



**AGH**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

---

## **Praca doktorska**

**Monika Śleziak**

# **Kompleksowa ocena zagrożenia radiologicznego w sąsiedztwie zbiorników osadowych wód kopalnianych na przykładzie kopalń Brzeszcze i Silesia**

Promotor: **dr hab. inż. Marek Duliński**

**Kraków 2015**

**Oświadczenie autora rozprawy:**

Oświadczam, świadomy(-a) odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę doktorską wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

data, podpis autora

**Oświadczenie promotora rozprawy:**

Niniejsza rozprawa jest gotowa do oceny przez recenzentów.

data, podpis promotora rozprawy



*Składam serdeczne podziękowania  
Koleżankom i Kolegom z Zespołu Fizyki Środowisk.*

*W szczególności dziękuję mojemu promotorowi,  
Panu dr hab. inż. Markowi Dulińskiemu za wsparcie, cierpliwość  
i pomoc na każdym etapie realizacji pracy.*

*Dziękuję Panu prof. dr hab. inż. Kazimierzowi Różańskiemu  
za wszechstronną pomoc podczas przygotowywania rozprawy.*

*Podziękowania kieruję również do  
Pani dr Anny Lewandowskiej z Instytutu Nauk Geologicznych UJ,  
Pana dr hab. inż. Chau Nguyen Dinh,  
Pana dr inż. Pawła Jodłowskiego  
oraz Pana dr Pawła Wróbla  
za pomoc w realizacji pomiarów.*

*Dziękuję Panu dr inż. Leszkowi Petryce  
za zainteresowanie tematyką pracy.*

*Dziękuję Rodzinie.*



## Spis treści

|                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Wstęp.....</b>                                                                                                        | <b>8</b>  |
| <b>2. Przegląd badań wykonanych przez Główny Instytut Górnictwa na terenach kopalnianych.....</b>                           | <b>12</b> |
| <b>3. Charakterystyka KWK Brzeszcze i KWK Silesia.....</b>                                                                  | <b>15</b> |
| 3.1. Charakterystyka ogólna.....                                                                                            | 15        |
| 3.2. Budowa geologiczna złoża. Stratygrafia i litologia warstw nadkładu i karbonu złóż KWK „Brzeszcze” i KWK „Silesia”..... | 16        |
| 3.2.1. Nadkład.....                                                                                                         | 16        |
| 3.2.2. Karbon produktywny.....                                                                                              | 18        |
| 3.3. Odpady kopalniane.....                                                                                                 | 19        |
| 3.3.1. Skała płonna.....                                                                                                    | 19        |
| 3.3.2. Żużel.....                                                                                                           | 21        |
| 3.4. Wody kopalniane i zagrożenie wodne kopalń.....                                                                         | 21        |
| 3.5. Ogólna charakterystyka zagrożeń dla środowiska naturalnego wynikające z działalności kopalń.....                       | 24        |
| <b>4. Charakterystyka zbiorników retencyjno – dozujących.....</b>                                                           | <b>27</b> |
| 4.1. Zbiornik Brzeszcze.....                                                                                                | 27        |
| 4.2. Zbiornik Rontok Duży.....                                                                                              | 29        |
| 4.3. Zbiornik Kaniów.....                                                                                                   | 31        |
| <b>5. Zarys geochemii pierwiastków radioaktywnych.....</b>                                                                  | <b>34</b> |
| <b>6. Wody zbiorników Brzeszcze, Kaniów i Rontok Duży: preparatyka prób i wyniki pomiarów.....</b>                          | <b>39</b> |
| 6.1. Przygotowanie prób wody do analiz oraz opis stosowanej metodyki pomiarowej.....                                        | 41        |
| 6.2. Typowe składy izotopowe wód obszaru Polski.....                                                                        | 55        |
| 6.3. Wyniki pomiarów.....                                                                                                   | 59        |
| <b>7. Osady i skała płonna zbiorników Brzeszcze, Kaniów i Rontok Duży: metodyka pomiarowa i wyniki pomiarów.....</b>        | <b>77</b> |
| 7.1. Badania składu mineralogicznego i pierwiastkowego osadów.....                                                          | 78        |
| 7.2. Badania radiologiczne.....                                                                                             | 85        |
| 7.3. Wyniki pomiarów aktywności promieniotwórczej osadów.....                                                               | 88        |
| 7.4. Aktywność promieniotwórcza skały płonnej.....                                                                          | 96        |

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8. Bilans wodny zbiorników i jego wpływ na usuwanie radu z kolumny wody..</b>                                                         | <b>99</b>  |
| 8.1. Bilans masowy i izotopowy zbiornika wodnego w stanie ustalonym. Określenie wielkości strumienia parowania – zagadnienia ogólne..... | 99         |
| 8.1.1. Zbiornik Brzeszcze.....                                                                                                           | 102        |
| 8.1.2. Wytrącanie barytu w zbiorniku Brzeszcze.....                                                                                      | 110        |
| 8.1.3. Zbiornik Kaniów.....                                                                                                              | 114        |
| 8.2. Oszacowanie aktywności radu $^{226}\text{Ra}$ skumulowanej w osadach dennych zbiorników Brzeszcze i Kaniów.....                     | 118        |
| <b>9. Pomiary aktywności radonu <math>^{222}\text{Rn}</math> w powietrzu atmosferycznym: metodyka pomiarowa i wyniki.....</b>            | <b>121</b> |
| 9.1. Ciągły pomiar aktywności radonu.....                                                                                                | 121        |
| 9.1.1. Schemat obliczania aktywności właściwej atmosferycznego radonu $^{222}\text{Rn}$ .....                                            | 123        |
| 9.1.2. Wyniki pomiarów.....                                                                                                              | 126        |
| 9.1.3. Zależność aktywności radonu $^{222}\text{Rn}$ od wybranych parametrów meteorologicznych.....                                      | 130        |
| 9.2. Terenowe pomiary aktywności radonu – metodyka i wyniki.....                                                                         | 135        |
| 9.3. Oszacowanie dawek pochodzących od radonu $^{222}\text{Rn}$ w powietrzu atmosferycznym.....                                          | 143        |
| <b>10. Pomiary przestrzennego równoważnika mocy dawki promieniowania gamma.....</b>                                                      | <b>146</b> |
| <b>11. Wskaźniki narażenia radiologicznego.....</b>                                                                                      | <b>157</b> |
| 11.1. Wyniki obliczeń wskaźników radiologicznych w odniesieniu do osadów i skał w otoczeniu poszczególnych zbiorników.....               | 162        |
| <b>12. Wnioski.....</b>                                                                                                                  | <b>167</b> |
| <b>13. Spis tabel i rysunków.....</b>                                                                                                    | <b>171</b> |
| <b>14. Bibliografia.....</b>                                                                                                             | <b>176</b> |
| <b>15. Załączniki cyfrowe.....</b>                                                                                                       | <b>182</b> |

## 1. Wstęp

Z działalnością górnictwem nierozdzielnie związana jest konieczność odwadniania wyrobisk, niezależnie od tego czy jest to górnictwo podziemne, czy odkrywkowe. Dobowe dopływy do wszystkich kopalń zlokalizowanych na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego są szacowane na kilkaset tysięcy m<sup>3</sup> wody (GIPH, 2002). Wody te są zrzucane do rzek przepływających w pobliżu zakładów wydobywczych. Z każdym rokiem ilość dopływających do wyrobisk wód maleje, więc zmniejsza się także ilość wody zrzucanej do rzek.

Wody pochodzące z odwadniania kopalń to przede wszystkim wysoko zmineralizowane solanki z utworów karbonu. Charakteryzują się one bardzo zróżnicowanym składem chemicznym. Dominujące typy wód to solanki chlorkowo – sodowe oraz chlorkowo – sodowo – wapniowe. Poza solankami występują również wody słodkie oraz miernie zasolone (Harat i Grmela, 2008). Wraz ze zmianą głębokości zmienia się skład chemiczny i promieniotwórczość wód dołowych. Te z poziomów głębszych, charakteryzują się wyższą zawartością jonów chlorkowych i baru, niższą zawartością jonów siarczanowych oraz podwyższoną promieniotwórczością. Wody z poziomów płytszych zawierają zwykle więcej siarczanów, mniej jonów chlorkowych i baru oraz cechuje je niska promieniotwórczość.

Część solanek GZW to wody reliktove, pochodzące z infiltracji w gorących klimatach przedczwartorzędowych. Ich czas przebywania w utworach skalnych, a zatem i czas kontaktu woda-skała jest długi. Prowadzi to do podwyższonych stężeń radionuklidów, przede wszystkim izotopów radu <sup>226</sup>Ra i <sup>228</sup>Ra. Poza nimi w wodach kopalnianych pojawia się także ołów <sup>210</sup>Pb, uran <sup>235</sup>U i <sup>238</sup>U a także tryt <sup>3</sup>H. Ze względu na podwyższoną koncentrację, oraz długi czas połowicznego zaniku najbardziej uciążliwe są izotopy radu. Wody dołowe pochodzące z odwadniania kopalń trafiają do zbiorników retencyjno – dozujących, a następnie do rzek. Warunkiem zrzucania wód do rzek jest odpowiednie rozcieńczenie wody kopalnianej tak, aby rzeka nie została nadmiernie skażona.

Wody z różnych poziomów, a co za tym idzie o różnym chemizmie ulegają mieszanii, w wyniku którego dochodzi do współstrącania związków zawierających izotopy promieniotwórcze. W pierwszym etapie nuklidy te są usuwane pod ziemią, nie powodując narażenia dla ogółu ludności a jedynie dla wąskiej grupy pracowników. Dalszy proces mieszania zachodzi na powierzchni. W jego wyniku izotopy promieniotwórcze mogą być

usuwane z wody do osadów w procesie współstrącania lub adsorpcji na powierzchni cząstek stałych.

Długoletnia eksploatacja zbiorników retencyjno – dozujących może prowadzić do znacznej akumulacji promieniotwórczych osadów. Z punktu widzenia ochrony radiologicznej osady te stanowią poważny problem dla środowiska i okolicznych mieszkańców. Ze względu na podwyższoną zawartość izotopów promieniotwórczych osady stwarzają istotne problemy związane z zagospodarowaniem terenu po zakończeniu eksploatacji zbiorników. W przypadku osadów odkrytych stają się one źródłem skażonych promieniotwórczo cząsteczek, które z wiatrem mogą być transportowane na duże odległości przyczyniając się do kontaminacji terenu. Zawarty w osadach rad jest prekursorem radonu – gazu, który może migrować i którego groźnym, długożyciowym produktem rozpadu jest ołów  $^{210}\text{Pb}$ . Zawarte w osadach radionuklidy są źródłem promieniowania gamma przyczyniając się do wzrostu mocy dawki na obszarze osadów i terenach do nich przylegających.

Istotnym problemem związanym z wydobywaniem węgla kamiennego jest konieczność usuwania skały płonnej towarzyszącej pokładom węgla. Może ona zawierać podwyższone stężenia radionuklidów, które kumulują się w wyniku składowania skały na zwalowiskach.

Wymienione powyżej zagrożenia pociągają za sobą konieczność kontrolowania poziomu skażeń wody, osadów oraz powietrza w najbliższym otoczeniu zbiorników. Takie pomiary były wykonywane przez Główny Instytut Górnictwa w Katowicach. Obszar, na którym wykonano badania był ograniczony do kilku zbiorników, w związku z czym obraz poziomów skażeń terenów samych zbiorników i obszarów do nich przylegających jest dalece niewystarczający.

Celem niniejszej pracy było rozszerzenie dotychczasowej wiedzy nt. wpływu eksploatacji kopalń na okalające je tereny w aspekcie skażeń promieniotwórczych. Jako obszar badawczy wybrano rejony zbiorników retencyjno – dozujących wody kopalnianej, użytkowanych przez Kopalnię Węgla Kamiennego „Brzeszcze” – zbiornik Brzeszcze, oraz Kopalnię Węgla Kamiennego „Silesia” – zbiornik Kaniów. Badaniom poddano także wyłączony z eksploatacji zbiornik Rontok Duży.

W ramach badań zaplanowano wykonanie w próbach wód pobranych ze zbiorników pomiarów aktywności izotopów radu ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ), ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  oraz uranu ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ). W celu określenia składu chemicznego wód i jego potencjalnej ewolucji planowano wykonanie pewnej liczby analiz chemicznych. Od początku pracy były planowane analizy składu izotopowego tlenu ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), wodoru ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ ) oraz stężenia trytu w wodach. Miały one na

celu dostarczenie dodatkowych informacji o pochodzeniu wód, procesach mieszania oraz umożliwić zbilansowanie strumieni wody w zbiornikach Brzeszcze i Kaniów. Zwłaszcza ten ostatni aspekt nabierał dużego znaczenia w świetle ograniczonych możliwości swobodnego dostępu do zbiorników i prowadzenia na nich badań. Włączenie do tych badań prób wód z dwóch piezometrów miało na celu ocenę poziomu skażenia płytkich wód podziemnych zasolonymi wodami zbiorników. W badaniach uwzględniono także jedną studnię gospodarską w znacznej odległości od badanych zbiorników, będącą swoistym punktem odniesienia dla analiz izotopowych.

W odniesieniu do osadów i skał zaplanowano wykonanie pomiarów aktywności izotopów radu ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ), toru  $^{228}\text{Th}$ , ołowiu  $^{210}\text{Pb}$ , uranu  $^{238}\text{U}$  oraz potasu  $^{40}\text{K}$ . Oprócz tego wyselekcjonowane próby osadów zbiornikowych miały być poddane analizom mineralogicznym i pierwiastkowym. Rezultaty tych analiz wraz z wynikami analiz chemicznych wód miały posłużyć do: i) uściślenia mechanizmu transportu izotopów radu (jako najbardziej niebezpiecznych) do osadów dennych zbiorników, ii) obliczeń modelowych rocznego strumienia  $^{226}\text{Ra}$  do osadów i oceny jego aktywności zakumulowanej w okresie eksploatacji zbiorników Brzeszcze i Kaniów, iii) oceny możliwości wykorzystania osadów w ramach rekultywacji terenów po zakończeniu eksploatacji.

Z uwagi na spodziewane duże aktywności  $^{226}\text{Ra}$  w osadach dennych, a także w obrębie zwałowisk skały płonnej wynikała konieczność wykonania pomiarów aktywności izotopu pochodnego – radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym. Konieczność wykonania takich pomiarów wynika z lokalizacji w stosunkowo niewielkiej odległości domów zamieszkałych przez okoliczną ludność, a także z wykorzystywania rejonów przyległych do zbiorników w charakterze terenów spacerowych. Pomiary te w zamierzeniu miały być zrealizowane poprzez analizę stężenia  $^{222}\text{Rn}$  w układzie stacjonarnym (wraz z rejestracją wybranych parametrów meteorologicznych), oraz przez zastosowanie przenośnego monitora aktywności  $^{222}\text{Rn}$ . Wyniki pomiarowe miały służyć oszacowaniu dopuszczalnego czasu (w obrębie doby) przebywania ludzi w danym rejonie z punktu widzenia ochrony radiologicznej.

Promieniowaniu korpuskularnemu zwykle towarzyszy promieniowanie gamma. Z uwagi na spodziewany podwyższony poziom aktywności radionuklidów alfa- i beta-promieniotwórczych w osadach i skałach zaplanowano wykonanie pomiarów przestrzennego równoważnika mocy dawki promieniowania gamma w najbliższym otoczeniu zbiorników. Ich celem było oszacowanie dawek otrzymywanych przez przygodne osoby znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie zbiorników.

Wszystkie opisane wyżej kierunki badań miały na celu uściślenie i rozszerzenie wiedzy odnośnie wpływu działalności kopalń węgla kamiennego na środowisko naturalne i zdrowie okolicznej ludności.

## 2. Przegląd badań wykonanych przez Główny Instytut Górnictwa na terenach kopalnianych

Badaniom poddane zostały zbiorniki Rontok Duży, Bojszowy, osadniki kopalni „Rymer” oraz kolektor OLZA. Na podstawie analiz wykonanych na terenie zbiorników Rontok Duży i Bojszowy możliwe było śledzenie zachowania się izotopów radu w zależności od typów wód kopalnianych zrzucanych do zbiorników. Oba zbiorniki pełniły funkcję osadników sedymentacyjnych zawiesiny stałej oraz były zbiornikami retencyjno – dozującymi wody słonej. Do pierwszego odprowadzano wody radowe typu A, do drugiego zaś typu B. Analizom zostały poddane wody zrzucane do zbiorników i odprowadzane do rzek, będących odbiornikami dla danego zbiornika, a także osady dennie oraz skała płonna z najbliższych okolic zbiorników. W poniższych tabelach zestawione zostały wyniki pomiarów wykonanych w okolicach wspomnianych zbiorników (Michalik i in., 2002, 2005; Chałupnik, 2002, 2005).

### Rontok Duży

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiaru aktywności prób stałych pobranych z osadnika Rontok Duży i jego najbliższych okolic (dla porównania zamieszczono przedziały aktywności poszczególnych izotopów typowe dla skorupy ziemskiej)

| izotop            | skorupa ziemska<br>[Bq/kg] | osady dennie<br>[Bq/kg] | skała płonna<br>[Bq/kg] | gleba i borowina<br>[Bq/kg] |
|-------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| <sup>226</sup> Ra | 7 – 50                     | 67 – 49151              | 30 – 3508               | 22 – 74                     |
| <sup>228</sup> Ra | 10 – 50                    | 62 – 6388               | 40 – 2482               | 17 – 47                     |
| <sup>224</sup> Ra | 10 – 50                    | 65 – 8990               | 38 – 1791               | 17 – 44                     |
| <sup>137</sup> Cs | -                          | <2 – 1014               | <2 – 79                 | 77 – 238                    |
| <sup>40</sup> K   | 100 – 700                  | 155 - 848               | 414 - 664               | 102 – 811                   |

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiaru aktywności prób wody pobranych z osadnika Rontok Duży.

| stężenie | <sup>226</sup> Ra [Bq/m <sup>3</sup> ] |         |         | <sup>228</sup> Ra [Bq/m <sup>3</sup> ] |         |         |
|----------|----------------------------------------|---------|---------|----------------------------------------|---------|---------|
|          | zakres                                 | średnia | mediana | zakres                                 | średnia | mediana |
| woda     | 337 – 3996                             | 3176    | 3609    | 520 – 3740                             | 2931    | 3220    |

Dodatkowo wykonano pomiary koncentracji radonu w glebie pobranej wzdłuż ścian zbiornika. Próbkę pobrano z głębokości 1 m. Maksymalna uzyskana wartość to  $12,7 \frac{kBq}{m^3}$ .

Kolejne wykonane pomiary dotyczą mocy dawki promieniowania gamma. Analizy zostały przeprowadzone przez inspektorów Państwowej Agencji Atomistyki (PAA, 1998) w 37 punktach rozmieszczonych na obwodzie zbiornika:

Wyniki:

- okolice wlotu wody do zbiornika –  $42 \frac{\mu Gy}{h}$ ,
- w odległości 15 m od rury zrzutowej –  $2 \frac{\mu Gy}{h}$ ,
- najniższe wartości dawek wynoszą poniżej  $1,2 \frac{\mu Gy}{h}$ .

(Tło w Polsce – za „Radiologicznym Atlasem Polski” –  $0,02 - 0,09 \frac{\mu Gy}{h}$ )

### Bojszowy

Tabela 3. Zestawienie wyników pomiaru aktywności wody i osadów pobranych z osadnika Bojszowy.

| stężenie | <sup>226</sup> Ra [kBq/m <sup>3</sup> ] |         |         | <sup>228</sup> Ra [kBq/m <sup>3</sup> ] |         |         |
|----------|-----------------------------------------|---------|---------|-----------------------------------------|---------|---------|
|          | zakres                                  | średnia | mediana | zakres                                  | średnia | mediana |
| woda     | 2,12 – 5,21                             | 3,45    | 3,34    | 4,76 – 8,32                             | 6,95    | 6,76    |
| stężenie | <sup>226</sup> Ra [Bq/kg]               |         |         | <sup>228</sup> Ra [Bq/kg]               |         |         |
|          | zakres                                  | średnia | mediana | zakres                                  | średnia | mediana |
| osady    | 95 – 950                                | 414     | 406     | 124 – 1710                              | 627     | 628     |

W przypadku zbiornika Bojszowy wykonano również pomiary współczynnika ekshalacji radonu. Osady o podwyższonej zawartości izotopów radu (maksymalnie: <sup>226</sup>Ra –  $2,0 \frac{kBq}{kg}$ , <sup>228</sup>Ra  $4,0 \frac{kBq}{kg}$ ) zalegają na dnie grubą warstwą. Pierwsze próby pomiaru stężeń radonu podjęto latem 2002r. Z powodu nasiąknięcia osadów wodą pomiary zostały wykonane tylko na niewielkich, osuszonych partiach zbiornika. Współczynnik ekshalacji radonu, jaki uzyskano podczas tych pomiarów wynosił  $200 \frac{mBq}{m^2 s}$ . Fakt nasiąknięcia osadów przez wodę zmniejszył ekshalację radonu z osadów. Kolejne pomiary wykonano w czerwcu 2003r. W niektórych miejscach współczynnik ekshalacji wynosił ponad  $400 \frac{mBq}{m^2 s}$ .

W przypadku zbiornika kopalni „Rymer” głównym źródłem zagrożenia są osady o miąższości 30 – 40 cm, zawierające podwyższoną zawartość izotopów radu. Stężenia izotopów promieniotwórczych w próbach osadów przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Aktywności prób osadów pobranych z osadników kopalni „Rymer” (Chałupnik 2004; 2005)

| <b>stężenie</b> | <b><math>^{226}\text{Ra}</math> [Bq/kg]</b> | <b><math>^{228}\text{Ra}</math> [Bq/kg]</b> | <b><math>^{210}\text{Pb}</math> [Bq/kg]</b> |
|-----------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| średnia         | $1810 \pm 90$                               | $980 \pm 50$                                | $140 \pm 30$                                |
| maksimum        | 2500                                        | 1500                                        | b.d.                                        |
| minimum         | 1700                                        | 1000                                        | b.d.                                        |

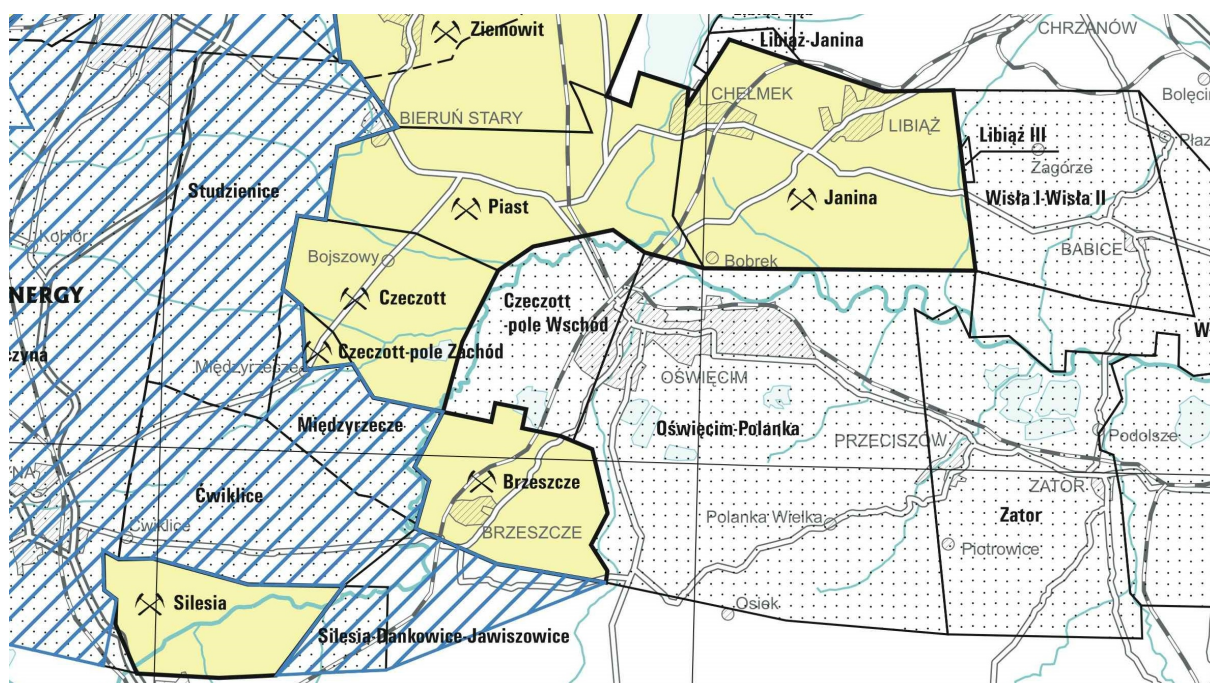
Kolektor OLZA to system rurociągów, który służył zbieraniu wód słonych Rybnickiego Okręgu Węglowego. Wody te były początkowo odprowadzane do rzeki Leśnica, a obecnie do Odry. W kolektorze następowało współstrącenie siarczanu radowo – barowego w wyniku mieszania wód typu A i B wprowadzanych do kolektora. Powodowało to wzrost aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  w rurach do poziomu  $70 \left[ \frac{\text{kBq}}{\text{kg}} \right]$  (Chałupnik, 2007).

### 3. Charakterystyka KWK Brzeszcze i KWK Silesia

#### 3.1. Charakterystyka ogólna

Kopalnia Węgla Kamiennego „Brzeszcze” i Kopalnia Węgla Kamiennego „Silesia” do 2004 roku stanowiły oddzielne organizmy gospodarcze. W styczniu 2005r. zostały połączone i funkcjonowały pod nazwą Kopalnia Węgla Kamiennego „Brzeszcze – Silesia”, przy czym KWK „Brzeszcze” stanowiła Ruch I Zakładu Górniczego a KWK „Silesia” Ruch II tego zakładu. Ponownie kopalnie zostały rozdzielone w grudniu 2010r ([www.kwsa.pl](http://www.kwsa.pl)).

Odległość wzajemna zakładów w linii prostej wynosi około 10km. KWK „Brzeszcze” znajduje się w województwie małopolskim, w powiecie oświęcimskim, na terenie miasta Brzeszcze. Natomiast KWK „Silesia” zlokalizowana jest w województwie śląskim, powiecie bielskim, na obszarze miasta Czechowice – Dziedzice. Oba leżą na prawym brzegu rzeki Wisły. KWK „Brzeszcze” – w odległości około 2km w linii prostej od koryta rzeki a KWK „Silesia” – w odległości około 600m (odległość od szybów wydobywczych). Powierzchnia obszaru górniczego KWK „Silesia” wynosi 21,36km<sup>2</sup>, a terenu górniczego 27,05km<sup>2</sup>. Natomiast obszar górniczy KWK „Brzeszcze” wynosi 26,9km<sup>2</sup> zaś teren górniczy 32km<sup>2</sup>. Obszary górnicze i lokalizację kopalń obrazuje poniższa mapa.



Rys.1. Obszary górnicze kopalń Brzeszcze i Silesia.

### **3.2. Budowa geologiczna złóż. Stratygrafia i litologia warstw nadkładu i karbonu złóż KWK „Brzeszcze” i KWK „Silesia”**

Zarówno złóż KWK „Silesia” jak i KWK „Brzeszcze” znajdują się w południowej części niecki głównej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Mają charakter pokładowy i zapadają się monoklinalnie w kierunku północnym.

#### **3.2.1. Nadkład**

Nadkład nad warstwami karbonu stanowią utwory czwarto- i trzeciorzędu. Grubość nadkładu jest zmienna i kształtuje się od około 100 do około 600m przy południowej granicy obszarów górniczych. Poniżej, w tabeli 5 zestawione zostały charakterystyki utworów dla omawianych złóż (PROGEO, 1998; Carbo – Techmex, 2004).

Tabela 5. Charakterystyka utworów trzecio i czwartorzędowych w złożach KWK „Brzeszcze” i „Silesia”.

| Złoże            | Czwartorzęd                                                                                                           |                                                                                                                                                                   | Trzeciorzęd                                                                                                                                                                               |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | Plejstocen                                                                                                            | Holocen                                                                                                                                                           | Miocen                                                                                                                                                                                    |
| <b>SILESIA</b>   | Pokrywa całą powierzchnię obszaru górniczego<br>Miąższość – od około 5,5m w części centralnej do około 70m na północy |                                                                                                                                                                   | Pokrywa cały obszar górniczy, położony bezpośrednio na karbonie<br>Miąższość – zmienna, zależna od stropu karbonu produktywnego                                                           |
|                  | Ciągła warstwa piaszczysto – żwirowa, związana ze zlodowaceniem krakowskim                                            | Zmienne warstwy gruntów organicznych (namuły, torfy), gliny, piaski pylaste oraz drobnoziarniste                                                                  | Litologicznie – iły, szarozielone iły, iłołupki pylaste. Wkłádki pyłów i piaszczystych drobnoziarnistych. Południowa część obszaru górniczego – pod iłami piaszczystymi drobnoziarnistymi |
| <b>BRZESZCZE</b> | Pokrywa całą powierzchnię obszaru górniczego<br>Miąższość – od 7m w pobliżu Soły do około 40m w pobliżu Wisły         |                                                                                                                                                                   | Pokrywa cały obszar górniczy<br>Miąższość – uzależniona od powierzchni formacji karbońskiej, wypiętrzenia – rejon Grojeckiej Góry; średnia miąższość około 80m                            |
|                  | Postać żwirów różnoziarnistych, występuje głównie we wschodniej części złoża                                          | Postać piasków szarozielonych, pyłków pylasto piaszczystych i żółtych glin Zachód i wschód – bardzo piaszczysty, przechodzący w różnoziarniste, jasnoszare piaski | Litologicznie – iły, iłołupki szarozielone, spoiste, miejscami zapiaszczone oraz piaszczysty w postaci soczewek o ograniczonym zasięgu                                                    |

### 3.2.2. Karbon produktywny

Złoże KWK „Silesia” zostało udokumentowane do 1300m, zaś złoża KWK „Brzeszcze” do około 1000m. W obrębie złóż występują warstwy łaziskie, orzeskie, rudzkie, siodłowe i brzeżne (GIG 2000; PROGEO, 1998; Carbo – Techmex, 2004). Ich charakterystykę zestawiono w postaci tabeli 6.

Tabela 6. Charakterystyka warstw w złożu SILESIA i BRZESZCZE

| Warstwy  | Złoże SILESIA                                                                                                                                                                                                                                                   | Złoże BRZESZCZE                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Łaziskie | Odpowiednik górnego Westfalu B i C<br>Osady o przewodzie piaskowców z ławicami osadów mułowcowo – iłowcowych które towarzyszą pokładom węgla. Piaskowce i zlepieńce stanowią 76%<br>Zlokalizowano 19 pokładów węgla o grubości powyżej 0,8m w tym 7 bilansowych | Odpowiednik Westfalu C<br>Występują w północnej części złoża<br>Osady o przewodzie piaskowców drobno, średnio i gruboziarnistych; niska węgloność, nie zawierają bilansowych pokładów węgla                                                                                                        |
| Orzeskie | Występują na całym obszarze górniczym kopalni<br>Kompleks osadów klastycznych, utwory ilasto – mułowcowe z udziałem piaskowca (30%) i znacznym udziałem węgla oraz łupków węglowych (ponad 10%)                                                                 | Występują na całym obszarze górniczym kopalni – na południu najmłodsze ogniwo<br>Litologicznie – naprzemiennie iłowce i mułowce z przewarstwieniami piaskowca (20 – 30%), także syderyty; liczne cienkie pokłady węgla i łupka węglowego<br>Zlokalizowano 24 pokłady węgla o miąższości około 500m |
| Rudzkie  | Dzieli się na dwie części: dolna – charakter piaskowcowy (60%), górna – mułowce i piaskowce (20 – 30%)                                                                                                                                                          | 120 – metrowy kompleks iłowcowo piaskowcowy<br>Litologicznie – iłowce i piaskowce zwarte, ilaste lub ilasto - krzemionkowe                                                                                                                                                                         |
| Siodłowe | Występują na całym obszarze górniczym kopalni, stanowią dolną część serii piaskowcowej                                                                                                                                                                          | Kompleks piaskowcowy o grubości 20m; piaskowiec – drobno i średnio ziarnisty o spoiwie ilasto - krzemionkowym                                                                                                                                                                                      |
| Brzeżne  | W obrębie obszaru górniczego – stropowy obszar o grubości 200m<br>Litologicznie – kompleks iłowców i mułowców z wtrąceniami piaskowców oraz cienkimi pokładami węgla                                                                                            | Zlokalizowane poniżej pokładu 510<br>Litologicznie – iłowce, piaskowce, mułowce oraz nieliczne cienkie pokłady węgla 0,2 – 0,4m<br>Warstwy te można zaliczyć do warstw porębskich                                                                                                                  |

### 3.3. Odpady kopalniane

Przez odpady kopalniane rozumiemy skałę płonną towarzyszącą pokładom węgla kamiennego a także żużel będący pozostałością po wypalonym węglu. Poniższe rozdziały zawierają krótką charakterystykę wymienionych odpadów.

#### 3.3.1. Skała płonna

Kopalnia „Brzeszcze” jak i Kopalnia „Silesia” to kopalnie głębinowe węgla kamiennego. Aby wydobyć węgiel zalegający w złożu kilkaset metrów pod powierzchnią ziemi, muszą powstać wyrobiska górnicze, pozwalające dotrzeć do złoża, a następnie przygotować go do eksploatacji i w końcu realizować wydobywanie. Z tego punktu widzenia wyróżniamy wyrobiska udostępniające, przygotowawcze i eksploatacyjne.

Wyrobiska udostępniające to szyby, przecznice, przekopy i pochylnie. Wspólną ich cechą jest to, że są to wyrobiska kamienne, wykonane w skałe płonnej (w większości przypadków łupki i piaskowce) towarzyszącej pokładom węgla. Przecznice i przekopy kierunkowe dzielą złoża w płaszczyznach poziomych na tak zwane poziomy wydobywcze, zawierające kilka lub kilkanaście pokładów węgla nadających się do eksploatacji. Wyrobiska udostępniające mają za zadanie umożliwić dotarcie do konkretnego pokładu węgla, celem wykonania kolejnych wyrobisk tak zwanych przygotowawczych.

Wyrobiska przygotowawcze dokonują tak zwaną rozcinę pokładu, to znaczy w przypadku wydobywania węgla systemem ścianowym dzielą pokład zawarty pomiędzy poziomami wentylacyjnym a wydobywczym na ściany, czyli na wyrobiska w których odbywa się urabianie węgla. Wyrobiska przygotowawcze zwykle wykonywane są częściowo w pokładzie węgla, a częściowo w skałach stropu lub spągu pokładu czyli w skałe płonnej. Zależy to od sposobu drążenia chodników – czy z „przybierką” stropu lub spągu, czy też obu jednocześnie. Wyrobiska udostępniające i przygotowawcze liczą setki metrów a nawet dziesiątki kilometrów.

W zależności od przeznaczenia wyrobiska stosuje się obudowy z łuków podatnych, w rozmiarze ŁP – 8 lub ŁP – 10, których przekrój w świetle obudowy wynosi odpowiednio 13 i 18m<sup>2</sup>. Zatem możemy przyjąć, że 1mb wyrobiska to co najmniej 13-18m<sup>3</sup> urobionej skały co daje 26 - 36 ton. Obrazuje to jak ogromna ilość skały z samych wyrobisk chodnikowych musi być wytransportowana na powierzchnię i w odpowiednich miejscach składowana.

Oprócz wyrobisk chodnikowych w podziemiu kopalni niezbędne dla jej prawidłowego funkcjonowania są wyrobiska komorowe, wykonywane zwykle w skałach towarzyszących pokładom węgla. Są to więc wyrobiska kamienne o dużych gabarytach, przykładowo podszybia z dworcami dla pociągów osobowych i materiałowych, oraz różnego przeznaczenia komory.

Urobek skalny z tych podziemnych budowli również transportowany jest na powierzchnię i tam składowany. Widzimy więc, że kopalnia jeszcze nie rozpoczynając wydobywania węgla musi wytransportować na powierzchnię ogromne ilości skały płonnej bezużytecznej z punktu widzenia działalności kopalni; są to tzw. odpady.

Po wykonaniu wyrobisk chodnikowych udostępniających, przygotowawczych i niezbędnych wyrobisk komorowych można przystąpić do wybierania węgla z pokładu przygotowanego do eksploatacji. Urobiony węgiel zawiera zanieczyszczenia skałą płonną pochodzącą np. z opadu stropu, z przerostów pokładu skałą płonną, wycienieniami pokładu na określonym odcinku frontu ścianowego, materiałem skalnym pochodzącym z przybierok i przebudów chodników przyścianowych, taśmowych i innych prac.

Urobiony węgiel transportowany jest przenośnikami do zbiornika dozującego urządzenia skipowego. Po wyciągnięciu na powierzchnię, dozowany jest na przenośniki transportujące urobek do zakładu przeróbczego. W zakładzie przeróbczym węgiel surowy jest poddawany procesom wzbogacania i klasyfikacji. W procesie wzbogacania następuje oddzielenie węgla od skały płonnej. Oddzielona skała płonna przekazywana jest przenośnikami do zbiorników kamienia, skąd jest ładowana na odpowiednie środki transportu (wagony, samochody) i przewożona na miejsce składowania. Czysty – wzbogacony węgiel odpowiednimi przenośnikami transportowany jest na przesiewacze, gdzie następuje rozdział na klasy ziarnowe zgodnie z normami handlowymi.

Kopalnia Brzeszcze od uruchomienia w 1907r do 2010r wydobyła łącznie około 160 milionów ton węgla. Według danych zawartych w Krajowym Planie Gospodarki Odpadami Uchwała nr 219 Rady Ministrów z dnia 29 października 2002r. w sprawie Krajowego Planu Gospodarki Odpadami, na jedną tonę wydobytego węgla przypada łącznie 0,4 tony odpadów. Wynika stąd, że w KWK „Brzeszcze” w okresie jej funkcjonowania wydobyto i ulokowano na jej obszarach  $160 \times 0,4 = 60$  milionów ton skał. Szacuje się, że KWK „Silesia” w okresie działalności, to znaczy od uruchomienia jej w 1906r do 2010r. wydobyła około 65 milionów ton węgla, czyli odpady skały płonnej wynoszą  $65 \times 0,4 = 26$  milionów ton.

Pierwotnie odpady skały płonnej składowano na wysypiskach, tak zwanych hałdach. Obecnie składa się je podpoziomowo, to znaczy zasypuje niecki osiadania powstałe na powierzchni w wyniku wybierania węgla. Tak wielkie ilości kamienia wydobywane przez kopalnie spowodowały, że duża część obszaru górniczego kopalń zarówno Brzeszcze jak i Silesia została nasycona tymi odpadami. Dodatkowo przyczynił się do tego fakt wykorzystywania odpadów kopalnianych w budownictwie drogowym i przeciwpowodziowym.

### **3.3.2. Żużel**

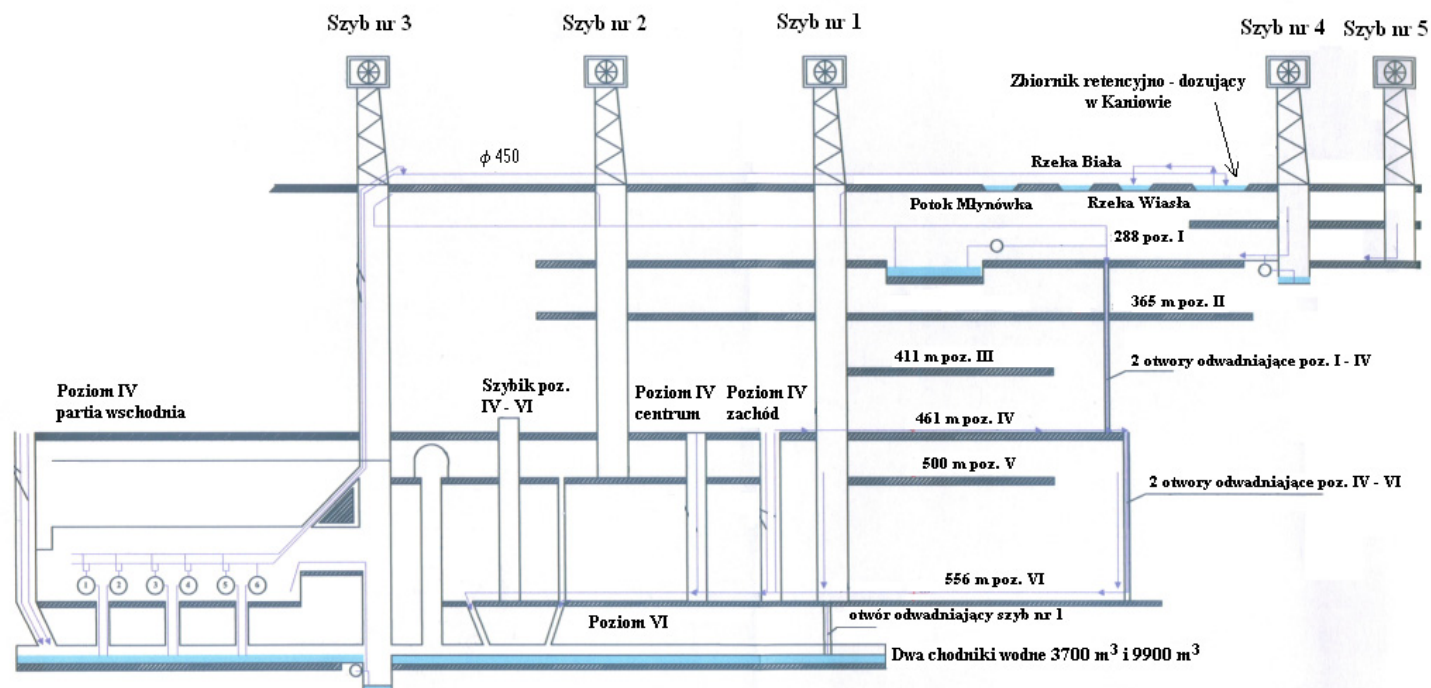
W latach 60 ubiegłego wieku w budownictwie indywidualnym na terenie Brzeszcz i okolicy bardzo popularnym materiałem budowlanym był żużel otrzymywany z węgla kamiennego, którym opalane były kotły parowe kotłowni kopalnianej, produkujące parę dla celów technologicznych i grzewczych. Spalany węgiel w paleniskach kotłów miał postać twardych szklistych spieków. Mieszany z mleczkiem wapiennym i niewielką ilością cementu stanowił doskonały materiał na ściany budynków. Wykonywano z tego materiału pustaki lub bezpośrednio na fundamentach budynku stawiano formy, w których ubijano wcześniej sporządzoną mieszaninę. Na ówczesne czasy był to materiał tani, o dobrych cechach izolacyjnych „łatwy i szybki” w budowie ścian domów. Te cechy spowodowały że był w powszechnym użyciu. Wybudowano dziesiątki domów, które są w dobrym stanie i nadal są zamieszkałe.

### **3.4. Wody kopalniane i zagrożenie wodne kopalń**

Wydobywanie węgla związane jest z koniecznością ciągłego drażenia różnorodnych podziemnych wyrobisk służących określonym celom technologicznym, w których muszą pomieścić się ludzie i sprzęt konieczny do działalności produkcyjnej. Na skutek zawodnienia skał towarzyszących pokładowi węgla (przede wszystkim odnosi się to do piaskowców i stref uskokowych), następuje ciągły dopływ wody do wyrobisk. W zależności od stopnia zawodnienia górotworu intensywność dopływu wody może być różna. Według PIB (baza danych MIDAS, 2003) kształtuje się ona od 0,64 do 52,8 m<sup>3</sup>/min. Dla kopalni „Brzeszcze” wynosi ona 9 m<sup>3</sup>/min a dla KWK „Silesia” 3,3 m<sup>3</sup>/min. Woda z wyrobisk musi być sukcesywnie usuwana i wypompowywana na powierzchnię ponieważ stanowi poważne

zagrożenie dla życia górników oraz dla ruchu zakładu górniczego. W historii kopalń węgla odnotowano kilka tragicznych wypadków wdarcia się wody do podziemia kopalni, skutkujących wypadkami śmiertelnymi. I tak przykładowo w kopalni „Brzeszcze”, w roku 1953 nastąpiło zatopienie nowo wybudowanego poziomu wydobywczego 430m, na szczęście bez ofiar w ludziach. Dlatego też odwadnianie jest jednym z warunków koniecznych, pozwalających na bezpieczne wydobywanie węgla z kopalń głębinowych. W podziemnych zakładach górniczych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 14 czerwca 2002r w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych, zostały ustalone trzy stopnie zagrożenia wodnego. Zależą one od warunków hydrogeologicznych złoża. Z wnioskiem o zaliczenie złoża lub jego części do odpowiedniego stopnia zagrożenia występuje kierownik ruchu zakładu górniczego do właściwego organu nadzoru górniczego. Złoże KWK „Brzeszcze” zaliczone jest do I i II stopnia zagrożenia wodnego a złoże KWK „Silesia” w całości do I stopnia zagrożenia wodnego.

Odwadnianie kopalni najogólniej ujmując, wymaga sprowadzenia wód z miejsc wypływu do pompowni głównej, skąd woda pompowana jest na powierzchnię a następnie z reguły odprowadzana do rzek. Pompownia główna lokalizowana jest na poziomie o największym dopływie wody. Woda z innych poziomów sprowadzana jest specjalnie wykonanymi otworami lub pochylniami (dotyczy to poziomów wyżej leżących), a w przypadku poziomów niżej leżących przepompowywana jest na poziom wyższy. Najbardziej ekonomicznym sposobem sprowadzania wód z miejsc wypływu jest sposób grawitacyjny. W tym celu główne chodniki transportowe i przekopy wykonywane są ze spadkiem wynoszącym 3-5 promili (w zależności od ilości zawiesiny w wodzie) w kierunku szybu. Woda płynie specjalnie wykonanymi ściekami zapewniającymi czystość spągu w tych wyrobiskach i kierowana jest do zbiorników wodnych. Zwykle wykonuje się dwa zbiorniki wodne. Podczas gdy jeden jest czynny, drugi zwykle jest wyłączony z ruchu i czyszczony z nagromadzonych osadów. Wymagana pojemność zbiorników wodnych uzależniona jest od ilości dopływającej wody i regulowana jest odpowiednimi przepisami. Schemat odwadniania kopalni Silesia przedstawiono na rysunku 2.



**Schemat głównego odwadniania KWK "Brzeszcze - Silesia" Ruch Silesia**

*Rys.2. Schemat odwadniania kopalni Silesia*

Wody kopalniane ze wszystkich poziomów kierowane są do zbiorników wodnych pompowni głównego odwadniania zlokalizowanych w rejonie podszybia szybu wydobywczego nr.3, na najniższym czynnym, VI poziomie wydobywczym, na głębokości 556m od zrębu szybu. Jeden zbiornik posiada pojemność 3700 m<sup>3</sup>, a drugi 9900 m<sup>3</sup>. Poziomy II i III są poziomami nieczynnymi, a poziom V jest poziomem wentylacyjnym. Poziomami na których istnieje ciągły dopływ wody do kopalni są:

poziom I – 0,506 m<sup>3</sup>/min,  
poziom IV – 1,556 m<sup>3</sup>/min,  
poziom V – 0,024 m<sup>3</sup>/min,  
poziom VI – 1,183 m<sup>3</sup>/min,  
Razem I – VI 3,309 m<sup>3</sup>/min,

Woda z poziomów I, IV, V na poziom VI odprowadzana jest grawitacyjnie za pomocą orurowanych otworów wiertniczych o średnicy 200 mm. Na poziomie VI woda z poszczególnych partii wyrobisk spływa ściekami wykonanymi w wyrobiskach transportowych. Łączny dopływ wody do podziemia kopalni „Silesia” wynosi 3,309 m<sup>3</sup>/min. Woda ze zbiorników jest transportowana na powierzchnię jednym z dwóch rurociągów o średnicy 350mm ułożonych w szybie nr 3, a następnie rurociągiem o średnicy 450mm ułożonym na powierzchni kopalni, kierowana jest do zbiornika retencyjno – dozującego wód kopalnianych Kaniów.

### **3.5. Ogólna charakterystyka zagrożeń dla środowiska naturalnego wynikające z działalności kopalń.**

Wody kopalniane prócz bezpośredniego zagrożenia dla kopalni są również zagrożeniem dla środowiska, do którego są odprowadzane. Zagrożenie to wynika przede wszystkim ze stopnia mineralizacji i składu chemicznego tych wód. Litologia warstw skalnych, głębokość występowania i czas przebywania wody w środowisku skalnym decydują o jej składzie chemicznym i stopniu mineralizacji. Wody podziemne wykazują szeroki wachlarz mineralizacji.

Ogólny stopień mineralizacji określa ciężar suchej masy osadu jaki pozostaje po odparowaniu w temperaturze 105°C jednego litra wody. Główny Instytut Górnictwa określa mineralizację

wód kopalnianych na podstawie sumy chlorków i siarczanów. Wydzielił cztery grupy wód dopływających do kopalni, a mianowicie:

Grupa I: wody o stężeniu  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{-2}$  do  $0,6 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$ ,

Grupa II: wody o stężeniu  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{-2}$  od  $0,6$  do  $1,8 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$ ,

Grupa III: wody o stężeniu  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{-2}$  od  $1,8$  do  $42 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$ ,

Grupa IV: wody o stężeniu  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{-2}$  powyżej  $42 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$

Przyjmuje się, że wody słonawe posiadają zasolenie od  $1,5$  do  $10 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$ , a wody słone powyżej  $10 \frac{\text{g}}{\text{dm}^3}$ .

Wody kopalniane charakteryzują się zróżnicowanym składem. Na niewielkich głębokościach eksploatacyjnych wody zawierają niewielkie stężenia chlorków ale duże stężenia siarczanów, natomiast na poziomach  $400\text{m}$  i poniżej ich mineralizacja jest odwrotna. Wody dołowe mogą zawierać również bar i stront – wtedy zwykle pozbawione są siarczanów. Z takim przypadkiem mamy do czynienia w KWK „Silesia”. W przypadku KWK „Brzeszcze” wody słodkie występują jedynie na głębokościach powyżej  $230\text{m}$ .

W wodach kopalnianych obserwuje się również znaczące stężenia pierwiastków promieniotwórczych, zwłaszcza radu  $^{226}\text{Ra}$  z szeregu uranu  $^{238}\text{U}$  i  $^{228}\text{Ra}$  z rodziny torowej. Sumaryczna aktywność izotopów radu wynosi do  $400 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3}$  w wodach dołowych, a w wodach odprowadzanych na powierzchnię do  $20 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3}$ . Różnica ta wynika z mieszania się wód radowych z innymi wodami złożowymi, oraz wytrącania radu w wyrobiskach górniczych. Stwierdzono, że tylko  $40\%$  radu zawartego w wodach kopalnianych pozostaje na dole kopalni, a  $60\%$  zostaje wypompowane na powierzchnię, powodując skażenie środowiska przyrodniczego (Smoliński, 2006). Na podstawie danych Pluty (1996) oraz własnych obliczeń wykonanych dla prób pobranych z wlotu do zbiornika Kaniów można stwierdzić, że proporcja cytowana przez Somińskiego (2006) dla Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia” jest następująca –  $25\%$  radu zostaje wypompowana a  $75\%$  zostaje na dole kopalni.

W kopalniach węgla kamiennego w Polsce wprowadzono podział na dwa typy wód radowych, które różnią się składem chemicznym. Wody typu A zawierają rad i jony baru często w stężeniach  $2 \frac{kg}{m^3}$ , a nie zawierają jonów siarczanowych. Wody typu B zawierają duże ilości jonów siarczanowych, a nie zawierają jonów baru. Kiedy wody typu A mieszają się z wodami zawierającymi siarczany następuje współstrącenie radu na osadzie siarczanu baru (barytu). Proces ten zachodzi w sposób niekontrolowany i może przebiegać w wyrobiskach dołowych, rurociągach podających wodę na powierzchnię jak również w osadnikach wód czy ciekach wodnych. Osady promieniotwórcze powstałe na dole kopalni stwarzają zagrożenie radiacyjne dla górników, a na powierzchni powodują skażenie środowiska.

Wody typu B nie zawierają jonów baru więc nie następuje z nich wytrącanie siarczanu radu. Wody takie zawierające rad mogą być tylko rozcieńczane, a rad może stopniowo ulegać powolnej sorpcji w obrębie osadów dennych kopalnianych zbiorników retencyjno – dozujących lub rzek, do których woda ta zostaje odprowadzona. Taka sytuacja powoduje rozległe skażenie cieków wodnych, do których następuje zrzut słonych wód kopalnianych.

#### **4. Charakterystyka zbiorników retencyjno – dozujących.**

Na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku pojawił się problem związany z czystością wód rzeki Wisły na odcinku pomiędzy miastami Czechowice – Dziedzice i Brzeszcze. Wynikał on pierwotnie z ilości zawiesiny i silnego zasolenia wód zrzucanych przez kopalnie, co skutkowało przekroczeniem dopuszczalnych norm zasolenia wód powierzchniowych. Na wspomnianym odcinku stan wody w Wiśle uległ tak daleko idącej degradacji, że wody te praktycznie pozbawione były życia biologicznego i stały się w zasadzie ściekiem. Dla poprawy tego stanu rzeczy zaczęto budować oczyszczalnie ścieków dla poszczególnych miejscowości, a okoliczne zakłady przemysłowe musiały spełniać określone warunki dotyczące poszczególnych parametrów zrzucanych do rzeki wód.

W przemyśle węglowym, dla kopalń zlokalizowanych w pobliżu koryta rzeki Wisły, (Silesia, Brzeszcze, Ziemowit, Piast, Czeczott) analizowano kilka wariantów ochrony środowiska przed nadmiernym zanieczyszczeniem. Rozważano przesyłanie wód kopalnianych wspólnym rurociągiem do Wisły poza Krakowem do miejscowości Przewóz, a także budowę wspólnych osadników dla kilku kopalń. Przeważała jednak koncepcja budowy zbiorników retencyjno – dozujących dla każdej z kopalń oddzielnie. W takim osadniku wody kopalniane będą oczyszczane grawitacyjnie z zawiesiny i w określonych warunkach zrzucane do rzek, tak aby nie przekroczyć ustalonych parametrów wody poniżej miejsca zrzutu.

##### **4.1. Zbiornik Brzeszcze**

Zbiornik Brzeszcze jest zbiornikiem o konstrukcji ziemnej. Stan obecny osiągnął po gruntownej rekonstrukcji i modernizacji pierwotnie wybudowanego zbiornika (Carbo – Techmex, 2002). Jego przeznaczeniem była eliminacja zawiesiny, którą w przeważającym stopniu stanowił muł węglowy, kierowany z wodami popłuczkowymi i dołowymi do osadników. Tam następowało jego wytrącenie a sklarowana woda odprowadzana była do rzeki Wisły. Pierwotnie zbiornik stanowiły 3 osadniki o łącznej pojemności około 70000 m<sup>3</sup>, zlokalizowane w południowo – wschodnim narożu obecnego zbiornika. Osadniki te po napełnieniu mułem były czyszczone.

W 1976 roku w zakładzie przeróbczym Kopalni Węgla Kamiennego „Brzeszcze” wybudowano osadnik Dorra (zamknięty obieg wód), skutkiem czego 3 osadniki przestały spełniać rolę osadników mułów popłuczkowych. Dla celów retencji wód słonych zbiorniki te

miały zbyt małą pojemność. Wyniknęła więc potrzeba budowy nowego zbiornika o odpowiedniej pojemności. Pomijając prace przygotowawcze (projektowe, administracyjne), zbiornik budowano w latach 1975 – 1979. Groble wykonano z miejscowego materiału ziemnego, pozyskanego z dna zbiornika. Skarpa od strony wody uszczelniona została ekranem z folii poliestrowej i obudowana gruboziarnistą warstwą skały płonnej pozyskanej z miejscowej hałdy. Od strony lądu podnóże skarpy zabezpieczone jest drenażem filtracyjnym.

Sztuczne obwałowanie zbiornika wykonano od strony wschodniej, południowej i zachodniej. Tak wykonany zbiornik posiadał pojemność użytkową  $983000 \text{ m}^3$ . Na skutek eksploatacji złoża węgla kamiennego w obrębie zbiornika, jego południowo – wschodnia część stopniowo zapadała się. Spowodowało to utratę pojemności zbiornika – w roku 1985 wynosiła ona jedynie około  $450000 \text{ m}^3$ . Wybieranie kolejnych pokładów węgla pod zbiornikiem wymusiło jego modernizację, którą wykonano w latach 1985 – 1990. W okresie tym zbiornik nie miał funkcji retencyjno – dozującej, a zrzut wód słonych odbywał się w sposób ciągły w formie przelewu.

Modernizacja polegała na podwyższeniu obwałowań. Do nadbudowy użyto skały płonnej układanej warstwami grubości 0,5m i zagęszczanej. Istniejący ekran z folii połączono z nowym, a rzędną maksymalnego poziomu wody podniesiono o około 1m. Odprowadzanie wody ze zbiornika odbywa się w sposób grawitacyjny, przy pomocy upustu dennego. Zrekonstruowany zbiornik retencyjno – dozujący posiada pojemność  $1156000 \text{ m}^3$  i powierzchnię 27,5ha a jego średnia głębokość wynosi 5,7m.

Należy dodać, że w roku 2012 ponownie podwyższone zostały obwałowania zbiornika od strony wschodniej i południowej, gdyż ciągła eksploatacja węgla pod zbiornikiem (obecnie pokład 510 o grubości 3m) spowodowała dalsze obniżanie się tej części obwałowania. Obecnie w części południowej grobla zbiornika styka się ze zwałowiskiem skały płonnej, lokowanej przez kopalnię na tym terenie, ze względu na konieczność likwidacji niecki związanej z wybieraniem węgla w tej części obszaru górniczego.

Zbiornik w części północnej, zachodniej oraz częściowo wschodniej w pasie przybrzeżnym porośnięty jest trzciną wodną, co świadczy że do zbiornika wpływa woda słodka transportująca cząstki gleby z pól uprawnych położonych powyżej zbiornika. Możliwy jest też niewielki dopływ słodkich wód podziemnych, gdyż przed wykonaniem zbiornika w tej części znajdowało się źródło wody wykorzystywane przez mieszkańców.

Zadaniem zbiornika retencyjno – dozującego jest gromadzenie słonych wód dołowych wypompowywanych z dołu kopalni. Wody te są zbierane w zbiorniku wtedy, gdy poziom

wody w Wiśle jest niski lub stężenie jonów  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4$  w rzece w czasie zrzucania wód mogłoby przekroczyć  $500 \text{ mg/dm}^3$



*Rys.3. Zbiornik Brzeszcze, widok przed podwyższeniem obwałowań (ze zbiorów autorki)*

#### **4.2.Zbiornik Rontok Duży**

Zbiornik Rontok Duży został wybudowany w 1974 roku w miejscu dawnego stawu rybnego, w rozległej rynnie o spadku w kierunku koryta rzeki Wisły (WASKO, 1995; GiG, 1998). Teren od strony północnej, jak również częściowo północno – wschodniej i północno – zachodniej stanowi naturalne wzniesienie, które połączono z wybudowanym od strony południowej obwałowaniem. Od strony wschodniej, w jej środkowej części, na odcinku 250 m wykonano groblę tworząc niewielki zbiornik wodny dla schładzania wód układu chłodzącego maszyn (sprężarki, wentylatory) pracujących w Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia”.

Wszystkie obwałowania wykonano ze skały płonnej pozyskanej w procesie wydobywania węgla. Jest to więc typowy zbiornik ziemny, bez dodatkowych uszczelnień dna i obwałowań. W obwałowaniu części południowej wykonano upust denny połączony z kanałem zrzutowym odprowadzającym wody zbiornika do rzeki Wisły. Wlot wody słonej do zbiornika znajdował się w jego południowo – wschodnim narożniku. W części południowej, od wlotu, na długości około 300m zbiornik styka się bezpośrednio ze zwałowiskiem skały płonnej, które na tym odcinku faktycznie stanowi obwałowanie zbiornika. Przy tak wykonanym obwałowaniu zbiornik Rontok Duży zajmuje powierzchnię 40ha i ma pojemność około 1900000m<sup>3</sup> przy maksymalnym dopuszczalnym napełnieniu.

Około 400m od zbiornika, na południowym zachodzie, znajduje się złoża borowiny wykorzystywane do celów leczniczych w sanatorium w Goczałkowicach i w związku z tym podlegające ścisłej ochronie. Od początku budowy zbiornika retencyjno – dozującego kopalnianych wód słonych zachodziła obawa, że złoża to zostanie zniszczone przez wody kopalniane. Przeprowadzone ekspertyzy potwierdziły te obawy. Podjęto więc środki zapobiegawcze - z części południowo zachodniej zbiornika Rontok Duży wydzielono około 11ha na tak zwany zbiornik buforowy wody słodkiej, który od zbiornika Rontok oddzielono groblą wykonaną ze skały płonnej. Zbiornik buforowy ma za zadanie przeciwdziałać infiltracji wód słonych do wód podziemnych a tym samym do złoża borowiny. Ponadto podjęto decyzję, że zbiornik Rontok Duży będzie pełnił jedynie funkcję osadnika zawiesiny kopalnianej. W wyniku tej decyzji zbiornik działał przy stale otwartym upuście dennym (wody w zbiorniku nie były piętrzone). Taka sytuacja spowodowała konieczność budowy nowego zbiornika retencyjno – dozującego wód kopalnianych, gdyż wykonane analizy wykluczyły możliwość rekonstrukcji istniejącego zbiornika. Po ukończeniu budowy zbiornika Kaniów, w 2002 roku, zbiornik Rontok Duży wyłączono z eksploatacji. Obecnie spełnia on rolę zbiornika retencyjnego dla terenów wyżej położonych, zwłaszcza leżących w kierunku północnym. W okresie wiosenno jesiennym jest on obficie zasilany wodami powierzchniowymi. Wody te niosą ze sobą znaczną ilość gleby wymywanej z pól uprawnych. Skutkiem tego rozrasta się roślinność wodna, zwłaszcza trzcina, która zajmuje już znaczne obszary zbiornika. Dopływ wody powierzchniowej oraz opady powodują także stopniowe wysładzanie się zbiornika



*Rys.4. Zbiornik Rontok Duży, widok ogólny od strony byłego wlotu (ze zbiorów autorki)*

#### **4.3.Zbiornik Kaniów**

Zbiornik retencyjno – dozujący Kaniów zlokalizowany jest w widłach rzek Wisły i Białej, w odległości około 50 do 100m od prawego brzegu Wisły i około 200m od lewego brzegu rzeki Białej. Pod budowę zbiornika kopalinianych wód słonych wykorzystano północną część osadnika mułów popłuczkowych o powierzchni 6,15ha. Zbiornik wykonano w specyficznych warunkach glebowych i materiałowych – uformowany został w całości na gruncie utworzonym przez skałę płonną i muł popłuczkowy które składowane były na tym terenie (CARBONTECHMEX, 2000).

Obwałowanie od strony południowej stanowi zwałowisko skały płonnej, odpowiednio uformowane. Część składowiska nadpoziomowego – tzw. stożek, została zebrana i zniwelowana do rzędnej obwałowań a od strony zbiornika uformowana w skarpe. Od strony północnej zaś jest to wał przeciwpowodziowy rzeki Wisły, który w części wschodniej łączy się z obwałowaniem zbiornika mułów popłuczkowych. W części zachodniej wykonano

obwałowanie ze skały płonnej, które obecnie styka się z czynnym zwałowiskiem tej skały i jest na wysokości obwałowania zbiornika.

Formowanie dna zbiornika polegało na pozostawieniu warstwy mułów popłuczkowych zagęszczonych skałą płonną i wzmocnionych geosiatką. Na niej ułożono drenaż z rur PCV mający za zadanie przechwytywanie wód: słonych - przenikających ze zbiornika, gruntowych - napierających na jego dno, z osadnika mułów popłuczkowych oraz wód ze składowiska skały płonnej stykającego się bezpośrednio ze zbiornikiem.

Integralną częścią zbiornika jest komora mieszania, której zadaniem było rozcieńczanie wód słonych z wodami słodkimi tak, aby spełniały wymogi II klasy czystości. W trakcie eksploatacji zbiornika komora mieszania została wyłączona z użytku i nie spełnia swojej pierwotnej funkcji.

Woda ze zbiornika odprowadzana jest do Wisły, kanałem o długości około 300m i szerokości dna 1m.

Opisany powyżej zbiornik Kaniów posiada następujące parametry techniczne:

- Powierzchnia całkowita zajmowana przez zbiornik – 6,15 ha,
- Powierzchnia obwałowania zbiornika i komory mieszania – 16500 m<sup>2</sup>,
- Powierzchnia dna zbiornika - 42500 m<sup>2</sup>,
- Powierzchnia lustra wody – 5,65 ha,
- Średnia głębokość – 4,5 m,
- Pojemność maksymalna zbiornika – 254250 m<sup>3</sup>,
- Rzędna maksymalnego piętrzenia wody - +246,00 m npm,
- Rzędna korony obwałowania - +247,5 m npm.



*Rys.5. Zbiornik Kaniów, widok ogólny od strony wlotu (ze zbiorów autorki)*

## 5. Zarys geochemii pierwiastków radioaktywnych

W geochemii radioaktywnych pierwiastków zasadnicze znaczenie mają procesy krystalizacji magmowej, w których wyodrębnia się proces hydrotermalny oraz procesy zachodzące na powierzchni skorupy ziemskiej, określane jako procesy hipergeniczne. Procesy te zostały opisane przez Ibragimowa (2009) oraz Arbuzowa i Rihwanowa (2009).

Etap krystalizacji magmowej charakteryzuje różnicowanie czyli dyferencjację magmy, powodującą tworzenie się w obrębie skorupy ziemskiej stopów krzemianowych. W procesie krystalizacji magmy wyróżniamy trzy etapy podczas których wydzielane są minerały: etap pierwotny (protokrystalizacja), główny (mezokrystalizacja) i ostateczny pegmatytowy (ciałokrystalizacja).

W pierwotnym etapie z płynnej magmy krystalizują rudy minerałów: magnetytu, apatytu, limonitu i innych. Równocześnie wydzielają się też bardzo rzadkie pierwiastki, dwu lub czterowartościowe takie jak chrom, nikiel, platyna czy siarka. W głównym etapie z magmy wydzielają się krzemiany – kwarc i mika, które bardzo często spotyka się w przyrodzie. W głównym etapie krystalizacji wydzielają się pierwiastki takie jak: lit, beryl, tantal, niob. W ostatnim etapie lotne składniki wydzielając się z granitowej magmy okrążając skały gromadzą się w pustkach i szczelinach, dając początek pegmatytowym i hydrotermalnym procesom. Zasadniczą cechą końcowego etapu krystalizacji są różnorodne mineralogiczne formy i pierwiastki chemiczne w jej końcowych produktach, to jest granitach i pegmatytach.

W dwóch pierwszych etapach krystalizacji uran i tor zachowują się jednakowo. Oba te pierwiastki są czterowartościowe, nie tworzą samodzielnych minerałów i występują tylko w postaci izomorficznych domieszek w cyrkonie, apatycie, tytanie oraz w niektórych innych minerałach o podobnych promieniach jonowych. Wydzielanie pierwszych uranowych i uranowo – torowych minerałów takich jak uraninitu, breggeritu będącego odmianą uraninitu wzbogaconego w tor (Geffroy i Sarcia, 1960) i innych, związane jest z ostatnim etapem krystalizacji. Na tym etapie zachowanie uranu i toru zaczyna się różnić. Część uranu dającego lotne związki halogenków migruje do hydrotermalnych roztworów. W tym czasie druga część oraz tor dąży do wydzielenia się w postaci izomorficznej mieszaniny z optokrzemianami, cyrkonami i apatytami lub też wchodzi w pegmatytowe płynne masy granitów.

Zawartość uranu w skorupie ziemskiej wynosi od 3 do  $4 \cdot 10^{-4}$  % wagowych, zaś toru -  $8 \cdot 10^{-4}$  % wagowych. (Niesmiejnow, 1975)

Różnicowaniu magmy towarzyszą procesy pneumatolityczne przy temperaturze powyżej 400°C i hydrotermalne zachodzące w dużo niższych temperaturach. Ze środowiskiem hydrotermalnym związane jest tworzenie się rzadkich metali i pierwiastków promieniotwórczych. Wytrącanie związków uranowych w procesach hydrotermalnych ma miejsce we wszystkich jego stadiach. W porównaniu z pegmatytami, żyły hydrotermalne są bogatsze w uran i są jednym z zasadniczych źródeł jego przemysłowego pozyskiwania.

Tor, którego związki są praktycznie nierozpuszczalne w wodzie, w hydrotermalnych procesach udziału nie bierze. Jednak w obecnym czasie stwierdzono, że w niektórych hydrotermalnych formacjach tor spotykamy w postaci monacytu lub w różnych odmianach torytu.

Pod pojęciem procesów hipergenicznych rozumiemy całość procesów zachodzących na powierzchni ziemi, które zmieniają skały i ich minerały. Warunki takie jak niskie temperatury, ciśnienie, obecność swobodnego tlenu czy kwasu węglowego powodują, że na powierzchni ziemi skały te okazują się mało stabilne i mają tendencję do przejścia w inne, bardziej stabilne. Zaczyna się intensywny proces ich wietrzenia i rozpadu. Migracja pierwiastków w stanie hipergenezy osiąga maksymalną wielkość. Końcowym wynikiem jest rozproszenie, a później koncentracja w skałach osadowych pierwiastków tworzących rudy i złoża minerałów.

Trudno rozpuszczalne związki czterowartościowego toru w wodach naturalnych mają bardzo niskie koncentracje. Wynika stąd, że ta część która rozpuściła się w wodach powierzchniowych i gruntowych w warunkach utleniających osadza się wraz z wodnymi osadami. Rola wody w geochemii toru i uranu w strefie hipergenicznej sprowadza się do środka transportu w jego migracji. Czterowartościowy uran tak jak i tor nie tworzy rozpuszczalnych w wodzie związków. W warunkach utleniających uran przechodzi w formę sześciowartościową i jego minerały tworzą bardzo dobrze rozpuszczalne związki (np. kompleksy węglanowe czy fosforanowe), mogące migrować na znaczne odległości. Przy rozpadzie produktów krystalizacji magmy proces rozpuszczania pierwotnych minerałów uranowych przebiega mniej intensywnie. Znacząca część uranu pozostaje nierozpuszczona i ulega rozproszeniu w produktach wietrzenia.

Procesy usuwania uranu z wodnych roztworów związane są z jego osadzaniem w postaci nierozpuszczonych związków lub z procesami adsorpcji i współstrącenia, szczególnie intensywnie przebiegającymi na glinach, osadach organicznych, uwodnionych osadach żelaza, aluminium, manganu i krzemu. Najbardziej sprzyjającymi warunkami do osadzania

się uranu są kwaśne roztwory zawierające części organiczne i siarczki. Brak związków o kwaśnym charakterze (początkowe warunki diagenety) powoduje, iż sześciowartościowy jon uranu przechodzi w czterowartościowy, którego rozpuszczalność w środowisku wodnym jest znacznie mniejsza.

Głównym czynnikiem skupiającym tor w strefie hipergenezy jest obecność minerałów skoncentrowanych w strefie produktów wietrzenia lub w skałach klastycznych. Dla uranu i radu takimi minerałami są gliniaste koloidy, niektóre związki organiczne i minerały fosforanowe.

Geochemia radioaktywnego izotopu potasu  $^{40}\text{K}$  nierozłącznie związana jest z zachowaniem się jego stabilnego izotopu  $^{39}\text{K}$  i dlatego też specjalnie się jej nie rozpatruje. Maksymalna koncentracja potasu w skałach osadowych wiąże się z występowaniem pokładów soli potasowych. Potas często występuje wspólnie z innymi radioaktywnymi pierwiastkami. W strefie hipergenezy ulega on zateżnieniu w obecności utworów gliniastych, które intensywnie sorbują jon potasu i wiele ciężkich metali, także uran i rad. Ogromne ilości gliny przenoszone są rzekami do mórz i oceanów. Wody bogate w elektrolity powodują jej wytrącanie i osadzanie. Część z wytrąconej gliny osadza się znacznie później, w dużej odległości od brzegów, tworząc morskie ily z których powstają łupki ilaste. Koagulacja cząstek adsorbujących rozpuszczone w wodzie jony jest głównym czynnikiem osadzania uranu, toru i potasu z wody morskiej. W tym upatruje się powodów obserwowanej czasami podwyższonej radioaktywności skał osadowych, a jej stopień wiąże się z zawartością substancji ilastych w ich składzie. Wpływ materii organicznej w procesie zateżniania uranu związany jest nie tylko z jej zwiększonymi właściwościami sorpcyjnymi, ale także z rozkładem substancji roślinnych i zwierzęcych, skutkującym redukcją uranu sześciowartościowego do nierozpuszczalnej formy czterowartościowej.

Promieniotwórczy produkt rozpadu uranu – rad, w czystej postaci jest dość miękkim metalem o srebrzystym kolorze. Znane są cztery naturalne izotopy radu:  $^{223}\text{Ra}$  z szeregu uranowo – aktynowego o czasie połowicznego zaniku 11,4 dnia,  $^{224}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  z szeregu torowego, o czasach rozpadu kolejno 3,6 doby i 5,75 lat oraz  $^{226}\text{Ra}$  z szeregu uranowo – radowego, którego czas połowicznego zaniku wynosi 1600 lat.

Rad należy do grupy berylówców stanowiących pierwiastki ziem alkalicznych. Właściwościami chemicznymi przypomina bar. Podobnie jak wszystkie pierwiastki ziem alkalicznych, rad posiada jeden stopień utlenienia wynoszący +2. Jest mało skłonny do tworzenia kompleksów, a w roztworach wodnych występuje w postaci jonów  $\text{Ra}^{2+}$ . Słabo

rozpuszczalnymi związkami radu są siarczany, węglany, fosforany, chromiany, fluorki i szczawiany, zaś dobrze rozpuszczają się w wodzie chlorki, bromki i jodki. Jak wynika z jego charakterystyki mobilność radu różni się od mobilności uranu w środowisku wodnym, co często prowadzi do naruszenia równowagi promieniotwórczej. Geochemiczne znaczenie mają tylko najbardziej długozyciowe izotopy radu, to jest  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ . Izotopy radu odznaczają się bardzo niskimi koncentracjami w przyrodzie (na poziomie  $10^{-10}\%$ ). Niskie koncentracje w wodach określają zachowanie izotopów radu charakterystyczne dla radionuklidów w skrajnie rozcieńczonych roztworach. W obecności reagenta (bar) rad zachowuje się zgodnie ze swoimi geochemicznymi właściwościami. Jeżeli koncentracja baru w wodach jest znikoma, atomy radu zachowują się jak typowe radiokoloidey. Mogą adsorbować się na bliskich, ujemnie naładowanych powierzchniach fazy ciała stałego (np. skały tworzące ściany zbiorników wodnych) bądź współosadzać się z wodorotlenkami metali. W masywach skał magmowych koncentrację izotopów radu determinuje koncentracja uranu i toru. Wyjątek stanowią młode skały wulkaniczne dla których nierzadko obserwuje się wzbogacenie w  $^{226}\text{Ra}$  w stosunku do  $^{238}\text{U}$ , bądź w  $^{228}\text{Ra}$  w stosunku do  $^{232}\text{Th}$ .

Zachowanie radu w układach hydrotermalnych można prześledzić na przykładzie współczesnych hydroterm, biorąc pod uwagę warunki utleniające środowiska. Rad przechodzi w hydrotermalne roztwory stref aktywnego wulkanizmu z gazami wulkanicznymi w postaci  $\text{Ra}(\text{Ba})\text{Cl}_2$ . Na utleniającej barierze, w strefie którą określa obecność siarczanów, następuje osadzenie  $\text{Ra}(\text{Ba})\text{SO}_4$  w porach i szczelinach wulkanicznych skał. W rezultacie na powierzchni wody mamy skrajnie niskie koncentracje radu, a w strefie osadzania siarczanu baru wzbogacenie w rad w miejscach nazywanych kolektorami. O obecności takich kolektorów u ujścia współczesnych hydroterm, na niewielkiej głębokości świadczy wysoka koncentracja produktu rozpadu radu – radonu, która niekiedy setki razy przewyższa tło niezależnie od koncentracji uranu w skałach.

Rad jest pierwiastkiem łatwo podlegającym procesom ługowania ze skał do środowiska wodnego. W pozbawionych siarczanów wodach granitowych masywów nie zawierających koloidów, koncentracja radu może być wielokrotnie wyższa od jego koncentracji w wodach powierzchniowych. W strefie kontaktu wód „szczelinowych” i wód gruntowych zachodzi wzbogacanie ich cząstkami koloidalnymi, podwyższenie pH oraz sorpcja radu na ściankach wodonośnych szczelin. Cząstki z zaadsorbowanym radem sedymentują w formie osadów ilastych w miejscu wypływu wód ze szczelin skalnych.

Osobne miejsce w geochemii radu zajmują roztwory chlorkowo – sodowo – wapniowe oraz strefy kontaktów z osadami zawierającymi węglowodory. Chlorkowo – sodowe, wysokozmineralizowane roztwory ługują ze skał wodonośnych duże ilości metali, między innymi rad i bar. Powoduje to, że tego typu wody bywają wzbogacone w rad nawet 100 – 10000 razy w porównaniu z wodami siarczanowymi pochodzącymi spoza rejonu ługowania.

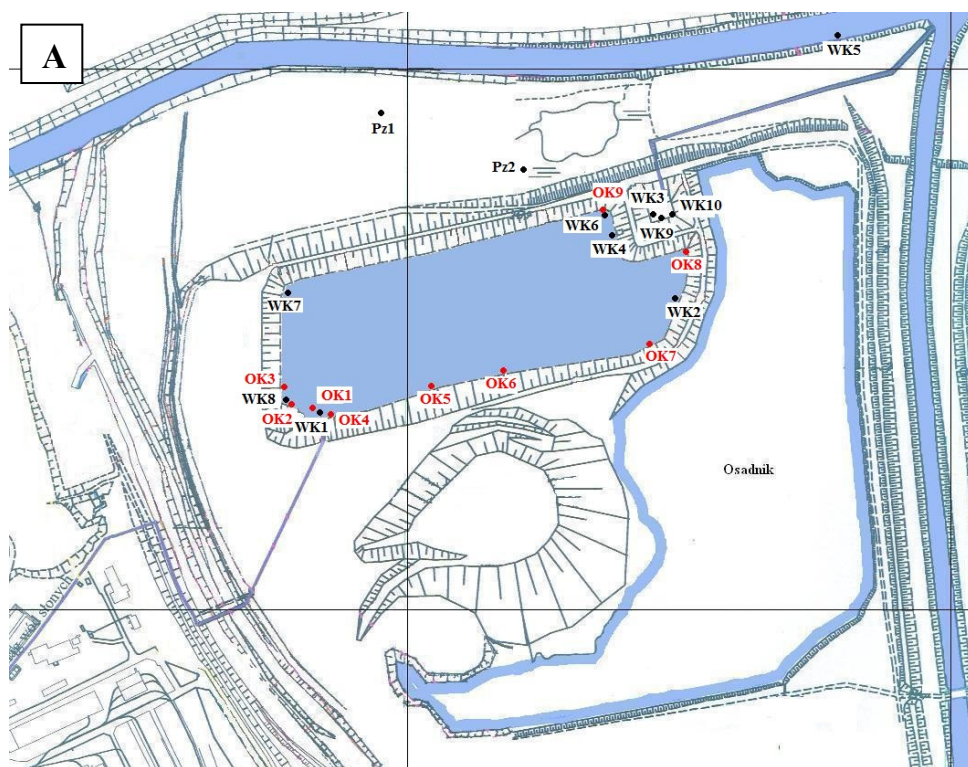
Radon należący do grupy gazów szlachetnych jest gazem obojętnym, pozbawionym koloru i zapachu. Nie posiada stabilnych i długożyciowych izotopów. Znanych jest około 30 izotopów radonu, w tym cztery naturalne. Dwa z nich pochodzą z szeregu uranowo – radowego ( $^{222}\text{Rn}$  oraz  $^{218}\text{Rn}$ ), jeden z szeregu uranowo – aktynowego ( $^{219}\text{Rn}$ ) oraz jeden z szeregu torowego ( $^{220}\text{Rn}$ ). Z tych czterech naturalnych izotopów najdłuższy czas połowicznego zaniku wynoszący 3,8 dnia posiada  $^{222}\text{Rn}$ . (Be i in., 2004). Radon, jak wszystkie gazy szlachetne, cechuje chemiczna obojętność. Mimo to znanych jest kilka związków radonu na różnych stopniach utlenienia. Są to między innymi fluorki  $\text{RnF}_2$ ,  $\text{RnF}_6$  oraz chlorek  $\text{RnCl}_4$ . Ze względu na nietrwałość samego radonu nie mają one żadnego praktycznego zastosowania.

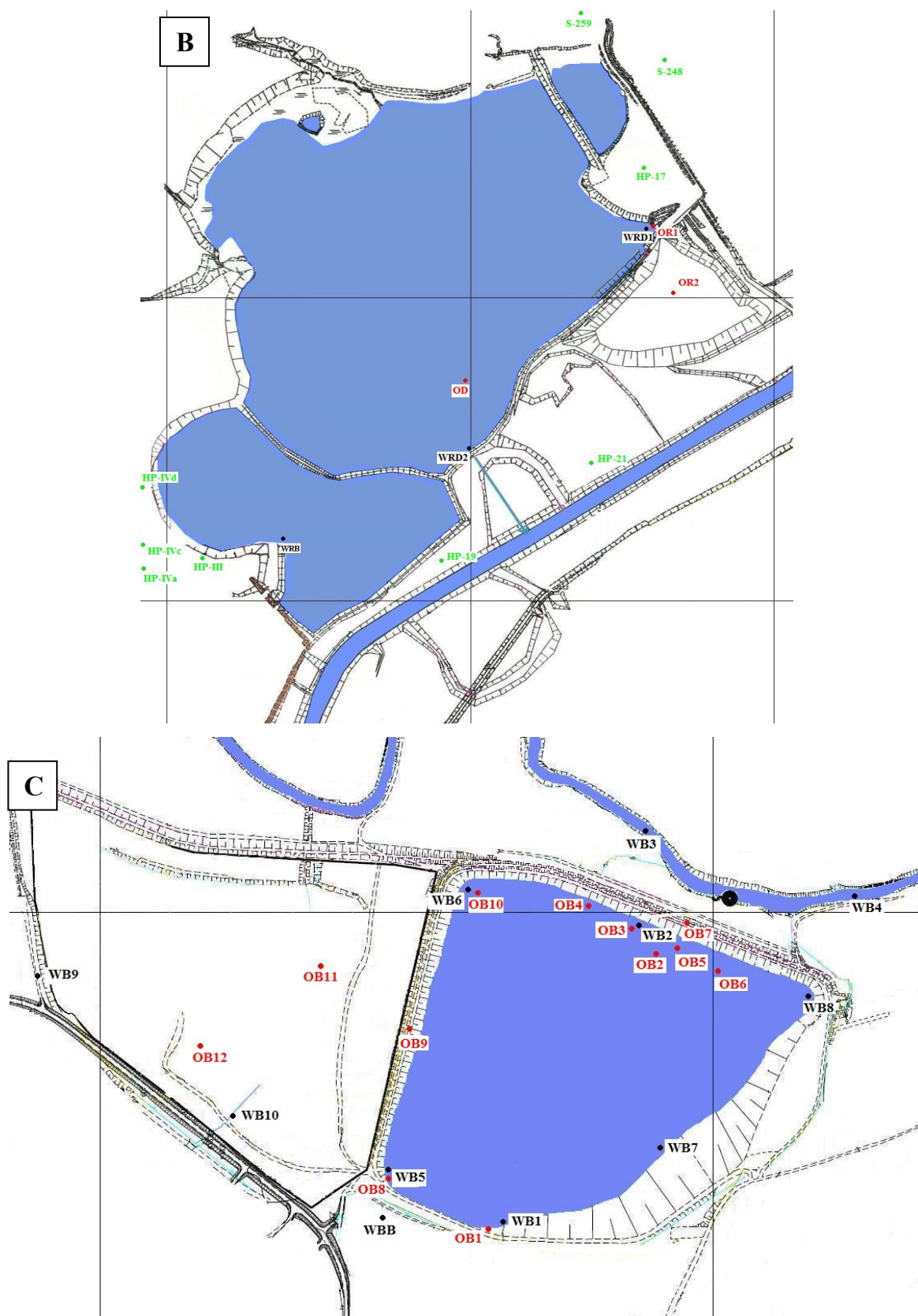
Izotopy radonu są rozpuszczalne w wodzie i innych cieczach. Współczynnik rozpuszczalności w wodzie, definiowany jako stosunek zawartości radonu w wodzie do zawartości radonu w powietrzu, przy temperaturze  $15^\circ\text{C}$  i ciśnieniu atmosferycznym waha się od 0,25 do 0,30. Rozpuszczalność radonu maleje wraz ze wzrostem temperatury. Przy temperaturze wrzenia radon jest całkowicie usuwany z roztworu. W porównaniu z roztworami wodnymi radon wykazuje znacznie wyższą rozpuszczalność w cieczach organicznych. Dobra rozpuszczalność w tłuszczach powoduje jego zwiększoną koncentrację w tkankach tłuszczowych. Radon jest adsorbowany na powierzchniach ciał stałych. Najlepszym sorbentem jest węgiel aktywny, zwłaszcza w niskich temperaturach. Zaadsorbowany radon jest bardzo ruchliwy i łatwo rozprzestrzenia się w ciałach stałych. Podgrzewanie powoduje desorpcje radonu (Cothorn, 1987; Witkowska, 2003)

Ze względu na to, że radon jest produktem rozpadu uranu i toru, wielkość jego emisji zależy przede wszystkim od zawartości tych dwóch pierwiastków w skałach, a co za tym idzie od budowy geologicznej terenu, możliwości opuszczania sieci krystalicznej minerału w którym się znajduje, a także od warunków panujących w strefach migracji czy akumulacji.

## 6. Wody zbiorników Brzeszcze, Kaniów i Rontok Duży: preparatyka prób i wyniki pomiarów.

Wody pochodzące z odwadniania badanych kopalń różnią się składem chemicznym, stężeniami izotopów promieniotwórczych oraz składem izotopowym tlenu i wodoru. Kontakt z wodą opadową dodatkowo zmienia parametry wód kopalnianych. Poddane analizie próby wody zostały pobrane z powierzchniowych zbiorników retencyjno – dozujących oraz z cieków znajdujących się w ich najbliższym sąsiedztwie. Kampanie pomiarowe prowadzone były w latach 2010 – 2014. W okresie tym kilkakrotnie pobrano próby w tych samych punktach. Miejsca poboru prób wody oraz osadów zostały przedstawione na poniższych mapach (dodatkowo zaznaczone są na nich także punkty poboru osadów).





Rys.6. Punkty poboru prób wody i osadów A – zbiornik Kaniów, B – zbiornik Rontok Duży, C – Zbiornik Brzeszcze. Czerwonymi symbolami oznaczono miejsca poboru osadów, czarnymi – punkty poboru wody, zielonymi – studnie i piezometry.

## 6.1. Przygotowanie prób wody do analiz oraz opis stosowanej metodyki pomiarowej

### *Pobieranie prób wody i procedury analityczne.*

Przeznaczone do analizy próby wody zostały pobrane ze zbiorników osadowych wód kopalnianych, z piezometrów zlokalizowanych w ich okolicach (tam, gdzie było to możliwe) oraz z rzeki Wisły, do której wody kopalniane są odprowadzane. Objętość każdej z prób wynosiła 11,5 litra, z czego 10 litrów przeznaczone zostało do oznaczania aktywności właściwej izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ , ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  a także uranu  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ , a pozostałe 1,5 litra na analizy zawartości izotopów stabilnych deuteru  $^2\text{H}$  i tlenu  $^{18}\text{O}$  oraz trytu  $^3\text{H}$ .

Próby pobierano do plastikowych butelek o objętości 5 i 1,5 litra. Przed pobraniem butelki przepłukiwano dwukrotnie pobieraną wodą, a do prób 5-cio litrowych dodawano 3 ml 8M kwasu azotowego  $\text{HNO}_3$ .

Aktywność izotopów promieniotwórczych radu, ołowiu i uranu została zmierzona za pomocą ciekłoscyntylacyjnego spektrometru promieniowania alfa i beta (rad i ołów) oraz spektrometru promieniowania alfa z detektorem półprzewodnikowym (uran).

Przed pomiarami pobrane próby wody poddane zostały preparatyce chemicznej, w wyniku której separowano dany izotop od innych, przeszkadzających w pomiarach.

### ***RAD***

Cechą charakterystyczną wód kopalnianych jest występowanie w dużych ilościach radu i baru. W obecności jonów siarczanowych dochodzi do wytrącania tych pierwiastków w postaci siarczanów radu i baru.

W wyniku preparatyki chemicznej opisanej przez Tomzę (1975) i Chau (1997) uzyskiwano osad, który następnie mieszano ze scyntylatorem żelowym. Aktywność właściwa izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  mierzona była przy użyciu spektrometru scyntylacyjnego.

Przed przystąpieniem do preparatyki, próby wody dwukrotnie filtrowano aby pozbyć się z nich zanieczyszczeń w formie partykulatów, a następnie zagęszczano (poprzez odparowanie) do objętości około 0,8 litra.

Do każdej serii próbek dodatkowo przygotowano także próbę tła z 0,5 litra wody destylowanej oraz próbę wzorca radu  $^{226}\text{Ra}$  również z 0,5 litra wody destylowanej, zawierającej znaną aktywność izotopu radu  $^{226}\text{Ra}$ . Za pomocą wzorca można kontrolować wydajność procedury preparatyki chemicznej oraz słuszność doboru parametru PSA, zaś próbka tła pozwala odrzucić ewentualne zanieczyszczenia wody destylowanej oraz

odczynniki chemiczne. **PSA (Pulse Shape Analysis)** to parametr określający separację impulsów pochodzących od izotopów alfa i beta promieniotwórczych zawartych w próbce. Zwykle dobierany jest metodą graficzną, na podstawie przecięcia się krzywych aktywności izotopów alfa i beta promieniotwórczych (Chau, 2002).

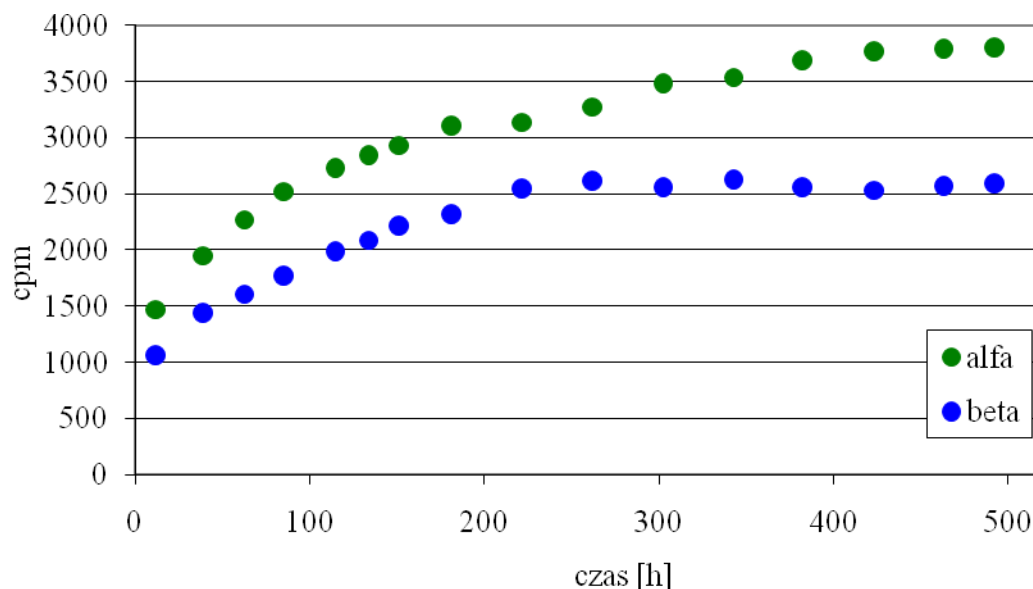
Szczegółowa preparatyka chemiczna:

1. Do próbki wody dodaje się kilka kropel oranżu metylowego ( $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$ ) w celu sprawdzenia jej odczynu pH. W przypadku gdy jest wyższy od 5 – obniża się go do wartości ok. 4 przez dodanie 3M roztworu kwasu azotowego  $HNO_3$ .
2. Następnie dodaje się kolejno: 25 ml alkalicznego 0,25M roztworu wersenianu dwusodowego  $Na_2EDTA$ , 5 ml 0,1M roztworu azotanu ołowiu  $PbNO_3$  oraz 18 ml 0,1M roztworu chlorku baru  $BaCl_2$ .
3. Po wymieszaniu i podgrzaniu próbki do około  $95^{\circ}C$  należy doprowadzić jej pH do wartości 4,5 przez dodanie 16 ml 3M kwasu siarkowego  $H_2SO_4$  – na tym etapie zostaje wytrącony osad zawierający siarczan radu, baru i ołowiu. Wytrącony osad pozostawia się do następnego dnia.
4. Nazajutrz zlewa się roztwór z nad osadu a następnie osad odwirowuje się sukcesywnie aż do uzyskania odczynu obojętnego – ciecz odrzucamy i zastępujemy wodą destylowaną.
5. Po uzyskaniu odczynu obojętnego osad podgrzewa się i rozpuszcza w około 80 ml 0,25M roztworu  $Na_2EDTA$ .
6. Gdy powstały roztwór staje się klarowny dodaje się około 60 ml kwasu octowego lodowatego  $CH_3COOH$  notując czas dodania kwasu, który jest równocześnie czasem wytrącenia radu (ołów pozostaje w roztworze).
7. Powstały osad jest neutralizowany ze względu na pH przy zastosowaniu procedury jak w p.4. Gdy ciecz nad osadem uzyska odczyn obojętny, osad jest przenoszony do naczynka pomiarowego, po czym dodaje się do niego 4 ml wody destylowanej i 12 ml scyntylatora żelowego.

Pomiar każdej przygotowanej próbki trwał około 500 godzin (21 dni). W ciągu każdego dnia zbierano dane przez 120 minut dla każdej z próbek.

Z powodu tak długiego czasu pomiaru nie uwzględniano izotopu radu  $^{224}Ra$  – z racji jego krótkiego czasu połowicznego zaniku (3,66 dni) można przyjąć, że jest on nieobecny w próbce.

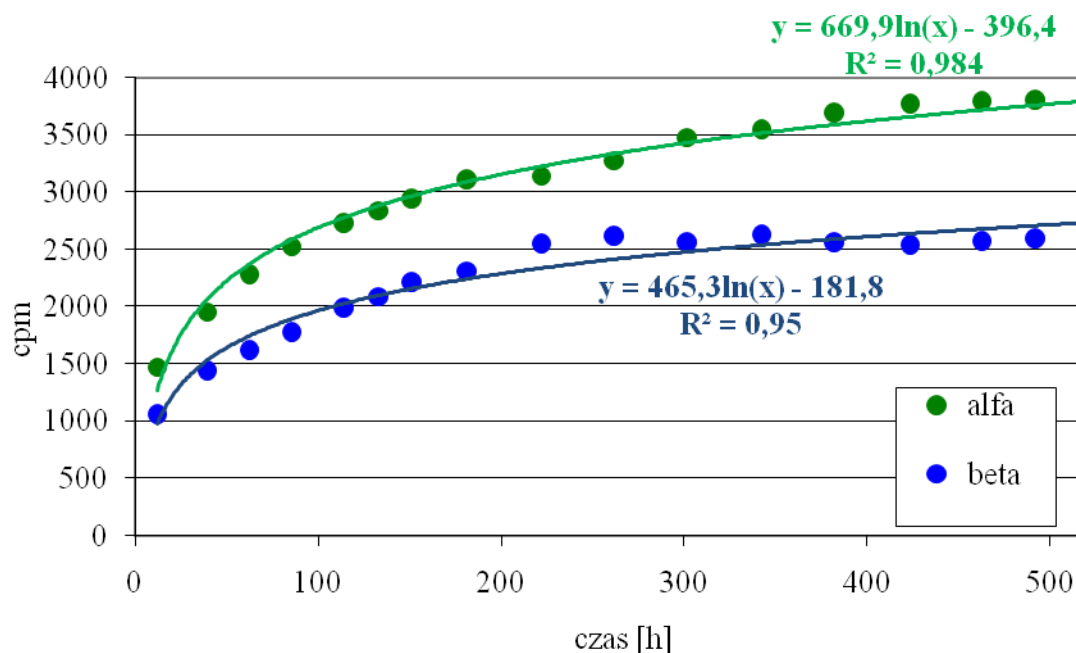
Po zebraniu danych przygotowano wykresy przedstawiające zależności liczby zliczeń od czasu w kanałach alfa i beta odpowiadających kolejno radowi  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  (z uwzględnieniem zliczeń dla tła). Poniżej przykładowy wykres jednej z analizowanych prób wody:



Rys.7. Przykładowa zależność częstości zliczeń od czasu dla próby wody.

Do zaznaczonych na wykresie punktów pomiarowych dopasowano krzywe. Następnie na podstawie opisujących je zależności częstości zliczeń od czasu pomiaru, wyznaczono częstości zliczeń w kanałach alfa i beta dla czasu 500 godzin. Dopasowane krzywe wraz ze współczynnikiem korelacji przedstawiono na rysunku 8.

Po czasie 500 godzin tworzy się równowaga promieniotwórcza pomiędzy radem  $^{226}\text{Ra}$  i produktami rozpadu. W tym czasie uzyskuje się również równowagę promieniotwórczą pomiędzy radem  $^{228}\text{Ra}$  a aktywnym  $^{228}\text{Ac}$ , poprzez który następuje pomiar częstości zliczeń – sam rad  $^{228}\text{Ra}$  emituje niskoenergetyczne promieniowanie beta, co skutkuje słabą wydajnością detekcji.



Rys.8. Przykładowa zależność częstości zliczeń od czasu wraz z dopasowanymi liniami trendu.

Aktywność właściwą izotopu radu  $^{226}\text{Ra}$  obliczamy z zależności:

$$A_{^{226}\text{Ra}} = \frac{I_{\alpha}}{60 \cdot \varepsilon_{\alpha} \cdot V} \quad (1)$$

gdzie:

$A_{^{226}\text{Ra}}$  - aktywność właściwa promieniowania alfa radu  $^{226}\text{Ra}$   $\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{l}} \right]$ ,

$I_{\alpha}$  - częstość zliczeń w kanale  $\alpha$  po 500h od wytrącenia radu w próbce,

$V$  – objętość próbki [l],

$\varepsilon_{\alpha}$  - wydajność rejestracji promieniowania  $\alpha$ ;  $\varepsilon_{\alpha} = 3,9309$  (stosunek całkowitej aktywności alfa-promieniotwórczych izotopów z szeregu radu  $^{226}\text{Ra}$  do aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$ ).

Natomiast aktywność radu  $^{228}\text{Ra}$  wyznaczamy w oparciu o poniższy wzór:

$$A_{^{228}\text{Ra}} = \frac{I_{\beta} - 0,45 \cdot I_{\alpha}}{60 \cdot \varepsilon_{\beta} \cdot V} \quad (2)$$

gdzie:

$A_{228Ra}$  - aktywność właściwa promieniowania beta radu  $^{228}\text{Ra}$   $\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{l}} \right]$ ,

$I_\beta$  - częstość zliczeń w kanale  $\beta$  po 500h od wytrącenia radu w próbce,

V – objętość próbki [l],

$\varepsilon_\beta$  - wydajność rejestracji promieniowania  $\beta$ ;  $\varepsilon_\beta = 1,1022$  (współczynnik udziału aktynu  $^{228}\text{Ac}$  w piku radu  $^{228}\text{Ra}$ ),

$0,45 \cdot I_\alpha$  (PSA  $\cdot I_\alpha$ ) – odpowiada za produkty rozpadu  $^{226}\text{Ra}$ , które ulegają przemianie beta,

$0,45$  (PSA) – stosunek aktywności promieniowania  $\beta$  do  $\alpha$  w szeregu zawierającym izotop radu  $^{226}\text{Ra}$ .

## **OŁÓW**

Podobnie jak w przypadku radu, stężenie izotopu ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  zostało zmierzone z użyciem ciekłoscyntylacyjnej spektrometrii alfa/beta. Aktywność właściwa tego izotopu w wodach kopalnianych jest niewielka, więc objętość wykorzystanej do analizy wody wynosiła minimum 4 litry.

Przefiltrowaną próbkę wody odparowywano do objętości około 1 litra, a następnie przeprowadzano preparatykę chemiczną opisaną przez Lebecką i in. (1992) oraz Chau (2001).

1. Do próbki o objętości około 1 litra dodaje się kolejno: 15 ml 3M roztworu siarczanu amonu  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 10 ml 0,1M azotanu ołowiu  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  i 10 ml 0,1M chlorku baru  $\text{BaCl}_2$ .
2. Po zamieszaniu i podgrzaniu próbki do około  $95^\circ\text{C}$  należy obniżyć jej pH do 4,5 poprzez powolne dodawanie 10 ml 3M kwasu siarkowego  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - wytrącony zostaje osad zawierający siarczany radu, baru i ołowiu. Osad pozostawia się do następnego dnia.
3. Nazajutrz, po zlaniu roztworu znad wytrąconego osadu należy odwirować go kilkakrotnie, za każdym razem zastępując odwirowany roztwór wodą destylowaną. Krok ten ma na celu zubożenie osadu.
4. Osad o odczynie obojętnym rozpuszcza się w 20 ml 0,1M roztworu wersenianu dwusodowego  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  i ponownie strąca dodając około 20 ml kwasu octowego lodowatego  $\text{CH}_3\text{COOH}$ .

5. Uzyskany w ten sposób osad zobojętnia się stosując technikę wirowania identyczną jak w p.3.
6. Jeżeli objętość uzyskanej cieczy jest mniejsza od 200 ml, uzupełnia się ją do takiej objętości wodą dejonizowaną, a następnie ponownie dodaje się 15 ml 3M siarczanu amonu  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .
7. Po podgrzaniu próbki dodaje się 3M kwas siarkowy  $\text{H}_2\text{SO}_4$  aż do wytrącenia osadu (około 15 ml).
8. Po wystudzeniu próbki doprowadza się ją do odczynu obojętnego poprzez wirowanie jej z wodą destylowaną i przenosi do polietylenowego naczynka pomiarowego wraz z 4 ml wody dejonizowanej. Naczynie szczelnie się zakręca.
9. Po upływie pół roku do próbki dodaje się 12 ml scyntylatora żelowego.

Ołów  $^{210}\text{Pb}$  emituje cząstki  $\beta$  o energiach 63,5 keV oraz 16,96 keV, rozpadając się do bizmutu  $^{210}\text{Bi}$  emitującego również cząstki  $\beta$  o energii 1160 keV, który wykorzystywany jest do wyznaczania aktywności  $^{210}\text{Pb}$ .

Rejestracja widma promieniowania  $\beta$  pochodzącego od bizmutu  $^{210}\text{Bi}$  prowadzona jest w takim zakresie, aby wyeliminować promieniowanie pochodzące od ołowiu  $^{210}\text{Pb}$ .

Aktywność właściwą izotopu ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  obliczamy z zależności:

$$A_{^{210}\text{Pb}} = \frac{I_{\alpha} + I_{\beta}}{60 \cdot \varepsilon \cdot (f_{\alpha} + f_{\beta}) \cdot V} \quad (3)$$

gdzie:

$A_{^{210}\text{Pb}}$  - aktywność właściwa ołowiu  $^{210}\text{Pb}$   $\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{l}} \right]$ ,

$I_{\alpha}, I_{\beta}$  - częstość zliczeń w kanałach  $\alpha$  i  $\beta$  [cpm],

$\varepsilon$  – wydajność procedury chemicznej wyznaczana na podstawie wzorca ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  (0,5 litra wody destylowanej, zawierającej znaną ilość wzorca ołowiu  $^{210}\text{Pb}$ ),

$f_{\alpha}$  – stosunek aktywności polonu  $^{210}\text{Po}$  do ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  (z równania Batemana dla szeregu  $^{210}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}$ ),

$f_{\beta}$  – stosunek aktywności bizmutu  $^{210}\text{Bi}$  do ołowiu  $^{210}\text{Pb}$ , wynikający z nakładania się widm ołowiu i bizmutu,

$V$  – objętość próbki.

## ***RAD I OŁÓW – WSPÓLNA PREPARATYKA***

W celu zmniejszenia ilości pobranej do analizy wody oraz ograniczenia czasu potrzebnego do przeprowadzenia preparatyki chemicznej wykorzystywano również procedurę jednoczesnego przygotowania prób wody do oznaczania izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  oraz ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  (Chau i Nowak, 2009).

Szczegółowa preparatyka chemiczna:

1. Do zagęszczonej do 1 litra poprzez odparowanie próby wody (początkowa objętość – 4 litry) dodaje się kolejno 25 ml 0,1M  $\text{Na}_2\text{EDTA}$ , 12 ml 0,1M  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ , 8 ml 0,1M  $\text{BaCl}_2$ , oraz 12 ml 3M  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .
2. Po zamieszaniu i podgrzaniu próbki do około  $95^\circ\text{C}$  wytrąca się osad zawierający siarczany radu, baru i ołowiu poprzez dodanie 10 ml 3M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Powstały osad odstawia się do następnego dnia.
3. Nazajutrz, po zlaniu roztworu z nad osadu wiruje się sukcesywnie zamieniając odwirowany roztwór wodą dejonizowaną, go aż do uzyskania odczynu obojętnego.
4. Osad rozpuszcza się w 20 – 40 ml 0,1M  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  i ponownie strąca dodając 10 – 20 ml kwasu octowego lodowatego.
5. Osad wiruje się (jak w p.3) do uzyskania odczynu obojętnego. Roztwór zachowuje się i uzupełnia do 200 ml wodą dejonizowaną. Osad zawierający rad jest przenoszony wraz z 4 ml wody dejonizowanej do szklanego naczynka pomiarowego i mieszany z 12 ml scyntylatora żelowego.
6. Do roztworu dodaje się 15 ml 3M  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , podgrzewa do około  $95^\circ\text{C}$  a następnie wytrąca osad zawierający ołów dodając około 25 ml 3M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .
7. Po wystudzeniu próbki doprowadza się ją do odczynu obojętnego poprzez wirowanie jej z wodą destylowaną i przenosi do polietylenowego naczynka pomiarowego wraz z 4 ml wody dejonizowanej.
8. Po upływie pół roku do próbki dodaje się 12 ml scyntylatora żelowego.

## ***URAN***

Aktywność właściwa izotopów uranu  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  została oznaczona z wykorzystaniem spektrometrii promieniowania alfa. Przygotowanie źródła promieniowania alfa poprzedzone zostało opisaną poniżej preparatyką chemiczną (Kronfeld, 1974; Pluta i in., 1990):

1. Do próby wody o objętości 4 litry dodaje się znacznik uranu  $^{232}\text{U}$  o aktywności 0,1 Bq oraz 3 ml 3M kwasu azotowego  $\text{HNO}_3$ . Powoduje to obniżenie pH do wartości około 1.

Dodanie kwasu azotowego powoduje konwersję uranu do +6 stopnia utlenienia co zapobiega jego adsorpcji na ściankach zlewki.

2. Próbkę wody odparowuje się do objętości około 1 litra i po wystudzeniu alkalizuje się ją do pH ok. 9 przez dodanie stężonego amoniaku.
3. Następnie dodaje się po 3 ml 0,3M roztworu nadmanganianu potasu  $\text{KMnO}_4$  oraz 0,3M chlorku manganu  $\text{MnCl}_2$ , co powoduje wytrącenie uranu w postaci kompleksu uranylowo-amonowego  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$  wraz z tlenkiem manganu  $\text{MnO}_2$ . Próbkę podgrzewa się.
4. Po wystudzeniu próbka mieszana jest przez 0,5 godziny mieszadłem magnetycznym i odstawiana do następnego dnia.
5. Następnego dnia roztwór jest dekantowany a osad wirowany sukcesywnie, za każdym razem będąc przemywanym wodą dejonizowaną. Wirowanie takie prowadzi się aż do zobojętnienia osadu. Następnie osad rozpuszczany jest w około 60 ml 9M kwasu solnego  $\text{HCl}$ .
6. Po wystudzeniu roztwór przenoszony jest na kolumnę jonowymienną, o średnicy wewnętrznej 10 mm i długości 50 cm, DOWEX 1 100 – 200 mesh. Kolumna jest wstępnie przemywana wodą destylowaną oraz 9M kwasem solnym  $\text{HCl}$  (80 ml).
7. Po przejściu próbki przez kolumnę ponownie jest ona przemywana 80 ml 9M kwasu solnego  $\text{HCl}$  (na tym etapie usuwany jest z kolumny tor, zaś uran i mangan zostają w żywicy) – eluat wylewa się. Następnie przepuszcza się przez kolumnę 40 ml 8M kwasu azotowego  $\text{HNO}_3$  i 120 ml wody destylowanej – ten eluat jest zbierany.
8. Po odparowaniu do sucha zebranego eluatu, pozostałość rozpuszcza się w 20 ml 1M kwasu solnego  $\text{HCl}$ . Roztwór przenoszony jest do polietylenowego naczynia, w którym wytrąca się uran poprzez dodanie 0,5 g soli Mohra (siarczan amonowo żelazowy)  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4$ , 50 $\mu\text{g}$  neodymu Nd i 3 ml 40% kwasu fluorowodorowego  $\text{HF}$ .
9. Po 0,5 godziny roztwór jest filtrowany przez filtr membranowy o średnicy 25 mm i porowatości 100 nm firmy Eichrome™. Po wysuszeniu filtra aktywność znajdujących się na nim nuklidów jest mierzona spektrometrem promieniowania alfa.

Do wyznaczenia aktywności izotopów uranu  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  wykorzystujemy powierzchnie pod pikami w widmie pomiarowym uzyskanym metodą spektrometrii promieniowania alfa. Przykładowe widmo pomiarowe przedstawione jest na rysunku 9 wraz z oznaczonymi pikami odpowiadającymi poszczególnym izotopom uranu, to jest  $^{232}\text{U}$  – wzorcowi i mierzonym  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ .

Aktywności izotopów uranu  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  wyznacza się z zależności:

$$A_{^{234}\text{U}} = \frac{A_{^{232}\text{U}} \cdot \frac{N_{^{234}\text{U}}}{N_{^{232}\text{U}}} - A_{T^{234}\text{U}}}{V} \quad (4)$$

$$A_{^{238}\text{U}} = \frac{A_{^{232}\text{U}} \cdot \frac{N_{^{238}\text{U}}}{N_{^{232}\text{U}}} - A_{T^{238}\text{U}}}{V} \quad (5)$$

gdzie:

$A_{^{232}\text{U}}$  - znana aktywność znacznika  $^{232}\text{U}$  dodana do próbki wody [mBq],

$A_{^{234}\text{U}}$  - aktywność właściwa uranu  $^{234}\text{U}$   $\left[ \frac{\text{mBq}}{\text{l}} \right]$ ,

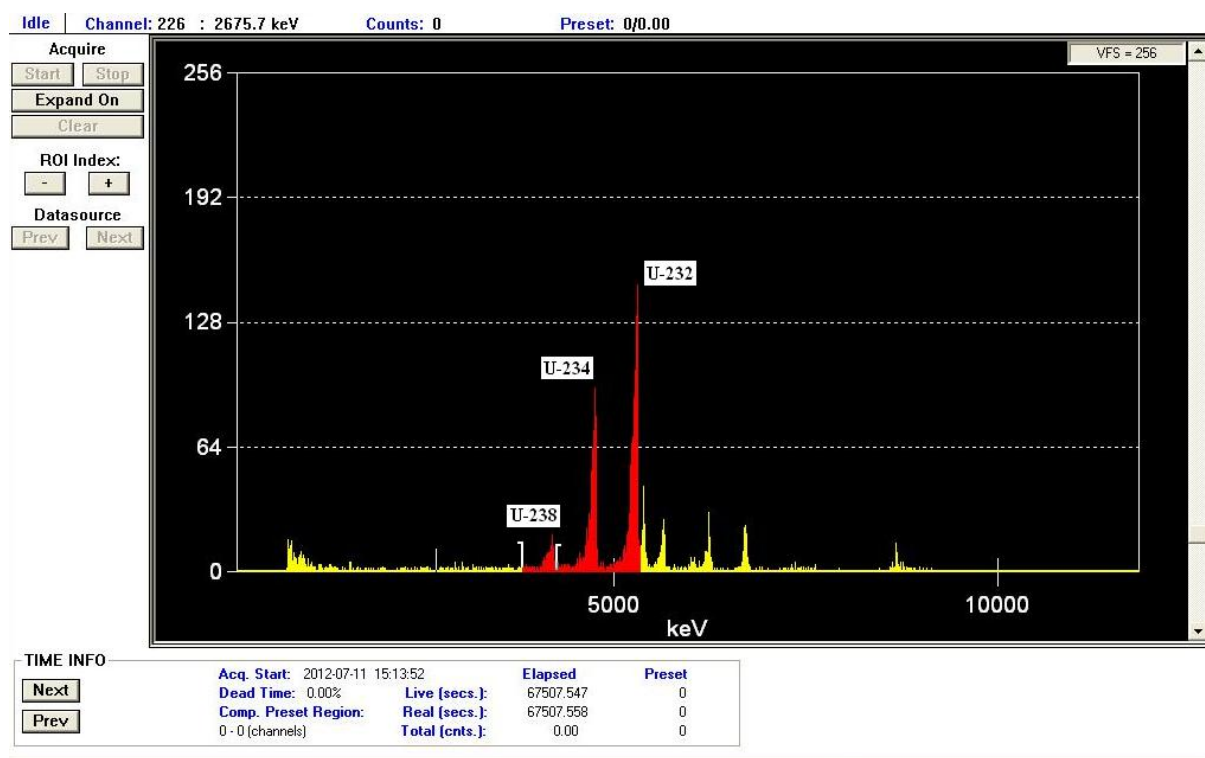
$A_{^{238}\text{U}}$  - aktywność właściwa uranu  $^{238}\text{U}$   $\left[ \frac{\text{mBq}}{\text{l}} \right]$ ,

$N_{^{232}\text{U}}, N_{^{234}\text{U}}, N_{^{238}\text{U}}$  – powierzchnie pod pikami odpowiadającymi izotopom uranu  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ ,

$V$  – objętość próby [l],

$A_{T^{234}\text{U}}$  - aktywność uranu  $^{234}\text{U}$  w próbce tła [mBq],

$A_{T^{238}\text{U}}$  - aktywność uranu  $^{238}\text{U}$  w próbce tła [mBq].



Rys.9. Widmo pomiarowe uranu zebrane przez spektrometr promieniowania alfa.

## TRYT

Zawartość trytu  $^3\text{H}$  w pobranych próbkach wody oznaczono za pomocą techniki ciekłych scyntylatorów (Kuc, 2005; Florkowski i in. 1973), przy 14 pomiarach trwających 50 minut dla każdej próbki. Preparatyka próby wody została poprzedzona jej wstępną destylacją – aż do momentu uzyskania przewodności właściwej poniżej  $35 \mu\text{S}$ . W przypadku, gdy nie udaje się obniżyć przewodności, w trakcie dodatkowej destylacji do próbki dodaje się nadtlenek sodu  $\text{Na}_2\text{O}_2$  i węgiel aktywny. Procedura przygotowania próbek do pomiaru jest rutynowo stosowaną w laboratorium Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo – Hutniczej i zawiera następujące kroki:

1. Do przeddestylowanych prób wody o objętości 0,5 litra i przewodności właściwej poniżej  $35 \mu\text{S}$  dodaje się 1,5g nadtlenu sodu  $\text{Na}_2\text{O}_2$  (w ten sposób tworzy się elektrolit).
2. Roztwory przenosi się do pustych, zważonych uprzednio cel elektrolitycznych i ponownie waży, w celu dokładnego wyznaczenia początkowej masy roztworu.
3. Następnie cele wkłada się do lodówki o specjalnej konstrukcji i przepuszcza przez nie prąd (o natężeniu 10A). W trakcie elektrolizy wody temperatura w przestrzeni między celami w lodówce jest utrzymywana na poziomie około  $0^\circ\text{C}$ , co zapobiega parowaniu wody. Ilość

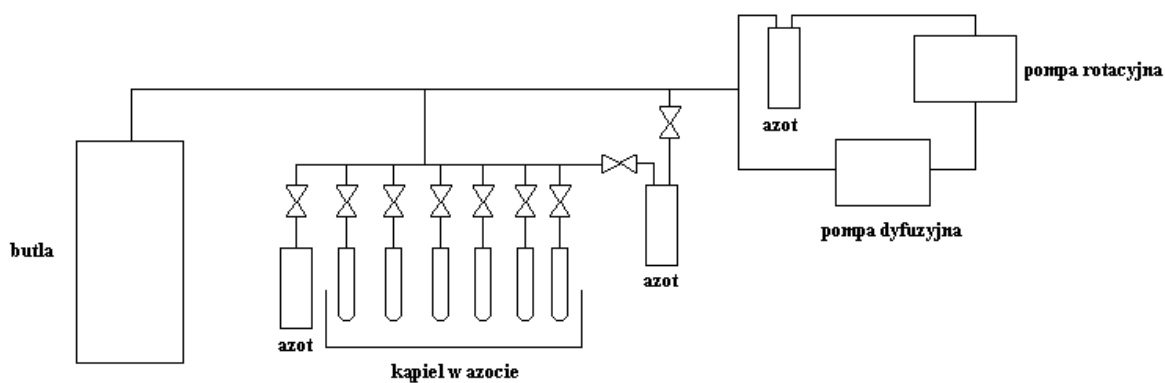
amperogodzin jest tak określona, aby w wyniku elektrolizy uzyskać ok. 24-krotną redukcję masy roztworu. Przy takiej redukcji masy otrzymuje się finalnie bardzo silny elektrolit.

4. Cele elektrolityczne, po wyjęciu ich z lodówki i doprowadzeniu do temperatury pokojowej są ponownie ważone. Pozwala to na wyznaczenie indywidualnych współczynników redukcji masy.
5. Roztwory są przenoszone do stalowych kolbek i ponownie destylowane.
6. Próbkę wody o objętości 8 ml przenosi się do polietylenowych naczynek pomiarowych i miesza z 12 ml ciekłego, żelującego scyntylatora ULTIMA GOLD.

Pomiary aktywności trytu  $^3\text{H}$  wykonane zostały przy pomocy ciekłoscyntylacyjnych spektrometrów TRI – CRAB 1600 – TR oraz TRI – CRAB 2500 TR/AB firmy Canberra – Packard.

## DEUTER

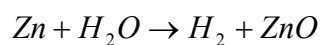
W preparatyce prób wodnych do pomiaru składu izotopowego wodoru wykorzystano metodę opisaną przez Kendalla i Coplena (1985), opartą na redukcji wody na metalicznym cynku. Do preparatyki próbek wody na zawartość deuteru stosowana była linia, której schemat przedstawiono poniżej.



*Rys.10. Schemat linii do laboratoryjnej preparatyki próbek wody do pomiaru składu izotopowego wodoru*

Próbki wody o objętości 10  $\mu\text{l}$  są wprowadzane do specjalnych naczyń zawierających 300 mg granulowanego cynku. Naczynia te, po podłączeniu do linii preparacyjnej były zamrażane w ciekłym azocie i odpompowywane do ciśnienia około  $4 \times 10^{-3}$  mbar. Następnie

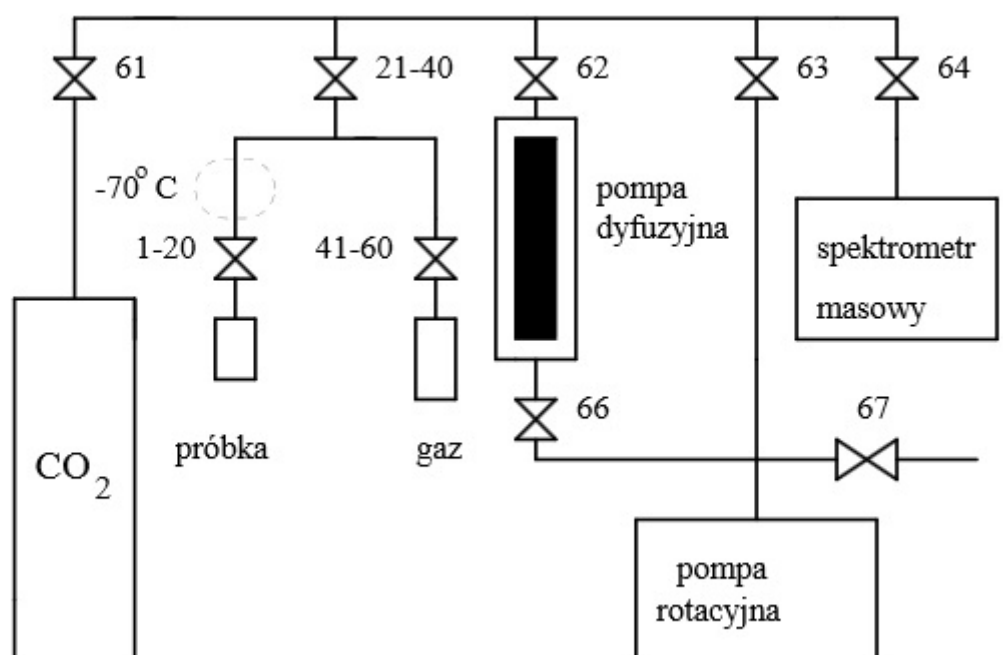
naczynia przenoszone były do pieca, gdzie w temperaturze 500<sup>0</sup>C w czasie 180 min zachodziła reakcja redukcji wody na metalicznym cynku wg schematu:



Uzyskany w wyniku reakcji gazowy wodór był bezpośrednio mierzony spektrometrem masowym Finnigan DeltaS.

### **TLEN**

Metodyka pomiaru koncentracji <sup>18</sup>O w wodzie oparta jest na klasycznej ekwilibracji z gazowym CO<sub>2</sub> o znanym składzie izotopowym (Epstein i Mayeda, 1953). Do pomiaru próbek wody na zawartość δ<sup>18</sup>O wykorzystana została automatyczna linia pomiarowa MULTIPREP, której schemat przedstawiony został poniżej:



Rys.11. Schemat linii do pomiaru wartości δ<sup>18</sup>O w próbach wody.  
(<http://www.fis.agh.edu.pl/~gorczyca/spec2.pdf>)

W skład linii wchodzi m.in. pompy: rotacyjna i dyfuzyjna. Poza tym, integralnymi jej częściami są zespoły małych naczyń ekwilibracyjnych (1 – 20) i gazowych (21 – 40), w których składowany jest przed pomiarem gazowy dwutlenek węgla wyekwilibrowany z próbkami wody.

Preparatyka próbek poddawanych analizie składa się z następujących etapów:

1. Do 20 naczyń ekwilibracyjnych wlewa się dwumililitrowe porcje prób wód przeznaczonych do analizy, przy czym 4 z nich to próby wzorcowe KWK (stosowany w laboratorium wzorzec: Krakowska Woda Kranowa, o znanym składzie izotopowym, wykalibrowanym względem międzynarodowych wzorców V-SMOW i NBS-19).
2. Po podłączeniu naczyń do układu próżniowego zostają one odpompowane.
3. Po dwuminutowym wytrząsaniu, podczas którego usuwane jest z próbki powietrze, wpuszcza się nad wodę dwutlenek węgla i poddaje układ ponownemu odpompowaniu.
4. Następnie do naczyń wpuszcza się CO<sub>2</sub> o znanym składzie izotopowym. Po czasie 2,5 godz, podczas których próby są wytrząsane i utrzymywane w kontrolowanej, stałej temperaturze 28,0±0,1°C, następuje ustalenie się równowagi izotopowej pomiędzy tlenem w próbce wody a tlenem w gazowym CO<sub>2</sub>, zgodnie z reakcją:



5. Po dwóch godzinach od momentu wytrząsania włączony zostaje układ wymrażania (-70°C), umożliwiający usunięcie pary wodnej z dwutlenku węgla w trakcie jego przetaczania z naczyń ekwilibracyjnych do gazowych (uprzednio odpompowanych).
6. Z naczyń gazowych dwutlenek węgla jest sukcesywnie wpuszczany do układu wejściowego spektrometru Finnigan Delta S i mierzony izotopowo.

### ***ANALIZA STĘŻENIA CHLORKÓW***

Część wód dopływających do polskich kopalń węgla na Śląsku stanowią silnie zmineralizowane solanki o dominującym udziale jonów Na<sup>+</sup> i Cl<sup>-</sup>. Dlatego jednym z najważniejszych wskaźników hydrogeologicznych stają się jony chlorkowe, jako najbardziej zachowawcze w środowisku wodnym.

Do określania zawartości chlorków w próbce wody wykorzystana została argentometryczna metoda Mohra, polegająca na miareczkowaniu roztworu zawierającego chlorki przez mianowany roztwór azotanu srebra AgNO<sub>3</sub>. W metodzie tej dochodzi do wytrącenia się trudno rozpuszczalnego osadu, a zawartość jonów chlorkowych wykrywana jest przy użyciu wskaźnika – chromianu potasu KCrO<sub>4</sub>.

Wykorzystane w trakcie realizacji pracy roztwory AgNO<sub>3</sub> miały trzy różne stężenia (0,5N; 0,1N i 0,01N) i były stosowane naprzemiennie w zależności od zawartości chlorków w

badanych próbkach. Przygotowano je rozpuszczając odważkę analityczną  $\text{AgNO}_3$  o dużej czystości w odpowiedniej objętości wody destylowanej.

Szczegółowa procedura oznaczania chlorków:

1. Do próbek wody o objętości 25ml dodaje się 7 – 8 kropel chromianu potasu, będącego wskaźnikiem miareczkowania.
2. Następnie wkrapla się powoli roztwór mianowany azotanu srebra  $\text{AgNO}_3$  – w trakcie tej czynności wytrąca się osad będący chlorkiem srebra  $\text{AgCl}$ .
3. Po wytrąceniu jonów chlorkowych  $\text{Cl}^-$ , następuje wytrącenie chromianu srebra o brunatno czerwonym – ceglanym – zabarwieniu. Pojawienie się tak zabarwionego osadu oznacza koniec miareczkowania.

Na podstawie znanej objętości użytego roztworu azotanu srebra  $\text{AgNO}_3$  zawartość jonów chlorkowych wyznacza się z zależności:

$$\text{Cl}^- = \frac{M_{\text{cz.Cl}^-} \cdot M \cdot 1000}{25} \cdot \Delta V \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] \quad (6)$$

gdzie:

$\text{Cl}^-$  - stężenie jonów chlorkowych  $\left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right]$ ,

$M_{\text{cz.Cl}^-}$  - masa cząsteczkowa chloru,

$M$  – miano roztworu  $\text{AgNO}_3$ ,

$\Delta V$  – objętość użytego roztworu  $\text{AgNO}_3$  [ml],

$\frac{1000}{25}$  - przelicznik normalizacyjny próby do 1 litra.

### **SKŁAD CHEMICZNY WODY**

Skład chemiczny analizowanych próbek wody został oznaczony w Laboratorium Hydrogeochemicznym Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska (Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej) metodą spektrometrii mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie – ICP – MS.

Metoda ta polega na wykorzystaniu spektrometru masowego ze wzbudzoną plazmą, co pozwala na analizę wielopierwiastkową. Atomy w próbce poddawane są jonizacji a ich zawartość określana jest przy użyciu spektrometru masowego.

## 6.2. Typowe składy izotopowe wód obszaru Polski

Skład izotopowy tlenu i wodoru w wodzie zwykło się wyrażać przy pomocy wielkości  $\delta$ , definiowanej jako względne odchylenie składu izotopowego próby w stosunku do składu wzorca:

$$\delta_X = \frac{R_X - R_{STD}}{R_{STD}} \quad (7)$$

gdzie:

$R_X$  – stosunek izotopów w próbce, np.  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,

$R_{STD}$  – analogiczny stosunek we wzorcu (standardzie).

Wartości wielkości  $\delta$  zwykle są niewielkie, dlatego też wyrażane są w promilach (‰):

$$\delta_X = \left( \frac{R_X}{R_{STD}} - 1 \right) \cdot 1000 \quad (8)$$

Wielkości  $\delta$  mogą przyjmować wartości dodatnie lub ujemne. Jeśli  $\delta_X > 0$  to próbka jest wzbogacona w cięższy izotop. Gdy  $\delta_X < 0$  – próbka jest zubożona w cięższy izotop w porównaniu ze wzorcem.

We wszystkich procesach chemicznych z udziałem jonów czy molekuł, a także w procesach z udziałem różnych faz zawsze dochodzi do różnicowania izotopowego, zwanego frakcjonowaniem. W warunkach równowagi izotopowej różnicowanie to opisuje tzw. równowagowy współczynnik frakcjonowania izotopowego  $\alpha$ . Współczynnik ten dla różnych substancji A i B lub różnych faz tej samej substancji definiuje się jako:

$$\alpha_{A-B} = \frac{R_A}{R_B} = \frac{1000 + \delta_A}{1000 + \delta_B} \quad (9)$$

W reakcjach pierwszego rzędu (do których należą reakcje wymiany izotopowej) równowagowy współczynnik frakcjonowania można wyrazić bezpośrednio przez stałą równowagi reakcji K:

$$\alpha = K^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

gdzie:

n – liczba wymienionych atomów,

K =  $\alpha$  – dla pojedynczych atomów.

Należy pamiętać, że stała równowagi reakcji zależy od temperatury. Wynika stąd, że równowagowy współczynnik frakcjonowania izotopowego również zależy od temperatury. Zależność ta jest zwykle postaci:

$$1000 \ln \alpha_{A-B} = \frac{A}{T^2} + \frac{B}{T} + C \quad (11)$$

gdzie T – temperatura w skali bezwzględnej, A, B, C - stałe.

Teoretycznie wartość równowagowego współczynnika frakcjonowania równa jedności oznacza, że obie substancje (lub fazy) mają taki sam skład izotopowy. W przyrodzie jednakże taka sytuacja zdarzają się bardzo rzadko. Wartości współczynnika  $\alpha_{A-B}$  większe od jedności oznaczają wzbogacenie substancji A w cięższy izotop względem substancji B i na odwrót, wartości mniejsze od jedynki oznaczają zubożenie substancji A w cięższy izotop w porównaniu z substancją B.

Do określania różnicowania izotopowego stosuje się również wielkość zwaną wzbogaceniem izotopowym  $\varepsilon_{A-B}$ , określoną zależnością:

$$\varepsilon_{A-B} = (\alpha_{A-B} - 1) \cdot 1000 \quad (12)$$

Użyteczność tej wielkości przejawia się w prostej relacji:

$$\varepsilon_{A-B} \approx \delta_A - \delta_B \quad (13)$$

którą łatwo wyprowadzić przy uwzględnieniu relacji (9) oraz założeniu  $\delta_B \ll 1000$ .

W środowisku przyrodniczym, z punktu widzenia procesów z udziałem wody największe znaczenie mają izotopy tlenu i wodoru. Tlen posiada trzy naturalne, trwałe izotopy o następujących abundancjach:  $^{16}\text{O}$  – 99,76%,  $^{17}\text{O}$  – 0,037%,  $^{18}\text{O}$  – 0,2% (Fritz,

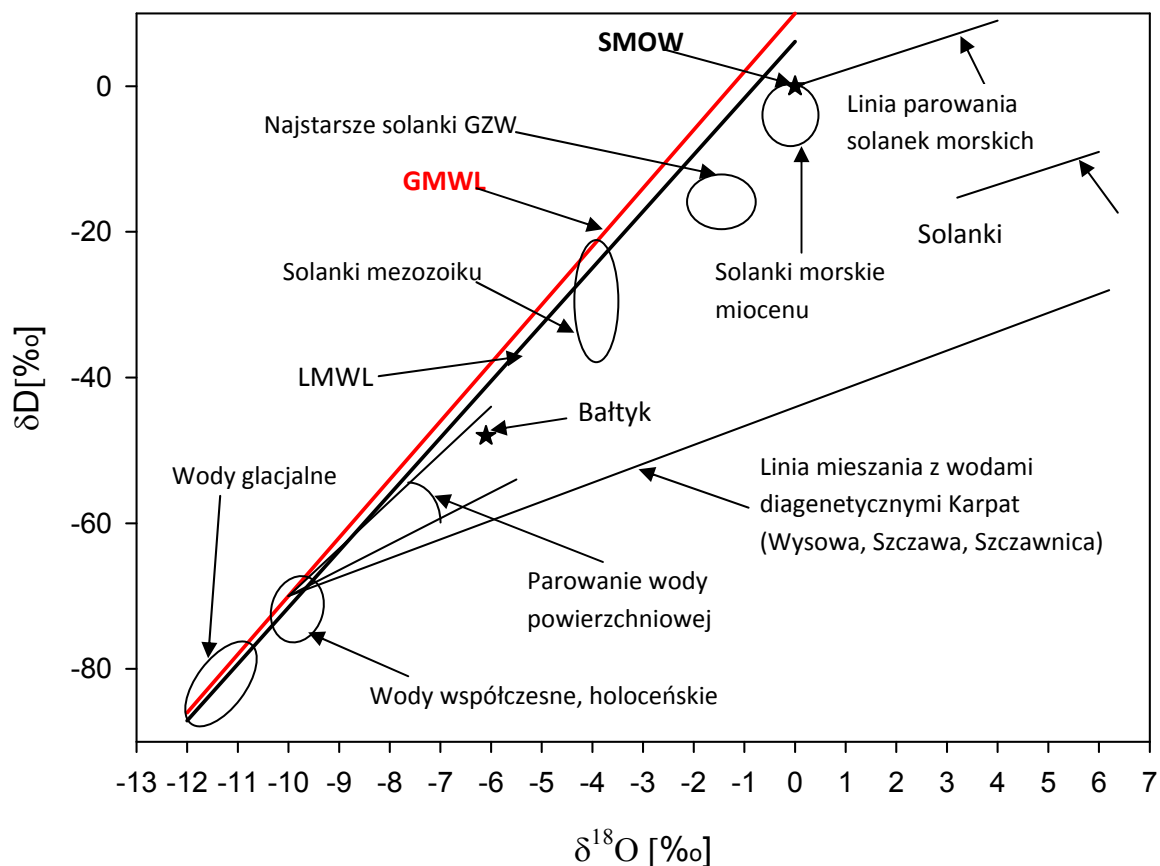
Fontes, 1980). Wodór również posiada trzy naturalne izotopy, z których dwa są trwałe:  $^1\text{H}$  (prot) i  $^2\text{H}$  (deuter) zaś trzeci z nich,  $^3\text{H}$  – tryt jest izotopem promieniotwórczym o czasie połowicznego zaniku równym 4500dni. Abundancje izotopów wodoru przedstawiają się następująco:  $^1\text{H} - 99,984\%$ ,  $^2\text{H} - 0,015\%$ ,  $^3\text{H} - 10^{-14} - 10^{-16}\%$ .

Międzynarodowo akceptowanym wzorcem do wyrażania składu izotopowego tlenu i wodoru jest V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), dla którego z założenia przyjmuje się:

$$\delta^{18}\text{O} = \delta^2\text{H} = 0$$

Stężenie trytu wyraża się w tzw. jednostkach trytowych T.U. Jedna jednostka trytowa oznacza stężenie równe 1 atomowi  $^3\text{H}$  przypadającemu na  $10^{18}$  atomów  $^1\text{H}$ , co w skali aktywności jest równoważne 0,119 Bq/kg wody .

Na rys.12 przedstawione zostały typowe składy izotopowe różnych wód występujących na obszarze Polski na tle globalnej i lokalnej linii wód meteorycznych (GMWL i LMWL). Za linię lokalną przyjęto linię opadów dla Krakowa.



Rys.12. Typowe składy izotopowe wód obszaru Polski (Zuber, 2007; Labus, 2003; Pluta, 2011)

Polskie wody podziemne dzielone są na cztery kategorie:

- 1) różnowiekowe wody meteoryczne – infiltracyjne (infiltracja bezpośrednia z opadów, infiltracja pośrednia – mieszanina wód z infiltracji bezpośredniej w wodami powierzchniowymi),
- 2) wody sedymentacyjne,
- 3) wody dehydratacyjne,
- 4) wody mieszane.

Z uwagi na okresy zasilania w obrębie wód infiltracyjnych można wyodrębnić następujące grupy:

- wody współczesne, zawierające składniki antropogeniczne – najczęściej tryt, SF<sub>6</sub>, SF<sub>5</sub>, freony, itp.,

- wody infiltracji holocenińskiej – pozbawione składników antropogenicznych, w tym trytu,
- wody paleoinfiltracyjne, reliktowe – zasilane w końcowym etapie ostatniego zlodowacenia, wody interglacjalne a także wody infiltracji przedplejstocenińskiej.

Wody sedymentacyjne można podzielić na morskie i lądowe, na syngenetyczne i epigenetyczne. Zaliczamy do nich wody reliktowe, ale także wody młode.

Kolejny typ wód to wody dehydratacyjne, do których zaliczane są wody metamorficzne (z uwodnionych minerałów ilastych podczas ich przemiany - metamorfizmu) a także wody diagenetyczne (uwalniane podczas tworzenia się skał z uwodnionych minerałów ilastych – diagenезы) i wody dehydratacyjne gipsów (uwalniane przy przechodzeniu gipsu w anhydryt).

Osobną grupą wód są wody mieszane. Powstają one w wyniku zmieszania omówionych wcześniej typów wód w różnych proporcjach. Mieszanie to może być dwu lub wieloskładnikowe (Zuber i Ciężkowski, 2007) skutecznie utrudniając tym samym interpretację ich pochodzenia, opartą na pomiarach wskaźnikowych.

### 6.3. Wyniki pomiarów

W tabelach 7 i 9 przedstawione zostały wyniki analiz składu chemicznego wody ze zbiorników Kaniów, Rontok Duży i Brzeszcze, a także wyniki pomiarów aktywności promieniotwórczej, składu izotopowego tlenu i wodoru oraz stężenia trytu.

Tabela 7. Zestawienie wyników analiz składu chemicznego wód zbiorników Kaniów (WK) Brzeszcze (WB) i Rontok Duży (WRD).

| Parametr                                                        | Wlot  |       |      | Wylot |       |      | Róg zb. | Wisła | Piezom |
|-----------------------------------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|---------|-------|--------|
|                                                                 | WK1   | WB1   | WRD1 | WK4   | WB2   | WRD2 | WK7     | WK5   | Pz2    |
| <b>Charakterystyka ogólna</b>                                   |       |       |      |       |       |      |         |       |        |
| <b>pH</b>                                                       | 6,94  | 7,38  | 7,38 | 7,46  | 7,22  | 7,56 | 7,38    | 7,44  | 2,7    |
| <b>Eh [Mv]</b>                                                  | 256   | 24    | 22   | 245   | 45    | 12   | 221     | 252   | 647    |
| <b>Przewodność <math>\gamma_{25}</math> [mS/cm]</b>             | 73,3  | 30,6  | 0,84 | 74,8  | 20,6  | 0,81 | 73,9    | 0,26  | 5,81   |
| <b>Substancje rozpuszczone mineralne Sm [mg/dm<sup>3</sup>]</b> | 52136 | 19728 | 440  | 55207 | 12889 | 434  | 53384   | 193   | 3199   |
| <b>Mineralizacja M [mg/dm<sup>3</sup>]</b>                      | 52191 | 19839 | 521  | 55270 | 12997 | 538  | 53439   | 253   | 3200   |
| <b>H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> [mg/dm<sup>3</sup>]</b>         | 6,63  | 14,8  | 1,43 | 5,98  | 23,8  | 1,82 | 7,54    | 7,80  | 35,4   |
| <b>SiO<sub>2</sub> [mg/dm<sup>3</sup>]</b>                      | 5,10  | 11,4  | 1,10 | 4,60  | 18,3  | 1,40 | 5,80    | 6,00  | 27,2   |
| <b>Kationy [mg/l]</b>                                           |       |       |      |       |       |      |         |       |        |
| <b>Na<sup>+</sup></b>                                           | 15880 | 6172  | 91,0 | 16330 | 4070  | 87,2 | 16450   | 24,5  | 325    |

|                                       | Włot   |        |        | Wylot |        |        | Róg zb. | Wisła | Piezom |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|--------|
| Parametr                              | WK1    | WB1    | WRD1   | WK4   | WB2    | WRD2   | WK7     | WK5   | Pz2    |
| K <sup>+</sup>                        | 168    | 82,1   | 11,1   | 170   | 55,9   | 11,0   | 173     | 4,07  | 4,91   |
| Li <sup>+</sup>                       | 2,00   | 0,77   | 0,016  | 1,98  | 0,49   | 0,015  | 1,99    | 0,002 | 0,028  |
| Be <sup>+2</sup> [*10 <sup>-3</sup> ] | 0,37   | <0,020 | <0,020 | 1,44  | <0,020 | <0,02  | 0,03    | 0,04  | 0,27   |
| Ca <sup>+2</sup>                      | 2638   | 509    | 47,0   | 2721  | 349    | 49,8   | 2737    | 35,9  | 404    |
| Mg <sup>+2</sup>                      | 1065   | 441    | 12,1   | 1086  | 286    | 12,0   | 1102    | 4,97  | 81,7   |
| Ba <sup>+2</sup>                      | 49,9   | 0,69   | 0,27   | 51,7  | 1,68   | 0,55   | 50,3    | 0,071 | 0,62   |
| Sr <sup>+2</sup>                      | 86,0   | 17,2   | 0,60   | 89,0  | 12,3   | 0,61   | 89,5    | 0,20  | 1,71   |
| Fe <sup>+2</sup>                      | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,079 | <0,002 | <0,002 | 0,19    | 0,27  | 326    |
| Mn <sup>+2</sup>                      | 1,56   | 0,001  | 0,001  | 1,46  | 0,001  | 0,001  | 1,51    | 0,009 | 36,5   |
| Al <sup>+3</sup>                      | 0,008  | <0,005 | <0,005 | 0,045 | <0,005 | <0,005 | 0,086   | 0,13  | 0,47   |
| Aniony [mg/l]                         |        |        |        |       |        |        |         |       |        |
| Cl <sup>-</sup>                       | 34316  | 10848  | 106    | 33110 | 7303   | 128    | 33394   | 36,9  | 1659   |
| Br <sup>-</sup>                       | 115    | NA     | NA     | 120   | NA     | NA     | 56,5    | 0,23  | 5,08   |
| J <sup>-</sup>                        | 53,2   | NA     | NA     | 45,1  | NA     | NA     | 5,1     | 0,25  | 1,08   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>         | 21,6   | 85,0   | 36,8   | 0,50  | 81,8   | 34,1   | 0,50    | 19,0  | 225    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>          | 1,10   | NA     | NA     | 0,87  | NA     | NA     | 1,00    | 0,12  | 0,02   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>          | 8,0    | NA     | NA     | 7,2   | NA     | NA     | 8,1     | 3,4   | 2,9    |
| BO <sub>3</sub> <sup>-3</sup>         | 15,3   | 4,2    | 0,28   | 15,2  | 3,4    | 0,20   | 12,0    | 0,05  | 0,90   |
| HBO <sub>2</sub>                      | 11,4   | 3,1    | 0,21   | 11,4  | 2,5    | 0,15   | 8,9     | 0,04  | 0,67   |

Zbiorniki Brzeszcze i Kaniów są zbiornikami czynnymi, zaś zbiornik Rontok Duży jest wyłączony z eksploatacji. Do zbiornika Brzeszcze odprowadzane są wody z Kopalni Węgla Kamiennego „Brzeszcze”. Wody te charakteryzują się dużą zmiennością parametrów chemicznych, co związane jest ze sposobem odwadniania kopalni. W przypadku zbiornika Kaniów, wody wykazują większą stabilność zarówno pod względem stężenia chlorków jak i aktywności izotopów promieniotwórczych i składu izotopowego tlenu oraz wodoru. (porównaj tabela 9). Obecność w nich głębokich solanek manifestuje się zwiększoną mineralizacją. W przypadku nieczynnego zbiornika Rontok Duży można zaobserwować efekt wysładzania się wód. Brak dopływu wody słonej w połączeniu z opadami atmosferycznymi i spływem wody z okolicznych pól powoduje systematyczny spadek stężenia chlorków oraz zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych. Wyniki pomiarów, potwierdzające powyższe stwierdzenia zestawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Zestawienie wyników pomiarów prób wody pobranych ze zbiornika Rontok Duży w ciągu 3 kampanii pomiarowych uzupełnione danymi Głównego Instytutu Górnictwa.

| Data                           | WRD1 –okolice wlotu wody do zbiornika |                          |                        | WRD2 –okolice wylotu wody ze zbiornika |                          |                        |
|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------|------------------------|
|                                | <sup>226</sup> Ra [Bq/l]              | <sup>228</sup> Ra [Bq/l] | Cl <sup>-</sup> [mg/l] | <sup>226</sup> Ra [Bq/l]               | <sup>228</sup> Ra [Bq/l] | Cl <sup>-</sup> [mg/l] |
| <b>23.04.2007<sup>1)</sup></b> | 0,307 ± 0,003                         | 0,235 ± 0,003            | NA                     | 0,267 ± 0,004                          | 0,0611 ± 0,003           | NA                     |
| <b>3.12.2008<sup>2)</sup></b>  | 0,152 ± 0,012                         | 0,05 ± 0,03              | NA                     | 0,152 ± 0,012                          | 0,05 ± 0,03              | NA                     |
| <b>14.12.2009<sup>3)</sup></b> | 0,106 ± 0,014                         | < 0,06                   | NA                     | 0,106 ± 0,014                          | < 0,06                   | NA                     |
| <b>14.05.2011</b>              | 0,039 ± 0,003                         | 0,010 ± 0,004            | 182                    | 0,052 ± 0,003                          | 0,016 ± 0,005            | 178                    |
| <b>25.07.2014</b>              | NA                                    | NA                       | 106                    | NA                                     | NA                       | 128                    |

<sup>1)</sup>Analizy wykonane w ramach pracy magisterskiej Autorki (Śleziak, 2008)

<sup>2)</sup>Analizy wykonane przez Główny Instytut Górnictwa (GIG, 2009)

<sup>3)</sup>Analizy wykonane przez Główny Instytut Górnictwa (GIG, 2010)

NA – nie analizowano

W okolicach zbiornika Rontok Duży zlokalizowane są piezometry ułatwiające kontrolę poziomu zwierciadła i jakości wód podziemnych w okolicach zbiornika. Analizy aktywności promieniotwórczej izotopów radu <sup>226</sup>Ra i <sup>228</sup>Ra nie wykazały podwyższonej radioaktywności wód pobranych z piezometrów.

Tabela 9. Zestawienie wyników pomiarów wody ze zbiorników Kaniów, Rontok Duży i Brzeszcze oraz z ich najbliższych okolic (por. rys.6).

## a) Zbiornik Kaniów

| Próbka         | Pobór     | Opis próbki                             | $^{226}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $^{228}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$ | $^{210}\text{Pb}$<br>[mBq/l] | $^{234}\text{U}$<br>[mBq/l] | $^{238}\text{U}$<br>[mBq/l] | $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$ | $\delta^{18}\text{O}$<br>[‰] | $\delta\text{D}$<br>[‰] | Tryt<br>[T.U.] | Przewodność<br>[mS] | $\text{Cl}^-$<br>[mg/l] | $\text{HCO}_3^-$<br>[mg/l] |
|----------------|-----------|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| W <sub>1</sub> | 2.10.2010 | wlot wody do zbiornika                  | 5,545 ± 0,033               | 4,75 ± 0,06                 | 0,86                                      | 237,8 ± 0,4                  | 30,5 ± 1,5                  | 5,9 ± 0,5                   | 5,22                                    | -4,80 <sup>1)</sup>          | -38,5 <sup>2)</sup>     | 2,2 ± 0,3      | 12,36               | 34300 <sup>3)</sup>     | 85,4 <sup>4)</sup>         |
| W <sub>2</sub> | 2.10.2010 | wschód                                  | 4,829 ± 0,039               | 5,13 ± 0,08                 | 1,06                                      | 44,5 ± 0,5                   | 4,09 ± 0,32                 | 1,49 ± 0,18                 | 2,74                                    | -4,61                        | -38,5                   | 1,9 ± 0,4      | 13,56               | 33200                   | 82,4                       |
| W <sub>3</sub> | 2.10.2010 | odciek – komora mieszania               | 2,565 ± 0,031               | 2,769 ± 0,059               | 1,08                                      | 8,53 ± 0,56                  | 6,16 ± 0,27                 | 1,93 ± 0,14                 | 3,19                                    | -4,63                        | -38,9                   | 2,2 ± 0,4      | 13,58               | 33500                   | 75,3                       |
| W <sub>4</sub> | 2.10.2010 | wylot ze zbiornika, od strony zbiornika | 4,32 ± 0,03                 | 3,799 ± 0,057               | 0,88                                      | 181,3 ± 0,4                  | 4,57 ± 0,38                 | 1,41 ± 0,19                 | 3,24                                    | -4,68                        | -38,8                   | 2,3 ± 0,4      | >20                 | 33100                   | 73,3                       |
| W <sub>5</sub> | 2.10.2010 | Wisła – przed zrzutem                   | ppd                         | ppd                         | -                                         | NA                           | 2,17 ± 0,18                 | 1,3 ± 0,14                  | 1,67                                    | -9,23                        | -67,2                   | 11,9 ± 0,7     | 0,227               | 36,9                    | 82,4                       |
| W <sub>6</sub> | 2.10.2010 | północny – wschód                       | 4,44 ± 0,04                 | 4,479 ± 0,076               | 1,01                                      | 246,4 ± 0,4                  | NA                          | NA                          | -                                       | -4,66                        | -39,8                   | 1,8 ± 0,4      | 14,36               | 34000                   | 79,3                       |
| W <sub>7</sub> | 2.10.2010 | północny – zachód                       | 4,174 ± 0,038               | 3,996 ± 0,072               | 0,96                                      | 104,1 ± 0,4                  | 4,18 ± 0,34                 | 1,85 ± 0,21                 | 2,26                                    | -4,72                        | -39,2                   | 2,3 ± 0,5      | >20                 | 33400                   | 73,2                       |
| W <sub>8</sub> | 2.10.2010 | południowy - zachód                     | 4,081 ± 0,037               | 3,92 ± 0,07                 | 0,96                                      | 60,1 ± 0,5                   | NA                          | NA                          | -                                       | -4,66                        | -38,8                   | 3,3 ± 0,5      | >20                 | 32600                   | 79,3                       |
| Pz 1           | 6.10.2010 | piezometr – dalej od zbiornika          | 0,007 ± 0,0007              | 0,052 ± 0,003               | 7,43                                      | ≤ 5                          | 2,96 ± 0,19                 | 1,58 ± 0,14                 | 1,88                                    | -9,29                        | -65,9                   | 9,3 ± 0,6      | 3,16                | 1070                    | 110                        |
| Pz 2           | 6.10.2010 | piezometr – bliżej zbiornika            | 0,0112 ± 0,0009             | 0,0253 ± 0,0019             | 2,26                                      | 28,42 ± 0,14                 | 4,15 ± 0,16                 | 1,72 ± 0,13                 | 2,41                                    | -8,07                        | -58,1                   | 12,2 ± 0,7     | 5,81                | 1660                    | NA                         |
| W <sub>1</sub> | 5.03.2011 | wlot wody do zbiornika                  | 6,16 ± 0,04                 | 6,73 ± 0,13                 | 1,09                                      | 160,2 ± 0,3                  | NA                          | NA                          | -                                       | -4,40                        | -37,9                   | 1,8 ± 0,5      | 13,78               | 38900                   | NA                         |

| Próbka          | Pobór      | Opis próbki                                      | $^{226}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $^{228}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$ | $^{210}\text{Pb}$<br>[mBq/l] | $^{234}\text{U}$<br>[mBq/l] | $^{238}\text{U}$<br>[mBq/l] | $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$ | $\delta^{18}\text{O}$<br>[‰] | $\delta\text{D}$<br>[‰] | Tryt<br>[T.U.] | Przewodność<br>[mS] | $\text{Cl}^-$<br>[mg/l] | $\text{HCO}_3^-$<br>[mg/l] |
|-----------------|------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| W <sub>9</sub>  | 5.03.2011  | odciek bliżej<br>wlotu do<br>komory<br>mieszania | 2,656 ±<br>0,021            | 3,45 ±<br>0,04              | 1,3                                       | 8,5 ± 0,4                    | NA                          | NA                          | -                                       | -4,36                        | -37,6                   | 2,4 ±<br>0,5   | 7,35                | 34600                   | NA                         |
| W <sub>10</sub> | 5.03.2011  | odciek<br>naprzeciwko<br>wylotu                  | 0,947 ±<br>0,011            | 1,101 ±<br>0,04             | 1,16                                      | ppd                          | NA                          | NA                          | -                                       | -5,88                        | -47,9                   | 2,8 ±<br>0,6   | 10,08               | 33500                   | NA                         |
| W <sub>1</sub>  | 9.04.2012  | wlot wody<br>do zbiornika                        | 10,30 ±<br>0,05             | 10,63 ±<br>0,10             | 1,03                                      | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -4,45                        | -36,3                   | 1,3 ±<br>0,4   | NA                  | 34500                   | 125                        |
| W <sub>3</sub>  | 9.04.2012  | odciek –<br>komora<br>mieszania                  | 3,84 ±<br>0,03              | 3,69 ±<br>0,05              | 0,96                                      | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -4,29                        | -35,5                   | 2,4 ±<br>0,4   | NA                  | 31100                   | 97,6                       |
| W <sub>4</sub>  | 9.04.2012  | wylot ze<br>zbiornika,<br>od strony<br>zbiornika | 7,78 ±<br>0,06              | 7,61 ±<br>0,12              | 0,98                                      | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -4,29                        | -35,9                   | 1,4 ±<br>0,4   | NA                  | 32900                   | 91,5                       |
| W <sub>9</sub>  | 9.04.2012  | odciek bliżej<br>wlotu do<br>komory<br>mieszania | 1,18 ±<br>0,11              | 1,08 ±<br>0,03              | 0,92                                      | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -4,82                        | -39,3                   | 2,7 ±<br>0,4   | NA                  | 28100                   | 110                        |
| W <sub>10</sub> | 9.04.2012  | odciek<br>naprzeciwko<br>wylotu                  | 1,69 ±<br>0,010             | 1,59 ±<br>0,04              | 0,94                                      | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -4,66                        | -36                     | 2,3 ±<br>0,4   | NA                  | 32300                   | 103                        |
| Grzawa          | 27.06.2012 | Studnia                                          | 0,00296<br>± 0,0006         | 0,0109 ±<br>0,0007          | 3,68                                      | ≤ 5                          | 2,83 ±<br>0,17              | 1,36 ±<br>0,16              | 2,08                                    | -9,18                        | -65,1                   | 8,6 ±<br>0,5   | NA                  | 24,1                    | NA                         |

b) Zbiornik Rontok Duży

| Próbka | Pobór      | Opis próbki                | $^{226}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $^{228}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$ | $^{210}\text{Pb}$<br>[mBq/l] | $^{234}\text{U}$<br>[mBq/l] | $^{238}\text{U}$<br>[mBq/l] | $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$ | $\delta^{18}\text{O}$<br>[‰] | $\delta\text{D}$ [‰] | Tryt<br>[T.U.] | przewodność<br>[mS] | $\text{Cl}^-$<br>[mg/l] | $\text{HCO}_3^-$<br>[mg/l] |
|--------|------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| WRD1   | 14.05.2011 | wlot wody<br>do zbiornika  | 0,039 ±<br>0,003            | 0,010 ±<br>0,004            | 0,26                                      | ≤ 5                          | 5,1 ± 0,4                   | 2,58 ±<br>0,25              | 1,98                                    | -6,40                        | -52,7                | 9,7 ±<br>0,5   | 0,511               | 182                     | 134                        |
| WRD2   | 14.05.2011 | okolice<br>wylotu          | 0,052 ±<br>0,003            | 0,016 ±<br>0,005            | 0,31                                      | 6,46 ±<br>0,19               | 4,56 ±<br>0,32              | 2,46 ±<br>0,23              | 1,85                                    | -6,33                        | -51,9                | 6,7 ±<br>0,4   | 0,551               | 179                     | 146                        |
| WRB    | 14.05.2011 | zbiornik<br>buforowy       | 0,0155 ±<br>0,0013          | ≤ 0,010                     | 0,26                                      | 7,73 ±<br>0,18               | NA                          | NA                          | -                                       | -7,62                        | -59,8                | 7,3 ±<br>0,4   | 0,342               | 75,2                    |                            |
| WRM    | 14.05.2011 | zbiornik<br>Rontok<br>Mały | ppd                         | ppd                         | -                                         | ≤ 5                          | 4,03 ±<br>0,27              | 2,4 ± 0,2                   | 1,69                                    | -8,59                        | -62,9                | 6,3 ±<br>0,4   | 0,369               | 68,1                    | 165                        |
| Pz IVc | 14.05.2011 | piezometr                  | ppd                         | ppd                         | -                                         | ≤ 5                          | 0,91 ±<br>0,10              | 0,55 ±<br>0,08              | 1,65                                    | -8,41                        | -56                  | 12,3 ±<br>0,6  | 0,1607              | 51,1                    | 91,5                       |
| Pz IVd | 14.05.2011 | piezometr                  | ppd                         | ppd                         | -                                         | ≤ 5                          | 1,96 ±<br>0,18              | 0,85 ±<br>0,11              | 2,31                                    | -9,07                        | -64,3                | 9,3 ±<br>0,5   | 0,1518              | 48,2                    | 61                         |
| WRD1   | 25.07.2013 | wlot wody<br>do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -5,14                        | -43,4                | 10,9 ±<br>0,7  | NA                  | 106                     | 140                        |
| WRD2   | 25.07.2013 | okolice<br>wylotu          | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -5,01                        | -44,3                | 11,7 ±<br>0,7  | NA                  | 128                     | 146                        |
| HP-17a | 2.10.2010  | piezometr                  | 0,010 ±<br>0,001            | 0,008 ±<br>0,002            | 0,8                                       | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | NA                           | NA                   | NA             | NA                  | NA                      | NA                         |

c) Zbiornik Brzeszcze

| Próbka          | Pobór      | Opis próbki             | $^{226}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $^{228}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$ | $^{210}\text{Pb}$<br>[mBq/l] | $^{234}\text{U}$<br>[mBq/l] | $^{238}\text{U}$<br>[mBq/l] | $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$ | $\delta^{18}\text{O}$<br>[‰] | $\delta\text{D}$ [‰] | Tryt<br>[T.U.] | Przewodność<br>[mS] | $\text{Cl}^-$<br>[mg/l] | $\text{HCO}_3^-$<br>[mg/l] |
|-----------------|------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| WB <sub>1</sub> | 5.03.2011  | wlot wody do zbiornika  | 0,0203 ± 0,0010             | 0,047 ± 0,004               | 2,32                                      | ppd                          | 6,98 ± 0,33                 | 1,33 ± 0,12                 | 5,25                                    | -9,24                        | -68,5                | 14,5 ± 0,5     | 1,267               | 519                     | 104                        |
| WB <sub>2</sub> | 5.03.2011  | wylot wody ze zbiornika | 0,056 ± 0,002               | 0,133 ± 0,008               | 2,38                                      | ppd                          | 5,4 ± 0,37                  | 2,05 ± 0,21                 | 2,63                                    | -8,72                        | -64,9                | 16,1 ± 0,9     | 9,61                | 6860                    | 183                        |
| WB <sub>3</sub> | 6.03.2011  | Wisła – przed zrzutem   | ppd                         | 0,0157 ± 0,0010             | -                                         | ppd                          | 2,71 ± 0,18                 | 1,34 ± 0,12                 | 2,02                                    | -10,02                       | -73,0                | 13,9 ± 0,9     | 0,663               | 182                     | 128                        |
| WB <sub>4</sub> | 6.03.2011  | Wisła – za zrzutem      | ppd                         | 0,0204 ± 0,0010             | -                                         | ppd                          | 2,08 ± 0,18                 | 1,06 ± 0,13                 | 1,96                                    | -9,99                        | -72,7                | 14,5 ± 0,9     | 1,171               | 486                     | 122                        |
| WB <sub>1</sub> | 13.08.2011 | wlot wody do zbiornika  | 0,086 ± 0,003               | 0,099 ± 0,010               | 1,15                                      | 7,2 ± 0,3                    | NA                          | NA                          | -                                       | -9,06                        | -63,4                | 7,7 ± 0,5      | 6,43                | 3050                    | 281                        |
| WB <sub>2</sub> | 14.08.2011 | wylot wody ze zbiornika | 0,149 ± 0,004               | 0,165 ± 0,010               | 1,11                                      | 9,10 ± 0,26                  | NA                          | NA                          | -                                       | -7,49                        | -55,3                | 9,7 ± 0,6      | 9,95                | 7420                    | 134                        |
| WB <sub>3</sub> | 14.08.2011 | Wisła – przed zrzutem   | 0,0092 ± 0,0010             | 0,012 ± 0,002               | 1,3                                       | ≤ 5                          | NA                          | NA                          | -                                       | -8,41                        | -60,4                | 10,0 ± 0,6     | 0,337               | 52,5                    | NA                         |
| WB <sub>4</sub> | 14.08.2011 | Wisła – za zrzutem      | 0,0132 ± 0,0010             | 0,0121 ± 0,002              | 0,92                                      | ≤ 5                          | NA                          | NA                          | -                                       | -8,33                        | -59,6                | 10,0 ± 0,7     | 1,091               | 494                     | NA                         |
| WB <sub>5</sub> | 13.08.2011 | róg zbiornika pd - wsch | 0,124 ± 0,003               | 0,191 ± 0,012               | 1,54                                      | -                            | NA                          | NA                          | -                                       | -7,42                        | -55,8                | 8,6 ± 0,6      | 10,16               | 7440                    | 116                        |
| WB <sub>6</sub> | 13.08.2011 | róg zbiornika pd - zach | 0,086 ± 0,003               | 0,109 ± 0,008               | 1,27                                      | 5,13 ± 0,16                  | NA                          | NA                          | -                                       | -7,28                        | -55,8                | 9,3 ± 0,6      | 10,41               | 7960                    | 104                        |
| WB <sub>7</sub> | 13.08.2011 | róg zbiornika pn - wsch | 0,053 ± 0,002               | 0,074 ± 0,006               | 1,4                                       | ≤ 5                          | NA                          | NA                          | -                                       | -8,31                        | -68,7                | 8,3 ± 0,6      | 6,48                | 3320                    | 116                        |
| WB <sub>8</sub> | 14.08.2011 | róg zbiornika pn - zach | 0,106 ± 0,003               | 0,079 ± 0,008               | 0,75                                      | ≤ 5                          | NA                          | NA                          | -                                       | -7,65                        | -55,9                | 9,1 ± 0,6      | 9,68                | 6040                    | 116                        |
| WBB             | 13.08.2011 | zalewisko               | ppd                         | ppd                         | -                                         | ppd                          | NA                          | NA                          | -                                       | -7,26                        | -55,7                | 9,4 ± 0,6      | 1,307               | 562                     | NA                         |
| WB <sub>1</sub> | 11.01.2012 | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,12                        | -59,5                | 6,9 ± 0,5      | NA                  | 13400                   | 162                        |

| Próbka           | Pobór      | Opis próbki             | $^{226}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $^{228}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$ | $^{210}\text{Pb}$<br>[mBq/l] | $^{234}\text{U}$<br>[mBq/l] | $^{238}\text{U}$<br>[mBq/l] | $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$ | $\delta^{18}\text{O}$<br>[‰] | $\delta\text{D}$ [‰] | Tryt<br>[T.U.] | Przewodność<br>[mS] | $\text{Cl}^-$<br>[mg/l] | $\text{HCO}_3^-$<br>[mg/l] |
|------------------|------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| WB <sub>2</sub>  | 11.01.2012 | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,40                        | -61,2                | 7,8 ± 0,5      | NA                  | 7400                    | NA                         |
| WB <sub>1</sub>  | 28.01.2012 | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -9,37                        | -64,4                | 11 ± 0,7       | NA                  | 276                     | 134                        |
| WB <sub>2</sub>  | 28.01.2012 | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,75                        | -62,1                | 8,0 ± 0,5      | NA                  | 8030                    | 183                        |
| WB <sub>9</sub>  | 28.12.2012 | odciek                  | 0,0041 ± 0,0002             | ≤ 0,010                     | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -9,54                        | -62,8                | 7,1 ± 0,5      | 0,334               | 32,6                    | NA                         |
| WB <sub>10</sub> | 28.12.2012 | odciek                  | ppd                         | ppd                         | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -9,00                        | -61,9                | 8,7 ± 0,5      | 0,795               | 159                     | NA                         |
| WB <sub>1</sub>  | 24.03.2012 | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,22                        | -63,7                | 6,4 ± 0,5      | 18,61               | 12100                   | 250                        |
| WB <sub>2</sub>  | 24.03.2012 | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -9,34                        | -69,6                | 7,9 ± 0,5      | 0,595               | 182                     | 116                        |
| WB <sub>1</sub>  | 28.04.2012 | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,48                        | -62,3                | 6,0 ± 0,4      | 16,53               | 10040                   | 238                        |
| WB <sub>2</sub>  | 28.04.2012 | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,10                        | -60,9                | 6,4 ± 0,5      | 13,5                | 6980                    | 165                        |
| WB <sub>1</sub>  | 25.06.2012 | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,95                        | -64,7                | 8,8 ± 0,5      | NA                  | 5020                    | 226                        |
| WB <sub>2</sub>  | 25.06.2012 | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -7,39                        | -57                  | 8,1 ± 0,5      | NA                  | 7590                    | 149                        |
| WB <sub>1</sub>  | 27.08.2012 | wlot wody do zbiornika  | 0,042 ± 0,003               | 0,041 ± 0,003               | 0,97                                      | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -                            | -                    | -              | NA                  | 309                     | NA                         |
| WB <sub>2</sub>  | 27.08.2012 | wylot wody ze zbiornika | 0,151                       | 0,167                       | 1,11                                      | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -                            | -                    | 8,7 ± 0,6      | NA                  | 7960                    | 150                        |
| WB <sub>1</sub>  | 10.06.2013 | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,33                        | -60,5                | 6,3 ± 0,4      | NA                  | 12300                   | 220                        |
| WB <sub>2</sub>  | 10.06.2013 | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,38                        | -61,7                | 5,7 ± 0,4      | NA                  | 7160                    | 146                        |
| WB <sub>1</sub>  | 25.07.2013 | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,37                        | -57,5                | 7,7 ± 0,6      | NA                  | 10800                   | 232                        |

| Próbka          | Pobór      | Opis próbki             | $^{226}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $^{228}\text{Ra}$<br>[Bq/l] | $\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}$ | $^{210}\text{Pb}$<br>[mBq/l] | $^{234}\text{U}$<br>[mBq/l] | $^{238}\text{U}$<br>[mBq/l] | $\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$ | $\delta^{18}\text{O}$<br>[‰] | $\delta\text{D}$ [‰] | Tryt<br>[T.U.] | Przewodność<br>[mS] | $\text{Cl}^-$<br>[mg/l] | $\text{HCO}_3^-$<br>[mg/l] |
|-----------------|------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| WB2             | 25.07.2013 | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -7,46                        | -51,9                | $8,9 \pm 0,6$  | NA                  | 7300                    | 168                        |
| WB1             | 4.09.2014  | wlot wody do zbiornika  | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,72                        | -62,5                | $5,1 \pm 0,4$  | NA                  | 13700                   | 268                        |
| WB2             | 4.09.2014  | wylot wody ze zbiornika | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -7,51                        | -55,1                | $7,4 \pm 0,5$  | NA                  | 7230                    | 159                        |
| WB <sub>5</sub> | 4.09.2014  | róg zbiornika pd - wsch | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -7,53                        | -56,4                | $8,0 \pm 0,5$  | NA                  | 6950                    | 122                        |
| WB <sub>6</sub> | 4.09.2014  | róg zbiornika pd - zach | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -7,55                        | -56,2                | $8,3 \pm 0,5$  | NA                  | 6800                    | 128                        |
| WB <sub>7</sub> | 4.09.2014  | róg zbiornika pn - wsch | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -8,98                        | -62,5                | $7,9 \pm 0,5$  | NA                  | 2210                    | 104                        |
| WB <sub>8</sub> | 4.09.2014  | róg zbiornika pn – Zach | NA                          | NA                          | -                                         | NA                           | NA                          | NA                          | -                                       | -6,95                        | -56,3                | $8,5 \pm 0,5$  | NA                  | 6640                    | 134                        |

NA – nie analizowano

ppd – poniżej poziomu detekcji

- – nie obliczano z powodu braku danych

<sup>1)</sup> – niepewność oznaczenia  $\delta^{18}\text{O}$  [‰] -  $\pm 0,1$  [‰]

<sup>2)</sup> - niepewność oznaczania  $\delta\text{D}$  śr [‰] -  $\pm 1$  [‰]

<sup>3)</sup> – niepewność oznaczania  $\text{Cl}^-$  - na poziomie 3%

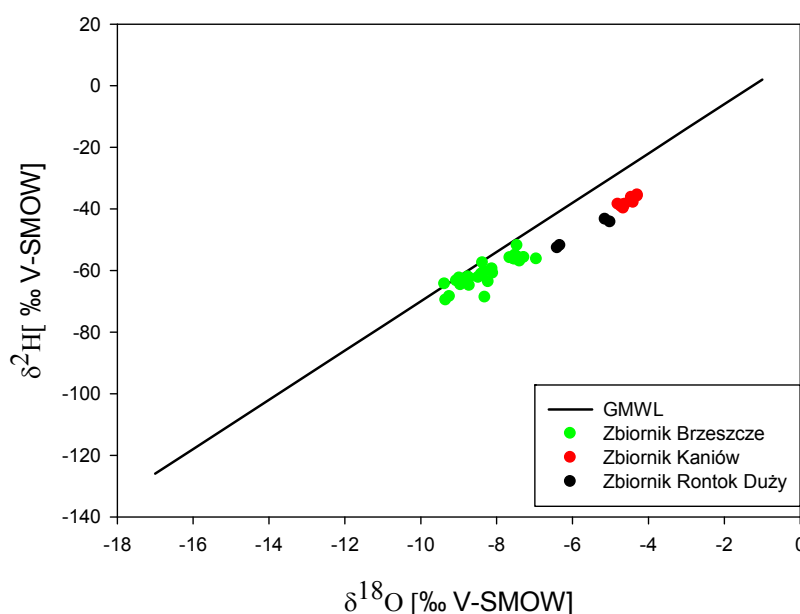
<sup>4)</sup> – niepewność oznaczania  $\text{HCO}_3^-$  - na poziomie 3%

Poziomy wykrywalności dla kolejnych izotopów promieniotwórczych:  $^{226}\text{Ra}$  – 2[mBq/l],  $^{228}\text{Ra}$  – 10[mBq/l],  $^{210}\text{Pb}$  – 5[mBq/l],  $^{234,238}\text{U}$  – 0,5[mBq/l] (Chau, 2010)

### **Omówienie wyników:**

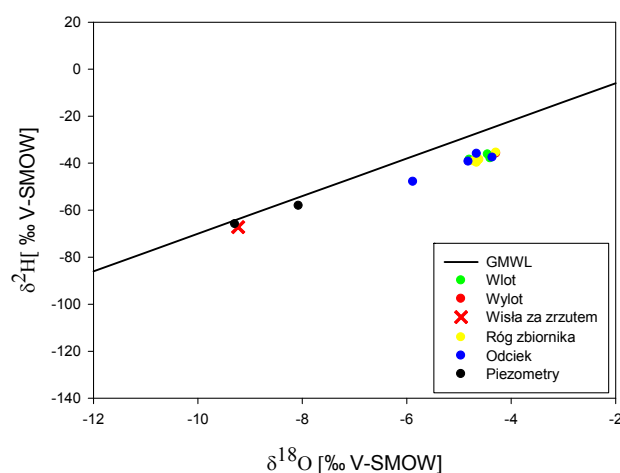
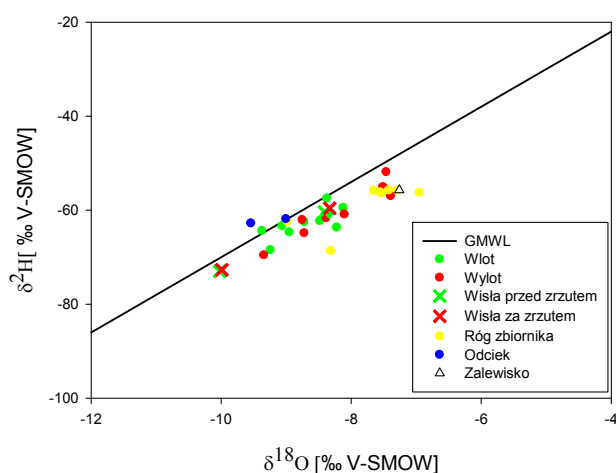
1. W wodach każdego z trzech zbiorników najwyższe aktywności osiągają izotopy radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ . W przypadku zbiornika Kaniów, w dniu 9.04.2012 zanotowano maksymalne stężenie radu  $^{226}\text{Ra}$  na wlocie wody do zbiornika -  $10,3 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{l}} \right]$ , przy jednoczesnym stężeniu radu  $^{228}\text{Ra}$  również powyżej  $10 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{l}} \right]$ .
2. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku izotopu ołowiu  $^{210}\text{Pb}$ . Najwyższe jego stężenia zanotowano w północno – wschodnim narożniku zbiornika Kaniów, a wynosiło ono ponad  $246 \left[ \frac{\text{mBq}}{\text{l}} \right]$ .
3. Aktywności izotopów uranu  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  we wszystkich zbiornikach są niewielkie, jednak również najwyższe ich aktywności stwierdzono w zbiorniku retencyjno – dozującym w Kaniowie – odpowiednio  $30,5$  i  $5,9 \left[ \frac{\text{mBq}}{\text{l}} \right]$  (2.10.2010 – na wlocie).
4. Woda w rejonie wylotu ze zbiornika Kaniów (WK4) ma niższą radioaktywność niż woda wlotowa do zbiornika (WK1). Odwrotna sytuacja ma miejsce w zbiorniku Brzeszcze.
5. Wody zbiorników Brzeszcze i Rontok Duży zawierają więcej trytu niż woda w zbiorniku Kaniów. W pierwszym przypadku szeroki zakres zmienności trytu na wlocie (od 5,1 do 14,5 T.U.) potwierdza zmienność proporcji mieszania wód różnego pochodzenia. Obserwuje się odwrotną zależność między stężeniem trytu a stężeniem jonów chlorkowych  $\text{Cl}^-$ . Jest to logicznie uzasadnione, jako że niskie stężenie chlorków odpowiada większemu rozcieńczeniu beztrytowych solanek głębszego krążenia płytszymi współczesnymi wodami infiltracyjnymi, zawierającymi tryt.
6. Zaobserwowane w marcu 2011 na wlocie do zbiornika Brzeszcze stężenie trytu na poziomie 14,5 TU pozwala na ostrożną ocenę wieku składowej trytowej na poziomie rzędu kilkudziesięciu lat (czas od momentu infiltracji do chwili pojawienia się w rurze wlotowej).
7. W Rontoku Dużym obserwowane obecnie podwyższone stężenie trytu jest wynikiem pochodzenia wody praktycznie w całości z opadów atmosferycznych i spływu powierzchniowego.

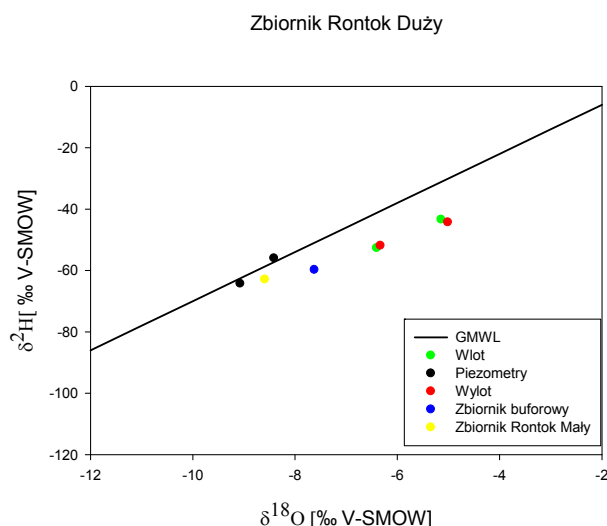
8. W zbiorniku Kaniów zawartość trytu zmienia się w niewielkim zakresie, to jest od 1,3 TU w wodzie wlotowej do 3,3 TU w jednym z rogów zbiornika. Odzwierciedla to niewielki udział wód współczesnych i dominację starych wód podziemnych o wysokiej mineralizacji. Dodatkowym potwierdzeniem takiego stanu rzeczy jest skład izotopowy zrzucanej wody, który wykazuje bardzo małe wahania w czasie i wyraźne przesunięcie w kierunku bardziej dodatnich wartości  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^2\text{H}$ .
9. W przypadku zbiornika Brzeszcze zaobserwowano, że w miesiącach letnich skład izotopowy na wylocie jest wyższy niż na wlocie, co jest skutkiem zwiększonego parowania i domieszki wód opadowych, które w lecie charakteryzują się wyższym składem izotopowym.



Zbiornik Brzeszcze

Zbiornik Kaniów

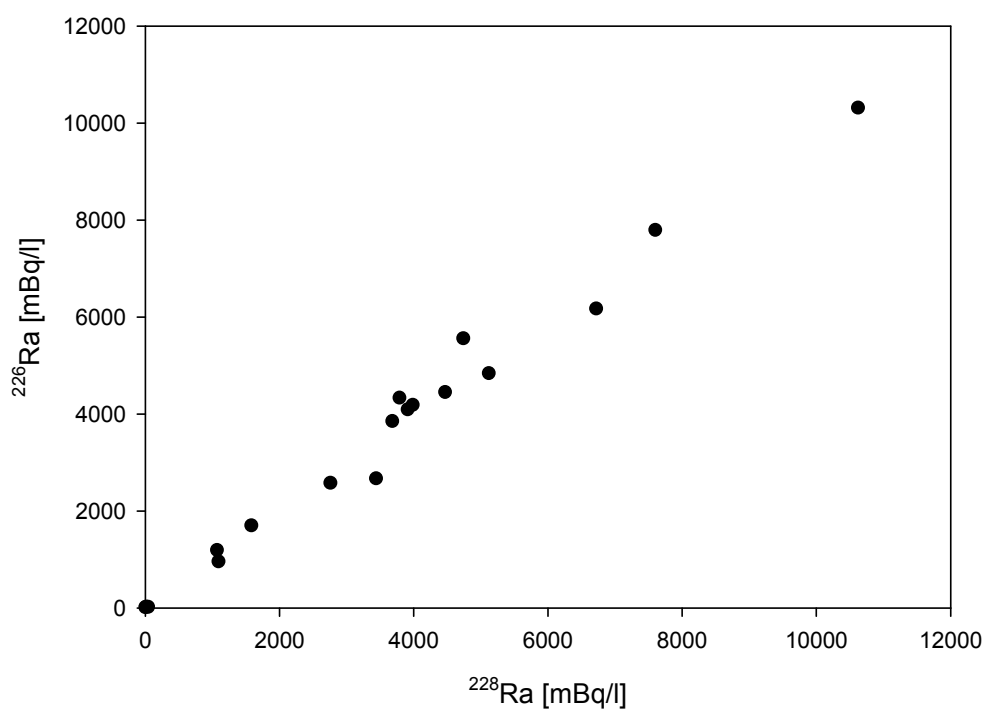




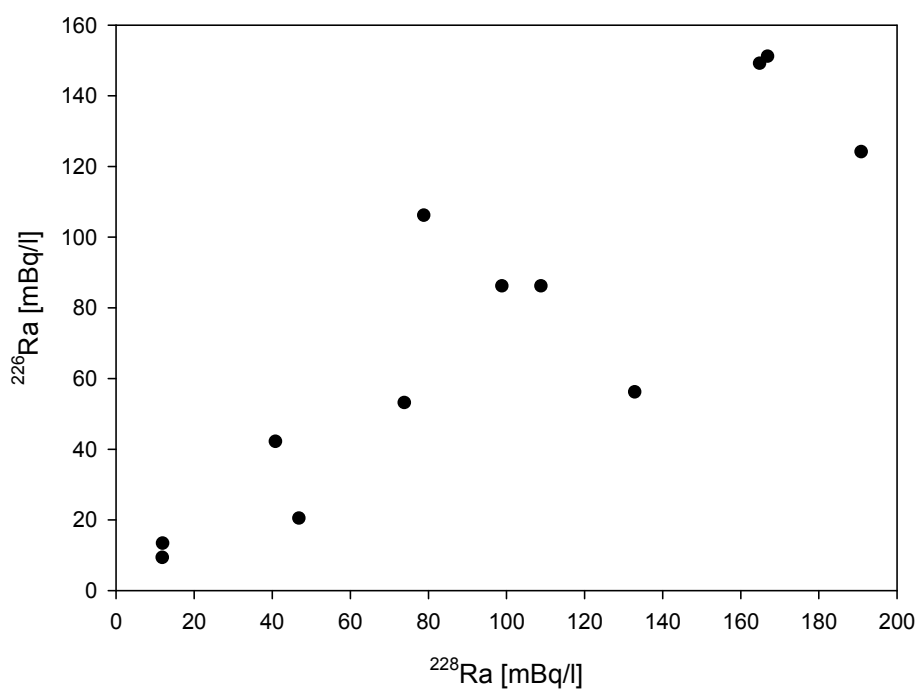
Rys.13. Skład izotopowy wody w zbiornikach Brzeszcze, Kaniów i Rontok Duży.

W celu lepszego zobrazowania zależności między poszczególnymi izotopami promieniotwórczymi, izotopami stabilnymi i chlorkami wykonano szereg wykresów dla zbiorników Kaniów, Brzeszcze i Rontok Duży, które zamieszczono poniżej.

Na rys. 14 i 15 przedstawione zostały zależności pomiędzy aktywnością dwóch izotopów radu występujących w wodach kopalnianych:  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ . Generalnie aktywności tych izotopów są ze sobą skorelowane liniowo, przy czym zależność ta jest silniejsza w przypadku wód pochodzących z Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia”, dla których w przybliżeniu współczynnik kierunkowy prostej jest równy jedności. Na obecnym etapie badań wytłumaczenie tego faktu nie jest możliwe zważywszy, że obydwa izotopy pochodzą z dwóch różnych szeregów promieniotwórczych. Silna liniowość zależności sugeruje mieszanie wód w układzie dwuskładnikowym. Z uwagi na obserwowany zakres zmienności stężeń oraz uwzględniając stałość składu izotopowego, nie może to być efekt mieszania się starych solanek z wodami współczesnymi. Wydaje się, że jest to raczej rezultat mieszania się różnych solanek na niższych poziomach kopalni. Częściowym potwierdzeniem takiej hipotezy mogą być dane przedstawione przez Plutę i in. (1996), które sugerują pewną zmienność aktywności  $^{226}\text{Ra}$  w poszczególnych dopływach na poziomach IV i VI kopalni przy podobnym składzie chemicznym. W przypadku wody z kopalni „Brzeszcze” również w przybliżeniu mamy do czynienia z zależnością liniową, jednak punkty pomiarowe wykazują większy rozrzut. Niewątpliwie jest on spowodowany zróżnicowanymi proporcjami wód wysoko zmineralizowanych i wody współczesnej w całkowitej masie zrzucanej przez kopalnię wody.



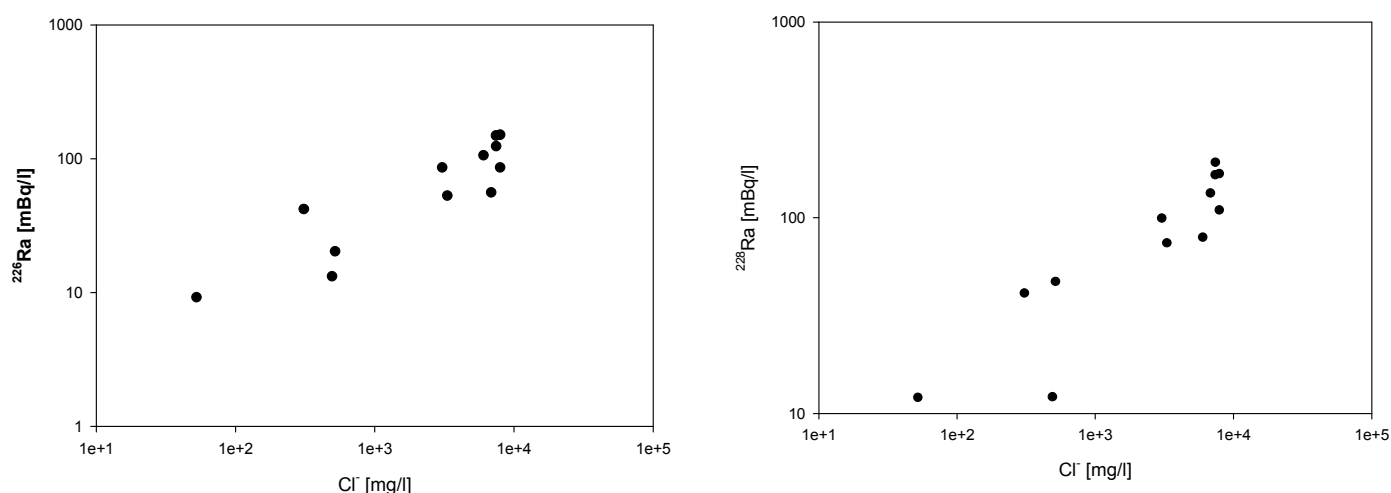
Rys.14. Zależność między izotopami radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  dla zbiornika Kaniów.



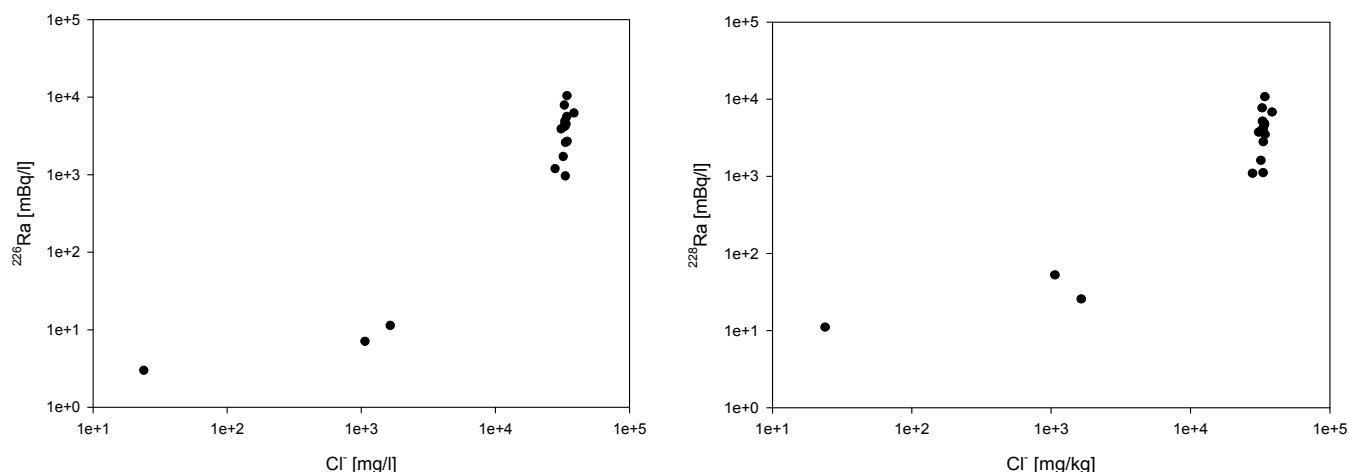
Rys.15. Zależność między izotopami radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  dla zbiornika Brzeszcze

Na kolejnych czterech wykresach (rys. 16 i 17), w układzie log-log przedstawiono zależności pomiędzy aktywnościami izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  a stężeniem chlorków w

wodzie. W takim układzie współrzędnych mieszanie dwuskładnikowe powinno przejawiać się w postaci zależności krzywoliniowej, zbliżonej do parabolicznej. W przypadku zbiornika Brzeszcze wyraźnie uwidacznia się zróżnicowany udział zarówno solanek jak i wód współczesnych. Stąd, w wodzie tego zbiornika obserwuje się szeroki zakres zmienności zarówno stężenia chlorków jak i izotopów radu (rys.16), a ich wzajemna relacja wykazuje słabe cechy mieszania dwuskładnikowego. W obrębie zbiornika w Kaniowie cechy mieszania dwuskładnikowego są zupełnie niewidoczne. Wyniki pomiarów tworzą zwarte grupy punktów. Oznaki mieszania widoczne są natomiast w próbach pobranych z piezometrów i ze studni w Grzawie. Jeśli wodę z tej ostatniej uznać za współczesną wodę infiltracyjną, wówczas położenie punktów reprezentujących piezometry jednoznacznie świadczy o mieszanii wód. Należy zatem stwierdzić, że przynajmniej w otoczeniu zbiornika w Kaniowie silnie zmineralizowane wody głębokiego krążenia mogą ascendować do względnie płytkich ujęć (przy założeniu, że misa zbiornika w Kaniowie jest szczelna).



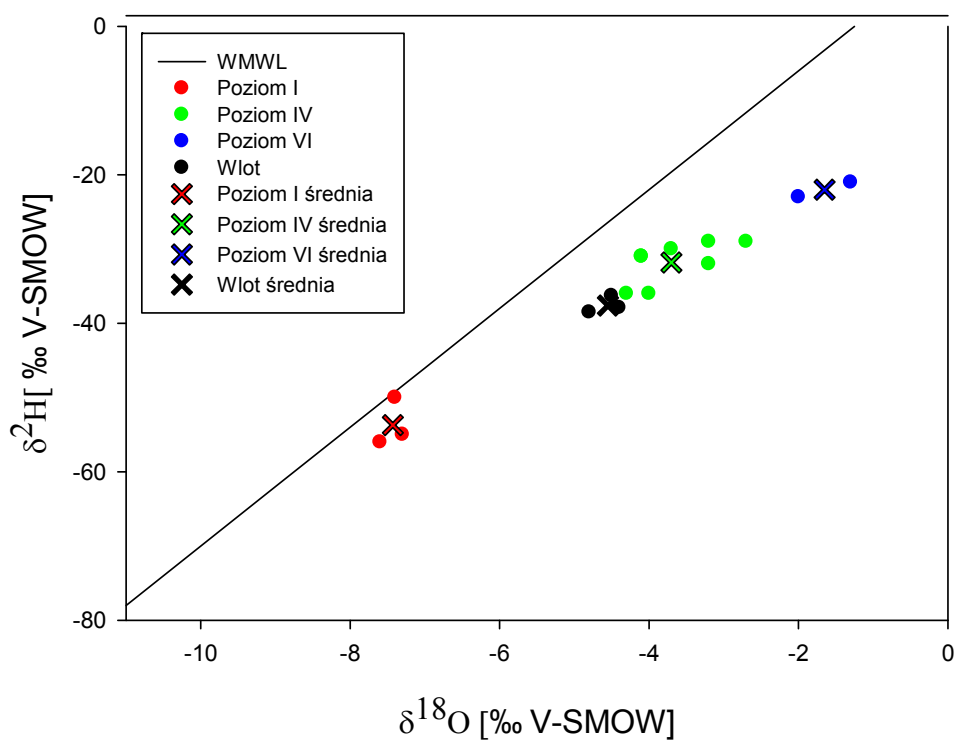
Rys.16. Zależność aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  od stężenia jonów chlorkowych  $\text{Cl}^-$  dla zbiornika Brzeszcze.



Rys.17. Zależność aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  od stężenia jonów chlorkowych  $\text{Cl}^-$  dla zbiornika Kaniów.

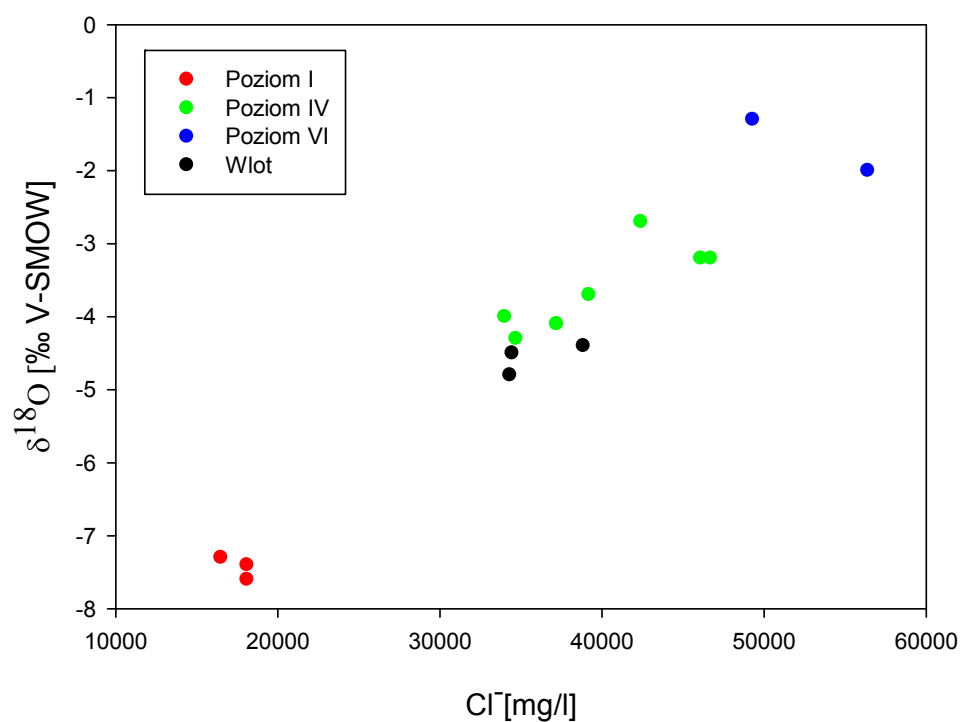
Wykorzystując dane Pluty i in. (1996) można ocenić zgodność wyników pomiarów składu izotopowego wody wlotowej do zbiornika wykonanych w ramach niniejszej pracy z rezultatami zawartymi we wspomnianej publikacji, dotyczącymi składów dopływów do poszczególnych poziomów kopalni. W cytowanej pracy zamieszczono również wyniki pomiarów aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$ , stężenia chlorków, oraz kilku innych parametrów chemicznych. Na podstawie tych danych oraz rezultatów zamieszczonych w tabeli 9 (a) Kaniów) sporządzono wykresy relacji pomiędzy składem izotopowym, stężeniem radu  $^{226}\text{Ra}$  i stężeniem chlorków w wodach.

Rys.18. dowodzi, że obraz izotopowy wód dopływających na poszczególnych poziomach kopalni Silesia i wód zrzucanych do zbiornika Kaniów tworzy spójny i logiczny układ.

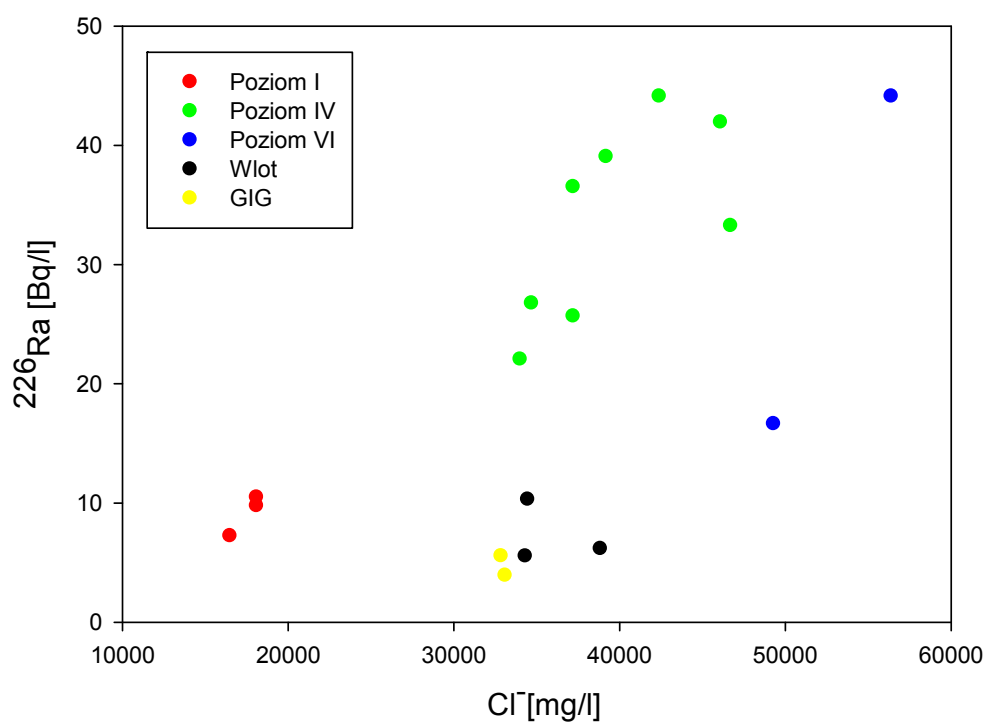


Rys.18. Skład izotopowy wody na poszczególnych poziomach kopalni Silesia (Pluta i in., 1996) oraz wody zrzucanej do zbiornika Kaniów (oznaczonej jako wlot)

Uwzględniając wielkość dopływów wody na poszczególnych poziomach (informacje uzyskane w Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia”) można pokazać, że wynik uzyskany na wlocie do zbiornika jest bliski średniej składów wód na poszczególnych poziomach, ważonej ich udziałami objętościowymi.



Rys.19. Zależność między składem izotopowym tlenu i stężeniem jonów chlorkowych w wodach kopalni „Silesia”



Rys.20. Zależność aktywności  $^{226}\text{Ra}$  od stężenia jonów chlorkowych w wodach kopalni „Silesia”

Mieszanie się wód różnego pochodzenia znajduje także poparcie w liniowym przebiegu zależności pomiędzy składem izotopowym tlenu a stężeniem chlorków.

Na rys. 20 oprócz wyników dla dopływów do poszczególnych poziomów kopalni Silesia (Pluta i in., 1996) zamieszczono rezultaty pomiarów aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  zmierzone w wodzie na wlocie do zbiornika Kaniów, wykonane na potrzeby niniejszej pracy. Zamieszczono na nim również dwa punkty reprezentujące wyniki pomiarowe uzyskane w laboratorium Głównego Instytutu Górnictwa w latach 2008 i 2009, wynoszące odpowiednio  $5,558 \pm 0,319$  i  $3,922 \pm 0,344 \left[ \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3} \right]$  (GiG, 2009, 2010). Są one porównywalne w sensie aktywności  $^{226}\text{Ra}$  z wynikami uzyskanymi w ramach tej pracy, aczkolwiek stężenia chlorków wydają się być nieco zaniżone.

Analiza tego rysunku w powiązaniu z rys. 19 wskazuje, że po drodze od ujęć poszczególnych dopływów do powierzchni ziemi zachodzi efektywne wytrącanie dużych ilości radu. Prezentowane dane sugerują, że w obrębie wyrobisk i instalacji kopalnianych wytrąceniu ulega aktywność rzędu 20 Bq z każdego wypompowywanego litra wody, co odpowiada ok. 30 GBq aktywności  $^{226}\text{Ra}$  magazynowanej w skali roku w podziemnych wyrobiskach. Niestety, w trakcie realizacji pracy wykonanie odpowiednich pomiarów pod ziemią, czy choćby pobranie prób z różnych rejonów kopalni nie było możliwe.

## **7. Osady i skała płonna zbiorników Brzeszcze, Kaniów i Rontok Duży: metodyka pomiarowa i wyniki pomiarów**

Woda kopalniana zrzuca do zbiorników jest głównym źródłem powstawania osadów w tych zbiornikach. Woda transportowana do zbiorników z dołu kopalń zawiera w swym składzie zawiesinę – drobne części skał i minerałów, cząstki organiczne oraz rozpuszczone w wodzie pierwiastki chemiczne określające jej skład chemiczny. Osady zbiorników są wynikiem gromadzenia części stałych mieszaniny wodnej – zawiesiny, jak również produktów reakcji chemicznych zachodzących pomiędzy pierwiastkami i związkami chemicznymi zawartymi w wodzie. Oprócz osadów pochodzących od wód kopalnianych w zbiornikach gromadzone są osady niesione wodami powierzchniowymi pochodzącymi z opadów deszczu dla których zbiorniki kopalniane są zbiornikami retencyjnymi. Takie uwarunkowania wpływają na skład chemiczny i mineralogiczny osadów dennych zbiorników kopalnianych.

Próbki do analiz pobierano z odsłoniętych przez wodę osadów, przy obniżonym jej stanie. W trakcie pobierania próbek stwierdzono, że osady pokrywały dno zbiornika i znajdowały się również na wewnętrznych ścianach obwałowań. Osady na ścianach zbiorników stanowiły cienkie niejednolite jasne warstwy (kolor kremowy, brunatny, rdzawy) zgromadzone w wyżłobieniach powstałych przez falującą wodę. Natomiast osady na dnie zbiornika stanowiły rozległe łachy koloru czarnego, o różnej grubości rozrzucone nieregularnie na powierzchni dna zbiornika. Największe skupisko osadów znajdowało się w okolicy wlotu. Rozmieszczenie osadów jest skutkiem wielu czynników wynikających z warunków technologicznych pracy zbiorników jak i będących odzwierciedleniem warunków meteorologicznych.

W trakcie zbierania materiałów do niniejszej pracy (pobieranie próbek wody i osadów, obserwacja pracy zbiorników) kilkakrotnie stwierdzono, iż zbiorniki pracowały przy otwartej zasuwie wylotowej – praca na przelew. Czyli woda wlotowa przepływała tylko przez zbiornik i nie była w nim retencjonowana. Incydentalnie zdarzało się, że zbiorniki pracowały przy różnym napełnieniu do maksymalnego włącznie. Wiatry powodowały intensywne falowanie wody powodując wyżłobienia w ścianach zbiorników i osadzanie osadów.

Przy pracy na przelew w zbiornikach nie było warunków dla wytrącania się osadów w wyniku reakcji chemicznych, natomiast przy napełnionych zbiornikach i zasilaniu ich wodą

istniały dogodne warunki do zachodzenia różnych reakcji chemicznych pomiędzy związkami zawartymi w wodzie wlotowej i wodzie zbiorników.

Przepływ wody w zbiornikach zależy od stopnia otwarcia upustu dennego i stopnia napełnienia zbiorników jak również od siły wiejącego wiatru. Te wszystkie okoliczności powodują iż osady dennego zbiorników kopalnianych są nieregularne, posiadają różną grubość w różnych miejscach zbiornika, a w niektórych miejscach nie występują wcale (wmywane przez prąd przepływającej wody). Osady do badań pobrano z różnych miejsc zbiorników. Miejsca poboru próbek zaznaczono na rysunku 6.

### **7.1. Badania składu mineralogicznego i pierwiastkowego osadów**

Badaniom mineralogicznym poddano sześć próbek osadów dennych z rejonów wlotu i wylotu wody zbiorników Kaniów, Brzeszcze i Rontok Duży. Pomiary przeprowadzono na osadach ze zbiornika Brzeszcze: OB1 – wlot, OB5 – wylot; ze zbiornika Kaniów: OK1 – wlot, OK9 – wylot, zaś ze zbiornika Rontok Duży analizowano: OR1 – osad z byłej rury wlotowej do zbiornika, OD – osad z okolic upustu dennego.

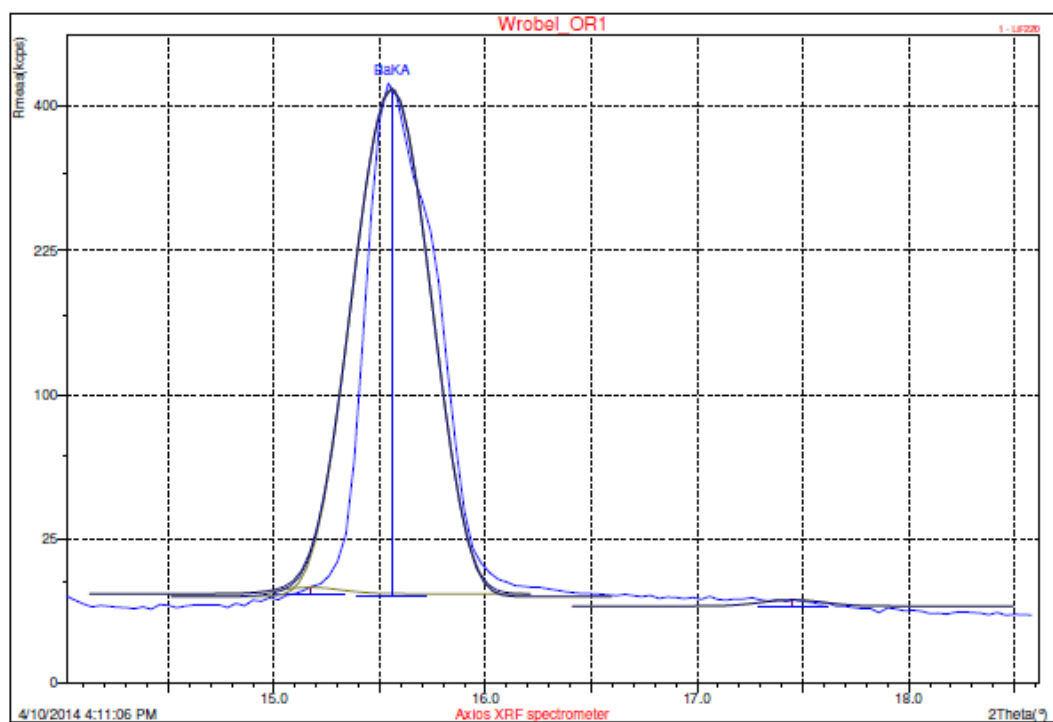
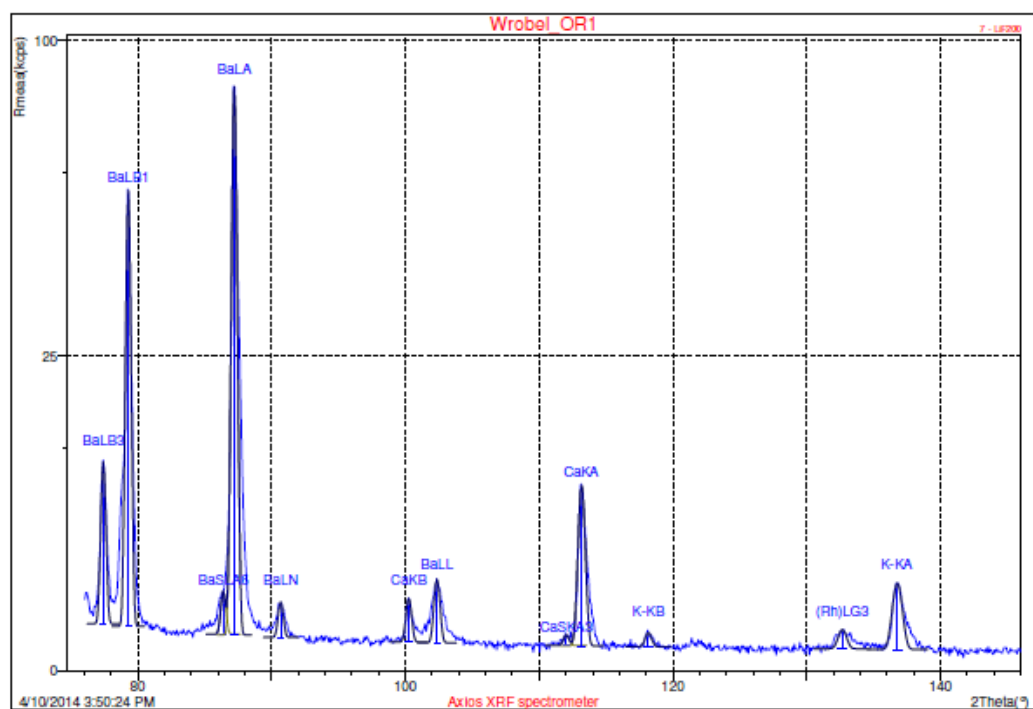
Wybierając do analizy osady z rejonów wlotu i wylotu wód kierowano się próbą ustalenia czy istnieją różnice w składzie pierwiastkowym jak również mineralogicznym tych osadów, oraz czy istnieją różnice w tym zakresie pomiędzy poszczególnymi zbiornikami.

Szczególny nacisk w wykonywanych analizach położono na zawartość baru (barytu), z racji jego roli w charakterze nośnika w procesie współstrącania radu w środowisku wodnym. Znajomość zawartości baru w wodzie i osadach może być pomocna w wyjaśnieniu procesów chemicznych z udziałem radu zachodzących w zbiornikach.

Analizę składu pierwiastkowego osadów wykonano w laboratorium Katedry Fizykochemii i Modelowania Procesów Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo – Hutniczej metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF, a także w laboratorium EkotechLAB w Gdańsku z zastosowaniem spektrometru rentgenowskiego z dyspersją długości fali WD-XRF. Badania składu mineralogicznego wykonano w Zakładzie Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego metodą dyfraktometrii rentgenowskiej XRD.

W tabeli 10 zestawiono wyniki analizy pierwiastkowej pobranych osadów dennych. Wyniki podane są w formie stężeń danych pierwiastków w gramach na kilogram osadu. Zostały one zebrane na podstawie linii widmowych uzyskanych w wyniku analizy

fluorescencyjnej wykonanej w AGH. Rysunek 21 przedstawia przykładowe widmo dla próby OR1:



Rys.21. Przykładowe widmo (dla próby OR1) analizy fluorescencyjnej.

Tabela 10. Zestawienie wyników analizy pierwiastkowej osadów (wybrane pierwiastki) wykonanej na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w g/kg.

| pierwiastek | Kaniów |        | Brzeszcze |        | Rontok Duży |
|-------------|--------|--------|-----------|--------|-------------|
|             | OK1    | OK9    | OB1       | OB5    | OR1         |
| Si          | 212,8  | 149,4  | 164,5     | 229,3  | 22,9        |
| Al          | 123    | 91,07  | 71,93     | 44,44  | 11,2        |
| Fe          | 79,66  | 52,34  | 168,8     | 56,96  | 98,07       |
| K           | 26,32  | 16,96  | 18,92     | 16,28  | 2,619       |
| Ca          | 24,79  | 12,38  | 55,69     | 168,4  | 12,01       |
| Ba          | 21,04  | 161,2  | 23,7      | 3,71   | 548,6       |
| S           | 16,95  | 54,79  | 26,75     | 10,56  | 73,42       |
| Na          | 12,18  | 14,52  | 13,76     | 13,1   | 3,195       |
| Mg          | 7,92   | 5,656  | 6,576     | 6,344  | 1,238       |
| Sr          | 2,342  | 7,841  | 5,554     | 2,541  | 26,46       |
| Mn          | 0,8748 | 28,27  | 1,713     | 1,652  | 1,008       |
| Zn          | 0,3926 | 0,2351 | 0,8149    | 4,441  | 0,2679      |
| Cr          | 0,2792 | 0,1843 | 0         | 0,3787 | 0           |
| Cu          | 0,1832 | 0,1395 | 0,3075    | 0,1488 | 0,2046      |
| Ni          | 0,1383 | 0      | 0,4152    | 0,1792 | 0           |
| Pb          | 0,1186 | 0      | 0,1914    | 0      | 0           |

„0” oznacza zawartość danego pierwiastka poniżej granicy oznaczalności

Z niewiadomych powodów dla próby pobranej ze zbiornika Rontok Duży – OR1 – otrzymane stężenie baru 548,6 g/kg jest niewątpliwie zawyżone, co wynika z pomiarów wykonanych przez laboratoria EkotechLAB i Uniwersytetu Jagiellońskiego. Podane stężenie baru odpowiada ok. 4 molom Ba/kg osadu. W tym samym osadzie ilość siarki to tylko ok. 2,3 mol/kg osadu. W barycie stosunek molowy Ba/S wynosi 1. Tak więc wydaje się, że część mierzonego baru nie jest związana z obecnością barytu, lecz występuje w osadzie w innej formie. Argument ten nie stanowi bezpośredniego dowodu na zawyżone stężenie baru w analizowanej próbce. Niemniej jednak jeśli założyć, że siarka (w warunkach utleniających) powinna występować w formie jonu siarczanowego  $\text{SO}_4^{2-}$  a żelazo powinno występować głównie w formie wodorotlenku  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (ta forma występowania widoczna jest w postaci brązowego zabarwienia osadu, znikającego po potraktowaniu słabym kwasem solnym), to do danych z tabeli 10 należy dodać: 146,5 mg tlenu (z  $\text{SO}_4^{2-}$ ) oraz ok. 90 mg stowarzyszonych z żelazem grup hydroksylowych  $\text{OH}^-$ . Tylko te dwie pozycje powodują, że suma składników osiąga poziom 1037 mg/kg osadu, co oczywiście dowodzi niespójności analizy. Warto

zaznaczyć, że do powyższych wartości należałoby dodać jeszcze tlen związany z glinokrzemianami, tlen i węgiel występujący w minerałach węglanowych, itp., co na tle oznaczeń innych laboratoriów stanowiłoby już wyraźny dowód zawyżonej wartości stężenia baru (pytanie, czy tylko tego pierwiastka?).

Osady w rejonie wlotu do zbiornika Brzeszcze w porównaniu do analogicznego rejonu zbiornika Kaniów zawierają ok. 2-krotnie więcej żelaza, wapnia i fosforu. Natomiast w rejonie wlotu osady zbiornika Kaniów są bogatsze w takie pierwiastki jak: krzem, aluminium i potas. W rejonie wylotu osady zbiornika Brzeszcze są wzbogacone w krzem, wapń, fosfor.

Osady OR1, z rury wylotowej zbiornika Rontok Duży posiadają, niezależnie od omówionego wcześniej problemu zawyżonej wartości, duże stężenie baru Ba. Ponadto charakteryzuje je również najwyższe stężenie strontu Sr w porównaniu z innymi badanymi próbkami, wynoszące 26,46 g/kg.

Wykonane badania pierwiastkowe pozwalają na ocenę zawartości metali ciężkich w badanych osadach w stosunku do wartości zawartych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010r w sprawie komunalnych osadów ściekowych.

Metale ciężkie to pierwiastki o gęstości większej od 4,5 g/cm<sup>3</sup>. Do metali ciężkich zaliczamy: Cu, Co, Cr, Cd, Fe, Zn, Pb, Sn, Hg, Mn, Ni, Mo. W cytowanym powyżej akcie prawnym określono graniczne dopuszczalne wielkości stężeń tylko dla następujących metali: kadmu(Cd), miedzi(Cu), niklu(Ni), ołowiu(Pb), cynku(Zn), rtęci(Hg) i chromu(Cr). W tabeli 11 zestawiono wartości zmierzone dla poszczególnych prób na tle wartości dopuszczalnych przez wspomniane wcześniej Rozporządzenie Ministra Środowiska.

Tabela 11. Wartości dopuszczalne ilości metali ciężkich w wierzchniej warstwie gruntu (0 – 25cm), przy zastosowaniu komunalnych osadów ściekowych do rekultywacji terenu na cele pozarolnicze w zależności od rodzaju gruntów: a – lekkie, b- średnie, c- ciężkie

| Metale ciężkie     | Zawartość metali ciężkich [mg/kg] |       |                 |       |                            |                                |
|--------------------|-----------------------------------|-------|-----------------|-------|----------------------------|--------------------------------|
|                    | Zbiornik Brzeszcze                |       | Zbiornik Kaniów |       | cele rolnicze<br>a – b – c | cele pozarolnicze<br>a – b – c |
|                    | wlot                              | wylot | wlot            | wylot |                            |                                |
| <b>Kadm (Cd)</b>   | 0                                 | 0     | 0               | 0     | 1 – 2 – 3                  | 3 – 4 – 5                      |
| <b>Miedź (Cu)</b>  | 308                               | 149   | 183             | 140   | 25 – 50 – 75               | 50 – 75 – 100                  |
| <b>Nikiel (Ni)</b> | 415                               | 179   | 138             | 0     | 20 – 35 – 50               | 30 – 45 – 60                   |
| <b>Ołów (Pb)</b>   | 191                               | 0     | 119             | 0     | 40 – 60 – 80               | 50 – 75 – 100                  |
| <b>Cynk (Zn)</b>   | 815                               | 4440  | 393             | 235   | 80 – 120 – 180             | 150 – 220 – 300                |
| <b>Rtęć (Hg)</b>   | 0                                 | 0     | 0               | 0     | 0,8 – 1,2 – 1,5            | 1 – 1,5 – 2                    |
| <b>Chrom (Cr)</b>  | 0                                 | 379   | 279             | 184   | 50 – 75 – 100              | 100 – 150 – 200                |

Z tabeli 11 wynika, że osady dennie zbiorników Brzeszcze i Kaniów nie mogłyby być stosowane do rekultywacji terenów nawet na cele pozarolnicze, gdyż zawartość metali ciężkich przekracza wartości dopuszczalne wymienione w rozporządzeniu. Reasumując należy stwierdzić, że osady zbiorników Brzeszcze i Kaniów są szczególnie uciążliwe, gdyż oprócz silnej kontaminacji pierwiastkami radioaktywnymi dodatkowo przekraczają normy zawartości innych metali ciężkich.

Zawartości wybranych minerałów w próbach osadów z rejonów wlotowych i wylotowych zbiorników Kaniów, Brzeszcze i Rontok Duży zestawiono w tabeli 12.

Tabela 12. Zawartość wybranych minerałów w badanych próbach osadów zmierzone przez laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego

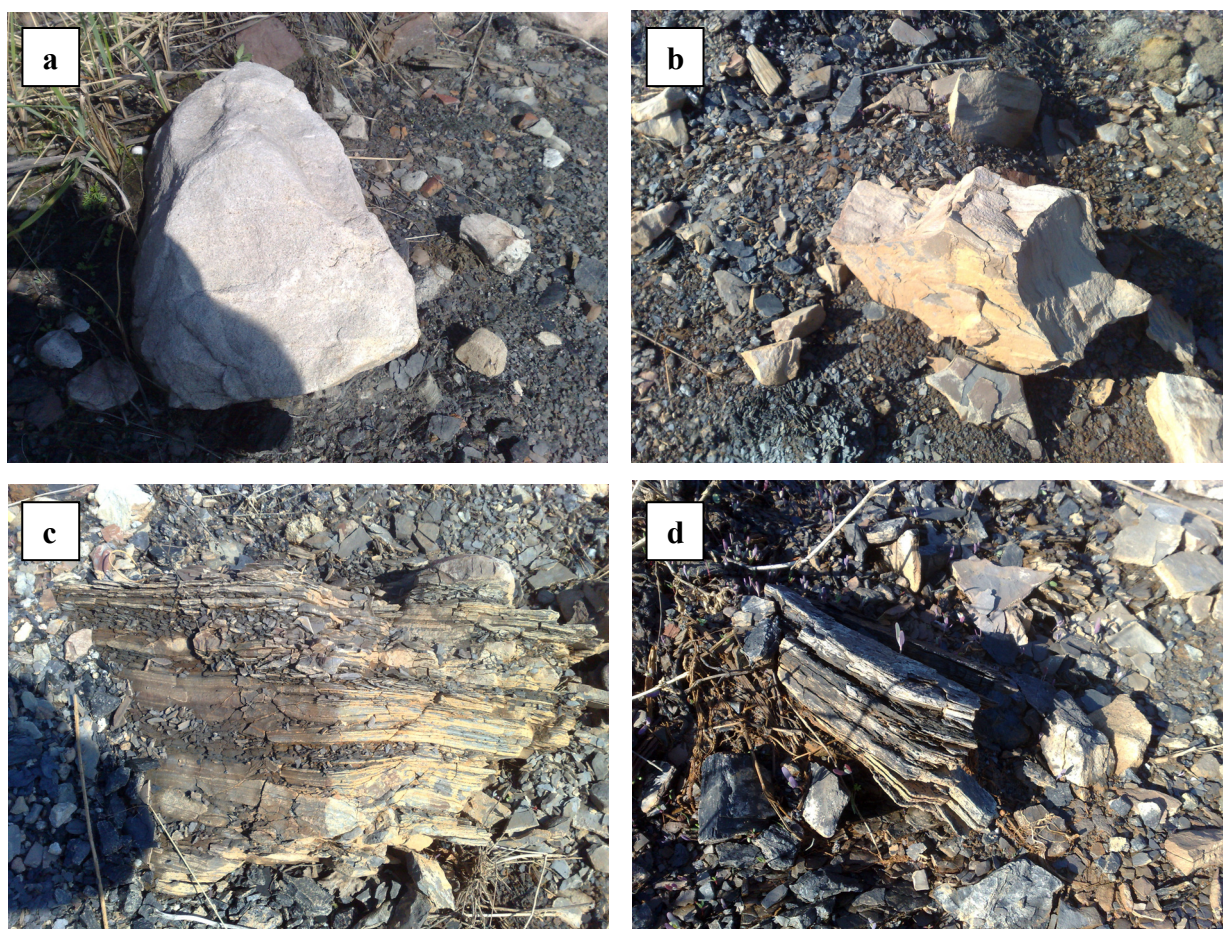
| Minerał                 | Zawartość minerału w próbce [%] |     |                 |     |                      |     |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-----------------|-----|----------------------|-----|
|                         | Zbiornik Brzeszcze              |     | Zbiornik Kaniów |     | Zbiornik Rontok Duży |     |
|                         | OB1                             | OB5 | OK1             | OK9 | OR1                  | OD  |
| <b>Baryt</b>            | 5,0                             | 0,4 | 5,4             | 29  | 55                   | 2,3 |
| <b>Kalcyt</b>           | 2,9                             | 15  | 0,5             | 0,0 | 0,8                  | 0,0 |
| <b>Illit</b>            | 4,9                             | 1,6 | 5,9             | 3,2 | 3,1                  | 2,4 |
| <b>Kaolinit</b>         | 7,6                             | 2,6 | 15              | 16  | 6,6                  | 5,7 |
| <b>Muskowit</b>         | 8,5                             | 5,4 | 14              | 12  | 2,8                  | 13  |
| <b>Kwarc</b>            | 15                              | 50  | 9,9             | 9,2 | 5,7                  | 44  |
| <b>Ciała amorficzne</b> | Dopełnienie do 100%             |     |                 |     |                      |     |

Przedstawione w tabeli 12 dane dowodzą, że minerały występujące w osadach należą do głównych minerałów skał osadowych takich jak piaskowce, mułowce, iłowce czy też łupki mułowcowe i iłowcowe. Skały te towarzyszą pokładom węgla stanowiąc strop i spąg eksploatowanych pokładów. Mułowce powstają na skutek diagenety mułów. Są skałami silnie scementowanymi spoiwem, które najczęściej stanowią węglany i krzemionka. Są skałami pośrednimi pomiędzy piaskowcami a skałami ilastymi. W procesie diagenety może dojść do złupkowacenia mułów – nazywamy je wtedy łupkami mułowymi. Kolor mułowców jest w zakresie od szarego, przez szaro zielony aż do czarnego. Natomiast iłowce to skały ilaste koloru szarego, podatne na rozmakanie. Na skutek działania wody pęcznieją i rozpadają się na szereg płytek zgodnie z uwarstwieniem jakie towarzyszyło im w procesie diagenety. Przedstawicielami tych skał są ily i łupki ilaste.

W osadach zbiornika Brzeszcze dominuje kwarc, którego udział w strefie wlotowej wynosi ok. 15 % a w rejonie wylotu 50%. Kalcytu w osadach zbiornika Brzeszcze jest znacznie więcej niż w zbiorniku Kaniów. Uzyskane dane sugerują, że wytrąca się on w trakcie migracji wody przez zbiornik, w strefach oddalonych od wlotu, prawdopodobnie wskutek stopniowego odgazowania CO<sub>2</sub>. Wyniki z Kaniowa świadczą, że kalcyt tylko w niewielkich ilościach jest wytrącany (lub deponowany) w strefie wlotowej. Takie minerały jak baryt, illit, kaolinit i muskowit w osadach zbiornika Kaniów występują w ilościach kilkukrotnie większych niż w zbiorniku Brzeszcze. Stąd można sądzić, że w górotworze stanowiącym obszar Kopalni Węgla Kamiennego Brzeszcze mamy więcej skał mułowcowych w porównaniu z KWK Silesia, gdzie przeważają skały iłowcowe.

W skład osadów oprócz minerałów wchodzi nieokreślone substancje amorficzne które stanowią od 24 do 55 % masy osadów.

Poniżej pokazano kilka zdjęć wymienionych skał wykonanych przez autorkę w trakcie prac terenowych związanych z niniejszą rozprawą.



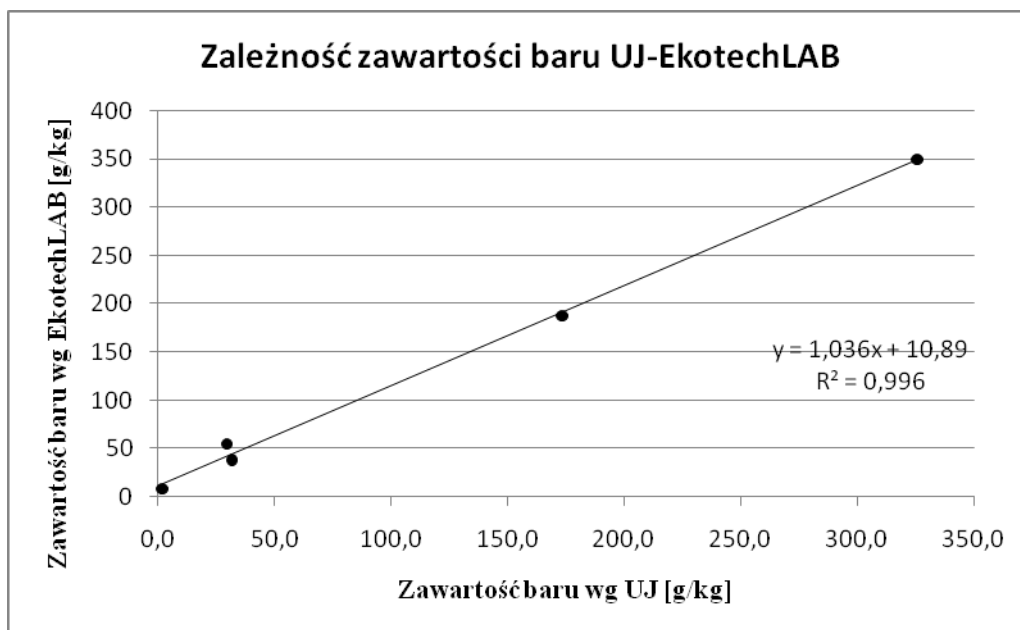
Rys.22. Kolejno: a) piaskowiec, b) iłowiec, c) łupek mulisty z warstwami zdeintegrowanego działaniem wody iłowca, d) łupek ilasty (za zbiorów autorki).

Ze względu na rolę jaką odgrywa bar w procesach zachodzących w zbiornikach wody kopalnianej, zawierającej często duże aktywności izotopów radu, wykonane zostały dodatkowe analizy zawartości radu w próbkach osadów ze wszystkich zbiorników. Badania te przeprowadzone zostały w akredytowanym laboratorium EkotechLAB w Gdańsku, z zastosowaniem spektrometru rentgenowskiego z dyspersją długości fali (WD-XRF) firmy Bruker model S8 Tiger, a ich wyniki przedstawiono w tabeli 13. Dla porównania analizy na tych samych próbkach (subsamples) zostały wykonane także w laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Tabela 13. Zawartość baru w próbkach osadów w [g/kg] oznaczona przez laboratorium EkotechLAB i laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego.

| <b>Próbka</b> | <b>EkotechLAB</b> | <b>Uniwersytet Jagielloński</b> | <b>Średnia</b> |
|---------------|-------------------|---------------------------------|----------------|
| <b>OK1</b>    | 37                | 32                              | 34             |
| <b>OK9</b>    | 188               | 174                             | 181            |
| <b>OB1</b>    | 55                | 30                              | 43             |
| <b>OB5</b>    | 8,3               | 2,4                             | 5,3            |
| <b>OR1</b>    | 350               | 326                             | 338            |
| <b>OD</b>     | NA                | 3,1                             | -              |

Na rys. 23 przedstawiono relację między wynikami pomiarów stężenia baru uzyskanymi w laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz EkotechLAB. Zależność pomiędzy wynikami z obydwóch laboratoriów jest liniowa, przy czym współczynnik kierunkowy prostej regresji jest bliski jedności. W związku z tym za najbardziej wiarygodne stężenia baru w osadach przyjęto wartości średnie uzyskane w wymienionych laboratoriach.



*Rys.23. Porównanie wyników oznaczeń stężenia baru w próbach osadów wykonanych przez laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz EkotechLAB.*

## 7.2. Badania radiologiczne

Pobrane próbki osadów oraz skał zostały wysuszone w temperaturze 105°C przez 24 godziny. Po usunięciu dużych kamieni poddano je rozdrobnieniu oraz mieszaniu (w przypadku skał rozbito je na mniejsze części).

Wszystkie tak przygotowane próbki zamknięto w naczynkach pomiarowych o wymiarach: średnica podstawy 70 mm, wysokość 31,5 mm i objętość 121,2 cm<sup>3</sup> na trzy tygodnie w celu uzyskania równowagi promieniotwórczej pomiędzy radonem <sup>222</sup>Rn i jego produktami rozpadu.

Pomiar aktywności prób osadów oraz skał został przeprowadzony w laboratorium Katedry Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie przy użyciu metody spektrometrii promieniowania gamma za pomocą półprzewodnikowego detektora HPGe – model GX4020 firmy Canberra. Ten cylindryczny detektor mierzy kwanty gamma o energiach od 3 keV do 10 MeV. Jego zdolność rozdzielcza wynosi odpowiednio 0,95 i 1,82 keV dla energii 122 i 1332 keV (Canberra, 2002).



*Rys.24. Detektor HPGe – górna osłona otwarta (ze zbiorów autorki)*

Aktywności izotopów promieniotwórczych takich jak potas  $^{40}\text{K}$ , rad  $^{226}\text{Ra}$ , tor  $^{228}\text{Th}$  oraz uran  $^{238}\text{U}$  zostały zmierzone poprzez linie charakterystyczne promieniowania gamma. W przypadku potasu i uranu pomiar wykonany był bezpośrednio z linii energetycznej 1460,8 keV oraz 1001,1 keV. Dla radu oraz toru wykorzystano promieniowanie emitowane przez nuklidy będące z nimi w równowadze promieniotwórczej. Rad został zmierzony przez promieniowanie gamma o energii 609,3 keV, 1120,3 keV, 1764,5 keV pochodzące od bizmutu  $^{214}\text{Bi}$ , zaś tor przez promieniowanie o energiach 583,2 keV oraz 2614,5 keV emitowane przez tal  $^{208}\text{Tl}$ .

Za pomocą programu Gamma Acquisition and Analysis Genie – 2000 firmy Canberra uzyskano raport o danej mierzonej próbce, zawierający jej masę, geometrię pomiarową oraz położenia zidentyfikowanych pików, pola powierzchni pików wraz z ich niepewnościami.

Mając powyższe dane można obliczyć aktywności próbki na podstawie zależności:  
(Jodłowski, 2005)

$$A_p = \frac{N_p(E)}{N_w(E)} \frac{t_w}{t_p} \frac{m_w}{m_p} C_c C_s A_w \quad (14)$$

gdzie:

indeks p – dotyczy próbki,

indeks w – odnosi się do wzorca

$N_p(E)$ ,  $N_w(E)$  – liczba zliczeń netto (bez tła) w fotopiku dla energii E,

$t_w$ ,  $t_p$  – czas pomiaru,

$m_w$ ,  $m_p$  – masa,

$C_c$  - poprawka na sumowanie koincydencyjne (w praktyce równe 1 – nuklid wzorcowy i mierzony jest taki sam),

$C_s$  – poprawka na samoabsorpcję w próbce obliczana względem wzorca,

$A_w$  – aktywność nuklidu we wzorcu  $\left[ \frac{Bq}{kg} \right]$

W przypadku pomiaru aktywności ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  w próbkach, wykorzystano metodę transmisyjną opracowaną i zaproponowaną przez Cutshall'a w 1983 roku. W metodzie tej istotną rolę odgrywa fakt, że w przypadku niskoenergetycznego promieniowania gamma (jak dla ołowiu,  $E = 46,5 \text{ keV}$ ) występuje jego silna samoabsorpcja w próbce.

Pomiar z wykorzystaniem metody transmisyjnej polega na tym, że po pomiarze aktywności ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  w próbce, umieszcza się nad nią radioaktywne źródło ołowiu o znanej aktywności. Na podstawie intensywności pochłaniania w piku ołowiu można wyznaczyć poprawkę na samoabsorpcję i rzeczywistą aktywność ołowiu w próbce (Bonczyk 2013).

Samoabsorpcja zdefiniowana jest jako stosunek wydajności detektora dla wzorca  $\varepsilon_w$  i wydajności dla próbki  $\varepsilon_p$ , to jest:

$$C_s(E) = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_p} \quad (15)$$

Znając intensywności zliczeń w piku ołowiowym, poprawkę względem powietrza można zapisać jako:

$$C = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{1 - \frac{I_0}{I}} \quad (16)$$

gdzie:

$I, I_0$  – intensywności zliczeń w pikie przy transmisyjnym pomiarze próbki ( $I$ ) oraz pustego pojemnika ( $I_0$ ).

Po uwzględnieniu pomiaru wzorca, poprawka na samoabsorpcję próbki względem wzorca może zostać zapisana jako:

$$C_s = \frac{C_{p,w}}{C_{p,p}} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I_w}\right) / \left(1 - \frac{I_w}{I_0}\right)}{\ln\left(\frac{I_0}{I_p}\right) / \left(1 - \frac{I_p}{I_0}\right)} \quad (17)$$

gdzie:

$I_0, I_w, I_p$  – to odpowiednio intensywności zliczeń dla pików ołowiowych pustego pojemnika, wzorca i próbki w pomiarach transmisyjnych.

### 7.3. Wyniki pomiarów aktywności promieniotwórczej osadów

Podobnie jak w przypadku spektrometrii promieniowania alfa, wyniki jakie uzyskano przedstawione są w pierwszej kolejności w postaci widma energetycznego. Przykładowe widmo przedstawione zostało poniżej:



Rys.25. Przykładowe widmo promieniowania gamma próbki osadu wraz z pikiem 609,4 keV pochodzącym od bizmutu  $^{214}\text{Bi}$ .

W kolejnych tabelach zestawiono wyniki pomiarów aktywności izotopów promieniotwórczych zidentyfikowanych w badanych próbkach osadów dennych oraz ze strefy przybrzeżnej a także w próbkach pobranych z okolic zbiorników Kaniów, Brzeszcze i Rontok Duży.

Tabela 14. Wyniki pomiarów analiz spektrometrycznych prób osadów.

**Kaniów**

| Próbka | Opis                      | <sup>226</sup> Ra [Bq/kg] | <sup>228</sup> Th [Bq/kg] | <sup>40</sup> K [Bq/kg] | <sup>238</sup> U [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb(Cs)[Bq/kg] | Cs    |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|
| O1     | osad z wlotu              | 6451 ± 89                 | 3340 ± 57                 | 794 ± 72                | ND                       | 490 ± 140                 | 591 ± 160                    | 1,205 |
| O2     | osad z okolic wlotu       | 2394 ± 38                 | 1247 ± 25                 | 423 ± 56                | ND                       | 398 ± 91                  | 373 ± 82                     | 0,938 |
| O3     | osad z okolic wlotu       | 4984 ± 70                 | 2395 ± 43                 | 671 ± 71                | ND                       | 690 ± 120                 | 830 ± 140                    | 1,206 |
| O4     | osad z okolic wlotu       | 9640 ± 130                | 4646 ± 71                 | ND                      | ND                       | 930 ± 170                 | 1530 ± 270                   | 1,643 |
| O5     | z dna 130m od wlotu       | 2664 ± 42                 | 1303 ± 26                 | 520 ± 62                | ND                       | 390 ± 110                 | 349 ± 88                     | 0,889 |
| O6     | 200m od wlotu             | 7834 ± 102                | 3884 ± 63                 | 715 ± 79                | ND                       | 850 ± 140                 | 1270 ± 210                   | 1,504 |
| O7     | 330m od wlotu             | 1043 ± 18                 | 548 ± 12                  | 622 ± 38                | ND                       | 204 ± 52                  | 246 ± 62                     | 1,208 |
| O8     | róg zbiornika             | 35490 ± 430               | 18740 ± 280               | 1620 ± 140              | ND                       | 680 ± 280                 | NA                           | NA    |
| O9     | osad z okolic wylotu wody | 32640 ± 390               | 17320 ± 260               | 1540 ± 140              | ND                       | 1333 ± 240                | 4120 ± 720                   | 3,088 |

**Brzeszcze**

| Próbka | Opis                      | <sup>226</sup> Ra [Bq/kg] | <sup>228</sup> Th [Bq/kg] | <sup>40</sup> K [Bq/kg] | <sup>238</sup> U [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb (Cs)[Bq/kg] | Cs    |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------|
| OB1    | osad z okolic wlotu       | 1414 ± 18                 | 695 ± 11                  | 382 ± 11                | ND                       | 93 ± 14                   | 149 ± 22                      | 1,600 |
| OB2    | osad z okolic wylotu wody | 107,9 ± 1,8               | 60,1 ± 1,2                | 561 ± 11                | ND                       | 87,1 ± 5,4                | 85,4 ± 5,3                    | 0,980 |
| OB3    | osad z okolic wylotu wody | 1164 ± 28                 | 680 ± 20                  | 413 ± 21                | ND                       | NA                        | NA                            | NA    |
| OB4    | osad z okolic wylotu wody | 1458 ± 19                 | 790 ± 13                  | 317 ± 14                | ND                       | 162 ± 20                  | 196 ± 24                      | 1,210 |
| OB5    | osad z okolic wylotu wody | 305,7 ± 4,1               | 138,9 ± 2,3               | 303,5 ± 7,6             | 64 ± 15                  | 105,6 ± 7,3               | 114,8 ± 7,5                   | 1,087 |
| OB6    | osad z okolic wylotu wody | 643,5 ± 8,4               | 289,2 ± 4,7               | 359 ± 9,9               | 58 ± 46                  | 207 ± 11                  | NA                            | NA    |
| OB7    | obwałowanie zbiornika     | 710,6 ± 9,4               | 439,3 ± 7,2               | 299 ± 12                | 57 ± 70                  | 187 ± 16                  | 186 ± 15                      | 0,994 |
| OB8    | obwałowanie zbiornika     | 3588 ± 58                 | 1817 ± 38                 | 459 ± 34                | ND                       | NA                        | NA                            | NA    |
| OB9    | obwałowanie zbiornika     | 1196 ± 15                 | 639 ± 10                  | 534 ± 14                | ND                       | 113 ± 16                  | NA                            | NA    |
| OB10   | róg zbiornika             | 1608 ± 20                 | 855 ± 14                  | 475 ± 16                | ND                       | 145 ± 22                  | NA                            | NA    |
| OB11   | zwałowisko skały płonnej  | 49,3 ± 1,0                | 55,7 ± 1,1                | 569 ± 11                | 80 ± 21                  | 79,4 ± 4,7                | NA                            | NA    |
| OB12   | zwałowisko skały płonnej  | 53,7 ± 1,3                | 62,3 ± 2,1                | 531,3 ± 9,3             | ND                       | NA                        | NA                            | NA    |

### Rontok Duży

| Próbka | Opis                       | <sup>226</sup> Ra [Bq/kg] | <sup>228</sup> Th [Bq/kg] | <sup>40</sup> K [Bq/kg] | <sup>238</sup> U [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb(Cs)[Bq/kg] | Cs    |
|--------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|
| OR1    | osad z okolic wlotu        | 95510 ± 1150              | 26150 ± 390               | 1528 ± 85               | ND                       | 980 ± 320                 | 2650 ± 830                   | 2,660 |
| OR2    | osad z okolic wylotu       | 96,7 ± 1,6                | 48,9 ± 1,0                | 572 ± 11                | 831 ± 31                 | 84,5 ± 4,3                | 80,0 ± 3,9                   | 0,947 |
| OA     | okolice wlotu              | 2688 ± 34                 | 738 ± 12                  | 249 ± 20                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| OB     | okolice wlotu              | 2379 ± 40                 | 847 ± 40                  | 251 ± 13                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| OC     | okolice wylotu             | 13331 ± 160               | 1434 ± 23                 | 376 ± 39                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| OD     | okolice wylotu             | 4714 ± 57                 | 419 ± 7                   | 454 ± 11                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| OE     | okolice wylotu             | 2679 ± 33                 | 251 ± 5                   | 504 ± 19                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| O1     | okolice wylotu brzeg       | 75 ± 2                    | 50 ± 1                    | 607 ± 12                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| O2     | zachodni rejon zbiornika   | 30,9 ± 1,1                | 27,5 ± 0,9                | 337 ± 9                 | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| O3     | północny rejon zbiornika   | 39,8 ± 1,0                | 41,4 ± 1,2                | 512 ± 12                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |
| O4     | pół – wsch rejon zbiornika | 31,3 ± 1,1                | 38,3 ± 1,1                | 461 ± 11                | 94 ± 30                  | NA                        | NA                           | NA    |
| O5     | okolice wlotu              | 2261 ± 29                 | 1308 ± 21                 | 534 ± 22                | ND                       | NA                        | NA                           | NA    |

ND – brak linii danego izotopu

NA – nie analizowano

Dla ułatwienia analizy uzyskanych wyników policzone zostały wartości średnie aktywności kolejnych izotopów oraz mediany na wlocie, wylocie i pozostałych rejonach zbiorników. Wyniki zebrane zostały w poniższej tabeli:

Tabela 15. Zestawienie parametrów statystycznych dla osadów.

| Izotopy           | Zbiornik Brzeszcze     |       |        | Zbiornik Kaniów        |         |        | Zbiornik Rontok Duży   |        |      |
|-------------------|------------------------|-------|--------|------------------------|---------|--------|------------------------|--------|------|
|                   | Aktywność osadów Bq/kg |       |        | Aktywność osadów Bq/kg |         |        | Aktywność osadów Bq/kg |        |      |
|                   | Wlot                   | Wylot | Inne   | Wlot                   | Wylot   | Inne   | Wlot                   | Wylot  | Inne |
| <sup>226</sup> Ra | 1414                   | 107,9 | 710,6  | 6451                   | 35490   | 2664   | 95510                  | 13331  | 30,9 |
|                   |                        | 1164  | 3588   | 2394                   | 32640   | 7834   | 2688                   | 4714   | 39,8 |
|                   |                        | 1458  | 1196   | 4984                   |         | 1043   | 2379                   | 2679   | 31,3 |
|                   |                        | 305,7 | 1608   | 9640                   |         |        | 2261                   | 75     |      |
|                   |                        | 643,5 |        |                        |         |        |                        |        |      |
| Średnia           | 1414                   | 736   | 1776   | 5887                   | 34060   | 3837,9 | 25710                  | 5199   | 34,0 |
| Mediana           | 1414                   | 643,5 | 1401,9 | 5717,4                 | 34064,1 | 2664,0 | 2533,5                 | 3696,5 | 31,3 |
| Max               | 1414                   | 1458  | 3588   | 9640                   | 35490   | 7834,4 | 95510                  | 13331  | 39,8 |
| Min.              | 1414                   | 107,9 | 710,6  | 2394                   | 32640   | 1042,5 | 2261                   | 75     | 31,3 |
| <sup>228</sup> Th | 695                    | 60,1  | 439,3  | 3340                   | 18740   | 1303   | 26150                  | 48,9   | 27,5 |
|                   |                        | 680   | 1817   | 1247                   | 17320   | 3884   | 738                    | 1434   | 41,4 |
|                   |                        | 790   | 639    | 2395                   |         | 548    | 847                    | 419    | 38,3 |
|                   |                        | 138,9 | 855    | 4646                   |         |        | 1308                   | 251    |      |
|                   |                        | 289,2 |        |                        |         |        |                        | 50     |      |
| Średnia           | 695                    | 391,5 | 937,6  | 2907                   | 18030   | 1912   | 7281                   | 441    | 35,7 |
| Mediana           |                        | 289,2 | 746,9  | 2867,6                 | 18029,4 | 1302,7 | 1077,5                 | 251    | 38,3 |
| Max               |                        | 791,4 | 1817   | 4646                   | 18740   | 3884   | 26150                  | 1434   | 41,4 |
| Min.              |                        | 60,1  | 439,3  | 1247                   | 17320   | 548    | 738,0                  | 48,9   | 27,5 |
| <sup>40</sup> K   | 382                    | 561   | 299    | 794                    | 1620    | 520    | 1528                   | 571,6  | 337  |
|                   |                        | 413   | 459    | 423                    | 1540    | 715    | 249,0                  | 376,0  | 512  |
|                   |                        | 317   | 534    | 671                    |         | 622    | 251,0                  | 454,0  | 461  |
|                   |                        | 303,5 | 475    |                        |         |        | 534,0                  | 504,0  |      |
|                   |                        | 359,0 |        |                        |         |        |                        | 607,0  |      |
| Średnia           | 382                    | 391   | 442    | 629                    | 1583    | 619    | 640                    | 503    | 437  |
| Mediana           |                        | 359,0 | 467,3  | 670,5                  | 1582,6  | 622,2  | 392,5                  | 504    | 461  |
| Max.              |                        | 561   | 534    | 794                    | 1620    | 715    | 1528                   | 607    | 512  |
| Min.              |                        | 303,5 | 299    | 423                    | 1540    | 520    | 251                    | 376    | 337  |
| <sup>238</sup> U  | -                      | 64    | 57     | -                      | -       | -      | -                      | 831    | 94   |
|                   |                        | 57    |        |                        |         |        |                        |        |      |
| Średnia           | -                      | 61    | 57     | -                      | -       | -      | -                      | 831    | 94   |
| <sup>210</sup> Pb | 93                     | 87,1  | 187    | 490                    | 680     | 390    | 980                    | 84,5   | -    |
|                   |                        | 162   | 113    | 398                    | 1333    | 850    |                        |        |      |
|                   |                        | 105,6 | 145    | 690                    |         | 204    |                        |        |      |
|                   |                        | 207   |        | 930                    |         |        |                        |        |      |
| Średnia           | 93                     | 140   | 148    | 628                    | 1008    | 504    | 980                    | 84,5   |      |
| Mediana           | 93                     | 133,7 | 144,8  | 589,7                  | 1007,5  | 372,8  | 980                    | 84,5   | -    |

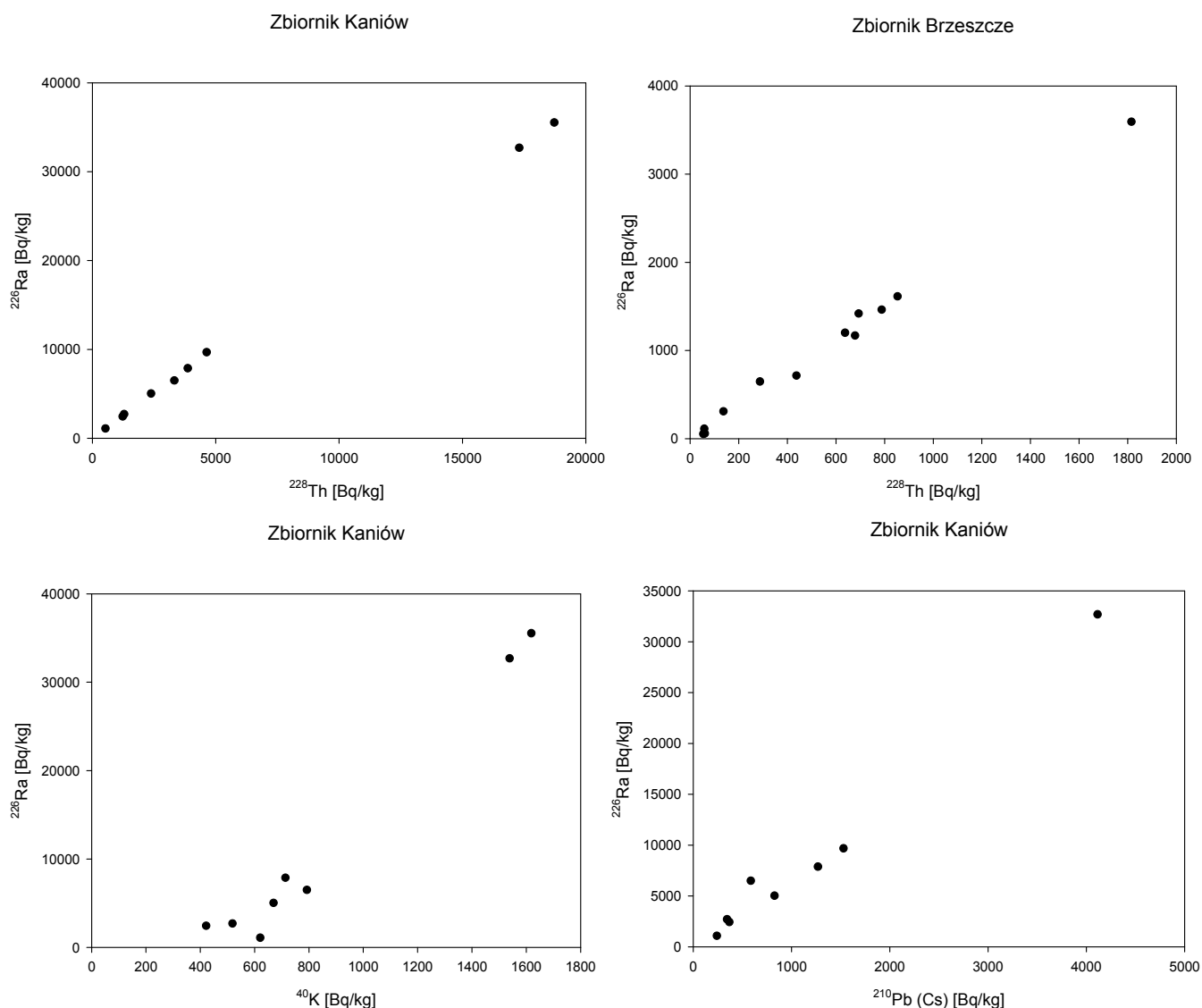
### ***Omówienie wyników pomiarów:***

1. Najwyższą średnią radioaktywność wykazują osady denne zbiornika Kaniów. Średnia zawartość radu  $^{226}\text{Ra}$  w osadach wynosi blisko  $14600 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  i jest wyższa ponad 11 razy od analogicznej średniej w zbiorniku Brzeszcze, przy czym wartości maksymalne dla tych zbiorników wynoszą odpowiednio ok.:  $35500 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  i  $1400 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ . Średnia aktywność toru  $^{228}\text{Th}$  w zbiorniku Kaniów wynosi  $7616 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ , wobec  $675 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  wyznaczonej dla zbiornika Brzeszcze. Zatem znów mamy do czynienia z 11-krotnie większą aktywnością osadów w Kaniowie. Średnia aktywność potasu  $^{40}\text{K}$  we wszystkich trzech zbiornikach jest zbliżona i nie przekracza  $1000 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ . W zbiorniku Kaniów osiąga najwyższą wartość wynoszącą  $944 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ . Średnia aktywność izotopu ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  również jest najwyższa w osadach zbiornika Kaniów. Wynosi ona  $713 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  i jest prawie 6 razy wyższa od wartości stwierdzonej w osadach zbiornika Brzeszcze.
2. Analizując rozkład aktywności pierwiastków promieniotwórczych w osadach w zależności od miejsca ich występowania (rejon wlotu, wylotu czy inne miejsce w zbiorniku) można zauważyć, iż aktywności radioizotopów w osadach dla każdego rejonu konkretnego zbiornika są inne. Na przykład, aktywność wszystkich badanych radioizotopów osiąga maksymalne wartości w rejonie wylotu zbiornika Kaniów. Natomiast w zbiorniku Brzeszcze najwyższe wartości zawarte są w osadach w rejonie wlotu (z wyjątkiem  $^{210}\text{Pb}$ ).
3. W przypadku zbiornika Kaniów, zmierzona aktywność izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$  i potasu  $^{40}\text{K}$  na wlocie wynosi odpowiednio  $6451 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  i  $794 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  a na wylocie  $32640 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  i  $1540 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ . Analogiczne wartości zmierzone przez Główny Instytut Górnictwa wynosiły

w 2008 roku:  $18979 \pm 211 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  dla radu  $^{226}\text{Ra}$ , poniżej  $470 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  dla potasu  $^{40}\text{K}$  oraz w 2009 roku:  $7260 \pm 440 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  dla radu  $^{226}\text{Ra}$  i również poniżej  $470 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  dla potasu  $^{40}\text{K}$  na wlocie. W przypadku osadu z okolic wylotu wody ze zbiornika wartości te wynoszą dla radu  $^{226}\text{Ra}$ :  $4397 \pm 59 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  (2008) i  $13500 \pm 1100 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  (2009) a dla potasu  $^{40}\text{K}$ :  $945 \pm 67 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  w 2008r. i  $1280 \pm 170 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$  w 2009r. (GIG 2009,2010). Różnice w zanotowanych wartościach mogą wynikać z różnych miejsc poboru prób osadów a także z ich niejednorodności.

4. Osady denne zbiornika Rontok Duży wykazują bardzo wysoką radioaktywność. Szczególnym przypadkiem jest próbka osadów oznaczona symbolem OR1. Została ona pobrana z końcówki rury wylotowej rurociągu (obecnie nieczynnego) doprowadzającego wody kopalniane kopalni Silesia do zbiornika. Aktywność izotopu radu  $^{226}\text{Ra}$  jest najwyższą, jaką stwierdzono dla badanych prób osadów w ramach tej pracy. Wynosi ona  $95510 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$ . Można przypuszczać iż na długości całego rurociągu nagromadzone osady będą miały podobną radioaktywność.
5. Według Kierepko (2003) aktywność osadów ze strefy środkowej zbiornika Rontok Duży wynosi  $93000 \left[ \frac{Bq}{kg} \right]$ . Wielkość ta pozostaje w zgodzie z rezultatem otrzymanym w wyniku pomiaru osadów z rury wlotowej.

Wyniki pomiarów spektrometrycznych osadów pobranych ze zbiorników retencyjno – dozujących zostały przedstawione w formie graficznej na zamieszczonych wykresach.



Rys.26. Wyniki analiz spektrometrycznych prób osadów pobranych ze zbiorników Kaniów i Brzeszcze.

Silna korelacja pomiędzy aktywnością radu  $^{226}\text{Ra}$  i toru  $^{228}\text{Th}$  dla zbiorników Kaniów i Brzeszcze może być wynikiem oddziaływań zachodzących pomiędzy wodą a skałami w strefie podziemnej, osadami zlokalizowanymi w zbiorniku i jego okolicach czy też procesów chemicznych zachodzących pod ziemią w trakcie chwilowego składowania wody przed wypompowaniem jej na powierzchnię. Kolejnym czynnikiem wpływającym na tą zależność może być mieszanie różnych typów wód pochodzących z odwadniania kopalń – wszak wraz ze zmianą głębokości wody te różnią się parametrami fizykochemicznymi. Wspomniane izotopy pochodzą z różnych szeregów promieniotwórczych, podobnie jak i dwa izotopy radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ , które w wodzie również wykazują silną korelację. Może to mieć również wpływ

na omawianą zależność. Na obecnym etapie wyjaśnienie tych zależności nie jest proste i wymaga bardziej szczegółowych badań.

W przypadku zbiornika Rontok Duży nie zaobserwowano żadnych korelacji pomiędzy zmierzoną aktywnością izotopów promieniotwórczych. Podobna sytuacja ma miejsce dla zbiornika Brzeszcze. W przypadku zbiornika Kaniów obserwuje się zależność pomiędzy aktywnością radu  $^{226}\text{Ra}$  i potasu  $^{40}\text{K}$ .

#### **7.4. Aktywność promieniotwórcza skały płonnej**

Próbki do badania aktywności promieniotwórczej skały płonnej pobrano ze zwałowisk przyległych do zbiorników retencyjno - dozujących Brzeszcze i Kaniów. Ze zwałowiska w Brzeszczach pobrano cztery próbki skał: mułowiec, łupek mułowcowy, piaskowiec oraz węgiel, natomiast z zwałowiska w Kaniowie pięć następujących próbek: łurowiec, łupek ilasty, łupek mułowcowy z wtrąceniami krzemionki, piaskowiec laminowany mułowcem a także węgiel.

Próbki rozdrobniono, wysuszono i umieszczono w pojemnikach przystosowanych do badania metodą spektrometrii promieniowania gamma. Zbadano aktywność promieniotwórczą izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{228}\text{Th}$ , potasu  $^{40}\text{K}$ , uranu  $^{238}\text{U}$  i ołowiu  $^{210}\text{Pb}$ . Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 16.

Tabela 16. Wyniki pomiarów naturalnej promieniotwórczości skał ze zwałowisk przyległych do zbiorników retencyjno – dozujących.

### Kaniów

| Próbka | Opis                                     | <sup>226</sup> Ra [Bq/kg] | <sup>228</sup> Th [Bq/kg] | <sup>40</sup> K [Bq/kg] | <sup>238</sup> U [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb(Cs)[Bq/kg] | Cs    |
|--------|------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|
| Kw_K   | węgiel                                   | 14,0 ± 0,7                | 9,8 ± 0,5                 | 22,1 ± 3,2              | 63 ± 19                  | 18,6 ± 1,7                | 10,8 ± 1,0                   | 0,580 |
| Ki_K   | iłowiec                                  | 27,6 ± 0,8                | 28,4 ± 0,7                | 48,9 ± 3,4              | 72 ± 15                  | 48,8 ± 1,8                | 30,1 ± 1,1                   | 0,616 |
| Kli_K  | łupek ilasty                             | 85,9 ± 1,3                | 73,7 ± 1,3                | 739 ± 12                | 128 ± 20                 | NA                        | NA                           | NA    |
| Klk_K  | łupek mułowcowi z wtrąceniami krzemionki | 68,7 ± 1,1                | 85,3 ± 1,4                | 590,1 ± 9,9             | 96 ± 15                  | 57,8 ± 3,3                | 69,8 ± 4,0                   | 1,208 |
| Kpm_K  | piaskowiec laminowany mułowcem           | 32,8 ± 0,7                | 34,6 ± 0,7                | 443,0 ± 7,6             | 41 ± 14                  | 37,9 ± 2,8                | 40,2 ± 2,9                   | 1,061 |

### Brzeszcze

| Próbka | Opis            | <sup>226</sup> Ra [Bq/kg] | <sup>228</sup> Th [Bq/kg] | <sup>40</sup> K [Bq/kg] | <sup>238</sup> U [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb [Bq/kg] | <sup>210</sup> Pb(Cs)[Bq/kg] | Cs    |
|--------|-----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|
| Km_B   | mułowiec        | 58,5 ± 1,2                | 71,1 ± 1,4                | 528 ± 11                | 674 ± 25                 | 58,6 ± 4,7                | 61,9 ± 4,9                   | 1,057 |
| Klm_B  | łupek mułowcowy | 56,7 ± 1,0                | 55,6 ± 1,0                | 621 ± 10                | 83 ± 16                  | 44,2 ± 2,7                | 48,6 ± 2,9                   | 1,100 |
| Kw_B   | węgiel          | 37,5 ± 0,9                | 24,4 ± 0,7                | 94,8 ± 4,1              | 79 ± 17                  | 52,6 ± 2,1                | 31,8 ± 1,3                   | 0,605 |
| Kp_B   | piaskowiec      | 29,7 ± 0,8                | 35,9 ± 0,8                | 712 ± 12                | NA                       | NA                        | NA                           | NA    |

### ***Omówienie wyników pomiarów:***

1. Węgiel z KWK Brzeszcze w porównaniu z węglem KWK Silesia wykazuje blisko trzykrotnie wyższą aktywność izotopów  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  i  $^{210}\text{Pb}$  a także czterokrotnie wyższą aktywność uranu.
2. Najwyższą aktywność uranu  $^{238}\text{U}$  posiadają mułowce z KWK Brzeszcze – wynosi ona  $674 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ . W pozostałych skałach obu kopalń nie przekracza ona wartości  $100 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$  (z jednym wyjątkiem, który dotyczy łupka ilastego KWK Silesia, gdzie wynosi ona  $128 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ ).
3. Aktywność ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  w badanych skałach w KWK Brzeszcze nie przekracza wartości  $60 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$ , podobnie jak w przypadku KWK Silesia.
4. Spośród wszystkich badanych skał obu kopalń łupek ilasty z KWK Silesia wykazuje najwyższe aktywności radioizotopów.

## 8. Bilans wodny zbiorników i jego wpływ na usuwanie radu z kolumny wody.

Jednym z procesów prowadzących do usuwania rozpuszczonych minerałów z kolumny wody jest ich zatężanie w procesie parowania. Bezpośredni pomiar strumienia pary wodnej z badanych zbiorników nie był możliwy. Do oszacowania wielkości tego efektu wykorzystano wyniki oznaczeń w wodach izotopów tlenu, stężenia chlorków, oraz dostępne dane dotyczące wielkości zrzutu wód kopalnianych do zbiorników. Przydatne okazały się również dane będące w posiadaniu Katedry Zastosowań Fizyki Jądrowej, Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie, odnośnie składu izotopowego opadów zbieranych w Krakowie. W obliczeniach wykorzystano proste modele, nie wymagające precyzyjnych pomiarów parametrów meteorologicznych i energetycznych w skali lokalnej.

### 8.1. Bilans masowy i izotopowy zbiornika wodnego w stanie ustalonym. Określenie wielkości strumienia parowania – zagadnienia ogólne.

Zbiorniki retencyjno-dozujące w Brzeszczach i Kaniowie są tworam i sztucznymi, posiadającymi uszczelnione brzegi i dno. Dlatego też we wszelkiego typu bilansach można pominąć składniki związane z dopływem i odpływem podziemnym. Równania bilansu masy i izotopów mają odpowiednio postać:

$$\frac{dV}{dt} = I + P - O - E \quad (18)$$

$$\frac{d(V\delta_v)}{dt} = I\delta_I + P\delta_P - O\delta_O - E\delta_E \quad (19)$$

gdzie:

$V$  – objętość zbiornika ( $m^3$ ), natomiast  $I$ ,  $P$ ,  $O$  i  $E$  ( $m^3/rok$ ) odpowiednio – dopływ do zbiornika wód zrzutowych (rurą wlotową), opady atmosferyczne, odpływ ze zbiornika i wielkość parowania. Wielkości  $\delta_X$  oznaczają  $\delta^2H$  lub  $\delta^{18}O$ ; indeks „X” oznacza jeden z podanych wyżej składników bilansowych. Dodatkowo  $\delta_v$  oznacza skład izotopowy wody w

zbiorniku. Z uwagi na lepszą powtarzalność oznaczania składu izotopowego tlenu w dalszych rozważaniach pod pojęciem  $\delta_X$  należy rozumieć  $\delta^{18}\text{O}$ .

Poza incydentalnymi sytuacjami wspominanymi wcześniej, wahania poziomu wody w zbiornikach można uznać za niewielkie. Sankcjonuje to założenie o warunkach ustalonych z uwagi na objętość wody. Wstępnie można założyć również, że skład izotopowy wody w zbiornikach również znajduje się w stanie ustalonym. Założenia te prowadzą do wyrażenia opisującego izotopowe wzbogacenie wody w wyniku parowania (Gat and Bowser 1991, Rozanski et al., 2001):

$$\delta_V - \delta_{I+P} = \Delta\delta = \frac{\delta_A - \delta_{I+P} + \varepsilon / h}{1 + \frac{I + P}{E} \frac{1 - h}{h}} \quad (20)$$

W wyrażeniu powyższym  $\delta_{I+P}$  oznacza skład izotopowy całkowitego dopływu do zbiorników, obejmującego wody zrzutowe oraz opady atmosferyczne. Jest on średnią ważoną składów poszczególnych komponent:

$$\delta_{I+P} = \frac{I \cdot \delta_I + P \cdot \delta_P}{I + P} \quad (21)$$

Wielkość  $\varepsilon$  opisuje całkowite wzbogacenie izotopowe w procesie parowania. Postać wyrażenia (20) wynika z założonego modelu (Craig and Gordon, 1965), w którym warstwa wody oddzielona jest od atmosfery (wilgotność względna  $h < 1$ ) laminarną warstwą graniczną, przylegającą do powierzchni wody, nasyconą w parę wodną ( $h = 1$ ). W warstwie tej molekuly wody są frakcjonowane izotopowo wskutek ruchu dyfuzyjnego, preferującego molekuly lżejsze. W efekcie, całkowite wzbogacenie izotopowe w procesie parowania może być opisane jako suma wzbogacenia równowagowego i kinetycznego:

$$\varepsilon = \varepsilon^* + \varepsilon_K \quad (22)$$

przy czym:

$$\varepsilon^* = (1 - \alpha_{G/V}) \cdot 1000 \quad (23)$$

$$\varepsilon_K = (1 - \hbar) \cdot C_K \cdot 1000 \quad (24)$$

Dla  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  wartość współczynnika  $C_K$  wynosi 0,0142 (14,2‰) (Gonfiantini, 1986).

$\alpha_{G/V}$  oznacza równowagowy współczynnik frakcjonowania w układzie para wodna-woda zbiornika. Zgodnie z definicją (por. 6.2.) współczynnik ten jest odwrotnością współczynnika  $\alpha_{V/G}$ , który zależy od temperatury wody w następujący sposób (Majoube, 1971):

$$\frac{1}{\alpha_{G/V}} = \alpha_{V/G} = \exp\left(\frac{1137}{T^2} - \frac{0,4156}{T} - 0,00207\right) \quad (25)$$

gdzie  $T$  – temperatura w skali bezwzględnej. Wzór (A3) uwzględnia wpływ wstecznego strumienia atmosferycznej pary wodnej „do wody” poprzez uwzględnienie jej składu izotopowego  $\delta_A$ .  $\hbar$  oznacza wilgotność względną atmosfery znormalizowaną nie tylko do wartości nasycenia, ale również do aktywności wody  $a_{\text{H}_2\text{O}}$ :

$$\hbar = \frac{h}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (26)$$

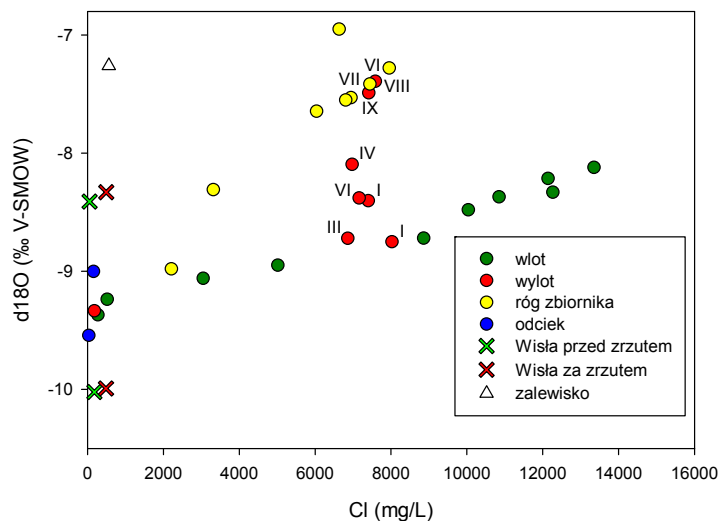
W powyższym wzorze  $h$  oznacza wilgotność względną atmosfery znormalizowaną do stanu nasycenia.

Przy dodatkowym założeniu, że skład izotopowy atmosferycznej pary wodnej jest w równowadze izotopowej z całkowitym dopływem do zbiorników wyrażenie (20) można zredukować i przekształcić do prostej postaci, wyrażającej stosunek całkowitego dopływu (I+P) do wysokości parowania (E):

$$\frac{I + P}{E} = \frac{\varepsilon^* + C_K}{\Delta\delta} - \frac{\hbar}{1 - \hbar} \quad (27)$$

### 8.1.1. Zbiornik Brzeszcze

Wyniki pomiarów składu izotopowego wód zbiornika Brzeszcze zestawiono w tabeli 9c. Na rys.27 przedstawiono relację pomiędzy składem izotopowym tlenu i stężeniem chlorków.

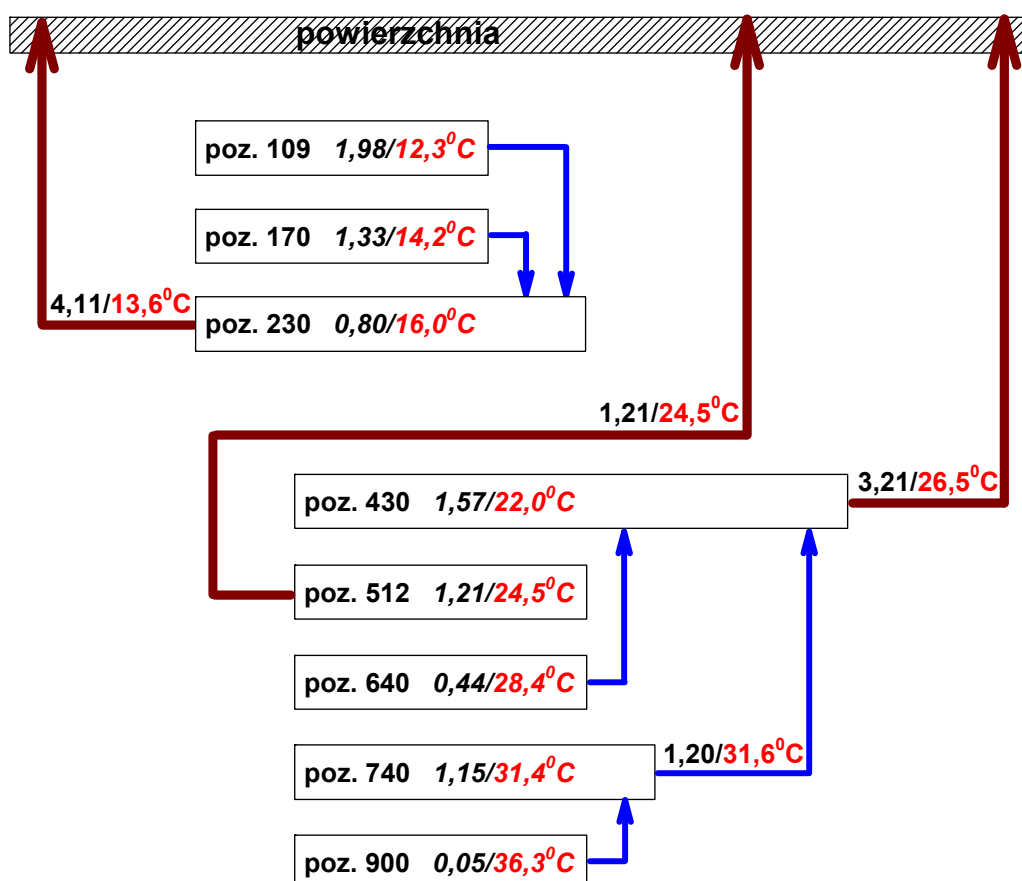


Rys.27. Relacja pomiędzy składem izotopowym tlenu i stężeniem chlorków w wodach zbiornika Brzeszcze

Cechą charakterystyczną wody zrzucanej przez kopalnię „Brzeszcze” jest zmienność jej parametrów w czasie. Odzwierciedla ona stosunki hydrologiczne w obrębie kopalni, w której wody dołowe ujmowane są zbiorczo na 8 poziomach. W tabeli 17 przedstawiono dostępne dane dotyczące wydatków dopływów na poszczególnych poziomach. Do poziomów górnych (230 m i powyżej) dopływa woda słodka, która jest szeroko wykorzystywana przez kopalnię do celów technologicznych, po czym zrzucana wraz z wodami zasolonymi (z poziomów między 230m a 740 m) oraz solankami (ujmowanymi poniżej 740 m) do zbiornika (rys. 28).

Tabela 17. Zestawienie dopływów wód dołowych do kopalni Brzeszcze

| Lp                    | Rejon Kopalni | Dopływ wody [m <sup>3</sup> /min] |             |                 |
|-----------------------|---------------|-----------------------------------|-------------|-----------------|
|                       |               | 4 – 12.06.2002                    | 2003        | I półrocze 2013 |
| 1                     | Poziom 109    | 1,85                              | 1,98        | 1,77            |
| 2                     | Poziom 170    | 1,54                              | 1,33        | 1,35            |
| 3                     | Poziom 230    | 0,94                              | 0,80        | 0,81            |
| 4                     | Poziom 430    | 1,48                              | 1,57        | 1,46            |
| 5                     | Poziom 512    | 0,43                              | 1,21        | 1,26            |
| 6                     | Poziom 640    | 1,75                              | 0,44        | 0,52            |
| 7                     | Poziom 740    | 1,16                              | 1,15        | 1,00            |
| 8                     | Poziom 900    | 0,05                              | 0,05        | 0,10            |
| <b>Razem Kopalnia</b> |               | <b>9,20</b>                       | <b>8,53</b> | <b>8,40</b>     |



Rys.28. Struktura usuwania wód dołowych z kopalni Brzeszcze. Czerwonymi cyframi przy odpowiednich poziomach zaznaczono temperaturę wody wyznaczoną w oparciu o stopień geotermiczny równy 33m (Poradnik Górnika, 1959). Temperatury przypisane strzałkom są średnimi ważonymi udziałem wód z poszczególnych poziomów w strumieniu wypompowywanej wody. Ilości wód ujmowanych na poszczególnych poziomach (m<sup>3</sup>/min) oznaczono czarnymi cyframi.

Jak wynika z tabeli 17 dopływy na poszczególnych poziomach do kopalni wykazują w przybliżeniu stałe wydatki w czasie. Sumaryczny dopływ (a co za tym idzie – zrzut) wynosi ok.  $8,5 \text{ m}^3/\text{min}$ , co odpowiada ilości  $4470000 \text{ m}^3$  wody w skali roku.

Mieszanie wód słodkich z solankami prowadzi do liniowej relacji między składem izotopowym a stężeniem chlorków (rys. 27). Równanie korelacyjne ma postać:

$$\delta^{18}\text{O} = (8,82 \pm 0,49) \cdot 10^{-5} \cdot \text{Cl}(\text{mg} / \text{L}) - (9,36 \pm 0,05) \quad (28)$$

$$N = 10; R^2 = 0,97$$

Z drugiej strony woda spuszczana ze zbiornika charakteryzuje się stosunkowo wąską zmiennością stężenia chlorków, sugerującą dobre mieszanie w obrębie zbiornika oraz kompensację efektu parowania wody. Skład izotopowy tlenu wód na wylocie ze zbiornika wykazuje zmienność sezonową. Dla celów niniejszej pracy podzielono rok na półroczne letnie (kwiecień – wrzesień) oraz zimowe (październik – grudzień – marzec). W miesiącach zimowych skład izotopowy wód zrzucanych ze zbiornika leży w pobliżu średniego składu wody na wlocie, natomiast w miesiącach letnich wykazuje on wartości przesunięte w kierunku bardziej dodatnich. Jakościowe wytłumaczenie tej zmienności wiąże się z wahaniami składu izotopowego opadów. W miesiącach letnich skład opadów jest przesunięty w stronę wartości bardziej dodatnich i nakłada się na analogiczne przesunięcie związane z efektem parowania wody w zbiorniku. W zimie, efekt wzrostu wartości  $\delta^{18}\text{O}$  wody wskutek parowania jest kompensowany poprzez opady o bardziej ujemnych składach izotopowych. Pomijając wyniki analiz próby na wylocie ze zbiornika z dnia 24.03.2012 (związanej z anomalnym stanem wody) ze wszystkich pozostałych można wyznaczyć średnie stężenie chlorków. Wynosi ono ok.  $7392 \text{ mg/L}$ . Wartość ta wstawiona do równania 28 pozwala na obliczenie średniego składu izotopowego tlenu wody zrzucanej do zbiornika przez kopalnię. Wynosi on  $\delta_l = -8,71\text{‰}$  i można zakładać, że pozostaje stały także w sensie wartości średnich w krótszych okresach czasu.

Z uwagi na niewielki dystans skład izotopowy opadów w rejonie Brzeszcz można zakładać na poziomie identycznym ze składem oznaczanym w miesięcznych próbach w Krakowie (GNIP – database). Dla okresu letniego, średni ważony ilością skład izotopowy tlenu w opadach krakowskich wynosi  $\delta_p = -7,74\text{‰}$ .

Na podstawie przytoczonych w raporcie Geoplanu danych (Łuciw et al., 2012) można stwierdzić, że średni roczny opad w rejonie Brzeszcz wynosi  $780 \text{ mm}$ . Uwzględniając

powierzchnię zbiornika (27,5 ha) daje to ok. 214500 m<sup>3</sup> wody zasilającej w skali roku zbiornik z tytułu opadów atmosferycznych. W rejonie Krakowa ok. 65% sumy rocznej opadów przypada na miesiące letnie. Przenosząc tę proporcję na okolice Brzeszcz uzyskuje się dla opadu letniego wysokość ok. 510 mm co równoważne jest 140250 m<sup>3</sup>.

Korzystając ze wzoru 21 można teraz wyliczyć skład izotopowy całkowitej wody dopływającej do zbiornika w formie zrzutu i opadów  $\delta_{I+P}$ . Wynosi on:

$$\delta_{I+P} = \frac{2235000 \cdot (-8,71\text{‰}) + 140250 \cdot (-7,74\text{‰})}{2235000 + 140250} = -8,65\text{‰}$$

Skład izotopowy wody w zbiorniku w miesiącach letnich  $\delta_v$  można wyznaczyć w oparciu o rezultaty analiz wykonanych dla prób pobranych w różnych rejonach zbiornika w sierpniu 2011 oraz we wrześniu 2014 roku. Z obliczeń należy wyeliminować próby oznaczone symbolem WB7 z północno- wschodniego rejonu zbiornika. Według danych uzyskanych od okolicznych mieszkańców, w przeszłości w rejonie tego miejsca znajdowały się źródła wody słodkiej. W trakcie budowy zbiornika źródła te zasypano warstwą ziemi, kształtując północną stronę zbiornika. W wyniku tego źródła znalazły się pod cienką warstwą ziemi. Niemniej jednak nie można wykluczać, że woda tego typu w dalszym ciągu dopływa do tego rejonu zbiornika. Skład izotopowy prób WB7 sugeruje taki scenariusz, aczkolwiek proces zdaje się mieć charakter ściśle lokalny. Wyznaczona w oparciu o pozostałe próby wartość  $\delta_v$  dla okresu letniego wynosi -7,40‰.

Stopień geotermiczny w rejonie Brzeszcz wynosi ok. 33 m (Poradnik Górnika, 1959). Korzystając z danych zawartych w tabeli 17 i rys. 28 można wyznaczyć średnią głębokość, ważoną ilością wody, z jakiej wypompowywana jest ona na powierzchnię. Głębokość ta wynosi ok. 370 m. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi ok. 9°C (Łuciw et al., 2012). Zatem temperatura wypompowywanej z kopalni wody powinna być na poziomie 20,2°C. Zmierzona na rurze wlotowej temperatura wody w dniu 25.07.2013 r wynosiła 21,3°C. W tej temperaturze równowagowy współczynnik frakcjonowania izotopów tlenu  $\alpha_{G/V}$  wynosi 0,9904. W celu określenia siły jonowej roztworu, aktywności wody oraz indeksów nasycenia wód względem poszczególnych minerałów wykonano stosowne obliczenia przy pomocy programu PHREEQC - 2 (Parkhurst and Appelo, 1999). Analiza chemiczna wody pobranej z rury wlotowej w dniu 25.07.2013 wskazuje na jej całkowitą mineralizację równą 18380 mg/L. Z tego powodu zdecydowano o zastosowaniu w obliczeniach biblioteki termodynamicznej

PITZER.DAT, rozszerzonej o baryt. Obliczenia wykonane w oparciu o zmierzone stężenia poszczególnych jonów (tab. 18) wskazują, że siła jonowa tej wody wynosi 0,36 mol/kg H<sub>2</sub>O, a aktywność wody równa się 0,990 (tab. 18). Średnia wartość wilgotności względnej mierzonej w Krakowie, za okres 1975-2013 wynosi  $h = 0,77$ . Zatem wartość wilgotności względnej znormalizowana do aktywności wody wynosi  $\bar{h} \approx 0,778$ . Wartości wielkości niezbędnych do oszacowania stosunku całkowitego dopływu do zbiornika do wielkości parowania wynoszą:

$$\varepsilon^* = 9,6\text{‰}; \quad C_K = 14,2\text{‰}; \quad \bar{h} = 0,778; \quad \delta_V = -7,40\text{‰}; \quad \delta_{I+P} = -8,65\text{‰}$$

Uwzględniając wszystkie te wielkości we wzorze 27 otrzymuje się:

$$\frac{I + P}{E} = 15,5 \tag{29}$$

Oznacza to, że ilość odparowanej wody w półroczu letnim stanowi 6,4% wody zasilającej zbiornik (zrzut + opad).

W skali rocznej można rozważać proces ochładzania wody od temperatury na wlocie (21,3°C) do średniej rocznej temperatury, równej ok. 9°C. Można pokazać, że powtórzenie zaprezentowanych obliczeń z odpowiednimi parametrami dotyczącymi skali roku prowadzi do identycznego stosunku całkowitego dopływu wody do wielkości parowania – 15,5. W skali roku daje to wielkość parowania na poziomie 1110 mm.

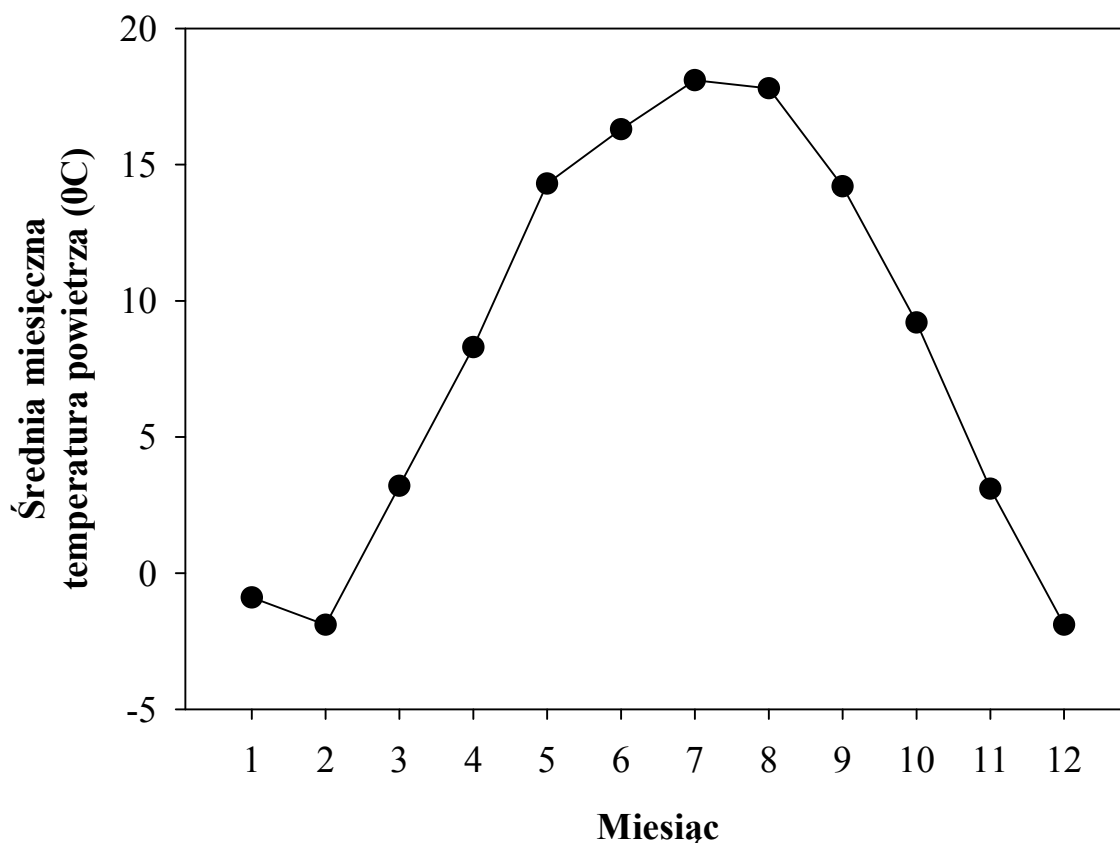
Tabela 18. Wyniki obliczeń programem PHREEQC dla próby WB1 pobranej w dniu 25.07.2013, oraz wody WB1<sub>MAX</sub> odpowiadającej najwyższemu zaobserwowanemu w okresie badań stężeniu chlorków (szczegóły – patrz tekst).

|                                         | śr. woda na<br>poz. 230 | WB1<br>(25.07.2013) | WB1 <sub>MAX</sub> |
|-----------------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| Temp (°C)                               | 16,0                    | 21,3                | 22,5               |
| pH                                      | 6,40                    | 7,31                | 7,64               |
| Na <sup>+</sup> (mg/L)                  | 67,1                    | 6172                | 7604               |
| K <sup>+</sup> (mg/L)                   | 4,81                    | 82,1                | 100,2              |
| Ca <sup>2+</sup> (mg/L)                 | 84,7                    | 508,9               | 608,4              |
| Mg <sup>2+</sup> (mg/L)                 | 21,7                    | 440,8               | 539,1              |
| Ba <sup>2+</sup> (mg/L)                 | n.m.                    | 0,685               | 0,846              |
| Sr <sup>2+</sup> (mg/L)                 | n.m.                    | 17,2                | 21,2               |
| Cl <sup>-</sup> (mg/L)                  | 132,6                   | 10848               | 13361              |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)    | 168,6                   | 85                  | 74,0               |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)    | 67,7                    | 222                 | 258                |
| <b>Parametry:</b>                       |                         |                     |                    |
| Siła jonowa I (mol/kg H <sub>2</sub> O) | 0,013                   | 0,36                | 0,44               |
| Aktywność wody a <sub>H2O</sub>         | 1,000                   | 0,990               | 0,987              |
| <b>Indeksy nasycenia:</b>               |                         |                     |                    |
| Aragonit                                | -1,77                   | 0,05                | 0,50               |
| Kalcyt                                  | -1,57                   | 0,24                | 0,69               |
| Dolomit                                 | -3,37                   | 0,87                | 1,80               |
| Baryt                                   | -----                   | 0,22                | 0,10               |
| Magnezyt                                | -2,50                   | -0,16               | 0,30               |

Stężenie chlorków w próbce WB1 z dnia 25.07.2013 jest niższe od wartości maksymalnej, stwierdzonej dla próby wody na wlocie do zbiornika 11.01.2012 i wynoszącej 13350 mg/L. Uwzględniając (Rys. 27), że skład chemiczny wód zrzuconych do zbiornika z kopalni powinien odpowiadać mieszaniną się dwóch składowych: słonej i słodkiej, można określić stężenia głównych składników w wodzie WB1<sub>MAX</sub> – odpowiadającej najwyższemu stężeniu jonów chlorkowych. Obliczeń takich dokonano programem PHREEQC-2 z biblioteką pitzer.dat, uzupełnioną o dane dla jonów baru. W oparciu o dostępne dane analityczne dotyczące chemizmu wód na poziomie 230 m (CBiDGP, 2010, 2011, 2012, 2013) określono średni skład wody słodkiej. W tym celu policzono średnią mineralizację tych wód przy zastosowaniu bloku MIX z równymi udziałami wód o danych mineralizacjach. Z braku danych założono zerowe stężenia jonów Ba oraz Sr. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 18. Obliczone średnie stężenie jonów chlorkowych w wodach słodkich wynosi ok. 133 mg/dm<sup>3</sup>. Korzystając z tej wartości oraz z maksymalnego zaobserwowanego stężenia można

określić proporcję w jakiej powinny mieszać się wody słodkie oraz  $WB1_{MAX}$  w celu uzyskania wody WB1. Proporcja ta to: 0,19:0,81. Wykorzystując tę proporcję obliczono skład chemiczny wody  $WB1_{MAX}$  z wyjątkiem pH oraz stężenia wodorowęglanów. Wielkości tych nie można wyliczać z prostej proporcji mieszania gdyż są powiązane równaniem nieliniowym. W celu ich wyznaczenia posłużono się metodą iteracyjną. Na wstępie zadeklarowano skład roztworu  $WB1_{MAX}$  odpowiadający w całości proporcji mieszania. Następnie naprzemiennie tak poprawiano wartości pH i  $HCO_3^-$  aby po zmieszaniu tej wody z wodą słodką w bloku MIX uzyskać zgodność z parametrami wody WB1 oraz wszystkimi ważnymi indeksami nasycenia. Rezultaty obliczeń przy pomocy tej procedury zebrano w Tabeli 18. Jak wynika z tej tabeli, takie podejście skutkuje zwiększeniem siły jonowej roztworu oraz nieznacznym spadkiem aktywności wody. Prostym rachunkiem można wykazać, że przedstawiona modyfikacja wartości  $a_{H_2O}$  nie wpływa na proporcję pomiędzy wielkością parowania a całkowitym zasilaniem zbiornika opisaną wzorem 29. W końcowej fazie obliczeń iteracyjnych należało również nieco skorygować stężenie jonów siarczanowych w wodzie  $WB1_{MAX}$  (z 65,4 na 74,0 mg/dm<sup>3</sup>) aby po zmieszaniu wód osiągnąć obserwowaną wartość 85 mg/dm<sup>3</sup> i indeks nasycenia względem barytu równy 0,22.

Pewne wątpliwości może budzić fakt, że w miesiącach letnich (IV-XI) temperatury powietrza podlegają istotnym zmianom. Z drugiej strony głębokości zbiorników w Brzeszczach jak i w Kaniowie są stosunkowo niewielkie, stwarzając dogodne warunki do efektywnego mieszania wód i wyrównywania ich temperatur z temperaturami atmosfery. Temperatura wód zrzucanych do zbiornika Brzeszcze wynosi ok. 21<sup>0</sup>C (udział wód opadowych w modyfikacji tej wielkości jest do zaniedbania). Rozkład średnich miesięcznych temperatur dla Krakowa zilustrowano na rys. 29. Z uwagi na niewielką odległość i różnice w ukształtowaniu terenu, ten rozkład powinien z dobrym przybliżeniem obowiązywać w rejonie Brzeszcz. Prezentowane dane świadczą, że wody kopalniane w obrębie zbiornika średnio rzecz biorąc powinny być poddawane schłodzeniu wskutek kontaktu z atmosferą. Niestety, nie ma danych odnośnie korelacji temperatur wód zbiornikowych z temperaturami atmosfery. Niemniej na potrzeby niniejszej pracy można rozważyć skrajny wariant, w którym woda w zbiorniku osiąga równowagę termiczną z atmosferą, której średnia temperatura powietrza w okresie letnim wynosi 14,7<sup>0</sup>C (GNIP - database). Wartość ta odpowiada średniej z lat 1975-2011 dla rejonu Krakowa.

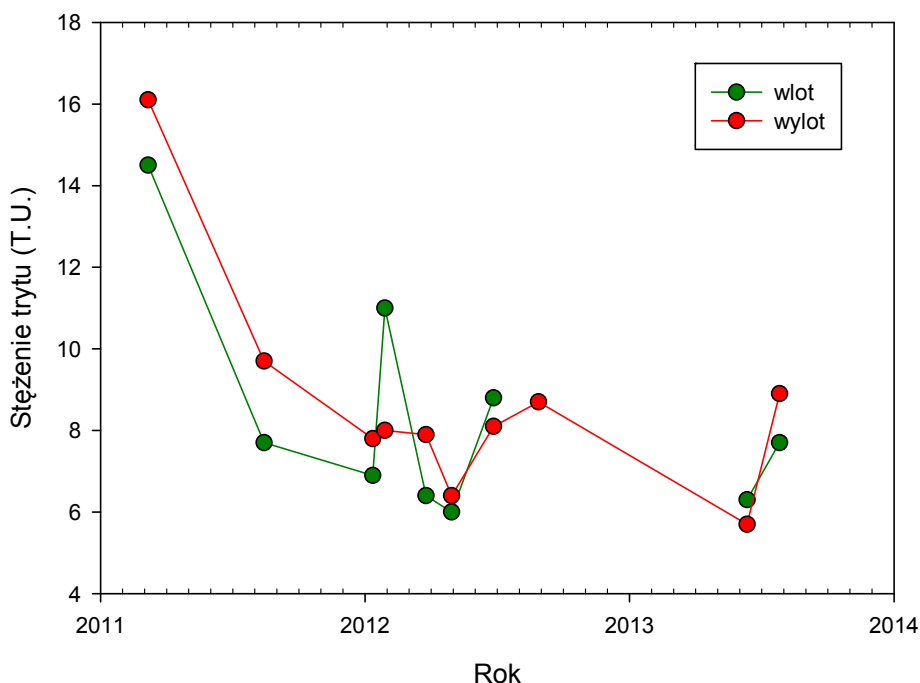


Rys.29. Średnie miesięczne temperatury powietrza mierzone w Krakowie w okresie 1975-2011 (GNIP – database)

Założenie takiej temperatury skutkuje jedynie zmianą wielkości równowagowego wzbogacenia izotopowego. Teraz wynosi ono  $\varepsilon^* = 10,2\text{‰}$ . W konsekwencji wartość ilorazu  $\frac{I+P}{E}$  wynosi 16,0. Parowanie stanowi więc 6,2% wody zasilającej zbiornik (wody kopalniane + opad). Jak widać, efekt ochładzania wody ma niewielki wpływ na względną wielkość strumienia parowania.

Przy uwzględnieniu wielkości dopływu I+P oraz powierzchni zbiornika, uzyskane wyniki odpowiadają wysokości parowania w półroczu letnim na poziomie ok. 540-560 mm. Rezultat ten jest porównywalny z szacowaną wcześniej wielkością opadów atmosferycznych w tym półroczu równą 510 mm, co tłumaczy obserwowany brak zmienności stężenia chlorków w omawianej skali czasowej. W skali roku, średnie stężenia chlorków na wlocie i wylocie zbiornika wynoszą odpowiednio: 6970 oraz 7390 mg/L. Ten stosunkowo niewielki wzrost stężenia chlorków spowodowany jest lekką nadwyżką parowania nad opadami atmosferycznymi. Niewielka zmienność stężenia chlorków świadcząca o wzajemnej

kompensacji strumieni wody parującej i opadowej znajduje pełne potwierdzenie w mierzonym na wlocie i wylocie zbiornika stężeniu trytu.



Rys.30. Przebieg stężenia trytu w wodzie mierzony na wlocie i wylocie zbiornika Brzeszcze.

Na rys. 30 przedstawiono rezultaty pomiarów stężenia trytu w wodzie zbiornika Brzeszcze. Wynika z niego, że zazwyczaj stężenie trytu na wylocie jest nieco wyższe niż na wlocie, co stanowi odzwierciedlenie udziału wód opadowych.

### 8.1.2. Wytrącanie barytu w zbiorniku Brzeszcze

Dostępne analizy chemiczne wody na wlocie i wylocie zbiornika Brzeszcze (tab. 7) uniemożliwiają przeprowadzenie modelowania odwrotnego. W trakcie opróbowania zarejestrowano pomiędzy wlotem i wylotem spadek stężenia jonów wapniowych o ponad 4 mmol/l, jonów magnezowych o 6,5 mmol/l przy ubytku węgla (w różnych jego postaciach) na poziomie zaledwie 0,4 mmol/l. Powód tej rozbieżności nie jest jasny. Niemniej jednak uniemożliwia ona skutecznie zbilansowanie ładunkowe roztworów konieczne w procedurze modelowania odwrotnego. Dlatego wykonano modelowanie wprost, oparte na danych wejściowych, zgodnych z parametrami roztworów WB1 i WB1<sub>MAX</sub> zamieszczonymi w tabeli 18 oraz 19.

Tabela 19. Zestawienie bilansu wody w zbiorniku Brzeszcze.

|                   | Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ ) | I ( $\text{m}^3$ ) | P ( $\text{m}^3$ ) | E ( $\text{m}^3$ ) | O=I+P+D-E ( $\text{m}^3$ ) | O/I   |
|-------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|-------|
| Brzeszcze-lato    | 21,3                         | 2235000            | 140250             | 152000             | 2223250                    | 0,995 |
| Brzeszcze-lato    | 14,7                         | 2235000            | 140250             | 147265             | 2227990                    | 0,997 |
| Brzeszcze-rocznie | 21,3                         | 4470000            | 214500             | 271700             | 4412800                    | 0,987 |
| Brzeszcze-rocznie | 9,0                          | 4470000            | 214500             | 341970             | 4342530                    | 0,971 |

Schemat obliczeniowy składał się z następujących kroków:

- obliczenie stężenia jonów baru w warunkach równowagi fazowej, tzn.  $SI_{\text{baryt}} = 0,0$ ;
- odparowanie wyznaczonej wcześniej ilości wody i obliczenie stężenia jonów barowych w warunkach równowagi fazowej;
- obniżenie początkowej temperatury wody i obliczenie stężenia jonów baru w warunkach równowagi faz.

Roztworu kończącego w/w rachunki nie należy utożsamiać z próbą WB2 (tabela 9), m.in. z uwagi na wspomniane rozbieżności w obrębie układu węglanowego. Obliczenia wykonano z rozróżnieniem na okres letni, oraz roczny. Ma to bezpośredni związek ze stopniem schładzania wody w trakcie przebywania w zbiorniku. W okresie letnim założono średnią temperaturę końcową wody na poziomie  $14,7^{\circ}\text{C}$ , a w okresie rocznym temperaturę  $9^{\circ}\text{C}$  będącą średnią roczną, stwierdzaną na tym terenie. Rezultaty obliczeń dla jonu barowego zestawiono w tabeli 20.

Tabela 20. Wyniki modelowania „wprost” zmienności stężenia jonów  $Ba^{2+}$  wskutek wytrącania barytu w wodzie zbiornika Brzeszcze oraz ocena aktywności  $^{226}Ra$  zmagazynowanego w osadach tego zbiornika w całym okresie jego eksploatacji

|                                                                                                                       | woda<br>WB1<br>lato   | woda WB1<br>okres<br>roczny | woda<br>WB1 <sub>MAX</sub><br>lato | woda<br>WB1 <sub>MAX</sub><br>okres roczny |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|
| początkowe stężenie jonów $Ba^{2+}$ (mol/l)                                                                           | $5,081 \cdot 10^{-6}$ | $5,081 \cdot 10^{-6}$       | $6,303 \cdot 10^{-6}$              | $6,303 \cdot 10^{-6}$                      |
| $SI_{baryt}$                                                                                                          | 0,19                  | 0,19                        | 0,11                               | 0,11                                       |
| ilość wytrąconych jonów $Ba^{2+}$ po osiągnięciu równowagi: $SI_{baryt} = 0,0$ (mol/l)                                | $1,767 \cdot 10^{-6}$ | $1,767 \cdot 10^{-6}$       | $1,376 \cdot 10^{-6}$              | $1,376 \cdot 10^{-6}$                      |
| ilość wytrąconych jonów $Ba^{2+}$ po odparowaniu wody i osiągnięciu równowagi:<br>$SI_{baryt} = 0,0$ (mol/l)          | $9,8 \cdot 10^{-9}$   | $9,42 \cdot 10^{-8}$        | $1,40 \cdot 10^{-8}$               | $1,348 \cdot 10^{-7}$                      |
| ilość wytrąconych jonów $Ba^{2+}$ po obniżeniu temperatury wody, w warunkach<br>równowagi: $SI_{baryt} = 0,0$ (mol/l) | $8,590 \cdot 10^{-7}$ | $1,440 \cdot 10^{-6}$       | $1,454 \cdot 10^{-6}$              | $2,261 \cdot 10^{-6}$                      |
| sumaryczna ilość wytrąconych jonów $Ba^{2+}$ (mol/l)                                                                  | $2,64 \cdot 10^{-6}$  | $3,21 \cdot 10^{-6}$        | $2,84 \cdot 10^{-6}$               | $3,77 \cdot 10^{-6}$                       |
| ilość zrzucanej wody w okresie obrachunkowym ( $m^3$ )                                                                | $2,235 \cdot 10^6$    | $4,470 \cdot 10^6$          | $2,235 \cdot 10^6$                 | $4,470 \cdot 10^6$                         |
| ilość wytrąconego do osadów barytu w okresie obrachunkowym (tony) <sup>*)</sup>                                       | 1,38                  | 3,35                        | 1,48                               | 3,93                                       |
| aktywność $^{226}Ra$ (MBq) wytrącanego z barytem                                                                      | 44,4                  | 107,9                       | 47,7                               | 126,5                                      |
| masa pozostałej części osadu odkładanego w okresie obrachunkowym (tony) <sup>**)</sup>                                | 33,1                  | 80,4                        | 35,5                               | 89,5                                       |
| aktywność pozostałej części osadu (MBq)                                                                               | 10,9                  | 26,4                        | 11,6                               | 29,4                                       |
| aktywność $^{226}Ra$ (GBq) zgromadzona w osadach zbiornika w trakcie jego 34 letniej<br>eksploatacji                  | 1,9                   | 4,6                         | 2,0                                | 5,3                                        |

<sup>\*)</sup> ilość ta stanowi średnio rzecz biorąc ok. 4% całkowitej masy osadu

<sup>\*\*)</sup> masa pozostałych 96% całkowitej masy osadu

Uwzględniając wyniki analiz mineralogicznych prób OB1 i OB5 (z okolic wlotu i w strefie wylotowej wody ze zbiornika; por. tab. 12) wartości średnie zawartości barytu w osadach dennych wynoszą odpowiednio 7,2 oraz 0,9%. Pozostała część przypada na minerały ilaste oraz substancje amorficzne. Wg Beneša i Strejca (1986) ok. 55% całkowitego  $^{226}\text{Ra}$ , usuwanego z wody na osadach zawierających baryt i minerały ilaste, przypada na współstrącenie na barycie. Zakładając, że podobna sytuacja ma miejsce w zbiorniku Brzeszcze można napisać następujące równania wynikające z zasady zachowania masy dla obszaru wlotowego i wylotowego wody:

$$\kappa \cdot \text{baryt} \cdot 0,55 + \lambda \cdot (1 - \text{baryt}) \cdot 0,45 = 1414 \quad (30)$$

$$\kappa \cdot \text{baryt}' \cdot 0,55 + \lambda \cdot (1 - \text{baryt}') \cdot 0,45 = 306 \quad (31)$$

W równaniach tych  $\kappa$  oraz  $\lambda$  oznaczają aktywności właściwe  $^{226}\text{Ra}$  odpowiednio na barycie, oraz innych składnikach osadów dennych. Prawe strony równań wyrażają zmierzone aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  w osadach dennych pobranych z okolic wlotu i wylotu wody do zbiornika. Podstawiając:  $\text{baryt} = 0,072$ ;  $\text{baryt}' = 0,009$ ;  $(1 - \text{baryt}) = 0,928$ ;  $(1 - \text{baryt}') = 0,991$ ; otrzymujemy:

$$\kappa = 32,2 \text{ kBq/kg barytu};$$

$$\lambda = 328 \text{ Bq/kg pozostałych składników osadu}$$

Średnia zawartość barytu w osadach (wlot-wylot) wynosi ok. 4%. Zatem średnio 96% stanowią inne substancje, na których zawieszona aktywność powinna wynosić 328 Bq/kg osadu. Używając tego przelicznika otrzymujemy aktywności  $^{226}\text{Ra}$  stowarzyszone z innymi składnikami osadu przedstawione w tabeli 19. Wynika z niej, że w przypadku najbardziej niekorzystnego scenariusza (woda  $\text{WB1}_{\text{MAX}}$  w okresie rocznym), zgromadzona dotychczasowa całkowita aktywność  $^{226}\text{Ra}$  w osadach dennych zbiornika Brzeszcze może sięgać wartości 5,3 GBq.

Jak wynika z tabeli 19 ok. 40% całkowitego barytu obecnego w osadzie powinno być wytrącane w okresie letnim. Na podstawie dostępnych danych można stwierdzić, że strumień barytu do osadów zbiornika może sięgać ok. 4 ton w skali roku. Najmniej znaczącym procesem prowadzącym do wytrącania barytu jest parowanie wody ponieważ, jak to wynika z tab. 20, ubytek wody wskutek parowania jest prawie w całości kompensowany ilością opadów atmosferycznych. Trzeba mieć jednak świadomość, że opisana sytuacja ma miejsce w

okresie letnim lub rocznym. W krótszej skali czasu, szczególnie w gorących i suchych miesiącach parowanie może być znaczącym czynnikiem wymuszającym wytrącanie barytu.

W przypadku minerałów węglanowych, szczególnie kalcytu, roztwór wodny musi osiągnąć odpowiednie przesycenie do zaistnienia efektywnego wytrącania tego minerału (ok. 7-krotne w przeciętnych warunkach wód infiltracyjnych). Z uwagi na brak analogicznych danych dla barytu, w obliczeniach konsekwentnie odnoszono się do warunków równowagi względem barytu. Może to zatem oznaczać, że wyniki obliczeń są nieco zawyżone.

Drugim ważnym minerałem w środowisku naturalnym, w skład którego wchodzi bar jest witeryt, czyli węglan baru ( $\text{BaCO}_3$ ). Wyniki obliczeń wskazują, że woda zbiornika Brzeszcze (podobnie jak wszystkie inne badane w ramach tej pracy) jest w znacznym stopniu nienasycona względem tego minerału. W związku z tym pominięto go całkowicie w dalszych rozważaniach.

### **8.1.3. Zbiornik Kaniów**

W przypadku omówionego zbiornika Brzeszcze oceny wielkości strumienia parowania dokonano w oparciu o izotopy tlenu. Analogiczne podejście w stosunku do zbiornika w Kaniowie prowadzi do absurdalnie niskich wielkości parowania – nawet rzędu 110 mm w okresie rocznym. U podstaw metody określania wielkości parowania z zastosowaniem bilansu izotopowego leży założenie o warunkach ustalonych tak w stosunku do objętości wody w zbiorniku, jak i jej składu izotopowego. Powodem uzyskiwanych nierealnych wartości parowania jest stan nieustalony tego zbiornika z uwagi na wymianę izotopową z atmosferyczną parą wodną (poprzez stan ustalony nie należy tutaj rozumieć tylko stałości składu izotopowego wody). W przypadku Brzeszcz wartość  $\delta_{\text{I+P}}$  wynosi -8,65‰ i jest bliska wartości -9,17‰ reprezentującej opady, z którymi atmosferyczna para wodna jest w równowadze izotopowej. Dla Kaniowa  $\delta_{\text{I+P}}$  równa jest -4,76‰. Odbiega więc znacząco od wartości -9,17‰. Najwyraźniej różnica ta nie może być zniwelowana w okresie odpowiadającym średniemu czasowi przebywania wody w zbiorniku – ok. 50 dni. Z uwagi na niewielki dystans dzielący obydwie zbiorniki można zakładać wielkość opadu rocznego na powierzchnię zbiornika w Kaniowie na poziomie 780 mm. W odniesieniu do wód zbiornika Kaniów, przeprowadzono dwie pełne serie poboru prób do analiz składu izotopowego: w październiku 2010 oraz kwietniu 2012 roku. Do oceny wielkości parowania można wykorzystać rezultaty pomiarów stężenia jonów chlorkowych (tabela 9), jako jednego z

najbardziej zachowawczych wskaźników hydrochemicznych. Średnie stężenie tych jonów na wlocie do zbiornika wynosiło 34386 mg/L, na wylocie – 33010 mg/L.

W oparciu o stężenie chlorków można napisać następujące równania bilansu masy:

$$O = I + P - E \quad (32)$$

$$O \cdot c_o = I \cdot c_i + P \cdot 0 - E \cdot 0 \quad (33)$$

gdzie znaczenie symboli I, O, E, P jest identyczne jak w równaniu (18).  $c_i$  oraz  $c_o$  oznaczają odpowiednio stężenie chlorków na wlocie i wylocie zbiornika. Strumienie opadów i parującej wody traktujemy jako pozbawione jonów chlorkowych; stąd zera w równaniu (33).

Uwzględniając powierzchnię zbiornika w Kaniowie, roczna suma opadów na poziomie 780 mm odpowiada  $P = 48360 \text{ m}^3$  wody. Rocznie do zbiornika zrzucających jest ok.  $I = 1640000 \text{ m}^3$  wód kopalnianych. Uwzględniając wszystkie powyższe założenia oraz wstawiając równanie (32) do (33) po prostych rachunkach otrzymujemy wielkość parowania  $E = -20000 \text{ m}^3$ ! Nieskomplikowana analiza równań bilansowych prowadzi do wniosku, że fizycznie poprawne wartości strumienia parowania można otrzymać zakładając istnienie dodatkowego dopływu D wody słodkiej do zbiornika. Uwzględnienie tego założenia prowadzi do wniosku, że  $D = (E + 20000) \text{ m}^3$ . Jeśli przyjąć, że strumień parującej wody jest taki sam jak w przypadku zbiornika Brzeszcze, otrzymujemy całkowitą roczną wartość dodatkowego dopływu wody słodkiej na poziomie ok.  $88800 \text{ m}^3$ . Wówczas otrzymuje się pełną zgodność obserwowanego w obrębie zbiornika bilansu jonów chlorkowych. Wy tłumaczenie pochodzenia takiej ilości wody nie jest proste. Wg informacji uzyskanych w KWK „Silesia” nie ma możliwości dopływu podziemnego do zbiornika w Kaniowie. Jednak w okolicy zbiornika znajduje się składowisko skały płonnej oraz osadnik mułów popłuczkowych. Ich sumaryczna powierzchnia jest na tyle znaczna, że potencjalnie mogą one stanowić istotne źródło dopływu w postaci spływających wód opadowych. Na obecnym etapie badań jest to jednak tylko hipoteza, wymagająca potwierdzenia w postaci specjalistycznych badań terenowych. Warto zaznaczyć, że uwzględnienie niepewności analitycznej oznaczania stężenia chlorków może prowadzić do 25% zwiększenia lub zmniejszenia ilości dodatkowo dopływającej wody do zbiornika.

Analogiczny bilans chlorków dla zbiornika Brzeszcze nie może być dokładnie spełniony z uwagi na zmienność stężenia tych jonów na wlocie do zbiornika. Jednak można pokazać rachunkiem opartym na bilansie masy, że w ramach obserwowanej zmienności

stężenia chlorków na wlocie oraz poczynionych założeń, zgodność wynikających z obliczeń stężeń na odpływie ze zbiornika jest zadowalająca z wartościami mierzonymi (w granicach  $\pm 8\%$ ).

Tabela 21. Zestawienie bilansu wody w zbiorniku Kaniów

|                                          | Temp.(°C) | I (m <sup>3</sup> ) | P (m <sup>3</sup> ) | E (m <sup>3</sup> ) | D (m <sup>3</sup> ) | O=I+P+D-E (m <sup>3</sup> ) | O/I   |
|------------------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-------|
| Kaniów-<br>rocznie<br>Bilans<br>chlorków | 25        | 1640000             | 48360               | 68820               | 88800               | 1708340                     | 1,042 |

Tabela 22. Wyniki obliczeń programem PHREEQC dla próby wody wlotowej z Kaniowa (szczegóły – patrz tekst).

|                                         | Kaniów wlot |
|-----------------------------------------|-------------|
| Temp (°C)                               | 25          |
| pH                                      | 6,94        |
| Na <sup>+</sup> (mg/L)                  | 15880       |
| K <sup>+</sup> (mg/L)                   | 167,8       |
| Ca <sup>2+</sup> (mg/L)                 | 2638        |
| Mg <sup>2+</sup> (mg/L)                 | 1065        |
| Ba <sup>2+</sup> (mg/L)                 | 49,9        |
| Sr <sup>2+</sup> (mg/L)                 | 86,1        |
| Cl <sup>-</sup> (mg/L)                  | 35875       |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)    | 21,6        |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)    | 111         |
| <b>Parametry:</b>                       |             |
| Siła jonowa I (mol/kg H <sub>2</sub> O) | 1,14        |
| Aktywność wody a <sub>H2O</sub>         | 0,968       |
| <b>Indeksy nasycenia:</b>               |             |
| Aragonit                                | 0,12        |
| Kalcyt                                  | 0,31        |
| Dolomit                                 | 0,77        |
| Baryt                                   | 0,86        |
| Magnezyt                                | -0,39       |

Woda wpływająca do zbiornika w Kaniowie wykazuje większe przesycenie w baryt w stosunku do wody z Brzeszcz (por. tab. 18 i 22). Próba modelowania odwrotnego procesu wytrącania barytu przy zastosowaniu programu PHREEQC nie przyniosła spodziewanych rezultatów. Uzyskane wyniki sugerują, że baryt powinien być rozpuszczany między wlotem i wylotem zbiornika w ilościach rzędu kilkunastu mikromoli na litr wody. Przy uwzględnieniu możliwych błędów analitycznych można dopuszczać sytuację, w której baryt nie jest efektywnie strącany. Jednak analizy mineralogiczne jednoznacznie wskazują na jego

obecność w osadach dennych i to w znaczących ilościach. Zdecydowano zatem o wykonaniu obliczeń opartych na modelowaniu wprost. Schemat obliczeniowy zawierał następujące kroki:

a) obniżenie początkowej temperatury wody do poziomu średniego rocznego ( $9^{\circ}\text{C}$ ) i obliczenie stężenia jonów baru w warunkach równowagi fazowej, tzn.  $\text{SI}_{\text{baryt}} = 0,0$ ;

b) dodanie wody na poziomie wynikającym z bilansu przedstawionego w tabeli 21 i wyznaczenie stężenia jonów baru w warunkach równowagi fazowej.

Wyniki tych oraz innych obliczeń zestawiono w tabeli 23. Ich wyniki świadczą, że dominującego strumienia barytu do osadów należałoby się spodziewać podczas ochładzania wody z równoczesnym przywracaniem w niej równowagi fazowej względem tego minerału – ok.  $0,2 \text{ mmol}$  z jednego litra wody. W fazie rozcieńczania roztworu wodnego teoretycznie istnieje możliwość rozpuszczania barytu z osadów w ilości  $1 \text{ mikromola}$  na litr wody. Ilość ta jest pomijalnie mała w porównaniu z przytoczoną powyżej. Sumarycznie można się spodziewać wytrącania na poziomie  $2,038 \cdot 10^{-4} \text{ mol barytu/L}$ . Jeżeli wartość tę przemnożyć przez ilość zrzucanej przez kopalnię wody w skali roku, otrzymuje się roczną ilość wytrącanego w zbiorniku barytu na poziomie ok.  $78 \text{ ton}$ . Zakładając liniowość stężenia barytu w osadach między wlotem i wylotem zbiornika i biorąc wartości średnie zmierzonych w tych lokalizacjach zawartości tego minerału uzyskuje się wielkość  $18,4\%$  jako średni udział barytu w osadach dennych. Zatem pozostałe składniki formują  $81,6\%$  całkowitej masy osadu, co daje ok.  $346 \text{ ton}$  w skali roku. Wykonując analogiczne rachunki jak dla zbiornika Brzeszcze, oparte na równaniach (32) i (33) otrzymuje się aktywność  $^{226}\text{Ra}$  deponowaną rocznie na innych składnikach osadów na poziomie  $0,33 \text{ GBq/rok}$ . Przez analogię do obliczeń dla Brzeszcz całkowita aktywność  $^{226}\text{Ra}$  zgromadzona w osadach zbiornika Kaniów w trakcie jego 14 letniej eksploatacji może wynosić  $212 \text{ GBq}$ .

Tabela 23. Wyniki modelowania wprost zmienności stężenia jonów  $Ba^{2+}$  (mol/l) wskutek wytrącania barytu w wodzie zbiornika Kaniów oraz ocena aktywności  $^{226}Ra$  zmagazynowanego w osadach tego zbiornika w całym okresie jego eksploatacji

|                                                                                                                                | Kaniów<br>Okres<br>roczny |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| początkowe stężenie jonów $Ba^{2+}$ (mol/l)                                                                                    | $3,849 \cdot 10^{-4}$     |
| $SI_{baryt}$                                                                                                                   | 0,86                      |
| ilość wytrąconych jonów $Ba^{2+}$ po obniżeniu temperatury do $9^{\circ}C$ , w warunkach równowagi: $SI_{baryt} = 0,0$ (mol/l) | $2,047 \cdot 10^{-4}$     |
| ilość rozpuszczanych jonów $Ba^{2+}$ po dodaniu wody, w warunkach równowagi: $SI_{baryt} = 0,0$ (mol/l)                        | $-9,06 \cdot 10^{-7}$     |
| efektywna ilość wytrąconych jonów $Ba^{2+}$ (mol/l)                                                                            | $2,038 \cdot 10^{-4}$     |
| ilość zrzucanej wody w okresie obrachunkowym ( $m^3$ )                                                                         | $1,640 \cdot 10^6$        |
| ilość wytrąconego do osadów barytu (tony/rok) <sup>*)</sup>                                                                    | 78,0                      |
| aktywność $^{226}Ra$ (GBq/rok) wytrącanego z barytem                                                                           | 14,8                      |
| masa pozostałej części osadu (tony/rok) <sup>**) )</sup>                                                                       | 345,9                     |
| aktywność pozostałej części osadu (GBq/rok)                                                                                    | 0,33                      |
| aktywność $^{226}Ra$ (GBq) zgromadzona w osadach zbiornika w trakcie jego 14 letniej eksploatacji                              | 212                       |

<sup>\*)</sup> ilość ta stanowi 18,4% całkowitej masy osadu

<sup>\*\*) )</sup> masa pozostałych 81,6% osadu

## 8.2. Oszacowanie aktywności radu $^{226}Ra$ skumulowanej w osadach dennych zbiorników Brzeszcze i Kaniów

Przedstawione oszacowanie skumulowanej aktywności  $^{226}Ra$  w osadach zbiorników zostało wykonane przy szeregu założeń upraszczających. W części bilansowej wody założenia te dotyczyły zarówno parametrów o charakterze meteorologicznym, jak i chemicznym. Założono średnie temperatury zrzucanej wody wynikające ze średniej głębokości pojawiania się wód w wyrobiskach oraz stopnia geotermicznego w rejonie kopalń. Zmiana proporcji pomiędzy składowymi zrzucanych wód może skutkować wahaniami temperatury – parametru istotnego z punktu widzenia rozpuszczalności minerałów. Wobec braku odpowiednich danych literaturowych, w obliczeniach modeli wprost przy użyciu programu PHREEQC konsekwentnie doprowadzano roztwory wodne do równowagi fazowej względem barytu. To założenie nie musi być spełnione, tak jak nie jest w przypadku minerałów węglanowych. Kolejnym uproszczeniem było zakładanie liniowego rozkładu masy (i jej poszczególnych składników) osadów między wlotem i wylotem. Rozkład ten prawdopodobnie nie jest liniowy, ale poczynione założenie pozwalało na uśrednienie

zawartości barytu w osadach i tym samym, wyznaczenie proporcji między tym minerałem a innymi składnikami osadów. Wreszcie w konstrukcji równań bilansowych (32) i (33) użyto wag wynikających z danych eksperymentalnych, uzyskanych w warunkach laboratoryjnych (Beneš i Strejc, 1986) na osadzie, który był zbliżony swym składem do osadów badanych zbiorników. W szczególności zastosowana waga dla  $^{226}\text{Ra}$  w odniesieniu do składnika reprezentującego pozostałą część osadu (poza barytem) została wzięta z eksperymentów, prowadzonych na osadach zdominowanych przez kaolinit. Wszystkie te czynniki powodują, że uzyskanych i przedstawionych w tabelach 20 i 23 wyników nie należy przeceniać.

Do ilościowej oceny uzyskanych wyników wykorzystany został współczynnik rozdziału  $K_d$ , określający podział adsorbentu pomiędzy fazę stałą i roztwór wodny (Szperliński, 2002). W oparciu o dokonane oszacowania ilości osadów zgromadzonych w zbiornikach, z wyłączeniem barytu, można obliczyć współczynniki rozdziału radu  $^{226}\text{Ra}$ . Obliczone wartości współczynnika  $K_d$  wraz z wartościami literaturowymi zestawiono w poniższej tabeli.

Tabela 24. Współczynniki rozdziału dla radu  $^{226}\text{Ra}$  w osadach zbiorników Kaniów i Brzeszcze wraz z wartościami literaturowymi.

|                                                     | Brzeszcze     | Kaniów |
|-----------------------------------------------------|---------------|--------|
| Średnia aktywność $^{226}\text{Ra}$ w wodzie [Bq/l] | 0,084         | 6,99   |
| Obliczona aktywność osadów (bez barytu) [Bq/kg]     | 329           | 954    |
| $K_d$ [l/kg]                                        | 3912          | 137    |
| <b>Dane literaturowe <math>K_d</math> [l/kg]</b>    |               |        |
| EPA (2004)                                          |               |        |
| piasek                                              | 57 – 21000    |        |
| muł                                                 | 1262 – 530000 |        |
| glina                                               | 696 – 56000   |        |
| Benes i Strejc (1984, 85, 86)                       |               |        |
| kwarc                                               | 1473 – 2116   |        |
| kaolinit                                            | 2478 – 3485   |        |
| muskowit                                            | 80468 – 96667 |        |
| albit                                               | 24625 – 41174 |        |

Uzyskane wyniki współczynników rozdziału mieszczą się w przedziałach podawanych przez innych autorów. Osady, o których mowa są mieszaniną różnych minerałów, w związku z czym możliwe jest porównywanie uzyskanych wyników z danymi literaturowymi. Poszczególne wartości podano w sensie przedziałów z powodu wielu czynników wpływających na wartość współczynnika  $K_d$  w konkretnych warunkach. Do najważniejszych trzeba zaliczyć: wielkość cząstek na których adsorbowany jest rad (określająca stosunek masy

cząstek do objętości wody i powierzchnię właściwą cząstek), pH i Eh wody, skład chemiczny wody – zwłaszcza kationowy, decydujący o efekcie podstawiania radu przez atomy innych pierwiastków w centrach sorpcyjnych.

Mając na względzie wartości współczynnika  $K_d$  oszacowane w ramach tej pracy i ich zgodność z zakresami literaturowymi należy stwierdzić, że przeprowadzone obliczenia zawierają informację o rzędzie wielkości aktywności  $^{226}\text{Ra}$ , z jaką możemy mieć do czynienia w poszczególnych zbiornikach retencyjno-dozujących.

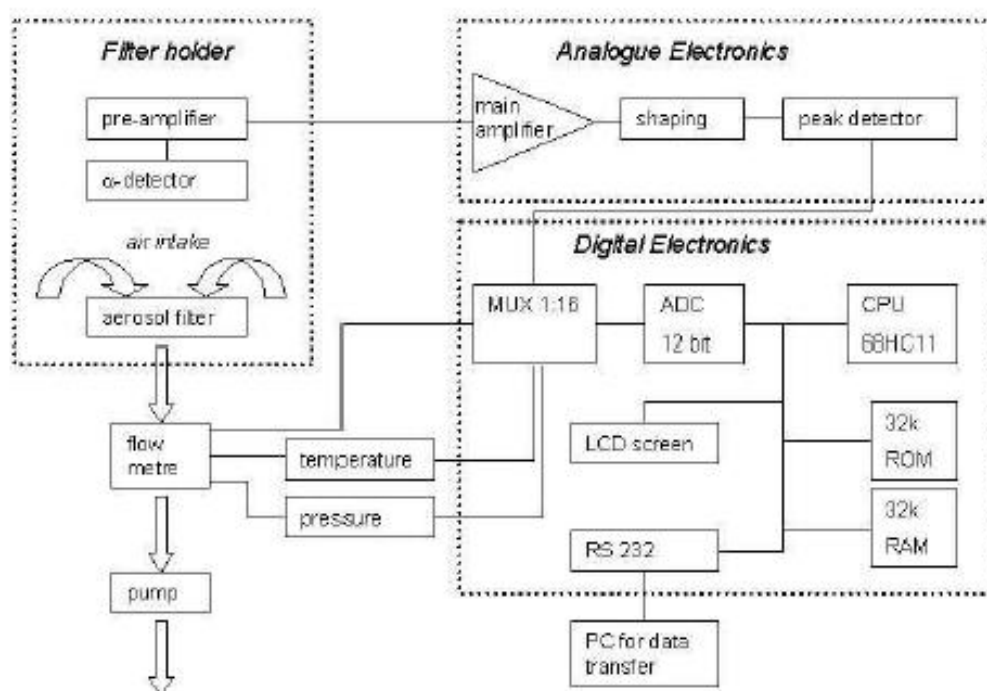
## **9. Pomiary aktywności radonu $^{222}\text{Rn}$ w powietrzu atmosferycznym: metodyka pomiarowa i wyniki.**

### **9.1. Ciągły pomiar aktywności radonu.**

Ciągły pomiar stężenia radonu w powietrzu atmosferycznym został wykonany w zachodniej części obszaru górniczego Kopalni Węgla Kamiennego „Brzeszcze”, w odległości około 600m od zbiornika retencyjno – dozującego wody słonej i zwałowiska skały płonnej. Badania tego typu przeprowadzono jedynie w sąsiedztwie zbiornika Brzeszcze, ze względu na konieczność ciągłego dostępu do źródła zasilania dla monitora i układu pomiarowego z komputerem do rejestracji danych. O wyborze tej lokalizacji poza łatwą dostępnością, przesądziła także stosunkowo gęsta zabudowa. Takie usytuowanie monitora pozwoliło na zbadanie zbiornika oraz zwałowiska jako potencjalnych źródeł radonu transportowanego następnie w kierunku ludzkich domostw.

Pomiar aktywności radonu w powietrzu atmosferycznym został wykonany za pomocą monitora UNI\_Heidelberg, zbudowanego na Uniwersytecie w Heidelbergu. Urządzenie to, pracujące w reżimie przepływowym składa się z głowicy pomiarowej, części elektronicznej umieszczonej w obudowie w postaci zamkniętej skrzynki z niewielkim ekranem, na którym w czasie pracy monitora wyświetlane są między innymi czas i ilość przepływającego powietrza. Integralną częścią tego urządzenia jest pompa powietrza oraz przepływomierz.

Głowica pomiarowa posiada filtr kwarcowy na którym osadzają się aerozole z produktami rozpadu radonu, detektor promieniowania alfa i przedwzmacniacz sygnału. Układ elektroniczny posiada część analogową i cyfrową. Część analogowa formuje przekaz z detektora promieniowania alfa, cyfrowa zaś zbiera i zapamiętuje widma promieniowania. Monitor radonowy podłączony jest do komputera, na którym zapisywane są dane pomiarowe. rys. 31 przedstawia schemat blokowy urządzenia do pomiaru ciągłego radonu w powietrzu atmosferycznym zastosowanego w niniejszej pracy.



Rys.31. Schemat blokowy urządzenia do ciągłego pomiaru radonu w powietrzu atmosferycznym UNI-Heidelberg (Manual for the Radon Monitor, 2000)

Aktywność atmosferycznego radonu  $^{222}\text{Rn}$  wyznaczana jest w oparciu o pomiar jego alfa promieniotwórczych produktów rozpadu: polonu  $^{218}\text{Po}$  o energii  $E_\alpha=6,0$  MeV, oraz polonu  $^{214}\text{Po}$  o energii  $E_\alpha=7,7$  MeV. Izotopy te są zaadsorbowane na aerozolach zbieranych ilościowo na kwarcowym filtrze Whatman® o średnicy 47 mm i średnicy porów 2,2  $\mu\text{m}$ . Pomiar aktywności wykonywany jest przy użyciu półprzewodnikowego detektora promieniowania alfa z barierą powierzchniową.

Średnia aktywność polonu  $^{214}\text{Po}$  mierzona w zadanym interwale czasowym jest proporcjonalna do szukanej aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  na ok. 50 minut przed pomiarem. Opóźnienie to wynika z obecności pomiędzy  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{214}\text{Po}$  dwóch emiterów promieniowania beta: ołowiu  $^{214}\text{Pb}$  i bizmutu  $^{214}\text{Bi}$ , o czasach połowicznego zaniku wynoszących odpowiednio 26,8 oraz 19,9 minut (Nuclear Data Search, 1999)

Technika pomiaru filtrowego pociąga za sobą utrudnienie związane z rozpadem izotopu radonu  $^{220}\text{Rn}$  na polon  $^{212}\text{Po}$  o energii  $E_\alpha=8,8$  MeV i następnie bizmut  $^{212}\text{Bi}$  o energii  $E_\alpha=6,1$  MeV. Linie energetyczne  $^{218}\text{Po}$  oraz  $^{212}\text{Bi}$  nakładają się na siebie. Możliwa jest analiza połączonych widm radonu  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  poprzez detektor z dużą rozdzielczością

energetyczną. W przypadku zastosowanego układu pomiarowego sposób obliczania aktywności  $^{222}\text{Rn}$  w oparciu o mierzony sygnał opisano w kolejnej części pracy.

### 9.1.1. Schemat obliczania aktywności właściwej atmosferycznego radonu $^{222}\text{Rn}$

Aktywność produktów rozpadu radonu  $^{222}\text{Rn}$  - izotopów polonu  $^{214}\text{Po}$  i  $^{218}\text{Po}$  osadzonych na filtrze, wyznaczana jest z zależności:

$$N_{^{222}\text{Rn}} = N - N_t - N_{^{220}\text{Rn}} \quad (34)$$

gdzie:

$N_{^{222}\text{Rn}}$  - ilość zliczeń pochodzących od produktów rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ ,

$N$  - całkowita zarejestrowana ilość zliczeń,

$N_t$  - ilość zliczeń pochodzących od tła,

$N_{^{220}\text{Rn}}$  - zliczenia pochodzące od produktów rozpadu  $^{220}\text{Rn}$ , wyznaczane na podstawie zliczeń uzyskanych od  $^{212}\text{Po}$ :

$$N_{^{220}\text{Rn}} = \frac{N_{^{212}\text{Po}}}{0,778 \cdot 0,6407} \quad (35)$$

W powyższym wyrażeniu:  $N_{^{212}\text{Po}}$  - oznacza zliczenia pochodzące od polonu  $^{212}\text{Po}$ , czynnik  $\frac{1}{0,778}$  - wynika z nakładania się pików pochodzących od izotopów polonu  $^{214}\text{Po}$  i  $^{212}\text{Po}$  (jego wartość została określona doświadczalnie dla różnych stosunków aktywności  $^{214}\text{Po}$  i  $^{212}\text{Po}$  (Manual for the Radon Monitor, 2000), czynnik  $\frac{1}{0,6407}$  - określa stosunek typów rozpadu bizmutu  $^{212}\text{Bi}$  na filtrze – 64,07% wszystkich rozpadów zachodzi przez  $^{212}\text{Po}$ . Pozwala on wyznaczyć wkład cząstek  $\alpha$  od bizmutu  $^{212}\text{Bi}$  z zależności:

$$\frac{^{212}\text{Bi} + ^{212}\text{Po}}{^{212}\text{Po}} = \frac{1}{0,6407} = 1,56 \quad (36)$$

Monitor radonowy UNI-Heidelberg wykorzystywany jest do wyznaczania aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu poprzez pomiar aktywności  $^{214}\text{Po}$ . Jak wspomniano powyżej na

filtrze osadza się również izotop polonu  $^{218}\text{Po}$ . Ze względu na działanie monitora zliczenia pochodzące od drugiego z izotopów muszą zostać odjęte od całkowitej liczby zliczeń dla radonu  $^{222}\text{Rn}$ . Separacja zliczeń polega na wykorzystaniu współczynnika równowagowego między polonem  $^{214}\text{Po}$  i  $^{218}\text{Po}$ .

Liczba zliczeń pochodząca od osadzonego na filtrze polonu  $^{214}\text{Po}$  dana jest zależnością:

$$N_{^{214}\text{Po}} = 0,942 \cdot N_{^{222}\text{Rn}} \quad (37)$$

gdzie:

$N_{^{214}\text{Po}}$  - liczba zliczeń od polonu  $^{214}\text{Po}$ ,

$N_{^{222}\text{Rn}}$  - liczba zliczeń pochodząca od produktów rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ ,

0,942 – współczynnik równowagowy

Szybkość rozpadu polonu  $^{214}\text{Po}$  znajdującego się na filtrze wyznaczana jest z równania:

$$A_{^{214}\text{Po}} = \frac{N_{^{214}\text{Po}}}{\Delta T} \quad (38)$$

gdzie:

$\Delta T$  - czas zbierania widma (30 min)

Powyższe zależności pozwalają na obliczenie aktywności atmosferycznego polonu  $^{214}\text{Po}$  z wykorzystaniem jego szybkości rozpadu na filtrze:

$$A_{^{214}\text{Po}} = \frac{p}{\varepsilon \cdot Q \cdot \Omega} \left[ \frac{1}{p} \frac{dAc}{dt} + Ac \right] \quad (39)$$

gdzie:

$A_{^{214}\text{Po}}$  - aktywność atmosferycznego polonu  $^{214}\text{Po}$   $\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ ,

p – współczynnik wyznaczony ze stałych rozpadu:

$$p = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{^{218}\text{Po}}} + \frac{1}{\lambda_{^{214}\text{Pb}}} + \frac{1}{\lambda_{^{214}\text{Bi}}}} = 2,3245 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right] \quad (40)$$

$$\frac{1}{\lambda_{218Po}} = 4,47 \text{ min},$$

$$\frac{1}{\lambda_{214Pb}} = 38,66 \text{ min},$$

$$\frac{1}{\lambda_{214Bi}} = 28,71 \text{ min}$$

$\varepsilon$ - wydajność filtra;  $\varepsilon=1$  po 5-cio godzinnym okresie próbkowania dla filtra Whatman® Quartz,

Q – objętościowe natężenie przepływu  $\left[ \frac{m^3}{\text{sec}} \right]$ ,

$\Omega$  - przestrzenny kąt widzenia detektora z barierą powierzchniową ( $\Omega = 0,265$  dla detektora Canberra;  $\Omega = 0,2325$  dla detektora Silena),

Ac – szybkość rozpadu polonu  $^{214}\text{Po}$  na filtrze dana wzorem:

$$Ac = \frac{N_{214Po}}{\Delta T} = \frac{0,942 \cdot N_{222Rn}}{\Delta T} = \frac{0,942 \cdot (N - N_t - N_{220Rn})}{\Delta T} = \frac{0,942}{\Delta T} \cdot \left[ N - N_t - \frac{N_{212Po}}{0,778 \cdot 0,6407} \right] \quad (41)$$

(oznaczenia użyte w równaniu – jak wcześniej)

Wykorzystując aktywność polonu  $^{214}\text{Po}$  będącego pochodną radonu  $^{222}\text{Rn}$  można wyznaczyć aktywność atmosferycznego radonu  $^{222}\text{Rn}$ , na podstawie współczynnika nierównowagi występującej między wymienionymi izotopami.

Średni współczynnik nierównowagi określono na podstawie równoległego pomiaru aktywności gazowego radonu  $^{222}\text{Rn}$  poprzez pomiar monitorem radonowym UNI\_Heidelberg oraz wykalibrowaną komorę jonizacyjną. Współczynnik ten wynosi  $\frac{1}{1,367}$  dla pomiaru wykonanego w Heidelbergu na wysokości 20 m nad powierzchnia ziemi. Wykorzystując aktywność produktów rozpadu radonu  $A_{222Rn(p)}$  można wyznaczyć aktywność samego radonu  $^{222}\text{Rn}$  z zależności:

$$A_{222Rn} = A_{222Rn(p)} \cdot 1,367 \quad (42)$$

gdzie:

$$A_{222Rn} - \text{aktywność gazowego radonu } ^{222}\text{Rn} \left[ \frac{\text{Bq}}{m^3} \right],$$

$A_{^{222}\text{Rn}(p)}$  - aktywność produktów rozpadu  $^{222}\text{Rn}$   $\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ ,

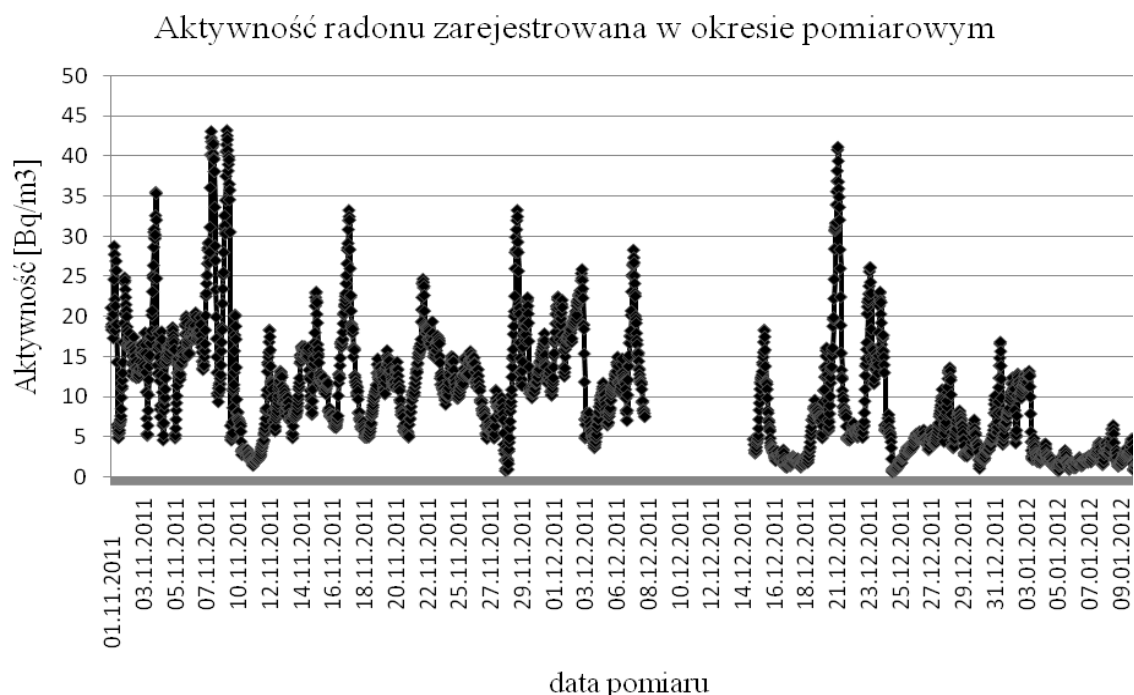
$\frac{1}{1,367}$  - współczynnik nierównowagi.

Istotnym faktem jest, że współczynnik nierównowagi wynoszący  $\frac{1}{1,367}$  został wyznaczony dla warunków dobrego mieszania. W przypadku inwersji zachodzącej w nocy (narastanie stężenia radonu) współczynnik ten może być większy od  $\frac{1}{1,5}$ .

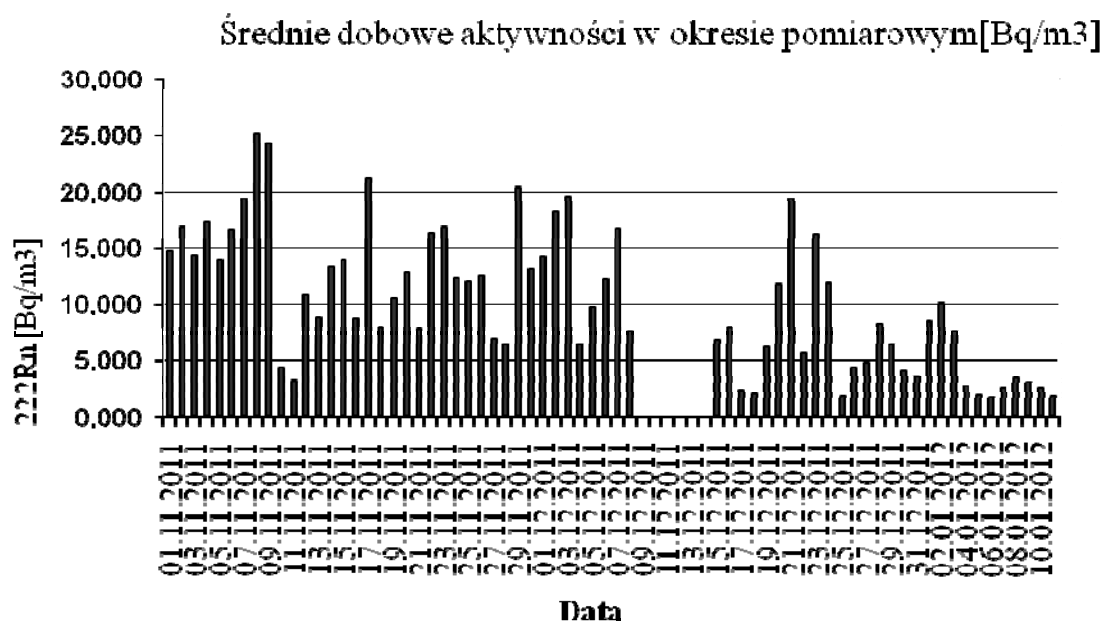
### 9.1.2. Wyniki pomiarów

Głowicę pomiarową umieszczono w specjalnie wybudowanej zadaszanej klatce pomiarowej, na wysokości 2,5m nad powierzchnią terenu. Monitor, pompę powietrza i komputer do rejestracji danych pomiarowych umieszczono w ogrzewanym pomieszczeniu. Pomiary dokonywane były w okresie od 1.11.2011r do 11.01.2012r. Przerwy w rejestracji związane były z koniecznością wymiany filtra w głowicy pomiarowej oraz przerwami w dostawie energii elektrycznej.

Na rys. 32 przedstawiono wyniki uzyskane w ciągu całego okresu pomiarowego wykonane z interwałem czasowym wynoszącym 30 minut (czas zbierania widma), zaś na rys. 33 średnie dobowe aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$ . Kompletne dane pomiarowe zestawione zostały w arkuszu na załączonej płycie CD (załącznik Z2).



Rys.32. Aktywność radonu  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowana w okresie pomiarowym.

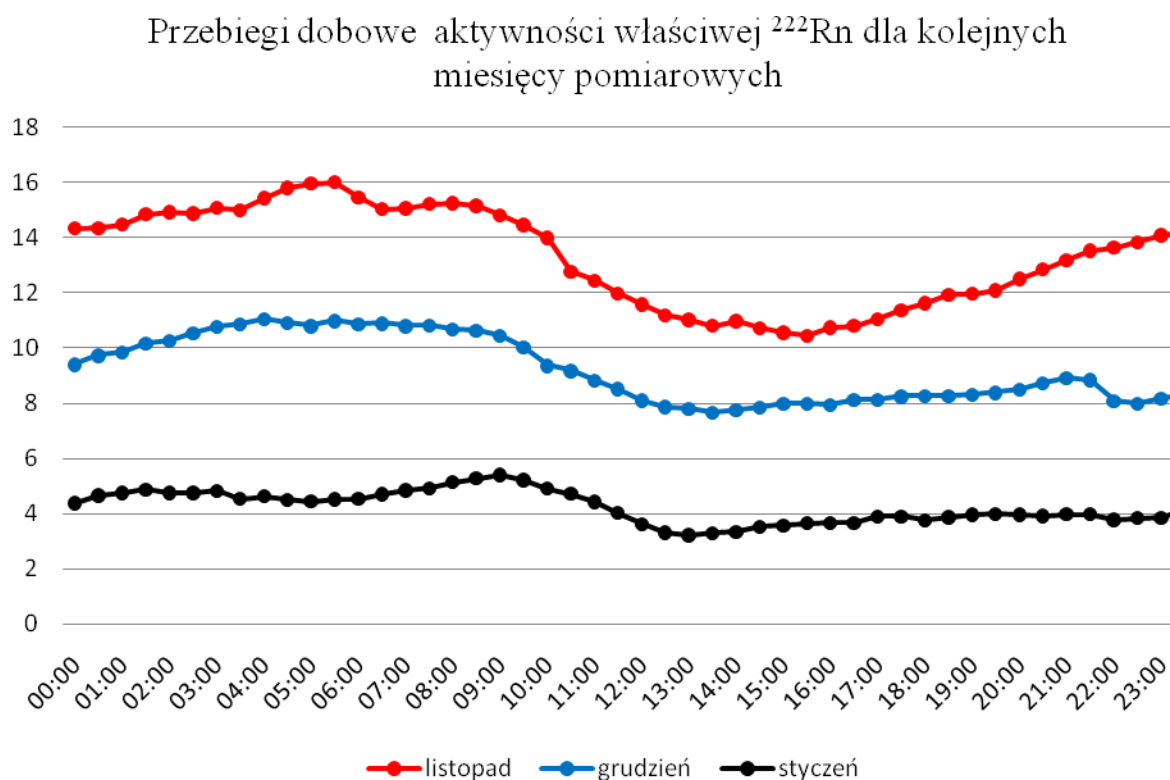


Rys.33. Średnie dobowe aktywności właściwe radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym zachodniej części obszaru górniczego KWK Brzeszcze.

W oparciu o serie pomiarowe przeprowadzono analizę zmian aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w poszczególnych godzinach w obrębie doby dla monitorowanych miesięcy. Wyniki w postaci tabeli 25 oraz wykresu rys. 34 zamieszczono poniżej.

Tabela 25. Średnie aktywności właściwe  $^{222}\text{Rn}$  w obrębie doby dla poszczególnych miesięcy okresu pomiarowego

| godzina | listopad [Bq/m <sup>3</sup> ] | grudzień [Bq/m <sup>3</sup> ] | styczeń [Bq/m <sup>3</sup> ] |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 00:00   | 14,354                        | 9,413                         | 4,393                        |
| 00:30   | 14,365                        | 9,736                         | 4,658                        |
| 01:00   | 14,488                        | 9,868                         | 4,757                        |
| 01:30   | 14,873                        | 10,196                        | 4,873                        |
| 02:00   | 14,931                        | 10,289                        | 4,750                        |
| 02:30   | 14,903                        | 10,549                        | 4,741                        |
| 03:00   | 15,096                        | 10,787                        | 4,825                        |
| 03:30   | 15,022                        | 10,880                        | 4,542                        |
| 04:00   | 15,458                        | 11,064                        | 4,632                        |
| 04:30   | 15,823                        | 10,923                        | 4,505                        |
| 05:00   | 15,990                        | 10,809                        | 4,441                        |
| 05:30   | 16,022                        | 11,008                        | 4,526                        |
| 06:00   | 15,488                        | 10,882                        | 4,544                        |
| 06:30   | 15,048                        | 10,902                        | 4,701                        |
| 07:00   | 15,072                        | 10,819                        | 4,833                        |
| 07:30   | 15,230                        | 10,848                        | 4,921                        |
| 08:00   | 15,272                        | 10,706                        | 5,133                        |
| 08:30   | 15,181                        | 10,663                        | 5,286                        |
| 09:00   | 14,837                        | 10,474                        | 5,404                        |
| 09:30   | 14,468                        | 10,043                        | 5,220                        |
| 10:00   | 14,007                        | 9,365                         | 4,915                        |
| 10:30   | 12,784                        | 9,178                         | 4,717                        |
| 11:00   | 12,453                        | 8,835                         | 4,434                        |
| 11:30   | 11,985                        | 8,521                         | 4,032                        |
| 12:00   | 11,592                        | 8,098                         | 3,628                        |
| 12:30   | 11,191                        | 7,865                         | 3,332                        |
| 13:00   | 11,041                        | 7,782                         | 3,223                        |
| 13:30   | 10,817                        | 7,660                         | 3,309                        |
| 14:00   | 10,990                        | 7,739                         | 3,341                        |
| 14:30   | 10,738                        | 7,829                         | 3,531                        |
| 15:00   | 10,580                        | 7,966                         | 3,580                        |
| 15:30   | 10,466                        | 7,977                         | 3,663                        |
| 16:00   | 10,757                        | 7,939                         | 3,665                        |
| 16:30   | 10,816                        | 8,110                         | 3,678                        |
| 17:00   | 11,052                        | 8,109                         | 3,904                        |
| 17:30   | 11,393                        | 8,246                         | 3,908                        |
| 18:00   | 11,643                        | 8,271                         | 3,771                        |
| 18:30   | 11,939                        | 8,269                         | 3,868                        |
| 19:00   | 11,979                        | 8,311                         | 3,967                        |
| 19:30   | 12,115                        | 8,385                         | 3,992                        |
| 20:00   | 12,524                        | 8,505                         | 3,974                        |
| 20:30   | 12,865                        | 8,729                         | 3,915                        |
| 21:00   | 13,206                        | 8,913                         | 3,981                        |
| 21:30   | 13,548                        | 8,849                         | 3,982                        |
| 22:00   | 13,662                        | 8,076                         | 3,773                        |
| 22:30   | 13,854                        | 7,984                         | 3,847                        |
| 23:00   | 14,113                        | 8,168                         | 3,864                        |
| 23:30   | 14,240                        | 8,306                         | 4,133                        |



Rys.34. Dobowe przebiegi zmienności aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$

Celem zobrazowania zmienności aktywności atmosferycznego radonu  $^{222}\text{Rn}$  w tabeli 26 zebrano parametry statystyczne charakteryzujące uzyskane w kolejnych miesiącach pomiarowych wyniki.

Tabela 26. Parametry statystyczne opisujące wyniki pomiarów aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym.

| miesiąc  | Średnia miesięczna aktywność $^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ] | Dobowa wartość maksymalna [Bq/m <sup>3</sup> ] | Dobowa wartość minimalna [Bq/m <sup>3</sup> ] | Mediana [Bq/m <sup>3</sup> ] |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|
| listopad | $13,5 \pm 1,0$                                                      | 25,2                                           | 3,2                                           | 13,3                         |
| grudzień | $9,1 \pm 1,2$                                                       | 19,6                                           | 1,8                                           | 7,6                          |
| styczeń  | $4,1 \pm 1,0$                                                       | 10,1                                           | 1,7                                           | 2,7                          |

Na podstawie rys. 32 oraz przytoczonych tabel można zauważyć, że w okresie pomiarowym najwyższa średnia miesięczna aktywność radonu  $^{222}\text{Rn}$  została zarejestrowana w

listopadzie i wynosiła  $13,5 \pm 1,0 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ , zaś najniższą wartość zmierzono dla miesiąca stycznia -  $4,1 \pm 1,0 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ .

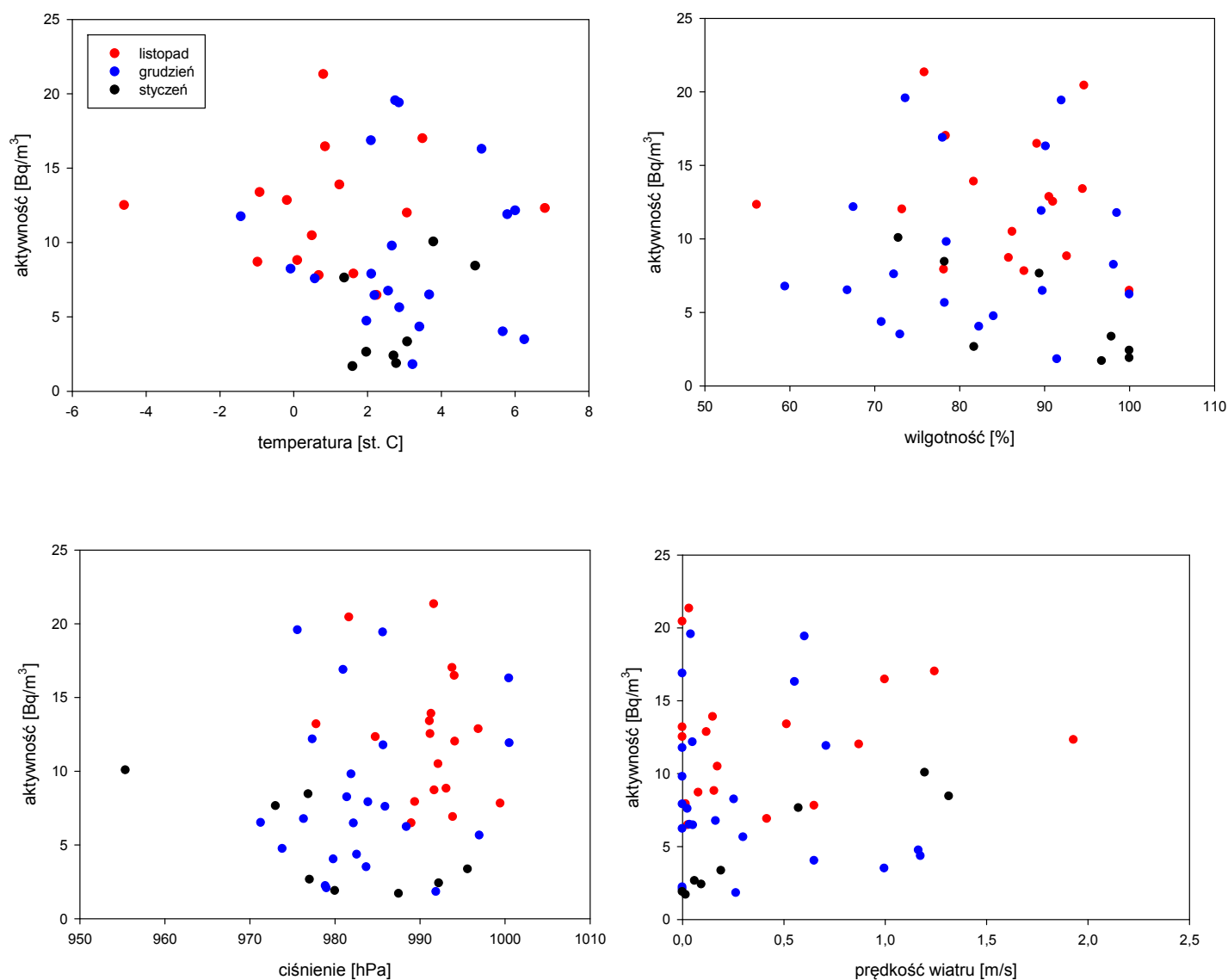
### 9.1.3. Zależność aktywności radonu $^{222}\text{Rn}$ od wybranych parametrów meteorologicznych.

Celem stwierdzenia istnienia zależności pomiędzy mierzoną aktywnością radonu  $^{222}\text{Rn}$  a czynnikami meteorologicznymi takimi jak temperatura, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne, prędkość i kierunek wiatru, dokonano oceny korelacji otrzymanych wyników aktywności właściwej radonu w powietrzu atmosferycznym z wynikami uzyskanymi ze stacji meteorologicznej. Stacja ta, wyposażona w termometr, wiatromierz, higrometr i barometr została zainstalowana nad klatką pomiarową i połączona z odbiornikiem zlokalizowanym w sąsiedztwie komputera. Poniższa fotografia prezentuje położenie monitora radonowego oraz stacji meteorologicznej.



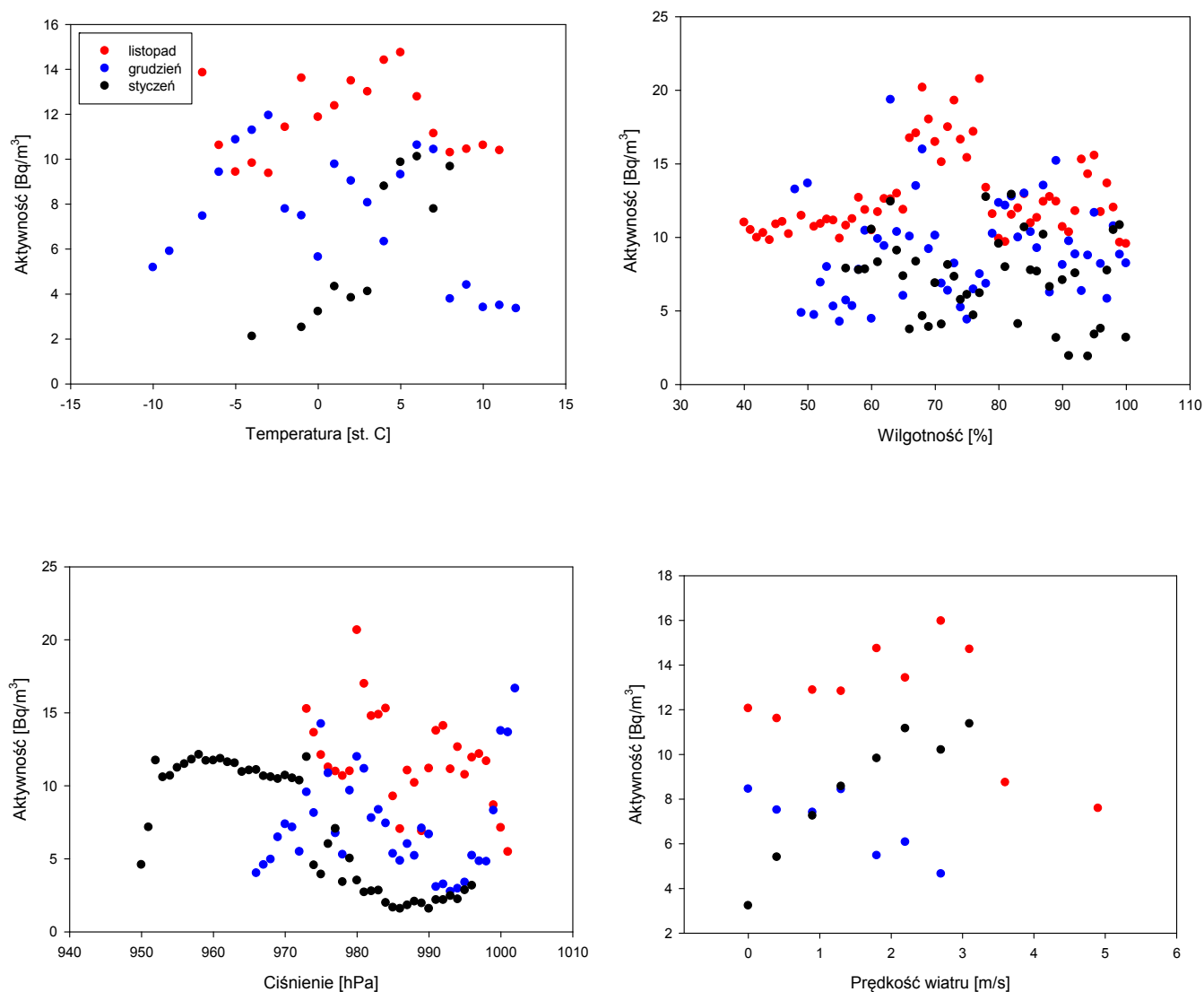
Rys.35. Lokalizacja monitora radonowego (ze zbiorów autorki)

Na rys.36 zilustrowano relacje pomiędzy stężeniem radonu a rejestrowanymi parametrami meteorologicznymi dla całego okresu pomiarowego. Dane pomiarowe z których korzystano znajdują się na dołączonej płycie CD (załączniki Z1 i Z2).



*Rys.36. Zależność aktywności radonu od wybranych parametrów meteorologicznych*

Na kolejnym rysunku zaprezentowano wyniki pomiarów w przetworzonej postaci. Dla każdego miesiąca, w którym rejestrowane były pomiary 30-to minutowe, pogrupowano ich wyniki w zależności od wartości analizowanego parametru, a następnie w każdej grupie obliczono średnie aktywności właściwe radonu  $^{222}\text{Rn}$ .



Rys.37. Zależności średnich wartości aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w od parametrów meteorologicznych.

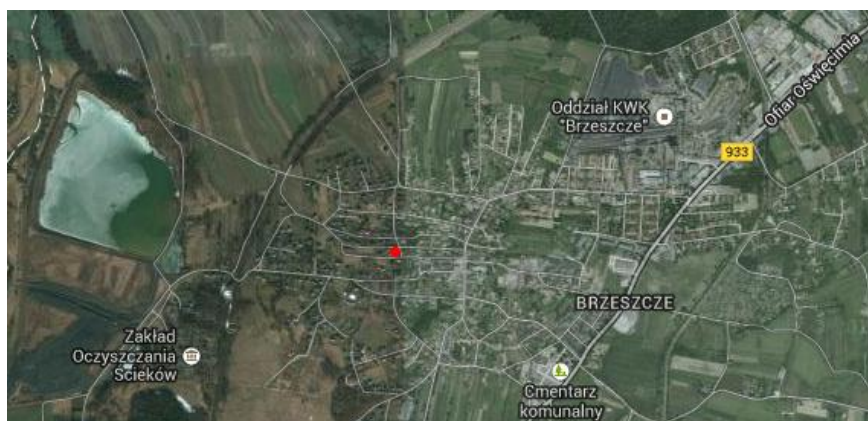
Przedstawione powyżej zależności pomiędzy zmierzoną w powietrzu aktywnością radonu  $^{222}\text{Rn}$  a parametrami meteorologicznymi są bardzo słabe i niejednoznaczne. Analizując kolejne wykresy można zauważyć, że jedynie dla pomiarów wykonanych w styczniu istnieją dające się opisać zależności. Kiedy zanotowane zostało niskie ciśnienie aktywność radonu była wyższa. Związane jest to z ułatwioną dyfuzją tego gazu z gleby. W

pewnym stopniu można mówić o zależności aktywności  $^{222}\text{Rn}$  od temperatury w miesiącu styczniu. Skok mierzonej aktywności radonu pojawia się w okolicach  $3^{\circ}\text{C}$ . Temperatura ta została zmierzona na wysokości ponad 2,5 m n.p.t. Zwykle temperatury przy gruncie są znacząco niższe. Sugeruje to, że warunki w powierzchniowej warstwie gruntu sprzyjały zamarzaniu wody (wilgoci) glebowej tworząc efektywną barierę dla uwalniania jakichkolwiek gazów z gleby. Jakkolwiek tłumaczenie to jest w pełni logiczne, to fakt zanotowania jego występowania tylko w styczniu do łatwych do wytłumaczenia już nie należy. Zarówno w listopadzie, jak i grudniu występowały bowiem temperatury ujemne, sięgające nawet  $-5$  lub  $-10$  stopni. Wobec niemożliwości racjonalnego wytłumaczenia opisanego problemu wydaje się, że zaobserwowaną zależność temperaturową dla stycznia należy uznać raczej za przypadkową.

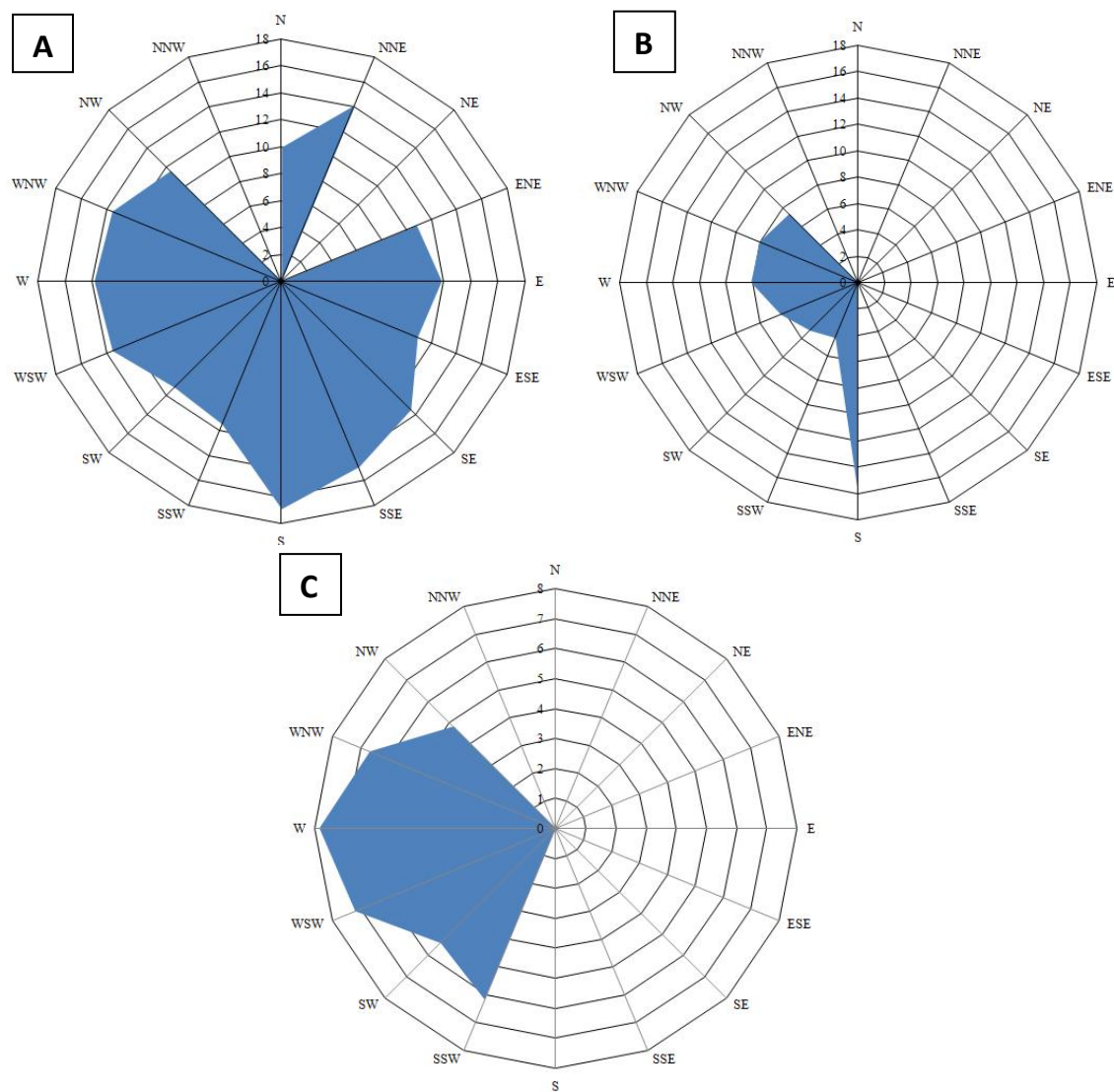
Na uwagę zasługuje także wykres zależności aktywności radonu od prędkości wiatru. W styczniu aktywność rośnie wraz ze wzrostem prędkości wiatru, zaś w grudniu sytuacja jest odwrotna. Powoduje to, że także i w tym przypadku trudno o jednoznaczność w interpretacji związku aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  z prędkością wiatru.

Wykorzystana w pomiarach automatyczna stacja meteorologiczna rejestrowała prędkości i kierunki, z których wiał wiatr. Na podstawie zarejestrowanych wartości aktywności właściwej radonu  $^{222}\text{Rn}$  sporządzono wykresy zależności aktywności od kierunku wiatru, dla półgodzinnych okresów zbierania danych pomiarowych. Każdemu kierunkowi wiatru przyporządkowano odpowiadającą mu wartość aktywności właściwej radonu  $^{222}\text{Rn}$ , a następnie obliczono średnie ze wszystkich wartości.

Na rysunku 38 zaznaczono miejsce pomiaru aktywności właściwej radonu  $^{222}\text{Rn}$  (czerwona kropka), zbiornik wraz z przylegającym do niego składowiskiem skały płonnej oraz Kopalnię Węgla Kamiennego Brzeszcze.



Rys.38. Lokalizacja miejsca pomiaru w stosunku do położenia zbiornika retencyjno – dozującego oraz KWK „Brzeszcze”.



Rys.39. Zależność aktywności właściwej radonu  $^{222}\text{Rn}$  od kierunku wiatru w A - listopadzie, B - grudniu i C – styczniu.

Zaprezentowane na rys.39 zależności aktywności właściwej atmosferycznego radonu  $^{222}\text{Rn}$  od kierunku wiatru wskazują, że w przeważającym czasie wiały wiatry z kierunków pomiędzy NW a WSW. Podwyższone aktywności właściwe radonu notowane są przy wietrze wiejącym z kierunku zachodniego. Kierunek ten obejmuje obszar, na którym zlokalizowany jest zbiornik retencyjno – dozujący wody kopalnianej oraz przyległe do niego zwałowisko skały płonnej. W kolejnych miesiącach pomiarowych notowano różne aktywności właściwe atmosferycznego radonu  $^{222}\text{Rn}$  przynieszone przez wiatr wiejący z zachodu – najwyższe zanotowano w listopadzie. Następny kierunek, z którego zanotowano silniej wiejący wiatr to kierunek południowy i południowo – wschodni (listopad i grudzień). Istnieje podejrzenie, że rejestrowane podwyższone aktywności spowodowane są nawiewaniem radonu ze starego zwałowiska skały płonnej zlokalizowanego w tamtym kierunku, oraz drugiego, nowotworzonego.

## **9.2. Terenowe pomiary aktywności radonu – metodyka i wyniki.**

Aktywność radonu  $^{222}\text{Rn}$  została zmierzona za pomocą przenośnego monitora radonowego PYLON AB – 5, wyposażonego w komorę dyfuzyjną służącą do pomiaru chwilowego stężenia radonu w powietrzu. Każdy z pomiarów trwał 30 minut, podczas których impulsy zbierane były sześć razy po 5 minut.

Przed wykonaniem właściwych pomiarów w terenie, przeprowadzone zostały dwa pomiary wstępne. Pierwszy z nich miał na celu wyznaczenie wydajności urządzenia pomiarowego, zaś drugi – określenie biegu własnego monitora. Do pomiaru wydajności urządzenia wykorzystano komorę referencyjną, szczelnie zamkniętą, zawierającą znaną aktywność izotopu radu  $^{226}\text{Ra}$ . Szczegółowe zasady pomiaru wydajności monitora radonowego PYLON AB – 5 zostały podane w instrukcji obsługi (Pylon Electronic Inc., 2002). Wydajność aparatury (iloraz zmierzonej i referencyjnej liczby zliczeń) pozwalająca na stabilną pracę miernika, powinna zawierać się w przedziale od 0,72 do 0,78. W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano wydajność na poziomie 0,75.

Pomiar biegu własnego monitora PYLON AB – 5 został wykonany w warunkach izolacji fotokatody od światła. Bieg własny wyznaczano w oparciu o jednogodzinne pomiary

prorowadzone przez kilkanaście godzin. Uzyskany wynik to  $73 \frac{imp}{h}$ , co odpowiada wartości  $6,1 \frac{imp}{5 min}$ , znormalizowanej do czasu rzeczywistego zbierania impulsów w trakcie pomiaru.

Bieg własny aparatury pochodzi od szumów elektroniki odczytu oraz prądu ciemnego fotokatody. Szumy elektroniki związane są z technologią jej wykonania, zaś na prąd ciemny mają wpływ drgania cieplne sieci krystalicznej materiału, z którego wykonano fotokatodę a także promieniowanie kosmiczne przechodzące przez osłonę fotokatody i wytwarzające dodatkowe impulsy.

Na poniższych fotografiach (rys.40) został przedstawiony sposób pomiaru radonu za pomocą monitora radonowego PYLON AB – 5:



Rys.40. Terenowy pomiar radonu (fot. ze zbiorów autorki)

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów można obliczyć aktywność radonu  $^{222}\text{Rn}$  na podstawie zależności:

$$C_{Rn} \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] = \frac{LZN}{t \cdot 3 \cdot E \cdot V} \quad (43)$$

gdzie:  $C_{Rn}$  – aktywność radonu  $^{222}Rn$ ,

LZN – liczba zliczeń netto, po odjęciu tła (bieg własny),

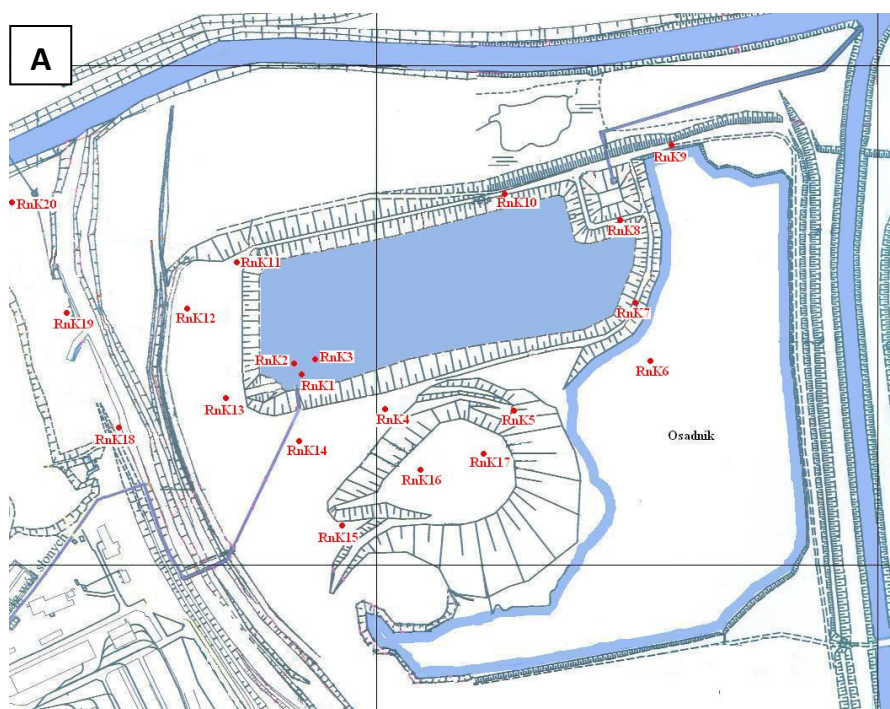
t – czas pomiaru,  $t=300s$ ,

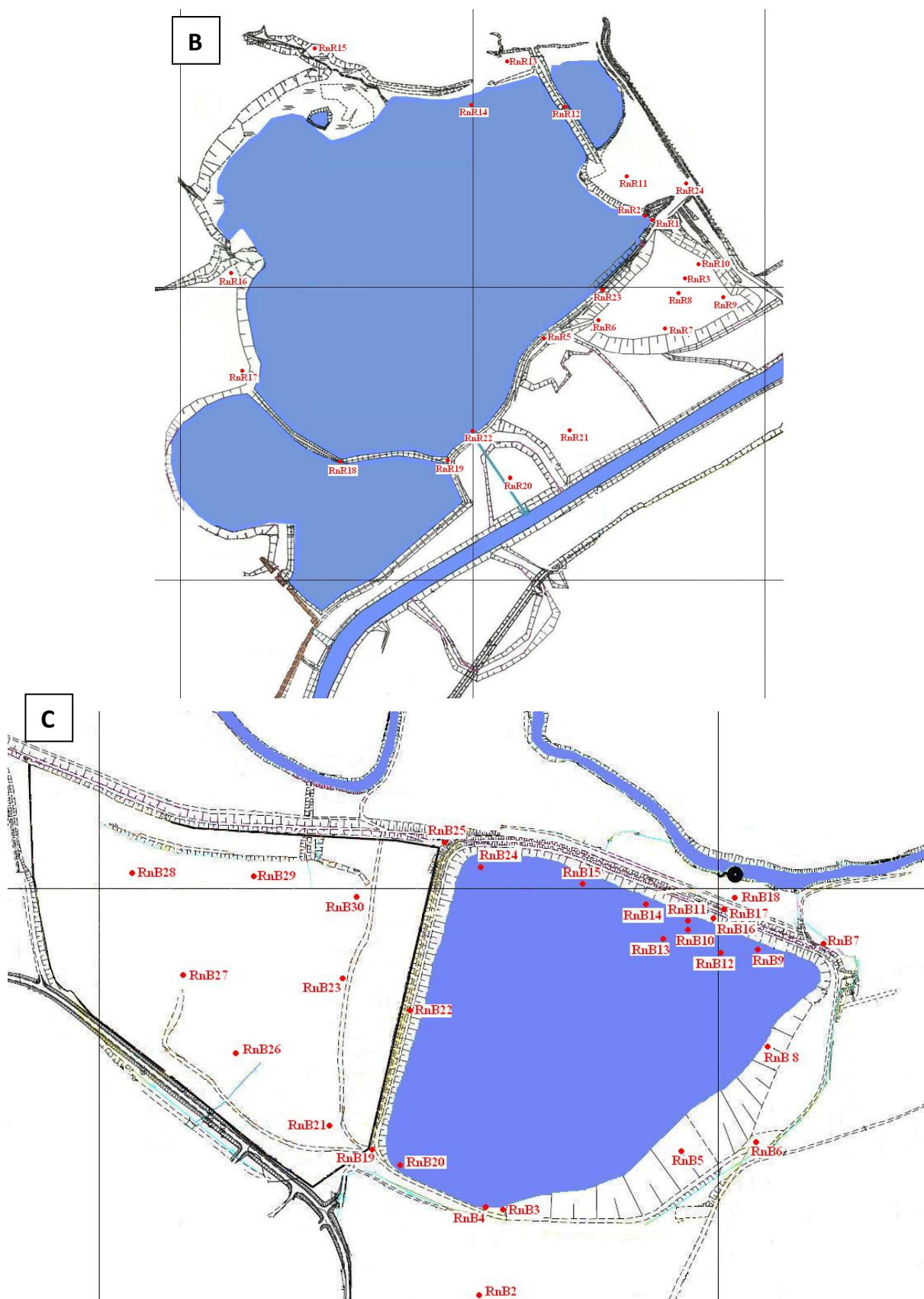
3 – liczba emiterów alfa pomiędzy radonem  $^{222}Rn$  a ołowiem  $^{210}Pb$ ,

E – wydajność,  $E=0,75$ ,

V – objętość komory dyfuzyjnej,  $V=0,00027\text{ m}^3$ .

Aktywność radonu  $^{222}Rn$  została zmierzona w najbliższym otoczeniu zbiorników retencyjno – dozujących wody słonej Kaniów, Rontok Duży i Brzeszcze, to jest na ich obwałowaniach, przyległych łąkach oraz zwałowiskach skały płonnej. Tam gdzie było to możliwe, wykonano pomiary na odkrytych osadach. Punkty pomiarowe przedstawione zostały na poniższych mapach.





Rys.41. Punkty pomiaru aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$ , zbiorniki A – Kaniów, B – Rontok Duży i C – Brzeszcze.

W kolejnych tabelach przedstawiono wyniki pomiarów aktywności radonu (wraz z niepewnościami pomiarowymi) oraz warunkami meteorologicznymi panującymi w trakcie pomiaru.

Tabela 27. Zestawienie wyników pomiarów stężeń  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym w okolicach zbiornika retencyjno – dozującego wody słonej Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia” Kaniów w dniach 5 i 6.05.2012.

| Punkt | Opis punktu                                                     | godzina | temperatura | wiatr | zachmurzenie | $^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------------------------------|---------|-------------|-------|--------------|----------------------------------------|
| RnK1  | odkryte osady, 2m od wlotu wody do zbiornika                    | 7:45    | 18          | lekki | bezchmurnie  | $79,0 \pm 8,7$                         |
| RnK2  | odkryte osady                                                   | 8:25    | 18          | lekki | bezchmurnie  | $103 \pm 10$                           |
| RnK3  | odkryte osady                                                   | 9:08    | 25          | lekki | bezchmurnie  | $74,4 \pm 7,7$                         |
| RnK4  | pomiędzy zbiornikiem a stożkiem                                 | 9:50    | 25          | lekki | bezchmurnie  | $36,8 \pm 6,4$                         |
| RnK5  | ½ wysokości stożka                                              | 10:25   | 25          | lekki | bezchmurnie  | $22,5 \pm 4,7$                         |
| RnK6  | zbiornik mułów popłuczkowych                                    | 11:07   | 30          | lekki | bezchmurnie  | $16,8 \pm 4,8$                         |
| RnK7  | obwałowanie między zbiornikiem a osadnikiem mułów popłuczkowych | 11:40   | 40          | lekki | bezchmurnie  | $24,2 \pm 5,7$                         |
| RnK8  | obwałowanie między zbiornikiem a komorą mieszania               | 12:25   | 35          | lekki | bezchmurnie  | $15,0 \pm 3,9$                         |
| RnK9  | zejście nad Wisłę                                               | 13:10   | 30          | lekki | bezchmurnie  | poniżej tła                            |
| RnK10 | obwałowanie od strony rzeki Wisła                               | 13:55   | 32          | lekki | bezchmurnie  | $17,1 \pm 6,4$                         |
| RnK11 | zwałowisko koło zbiornika                                       | 7:50    | 21          | silny | lekkie       | $30,2 \pm 7,5$                         |
| RnK12 | zwałowisko koło zbiornika                                       | 8:30    | 21          | silny | lekkie       | $41,2 \pm 8,4$                         |
| RnK13 | zwałowisko koło zbiornika                                       | 9:10    | 21          | silny | mocne        | $27,8 \pm 5,7$                         |
| RnK14 | zwałowisko koło zbiornika                                       | 9:53    | 24          | silny | mocne        | $24,7 \pm 2,8$                         |
| RnK15 | podnóże stożka                                                  | 10:35   | 26          | silny | mocne        | $23,2 \pm 1,8$                         |
| RnK16 | stożek                                                          | 11:15   | 25          | silny | mocne        | $19,6 \pm 3,1$                         |
| RnK17 | stożek                                                          | 12:00   | 27          | silny | mocne        | $24,1 \pm 6,9$                         |
| RnK18 | stare koryto rzeki Biała                                        | 12:50   | 25          | silny | mocne        | $34,6 \pm 9,8$                         |
| RnK19 | stare koryto rzeki Biała                                        | 13:30   | 28          | silny | mocne        | $22,3 \pm 2,6$                         |
| RnK20 | stare koryto rzeki Biała – w pobliżu Wisły                      | 14:10   | 28          | silny | mocne        | $10,4 \pm 2,2$                         |

Tabela 28. Zestawienie wyników pomiarów stężeń  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym w okolicach byłego zbiornika retencyjno – dozującego wody słonej Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia” Rontok Duży w dniach 28.12.2011 oraz 18, 19 i 20.03.2012.

| Punkt | Opis punktu                                                           | godzina | temperatura | wiatr               | zachmurzenie           | $^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|---------|-------------|---------------------|------------------------|----------------------------------------|
| RnR1  | na lewo od wlotu do zbiornika                                         | 10:35   | 3,4         | lekki               | zupełne                | 61 ± 16                                |
| RnR2  | nad wodą, na wprost rury wylotowej                                    | 11:10   | 3,5         | lekki               | zupełne                | 550 ± 102                              |
| RnR3  | środek zwałowiska, lasek, odsłonięta skała                            | 11:55   | 3,8         | lekki               | zupełne                | 116 ± 42                               |
| RnR5  | zwałowisko                                                            | 8:45    | 10          | lekki               | pełne słońce           | 55 ± 12                                |
| RnR6  | zwałowisko                                                            | 9:30    | 12          | lekki               | pełne słońce           | 41,5 ± 7,0                             |
| RnR7  | zwałowisko                                                            | 10:15   | 15          | lekki               | pełne słońce           | 23,2 ± 9,5                             |
| RnR8  | zwałowisko                                                            | 10:55   | 18          | lekki               | pełne słońce           | 31 ± 11                                |
| RnR9  | zwałowisko                                                            | 11:45   | 20          | lekki               | pełne słońce           | 17 ± 10                                |
| RnR10 | zwałowisko                                                            | 9:20    | 8           | lekki               | zupełne, lekki deszcz  | 52,5 ± 8,5                             |
| RnR11 | pole kukurydzy na wschód od zbiornika                                 | 10:05   | 7           | mocny, od zbiornika | zupełne                | 113 ± 25                               |
| RnR12 | grobła północny - wschód                                              | 10:50   | 7           | silny               | zupełne                | 172 ± 15                               |
| RnR13 | las na północy                                                        | 11:40   | 9           | silny, pn - zach    | zupełne                | 153 ± 25                               |
| RnR14 | pomiar z pomostu nad lustrem wody, 5m od brzegu, 1m nad wodą          | 12:25   | 9           | silny, pn - zach    | zupełne                | 115 ± 10                               |
| RnR15 | skraj lasu na północy                                                 | 13:20   | 10          | silny, pn - zach    | przejaśnienia          | 117 ± 15                               |
| RnR16 | las, północny - zachód                                                | 14:15   | 14          | silny, pn - zach    | przejaśnienia          | 91 ± 13                                |
| RnR17 | koniec grobli, od strony lasu                                         | 15:10   | 12          | silny, pn - zach    | przejaśnienia          | 87 ± 7,9                               |
| RnR18 | środek grobli między zbiornikiem a zb. buforowym                      | 9:10    | 14          | słaby               | bezhmurnie, słonecznie | 15,0 ± 3,0                             |
| RnR19 | początek grobli - zachód                                              | 9:55    | 13          | słaby, pn - zach    | słonecznie             | 19,6 ± 4,2                             |
| RnR20 | łąka, obok kanału zrzutowego                                          | 10:45   | 20          | lekki               | słonecznie             | poniżej tła                            |
| RnR21 | łąka południowy - wschód                                              | 11:23   | 12/20       | lekki               | słonecznie             | 19,6 ± 5,4                             |
| RnR22 | wysokość nad lustrem wody – 6m, nad koroną obwałowania                | 12:10   | 14          | lekki               | słonecznie             | 15,0 ± 4,8                             |
| RnR23 | przy rowie odprowadzającym wodę ze zbiornika do Wisły, poniżej korony | 12:55   | 18          | lekki               | słonecznie             | poniżej tła                            |
| RnR24 | skraj pola kukurydzy na wschód od zbiornika                           | 13:45   | 18          | lekki               | słonecznie             | 29,6 ± 6,0                             |

Tabela 29. Zestawienie wyników pomiarów stężeń  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym w okolicach zbiornika retencyjno – dozującego wody słonej Kopalni Węgla Kamiennego „Brzeszcze” Brzeszcze w dniach 14, 18, 19 i 21.11.2011 oraz 7.12.2011.

| Punkt | Opis punktu                                                                       | godzina | temperatura | wiatr               | zachmurzenie              | $^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| RnB1  | przepust pod torami                                                               | 10:00   | 6           | pd - zach           | zamglenie                 | 54 ± 13                                |
| RnB2  | łąka z kanałem<br>zrzutowym                                                       | 10:42   | 7           | pd - zach           | zamglenie                 | 113 ± 13                               |
| RnB3  | okolice wlotu wody do<br>zbiornika                                                | 11:30   | 8           | pd - zach           | słońce przebija<br>się    | 156 ± 16                               |
| RnB4  | okolice wlotu wody do<br>zbiornika                                                | 12:07   | 14          | pd - zach           | słońce; lekka<br>mgła     | 78 ± 10                                |
| RnB5  | obwałowanie                                                                       | 12:45   | 11          | pd - zach           | słońce delikatne;<br>mgła | 68 ± 12                                |
| RnB6  | plac 100m od zbiornika                                                            | 13:25   | 8           | pd - zach           | całkowite<br>zachmurzenie | 65 ± 12                                |
| RnB7  | zejście nad Wisłę                                                                 | 10:10   | 4           | zach, słaby         | zupełne                   | 42,4 ± 8,9                             |
| RnB8  | obwałowanie                                                                       | 10:49   | 3           | zach, słaby         | zupełne                   | 90,9 ± 8,8                             |
| RnB9  | obwałowanie od strony<br>wylotu                                                   | 11:30   | 5           | zach, słaby         | zupełne                   | 200 ± 22                               |
| RnB10 | odkryte osady w<br>okolicach wylotu wody                                          | 12:15   | 7           | zach, słaby         | zupełne                   | 267 ± 19                               |
| RnB11 | odkryte osady w<br>okolicach wylotu wody                                          | 12:50   | 7           | zach, słaby         | zupełne                   | 575 ± 56                               |
| RnB12 | odkryte osady w<br>okolicach wylotu wody                                          | 13:27   | 3           | zach, słaby         | zupełne                   | 743 ± 113                              |
| RnB13 | odkryte osady w<br>okolicach wylotu wody                                          | 9:55    | 3           | pd., słaby          | zupełne                   | 123 ± 33                               |
| RnB14 | odkryte osady w<br>okolicach wylotu wody                                          | 10:35   | 3           | pd., słaby          | zupełne                   | 257 ± 49                               |
| RnB15 | odkryte osady w<br>okolicach wylotu wody                                          | 11:10   | 3           | pd., słaby          | zupełne                   | 204 ± 38                               |
| RnB16 | obwałowanie od strony<br>zbiornika                                                | 12:15   | 3           | pd., słaby          | zupełne                   | 289 ± 54                               |
| RnB17 | obwałowanie po<br>zewnętrznej stronie                                             | 12:50   | 3           | pd., słaby          | zupełne                   | 210 ± 41                               |
| RnB18 | szczyt skarpy                                                                     | 13:40   | 3           | pd., słaby          | zupełne                   | 173 ± 36                               |
| RnB19 | okolice drogi dojazdowej<br>do zbiornika, między<br>zwałowiskiem a<br>zbiornikiem | 10:55   | 7           | pn – zach,<br>lekki | słońce zza chmur          | 36,0 ± 9,6                             |
| RnB20 | odkryte osady koło<br>dojazdu                                                     | 11:30   | 6           | pn – zach,<br>lekki | słońce zza chmur          | 70 ± 26                                |
| RnB21 | porośnięta trawą część<br>zwałowiska                                              | 12:45   | 10          | pn – zach,<br>lekki | słońce zza chmur          | 71,7 ± 3,6                             |
| RnB22 | obwałowanie – między<br>zbiornikiem a<br>zwałowiskiem                             | 13:05   | 7           | pn – zach,<br>lekki | słońce zza chmur          | 72 ± 19                                |
| RnB23 | porośnięta trawą część<br>zwałowiska (środek)                                     | 13:40   | 8           | pn – zach,<br>lekki | słońce zza chmur          | 71,7 ± 6,7                             |
| RnB24 | odkryte osady                                                                     | 14:20   | 6           | pn – zach,<br>lekki | słońce zza chmur          | 241 ± 25                               |

| Punkt | Opis punktu                             | godzina | temperatura | wiatr     | zachmurzenie  | $^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------|---------|-------------|-----------|---------------|----------------------------------------|
| RnB25 | róg – między zbiornikiem a zwałowiskiem | 10:05   | 5           | pd, mocny | zupełne       | $69 \pm 16$                            |
| RnB26 | zwałowisko                              | 12:30   | 5           | pd, mocny | zupełne       | $89 \pm 20$                            |
| RnB27 | zwałowisko                              | 13:05   | 5           | pd, mocny | zupełne       | $210 \pm 20$                           |
| RnB28 | zwałowisko                              | 14:40   | 5           | pd, mocny | zupełne       | $415 \pm 17$                           |
| RnB29 | zwałowisko                              | 15:15   | 5           | pd, mocny | zupełne       | $448 \pm 46$                           |
| RnB30 | zwałowisko                              | 15:50   | 5           | pd, mocny | zupełne, mgła | $773 \pm 70$                           |

Celem zwiększenia przejrzystości uzyskanych wyników pomiarów sporządzono tabelę 30, w której zestawiono rezultaty pomiarów w zależności od miejsca ich wykonania w otoczeniu poszczególnych zbiorników wraz z wartościami średnimi dla tych obszarów.

Tabela 30. Zestawienie wyników pomiarów aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w zależności od miejsca.

| Lokalizacja                 | Zmierzone zakresy aktywności radonu $^{222}\text{Rn}$ w powietrzu atmosferycznym (średnia na danym obszarze) [Bq/m <sup>3</sup> ] |                 |                  |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
|                             | Kaniów                                                                                                                            | Rontok Duży     | Brzeszcze        |
| obwałowanie                 | 15 – 24,1 (18,7)                                                                                                                  | 15 – 172 (83,5) | 68 – 289 (146,6) |
| okolice wlotu               | 74,4 – 103 (85,4)                                                                                                                 | 550             | 78 – 156 (117)   |
| okolice wylotu (osady)      | ND                                                                                                                                | ND              | 123 – 743 (362)  |
| zwałowisko                  | 10,4 – 41,2 (26,5)                                                                                                                | 17 – 116 (48)   | 89 – 773 (387)   |
| zwałowisko porośnięte trawą | ND                                                                                                                                | ND              | 71,7             |

ND – brak danych

#### **Omówienie wyników pomiarów:**

1. Rozkład aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w przypadku zbiorników Kaniów i Rontok Duży jest podobny. Maksymalne wartości aktywności zanotowano w okolicy wlotu (byłego wlotu) wody do zbiornika. Na odkrytych osadach zbiornika Kaniów aktywność wynosiła około  $100 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ , zaś w przypadku zbiornika Rontok Duży było to 550  $\left[ \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$  na nieczynnej rurze wlotowej.
2. Analizując rozkład aktywności promieniotwórczej radonu w najbliższej okolicy zbiornika Brzeszcze można zauważyć, że maksymalna wartość została zmierzona na

odkrytych osadach w okolicy wylotu wody ze zbiornika i wyniosła ona  $743 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ ,

przy czym zakres zmienności to  $123 - 743 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ .

3. Pomiary aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  na zwałowiskach skały płonnej wykazały, że wartości zanotowane koło zbiorników Kaniów i Rontok Duży są zbliżone i wynoszą odpowiednio  $10,4 - 41,2$  oraz  $17 - 116 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ .

4. Zwałowisko przyległe do zbiornika Brzeszcze składa się z dwóch części: kamiennej i porośniętej trawą. Na części kamiennej zmierzone wartości aktywności sięgają blisko  $800 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ , natomiast w przypadku części porośniętej trawą wskazania spadają około 10 krotnie do poziomu  $70 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ .

5. Pomiary stężenia radonu  $^{222}\text{Rn}$  uzupełniono pomiarami wykonanymi na terenie niezanieczyszczonym. Średnie stężenie radonu  $^{222}\text{Rn}$  wyniosło  $25,2 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ .

Zestawiając tą wartość z wynikami uzyskanymi w najbliższym otoczeniu zbiorników, można stwierdzić istnienie ich wpływu na aktywność mierzonego izotopu.

### 9.3. Oszacowanie dawek pochodzących od radonu $^{222}\text{Rn}$ w powietrzu atmosferycznym

Podwyższona koncentracja radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym w najbliższym otoczeniu zbiorników kopalnianych przyczynia się do wzrostu dawki promieniowania gamma, którą otrzymują na tych terenach ludzie. Wielkość tej dawki, zgodnie z raportem UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) obliczana jest z zależności:

$$D[Sv] = C_{Rn} \left[ \frac{Bq}{m^3} \right] \cdot F \cdot 9 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{Sv \cdot m^3}{Bq \cdot h} \right] \cdot T[h] \quad (44)$$

gdzie:

$C_{Rn}$  – stężenie radonu w powietrzu  $\left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$

F – współczynnik równowagi wynikający z efektywności usuwania produktów rozpadu radonu (o wartościach z przedziału 0 – 1), na zewnątrz pomieszczeń  $F = 0,8$ ,

$9 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{Sv \cdot m^3}{Bq \cdot h} \right]$  – współczynnik konwersji Bq na Sv oznaczający, że ekspozycja na radon w powietrzu przy koncentracji  $1 \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ , w czasie jednej godziny przyczynia się do otrzymania efektywnej dawki promieniowania gamma na poziomi 9 nSv

T – czas ekspozycji.

Wykorzystując wyniki pomiarów koncentracji radonu w powietrzu można oszacować równoważnik mocy dawki, jaką otrzymają okoliczni mieszkańcy (na podstawie ciągłego pomiaru stężenia radonu  $^{222}\text{Rn}$ ). Na podstawie dostępnych pomiarów w najbliższym otoczeniu zbiornika można też obliczyć czas bezpiecznego przebywania w poszczególnych miejscach (tj. na zwałowisku skały płonnej czy też na obwałowaniach zbiornika).

W przypadku pomiarów ciągłych stężenia radonu, czas ekspozycji wynosi  $365 \cdot 24 \cdot 0,2$ , gdzie 0,2 to współczynnik odpowiadający czasowi przebywania w otwartym terenie. W tabeli 31 zebrano wyniki obliczeń dla wybranych, znaczących wyników aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu.

Tabela 31. Zestawienie wyników obliczeń równoważników mocy dawki pochodzących od radonu  $^{222}\text{Rn}$ .

|                                                                        | Aktywność radonu $^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ] | D [mSv/rok] |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|
| listopad – średnia                                                     | 13,5                                                    | 0,17        |
| grudzień – średnia                                                     | 9,1                                                     | 0,11        |
| styczeń – średnia                                                      | 4,1                                                     | 0,05        |
| maksymalne zanotowane stężenie                                         | 43,23                                                   | 0,55        |
| średnie stężenie z kierunków NW - WSW (zbiornik, zwałowisko Brzeszcze) | 13,2                                                    | 0,17        |

W oparciu o wyniki pomiarów wykonanych przy pomocy przenośnego monitora radonowego PYLON AB-5 oszacowano czasy bezpiecznego przebywania osób na przebadanym terenie. Przez czas bezpiecznego przebywania rozumiano tutaj taki czas, podczas którego maksymalna otrzymana dawka wyniesie  $1 \frac{mSv}{rok}$  (RM, 18.01.2005). Uzyskane wyniki przedstawione zostały w tabeli 32.

Tabela 32. Szacowany czas bezpiecznego przebywania (w godz/dobę) dla ogółu ludności w najbliższym otoczeniu zbiorników kopalnianych Kaniów, Brzeszcze i Rontok Duży

| Lokalizacja                 | Średnia aktywność radonu $^{222}\text{Rn}$ w powietrzu atmosferycznym [ $\text{Bq/m}^3$ ] |             |           | Czas bezpiecznego przebywania [h/d] |             |           |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------|-------------|-----------|
|                             | Kaniów                                                                                    | Rontok Duży | Brzeszcze | Kaniów                              | Rontok Duży | Brzeszcze |
| obwałowanie                 | 18,7                                                                                      | 83,5        | 146,6     | 20                                  | 4,6         | 2,6       |
| okolice wlotu               | 85,4                                                                                      | 550         | 117       | 4,5                                 | 0,7         | 3,3       |
| okolice wylotu (osady)      | ND                                                                                        | ND          | 356       | -                                   | -           | 1,1       |
| zwałowisko                  | 26,5                                                                                      | 48          | 387       | 14,5                                | 8           | 1,0       |
| zwałowisko porośnięte trawą | ND                                                                                        | ND          | 71,7      | -                                   | -           | 5,3       |

ND – brak danych

### Omówienie wyników pomiarów

1. Obliczone skuteczne dawki efektywne pochodzące od radonu  $^{222}\text{Rn}$  zawartego w powietrzu atmosferycznym nie przekraczają dopuszczalnej wartości  $1 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$  dla ogółu ludności (tab. 31). Najwyższa dawka 0,55 mSv, obliczona dla maksymalnej zaobserwowanej koncentracji radonu, stanowi jednak znaczący wkład do dawki dla ogółu ludności.
2. Pod względem długości bezpiecznego czasu przebywania osób najgorzej wypada zbiornik Brzeszcze. Już godzina dziennie na zwałowisku skały płonnej, czy też w okolicach wylotu ze zbiornika wystarczy, aby otrzymać maksymalną dozwoloną dawkę. Jeszcze krócej można przebywać w okolicach byłego wlotu do zbiornika Rontok Duży.
3. Zbiornik Kaniów (poza okolicami wlotu) wydaje się być bezpieczny z punktu widzenia dawek otrzymywanych od radonu  $^{222}\text{Rn}$ .

## 10. Pomiary przestrzennego równoważnika mocy dawki promieniowania gamma

Moc dawki ekspozycyjnej promieniowania gamma została zmierzona przy użyciu radiometru Ludlum Model 19 Micro R Meter. Ze względu na dużą czułość przyrząd ten może być wykorzystywany do pomiarów środowiskowych.



Rys.42. Radiometr Ludlum Model 19 ([www.ludlums.com](http://www.ludlums.com))

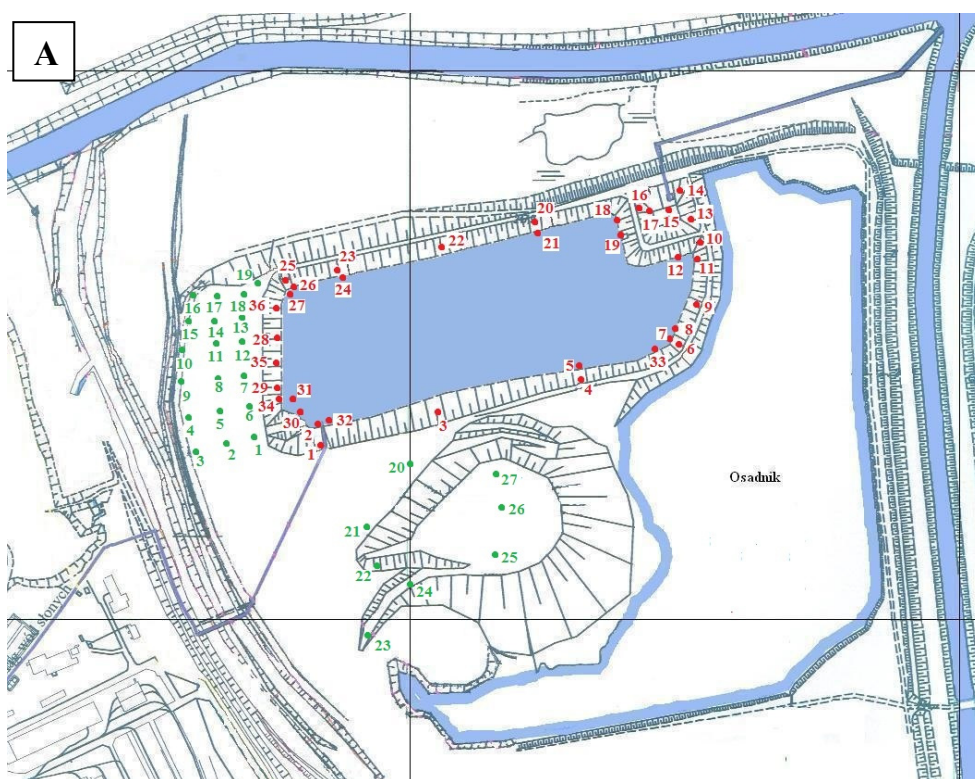
Do pomiaru mocy dawki promieniowania gamma w radiometrze tego typu wykorzystywany jest detektor scyntylacyjny z kryształem NaI(Tl) – kryształ jodku sodu aktywowanego talem. Przed pomiarami radiometr został wykalibrowany w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

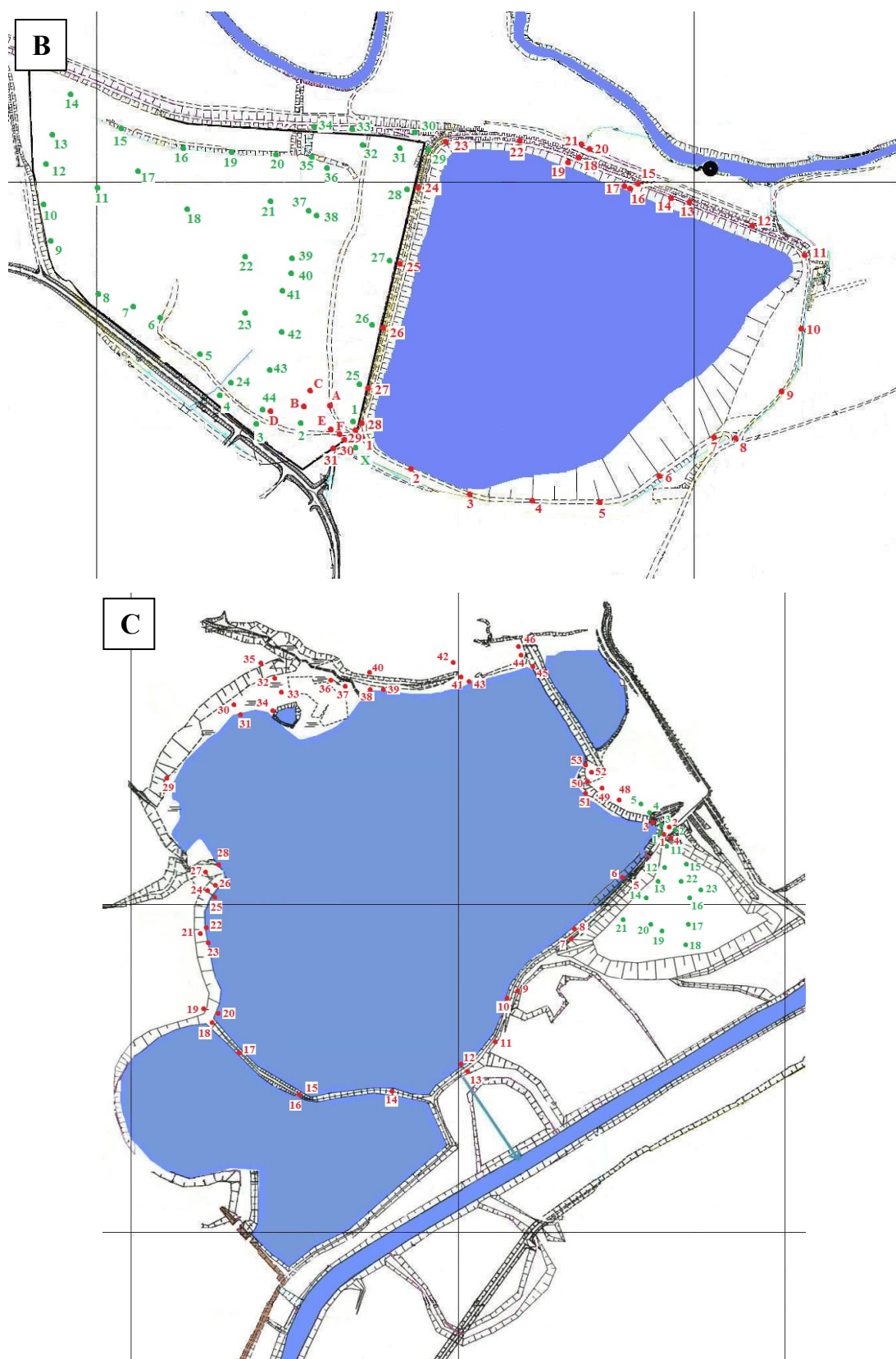
Większość badań zostało wykonanych 1m nad powierzchnią ziemi. Jedyne odstępstwa od tej reguły zastosowano w przypadku odkrytych osadów oraz znajdujących się w strefie

przybrzeżnej. Szczegółowo procedura pomiarowa opisana jest w instrukcji obsługi przyrządu pomiarowego (Ludlum Measurements Inc, 2005)

Punkty w których wykonywano pomiary zostały wybrane w bezpośrednim sąsiedztwie zbiorników retencyjno – dozujących wody kopalnianej Brzeszcze, Kaniów i Rontok Duży: na koronie zbiorników, w wybranych miejscach skarpy i nad lustrem wody, na łąkach i polach w pobliżu zbiorników oraz na przyległych do nich zwałowiskach skały płonnej. Istotnym faktem jest, że lokalizacja punktów pomiarowych podyktowana została ich dostępnością dla ludzi.

Uzyskane wyniki pomiarów zostały zestawione w tabelach 33 – 37. W każdym przypadku obliczono średnie wartości mocy dawki ekspozycyjnej podawanej w  $\frac{\mu R}{h}$  oraz średni przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma wyrażony w  $\frac{\mu Sv}{h}$  wraz z niepewnościami pomiarowymi. Dane wykorzystane do obliczeń zestawione są w arkuszach kalkulacyjnych na płycie CD (załączniki Z3 – Z7). Punkty, w których wykonano pomiary mocy dawki promieniowania gamma zaznaczono na zamieszczonych poniżej mapach





Rys.43. Punkty pomiaru mocy dawki promieniowania gamma A – zbiornik Kaniów, B – zbiornik Brzeszcze, C – zbiornik Rontok Duży. Czerwone symbole oznaczają punkty wokół zbiorników, zielone zaś na zwałowiskach skały płonnej.

1. Wyniki pomiarów mocy dawki promieniowania gamma w rejonie zbiornika Brzeszcze.

Tabela 33. Moc dawki ekspozycyjnej<sup>1</sup> (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu\text{R}/\text{h}$ ] w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych w okolicy zbiornika retencyjno – dozującego Brzeszcze oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma (27.12.2009) – A oraz przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma w punktach pomiarowych zlokalizowanych na zwałowisku skały płonnej przyległym do zbiornika retencyjno – dozującego Brzeszcze (28.06.2012) – B.

A.

| Nr punktu pomiarowego                        | $X_{\text{sr}} \pm u(X_{\text{sr}})$<br>[ $\frac{\mu\text{R}}{\text{h}}$ ] | $H^*[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}]$ | Nr punktu pomiarowego                        | $X_{\text{sr}} \pm u(X_{\text{sr}})$<br>[ $\frac{\mu\text{R}}{\text{h}}$ ] | $H^*[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}]$ |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Zwałowisko skały płonnej</b>              |                                                                            |                                      | <b>Korona zbiornika i najbliższe okolice</b> |                                                                            |                                      |
| A                                            | $7,34 \pm 0,11$                                                            | 0,07                                 | 13                                           | $17,00 \pm 0,10$                                                           | 0,17                                 |
| B                                            | $7,1 \pm 0,3$                                                              | 0,07                                 | 14                                           | $15,51 \pm 0,13$                                                           | 0,16                                 |
| C                                            | $7,73 \pm 0,16$                                                            | 0,08                                 | 15                                           | $15,34 \pm 0,11$                                                           | 0,15                                 |
| D                                            | $8,57 \pm 0,15$                                                            | 0,09                                 | 16                                           | $17,36 \pm 0,14$                                                           | 0,17                                 |
| E                                            | $7,74 \pm 0,09$                                                            | 0,08                                 | 17                                           | $13,00 \pm 0,16$                                                           | 0,13                                 |
| F                                            | $10,95 \pm 0,03$                                                           | 0,11                                 | 18                                           | $10,84 \pm 0,11$                                                           | 0,11                                 |
| <b>Korona zbiornika i najbliższe okolice</b> |                                                                            |                                      | 19                                           | $10,8 \pm 0,3$                                                             | 0,11                                 |
| 1                                            | $13,74 \pm 0,14$                                                           | 0,14                                 | 20                                           | $15,86 \pm 0,11$                                                           | 0,16                                 |
| 2                                            | $9,07 \pm 0,03$                                                            | 0,09                                 | 21                                           | $12,4 \pm 0,2$                                                             | 0,12                                 |
| 3                                            | $15,6 \pm 0,2$                                                             | 0,16                                 | 22                                           | $16,4 \pm 0,5$                                                             | 0,16                                 |
| 4                                            | $7,7 \pm 0,2$                                                              | 0,08                                 | 23                                           | $12,0 \pm 0,5$                                                             | 0,12                                 |
| 5                                            | $7,50 \pm 0,14$                                                            | 0,08                                 | 24                                           | $10,99 \pm 0,10$                                                           | 0,11                                 |
| 6                                            | $9,4 \pm 0,3$                                                              | 0,09                                 | 25                                           | $11,44 \pm 0,12$                                                           | 0,11                                 |
| 7                                            | $7,21 \pm 0,09$                                                            | 0,07                                 | 26                                           | $11,42 \pm 0,10$                                                           | 0,11                                 |
| 8                                            | $12,95 \pm 0,15$                                                           | 0,13                                 | 27                                           | $12,1 \pm 0,2$                                                             | 0,12                                 |
| 9                                            | $13,81 \pm 0,12$                                                           | 0,14                                 | 28                                           | $11,71 \pm 0,11$                                                           | 0,12                                 |
| 10                                           | $11,11 \pm 0,11$                                                           | 0,11                                 | 29                                           | $10,73 \pm 0,09$                                                           | 0,11                                 |
| 11                                           | $13,2 \pm 0,2$                                                             | 0,13                                 | 30                                           | $10,62 \pm 0,12$                                                           | 0,11                                 |
| 12                                           | $11,98 \pm 0,17$                                                           | 0,12                                 | 31                                           | $10,08 \pm 0,10$                                                           | 0,10                                 |

<sup>1</sup> zgodnie z nomenklaturą ICRP nazywana ekspozycją

B.

| Nr punktu pomiarowego | $H^*_{sr} \pm u(H^*_{sr}) \left[ \frac{\mu Sv}{h} \right]$ | Nr punktu pomiarowego | $H^*_{sr} \pm u(H^*_{sr}) \left[ \frac{\mu Sv}{h} \right]$ |
|-----------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| X                     | 0,18 ± 0,01                                                | 23                    | 0,19 ± 0,01                                                |
| 1                     | 0,26 ± 0,01                                                | 24                    | 0,26 ± 0,01                                                |
| 2                     | 0,29 ± 0,01                                                | 25                    | 0,25 ± 0,01                                                |
| 3                     | 0,23 ± 0,01                                                | 26                    | 0,26 ± 0,01                                                |
| 4                     | 0,27 ± 0,01                                                | 27                    | 0,26 ± 0,01                                                |
| 5                     | 0,30 ± 0,01                                                | 28                    | 0,27 ± 0,01                                                |
| 6                     | 0,26 ± 0,01                                                | 29                    | 0,29 ± 0,01                                                |
| 7                     | 0,30 ± 0,01                                                | 30                    | 0,32 ± 0,01                                                |
| 8                     | 0,33 ± 0,01                                                | 31                    | 0,19 ± 0,01                                                |
| 9                     | 0,27 ± 0,01                                                | 32                    | 0,16 ± 0,01                                                |
| 10                    | 0,24 ± 0,01                                                | 33                    | 0,21 ± 0,01                                                |
| 11                    | 0,25 ± 0,01                                                | 34                    | 0,20 ± 0,01                                                |
| 12                    | 0,28 ± 0,01                                                | 35                    | 0,19 ± 0,01                                                |
| 13                    | 0,29 ± 0,01                                                | 36                    | 0,13 ± 0,01                                                |
| 14                    | 0,29 ± 0,01                                                | 37                    | 0,25 ± 0,01                                                |
| 15                    | 0,29 ± 0,01                                                | 38                    | 0,21 ± 0,01                                                |
| 16                    | 0,32 ± 0,01                                                | 39                    | 0,29 ± 0,01                                                |
| 17                    | 0,25 ± 0,01                                                | 40                    | 0,28 ± 0,01                                                |
| 18                    | 0,31 ± 0,01                                                | 41                    | 0,16 ± 0,01                                                |
| 19                    | 0,24 ± 0,01                                                | 42                    | 0,14 ± 0,01                                                |
| 20                    | 0,30 ± 0,01                                                | 43                    | 0,16 ± 0,01                                                |
| 21                    | 0,19 ± 0,01                                                | 44                    | 0,18 ± 0,01                                                |
| 22                    | 0,30 ± 0,01                                                |                       |                                                            |

2. Wyniki pomiarów mocy dawki promieniowania gamma w rejonie zbiornika Kaniów.

Tabela 34. Średnia moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu R/h$ ] w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych w okolicy zbiornika retencyjno – dozującego Kaniów oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma zmierzony 14.04.2009, 27.12.2009 oraz 09.04.2012

| Nr punktu pomiarowego | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| 1                     | 47,4 ± 1,1                                      | 0,47                    | 46,9 ± 1,5                                      | 0,469                   | 68,3 ± 2,1                                      | 0,68                    |
| 2                     | 118,6 ± 1,4                                     | 1,19                    | -                                               | -                       | 430,0 ± 3,1                                     | 4,30                    |
| 3                     | 21,3 ± 0,3                                      | 0,21                    | 21,3 ± 0,3                                      | 0,213                   | -                                               | -                       |
| 4                     | 20,0 ± 0,0                                      | 0,20                    | 21,5 ± 0,2                                      | 0,215                   | -                                               | -                       |
| 5                     | 105,6 ± 2,8                                     | 1,06                    | 96,0 ± 1,6                                      | 0,960                   | 126,4 ± 2,8                                     | 1,26                    |
| 6                     | 16,1 ± 0,4                                      | 0,16                    | 17,0 ± 0,2                                      | 0,170                   | -                                               | -                       |
| 7                     | 84,3 ± 2,7                                      | 0,84                    | 102,1 ± 0,9                                     | 1,021                   | -                                               | -                       |
| 8                     | 12,8 ± 0,2                                      | 0,13                    | 17,4 ± 0,3                                      | 0,174                   | -                                               | -                       |
| 9                     | 26,0 ± 0,2                                      | 0,26                    | 24,7 ± 0,5                                      | 0,247                   | -                                               | -                       |
| 10                    | 157,0 ± 2,0                                     | 1,57                    | 106,7 ± 1,7                                     | 1,067                   | -                                               | -                       |
| 11                    | 21,2 ± 0,3                                      | 0,21                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |
| 12                    | 17,7 ± 0,3                                      | 0,18                    | 17,2 ± 0,3                                      | 0,172                   | -                                               | -                       |
| 13                    | 17,3 ± 0,1                                      | 0,17                    | 16,9 ± 0,3                                      | 0,169                   | 18,4 ± 0,5                                      | 0,18                    |
| 14                    | 59,4 ± 2,6                                      | 0,59                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |
| 15                    | 19,7 ± 0,2                                      | 0,20                    | 19,1 ± 0,2                                      | 0,191                   | -                                               | -                       |
| 16                    | 421,1 ± 4,6                                     | 4,21                    | 430,0 ± 4,8                                     | 4,300                   | -                                               | -                       |
| 17                    | 544,3 ± 19,5                                    | 5,44                    | 465,7 ± 15,4                                    | 4,657                   | -                                               | -                       |
| 18                    | 258,4 ± 2,6                                     | 2,58                    | -                                               | -                       | 340,0 ± 3,8                                     | 3,40                    |
| 19                    | 17,3 ± 0,3                                      | 0,17                    | 17,8 ± 0,1                                      | 0,178                   | 291,4 ± 3,4                                     | 2,91                    |
| 20                    | 70,4 ± 0,5                                      | 0,70                    | 62,0 ± 0,8                                      | 0,620                   | -                                               | -                       |
| 21                    | 16,0 ± 0,0                                      | 0,16                    | 14,9 ± 0,2                                      | 0,149                   | -                                               | -                       |
| 22                    | 20,4 ± 0,4                                      | 0,20                    | 17,4 ± 0,2                                      | 0,174                   | -                                               | -                       |
| 23                    | 148,9 ± 1,5                                     | 1,49                    | 92,0 ± 0,8                                      | 0,920                   | -                                               | -                       |
| 24                    | 21,2 ± 0,1                                      | 0,21                    | 18,6 ± 0,2                                      | 0,186                   | -                                               | -                       |
| 25                    | 169,0 ± 3,9                                     | 1,69                    | 141,9 ± 0,9                                     | 1,419                   | -                                               | -                       |
| 26                    | 19,5 ± 0,4                                      | 0,20                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |
| 27                    | 32,9 ± 0,4                                      | 0,33                    | 26,7 ± 0,7                                      | 0,267                   | -                                               | -                       |
| 28                    | 34,9 ± 0,6                                      | 0,35                    | 24,9 ± 0,3                                      | 0,249                   | -                                               | -                       |
| 29                    | 837,1 ± 16,6                                    | 8,37                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |
| 30                    | 418,9 ± 2,9                                     | 4,19                    | -                                               | -                       | 800,0 ± 30,9                                    | 8,00                    |
| 31                    | 742,9 ± 39,9                                    | 7,43                    | -                                               | -                       | 834,3 ± 17,3                                    | 8,34                    |
| 32                    | 814 ± 34                                        | 8,14                    | -                                               | -                       | 885,7 ± 26,1                                    | 8,86                    |
| 33                    | 112,0 ± 2,6                                     | 1,12                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |
| 34                    | 20,0 ± 0,4                                      | 0,20                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |
| 35                    | 30,9 ± 0,3                                      | 0,31                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |
| 36                    | 63,4 ± 1,5                                      | 0,63                    | -                                               | -                       | -                                               | -                       |

- nie wykonano pomiaru

Tabela 35. Moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu R/h$ ] w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych w okolicach zbiornika retencyjno – dozującego Kaniów i na zwałowisku skały płonnej w jego sąsiedztwie oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma (09.04.2012)

| Nr punktu pomiarowego | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ | Nr punktu pomiarowego | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| 1                     | 25,4 ± 0,6                                      | 0,25                    | 15                    | 35,6 ± 0,4                                      | 0,36                    |
| 2                     | 26,0 ± 0,5                                      | 0,26                    | 16                    | 94,3 ± 1,7                                      | 0,94                    |
| 3                     | 28,1 ± 0,4                                      | 0,28                    | 17                    | 57,3 ± 0,9                                      | 0,57                    |
| 4                     | 39,1 ± 0,7                                      | 0,39                    | 18                    | 70,3 ± 1,1                                      | 0,70                    |
| 5                     | 37,1 ± 0,6                                      | 0,37                    | 19                    | 92,9 ± 1,2                                      | 0,93                    |
| 6                     | 32,1 ± 0,6                                      | 0,32                    | 20                    | 21,1 ± 0,5                                      | 0,21                    |
| 7                     | 32,3 ± 0,5                                      | 0,32                    | 21                    | 24,9 ± 0,5                                      | 0,25                    |
| 8                     | 29,4 ± 0,7                                      | 0,29                    | 22                    | 21,6 ± 0,5                                      | 0,22                    |
| 9                     | 44,7 ± 0,4                                      | 0,45                    | 23                    | 21,4 ± 0,4                                      | 0,21                    |
| 10                    | 43,4 ± 0,6                                      | 0,43                    | 24                    | 21,6 ± 0,6                                      | 0,22                    |
| 11                    | 40,0 ± 0,8                                      | 0,40                    | 25                    | 20,3 ± 0,8                                      | 0,20                    |
| 12                    | 28,9 ± 1,7                                      | 0,29                    | 26                    | 21,1 ± 0,9                                      | 0,21                    |
| 13                    | 30,7 ± 0,4                                      | 0,31                    | 27                    | 20,1 ± 0,6                                      | 0,20                    |
| 14                    | 70,0 ± 1,1                                      | 0,70                    |                       |                                                 |                         |

### 3. Wyniki pomiarów mocy dawki promieniowania gamma w okolicach zbiornika Rontok Duży.

Tabela 36. Średnia moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu R/h$ ] w wybranych punktach pomiarowych oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma zmierzony 19, 20, 21.06.2008 (Śleziak, 2008)

| Nr punktu pomiarowego | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| 1                     | 56 ± 2                                          | 0,56                    | 108,7 ± 0,7                                     | 1,09                    | 71 ± 1                                          | 0,71                    |
| 2                     | 22                                              | 0,22                    | 21,1 ± 0,2                                      | 0,21                    | 21,4 ± 0,3                                      | 0,21                    |
| 3                     | 54,9 ± 0,3                                      | 0,55                    | 46,9 ± 0,6                                      | 0,47                    | 52 ± 1                                          | 0,52                    |
| 4                     | 18,9 ± 0,3                                      | 0,19                    | 21,14 ± 0,22                                    | 0,21                    | 19,9 ± 0,3                                      | 0,20                    |
| 5                     | 13,5 ± 0,2                                      | 0,13                    | 14,3 ± 0,2                                      | 0,14                    | 14,4 ± 0,2                                      | 0,14                    |
| 6                     | 14,5 ± 0,2                                      | 0,15                    | 13,5 ± 0,2                                      | 0,13                    | 14,3 ± 0,2                                      | 0,14                    |
| 7                     | 14,07 ± 0,04                                    | 0,14                    | 13,73 ± 0,14                                    | 0,14                    | 14,47 ± 0,14                                    | 0,14                    |
| 8                     | 15,29 ± 0,14                                    | 0,15                    | 14,33 ± 0,18                                    | 0,14                    | 15,09 ± 0,08                                    | 0,15                    |
| 9                     | 12,1 ± 0,2                                      | 0,12                    | 15,03 ± 0,49                                    | 0,15                    | 12,41 ± 0,15                                    | 0,12                    |
| 10                    | 15,36 ± 0,18                                    | 0,15                    | 16,3 ± 0,3                                      | 0,16                    | 17,2 ± 0,3                                      | 0,17                    |
| 11                    | 16,04 ± 0,25                                    | 0,16                    | 15,96 ± 0,09                                    | 0,16                    | 15,54 ± 0,15                                    | 0,16                    |
| 12                    | 15,67 ± 0,14                                    | 0,16                    | 15,93 ± 0,14                                    | 0,16                    | 15,50 ± 0,13                                    | 0,16                    |

| Nr punktu<br>pomiarowego | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*$<br>[ $\frac{\mu Sv}{h}$ ] | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*$<br>[ $\frac{\mu Sv}{h}$ ] | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*$<br>[ $\frac{\mu Sv}{h}$ ] |
|--------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|
| 13                       | 14,67 ± 0,14                                    | 0,15                            | 14,61 ± 0,18                                    | 0,15                            | 12,86 ± 0,18                                    | 0,13                            |
| 14                       | 15,74 ± 0,16                                    | 0,16                            | 16,6 ± 0,4                                      | 0,17                            | 17,4 ± 0,4                                      | 0,17                            |
| 15                       | 13,17 ± 0,12                                    | 0,13                            | 12,19 ± 0,14                                    | 0,12                            | 11,44 ± 0,18                                    | 0,11                            |
| 16                       | 14,13 ± 0,07                                    | 0,14                            | 14,71 ± 0,18                                    | 0,15                            | 14,00 ± 0,15                                    | 0,14                            |
| 17                       | 21,70 ± 0,14                                    | 0,22                            | 21,2 ± 0,3                                      | 0,21                            | 22,20 ± 0,16                                    | 0,22                            |
| 18                       | 14,57 ± 0,17                                    | 0,15                            | 14,6 ± 0,4                                      | 0,15                            | 12,7 ± 0,3                                      | 0,13                            |
| 19                       | 13,93 ± 0,14                                    | 0,14                            | 13,99 ± 0,10                                    | 0,14                            | 13,6 ± 0,2                                      | 0,14                            |
| 20                       | 9,93 ± 0,08                                     | 0,10                            | 9,86 ± 0,10                                     | 0,10                            | 9,49 ± 0,15                                     | 0,09                            |
| 21                       | 10,14 ± 0,14                                    | 0,10                            | 10,84 ± 0,15                                    | 0,11                            | 10,70 ± 0,19                                    | 0,11                            |
| 22                       | 8,04 ± 0,05                                     | 0,08                            | 7,26 ± 0,09                                     | 0,07                            | 8,03 ± 0,10                                     | 0,08                            |
| 23                       | 10,91 ± 0,19                                    | 0,11                            | 8,46 ± 0,15                                     | 0,08                            | 9,46 ± 0,15                                     | 0,09                            |
| 24                       | 11,3 ± 0,14                                     | 0,11                            | 11,11 ± 0,04                                    | 0,11                            | 10,61 ± 0,04                                    | 0,11                            |
| 25                       | 10,2 ± 0,5                                      | 0,10                            | 9,4 ± 0,2                                       | 0,09                            | 9,9 ± 0,2                                       | 0,10                            |
| 26                       | 11,33 ± 0,14                                    | 0,11                            | 12,71 ± 0,12                                    | 0,13                            | 11,71 ± 0,12                                    | 0,12                            |
| 27                       | 11,20 ± 0,15                                    | 0,11                            | 10,43 ± 0,15                                    | 0,10                            | 10,56 ± 0,13                                    | 0,11                            |
| 28                       | 8,53 ± 0,13                                     | 0,09                            | 7,59 ± 0,15                                     | 0,08                            | 7,64 ± 0,19                                     | 0,08                            |
| 29                       | 10,79 ± 0,15                                    | 0,11                            | 10,07 ± 0,21                                    | 0,10                            | 10,4 ± 0,2                                      | 0,10                            |
| 30                       | 10,76 ± 0,15                                    | 0,11                            | 12,33 ± 0,11                                    | 0,12                            | 12,37 ± 0,12                                    | 0,12                            |
| 31                       | 8,67 ± 0,13                                     | 0,09                            | 8,66 ± 0,14                                     | 0,09                            | 8,60 ± 0,14                                     | 0,09                            |
| 32                       | 10,96 ± 0,04                                    | 0,11                            | 12,47 ± 0,14                                    | 0,12                            | 12,5 ± 0,3                                      | 0,13                            |
| 33                       | 12,10 ± 0,06                                    | 0,12                            | 12,16 ± 0,13                                    | 0,12                            | 12,30 ± 0,12                                    | 0,12                            |
| 34                       | 8,91 ± 0,09                                     | 0,09                            | 8,27 ± 0,10                                     | 0,08                            | 8,26 ± 0,09                                     | 0,08                            |
| 35                       | 13,71 ± 0,12                                    | 0,14                            | 12,3 ± 0,3                                      | 0,12                            | 13,73 ± 0,14                                    | 0,14                            |
| 36                       | 10,16 ± 0,11                                    | 0,10                            | 10,8 ± 0,2                                      | 0,11                            | 9,49 ± 0,15                                     | 0,09                            |
| 37                       | 10,53 ± 0,16                                    | 0,11                            | 10,80 ± 0,10                                    | 0,11                            | 11,16 ± 0,07                                    | 0,11                            |
| 38                       | 11,73 ± 0,19                                    | 0,12                            | 11,89 ± 0,10                                    | 0,12                            | 11,16 ± 0,08                                    | 0,11                            |
| 39                       | 9,7 ± 0,2                                       | 0,10                            | 9,7 ± 0,2                                       | 0,10                            | 9,2 ± 0,2                                       | 0,09                            |
| 40                       | 12,1 ± 0,2                                      | 0,12                            | 11,96 ± 0,21                                    | 0,12                            | 11,7 ± 0,2                                      | 0,12                            |
| 41                       | 11,36 ± 0,16                                    | 0,11                            | 11,34 ± 0,11                                    | 0,11                            | 11,4 ± 0,2                                      | 0,11                            |
| 42                       | 11,96 ± 0,06                                    | 0,12                            | 12,10 ± 0,06                                    | 0,12                            | 12,01 ± 0,24                                    | 0,12                            |
| 43                       | 8,17 ± 0,06                                     | 0,08                            | 11,8 ± 0,2                                      | 0,12                            | 7,7 ± 0,2                                       | 0,08                            |
| 44                       | 12,97 ± 0,15                                    | 0,13                            | 12,43 ± 0,15                                    | 0,12                            | 12,24 ± 0,11                                    | 0,12                            |
| 45                       | 11,99 ± 0,15                                    | 0,12                            | 11,17 ± 0,10                                    | 0,11                            | 11,24 ± 0,10                                    | 0,11                            |
| 46                       | 11,5 ± 0,2                                      | 0,12                            | 12,5 ± 0,4                                      | 0,12                            | 11,16 ± 0,08                                    | 0,11                            |
| 47                       | 13,20 ± 0,19                                    | 0,13                            | 13,61 ± 0,13                                    | 0,14                            | 13,93 ± 0,09                                    | 0,14                            |
| 48                       | 12,3 ± 0,2                                      | 0,12                            | 12,84 ± 0,14                                    | 0,13                            | 12,71 ± 0,15                                    | 0,13                            |
| 49                       | 11,6 ± 0,2                                      | 0,12                            | 11,19 ± 0,13                                    | 0,11                            | 10,53 ± 0,18                                    | 0,11                            |
| 50                       | 11,89 ± 0,19                                    | 0,12                            | 11,6 ± 0,2                                      | 0,12                            | 11,39 ± 0,15                                    | 0,11                            |
| 51                       | 8,9 ± 0,2                                       | 0,09                            | 9,40 ± 0,19                                     | 0,09                            | 8,71 ± 0,14                                     | 0,09                            |
| 52                       | 11,14 ± 0,06                                    | 0,11                            | 11,13 ± 0,12                                    | 0,11                            | 10,56 ± 0,17                                    | 0,11                            |
| 53                       | 7,7 ± 0,2                                       | 0,08                            | 8,6 ± 0,1                                       | 0,09                            | 8,10 ± 0,09                                     | 0,08                            |

Tabela 37. Moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu R/h$ ] w wybranych punktach pomiarowych w okolicach zbiornika Rontok Duży i na zwałowisku skały płonnej zlokalizowanej w jego sąsiedztwie oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma (28. 12. 2011)

| Nr punktu pomiarowego | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ | Nr punktu pomiarowego | $X_{sr} \pm u(X_{sr})$<br>[ $\frac{\mu R}{h}$ ] | $H^*[\frac{\mu Sv}{h}]$ |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| 1                     | $37,6 \pm 0,2$                                  | 0,38                    | 12                    | $66,1 \pm 1,6$                                  | 0,66                    |
| 2                     | $25,9 \pm 0,6$                                  | 0,26                    | 13                    | $24,3 \pm 0,2$                                  | 0,24                    |
| 3                     | $48,6 \pm 0,4$                                  | 0,49                    | 14                    | $30,8 \pm 0,5$                                  | 0,31                    |
| 3                     | $66,4 \pm 1,4$                                  | 0,67                    | 15                    | $17,3 \pm 0,3$                                  | 0,17                    |
| 4                     | $17,0 \pm 0,4$                                  | 0,17                    | 16                    | $17,6 \pm 0,2$                                  | 0,18                    |
| 5                     | $14,4 \pm 0,5$                                  | 0,14                    | 17                    | $16,8 \pm 0,2$                                  | 0,17                    |
| 6                     | $41,0 \pm 0,6$                                  | 0,41                    | 18                    | $17,99 \pm 0,03$                                | 0,18                    |
| 7                     | $288,1 \pm 2,8$                                 | 2,88                    | 19                    | $18,00 \pm 0,04$                                | 0,18                    |
| 7                     | $308,4 \pm 2,3$                                 | 3,08                    | 20                    | $30,7 \pm 0,4$                                  | 0,31                    |
| 8                     | $40,7 \pm 0,2$                                  | 0,41                    | 21                    | $17,11 \pm 0,33$                                | 0,17                    |
| 9                     | $29,11 \pm 0,33$                                | 0,29                    | 22                    | $17,99 \pm 0,03$                                | 0,18                    |
| 10                    | $49,0 \pm 0,3$                                  | 0,49                    | 23                    | $23,99 \pm 0,03$                                | 0,24                    |
| 11                    | $14,4 \pm 0,7$                                  | 0,14                    |                       |                                                 |                         |

### **Omówienie wyników pomiarów**

Pomiary mocy dawki ekspozycyjnej w bezpośrednim sąsiedztwie zbiorników retencyjno – dozujących zostały uzupełnione o szereg pomiarów wykonanych na terenach niezanieczyszczonych. Wybrane zostały do tego celu dwie wsie – Grzawa i Osiek. Pierwsza z nich zlokalizowana jest między miejscowościami Brzeszcze i Kaniów, na terenie których położone są zbiorniki wód kopalnianych, druga zaś leży około 25km na wschód od Brzeszcz. Wartość średniego przeliczonego przestrzennego równoważnika mocy dawki promieniowania gamma na tych obszarach wynosi  $0,11 \frac{\mu Sv}{h}$ , co odpowiada  $0,96 \frac{mSv}{rok}$ .

Średnia wartość równoważnika mocy dawki promieniowania gamma otrzymywana przez ogół ludności na terenie Polski według komunikatu Państwowej Agencji Atomistyki w 2011 roku była równa  $3,3 \frac{mSv}{rok}$ , czyli  $0,38 \frac{\mu Sv}{h}$ . Jeśli chodzi o dawkę pochodzącą od źródeł naturalnych, to jest od izotopów promieniotwórczych występujących w skorupie ziemskiej,

od materiałów budowlanych czy też od promieniowania kosmicznego, oszacowano ją na poziomie  $0,27 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $2,4 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ).

Najwyższe zmierzone wartości przestrzennego równoważnika mocy dawki promieniowania gamma są ponad 20 krotnie wyższe od wartości dla terenów nie skażonych działalnością górniczą. Wyniki takie uzyskano nad odkrytymi osadami dennymi zbiornika Kaniów – zmierzono wartości w przedziale  $0,59 - 8,86 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $77,7 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ). W przypadku pozostałych zbiorników wartości były niższe – dla zbiornika Rontok Duży od  $0,47$  do  $1,09 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $9,6 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ) a dla zbiornika Brzeszcze od  $0,16$  do  $0,18 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $1,58 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ).

Punkty pomiarowe zlokalizowano także wzdłuż obwałowań zbiorników. W przypadku zbiornika w Kaniowie wartości przestrzennego równoważnika mocy dawki promieniowania gamma należą do przedziału  $0,13$  do  $0,35 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ , to jest  $3,1 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ . Dla zbiornika Rontok Duży wartości te wahają się od  $0,07$  do  $0,22 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $1,9 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ). Najniższe wartości mocy dawki, porównywalne z tymi zanotowanymi na terenach niezanieczyszczonych, zmierzono w okolicach zbiornika Brzeszcze. Równoważnik mocy dawki nad obwałowaniami tego rezerwuaru wynosi od  $0,07$  do  $0,17 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ , co odpowiada  $1,49 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ .

Badany teren obejmował również łąki otaczające wszystkie zbiorniki a także przylegające do nich zwałowiska skały płonnej. W przypadku łąk równoważnik mocy dawki wynosi  $0,11$  do  $0,22 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $1,9 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ) dla Kaniowa,  $0,10 - 0,14 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $1,23 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ) dla Rontoka Dużego oraz  $0,07 - 0,14 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  ( $1,23 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ ) dla zbiornika Brzeszcze.

Jeżeli chodzi o zwałowiska skały płonnej przyległe do zbiorników retencyjno – dozujących, maksymalne dawki wynoszą  $0,33 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  dla zbiornika Brzeszcze,  $0,45 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  dla zbiornika Kaniów oraz  $0,66 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$  dla zbiornika Rontok Duży.

W tabeli 38 zebrano wyniki przestrzennego równoważnika mocy dawki promieniowania gamma w przeliczeniu na dawkę roczną. Analizując tabelę można zauważyć, że najwyższe wartości zostały zanotowane w okolicach wlotów słonej wody kopalnianej do

zbiorników. Maksymalna dawka równa  $77,7 \frac{mSv}{rok}$  została zanotowana nad odkrytymi osadami zbiornika Kaniów. Minimalne dawki pojawiają się natomiast nad łąkami w okolicach zbiorników Rontok Duży i Brzeszcze – ich rozkład jest porównywalny do wartości odpowiadającej naturalnemu tłu promieniotwórczemu.

Tabela 38. Przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma w bezpośrednim sąsiedztwie zbiorników Kaniów, Rontok Duży i Brzeszcze.

| Lokalizacja              | Przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma (średnia) [ $\mu Sv/h$ ] |                    |                    |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
|                          | Kaniów                                                                            | Rontok Duży        | Brzeszcze          |
| wlot wody do zbiornika   | 0,47 – 1,19 (0,71)                                                                | 0,19 – 0,55 (0,36) | 0,09 – 0,12 (0,10) |
| obwałowanie              | 0,13 – 0,35 (0,20)                                                                | 0,07 – 0,22 (0,15) | 0,07 – 0,17 (0,12) |
| łąka w okolicy zbiornika | 0,11 – 0,22 (0,16)                                                                | 0,10 – 0,14 (0,12) | 0,07 – 0,14 (0,10) |
| nad odkrytymi osadami    | 0,59 – 8,86 (5,76)                                                                | 0,47 – 1,09 (0,65) | 0,16 – 0,18 (0,17) |
| zwałowisko skały płonnej | 0,37 – 0,45 (0,38)                                                                | 0,14 – 0,66 (0,24) | 0,13 – 0,33 (0,25) |

## 11. Wskaźniki narażenia radiologicznego

Ilości nagromadzonych osadów w zbiornikach retencyjno-dozujących są bardzo duże. Wraz ze wzrostem ich ilości pojawia się problem późniejszego ich zagospodarowania lub neutralizacji. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku drugiego materiału odpadowego jakim jest skała płonna wydobywana wraz z węglem na powierzchnię i lokowana na zwałowiskach. W odróżnieniu od osadów dennych wykorzystywana ona jest do zasypywania obniżeń terenu powstających w wyniku działalności górniczej, a także do budowy dróg technologicznych, obwałowań zbiorników retencyjnych czy też wałów przeciwpowodziowych.

Zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych w osadach i skałach są podwyższone w stosunku do typowych zawartości stwierdzanych w glebach Polski (Atlas Radiologiczny Polski, (2006)

- rad  $^{226}\text{Ra}$  – od 4,2 do  $116 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ ; średnio  $25 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ ,
- tor  $^{228}\text{Th}$  – od 3,6 do  $82,8 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ ; średnio  $23,4 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$
- potas  $^{40}\text{K}$  – od 60 do  $1028 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ ; średnio  $408 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$

Z tego powodu, przed ich wykorzystaniem w charakterze materiałów niwelacyjnych czy budowlanych zachodzi konieczność sprawdzenia ich przydatności pod kątem promieniowania jonizującego. Polskie prawodawstwo opiera się na Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 02.01.2007 „w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu  $^{40}\text{K}$ , radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{228}\text{Th}$  w surowcach i materiałach budowlanych przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów”, oraz na prawodawstwie ustalonym przez Komisję Europejską (m.in. EU, 1999). W regulacjach dotyczących tego zagadnienia stosowane są różne wskaźniki narażenia radiologicznego (współczynniki „f”, ekwiwalent radowy, indeks wewnętrznego i zewnętrznego narażenia, dawka efektywna), co ma na celu lepsze określenie poziomów zagrożenia pochodzącego od promieniowania jonizującego. W tym miejscu warto zaznaczyć, że pomiędzy polskim prawodawstwem a prawodawstwem europejskim istnieje rozbieżność co do izotopów toru, których aktywność powinna być używana w obliczeniach wartości wskaźników.

Ustawodawca w Polsce, po szeregu konsultacji z największymi jednostkami badawczymi w kraju, zalecił używanie toru  $^{228}\text{Th}$  zamiast toru  $^{232}\text{Th}$ . Ma to związek z faktem, że polskie laboratoria są dostosowane do pomiarów aktywności toru  $^{228}\text{Th}$  (pomiar aktywności toru  $^{232}\text{Th}$  nastrocza problemy z preparatyką prób i dostępem do aparatury pomiarowej). Obliczenia oparte na torze  $^{228}\text{Th}$  dają wyniki bezpieczniejsze w stosunku do obliczeń opartych na aktywności toru  $^{232}\text{Th}$  ponieważ stosunek aktywności  $\frac{A^{228}\text{Th}}{A^{232}\text{Th}}$  jest zwykle większy od 1 (Bernat i Goldberg, 1968). W obliczeniach wszystkich wskaźników narażenia radiologicznego konsekwentnie użyto aktywności toru  $^{228}\text{Th}$  zamiast  $^{232}\text{Th}$ , co prowadzi do nieznacznego zawyżenia ich wartości.

Poniżej scharakteryzowane zostały kolejne wskaźniki narażenia radiologicznego, które zostały obliczone na podstawie danych zebranych podczas pomiarów prób osadów i skały płonnej wykonanych w ramach niniejszej pracy.

### 1) Współczynniki $f_1$ i $f_2$ (RM, 2.01.2007)

Wskaźnik aktywności  $f_1$  określa zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych takich jak rad  $^{226}\text{Ra}$ , tor  $^{228}\text{Th}$  i potas  $^{40}\text{K}$  w materiałach i odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, a co za tym idzie - opisuje narażenie całego ciała na promieniowanie gamma pochodzące od tych radionuklidów. Wyznaczany jest na podstawie równania:

$$f_1 = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} \quad (45)$$

gdzie:

$C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ ,  $C_K$  – aktywności właściwe izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{228}\text{Th}$  i potasu  $^{40}\text{K}$  w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ ,

Wskaźnik aktywności  $f_2$  odpowiada aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  w badanej próbce w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ :

$$f_2 = C_{Ra} \quad (46)$$

Rad jest prekursorem radonu, w związku z czym współczynnik ten informuje pośrednio o narażeniu na promieniowanie pochodzące od radonu i jego krótkożyciowych produktów rozpadu (Zapotoczna i in., 2012).

W rozporządzeniu (RM, 2.01.2007) podano dopuszczalne wartości współczynników  $f_1$  i  $f_2$ , w zależności od sposobu wykorzystania materiałów budowlanych i odpadów przemysłowych:

- 1)  $f_1 = 1$ ,  $f_2 = 200 \frac{Bq}{kg}$  w odniesieniu do surowców i materiałów budowlanych stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi lub inwentarza żywego,
- 2)  $f_1 = 2$ ,  $f_2 = 400 \frac{Bq}{kg}$  w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w obiektach budowlanych naziemnych wznoszonych na terenach zabudowanych lub przeznaczonych do zabudowy w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego oraz do niwelacji takich terenów,
- 3)  $f_1 = 3,5$ ,  $f_2 = 1000 \frac{Bq}{kg}$  w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w częściach naziemnych obiektów budowlanych niewymienionych w pkt. 2 oraz do niwelacji terenów niewymienionych w pkt. 2,
- 4)  $f_1 = 7$ ,  $f_2 = 2000$  w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w częściach podziemnych obiektów budowlanych, o których mowa w pkt. 3, oraz w budowlach podziemnych, w tym w tunelach kolejowych i drogowych, z wyłączeniem odpadów przemysłowych wykorzystywanych w podziemnych wyrobiskach górniczych

Do spełnienia wymogów, wartości wskaźników radiologicznych nie mogą być wyższe o więcej niż o 20% w stosunku do wymienionych. W przypadku niwelacji terenów, budowy dróg czy też obiektów sportowych i rekreacyjnych dodatkowym ograniczeniem jest obniżenie dawki pochłoniętej na wysokości 1m nad powierzchnią do wartości  $0,3 \frac{\mu Gy}{h}$  przy zachowaniu wartości współczynników  $f_1$  i  $f_2$ . Obniżenie dawki może być wykonane przez położenie dodatkowej warstwy innego materiału.

## **2) Ekwiwalent radowy (Beretka i Mathew, 1985)**

Współczynnik ten został wprowadzony dla ułatwienia porównania aktywności właściwej materiałów, które zawierają różne stężenia izotopów promieniotwórczych radu, toru i potasu i wyrażony jest zależnością:

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1,47C_{Th} + 0,077C_K \quad (47)$$

gdzie:

$C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ ,  $C_K$  – aktywności właściwe izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{232}\text{Th}$  i potasu  $^{40}\text{K}$  w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ ,

$Ra_{eq}$  – ekwiwalent radowy w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ .

Tak zdefiniowany ekwiwalent radowy pociąga za sobą założenie, że 1  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  radu  $^{226}\text{Ra}$ , 0,7

$\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  toru  $^{232}\text{Th}$  oraz 13  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  potasu  $^{40}\text{K}$  skutkuje taką samą dawką promieniowania gamma.

(Inna wersja – 370  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$   $^{226}\text{Ra}$ , 259  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$   $^{232}\text{Th}$  lub 4810  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$   $^{40}\text{K}$ ). Przyjmuje się, że  $Ra_{eq} = 370$

$\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  jest wartością graniczną, przy której narażenie radiologiczne jest zanedbywalne.

### 3) Indeks zewnętrznego narażenia (UNSCEAR, 2000)

Wartość współczynnika wyznaczana jest z równania:

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \quad (48)$$

gdzie:

$C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ ,  $C_K$  – aktywności właściwe izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{232}\text{Th}$  i potasu  $^{40}\text{K}$  w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$

Indeks zewnętrznego narażenia ściśle związany jest z ekwiwalentem radowym:  $H_{ex}=1$

odpowiada wartości granicznej ekwiwalentu radowego  $Ra_{eq} = 370 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ . Przy tej wartości

indeksu, narażenie radiologiczne jest zanedbywalne. Dodatkowo przy wartości współczynnika równej 1, dawka promieniowania gamma pochodząca od materiałów jest na poziomie  $1,5 \frac{\text{mSv}}{\text{rok}}$ .

### 4) Indeks wewnętrznego narażenia

Poza narażeniem zewnętrznym możemy mieć również do czynienia z wewnętrznym narażeniem radiacyjnym. Zagrożeniem jest głównie radon i jego krótkożyciowe produkty

rozpadu. Indeks wewnętrznego narażenia definiuje wpływ tychże izotopów zgodnie z równaniem:

$$H_{in} = \frac{C_{Ra}}{185} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \quad (49)$$

gdzie:

$C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ ,  $C_K$  – aktywności właściwe izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{232}\text{Th}$  i potasu  $^{40}\text{K}$  w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$

Graniczną wartością tego współczynnika jest 1, co odpowiada połowie maksymalnej dopuszczalnej koncentracji radu  $^{226}\text{Ra}$ .

### 5) Całkowita dawka pochłonięta 1m nad ziemią (Yu, Guan i Stokes, 1992)

Całkowita dawka pochłonięta 1m nad ziemią może być wyznaczona z równania:

$$D = 0,462C_{Ra} + 0,604C_{Th} + 0,041C_K \quad (50)$$

gdzie:

$D$  – dawka pochłonięta 1m nad ziemią  $\frac{\text{nGy}}{\text{h}}$ ,

$C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ ,  $C_K$  – aktywności właściwe izotopów radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{232}\text{Th}$  i potasu  $^{40}\text{K}$  w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$

Jako przyczynki do obliczania dawki przyjmuje się izotopy radu  $^{226}\text{Ra}$ , toru  $^{232}\text{Th}$  oraz potasu  $^{40}\text{K}$  i ich koncentracje w  $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ . Zakłada się również, że wpływ innych radionuklidów takich jak  $^{137}\text{Cs}$ , stront  $^{90}\text{Sr}$  oraz pochodzących z szeregu uranowego może być zaniedbany ze względu na ich niewielką koncentrację w materiałach a co za tym idzie niewielki wpływ na dawkę.

Współczynniki zamieniające wartości aktywności właściwej  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ ,  $C_K$  radu, toru i potasu na wartości dawki wyznaczone zostały metodą Monte Carlo.

### 6) Dawka efektywna (UNSCEAR, 2000)

Kolejnym wskaźnikiem narażenia radiologicznego jest dawka efektywna wyrażona wzorem:

$$Eff\left[\frac{mSv}{rok}\right] = D\left[\frac{nGy}{h}\right] \cdot 8760\left[\frac{h}{rok}\right] \cdot 0,2 \cdot 0,7\left[\frac{Sv}{Gy}\right] \cdot 10^{-6} \quad (51)$$

gdzie:

$D$  – całkowita dawka pochłonięta 1m nad ziemią  $\frac{nGy}{h}$ ,

$0,7 \frac{Sv}{Gy}$  - współczynnik konwersji dawki pochłoniętej na efektywną,

$0,2$  – współczynnik odpowiadający czasowi przebywania na zewnątrz,

$8760$  – liczba godzin w roku.

Aby oszacować roczną dawkę efektywną, należy przyjąć współczynnik konwersji dawki pochłoniętej na efektywną oraz czynnik określający czas przebywania na zewnątrz.

Wartości współczynników zostały zaproponowane w raporcie UNSCEAR (UNSCEAR, 2000). Pierwszy z nich został obliczony metodą Monte Carlo dla chmury źródeł promieniowania gamma o energii 1MeV (dla osób dorosłych równy 0,7). W przypadku dzieci i niemowląt wartość współczynnika konwersji jest inna – kolejno 0,8 i  $0,9 \frac{Sv}{Gy}$ . (wyższe

wartości współczynnika konwersji związane są z tym, że promieniowanie gamma jest mniej absorbowane w organizmach dzieci i niemowląt).

### **11.1. Wyniki obliczeń wskaźników radiologicznych w odniesieniu do osadów i skał w otoczeniu poszczególnych zbiorników**

W tabeli 38 zestawione zostały wyniki obliczeń wskaźników radiologicznych dla prób osadów i skały płonnej pobranej z okolic zbiorników retencyjno dozujących Kaniów, Brzeszcze i Rontok Duży.

Tabela 39. Wskaźniki narażenia radiologicznego dla osadów i skały płonnej zbiorników retencyjno – dozujących.

**Kaniów**

| Próbka | Opis                                     | $f_1$             | $f_2$<br>[Bq/kg] | $Ra_{eq}$<br>[Bq/kg] | D<br>[μGy/h]        | $H_{ex}$          | $H_{in}$          | $E_{ff} d^1$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} dz^2$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} n^3$<br>[mSv/rok] |
|--------|------------------------------------------|-------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| O1     | osad z okolic wlotu                      | $38,5 \pm 0,4$    | $6451 \pm 89$    | $11420 \pm 120$      | $5,03 \pm 0,05$     | $30,49 \pm 0,33$  | $47,93 \pm 0,53$  | $2,50 \pm 0,07$           | $7,05 \pm 0,07$            | $7,93 \pm 0,08$           |
| O2     | osad z okolic wlotu                      | $14,4 \pm 0,2$    | $2394 \pm 38$    | $4260 \pm 53$        | $1,88 \pm 0,02$     | $11,37 \pm 0,14$  | $17,84 \pm 0,23$  | $2,30 \pm 0,03$           | $2,63 \pm 0,03$            | $2,96 \pm 0,04$           |
| O3     | osad z okolic wlotu                      | $28,8 \pm 0,3$    | $4984 \pm 70$    | $8556 \pm 95$        | $3,78 \pm 0,04$     | $22,86 \pm 0,25$  | $36,32 \pm 0,42$  | $4,63 \pm 0,05$           | $5,29 \pm 0,06$            | $5,95 \pm 0,07$           |
| O4     | osad z okolic wlotu                      | ND                | $9640 \pm 130$   | ND                   | ND                  | ND                | ND                | ND                        | ND                         | ND                        |
| O5     | z dna 130m od wlotu                      | $15,6 \pm 0,2$    | $2664 \pm 42$    | $4619 \pm 58$        | $2,04 \pm 0,03$     | $12,34 \pm 0,15$  | $19,54 \pm 0,25$  | $2,50 \pm 0,03$           | $2,86 \pm 0,04$            | $3,21 \pm 0,04$           |
| O6     | 200m od wlotu                            | $45,7 \pm 0,5$    | $7834 \pm 102$   | $13600 \pm 140$      | $5,99 \pm 0,06$     | $36,32 \pm 0,37$  | $57,5 \pm 0,6$    | $7,35 \pm 0,07$           | $8,40 \pm 0,08$            | $9,45 \pm 0,08$           |
| O7     | 330m od wlotu                            | $6,42 \pm 0,09$   | $1043 \pm 18$    | $1896 \pm 26$        | $0,838 \pm 0,011$   | $5,06 \pm 0,07$   | $7,88 \pm 0,11$   | $1,028 \pm 0,014$         | $1,175 \pm 0,016$          | $1,322 \pm 0,018$         |
| O8     | róg zbiornika                            | $212,6 \pm 2,0$   | $35490 \pm 430$  | $63170 \pm 590$      | $27,8 \pm 0,3$      | $168,6 \pm 1,6$   | $264,5 \pm 2,5$   | $34,07 \pm 0,32$          | $38,94 \pm 0,36$           | $43,8 \pm 0,4$            |
| O9     | osad z okolic wylotu                     | $195,9 \pm 1,8$   | $32640 \pm 390$  | $58210 \pm 550$      | $25,6 \pm 0,2$      | $155,4 \pm 1,5$   | $243,6 \pm 2,3$   | $31,4 \pm 0,3$            | $35,9 \pm 0,4$             | $40,4 \pm 0,4$            |
| Kw_K   | węgiel                                   | $0,103 \pm 0,004$ | $14,0 \pm 0,7$   | $30,1 \pm 1,0$       | $0,013 \pm 0,005$   | $0,080 \pm 0,003$ | $0,118 \pm 0,004$ | $0,0163 \pm 0,0006$       | $0,0186 \pm 0,0006$        | $0,0209 \pm 0,0007$       |
| Ki_K   | iłowiec                                  | $0,250 \pm 0,005$ | $27,6 \pm 0,8$   | $73,1 \pm 1,3$       | $0,032 \pm 0,002$   | $0,194 \pm 0,004$ | $0,269 \pm 0,005$ | $0,0391 \pm 0,0007$       | $0,0447 \pm 0,0008$        | $0,0503 \pm 0,0009$       |
| Kli_K  | łupek ilasty                             | $0,901 \pm 0,009$ | $85,9 \pm 1,3$   | $251,1 \pm 2,5$      | $0,115 \pm 0,002$   | $0,670 \pm 0,007$ | $0,902 \pm 0,009$ | $0,1404 \pm 0,0014$       | $0,1605 \pm 0,0016$        | $0,1805 \pm 0,0017$       |
| Klk_K  | łupek mułowcowi z wtrąceniami krzemionki | $0,852 \pm 0,009$ | $68,7 \pm 1,1$   | $239,5 \pm 2,5$      | $0,1075 \pm 0,0011$ | $0,638 \pm 0,007$ | $0,823 \pm 0,008$ | $0,1318 \pm 0,0013$       | $0,1506 \pm 0,0015$        | $0,1694 \pm 0,0016$       |
| Kpm_K  | piaskowiec laminowany mułowcem           | $0,430 \pm 0,005$ | $32,8 \pm 0,7$   | $117,8 \pm 1,4$      | $0,0542 \pm 0,0006$ | $0,314 \pm 0,004$ | $0,403 \pm 0,005$ | $0,0665 \pm 0,0008$       | $0,076 \pm 0,02$           | $0,085 \pm 0,002$         |

**Rontok Duży**

| Próbka | Opis                 | $f_1$             | $f_2$<br>[Bq/kg] | $Ra_{eq}$<br>[Bq/kg] | D<br>[μGy/h]      | $H_{ex}$          | $H_{in}$         | $E_{ff} d^1$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} dz^2$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} n^3$<br>[mSv/rok] |
|--------|----------------------|-------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| OR1    | osad z okolic wlotu  | $449,6 \pm 4,3$   | $95510 \pm 1150$ | $134000 \pm 1300$    | $59,98 \pm 0,58$  | $359,4 \pm 3,4$   | $617,6 \pm 6,4$  | $73,6 \pm 0,7$            | $84,1 \pm 0,8$             | $94,6 \pm 0,9$            |
| OR2    | osad z okolic wylotu | $0,757 \pm 0,008$ | $96,7 \pm 1,6$   | $212,6 \pm 2,3$      | $0,098 \pm 0,001$ | $0,569 \pm 0,006$ | $0,83 \pm 0,01$  | $0,1198 \pm 0,0012$       | $0,1369 \pm 0,0015$        | $0,154 \pm 0,002$         |
| OA     | okolice wlotu        | $12,73 \pm 0,13$  | $2688 \pm 34$    | $3792 \pm 38$        | $1,698 \pm 0,017$ | $10,17 \pm 0,10$  | $17,43 \pm 0,19$ | $2,08 \pm 0,02$           | $2,38 \pm 0,03$            | $2,68 \pm 0,03$           |

| Próbka | Opis                       | $f_1$             | $f_2$<br>[Bq/kg] | $Ra_{eq}$<br>[Bq/kg] | D<br>[μGy/h]        | $H_{ex}$          | $H_{in}$          | $E_{ff} d^1$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} dz^2$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} n^3$<br>[mSv/rok] |
|--------|----------------------------|-------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| OB     | okolice wlotu              | $12,3 \pm 0,2$    | $2379 \pm 40$    | $3643 \pm 71$        | $1,62 \pm 0,03$     | $9,75 \pm 0,19$   | $16,2 \pm 0,3$    | $1,99 \pm 0,04$           | $2,27 \pm 0,04$            | $2,56 \pm 0,05$           |
| OC     | okolice wylotu             | $51,7 \pm 0,6$    | $13331 \pm 160$  | $15470 \pm 160$      | $7,04 \pm 0,08$     | $41,6 \pm 0,4$    | $77,7 \pm 0,9$    | $8,64 \pm 0,09$           | $9,87 \pm 0,11$            | $11,10 \pm 0,12$          |
| OD     | okolice wylotu             | $17,96 \pm 0,19$  | $4714 \pm 57$    | $5365 \pm 58$        | $2,45 \pm 0,03$     | $14,45 \pm 0,16$  | $27,2 \pm 0,3$    | $3,01 \pm 0,03$           | $3,43 \pm 0,04$            | $3,86 \pm 0,04$           |
| OE     | okolice wylotu             | $10,35 \pm 0,11$  | $2679 \pm 33$    | $3087 \pm 34$        | $1,41 \pm 0,02$     | $8,31 \pm 0,09$   | $15,6 \pm 0,2$    | $1,729 \pm 0,019$         | $1,98 \pm 0,02$            | $2,22 \pm 0,02$           |
| O1     | okolice wylotu brzeg       | $0,702 \pm 0,009$ | $75 \pm 2$       | $195,2 \pm 2,6$      | $0,0897 \pm 0,0012$ | $0,522 \pm 0,007$ | $0,725 \pm 0,012$ | $0,1101 \pm 0,0015$       | $0,1258 \pm 0,0017$        | $0,1415 \pm 0,0019$       |
| O2     | zachodni rejon zbiornika   | $0,353 \pm 0,007$ | $30,9 \pm 1,1$   | $97,3 \pm 1,9$       | $0,0447 \pm 0,008$  | $0,260 \pm 0,005$ | $0,343 \pm 0,007$ | $0,0548 \pm 0,0010$       | $0,0627 \pm 0,0012$        | $0,0705 \pm 0,0013$       |
| O3     | północny rejon zbiornika   | $0,510 \pm 0,008$ | $39,8 \pm 1$     | $140,1 \pm 2,2$      | $0,0644 \pm 0,0010$ | $0,374 \pm 0,006$ | $0,481 \pm 0,008$ | $0,0790 \pm 0,0012$       | $0,0902 \pm 0,0014$        | $0,1015 \pm 0,0016$       |
| O4     | pół – wsch rejon zbiornika | $0,450 \pm 0,008$ | $31,3 \pm 1,1$   | $123,1 \pm 2,1$      | $0,0565 \pm 0,0010$ | $0,328 \pm 0,006$ | $0,413 \pm 0,008$ | $0,0693 \pm 0,0012$       | $0,0792 \pm 0,0013$        | $0,0891 \pm 0,0015$       |
| O5     | okolice wlotu              | $14,26 \pm 0,14$  | $2261 \pm 29$    | $4225 \pm 42$        | $1,86 \pm 0,02$     | $11,27 \pm 0,11$  | $17,4 \pm 0,2$    | $2,28 \pm 0,02$           | $2,60 \pm 0,03$            | $2,93 \pm 0,03$           |

### Brzeszcze

| Próbka | Opis                  | $f_1$             | $f_2$<br>[Bq/kg] | $Ra_{eq}$<br>[Bq/kg] | D<br>[μGy/h]        | $H_{ex}$          | $H_{in}$          | $E_{ff} d^1$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} dz^2$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} n^3$<br>[mSv/rok] |
|--------|-----------------------|-------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| OB1    | osad z okolic wlotu   | $8,31 \pm 0,08$   | $1414 \pm 18$    | $2464 \pm 24$        | $1,088 \pm 0,010$   | $6,58 \pm 0,06$   | $10,40 \pm 0,10$  | $1,335 \pm 0,013$         | $1,525 \pm 0,015$          | $1,716 \pm 0,016$         |
| OB2    | osad z okolic wylotu  | $0,847 \pm 0,009$ | $107,9 \pm 1,8$  | $239,5 \pm 2,7$      | $0,1091 \pm 0,0012$ | $0,640 \pm 0,007$ | $0,932 \pm 0,011$ | $0,1339 \pm 0,0015$       | $0,1530 \pm 0,0017$        | $0,1721 \pm 0,0019$       |
| OB3    | osad z okolic wylotu  | $7,41 \pm 0,14$   | $1164 \pm 28$    | $2193 \pm 41$        | $0,964 \pm 0,018$   | $5,85 \pm 0,11$   | $8,99 \pm 0,17$   | $1,18 \pm 0,02$           | $1,35 \pm 0,03$            | $1,52 \pm 0,03$           |
| OB4    | osad z okolic wylotu  | $8,92 \pm 0,09$   | $1458 \pm 19$    | $2646 \pm 26$        | $1,165 \pm 0,011$   | $7,06 \pm 0,07$   | $11,00 \pm 0,11$  | $1,428 \pm 0,014$         | $1,632 \pm 0,016$          | $1,836 \pm 0,018$         |
| OB5    | osad z okolic wylotu  | $1,815 \pm 0,018$ | $305,7 \pm 4,1$  | $533,3 \pm 5,3$      | $0,238 \pm 0,002$   | $1,426 \pm 0,014$ | $2,25 \pm 0,02$   | $0,291 \pm 0,003$         | $0,333 \pm 0,003$          | $0,375 \pm 0,004$         |
| OB6    | osad z okolic wylotu  | $3,71 \pm 0,04$   | $643,5 \pm 8,4$  | $1096 \pm 11$        | $0,487 \pm 0,005$   | $2,93 \pm 0,03$   | $4,67 \pm 0,05$   | $0,597 \pm 0,006$         | $0,682 \pm 0,007$          | $0,767 \pm 0,008$         |
| OB7    | obwałowanie zbiornika | $4,66 \pm 0,05$   | $710,6 \pm 9,4$  | $1379 \pm 14$        | $0,606 \pm 0,006$   | $3,68 \pm 0,04$   | $5,60 \pm 0,06$   | $0,743 \pm 0,008$         | $0,849 \pm 0,009$          | $0,955 \pm 0,010$         |
| OB8    | obwałowanie zbiornika | $21,20 \pm 0,27$  | $3588 \pm 58$    | $6295 \pm 80$        | $2,77 \pm 0,03$     | $16,81 \pm 0,21$  | $26,5 \pm 0,4$    | $3,40 \pm 0,04$           | $3,98 \pm 0,05$            | $4,37 \pm 0,06$           |
| OB9    | obwałowanie zbiornika | $7,36 \pm 0,07$   | $1196 \pm 15$    | $2176 \pm 21$        | $0,960 \pm 0,009$   | $5,81 \pm 0,06$   | $9,04 \pm 0,09$   | $1,178 \pm 0,011$         | $1,346 \pm 0,013$          | $1,514 \pm 0,015$         |
| OB10   | róg zbiornika         | $9,79 \pm 0,09$   | $1608 \pm 20$    | $2901 \pm 29$        | $1,279 \pm 0,013$   | $7,75 \pm 0,08$   | $12,09 \pm 0,12$  | $1,568 \pm 0,015$         | $1,792 \pm 0,018$          | $2,02 \pm 0,02$           |

| Próbka | Opis                        | $f_1$             | $f_2$<br>[Bq/kg] | $Ra_{eq}$<br>[Bq/kg] | D<br>[μGy/h]        | $H_{ex}$          | $H_{in}$          | $E_{ff} d^1$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} dz^2$<br>[mSv/rok] | $E_{ff} n^3$<br>[mSv/rok] |
|--------|-----------------------------|-------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| OB11   | zwałowisko skały<br>płonnej | $0,633 \pm 0,007$ | $49,3 \pm 1,0$   | $175,0 \pm 2,1$      | $0,0798 \pm 0,0009$ | $0,467 \pm 0,006$ | $0,600 \pm 0,007$ | $0,0979 \pm 0,0011$       | $0,1118 \pm 0,0013$        | $0,1258 \pm 0,0015$       |
| OB12   | zwałowisko skały<br>płonnej | $0,668 \pm 0,012$ | $53,7 \pm 1,3$   | $186,2 \pm 3,4$      | $0,0842 \pm 0,0015$ | $0,496 \pm 0,009$ | $0,641 \pm 0,011$ | $0,1033 \pm 0,0018$       | $0,118 \pm 0,002$          | $0,133 \pm 0,002$         |
| Km_B   | mułowiec                    | $0,727 \pm 0,009$ | $58,5 \pm 1,2$   | $203,7 \pm 2,5$      | $0,0916 \pm 0,0011$ | $0,542 \pm 0,007$ | $0,701 \pm 0,008$ | $0,1124 \pm 0,0013$       | $0,1284 \pm 0,0015$        | $0,1445 \pm 0,0017$       |
| Klm_B  | łupek mułowcowy             | $0,674 \pm 0,007$ | $56,7 \pm 1,0$   | $186,3 \pm 1,9$      | $0,0853 \pm 0,0009$ | $0,497 \pm 0,005$ | $0,650 \pm 0,008$ | $0,1046 \pm 0,0011$       | $0,1195 \pm 0,0012$        | $0,1344 \pm 0,0014$       |
| Kw_B   | węgiel                      | $0,279 \pm 0,005$ | $37,5 \pm 0,9$   | $80,7 \pm 1,4$       | $0,0359 \pm 0,0006$ | $0,215 \pm 0,004$ | $0,327 \pm 0,006$ | $0,0441 \pm 0,0008$       | $0,0504 \pm 0,0009$        | $0,0567 \pm 0,0010$       |
| Kp_B   | piaskowiec                  | $0,516 \pm 0,006$ | $29,7 \pm 0,8$   | $137,3 \pm 1,7$      | $0,0646 \pm 0,0008$ | $0,367 \pm 0,005$ | $0,447 \pm 0,006$ | $0,0792 \pm 0,0010$       | $0,0905 \pm 0,0011$        | $0,1019 \pm 0,0012$       |

<sup>1)</sup> – d – osoby dorosłe

<sup>2)</sup> – dz – dzieci

<sup>3)</sup> – n – niemowlęta

ND – brak danych do obliczeń

## **Omówienie wyników obliczeń**

1. W przypadku skał pobranych ze zwałowiska przyległego do zbiornika Brzeszcze, współczynnik  $f_1$  wynosi 0,279 – 0,727, a współczynnik  $f_2$  od 29,7 do  $58,5 \frac{Bq}{kg}$ .  
Oznacza to, że skały te mogą zostać wykorzystane do niwelacji terenów w obszarze zabudowanym i niezabudowanym, ale także jako materiał budowlany w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku skał ze zwałowiska w Kaniowie (współczynnik  $f_1$  wynosi od 0,103 do 0,901, zaś współczynnik  $f_2$  14 –  $85,9 \frac{Bq}{kg}$ ).
2. Wartości pozostałych wskaźników narażenia radiologicznego dla skał pobranych ze zwałowisk przyległych do zbiorników nie przekraczają wartości granicznych. W stosunku do osadów ich wartości są znacznie przekroczone na całym terenie zbiornika Kaniów. Podobna sytuacja ma miejsce w Rontoku Dużym, z wyłączeniem stref przybrzeżnych (co prawdopodobnie ma związek z dopływem wód słodkich). W pozostałych rejonach zbiornika obserwuje się przestrzenne wahania wartości wskaźników. Podobne zróżnicowanie występuje na całym obszarze zbiornika Brzeszcze z włączeniem stref przybrzeżnych.
3. W przypadku osadów pobranych ze zbiorników, współczynniki  $f_1$  i  $f_2$  w większości przypadków przekraczają wartości pozwalające na wykorzystanie ich jako materiały do niwelacji terenów w obszarach zabudowanych i niezabudowanych.
4. Osady ze zbiornika Brzeszcze mogą być wykorzystane w budowlach podziemnych – tunele drogowe i kolejowe ( $f_1 < 7$ ,  $f_2 < 2000 \frac{Bq}{kg}$ ).
5. Osady ze zbiornika Kaniów nie mogą być wykorzystane do żadnych robót budowlanych, zarówno naziemnych jak i podziemnych.
6. Osady denne ze zbiornika Rontok Duży wykazują podwyższone wartości wskaźników narażenia radiologicznego. Nie będzie można ich wykorzystać jako materiałów budowlanych. W przypadku rekultywacji terenu osady te będą stanowiły istotny problem z punktu widzenia ochrony radiologicznej.

## 12. Wnioski

Wykonane w trakcie realizacji pracy pomiary terenowe i laboratoryjne izotopów promieniotwórczych w wodzie, osadach, skałach i powietrzu atmosferycznym pozwalają na sformułowanie szeregu wniosków, z których kilkanaście zestawiono w poniższym tekście.

1. W ogólności poziomy promieniowania izotopów radu ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) w osadach dennych i otoczeniu zbiornika Brzeszcze są niższe od rejestrowanych dla zbiornika w Kaniowie. Kopalnie Brzeszcze i Silesia są położone stosunkowo blisko siebie i charakteryzuje je podobieństwo utworów geologicznych. Stąd wniosek, że za zróżnicowane aktywności radu odpowiedzialne są wody dopływające do wyrobisk wymienionych kopalń a następnie wypompowywanych na powierzchnię. Wykonane analizy składu izotopowego, stężenia trytu oraz stężenia jonów chlorkowych pozwoliły na ocenę pochodzenia wód. W przypadku kopalni Silesia (zrzucającej wody do zbiornika Kaniów) proporcje mieszania wód z różnych poziomów są stałe i od lat niezmiennie. Wody te zawierają niewielkie stężenie trytu co świadczy o tym, że w wodach z płytszych poziomów wydobywczych występuje niewielka domieszka wód współczesnych (możliwe, że wód pochodzenia opadowego: por. p.6). Pozostałą komponentę stanowią infiltracyjne wody reliktowe, prawdopodobnie wieku trzeciorzędowego. Wody z kopalni Brzeszcze charakteryzują się dużą zmiennością wszystkich wymienionych wcześniej parametrów. Wysokie stężenia trytu świadczą o dominującym udziale wód współczesnych w całkowitej masie wody zrzucanej przez tą kopalnię. Stąd, niższe aktywności izotopów w przypadku tego zbiornika są logicznie uzasadnione.

2. W zbiornikach Brzeszcze i Kaniów oraz w ich otoczeniu, zarówno aktywności izotopów uranu ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) jak i ołowiu  $^{210}\text{Pb}$  są niewielkie.

3. Na obecnym etapie badań wpływ zasolonych wód zbiornika Kaniów na jakość wód podziemnych w bezpośrednim sąsiedztwie jest niejednoznaczny. W dwóch piezometrach zlokalizowanych na północ od zbiornika, na kierunku spływu wód podziemnych w stronę Wisły stwierdzono podwyższone stężenia jonów chlorkowych i izotopów promieniotwórczych. Ich pochodzenie jest trudne do wyjaśnienia. Z jednej bowiem strony wydaje się, że po zakończeniu prac rekonstrukcyjnych zbiornik powinien być szczelny. Z

drugiej strony nie można wykluczyć ascenzji do piezometrów wód głębszego krążenia, silniej zmineralizowanych. Ten problem powinien być przedmiotem dalszych badań.

4. Analiza dostępnych danych archiwalnych w porównaniu z wynikami pomiarów aktywności  $^{226}\text{Ra}$  na wlocie do zbiornika Kaniów prowadzi do wniosku, że ok. 20 Bq tego izotopu zostaje usunięte z każdego litra wody pomiędzy miejscem jej dopływu do wyrobiska a zbiornikiem powierzchniowym. W ramach pracy nie było możliwe wykonanie pomiarów na drodze dopływu wód do podziemnych kolektorów (chodników wodnych) i w samych kolektorach. Niemniej szacowana aktywność przy uwzględnieniu rocznego dopływu wód do kopalni musi skutkować poważnym skażeniem w obrębie ścieków doprowadzających wody do chodników wodnych a także obszarów, w których składowane są osady pochodzące z okresowego czyszczenia chodników wodnych. Rząd wielkości aktywności  $^{226}\text{Ra}$  potencjalnie składowanej pod ziemią powinien wzbudzać także obawy co do aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  – izotopu pochodzącego z rozpadu  $^{226}\text{Ra}$ . Oczywiście, szkodliwość tego izotopu silnie zależy od intensywności wentylacji chodników. Niemniej jest to kolejny problem, który powinien być rozwiązany na drodze dodatkowych, szczegółowych badań w przyszłości. W świetle powyższego istotnym problemem jest zagrożenie radiologiczne dla osób pracujących przy czyszczeniu zbiorników wodnych i lokowaniu osadów w nieczynnych zrobach. Dla tych pracowników należało by ustalić dopuszczalną dawkę pochodzącą od promieniowania gamma i od radonu oraz określić wymóg posiadania osobistego dozymetru i ustalenia normy czasowej dla wykonywania tego rodzaju pracy biorąc pod uwagę zagrożenie radiologiczne.

5. Z niewiadomych na obecnym etapie badań powodów, stosunek aktywności  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$  w zbiorniku Brzeszcze i Kaniów jest bliski jedności. Jest to o tyle interesujące, że izotopy te pochodzą z dwóch różnych szeregów promieniotwórczych.

6. W oparciu o zmierzony skład izotopowy sporządzono bilans wodny zbiornika Brzeszcze. Wielkości głównych strumieni wodnych (wód zrzucanych przez kopalnię, parowania i opadów) a także mierzone stężenie jonów chlorkowych tworzą spójny układ dowodzący, że strumień parowania jest prawie w całości kompensowany ilością wód opadowych. Dla zbiornika Kaniów analogiczne podejście nie było możliwe, z uwagi na średni czas przebywania wody (rzędu 50 dni), zbyt krótki do osiągnięcia równowagi izotopowej wody z atmosferyczną parą wodną. Z tego powodu bilans wodny tego zbiornika określono na

podstawie stężenia chlorków. W wyniku obliczeń stwierdzono konieczność istnienia dodatkowego dopływu wód słodkich do zbiornika w ilości ok. 90 000 m<sup>3</sup> w skali roku. Z uwagi na topografię terenu można sformułować hipotezę, że może to być woda opadowa spływająca od strony hałdy skały płonnej. Niestety, eksperymentalne potwierdzenie tej hipotezy nie było możliwe z uwagi na utrudniony dostęp do zbiornika.

7. Pomiarы mineralogiczne wykazały obecność barytu w osadach badanych zbiorników. Obecność tego minerału odgrywa znaczną rolę w procesie współstrącania radu. Rezultaty analiz składu chemicznego wód oraz bilansu wodnego zbiorników Brzeszcze i Kaniów stały się podstawą do wykonania modelowania „wprost” procesu wytrącania barytu przy zastosowaniu programu Phreeqc ze zmodyfikowaną biblioteką termodynamiczną Pitzer.dat. Uwzględnienie okresu eksploatacji zbiorników i wyników obliczeń numerycznych umożliwiło oszacowanie rzędu wielkości aktywności <sup>226</sup>Ra zakumulowanej w osadach dennych. W przypadku zbiornika Brzeszcze aktywność ta może sięgać 5 GBq, natomiast w przypadku zbiornika Kaniów analogiczna wartość może wynosić nawet 200 GBq. Wyniki te wskazują na ogrom problemów, z którymi będzie trzeba się zmierzyć w trakcie rekultywacji terenów zbiorników w przyszłości.

8. Wyniki pomiarów aktywności <sup>222</sup>Rn w powietrzu atmosferycznym przy pomocy stacjonarnego detektora sprzężonego z aparaturą mierzącą podstawowe parametry meteorologiczne, usytuowanego na E od zbiornika Brzeszcze dowiodły wpływu zbiornika i zwałowiska skały płonnej na zawartość tego izotopu w powietrzu. Analiza danych pomiarowych prowadzi do wniosku, że spośród zmierzonych parametrów meteorologicznych, jedynie kierunek wiatru wydaje się mieć w tym przypadku decydujące znaczenie.

9. Pomiarы terenowe aktywności <sup>222</sup>Rn w powietrzu wykonane przyrządem PYLON AB-5 wykazały znaczne wartości w rejonie wlotów do wszystkich trzech zbiorników. Należy stwierdzić, że z punktu widzenia ochrony radiologicznej najkrótsze czasy przebywania dla ludzi szacowane są dla zbiornika Brzeszcze, gdzie w okolicach wylotu i zwałowiska czas ten nie powinien być dłuższy niż 1 godzina na dobę.

10. Wyniki pomiarów aktywności izotopów promieniotwórczych i pomiarów równoważników mocy dawek sugerują konieczność ustanowienia na obszarze zbiorników

stref ogrodzonych, skutecznie uniemożliwiających dostęp osób postronnych. Dotyczy to w całości strefy osadów zbiornika w Kaniowie oraz rejonu rury wlotowej wody do Rontoka Dużego.

11. Rezultaty pomiarów składu pierwiastkowego, uzyskane w ramach niniejszej pracy stanowią cenne źródło informacji o możliwości utylizacji osadów i skał po zakończeniu eksploatacji zbiorników. Na ich podstawie można stwierdzić, że skały ze zwałowisk zbiorników Brzeszcze i Kaniów można będzie spożytkować nawet w terenie zabudowanym. Osady zbiornika Brzeszcze można będzie wykorzystać jedynie w budowlach podziemnych. Największe problemy stanowić będą osady zbiornika Kaniów, które w świetle obowiązujących przepisów nie mogą być wykorzystane do żadnych celów. Osady zbiornika Rontok Duży również nie będą mogły być wykorzystane w charakterze materiału budowlanego. Rekultywacja tego terenu napotka zatem na poważne problemy.

### 13. Spis tabel i rysunków

#### Spis tabel:

- Tabela 1. Zestawienie wyników pomiaru aktywności prób stałych pobranych z osadnika Rontok Duży i jego najbliższych okolic. (dla porównania zamieszczono przedziały aktywności poszczególnych izotopów typowe dla skorupy ziemskiej)
- Tabela 2. Zestawienie wyników pomiaru aktywności prób wody pobranych z osadnika Rontok Duży.
- Tabela 3. Zestawienie wyników pomiaru aktywności wody i osadów pobranych z osadnika Bojszowy.
- Tabela 4. Aktywności prób osadów pobranych z osadników kopalni „Rymer” (Chałupnik 2004; 2005)
- Tabela 5. Charakterystyka utworów trzecio i czwartorzędowych w złożach KWK „Brzeszcze” i „Silesia”.
- Tabela 6. Charakterystyka warstw w złożu SILESIA i BRZESZCZE.
- Tabela 7. Zestawienie wyników analiz składu chemicznego wód zbiorników Kaniów (WK) Brzeszcze (WB) i Rontok Duży (WRD).
- Tabela 8. Zestawienie wyników pomiarów prób wody pobranych ze zbiornika Rontok Duży w ciągu 3 kampanii pomiarowych uzupełnione danymi Głównego Instytutu Górnictwa.
- Tabela 9. Zestawienie wyników pomiarów wody ze zbiorników Kaniów, Rontok Duży i Brzeszcze oraz z ich najbliższych okolic: a) zbiornik Kaniów, b) zbiornika Rontok Duży, c) zbiornik Brzeszcze.
- Tabela 10. Zestawienie wyników analizy pierwiastkowej osadów (wybrane pierwiastki) wykonanej na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w g/kg.
- Tabela 11. Wartości dopuszczalne ilości metali ciężkich w wierzchniej warstwie gruntu (0 – 25cm), przy zastosowaniu komunalnych osadów ściekowych do rekultywacji terenu na cele pozarolnicze w zależności od rodzaju gruntów: a – lekkie, b- średnie, c- ciężkie.
- Tabela 12. Zawartość wybranych minerałów w badanych próbach osadów zmierzone przez laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Tabela 13. Zawartość baru w próbkach osadów w [g/kg] oznaczona przez laboratorium EkotechLAB i laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Tabela 14. Wyniki pomiarów analiz spektrometrycznych prób osadów.
- Tabela 15. Zestawienie parametrów statystycznych dla osadów.
- Tabela 16. Wyniki pomiarów naturalnej promieniotwórczości skał ze zwałowisk przyległych do zbiorników retencyjno – dozujących.
- Tabela 17. Zestawienie dopływów wód dołowych do kopalni Brzeszcze.
- Tabela 18. Wyniki obliczeń programem PHREEQC dla próby WB1 pobranej w dniu 25.07.2013, oraz wody WB1<sub>MAX</sub> odpowiadającej najwyższemu

zaobserwowanemu w okresie badań stężeniu chlorków (szczegóły – patrz tekst).

- Tabela 19. Zestawienie bilansu wody w zbiorniku Brzeszcze.
- Tabela 20. Wyniki modelowania „wprost” zmienności stężenia jonów  $Ba^{2+}$  wskutek wytrącania barytu w wodzie zbiornika Brzeszcze oraz ocena aktywności  $^{226}Ra$  zmagazynowanego w osadach tego zbiornika w całym okresie jego eksploatacji.
- Tabela 21. Zestawienie bilansu wody w zbiorniku Kaniów.
- Tabela 22. Wyniki obliczeń programem PHREEQC dla próby wody wlotowej z Kaniowa (szczegóły – patrz tekst).
- Tabela 23. Wyniki modelowania wprost zmienności stężenia jonów  $Ba^{2+}$  (mol/l) wskutek wytrącania barytu w wodzie zbiornika Kaniów oraz ocena aktywności  $^{226}Ra$  zmagazynowanego w osadach tego zbiornika w całym okresie jego eksploatacji.
- Tabela 24. Współczynniki rozdziału dla radu  $^{226}Ra$  w osadach zbiorników Kaniów i Brzeszcze wraz z wartościami literaturowymi.
- Tabela 25. Średnie aktywności właściwe  $^{222}Rn$  w obrębie doby dla poszczególnych miesięcy okresu pomiarowego.
- Tabela 26. Parametry statystyczne opisujące wyniki pomiarów aktywności radonu  $^{222}Rn$  w powietrzu atmosferycznym.
- Tabela 27. Zestawienie wyników pomiarów stężeń  $^{222}Rn$  w powietrzu atmosferycznym w okolicach zbiornika retencyjno – dozującego wody słonej Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia” Kaniów w dniach 5 i 6.05.2012.
- Tabela 28. Zestawienie wyników pomiarów stężeń  $^{222}Rn$  w powietrzu atmosferycznym w okolicach byłego zbiornika retencyjno – dozującego wody słonej Kopalni Węgla Kamiennego „Silesia” Rontok Duży w dniach 28.12.2011 oraz 18, 19 i 20.03.2012.
- Tabela 29. Zestawienie wyników pomiarów stężeń  $^{222}Rn$  w powietrzu atmosferycznym w okolicach zbiornika retencyjno – dozującego wody słonej Kopalni Węgla Kamiennego „Brzeszcze” Brzeszcze w dniach 14, 18, 19 i 21.11.2011 oraz 7.12.2011.
- Tabela 30. Zestawienie wyników pomiarów aktywności radonu  $^{222}Rn$  w zależności od miejsca.
- Tabela 31. Zestawienie wyników obliczeń równoważników dawki pochodzących od radonu  $^{222}Rn$ .
- Tabela 32. Szacowany czas bezpiecznego przebywania (w godz/dobę) dla ogółu ludności w najbliższym otoczeniu zbiorników kopalnianych Kaniów, Brzeszcze i Rontok Duży
- Tabela 33. Moc dawki ekspozycyjnej<sup>1</sup> (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu R/h$ ] w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych w okolicy zbiornika retencyjno – dozującego Brzeszcze oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma (27.12.2009) – A oraz przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma w punktach pomiarowych zlokalizowanych na zwałowisku skały płonnej przyległym do zbiornika retencyjno – dozującego Brzeszcze (28.06.2012) – B.

- Tabela 34. Średnia moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu\text{R/h}$ ] w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych w okolicy zbiornika retencyjno – dozującego Kaniów oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma zmierzony 14.04.2009, 27.12.2009 oraz 09.04.2012.
- Tabela 35. Moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu\text{R/h}$ ] w wybranych punktach pomiarowych zlokalizowanych w okolicach zbiornika retencyjno – dozującego Kaniów i na zwałowisku skały płonnej w jego sąsiedztwie oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma (09.04.2012).
- Tabela 36. Średnia Moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu\text{R/h}$ ] w wybranych punktach pomiarowych oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma zmierzony 19, 20, 21.06.2008 (Śleziak, 2008).
- Tabela 37. Moc dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1 m nad ziemią  $X^*$  [ $\mu\text{R/h}$ ] w wybranych punktach pomiarowych w okolicach zbiornika Rontok Duży i na zwałowisku skały płonnej zlokalizowanej w jego sąsiedztwie oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma (28. 12. 2011)
- Tabela 38. Przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma w bezpośrednim sąsiedztwie zbiorników Kaniów, Rontok Duży i Brzeszcze.
- Tabela 39. Wskaźniki narażenia radiologicznego dla osadów i skały płonnej zbiorników retencyjno – dozujących.

### Spis rysunków:

- Rys.1. Obszary górnicze kopalń Brzeszcze i Silesia.
- Rys.2. Schemat odwadniania kopalni Silesia.
- Rys.3. Zbiornik Brzeszcze, widok przed podwyższeniem obwałowań (ze zbiorów autorki).
- Rys.4. Zbiornik Rontok Duży, widok ogólny od strony byłego wlotu (ze zbiorów autorki).
- Rys.5. Zbiornik Kaniów, widok ogólny od strony wlotu (ze zbiorów autorki).
- Rys.6. Punkty poboru prób wody i osadów A – zbiornik Kaniów, B – zbiornik Rontok Duży, C – Zbiornik Brzeszcze. Czerwonymi symbolami oznaczono miejsca poboru osadów, czarnymi – punkty poboru wody, zielonymi – studnie i piezometry.
- Rys.7. Przykładowa zależność częstości zliczeń od czasu dla próby wody.
- Rys.8. Przykładowa zależność częstości zliczeń od czasu wraz z dopasowanymi liniami trendu.
- Rys.9. Widmo pomiarowe uranu zebrane przez spektrometr promieniowania alfa.
- Rys.10. Schemat linii do laboratoryjnej preparatyki próbek wody do pomiaru składu izotopowego wodoru
- Rys.11. Schemat linii do pomiaru wartości  $\delta^{18}\text{O}$  w próbkach wody.  
(<http://www.fis.agh.edu.pl/~gorczyca/spec2.pdf>)

- Rys.12. Typowe składy izotopowe wód obszaru Polski (Zuber, 2007; Labus, 2003; Pluta, 2011)
- Rys.13. Skład izotopowy wody w zbiornikach Brzeszcze, Kaniów i Rontok Duży.
- Rys.14. Zależność między izotopami radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  dla zbiornika Kaniów.
- Rys.15. Zależność między izotopami radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  dla zbiornika Brzeszcze.
- Rys.16. Zależność aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  od stężenia jonów chlorkowych  $\text{Cl}^-$  dla zbiornika Brzeszcze.
- Rys.17. Zależność aktywności radu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  od stężenia jonów chlorkowych  $\text{Cl}^-$  dla zbiornika Kaniów.
- Rys.18. Skład izotopowy wody na poszczególnych poziomach kopalni Silesia (Pluta i in., 1996) oraz wody zrzucanej do zbiornika Kaniów (oznaczonej jako wlot).
- Rys.19. Zależność między składem izotopowym tlenu i stężeniem jonów chlorkowych w wodach kopalni „Silesia”.
- Rys.20. Zależność aktywności  $^{226}\text{Ra}$  od stężenia jonów chlorkowych w wodach kopalni „Silesia”.
- Rys.21. Przykładowe widmo (dla próby OR1) analizy fluorescencyjnej.
- Rys.22. Kolejno: a) piaskowiec, b) iłowiec, c) łupek mulisty z warstwami zdeintegrowanego działaniem wody iłowca, d) łupek ilasty (za zbiorów autorki).
- Rys.23. Porównanie wyników oznaczeń stężenia baru w próbach osadów wykonanych przez laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrologii i Geochemii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz EkotechLAB.
- Rys.24. Detektor HPGe – górna osłona otwarta (ze zbiorów autorki).
- Rys.25. Przykładowe widmo promieniowania gamma próbki osadu wraz z pikiem 609,4 keV pochodzącym od bizmutu  $^{214}\text{Bi}$ .
- Rys.26. Wyniki analiz spektrometrycznych prób osadów pobranych ze zbiorników Kaniów i Brzeszcze.
- Rys.27. Relacja pomiędzy składem izotopowym tlenu i stężeniem chlorków w wodach zbiornika Brzeszcze.
- Rys.28. Struktura usuwania wód dołowych z kopalni Brzeszcze. Czerwonymi cyframi przy odpowiednich poziomach zaznaczono temperaturę wody wyznaczoną w oparciu o stopień geotermiczny równy 33m (Poradnik Górnika, 1959). Temperatury przypisane strzałkom są średnimi ważonymi udziałem wód z poszczególnych poziomów w strumieniu wypompowywanej wody. Ilości wód ujmowanych na poszczególnych poziomach ( $\text{m}^3/\text{min}$ ) oznaczono czarnymi cyframi.
- Rys.29. Średnie miesięczne temperatury powietrza mierzone w Krakowie w okresie 1975-2011 (GNIP – database).
- Rys.30. Przebieg stężenia trytu w wodzie mierzony na wlocie i wylocie zbiornika Brzeszcze.
- Rys.31. Schemat blokowy urządzenia do ciągłego pomiaru radonu w powietrzu atmosferycznym UNI-Heidelberg (Manual for the Radon Monitor, 2000).
- Rys.32. Aktywność radonu  $^{222}\text{Rn}$  zarejestrowana w okresie pomiarowym.
- Rys.33. Średnie dobowe aktywności właściwe radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym

- zachodniej części obszaru górniczego KWK Brzeszcze.
- Rys.34. Dobowe przebiegi zmienności aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$ .
- Rys.35. Lokalizacja monitora radonowego (ze zbiorów autorki).
- Rys.36. Zależność aktywności radonu od wybranych parametrów meteorologicznych
- Rys.37. Zależności średnich wartości aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w od parametrów meteorologicznych.
- Rys.38. Lokalizacja miejsca pomiaru w stosunku do położenia zbiornika retencyjno – dozującego oraz KWK „Brzeszcze”.
- Rys.39. Zależność aktywności właściwej radonu  $^{222}\text{Rn}$  od kierunku wiatru w A - listopadzie, B - grudniu i C – styczniu.
- Rys.40. Terenowy pomiar radonu (fot. ze zbiorów autorki)
- Rys.41. Punkty pomiaru aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$ , zbiorniki A – Kaniów, B – Rontok Duży i C – Brzeszcze.
- Rys.42. Radiometr Ludlum Model 19 ([www.ludlums.com](http://www.ludlums.com))
- Rys.43. Punkty pomiaru mocy dawki promieniowania gamma A – zbiornik Kaniów, B – zbiornik Brzeszcze, C – zbiornik Rontok Duży. Czerwone symbole oznaczają punkty wokół zbiorników, zielone zaś na zwałowiskach skały płonnej.

## 14. Bibliografia

- Atlas Klimatu Polski, 2005. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, (Lorenc H., red.): str. 116.
- Arbuzow S. I., Rihwanow L.I. 2009. Geochemia pierwiastków Radioaktywnych; Tomski Państwowy Uniwersytet, Tomsk (w j. rosyjskim).
- Be M. M., Chiste V., Dulieu C. 2004. Le Radium 226 et ses Descendants. Tables et Commentaires. Note technique LNHB/04 – 04. Laboratoire National Henri Becquerel. France
- Beneš P. and Strejc P., 1984. Interaction of radium with freshwater sediments and their mineral components. I. Ferric Hydroxide and Quartz. J. Radioanal. Nucl. Chem., 88/2: 275–285
- Beneš P. and Strejc P., 1985. Interaction of radium with freshwater sediments and their mineral components. II. Kaolinite and Montmorillonite. J. Radioanal. Nucl. Chem., 89/2: 339–351
- Beneš P. and Strejc P., 1986. Interaction of radium with freshwater sediments and their mineral components. III. Muscovite and Feldspar. J. Radioanal. Nucl. Chem., 98(1): 91 – 103.
- Beneš P. and Strejc P., 1986. Interaction of radium with freshwater sediments and their mineral components. IV. Waste water and riverbed sediments. J. Radioanal. Nucl. Chem., 99(2): 407-422.
- Beretka J., Mathew P.J., 1985. Natural radioactivity of Australian building materials. Industrial wastes and by-products Health Physics, 48: 87–95
- Bernat M., Goldberg E., 1969. Thorium isotopes in the marine environment. Earth and Planetary Science Letters, 5: 308 – 312
- Bończyk M.; 2013. Oznaczanie stężenia izotopu  $^{210}\text{Pb}$  w próbkach stałych dla potrzeb oceny zagrożenia radiacyjnego występującego w kopalniach. J. Sustainable Mining Vol. 12, No 2, str. 1
- Canberra, 2002. Detector Specifications and Performance Data – Model GX4020 – 7915.30, S/N b 01010.
- Carbo – Techmex, 2002. Operat wodno prawny gospodarki wodno – ściekowej KWK „Brzeszcze” (Mizera A. opracowanie), Katowice
- Carbo – Techmex, 2004. Raport o oddziaływaniu na środowisko do wniosku Kopalni Węgla Kamiennego „Brzeszcze” o udzielenie koncesji na wydobywanie węgla ze złoża „Brzeszcze”. Katowice
- Carbontechmex, 2000. Ochrona Wisły przed zasoleniem – adaptacja części osadnika mułów popłuczkowych w Kaniowie na zbiornik retencyjno – dozujący wód słonych KWK „Silesia”. Tom I: Część ogólna, Zeszyt 1: Część opisowa. Katowice
- Carbontechmex, 2000. Ochrona Wisły przed zasoleniem – adaptacja części osadnika mułów popłuczkowych w Kaniowie na zbiornik retencyjno – dozujący wód słonych KWK „Silesia”. Tom V: Opracowanie związane z projektem budowlanym zbiornika, Zeszyt 7: Operat do dochodzeń wodno prawnych. Katowice

- Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o.o.; 2010, 2011, 2012, 2013. Sprawozdania z badań: Nr 3547/SL/10, Nr 4026/SL/11, Nr 6708/ZL/12, Nr 6809/ZL/13. Łódź
- Chałupnik St., Aguado J.; 2004. Radium leaching from mine deposits and other materials; NORM IV, Szczyrk, Polska
- Chałupnik St.; 2005. Wtórne wymywanie radu z osadów kopalnianych (Leaching of radium from mine sediments); Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa; 2/2005 Katowice: 84 - 93
- Chałupnik St.; 2007. Rad w wodach kopalń węgla kamiennego na Górnym Śląsku – metody badań, ocena wpływu na środowisko, zapobieganie skażeniom; Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa; No 870; Katowice,
- Chau N. D., Niewodniczański J., Dorda J., Ochoński A., Chruściel E., Tomza I.; 1997. Determination of radium isotopes in mine waters through alpha – and beta – activities measured by liquid scintillation spectrometry; Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.222.
- Chau N.D., Chwiej T., Chruściel E.; 2001.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in some water samples of mines. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry; 250(2): 387 – 390.
- Chau N. D., Chruściel E.; 2002. Oznaczanie izotopów radu w promieniotwórczych wodach podziemnych i powierzchniowych techniką spektrometrii  $\alpha/\beta$  z ciekłym scyntylatorem; Technika jądrowa w przemyśle, medycynie, rolnictwie i ochronie środowiska, Raporty IchTJ, Warszawa.
- Chau N. D., Nowak J.; 2009. Jednoczesne oznaczanie izotopów radu i ołowiu w próbkach wody. [W:] V Krajowa Konferencja Radiochemii i Chemii Jądrowej, Kraków – Przegorzały, 24 – 27 maja 2009 – Streszczenia. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej; Warszawa: 25.
- Chau N. D.; 2010. Promieniotwórczość naturalna wybranych wód mineralnych Karpat Polskich, Wydawnictwo JAK, Kraków.
- Chu S.Y.F., Ekstrom L.P., Firestone R.B., 1999. The Lund/LBNL Nuclear Data Search. Version 2.0, www. Version. Berkeley, USA, Lund University, Sweden.
- Cothorn C.R., Smith J.E. Jr., 1987. Environmental Radon, Environmental Science Research, Volume 35, Plenum Press, New York
- Craig H. and Gordon L.I., 1965. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: Tongiorgi E (ed) Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures. Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa: 9–130.
- Environmental Protection Agency, 2004. Understanding variation in partition coefficient,  $K_d$ , values. Volume III: Review of Geochemistry and Available  $K_d$  Values for Americium, Arsenic, Curium, Iodine, Neptunium, Radium, and Technetium. Washington
- Epstein S., Mayeda T., 1953. Variation of  $^{18}\text{O}$  content of water from natural sources. Geochim. Et Cosmochim. Acta, 4: 213.
- European Commission. 1999. Radiation Protection 112: Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Directorate – General Environment. Nuclear Safety and Civil Protection.

- Florkowski T., Grabczak J., 1973. Scyntylnacyjne pomiary naturalnego trytu w próbkach wody. Raport Nr 36/I, Instytut Techniki Jądrowej AGH, Kraków.
- Fritz P., Fontes J.Ch., 1980. Introduction in: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Volume 1: The Terrestrial Environment A. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam: 2 – 7.
- Gat J. R. and Bowser C., 1991. The heavy isotope enrichment of water in coupled evaporative systems. in Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. Special Publication No. 3, (A. A. Levinson, Ed.), The Geochemical Society, Calgary: 159–169.
- Geffroy J., Sarci J.A., 1960. Premiere Partie: Les Minerais Noirs in Les Minerais Uraniferes Francais et leurs gisements. Institut National des Sciences et Techniques Nucleaires, Presses Universitaires de France: 9.
- Główny Instytut Górnictwa, 1998. Studium programowo – przestrzenne na adaptację zbiornika Rontok Duży w Rudolowicach oraz części osadnika mułów popłuczkowych w Kaniowie na zbiorniki retencyjno – dozujące wód słonych. II.3. Ocena hydrogeologiczna zbiornika Rontok Duży oraz jego otoczenia wraz z badaniami modelowymi funkcjonowania jako zbiornika retencyjno – dozującego o niezbędnej wielkości dla ustalonych możliwości chłonnych rzeki Wisły, Katowice
- Główny Instytut Górnictwa, 2000. Operat wodno prawny na odprowadzanie wód pochodzących z odwadniania KWK „Silesia” do wód powierzchniowych. Katowice
- Główny Instytut Górnictwa; 2009, 2010. Wyniki analizy promieniotwórczości wód: Raporty nr: R/53/09, R/55/2009, R/86/2010 oraz R/88/2010. Katowice
- Główny Instytut Górnictwa; 2009, 2010. Wyniki analizy spektrometrycznej: Raport nr S/2/09 i Raport nr S/12/2010. Katowice
- Gonfiantini R., 1986. Environmental isotopes in lake studies. In: Fritz P, Fontes JC (eds) Handbook of environmental isotope geochemistry, volume 2. The terrestrial environment, B. Elsevier, Amsterdam: 113–168.
- Górnicza Izba Przemysłowo – Handlowa, 2002. Wody dołowe. Poważny problem. Biuletyn Górniczy Nr 7 – 8, 2002r. Katowice (wersja internetowa).
- Harat A., Grmela A., 2008. Wpływ wód kopalnianych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego na zmiany jakości wody w rzece Olza w latach 2000 – 2007. Monitoring Środowiska Przyrodniczego nr 9, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce: 57 – 62.
- Harbeck, G. E. J., 1962. A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-447 transfer theory. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 272-E: 101–105.
- Ibragimow Sz. Z. 2008; Geofizyka jądrowa; Kazański Państwowy Uniwersytet; Kazań (w j. rosyjskim)
- Jodłowski P.; 2005. Spektrometria promieniowania gamma prób środowiskowych nuklidy promieniotwórcze w środowisku przyrodniczym Górców, Kraków
- Justus C. G. and Mikhail A., 1976. Height variation of wind speed and distribution statistics, Geophys. 452 Res. Lett., 3(5): 261–264.
- Karwasiecka M., 2001. Pole cieplne Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Proc. International Sci. Conference „Geothermal Energy in Underground Mines”, November 21-23, 2001, Ustroń, Poland: 41-49.

- Kendall C., Coplen T. B., 1985. Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination, *Anal. Chem.* 57: 1437 – 1440.
- Kierepko R., 2003. Próba oceny skażenia środowiska spowodowanego odprowadzaniem wód kopalnianych na powierzchnię na przykładzie zbiornika Rontok. Kraków.
- Kronfeld J., 1974. Uranium deposition and  $^{234}\text{Th}$   $\alpha$  recoil: An explanation extreme  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  fraction within the Trinity aquifer. *Earth and Planetary Science Letters*, 21: 327 – 330.
- Kuc T., Grabczak J., 2005. Elektrolityczne wzbogacanie izotopowe próbek wody w pomiarach ciekłoscyntylacyjnych. Krajowe Sympozjum: Technika Jądrowa w Przemysle, Medycynie, Rolnictwie i Ochronie Środowiska. Kraków
- Labus K., 2003. Chemizm i pochodzenie wód kopalnianych w południowo – zachodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, *Prace Geologiczne* 151, Wydawnictwo PAN, Kraków.
- Lebecka M., Mielnikow A., Chałupnik St., Skubacz K.; 1992. Liquid scintillation counting of  $^{210}\text{Pb}$  in grass and soil. [W:] Noakes J.E., Schonhofer F., Polach H.A. (red), *Liquid Scintillation Spectrometry 1992*, *RADIOCARBON*: 455 – 459.
- Ludlum Measurements Inc., 2005: Ludlum Model 19 Micro R Meter Manual, Texas
- Łuciw P., Czuczvara P., Luszka A., Niezabitowska A., Matusiak K., Niżborski M., 2012. Miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego gminy Brzeszcze w rejonie ulicy Ofiar Oświęcimia. Prognoza oddziaływania na środowisko. Geoplan, Wrocław: str. 38.
- Majoube M., 1971. Fractionnement en oxygen-18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur; *J. Chem. Phys.* 68: 1423-1436.
- Manual for the Radon Monitor, developed at the Institute fur Umweltphysik, University of Heidelberg, 2000, Heidelberg
- Michalik B., Chałupnik St., Wysocka M., Skubacz K. 2002. Ecological problems of the coal industry and the ways to solve them; *Journal of Mining Science*; Vol. 38; No. 6,.
- Michalik B., Chałupnik St., Wysocka M., Skubacz K., Mielnikow A., Trząski L. 2005. Contamination caused by radium discharged with mine effluents into inland waters; *Radioprotection*, Supplement 1; vol. 40: 503 – 509.
- Niesmiejano An. N. 1975; *Radiochemia*, PWN, Warszawa.
- Państwowa Agencja Atomistyki, 1998, Protokół nr DJ/118, K/98 z kontroli w zakresie ochrony radiologicznej zarządzanej przez Głównego Inspektora Dozoru Jądrowego. Czechowice – Dziedzice
- Państwowa Agencja Atomistyki, 2011. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki i ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2010r. , PAA, Warszawa.
- Parkhurst, D.L., Appelo C.A.J., 1999. User's Guide to PHREEQC (Version 2) – A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. US Geol. Surv. Water-Resour. Invest. Rep. 99-4259, USGS.
- Pluta I., Tomza I., Pluta T., 1990. Determination of  $^{238}\text{U}$  and  $^{234}\text{U}$  isotopes in water by liquid scintillation counting, *Nuclear Geophysics*, 4(4): 489 – 492.

- Pluta I., Wątor L., Zuber A.; 1996. Pochodzenie solanek Kopalni Silesia w świetle badań izotopowych i hydrochemicznych, Problemy Hydrogeologiczne Południowo – Zachodniej Polski, Wrocław: 305 – 312
- Pluta I., 2011. Hydrogeochemia utworów karbonu obszarów górniczych południowej części Górnośląskiego zagłębia Węglowego. Katowice: 135 – 140.
- Poradnik Górnika Tom II/2, 1959. Wydawnictwo Górniczo – Hutnicze (Gisman St., red.), Katowice str. 1169
- PROGEO Sp. z o.o., 1998. Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z wydobywaniem kopaliny ze złoża węgla kamiennego KWK „Silesia”. Część I: Tekst. Katowice
- Przylibski T. 2010, Radon i promieniowanie jonizujące w obiektach podziemnych w czasie prac eksploatacyjnych, dokumentacyjnych i udostępniających, Wrocław
- Pylon Electronic Inc.; 2002. Pylon<sup>®</sup> Model AB-5 / AB-5R portable radiation monitor. Instruction Manual. Revision 6. Central Canada Region.
- Radiologiczny Atlas Polski 2005, 2006. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej. Warszawa.
- Rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 14 czerwca 2002r w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz. U. 2002 nr 94 poz. 841)
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. 2010 nr 137 poz. 924)
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2.01.2007 w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu <sup>40</sup>K, radu <sup>226</sup>Ra, toru <sup>228</sup>Th w surowcach i materiałach budowlanych przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie, oraz kontroli zawartości tych izotopów (Dz. U. 2007 nr 4 poz. 29)
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18. Stycznia 2005r w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz. U. 2005 nr 20 poz. 168)
- Róžański K., Froehlich K. and Mook W., 2001. Surface water, in Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principals and applications. Volume III. IHP-V. Technical Documents in Hydrology, vol. 111, (W. G. Mook, Ed.), UNESCO/IAEA, Paris: pp. 117.
- Smoliński A. 2006. Gospodarka zasolonymi wodami kopalnianymi, Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, 1/2006, Katowice: 5 – 15
- Szperliński Z., 2002. Chemia w ochronie i inżynierii środowiska. Cz. I, Cz. II i III, OWPW, Warszawa
- Śleziak M.; 2008. Ocena zagrożenia radiacyjnego pochodzącego od zbiornika odpadów poprodukcyjnych Rontok Duży, Kraków
- Tomza I.; 1975. Determination of low radium concentration in mineralized Waters [W:] Proceedings of International Conference on Low Radioactivity Measurements and Applications, 6 – 10 October 1975, The High Tatras, Czechoslovakia. Comenius University, Bratislava: 387 – 390.
- Uchwała Rady Ministrów nr 219 z dnia 29 października 2002 r. w sprawie krajowego planu gospodarki odpadami (M.P. z 2003 r. nr 11, poz. 159)

- UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, New York, USA.
- WASKO, 1995. Ocena oddziaływania na środowisko KWK "Silesia" w związku z wydobywaniem kopalin ze złóż, Gliwice
- Witkowska E., 2003: Zawartość radonu w powietrzu, jego pochodzenie, pomiary, obniżanie stężenia. Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa
- Yu, K. N., Guan, Z. J., Stokes, M. J., & Young, E. C. M. (1992a). The assessment of the natural radiation dose committed to the Hong Kong people. *Journal of Environmental Radioactivity*, 17: 31 – 48.
- Zapotoczna – Sytek G., Mamont – Cieślak K., Rybarczyk T., 2012. Naturalna promieniotwórczość wyrobów budowlanych, w tym autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), *Przegląd Budowlany* 7 – 8/2012
- Zuber A., Ciężkowski W., 2007. Hydrogeologia regionalna Polski. Tom I: Wody słodkie, Część pierwsza: 2. Typy genetyczne i chemiczne wód podziemnych: Poglądy ośrodka krakowskiego. Państwowy Instytut Geologiczny (Paczynski B., Sadurski A., red), Warszawa
- Zuber A., 2007. Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [http://www.kwsa.pl/o\\_firmie/oddzialy/Oddzia%C5%82+KWK+%22Brzeszcze%22](http://www.kwsa.pl/o_firmie/oddzialy/Oddzia%C5%82+KWK+%22Brzeszcze%22) – strona internetowa Kompani Węglowej SA
- <http://www.fis.agh.edu.pl/~gorczyca/spec2.pdf>
- <http://www.univie.ac.at/cartography/project2/wiser/index.php> - GNIP database

## 15. Załączniki cyfrowe.

- Z1. Parametry meteorologiczne zarejestrowane w okresie pomiarowym (11.2011 - 01.2012): a) listopad, b) grudzień, c) styczeń.
- Z2. Rejestrowane aktywności radonu  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym a) listopad, b) grudzień, c) styczeń.
- Z3. Wyniki pomiarów mocy dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1m nad ziemią X [uR/h] w wybranych punktach pomiarowych w okolicy zbiornika Rontok Duży wraz z wartością średnią oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma a) 19.06.2008, b) 20.06.2008, c) 21.06.2008.
- Z4. Wyniki pomiarów mocy dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1m nad ziemią X [uR/h] w wybranych punktach pomiarowych w okolicy zbiornika Rontok Duży, z wartością średnią oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma.
- Z5. Wyniki pomiarów mocy dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1m nad ziemią X [uR/h] w wybranych punktach pomiarowych w okolicy zbiornika Kaniów, z wartością średnią oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma a) 14.4.2009, b) 27.12.2009, c) 9.04.2012.
- Z6. Wyniki pomiarów mocy dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1m nad ziemią X [uR/h] w wybranych punktach pomiarowych w okolicy zbiornika Brzeszcze wraz z wartością średnią oraz odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma a) 27.12.2009 - okolice zbiornika, 28.06.2010 – zwałowisko.
- Z7. Wyniki pomiarów mocy dawki ekspozycyjnej (w powietrzu) 1m nad ziemią X [uR/h] w wybranych punktach pomiarowych na terenie niezanieczyszczonym odpowiadający jej przestrzenny równoważnik mocy dawki promieniowania gamma a) Osiek - 26.12.2009, b) Osiek - 27.12.2011, c) Grzawa - 26.12.2009.