

low

# POČÍTAČOVÁ SIMULACE ŠÍŘENÍ RADONU V RODINNÉM DOMĚ

Jan Kubelka<sup>1</sup>, Martin Barták<sup>1</sup>, Jan L. M. Hensen<sup>2</sup>

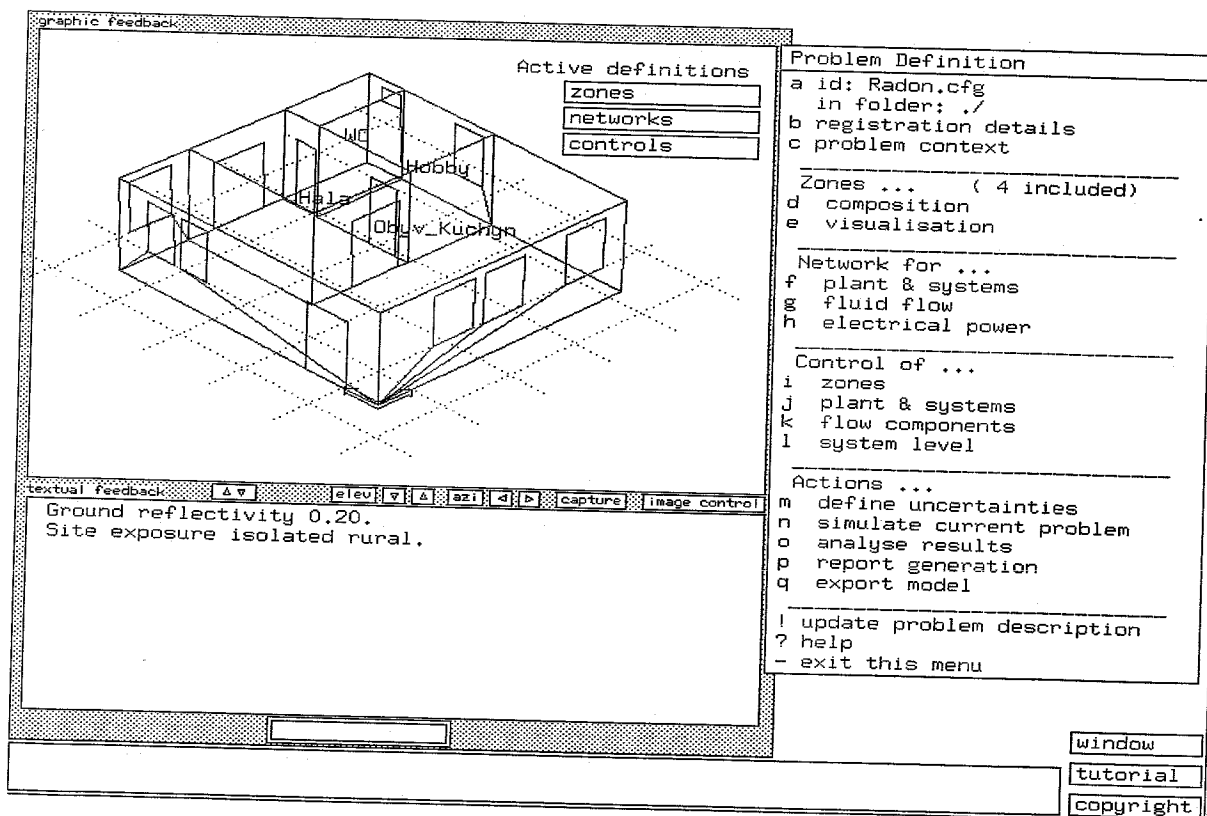
<sup>1</sup>České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí

<sup>2</sup>Eindhoven University of Technology, Center for Building Systems TNO-TUE

## 1. Úvod

Pokud radon pronikne do budovy, má na jeho šíření rozhodující podíl proudění vzduchu mezi místnostmi. Hnacími silami tohoto proudění jsou rozdíly tlaku vzduchu, které jsou dány směrem a rychlostí větru v okolí budovy, způsobem větrání a teplotními rozdíly (způsobem vytápění). Objemy proudícího vzduchu a objemové aktivity radonu jsou spolu svázány. Hodnoty koncentrace radonu lze vypočítat z rovnice pro bilanci škodliviny ve větraném prostoru, kterou sestavujeme pro okamžité průtoky vzduchu, získané počítačovou simulací na nestacionárním modelu proudění vzduchu v budově. Přitom uvažujeme vzájemné ovlivňování jednotlivých prvků vnitřního a venkovního prostředí.

Na modelu vytvořeném v programu ESP-r byly simulací stanoveny pravděpodobné průtoky vzduchu a na jejich základě i časový průběh koncentrace radonu ve čtyřech místnostech nepodsklepeného rodinného domu. Uvažovalo se pronikání radonu podlahou jedné místnosti a infiltrace venkovního vzduchu znečištěného radonem. V modelu je zahrnuto působení venkovních klimatických podmínek včetně rychlosti a směru větru.



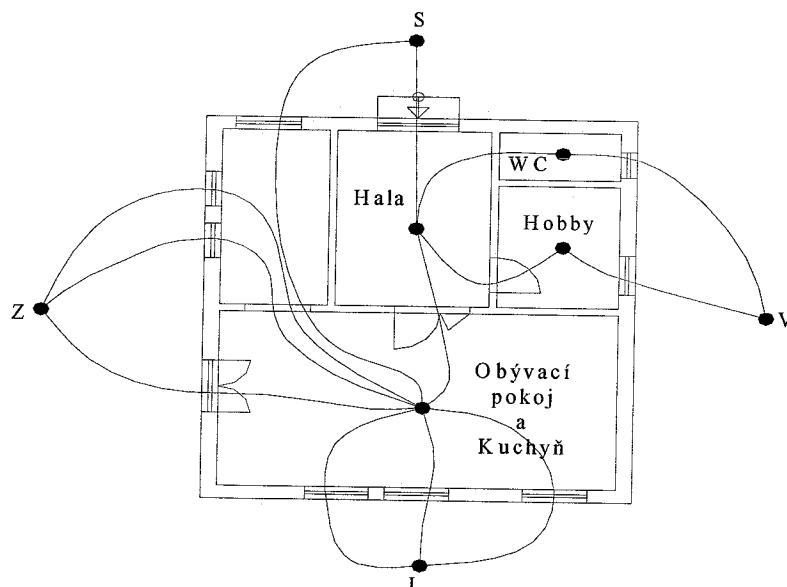
Obr. 1 – Model objektu v simulačním prostředí ESP-r

## 2. Popis modelu

Model sestává ze čtyř místností (termálních a tlakových zón) v přízemí nepodsklepeného rodinného domu. Jsou to *obývací pokoj a kuchyň* (jedna zóna), *hala*, *hobby* a *WC*. Geometrie modelu je patrná z obr.1. Budova nemá klimatizaci a veškeré větrání venkovním vzduchem způsobuje infiltrace spárami kolem oken a dveří. Těmito netěsnostmi se může dovnitř dostávat nebo naopak ven unikat vzduch a s ním i radon. Místnosti jsou vytápěné s požadovanými minimálními teplotami pro obývací pokoj a kuchyň 20°C, halu 18°C, hobby a WC 15°C.

Proudění vzduchu v místnostech je modelováno v modulu *mass flow network (mfn)* programu ESP-r. Modul *mfn* využívá uzlovou síť, která spojuje jednotlivé zóny (místnosti) modelu. Porovnávají se tlaky v jednotlivých uzlech a bilancují se hmotnostní toky mezi nimi. Přitom se uvažují proměnlivé teploty a tlaky v jednotlivých zónách a účinek venkovního prostředí, především směru a rychlosti větru. Komponenty sítě *mfn* charakterizují propojení jednotlivých zón z hlediska místních tlakových ztrát, což umožňuje popsat prvky jako jsou např. spáry kolem oken a dveří, větrací otvory apod. Proudění se předpokládá ustálené v daném časovém kroku.

V našem případě byla vytvořena síť čítající osm uzlů, viz obr.2. V každé místnosti je po jednom uzlu a čtyři venkovní uzly respektují světové strany. Použité hodnoty rychlosti a směru větru jsou z klimatické databáze programu ESP-r. V uzlové síti je modelováno proudění vzduchu spárami kolem zavřených oken a zavřených dveří.



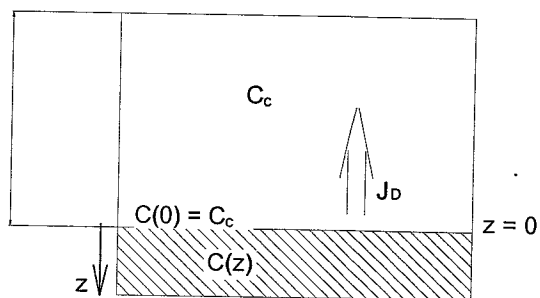
Obr. 2 – Schéma uzlové sítě pro simulaci proudění vzduchu v objektu

## 3. Pronikání radonu do budovy

Radon se do domu dostává z půdního vzduchu přes podlahu pouze v hale a dále z venkovního vzduchu, který do budovy proniká infiltrací. Stavební materiály neobsahují radon, v domě se nespaluje zemní plyn a voda se přivádí z vodárny a tudíž také neobsahuje radon. Pro popis pronikání radonu přes podlahu místnosti byly použity dva modely [1].

### Exhalace radonu do uzavřeného prostoru

Tento model uvažuje rovnoměrně rozloženou objemovou hustotu produkce radonu v půdě a unikání radonu ze země do uzavřené válcové nádoby - obr. 3. Jestliže je průměr nádoby dostatečně velký, potom bude difúzní pole v ustáleném stavu pod nádobou jednorozměrné.



Obr.3

Profil koncentrace radonu v půdě je v tomto případě popsán rovnicí

$$C(Z) = \frac{\phi}{\lambda} \left\{ 1 - \frac{e^{\left(\frac{Z}{l}\right)}}{1 + \varepsilon \frac{l}{h}} \right\} \quad Z \leq 0 \quad (1)$$

a hustota toku radonu do nádoby je

$$J_D = \varepsilon \phi l \left[ 1 + \varepsilon \cdot l \cdot h^{-1} \right]^{-1} \quad (2)$$

Pokud je výška  $h$  nádoby malá v porovnání s difúzní délkou  $l$ , potom se rovnice popisující profil koncentrace zjednoduší na tvar

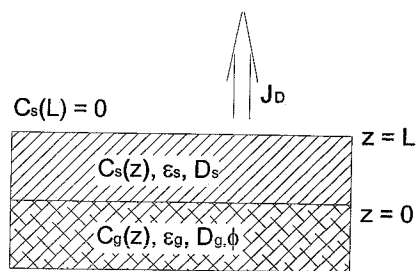
$$C(Z) \cong \frac{\phi}{\lambda} \quad (3)$$

a hustota toku radonu bude

$$J_D \cong h \cdot \phi \quad (4)$$

### Exhalace radonu přes desku ležící na zemi

Tento model popisuje případ šíření radonu v desce tloušťky  $L$ , která leží na zemi s rovnoměrně rozloženou objemovou hustotu produkce radonu - viz obr.4. V desce samotné se radon neprodukuje a z prostoru nad deskou je radon odvětráván (koncentrace radonu ve vzduchu nad deskou je nulová). Toto uspořádání může být použito k odhadu redukce hustoty toku radonu ze země.



Obr. 4

V ustáleném stavu popisují profil koncentrace radonu v betonové desce a v zemi rovnice

$$\frac{D_g}{\varepsilon_g} \left( \frac{d^2 C_g}{dZ^2} \right) - \lambda C_g + \phi = 0 \quad Z \leq 0 \quad (5)$$

$$\frac{D_s}{\varepsilon_s} \left( \frac{d^2 C_s}{dZ^2} \right) - \lambda C_s = 0, \quad 0 \leq Z \leq L \quad (6)$$

Hustota toku radonu z vrchní strany desky je popsána rovnicí

$$J_D = \phi \varepsilon_s l_s \left\{ \cosh\left(\frac{L}{l_s}\right) \left[ 1 + \left(\frac{l_s}{l_g}\right) \left(\frac{D_g}{D_s}\right) \tanh\left(\frac{L}{l_s}\right) \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

Index  $s$  přísluší desce, index  $g$  platí pro zem.

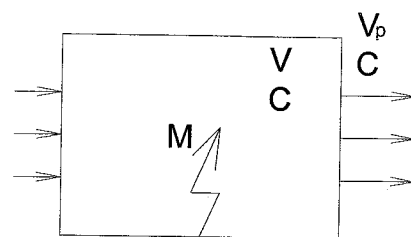
#### 4. Postup výpočtu

Vstupními hodnotami pro výpočet jsou naměřené hodinové hodnoty koncentrace radonu ve venkovním vzduchu a hustoty toku radonu z půdy, publikované v literatuře [2]. Tyto hodnoty byly potom přepočítány pro případ *desky ležící na zemi* podle rovnice (7). Použité hodnoty jsou v tab. 1.

Tab.1 - Hodnoty použité při výpočtech

Pórovitost půdy	$\varepsilon_g$ [-]	0,25
Pórovitost betonu	$\varepsilon_s$ [-]	0,1
Součinitel difúze v půdě	$D_g$ [cm <sup>2</sup> .s]	0,0075
Součinitel difúze v betonu	$D_s$ [cm <sup>2</sup> .s]	0,00002
Difúzní vzdálenost v betonu	$l_s$ [cm]	10
Difúzní vzdálenost v půdě	$l_g$ [cm]	119,5
Tloušťka betonové vrstvy	$L$ [cm]	15
Výška kontejneru	$h$ [cm]	50

Předpokládáme, že podle schématu na obr. 5 je vývin škodlivin ustálený v daném časovém kroku. Škodlivina (radon) se rovnoměrně rozptyluje v místnosti o objemu  $V$  [m<sup>3</sup>]. Do místnosti vstupuje objemový průtok vzduchu  $V_p$  [m<sup>3</sup>/s] se vstupní koncentrací téže škodliviny  $C_p$  [Bq/m<sup>3</sup>], který rovnoměrně větrá celý prostor takže koncentrace škodliviny v odváděném vzduchu  $C$  [Bq/m<sup>3</sup>] je rovna koncentraci v místnosti.



Obr. 5

Při výpočtu koncentrace vycházíme ze základní rovnice pro bilanci škodliviny ve větraném prostoru

$$M \cdot d\tau + V_p \cdot C_p \cdot d\tau = V_p \cdot C_p \cdot d\tau + V \cdot dC \quad (8)$$

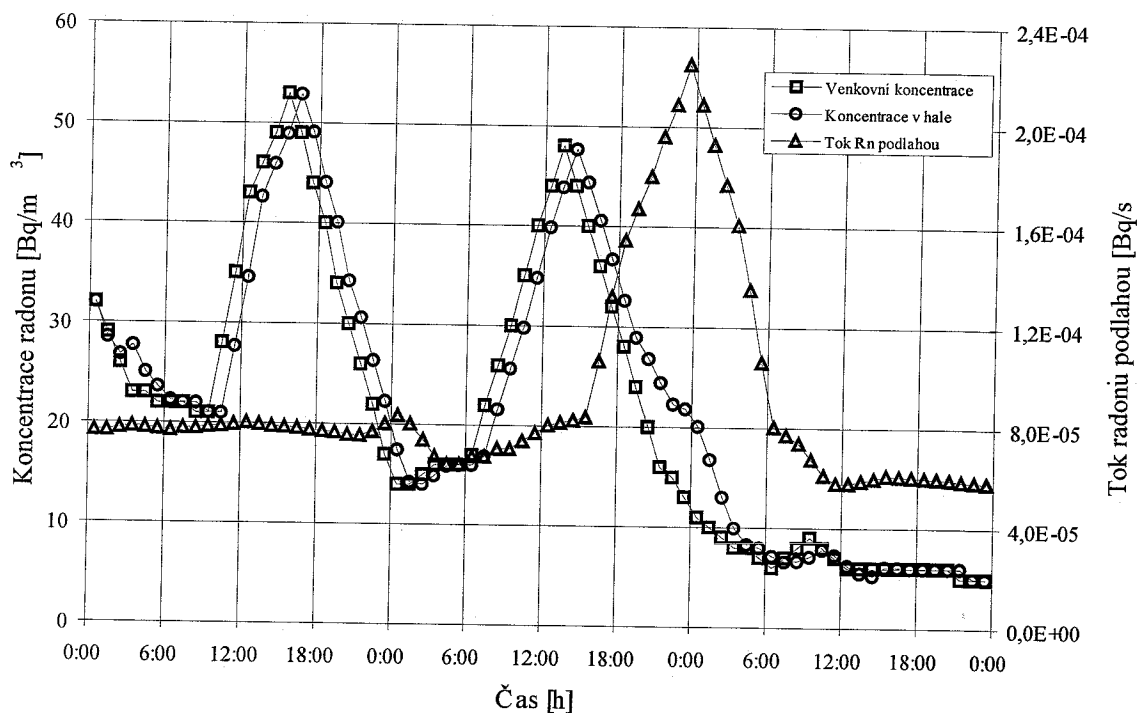
Velikost koncentrace po určité době bude

$$C_2 = C_1 \cdot e^{-\tau \left( \frac{V_p}{V} \right)} + \left( \frac{M}{V_p} + C_p \right) \cdot \left( 1 - e^{-\tau \left( \frac{V_p}{V} \right)} \right) \quad (9)$$

Na počátku jsou koncentrace ve všech místnostech stejné a rovnají se počáteční koncentraci radonu ve venkovním vzduchu  $C_{poč} = 32 \text{ Bq/m}^3$ . V dalších krocích se koncentrace mění podle průtoku vzduchu, množství unikajícího radonu a venkovní koncentrace radonu. Okamžité průtoky vzduchu byly získány ze simulace v prostředí ESP-r, následně byly v tabulkovém procesoru vypočteny koncentrace radonu.

## 5. Výsledky simulačních výpočtů

Jako příklad výsledků simulačních výpočtů je uveden průběh koncentrace radonu a hustoty toku radonu podlahou pro jednu místnost (halu) během tří říjnových dnů, viz graf 1. Z grafu je patrný vliv radonu pronikajícího podlahou místnosti.



Graf 1 - Koncentrace radonu v hale ve vybraných dnech v říjnu

## 6. Závěr

V daném případě koncentrace radonu v jednotlivých místnostech prakticky kopíruje koncentraci radonu ve venkovním vzduchu. I když byla na počátku výpočtu stejná koncentrace v místnostech i venku, dochází v průběhu výpočtu ke zpoždění průběhu koncentrací v místnostech vůči průběhu ve venkovním prostředí. To je dáno tím, že množství vzduchu, které proudí z venkovního prostředí je malé, neboť se uvažují stále uzavřená okna a dveře. Při velkém průtoku vzduchu bude průběh koncentrace radonu v místnostech stejný jako venku (tj. bez časového posunutí). Hustota toku radonu z podlahy je tak malá, že se prakticky neprojevuje na koncentraci radonu v místnosti a hlavní radonovou zátěž způsobuje kontaminovaný venkovní vzduch.

## Literatura

1. R. Collé, R. J. Rubin: Radon Transport through and Exhalation from Building Materials: A Review and Assessment, NBS Technical Note 1139, NBS, Washington 1981
2. Protection against Radon at Home and At Work, Proceedings of the European Conference in Prague, ČVUT v Praze, Praha 1997
3. R. Nový a kol.: Technika prostředí, ČVUT v Praze, Praha 1999

## Použité označení veličin

Označení	Veličina	Jednotka
$L$	tloušťka betonové desky	m
$l$	difúzní délka	m
$D$	difúzní součinitel	$m^2/s$
$\varepsilon$	součinitel pórovitosti	-
$\lambda$	konstanta rozpadu	$s^{-1}$
$Z$	svislá vzdálenost	m
$J_D$	plošná hustota toku $R_n$	$Bq/(s.m^2)$
$\phi$	objemová hustota produkce $R_n$	$Bq/(s.m^3)$
$C_1$	koncentrace $R_n$ na počátku kroku	$Bq/m^3$
$C_2$	koncentrace $R_n$ na konci kroku	$Bq/m^3$
$C_p$	koncentrace $R_n$ na přívodu	$Bq/m^3$
$V_p$	množství přiváděného vzduchu	$m^3/s$
$M$	množství vznikající škodliviny	$Bq/s$
$V$	objem místnosti	$m^3$
$\tau$	doba větrání	s