

---

**Instytut Fizyki Jądrowej  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
Polskiej Akademii Nauk  
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**  
[www.ifj.edu.pl/reports/2005.html](http://www.ifj.edu.pl/reports/2005.html)  
Kraków, wrzesień 2005

---

Raport Nr 1966/AP

**Przenikanie radonu z gruntu do budynku.  
Modelowanie komputerowe i weryfikacja  
w budynkach mieszkalnych**

*Mirosław Janik*

*Praca doktorska*

---

*Panu prof. dr hab. Jerzemu Łoskiewiczowi składam serdeczne podziękowanie za podjęcie się sprawowania opieki naukowej w trakcie wykonywania niniejszej pracy.*

*Dziękuję Koledze dr inż. Krzysztofowi Kozakowi, Koledze dr inż. Janowi Swakoniowi, Koleżance mgr inż. Jadwidze Mazur oraz Koleżance mgr Joannie Bogacz za pomoc w trakcie wykonywania eksperymentów i pomiarów, jak i za cenne uwagi podczas pisania pracy.*

*Dziękuję również Koledze Ryszardowi Haberowi oraz Koledze Tadeuszowi Zdziarskiemu za pomoc w trakcie wykonywania pomiarów środowiskowych oraz przyrzady do ich pomiarów wykonane w pracowni.*

*Dziękuję całej Pracowni Fizyki Transportu Neutronów IFJ PAN, a w szczególności Panu mgr inż. Andrzejowi Igielskiemu za umożliwienie wykonania pomiarów laboratoryjnych.*

*Gorąco dziękuję mojej Rodzinie, a zwłaszcza żonie Małgorzacie, za stałe wsparcie, wiarę i wyrozumiałość, co w istotny sposób przyczyniło się do powstania tej pracy, którą właśnie Im dedykuję.*

*Autor*

---

## Spis treści

<b>1. Wstęp.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Cel i zakres pracy.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Promieniowanie jonizujące i skutki jego działania.....</b>	<b>11</b>
3.1. Źródła promieniowania jonizującego.....	11
3.2. Radon.....	11
3.3. Podsumowanie.....	13
<b>4. Radon w gruncie.....</b>	<b>14</b>
4.1. Wprowadzenie.....	14
4.2. Źródła radonu.....	14
4.3. Parametry gruntu.....	18
4.4. Transport radonu.....	22
<b>5. Model przenikania radonu z gruntu do budynku.....</b>	<b>27</b>
5.1. Wstęp.....	27
5.2. Założenia modelu.....	28
5.3. Geometria modelu.....	31
5.4. Model fizyczny.....	31
5.5. Model matematyczny.....	32
5.6. Rozkład zaburzonego ciśnienia w gruncie.....	32
5.7. Produkcja radonu w gruncie.....	34
5.8. Strumień radonu przez grunt.....	34
5.9. Pole stężenia radonu w gruncie.....	35
5.10. Warunki brzegowe .....	35
5.11. Stężenie radonu w budynku.....	36
5.12. Radon z materiałów budowlanych.....	37
5.13. Podsumowanie.....	38
<b>6. Metody oraz urządzenia pomiarowe .....</b>	<b>39</b>
6.1. Pomiar stężenia $^{222}\text{Rn}$ oraz $^{220}\text{Rn}$ .....	39
6.2. Pomiar stężenia $^{222}\text{Rn}$ oraz $^{220}\text{Rn}$ w powietrzu gruntowym.....	41
6.3. Pomiar stężenia $^{222}\text{Rn}$ oraz $^{220}\text{Rn}$ w budynkach.....	42
6.4. Pomiar porowatości.....	42
6.5. Pomiar gęstości objętościowej.....	43
6.6. Pomiar gęstości właściwej.....	43
6.7. Pomiar stężenia $^{226}\text{Ra}$ w próbkach gruntu.....	44
<b>7. Przepuszczalność gruntu dla radonu.....</b>	<b>46</b>
7.1. Wstęp.....	46
7.2. Metoda pomiaru przepuszczalności IFJ.....	50
7.3. Metodyka pomiaru.....	52
7.4. Wyniki pomiarów.....	54
7.5. Badania terenowe.....	57
7.6. Wnioski.....	57
<b>8. Parametry gruntu oraz wybór budynków do badań .....</b>	<b>58</b>
8.1. Wstęp.....	58
8.2. Założenia.....	58
8.3. Metodyka badań.....	58
8.4. Opis budynków.....	60
8.4.1. B1 – Budynek nr 1 (Biertowice).....	60
8.4.2. B2 – Budynek nr 2 (Borowego).....	61
8.4.3. B3 – Budynek nr 3 (Tyniecka).....	62
8.4.4. B4 – Budynek nr 4 (Ojcowska).....	63
8.4.5. B5 - Budynek nr 5 (Kapelanka).....	64
<b>9. Wyniki pomiarów.....</b>	<b>65</b>

---

9.1. Wstęp.....	65
9.2. Budynek B1.....	66
9.3. Budynek B2.....	68
9.4. Budynek B3.....	70
9.5. Budynek B4.....	72
9.6. Budynek B5.....	74
9.7. Podsumowanie.....	76
<b>10. Program komputerowy TRIRAD .....</b>	<b>77</b>
10.1. Wstęp.....	77
10.2. Metoda różnic skończonych (dyskretyzacji).....	78
10.3. Model komputerowy.....	79
10.4. Program TRIRAD.....	80
10.5. Interfejs programu TRIRAD.....	82
10.6. Parametry wejściowe do programu.....	85
<b>11. Analiza porównawcza wartości zmierzonych i obliczonych .....</b>	<b>88</b>
11.1. Ocena poprawności modelu.....	88
11.2. Obliczenia modelowe.....	91
11.3. Analiza wyników.....	92
11.4. Budynek B1.....	93
11.5. Budynek B2.....	96
11.6. Budynek B3.....	98
11.7. Budynek B4.....	100
11.8. Budynek B5.....	102
11.9. Porównanie wartości stężeń <sup>222</sup> Rn w budynkach obliczonych i zmierzonych.....	104
<b>12. Podsumowanie i wnioski.....</b>	<b>105</b>
<b>13. Graficzna prezentacja wyników obliczeń programem TRIRAD.....</b>	<b>109</b>
13.1. Budynek B-1.....	109
13.2. Budynek B-2.....	111
13.3. Budynek B-3.....	113
13.4. Budynek B-4.....	115
13.5. Budynek B-5.....	117
<b>14. Literatura.....</b>	<b>119</b>
<b>15. Uzupełnienie A .....</b>	<b>123</b>
15.1. Przykład obliczeń za pomocą metody różnicowej.....	123
15.2. Wyznaczanie elementów kontrolnych.....	124
15.3. Równanie dyskretyzacyjne dla pola zaburzonego ciśnienia.....	127
15.4. Równanie dyskretyzacyjne dla pola stężenia radonu.....	128
<b>16. Uzupełnienie B.....</b>	<b>129</b>
16.1. Instalacja i uruchomienie programu TRIRAD.....	129
16.1.1. Uwagi.....	129
16.1.2. Struktura katalogów.....	129
16.1.3. Instalacja.....	129
16.1.4. Uruchomienie.....	129
16.1.5. Zapisywanie wyników.....	130

---

## Spis tabel, rysunków i ilustracji

---

### Indeks tabel

Tab. 3-1. Roczne dawki efektywne [UNS00].....	13
Tab. 4-1. Aktywności radu w wybranych formacjach geologicznych [Nie94, Naz88, Sun04].....	15
Tab. 4-2. Zawartości uranu, radu i radonu w wybranych gruntach [Cot87].....	16
Tab. 4-3. Parametry fizyczne dla wybranych rodzajów gruntu [Naz88].....	18
Tab. 4-4. Współczynniki dyfuzji i droga dyfuzji dla radonu w wybranych materiałach [Cot87, Naz88].....	23
Tab. 4-5. Źródła radonu w atmosferze [Bod89].....	26
Tab. 6-1. Podstawowe parametry przyrządu AlphaGUARD.....	40
Tab. 6-2. Parametry toru spektrometrycznego LPN IFJ PAN.....	44
Tab. 7-1. Wartości porowatości dla wybranych typów skał [Naz88, Cot87].....	47
Tab. 7-2. Przepuszczalność dla 3 rodzajów gruntu wg teorii Kozeny [Naz88].....	48
Tab. 7-3. Zależność współczynnika kształtu W od wysokości warstwy piasku dla dwóch prędkości przepływu.....	54
Tab. 7-4. Wyniki pomiarów prędkości 'v' do obliczeń współczynnika 'W'.....	55
Tab. 7-5. Parametry krzywej dopasowania w celu wyznaczenia W.....	56
Tab. 7-6. Porównanie wyników pomiarów przepuszczalności.....	57
Tab. 9-1. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B1.....	66
Tab. 9-2. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-1.....	67
Tab. 9-3. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-2.....	68
Tab. 9-4. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-2.....	69
Tab. 9-5. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-3.....	70
Tab. 9-6. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-3.....	71
Tab. 9-7. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-4.....	72
Tab. 9-8. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-4.....	73
Tab. 9-9. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-5.....	74
Tab. 9-10. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-5.....	75
Tab. 10-1. Dane wejściowe do programu TRIRAD.....	86
Tab. 11-1. Porównanie modeli UNSCEAR i TRIRAD.....	88
Tab. 11-2. Dane wejściowe do modeli opracowanie na podstawie UNSCEAR 2000.....	89
Tab. 11-3. Porównanie obliczeń szybkości wnikania radonu dla modeli UNSCEAR oraz TRIRAD.....	90
Tab. 11-4. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B1.....	93
Tab. 11-5. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1.....	93
Tab. 11-6. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2.....	93
Tab. 11-7. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3.....	94
Tab. 11-8. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4.....	94
Tab. 11-9. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B1.....	94
Tab. 11-10. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B2.....	96
Tab. 11-11. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1.....	96
Tab. 11-12. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2.....	96
Tab. 11-13. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3.....	96
Tab. 11-14. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4.....	97
Tab. 11-15. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B2.....	97
Tab. 11-16. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B3.....	98
Tab. 11-17. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1.....	98
Tab. 11-18. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2.....	98
Tab. 11-19. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3.....	98
Tab. 11-20. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4.....	99
Tab. 11-21. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B3.....	99
Tab. 11-22. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B4.....	100
Tab. 11-23. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1.....	100
Tab. 11-24. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2.....	100
Tab. 11-25. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3.....	100
Tab. 11-26. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4.....	101
Tab. 11-27. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B4.....	101
Tab. 11-28. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B5.....	102
Tab. 11-29. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1.....	102
Tab. 11-30. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2.....	102
Tab. 11-31. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3.....	102
Tab. 11-32. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4.....	103
Tab. 11-33. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B5.....	103
Tab. 11-34. Porównanie wartości obliczonych i zmierzonych stężeń radonu w badanych budynkach.....	104

---

## Indeks rysunków

Rys. 1-1. Zależność stężenia radonu w budynku od stężenia radonu w gruncie [Vau02].....	8
Rys. 3-1. Udział różnych źródeł promieniowania w średnim rocznym efektywnym równoważniku dawki otrzymanej przez mieszkańca Polski w 1998 r. [Jag98].....	11
Rys. 3-2. Radon i jego produkty rozpadu.....	12
Rys. 4-1. Mechanizmy odpowiedzialne za produkcję, migrację i wchodzenie radonu do budynku [Naz88].....	15
Rys. 4-2. Drogi wnikania radonu do budynku.....	17
Rys. 4-3. Mechanizm ekshalacji radonu i toronu.....	19
Rys. 4-4. Proces emanacji radonu z ziarna [Cot87].....	20
Rys. 4-5. Zależność współczynnika emanacji radonu od rozmiaru ziarna [Gre96].....	21
Rys. 4-6. Radon, toron oraz produkty ich rozpadu w atmosferze [Pos93].....	22
Rys. 4-7. Zależność współczynnika dyfuzji $^{222}\text{Rn}$ od wilgotności [Rog91b, UNS00].....	24
Rys. 4-8. Zależność ekshalacji w funkcji wilgotności [Cot87].....	24
Rys. 4-9. Charakterystyka zmian stężenia radonu oraz ciśnienia.....	26
Rys. 4-10. Zależność stężenia radonu w gruncie od głębokości [Due99].....	26
Rys. 5-1. Zmiany stężeń radonu w budynku mieszkalnym [Jan98].....	29
Rys. 5-2. Konfiguracja geometryczna bloku gruntu oraz budynku.....	31
Rys. 5-3. Schemat przedstawiający główne elementy modelu.....	32
Rys. 5-4. Strefy warunków brzegowych dla modelu.....	36
Rys. 6-1. Schemat układu do pomiaru sumarycznego stężenia radonu i toronu.....	42
Rys. 6-2. Przykładowe widmo gamma spektrometryczne próbki gruntu uzyskane na spektrometrze z zaznaczeniem pików 186 keV oraz 1001 keV.....	45
Rys. 7-1. Zakres przepuszczalności gruntu [Naz88].....	46
Rys. 7-2. Zależność znormalizowanej przepuszczalności od wilgotności [Rog91a].....	48
Rys. 7-3. Względna przepuszczalność piasku ilastego dla powietrza i wody w funkcji nasycenia wodą [Naz88].....	49
Rys. 7-4. Rozkład ziarnowy dla dwóch różnych typów gruntu.....	50
Rys. 7-5. Schemat układu do pomiaru przepuszczalności 'k' gruntu in-situ (dla 'k' poniżej 2,5kPa).....	51
Rys. 7-6. Schemat układu do pomiaru przepuszczalności 'k' gruntu in-situ (dla 'k' do 10kPa).....	51
Rys. 7-7. Porównanie przepuszczalności zmierzonej i teoretycznej [Rog91a].....	52
Rys. 7-8. Schemat kalibratora sond gruntowych.....	53
Rys. 7-9. Zależność $W$ od wysokości warstwy piasku dla dwóch prędkości przepływu.....	54
Rys. 7-10. Współczynnik kształtu $W$ w funkcji prędkości przepływu $v$ .....	56
Rys. 7-11. Rozkład ziarnowy piasków użytych do kalibracji sond.....	57
Rys. 8-1. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B1.....	60
Rys. 8-2. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B2.....	61
Rys. 8-3. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B3.....	62
Rys. 8-4. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B4.....	63
Rys. 8-5. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B5.....	64
Rys. 9-1. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B1.....	67
Rys. 9-2. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-2.....	69
Rys. 9-3. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-3.....	71
Rys. 9-4. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-4.....	73
Rys. 9-5. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-5.....	75
Rys. 10-1. Siatka dwuwymiarowa.....	78
Rys. 10-2. Schemat blokowy programu TRIRAD.....	81
Rys. 10-3. Ekran powitalny programu TRIRAD.....	82
Rys. 10-4. Ekran z danymi wejściowymi do programu TRIRAD.....	83
Rys. 10-5. Ekran "Wykonaj obliczenia".....	83
Rys. 10-6. Ekran "Pokaż wyniki".....	84
Rys. 10-7. Ekran przedstawiający elementy kontrolne w 3 płaszczyznach.....	84
Rys. 11-1. Porównanie modeli UNSCEAR i TRIRAD.....	90
Rys. 11-2. Geometria 1/4 budynku z naniesionymi wymiarami użytymi do obliczeń.....	91
Rys. 11-3. Schemat obliczeń modelowych do badania zmienności przestrzennych.....	92
Rys. 12-1. Wpływ parametrów wejściowych na zmianę stężenia radonu wewnątrz budynku.....	107
Rys. 13-1. Elementy Kontrolne dla budynku B1.....	109
Rys. 13-2. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B1.....	110
Rys. 13-3. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B1.....	110
Rys. 13-4. Elementy Kontrolne dla budynku B2.....	111
Rys. 13-5. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B2.....	112
Rys. 13-6. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B2.....	112
Rys. 13-7. Elementy Kontrolne dla budynku B3.....	113
Rys. 13-8. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B3.....	114
Rys. 13-9. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B3.....	114
Rys. 13-10. Elementy Kontrolne dla budynku B4.....	115

---

Rys. 13-11. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B4.....	116
Rys. 13-12. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B4.....	116
Rys. 13-13. Elementy Kontrolne dla budynku B5.....	117
Rys. 13-14. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B5.....	118
Rys. 13-15. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B5.....	118
Rys. 15-1. Punkty siatki w zagadnieniu jednowymiarowym.....	123
Rys. 15-2. Profil krokowy.....	124
Rys. 15-3. 1/4 bloku gruntu ze zdefiniowanym układem współrzędnych.....	124
Rys. 15-4. Schemat bloku gruntu wraz z zaznaczonymi strefami.....	125
Rys. 15-5. Idea algorytmu do obliczeń elementów kontrolnych.....	126
Rys. 15-6. 2-wymiarowy element kontrolny .....	128

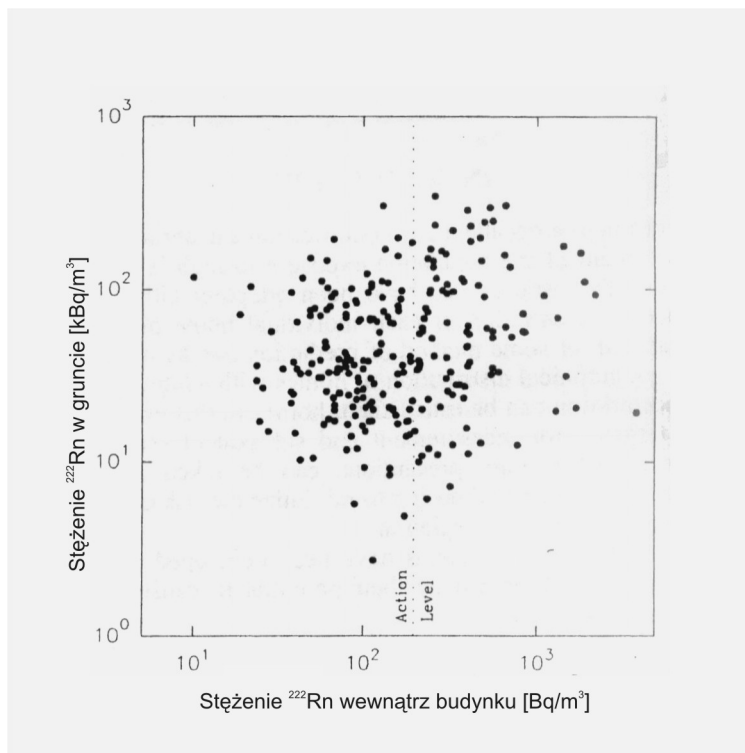
## Indeks ilustracji

Ilustracja 6-1. AlphaGUARD PQ 2000 Pro f-my Genitron będący na wyposażeniu pracowni LPN IFJ PAN.....	39
Ilustracja 6-2. Przystawka Multisensor D/D f-my Genitron.....	40
Ilustracja 6-3. Świder okienkowy oraz sonda gruntowa wykonane w IFJ-PAN.....	41
Ilustracja 7-1. Kalibratory sond gruntowych.....	53

## 1. Wstęp

Dawka promieniowania jonizującego pochodząca od radonu stanowi na terenie Polski ok. 40% całkowitej dawki dla populacji, jak podaje opracowywany w CLOR „Radiologiczny Atlas Polski – 1997” [Jag98]. Przy średnim rocznym efektywnym równoważniku dawki wynoszącym w roku 1998 wg CLOR 3,3 mSv dawka od radonu wynosi ok. 1,32 mSv, dlatego też jest to ważny problem z punktu widzenia ochrony radiologicznej. Od wielu lat prowadzone są badania mające na celu poznanie rzeczywistego zagrożenia jakie niesie radon i jego pochodne.

Głównym źródłem radonu jest grunt. Próby prognozowania stężenia radonu w budynkach mieszkalnych opierające się jedynie na wartości stężenia radonu w powietrzu gruntowym lub stężenia radu w gruncie nie dały zadowalających rezultatów (Rys. 1-1).



Rys. 1-1. Zależność stężenia radonu w budynku od stężenia radonu w gruncie [Vau02]

Prowadzone badania wskazują, że zależności te są bardziej złożone. Obserwowane poziomy stężenie radonu w budynkach mieszkalnych są wynikiem złożonych procesów obejmujących zarówno powstawanie i rozpad radonu oraz radu w gruncie, przepuszczalność i porowatość gruntu, radon uwalniany z materiałów budowlanych, typ podpiwniczenia budynku, czynniki meteorologiczne czy też styl życia mieszkańców.



W celu prognozowania stężeń radonu stosuje się modele matematyczne opisujące te procesy. Pozwala to na określenie stopnia zagrożenia radiologicznego dla przyszłych mieszkańców, a co za tym idzie na stosowanie odpowiednich technik zabezpieczających.

W wielu krajach „problem radonowy” posiada uregulowania prawne. W Polsce do 31.12.2002 roku obowiązywało Zarządzenie Prezesa PAA opublikowane w Monitorze Polskim Nr 35 z 1995 roku określające tzw. poziom działania – powyżej którego powinno podjąć się działania zaradcze, ograniczające poziom stężenia radonu w budynku, który dla budynków wybudowanych przed 1998 roku wynosi  $400 \text{ Bq/m}^3$ , natomiast dla budynków wybudowanych po 1998 roku –  $200 \text{ Bq/m}^3$ .

W przygotowywanych do druku w 2005 roku materiałach ICRP (International Commission of Radiological Protection) proponowane są zalecenia określające „poziom działania” przy stężeniu radonu  $600 \text{ Bq/m}^3$ .

## 2. Cel i zakres pracy

---

Celem niniejszej pracy jest opracowanie metody, z wykorzystaniem modelowania komputerowego, służącej do określania stężenia radonu, który przenika do budynku zarówno z gruntu jak i z materiałów budowlanych. Autor w swej pracy bazuje na modelu Loureiro, który zakłada, że głównym mechanizmem powodującym przechodzenie radonu z gruntu do budynku jest ujemna różnica ciśnień (rzędu kilku Pa) pomiędzy wnętrzem budynku a otoczeniem.

Autor między innymi:

- rozszerzył model Loureiro opisujący transport radonu poprzez uwzględnienie zjawiska ekshalacji radonu ze ścian budynku;
- zastosował rozszerzony model Loureiro do napisania programu komputerowego TRIRAD;
- opracował algorytm pozwalający zbadać wpływ parametrów gruntu wokół budynku na wartość stężenia radonu wewnątrz niego;
- ocenił poprawność opracowanego modelu wykonując pomiary w pięciu budynkach mieszkalnych i porównując je z wynikami obliczeń modelowych przeprowadzonych programem TRIRAD;
- opracował metodę pomiaru przepuszczalności gruntu *in-situ* z wykorzystaniem sondy gruntowej IFJ;
- opracował efektywną metodę poboru próbek gruntu do pomiarów porowatości.

Pierwsza część pracy zawiera opis zagadnień dotyczących problematyki związanej z radonem. Omówione są w niej takie zagadnienia jak: promieniowanie jonizujące i jego wpływ na organizmy żywe, a także poziomy stężenie radonu zarówno w budynkach jak i gruncie.

W części drugiej przedstawiono wyniki pomiarów terenowych wykonanych pod kątem przetestowania udoskonalonego przez autora 3-wymiarowego modelu Loureiro.

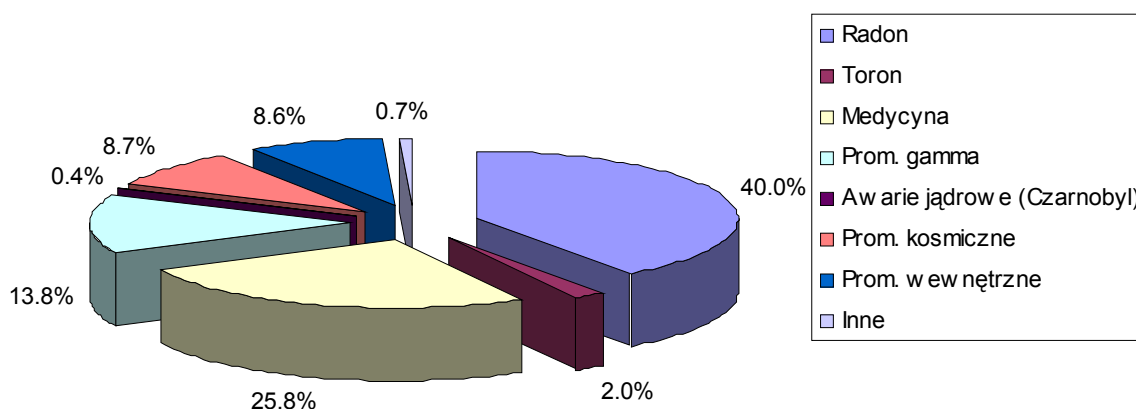
Dane wejściowe do obliczeń programem TRIRAD wymagały wykonania szeregu pomiarów, zarówno laboratoryjnych jak też *in-situ*. Autor wykonał pomiary: przepuszczalności gruntu jako jednego z najważniejszych parametrów opisujących transport radonu w guncie, porowatości gruntu, stężenia radu w gruncie, stężenia radonu w gruncie i budynkach mieszkalnych, wilgotności gruntu oraz różnicy temperatur i ciśnień wewnątrz i na zewnątrz budynku. Cel jaki autor przed sobą postawił został osiągnięty. Opracowana metoda pomiarowa pozwala, poprzez wykonanie kilkunastu pomiarów, na efektywną ocenę przydatności terenu przeznaczonego pod budowę z punktu widzenia narażenia radiologicznego dla mieszkańców nowopowstającego budynku.

### 3. Promieniowanie jonizujące i skutki jego działania

#### 3.1. Źródła promieniowania jonizującego

Źródła promieniowania jonizującego możemy podzielić ze względu na pochodzenie na dwa rodzaje: naturalne, do których zaliczamy promieniowanie kosmiczne i rozpady promieniotwórcze jąder pierwiastków naturalnych (w tym radon) oraz sztuczne, które powstają w wyniku działalności człowieka i do nich możemy zaliczyć m.in. akceleratory cząstek i reaktory jądrowe.

Dawka promieniowania otrzymywana przez człowieka zależy m.in. od miejsca gdzie żyje dana populacja. Dla mieszkańców Polski średni roczny efektywny równoważnik dawki, obliczony zgodnie z rekomendacjami UNSCEAR 1993, wynosi 3,3 mSv [UNS93]. Największy udział w całkowitej dawce ma promieniowanie pochodzące od radionuklidów naturalnych. Znaczny udział w dawce ma promieniowanie jonizujące stosowane w diagnostyce medycznej. Udziały poszczególnych źródeł promieniowania w sumarycznej dawce przedstawiono na rysunku 3-1.



Rys. 3-1. Udział różnych źródeł promieniowania w średnim rocznym efektywnym równoważniku dawki otrzymanej przez mieszkańca Polski w 1998 r. [Jag98]

#### 3.2. Radon

Promieniowanie jonizujące pochodzące od radonu stanowi ok. 40-55 % całkowitej efektywnej dawki rocznej w zależności od położenia geograficznego, dlatego też jest to ważny problem z punktu widzenia ochrony radiologicznej.

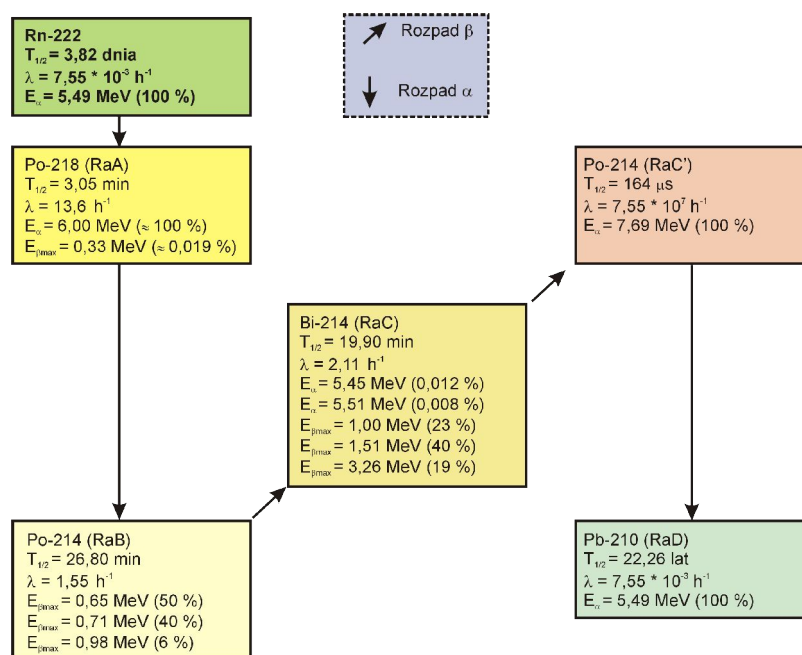
Radon posiada trzy izotopy promieniotwórcze, z tego dwa - tzn.  $^{222}\text{Rn}$  (radon) pochodzący z szeregu uranowego, o czasie połowicznego zaniku 3,82 dnia oraz  $^{220}\text{Rn}$  (toron) - pochodzący z szeregu torowego - o czasie połowicznego zaniku 55 s, dają główny wkład w dawkę roczną pochodzącą od promieniowania naturalnego. Izotop  $^{219}\text{Rn}$  o czasie połowicznego zaniku 4 sekund nie jest brany pod uwagę.

Produkty rozpadu radonu można podzielić na 2 grupy:

- „krótkożyciowe” z czasami połowicznego rozpadu poniżej 30 min, w skład której wchodzi  $^{218}\text{Po}$  (tzw. RaA, o czasie połowicznego rozpadu 3,05 min),  $^{214}\text{Pb}$  (RaB, 26,8 min),  $^{214}\text{Bi}$  (RaE, 19,7 min) oraz  $^{214}\text{Po}$  (RaC', 164  $\mu\text{s}$ ),
- „długożyciowe”:  $^{210}\text{Pb}$  (RaD, 22,3 lat),  $^{210}\text{Bi}$  (RaE, 5,01 dnia) oraz  $^{210}\text{Po}$  (RaF, 138,4 dnia).

Toron nie posiada „długożyciowych” produktów rozpadu, a głównym radionuklidem pochodzącym z jego łańcucha rozpadu jest  $^{212}\text{Pb}$  z czasem połowicznego zaniku 10,6 godz, z którego powstaje alfa-promieniotwórczy izotop  $^{212}\text{Bi}$  (60,6 min).

Produkty rozpadu radonu (który jest gazem) są ciałami stałymi (zachowują się zupełnie inaczej niż radon) i łatwo doczepiają się do istniejących w atmosferze aerozoli. Produkty te rozpadają się emitując cząstki alfa lub beta z towarzyszeniem promieniowania gamma.



Rys. 3-2. Radon i jego produkty rozpadu

Rozpad pochodnych radonu (poprzez emisję cząstek  $\alpha$ ) na ściankach płuc ma główny wpływ w wielkość dawki otrzymanej przez organy wchodzące w skład dróg oddechowych.

### 3.3. Podsumowanie

Średnia efektywna dawka roczna, szacowana przez UNSCEAR, wynosi ok. 2,4 mSv. W tabeli 3-1 zebrane są roczne dawki efektywne wywołane naturalnymi źródłami promieniotwórczości na obszarach normalnej radioaktywności, otrzymywane przez osoby dorosłe.

Tab. 3-1. Roczne dawki efektywne [UNS00]

Źródło promieniowania	Napromieniowanie [ $\mu$ Sv]		
	Zewnętrzne	Wewnętrzne	Całkowite
<i>Promieniowanie kosmiczne</i>			
- składowa jonizująca	300	-	300
- składowa neutronowa	80	-	80
<i>Radionuklidy kosmogeniczne</i>	-	12	12
<i>Szereg uranowo-torowy (bez radonu)</i>	115	60	175
<i>Szereg torowy (bez toronu)</i>	185	6	191
<i>Radon i produkty rozpadu</i>	-	1270	1270
<sup>40</sup> K	160	165	325
<sup>85</sup> Rb	-	6	6
<b>Suma</b>	<b>840</b>	<b>1520</b>	<b>2360</b>

## 4. Radon w gruncie

---

### 4.1. Wprowadzenie

Głównym źródłem radonu oraz toronu są skały oraz grunt. Ich stężenie w danym punkcie jest funkcją:

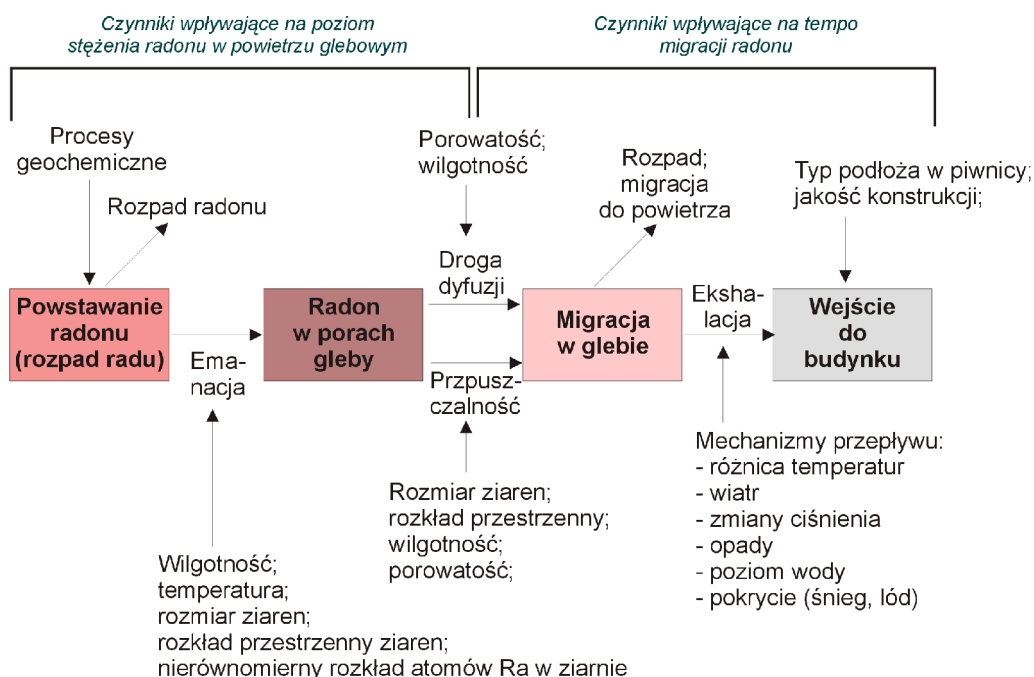
- stężenia i rozkładu w gruncie prekursora radonu i toronu czyli radu;
- parametrów fizyko-chemicznych gruntu;
- transportu radonu z gruntu do biosfery;
- uwalnianie radonu z głębszych warstw gruntu;
- czasu połowicznego zaniku radonu.

W pracy, autor pod pojęciem „grunt” rozumie warstwę o grubości do 10 m definiowaną jako „naturalny twór wierzchniej warstwy skorupy ziemskiej, powstały ze zwiertzeliny skalnej w wyniku oddziaływania na nią zmieniających się w czasie zespołów organizmów żywych i czynników klimatycznych w określonych warunkach rzeźby terenu” [Kow01].

### 4.2. Źródła radonu

Naturalne izotopy radonu powstają w wyniku samorzutnego rozpadu promieniotwórczego izotopów wchodzących w skład trzech naturalnych szeregów promieniotwórczych.

Parametry gruntu takie jak: wilgotność, temperatura, rozmiar ziaren, rozmieszczenie atomów radu w ziarnie oraz czas połowicznego zaniku radu i radonu są czynnikami wpływającymi na wartość stężenia radonu w gruncie. Rysunek 4-1 pokazuje historię transportu radonu z uwzględnieniem różnych czynników fizycznych determinujących tempo zjawiska i ostateczną ilość radonu w pomieszczeniu. Czynniki odpowiedzialne za migrację radonu w gruncie oraz wchodzenie do budynku zależne są od warunków gruntowych oraz od parametrów budynku. Wśród nich można wymienić a) przepuszczalność zależną od wilgotności, porowatości, gęstości gruntu, rozmiarów ziaren, b) mechanizmy powodujące migrację radonu takie jak dyfuzja, konwekcja, na które mogą mieć wpływ gradienty temperatur, gradienty ciśnienia, zmiany dobowe i sezonowe oraz parametry meteorologiczne.



Rys. 4-1. Mechanizmy odpowiedzialne za produkcję, migrację i wchodzenie radonu do budynku [Naz88]

Radon i toron wchodzą w skład szeregów promieniotwórczych, uranowego w przypadku radonu oraz torowego dla toronu. Prekursorem dla  $^{222}\text{Rn}$  jest  $^{226}\text{Ra}$  (element szeregu uranowego), a dla  $^{220}\text{Rn}$  –  $^{228}\text{Ra}$  (z szeregu torowego). Tabela 4-1 przedstawia zawartości radu w różnych formacjach skalnych. Największą zawartością radu charakteryzują się skały granitowe, zmetamorfizowane skały magmowe oraz łupki, w których średnie stężenie wynosi około 50 Bq/kg.

Tab. 4-1. Aktywności radu w wybranych formacjach geologicznych [Nie94, Naz88, Sun04]

Material	Aktywność właściwa $^{226}\text{Ra}$ [Bq/kg]		Aktywność właściwa $^{228}\text{Ra}$ [Bq/kg]	
	Średnia	Zakres	Średnia	Zakres
<i>Skały magmowe</i>				
<i>Sjenity</i>	692	4 – 8930	5	2 – 3560
<i>Granity</i>	78	1 – 372	111	0,4 – 1025
<i>Dioryty</i>	40	1 – 285	49	2 – 429
<i>Bazalty</i>	11	0,4 – 41	10	0,2 – 36
<i>Gabro</i>	10	0,1 – 71	9	0,1 – 61
<i>Skały pochodzenia osadowego</i>				
<i>Wapień</i>	25	0,4 – 223	7	0 – 45
<i>Węgle</i>	26	-	-	-
<i>Piaskowce</i>	19	-	-	-
<i>Iły</i>	50	14 – 198	35	8 – 223
<i>Skały metamorficzne</i>				
<i>Gnejsy</i>	50	1 – 1835	60	0,4 – 421

<i>Material</i>	<i>Aktywność właściwa <sup>226</sup>Ra</i> <i>[Bq/kg]</i>		<i>Aktywność właściwa <sup>228</sup>Ra</i> <i>[Bq/kg]</i>	
<i>Łupki</i>	37	1 – 657	49	0,4 – 368
<i>Gleba</i>				
<i>Szaroziem</i>	32	-	-	-
<i>Gleba kasztanowa</i>	27	-	-	-
<i>Czarnoziem</i>	22	-	-	-
<i>Gleby bagienne</i>	6	-	-	-

W tabeli 4-2 zebrano zawartości uranu i radu w różnych typach gruntu. Nie ma prostej zależności pomiędzy zawartością uranu (radu) i radonu w gruncie.

Tab. 4-2. Zawartości uranu, radu i radonu w wybranych gruntach [Cot87]

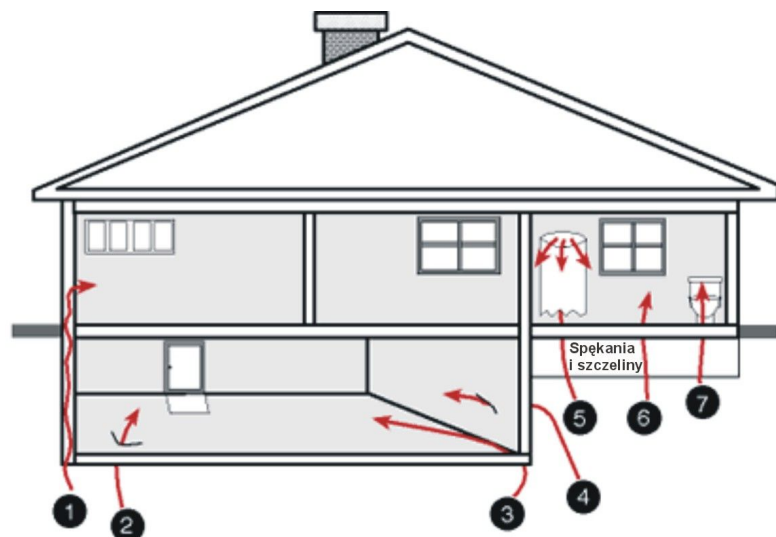
<i>Typ gruntu</i>	<i>Zawartość U</i> <i>[ppm]</i>	<i>Rad-226</i> <i>[Bq/kg]</i>	<i>Radon w gruncie</i> <i>[Bq/m3]</i>
<i>Szwecja</i>			
<i>Glina morenowa, normalna</i>	-	15 – 62	5000 – 30000
<i>Glina morenowa granitowa</i>	5 – 30	30 – 125	10000 – 60000
<i>Glina morenowa (granit bogaty w U)</i>	-	125 – 360	10000 – 200000
<i>Glina morenowa (łupek aluowy)</i>	10 – 100	175 – 2500	100000 - >1000000
<i>Ester</i>	4 – 10	30 – 75	10000 – 200000
<i>Piasek, ił</i>	-	6 – 70	2000 – 30000
<i>Glina</i>	-	25 – 100	10000 – 80000
<i>USA</i>			
<i>Lodowiec aluwialny</i>	2 – 3	-	2000 – 40000
<i>Reading Prong., NJ</i>	-	-	40000 - >1000000

Można stwierdzić, że skały magmowe (granity) oraz towarzyszące im skały powstałe w procesach pomagmowych wykazują znacznie większą zawartość <sup>226</sup>Ra i <sup>228</sup>Ra, niż skały metamorficzne i osadowe. Znajomość typu podłoża pozwoli oszacować od strony geologicznej, gdzie występują obszary „podwyższonego ryzyka radonowego”. Ponieważ pomiędzy uranem i radem zwykle zachowana jest równowaga promieniotwórcza, dlatego też miejsca tworzenia się radonu związane są ze złożami lub miejscami okruszczenia skał uranem. Radon powstaje jednakże w każdej skale, ponieważ zarówno uran jak i rad występują w całej skorupie ziemskiej. Typowa wartość aktywności właściwej radu w przypowierzchniowej warstwie skorupy ziemskiej, gdzie nie występują złoża rud uranowych wynosi około 35 Bq/kg [UNS00], natomiast w Polsce średnia wartość kształtuje się na poziomie 26 Bq/kg, a zmierzony zakres to 5 – 120 Bq/kg. [Jag98].

Głównym źródłem radonu w budynku jest grunt. Wg EPA (Environmental Protection Agency) w USA 86 – 90 % radonu pochodzi z podłoża, 2 – 5 % z materiałów budowlanych a poniżej 1 % z wody. Jego ilość zależy więc od typu podłoża na jakim jest posadowiony



budynek, a także od parametrów samego budynku, w szczególności od typu podpiwniczenia (wylewka betonowa, płytki ceramiczne, ziemia, itp...) oraz od szybkości wentylacji pomieszczeń. Rysunek 4-2 przedstawia typowe drogi wnikania radonu z gruntu do budynku, wśród których są przede wszystkim spękania w ścianach i podłożu (1, 2, 4, 6), złącza konstrukcyjne (3) oraz nieszczelności wokół rur kanalizacyjnych (7).



**Oznaczenia:**

- 1, 4 – szczeliny w ścianach
- 2, 6 – szczeliny w podłożu
- 3 – złącza konstrukcyjne
- 5 – woda
- 7 – rury kanalizacyjne

Rys. 4-2. Drogi wnikania radonu do budynku

Wybudowanie budynku musi wiązać się z dostaniem do głębszych, o wyższym stężeniu radonu, warstw gruntu. Powstaje tzw. „efekt kominowy”, czyli zasysanie radonu do wnętrza budynku, ponieważ ciśnienie w budynku (piwnicy) jest niższe niż na zewnątrz. Dlatego też wyższych stężeń można spodziewać się w pomieszczeniach graniczących bezpośrednio z gruntem niż w pomieszczeniach na wyższych kondygnacjach [Maj92, Arv95, Naz88]. Prowadzone przez autora badania pokazują zmiany sezonowe stężenia radonu [Jan97a]. W zimie obserwowane jest wyższe stężenie radonu w pomieszczeniach niż w lecie, gdy obserwowane stężenia są najniższe. Te wyższe stężenia w zimie spowodowane są zamarzaniem przypowierzchniowych warstw gruntu oraz brakiem dostatecznej wentylacji pomieszczeń [Arv95, Jon99]. Jak podaje USCEAR maksymalne stężenia obserwowane były w Szwecji i wynosiły ponad 85 000 Bq/m<sup>3</sup>.

W Polsce stężenia radonu w budynkach wynoszą od kilkunastu do kilku tysięcy Bq/m<sup>3</sup> w zależności od regionu, przy czym średnia dla Polski wynosi 32 Bq/m<sup>3</sup> [UNS00]. Najwyższe zanotowane przez zespół LPN IFJ PAN stężenia, w granicach 15 000 Bq/m<sup>3</sup> występują w rejonie Jeleniej Góry. W rejonie Krakowa średnie stężenie radonu w budynkach wynosi 50 Bq/m<sup>3</sup> [Nie94]. Najwyższe zmierzone przez autora chwilowe stężenia w rejonie Krakowa to ok. 2 500 Bq/m<sup>3</sup>.

### 4.3. Parametry gruntu

Na ilość radonu wokół budynku mają wpływ fizyczne parametry otaczającego go gruntu. Część z nich zostanie przedstawiona w tym paragrafie, natomiast problem przepuszczalności będzie rozważany w rozdziale 6.

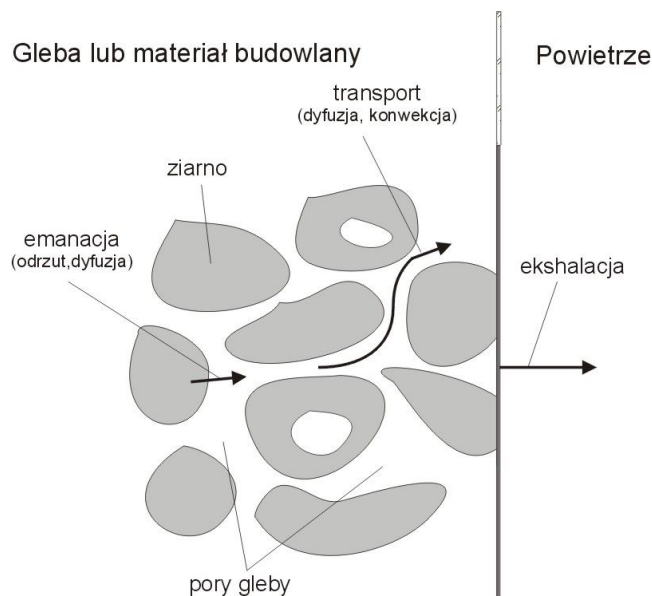
Grunt składa się z dwóch frakcji: frakcji stałej zawierającej głównie ziarna minerałów i ziarna substancji organicznych oraz frakcji pustej zawierającej medium (powietrze gruntowe lub wodę) wypełniające przestrzenie międzyziarnowe (pory gruntu). Grunt możemy sklasyfikować poprzez następujące parametry: rozmiary ziaren, porowatość, wilgotność oraz przepuszczalność. W tabeli 4-3 podane są parametry charakterystyczne dla każdego rodzaju gruntu.

Tab. 4-3. Parametry fizyczne dla wybranych rodzajów gruntu [Naz88]

Typ gruntu	Rozmiary ziaren [ $\mu\text{m}$ ]	Porowatość [-]	Wilgotność [%]	Zakresy przepuszczalności [ $\text{m}^2$ ]
Piasek	60 – 2000	0,4	15	$10^{-11} - 10^{-14}$
Pył	2 – 60	0,5	58	$10^{-12} - 10^{-15}$
Il	< 2	0,6	68	$10^{-14} - 10^{-16}$

W celu zrozumienia procesów powstawania i transportu radonu z gruntu do atmosfery należy rozważyć następujące zagadnienia:

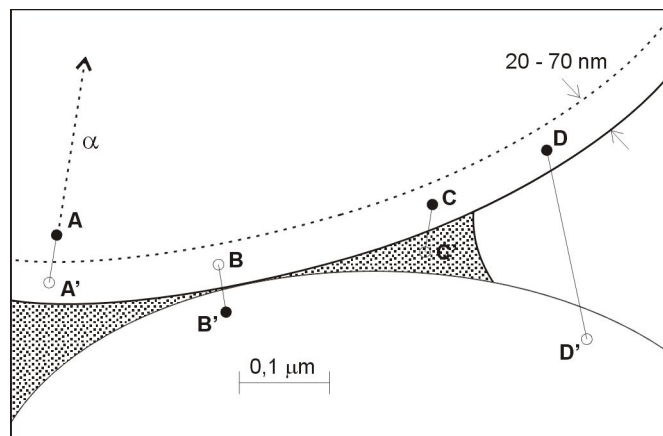
- wydostawanie się radonu z ziarna do przestrzeni międzyziarnowej – tzw. „emanacja”;
- transport radonu w gruncie, który następuje poprzez:
  - dyfuzję molekularną;
  - konwekcję;
- porywanie przez strumienie gazów (głównie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  i inne gazy);
- unoszenie przez wodę;
- ekshalację (uwalnianie się radonu z podłoża).



Rys. 4-3. Mechanizm ekshalacji radonu i toronu

Rozpad radu w ziarnie gruntu powoduje powstawanie atomów radonu. Część radonu może się wydostać do obszaru międzyziarnowego wypełnionego wodą lub gazem. Stosunek ilości radonu powstałego w ziarnie z rozpadu radu do ilości radonu uwolnionego z ziarna zwany jest współczynnikiem emanacji. Proces emanacji jest złożeniem trzech komponentów: odrzutu bezpośredniego, odrzutu pośredniego oraz dyfuzji. Nazwy tych komponentów wynikają z końcowego miejsca ulokowania się atomu radonu po rozpadzie radu. W przypadku odrzutu bezpośredniego jest to obszar międzyziarnowy (przypadek „C” na rysunku 4-4). Przedostanie się atomu radonu po rozpadzie radu do innego ziarna (przypadek „B” oraz „D”) jest to odrzut pośredni. Nie zostało oszacowane jaki procent przypada na odrzut pośredni, a jaki na bezpośredni, jednakże udział odrzutu pośredniego nie powinien być znacząco większy od odrzutu bezpośredniego. Frakcja dyfuzyjna odpowiada przypadkowi „A”. Atom radonu nie wydostaje się z ziarna i migruje on do porów poprzez dyfuzję molekularną wewnątrz ziarna.

Z powodu małego współczynnika dyfuzji gazu w ziarnach gruntu, procesem dominującym jest tzw. „odrzut alfa”. Po rozpadzie atomu radu, powstający atom radonu lub toronu nabywa energii kinetycznej o energii odpowiednio 86 keV lub 123 keV, dlatego też może migrować w ziarnie gruntu i wydostać się z niego. Odległość jaką atom radonu może przebyć w ziarnie wskutek odrzutu waha się w granicach 40 – 60 nm, w powietrzu jest to ok. 60  $\mu\text{m}$ , natomiast w wodzie w granicach 100 nm.



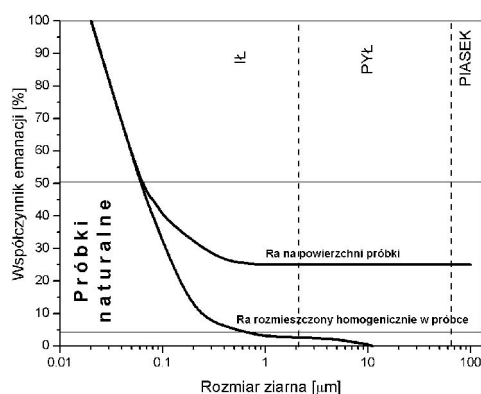
Rys. 4-4. Proces emanacji radonu z ziarna [Cot87]

Na rysunku 4-4 przedstawione są 4 możliwe przypadki, historii atomu radonu po jego rozpadzie. Atom „A” jest ulokowany poza strefą odrzutu i jest on zatrzymany w ziarnie. Atom „B” jest co prawda w obrębie strefy odrzutu, lecz po odrzucie został osadzony w sąsiednim ziarnie. Atom „C” wydostał się z ziarna i został zatrzymany przez wodę znajdującą się w przestrzeni międzyporowej, która pozbawiła go energii odrzutu. Natomiast atom „D” co prawda wydostał się z ziarna, lecz ze względu na to, że powietrze w przestrzeni międzyziarnowej ma małe zdolności spowalniające, ulokowany został w sąsiednim ziarnie. Ważną rolę w procesie wydostawania się radonu z ziarna o rozmiarach przekraczających drogę dyfuzji odgrywa rozłożenie atomów jego izotopu macierzystego, czyli radu, w ziarnie. Jeżeli rad jest rozmieszczony równomiernie w ziarnie, to wraz ze wzrostem objętości ziaren ilość wydostających się atomów radonu z ziarna będzie malała. Z ziaren o średnicy ok. 1 mm może uwolnić się zaledwie 0,005 % atomów radonu, natomiast w przypadku ziaren o średnicy 1  $\mu\text{m}$  ilość uwolnionych atomów radonu sięga 5 %. Główna część radonu pochodząca od odrzutu alfa pochodzi z wnętrza ziarna, ponieważ ziarno posiada dużo otwartych porów z dużą powierzchnią emanacji. Dlatego też radon wychodzi z ziarna do tych wewnętrznych porów, a następnie poprzez dyfuzję wydostaje się do przestrzeni międzyziarnowej. Te wewnętrzne pory zwane są „nanoporami”, ponieważ ich średnica wynosi około 10 – 20 nm. Istotnym czynnikiem wpływającym na proces emanacji jest wilgotność. Niska wilgotność w porach międzyziarnowych powoduje wzrost udziału frakcji odrzutu bezpośredniego, ponieważ woda znacznie zmniejsza zasięg odrzutu. Warstwa wody o grubości rzędu 0,1  $\mu\text{m}$  skutecznie hamuje atomy radonu w wodzie. Jednakże w przypadku wypełnienia wodą porów wewnątrz ziarna współczynnik dyfuzji radonu z tego ziarna ulega zmniejszeniu, ponieważ dyfuzja radonu w wodzie jest ok. 3 rzędy wielkości wolniejsza niż w powietrzu. Rozpuszczalność radonu w wodzie zmniejsza się wraz z temperaturą. Współczynnik podziału radonu pomiędzy wodę

i gaz dany jest przez współczynnik Oswalda, określający stosunek stężenia radonu w wodzie i w powietrzu. Wartość tego współczynnika zmienia się w zakresie od 0,53 przy temperaturze wody 0 °C do 0,23 przy temperaturze wody 25 °C [UNS00]. Typową, przyjmowaną wartością do obliczeń stężenia radonu w wodzie jest wartość 0,30 przy temperaturze wody 15 °C.

Często rozmieszczenie radu (do 30% jego ilości) w skale jest niejednorodne. Znajduje się on w porach interstycjalnych i na powierzchni ziaren, co związane jest z tworzeniem się minerałów zawierających rad i uran w procesach pomagmowych, metamorficznych oraz wietrzenia chemicznego skał. Powoduje to, że znaczna ilość atomów radonu jest uwalniana w procesie odrzutu bezpośredniego do przestrzeni międzyziarnowej.

Współczynnik emanacji określa stosunek ilości radonu wyemanowanego (uwolnionego z ziarna do przestrzeni międzyporowej) z ziarna do całkowitej ilości powstałego z radu radonu. Zmierzone i obliczone współczynniki emanacji są różne dla różnych rodzajów skał i środowisk. Dla skał krystalicznych są w granicach 0,3 – 0,5. Dla innych skał przyjmuje się wartości mniejsze od 0,5. Współczynnik ten zależy przede wszystkim od parametrów petrofizycznych danej skały, tj. od zawartości radu, sposobu jego rozprzestrzeniania się w ziarnach lub kryształach minerałów, uziarnienia, wilgotności i porowatości. Badania pokazują, że najwyższym współczynnikiem emanacji charakteryzują się skały o porowatości około 20 % [Sun98]. Zależności współczynnika emanacji od rozmiaru ziaren pokazane są na rysunku 4-5. Dla tego samego rozmiaru ziarna w przypadku rozłożenia homogenicznego atomów radu w ziarnie współczynnik emanacji będzie mniejszy niż w przypadku, gdy rad będzie ulokowany tylko na powierzchni. Wynika to z drogi dyfuzji radonu po rozpadzie radu w ziarnie. Wyższe wartości współczynnika emanacji są dla ziaren o mniejszej średnicy.

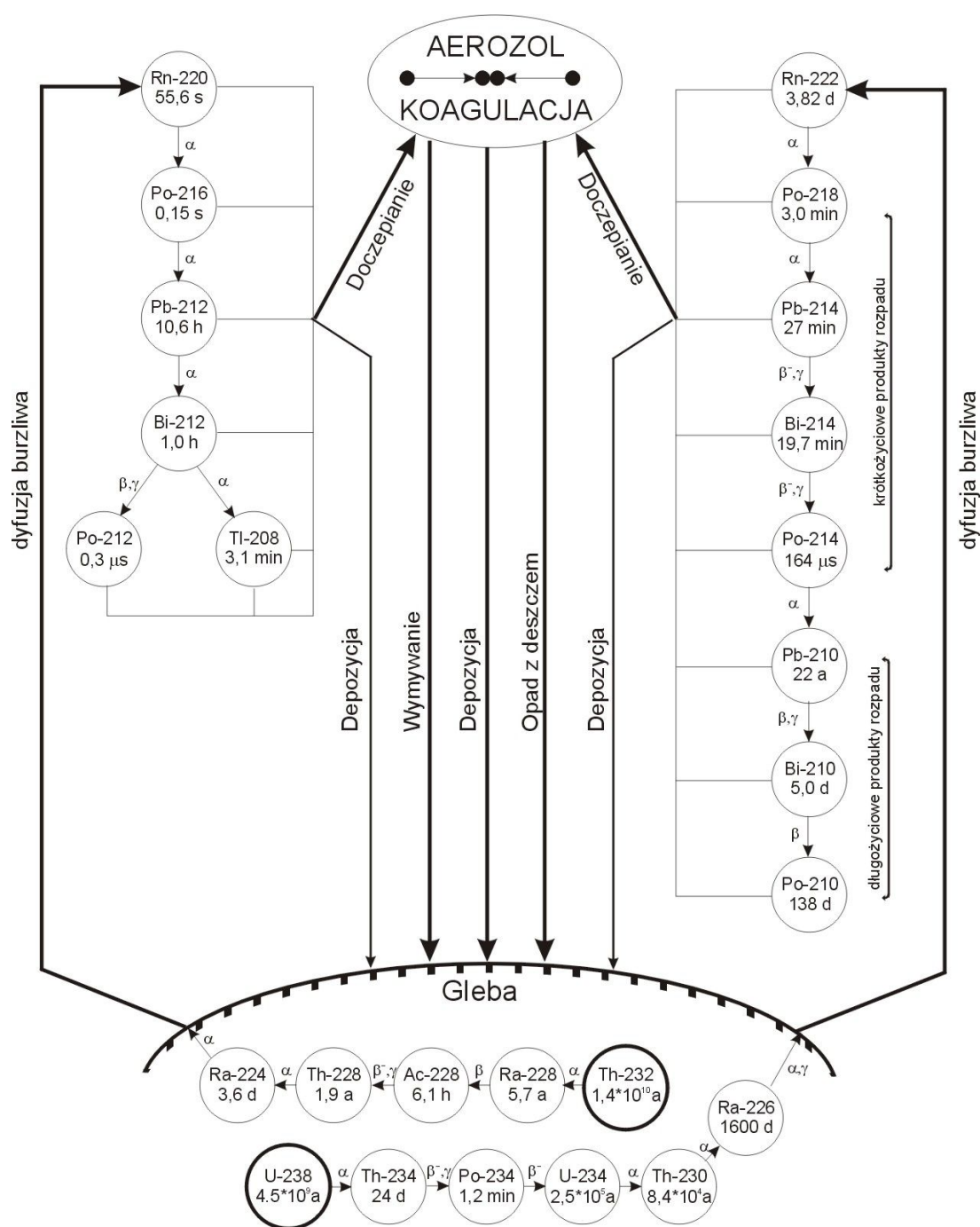


Rys. 4-5. Zależność współczynnika emanacji radonu od rozmiaru ziarna [Gre96]

#### 4.4. Transport radonu

Radon powstały w skorupie ziemskiej przedostaje się do atmosfery poprzez dyfuzję molekularną i konwekcję przy udziale procesów zachodzących w atmosferze (rys. 4-6).

Eliminacja, powstałych w wyniku rozpadu radonu produktów, z atmosfery odbywa się poprzez ich naturalny rozpad promieniotwórczy lub inne procesy takie jak: depozycja, wymywanie, opady.



Rys. 4-6. Radon, toron oraz produkty ich rozpadu w atmosferze [Pos93]

Przemieszczanie się radonu w materiale porowatym, jakim jest grunt, wywołane może być gradientem stężenia (dyfuzja molekularna) lub ciśnienia (konwekcja). Może też się przemieszczać z innymi gazami (np., CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> i inne) lub wodą wypełniającą szczeliny i spękania w gruncie. Mechanizm dyfuzji opisany jest prawem Fick'a, które łączy gradient stężenia ze strumieniem, natomiast konwekcja (przepuszczalność) jest scharakteryzowana przez prawo Darcy.

Całkowity strumień radonu jest kombinacją tychże zjawisk i w przypadku transportu przez obszar izotropowy ogólne równanie transportu będzie miało postać:

$$\vec{\Phi}(r) = -D(r)\varepsilon \vec{\nabla} C(r) - \frac{k(r)}{\mu} \vec{\nabla} P(r)C(r) \quad (4-1)$$

gdzie:  $\Phi(r)$  - strumień radonu, [Bq/m<sup>2</sup> s];  
 $D(r)$  - współczynnik dyfuzji radonu, [m<sup>2</sup>/s];  
 $\varepsilon$  - porowatość, [-];  
 $C(r)$  - stężenie radonu w gruncie, [Bq/m<sup>3</sup>];  
 $k(r)$  - przepuszczalność gruntu, [m<sup>2</sup>];  
 $\mu$  - lepkość dynamiczna gazu gruntowego, [Pa s];  
 $P(r)$  - ciśnienie gazu gruntowego w punkcie  $r$ , [Pa].

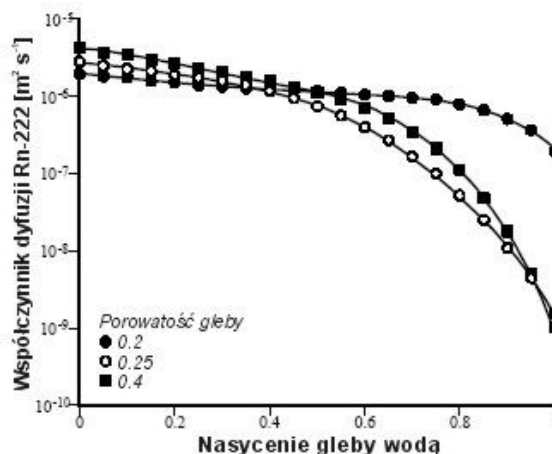
Kluczową rolę na wielkość strumienia radonu w gruncie odgrywają dwa parametry, przepuszczalność ( $k$ ) oraz współczynnik dyfuzji ( $D$ ). W równaniu 4-1 zarówno człon dyfuzyjny jak i konwekcyjny zależą od czasu połowicznego rozpadu radonu. W tabeli 4-4 przedstawiono zakresy zmienności współczynnika dyfuzji oraz drogi dyfuzji dla różnych rodzajów minerałów.

Tab. 4-4. Współczynniki dyfuzji i droga dyfuzji dla radonu w wybranych materiałach [Cot87, Naz88]

<b>Materiał</b>	<b>Współczynnik dyfuzji</b> [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	<b>Droga dyfuzji</b> [m]
Skąły (pokruszone)	$8 \cdot 10^{-2}$	-
Żwir	$7 \cdot 10^{-2}$	5
Grunt	$4 \cdot 10^{-2}$	-
Piasek	$3 \cdot 10^{-2}$	1,5
Powietrze	$1 \cdot 10^{-2}$	2,4
Iły	$8 \cdot 10^{-5}$	0,02
Beton	$2 \cdot 10^{-5}$	0,04 – 0,26
Woda	$1 \cdot 10^{-5}$	$10^{-2}$
Kryształy mineralne	$10^{-9} - 10^{-20}$	-

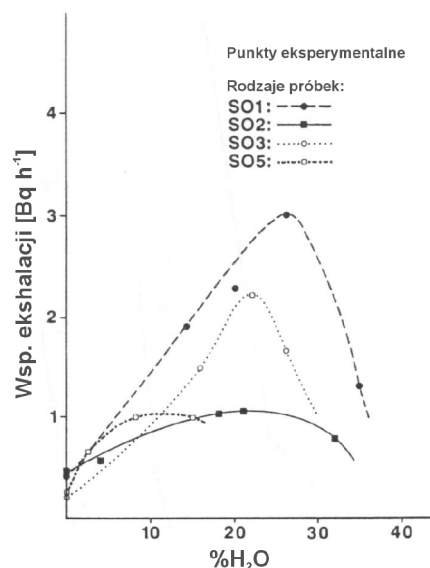
Przemieszczanie się radonu pod wpływem dyfuzji nie pozwoliłoby mu wydostawać się z dużych głębokości, bowiem droga dyfuzji (ze względu na czas połowicznego rozpadu) jest w granicach od 5 m w żwirze do około 2 cm w łąch. Współczynnik dyfuzji silnie zależy od wilgotności ośrodka (rys. 4-7) oraz od porowatości. Wypełnianie ośrodka wodą powoduje, że do pewnego poziomu wilgotności rośnie ilość radonu uwolnionego do przestrzeni międzyporowej (rys. 4-8). Można to tłumaczyć tym, że woda zatrzymuje w przestrzeni

międzyporowej atomy radonu powstałe w wyniku odrzutu bezpośredniego. Powyżej pewnego poziomu wilgotności nanopory w ziarnie oraz przestrzeń międzyziarnowa zostają wypełnione całkowicie wodą, która atomy radonu skutecznie zatrzymuje.



Rys. 4-7. Zależność współczynnika dyfuzji  $^{222}Rn$  od wilgotności [Rog91b, UNS00]

W przypadku małej wilgotności występuje efekt odrzutu pośredniego (czyli powstały w jednym ziarnie atom radonu zostaje po odrzucie ulokowany w ziarnie sąsiednim), ponieważ atomy radonu nie są hamowane w przestrzeni międzyporowej (długość dyfuzji w powietrzu jest ok. 1000 razy większa niż w wodzie).



Rys. 4-8. Zależność ekshalacji w funkcji wilgotności [Cot87]

Procesy dyfuzji są dominujące, jeżeli przepuszczalność ośrodka jest mniejsza niż  $10^{-10} m^2$ . Przy większej przepuszczalności główną rolę zaczynają odgrywać procesy konwekcyjne. Ponieważ radon jest gazem nie wchodzącym w reakcje chemiczne może on

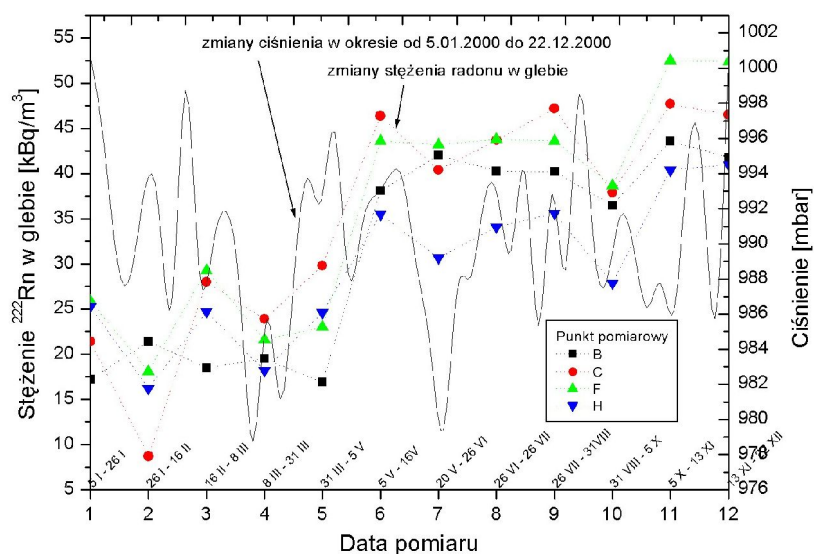


włączyć się w strumień wody lub gazu migrującego ku powierzchni ziemi. W obszarach aktywności tektonicznej, wulkanicznej, a także geotermalnej, fluidy te mogą się poruszać ze znacznymi prędkościami, w związku z istnieniem znacznych gradientów ciśnień i/lub temperatur [Fle79, Fle80, Hol94, Prz02, Mog77].

Zarówno układy struktur geologicznych jak też własności fizykochemiczne radonu pozwalają na występowanie większych jego stężeń w obszarach ku temu sprzyjających. Radon jest gazem cięższym od powietrza, co powoduje, że może się on gromadzić w różnego rodzaju pustkach (jaskinie) i pomieszczeniach (sztolnie, piwnice, podziemia, kopalnie) słabo wentylowanych. Stężenia, jakie mogą występować w tego typu obiektach są bardzo wysokie, rzędu stężeń występujących w powietrzu gruntowym. W kopalniach dolnośląskich maksymalne zmierzone stężenia radonu sięgają  $150 \text{ kBq/m}^3$  [Wys02], natomiast w jaskiniach sięgają  $28 \text{ kBq/m}^3$  [Zoh99, Hak97, Prz99]. Takie nagromadzenie radonu w tych miejscach może prowadzić do powstawania lokalnych anomalii, tj. do miejsc, w których radon będzie się gromadził lub zmieniał kierunek przepływu nie mogąc wydostać się na powierzchnię. Anomalie takie mogą tworzyć się w miejscach odległych od występowania pierwiastków macierzystych radonu i toronu, a związane może to być z miejscami występowania skał ilastych, glin lub gleb zawierających znaczną ilość minerałów ilastych, czyli ogólnie gruntów słaboprzepuszczalnych dla gazów.

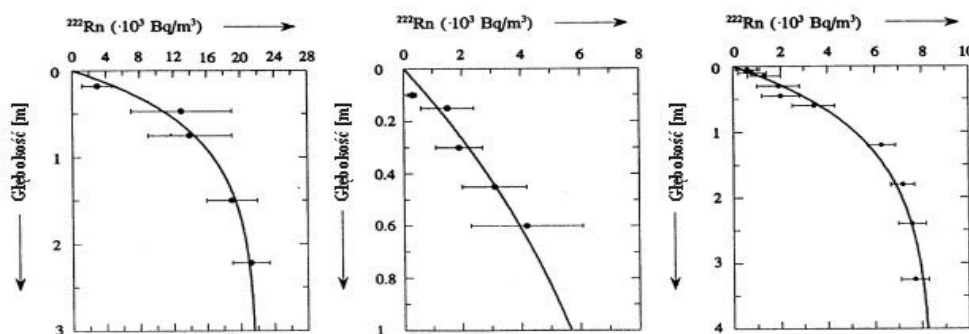
Transport radonu najefektywniejszy jest w sąsiedztwie uskoków, skał szczelinowatych, a także utworów skrasowiałych, poprzez systemy pęknięć, szczelin czy też spękań, jeżeli są one ze sobą połączone. W niektórych miejscach, szczególnie przy uskockach tektonicznych, mogą się tworzyć anomalie radonowe, gdzie stężenie radonu może być kilkakrotnie wyższe ponad przeciętną [Swa02]. W wyniku badań prowadzonych przez zespół LPN (którego autor jest współpracownikiem) zaobserwowano związki pomiędzy stężeniem radonu a głęboką budową geologiczną podłoża. Stężenia izotopu  $^{222}\text{Rn}$  wykazują znaczną zmienność wzdłuż linii prostopadłych do przebiegów uskoków, osiągając maksimum w sąsiedztwie uskoku [Swa04]. Natomiast toron ( $^{220}\text{Rn}$ ), nie wykazuje zmienności na liniach prostopadłych do uskoku. Może to świadczyć, że jest on produkowany w warstwach przypowierzchniowych gruntu.

Zmiany stężeń radonu w gruncie podlegają wahaniom. Badania mające na celu ustalenie korelacji pomiędzy stężeniami radonu w gruncie i parametrami klimatycznymi (rys. 4-9) prowadzone są również w IFJ PAN przez autora i współpracowników.



Rys. 4-9. Charakterystyka zmian stężenia radonu oraz ciśnienia

Badania profili gruntowych pokazują, że stężenia radonu rosną wraz z głębokością (rys. 4-10). Jednakże poniżej pewnej głębokości (w tym przypadku około 2 m) stężenie już nie wykazuje dużych zmian wraz ze wzrostem głębokości.



Rys. 4-10. Zależność stężenia radonu w gruncie od głębokości [Due99]

Podsumowując, jak wynika z przedstawionych powyżej informacji grunt stanowi najważniejsze źródło radonu (prawie 80%) w atmosferze (tab. 4-5).

Tab. 4-5. Źródła radonu w atmosferze [Bod89]

Źródło	Ilość Rn uwalnianego do atmosfery		
	[Bq/rok]	Udział %	
Emanacja z gruntu	$74000 \cdot 10^{15}$	78.9	
Wody podziemne (potencjalnie)	$18500 \cdot 10^{15}$	19.7	
Emanacja z oceanów	$1110 \cdot 10^{15}$	1.2	
Wydobycie i przeróbka:	fosforytów	$111 \cdot 10^{15}$	0.12
	uranu	$74 \cdot 10^{15}$	0.08
	węgla	$0,74 \cdot 10^{15}$	0.0008
Gazy naturalne	$0,37 \cdot 10^{15}$	0.0004	
Spalanie węgla	$0,04 \cdot 10^{15}$	0,00004	

## 5. Model przenikania radonu z gruntu do budynku

---

W rozdziale tym opisany jest model przenikania radonu z gruntu do budynku, jego założenia fizyczne oraz rozwiązania numeryczne. Użyty w tej pracy model opiera się na modelu Loureiro [Lou87, Lou90]

### 5.1. Wstęp

Prowadzone badania [Vau02, Var98, Enn95] na temat przewidywań stężenia radonu w budynkach na podstawie pomiarów stężenia radonu w gruncie nie dały zadowalających rezultatów. Varley i Flowers [Var98] w celu zbadania tych zależności przebadali 252 budynki w płd-wsch Anglii. Pomiarów wykonali zgodnie z zaleceniami NRPB (National Radiological Protection Board). Uzyskane wyniki pokazują brak korelacji (współczynnik korelacji na poziomie 0,143) pomiędzy wartościami stężenia radonu w gruncie i w budynkach. Jedną z konkluzji ich pracy jest stwierdzenie, że w przypadku stężenia radonu w gruncie powyżej 50 kBq/m<sup>3</sup> około 50 % budynków będzie miało przekroczony poziom działania. Również wyniki uzyskane w innych pracach pokazują brak korelacji pomiędzy tymi wartościami. Dlatego też, badanie stężenia radonu wokół budynku może dać jedynie informację o możliwym zagrożeniu radiologicznym ze strony radonu, natomiast nie może dać odpowiedzi na temat wartości stężenia radonu wewnątrz budynku.

Wydaje się zasadnym, że znajomość charakterystyki porowatego medium oraz parametrów strumienia radonu przechodzącego przez to medium jest fundamentem zrozumienia procesów powstawania i transportu radonu w gruntach i skałach.

Ogólne równanie transportu radonu jest rozwiązywane w oparciu o zasadę zachowania masy w elementarnej objętości danego medium, gdzie grunt traktuje się jako jedyne źródło radonu.

Jednym z pierwszych modeli był model Clementsa i Wilkeninga [Cle74], którzy badali wpływ zmienności ciśnienia atmosferycznego na strumień radonu z gruntu. Kolejnym modelem był jednowymiarowy model Rogersa i Nielsona [Nie84]. Model ten opisywał strumień radonu w wielowarstwowym materiale przykrywającym złoża uranu. Jedynym rozważanym mechanizmem transportu radonu była dyfuzja. Kolejne wersje tego modelu zaczęły uwzględniać konwekcję. Rozwiązanie analityczne opierało się na modelu jednowymiarowym, w stanie ustalonym, ze stałą prędkością przepływu strumienia. Bates i Edwards [Bat80b] w zaproponowanym modelu zastosowali konwekcyjno-dyfuzyjne równanie transportu radonu do czasowo-zależnych rozważań strumienia radonu ze ścian do wnętrza

kopalni uranu w funkcji ciśnienia. Jednym z celów tego projektu było rozwiązanie problemu współczynnika wentylacji wewnątrz kopalni. Użyty model matematyczny miał dwie wersje: 1) cylindryczny układ 2-wymiarowy i 2) układ jednowymiarowy. Modele te mają rozwiązania analityczne.

Modelowanie numeryczne transportu radonu było podejmowane przez wiele grup badawczych. Jednym z pierwszych był model zaprezentowany przez Bruno w roku 1983 [Bru83]. Sugerował on, że głównym źródłem radonu w domu jest infiltracja gazu gruntowego wywołana przez „efekt kominowy” oraz „efekt wiatru”. Do rozwiązania numerycznego równania Darcy zastosował on metodę różnic skończonych. Kolejną propozycją był 3-wymiarowy model zaprezentowany przez Loureiro [Lou87]. Zakłada on, że głównym mechanizmem powodującym przenikanie radonu z gruntu do budynku jest ujemna różnica ciśnień (rzędu kilku Pa) pomiędzy wnętrzem budynku a otoczeniem na zewnątrz i opiera się na dyfuzyjno-konwekcyjnym równaniu transportu przez szczelinę. Praca ta opisuje zastosowanie bardzo użytecznej metody obliczania tzw. „elementów kontrolnych”, wg metody Patankara [Pat80]. Kolejne 3-wymiarowe modele opierają się na modelu Loureiro. Przykładem może być model grupy Revzana [Rev93], który uwzględnia wpływ niejednorodności pola temperatury wokół budynku.

Dynamiczny model RAGENA [Fon01] opiera swoje przewidywania na podstawie różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem i zewnątrz budynku, siły wiatru oraz współczynnika wentylacji. Do rozwiązania numerycznego wykorzystywana jest metoda Runge-Kutta.

Innymi przykładami, mogą być modele Andersena [And01, And99] i van de Spoela [Spo98], którzy badają zastosowanie membran w szczelinach pomiędzy fundamentami a gruntem.

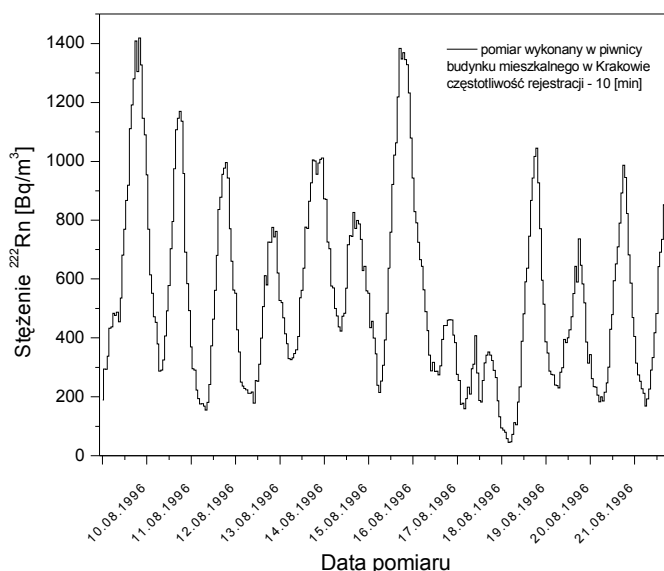
## **5.2. Założenia modelu**

Zgodnie z założeniami, zadaniem jaki autor przed sobą postawił, była weryfikacja udoskonalonego przez autora modelu Loureiro. W celu rozwiązania tego problemu zaimplementowany został model transportu radonu opracowany przez Loureiro [Lou87]. Na jego podstawie autor napisał program komputerowy TRIRAD, którego część obliczeniowa napisana jest w języku FORTRAN 90, natomiast interfejs użytkownika oraz graficzna prezentacja wyników pomiarowych w języku Borland Delphi. Warto podkreślić, że inna modyfikacja modelu Loureiro jest wykorzystywana i udoskonalana w Lawrence Berkeley Laboratory [Gar93a, Gar93b].

Prezentowany model opiera się na 5 głównych założeniach:

- stan ustalony – brak zależności od czasu;
- występuje stała różnica ciśnień pomiędzy poziomem podłogi w piwnicy a otoczeniem zewnętrznym;
- modelowany budynek jest symetryczny;
- szczeliny pomiędzy ścianą i podłogą w piwnicy są jednymi miejscami, którymi przedostaje się radon do wnętrza budynku;
- nie jest uwzględniony przepływ związany z efektem Knudsen'a.

W rzeczywistości zmiany stężeń radonu wewnątrz budynku mają charakter dynamiczny w czasie, zależny od wielu parametrów. Mają one charakter zmian dziennych lub/i cyklicznych (rys. 5-1).



Rys. 5-1. Zmiany stężeń radonu w budynku mieszkalnym [Jan98]

Czynnikami wpływającymi na taki charakter przebiegu stężenia radonu w budynku mogą być: a) parametry gruntu, b) kierunek i prędkość wiatru, c) różnica temperatur oraz ciśnień pomiędzy wnętrzem budynku i otoczeniem, d) wielkość opadów, e) czynnik ludzki.

Uwzględnienie wszystkich wymienionych wyżej parametrów przemawia za przyjęciem stanu ustalonego.

Wiatr jest czynnikiem wpływającym na rozkład ciśnień w gruncie co wpływa na transport radonu [Ri199, Ri195], jego wpływ zaznacza się w przypadku gruntów dobrze przepuszczalnych, o przepuszczalności rzędu  $10^{-8} - 10^{-10}$  [m<sup>2</sup>]. W tym przypadku największy udział ma nie prędkość wiatru, a okresowa zmiana kierunku. Zaobserwowano wzrost stężenia

radonu w budynku o 21% ponad stężenie dla stanu ustalonego wywołany przez zmianę kierunku wiatru. Natomiast dla gruntów słabo-przepuszczalnych, zmiany ciśnienia wywołane przez wiatr mają niewielki wpływ. W przedstawionym modelu, gdzie realnie zmierzone przepuszczalności są rzędu  $10^{-14} - 10^{-12}$  [ $m^2$ ], czynnik wiatru nie został uwzględniony.

Kolejnym ważnym założeniem modelu jest przyjęcie stałej, ujemnej różnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem budynku (na poziomie podłogi najniższego poziomu) a otoczeniem. Ciśnienie absolutne na poziomie podłogi w piwnicy jest sumą ciśnienia atmosferycznego i ciśnienia kolumny powietrza od poziomu podłogi do poziomu gruntu pomniejszoną o założoną różnicę ciśnień, która przyjmowana jest jako rezultat wszystkich mechanizmów generujących gradient ciśnienia w domu, takich jak: różnica temperatur, wpływ wiatru oraz niezbilansowana wentylacja mechaniczna.

Modelowany budynek jest geometrycznie symetryczny, co pokazano na rysunku 5-2, natomiast rozkład ciśnień w gruncie pod budynkiem może być niesymetryczny. Głównym czynnikiem generującym niesymetrię jest zmieniający się kierunek wiatru. Inne czynniki generujące podciśnienie w budynku, takie jak np.: efekt kominowy, nie powodują powstawania asymetrii. Jak zostało wspomniane wcześniej, przy gruntach słaboprzepuszczalnych wiatr nie ma znaczącego wpływu na zmiany ciśnienia. Możemy zatem przyjąć, że rozkład ciśnień w gruncie wokół budynku będzie symetryczny, a co za tym idzie możemy przyjąć symetrię budynku zarówno z punktu widzenia geometrii jak i rozkładu ciśnień.

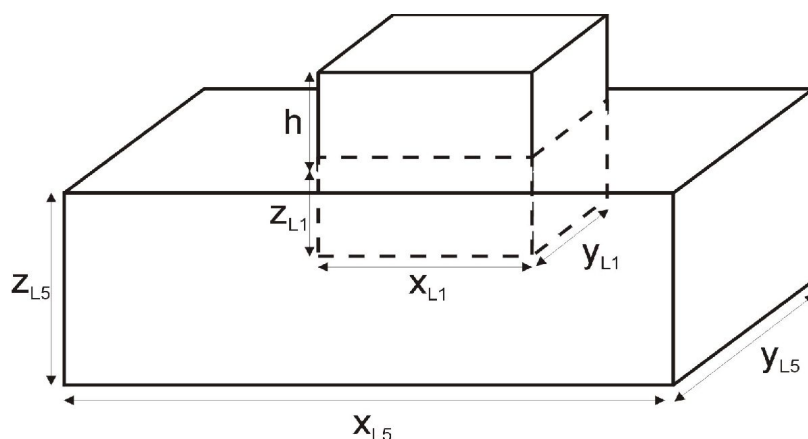
Głównym źródłem radonu w budynku jest grunt. Radon przedostaje się szczelinami w fundamencie, na styku między ścianą budynku a podłogą, ponieważ przyjmujemy, że w trakcie budowy domu mogły wystąpić właśnie w tym miejscu spękania i szczeliny. Uwzględniona została także emanacja radonu z materiałów budowlanych, chociaż jej udział w całkowitym stężeniu wewnątrz budynku jest niewielki, rzędu kilku procent.

W modelu nie jest uwzględniony efekt Knudsena, czyli tzw. termodyfuzja. Efekt ten zachodzi dla mikroporów przy przechodzeniu gazu przez materiał porowaty. W mikroporach średnia droga swobodna molekuł gazu jest większa niż poprzeczny przekrój kanalika porowego a liczba Knudsena  $K_n$ , będąca stosunkiem drogi swobodnej do średnicy kanalika porowego jest większa niż 1. Przy przepływie gazu molekuly słabo oddziałują jedna z drugą, bowiem zderzają się prawie wyłącznie ze ścianami kanalika. Wyrażenia na przewodnictwo cieplne i tarcie wewnętrzne (lepkość) są liniowymi funkcjami gradientu temperatury i prędkości gazu. Powstaje termodyfuzyjny strumień gazu dający efekt Knudsena. Przekaz masy gazu zachodzi wówczas przez mikropory łączące znaczną objętość gazu (gdzie mamy ciśnienie  $P_1$

i temperaturę  $T_1$ ) z naczyniem gdzie panuje temperatura  $T_0$  ( $T_0 < T_1$ ) i ciśnienie  $P_0$ . Stan równowagi zostanie osiągnięty gdy:  $P_0/\sqrt{T_0}=P_1/\sqrt{T_1}$ . Efekt Knudsena powoduje, że ciśnienie rośnie w objętości cieplejszej:  $P_1=P_0\sqrt{T_1}/\sqrt{T_0}$ . Mikropory w ścianach betonowych spełniają warunki efektu Knudsen'a i radon dzięki termodyfuzji może przenikać do budynku, ponieważ panuje tam wyższa temperatura.

### 5.3. Geometria modelu

Geometria modelu jest przedstawiona na rysunku 5-2. Blok gruntu przedstawiony jest przez wymiary  $x_{L5}$ ,  $y_{L5}$ ,  $z_{L5}$ , natomiast budynek jest reprezentowany wymiarami  $x_{L1}$ ,  $y_{L1}$ ,  $z_{L1}+h$ , gdzie  $h$  jest wysokością budynku od poziomu gruntu.



Rys. 5-2. Konfiguracja geometryczna bloku gruntu oraz budynku

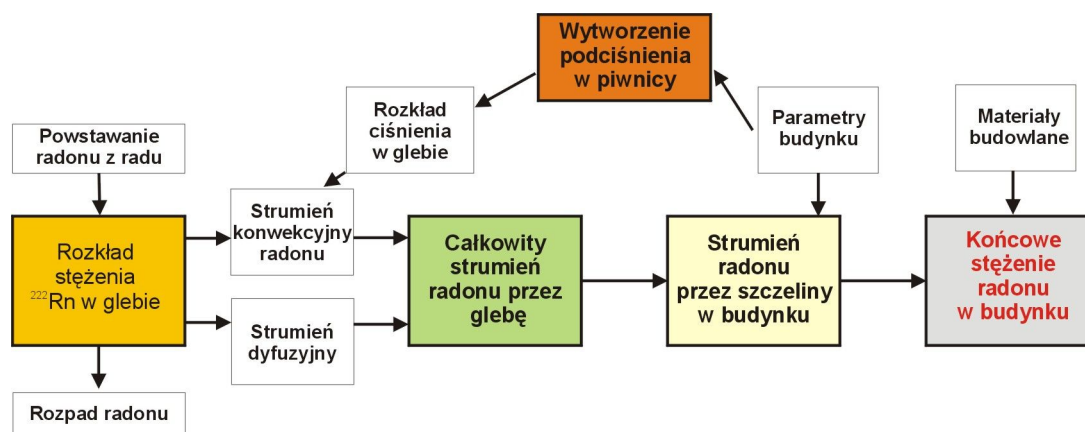
### 5.4. Model fizyczny

Przechodzenie radonu z gruntu do budynku oparte jest na 4 zasadniczych procesach:

- tworzenie i rozpad radonu w gruncie;
- powstawaniu różnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem i otoczeniem budynku jako zasadniczego procesu powodującego transport radonu;
- dyfuzyjnym i konwekcyjnym transporcie radonu w gruncie;
- przechodzeniu przez szczeliny lub pęknięcia w budynku (ze szczególnym uwzględnieniem piwnicy).

Rysunek 5-3 przedstawia główne elementy modelu. Najważniejszym elementem, powodującym transport radonu do wnętrza budynku jest założone zaburzone podciśnienie  $-p(x, y, z)$  panujące w piwnicy. To zaburzone podciśnienie rozchodzi się w gruncie, powodując powstanie stałego rozkładu ciśnień. Powstałe pole ciśnień wywołuje stały, ale nie jednolity strumień gazu gruntowego przez grunt. Z drugiej strony w każdym punkcie gruntu

(którą z założenia uważamy za jednorodną i izotropową) na skutek rozpadu radu powstaje radon. Ilość powstającego radonu zależy od stężenia radu w danym punkcie gruntu. Wskutek oddziaływania powyższych elementów powstaje strumień radonu przez grunt. Po uwzględnieniu parametrów budynku, takich jak: głębokość wkopania piwnicy, jego geometrii oraz współczynnika wentylacji możemy obliczyć końcowe stężenie radonu w budynku.



Rys. 5-3. Schemat przedstawiający główne elementy modelu

### 5.5. Model matematyczny

W celu obliczenia końcowego stężenia radonu w budynku należy, bazując na modelu fizycznym, sformułować model matematyczny. W tym celu najpierw należy rozwiązać problem zaburzenia ciśnienia w gruncie. Następnie po wyznaczeniu ilości produkowanego radonu w gruncie obliczyć strumień dyfuzyjny i konwekcyjny tegoż radonu przez grunt. Oba te problemy wymagają zdefiniowanych warunków brzegowych. Obliczenia końcowe prowadzą się do wyznaczenia stężenia radonu w budynku. Ta część pracy oparta jest na pracy doktorskiej Celso O. Loureiro wykonanej w University of Michigan w 1987 roku [Lou87].

### 5.6. Rozkład zaburzonego ciśnienia w gruncie

Ciśnienie bezwzględne  $P$  wewnątrz gruntu jest złożeniem dwóch niezależnych komponentów: ciśnienia hydrostatycznego  $P_H$  oraz tzw. ciśnienia zaburzonego  $p(x, y, z)$

Ciśnienie hydrostatyczne na głębokości 'z' będzie dane wzorem:

$$P_H(z) = P_A + \rho g z \quad (5-1)$$

gdzie:  $P_H(z)$  - ciśnienie hydrostatyczne w gruncie na głębokości z, [N/m<sup>2</sup>];

$P_A$  - ciśnienie atmosferyczne dla  $z = 0$ , [N/m<sup>2</sup>];

$\rho$  - gęstość powietrza gruntowego, [kg/m<sup>3</sup>];

$g$  - stała grawitacji, [m/s<sup>2</sup>].

Ciśnienie zaburzone jest to ciśnienie dodane w dowolnym punkcie gruntu, które rozchodzi się w całym bloku gruntu. W naszym przypadku to zaburzone ciśnienie



$-p(x, y, z)$  pochodzi od podciśnienia wewnątrz budynku na poziomie piwnicy. Ciśnienie to jest niezależne od ciśnienia hydrostatycznego.

W każdym punkcie gruntu, we współrzędnych  $(x, y, z)$ , ciśnienie bezwzględne wynosi:

$$P(x, y, z) = P_A + \rho g z + p(x, y, z) \quad (5-2)$$

Obliczenie pola ciśnień w gruncie możemy wykonać stosując dwa równania:

1) równanie Darcy oraz 2) równanie ciągłości.

Dla gruntu izotropowego przyjmujemy formę równania Darcy, pokazującą, że prędkość gazu gruntowego w danym punkcie gruntu  $(x, y, z)$  jest wprost proporcjonalna do gradientu różnicy ciśnień w gruncie oraz ciężaru właściwego gruntu.

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} (\vec{\nabla} P - \rho \vec{g}) \quad (5-3)$$

gdzie:  $k$  - przepuszczalność gruntu w danym punkcie  $(x, y, z)$ , [ $m^2$ ];  
 $\mu$  - lepkość dynamiczna gazu gruntowego, [ $N \cdot s/m^2$ ];  
 $P$  - ciśnienie bezwzględne w danym punkcie  $(x, y, z)$  gruntu, [ $N/m^2$ ];  
 $\rho$  - gęstość powietrza gruntowego, [ $kg/m^3$ ];  
 $\vec{q}$  - wektor prędkości gazu gruntowego, [ $m/s$ ];  
 $\vec{g}$  - przyspieszenie ziemskie, [ $m/s^2$ ].

Wstawiamy równanie (5-2) do równania Darcy (5-3)

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} [\vec{\nabla} (P_A + \rho g z + p(x, y, z)) - \rho \vec{g}] = -\frac{k}{\mu} (\rho \vec{g} + \vec{\nabla} p(x, y, z) - \rho \vec{g}) \quad (5-4)$$

i po przekształceniach otrzymamy (dla gruntu izotropowego) równanie:

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} \vec{\nabla} p(x, y, z) \quad (5-5)$$

Rozpisując we współrzędnych kartezjańskich otrzymujemy:

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \quad w = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5-6)$$

gdzie:  $u, v, w$  są składowymi prędkościami przesączania  $q$  w kierunku  $x, y$  oraz  $z$ .

Aby obliczyć rozkład ciśnienia zaburzonego możemy wykorzystać równanie ciągłości, mówiące o równowadze masy gazu gruntowego w gruncie, w postaci:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{q}) = 0 \quad (5-7)$$

Przyjmując stan ustalony oraz nieściśliwość przepływającego gazu przez grunt, a także zakładając stałą gęstość gazu gruntowego równanie ciągłości przyjmuje postać:

$$\vec{\nabla} \vec{q} = 0 \quad (5-8)$$

Wstawiając równanie Darcy (5-4) do (5-8), a przy założeniu lepkości dynamicznej  $\mu$  gazu gruntowego jako stałej a następnie przekształcając otrzymujemy interesujące nas równanie na rozkład ciśnienia zaburzonego w gruncie, w następującej postaci:

$$\vec{\nabla}(k \vec{\nabla} p(x, y, z))=0 \quad (5-9)$$

We współrzędnych kartezjańskich wzór ten przyjmie następującą postać:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (5-10)$$

### 5.7. Produkcja radonu w gruncie

Ilość radonu produkowanego w gruncie jest proporcjonalna do stężenia radu w gruncie, gęstości gruntu oraz emanacji radonu i wyrażona jest wzorem:

$$G = f \rho C_{Ra} \lambda_{Rn} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \quad (5-11)$$

gdzie: G - ilość produkowanego radonu w gruncie, [Bq/m<sup>3</sup>s];

f - współczynnik emanacji radonu [-];

$\rho$  - ciężar właściwy gruntu, [kg/m<sup>3</sup>];

$C_{Ra}$  - stężenie <sup>226</sup>Ra w gruncie, [Bq/kg];

$\lambda_{Rn}$  - stała rozpadu <sup>222</sup>Rn, [1/s];

$\varepsilon$  - porowatość gruntu [-].

### 5.8. Strumień radonu przez grunt.

Gęstość strumienia radonu przez grunt jest złożeniem dwóch składowych:

- dyfuzyjnej  $j_d$  i
- konwekcyjnej  $j_k$ :

$$\vec{j} = \vec{j}_d + \vec{j}_k \quad (5-12)$$

Składowa dyfuzyjna jest wyrażona za pomocą prawa Ficka dla dyfuzji molekularnej przez medium porowate, czyli dla przemieszczania się atomów radonu wynikająca z różnicy stężeń.

Dla gruntu izotropowego będzie dana wzorem:

$$\vec{j}_d = -D \vec{\nabla} C_{Rn} \quad (5-13)$$

gdzie:  $j_d$  - składowa dyfuzyjna gęstości strumienia radonu przez grunt, [Bq/m<sup>2</sup>s];

D - współczynnik dyfuzji dla radonu, [m<sup>2</sup>/s];

$C_{Rn}$  - stężenie radonu w gruncie [Bq/m<sup>3</sup>].

Współczynnik dyfuzji D jest funkcją temperatury, ciśnienia i zmienia się w czasie. Jednocześnie z dyfuzją molekularną występuje zjawisko tzw. dyspersji mechanicznej, ale ponieważ strumień gazu jest mały, więc zaniedbujemy to zjawisko i przyjmujemy, że współczynnik D jest niezależny od q.

W przypadku konwekcji równanie na gęstość strumienia będzie mieć postać:

$$\vec{j}_k = C_{Rn} \vec{q} \quad (5-14)$$

gdzie:  $\vec{j}_k$  - składowa konwekcyjna gęstości strumienia radonu w gruncie, [Bq/m<sup>2</sup>s];  
 $C_{Rn}$  - stężenie radonu w gruncie, [Bq/m<sup>3</sup>];  
 $\vec{q}$  - wektor prędkości przesączania gazu gruntowego [m/s].

W przypadku omawianego modelu, przyjmuje się, że transport gazu gruntowego zawierającego radon jest wywołany przez konwekcję oraz dyfuzję. Tak więc całkowita gęstość strumienia będzie sumą tych dwóch składowych i wyrażona będzie wzorem:

$$\vec{j} = -D \vec{\nabla} C_{Rn} + C_{Rn} \vec{q} \quad (5-15)$$

### 5.9. Pole stężenia radonu w gruncie

Równanie zachowania masy radonu opisuje zmianę w czasie stężenia radonu w danym punkcie spowodowaną produkcją radonu  $G$ , ubytkiem wynikającym z jego rozpadu  $\lambda_{Rn} C_{Rn}$  oraz ubytkiem wywołanym dyfuzją i konwekcją radonu:

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_{Rn} \varepsilon) = \varepsilon G - \lambda_{Rn} C_{Rn} \varepsilon - \vec{\nabla} \cdot \vec{j} \quad (5-16)$$

Uwzględniając otrzymane wyrażenie na gęstość strumienia radonu  $j$  (5-15) otrzymamy:

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_{Rn} \varepsilon) = \varepsilon (G - \lambda_{Rn} C_{Rn}) + \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} C_{Rn}) - \vec{\nabla} \cdot (C_{Rn} \vec{q}) \quad (5-17)$$

W stanie ustalonym równanie to przyjmie postać:

$$\varepsilon (G - \lambda_{Rn} C_{Rn}) + \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} C_{Rn}) - \vec{\nabla} \cdot (C_{Rn} \vec{q}) = 0 \quad (5-18)$$

Drugą ważną zależnością konieczną do opisu rozkładu stężeń radonu w gruncie jest równanie ciągłości przedstawione wyrażeniem (5-8).

### 5.10. Warunki brzegowe

Równanie (5-8) jest rozwiązywalne numerycznie dla danych warunków brzegowych. Należy rozróżnić kilka stref oddziaływania pomiędzy obszarami (rys. 5-4):

- strefa 1: na granicy obszaru grunt-atmosfera przyjmujemy wartość  $C_{Rn} = C_{zew} = 0$ . Założenie to opiera się na fakcie, że stężenie radonu w powietrzu nad glebą wynosi ok. 20 Bq/m<sup>3</sup>, natomiast w gruncie kilkadziesiąt tysięcy Bq/m<sup>3</sup>;
- strefa 2: granica obszaru grunt-podłoga w piwnicy oraz grunt-ściana boczna w piwnicy z wyłączeniem szczeliny – w tym przypadku przyjmujemy  $\vec{j} = 0$  (równanie 5-15), bowiem materiały budowlane charakteryzują się znacznie niższym współczynnikiem dyfuzji  $D$  w porównaniu z gruntem, a prędkość transportu radonu  $\vec{q}$  w materiałach

budowlanych będzie niewielka z powodu niskiej wartości współczynnika przepuszczalności  $k$ ;

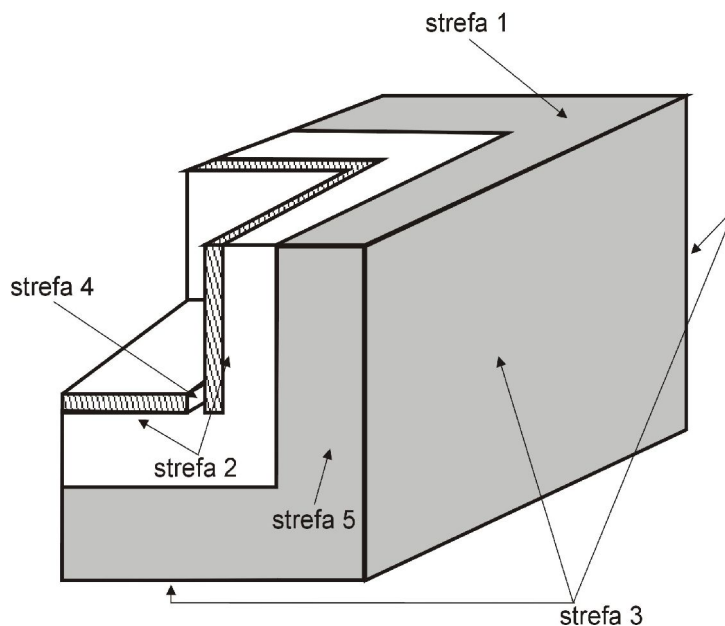
strefa 3: przepływ przez boczne ściany oraz przez powierzchnię dolną rozważanego bloku gruntu jest zanedbywany ( $\vec{j}=0$ ). Zewnętrzne rozmiary modelu zostały tak dobrane, że zaburzenie rozkładu ciśnienia spowodowane obecnością wgłębionego budynku nie jest obserwowane na zewnętrznej granicy. Ponieważ transport radonu spowodowany jest różnicą ciśnień, można przyjąć  $\vec{j}=0$  na powierzchni strefy 3.

strefa 4: stanowi ona drogę przedostawania się radonu z gruntu do pomieszczenia piwnicy. W stanie ustalonym w piwnicy ustala się stężenie  $C_{wew}$  radonu. Zależność pomiędzy gęstością strumienia  $\vec{j}$  przedostającego się do pomieszczenia a stężeniem  $C_{wew}$  określa zależność:

$$\vec{j} = V \lambda_v C_{wew} \quad (5-19)$$

gdzie:  $V$  - całkowita objętość pomieszczenia, [ $m^3$ ];  
 $\lambda_v$  - współczynnik wymiany powietrza w pomieszczeniu, [1/s].

strefa 5: na styku pomiędzy płaszczyznami symetrii bloku gruntu nie będzie strumienia  $\vec{j}=0$ .



Rys. 5-4. Strefy warunków brzegowych dla modelu

### 5.11. Stężenie radonu w budynku

Szybkość wchodzenia radonu do  $\frac{1}{4}$  budynku z  $\frac{1}{4}$  bloku gruntu dana jest wzorem:

$$T_{calc} = \vec{j}_{wew} S_{szcz} \quad (5-20)$$

gdzie:  $T_{calc}$  - przepływ radonu przez szczelinę, [Bq/s];  
 $\vec{j}_{wew}$  - strumień radonu wychodzący ze szczeliny, [Bq/m<sup>2</sup>s];  
 $S_{szcz}$  - powierzchnia szczeliny, [m<sup>2</sup>].

Aby następnie obliczyć całkowite stężenie radonu w piwnicy opieramy się na równaniu zachowania masy, co będzie dane zależnością:

$$\frac{\partial C_{wew}}{\partial t} = \frac{4 T_{calc}}{V} - C_{wew}(\lambda_{Rn} + \lambda_V) + C_{zew} \lambda_V \quad (5-21)$$

gdzie:  $C_{wew}$  - stężenie wewnątrz budynku, [Bq/m<sup>3</sup>];  
 $C_{zew}$  - stężenie na zewnątrz budynku, [Bq/m<sup>3</sup>];  
 $V$  - objętość budynku, [m<sup>3</sup>];  
 $\lambda_V$  - współczynnik wymiany powietrza wewnątrz budynku, [1/s];  
 $\lambda_{Rn}$  - stała rozpadu radonu, [1/s].

Ponieważ założyliśmy stan ustalony oraz że  $C_{zew} = 0$ , możemy przekształcić równanie (5-21) do następującej postaci:

$$C_{wew} = \frac{4 T_{calc}}{V} \frac{1}{(\lambda_{Rn} + \lambda_V)} \quad (5-22)$$

### 5.12. Radon z materiałów budowlanych

W rozdziale 4.10 założono, że nie występuje zjawisko przenikania (transportu) radonu przez ściany z otaczającego budynek gruntu. Natomiast sam materiał budowlany może być źródłem radonu poprzez jego dyfuzję z tych materiałów, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu stężenia tego gazu wewnątrz budynku.

Składowa dyfuzyjna gęstości strumienia radonu wynikająca z obecności <sup>226</sup>Ra w materiałach budowlanych obliczana jest wg następującego wzoru [UNS00]:

$$j_{scian}^{\vec{}} = C_{Ra} \lambda_{Rn} f \rho L \tanh\left(\frac{d}{L}\right) \quad (5-23)$$

gdzie:  $C_{Ra}$  - aktywność <sup>226</sup>Ra w materiałach budowlanych, [Bq/kg];  
 $f$  - współczynnik emanacji radonu ze ścian, [-];  
 $\rho$  - gęstość materiałów budowlanych, [kg/m<sup>3</sup>];  
 $L$  - droga dyfuzji radonu w materiałach budowlanych, [m];  
 $d$  - grubość ściany, [m].

Drogę dyfuzji  $L$  obliczamy z zależności:  $L = \sqrt{D_e / \lambda_{Rn}}$ , gdzie  $D_e$  jest współczynnikiem dyfuzji radonu w materiałach budowlanych.

Uwzględniając wpływ materiałów budowlanych na stężenie radonu wewnątrz budynku wzór (5-22) przyjmie postać.

$$C_{wew} = \frac{4 T_{calc}}{V} \frac{1}{\lambda_{Rn} + \lambda_V} + \left( \frac{S_{scian} j_{scian}^{\vec{}}}{V} \frac{1}{\lambda_{Rn} + \lambda_V} \right) \quad (5-24)$$

gdzie:  $S_{scian}$  - powierzchnia ścian, [m<sup>2</sup>];  
 $j_{scian}$  - dyfuzyjny strumień radonu ze ścian, [Bq/m<sup>2</sup>s].

### **5.13. Podsumowanie**

Należy zwrócić uwagę, że przedstawiony model przenikania radonu do budynku nie uwzględnia zjawiska dyfuzji radonu z gruntu do atmosfery w sąsiedztwie budynku.

Z równania bilansu masy radonu oznacza to, że cały radon produkowany w zdefiniowanej objętości transportowany jest w kierunku budynku. W rzeczywistości część radonu dyfunduje w kierunku powierzchni ziemi poza strefę budynku. Zjawisko to stanowiłoby istotny problem w przypadku silnej anizotropii gruntu, która sprzyjałaby takiej dyfuzji. Wyniki stężeń radonu  $C_{wew}$  obliczone w takim przypadku mogłyby być zawyżone.

## 6. Metody oraz urządzenia pomiarowe

W tym rozdziale opisane są metody oraz urządzenia pomiarowe, które były wykorzystane do przeprowadzenia terenowych i laboratoryjnych badań próbek gruntu oraz do pomiarów stężeń radonu i toronu w powietrzu gruntowym i w mieszkaniach.

### 6.1. Pomiar stężenia $^{222}\text{Rn}$ oraz $^{220}\text{Rn}$

Do pomiarów stężenia  $^{222}\text{Rn}$  oraz  $^{220}\text{Rn}$  zarówno w powietrzu gruntowym jak i wewnątrz budynków autor wykorzystał przyrządy AlphaGUARD PQ-2000 oraz AlphaGUARD PQ - 2000 Pro (Ilustracja 6-1) (w dalszym ciągu pracy będzie wykorzystywany skrót AG oraz AGP). [Gen95]



*Ilustracja 6-1. AlphaGUARD PQ 2000 Pro f-my Genitron  
będący na wyposażeniu pracowni LPN IFJ PAN*

AlphaGUARD wyposażony jest w komorę jonizacyjną o objętości  $0,56 \text{ dm}^3$  do pomiarów promieniowania alfa. Umożliwia on ciągły pomiar stężenia radonu i toronu w powietrzu, z jednoczesną rejestracją parametrów klimatycznych (temperatura, wilgotność, ciśnienie), a model AGP może dodatkowo mierzyć moc równoważnika dawki promieniowania. W tabeli 6-1 przedstawione są podstawowe parametry AG i AGP.

Wbudowane na wejściu do komory jonizacyjnej filtry z włóknem szklanym, które zapewniają wychwyty produktów rozpadu radonu (współczynnik wychwyty pochodnych radonu  $>99,9\%$ ) i przeciwdziałają kontaminacji komory pomiarowej. Cyfrowa obróbka sygnału pomiarowego z wbudowanym algorytmem eliminacji zliczeń od produktów rozpadu radonu pozwala na poprawną rejestrację stężeń radonu w komorze pomiarowej. Dzięki wyposażeniu miernika w pamięć wewnętrzną możliwe jest gromadzenie zarejestrowanych wyników stężeń radonu oraz parametrów klimatycznych z krokiem co 1, 10 lub 60 minut w zależności od

modelu. AG umożliwia rejestrację do 32 serii pomiarowych bez konieczności ich odczytu i zapisu na nośnik zewnętrzny, przy czym ilość ich zależy od czasu trwania pomiarów. Pełna analiza zmienności stężeń oraz innych rejestrowanych parametrów jest dostępna dzięki specjalistycznemu dedykowanemu oprogramowaniu, które współpracuje z miernikiem stężeń radonu i może być wykonana off-line po odczycie pamięci AG.

Błędy pomiarowe stężenia radonu i toronu obliczane są przez wbudowany w AG algorytm. Niestety, firma Genitron, pomimo zapytań z naszej strony, nie udostępniła opisu procedur obliczeniowych służących wyznaczaniu tych niepewności.

Tab. 6-1. Podstawowe parametry przyrządu AlphaGUARD

<i>Parametr</i>	<i>Opis</i>
<i>Całkowita objętość detektora</i>	<i>0,62 dm<sup>3</sup></i>
<i>Aktywna objętość detektora</i>	<i>0,56 dm<sup>3</sup></i>
<i>Zakres pomiarowy stężenia radonu</i>	<i>1,85 Bq/m<sup>3</sup> – 2 MBq/m<sup>3</sup></i>
<i>Błąd pomiaru</i>	<i>3%</i>
<i>Pomiar temperatury</i>	<i>-10°C - + 50°C</i>
<i>Pomiar wilgotności powietrza</i>	<i>0 – 99 % rH</i>
<i>Pomiar ciśnienia atmosferycznego</i>	<i>700 – 1100 mbar</i>
<i>Pomiar równoważnika mocy dawki</i>	<i>H (x10) mSv/h</i>

W pomiarach zastosowane zostały dedykowane do AG lub AGP przystawki Multisensor D/T oraz D/D (Ilustr. 6-2). Przystawka D/D umożliwiająca pomiar różnicy ciśnień w 3 zakresach pomiarowych (0- 500 Pa, 0-1250 Pa oraz 0-2500 Pa) oraz prędkości przepływu w zakresie od 0 – 1250 ml/min, wykorzystywana była do określania przepuszczalności, który to problem dokładniej rozważany jest w rozdziale 6. Natomiast przystawka D/T, która umożliwia pomiar małych różnic ciśnienia w 3 zakresach pomiarowych ( $\pm 5$  Pa,  $\pm 12,5$  Pa,  $\pm 25$  Pa) oraz różnicy temperatur w zakresie od -20 ... +42 °C, wykorzystana została do określenia różnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem budynku a jego otoczeniem zewnętrznym.

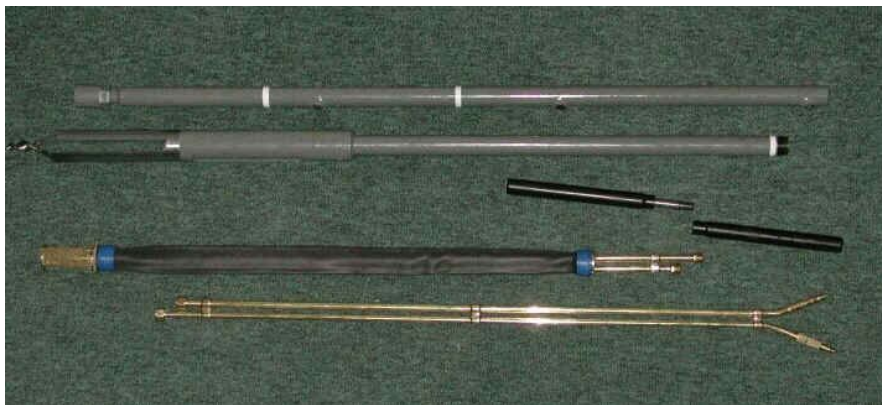


Ilustracja 6-2. Przystawka Multisensor D/D f-my  
Genitron



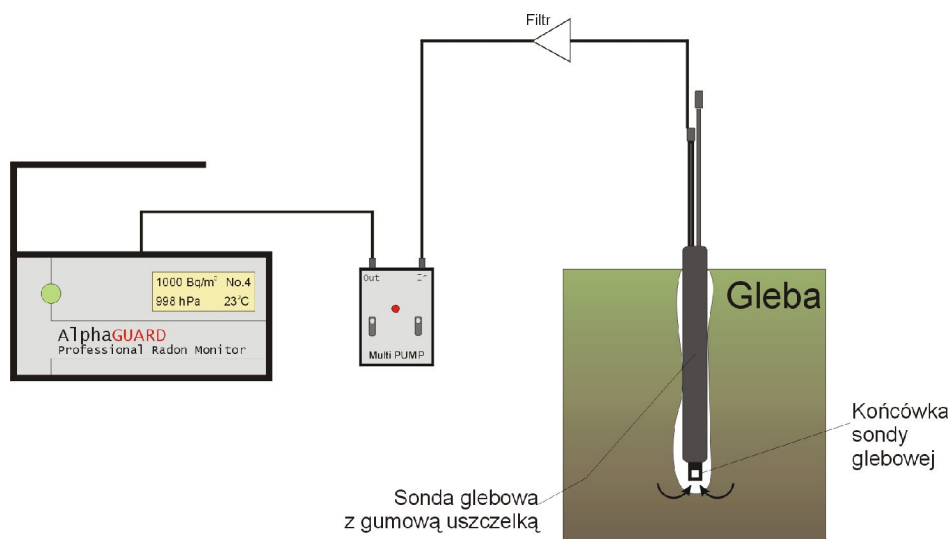
## 6.2. Pomiar stężenia $^{222}\text{Rn}$ oraz $^{220}\text{Rn}$ w powietrzu gruntowym

Do pomiarów chwilowych stężeń radonu i toronu w powietrzu gruntowym autor stosował miernik AG wraz z oprzyrządowaniem: świdrem okienkowym, sondą gruntową, które to przyrządy przedstawione są na ilustracji 6-3, oraz pompą [Swa00, Koz04a, Koz04b].



Ilustracja 6-3. Świder okienkowy oraz sonda gruntowa wykonane w IFJ-PAN

Oprzyrządowanie to pozwala na pobór powietrza gruntowego w zakresie głębokości od 30 do 180 cm. Prowadzone przez autora pomiary polegały na wywierceniu otworów wokół budynku, przy zastosowaniu świdra okienkowego. W tak wykonanym otworze instalowana jest sonda do poboru powietrza gruntowego. W celu odcięcia dopływu powietrza z atmosfery, sonda uszczelniana jest za pomocą gumowego, pompowanego rękawa. Po podłączeniu pompy i ustaleniu przepływu, następuje zasysanie powietrza gruntowego z otworu bezpośrednio do AG. W celu jak najbardziej reprezentatywnego pomiaru stężenia radonu w powietrzu gruntowym, tzn. z jak najmniejszym zaburzeniem równowagi, przepływ powinien być jak najmniejszy, ale o charakterze ciągłym. Pompa umożliwia ustawienie sześciu prędkości przepływu, w tym trzy (0,03 l/min, 0,05 l/min, 0,1 l/min), które są quasi-ciągłe (tzn. następuje cykl pompowania z prędkością np. 0,5 l/min a następnie przerwa) oraz 3 ciągłe (0,3 l/min, 0,5 l/min, 1,0 l/min). Omówiony powyżej zestaw umożliwia pomiary stężenia zarówno radonu jak i toronu (rys. 6-1).



Rys. 6-1. Schemat układu do pomiaru sumarycznego stężenia radonu i toronu

W przypadku pomiaru stężenia toronu komora jonizacyjna AG jest napełniana powietrzem gruntowym a następnie zamykana. Po ok. 10 czasach połowicznego rozpadu toronu ( $T_{1/2} = 55,6$  sek) w komorze AG, następuje zliczanie tylko cząstek  $\alpha$  pochodzących od radonu. Stężenie toronu w powietrzu gruntowym otrzymujemy poprzez odjęcie od całkowitej ilości radonu i toronu zliczeń pochodzących tylko od radonu.

### 6.3. Pomiar stężenia <sup>222</sup>Rn oraz <sup>220</sup>Rn w budynkach

Do pomiaru sumarycznego stężenia radonu i toronu w budynkach wykorzystano AG. Przyrząd był umieszczany w wybranym pomieszczeniu w budynku, na jego najniższym poziomie (w piwnicy lub w przyziemiu, zgodnie z opisem kryteriów wyboru oraz opisem budynków w rozdziale 7). Rejestracja stężenia odbywała się w sposób ciągły od 1 do 63 dni. Pomiaru wykonywano z częstotliwością próbkowania co 1 godzinę. Wartość średnią oraz błąd pomiaru uzyskiwano stosując dedykowane oprogramowanie AlphaEXPERT ver. 3.34.

Pomiary te były wykonywane równoległe z pomiarami stężenia radonu w gruncie, pomiarami przepuszczalności oraz pozostałymi parametrami gruntu *in-situ*, a w celu określenia średniorocznego stężenia radonu w budynku także w innych okresach roku.

### 6.4. Pomiar porowatości

Porowatość gruntu została zmierzona zgodnie z Polską Normą PN-88/B-04481 [PN88], wg wzoru:

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \quad (6-1)$$

gdzie:  $\rho_s$  – gęstość właściwa szkieletu gruntowego, [g/cm<sup>3</sup>];  
 $\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, [g/cm<sup>3</sup>].

### 6.5. Pomiary gęstości objętościowej

Pomiary gęstości objętościowej gruntu wykonywane były na rdzeniach o nienaruszonej strukturze. Rdzenie pobrane zostały z dwóch głębokości ok. 1,0 m oraz 1,5 m w tych samych otworach, w których prowadzone były pomiary stężenia radonu. Aby uzyskać rdzenie o nienaruszonej strukturze i ściśle określonej średnicy autor opracował metodę poboru za pomocą ciekłego azotu. Metoda ta polega na wsunięciu rury stalowej we wcześniej wykonany za pomocą świdra otwór, następnie wbiciu jej na głębokość 5-10 cm i zamrożeniu uzyskanego tak rdzenia gruntowego za pomocą ciekłego azotu. Rura z zamrożonym rdzeniem wyciągana jest na powierzchnię. Po odmrożeniu rdzeń wybijany jest z rury za pomocą wycioru. Następnie rdzenie umieszczane są w tzw. „kalibratorze próbek”, a czoło i tył próbki jest wyrównywane. Tak przygotowane rdzenie są ważone i mierzone.

Gęstość objętościowa uzyskanej w ten sposób próbki obliczana jest za pomocą wzoru:

$$\rho_d = \frac{m_r}{V_r} \quad (6-2)$$

gdzie:  $m_r$  – masa próbki w stanie mokrym, [g];  
 $V_r$  – objętość próbki, [cm<sup>3</sup>].

### 6.6. Pomiar gęstości właściwej

Pomiar gęstości właściwej prowadzony był na wysuszonych przez 24 h w temperaturze 105 °C rdzeniach, w warunkach określonych Polską Normą [PN88]. Po procesie suszenia próbki były kruszone i ważone. Gęstość właściwa obliczana była ze wzoru:

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_p} \quad (6-3)$$

gdzie:  $m_p$  – masa próbki w stanie suchym, [g];  
 $V_p$  – objętość rzeczywista próbki, [cm<sup>3</sup>].

Objętość rzeczywista próbki wyznaczana była za pomocą piknometru f-my Quantachrome będącego na wyposażeniu Laboratorium Transportu Neutronów IFJ PAN. Idea pomiaru na piknometrze opiera się na penetracji gazu w najmniejszych nawet porach próbki. Do tego celu, jako gaz penetrujący, zalecany jest hel. Zapewnia on penetrację porów nawet o wielkości jednego angstroma (10<sup>-10</sup> m). W piknometrze objętość właściwa określana jest na podstawie różnicy ciśnień pomiędzy gazem znajdującym się w tzw. „objętości referencyjnej  $V_r$ ” i „objętości próbki  $V_p$ ” umieszczonej w „objętości pomiarowej  $V_c$ ” i obliczana jest ze wzoru:

$$V_p = V_c - V_r \left( \frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \quad (6-4)$$

gdzie:  $V_c$  – objętość pomiarowa, [cm<sup>3</sup>];  $P_1$  – ciśnienie gazu w objętości referencyjnej, [Pa];  
 $V_r$  – objętość referencyjna, [cm<sup>3</sup>];  $P_2$  – ciśnienie gazu w objętości pomiarowej zawierającej próbkę, [Pa].

### 6.7. Pomiary stężenia $^{226}\text{Ra}$ w próbkach gruntu

Do pomiarów stężenia  $^{226}\text{Ra}$  użyty został tor spektrometryczny wyposażony w detektor półprzewodnikowy HpGe, będący na wyposażeniu Laboratorium Promieniotwórczości Naturalnej IFJ PAN. Podstawowe parametry detektora przedstawia tabela 6-2.

Tab. 6-2. Parametry toru spektrometrycznego LPN IFJ PAN

<i>Spektrometr SP-2</i>	<i>Opis</i>
<i>Detektor</i>	<i>High Purity Germanium - HPGe typ PRGC 2519 (PGT)</i>
<i>Zdolność rozdzielcza FWHM</i>	<i>1,95 keV / 1330 keV (Co-60) 0,99 keV / 122 keV (Co-57)</i>
<i>Wydajność względna</i>	<i>26,2 %</i>
<i>Oslona detektora:</i>	<i>Pb: 100 mm (górną osłoną Pb: 250 mm); Fe: 10,0 mm, Cu: 2,0 mm, Mg: 2,0 mm</i>
<i>Elektronika:</i>	<i>Układ 92X firmy ORTEC (HV, Ampl., ADC, MCA)</i>
<i>Napięcie pracy detektora</i>	<i>+ 4 500 V</i>
<i>Oprogramowanie</i>	<i>Gamma Vision-32 (ORTEC)</i>

Określanie stężenia radu w próbce następowało w oparciu o linię gamma z  $^{226}\text{Ra}$ , o energii 186,2 keV, zgodnie ze wzorem:

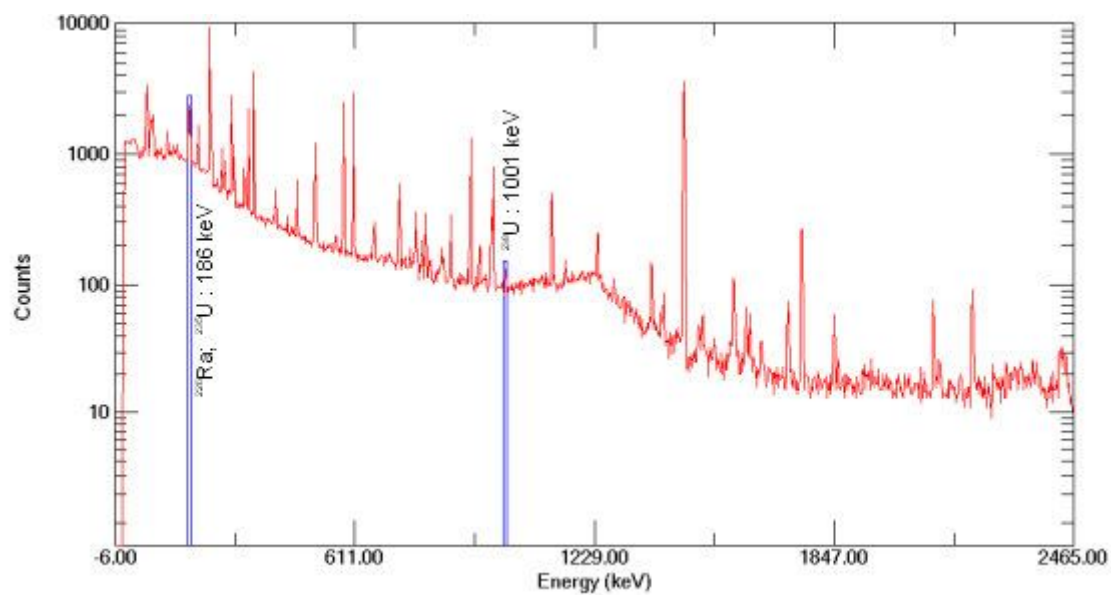
$$C_{\text{Ra}} = \frac{N_{\text{net}}}{t_{\text{pom}} \cdot E_{\text{eff}} \cdot m_{\text{net}} \cdot y} \quad (6-5)$$

gdzie:  $C_{\text{Ra}}$  – stężenie  $^{226}\text{Ra}$  w próbce, [Bq/kg];  
 $N_{\text{net}}$  – liczba zliczeń w fotopiku o energii 186 keV;  
 $t_{\text{pom}}$  – czas pomiaru, [s];  
 $E_{\text{eff}}$  – wydajność energetyczna dla  $E = 186$  keV dla  $^{226}\text{Ra}$   
 $m_{\text{net}}$  – masa netto próbki, [kg];  
 $y$  – wydajność kwantowa spektrometru dla  $E = 186$  keV dla  $^{226}\text{Ra}$ .

Przy interpretacji wyników należy uwzględnić pik 185,7 keV od  $^{235}\text{U}$ , który interferuje z pikiem pochodzący od  $^{226}\text{Ra}$ . W celu wyeliminowania udziału tej linii należy wziąć pod uwagę pik 1001 keV (rys. 6-2) pochodzący od  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ , którego protoplastą jest  $^{238}\text{U}$ . Jeżeli pik ten występuje w widmie spektrometrycznym, może to świadczyć o obecności  $^{235}\text{U}$  w próbce w ilości ok. 0,7 %  $^{238}\text{U}$ . Należy zatem uwzględnić poprawkę, zgodnie ze wzorem:

$$C_{\text{Ra pop}} = C_{\text{Ra}} - a C_{\text{U238}} \quad (6-6)$$

gdzie:  $C_{\text{Ra pop}}$  – stężenie  $^{226}\text{Ra}$  w próbce z uwzględnieniem  $^{235}\text{U}$ , [Bq/kg];  
 $C_{\text{U238}}$  – stężenie  $^{238}\text{U}$  w próbce, [Bq/kg];  
 $a$  – współczynnik zależny od wydajności kwantowej i abundancji  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$



Rys. 6-2. Przykładowe widmo gamma spektrometryczne próbki gruntu uzyskane na spektrometrze z zaznaczeniem pików 186 keV oraz 1001 keV.

Wyniki pomiarów i obliczeń stężeń radu w próbkach gruntu przedstawione zostały w rozdziale 8.

## 7. Przepuszczalność gruntu dla radonu

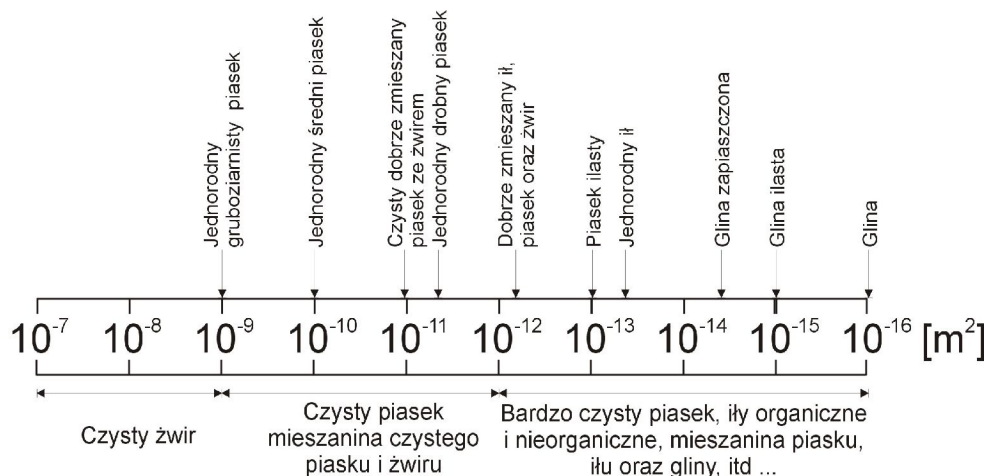
### 7.1. Wstęp

Jednym z najważniejszych parametrów gruntu, który musi być uwzględniony przy rozważaniu możliwości transportu radonu przez grunt jest jego przepuszczalność. Pomiar przepuszczalności *in-situ* potrzebne są do oszacowania ryzyka radonowego dla badanego obszaru. Często do obliczeń transportu radonu przyjmuje się wartości literaturowe dla danego typu gruntu. Jednakże, co potwierdziły badania prowadzone przez autora wokół budynków (wyniki przedstawione są w rozdziale 8), przepuszczalność może zmieniać się w szerokim zakresie na niewielkim obszarze (rzędu kilkunastu m<sup>2</sup>).

Istniejące metody wyznaczania przepuszczalności *in-situ* wykorzystują dwa podejścia do zagadnienia: 1) metodę teoretyczną, [Joh01, Dam92], w której przepuszczalność obliczamy z równania Darcy przy założeniu, że grunt jest jednorodny i izotropowy oraz 2) metodę półempiryczną [Rog91a], opartą na pomiarach doświadczalnych i dopasowaniu zależności teoretycznej do danych doświadczalnych.

Autor opracował metodę pomiarową, która stosując metodę Rogersa-Nielsona (półempiryczną), umożliwia równoczesne prowadzenie pomiarów radonu w gruncie i przepuszczalności *in-situ*. Pozwala ona uwzględniać w znacznej mierze niejednorodność i anizotropię gruntu.

Zakres przepuszczalności gruntu dla gazów jest bardzo szeroki (rys. 7-1), od 10<sup>-7</sup> [m<sup>2</sup>] (grunt jest bardzo dobrze przepuszczalny) do 10<sup>-16</sup> [m<sup>2</sup>] (grunty nieprzepuszczalne). Przepuszczalność łączy prędkość gazu gruntowego przez pory gruntu z gradientem ciśnienia wewnątrz gruntu (równanie 5-3). Zależność ta jest opisana prawem Darcy.



Rys. 7-1. Zakres przepuszczalności gruntu [Naz88]

Przepuszczalność zależy od parametrów mikroskopowych gruntu takich jak: rozmiar i kształt ziaren, kształt i liczba porów, występowanie mikroporów oraz wilgotność gruntu. Przyjmuje się, że duże pory w gruncie powodują, że przepuszczalność gruntu jest duża, tzn. opór, na jaki napotyka gaz przepływając przez grunt jest znacznie mniejszy w przypadku dużych porów niż w przypadku małych porów np. dla gliny, w której ziarna są bardzo małe.

Przepuszczalność w silnym stopniu zależy od porowatości. Pory gruntu, tworzące kanaliki, możemy zdefiniować jako część przestrzeni niewypełnionej ziarnami oraz lepiszczem. Struktura chemiczna poszczególnych składników skał czy też gleb oraz ich własności fizyczne mogą być bardzo różnorodne. Np. w skałach gromadzących płyny rozmiar ziaren jest na ogół mniejszy od 1 mm.

Porowatością objętościową nazywa się stosunek objętości porów  $V_p$  do całkowitej objętości  $V$  ośrodka porowatego:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} \quad (7-1)$$

Największą porowatość wykazują skały osadowe (w tym okruczowe), a także niektóre iły i skały pochodzenia chemicznego.

Tab. 7-1. Wartości porowatości dla wybranych typów skał [Naz88, Cot87]

<b>Typ skały</b>	<b>Zakres porowatości [%]</b>
<i>Zbite wapienie i dolomity</i>	0,6 – 2,5
<i>Wapienie roponośne</i>	2,0 – 22,0
<i>Piaskowce</i>	3,5 – 29,0
<i>Dolomity roponośne</i>	6,0 – 33,0
<i>Iły</i>	6,0 – 50,0
<i>Piaski</i>	6,0 – 52,0

Duży wpływ na przepływ medium przez ośrodki porowate ma także rozmiar kanalików porowych. Cechą charakteryzującą ośrodek porowaty jest powierzchnia właściwa  $M$ , równa stosunkowi pola powierzchni wewnętrznej porów  $F_p$ , znajdujących się w objętości ośrodka  $V$ , do tej objętości (wzór 7-2).

$$M = \frac{F_p}{V} \quad (7-2)$$

Pierwszą teorią łączącą właściwości transportowe porowatego medium, jakim jest grunt z przepuszczalnością jest teoria Kozeny [Naz88]. Rozwazał on równanie Naviera-Stockesa, które opisuje ruch rzeczywistego, ale nieściśliwego płynu, wynikający z działania sił składowych w kierunku trzech osi prostopadłych. Otrzymane zależności opisujące prędkość przepływu strumienia płynu porównał z równaniem Darcy i uzyskał wzór pozwalający wyznaczyć przepuszczalność:

$$k = \frac{c \cdot \varepsilon^3}{T \cdot S^2} \quad (7-3)$$

gdzie:  $c$  - teoretyczna stała zależna od kształtu porów, zmieniająca się w zakresie od 0,5 – 0,67, [-];  
 $\varepsilon$  - porowatość, [-];  
 $T$  - krętość, wartość wyznaczona empirycznie, większa lub równa 1, [-];  
 $S$  - powierzchnia właściwa ziaren, [ $m^{-1}$ ].

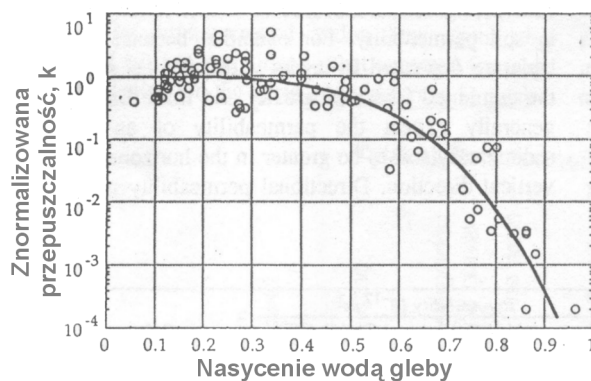
Dla jednolitych, kulistych ziaren:  $S = \frac{6(1-\varepsilon)}{d}$  ; gdzie  $d$  jest średnicą ziarna w [m].

Ze wzoru 7-3 wynika, że dla gruntu jednorodnego, przepuszczalność jest proporcjonalna do kwadratu średnicy ziarna. Tabela 7-2 podaje zakresy przepuszczalności dla trzech typów gruntu obliczone na podstawie teorii Kozeny.

Tab. 7-2. Przepuszczalność dla 3 rodzajów gruntu wg teorii Kozeny [Naz88]

Typ gruntu	$d$ [ $\mu m$ ]	$\varepsilon$	$S$ [ $m^{-1}$ ]	$k$ [ $m^2$ ]
<i>Il</i>	1	0,6	2,0E6	1,0E-14
<i>Pył</i>	20	0,5	2,0E5	1,0E-12
<i>Piasek</i>	200	0,4	2,0E4	4,0E-11

Teoria Kozeny sprawdza się dla gruntu całkowicie wypełnionego danym medium, czyli w przypadku radonu, który jest gazem, można ją zastosować dla gruntów o małej wilgotności. Przepuszczalność bowiem, silnie zależy od wilgotności (rys. 7-2).

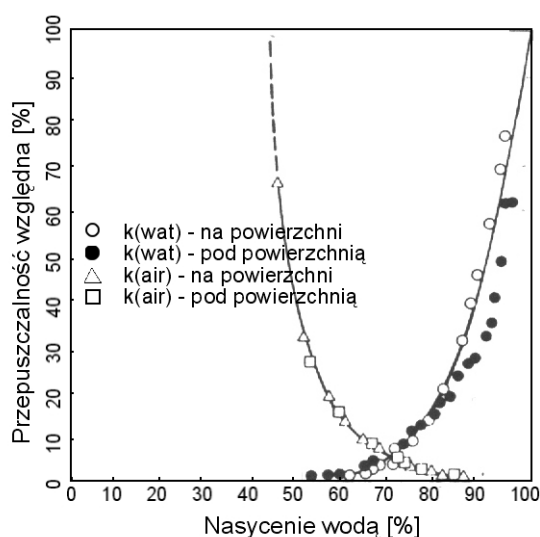


Rys. 7-2. Zależność znormalizowanej przepuszczalności od wilgotności [Rog91a]



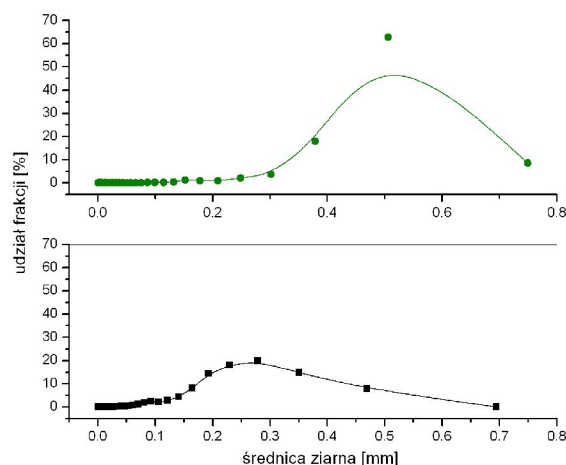
Możemy zdefiniować współczynnik tzw. „przepuszczalności względnej”, będący stosunkiem przepuszczalności efektywnej do przepuszczalności, przy której dany ośrodek jest wypełniony określonym medium (gaz, woda) w 100%. Pozwala to na określenie jak przepuszczalność danego ośrodka reaguje na zmiany wilgotności. Rysunek 7-3 przedstawia zależności przepuszczalności względnej dla powietrza  $k(\text{air})$  oraz dla wody  $k(\text{wat})$  od wilgotności dla piasku. Przepuszczalność jest praktycznie stała przy wilgotności gruntu do ok. 43% dla próbek powierzchniowych i 47% dla próbek z warstw głębszych. Powyżej tych wartości, gdy zaczynają być wypełniane duże pory piasku przez wodę, przepuszczalność maleje.

W przypadku gruntów gliniastych wpływ wilgotności na przepuszczalność jest większy niż dla piaskowych z dwóch powodów: 1) średnia średnica ziaren jest mniejsza niż w przypadku piasku, więc jest większa tendencja do blokowania porów, oraz 2) mniejsza porowatość powoduje szybsze zmiany strumienia przepływającego medium.



Rys. 7-3. Względna przepuszczalność piasku ilastego dla powietrza i wody w funkcji nasycenia wodą [Naz88]

Teorie przepuszczalności gazu przez grunt w większości przypadków zakładają jego jednorodność i izotropowość. Pomiary wykonane przez autora pokazują, że w rzeczywistości zakres rozmiarów ziaren w gruncie jest bardzo szeroki (rys. 7-4), a ich kształty mogą przyjmować różne postacie (kulki, walce, szpilki), a często formy nieregularne.



Rys. 7-4. Rozkład ziarnowy dla dwóch różnych typów gruntu

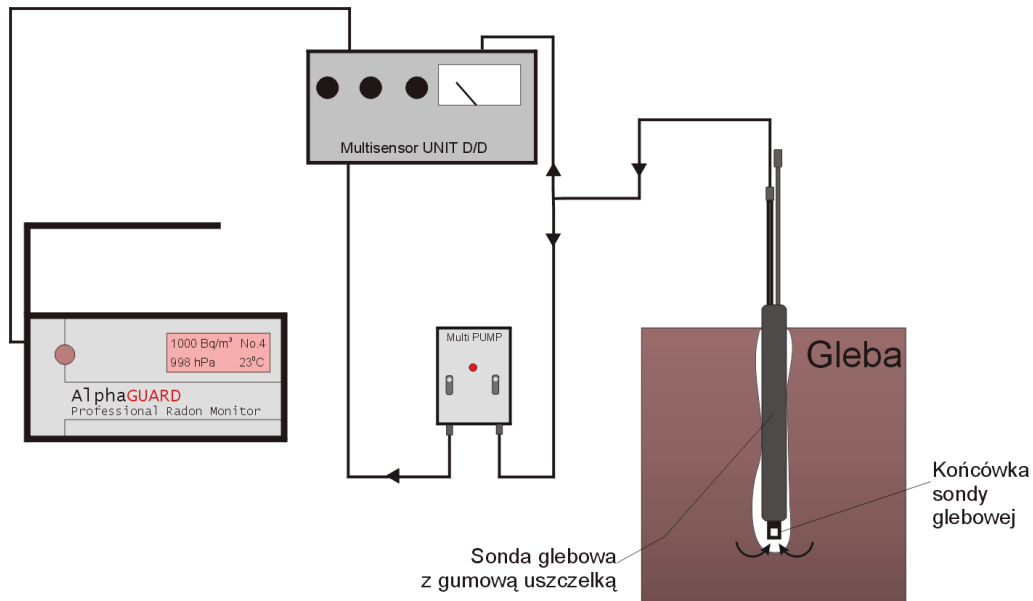
Należy wziąć jeszcze pod uwagę aspekt nieizotropowego rozkładu źródła radonu w gruncie (tzn. rozkładu radu jako prekursora radonu). Ponieważ sedymentacja następuje warstwowo pod wpływem siły ciężkości można się spodziewać, że przepuszczalność pozioma będzie większa od przepuszczalności pionowej. Prowadzone badania [Cot87] wykazały, że przepuszczalność pozioma jest 1,4 – 7 razy (w zależności od badanego obszaru) większa niż przepuszczalność pionowa.

## 7.2. Metoda pomiaru przepuszczalności IFJ

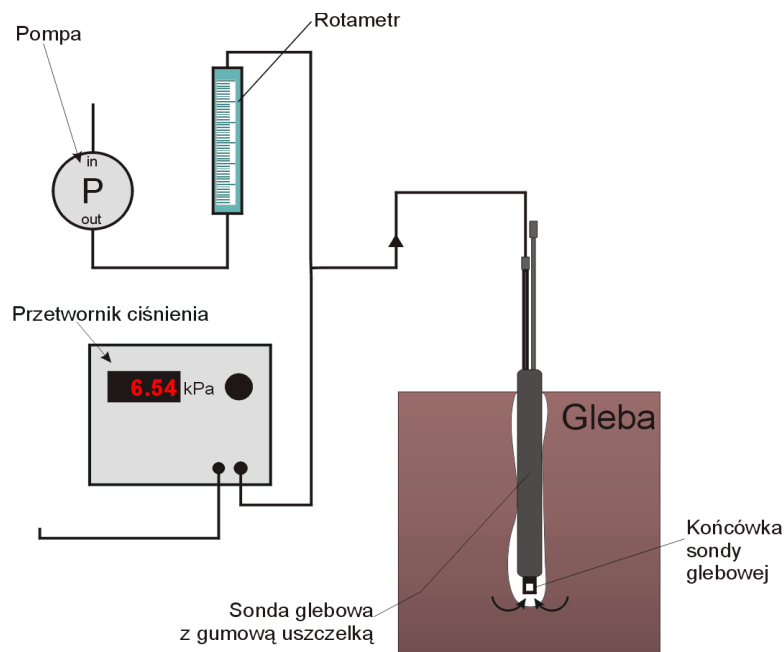
Aby zastosować sondę gruntową IFJ do pomiaru przepuszczalności gruntu *in-situ* należało określić tzw. współczynnik kształtu „W” dla sondy.

Układ do pomiaru przepuszczalności gruntu *in-situ* w zależności od zakresu pomiarowego składa się następujących części (rys. 7-5, rys. 7-6):

- komory jonizacyjnej AGP;
- urządzeń do pomiaru różnicy ciśnień i prędkości przepływu;
- Multisensora Unit D/D (MSU) – zintegrowanego z AlphaGUARD miernika do pomiaru prędkości przepływu oraz różnicy ciśnień w zakresie 0 – 2,5 kPa;
- VDPT – 10S – układu pomiarowego różnicy ciśnień w zakresie pomiarowym 0 – 10 kPa firmy VIGOTOR (używany przy różnicach ciśnień większych niż 2,5kPa);
- pompki AlphaPUMP f-my Genitron do wytwarzania różnicy ciśnień, pracującej w zakresach pomiarowych – 0,03 l/min; 0,05 l/min; 0,1 l/min; 0,3 l/min; 0,5 l/min; 1 l/min;
- sondy gruntowej IFJ.



Rys. 7-5. Schemat układu do pomiaru przepuszczalności 'k' gruntu in-situ (dla 'k' poniżej 2,5kPa)



Rys. 7-6. Schemat układu do pomiaru przepuszczalności 'k' gruntu in-situ (dla 'k' do 10kPa)

Zakładając jednorodność i izotropowość gruntu oraz stan ustalony, można dla powietrza napisać wzór:

$$Q = W \left( \frac{k}{\mu} \right) \Delta P \quad (7-4)$$

gdzie:  $Q$  – strumień gazu gruntowego przepompowywanego przez sondę, [m<sup>3</sup>/s];  
 $W$  – współczynnik kształtu sondy, [m];  
 $\mu$  – lepkość dynamiczna powietrza, [Pa s];  
 $\Delta P$  – różnica ciśnień zmierzona za pomocą MSU lub Vigotor pomiędzy końcówką sondy a powierzchnią gruntu wywołana przez pompkę, [Pa];  
 $k$  – przepuszczalność, [m<sup>2</sup>].

Przekształcając wzór 7-4, przepuszczalność  $k$  możemy obliczyć następująco:

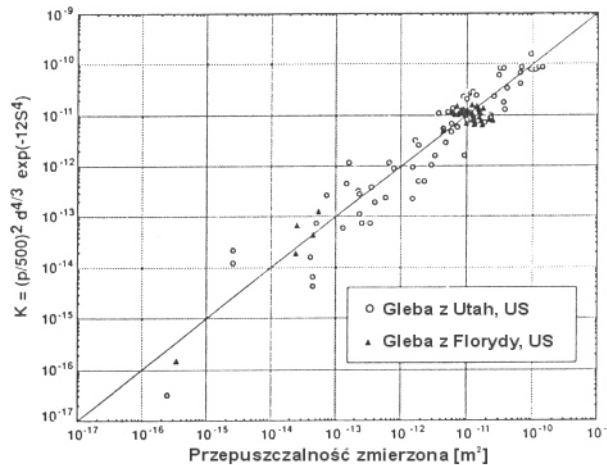
$$k = \mu \frac{1}{W} \frac{Q}{\Delta P} \quad (7-5)$$

Lepkość dynamiczna  $\mu = 1,75 \cdot 10^{-5}$  Pa s [Jan97b] w temperaturze powietrza  $10^\circ\text{C}$ , wartości  $Q$  oraz  $\Delta P$  otrzymujemy z pomiarów wykonanych powyżej przedstawioną aparaturą. W celu wyznaczenia przepuszczalności  $k$  należy wyznaczyć **współczynnik kształtu sondy  $W$** .

Inna metoda wyznaczania przepuszczalności gruntu przedstawiona jest w pracy Rogersa i Nielsena [Rog91a]. Wykonali oni serię 137 pomiarów przepuszczalności dla próbek gruntu o różnej gęstości, porowatości  $\varepsilon$ , średnicy ziaren  $d$  oraz wilgotności  $S$ . Do otrzymanych wyników dopasowano funkcję, (rys. 7-7).

$$k(\varepsilon, d, S) = \left(\frac{\varepsilon}{500}\right)^2 d^{4/3} \exp(-12S^4) \quad (7-6)$$

Rezultat dopasowania przedstawiono na rysunku 7-7. Mimo obserwowanego rozrzutu punktów, korelacja danych eksperymentalnych i wartości obliczonych wg równania 7-6 jest zadowalająca. Wzór 7-6 pozwala na teoretyczne oszacowanie przepuszczalności.



Rys. 7-7. Porównanie przepuszczalności zmierzonej i teoretycznej [Rog91a]

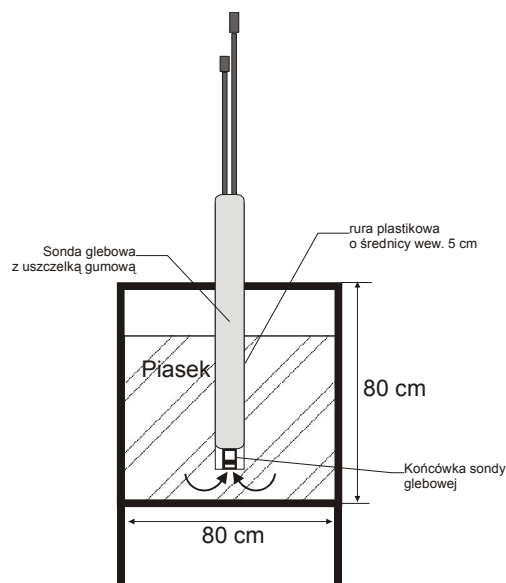
### 7.3. Metodyka pomiaru

W celu kalibracji sondy gruntowej, zostały zaprojektowane przez autora i wykonane w IFJ PAN kalibratory sondy (ilustr. 7-1).



*Ilustracja 7-1. Kalibratory sond gruntowych*

Schemat kalibratora przedstawia rysunek 7-8. Składa się on ze zbiornika stalowego o wysokości 80 cm oraz średnicy 80 cm. Wypełniony jest materiałem o zmierzonym rozkładzie granulacji. Do środka zbiornika wprowadzona jest rura plastikowa o średnicy 5 cm, w której umieszcza się sondę gruntową IFJ.



*Rys. 7-8. Schemat kalibratora sond gruntowych*

Wyznaczenie współczynnika kształtu sondy polegało na zmierzeniu prędkości przepływu i różnicy ciśnień.

Przekształcając wzór 7-5 otrzymujemy wyrażenie na współczynnik kształtu  $W$  w następującej postaci:

$$W = \frac{\mu}{k} \frac{Q}{\Delta P} \quad (7-7)$$

Przepuszczalność teoretyczną  $k$  dla piasku obliczamy ze wzoru 7-6 na podstawie pomiarów porowatości, średnicy ziaren oraz wilgotności użytego w „kalibratorze” piasku.

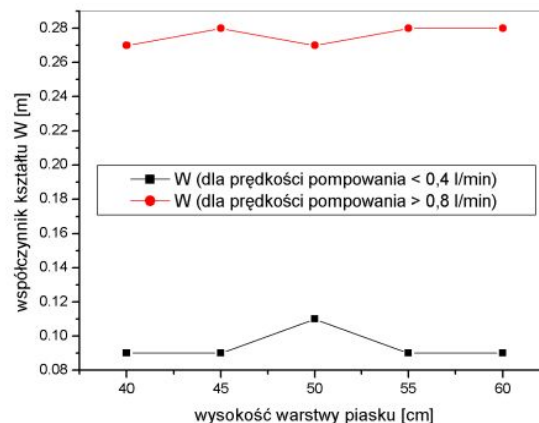
#### 7.4. Wyniki pomiarów

Oznaczenie przepuszczalności  $k$  wzorcowego piasku za pomocą wzoru (7-6) i przy następujących parametrach:  $\varepsilon = 0,38$ ;  $d = 2,5 \cdot 10^{-4}$  [m];  $S = 0,06$  dało wynik  $k = 9,43 \cdot 10^{-12}$  [m<sup>2</sup>], co zgadza się z wynikami literaturowymi podawanymi przez Nazaroffa [Naz88].

W pierwszej serii pomiarów zostały wykonane pomiary dla różnych wysokości napełnienia zbiornika piaskiem – od 40 do 60 cm z krokiem co 5 cm oraz dla 2 różnych prędkości przepływu (tab. 7-3). Wyniki pomiarów pozwoliły na określenie współczynnika kształtu  $W$  dla sondy, wg wzoru 7-7, przyjmując jako  $k$  – obliczoną powyżej przepuszczalność piasku.

Tab. 7-3. Zależność współczynnika kształtu  $W$  od wysokości warstwy piasku dla dwóch prędkości przepływu

Wysokość warstwy piasku	$\Delta P$ [Pa]	$v$ [l/min]	$W$ [m]
40cm	90	0,277	0,09
	95	0,837	0,27
45cm	90	0,273	0,09
	91	0,829	0,28
50cm	100	0,368	0,11
	106	0,924	0,27
55cm	94	0,275	0,09
	92	0,836	0,28
60cm	90	0,275	0,09
	92	0,833	0,28



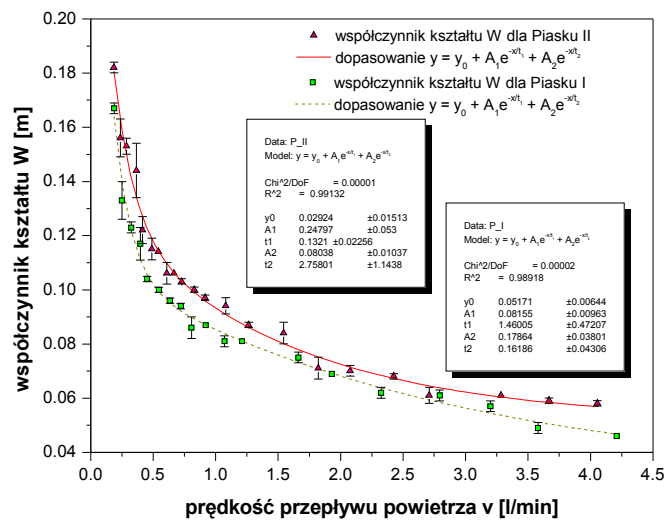
Rys. 7-9. Zależność  $W$  od wysokości warstwy piasku dla dwóch prędkości przepływu

Otrzymane wyniki, przedstawione na rys. 7-9, pokazują, że istnieje zależność współczynnika kształtu  $W$  od prędkości pompowania, natomiast nie ma zależności od wysokości warstwy piasku tzn. dla danej prędkości pompowania współczynnik  $W$  zmienia się w niewielkim zakresie wraz z głębokością zanurzenia sondy w zbiorniku. Wniosek ten jest ważny, bowiem w przypadku pomiarów *in-situ* mamy do czynienia z różnymi prędkościami przepływu gazu gruntowego przez sondę, w zakresie od ok. 0,01 l/min do 0,95 l/min. Nie możemy więc zakładać jednego współczynnika kształtu sondy gruntowej dla różnych prędkości pompowania.

Druga seria pomiarów dotyczyła sprawdzenia jak współczynnik kształtu  $W$  zachowuje się przy różnych prędkościach pompowania dla dwóch rodzajów piasku o różnej granulacji (rys. 7-11). Wynik przedstawiono w tabeli 7-4 oraz na rysunku 7-10.

Tab. 7-4. Wyniki pomiarów prędkości 'v' do obliczeń współczynnika 'W'

<b>Piasek I (New)</b>			<b>Piasek II (Old)</b>		
<b>v [l/min]</b>	<b>W [m]</b>	<b>Błąd pomiaru (W)</b>	<b>v [l/min]</b>	<b>W [m]</b>	<b>Błąd pomiaru (W)</b>
0,19	0,18	2E-3	0,19	0,17	2E-3
0,24	0,16	-7E-3	0,25	0,13	-7E-3
0,29	0,15	3E-3	0,33	0,12	2E-3
0,37	0,14	1E-2	0,4	0,12	6E-3
0,41	0,12	-5E-3	0,45	0,1	-1E-3
0,49	0,12	-4E-3	0,55	0,1	1E-3
0,54	0,11	< 1E-4	0,63	0,1	1E-3
0,61	0,11	-4E-3	0,72	0,09	1E-3
0,67	0,11	< 1E-4	0,81	0,09	-4E-3
0,73	0,1	-1E-3	0,92	0,09	< 1E-4
0,83	0,1	1E-3	1,07	0,08	-2E-3
0,92	0,1	1E-3	1,21	0,08	< 1E-4
1,08	0,09	3E-3	1,66	0,08	2E-3
1,26	0,09	1E-3	1,93	0,07	< 1E-4
1,54	0,08	4E-3	2,32	0,06	-2E-3
1,82	0,07	-4E-3	2,79	0,06	2E-3
2,08	0,07	-2E-3	3,2	0,06	2E-3
2,42	0,07	1E-3	3,58	0,05	-2E-3
2,71	0,06	-3E-3	4,21	0,05	< 1E-4
3,28	0,06	< 1E-4	-	-	-
3,67	0,06	1E-3	-	-	-
4,05	0,06	1E-3	-	-	-

Rys. 7-10. Współczynnik kształtu  $W$  w funkcji prędkości przepływu  $v$ 

Do wyników dopasowana została krzywa eksponencjalna dana równaniem:

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2} \quad (7-8)$$

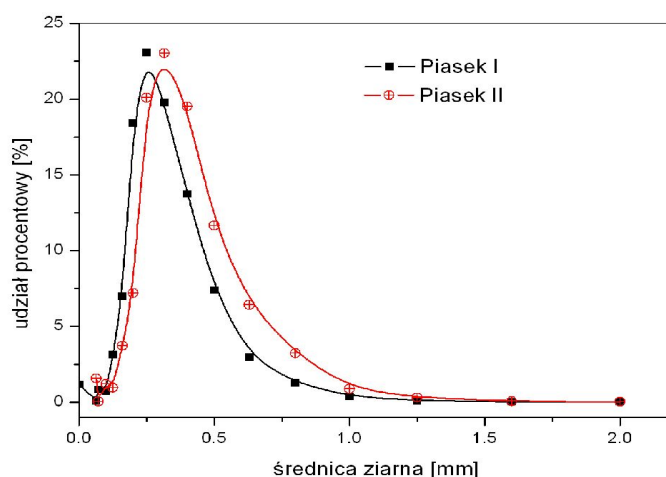
o następujących parametrach:

Tab. 7-5. Parametry krzywej dopasowania w celu wyznaczenia  $W$ 

Parametr	Piasek I (NEW)	Piasek II (OLD)
$y_0$	0.05 ± 0.01	0.03 ± 0.02
$A_1$	0.08 ± 0.01	0.25 ± 0.05
$t_1$	1.46 ± 0.47	0.13 ± 0.02
$A_2$	0.18 ± 0.04	0.08 ± 0.01
$t_2$	0.16 ± 0.04	2.76 ± 1.14

Z tabeli 7-5 wynika, że istnieje zależność współczynnika kształtu sondy  $W$  od prędkości przepływu powietrza gruntowego przez sondę i ta zależność dana jest funkcją eksponencjalną drugiego rzędu. Widać też, że występuje różnica pomiędzy współczynnikami dla tychże piasków (nie przekracza 2 %), co może wynikać z różnej granulacji piasku, których rozkłady ziarnowe pokazane są na rys. 7-11 (różnica pomiędzy średnią ważoną średnicą ziaren wynosi 7%).





Rys. 7-11. Rozkład ziarnowy piasków użytych do kalibracji sond

### 7.5. Badania terenowe

Stosując opisaną metodę obliczono przepuszczalności gruntu wokół wytypowanych do badań budynków. Otrzymano zakresy przepuszczalności w granicach  $10^{-12}$  [ $m^2$ ] do  $10^{-14}$  [ $m^2$ ], co odpowiada wartościom literaturowym dla danego rodzaju gruntu.

Tab. 7-6. Porównanie wyników pomiarów przepuszczalności

Lokalizacja	Liczba pomiarów	Zakres 'k' $\times 10^{-12}$ [ $m^2$ ]	Referencja
<b>Kraków</b>	<b>185</b>	<b>0,006 – 17</b>	<b>pomiary własne</b>
USA/Washington	30	15 – 84	[Sex96]
USA/California	30	0,06 – 30	[Gar99]
USA/New Jersey	9	1 – 700	[Naz89]
USA/Floryda	1073 (lab); 137 (in-situ)	0,005 – 200	[Rog91a]
Szwajcaria	50	1 – 1400	[Sur01]

### 7.6. Wnioski

Przedstawiona metoda pomiaru przepuszczalności *in-situ* wykorzystuje tą samą sondę gruntową, przy pomocy której mierzone jest stężenie radonu. Dzięki temu znana jest przepuszczalność gruntu dokładnie w tym samym miejscu, z którego pobierane jest powietrze gruntowe do pomiaru stężenia radonu.

Przeprowadzone szczegółowe pomiary laboratoryjne pozwoliły na wyznaczenie współczynnika kształtu sondy **W** jako funkcję prędkości przepływu powietrza gruntowego. Zależność ta okazała się silnie malejącą funkcją eksponencjalną, nie do pominięcia przy określaniu przepuszczalności gruntu.

## 8. Parametry gruntu oraz wybór budynków do badań

---

### 8.1. Wstęp

W celu weryfikacji modelu transportu radonu zostały przeprowadzone badania terenowe oraz laboratoryjne wymaganych parametrów gruntu i budynków. Początkowo praca zakładała pomiary porównawcze (budynków i modelu) w dwóch budynkach. Dla zwiększenia statystyki badanej próby projekt został rozszerzony na badania pięciu istniejących budynków mieszkalnych.

### 8.2. Założenia

Główne kryteria wyboru budynków do badań eksperymentalnych były następujące:

- muszą to być budynki wolnostojące;
- stężenia radonu wewnątrz budynków powinny przekraczać średnią dla obszaru Krakowa wynoszącą  $50 \text{ Bq/m}^3$  [Nie94];
- powinny posiadać piwnicę lub pomieszczenie pod budynkiem mające bezpośredni styk z gruntem;
- pomieszczenie powinno posiadać ustalony współczynnik wentylacji.

Wybór budynku wolno-stojącego opiera się na tym, aby wokół takiego budynku można przeprowadzić badania gruntu *in-situ*. Umożliwia to zmierzenie parametrów gruntu na obu osiach budynku, co pozwoli oszacować średnie wartości parametrów gruntu wokół niego. Z powodu dużej niejednorodności gruntu oraz możliwości zmiany mierzonych parametrów nawet na niewielkim obszarze, ilość punktów pomiarowych wokół budynku powinna być dostatecznie duża.

Stężenia radonu powinny być w miarę wysokie, ponieważ dla małych stężeń występują duże błędy pomiarowe. Interpretacja wyników takich pomiarów mogłaby być niejednoznaczna.

Założenie istnienia pomieszczenia o ustalonym współczynniku wentylacji zostało podyktowane możliwością wpływu na wynik pomiaru czynnika ludzkiego, jak również czynników związanych z nieuwzględnianymi w modelu parametrami jak np. wiatr.

### 8.3. Metodyka badań

Po wykonaniu wstępnych badań screeningowych oraz w oparciu o dostępne w IFJ PAN wyniki badanych wcześniej budynków na terenie Krakowa i okolic zostało wytypowanych do badań pięć budynków, które spełniały powyższe założenia.

Pomiary były prowadzone przez autora w następujący sposób: wewnątrz budynku był umieszczany AG (AlphaGUARD) mierzący stężenie radonu na kilka dni przed, w trakcie i po pomiarach parametrów gruntu (stężenie radonu, przepuszczalność, gęstość, porowatość). Następnie wokół budynku było wiercone 7 do 10 otworów (w zależności od warunków) o dwóch różnych głębokościach (ok. 1 m oraz ok. 1,5 m), z których pobrano rdzenie i próbki gruntu do badań laboratoryjnych. Przeprowadzono następujące pomiary:

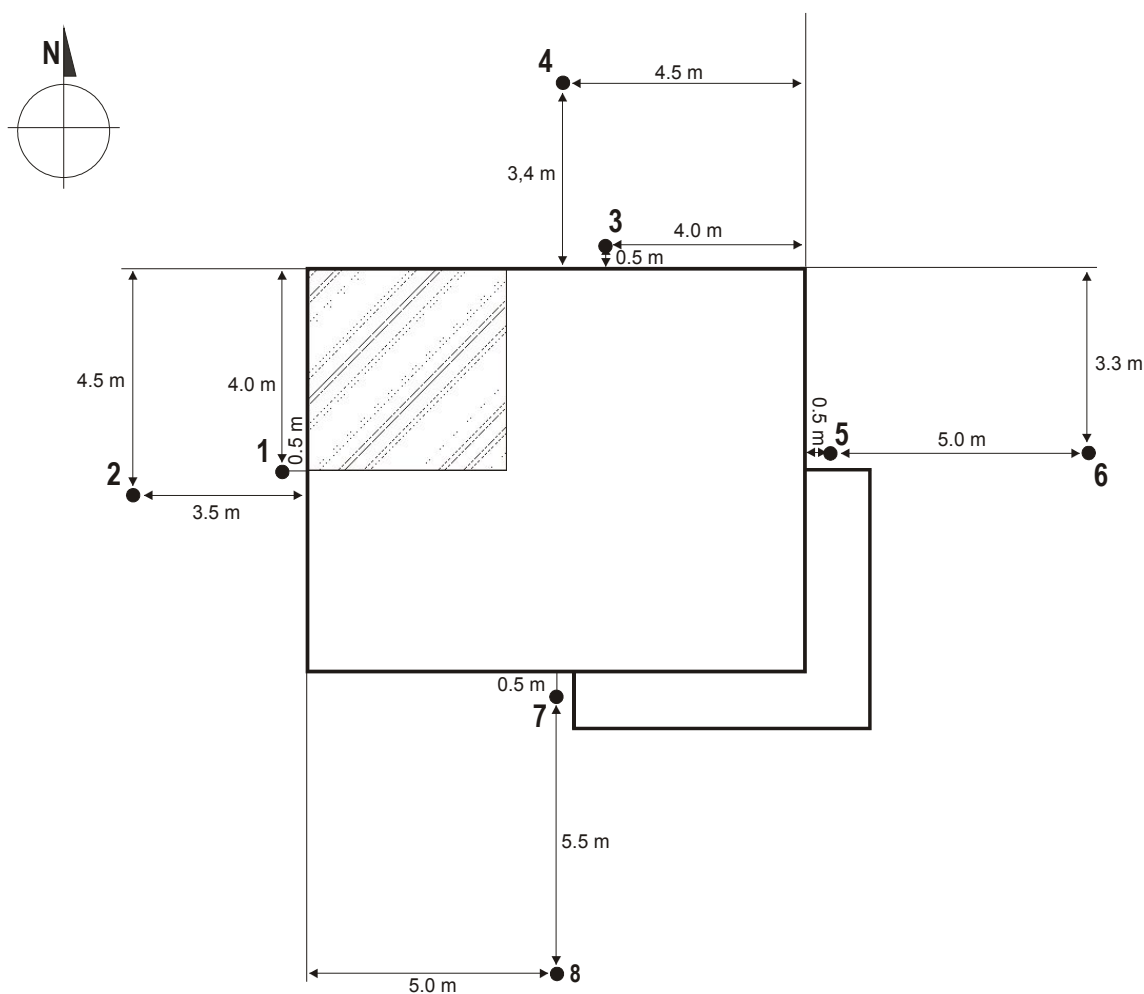
- *in-situ*: stężenia radonu i toronu w gruncie, prędkości przepływu i różnicy ciśnień w celu określenia przepuszczalności;
- laboratoryjne: porowatość, wilgotność, gęstość gruntu, zawartość  $^{226}\text{Ra}$  w gruncie, rozkład ziarnowy (kilka próbek, w celu oceny metody pomiaru przepuszczalności).

Metody pomiarowe opisane są w rozdziale 5. Wartości zmierzonych parametrów zostały następnie wykorzystane jako parametry wejściowe do programu TRIRAD w celu określenia poprawności modelu (szczegóły testowania programu oraz wyniki opisane są w rozdziałach 8 oraz 9).

## 8.4. Opis budynków

### 8.4.1. B1 – Budynek nr 1 (Biertowice)

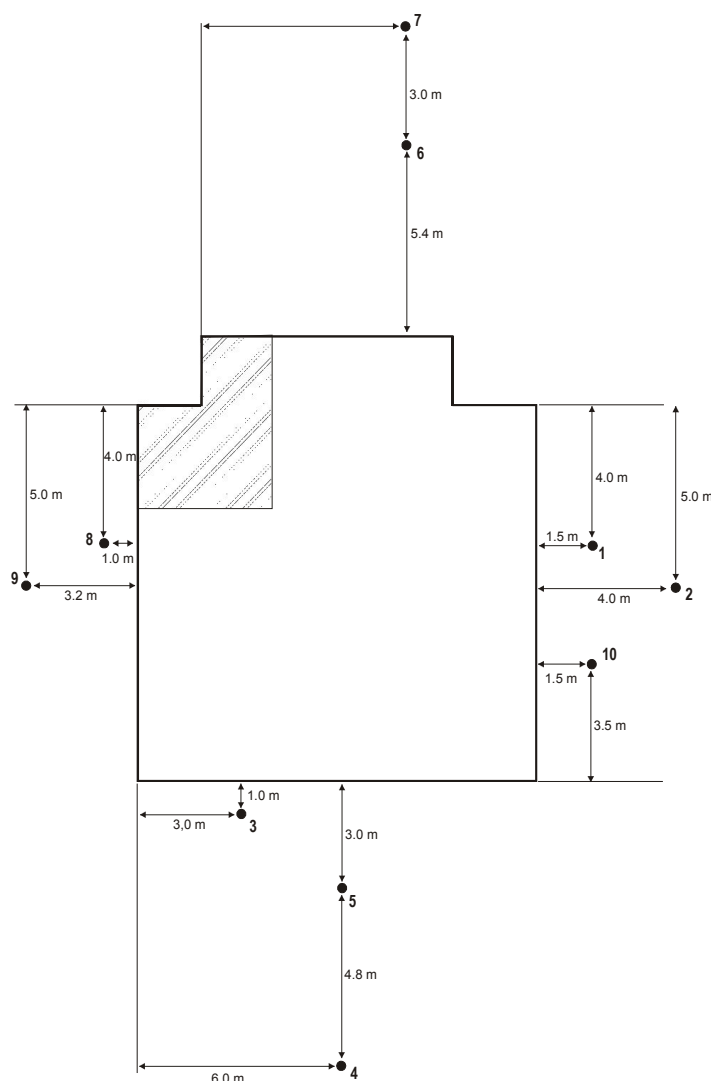
Rzut budynku oraz schemat rozmieszczenia otworów pomiarowych przedstawia rysunek 8-1. Jest to budynek drewniany z murowaną podmurówką i piwnicą. Postawiony został w latach 70-tych. Piwnica znajduje się pod całym budynkiem i jest zagłębiona w ziemi na 0,8 m. W jednym z jej pomieszczeń (zaznaczonym na rysunku ukośnymi liniami) monitorowano stężenie radonu przyrządem AG. Pomieszczenie to nie ma okien, a jedynie niezamykane szczelnie drzwi. Wymiary tego pomieszczenia to 4 m (szer.) x 4 m (dł.) x 1,7m (wys.), natomiast wymiary całego budynku: 10 m (szer.) x 8 m (dł.) x 8 m (wys.). Otwory pomiarowe oznaczone są przez cyfry od 1 – 8. W otworze „2” w trakcie robienia odwiertu, na głębokości ok. 0,6 m pojawiła się woda, co uniemożliwiło dalsze przeprowadzenie pomiarów.



Rys. 8-1. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B1

#### 8.4.2. B2 – Budynek nr 2 (Borowego)

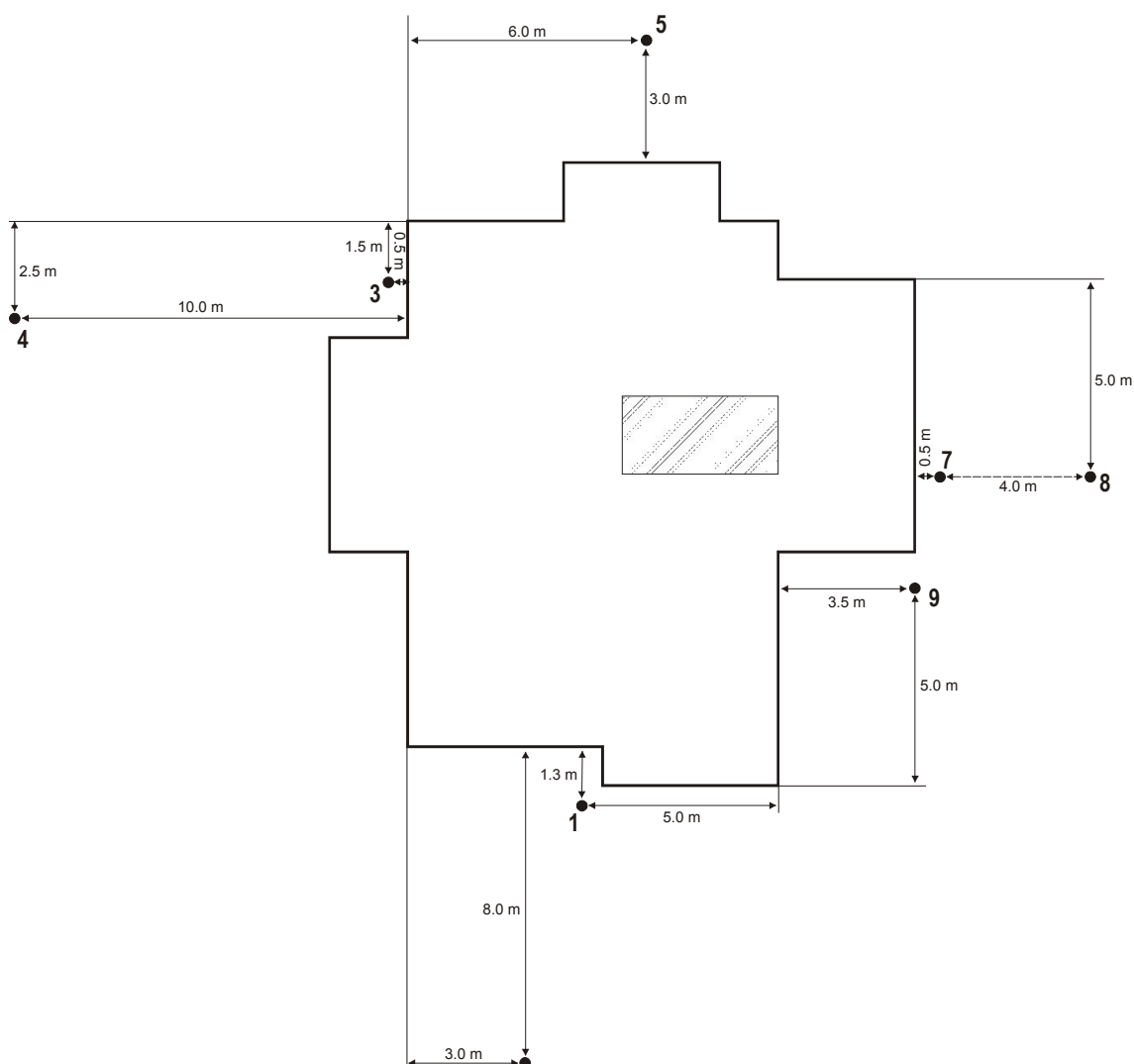
Rzut poziomy budynku przedstawiony jest na rysunku 8-2. Jest to budynek, w którym piwnica jest posadowiona dość płytko, bowiem ok. 10 cm pod powierzchnią gruntu. Wykonany jest on z cegły. Został wybudowany w roku 1935. Tak samo jak w budynku B1, w jednym z jego pomieszczeń został umieszczony AG. W pomieszczeniu tym ok. 80 % podłogi jest wyłożone drewnianą podłogą położoną bezpośrednio na glebie, natomiast 20% stanowi podłoga cementowa. Posiada ono dwa małe okienka, które były zamknięte w czasie pomiarów. Powierzchnia tego pomieszczenia wynosi 15,5 m<sup>2</sup>, natomiast wymiary domu to 12 m (szer.) x 13 m (dł.) x 10m (wys.). Wokół budynku wykonano 10 odwiertów na dwóch głębokościach: ok. 1,0 i 1,5 m.



Rys. 8-2. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B2

### 8.4.3. B3 – Budynek nr 3 (Tyniecka)

W budynku B3 (rys. 8-3) piwnica, w której umieszczony był AG znajduje się w środku budynku (obszar zaznaczony liniami ukośnymi). Jest to pomieszczenie o powierzchni  $6 \text{ m}^2$  i wysokości  $1,5 \text{ m}$ , zagłębione w ziemi na głębokość  $1,0 \text{ m}$ . Wymiary całego budynku to  $15 \text{ m}$  (szer.) x  $16 \text{ m}$  (dł.) x  $10 \text{ m}$  (wys.). Jest to budynek wykonany z cegły w latach 1971-72. W tym przypadku pojawił się problem związany z rodzajem gruntu (opis trudności pomiarowych zamieściłem przy omawianiu wyników). Wykonane zostały, tak jak w poprzednich budynkach, otwory w celu pobrania próbek gruntu oraz pomiaru stężenia radonu w gruncie. W przypadku tym wykonanych zostało 9 otworów o dwóch głębokościach  $1,0 \text{ m}$  oraz  $1,5 \text{ m}$ .

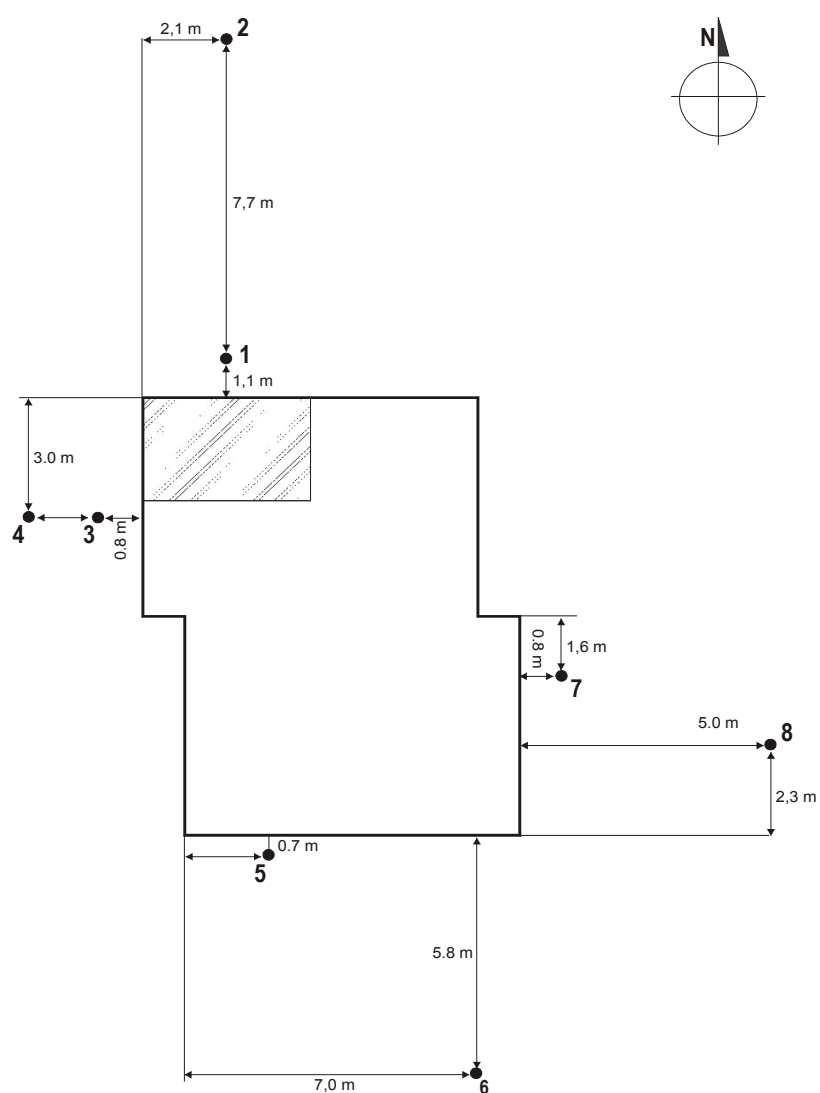


Rys. 8-3. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B3



#### 8.4.5. B5 - Budynek nr 5 (Kapelanka)

Budynek wybudowany został w latach 1980-tych. Materiałem użytym do budowy była cegła. Budynek ten jest budynkiem częściowo podpiwniczonym. Część mieszkalna znajduje się poniżej poziomu przebiegającej obok drogi. W pokoju do pracy (na rysunku 8-5 zaznaczonym linią ukośną) umieszczony został AG. Pomieszczenie to posiada 1 okno, które zostało zamknięte na czas pomiarów. Wymiary pomieszczenia: powierzchnia  $10 \text{ m}^2$ , wysokość: 2.8 m. Wymiary całego budynku: 11,5 m x 8 m x 8 m (wysokość). Wokół budynku wykonano 8 odwiertów, w których wykonanych zostało 15 pomiarów na dwóch głębokościach: 1,0 m oraz 1,5 m.



Rys. 8-5. Schemat budynku oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych dla budynku B5



## 9. Wyniki pomiarów

W rozdziale tym zostaną przedstawione wyniki pomiarów terenowych wokół oraz wewnątrz wytypowanych budynków, jak również wyniki z pomiarów laboratoryjnych pobranych próbek gruntu. Wyniki te posłużą jako dane wejściowe do programu TRIRAD.

### 9.1. Wstęp

Głównym celem pracy było opracowanie i weryfikacja modelu opisującego przechodzenie radonu z gruntu i materiałów budowlanych do budynku. Budynki i kryteria ich wyboru zostały szczegółowo opisane w rozdziale 7. Wyniki przedstawione w tabelach posłużyły do oceny i testowania programu TRIRAD, wykorzystującego teoretyczny model przechodzenia radonu z gruntu do budynków.

W poniższych tabelach zebrano wyniki końcowe pomiarów. Pomiarzy przeprowadzone zostały przy użyciu metod pomiarowych opisanych w rozdziałach 5 i 6.

Oznaczenia mierzonych parametrów:

- n - oznaczenie pomiaru
- $C_{Rn\&Tn}$  - sumaryczne stężenie  $^{222}Rn$  i  $^{220}Rn$  w powietrzu gruntowym, [Bq/m<sup>3</sup>];
- $C_{Rn}$  - stężenie  $^{222}Rn$  w powietrzu gruntowym, [Bq/m<sup>3</sup>];
- $\Delta p$  - różnica ciśnień, [Pa];
- v - prędkość przepływu, [m<sup>3</sup>/s];
- k - przepuszczalność, [m<sup>2</sup>];
- $\varepsilon$  - porowatość, [-];
- $C_{Ra}$  - stężenie  $^{226}Ra$  w gruncie, [Bq/kg];
- $\rho$  - gęstość gruntu, [kg/m<sup>3</sup>];
- $\sigma$  - błąd standardowy średniej, [-];
- venti - współczynnik wymiany powietrza w pomieszczeniu, [1/s].

## 9.2. Budynek B1

W tabeli 9-1 (grunt wokół budynku) oraz w tabeli 9-2 (wewnątrz budynku) zostały zebrane wyniki pomiarów przeprowadzonych dla budynku B-1.

Tab. 9-1. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B1

<i>n</i>	$C_{Rn\&Tn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$C_{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$\Delta p$ [Pa]	$v$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [m <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ -	$C_{Ra}$ [Bq/kg]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1-1	58355	55552	2455	3,89E-06	9,96E-14	0,25	26,3	2,00
1-2	*W	*W	1117	7,19E-08	1,65E-14	0,22	31,4	2,06
2-1	52795	54016	872	4,48E-06	3,00E-13	0,25	0,0	1,99
2-2	*W	*W	1338	2,92E-07	4,54E-14	0,21	27,9	2,10
3-1	43343	42008	737	1,32E-07	4,33E-14	*NA	27,9	*NA
3-2	34667	34891	842	3,04E-07	7,44E-14	*NA	28,6	*NA
4-1	13346	*LL	*PZ	*PZ	*PZ	*NA	25,2	*NA
4-2	*LL	*LL	*PZ	*PZ	*PZ	*NA	*NA	*NA
5-1	181	390	1124	2,34E-07	4,57E-14	*NA	25,5	*NA
5-2	178	282	1154	1,06E-07	2,28E-14	*NA	28,7	*NA
6-1	51712	44209	1572	4,41E-06	1,65E-13	*NA	32,2	*NA
6-2	49736	41745	431	4,56E-06	6,12E-13	*NA	23,8	*NA
7-1	249	173	1443	3,17E-07	4,48E-14	0,25	*NA	1,95
7-2	1881	2390	1226	2,61E-07	4,56E-14	0,28	25,7	1,91
8-1	2304	3600	1031	1,08E-07	2,59E-14	0,26	32,2	1,95
8-2	6195	5832	913	1,32E-07	3,48E-14	0,23	36,7	2,02

\*W – woda w otworze

\*PZ – poza zakresem pomiarowym

\*LL – błąd względny pomiaru jest większy niż zmierzone stężenie radonu

\*NA – pomiar nie został wykonany

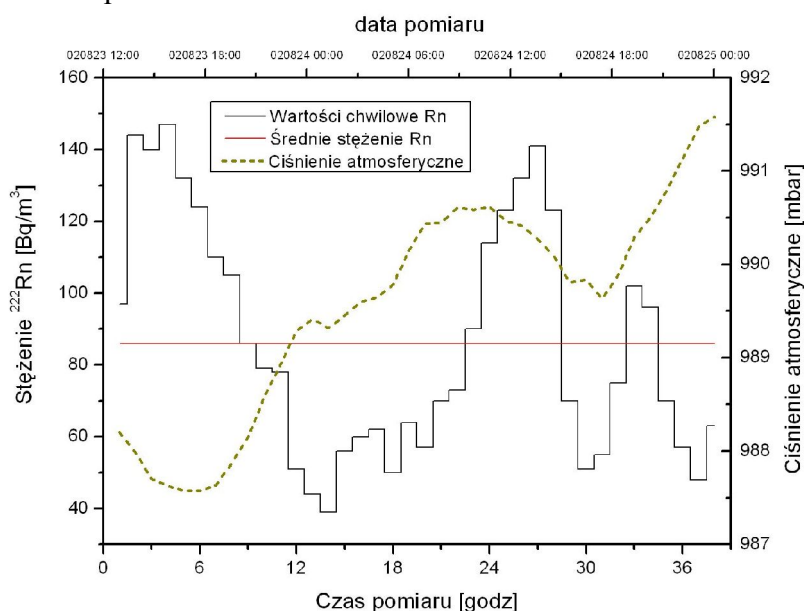
Z tabeli 9-1 wynika, że otrzymane wartości stężeń <sup>222</sup>Rn w gruncie podlegają znacznym wahaniom, w zależności od punktu pomiarowego. Spowodowane to jest prawdopodobnie przez różnice w strukturze gruntu, a co za tym idzie przez różnice w przepuszczalności. W otworach nr 1 oraz nr 2 pomiar nie został przeprowadzany ze względu na obecność wody od głębokości ok. 60 cm. Pomiary porowatości i gęstości gruntu przeprowadzone zostały na tak wybranych próbkach, aby uzyskać wartości na obu osiach budynku (schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych przedstawiony jest w rozdziale 7). Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy radem w gruncie i radonem w gruncie wynosi 0,18. Nie można więc stwierdzić istnienia korelacji pomiędzy tymi parametrami.

W czasie pomiarów gruntowych przeprowadzono pomiary wewnątrz budynku. W celu określenia średniej wartości stężenia radonu wewnątrz przeprowadzone były pomiary w różnych okresach roku. Wyniki zebrane zostały w poniższej tabeli (tab. 9-2)

Tab. 9-2. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-1.

<i>n</i>	<i>Początek pomiaru</i>	<i>Długość pomiaru [godz.]</i>	$\langle^{222}\text{Rn}\rangle$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	<i>Błąd</i> <sub>222Rn</sub> [Bq/m <sup>3</sup> ]	$^{222}\text{Rn}_{\text{min}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$^{222}\text{Rn}_{\text{max}}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$\Delta p$ [Pa]	<i>venti</i> [1/s]
1	10.05.03	137	86	4	39	147	-0,33	1,42E-05
2	23.08.02	38	20	1	1	60	-	5,78E-05
3	19.08.02	77	87	7	40	584	-1,07	7,22E-06
4	06.07.02	29	175	8	12	490	-	2,08E-05

Pomiary przeprowadzono na wiosnę i w lecie. Ze względu na niedostępność pomieszczenia nie były prowadzone w okresie zimowym. Trwały od 29 do 137 godzin. Wartość oznaczona  $\langle^{222}\text{Rn}\rangle$  jest to średnie stężenie radonu w trakcie trwania pomiaru. Maksymalne zanotowane stężenie wynosiło 584 Bq/m<sup>3</sup>.



Rys. 9-1. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B1

Na rysunku 9-1 przedstawiono wartości stężenia  $^{222}\text{Rn}$  i zmian ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-1 w okresie pomiarów korelacyjnych, czyli w trakcie równoczesnych pomiarów wokół budynku i wewnątrz niego. Można zauważyć wyraźne dobowe zmiany stężenia radonu. Współczynnik korelacji pomiędzy stężeniem radonu i ciśnieniem wynosi -0,44, a więc nie można stwierdzić prostych zależności pomiędzy tymi parametrami.

### 9.3. Budynek B2

W tabelach 9-3 oraz 9-4 zostały zebrane wyniki pomiarów dla budynku B-2. Pomiar wokół tego budynku nie wykazały tak dużych zmian stężenia radonu w obrębie jednego otworu jak w otoczeniu budynku B1, co może świadczyć o jednorodności gruntu w płaszczyźnie pionowej. Występują natomiast dość duże zróżnicowania w obrębie całego obszaru. Pomijając punkt 1-2 widać, że występują wahania stężeń radonu w zakresie od ok. 13 - 66 kBq/m<sup>3</sup>. Nie występuje korelacja pomiędzy stężeniem radu i radonu w gruncie (współczynnik korelacji wynosi 0,38).

Tab. 9-3. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-2

<i>n</i>	$C_{Rn\&Tn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$C_{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$\Delta p$ [Pa]	<i>v</i> [m <sup>3</sup> /s]	<i>k</i> [m <sup>2</sup> ]	$\epsilon$ -	$C_{Ra}$ [Bq/kg]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1-1	*LL	45312	652	8,44E-06	5,79E-12	*NA	32,5	*NA
1-2	1985	425	*PZ	3,60E-07	0,00E+00	*NA	41,7	*NA
2-1	66027	55392	273	1,55E-05	5,19E-11	*NA	40,1	*NA
2-2	65792	53197	*PZ	0,00E+00	0,00E+00	*NA	33,4	*NA
3-1	*LL	*LL	274	1,55E-05	5,17E-11	*NA	28,8	*NA
3-2	23196	14891	*PZ	*PZ	*PZ	*NA	35,9	*NA
4-1	27036	20171	1626	5,29E-06	1,19E-12	*NA	29,5	*NA
4-2	25401	24789	200	1,60E-07	2,25E-13	*NA	33,9	*NA
5-1	24021	26944	*PZ	*PZ	*PZ	*NA	37,3	*NA
5-2	22043	21248	210	1,67E-05	8,74E-11	*NA	30,8	*NA
6-1	23302	8532	*PZ	3,56E-06	0,00E+00	*NA	32,5	*NA
6-2	36962	11042	375	8,08E-06	9,39E-12	*NA	26,6	*NA
7-1	13061	7100	225	7,81E-06	1,49E-11	*NA	10,9	*NA
7-2	15616	5234	155	5,96E-07	1,10E-12	*NA	10,9	*NA
8-1	29269	15514	275	7,96E-06	1,25E-11	*NA	*NA	*NA
8-2	33910	16529	310	8,01E-06	1,12E-11	*NA	44,3	*NA
9-1	28772	13097	688	7,45E-06	4,53E-12	*NA	37,8	*NA
9-2	56576	24560	300	7,48E-06	1,04E-11	*NA	44,9	*NA

\*PZ – poza zakresem pomiarowym

\*LL – błąd względny pomiaru jest większy niż zmierzone stężenie radonu

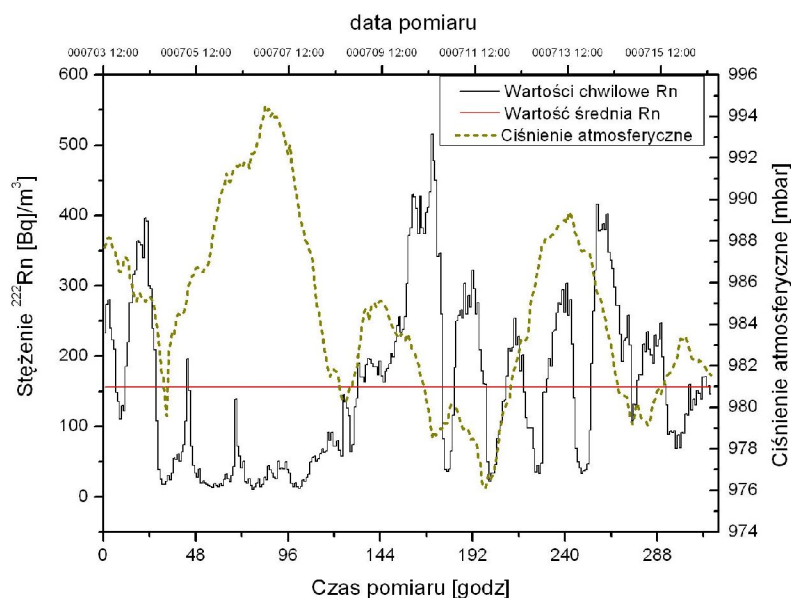
\*NA – pomiar nie został wykonany

Przy przeprowadzaniu pomiarów wokół budynku B-2 nie natrafiono na żadne trudności. Budynek posadowiony jest w dawnym korycie rzeki Rudawy, więc grunt, w którym przeprowadzane były wiercenia składa się głównie z mady. Nie wystąpiły też problemy związane z wodami gruntowymi, chociaż odległość od Rudawy jest niewielka (około 50m). Wokół budynku nie zostały wykonane pomiary gęstości i porowatości gruntu.

Tab. 9-4. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-2.

<i>n</i>	Początek pomiaru	Długość pomiaru [godz.]	$\langle^{222}\text{Rn}\rangle$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$\text{Błqd}_{222\text{Rn}}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$^{222}\text{Rn}_{\text{min}}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$^{222}\text{Rn}_{\text{max}}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$\Delta p$ [Pa]	<i>venti</i> [1/s]
1	23.12.99	1534	140	8	32	470	-1,05	5,28E-06
2	25.02.00	817	180	6	30	428	-0,56	8,61E-06
3	30.03.00	112	212	8	34	384	-	6,94E-06
4	10.04.00	1345	154	5	9	600	-	1,42E-05
5	03.07.00	316	156	5	10	516	-1,17	1,50E-05
6	30.08.00	239	116	4	15	424	-0,44	8,33E-06

Do oceny wartości średniorocznej stężenia radonu wewnątrz budynku B2 wykonanych zostało 6 pomiarów w różnych porach roku. Z tabeli 9-4 wynika, że spodziewaną wartością średnioroczną stężenia radonu wewnątrz budynku będzie wartość ok.  $160 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Zarejestrowana wartość maksymalna to  $600 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Przebieg zmian stężenia radonu wewnątrz budynku jest pokazany na rysunku 9-2. Obserwuje się duże wahania stężeń radonu od  $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$  do  $516 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Nie znana jest historia aktywności mieszkańców budynku, można przypuszczać, że w okresie najmniejszych fluktuacji nastąpiło np. otwarcie okna lub drzwi.



Rys. 9-2. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-2

Pomiary korelacyjne wokół budynku przeprowadzono w czasie wykonywania pomiaru nr 5. W tym czasie średnie zarejestrowane stężenie w budynku wynosiło  $156 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , a więc było ok. 3 % mniejsze niż przewidywane stężenie średnioroczne. Obliczony został współczynnik korelacji pomiędzy stężeniem radonu i ciśnieniem atmosferycznym wewnątrz budynku. Otrzymano wartość  $-0,38$ , a więc można stwierdzić brak korelacji.

### 9.4. Budynek B3

Dane w tabeli 9-5 przedstawiają wartości zmierzonych parametrów gruntu dla budynku B-3. Budynek jest usytuowany w dawnym korycie Wisły, dlatego można się było spodziewać trudności pomiarowych. Współczynnik korelacji pomiędzy stężeniem radu i radonu w gruncie wynosi 0,40.

Tab. 9-5. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-3

<i>n</i>	$C_{Rn\&Tn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$C_{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$\Delta p$ [Pa]	$v$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [m <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ -	$C_{Ra}$ [Bq/kg]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1-1	91227	72947	216	1,19E-05	2,37E-12	0,35	28,5	1,63
1-2	5163	5955	222	1,20E-05	2,31E-12	0,33	7,8	1,80
2-1	5413	5373	233	1,20E-05	2,20E-12	0,31	47,6	1,74
2-2	2256	1839	225	1,19E-05	2,27E-12	0,22	5,9	2,04
3-1	45605	34688	280	1,25E-05	1,88E-12	0,29	46,6	1,79
3-2	321	707	477	6,78E-06	9,71E-13	*NA	8,9	*NA
4-1	26344	13459	480	4,04E-07	4,55E-13	0,32	40,3	1,72
4-2	23570	*LL	17560	5,18E-06	2,90E-14	0,17	44,7	2,09
5-1	26852	21659	1343	2,61E-07	1,12E-13	*NA	49,3	*NA
5-2	23712	16332	449	3,27E-07	4,06E-13	0,31	25,1	1,79
6-1	*W	*W	*W	*W	*W	*W	*W	*NA
6-2	*W	*W	*W	*W	*W	*W	*W	*NA
7-1	387	308	17600	7,02E-06	2,61E-14	*NA	21,2	*NA
7-2	1917	4513	230	7,92E-06	1,96E-12	*NA	16,3	*NA
8-1	693	949	*PZ	*PZ	*PZ	*NA	24,5	*NA
8-2	2438	2110	517	7,19E-06	8,84E-13	*NA	*NA	*NA

\*W – woda w otworze

\*PZ – poza zakresem pomiarowym

\*LL – błąd względny pomiaru jest większy niż zmierzone stężenie radonu

\*NA – pomiar nie został wykonany

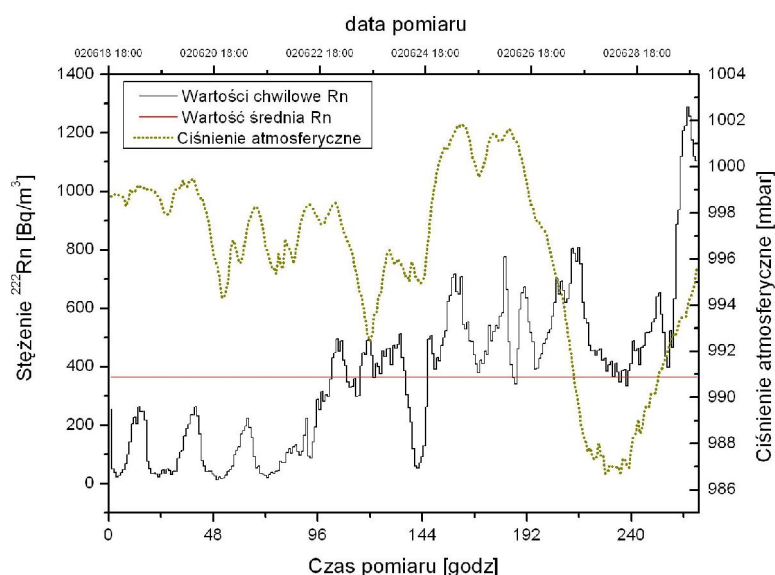
W trakcie wiercenia okazało się, że do głębokości ok. 1,5 m zalega warstwa mady, natomiast poniżej występuje warstwa nasyconego wodą piasku. Z tego powodu nie przeprowadzono pomiarów w punkcie nr 6. Próby pobierania powietrza gruntowego z głębokości poniżej 1,5 m (tzn. z warstwy piasku nasyconego wodą) kończyły się zasysaniem wody, co mogło doprowadzić do uszkodzenia urządzeń pomiarowych (pompki oraz AlphaGUARD).

Tak jak w przypadkach poprzednich do oceny wartości średniorocznej stężenia radonu wewnątrz budynku wykonane zostało kilka pomiarów w różnych okresach roku (tab. 9-6). Pomiaru te trwały od 23 do 270 godzin (11,5 dnia). Wyniki pomiarów pokazują, że wartość średnią dla tego budynku możemy szacować na ok. 351 Bq/m<sup>3</sup> i jest to wartość wyższa niż

średnia wartość stężenia radonu w budynkach z rejonu południa Polski ( $50 \text{ Bq/m}^3$ ). Zarejestrowano wartości stężeń od 8 do  $1288 \text{ Bq/m}^3$ . Pomiary korelacyjne wykonane zostały w okresie, gdy średnia wartość stężenia radonu wewnątrz budynku wynosiła  $369 \text{ Bq/m}^3$  i była większa od średniej rocznej o ok. 5 %.

Tab. 9-6. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-3.

<i>n</i>	Początek pomiaru	Długość pomiaru [godz.]	$\langle {}^{222}\text{Rn} \rangle$ [ $\text{Bq/m}^3$ ]	Błąd $_{222\text{Rn}}$ [ $\text{Bq/m}^3$ ]	${}^{222}\text{Rn}_{\text{min}}$ [ $\text{Bq/m}^3$ ]	${}^{222}\text{Rn}_{\text{max}}$ [ $\text{Bq/m}^3$ ]	$\Delta p$ [Pa]	venti [1/s]
1	18.06.02	270	364	12	12	1288	-	$1,22\text{E-}05$
2	17.06.02	23	369	15	298	436	-0,11	$3,61\text{E-}06$
3	26.05.02	119	503	17	73	1184	-	$2,50\text{E-}06$
4	06.11.00	124	340	9	166	344	-0,41	$1,11\text{E-}06$
5	07.04.01	138	287	7	84	284	-	$1,11\text{E-}06$
6	22.03.01	168	289	7	42	266	-	$8,33\text{E-}07$
7	23.07.01	135	305	12	8	392	-	$1,47\text{E-}05$



Rys. 9-3. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-3

Na rysunku 9-3 przedstawiono przebieg stężenia radonu oraz zmiany ciśnienia wewnątrz budynku w okresie korelacyjnym. Wyraźnie widać zmiany dobowe w pierwszej części okresu pomiarowego. Nagły wzrost stężenia z wartości ok.  $100 \text{ Bq/m}^3$  do ok.  $500 \text{ Bq/m}^3$  spowodowany był między innymi dużymi zmianami ciśnienia atmosferycznego. Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy stężeniem radonu i ciśnieniem w budynku wynosi  $-0,22$ , co świadczy o braku korelacji pomiędzy parametrami.

### 9.5. Budynek B4

Wyniki pomiarów z budynku B-4 pokazują (tabela 9-7), że wokół tego budynku występują duże zmienności stężenia radonu. Współczynnik korelacji stężenia radonu w gruncie ze stężeniem radu w gruncie wynosi ok. 0,11, a więc można stwierdzić brak prostej zależności pomiędzy tymi parametrami.

Tab. 9-7. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-4

<i>n</i>	$C_{Rn\&Tn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$C_{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$\Delta p$ [Pa]	$v$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [m <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$ -	$C_{Ra}$ [Bq/kg]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1-1	44032	27456	468	2,81E-06	2,02E-12	0,32	22,8	2,10
1-2	41216	32785	188	2,21E-06	1,90E-12	0,3	18,5	2,17
2-1	16424	6215	593	1,39E-06	9,13E-13	*NA	25,4	2,16
2-2	11260	8838	469	5,70E-06	3,67E-13	0,29	17,3	2,17
3-1	36510	22266	750	2,86E-06	9,29E-13	0,3	16,1	2,14
3-2	34624	26400	469	5,31E-06	2,45E-12	0,27	13,5	2,19
4-1	49920	35530	218	2,70E-06	3,26E-12	0,31	25,8	1,99
4-2	46103	36608	530	*PZ	*PZ	0,29	14,5	2,16
5-1	48524	46706	1725	7,53E-06	2,19E-13	0,31	17,0	2,12
5-2	53984	47342	406	1,61E-05	7,68E-13	*NA	25,1	*NA
6-1	32896	25234	1875	4,02E-06	2,51E-13	0,29	21,2	2,14
6-2	30933	28891	230	1,71E-05	1,53E-12	0,44	16,3	2,13
7-1	39381	34334	1300	1,81E-05	4,51E-13	0,28	24,5	2,16
7-2	27183	22776	*PZ	*PZ	*PZ	0,32	14,3	2,10
8-1	21824	16132	470	1,48E-05	6,78E-13	0,32	*NA	2,06
8-2	26144	21157	218	1,78E-05	1,73E-12	0,29	18,9	2,12
9-1	17746	13696	280	1,79E-05	1,80E-12	0,39	24,3	1,97
9-2	27808	17455	*PZ	*PZ	*PZ	0,34	16,1	2,03

\*PZ – poza zakresem pomiarowym

\*NA – pomiar nie został wykonany

W trakcie pomiarów nie natrafiono na żadne trudności pomiarowe. Zakres zmierzonych przepuszczalności w zakresie  $2,19 \cdot 10^{-13}$  m<sup>2</sup> do  $3,26 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>, wskazuje na grunty ilaste. Zanotowano średnie stężenie <sup>226</sup>Ra na poziomie  $19,4 \pm 4,3$  Bq/kg, przy średnim stężeniu na terenie aglomeracji krakowskiej rzędu  $35 \pm 4$  Bq/kg [Swa02]. Wartości gęstości i porowatości odpowiadają wartościom literaturowym dla tego rodzaju gruntu [Pos93].

Tak jak w poprzednich przypadkach mierzono stężenie radonu w budynku w kilku okresach roku, w celu określenia średniej rocznej, a czas ich trwania wynosił od 62 do 315 godzin (13 dni). Wyniki przedstawiono w tabeli 9-8.

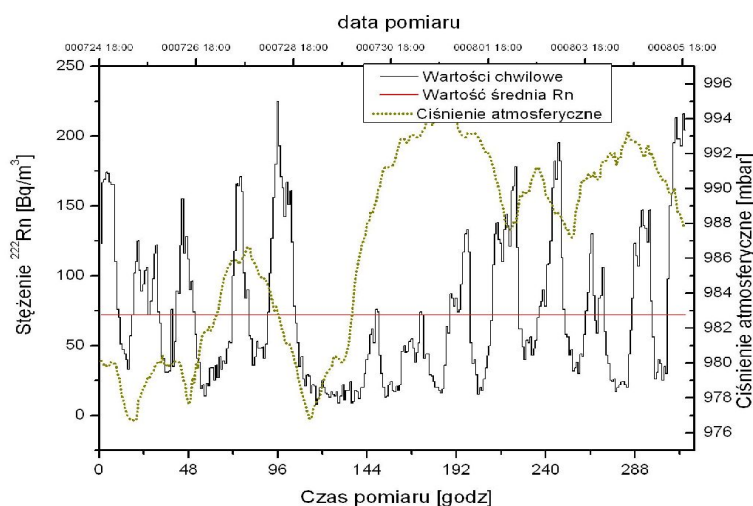


Tab. 9-8. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-4.

<i>n</i>	Początek pomiaru	Długość pomiaru [godz.]	$\langle^{222}\text{Rn}\rangle$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	Błąd $_{222}\text{Rn}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$^{222}\text{Rn}_{\min}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$^{222}\text{Rn}_{\max}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$\Delta p$ [Pa]	venti [1/s]
1	25.02.00	72	99	4	57	133	-0,67	1,42E-05
2	16.03.00	304	110	4	35	220	-	5,78E-05
3	24.07.00	315	73	3	8	255	-0,95	7,22E-06
4	19.11.01	136	88	10	50	436	-	8,33E-07
5	06.11.98	62	46	4	1	169	-	4,92E-05

W trakcie pomiarów korelacyjnych średnie stężenie radonu w budynku wynosiło  $73 \pm 3 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , więc było o ok. 14 % niższe niż średnie stężenie ze wszystkich okresów pomiarowych ( $83 \pm 5 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ). Zarejestrowana różnica ciśnień pomiędzy pomieszczeniem wewnątrz budynku a otoczeniem wynosiła średnio -0,81 Pa, co może wywoływać tzw. efekt kominowy (czyli zasysanie powietrza zawierającego radon z gruntu do wnętrza budynku).

Rysunek 9-4 przedstawia zarejestrowane zmiany stężenia radonu w piwnicy budynku B4 w trakcie pomiarów stężenia radonu w gruncie. Można zauważyć duże zmiany dobowe w przebiegu stężenia. Brak występowania tych zmian w pewnym okresie może świadczyć np. o aktywności mieszkańców (otwarcie drzwi). Zarejestrowaną wartością maksymalną było  $255 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , natomiast minimalną  $8 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy stężeniem radonu i ciśnieniem wewnątrz domu wynosi -0,04.



Rys. 9-4. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-4

## 9.6. Budynek B5

Wyniki pomiarów z budynku B-5 przedstawiono w tabeli 9-8 oraz w tabeli 9-9.

Tab. 9-9. Wartości zmierzone w gruncie dla budynku B-5

<i>n</i>	$C_{Rn\&Tn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$C_{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$\Delta p$ [Pa]	$v$ [m <sup>3</sup> /s]	$k$ [m <sup>2</sup> ]	$\epsilon$ -	$C_{Ra}$ [Bq/kg ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1-1	335	260	5940	2,50E-06	5,16E-14	0,22	40,0	2,06
1-2	56752	36520	1270	5,00E-06	2,39E-13	0,23	38,4	2,05
2-1	40806	40839	1000	5,50E-06	2,39E-13	*NA	38,5	*NA
2-2	5683	5429	350	5,00E-06	8,08E-13	0,22	30,3	2,05
3-1	20372	15332	4940	3,33E-06	4,81E-14	0,21	37,1	2,06
3-2	7442	1389	1530	5,00E-06	1,83E-13	0,20	37,6	2,10
4-1	17839	*LL	180	5,00E-06	1,48E-12	0,22	31,2	2,04
4-2	41872	20104	275	5,00E-06	9,23E-13	0,22	40,0	2,03
5-1	5936	*LL	175	4,17E-06	1,50E-12	0,22	38,1	2,01
5-2	20582	16565	5580	3,33E-06	6,90E-14	0,21	39,8	2,05
6-1	27232	7331	200	4,17E-06	1,26E-12	0,20	37,8	2,05
6-2	*NA	*NA	*NA	0,00E+00	0,00E+00	*NA	39,6	*NA
7-1	17306	9260	150	5,00E-06	1,68E-12	*NA	32,9	*NA
7-2	*NA	*NA	*NA	*NA	*NA	*NA	15,0	*NA
8-1	36077	16744	180	4,17E-06	4,51E-14	0,22	37,4	2,04
8-2	7307	9023	5250	4,17E-06	1,41E-12	0,22	38,7	2,05

\*W – woda w otworze

\*PZ – poza zakresem pomiarowym

\*LL – błąd względny pomiaru jest większy niż zmierzone stężenie radonu

\*NA – pomiar nie został wykonany

Uzyskane wyniki pomiarów w gruncie pokazują dużą zmienność stężenia radonu w gruncie wokół badanego budynku. Zakres zmienności jest pomiędzy 260 Bq/m<sup>3</sup> a 40839 Bq/m<sup>3</sup>. Pomiary wykonywane były na dwóch głębokościach (1,0 m oraz 1,5 m). Z tabeli 9-9 widać, że stężenie radonu nie koreluje się z głębokością. Ponieważ jest to pomiar chwilowy, stężenie radonu w silnym stopniu zależy od parametrów fizyko-chemicznych gruntu, takich jak: wilgotność, porowatość, przepuszczalność. Zakresy przepuszczalności wskazują, że są to grunty ilaste bądź ilasto-gliniaste. Stężenia radu odpowiadają średnim stężeniom dla aglomeracji krakowskiej. Współczynnik korelacji między stężeniem radu i radonu w gruncie wynosi 0,26.

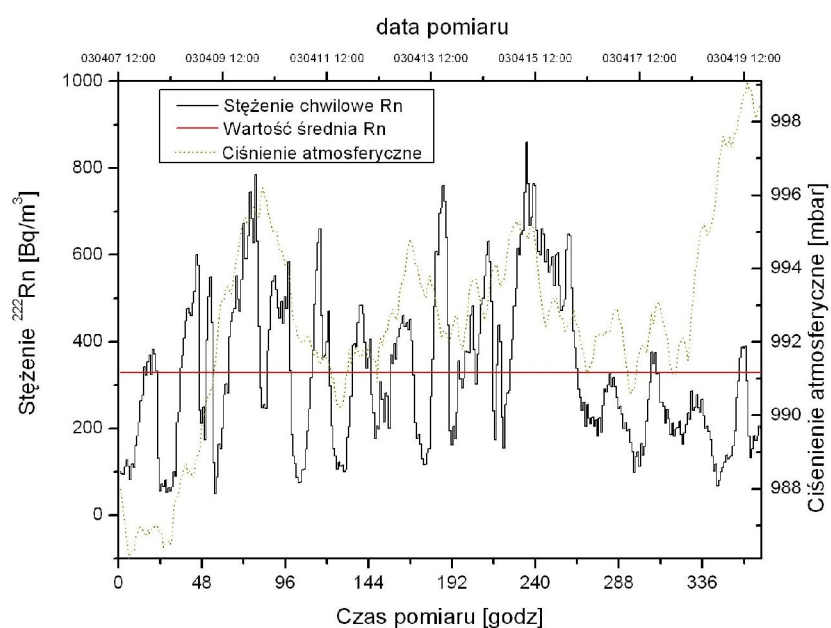
W tym przypadku zaobserwowano największe wartości stężeń radonu wewnątrz spośród wszystkich pięciu budynków wytypowanych do badań.

Tab. 9-10. Stężenie radonu wewnątrz budynku B-5.

<i>n</i>	Początek pomiaru	Długość pomiaru [godz.]	$\langle^{222}\text{Rn}\rangle$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$\text{Błq}_{222\text{Rn}}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$^{222}\text{Rn}_{\text{min}}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$^{222}\text{Rn}_{\text{max}}$ [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	$\Delta p$ [Pa]	<i>venti</i> [1/s]
1	26.06.03	165	308	11	72	744	-	9,44E-006
2	0.,07.03	18	605	28	31	1080	-	3,92E-005
3	04.07.03	370	329	11	49	860	-1,52	1,14E-005
4	29.07.03	68	297	8	8	1120	-	3,17E-005
5	25.07.03	1146	405	13	12	1880	-	1,31E-005
6	02.12.98	1033	297	9	50	579	-	1,94E-06

Maksymalne wartości w tym budynku sięgają prawie  $1900 \text{ Bq}/\text{m}^3$  [Jan98]. Warto wspomnieć, że pomiary wykonywane były w pokoju, na parterze budynku (budynek ten jest częściowo podpiwniczony).

W okresie korelacyjnym z pomiarami gruntowymi średnie zaobserwowane stężenie w budynku wynosiło  $329 \pm 11 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , co stanowi ok. 88 % przewidywanej średniej rocznej ( $373 \pm 13 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ).



Rys. 9-5. Przebieg zmian stężenia radonu i ciśnienia atmosferycznego wewnątrz budynku B-5

Rysunek 9-5 przedstawia zmiany stężenia radonu wewnątrz budynku B-5 w czasie pomiarów gruntowych. Widać na nim bardzo wyraźne dobowe zmiany stężenia. Minimalną zarejestrowaną wartością było  $49 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , natomiast wartością maksymalną było  $860 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy stężeniem radonu a ciśnieniem atmosferycznym wewnątrz budynku wynosi 0,22.

### **9.7. Podsumowanie**

Wykonane pomiary pokazują, że wokół budynków B-1, B-2 i B-4 nie ma większych różnic stężeń radonu w płaszczyźnie pionowej, natomiast występują znaczne różnice w płaszczyźnie poziomej. Natomiast na obszarze wokół budynku B-3 i B-5 występują różnice zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej. Otrzymane wyniki pokazują wyraźnie, jak duże trudności możemy napotkać przy ocenie stężenia radonu w gruncie na badanym obszarze. Wynika z tego, że do oceny stopnia zagrożenia radiologicznego pochodzącego od radonu, w miejscu planowanego postawienia budynku musimy wykonać co najmniej kilkanaście pomiarów.

We wszystkich budynkach zaobserwowano duże zmiany dobowe stężeń radonu wewnątrz budynków. W przypadku budynku B-5 były to nawet zmiany o mnożnik 4 (od wartości 400 do 1800 Bq/m<sup>3</sup>). Tak wysokie wartości stężeń radonu mogą być wywołane przez położenie budynku na obszarze spękań struktury geologicznej podłoża. Terenem o takiej strukturze jest południowo-wschodni obszar aglomeracji krakowskiej, na którym stwierdzono występowanie podwyższonych stężeń radonu w budynkach [Swa04]. Inną przyczyną tak wysokich wartości może być duża zawartość radu w gruncie wokół budynku (najwyższa ze wszystkich przebadanych).

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że nie ma bezpośredniej korelacji pomiędzy stężeniem radonu i radu w gruncie. Również wartości współczynników korelacji pomiędzy stężeniem radonu a ciśnieniem atmosferycznym wewnątrz budynku są na bardzo niskim poziomie.

W przypadku budynku B-2 warto zwrócić uwagę na duży udział toronu w gruncie, sięgający 50% sumarycznego stężenia radon + toron.

Przedstawione w tym rozdziale wyniki posłużyły do testowania modelu zaimplementowanego w programie TRIRAD, co zostało przedstawione w rozdziale 9 i 10.

## 10. Program komputerowy TRIRAD

---

W celu sprawdzenia poprawności modelu matematycznego został opracowany, zmodyfikowany program komputerowy TRIRAD (w oparciu o istniejący program komputerowy PRESSU i MASTRA), którego część obliczeniowa napisana jest w języku Fortran 90, natomiast procedury graficzne oraz interfejs zrealizowane za pomocą języka Borland Delphi.

W rozdziale 4 przedstawiony został matematyczny model przechodzenia radonu z gruntu do budynku. Rozwiązanie 3-wymiarowych liniowych równań rozkładu ciśnień (5-10) oraz stężenia radonu (5-18) musi nastąpić numerycznie, bowiem równania te nie mają rozwiązań analitycznych.

Rozwiązanie tych równań, które są liniowymi równaniami różniczkowymi drugiego rzędu, opiera się na metodzie Patankara-Spaldinga, zwanej „metodą dyskretyzacji”, która zostanie omówiona w dalszej części rozdziału.

### 10.1. Wstęp

Problemy fizyki występujące w aplikacjach technicznych można badać jednym z dwu sposobów. W pierwszym z nich zadane są równania różniczkowe opisujące zachowanie się typowego nieskończonego małego obszaru. Drugim poprawnym rozwiązaniem problemu jest takie rozwiązanie, które minimalizuje pewną wielkość  $\phi$  (będącą funkcją nieznaną funkcji i noszącą nazwę funkcjonału) zdefiniowaną przez odpowiednie całkowanie poszukiwanych wielkości po całym obszarze.

Oba te sposoby są matematycznie równoważne. Każde z nich można uważać za podstawowe sformułowanie problemu, jednakże użycie równania różniczkowego prawdopodobnie będzie bardziej użyteczne.

Różnice występują w przypadku rozwiązania przybliżonego. Podczas, gdy jedne metody, jak np. metoda różnic skończonych, aproksymują rozwiązanie równania różniczkowego bezpośrednio, poprzez dyskretyzację, inne, takie jak metoda elementów skończonych dokonuje przybliżonej minimalizacji funkcjonału.

Aproksymacja funkcyjna musi spełniać warunki kompletności, aby przy zwiększaniu gęstości siatki uzyskać zbieżność wyników do wyników dokładnych. Funkcje wchodzące w skład funkcjonału muszą pozostawać jednoznaczne i ciągłe. [Zie72]

## 10.2. Metoda różnic skończonych (dyskretyzacji)

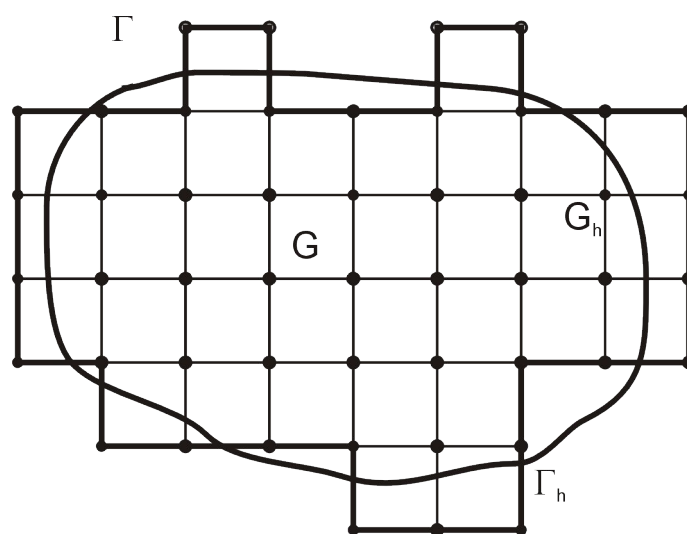
Do najczęściej stosowanych metod numerycznych rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych należy metoda różnicowa. Metoda ta w ogólności polega na przechodzeniu w równaniu różniczkowym od pochodnych do odpowiednich ilorazów różnicowych.

Równanie różnicowe, czyli równanie, w którym zamiast pochodnych występują wyrażenia różnicowe, wiąże ze sobą wartości szukanej funkcji w pojedynczych, odosobnionych punktach. Punkty te wybierane są tak, aby tworzyły siatkę regularną, np. prostokątną lub sześcienną. Rodzaj siatki zależy najczęściej od rodzaju układu współrzędnych.

Metoda ta jest metodą przybliżoną i może być stosowana do rozwiązywania tych zagadnień brzegowych, w których zawodzą inne metody dające dokładne rozwiązanie.

Idea przybliżonego rozwiązywania zagadnień brzegowych dla równań różniczkowych jest następująca:

1. w obszarze  $G$  (płaskim lub 3-wymiarowym), w którym poszukiwane jest rozwiązanie, tworzy się siatkę złożoną z jednakowych komórek, przybliżającą dany obszar  $G$ ;
2. dane równanie różniczkowe zastępuje się w węzłach siatki odpowiednim równaniem różnicowym;
3. w oparciu o warunki brzegowe ustala się wartości szukanego rozwiązania w węzłach brzegu obszaru  $G_h$ .



Rys. 10-1. Siatka dwuwymiarowa

Szczególny przypadek metody różnic skończonych, zwany metodą Patankara-Spaldinga [Pat80] został zaimplementowany do rozważanego modelu i zaprezentowany w uzupełnieniu A.

Ogólne równanie reprezentujące zmienną w punkcie obszaru G można napisać następująco:

$$\phi = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (10-1)$$

Metodami numerycznymi musimy znaleźć wartości współczynników  $a_0, a_1, a_2, a_m$ .

### **10.3. Model komputerowy**

Równania dyskretyzacyjne dla pola zaburzonego ciśnienia oraz dla pola stężenia radonu w bloku gruntu zostały przedstawione w dodatku A. Są to równania liniowe, 3- wymiarowe, drugiego rzędu. Równania te mogą być rozwiązane numerycznie przy użyciu metody Patankara-Spaldinga, przy założeniu warunków brzegowych podanych w rozdziale 4. Metoda ta opiera się na tzw. „elementach kontrolnych” i jest zbliżona do metody różnic skończonych. Działanie „metody dyskretyzacji” polega w pierwszym kroku na podzieleniu całego rozpatrywanego obszaru na niezachodzące na siebie „elementy kontrolne”. Wymiary „elementów kontrolnych” są różne w zależności od dokładności obliczeń jakie chcemy osiągnąć. W środku każdej z nich umieszczany jest węzeł siatki. Cała idea tej metody polega na założeniu, że wartości zależne w całym elemencie kontrolnym reprezentowane są przez punkt – węzeł siatki – znajdujący się w centrum.

Dla każdego elementu kontrolnego jest rozpatrywane osobne równanie różnicowe. W rezultacie otrzymujemy, dla każdego węzła siatki równanie algebraiczne (dyskretne), wyrażające wartość zmiennej zależnej jako funkcje wartości komórek sąsiednich. Tak więc, jeżeli mamy siatkę złożoną z N punktów, otrzymujemy N dyskretnych równań algebraicznych, które możemy już rozwiązać metodami algebraicznymi. Do rozwiązania tych algebraicznych równań dyskretyzacyjnych została użyta numeryczna metoda iteracyjna. W tej metodzie 3-wymiarowa siatka jest rozwiązywana linia po linii, czyli warstwa po warstwie w porządku naprzemiennym. W każdej z iteracji cały rozpatrywany układ jest redukowany do tej jednej linii. Cały proces iteracyjny prowadzony jest do czasu, aż nieznane wartości zmiennych zbiegną się do końcowych wartości dla obliczanego obszaru, włączając w to powierzchnie styku grunt-szczelina. Do obliczeń założone zostaje kryterium tolerancji niedokładności.

#### **10.4. Program TRIRAD**

Powyższy model został zaimplementowany do programu komputerowego o nazwie TRIRAD (ThRee-dImensional RADon Transport Model). Jest to udoskonalona wersja programu „Mastra” i „Pressu” C.O.Loureiro.

Blokowy schemat programu przedstawiono na rysunku 10-2. Wyróżnione są dwa bloki: CIŚNIERA oraz STĘŻERA. Moduł CIŚNIERA na podstawie danych wejściowych dotyczących geometrii obszaru oblicza elementy kontrolne (ElKo) oraz generuje siatkę w rozpatrywanym bloku gruntu. Następnie obliczany jest rozkład ciśnienia i prędkości rozprzestrzeniania się radonu w gruncie. Wyniki obliczeń zapisywane są w plikach: PARAMETRY, CVX, CVY, CVZ, XVELO, YVELO, ZVELO a następnie wykorzystywane są do obliczeń rozkładu radonu w gruncie, co wykonywane jest w module STĘŻERA. Również w tym module obliczany jest strumień radonu przechodzący przez szczeliny budynku do jego wnętrza i następnie na podstawie danych o geometrii budynku obliczane jest stężenie radonu w jego wnętrzu.

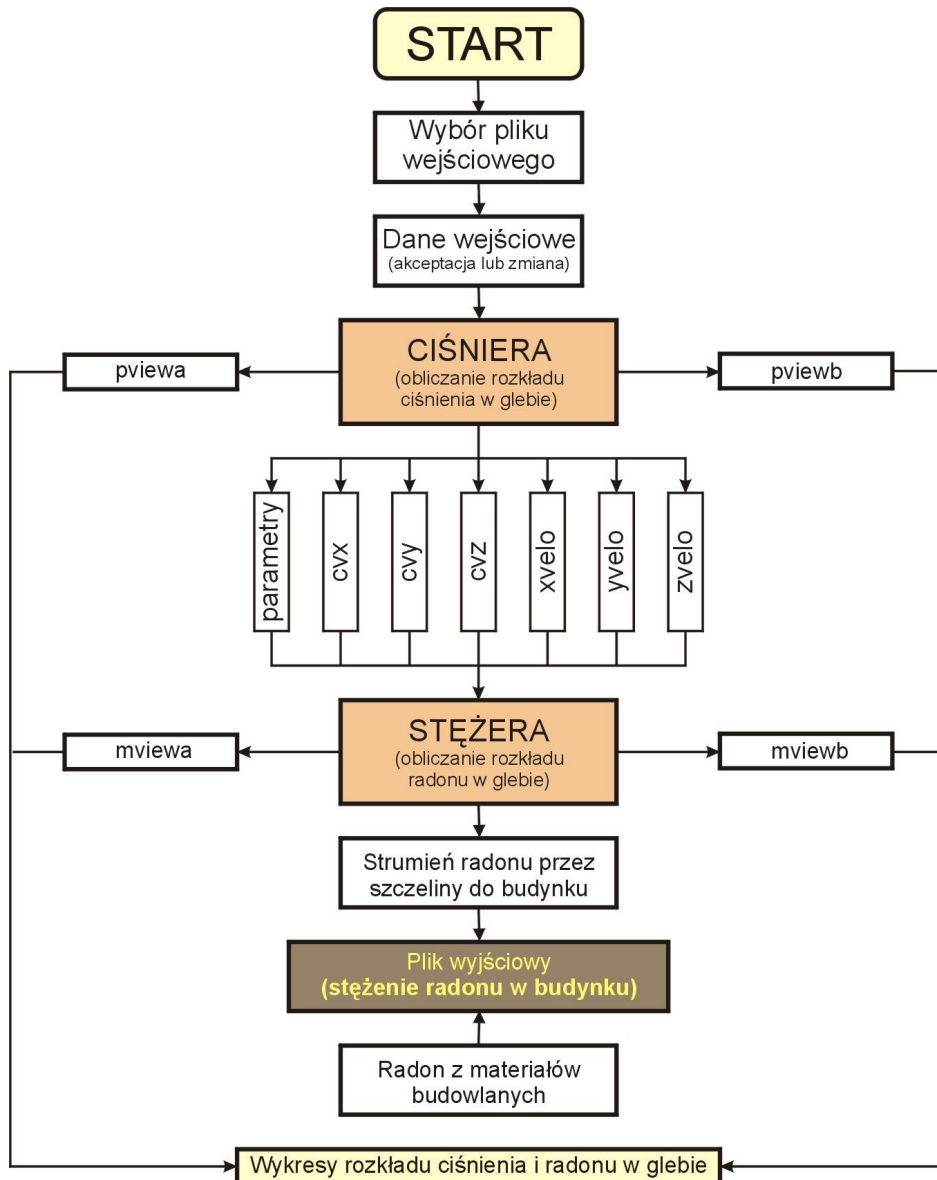
W wyniku działania tych modułów otrzymujemy dane służące do graficznej prezentacji wyników. Są to: 4 pliki PVIEW\_ do prezentacji rozkładu ciśnienia oraz 4 pliki MVIEW\_ do prezentacji rozkładu stężenia radonu w gruncie.

Plik PVIEWA przedstawia rozkład ciśnienia w gruncie w pierwszym zdefiniowanym przekroju gruntu, w PVIEWB zapisane są dane rozkładu ciśnienia wokół szczeliny. Pliki PVIEWC oraz PVIEWD również zawierają dane rozkładu ciśnienia, jednakże w drugim zdefiniowanym przekroju gruntu. W taki sam sposób przedstawione są rozkłady radonu w gruncie i wokół szczeliny, które zapisane są w plikach MVIEWA do MVIEWD.

Plik PARAMETRY służy do przekazywania parametrów kontrolnych pomiędzy modułami CIŚNIERA i STĘŻERA. Plik CVX, CVY oraz CVZ są plikami zawierającymi obliczone wielkości elementów kontrolnych w każdym z kierunków, natomiast XVELO, YVELO oraz ZVELO podają nam prędkości rozchodzenia się gazu gruntowego odpowiednio w kierunkach x, y oraz z.

W programie zastosowano dwa języki programowania. Do wprowadzania danych oraz graficznej prezentacji wyników użyty został kompilator Delphi f-my Borland, natomiast procedury do obliczeń numerycznych zostały napisane w języku Fortran 90 i kompilowane przy użyciu pakietu MinGW (Minimalist GNU Windows).



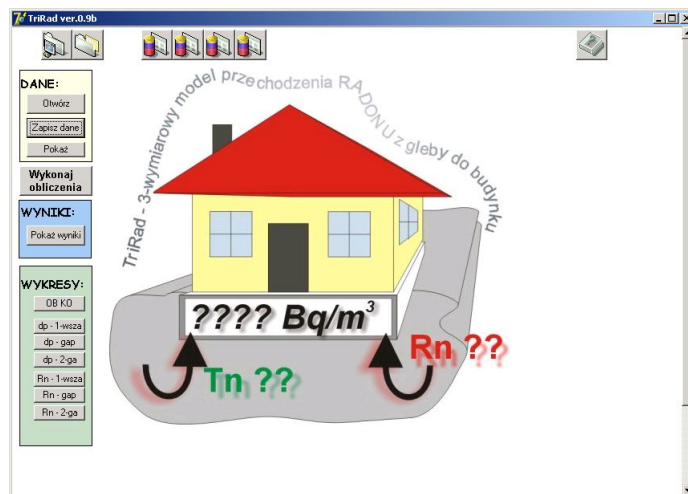


Rys. 10-2. Schemat blokowy programu TRIRAD

### 10.5. Interfejs programu TRIRAD

Opis instalacji programu dołączonego na CD znajduje się w Uzupełnieniu B.

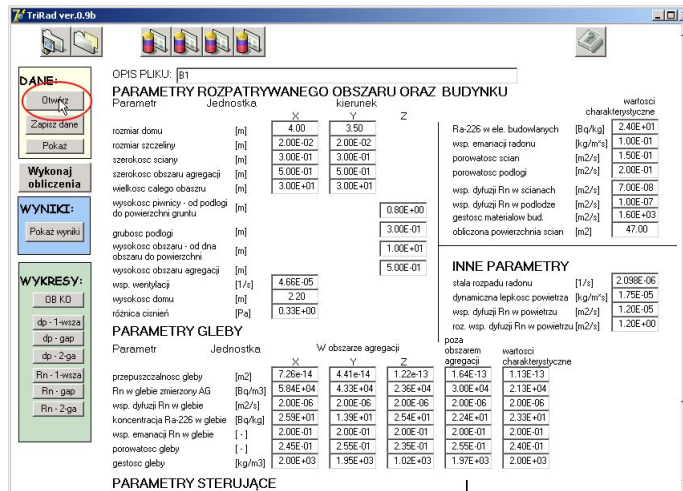
Po uruchomieniu programu mamy dostępny ekran (rysunek 10-3), o następujących opcjach: „Dane”, „Wykonaj obliczenia”, „Wyniki” oraz „Wykresy”.



Rys. 10-3. Ekran powitalny programu TRIRAD

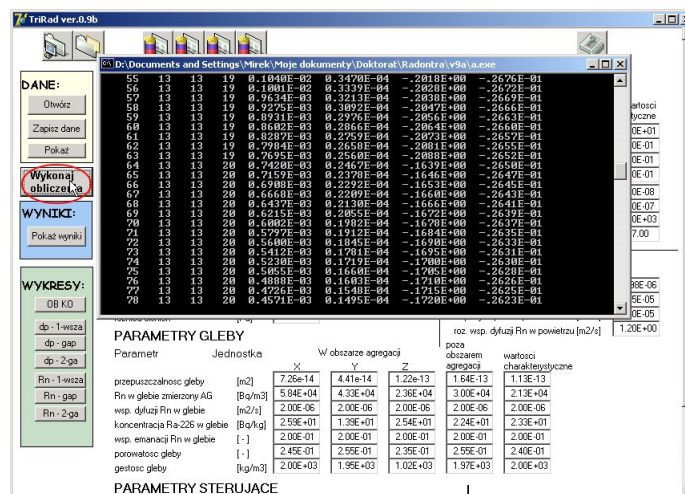
Naciśnięcie klawisza „Otwórz” z zakładki „Dane” otwiera ekran (rys. 10-4) służący do wprowadzania danych wejściowych do programu. Dane te zostały podzielone na kilka części:

- opis pliku
- parametry obszaru oraz budynku
- parametry gruntu
- parametry sterujące
- parametry materiałów budowlanych
- inne parametry



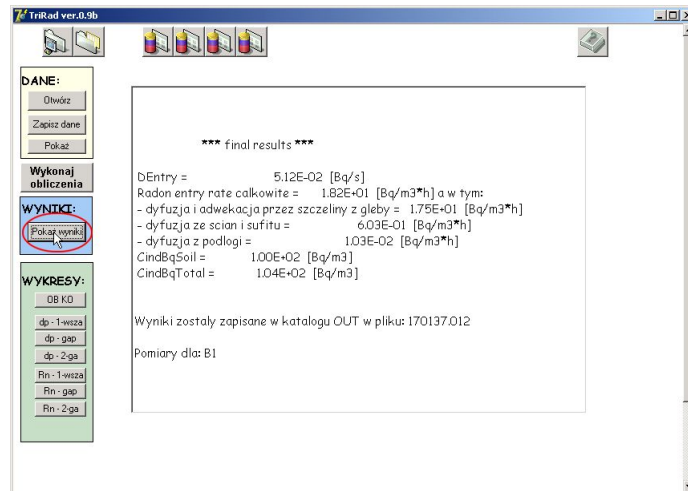
Rys. 10-4. Ekran z danymi wejściowymi do programu TRIRAD

Po naciśnięciu przycisku „Wykonaj obliczenia” program zaczyna obliczenia na podstawie wpisanych wcześniej parametrów (rys. 10-5).



Rys. 10-5. Ekran "Wykonaj obliczenia"

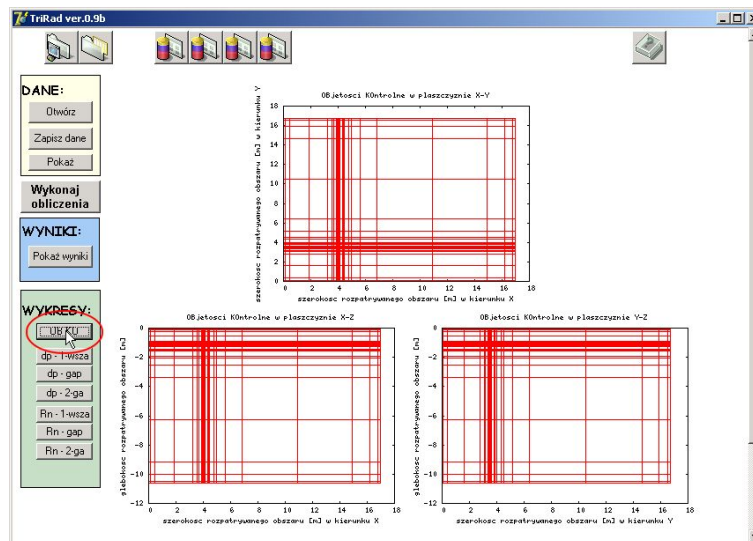
Po wykonaniu obliczeń można przejść do prezentacji wyników (rys. 10-6):



Rys. 10-6. Ekran "Pokaż wyniki"

W obecnej wersji programu oznaczonej wersją 1.1, dostępne są następujące wykresy:

- elementy kontrolne w płaszczyznach X-Y, X-Z oraz Y-Z (rysunek 10-7);
- rozkład ciśnienia w gruncie, w pierwszej warstwie pionowej;
- rozkład ciśnienia w gruncie, w drugiej warstwie pionowej;
- rozkład stężenia radonu w gruncie, w pierwszej warstwie pionowej;
- rozkład stężenia radonu w gruncie, w drugiej warstwie pionowej.



Rys. 10-7. Ekran przedstawiający elementy kontrolne w 3 płaszczyznach

Rysunek 10-7 przedstawia przykładowy zrzut ekranu obliczonych "elementów kontrolnych" w trzech płaszczyznach.

### **10.6. Parametry wejściowe do programu**

W tabeli 10-1 przedstawione zostały opisy danych wejściowych do programu TRIRAD. Dane te zostały podzielone na sekcje danych dotyczących:

- budynku (jego wielkości, szerokości ścian, grubości podłogi)
- wielkości rozpatrywanego budynku
- parametrów fizycznych budynku (różnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem i otoczeniem, współczynnik wentylacji, materiałów)
- ilości węzłów w rozpatrywanym obszarze (do podziału obszaru na elementy kontrolne ElKo)
- parametrów fizycznych gruntu wokół budynku
- parametrów sterujących

Parametry zaznaczone pogrubieniem są wartościami zmierzonymi przez autora, natomiast pozostałe zostały dobrane na podstawie dostępnych danych literaturowych lub zostały przyjęte na podstawie dostępnych planów architektonicznych dla poszczególnych budynków.

Wymiary bloku gruntu dobrane zostały tak, aby wpływ ciśnienia zaburzonego na transport radonu w gruncie był zaniedbywany w odległości maksymalnej od szczeliny.

Tab. 10-1. Dane wejściowe do programu TRIRAD

<b>Parametr</b>	<b>Jednostka</b>	<b>Opis parametru</b>
<i>XL1</i>	- [m]	rozmiar pomieszczenia w kierunku X
<i>XL2</i>	- [m]	rozmiar szczeliny w kierunku X
<i>XL3</i>	- [m]	szerokość ściany w kierunku X
<i>XL5</i>	- [m]	wielkość całego rozpatrywanego obszaru w kierunku X
<i>xlag</i>	- [m]	szerokość obszaru wymieszania w kierunku X
<i>YL1</i>	- [m]	rozmiar pomieszczenia w kierunku Y
<i>YL2</i>	- [m]	rozmiar szczeliny w kierunku Y
<i>YL3</i>	- [m]	szerokość ściany w kierunku Y
<i>YL5</i>	- [m]	wielkość całego rozpatrywanego obszaru w kierunku Y
<i>ylag</i>	- [m]	szerokość obszaru wymieszania w kierunku Y
<i>ZL1</i>	- [m]	wysokość piwnicy - od dna do powierzchni gruntu w kierunku Z
<i>ZL3</i>	- [m]	grubość podłogi w piwnicy
<i>ZL5</i>	- [m]	wysokość rozpatrywanego obszaru od powierzchni do dna obszaru
<i>zlag</i>	- [m]	wysokość obszaru wymieszania w kierunku Z
<i>height</i>	- [m]	wysokość domu
<i>deltap</i>	- [Pa]	różnica ciśnień
<i>venti</i>	- [1/s]	współczynnik wentylacji w domu
<i>nx1</i>	-	liczba węzłów pod piwnicą w kierunku X
<i>nx2</i>	-	liczba węzłów pod szczeliną w kierunku X
<i>nx3</i>	-	liczba węzłów pod pionową ścianą w kierunku X
<i>nx4</i>	-	liczba węzłów poza obszarem wymieszania w kierunku X
<i>nxag</i>	-	liczba węzłów w obszarze wymieszania w kierunku X
<i>ny1</i>	-	liczba węzłów pod piwnicą w kierunku Y
<i>ny2</i>	-	liczba węzłów pod szczeliną w kierunku Y
<i>nyag</i>	-	liczba węzłów pod pionową ścianą w kierunku Y
<i>nz1</i>	-	liczba węzłów powyżej piwnicy w kierunku Z
<i>nz2</i>	-	liczba węzłów pod obszarem wymieszania w kierunku Z
<i>nzag</i>	-	liczba węzłów w obszarze wymieszania w kierunku Z
<i>perm0</i>	- [m <sup>2</sup> ]	charakterystyczna przepuszczalność gruntu
<i>perm1</i>	- [m <sup>2</sup> ]	przepuszczalność gruntu poza obszarem wymieszania
<i>permx</i>	- [m <sup>2</sup> ]	przepuszczalność gruntu w kierunku X w obszarze wymieszania
<i>permy</i>	- [m <sup>2</sup> ]	przepuszczalność gruntu w kierunku Y w obszarze wymieszania
<i>permz</i>	- [m <sup>2</sup> ]	przepuszczalność gruntu w kierunku Z w obszarze wymieszania
<i>radons0</i>	- [Bq/m <sup>3</sup> ]	Charakterystyczna wartość stężenia radonu w gruncie zmierzona przy użyciu AlphaGUARD
<i>radons1</i>	- [Bq/m <sup>3</sup> ]	zmierzone AG stężenie radonu w gruncie poza obszarem wymieszania
<i>radonsX</i>	- [Bq/m <sup>3</sup> ]	zmierzone AG stężenie radonu w gruncie w obszarze wymieszania w kierunku X
<i>radonsY</i>	- [Bq/m <sup>3</sup> ]	zmierzone AG stężenie radonu w gruncie w obszarze wymieszania w kierunku Y
<i>radonsZ</i>	- [Bq/m <sup>3</sup> ]	zmierzone AG stężenie radonu w gruncie w obszarze wymieszania w kierunku Z
<i>emana0</i>	-	charakterystyczna wartość współczynnika emanacji radonu
<i>emana1</i>	-	współczynnik emanacji radonu poza obszarem wymieszania
<i>emanaX</i>	-	współczynnik emanacji radonu w obszarze wymieszania w kierunku X

<b>Parametr</b>	<b>Jednostka</b>	<b>Opis parametru</b>
<i>emanaY</i>	-	współczynnik emanacji radonu w obszarze wymieszania w kierunku Y
<i>emanaZ</i>	-	współczynnik emanacji radonu w obszarze wymieszania w kierunku Z
<i>poros0</i>	-	charakterystyczna wartość porowatości gruntu
<i>poros1</i>	-	porowatość gruntu poza obszarem wymieszania
<i>porosX</i>	-	porowatość gruntu w obszarze wymieszania w kierunku X
<i>porosY</i>	-	porowatość gruntu w obszarze wymieszania w kierunku Y
<i>porosZ</i>	-	porowatość gruntu w obszarze wymieszania w kierunku Z
<i>radiu0</i>	- [Bq/kg]	charakterystyczna wartość stężenia Ra-226 w gruncie
<i>radiu1</i>	- [Bq/kg]	stężenie Ra-226 poza obszarem wymieszania
<i>radiuX</i>	- [Bq/kg]	stężenie Ra-226 w obszarze wymieszania w kierunku X
<i>radiuY</i>	- [Bq/kg]	stężenie Ra-226 w obszarze wymieszania w kierunku Y
<i>radiuZ</i>	- [Bq/kg]	stężenie Ra-226 w obszarze wymieszania w kierunku Z
<i>densi0</i>	- [kg/m <sup>3</sup> ]	charakterystyczna wartość gęstości gruntu
<i>densi1</i>	- [kg/m <sup>3</sup> ]	gęstość gruntu poza obszarem wymieszania
<i>densiX</i>	- [kg/m <sup>3</sup> ]	gęstość gruntu w obszarze wymieszania w kierunku X
<i>densiY</i>	- [kg/m <sup>3</sup> ]	gęstość gruntu w obszarze wymieszania w kierunku Y
<i>densiZ</i>	- [kg/m <sup>3</sup> ]	gęstość gruntu w obszarze wymieszania w kierunku Z
<i>dfair1</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	współczynnik dyfuzji radonu w otwartym powietrzu
<i>dfair2</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	rozszerzony współczynnik dyfuzji radonu w powietrzu
<i>diffu1</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	współczynnik dyfuzji radonu w gruncie poza obszarem wymieszania
<i>diffuX</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	współczynnik dyfuzji radonu w gruncie w obszarze wymieszania w kierunku X
<i>diffuY</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	współczynnik dyfuzji radonu w gruncie w obszarze wymieszania w kierunku Y
<i>diffuZ</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	współczynnik dyfuzji radonu w gruncie w obszarze wymieszania w kierunku Z
<i>visco</i>	- [kg/ms]	dynamiczna lepkość powietrza
<i>diff0</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	dyfuzja radonu w gruncie
<i>rnlamb</i>	- [1/s]	stała rozpadu radonu Rn-222
<i>tol</i>	-	kryterium tolerancji
<i>iter</i>	-	aktualna iteracja
<i>itemax</i>	-	maksymalna liczba iteracji
<i>radiuB</i>	- [Bq/kg]	charakterystyczna wartość stężenia Ra-226 w elementach budowlanych
<i>emanaB</i>	-	charakterystyczna wartość współczynnika emanacji radonu
<i>porosW</i>	-	charakterystyczna wartość porowatości ścian
<i>porosF</i>	-	charakterystyczna wartość porowatości podłogi
<i>diffuW</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	współczynnik dyfuzji radonu w ścianach
<i>diffuF</i>	- [m <sup>2</sup> /s]	współczynnik dyfuzji radonu w podłodze
<i>densiB</i>	- [kg/m <sup>3</sup> ]	gęstość materiałów budowlanych

## 11. Analiza porównawcza wartości zmierzonych i obliczonych

W rozdziale tym, do oceny poprawności modelu transportu radonu TRIRAD i możliwości jego zastosowania autor przeprowadził analizę porównawczą z modelem Masonry House of UNSCEAR. Następnie, używając danych z rozdziału 8, przedstawił wyniki modelowania programem TRIRAD stężenia radonu w budynkach, które zostały następnie porównane z danymi doświadczalnymi.

### 11.1. Ocena poprawności modelu

Do oceny poprawności modelu autor posłużył się jego porównaniem z modelem prezentowanym przez UNSCEAR (Masonry House of UNSCEAR). Ten uogólniony model został opracowany na podstawie badań nad transportem radonu prowadzonym przez wiele grup badawczych. Służy on do opisu i obliczeń efektów, wśród których możemy znaleźć dyfuzję i konwekcję radonu, emanację radonu z wody i jego ekshalację z materiałów budowlanych [UNS00].

W tabeli 11-1 porównane są oba modele poprzez podanie obliczanych źródeł radonu w budynku.

Tab. 11-1. Porównanie modeli UNSCEAR i TRIRAD

Źródło radonu		Model	
		UNSCEAR	TRIRAD
grunt	Dyfuzja przez szczeliny	+	+
	Dyfuzja przez podłogę	+	-
	Adwekcja	+	+
Mat. budowlane	Dyfuzja ze ścian	+	+
	Dyfuzja z podłogi	+	+
Otoczenie	Infiltracja	+	-
Woda zasilające	de-emanacja	+	-
Gaz	Konsumpcja	+	-

Z tabeli 11-1 wynika, że oba modele różnią się. W modelu UNSCEAR został uwzględniony oprócz dyfuzji i konwekcji radonu przez szczeliny oraz radonu z materiałów budowlanych, także transport radonu przez podłogę poprzez dyfuzję, stężenie radonu na zewnątrz budynku, radon z de-emanacji z wody oraz radon z użytkowania gazu ziemnego. W TRIRAD przyczynki pochodzące z otoczenia, wody i gazu są zaniedbane, ze względu na ich niewielki wkład w całość stężenia wewnątrz budynku, bowiem jak podano w rozdziale 3 około



86–90 % radonu pochodzi z podłoża, 2–5 % z materiałów budowlanych a poniżej, 1% od wody.

Jako dane wejściowe do programu TRIRAD zostały użyte wartości podane przez UNSCEAR przedstawione w tabeli 11-2 [UNS00].

Tab. 11-2. Dane wejściowe do modeli opracowanie na podstawie UNSCEAR 2000

<i>Parametr</i>	<i>Oznaczenie</i>	<i>Wartość</i>
<b>Parametry domu</b>		
<i>Objętość budynku</i>	-	$250 \text{ m}^3$
<i>Powierzchnia podłogi</i>	-	$100 \text{ m}^2$
<i>Długość szczeliny</i>	-	$40 \text{ m}$
<i>Szerokość szczeliny</i>	-	$3 \text{ mm}$
<i>Całkowita powierzchnia ścian</i>	-	$450 \text{ m}^2$
<i>Współczynnik wentylacji</i>	-	$1 \text{ h}^{-1}$
<b>Parametry gruntu</b>		
<i>Stężenie <math>^{226}\text{Ra}</math></i>	$C_{Ra}$	$50 \text{ Bq kg}^{-1}$
<i>Współczynnik emanacji</i>	$f$	$0.2$
<i>Porowatość</i>	$\epsilon$	$0.25$
<i>Wilgotność</i>	$m$	$0.2$
<i>Efektywny współczynnik dyfuzji</i>	$D_e$	$2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
<i>Całkowity współczynnik dyfuzji</i>	$D$	$5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
<i>Gęstość</i>	$\rho$	$1 \text{ 600 kg m}^{-3}$
<i>Przepuszczalność</i>	$k$	$2,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$
<i>Grubość obszaru wymieszania</i>	-	$0.15 \text{ m}$
<i>Przepuszczalność w obszarze wymieszania</i>	-	$5,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$
<b>Parametry materiałów budowlanych</b>		
<i>Grubość podłogi</i>	-	$0.1 \text{ m}$
<i>Grubość ścian</i>	-	$0.2 \text{ m}$
<i>Stężenie <math>^{226}\text{Ra}</math></i>	$C_{Ra}$	$50 \text{ Bq kg}^{-1}$
<i>Współczynnik emanacji</i>	$f$	$0.1$
<i>Porowatość ścian</i>	$\epsilon$	$0.15$
<i>Porowatość podłogi</i>	-	$0.20$
<i>Efektywny współczynnik dyfuzji ścian</i>	$D_e$	$7,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
<i>Efektywny współczynnik dyfuzji podłogi</i>	-	$1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
<i>Gęstość</i>	$\rho$	$1 \text{ 600 kg m}^{-3}$

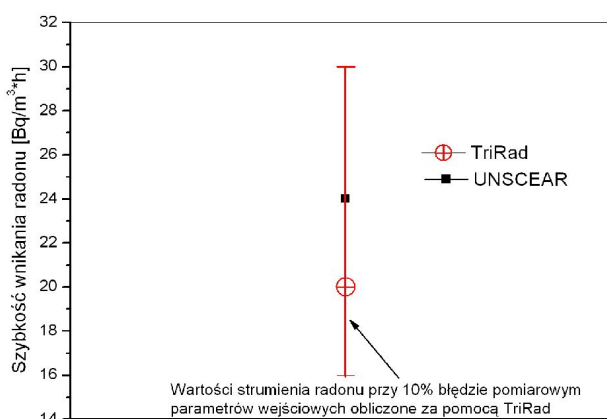
Porównanie obejmuje tylko wartości szybkości wnikania radonu do budynku, który pochodzi z gruntu i materiałów budowlanych (tabela 11-3).

Tab. 11-3. Porównanie obliczeń szybkości wnikania radonu dla modeli UNSCEAR oraz TRIRAD

Nazwa [-]	Obliczona szybkość wnikania radonu do budynku [Bq/m <sup>3</sup> ·h]	
	Radon z gruntu	Radon z gruntu i materiałów budowlanych
TRIRAD	20	31
UNSCEAR	24	35

Z tabeli 11-3 wynika, że różnica pomiędzy otrzymanymi wartościami w przypadku strumienia radonu z gruntu wynosi 20 %, z materiałów budowlanych wynosi 0 %, natomiast przy całkowitym strumieniu różnica wynosi 13 %. Wydaje się więc, że model oraz program TRIRAD jest poprawny i uzyskane wyniki modelowania będą wiarygodne.

Dodatkowym kryterium oceny poprawności modelu było wykonanie przez autora obliczeń modelowych przy założeniu 10 % błędu pomiarowego zmierzonych parametrów takich jak: stężenie radonu w gruncie, przepuszczalność, wilgotność, stężenie radu w gruncie, porowatość, gęstość gruntu, czyli tych parametrów, które autor mierzy bezpośrednio. Obliczenia te prowadzono przy zmianie o 10 % każdego w tych parametrów oraz wszystkich razem. Otrzymano minimalną wartość strumienia radonu na poziomie 16 [Bq/m<sup>3</sup>·h], a wartość maksymalną 30 [Bq/m<sup>3</sup>·h]. W wynikach obliczeń pominięto wpływ udziału radonu z materiałów budowlanych, ponieważ autor nie prowadził badań w tym zakresie. Szybkość wnikania radonu do budynku z gruntu modelu UNSCEAR ( wynoszący 24 Bq/m<sup>3</sup>·h) zawiera się w tych granicach (rysunek 11-1).

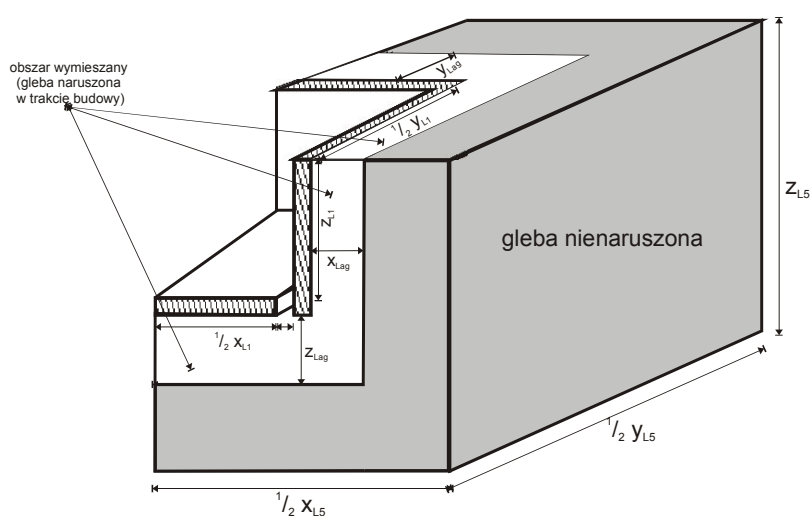


Rys. 11-1. Porównanie modeli UNSCEAR i TRIRAD

## 11.2. Obliczenia modelowe

Zmierzone parametry gruntu i budynku zostały zapisane w formacie umożliwiającym wykonanie obliczeń za pomocą programu TRIRAD.

W założeniach modelu mamy jego symetrię. W celu zbadania przestrzennego rozkładu ciśnień oraz radonu w gruncie przyjęto inne od Loureiro podejście. Cały obszar gruntu został podzielony na 4 symetryczne ćwiartki (rys. 11-2). Modelowanie odbywa się dla każdej z nich osobno, jednakże przyjęto, że każda ćwiartka modeluje cały obszar, tzn. w wyniku modelowania otrzymujemy stężenie radonu w całym budynku. Takie właśnie podejście pozwoli na zbadanie wpływu zmienności parametrów gruntu na stężenie radonu w budynku.



Rys. 11-2. Geometria 1/4 budynku z naniesionymi wymiarami użytymi do obliczeń

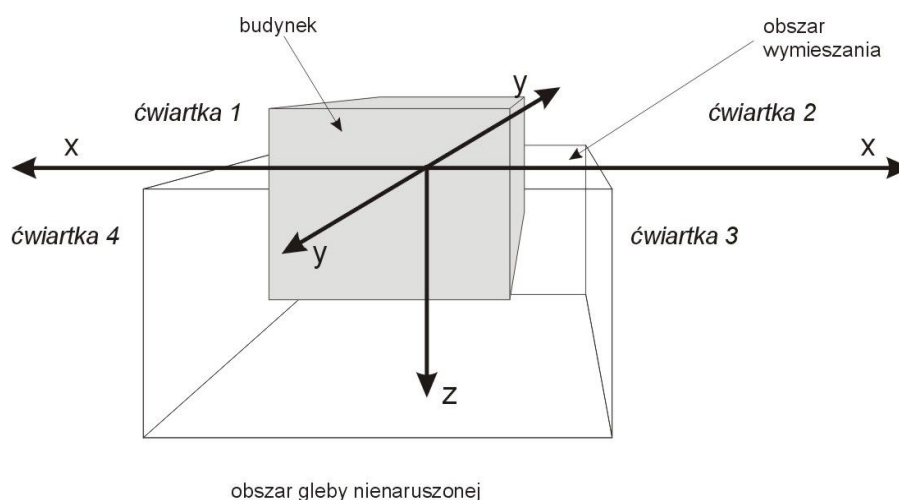
Rozróżniamy dwa obszary gruntu: 1) obszar, który został naruszony w trakcie budowy domu i na jego strukturę składa się gruz budowlany wymieszany z gruntem pierwotnym, i jest to tzw. „obszar wymieszania”, znajdujący się zaraz przy budynku oraz pod nim, oraz 2) obszar gruntu nienaruszonego. Oba te obszary mają zdefiniowaną swoją gęstość, przepuszczalność, porowatość, stężenie  $^{226}\text{Ra}$ , stężenie  $^{222}\text{Rn}$  oraz emanację. Przyjmujemy, że w zdefiniowanym obszarze wartości te są stałe i izotropowe, ale zmieniają się w zależności od ćwiartki.

Po wykonaniu obliczeń otrzymano wyniki obliczeń oraz rozkłady ciśnienia i stężenia radonu w gruncie. Na stronach od 109 do 118 zamieszczone są rysunki (13-1 - 13-15), przedstawiające rozkłady dla całego rozpatrywanego obszaru dla wszystkich pięciu budynków. W przypadku rozkładu ciśnienia izolinie reprezentują wartości ciśnienia znormalizowane do wartości podciśnienia panującego w budynku. Dla rozkładu stężenia radonu izolinie reprezentują wartości stężenia radonu w gruncie znormalizowane do maksymalnej wartości stężenia radonu w gruncie dla największej głębokości.

W programie TRIRAD istnieje możliwość zdefiniowania parametrów gruntu dla wszystkich trzech osi, w kierunku X, Y oraz Z w obszarze wymieszania (czyli w obszarze najbardziej zaburzonym w trakcie budowy domu) a także dla obszaru poza nim.

### 11.3. Analiza wyników

Obliczenia modelowe programem TRIRAD wykonane są dla każdej ćwiartki zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 11-3.



Rys. 11-3. Schemat obliczeń modelowych do badania zmienności przestrzennych

Analiza wyników opiera się na porównaniu wartości obliczonych i zmierzonych. W tabelach z rezultatami podane jest rozróżnienie ilości radonu pochodzącego z gruntu i materiałów budowlanych, z których dany budynek został wykonany. Dane wejściowe do obliczeń programem TRIRAD dla materiałów budowlanych przyjęto w oparciu o dostępne dane literaturowe - [Zak93, Bog94].

### 11.4. Budynek B1

W poniższych tabelach zebrano najważniejsze parametry rozpatrywanego obszaru, budynku, gruntu oraz materiałów budowlanych, wchodzących jako parametry wejściowe do programu TRIRAD dla budynku B1. Podane są wartości przyjęte do obliczeń w obszarze wymieszania, w kierunkach X, Y oraz Z, jak również poza nim.

Tab. 11-4. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B1

Parametr	jednostka	Wartość w kierunku		
		X	Y	Z
rozmiar pomieszczenia	m	4	4	-
rozmiar szczeliny	m	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	-
grubość ściany	m	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	-
wielkość całego obszaru	m	30	30	-
wielkość obszaru wymieszania	m	0,5	0,5	0,5
wysokość piwnicy - od podłogi do powierzchni gruntu	m	-	-	0,8
grubość podłogi w piwnicy	m	-	-	0,3
wysokość rozpatrywanego obszaru od powierzchni do dna obszaru	m	-	-	10
wysokość pomieszczenia	m	-	-	1,7

Tab. 11-5. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	9,96E-14	4,33E-14	4,55E-14	1,01E-13
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	55,5	4,33	34,6	30,5
Wilgotność gruntu	-	0,24	0,25	0,22	0,23
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	26,3	27,9	28,0	26,6
Porowatość gruntu	[-]	0,25	0,25	0,25	0,24
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	2,00	1,95	1,99	2,02

Tab. 11-6. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	4,57E-14	4,33E-14	2,28E-14	3,89E-13
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	0,18	43,3	0,17	50,7
Wilgotność gruntu	-	0,24	0,24	0,24	0,24
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	25,5	27,9	28,7	27,1
Porowatość gruntu	[-]	0,25	0,25	0,25	0,24
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	2,00	1,95	1,99	2,02

Tab. 11-7. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	m <sup>2</sup>	4,57E-14	4,48E-14	4,56E-14	2,09E-13
Rn-222 w gruncie	kBq/m <sup>3</sup>	0,52	0,25	1,03	27,5
Wilgotność gruntu	-	0,24	0,24	0,23	0,26
Ra-226 w gruncie	Bq/kg	25,5	23,3	32,7	31,2
Porowatość gruntu	[-]	0,25	0,25	0,25	0,24
Gęstość gruntu	kg/dm <sup>3</sup>	2,00	1,95	1,99	2,02

Tab. 11-8. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	m <sup>2</sup>	9,96E-14	4,48E-14	4,56E-14	1,02E-13
Rn-222 w gruncie	kBq/m <sup>3</sup>	55,5	0,25	1,88	20,4
Wilgotność gruntu	-	0,25	0,24	0,26	0,23
Ra-226 w gruncie	Bq/kg	26,3	23,3	32,2	32,3
Porowatość gruntu	[-]	0,25	0,25	0,25	0,24
Gęstość gruntu	kg/dm <sup>3</sup>	2,00	1,95	1,99	2,02

Używając jako parametrów wejściowych do programu TRIRAD danych dla każdej ćwiartki zebranych w tabelach 10-1 do 10-4, autor otrzymał następujące wyniki dla modelowania budynku B1.

Tab. 11-9. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B1

Ćwiartka	Udział Rn z gruntu [Bq/m <sup>3</sup> ]	Udział Rn z mat. bud [Bq/m <sup>3</sup> ]	Rn całkowity [Bq/m <sup>3</sup> ]	Udział Rn gruntu [%]
1	71	6,4	78	91,8
2	73	6,4	79	91,9
3	83	6,5	90	92,7
4	86	6,4	93	93,1
<b>średnia</b>	<b>78</b>	<b>6,4</b>	<b>85</b>	<b>92,4</b>
$\sigma$	7	0,1	7	0,6

Jak widać z tabeli 11-9 przy zmianie parametrów wejściowych do programu zmieniają się wartości uzyskiwanych za pomocą modelowania stężeń radonu w budynku. Zakres obliczonych stężeń wynosi od 71 do 86 Bq/m<sup>3</sup>. Różnica pomiędzy wartością maksymalną a minimalną wynosi ok. 20 %. Średnia ze wszystkich ćwiartek to  $78 \pm 7$  Bq/m<sup>3</sup>. W ostatniej kolumnie podano procentowy udział radonu w budynku pochodzący z gruntu, który dla tego budynku jest rzędu 92 %. Wartości obliczonych stężeń zostaną porównane z rzeczywistymi danymi pomiarowymi, co przedstawione jest w tabeli 11-34.

Jako rezultat modelowania otrzymujemy również graficzną prezentację wyników w postaci rozkładów ciśnienia i stężenia radonu w gruncie. Możemy również zweryfikować wielkości elementów kontrolnych. W przypadku budynku B1 rozkłady ciśnień w gruncie przedstawione są na rysunku 13-2 (str. 110). W przypadku rozkładu radonu widać obniżanie się stężenia radonu w gruncie, gdy zbliżamy się do szczeliny. W odległości od ok. 6 metrów od domu wartość stężenia radonu nie powinna się zmieniać.

## 11.5. Budynek B2

Tak jak przy obliczeniach dla budynku B1, także w tym przypadku pokazano w tabelach od 11-10 do 11-14 dane wejściowe do programu TRIRAD dla budynku B2.

Tab. 11-10. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B2

Parametr	jednostka	Wartość w kierunku		
		X	Y	Z
rozmiar pomieszczenia	m	4	3,9	-
rozmiar szczeliny	m	$8 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	-
grubość ściany	m	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	-
wielkość całego obszaru	m	30	30	-
wielkość obszaru wymieszania	m	0,5	0,5	0,5
wysokość piwnicy - od podłogi do powierzchni gruntu	m	-	-	0,3
grubość podłogi w piwnicy	m	-	-	0,1
wysokość rozpatrywanego obszaru od powierzchni do dna obszaru	m	-	-	10
wysokość pomieszczenia	m			2

Tab. 11-11. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$1,08E-11$	$5,17E-11$	$1,85E-11$	$3,52E-11$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	45,0	24,0	12,6	38,4
Wilgotność gruntu	-	0,25	0,21	0,24	0,20
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	32,3	28,8	38,8	34,1
Porowatość gruntu	[-]	0,25	0,25	0,25	0,25
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	1,60	1,60	1,60	1,60

Tab. 11-12. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$1,25E-11$	$5,17E-11$	$1,12E-11$	$2,08E-11$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	29,3	24,0	33,9	26,6
Wilgotność gruntu	-	0,24	0,24	0,24	0,24
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	32,4	28,8	44,3	35,7
Porowatość gruntu	[-]	0,25	0,25	0,25	0,25
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	1,60	1,60	1,60	1,60

Tab. 11-13. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$1,25E-11$	$1,85E-11$	$9,39E-11$	$7,73E-12$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	29,3	23,3	37,0	28,5
Wilgotność gruntu	-	0,24	0,24	0,23	0,26
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	32,4	32,5	26,6	26,1
Porowatość gruntu	[-]	0,25	0,25	0,25	0,25
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	1,60	1,60	1,60	1,60



Tab. 11-14. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4

<i>Parametr</i>	<i>jednostka</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>poza</i>
<i>Przepuszczalność</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>1,08E-11</i>	<i>1,85E-11</i>	<i>9,39E-12</i>	<i>2,26E-11</i>
<i>Rn-222 w gruncie</i>	<i>kBq/m<sup>3</sup></i>	<i>45,0</i>	<i>23,3</i>	<i>19,5</i>	<i>40,1</i>
<i>Wilgotność gruntu</i>	<i>-</i>	<i>0,25</i>	<i>0,24</i>	<i>0,26</i>	<i>0,23</i>
<i>Ra-226 w gruncie</i>	<i>Bq/kg</i>	<i>32,4</i>	<i>33,5</i>	<i>37,1</i>	<i>23,8</i>
<i>Porowatość gruntu</i>	<i>[-]</i>	<i>0,25</i>	<i>0,25</i>	<i>0,25</i>	<i>0,25</i>
<i>Gęstość gruntu</i>	<i>kg/dm<sup>3</sup></i>	<i>1,60</i>	<i>1,60</i>	<i>1,60</i>	<i>1,60</i>

Tabela 11-15 zawiera obliczone stężenie radonu wewnątrz budynku B2. W tym przypadku różnice pomiędzy wartością minimalną (87 Bq/m<sup>3</sup>) a maksymalną (176 Bq/m<sup>3</sup>) sięga 100 %. Wpływ na to może mieć zarówno przepuszczalność, zmieniająca się w zakresie od 7,73·10<sup>-12</sup> do 5,17·10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup> oraz/lub stężenie radu w gruncie, którego stężenia są w zakresie od 23,8 do 44,3 Bq/kg. Średni udział radonu z gruntu w całkowitym stężeniu radonu w budynku wynosi 96 %.

Tab. 11-15. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B2

<i>Ćwiartka</i>	<i>Udział Rn z gruntu</i>	<i>Udział Rn z mat. bud</i>	<i>Rn całkowity</i>	<i>Udział Rn gruntu</i>
	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[%]</i>
<i>1</i>	<i>171</i>	<i>5,0</i>	<i>176</i>	<i>97,2</i>
<i>2</i>	<i>159</i>	<i>5,0</i>	<i>164</i>	<i>97,0</i>
<i>3</i>	<i>123</i>	<i>5,0</i>	<i>128</i>	<i>96,1</i>
<i>4</i>	<i>82</i>	<i>5,1</i>	<i>87</i>	<i>94,2</i>
<i>średnia</i>	<i>134</i>	<i>5,0</i>	<i>139</i>	<i>96,1</i>
<i>σ</i>	<i>40</i>	<i>0,1</i>	<i>40</i>	<i>1,4</i>

Rysunki 13-4 (str. 111) do 13-6 (str. 112) przedstawiają graficzne wyniki modelowania rozkładów ciśnienia i stężenia radonu w gruncie. W tym przypadku zaburzenie ciśnienia rozciąga się na cały rozpatrywany obszar. Rozkład stężenia radonu w gruncie jest rozkładem prawie poziomym, z niewielkimi zaburzeniami w okolicach szczeliny.

### 11.6. Budynek B3

Dla budynku B3 dane wejściowe do programu TRIRAD przedstawiono w tabelach od 11-16 do 11-20

Tab. 11-16. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B3

Parametr	jednostka	Wartość w kierunku		
		X	Y	Z
rozmiar pomieszczenia	m	3	2	-
rozmiar szczeliny	m	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	-
grubość ściany	m	$8 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$	-
wielkość całego obszaru	m	30	30	-
wielkość obszaru wymieszania	m	0,5	0,5	0,5
wysokość piwnicy - od podłogi do powierzchni gruntu	m	-	-	0,8
grubość podłogi w piwnicy	m	-	-	0,5
wysokość rozpatrywanego obszaru od powierzchni do dna obszaru	m	-	-	10
wysokość pomieszczenia	m			1,5

Tab. 11-17. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$1,88E-12$	$2,37E-12$	$1,61E-12$	$1,23E-12$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	45,6	72,9	1,29	14,4
Wilgotność gruntu	-	0,20	0,20	0,20	0,20
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	16,6	28,5	8,35	34,6
Porowatość gruntu	[-]	0,35	0,29	0,33	0,26
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	1,63	1,79	1,80	1,89

Tab. 11-18. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$1,88E-12$	$2,37E-12$	$1,61E-12$	$2,50E-13$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	45,6	72,9	1,29	25,1
Wilgotność gruntu	-	0,20	0,20	0,20	0,20
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	16,6	28,5	8,35	39,9
Porowatość gruntu	[-]	0,35	0,29	0,33	0,27
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	1,63	1,79	1,80	1,86

Tab. 11-19. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$2,61E-14$	$2,37E-12$	$2,13E-12$	$4,67E-13$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	0,39	72,9	2,64	13,4
Wilgotność gruntu	-	0,20	0,20	0,20	0,20
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	21,2	28,5	12,5	32,3
Porowatość gruntu	[-]	0,29	0,35	0,33	0,31
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	1,83	1,63	1,80	1,79

Tab. 11-20. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4

<i>Parametr</i>	<i>jednostka</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>poza</i>
<i>Przepuszczalność</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>2,61E-14</i>	<i>2,37E-14</i>	<i>2,13E-13</i>	<i>1,78E-12</i>
<i>Rn-222 w gruncie</i>	<i>kBq/m<sup>3</sup></i>	<i>0,38</i>	<i>72,9</i>	<i>2,64</i>	<i>2,70</i>
<i>Wilgotność gruntu</i>	<i>-</i>	<i>0,25</i>	<i>0,24</i>	<i>0,26</i>	<i>0,23</i>
<i>Ra-226 w gruncie</i>	<i>Bq/kg</i>	<i>21,2</i>	<i>28,5</i>	<i>12,5</i>	<i>26,0</i>
<i>Porowatość gruntu</i>	<i>[-]</i>	<i>0,29</i>	<i>0,35</i>	<i>0,33</i>	<i>0,27</i>
<i>Gęstość gruntu</i>	<i>kg/dm<sup>3</sup></i>	<i>1,83</i>	<i>1,63</i>	<i>1,80</i>	<i>1,89</i>

W tabeli 11-21 przedstawiono wyniki modelowania programem TRIRAD budynku B3. Uzyskano wartości w zakresie od 360 do 503 Bq/m<sup>3</sup>, przy wartości średniej 432 ± 59 Bq/m<sup>3</sup>. Różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną wynosi 40 %. Spowodowane to jest prawdopodobnie zmianami przepuszczalności w zakresie dwóch rzędów wielkości i stężeniem radonu w gruncie dochodzącym do 73 kBq/m<sup>3</sup>. Średni udział radonu pochodzącego z gruntu jest wysoki i sięga 98 %.

Tab. 11-21. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B3

<i>Ćwiartka</i>	<i>Udział Rn z gruntu</i>	<i>Udział Rn z mat. bud</i>	<i>Rn całkowity</i>	<i>Udział Rn gruntu</i>
	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[%]</i>
<i>1</i>	<i>419</i>	<i>6,0</i>	<i>425</i>	<i>98,6</i>
<i>2</i>	<i>352</i>	<i>8,0</i>	<i>360</i>	<i>97,8</i>
<i>3</i>	<i>434</i>	<i>7,0</i>	<i>441</i>	<i>98,4</i>
<i>4</i>	<i>495</i>	<i>8,0</i>	<i>503</i>	<i>98,4</i>
<i>średnia</i>	<i>425</i>	<i>7,3</i>	<i>432</i>	<i>98,3</i>
<i>σ</i>	<i>59</i>	<i>1,0</i>	<i>59</i>	<i>0,4</i>

Modelowanie rozkładów ciśnienia dla budynku B3 przedstawia rysunek 13-8 (str. 114). Rozkład stężenia radonu (rys. 13-9 str.114) jest prawie równomierny w całym obszarze.

## 11.7. Budynek B4

Tabele od 11-22 do 11-26 zawierają dane wejściowe dla budynku B4.

Tab. 11-22. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B4

Parametr	jednostka	Wartość w kierunku		
		X	Y	Z
rozmiar pomieszczenia	m	2	4	-
rozmiar szczeliny	m	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	-
grubość ściany	m	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	-
wielkość całego obszaru	m	30	30	-
wielkość obszaru wymieszania	m	0,2	0,2	0,5
wysokość piwnicy - od podłogi do powierzchni gruntu	m	-	-	1
grubość podłogi w piwnicy	m	-	-	0,2
wysokość rozpatrywanego obszaru od powierzchni do dna obszaru	m	-	-	10
wysokość pomieszczenia	m			3

Tab. 11-23. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	m <sup>2</sup>	9,29E-13	2,02E-12	2,18E-12	1,51E-12
Rn-222 w gruncie	kBq/m <sup>3</sup>	36,5	44,0	37,9	10,9
Wilgotność gruntu	-	0,13	0,12	0,12	0,14
Ra-226 w gruncie	Bq/kg	16,1	22,8	16,0	20,1
Porowatość gruntu	[-]	0,30	0,32	0,29	0,30
Gęstość gruntu	kg/dm <sup>3</sup>	2,14	2,10	2,18	2,12

Tab. 11-24. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	m <sup>2</sup>	9,29E-13	2,19E-13	1,61E-13	1,68E-12
Rn-222 w gruncie	kBq/m <sup>3</sup>	36,5	46,7	44,3	40,0
Wilgotność gruntu	-	0,13	0,14	0,10	0,13
Ra-226 w gruncie	Bq/kg	16,1	17,0	19,3	19,5
Porowatość gruntu	[-]	0,30	0,31	0,27	0,34
Gęstość gruntu	kg/dm <sup>3</sup>	2,14	2,12	2,19	2,11

Tab. 11-25. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3

Parametr	jednostka	X	Y	Z	poza
Przepuszczalność	m <sup>2</sup>	5,65E-13	2,19E-13	1,25E-12	1,19E-12
Rn-222 w gruncie	kBq/m <sup>3</sup>	30,6	46,7	35,8	27,4
Wilgotność gruntu	-	0,15	0,15	0,14	0,16
Ra-226 w gruncie	Bq/kg	24,5	17,0	19,4	19,5
Porowatość gruntu	[-]	0,30	0,31	0,31	0,36
Gęstość gruntu	kg/dm <sup>3</sup>	2,11	2,12	2,11	2,07

Tab. 11-26. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4

<i>Parametr</i>	<i>jednostka</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>poza</i>
<i>Przepuszczalność</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>5,65E-13</i>	<i>2,02E-12</i>	<i>1,82E-15</i>	<i>1,02E-12</i>
<i>Rn-222 w gruncie</i>	<i>kBq/m<sup>3</sup></i>	<i>30,6</i>	<i>44,0</i>	<i>31,5</i>	<i>18,3</i>
<i>Wilgotność gruntu</i>	<i>-</i>	<i>0,15</i>	<i>0,12</i>	<i>0,15</i>	<i>0,18</i>
<i>Ra-226 w gruncie</i>	<i>Bq/kg</i>	<i>24,5</i>	<i>22,8</i>	<i>17,2</i>	<i>20,7</i>
<i>Porowatość gruntu</i>	<i>[-]</i>	<i>0,30</i>	<i>0,32</i>	<i>0,030</i>	<i>0,34</i>
<i>Gęstość gruntu</i>	<i>kg/dm<sup>3</sup></i>	<i>2,11</i>	<i>2,10</i>	<i>2,13</i>	<i>2,08</i>

W wyniku obliczeń programem TRIRAD uzyskano wartości stężeń, które przedstawione są w tabeli 11-27. W tym przypadku zastanawia wysoki udział radonu pochodzącego z materiałów budowlanych, który sięga 50 % stężenia całkowitego. Spowodowane może to być tym, że do budowy tego domu użyto pustaka żuźlowego.

Tab. 11-27. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B4

<i>Ćwiartka</i>	<i>Udział Rn z gruntu</i>	<i>Udział Rn z mat. bud</i>	<i>Rn całkowity</i>	<i>Udział Rn gruntu</i>
	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[%]</i>
<i>1</i>	<i>39</i>	<i>38</i>	<i>77</i>	<i>54,5</i>
<i>2</i>	<i>49</i>	<i>38</i>	<i>87</i>	<i>56,3</i>
<i>3</i>	<i>26</i>	<i>38</i>	<i>64</i>	<i>40,5</i>
<i>4</i>	<i>36</i>	<i>38</i>	<i>73</i>	<i>48,4</i>
<i>średnia</i>	<i>37</i>	<i>37</i>	<i>75</i>	<i>49,9</i>
<i>σ</i>	<i>10</i>	<i>3</i>	<i>10</i>	<i>7,2</i>

Rysunki 13-10 (str. 115) do 13-12 (str. 116) pokazują zamodelowane rozkłady ciśnień oraz radonu w gruncie pod i wokół budynku B4.

## 11.8. Budynek B5

Dla budynku B5 dane wejściowe do TRIRAD zebrano w tabelach 11-28, 11-29, 11-30, 11-31 i 11-32.

Tab. 11-28. Wymiary budynku oraz całego obszaru dla budynku B5

Parametr	jednostka	Wartość w kierunku		
		X	Y	Z
rozmiar pomieszczenia	m	4	2,5	-
rozmiar szczeliny	m	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	-
grubość ściany	m	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	-
wielkość całego obszaru	m	30	30	-
wielkość obszaru wymieszania	m	0,35	0,35	0,5
wysokość piwnicy - od podłogi do powierzchni gruntu	m	-	-	0,3
grubość podłogi w piwnicy	m	-	-	0,5
wysokość rozpatrywanego obszaru od powierzchni do dna obszaru	m	-	-	10
wysokość pomieszczenia	m			2,8

Tab. 11-29. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 1

Parametr	jednostka	x	y	z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$1,68E-12$	$5,16E-14$	$2,39E-13$	$6,05E-13$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	17,3	0,33	36,5	22,5
Wilgotność gruntu	-	0,19	0,19	0,22	0,19
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	32,9	40,0	28,4	36,2
Porowatość gruntu	[-]	0,22	0,22	0,23	0,22
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	2,05	2,06	2,05	2,05

Tab. 11-30. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 2

Parametr	jednostka	x	y	z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$1,68E-12$	$1,50E-12$	$6,90E-14$	$9,10E-13$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	17,3	5,94	20,6	23,5
Wilgotność gruntu	-	0,19	0,18	0,23	0,17
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	32,9	38,1	39,8	38,4
Porowatość gruntu	[-]	0,22	0,22	0,21	0,21
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	2,05	2,01	2,05	2,05

Tab. 11-31. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 3

Parametr	jednostka	x	y	z	poza
Przepuszczalność	$m^2$	$4,81E-14$	$1,50E-12$	$1,26E-13$	$1,22E-12$
Rn-222 w gruncie	$kBq/m^3$	20,4	5,94	14,01	29,0
Wilgotność gruntu	-	0,15	0,18	0,22	0,18
Ra-226 w gruncie	$Bq/kg$	37,1	38,1	38,7	37,2
Porowatość gruntu	[-]	0,21	0,22	0,21	0,21
Gęstość gruntu	$kg/dm^3$	2,06	2,01	2,08	2,04

Tab. 11-32. Dane wejściowe TRIRAD dla ćwiartki 4

<i>Parametr</i>	<i>jednostka</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>poza</i>
<i>Przepuszczalność</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>4,81E-14</i>	<i>5,16E-14</i>	<i>2,11E-13</i>	<i>8,63E-13</i>
<i>Rn-222 w gruncie</i>	<i>kBq/m<sup>3</sup></i>	<i>20,4</i>	<i>0,33</i>	<i>32,1</i>	<i>26,7</i>
<i>Wilgotność gruntu</i>	<i>-</i>	<i>0,15</i>	<i>0,19</i>	<i>0,21</i>	<i>0,20</i>
<i>Ra-226 w gruncie</i>	<i>Bq/kg</i>	<i>37,1</i>	<i>40,0</i>	<i>38,0</i>	<i>35,0</i>
<i>Porowatość gruntu</i>	<i>[-]</i>	<i>0,21</i>	<i>0,22</i>	<i>0,22</i>	<i>0,22</i>
<i>Gęstość gruntu</i>	<i>kg/dm<sup>3</sup></i>	<i>2,06</i>	<i>2,06</i>	<i>2,08</i>	<i>2,04</i>

Wyniki modelowania przedstawione są w tabeli 11-33. W tym przypadku udział radonu z materiałów budowlanych nie przekracza 3 %. W pomieszczeniu gdzie prowadzony był pomiar ściany pokryte były tynkiem oraz farbą, więc przyjęty do obliczeń współczynnik emanacji radonu ze ścian był niewielki.

Tab. 11-33. Wyniki modelowania programem TRIRAD dla budynku B5

<i>Ćwiartka</i>	<i>Udział Rn z gruntu</i>	<i>Udział Rn z mat. bud</i>	<i>Rn całkowity</i>	<i>Udział Rn gruntu</i>
	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[Bq/m<sup>3</sup>]</i>	<i>[%]</i>
<i>1</i>	<i>442</i>	<i>5,0</i>	<i>447</i>	<i>98,9</i>
<i>2</i>	<i>319</i>	<i>5,0</i>	<i>324</i>	<i>98,5</i>
<i>3</i>	<i>448</i>	<i>5,0</i>	<i>453</i>	<i>98,9</i>
<i>4</i>	<i>393</i>	<i>6,0</i>	<i>399</i>	<i>98,5</i>
<i>średnia</i>	<i>401</i>	<i>5,3</i>	<i>406</i>	<i>98,7</i>
<i>σ</i>	<i>60</i>	<i>0,5</i>	<i>60</i>	<i>0,2</i>

Na rysunkach 13-14 i 13-15 przedstawione są rozkłady ciśnień i rozkłady radonu w gruncie dla całego obszaru. Dla budynku B5 rozkłady stężeń radonu są prawie poziome, za wyjątkiem obszaru wokół szczeliny. Przy szczelinie wartości ciśnienia kształtują się na poziomie 40 % ciśnienia panującego w budynku, natomiast w gruncie osiągają 2 % tego ciśnienia.

### 11.9. Porównanie wartości stężeń $^{222}\text{Rn}$ w budynkach obliczonych i zmierzonych

Wyniki obliczeń dla wszystkich budynków przedstawione są w tabeli 11-34. Na wartość stężenia radonu w budynku mają wpływ zróżnicowane przestrzennie parametry gruntu wokół niego.

Tab. 11-34. Porównanie wartości obliczonych i zmierzonych stężeń radonu w badanych budynkach

	Obliczone		Zmierzone		Błąd względny
Budynek	średnia dla budynku	odchylenie standardowe	średnia dla budynku	Błąd pomiaru*	
Symbol	$\text{Bq/m}^3$	$\text{Bq/m}^3$	$\text{Bq/m}^3$	$\text{Bq/m}^3$	%
B1	85	7	92	4	8
B2	139	40	160	6	15
B3	432	59	351	11	19
B4	75	10	83	5	11
B5	406	60	373	11	8

\*parametr odczytany ze wskazań komory jonizacyjnej AlphaGUARD.

Jak widać z powyższej tabeli różnica pomiędzy średnimi wartościami stężeń radonu obliczonymi i zmierzonymi nie przekracza 20%. Największe różnice występują w przypadku budynków B2 i B3.

W przypadku budynku B2 może to być spowodowane dwoma przyczynami: 1) ustalenie wielkości szczeliny, przez którą przepływa radon jest bardzo trudne ze względu na to, że na 40% powierzchni podłogi w piwnicy nie było betonowej wylewki; 2) część danych użytych jako parametry wejściowe do programu TRIRAD stanowią wartości literaturowe dla danego typu gruntu.

W przypadku budynku B3 ta prawie 19% różnica pomiędzy wartością zmierzoną i obliczoną może być spowodowana trudnymi warunkami pomiarowymi wokół budynku. Jak wspomniano w opisie budynku, pod warstwą mady o grubości ok. 1 – 1,5 m występowała warstwa nasyconego wodą piasku. Utrudniało to znacznie pomiary w kierunku Z dla obszaru wymieszania. Model zakłada jednorodność gruntu w danym obszarze, co w tym przypadku nie jest spełnione. W pozostałych przypadkach (dla budynków B1, B4 i B5) różnice nie przekraczają 11%, co można uważać za wynik bardzo dobry. W tych przypadkach nie zanotowano różnic w rodzaju gruntu przy pomiarach płytszych (1,0 m) oraz głębszych (1,5 m). Tak więc można przyjąć, że grunt jest izotropowy dla każdego z czterech wyróżnionych obszarów (X, Y, Z, poza obszarem wymieszania).



## 12. Podsumowanie i wnioski

---

Głównym celem rozprawy była weryfikacja ulepszonego modelu Loureiro, czyli prognozowanie przenikania radonu z gruntu do budynku z wykorzystaniem modelowania komputerowego. Zadanie to autor zrealizował w 2 etapach:

### **Etap 1 - Pomiary**

W celu przeprowadzenia modelowania komputerowego za pomocą programu TRIRAD autor zaplanował i wykonał eksperyment, celem którego było a) wyznaczenie parametrów gruntu wokół budynków (parametry te posłużyły jako dane wejściowe do programu TRIRAD); b) pomiar stężenia radonu wewnątrz budynków.

Konieczne było opracowanie metody pomiaru przepuszczalności *in-situ* z wykorzystaniem sondy gruntowej IFJ. Metoda ta pozwala na szybkie i prowadzone w terenie pomiary przepuszczalności gruntu. Został przez autora wyznaczony tzw. współczynnik kształtu sondy gruntowej - „ $W$ ”, zależny od prędkości przepływu  $v$  i dla sondy IFJ dany wzorem:

$W = W_0 + A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2}$  ; gdzie:  $W_0$ ,  $A_1$ ,  $t_1$ ,  $A_2$ ,  $t_2$  są parametrami zależnymi od kształtu sondy. Autor pokazał, że należy wziąć pod uwagę nie tylko różnicę ciśnień generowaną przez wymuszony przepływ, ale także prędkość tego przepływu. Uzyskane wyniki pokrywają się z danymi literaturowymi dla badanych przez autora rodzajów gruntu.

Kolejnym problemem pomiarowym rozwiązany przez autora było opracowanie metody poboru próbek gruntu o nienaruszonej strukturze z wykorzystaniem ciekłego azotu. Próbkę taką posłużyły do wyznaczenia porowatości gruntu, która jest parametrem wejściowym do programu TRIRAD. Na uzyskanych w ten sposób próbkach autor przeprowadził badania laboratoryjne stężenia radu w gruncie, wilgotności oraz wyznaczył jej gęstość właściwą i objętościową.

Autor wykonał również pomiary stężenia radonu w gruncie metodą z wykorzystaniem sondy gruntowej, której był współautorem.

W pobranych próbkach gruntu autor zmierzył stężenie radu z użyciem toru spektrometrycznego wyposażonego w detektor HpGe będącego na wyposażeniu Laboratorium Naturalnej Promieniotwórczości LPN PAN.

Dane te posłużyły jako parametry wejściowe do programu TRIRAD.

W celu oszacowania średniego stężenia radonu w budynkach autor, wykorzystując komorę jonizacyjną AlphaGUARD wykonał stosowne pomiary.

## **Etap 2 – Modelowanie**

W drugim etapie pracy, autor przeprowadził obliczenia modelowe dla pięciu wytypowanych, wg ustalonych założeń, budynków jednorodzinnych w obrębie Krakowa, o podwyższonym średnio-rocznym stężeniu radonu wewnątrz. Do modelowania został użyty program komputerowy TRIRAD, napisany przez autora w oparciu o algorytmy opracowane przez Loureiro.

Autor zastosował jednakże nowe podejście do zagadnienia uwzględniające zmienność przestrzenną parametrów gruntu w odróżnieniu od symetrycznego przestrzennie podejścia Loureiro. W tym celu został opracowany odpowiedni algorytm pozwalający na zbadanie osobno wpływu czterech ćwiartek przestrzeni gruntu wokół badanego budynku.

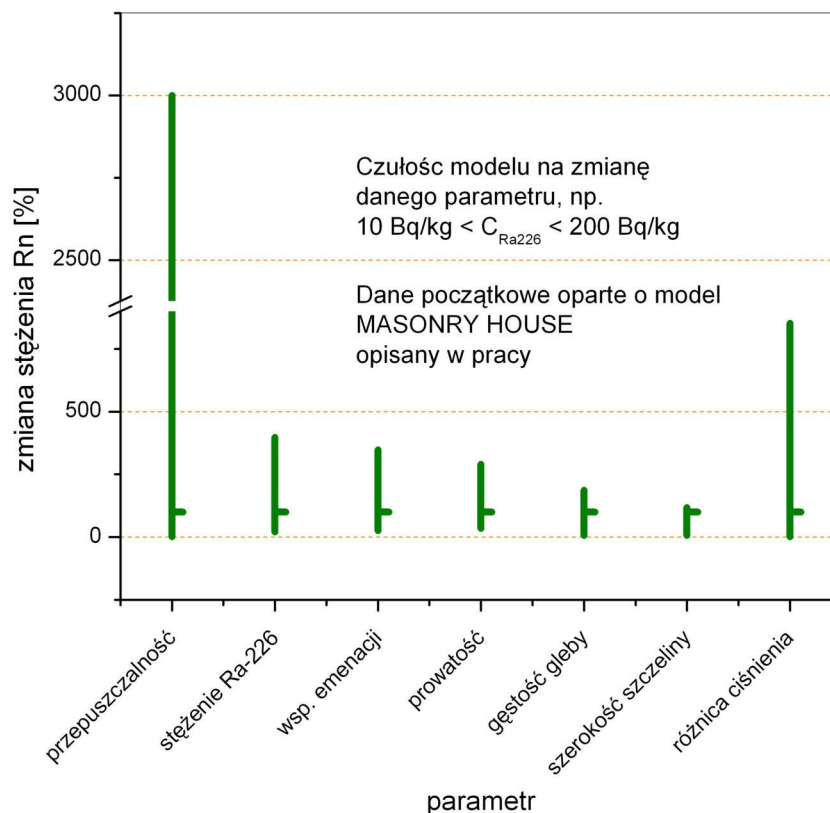
Całkowicie nowym elementem jest wprowadzenie modułów uwzględniających emanację radonu w materiałów budowlanych, z których wykonany jest budynek.

W przeciwieństwie do oryginału połączono dwa etapy obliczeń (rozkład ciśnień i strumień gazu gruntowego oraz rozwiązanie równania transportu) w jeden program. Autor opracował również wygodny graficzny interfejs użytkownika, służący do wprowadzania danych oraz graficznej prezentacji wyników (napisany w języku Delphi f-my Borland).

Porównanie wyników obliczeń i wartości zmierzonych pozwoliło na ocenę poprawności modelu. Wyniki modelowania i korelacja ich z pomiarami stężenia radonu wewnątrz budynku potwierdzają jego poprawność. Różnica w najlepszym przypadku wynosi 8%, natomiast w najgorszym nie przekracza 20%, co można uznać za wynik zadowalający.

Weryfikacja rozszerzonego modelu Loureiro polegała na porównaniu z modelem UNSCEAR. Pokazano że różnica obliczeń szybkości wnikania radonu osiąga dobrą zgodność, ponieważ nie przekracza 13%.

W celu oceny wpływu parametrów wejściowych na stężenie radonu w budynku wykonano obliczenia modelowe programem TRIRAD bazując na danych do modelu UNSCEAR. Zakres zmian poszczególnych parametrów opiera się na danych literaturowych i pomiarach własnych. Uzyskane wyniki pokazują, że największy wpływ na stężenie radonu wewnątrz budynku ma przepuszczalność gruntu (rys. 12-1), która była szeroko omawiana w pracy.



Rys. 12-1. Wpływ parametrów wejściowych na zmianę stężenia radonu wewnątrz budynku

Przesiewowe pomiary mające na celu wytypowanie budynków do modelowania pokazały, że w Krakowie na niektórych obszarach może istnieć „problem radonowy”. W wyniku badań prowadzonych przez LPN, którego autor jest współpracownikiem, otrzymano zakresy stężeń radonu w budynkach od 24 do 1200 Bq/m<sup>3</sup> [Bog98]. Tak wysokie wartości stężeń radonu mogą być wywołane przez usytuowanie budynków na obszarze spękań struktury geologicznej podłoża. Terenem o takiej strukturze jest południowo-wschodni obszar aglomeracji krakowskiej [Swa04].

Zgodnie z Zarządzeniem Prezesa PAA opublikowanym w Monitorze Polskim Nr 35 z 1995 r. tzw. poziom działania – powyżej którego powinno podjąć się działania zaradcze, ograniczające poziom stężenia radonu w budynku, wynosi dla budynków wybudowanych przed 1998 r. – 400 Bq/m<sup>3</sup>, natomiast dla budynków wybudowanych po 1998 r. – 200 Bq/m<sup>3</sup>. Niestety z dniem 31 grudnia 2002 roku utraciły moc obowiązującą wszystkie akty wykonawcze wydane na podstawie ustawy z dnia 10 kwietnia 1986 roku – Prawo Atomowe.

Reasumując, wyniki otrzymane przez autora wskazują, że używanie programu TRIRAD (wraz z opracowanymi przez autora metodami pomiarów terenowych do wyznaczania przepuszczalności i pobierania próbek gruntu o nienaruszonej strukturze do wyznaczania porowatości) jest dobrą metodą prognozowania stężeń radonu w nowo powstających budynkach. Polecana jest ona do stosowania ze względu na ochronę radiologiczną szczególnie na obszarach o dużym potencjale radonowym, czyli na obszarach spękań geologicznych struktury (np. w Krakowie Wola Justowska oraz rejon Kapelanki), jak również na obszarach o dużej zawartości uranu w podłożu np. rejon Sudetów, gdzie stwierdzono (badania LPN) występowanie bardzo wysokich stężeń radonu w budynkach sięgających 15 000 Bq/m<sup>3</sup>.

Wydaje się celowe zatem opracowanie procedur mających na celu oszacowanie tego zagrożenia:

Autor proponuje więc następujący schemat postępowania przed wybudowaniem budynku:

- wytypowanie obszaru pod budynek;
- przeprowadzenie około 5 badań gleby na każdy kwadrat o boku 10 x 10 m.;
- prowadzenie badań na 2 głębokościach – ok 1m oraz 1.5 lub 2m. w celu poznania zmienności przestrzennej właściwości gruntu;
- wykonanie w tych otworach badań przepuszczalności, porowatości i wilgotności;
- wykonanie badań spektrometrycznych (badanie stężenia Ra-226);
- pomiar stężenia Rn-222 i Rn-220 w gruncie;
- modelowanie programem TRIRAD na podstawie tych badań oraz projektu budynku.

Konieczne jest zapoznanie z metodami budowlanymi dotyczącymi badań ruchliwości gruntu – w celu oszacowania możliwości powstania szczelin i pęknięć w fundamentach.

Można też po przeprowadzeniu odpowiednio dużej ilości pomiarów w budynkach o podobnej konstrukcji założyć typową wielkość szczeliny.

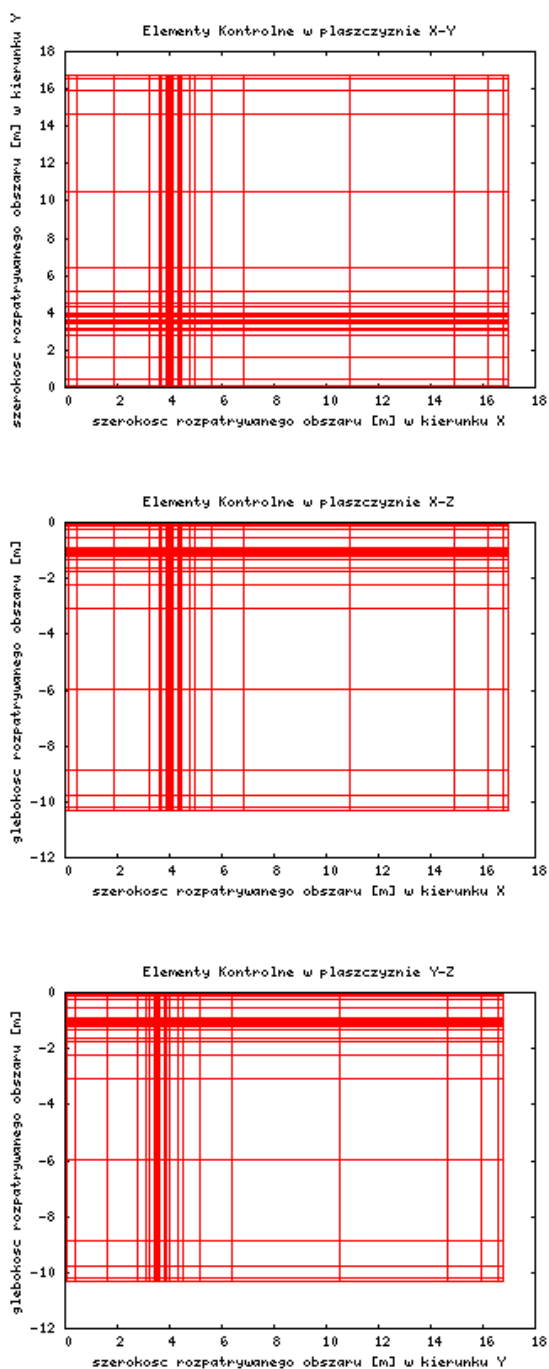
Jako wynik takiej ekspertyzy powinno się otrzymać wartość maksymalnego stężenia radonu w budynku przy uwzględnieniu tych parametrów oraz wieku budynku (przewidując powstawanie pęknięć a co za tym idzie większy strumień radonu do budynku).

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2003-2005 jako projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Informatyzacji nr ST 12B 06525.*

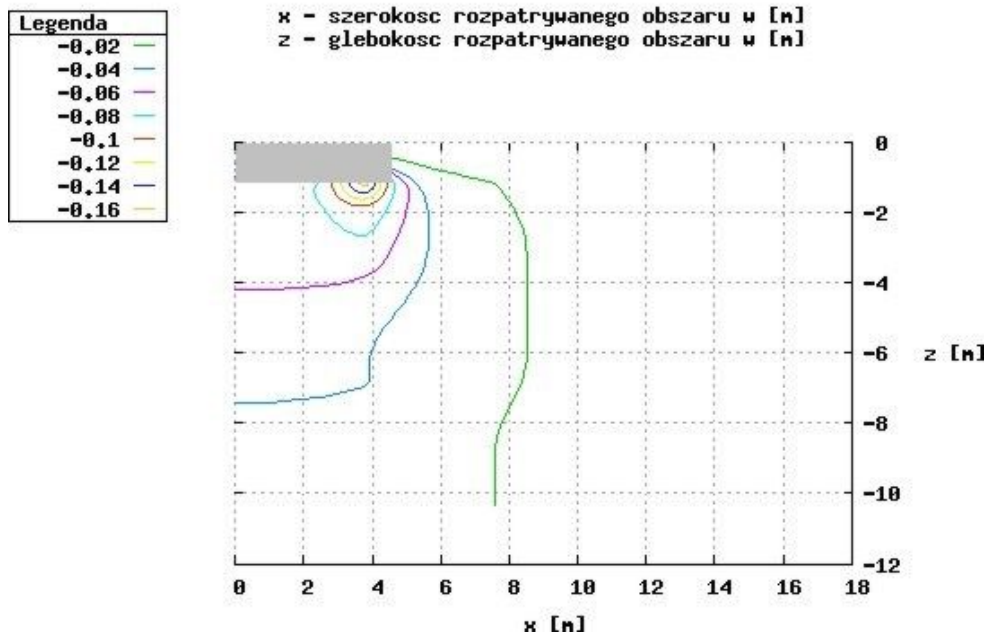
## 13. Graficzna prezentacja wyników obliczeń programem TRIRAD

### 13.1. Budynek B-1

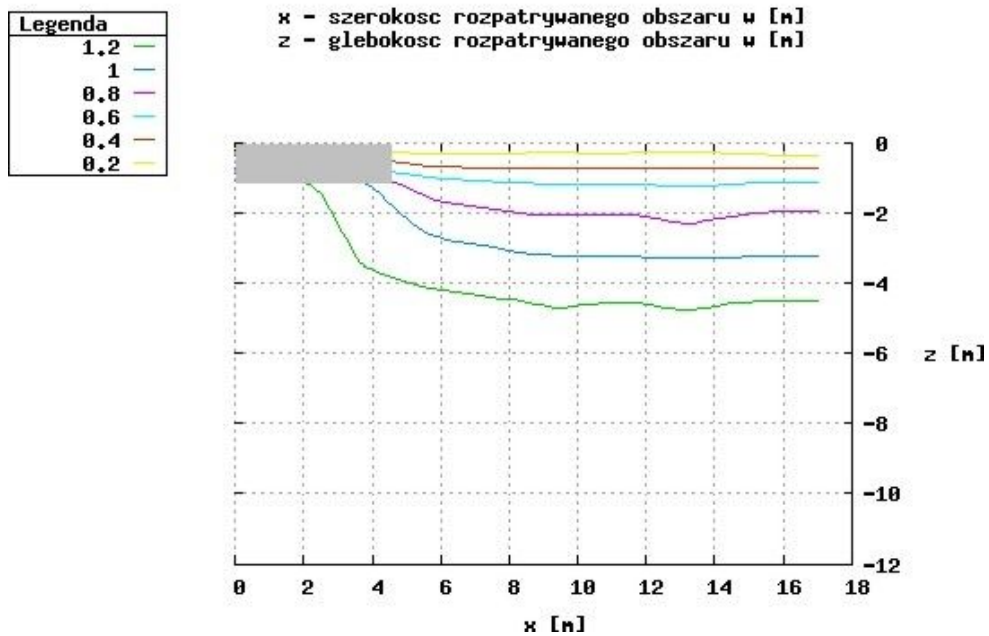
Elementy Kontrolne:



Rys. 13-1. Elementy Kontrolne dla budynku B1



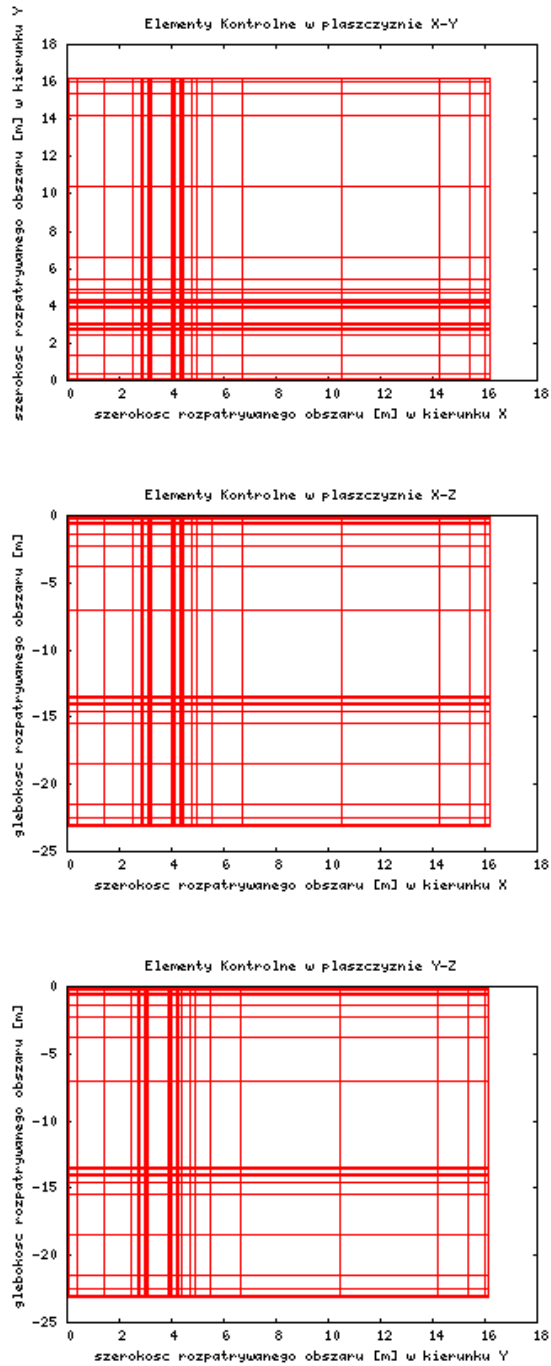
Rys. 13-2. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B1



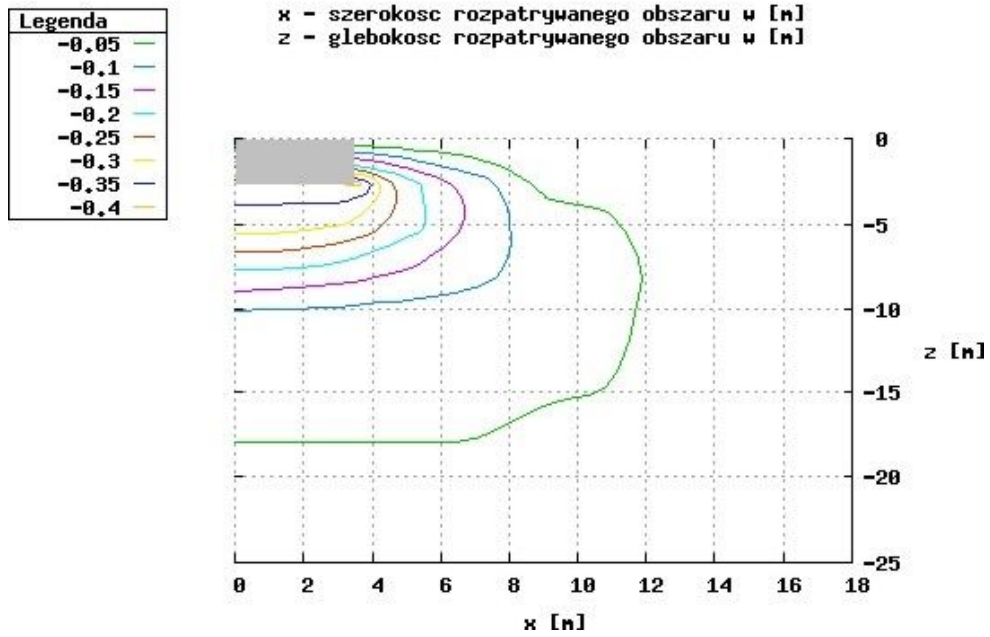
Rys. 13-3. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B1

## 13.2. Budynek B-2

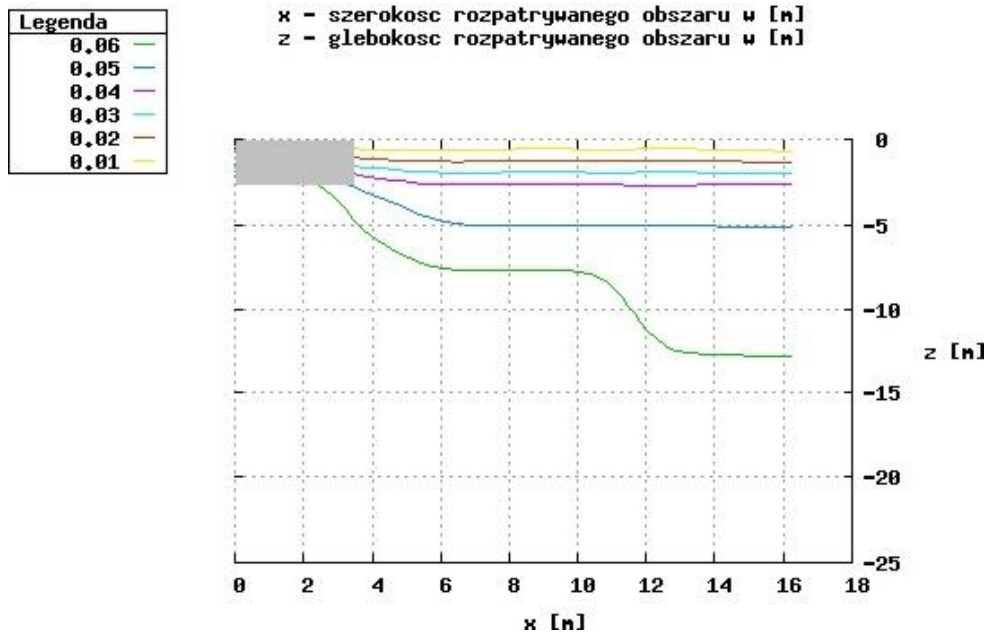
Elementy Kontrolne:



Rys. 13-4. Elementy Kontrolne dla budynku B2



Rys. 13-5. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B2

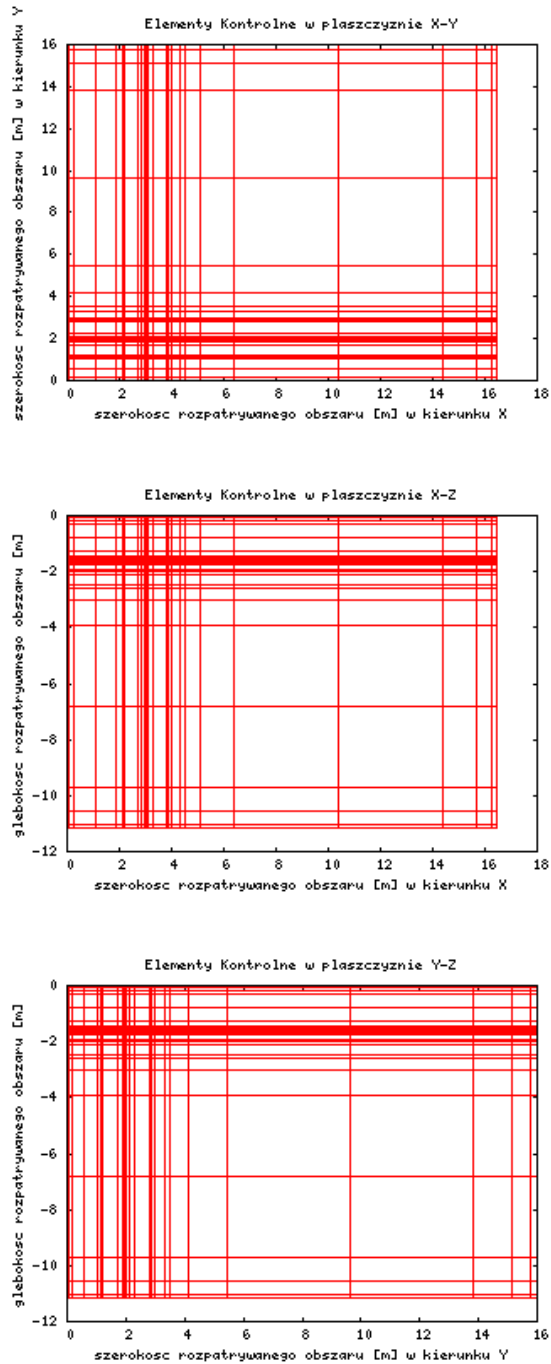


Rys. 13-6. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B2

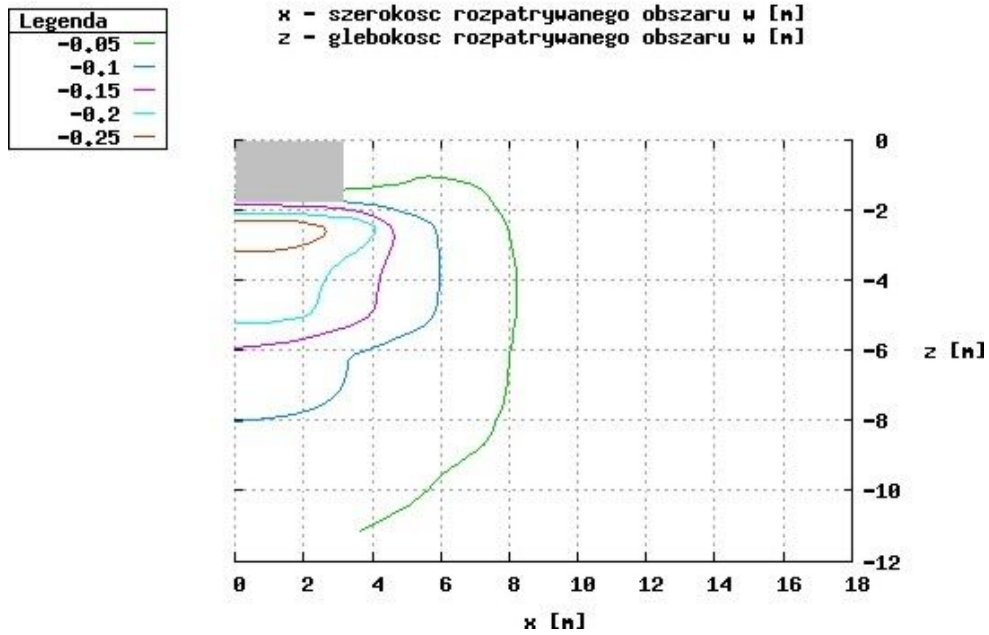


### 13.3. Budynek B-3

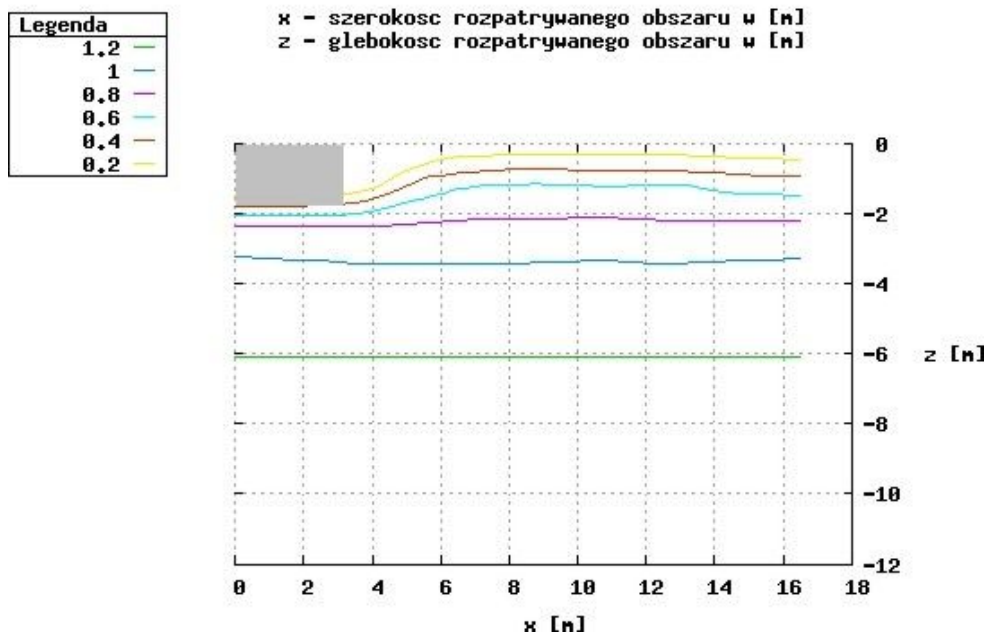
Elementy Kontrolne:



Rys. 13-7. Elementy Kontrolne dla budynku B3



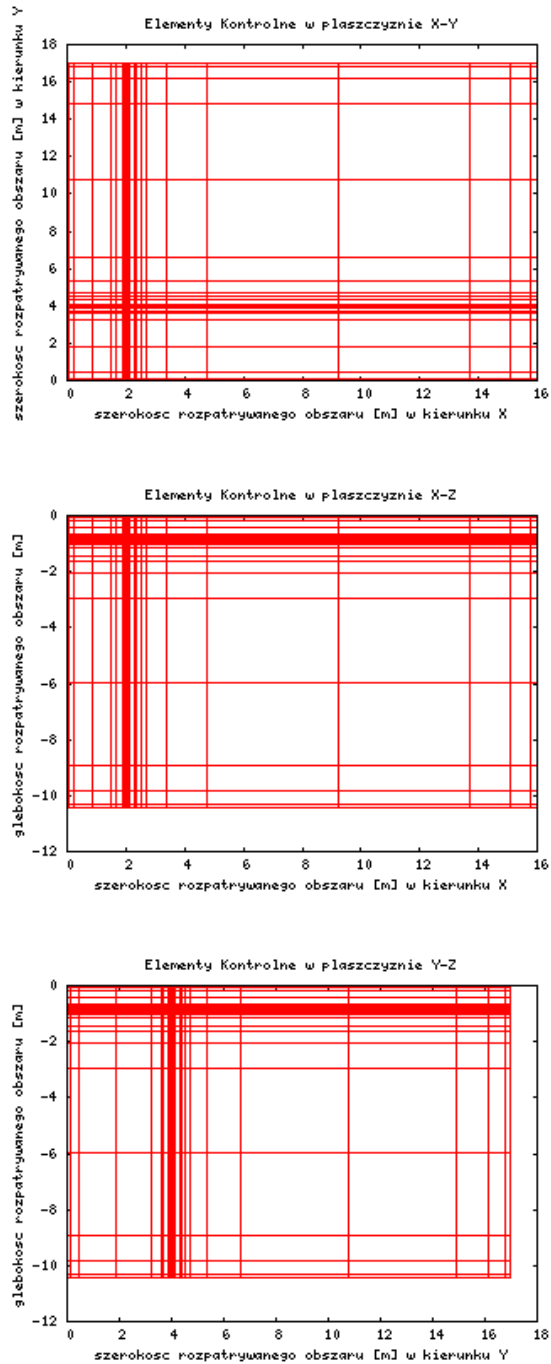
Rys. 13-8. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B3



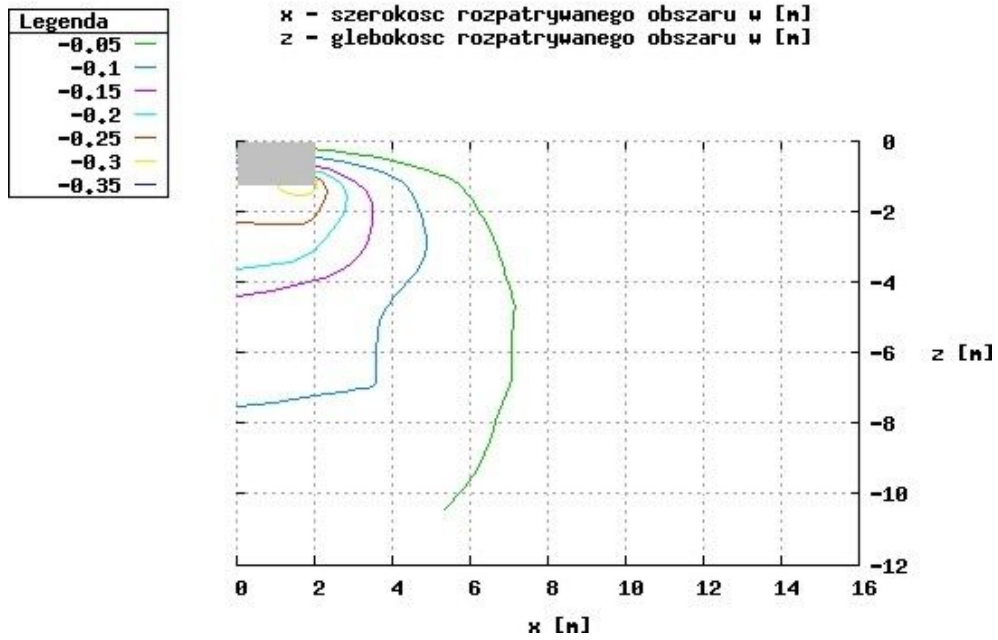
Rys. 13-9. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B3

### 13.4. Budynek B-4

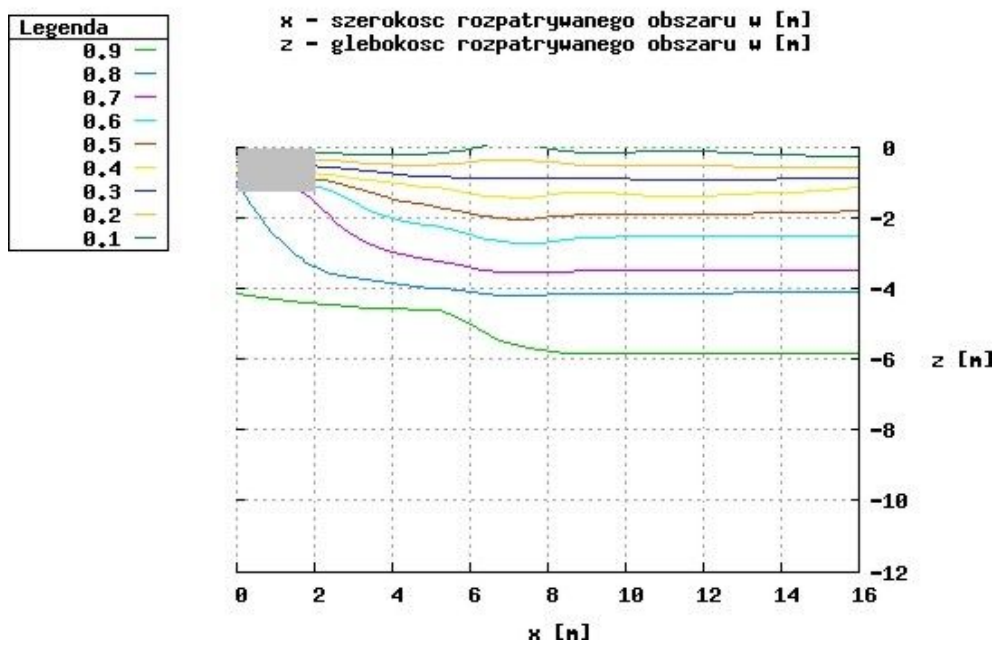
Elementy Kontrolne:



Rys. 13-10. Elementy Kontrolne dla budynku B4



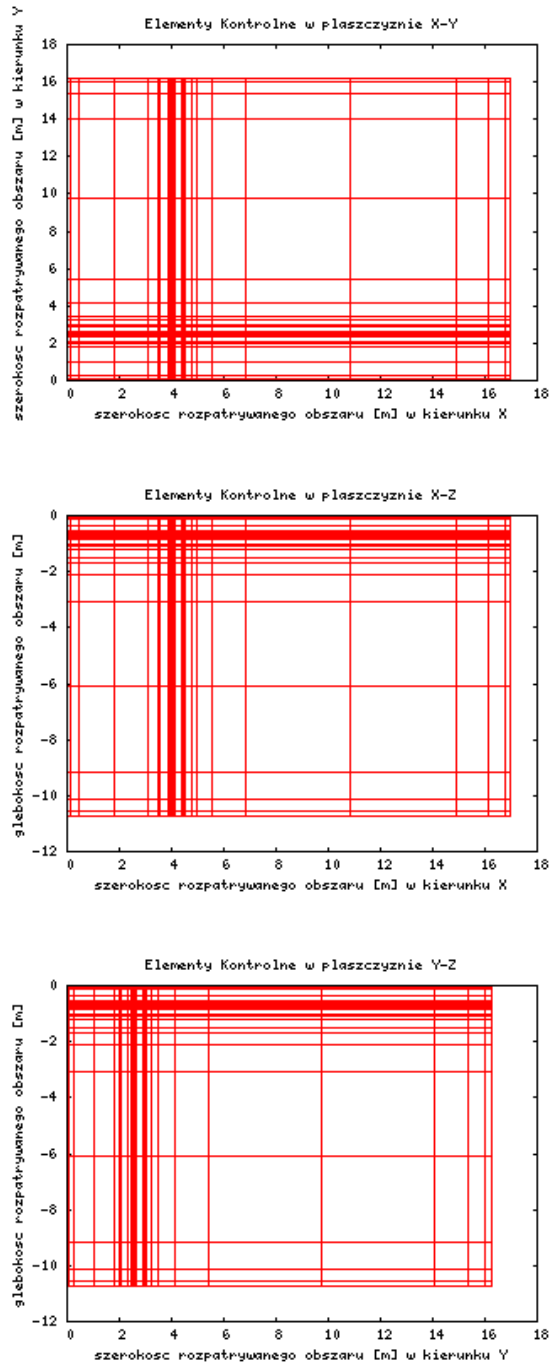
Rys. 13-11. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B4



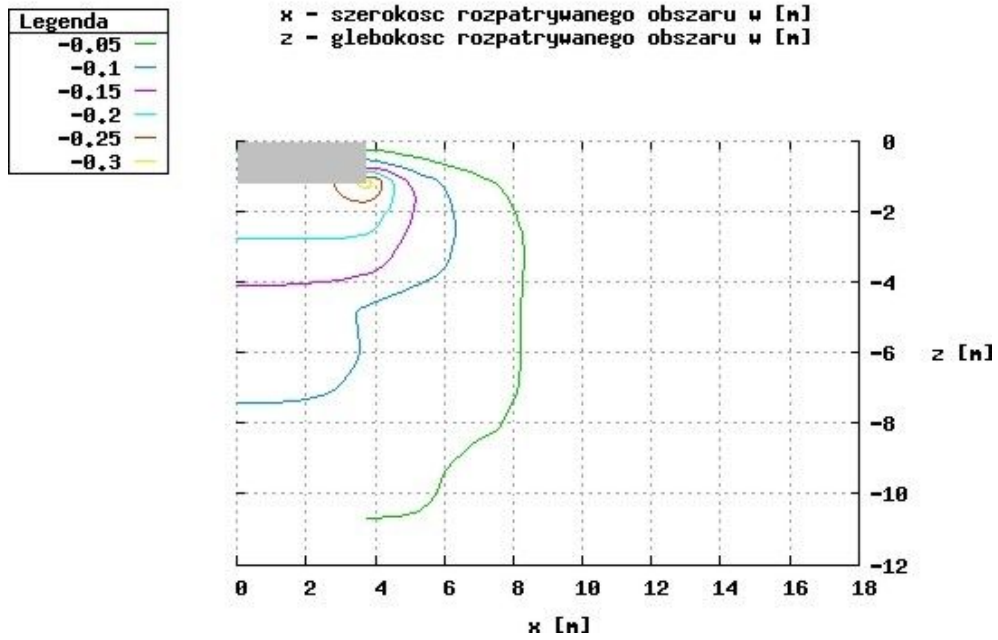
Rys. 13-12. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B4

### 13.5. Budynek B-5

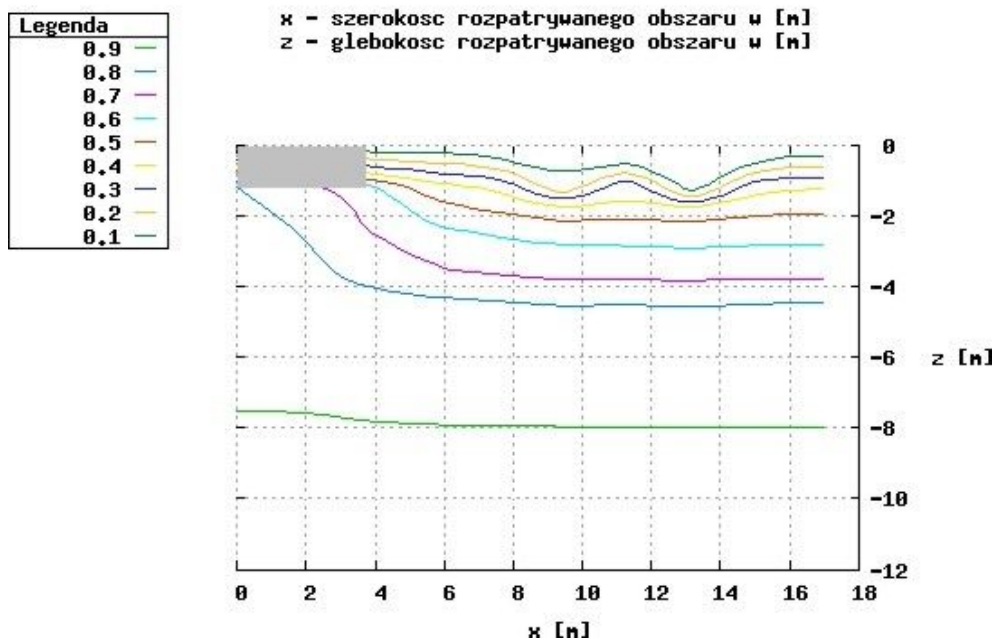
Elementy Kontrolne:



Rys. 13-13. Elementy Kontrolne dla budynku B5



Rys. 13-14. Rozkład ciśnienia w gruncie dla budynku B5



Rys. 13-15. Rozkład stężenia radonu w gruncie dla budynku B5

---

## 14. Literatura

---

- [And01] Anderssen C. E. *Numerical modeling of radon-222 entry into houses: an outline of techniques and results*. The Science of the Total Environment, vol. 272 (2001)
- [And99] Andersen C. E. *Radon-222 exhalation from Danish building materials: H + H Industri A/S results*. Riso Report nr 1135 (1999)
- [Are26] Arend R., Kalman N. *Über den Mechanismus der Aufladung von Nebeltröpfchen*. Z. f. Physik, vol. 35 (1926)
- [Arv95] Arvela H. *Seasonal variation in radon concentration of 3000 dwelling with model comparison*. Radiation Protection Dosimetry, vol. 59 (1995)
- [Bat80a] Bath L. J., Farthing J. W. i inni *Development of the Alligator Rivers Uranium Deposits, materiały pokonferencyjne z Uranium Evaluation and Mining Techniques*. IAEA, Wiedeń (1980)
- [Bat80b] Bates R. C., Edwards J. C. *Mathematical modeling of time dependent radon flux problems*. 2nd Int. Congress on Mine Ventilation, Reno, Nevada, (1980)
- [Bau67] Baust W. *Die Anlagerung von Radioaktiven Atomen und Ionen an Aerosolteilchen*. Z. f. Physik, vol. 199 (1967)
- [Bod89] Bodamski D. i inni *Indoor radon and its hazards*. University of Washington Press (1989)
- [Bog94] Bogacz J., Cywicka-Jakiel T. i inni *Analiza promieniotwórczości niektórych materiałów budowlanych z obszaru małopolski*. Raport IFJ nr 1687/AP, Kraków (1994)
- [Bog98] Bogacz J., Janik M. i inni *The use of diffusion-barrier charcoal canisters for radon concentration measurements in buildings*. Raport IFJ nr 1789/AP, Kraków (1998)
- [Bru83] Bruno R. C. *Verifying a Model of Radon Decay Product Behavior Indoors*. Health Physics, vol. 45 (1983)
- [Cal03] Calabrese E., Baldwin L. A. *Toxicology rethinks its central belief*. Nature, vol. 421 (2003)
- [Chu76] Chuan N. *Rapid Measurement of Particulate Size Distribution in the Atmosphere "Fine Particles"*. Academic Press N.Y. (1976)
- [Cle74] Clements W. E., Wilkening M. H. *Atmospheric pressure effects on 222Rn transport across the earth-air interface*. Journal of Geophysical Research, vol. 79 (1974)
- [Cot87] Cothorn C. R., Smith Jr J. E. *Environmental Radon*. Plenum Press, New York (1987)
- [Dam92] Damkjaer A., Korbesch U. *A small-diameter probe for "in situ" measurements of gas permeability of soils*. Radiation Protection Dosimetry, vol. 42 (1992)
- [Due99] Duenas C. i inni *Methane and carbon dioxide fluxes in soils evaluated by 222Rn flux and soil air concentration profiles*. Atmospheric Environment, vol. 33 (1999)
- [Enn95] Ennemoser O., Giacomuzzi S. M. G. i inni *Radon measurements in soil to predict indoor radon concentrations in new buildings in an area with unusually high radon levels*. The Science of the Total Environment, vol. 162 (1995)
- [Fle79] Fleischer R. I., Mogro-Campero A. *Radon enhancements in the Earth: Evidence for intermittent upflows*. Geophysical Research Letters, vol. 6 (1979)
- [Fle80] Fleischer R. I., Hart H. R. i inni *Radon emanation over an ore body: Search for long-distance transport of radon*. Nuclear Instruments and Methods, vol. 173 (1980)
- [Fon01] Font L., Baixeras C., Domingo C. *Uncertainty, variability and sensitivity analysis applied to the RAGENA model of radon generation, entry and accumulation indoors*. The Science of the Total Environment, vol. 272 (2001)
- [Gar93a] Garbesi K. *Toward resolving model-measurement discrepancies of radon entry into houses*. LBL-34244, Lawrence Berkeley Laboratory, CA 94720, USA, (1993)
- [Gar93b] Garbesi K., Sextro R. G., i inni *Soil-Gas Entry into an Experiment Basement: Model Measurement Comparison and Seasonal Effects*. Environmental Science and Technology, vol. 27 (1993)
- [Gar99] Garbesi K., Robinson A.L., i inni *Radon Entry into Houses: The Importance of Scale-Dependent Permeability*. Health Physics, vol. 77 (1999)

- [Gen95] *Instrukcja obsługi AlphaGURAD PQ2000/MC50 Multiparameter Radon Monitor*. Genitron Instruments GmbH (1995)
- [Gre96] Greeman D. J., Rose A. W. *Factors controlling the emanation of radon and thoron in soils of eastern U.S.A.* Chemical Geology, vol. 129 (1996)
- [Gry87] Grychowski P., Mazgaj P. i inni *Pomiary radioaktywności wody, mleka i jego pochodnych, warzyw i trawy w okolicach Krakowa po awarii reaktora w Czernobylu*. Raport IFJ nr 1350/B, Kraków (1987)
- [Hak97] Hakl J., Hunyadi I., Csige I. *Radon transport phenomena studied in Karst caves - international experiences on radon levels and exposures*. Radiation Measurements, vol 28 (1997)
- [Hol94] Holub R. F., Killoran L. K., *Is Diffusion or Forced Flow the Main Mechanism of Radon Infiltration into Underground Openings? A Theoretical Study*. Radiation Protection Dosimetry, vol. 56 (1994)
- [Hry01] Hrynkiewicz A. i inni *Człowiek i promieniowanie jonizujące*. PWN (2001)
- [ICRP60] ICRP Publication 60: *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* 60 Annals of the ICRP vol. 21 (1990)
- [ICRP90] ICRP Publication 90: *Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus)* (1990)
- [Jag92] Jagielak J., Biernacka M., Henschke J. i inni *Radiologiczny Atlas Polski*. Biblioteka Monitoringu Środowiska Warszawa (1992)
- [Jag98] Jagielak J., Biernacka M., Henschke J. i inni *Radiologiczny Atlas Polski 1997*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa (1998).
- [Jan97a] Janik M., Łoskiewicz J., Mazur D. i inni *On the Applicability of Short Time Measurements to the Determination of Annual Average of Radon Concentration in Dwellings*. IRPA Regional Symp. on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe, Prague, 8-12 September (1997)
- [Jan97b] Janssen L., Warmoeskerken M. *Transport phenomena data companion*. Delft University Press (1997)
- [Jan98] Janik M., Łoskiewicz J. i inni *How Precise is the Determination of the Average Radon Concentration in Buildings from Measurements Lasting only a few Days*. Raport IFJ nr 1792/AP, Kraków (1998)
- [Jaw97] Jaworowski Z. *Dobroczynne Promieniowanie*. Wiedza i Życie, nr 3 (1997)
- [Joh01] Johner H. U., Surbeck H. *Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction*. The Science of the Total Environment, vol. 272 (2001)
- [Jon99] Jönsson G. i inni *Seasonal variation of radon concentration measurements in some european countries*. Materiały pokonferencyjne z Radon in the Living Environment, Greece (1999)
- [Kar91] Karolinska Hospital (1991), cytowane z Nuclear News nr 3 (1992)
- [Kow01] Kowalik P. *Ochrona środowiska glebowego*. Wydawnictwo Naukowe PWN S.A. (2001)
- [Koz03] Kozak K. Praca zbiorowa *Zarządzanie bezpieczeństwem i higieną pracy*. Tom II. Zagrożenia i ochrona centrum Szkolenia i Organizacji Systemów Jakości PK, Kraków (2003)
- [Koz04] Kozak K., Mazur J., Janik M., Haber R. *Preliminary Results of Radon and Thoron Measurements in South-Eastern Part of Serbia and Montenegro*. Raport IFJ nr 1946/AP, Kraków (2004)
- [Koz04a] Kozak K., Mazur J., Janik M., Haber R. *Instrukcja prowadzenie pomiarów terenowych - pomiar radonu-222, toronu-220 i różnicy ciśnień w powietrzu glebowym*. Instrukcja LPN-IFJ/01/2002 (2004)
- [Koz04b] Kozak K., Mazur J., Janik M., Haber R. *Świder do poboru prób gleby. Sonda do poboru prób powietrza glebowego*. LPN-IFJ-2004, (2004)
- [Koz97] Kozak K. *Pomiary skażeń gamma promieniotwórczych powietrza w sytuacji normalnej i awaryjnej*. Praca doktorska, Kraków (1997)
- [Los97] Łoskiewicz J. *Indoor exposure to Radon and its Health Effect*. Raport IFJ nr 1766/AP, Kraków (1997)
- [Lou87] Loureiro C. O. *Simulation of the steady-state transport of radon from soil into houses with basements under constant negative pressure*. LBL-24378, Lawrence Berkeley Laboratory, CA 94720, USA, (1997)



- [Lou90] Loureiro C. O., Abriola L. M., Martin J. E., Sextro R. G. *Three-dimensional simulation of radon transport into houses with basements under constant negative pressure*. Environmental Science and Technology, vol. 24 (1990)
- [Maj92] Majborn B. *Seasonal variations of radon concentration in single-family houses with different sub-structures*. Radiation Protection Dosimetry, vol. 45 (1992)
- [Mog77] Mogro-Campero A., Fleischer R. L. *Subterresrial fluid convection: A hypothesis for long-distance migration of Radon within the Earth*. Earth and Planetary Science Letters., vol. 34 (1977)
- [Naz88] Nazaroff W. W., Nero A. V. *Radon and its decay products in indoor air*. John Wiley and Sons, (1988)
- [Naz89] Nazaroff W. W., Sextro R. G. *Technique for measuring the indoor  $^{222}\text{Rn}$  source potential of soil*. Environmental Science and Technology, vol. 23 (1989)
- [Nie84] Nielson K. K., Rogers V. C. i inni *Diffusion of radon through soils. A pore distribution model*. Soil Science Society of America Journal, vol. 48 (1984)
- [Nie94] Niewiadomski T. *Radon - właściwości, ryzyka, przeciwdziałanie*. IFJ (1994)
- [Pat80] Patankar S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation (1980)
- [PN88] *Polska Norma PN-88/B-04481, Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa (1988)
- [Pos93] Porstendörfer J. *Properties and Behaviour of Radon and Thoron and their decay products in the Air*. Raport końcowy z Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment, Luxemburg (1993)
- [Prz02] Przylibski T. A. *Radon w środowisku wód podziemnych i górnej części litosfery*. Wiadomości chemiczne, vol 56 (2002)
- [Prz04] Przylibski T. A., Mamont-Cieśla K. i inni *Radon concentrations in groundwaters of the Polish part of the Sudety Mountains (SW Poland)*. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 75 (2004)
- [Prz99] Przylibski T. A. *Radon concentration changes in the air of two caves in Poland*. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 45 (1999)
- [Rev93] Revzan K. L., Fisk W. J., Sextro R. G. *Modeling radon entry into Florida slab-on-grade houses*. Health Physics, vol. 65 (1993)
- [Ril95] Riley W. J., Robinson A. L. i inni *The effect of steady winds on radon-222 entry from soil into houses*. Atmospheric Environment, vol. 30 (1995)
- [Ril99] Riley W. J., Robinson A. L. i inni *Effects of variable wind speed and direction on radon transport from soil into buildings: model development and exploratory results*. Atmospheric Environment, vol. 33 (1999)
- [Rog91a] Rogers V. C., Nielsen K. K. *Correlations for predicting air permeabilities and Rn-222 diffusion coefficients of soils*. Health Physics, vol 61 (1991)
- [Rog91b] Rogers, V. C., Nielson K. K. *Multiphase Radon Generation and Transport in Porous Materials*. Health Physics, vol. 60 (1991)
- [Sex96] Sextro R. G., Garbesi K., i inni *Scale dependence of soil permeability to air: Measurement technique and field investigation*. Water Resources Research vol. 32 (1996)
- [Sko03] Skowronek J., Zemla B. *Epidemiology of lung and larynx cancers in coal mines in upper silesia – preliminary results*. Health Physics, vol. 85 (2003)
- [Spo98] Van der Spoel W. H., Van der Graaf E. R., De Meijer G. *Foil coverage of a crawl-space floor: measurements and modeling of radon entry*. Health Physics, vol. 74 (1998)
- [Sun04] Sundal A. V., Henriksen H. i inni *The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway*. The Science of the Total Environment, vol. 328 (2004)
- [Sun98] Sun H., Semkov T. S. *Mobilization of thorium, radium and radon radonuclide in ground water by successive alpha-recoils*. Journal of Hydrology, vol. 205 (1998)
- [Sur01] Surbeck H., Johnner H. U. *Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction*. The Science of the Total Environment, vol. 272 (2001)
- [Swa00] Swakoń J., Mazur J. *Pomiary stężeń radonu w powietrzu glebowym*. Człowiek, Środowisko, Zagrożenie; Wydawnictwo Nauczycielskie, Jelenia Góra (2000)

- [Swa01] Swakoń J., Zorski T. *Badania promieniotwórczości ośrodka skalnego w celu rozpoznania geologicznego oraz oceny bezpieczeństwa radiacyjnego środowiska*. Materiały pokonferencyjne z Geofizyka w inżynierii i ochronie środowiska, Dębe (2001)
- [Swa02] Swakoń J., Kozak K., Janik M. i inni *Pomiary radonu w powietrzu glebowym na terenie aglomeracji krakowskiej*. Raport IFJ nr 1985/B, Kraków (2002)
- [Swa04] Swakoń J., Janik M. i inni *Radon concentration in soil gas around local disjunctive tectonic zones in the Krakow area*. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 78 (2004)
- [UNS00] *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR Report (2000)
- [UNS93] *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR Report (1993)
- [Var98] Varley N. R., Flowers A. G. *Indoor radon prediction from soil gas measurements*. Health Physics, vol. 76 (1998)
- [Vau02] Vaupotic J., Andjelov M., Kobal I. *Relationship between radon concentration in indoor air and in soil gas*. Environmental Geology, vol. 42 (2002)
- [Wys02] Wysocka M. *Zależność poziomu stężeń radonu na terenie Górnego Śląska od warunków geologiczno-górnicznych*. Praca doktorska, GIG Katowice (2002)
- [Zak93] Żak A., Biernacka M. *Badania stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach i materiałach budowlanych*. Nukleonika, vol. 38 (1993)
- [Zie72] Zienkiewicz O. C. *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa (1972)
- [Zoh99] Zahorowski W., Whittlestone S., James J., Solomon S., *Radon in a tourist cave: A one year continuous survey of the concentrations of attached and unattached radon progeny and radon*. Materiały pokonferencyjne z Radon in the Living Environment, Greece (1999)

## 15. Uzupełnienie A

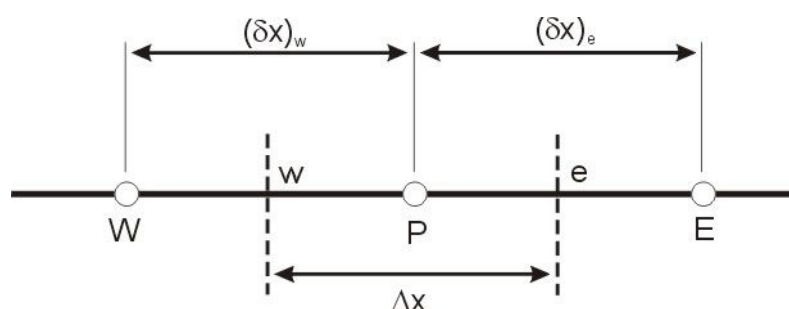
### 15.1. Przykład obliczeń za pomocą metody różnicowej

Znalezienie wartości w węźle siatki na podstawie wartości węzłów sąsiednich można zilustrować na przykładzie jednowymiarowego transportu ciepła w stanie ustalonym danego wzorem:

$$\frac{d}{dx} \left( k_x \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (15-1)$$

gdzie  $k$  – przewodnictwo cieplne;  
 $T$  – temperatura;  
 $S$  – źródło.

Opierając się na rysunku 15-1 przyjmujemy, że P jest punktem środkowym, natomiast sąsiedni punkt E jest przyjmowany z plusem, a punkt W z minusem.



Rys. 15-1. Punkty siatki w zagadnieniu jednowymiarowym

Linie przerywane oznaczają długość elementu kontrolnego. Jeżeli teraz wykonamy całkowanie równania 15-1 po całym elemencie kontrolnym otrzymamy równanie:

$$\left( k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left( k \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (15-2)$$

Po przyjęciu profilu krokowego (15-2) możemy ocenić różniczkę  $dT/dx$  i napisać równanie 15-2 w postaci:

$$\frac{k_e (T_E - T_P)}{\delta x_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{\delta x_w} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (15-3)$$

gdzie  $\bar{S}$  jest średnią wartością  $S$  w całym elemencie kontrolnym. Równanie 15-3 możemy przekształcić do postaci:

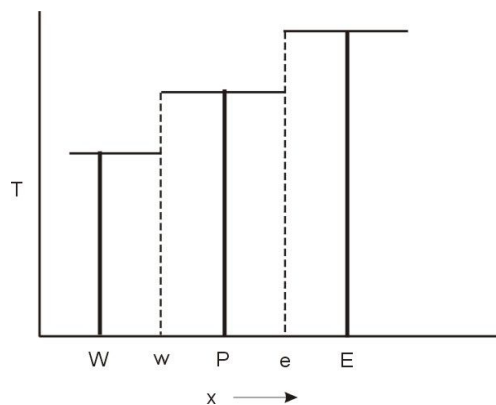
$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (15-4)$$

Gdzie:  $a_E = \frac{k_e}{\delta x_e}$  ;  $a_W = \frac{k_w}{\delta x_w}$  ;  $a_P = a_E + a_W$  ;  $b = \bar{S} \Delta x$

Równanie to reprezentuje ogólną formę równania dyskretyzacyjnego. W ogólnym przypadku (dla przypadków dwu- lub trzy- wymiarowych) możemy napisać:

$$a_p T_p = \sum a_{nb} T_{nb} + b \quad (15-5)$$

gdzie: nb – sąsiednie punkty

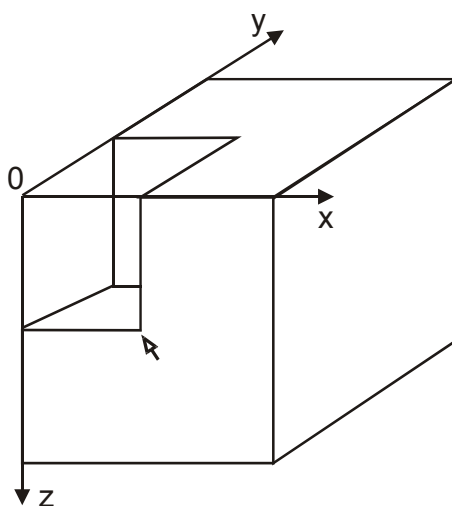


Rys. 15-2. Profil krokowy

## 15.2. Wyznaczanie elementów kontrolnych

Przed rozwiązaniem numerycznym układu równań musimy zdefiniować układ współrzędnych oraz siatkę w celu wyznaczenia elementów kontrolnych.

Zgodnie z założeniami modelu z rozdziału 4 układ jest symetryczny, możemy przyjąć do obliczeń jedynie  $\frac{1}{4}$  rozpatrywanego obszaru (rysunek 15-3).



Rys. 15-3. 1/4 bloku gruntu ze zdefiniowanym układem współrzędnych

Po zdefiniowaniu układu współrzędnych należy przeprowadzić przez blok gruntu kilkadziesiąt równoległych płaszczyzn we wszystkich 3 kierunkach. Płaszczyzny te będą tworzyć boki elementów kontrolnych.

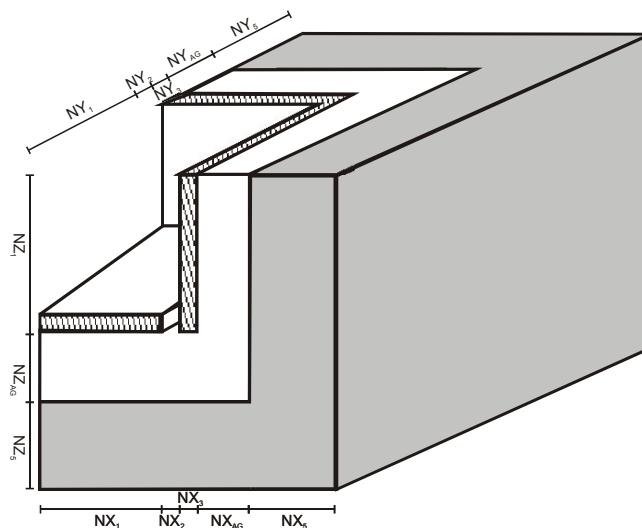
Geometryczny środek potrzebnych do obliczeń elementów kontrolnych usytuowany jest w węźle sieci. Podejście takie pozwala na usuwanie nieciągłości na granicach rozważanego obszaru. W sensie fizycznym dla rozważanego problemu, nieciągłości pojawiają się na styku obszarów, np. przy szczelinie w podłodze, na spodzie obszaru. Dlatego cały obszar należy podzielić na kilka stref (rys. 15-4).

W kierunku X i Y wyróżnione są strefy:

- od środka obszaru do szczeliny
- szczelina
- ściana pionowa
- obszar wymieszania gruntu
- od obszaru wymieszania do końca bloku gruntu

Natomiast w kierunku Z wyróżniamy:

- od środka obszaru do podłogi
- obszar wymieszania
- od obszaru wymieszania do dna rozważanego bloku gruntu



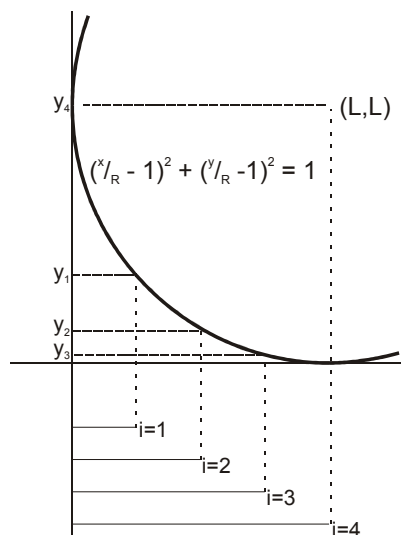
Rys. 15-4. Schemat bloku gruntu wraz z zaznaczonymi strefami

Elementy kontrolne nie mają tych samych rozmiarów, ze względu na różnice w wielkości obszarów oraz na dokładność obliczeń jaką chcemy uzyskać w danym obszarze (np. wokół szczeliny).

Idea tworzenia elementów kontrolnych polega na wzroście liczby węzłów sieci, co powoduje zmniejszanie oczek sieci. W tym celu zastosowany został, za Patankarem, algorytm obliczeniowy opierający się na równaniu koła. Metoda ta polega na tym, że dla każdego rozpatrywanego obszaru, w miarę posuwania się w stronę centrum koła, wielkość oczka sieci maleje (czyli elementy kontrolne są coraz mniejsze).

Rozpatrzmy  $\frac{1}{4}$  koła (rys. 15-5) o promieniu  $R$  i środku o współrzędnych  $(L, L)$ , oraz zdefiniowanych zmiennych  $x, y$  w przedziałach  $0 \leq x \leq R$  i  $0 \leq y \leq R$ , które dane jest wzorem:

$$\left(\frac{x}{R}-1\right)^2 + \left(\frac{y}{R}-1\right)^2 = 1 \quad (15-6)$$



Rys. 15-5. Idea algorytmu do obliczeń elementów kontrolnych

Jeżeli podzielimy promień koła  $R$  na  $N$  równych części w kierunku osi  $x$ , i zrzutujemy na oś  $y$ , uzyskamy coraz większe odległości w kierunku  $y$ . Definiujemy współczynnik podziału  $k_i = \frac{i}{N}$ , gdzie  $N$  – liczba części na jaką dzielimy odcinek  $R$ , natomiast  $i$  – numer kolejnego odcinka, przy czym  $0 \leq i \leq N$ .

Zatem zmienna  $x$  będzie dana wzorem:

$$x_i = k_i R = \left(\frac{i}{N}\right) R \quad (15-7)$$

Definiując współczynnik podziału  $j_i$ , możemy znaleźć odległości na osi

$$y_i = j_i R \quad (15-8)$$

Wstawiając teraz 15-7 oraz 15-8 do 15-6 otrzymamy po przekształceniach

$$\left(\frac{i}{N} - 1\right)^2 + (j-1)^2 = 0 \quad (15-9)$$

Rozwiązując równanie 15-9 dla  $0 \leq i \leq N$

$$j = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{i}{N} - 1\right)^2} \quad (15-10)$$

Wstawiając to rozwiązanie do 15-8 otrzymamy:

$$y_i = R \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{i}{N} - 1\right)^2} \right] \quad (15-11)$$

Tak więc, za pomocą tej prostej metody, ustalając liczbę węzłów w każdym z obszarów, możemy podzielić rozpatrywany obszar na interesujące nas elementy kontrolne.

Ponieważ najbardziej interesującym obszarem jest obszar wnikania radonu do budynku (zaznaczony strzałką na rysunku 15-3), więc wokół tego obszaru elementy kontrolne będą najmniejsze.

Opierając się na tych rozważaniach możemy przystąpić do dyskretyzacji równań dla pola zaburzonego ciśnienia oraz dla pola stężenia radonu.

### 15.3. Równanie dyskretyzacyjne dla pola zaburzonego ciśnienia

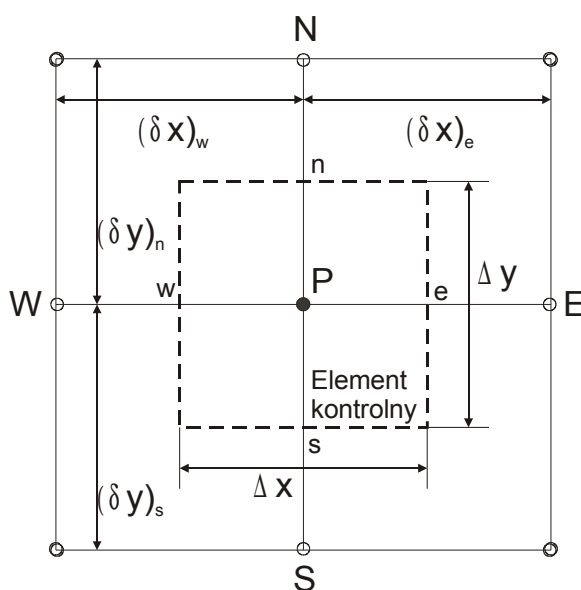
Równanie 5-9 dla pola zaburzonego ciśnienia w postaci:

$$\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} p) = 0 \quad (15-12)$$

możemy przedstawić również w postaci

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (15-13)$$

Zgodnie z metodą dyskretyzacji równanie to będzie całkowane dla wszystkich elementów kontrolnych i transformowane do układu równań algebraicznych. Będzie to tzw. "równanie dyskretyzacyjne" o następującej postaci (15-14) – dla węzła P (rys. 15-6):



Rys. 15-6. 2-wymiarowy element kontrolny

$$a_P p_P = a_E p_E + a_W p_W + a_N p_N + a_S p_S + a_B p_B + a_T p_T \quad (15-14)$$

Gdzie:  $a_p, a_E, a_W, a_N, a_S, a_B, a_T$  - współczynniki dyskretyzacji

$p_p$  - wartość dla węzła P

$p_E, p_W, p_N, p_S, p_B, p_T$  - wartości dla sąsiednich węzłów siatki

kierunek x: E - wschód, W - zachód

kierunek y: N - północ, S - południe

kierunek z: B - w górę, T - w dół

Wartości współczynników  $a_x$  definiujemy następująco:

$$a_E = k_e \left( \frac{\Delta y \Delta z}{(\partial x)_e} \right); a_W = k_w \left( \frac{\Delta y \Delta z}{(\partial x)_w} \right); a_N = k_n \left( \frac{\Delta z \Delta x}{(\partial x)_n} \right) \quad (15-15)$$

$$a_S = k_s \left( \frac{\Delta z \Delta x}{(\partial y)_s} \right); a_B = k_b \left( \frac{\Delta x \Delta y}{(\partial z)_b} \right); a_T = k_t \left( \frac{\Delta x \Delta y}{(\partial z)_t} \right)$$

Gdzie:  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  - wymiary elementów kontrolnych

$\delta x, \delta y, \delta z$  - odległości pomiędzy węzłami siatki

#### 15.4. Równanie dyskretyzacyjne dla pola stężenia radonu

Równanie 5-18 opisujące pole stężenia radonu w gruncie możemy zapisać w następującej formie rozdzielając część dyfuzyjną, konwekcyjną oraz źródło:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (Cq) + \frac{\partial}{\partial y} (Cq) + \frac{\partial}{\partial z} (Cq) \right] + \varepsilon (G - \lambda C) = 0 \quad (15-16)$$

Podobnie jak równanie 15-13 musimy go zamienić na równanie dyskretyzacyjne w następującej formie:

$$a_P C_P = a_E C_E + a_W C_W + a_N C_N + a_S C_S + a_B C_B + a_T C_T + b \quad (15-17)$$



## 16. Uzupełnienie B

### 16.1. Instalacja i uruchomienie programu TRIRAD.

#### 16.1.1. Uwagi

Ze względu na format danych należy przestawić symbol dziesiętny w opcjach regionalnych Windows z przecinka na kropkę.

Wszelkie uwagi i zapytania n/t programu proszę kierować do autora na adres e-mail:

[Miroslaw.Janik@ifj.edu.pl](mailto:Miroslaw.Janik@ifj.edu.pl)

#### 16.1.2. Struktura katalogów

TRIRAD / src / f90	<i>pliki źródłowe modułu obliczeniowego</i>
/ delphi	<i>pliki źródłowe interfejsu graficznego</i>
TRIRAD /dane	<i>katalog z danymi</i>
/gnu	<i>program gnuplot do tworzenia wykresów</i>
/img	<i>wyjściowe pliki graficzne</i>
/out	<i>wyjściowe pliki tekstowe</i>
/temp	<i>pliki tymczasowe wymiany danych między modułami</i>
/wyniki	<i>katalog z wynikami (należy przenieść z /img i /out)</i>
a.exe	<i>moduł obliczeniowy</i>
TRIRAD.exe	<i>GŁÓWNY PROGRAM TRIRAD</i>
gnu.bat	<i>procedury graficzne</i>

#### 16.1.3. Instalacja

Program należy przekopiować na dysk twardy z zachowaniem układu katalogów. Katalogu /src nie trzeba kopiować.

#### 16.1.4. Uruchomienie

Uruchomienie programu TRIRAD.exe powoduje otwarcie powitalnego okna dialogowego. Należy wybrać z zakładki DANE przycisk „Otwórz” i znaleźć katalog np. <f:/Program Files/TRIRAD/dane> Następnie należy wybrać odpowiedni plik wejściowy. Dane można zmieniać i zapisać pod inną nazwą z rozszerzeniem .tri.

Można również utworzyć plik z nowymi danymi poprzez wybranie polecenia Nowy plik z zakładki DANE.

Po akceptacji danych należy nacisnąć przycisk „Wykonaj obliczenia”.

Po zamknięciu się okienka z obliczeniami przechodzimy do zakładki WYNIKI i naciskamy przycisk „Pokaż wyniki”.

W zakładce WYKRESY po przejrzaniu wyników mamy dostępne następujące wykresy:

- **ElKo** - Elementy kontrolne w 3 płaszczyznach
- **dp – 1-wsza** - Rozkład ciśnienia w całym bloku gruntu – pierwsza warstwa pionowa
- **dp – gap** - Rozkład ciśnienia w gruncie wokół szczeliny
- **dp – 2-ga** - Rozkład ciśnienia w całym bloku gruntu – druga warstwa pionowa
- **Rn – 1-wsza** - Rozkład stężenia radonu w całym bloku gruntu – pierwsza warstwa pionowa
- **Rn– gap** - Rozkład stężenia radonu w gruncie wokół szczeliny
- **Rn – 2-ga** - Rozkład stężenia radonu w całym bloku gruntu – druga warstwa pionowa

#### **16.1.5. Zapisywanie wyników**

Wyniki z obliczeń zapisywane są w katalogu np. <f:/Program Files/TRIRAD/out> w formacie ASCII. Nazwa pliku związana jest z plikiem źródłowym zawierającym dane wejściowe.

Pliki z wynikami można przekopiować do katalogu, np. <f:/Program Files/TRIRAD/wyniki>, stworzonego przez użytkownika. Aby zachować wykresy należy przekopiować pliki z rozszerzeniem .png z katalogu <f:/Program Files/TRIRAD/img> do katalogu użytkownika.