

CZYNNIKI WARUNKUJĄCE ZMIENNOŚĆ SKŁADU FAZY GAZOWEJ SKŁADOWISKA ODPADÓW KOMUNALNYCH W OTWOCKU

FACTORS CONTROLLING CHANGES OF GAS COMPOSITION WITHIN THE OTWOCK LANDFILL

DOROTA POROWSKA¹, TOMASZ GRUSZCZYŃSKI¹

Abstrakt. Badania prowadzone na zrehabilitowanym składowisku odpadów komunalnych w Otwocku wykazały aktywność procesów związanych z biochemicznymi przemianami substancji organicznej. Jednym z produktów tych przemian jest mieszanina gazów, określana jako gaz składowiskowy. Prace badawcze prowadzono w celu identyfikacji czynników decydujących o czasowym i przestrzennym zróżnicowaniu składu fazy gazowej składowiska. Uzyskane wyniki pomiarów tlenu, dwutlenku węgla i siarkowodoru analizowane na tle warunków klimatycznych wskazują, że produkcja biogazu składowiskowego zależy głównie od stosunków wilgotnościowych panujących w bryle składowanych odpadów. Istotne znaczenie mają także temperatura i odczyn środowiska oraz skład zdeponowanego materiału.

Słowa kluczowe: dwutlenek węgla, siarkowodór, model Thorntwaite'a, składowisko odpadów komunalnych.

Abstract. The field research conducted at the municipal landfill in Otwock (after reclamation) indicated that biochemical processes are still active and landfill gas (biogas) is being generated. The objective of this study was to identify the factors controlling temporal and lateral variation in concentration of landfill gas. Measurement of oxygen, carbon dioxide and hydrogen sulphide, analysed with regard to climatic conditions indicated that biogas formation strongly depended on moisture content in the landfill body. Temperature, pH of environment and composition of refuses also play some role in controlling changes of gas composition.

Key words: carbon dioxide, hydrogen sulphide, Thorntwaite model, municipal landfill.

WSTĘP

Gaz składowiskowy powstaje w wyniku oddziaływania szeregu czynników na zdeponowany na składowisku materiał. Spośród czynników naturalnych najistotniejsze znaczenie w procesie powstawania biogazu mają wysokość i częstotliwość opadów, temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne oraz warunki hydrogeologiczne, a zwłaszcza położenie zwierciadła wody i wykształcenie litologiczne strefy przypowierzchniowej (Farquhar, Rover, 1973). Ważny element stanowi również rodzaj składowanych odpadów i okres, w którym zachodzą procesy rozkładu w zdeponowa-

nym materiale. Wymienione czynniki tworzą skomplikowany układ powodujący czasowe i przestrzenne zróżnicowanie składu powstającego biogazu. Produkty przemian mikrobiologicznych rozpuszczone w wodach infiltracyjnych tworzą strumień masy na wejściu do systemu wodonośnego, przez co stanowią potencjalne zagrożenie jakości wód podziemnych.

Obiektem badań było zrehabilitowane składowisko odpadów komunalnych zlokalizowane w zachodniej części Otwocka. Wcześniejsze badania w otoczeniu składowiska (Gruszczyński, 2003) wykazały dopływ zanieczyszczeń do

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: dorotap@uw.edu.pl, tgruszcz@uw.edu.pl

wód podziemnych, przy czym proces ten charakteryzuje się zmiennym w czasie natężeniem. Badania prowadzono w celu identyfikacji czynników decydujących o czasowym

i przestrzennym zróżnicowaniu przemian mikrobiologicznych w bryle składowiska, na podstawie analizy składu fazy gazowej.

METODY BADAŃ

BADANIA TERENOWE

Pomiary zawartości gazów powstających na składowisku wykonano pięciokrotnie (25.05.2006; 11.07.2006; 23.08.2006; 8.12.2006; 6.03.2007), stosując terenowy zestaw do analizy gazów *Gastec* firmy *Gastec Corporation Japan*. Podczas drugiej serii badawczej, w dniu 11 lipca 2006 r. dodatkowo wykonano jednorazowe pomiary gazów za pomocą miernika *Tetra* firmy *Crowcon Detection Instrument, England*.

Za pomocą zestawu *Gastec* pomierzono zawartość trzech wybranych gazów – tlenu, dwutlenku węgla i siarkowodoru (*Gastec Handbook*, 2004).

Miernik gazów *Tetra* wykorzystano do określenia zawartości metanu, tlenu i siarkowodoru. Jednostką pomiarową zawartości metanu jest %DGW (dolna granica wybuchowości metanu – 5% obj.), w przypadku pozostałych gazów – ppm. Oba urządzenia pomiarowe (zestaw *Gastec* i miernik *Tetra*) w przypadku tlenu i siarkowodoru wykazywały zbliżone wartości. Szczegółowy opis działania tych urządzeń podano w artykule, w którym zaprezentowano wstępne wyniki badań (Porowska, Gruszczyński, 2006).

Do analizy zmian udziału poszczególnych gazów, które wchodziły w skład biogazu powstającego w składowisku, wykorzystano archiwalne wyniki oznaczeń gazów z 1999 r. wykonane w 8 studniach gazowych (Koda i in., 1999) oraz wyniki badań własnych wykonanych w 6 czynnych studniach gazowych na głębokości 0,2 m od wylotu otworu.

MODEL THORNTWAITE'A

Terminem *model Thorntwaite'a* (MT) jest określana klasa modeli bilansu wodnego strefy przypowierzchniowej. Model tego typu po raz pierwszy zastosowano w połowie XX w.

(Thorntwaite, Mather, 1955) i doczekał się licznych modyfikacji. MT jest modelem deterministycznym, pozwalającym na ilościową ocenę składowych bilansu hydrologicznego w otoczeniu powierzchni terenu. Dane wejściowe do obliczeń stanowią dwa wektory danych, reprezentujące temperaturę powietrza oraz opad atmosferyczny. Obliczenie potencjalnej ewapotranspiracji wymaga dodatkowo określenia szerokości geograficznej. Zastosowanie w obliczeniach dyskretyzacji czasu pozwala na określenie zmienności bilansu wodnego w czasie. Do wyróżnionych kroków czasowych są przypisywane średnia temperatura powietrza i suma wysokości opadu atmosferycznego. Model Thorntwaite'a uwzględnia następujące składowe bilansu hydrologicznego: opad atmosferyczny (z rozróżnieniem na deszcz i śnieg), spływ powierzchniowy, aktualną ewapotranspirację, pokrywą śnieżną, pojemność wilgotnościową gleby (maksymalną i aktualną) oraz nadwyżkę bilansu, która może potencjalnie formować strumień infiltracji efektywnej. Relacje między poszczególnymi elementami bilansu w MT są zapisane w postaci równań matematycznych.

Obliczenia bilansu hydrologicznego dla poligonu badawczego w Otwocku przeprowadzono w programie komputerowym Athor, autorstwa T. Gruszczyńskiego. Model bilansu wodnego wykonano dla okresu od grudnia 2006 r. do kwietnia 2007 r., przyjmując krok dyskretyzacji odnoszący się do miesięcy kalendarzowych. Ewapotranspiracja potencjalna została obliczona za pomocą formuły Hamona, która pozwala na uwzględnienie parowania terenowego także w miesiącach z ujemną średnią temperaturą powietrza (McCabe, Wolock, 2002). Dane wejściowe do obliczeń stanowiły średnie miesięczne temperatury powietrza oraz miesięczne sumy opadów atmosferycznych zarejestrowane na Lotniskowej Stacji Meteorologicznej Warszawa Okęcie.

WYNIKI BADAŃ

Pomiary wykonane w listopadzie 1999 r. wykazały niskie zawartości tlenu (poniżej 1%) we wszystkich 6 otworach. Z analizy przestrzennego rozkładu O₂ w tym okresie wynika, że najniższe zawartości tego gazu są związane z centralną częścią składowiska, natomiast w kierunku jego krawędzi natlenienie wzrasta (Porowska, Gruszczyński, 2006). Analogiczną tendencję zaobserwowano w maju 2006 r., przy czym zawartości tlenu w strefie przykrawędziowej przekraczały lokalnie 12%. Wyniki pomiarów z lipca 2006 r.

wykazały spadek zawartości tlenu w zachodniej części składowiska (poniżej 0,5%), przy jednoczesnym wyraźnym wzroście w części wschodniej (lokalnie ok. 19%). W czasie kolejnych trzech pomiarów (23.08.2006 r., 8.12.2006 r., 6.03.2006 r.) w obrębie całego składowiska zawartość tlenu kształtowała się poniżej zakresu pomiarowego, który wynosił 0,5%.

Rozkład dwutlenku węgla wykazuje znaczną zmienność czasową i przestrzenną, świadczącą o dynamice procesów,

które zachodzą w składowisku. Generalnie najwyższe zawartości dwutlenku węgla są związane ze strefą przykrawędziową składowiska, zwłaszcza w części północnej i wschodniej (fig. 1). Wyjątek stanowią pomiary wykonane w lipcu 2006 r., kiedy najwyższe zawartości CO₂ stwierdzono w zachodniej części składowiska. Zawartość CO₂ w studni gazowej nr 3 była zazwyczaj najwyższa (w sierpniu 2006 r. wynosiła maksymalnie 30%), natomiast w czasie lipcowego opróbowania wykazywała jedną z najniższych wartości (1,3%).

Najbardziej problematyczne przy ocenie składu fazy gazowej okazały się pomiary metanu i azotu, które stanowią istotny udział w składzie biogazów powstających w składowisku. Z badań archiwalnych wynika, że metan stanowił od 15,31 do 48,62%. Seria pomiarów z 11 lipca 2006 r. dostarczyła niepełnych danych na temat zawartości tego gazu. Górny zakres pracy urzędnika uniemożliwił dokładne określenie zawartości metanu w otworach nr 1, 2, 4 i 5, w których została przekroczona dolna granica wybuchowości. Najniż-

sze wartości występują w części północno-wschodniej, w otworze nr 3 stwierdzono 5% DGW, natomiast w otworze nr 6 tylko 2% DGW.

Rozkład substancji organicznej prowadzi również do powstania siarkowodoru. W listopadzie 1999 r. zawartość siarkowodoru w biogazie, wydzielającym się ze składowiska wynosiła od 0,4 do 15,0 ppm, najwyższą zawartość odnotowano w północnej części składowiska. Analogiczną sytuację stwierdzono w przypadku opróbowania wykonanego w maju 2006 r., gdy najwyższe zawartości siarkowodoru (8 ppm) także występowały w części północnej składowiska. W lipcu 2006 r. zawartość siarkowodoru w większości studzien mieściła się poniżej granicy oznaczalności (poniżej 0,25 ppm). Wyjątek stanowił otwór nr 4, gdzie zawartość siarkowodoru wyniosła 4 ppm. W kolejnych okresach badawczych stwierdzono wyraźny wzrost zawartości siarkowodoru – nawet do 47 ppm jesienią i zimą we wschodniej części składowiska (fig. 2).

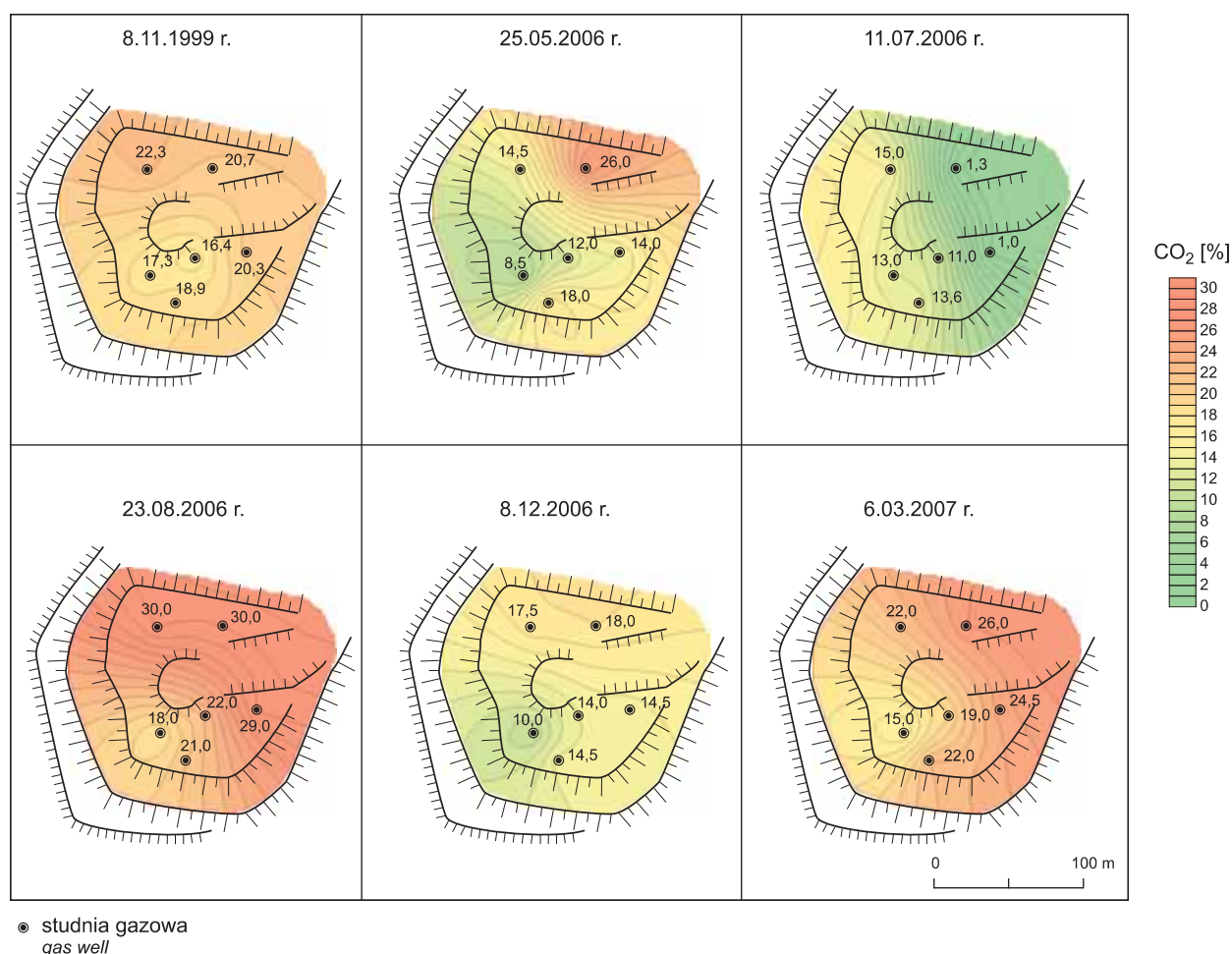


Fig. 1. Rozkład zawartości dwutlenku węgla w składowisku Otwock

Diagram of the carbon dioxide content within the Otwock landfill

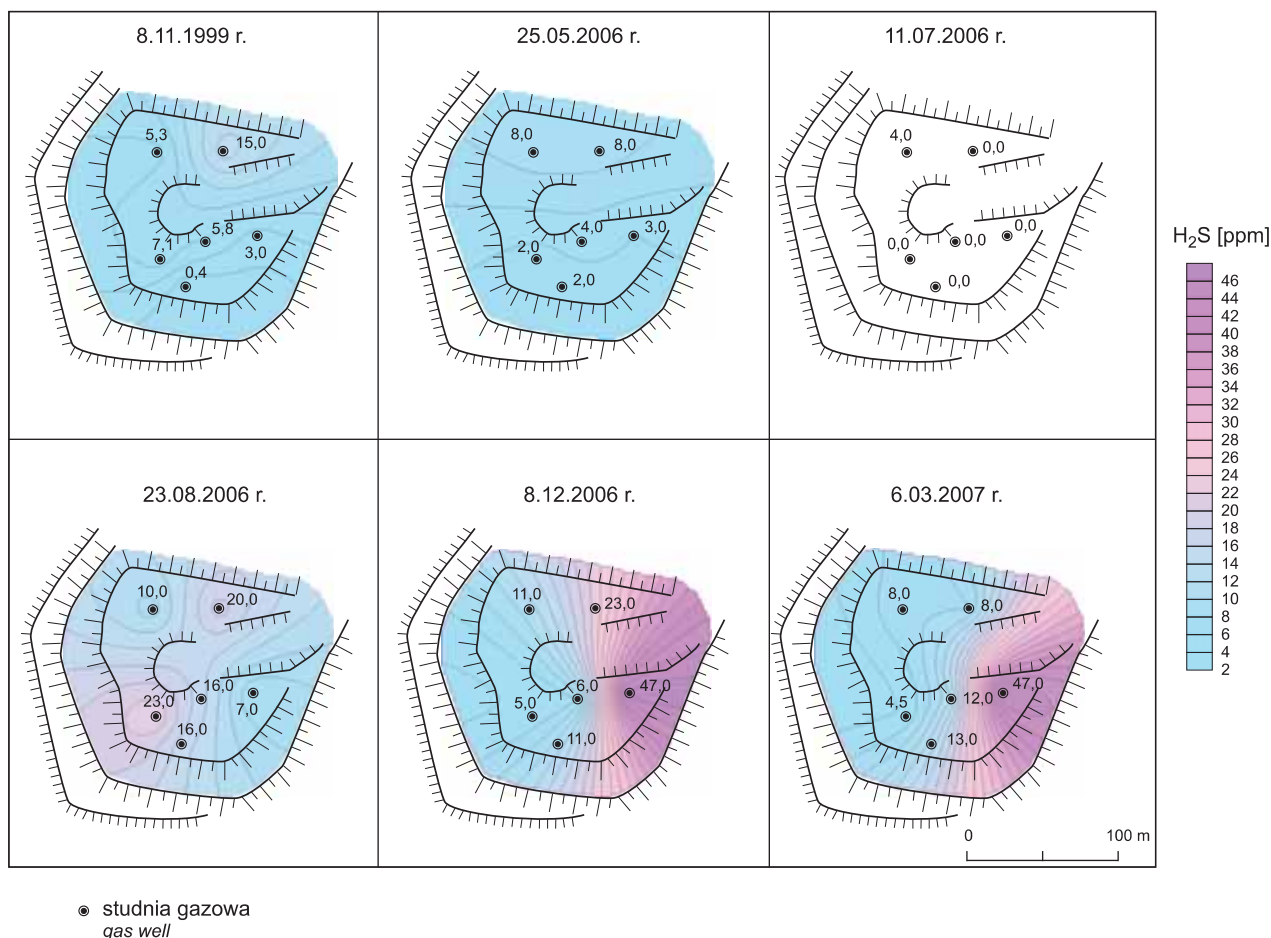


Fig. 2. Rozkład zawartości siarkowodoru w składowisku Otwock

Diagram of the hydrogen sulphide content within the Otwock landfill

INTERPRETACJA WYNIKÓW

Z badań przeprowadzonych na składowisku w Otwocku wynika, że nadal stanowi ono aktywne środowisko przemian mikrobiologicznych, skutkujących m.in. produkcją biogazu. Jednocześnie zaobserwowano zmienne w czasie natężenie i kierunek procesu. Badania modelowe przeprowadzone metodą Thorntwaite'a wykazały wyraźną korelację między natężeniem procesu mikrobiologicznej przemiany związków organicznych a bilansem wodnym bryły składowiska (fig. 3).

Najwyższy udział dwutlenku węgla w składzie fazy gazowej składowiska odnotowano w sierpniu 2006 r., podczas gdy opróbowanie wykonane w lipcu tego samego roku (niepełna dwa miesiące wcześniej) wskazywało zdecydowane zahamowanie produkcji biogazu. Niskie sumy opadów atmosferycznych w drugim kwartale 2006 r. w zestawieniu z wysokim potencjałem ewaporymetrycznym zahamowały strumień zasilania infiltracyjnego bryły składowiska i doprowadziły do drastycznego spadku wilgotności zdeponowanych osadów. W konsekwencji doprowadziło to do zahamowania procesów życiowych mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkład związków polimerycznych, co spowodowało ograniczenie dostępu do produktów rozpadu tych

związków, stanowiących substrat do przemian biochemicznych z udziałem autochtonicznej mikroflory. W rezultacie nastąpiło ograniczenie produkcji gazowego dwutlenku węgla i siarkowodoru. Wyjątek stanowi zachodnia część składowiska, gdzie zmiany wilgotności były mniej drastyczne ze względu na podniesienie poziomu wód gruntowych (Porowska, Gruszczyński, 2006). Wysokie sumy opadów atmosferycznych w sierpniu 2006 r. w zestawieniu z wysokimi temperaturami przełożyły się na optymalizację warunków środowiskowych dla przemian mikrobiologicznych. Badania modelowe wskazują, że opady nie doprowadziły w tym okresie do uformowania strumienia infiltracyjnego, ale zagwarantowały wysycenie deficytu wilgotności w strefie przypowierzchniowej. Pozwoliło to na ponowne uruchomienie mikrobiologicznych przemian złożonych związków organicznych. W wyniku tych procesów w środowisku pojawiły się produkty rozkładu związków polimerycznych, stanowiące potencjalne, optymalne i łatwo dostępne źródło węgla dla bakterii autochtonicznych. Spowodowało to wzrost zawartości dwutlenku węgla w fazie gazowej składowiska. Jednocześnie odnotowano wzrost zawartości innego skład-

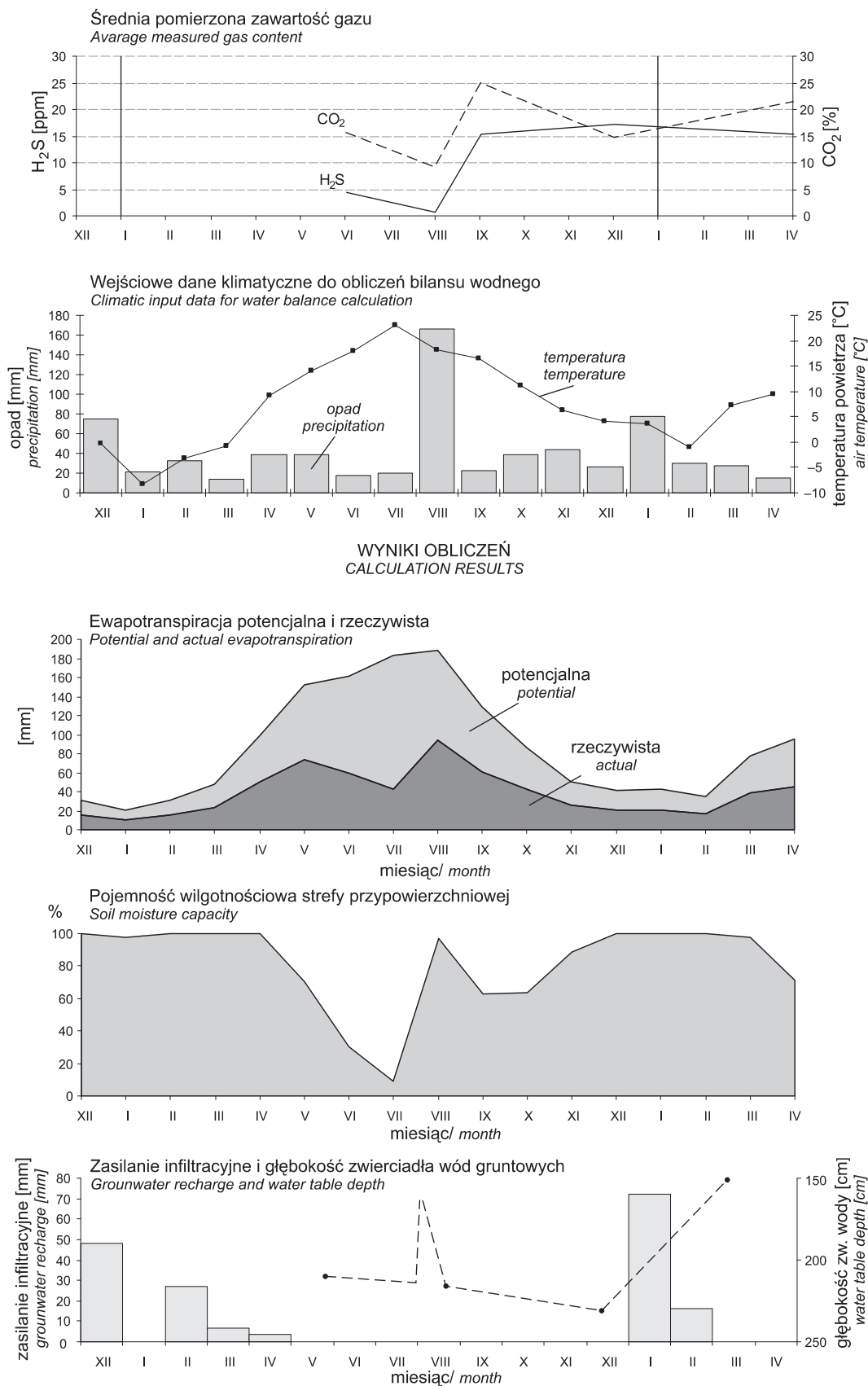


Fig. 3. Porównanie średniej zawartości siarkowodoru i dwutlenku węgla z wynikami obliczeń bilansu wodnego (model Thorntwaite'a)

Comparison of the average content of hydrogen sulphide and carbon dioxide with the results of water balance calculations (Thorntwaite model)

nika biogazu – siarkowodoru. Kolejne spowolnienie produkcji biogazu w czaszy składowiska miało miejsce jesienią 2006 r. Z obliczeń bilansu wodnego wynika, że w tym okresie nastąpił wzrost deficytu wilgotności w strefie przypowierzchniowej, choć nie tak drastyczny jak w drugim kwartale. W tym okresie odnotowano także najniższe w skali roku stany wód podziemnych. Zmiana warunków środowiskowych (głównie wilgotności) spowodowała ograniczenie aktywności mikroorganizmów odpowiedzialnych za przemianę związków węgla. Obniżenie termiki środowiska (zwłaszcza we wschodniej części bryły składowiska, gdzie miąższość zdeponowanych odpadów jest mniejsza) spowodowało optymalizację warunków dla bakterii odpowiedzialnych za redukcję związków organicznych, zawierających siarkę. W efekcie doszło do wzrostu aktywności metabolicznej tych mikroorganizmów, a więc zwiększonego udziału siarkowodoru w składzie fazy gazowej. W pierwszym kwartale 2007 r. nastąpiła poprawa warunków środowiskowych dla mikrobiologicznych przemian związków węgla. Wysookie sumy opadów atmosferycznych w połączeniu z niskim

potencjałem ewaporymetrycznym spowodowały wysycenie deficytu wilgotności strefy przypowierzchniowej oraz uformowanie strumienia zasilania infiltracyjnego. W konsekwencji wzrosła produkcja dwutlenku węgla. Jednocześnie termika środowiska nadal sprzyjała mikrobiologicznej redukcji związków siarki. Zaznaczyło się to wzrostem zawartości siarkowodoru w fazie gazowej składowiska. Uformowanie strumienia infiltracyjnego w tym okresie spowodowało migrację rozpuszczonego siarkowodoru do wód gruntowych. Zmiana warunków w strefie pełnego nasycenia w kierunku środowiska utleniającego prowadziła do chemicznych lub biologicznych (z udziałem bakterii aerobowych) przemian siarkowodoru (Borkowski, Wolicka, 2007). Mechanizm ten tłumaczy podwyższone i zmienne w czasie stężenia siarczanów w strumieniu wody podziemnej poniżej składowiska (Gruszczyński, 2003). Procesy te zachodzą dzięki współwystępowaniu grup mikroorganizmów, co w wykonanych pomiarach objawia się zmiennym w czasie i przestrzeni składem biogazu.

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonej analizy wynika, że badane składowisko stanowi nadal aktywne środowisko przemian mikrobiologicznych. Wyniki zestawienia czasoprzestrzennego rozkładu badanych gazów w powiązaniu z obliczonym bilansem wodnym wykazały, że głównym czynnikiem determinującym natężenie przemian mikrobiologicznych jest wilgotność odpadów. Z badań modelowych bilansu wodnego wynika, że w analizowanym okresie infiltracyjne zasilanie systemu mogło zachodzić wyłącznie w miesiącach zimowych i wczesną wiosną. Wzrostowi wilgotności zdeponowanych odpadów w tym okresie towarzyszyła intensyfikacja produkcji biogazu. W okresach, w których system nie był zasilany infiltracyjnie, dochodziło do przesuszania bryły składowiska, a proces produkcji biogazu ulegał spowolnieniu (lokalnie zahamowaniu). Lokalizacja składowiska na powierzchni tarasu zalewowego Wisły sprawia, że o stosunkach wilgotnościowych w bryle składowiska decydował

także reżim hydrologiczny Wisły. Wylewy i podpiętrzenia, spowodowane przejściem fal wezbraniowych, dostarczały wilgoci niezbędnej do procesów przemian mikrobiologicznych, także w warunkach braku zasilania infiltracyjnego. Rezultat obliczeń metodą Thorntwaite'a, wobec braku możliwości weryfikacji, jest obciążony niepewnością. Niemniej wskazuje on na czasowy rozkład warunków wilgotnościowych, który może być analizowany w aspekcie co najmniej jakościowym. Stwierdzona relacja między zawartością wody a produkcją biogazu wskazuje na istotną rolę wilgotności w procesie przemian mikrobiologicznych materii organicznej. Pod względem jakościowym jest to czynnik główny, gdyż deficyt wilgotności prowadzi do zahamowania procesu. Pod względem ilościowym istotne znaczenie do przebiegu przemian mikrobiologicznych będą miały także inne czynniki, takie jak temperatura środowiska i skład zdeponowanej materii organicznej.

LITERATURA

- BORKOWSKI A., WOLICKA D., 2007 — Geomicrobiological aspects of the oxidation of reduced sulfur compounds by photosynthesizing bacteria. *Pol. J. Microbiol.*, **56**, 1: 53–57.
- FARQUHAR G. J., ROVER F. A., 1973 — Infiltration and landfill behavior. *ASCE J. Environ. Engineering Division*, **99**: 671–690.
- GASTEC HANDBOOK, 2004 — Gastec Handbook – Environmental Analysis Technology – Fukaya, Ayse-shi, Kanagawa, Japan, 5-th edition.
- GRUSZCZYŃSKI T., 2003 — Modyfikacja metody dynamicznej wyznaczania współczynnika opóźnienia dla matematycznego opisu migracji substancji rozpuszczonych w wodach podziemnych [rozpr. doktor.]. Arch. WG UW, Warszawa.
- KODA E., AUGUSTYNIAK E., PACHUTA K., PAPROCKI P., 1999 — Ocena oddziaływania na środowisko nieczynnego wysypiska odpadów stałych w Otwocku, woj. mazowieckie – wyk. GEOTEKO Sp. z o.o. Arch. MPO, Warszawa.
- McCABE G.J., WOLOCK D.M., 2002 — Trends and temperature sensitivity of moisture conditions in the conterminous United States. *Climate Research*, **20**: 19–29.

POROWSKA D., GRUSZCZYŃSKI T., 2006 — Zmienność składu fazy gazowej składowiska odpadów komunalnych w Otwocku, *Prz. Geol.*, **54**, 11: 996–1001.

THORNTWAITE C.W, MATHER J.R., 1955 — The Water Balance. *Publications in Climatology, Laboratory of Climatology*, **8**, 1: 1–104.

SUMMARY

The field research was conducted at the municipal landfill located in western part of Otwock. Measured gases indicated that biochemical processes are still active and landfill gas (biogas) is being generated. The objective of this study was to identify the factors controlling temporal and lateral variation in concentration of selected landfill gas. For determination of water balance in the landfill body, Thorntwaite

model was used. Measured values of oxygen, carbon dioxide and hydrogen sulphide indicated that biogas composition within the Otwock landfill varied with time and strongly depended on changes in moisture content. Temperature, pH of environment and composition of refuses also play some role in controlling changes of gas composition.

