

Projekt MicroBUS – Mikroměřítkové nástroje pro kvantifikaci dopravně - urbanistických scénářů v městské zástavbě z pohledu imisních limitů.

Hynek Řezníček, Jan Geletič, Michal Belda, Jaroslav Resler,
Štěpán Nosek, Pavel Krč (a kol.)

Ústav informatiky Akademie Věd ČR v. v. i.



Motivace - Snížení emisí a rekonstrukce Legerovy ul.

- **EU do 2030 sníží imisní limity** o polovinu (Ambiant air quaility directive)
<https://environment.ec.europa.eu/>
- Nejvíce se dopady týkají dopravních hotspotů
- **Rekonstrukce magistrály** představená v lednu
 - testovací doména (Legerova ulice)
 - provnání s tunelovými experimenty
- **Uliční stromy**
 - Spojují náš projekt s tématem setkání (populární mitigační opatření proti tepelnému stresu)
 - Stromy mění proudění a Energetickou bilanci



Magistrála projde rekonstrukcí. Promění se v moderní městský bulvár společně s Ječnou ulicí

Praha připravuje rozsáhlou rekonstrukci ulic Legerova, Sokolská a Mezibránská, která zásadně promění tyto pro dopravu klíčové ulice. Cílem projektu je vytvořit vlnité a bezpečné prostředí pro všechny účastníky silničního provozu – chodce, motoristy i cyklisty a též pro obyvatele a návštěvníky. Rekonstrukce se bude týkat úseku od předpolí Nuselského mostu po Muzejní oázu. V současné době probíhá zpracování studie proveditelnosti. Realizátorem studie a následně i samotné rekonstrukce je Technická správa komunikací (TSK). Dalším navazujícím klíčovým projektem je aktuálně dokončená studie k rekonstrukci ulice Ječná.



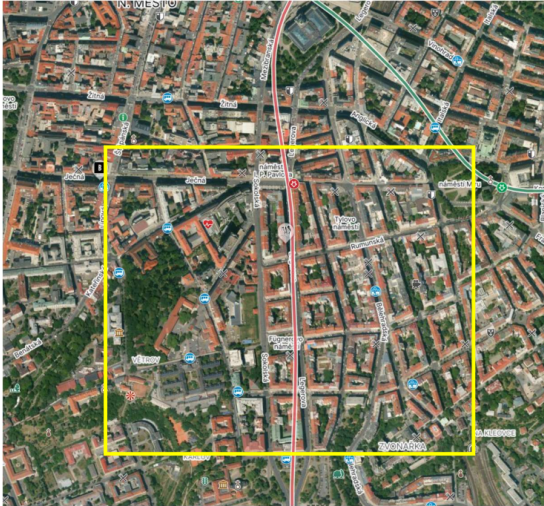
Za přítomnosti médií byly ve čtvrtek 30. ledna 2025 představeny první návrhy budoucí podoby magistrály a finální řešení rekonstrukce ulice Ječná. Tiskové konference, kterou pořádala TSK hl. m. Prahy, se zúčastnil i starosta Jan Koršeska společně s místostarostou pro oblast životního prostředí Janem Recmanem a radním pro oblast dopravy Tomášem Halvou.

Cíle projektu MicroBUS

- **nástroj pro hodnocení dopravně-emisních scénářů** - řešení tvořené mikroměřítkovým modelem PALM s připravenými otestovanými konfiguracemi (meteorologie, emise) + postprocessingové nástroje
- **Vyhodnocení nejistot modelovaných imisních ukazatelů** na základě porovnání s měřením v aerodynamickém tunelu (pro doménu Legerova)
- **Vytvoření imisních map pro scénáře** - pro snížení dopravy, lokálních emisí, urbanistických opatření apod.



Doména a fyzický model v aerodynamickém tunelu



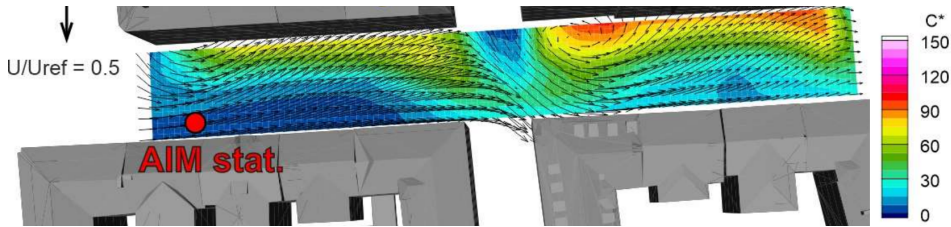
Wind-tunnel model (scale of 1:500)



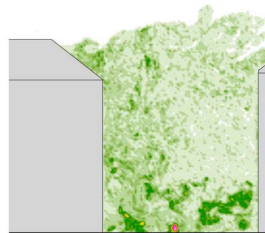
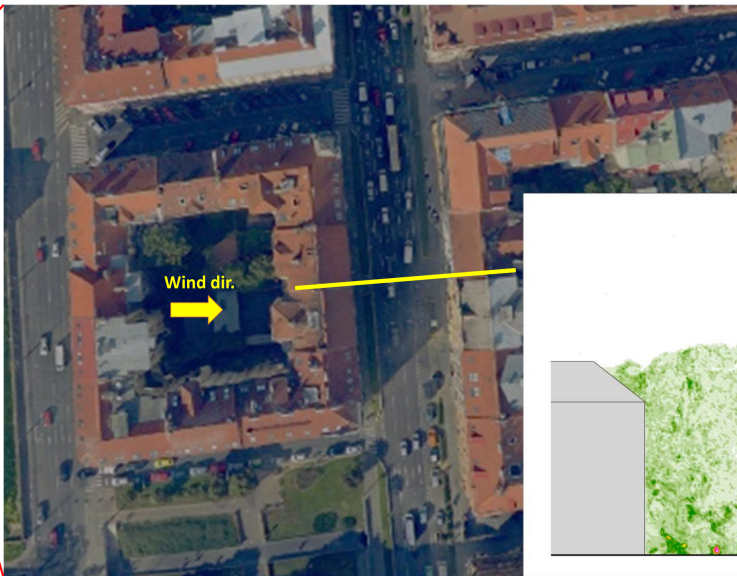
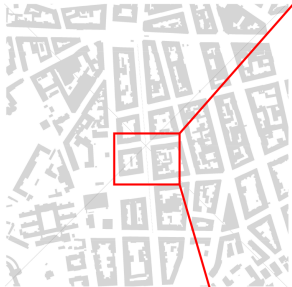
Měření v aerodynamickém tunelu (ukázka proudění)

- Liniový zdroj emisí uprostřed Legerovy ulice.
- Plošně (s časovým rozlišením) měřeny vektory rychlostí a koncentrace pasivního kontaminantu metodou PIV (vysokorychlostní kamerou).
- Bodově měřen i etan (reprezentant plyných emisí) rychlým plamenným ionizačním detektorem (FFID)

↓ Proudění a koncentrace kolem stanice AIM v Legerově ul. ↓

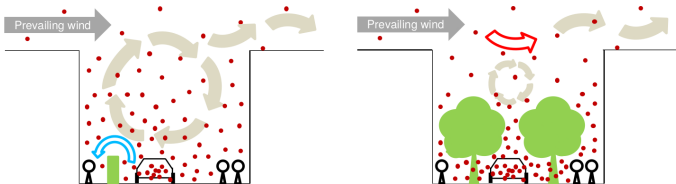


Výsledky pole koncentrací v kaňonu ulice

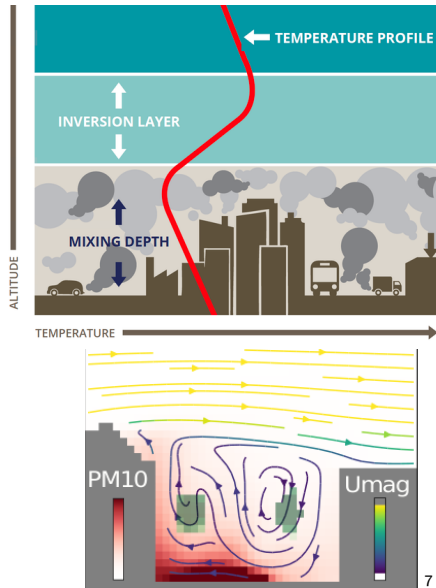


Ventilace (odvětrání) uličního kařonu.

- Během **Teplotní inverze** koncentrace polutantů a polétavého prachu v ulici roste
- Koncentrace lze snížit ventilací (odvětráním) uličního kařonu vlivem větru
- Particulate Matter ($\approx$ prach, zde PM 10 μm)
- (NO , NO_2 , přizemní O_3 (+VOC))
- **Stromy** mohou zabránit/pozměnit ventilaci

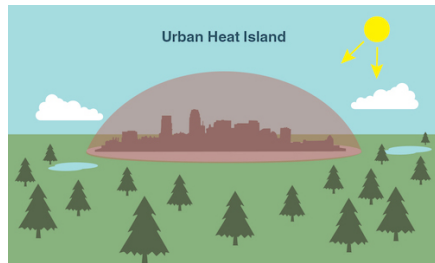


Transport znečištění (<https://www.london.gov.uk/>)



Ale zároveň stromy mitigují (zmírňují) dopady horka

- **Městský tepelný ostrov (UHI)** posiluje přehřátí ulic během vln veder (především v centrech měst)
- Vyšší teplota vzduchu (T_{2m}) (**nižší pod stromy**)
- Vyšší oslunění povrchu přímým i odraženým zářením
- Jak zahrnout vliv větru ($\vec{v}$ chladivý vánek) ?



2023, © Google StreetView

- **Universal Thermal Climate Index (UTCI)**
= $fce(T_{2m}, \vec{v}, \text{záření})$ [Fiala et al.2012]
- **Stromy** mohou snížit T_{2m} o $\sim 1^\circ\text{C}$
- **Stromy** mohou snížit UTCI řádově $\sim 10^\circ\text{C}$
- Silná časo-prostorová variabilita v obou případech redukcí (ve stínu)

Výsledky scénářových simulací v Praze–Dejvicích

- **Realistická doména**, kde byl PALM už dříve validován (měřicí kampaň 2021)
 - detailní geografická data (LOD 3)
- 2 nestované domény:
 - rodičovská 6×6 km s rozlišením 10 m o celkové výšce ~ 2.9 km.
 - vnořený potomek 600×600 m s rozlišením 1 m a výškou 160 m
- Hlavní bulvár, severo-jížně orientovaný poměr výšky ku šířce kaňonu: 0.50–0.75.
- Užší ulice, orientovaný cca severo-západně – jiho-východně poměr výšky ku šířce kaňonu blízký 1.0.

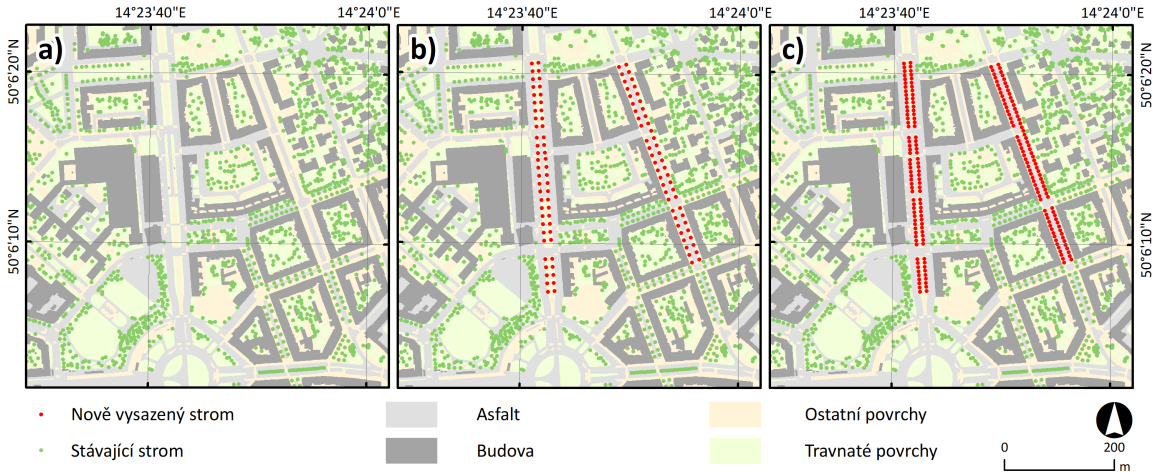


doména z [Resler et al.2021]

Scénáře ve vnořené doméně

- *Platanus* × *hispanica*, výška 15 m + šířka 10 m

- 206/109 stromů s homog. LAD



3 různá nastavení pro uliční stromy: (a) bez stromů, (b) poloviční, (c) plná výsadba.

Počáteční a okrajové podmínky (synthetické, blízké realitě)

- Vybrány 2 různé dny: letní (a,d) a podzimní (b,e)
s reálnou WRF meteorologií a radiací, profily $\rightarrow$

Okrajové podmínky:

převzaté, až na syntetický horizontální profil

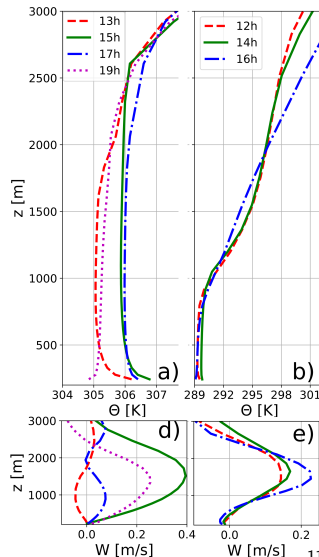
vstup (Z, JZ, J směr větru), Dirichlet o.p.

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{top}} \right)^{0.2}, \text{ kde } U_{ref} = 3 \text{ m/s}$$

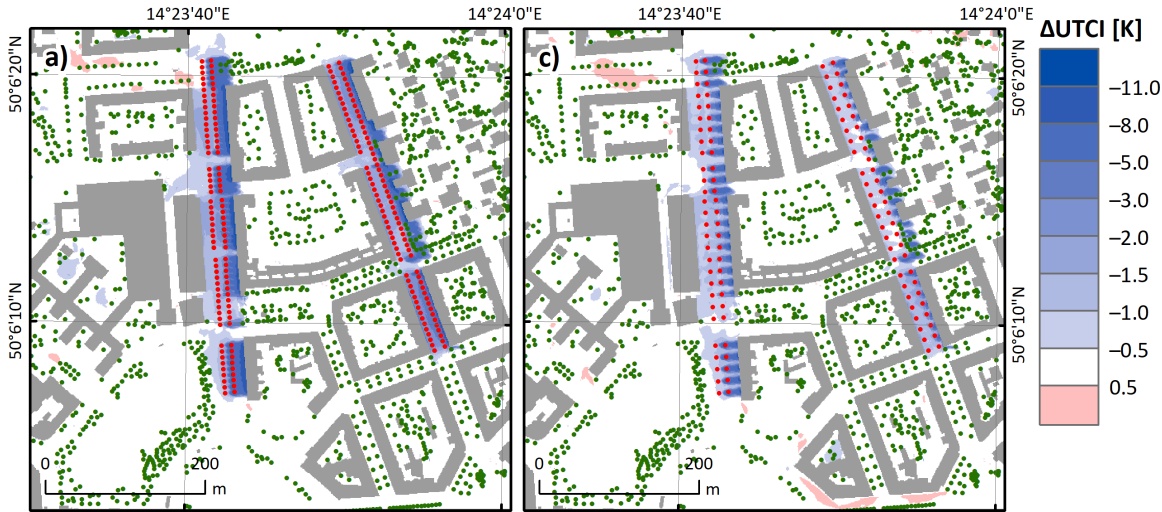
výstup (závisí na směru větru) Radiační o.p.

+ Emise:

- $\forall$ okraj a počátek $PM_{10} = 0$ pro eliminaci vnějšího vlivu
- **Každý pruh v zájmových ulicích** (hlavní a úžší) má předepsaný jednotný objemový tok $0.1 \mu g m^{-3} s^{-1} / grid$



Výsledky - redukce UTCI (v létě)



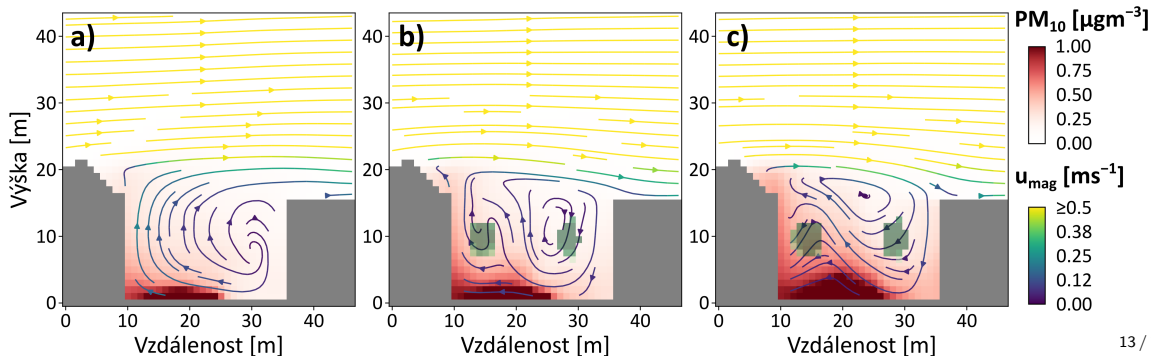
léto, 15 h [UTC]: plná výsadba

poloviční výsadba

Výsledky - nárůst PM₁₀ (na podzim)

Zhoršení koncentrace PM₁₀ v ulicích v porovnání se situací "bez stromů" (průměr) na podzim

[UTC]–směr větru	hlavní, plná	hlavní, poloviční	užší, plná	užší, poloviční
14 h – Z	21%	21%	117%	53%
14 h – JZ	16%	16%	82%	37%
14 h – J	19%	26%	80%	59%



Závěr a shrnutí

- Startující projekt MicroBUS se zaměřuje na scénářové simulace pro dopravní hotspoty
- Zatím proběhla měření v aerodynamickém tunelu pro doménu Legereova
- Stromy blokují odvětrávání a mění E bilanci.
- Změny v tepelném indexu UTCI a koncentraci PM_{10} pozorovány pro různá pokrytí stromy.
- Méně stromů může znamenat lepší kompromis (podobná UTCI, menší růst PM_{10}).
- Stromy v širších (havních) ulicích jsou prospěšnější.
- Podrobněji: <https://doi.org/10.1002/qj.4954>



Děkuji za pozornost.

reznicek@cs.cas.cz

Tento výzkum byl podpořen projekty: MicroBUS (SQ01010181) financovaný TAČR
<https://www.microbus.cz>
a TURBAN (č. TO01000219) financovaný z Norských fondů a TAČR.
<https://www.project-turban.eu>

References

-  Baklanov A., Molina L.T. and Gauss M.: Megacities, air quality and climate, *Atmospheric Environment* 126 (2016) <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>
-  World Meteorological Organization: Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environment Services, ISBN 978-92-63-11234-7 (2021)
-  International Panel of Climate Change (IPCC): Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report. *IPCC, Geneva, Switzerland* (2023) <https://doi.org/10.101610.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
-  Urban A., Fonseca-Rodríguez O., Di Napoli C., Plavcová E.: Temporal changes of heat-attributable mortality in Prague, Czech Republic, over 1982–2019, *Urban Climate* 44 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101197>
-  Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P. et al.: UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation, *International Journal of Biometeorology*, 56 (2012) <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>
-  Resler J., Eben K., Geletič J., Krč P., Belda M., Fuka V., Halenka T., Keder J., Vlček O. et al.: Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague *Geoscientific Model Development*, 14(8) (2021) <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4797-2021>

References



Krč P., Resler J., Sühling M., Schubert S., Salim M.H. and Fuka V.:
Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0.
Geosci. Model Dev., 14(5) (2021) <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021>



Belda M., Resler J., Geletič J., Krč P., Maronga B., Sühling M., Kurppa M., Kanani-Sühling F., et al.:
Sensitivity analysis of the PALM model system 6.0 in the urban environment,
Geosci. Model Dev. 14(7) (2021) <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4443-2021>



Geletič J., Lehnert M., Resler J., Krč P., Bureš M., Urban A., Krayenhoff E.S.:
Heat exposure variations and mitigation in a densely populated neighborhood during a hot day: Towards ...
Building and Env. 242 (2023) <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110564>



Radović J., Belda M, Resler J., Eben K, Bureš M, Geletič J., Krč P., Řezníček H. and Fuka V.:
Challenges of constructing and selecting the “perfect” boundary conditions for the LES model PALM.
Geosci. Model Dev. 17(7) (2024) <https://doi.org/10.5194/gmd-17-2901-2024>

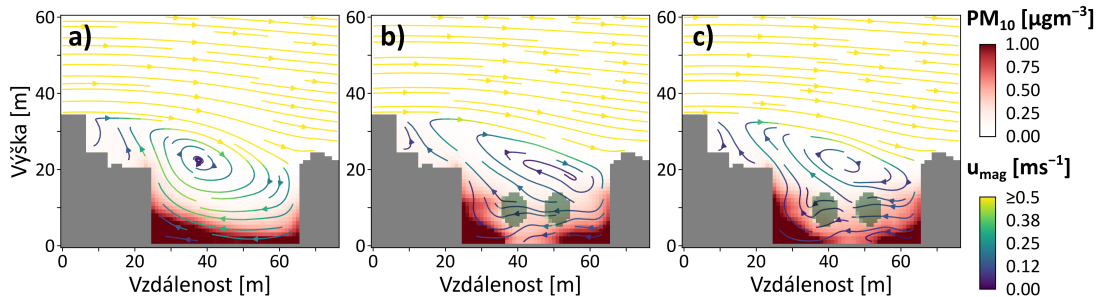


Řezníček H., Geletič J., Belda M., Beneš L., Bureš M., Eben K., Fuka V., Krč P., Resler J., et al.:
Analysis of the complex role of trees in street canyons using a large-eddy simulation model,
Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (2025) <https://doi.org/10.1002/qj.4954>

BACKUP: table with picked times and stratification

Stratification	Ri_b	Conditions (times in UTC, local time +02h)
Convective	-1.4	original 19 July, 15–16h, summer afternoon, clear sky end of direct irradiation of the street surface
Residual / close to stable	0.6	original 19 July, 19–20h, summer evening, clear sky sunset 19:15
Neutral 1 / close to conv.	-0.2	original 19 July, 14–15h, autumn afternoon, middle-altitude clouds end of direct irradiation of the street surface
Neutral 2 / close to stable	0.4	original 19 October, 16–17h, autumn afternoon, clear sky sunset 16:02
Stable	5.4	original 19 October, 05–06h, autumn morning, clear sky sunrise 05:31

Boulevard (podzim): Západní vítr



BACKUP: Navier-Stokes eq. in Boussinesq approx.

Equations for filtered quantities (overbar is omitted):

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla \pi - \nabla \cdot \underline{\underline{\boldsymbol{\tau}}}\end{aligned}$$

for velocity $\mathbf{u} = u_i = (u, v, w)$, dry air density ρ_0 , gravitational acceleration $\mathbf{g} = -g\delta_{i3}$

modified pressure fluct. $\pi = p + \frac{2}{3}\rho_0 e$,

with sub-grid-scale (unresolved) turbulent kinetic energy e

and the residual stress tensor $\underline{\underline{\boldsymbol{\tau}}} = \tau_{ij}$

BACKUP: Mathematical model II (simplified):

Equations for filtered quantities (overbar is omitted):

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla \pi + \mathbf{g} \left(\frac{\Theta_v}{\langle \Theta_v \rangle} - 1 \right) - \nabla \cdot \underline{\underline{\boldsymbol{\tau}}} \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \Theta &= -\nabla \cdot \underline{\underline{\boldsymbol{\tau}}}_\Theta + \text{Sources},\end{aligned}$$

where $\langle . \rangle$ denote a horizontal domain average,

virtual potential temperature $\Theta_v = \Theta \left[1 + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q_v \right]$

and "temperature stress vector" $\underline{\underline{\boldsymbol{\tau}}}_\Theta = \overline{u_i'' \Theta''}$ (simulated via $K_h \nabla \Theta$ where $K_h = f(K_m)$)

+ equation for specific humidity q_v + equations for concentrations (passive scalar)

BACKUP: Turbulent closure (modified Deardorff's model)

$$\tau_{ij} = \overline{u_i'' u_j''} - \frac{2}{3} e \delta_{ij} = -K_m \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$
$$\frac{\partial e}{\partial t} + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial e}{\partial x_j}}_{\text{advection}} = \underbrace{2K_m \frac{\partial^2 e}{\partial x_j^2}}_{\text{diffusion}} + \underbrace{\overline{u_i'' u_j''} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{production}} - \epsilon$$

where the local coefficient (sgs eddy diffusivity) of momentum $K_m \approx 0.1 \Delta \sqrt{e}$,
distance $\Delta = \min\{\Delta_{x_i}\}$ (minimum grid spacing)

and dissipation rate $\epsilon \approx 0.93 \frac{\sqrt{e^3}}{\Delta}$.

$x_i = (x, y, z)$

Boulevard (autumn): W (a–c) 5 h and (d–f) 14 h [UTC]

