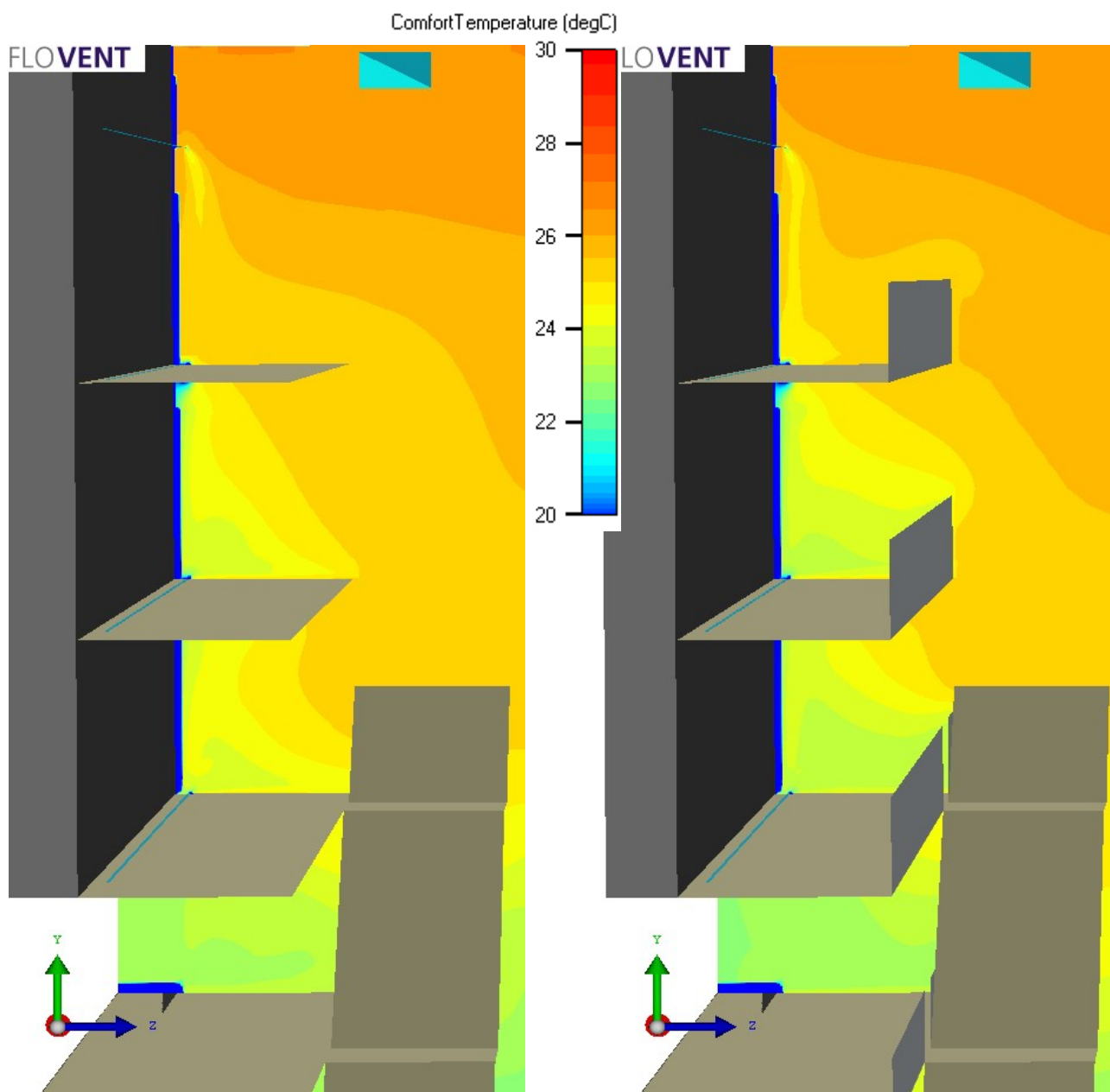
Teplotní pole ukazují na příznivější stav pro variant, kdy bylo použité plné zábradlí. Interní mikroklima vytvořené v pasážích je zhodnoceno pomocí zmiňovaných ukazovatelů na následujících řezech (obr. 11-13).



Obr. 11: Srovnání tepelných pocitů pomocí ukazatele PMV v závislosti na druhu zábradlí



Obr. 12: Srovnání procenta nespokojených lidí s daným prostředím pomocí ukazatele PPD v závislosti na druhu zábradlí

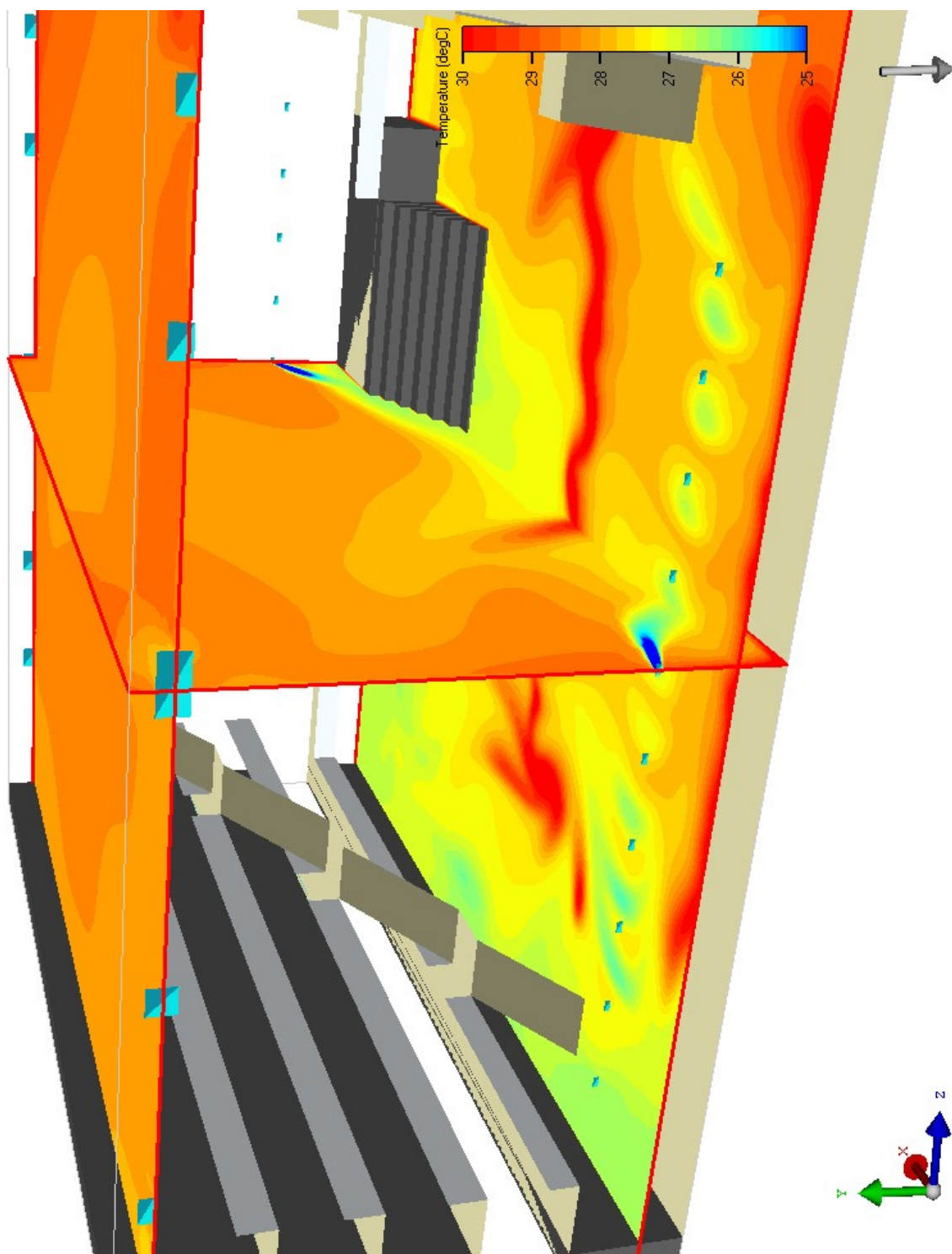


Obr. 13: Srovnání operativních teplot pasáží v závislosti na druhu zábradlí

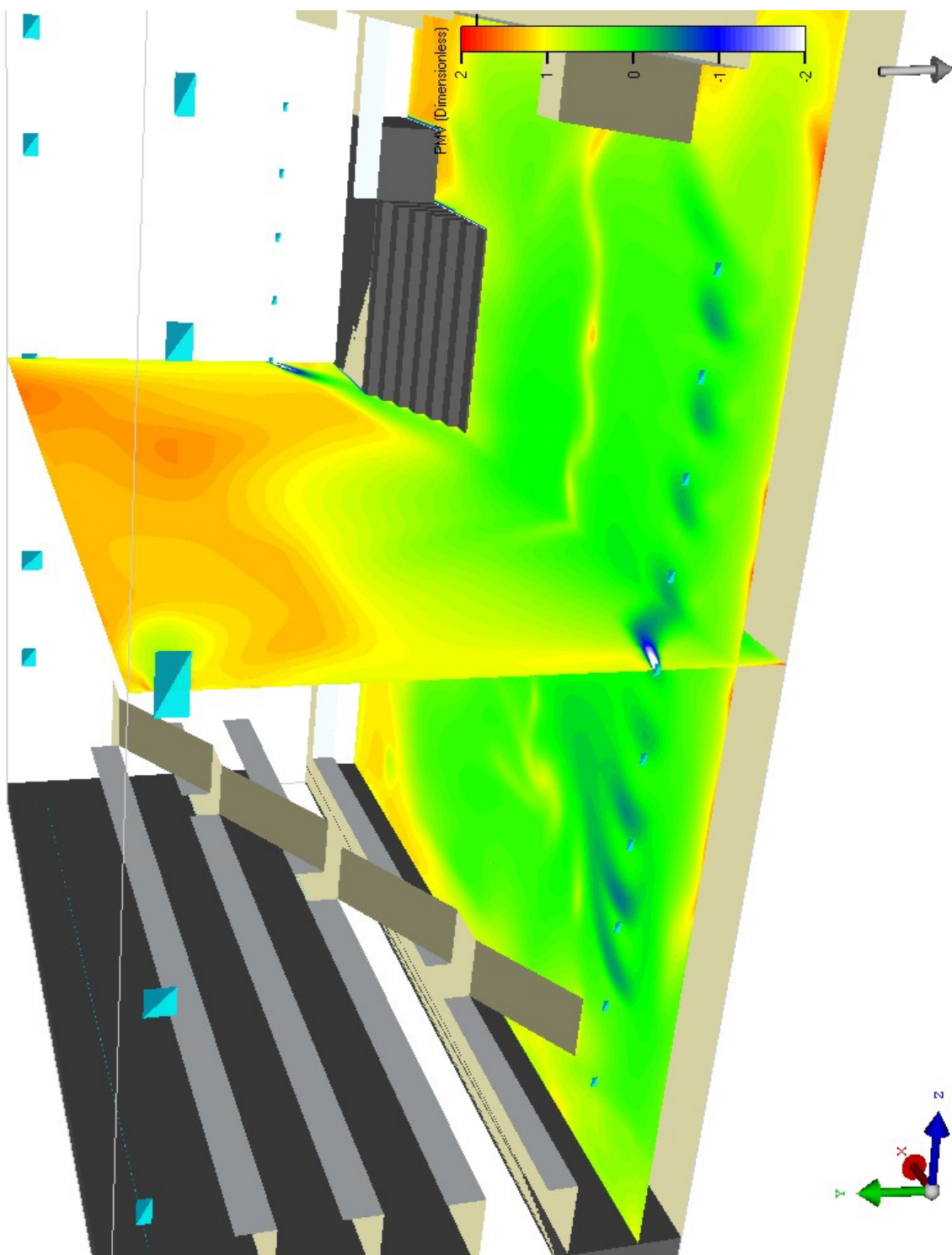
MIKROKLIMA ATRIA

Podobně jako u pasáže lze také v pobytové oblasti atria zhodnotit stav tepelného mikroklimatu pomocí koeficientů PMV, PPD a operativní teploty. V rámci optimalizace simulačního řešení, které v současnosti obsahuje popisovanou tepelnou zátěž od lidí a slunce, provětrání horní části podstřešního prostoru, přívod chladného a odtah znehodnoceného vzduchu pomocí vzduchotechniky, správné nasměrování dýz a přítomnost plného zábradlí. Tyto faktory mají za následek zlepšení vnitřního mikroklimatu nejen v pobytové oblasti atria.

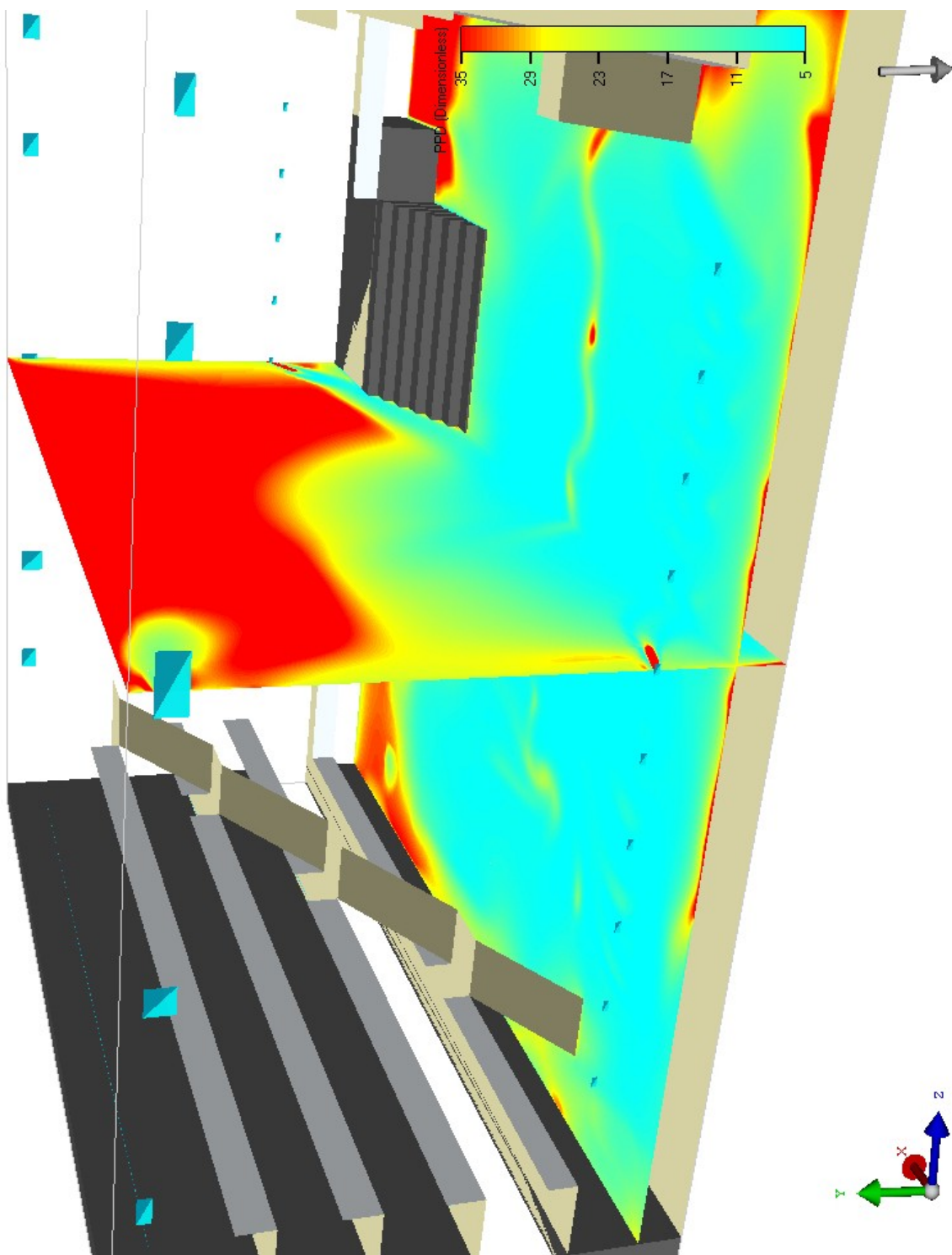
Rozložení teplot v porovnání s původním navrhovaným řešením je mnohem příznivější (obr. 14). Také pocitově je interiér celkem přínosně zhodnocen ukazateli PMV a PPD (obr. 15 a 16), takže nedochází k přílišným pocitům chladu nebo horka. V daném prostředí bude za daných podmínek nespokojených přibližně do 10% lidí, takže prostor lze zařadit do kategorie A, teda jako prostředí zcela vyhovující po stránce tepelno vlhkostního mikroklimatu.. Operativní teplota se pohybuje v přípustných mezích pro letní období uváděných v normě (obr. 17).



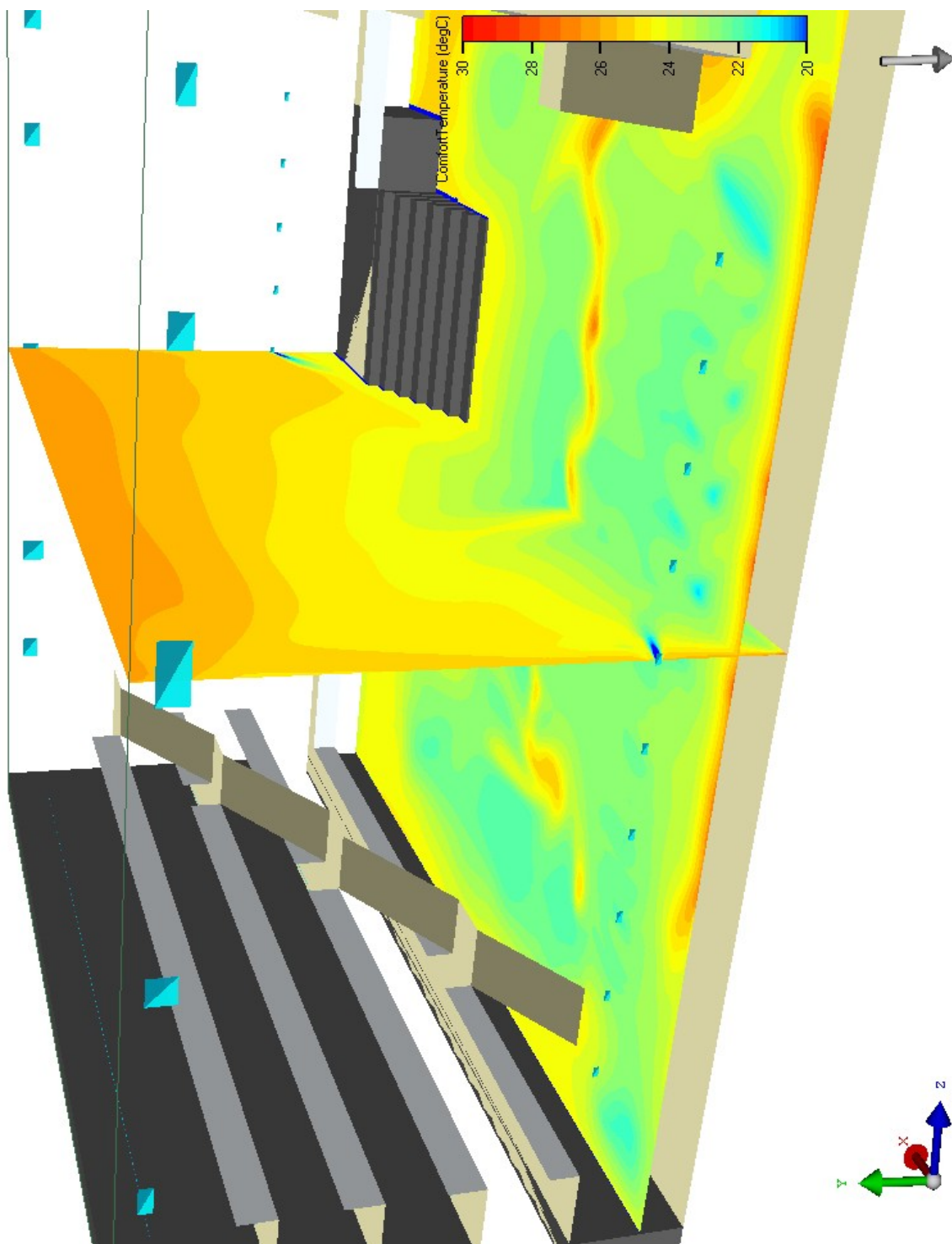
Obr. 14: Teplotní pole v optimalizovaném prostoru atria



Obr. 15: Pole hodnot tepelných pocitů pomocí ukazovatele PMV v optimalizovaném prostoru atria



Obr. 16: Pole hodnot PPD ukazující procenta nespokojených lidí s daným prostředím
v optimalizovaném prostoru atria



Obr. 17: Pole operativních teplot v optimalizovaném prostoru atria

4. ZÁVĚR

Cílem provedených simulací bylo zhodnotit mikroklima prostoru atria a optimalizovat navržené vzduchotechnické řešení. Ukázalo se, že snížené množství přiváděného vzduchu nebude postačující. Rovněž se ukázalo, že navyšováním množství vzduchu se problematické prostředí proskleného atria nevyřeší. Bylo vyhotoveno několik simulačních variant a úprav, které byly optimalizovány tak, aby byly pro vnitřní mikroklima prospěšné, což se také potvrdilo.

Mezi zásadní doporučení patří *stínění střešního prosklení* za účelem snížit solární radiaci dopadající na povrchy atria. Účinnější variantou, než rapidní navyšování větracího vzduchu se ukázalo *provětrávání podstropního prostoru* venkovním vzduchem za účelem odvodu vzniklého tepla v letním období. K další tvorbě mikroklimatu třeba *zvážit použití plných zábradlí* v prostorech pasáží a *správné natočení dýz*. Při dodržení vstupních okrajových podmínek a navržených řešení tvorby vhodného mikroklimatu je možné dle vykonaných simulací dosáhnout teplot v pobytových zónách mezi 25-28°C a příznivé hodnoty ukazatelů PMV a PPD hodnotících vnitřní mikroklima a tepelnou pohodu interiérů.

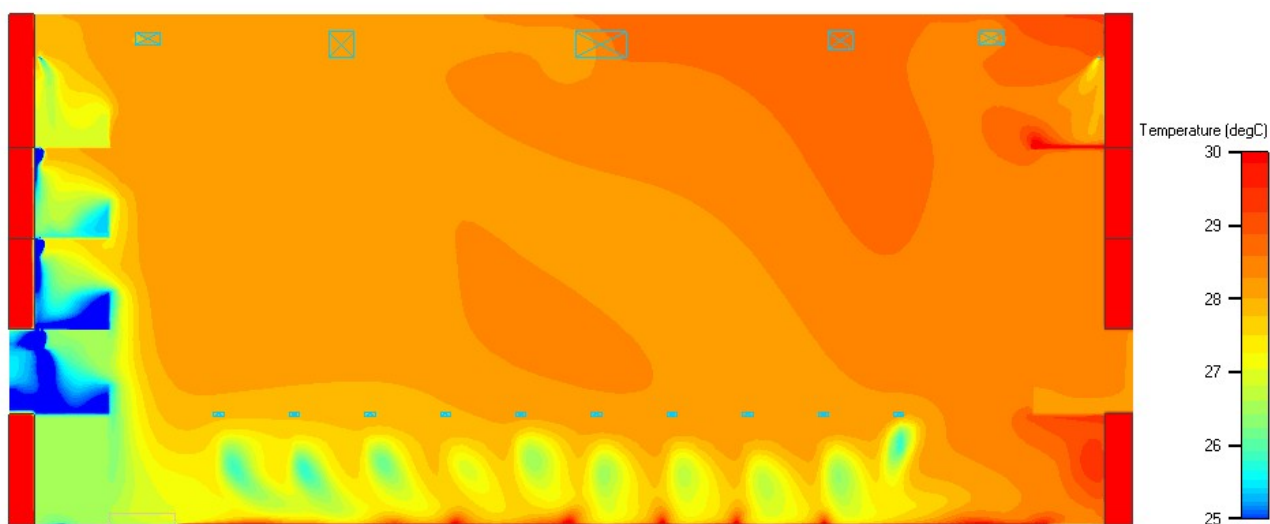
Simulační řešení je pravděpodobnostní výpočet vycházející z fyzikálních a matematických zákonů. Objektivní výsledek je závislý na okrajových podmínkách, které jsou dynamicky proměnné, a proto má změna na okraji řešeného prostoru vliv na chování veličin mikroklimatu uvnitř řešeného prostoru.

Další výstupy (mimo diskutovaný kontext) z optimalizovaného simulačního řešení mikroklimatu prostoru atria jsou uvedeny jako přílohy této zprávy.

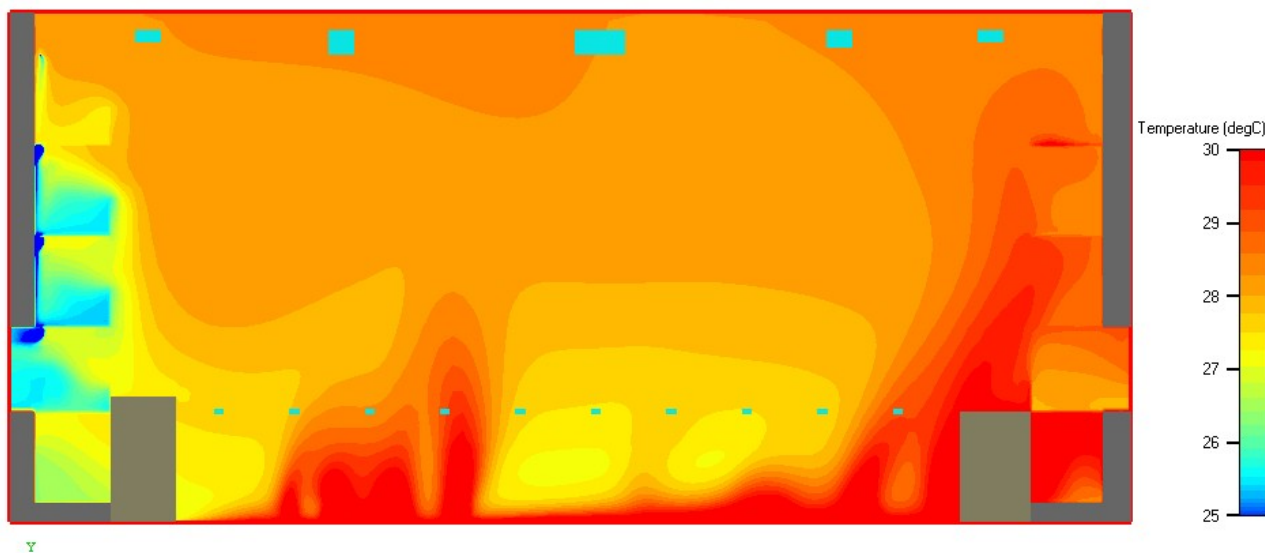
V Brně, dne 27.5.2010

Ing. Peter Podoliak

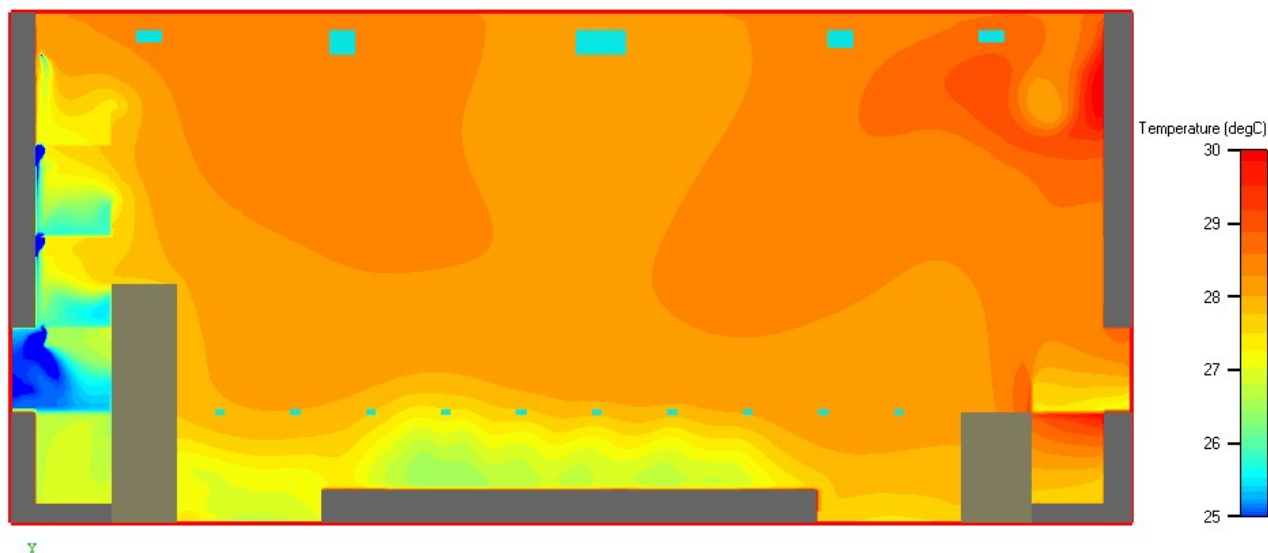
PŘÍLOHY



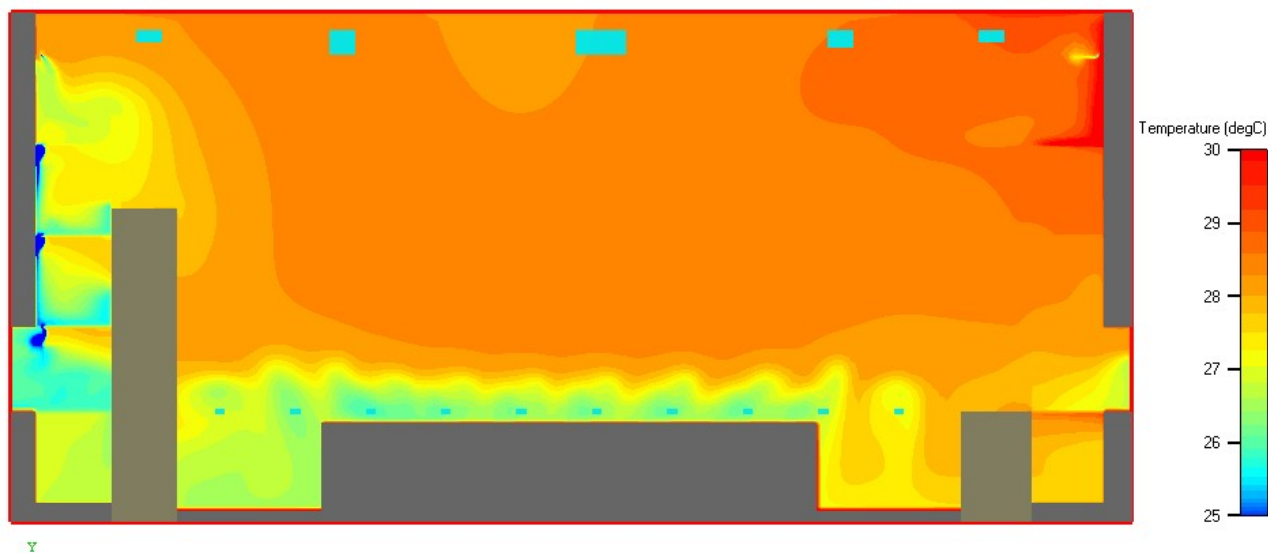
Příloha 1: Teplotní pole atria ($x = 5m$)



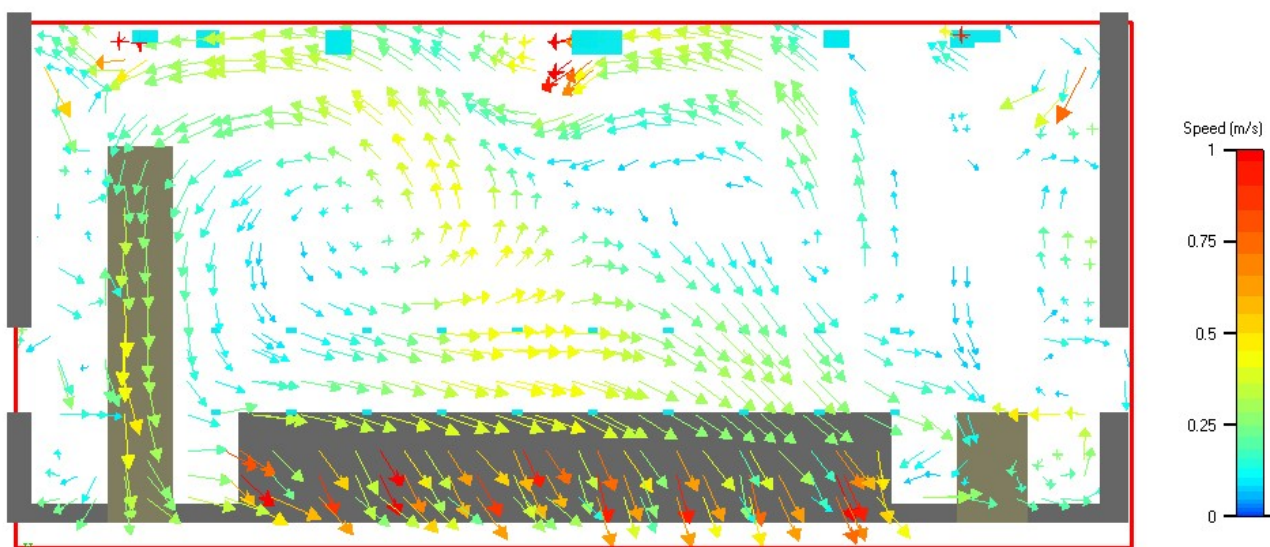
Příloha 2: Teplotní pole atria ($x = 15m$)



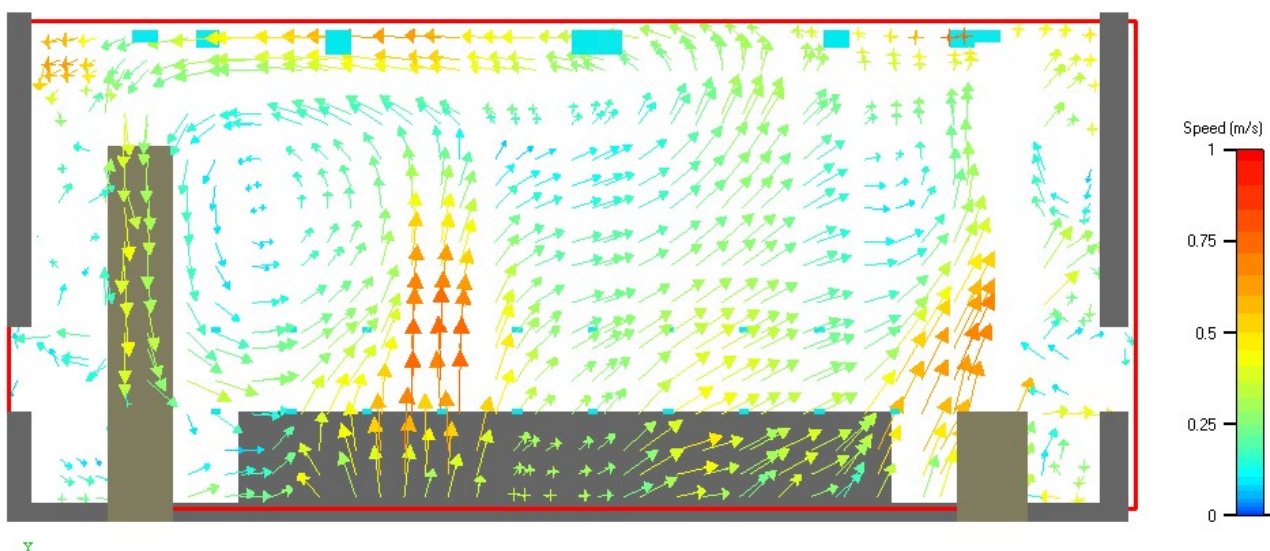
Příloha 3: Teplotní pole atria ($x = 25m$)



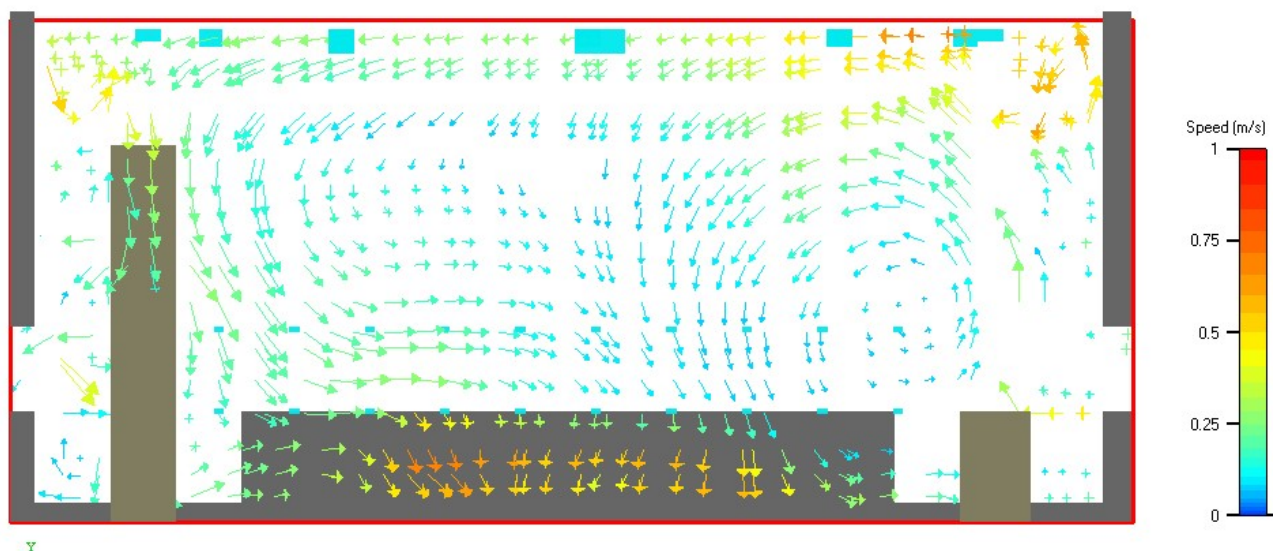
Příloha 4: Teplotní pole atria ($x = 32m$)



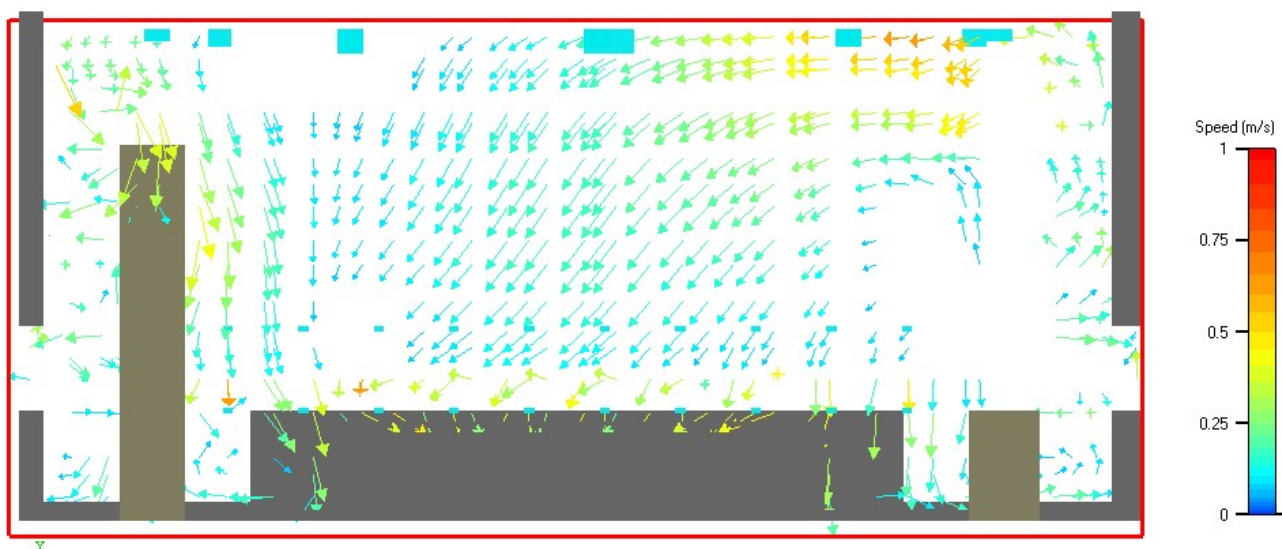
Příloha 5: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($x = 5m$)



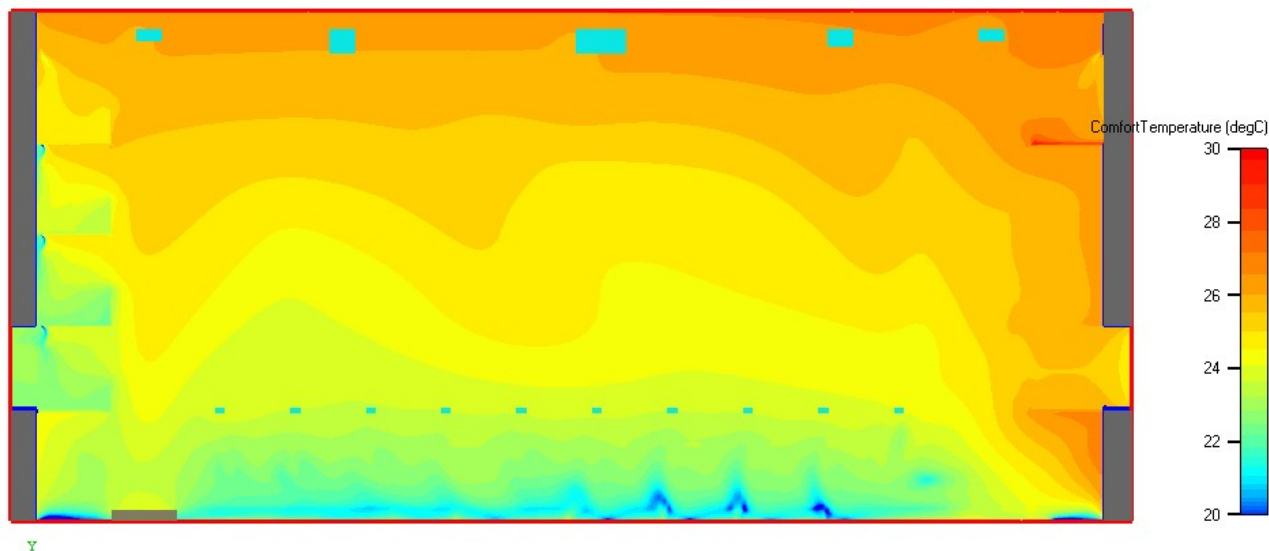
Příloha 6: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($x = 15m$)



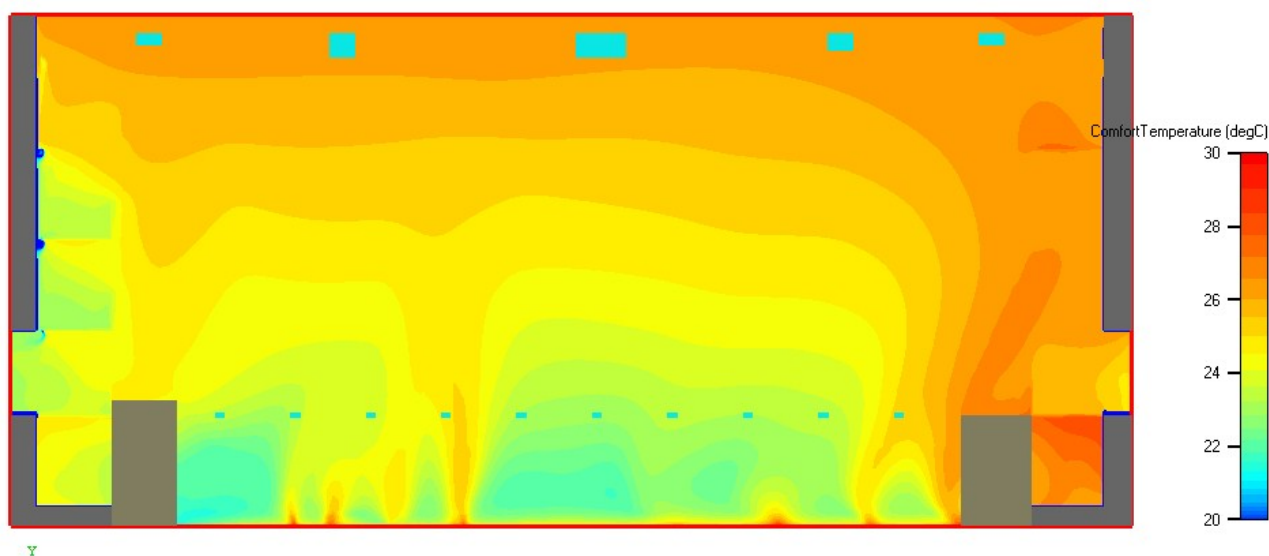
Příloha 7: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($x = 25m$)



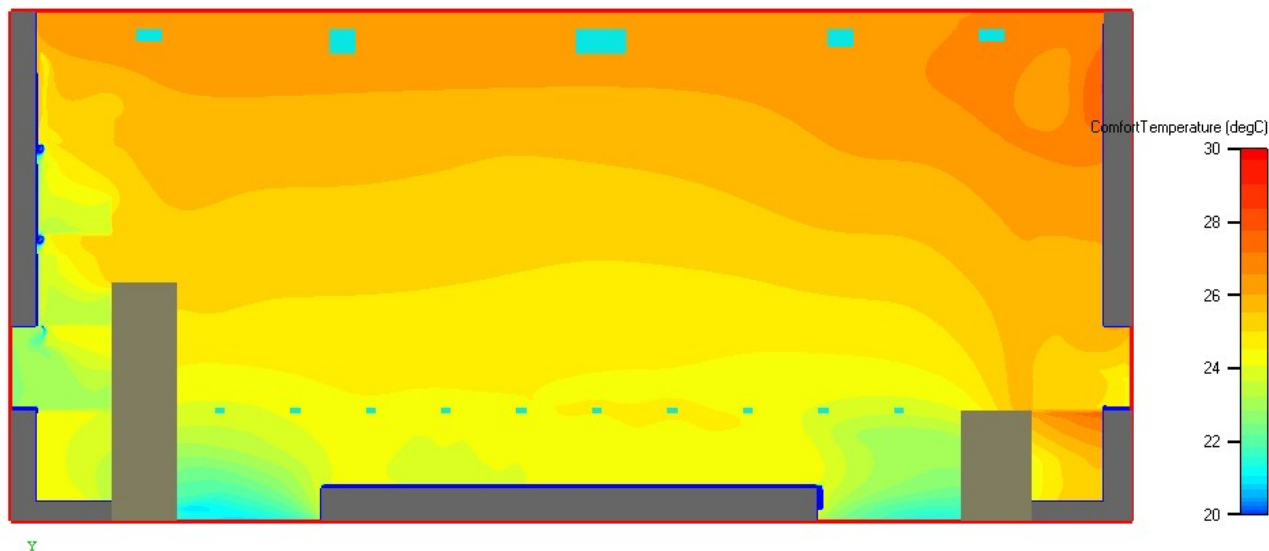
Příloha 8: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($x = 32m$)



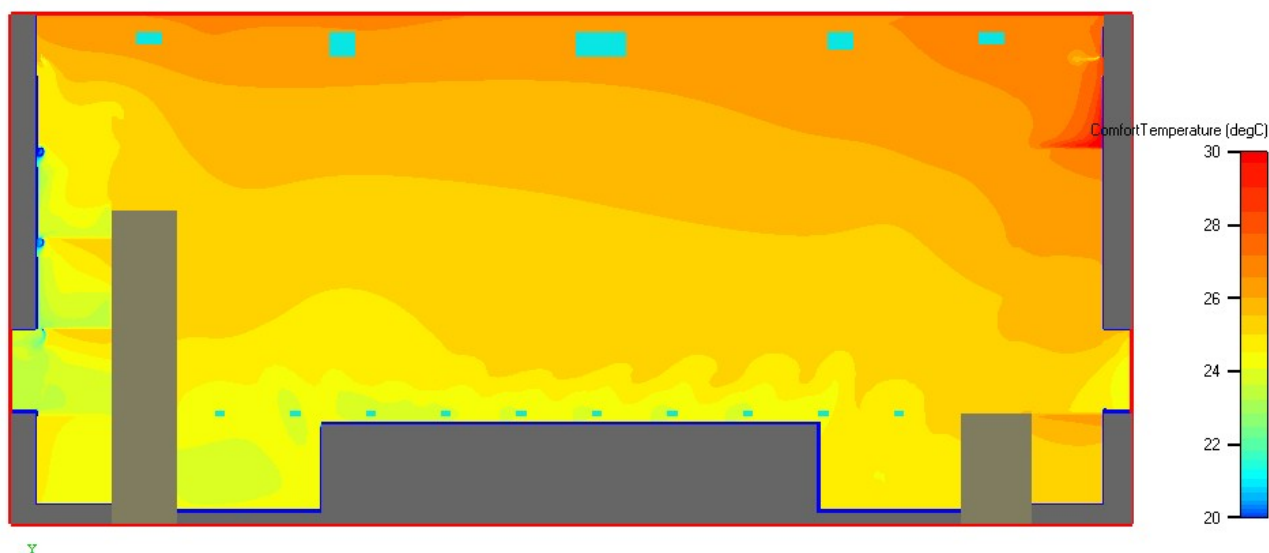
Příloha 9: Pole operativní teploty ($x = 5m$)



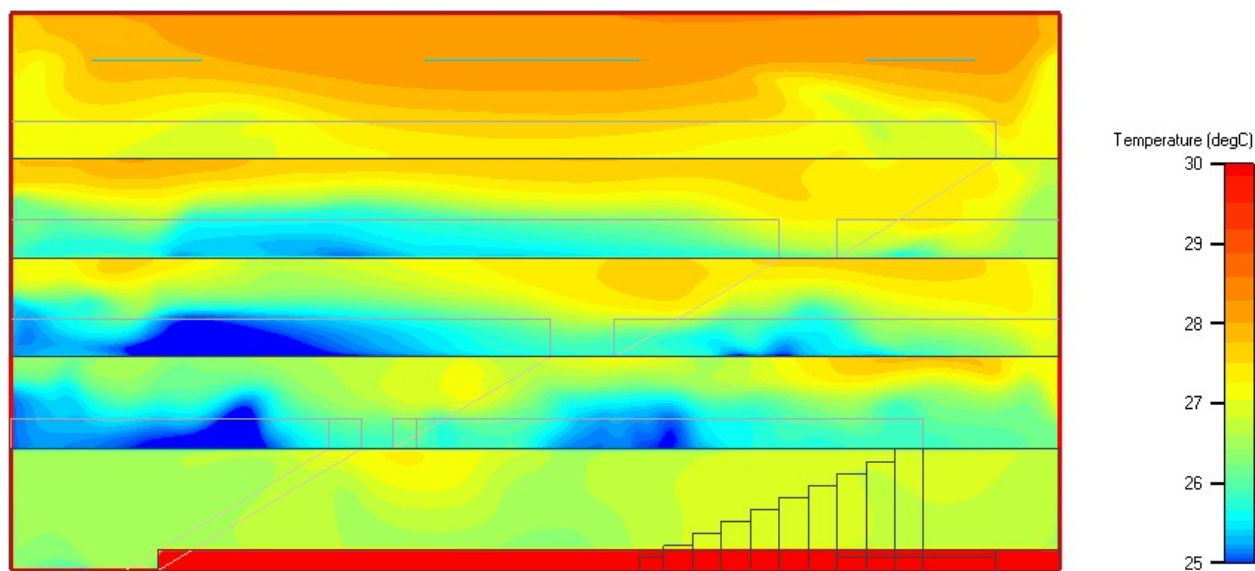
Příloha 10: Pole operativní teploty ($x = 15m$)



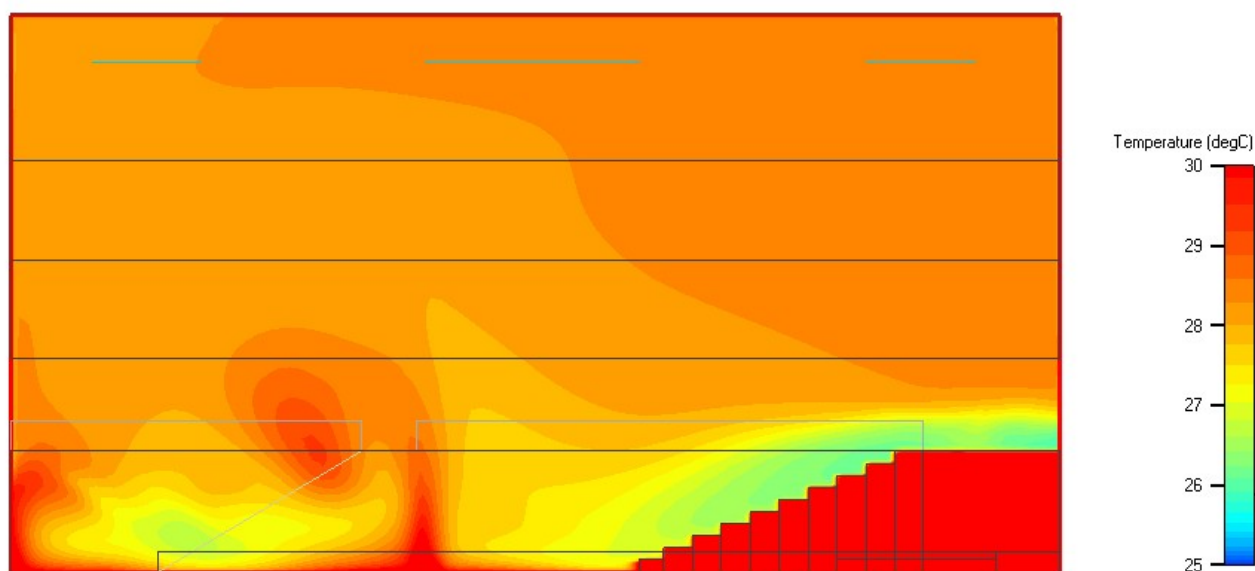
Příloha 11: Pole operativní teploty ($x = 25m$)



Příloha 12: Pole operativní teploty ($x = 32m$)

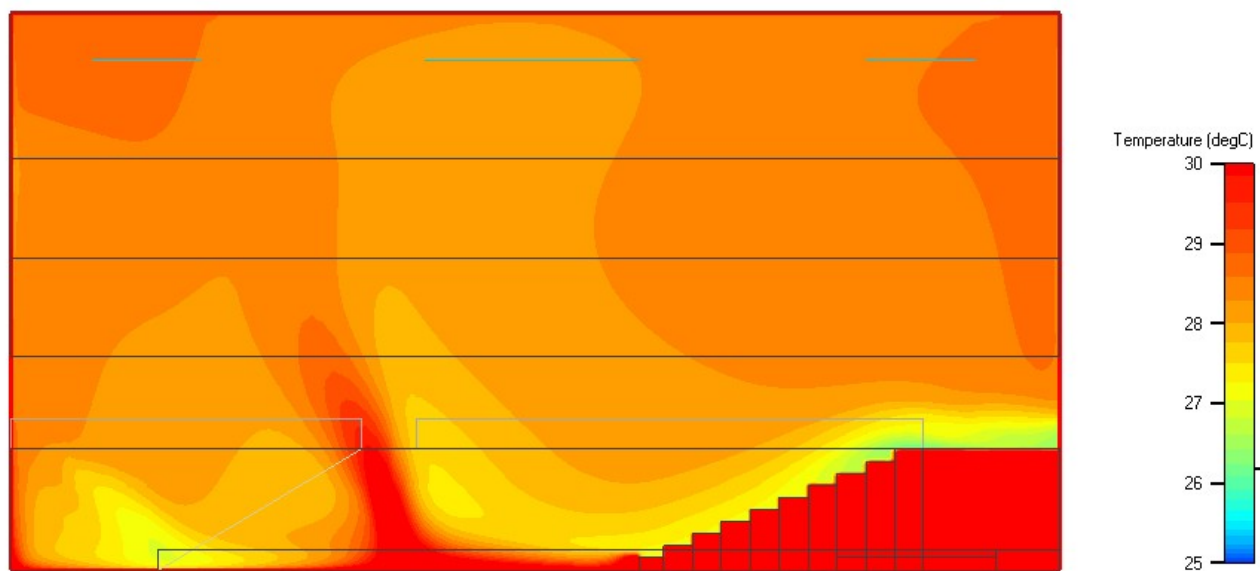


Příloha 13: Teplotní pole atria ($z = 2m$)

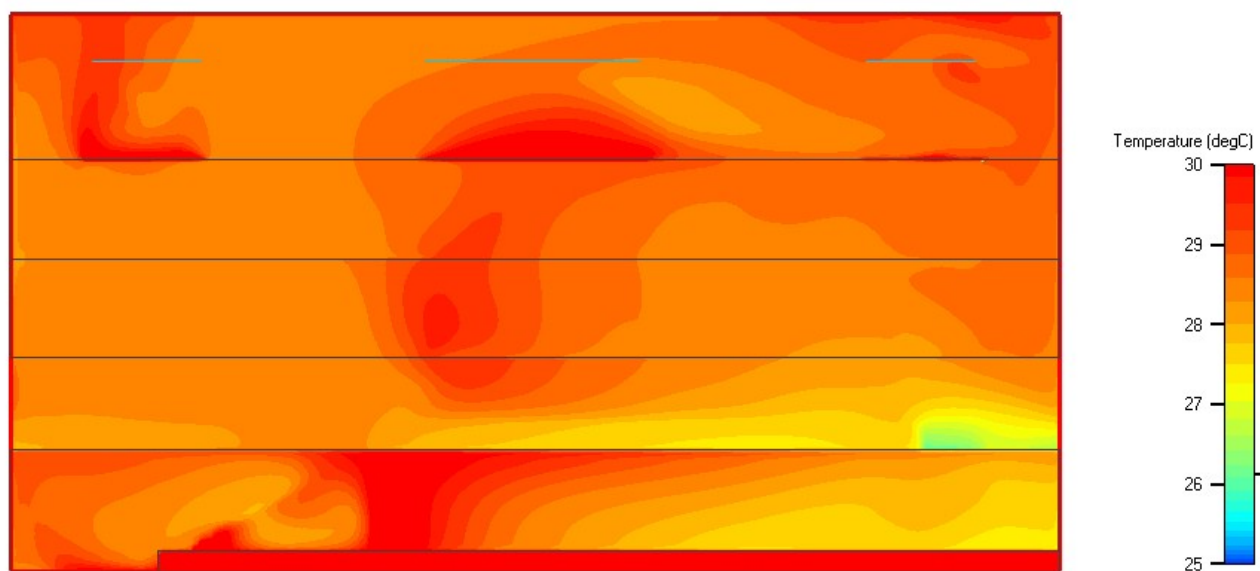


Příloha 14: Teplotní pole atria ($z = 15m$)

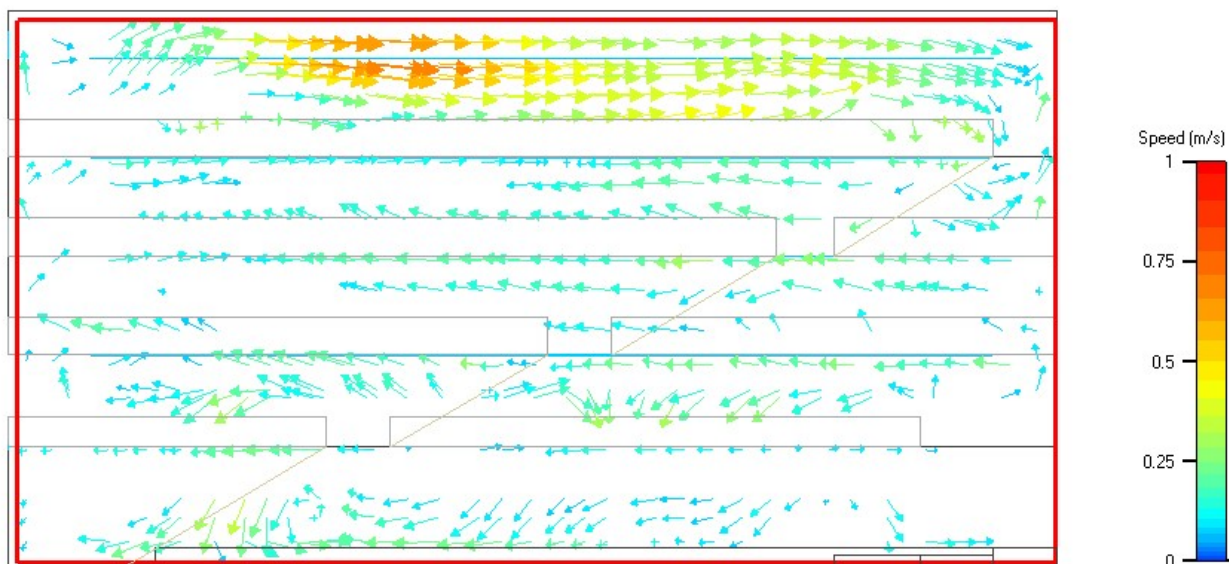
36(46)



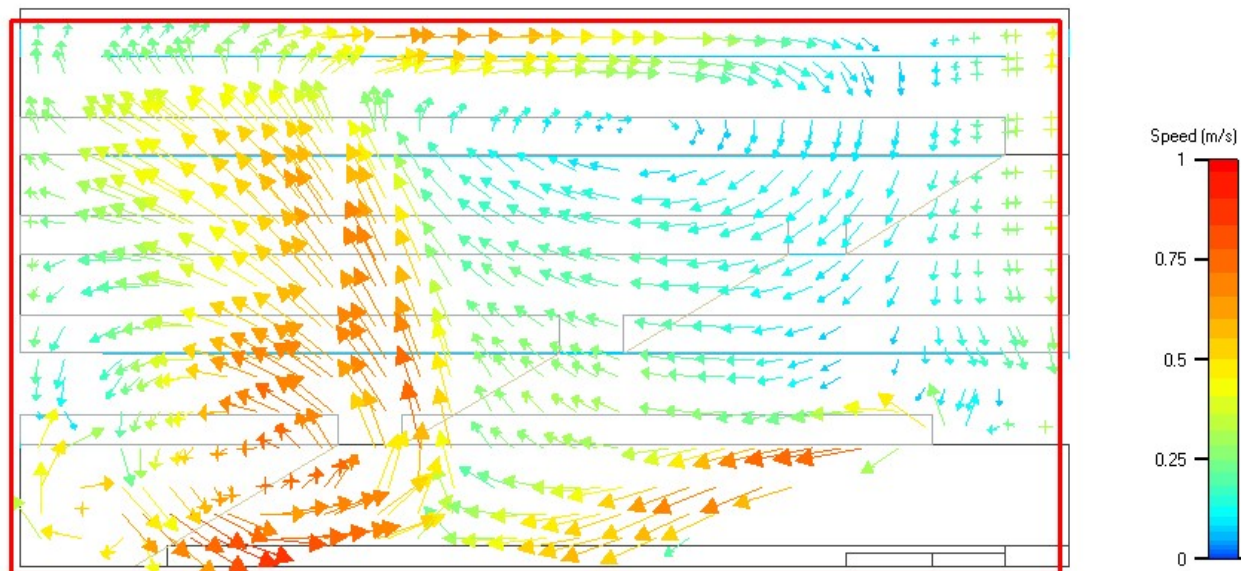
Příloha 15: Teplotní pole atria ($z = 30m$)



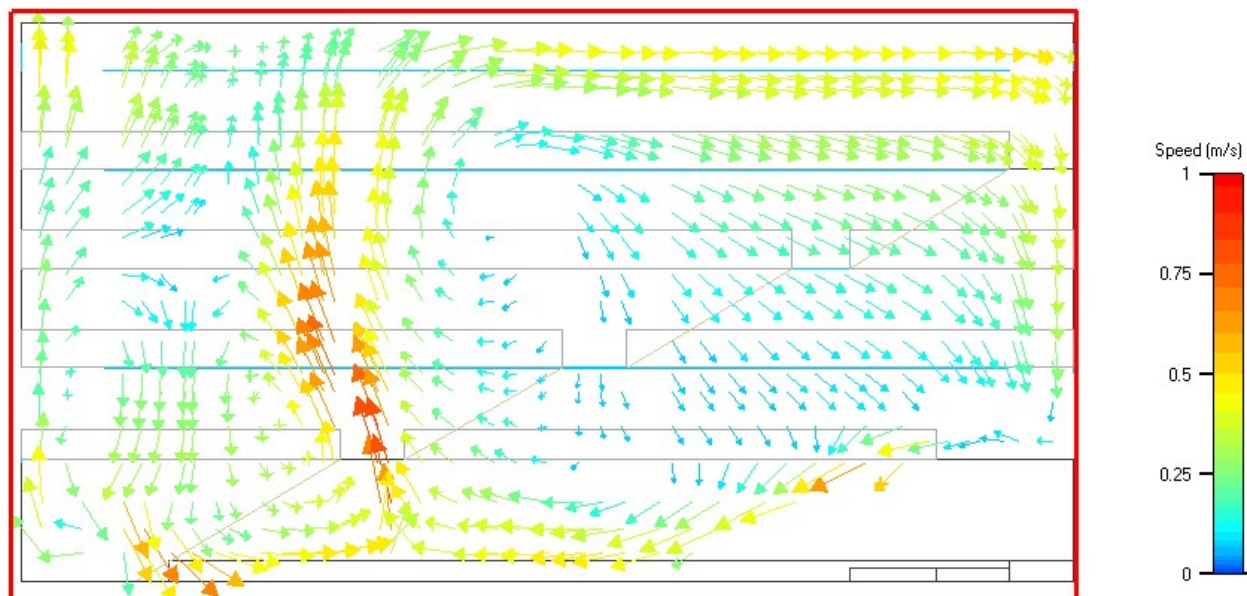
Příloha 16: Teplotní pole atria ($z = 40m$)



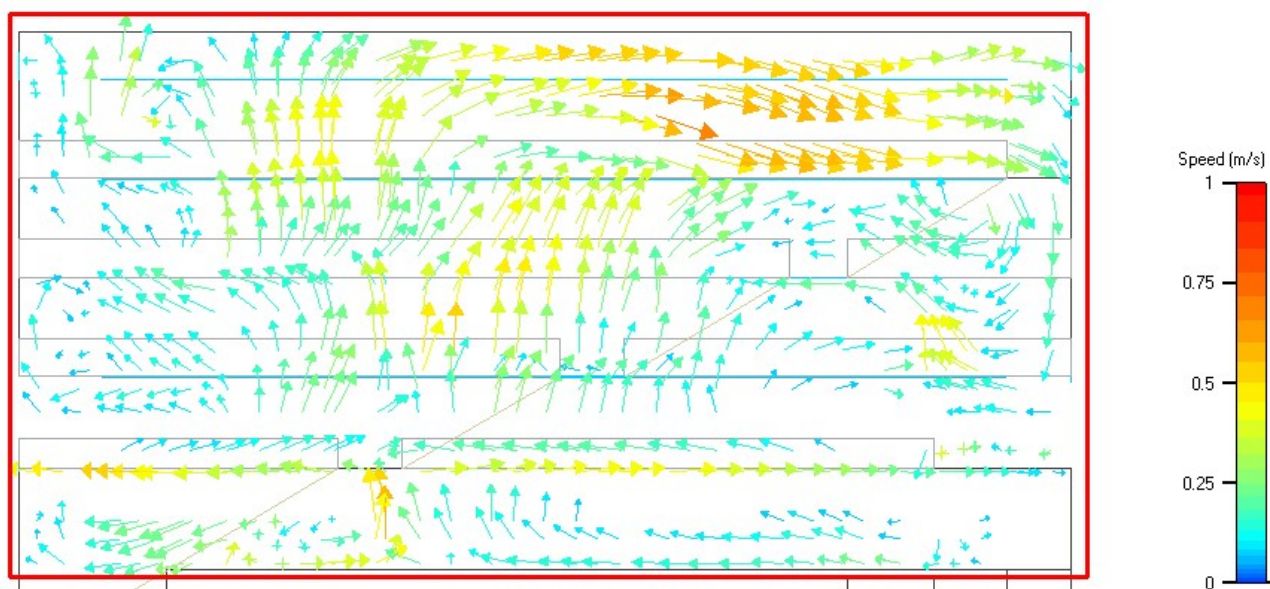
Příloha 17: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($z = 2m$)



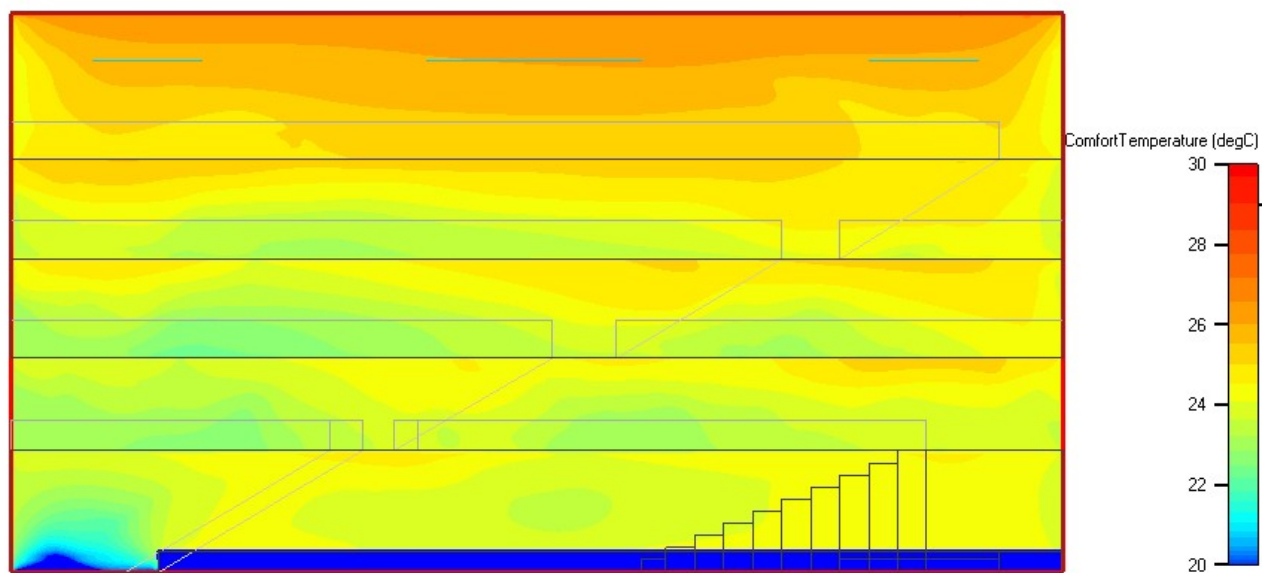
Příloha 18: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($z = 15m$)



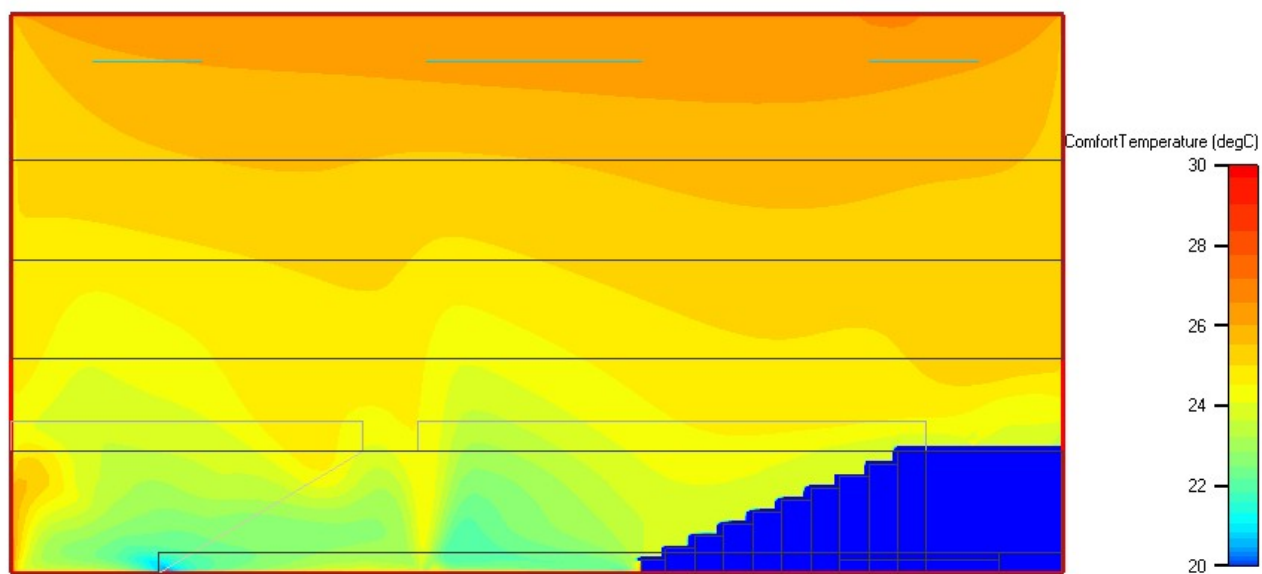
Příloha 19: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($z = 30m$)



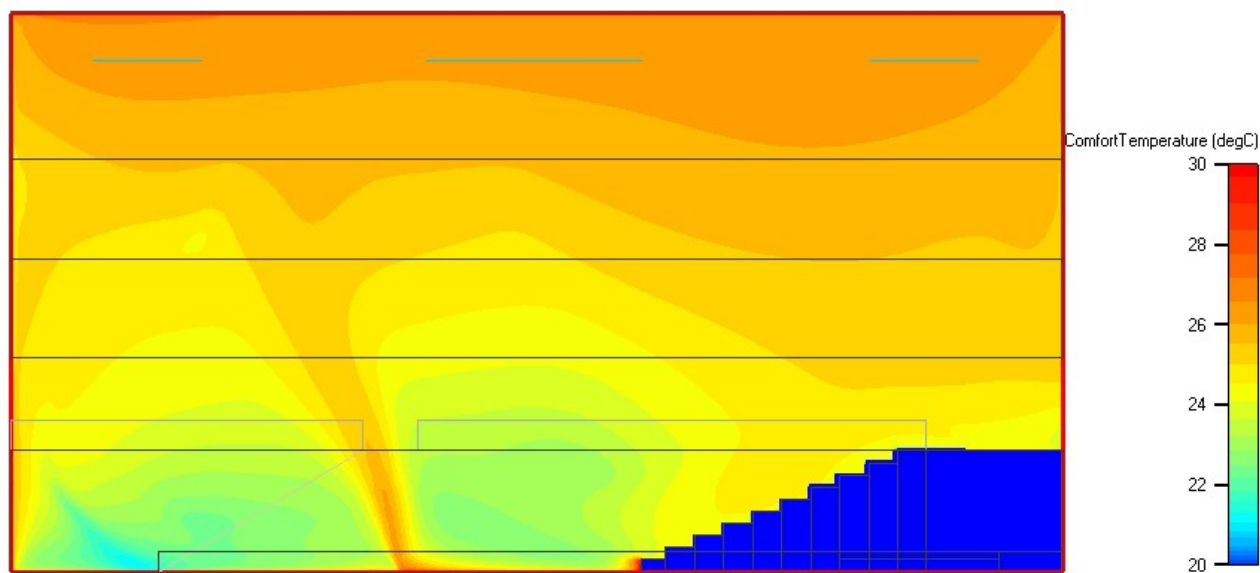
Příloha 20: Proudové pole atria, vektory rychlosti ($z = 40m$)



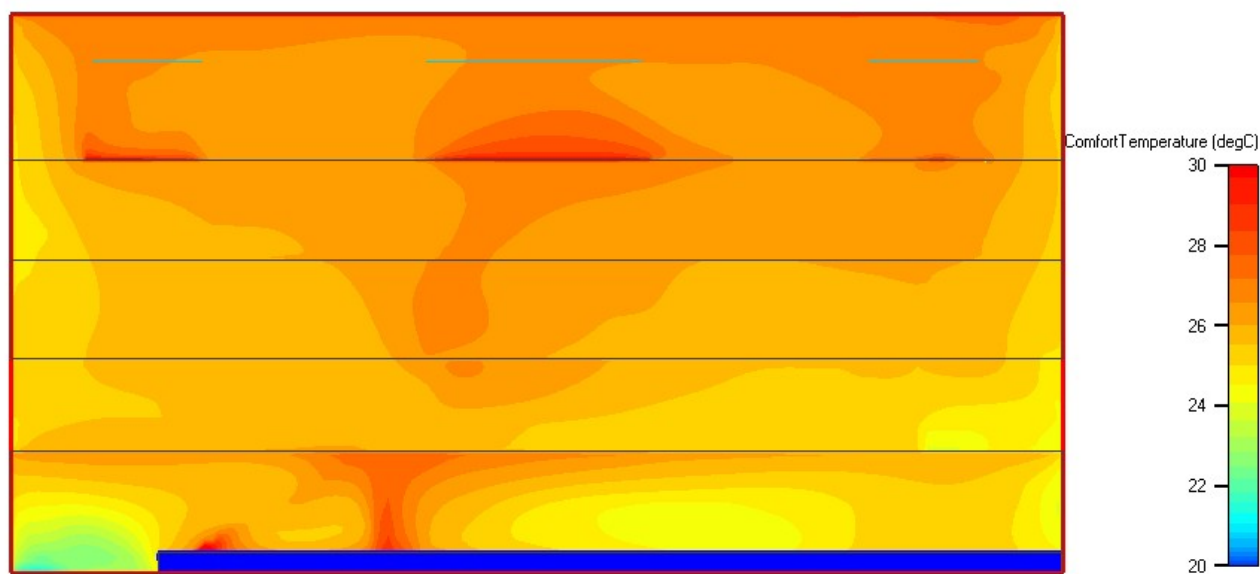
Příloha 21: Pole operativní teploty ($z = 2m$)



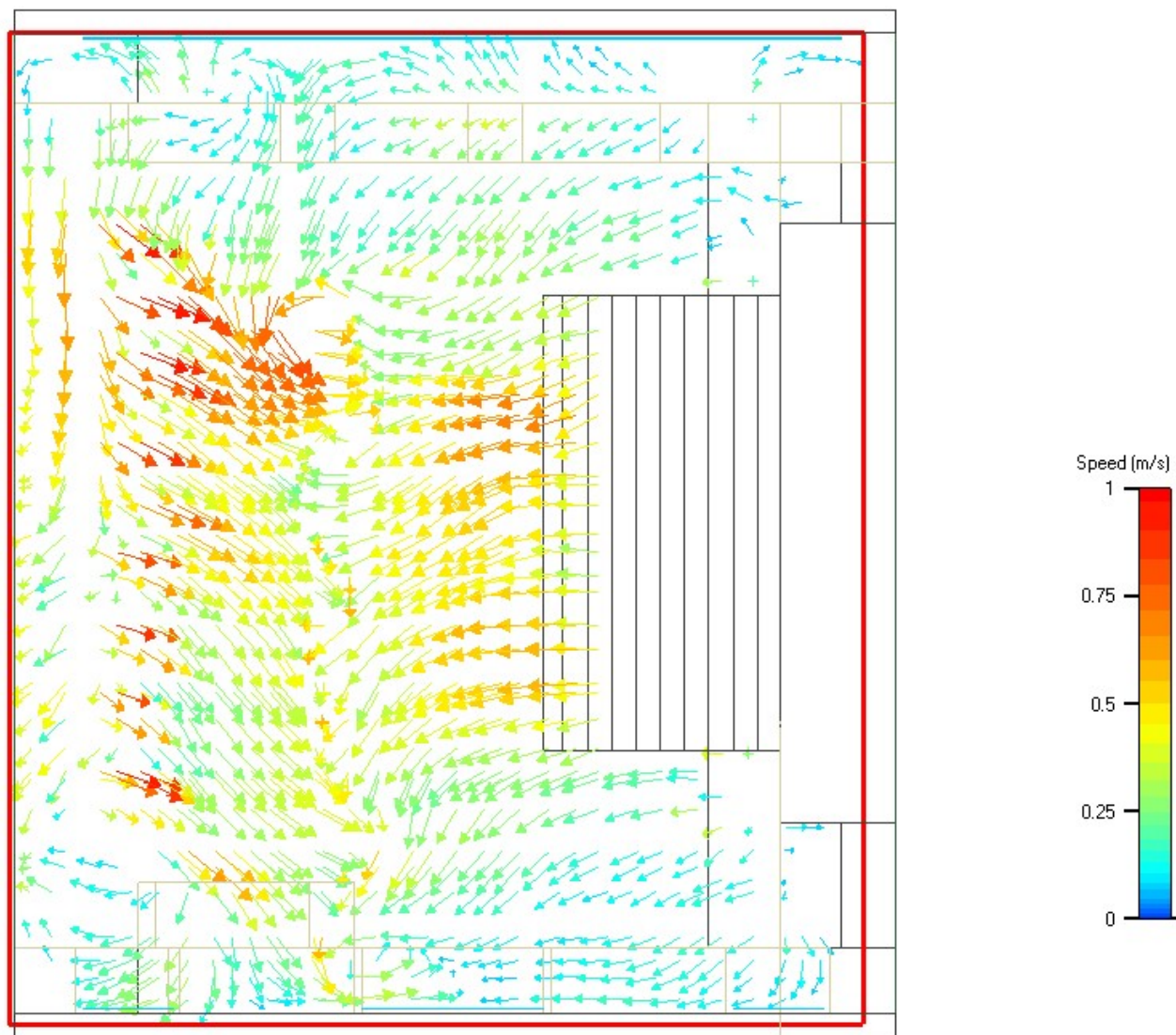
Příloha 22: Pole operativní teploty ($z = 15m$)



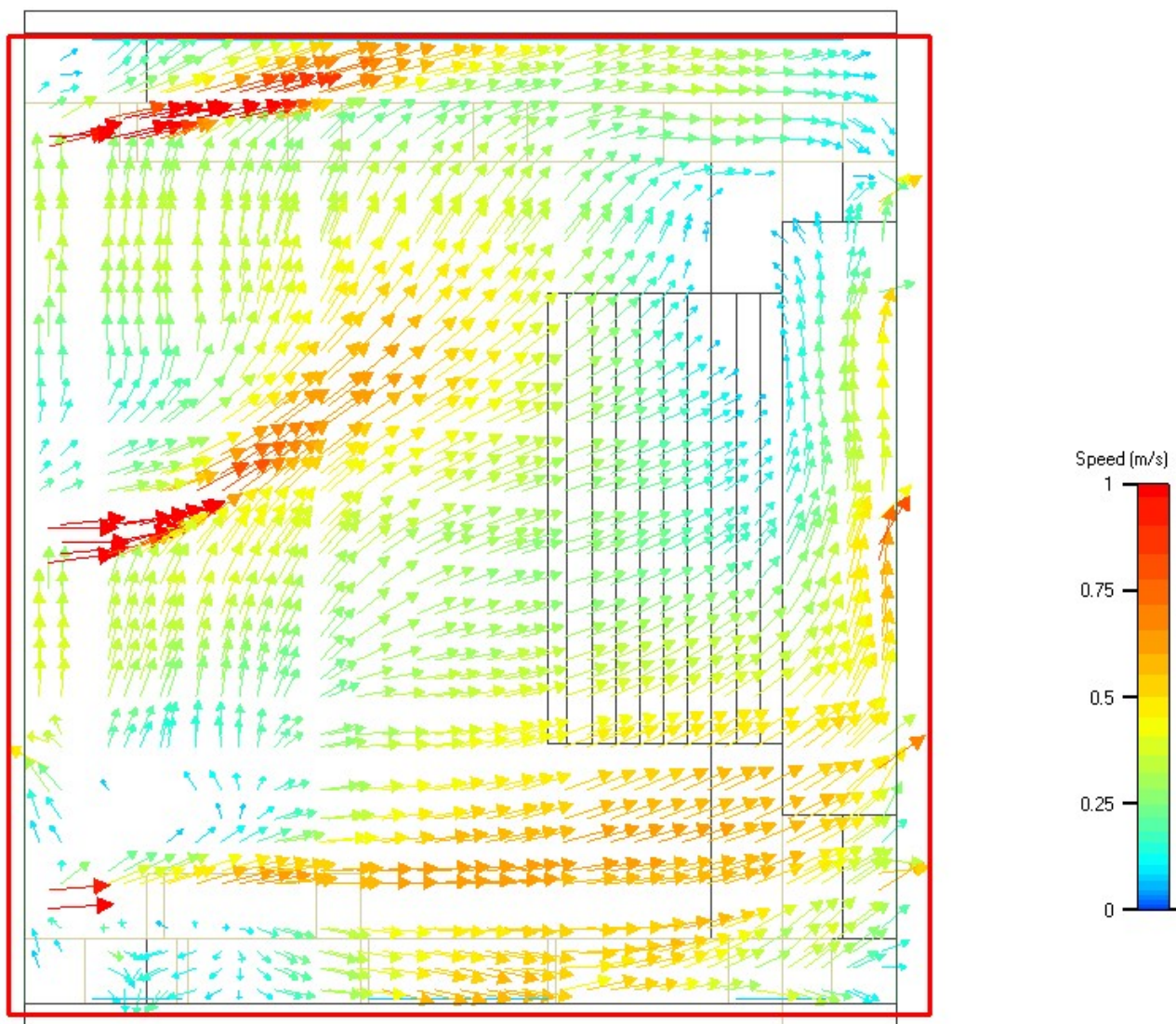
Příloha 23: Pole operativní teploty ($z = 30m$)



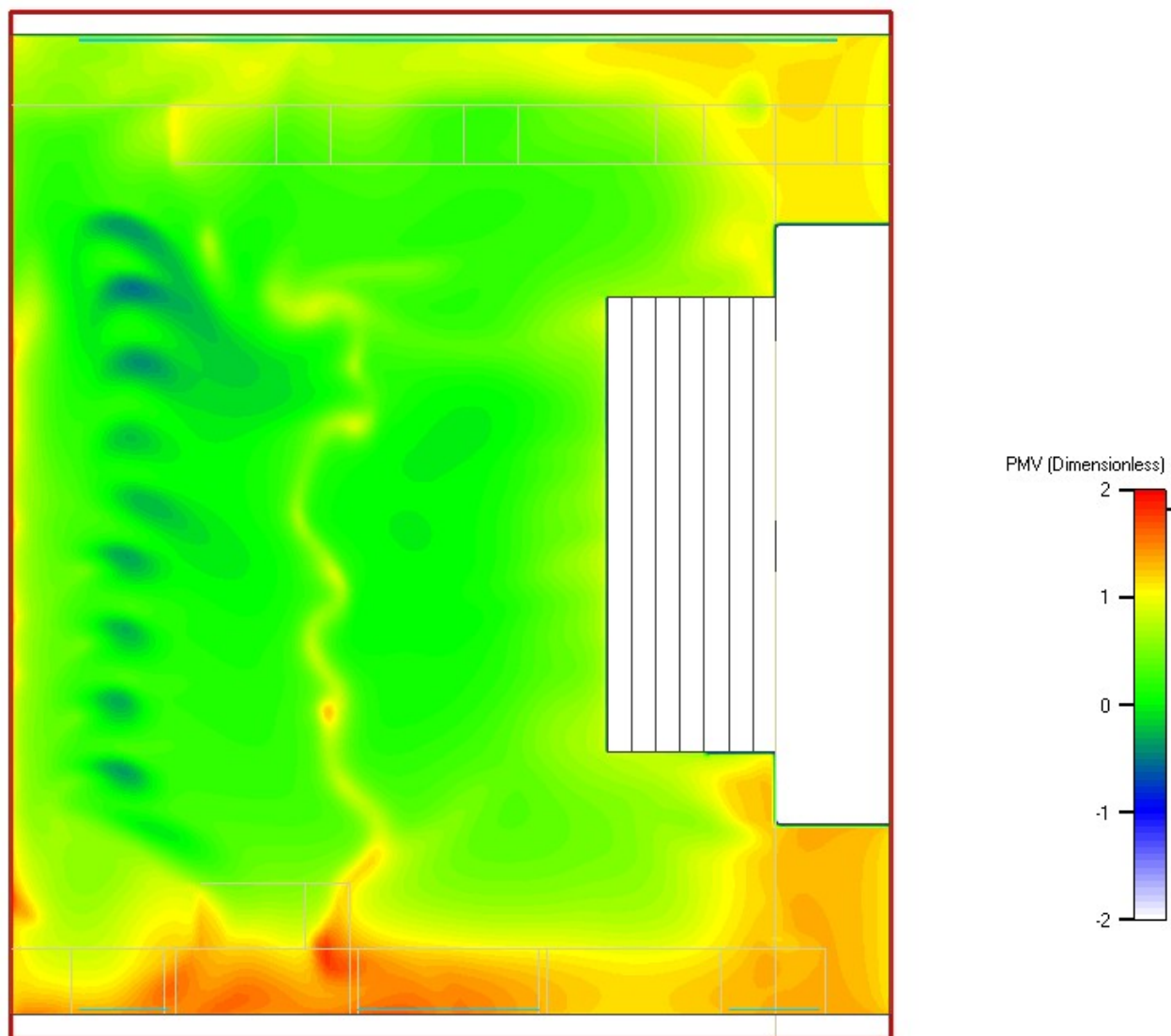
Příloha 24: Pole operativní teploty ($z = 40m$)



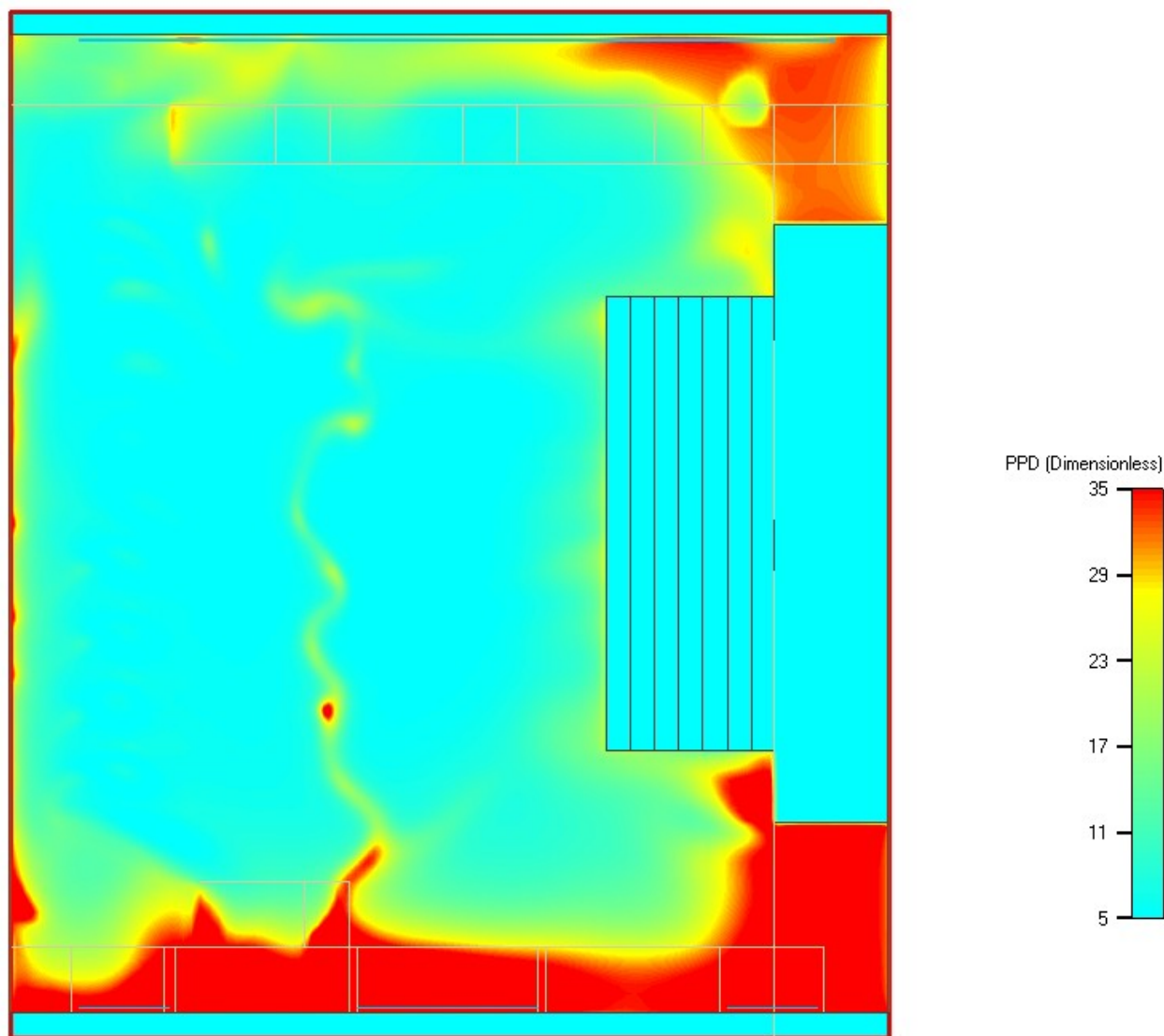
Příloha 25: Proudové pole atria, vektory rychlosti v pobytové zóně ($y = 1,7\text{m}$)



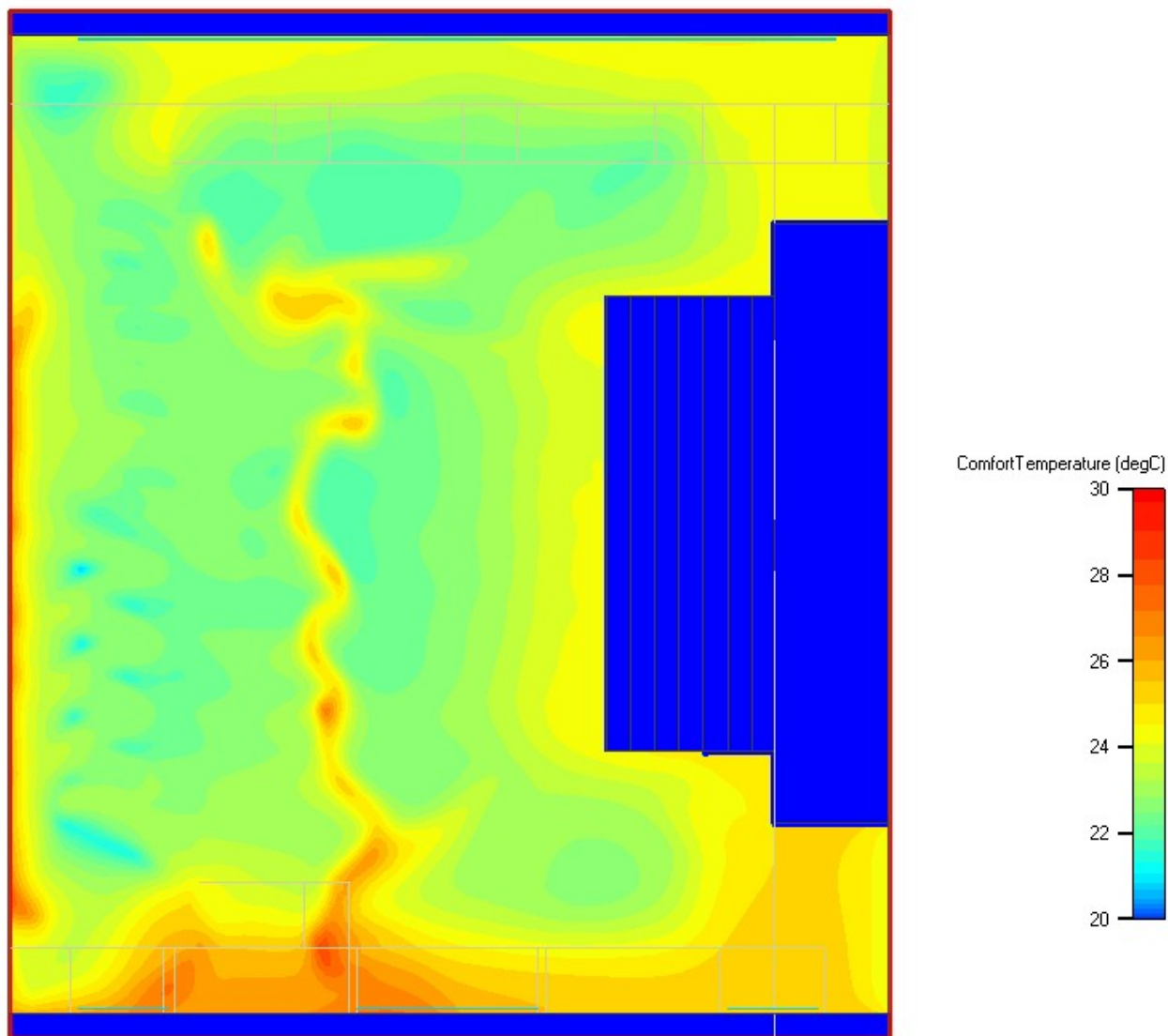
Příloha 26: Proudové pole atria, vektory rychlosti v podstropní oblasti ($y = 19\text{m}$)



Příloha 27: Pole hodnot PMV v pobytové zóně ($y = 1,7\text{m}$)



Příloha 28: Pole hodnot PPD v pobytové zóně ($y = 1,7\text{m}$)



Příloha 29: Pole operativních teplot v pobytové zóně ($y = 1,7\text{m}$)