



.....  
**ELŻBIETA DUSZA**  
.....

**Rozprawa Doktorska**

**„WPLYW ŚCIEKÓW POGALWANICZNYCH NA EFEKTYWNOŚĆ PROCESU  
OCZYSZCZANIA W KOMUNALNEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU  
ORAZ MOŻLIWOŚĆ ZAGOSPODAROWANIA OSADÓW NADMIERNYCH I  
WYPRODUKOWANYCH Z NICH KOMPOSTÓW”**

**Praca wykonana pod kierunkiem  
Prof. dr hab. Zdzisława Zabłockiego**

---

Autorka pracy była stypendystką Burmistrza Miasta i Gminy Recz  
w okresie od stycznia 2004 do grudnia 2006 r.

**SZCZECIN 2007**

# 1. WSTĘP

Dużym zagrożeniem dla jakości środowiska przyrodniczego, a zwłaszcza wodnego jest często pojawiający się problem dotyczący zrzutu nieoczyszczonych ścieków lub oczyszczanych w stopniu niespełniającym wymogów RMŚ [2006]. W ściekach komunalnych definiowanych przez Santarsiero i in. [1998] czy Chipasę [2001] jako zużyte wody z gospodarstw domowych i obiektów użyteczności publicznej oraz małych zakładów produkcyjnych, mogą znajdować się substancje toksyczne (w tym metale ciężkie), które wspólnie z wodami kanalizacji burzowej transportowane są do oczyszczalni ścieków.

Ładunek substancji toksycznych dostających się do oczyszczalni zależy, jak podaje Karvelas i in. [2003] od wielu czynników, do których autorzy zaliczają między innymi: rodzaj zakładów przemysłowych zlokalizowanych w niewielkich odległościach od oczyszczalni, styl życia mieszkańców oraz lokalną świadomość dotyczącą problemów środowiskowych. Dlatego tak ważne jest osiągnięcie maksymalnego poziomu usuwania metali ciężkich podczas procesów oczyszczania ścieków komunalnych, w celu ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Zawartość metali ciężkich w ściekach surowych trafiających do komunalnych oczyszczalni ścieków według Chipasa [2001], Karvelasa i in. [2003] uzależniona jest przede wszystkim od ilości i jakości ścieków przemysłowych, natomiast Chełmiński [2002] dodaje, że skład ścieków zależy również od konkretnej gałęzi przemysłu i rodzaju stosowanej technologii. Przyjmuje się, że sferą produkcji przemysłowej mającą znaczący wpływ na obciążenie ścieków komunalnych substancjami szkodliwymi, a zwłaszcza metalami ciężkimi są procesy powierzchniowej obróbki metali [Stefanowicz i in. 1996]. Podczyszczone ścieki galwaniczne są często główną przyczyną zanieczyszczenia ścieków surowych, które oczyszczane są najczęściej przy wykorzystaniu metody osadu czynnego. Jednak jak podkreślają Dilek i in. [1998], Chua i in. [1999] wysokie koncentracje metali ciężkich w ściekach dopływających są toksyczne dla organizmów żywych, zwłaszcza dla mikroorganizmów tworzących osad czynny. Podwyższone zawartości metali ciężkich wpływają hamująco na zachodzące w osadzie czynnym procesy metaboliczne mikroorganizmów, zwłaszcza na nityfikację i denityfikację, powodując tym samym obniżenie efektywności oczyszczania ścieków komunalnych.

Zanieczyszczenie ścieków metalami ciężkimi, które kumulują się w osadzie czynnym skutkuje generowaniem dużych ilości komunalnych osadów ściekowych, zawierających oprócz składników nawozowych także ponadnormatywne zawartości substancji szkodliwych.

Normy biologiczne są zazwyczaj możliwe do osiągnięcia w procesie higienizacji osadów ściekowych, natomiast zanieczyszczenia trwałe takie jak metale ciężkie mogą ograniczać, a nawet eliminować możliwość ich zagospodarowania czyniąc je uciążliwym odpadem.

Sytuacja prawna wykorzystywania osadów ściekowych w ostatnich latach została uregulowana, zarówno w zakresie koniecznych badań jak i dawek oraz form stosowania osadów [RMS 2002], co w znacznym stopniu zwiększyło ich wykorzystanie. W roku 2004 na terenie kraju około 14,5% osadów wytworzonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków było wykorzystywanych w rolnictwie, 23,3 % powstałych osadów stosowano do rekultywacji terenów zdegradowanych, a około 6,2% stosowano do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu GUS [2005].

Koncentracja metali ciężkich jest najczęściej spotykaną przeszkodą w zagospodarowaniu osadów na cele rolne, która może spowodować zanieczyszczenie środowiska (głównie glebowego) już po ich zastosowaniu. Dlatego też usuwanie metali ciężkich z osadów ściekowych powinno odbywać się na etapie wprowadzania do systemów kanalizacji miejskich ścieków surowych o niskiej zawartości tych szkodliwych substancji. Pomimo, iż dostępne technologie oczyszczania ścieków są już na tyle zaawansowane, że nawet w przypadku wysokoobciążonych ścieków przemysłowych możliwe są do osiągnięcia wysokie standardy jakości ścieków oczyszczonych [RMS 2006], nadal jedynym skutecznym sposobem ograniczenia ilości ładunków metali ciężkich dopływających do oczyszczalni jest stosowanie skuteczniejszych metod podczyszczania ścieków technologicznych, które stanowią dodatek (na ogół rzędu 10%) do ścieków komunalnych.

Celem niniejszej pracy była analiza zmienności koncentracji metali ciężkich (Cu, Ni, Cd, Pb, Zn, Cr, Hg) w ściekach surowych (dopływających), osadzie czynnym oraz ściekach oczyszczonych pobieranych z terenu Komunalnej mechaniczno – biologicznej Oczyszczalni Ścieków w Reczu. Dokonano także oceny poziomu akumulacji metali ciężkich w odwodnionych i ustabilizowanych osadach ściekowych wcześniej zdeponowanych i aktualnie powstających na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu oraz przedstawiono możliwości ich zagospodarowania. Podjęto także próbę obniżenia ponadnormatywnych zawartości metali ciężkich w nagromadzonych osadach ściekowych na drodze ich kompostowania z dodatkiem materiałów strukturotwórczych (odpadów organicznych) oraz oceniono właściwości uzyskanych kompostów i możliwości ich przyrodniczego wykorzystania.

## **2. PRZEGLĄD LITERATURY**

Zanieczyszczenie wód najczęściej rozumiane jest jako niekorzystne zmiany składu chemicznego i bakteriologicznego wody spowodowane wprowadzaniem w nadmiarze substancji nieorganicznych i organicznych (stałych, płynnych), często w postaci ścieków. Ścieki komunalne (zawierające m.in. biogeny, detergenty, mikroorganizmy chorobotwórcze) i przemysłowe (zawierające m.in. sole metali ciężkich, związki siarki i azotu) powodują zmiany we właściwościach fizycznych wody – jej barwy, smaku oraz zmętnienia, a także powodują zmienność w jej składzie chemicznym. Wpływa to ujemnie przede wszystkim na jakość wody, co w konsekwencji ogranicza jej przydatność do spożycia i do celów gospodarczych. Niejednokrotnie zawarte w wodzie mikroorganizmy chorobotwórcze mogą powodować także ciężkie zatrucia pokarmowe, a nawet stwarzać zagrożenie epidemiologiczne.

Oprócz często pojawiających się problemów dotyczących zrzutu ścieków nieoczyszczonych lub oczyszczanych w stopniu niespełniającym wymogów RMŚ [2006], problemem pozostają także znaczne ilości osadów ściekowych powstających podczas oczyszczania ścieków komunalnych. Niejednokrotnie te cenne zwłaszcza pod względem nawozowym substancje, zostają nadmiernie obciążone metalami ciężkimi dopływającymi do oczyszczalni ścieków systemem kanalizacyjnym najczęściej z lokalnych zakładów przemysłowych, co uniemożliwia ich przyrodnicze wykorzystanie.

### **2.1 STAN I SKŁAD ŚCIEKÓW KOMUNALNYCH**

Definicja prawna ścieków, zawarta jest w Ustawie - Prawo wodne [2001], gdzie jako ścieki definiuje się wprowadzane do wód lub do ziemi:

- wody zużyte na cele bytowe lub gospodarcze;
- ciekłe odchody zwierzęce, z wyjątkiem gnojówki i gnojowicy, przeznaczonych do rolniczego wykorzystania w sposób i na zasadach określonych w przepisach o nawozach i nawożeniu;
- wody opadowe lub roztopowe, ujęte w systemy kanalizacyjne, pochodzące z powierzchni zanieczyszczonych, w tym z centrów miast, terenów przemysłowych i składowych, baz transportowych oraz dróg i parkingów o trwałej nawierzchni;

- wody odciekowe ze składowisk odpadów, wykorzystane solanki, wody lecznicze i termalne;
- wody pochodzące z odwodnienia zakładów górniczych, z wyjątkiem wód wprowadzanych do górotworu, jeżeli rodzaje i ilość substancji zawartych w wodzie wprowadzanej do górotworu są tożsame z rodzajami i ilością zawartymi w pobranej wodzie;
- wody wykorzystane, odprowadzane z obiektów gospodarki rybackiej, jeżeli występują w nich nowe substancje lub zwiększone zostaną ilości substancji w stosunku do zawartych w pobranej wodzie.

Przywoływany wyżej akt prawny definiuje także pojęcie ścieków bytowych, ścieków komunalnych oraz ścieków przemysłowych. Według Ustawy - Prawo wodne [2001] ścieki bytowe - rozumie się jako ścieki z budynków przeznaczonych na pobyt ludzi, z osiedli mieszkaniowych oraz z terenów usługowych, powstające w szczególności w wyniku ludzkiego metabolizmu oraz funkcjonowania gospodarstw domowych. Ustawa definiuje także pojęcie ścieków przemysłowych jako ścieków odprowadzanych z terenów, na których prowadzi się działalność handlową lub przemysłową albo składową, niebędące ściekami bytowymi lub wodami opadowymi.

Nieco inne, choć tematycznie zbliżone są definicje spotykane w literaturze. Według Kutery [1988] ścieki komunalne to wszystkie wody zużyte w wyniku działalności życiowej i produkcyjnej człowieka, wody opadowe oraz inne dopływy do kanalizacji z terenów zurbanizowanych. Zbliżoną definicję ścieków podają także Santarsiero i in. [1998], Nies [1999] oraz Chipasa [2001], stwierdzając, że ścieki komunalne zawierają przede wszystkim zużyte wody z gospodarstw domowych i obiektów użyteczności publicznej oraz małych zakładów produkcyjnych, wody drenażowe, depozycje atmosferyczną, a także substancje toksyczne pochodzące z komunikacji transportowane wraz z wodami kanalizacji burzowej do oczyszczalni ścieków. Jak podkreślają Karvelas i in. [2003] kumulacja toksycznych dla środowiska metali ciężkich przedostających się wraz ze ściekami komunalnymi zależy od wielu czynników, do których zalicza się między innymi: rodzaj zakładów przemysłowych zlokalizowanych w niewielkich odległościach od oczyszczalni, styl życia mieszkańców oraz lokalną świadomość dotyczącą problemów środowiskowych. Ponadto Tyszka i in. [1998] oraz Słaba i Długoński [2002] podkreślają, że częstym zjawiskiem jest ponadnormatywna zawartość substancji szkodliwych w ściekach komunalnych, do których zaliczają przede wszystkim metale ciężkie. Dlatego tak ważne jest osiągnięcie maksymalnego poziomu

usuwania metali ciężkich podczas procesów oczyszczania ścieków komunalnych, co jednocześnie umożliwia ograniczenie ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Zawartość metali ciężkich w ściekach docierających do komunalnych oczyszczalni ścieków, uzależniona jest przede wszystkim od ilości i jakości ścieków przemysłowych [Chipasa 2001, Karvelas i in. 2003], które jak podaje Tyszka i in. [1998] poza zawartością różnorodnych substancji szkodliwych charakteryzują się znaczną heterogenicznością oraz dużą okresową zmiennością stężeń ładunków. Jak podaje Chełmiński [2002] w skład ścieków przemysłowych, których jakość i ilość uzależniona jest od rodzaju produkcji przemysłowej, wchodzi oprócz najczęściej charakteryzowanych wymienionych poniżej metali ciężkich, także różnego rodzaju chemikalia, rozpuszczalniki i odpady organiczne (tab. 1.). Jednocześnie autor wyraźnie podkreśla, że skład ścieków uzależniony jest do konkretnej gałęzi przemysłu i rodzaju stosowanej technologii produkcji. W poniższej tabeli przedstawiono zawartość metali ciężkich, jako wyznacznik szkodliwości różnego rodzaju ścieków przemysłowych, w zależności od gałęzi przemysłu, wprowadzanych do kanalizacji miejskich.

**Tabela 1.** Koncentracja metali ciężkich w ściekach w  $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  różnych gałęzi przemysłu [Chełmiński 2002 za Henry, Heinke 1989]

Cecha	Ścieki komunalne	Przemysł		
		spożywczy	galwanizernie	tekstylny
pH	7,0	7,0	4 – 10	10
Cu	0,17	0,29	6,0	0,31
Cd	0,01	0,006	11,0	0,03
Cr	0,08	0,15	12,0	0,82
Ni	0,06	0,11	-	0,25
Pb	0,1	-	-	-
Zn	0,29	1,08	9,0	0,47

Stasinakis i in. [2003] oraz Malik i Ahmad [2003] stwierdzają, że sferą produkcji przemysłowej mającą znaczący wpływ na obciążenie ścieków przede wszystkim metalami ciężkimi są takie gałęzie przemysłu jak: hutnictwo, procesy powierzchniowej obróbki metali czy garbarstwo. Potwierdzają to także Chełmiński [2002], Stefanowicz i in. [1996] oraz Atkinson i in. [1998] podkreślając jednak, że obecnie tego rodzaju ścieki przemysłowe są najczęściej dość skutecznie neutralizowane, z pełnym rozkładem organicznych substancji toksycznych oraz maksymalnym usunięciem z nich metali ciężkich. Jest to szczególnie istotne w przypadku, gdy końcowym odbiornikiem ścieków oczyszczonych jest zbiornik wodny (jezioro, rzeka, staw), ponieważ to właśnie metale ciężkie są jednym z głównych elementów mogących zakłócać prawidłowe funkcjonowanie ekosystemów wodnych.

Jednym z zasadniczych celów ochrony wód, określonych w art. 38 ust. 3 ustawy Prawo Wodne [2001], jest unikanie, eliminacja i ograniczanie zanieczyszczenia wód, w tym głównie substancjami szczególnie szkodliwymi dla środowiska wodnego. Stosowanie do art. 42 Prawa wodnego obowiązek zapewnienia ochrony wód przed zanieczyszczeniem spoczywa na podmiocie, który wprowadza do wód lub do ziemi ścieki, pośród których mogą znajdować się również substancje szkodliwe dla środowiska wodnego. Jednym ze sposobów wprowadzania ścieków do środowiska może być wprowadzanie ścieków za pośrednictwem urządzeń kanalizacyjnych będących własnością innych podmiotów, najczęściej lokalnych przedsiębiorstw zajmujących się gospodarką wodno – ściekową [Prawo Wodne 2001].

Wszystkie ścieki wprowadzane do wód lub do ziemi powinny być oczyszczone w stopniu wymaganym przepisami Ustawy – Prawo Wodne [2001]. Ze względu na fakt, że ustawową ochroną objęto wszystkie wody, niezależnie od tego kto jest ich właścicielem, w dziale „ochrona wód” ustanowiono system nakazów, zakazów i ograniczeń dotyczących wprowadzania ścieków do wód lub do ziemi oraz wszelkich czynności i działań mogących wpływać na jakość wód. O zakazach wprowadzania ścieków do wód lub do ziemi stanowi art. 39 wspomnianej ustawy, i tak:

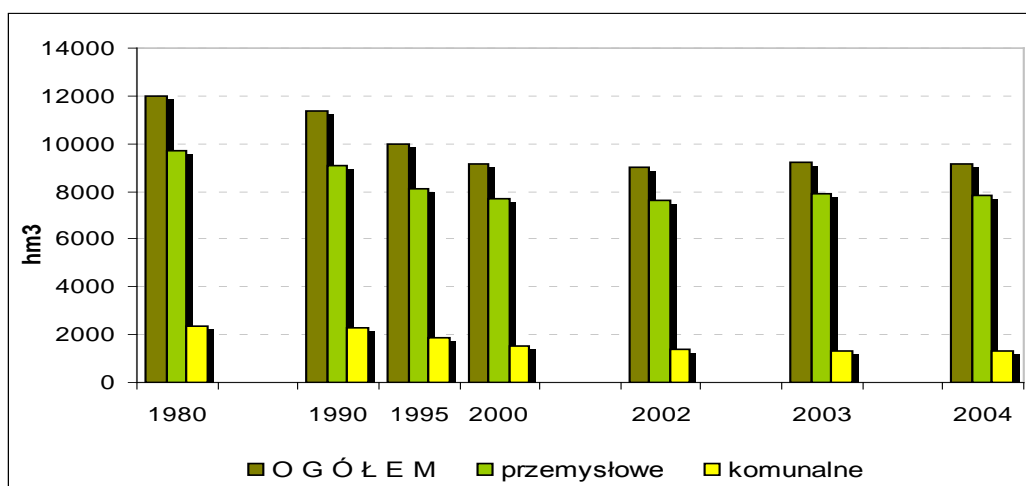
- zabrania się wprowadzania ścieków bezpośrednio do wód podziemnych;
- zabrania się wprowadzanie ścieków do wód:
  - powierzchniowych, jeżeli jest to sprzeczne z warunkami wynikającymi z istniejących form ochrony przyrody, utworzonych stref ochrony zwierząt łownych albo ostoi na podstawie ustawy o ochronie przyrody, a także stref ochronnych ujęć wody oraz obszarów ochronnych zbiorników śródlądowych;
  - powierzchniowych w obrębie kąpielisk, plaż publicznych nad wodami oraz w odległości mniejszej niż 1 km od ich granic;
  - stojących (zakaz dotyczy wszystkich wód stojących, niezależnie czyją stanowią własność i wszystkich rodzajów ścieków);
  - jezior oraz ich dopływów, jeżeli czas dopływu ścieków do jeziora byłby krótszy niż 24 godziny;
- zabrania się wprowadzania ścieków do ziemi:
  - jeżeli jest to sprzeczne z warunkami wynikającymi z istniejących form ochrony przyrody, utworzonych stref ochrony zwierząt łownych albo ostoi na podstawie ustawy o ochronie przyrody, a także stref ochronnych ujęć wody oraz obszarów ochronnych zbiorników śródlądowych;

- o zawierających substancje szczególnie szkodliwe dla środowiska wodnego określone w załączniku do RMŚ [2006];
- o w pasie technicznym obszarów morskich i administracji morskiej;
- o jeżeli stopień oczyszczania ścieków lub miąższość utworów skalnych nad zwierciadłem wód podziemnych nie stanowi zabezpieczenia tych wód przed zanieczyszczeniem;
- o w odległości mniejszej niż 1 km od granic kąpielisk oraz plaż publicznych nad wodami.

Ustawa Prawo Wodne [2001] zabrania też wprowadzania do wód lub do ziemi ścieków zawierających: odpady oraz zanieczyszczenia pływające, DDT, PCB, PCT, HCH oraz aldryny, endryny, izodryny a także ścieków mogących zawierać chorobotwórcze drobnoustroje pochodzące z obiektów, w których leczeni są chorzy na choroby zakaźne. Ścieki wprowadzane do wód nie mogą także powodować w tych wodach zmiany w naturalnej, charakterystycznej dla nich biocenozie, naturalnej mętności, barwy i zapachu oraz nie mogą formować osadów lub piany. Ustawowo zostało również zabronione rozcieńczenie ścieków wodą w celu uzyskania ich stanu, składu oraz minimalnego procentu redukcji zanieczyszczeń zgodnego z RMŚ [2006]. Ustawodawca zadbał, aby ścieki, których powstawanie jest nieuniknione, były jak najskuteczniej oczyszczane i nie stwarzały zagrożenia dla środowiska naturalnego.

Na podstawie danych statystycznych GUS [2005] w ciągu ostatnich dwóch dekad (1980 – 2004) w Polsce, stwierdzono trend spadkowy w ilości wytwarzanych ścieków ogółem. Te zmiany w czasie dotyczą zarówno ilości powstających ścieków przemysłowych jak i ścieków komunalnych. Jednak w ostatnich latach (2000 – 2004) ilość wytwarzanych ścieków komunalnych i przemysłowych utrzymuje się na zbliżonym poziomie, nie wykazując istotnych wahań (ryc.1).

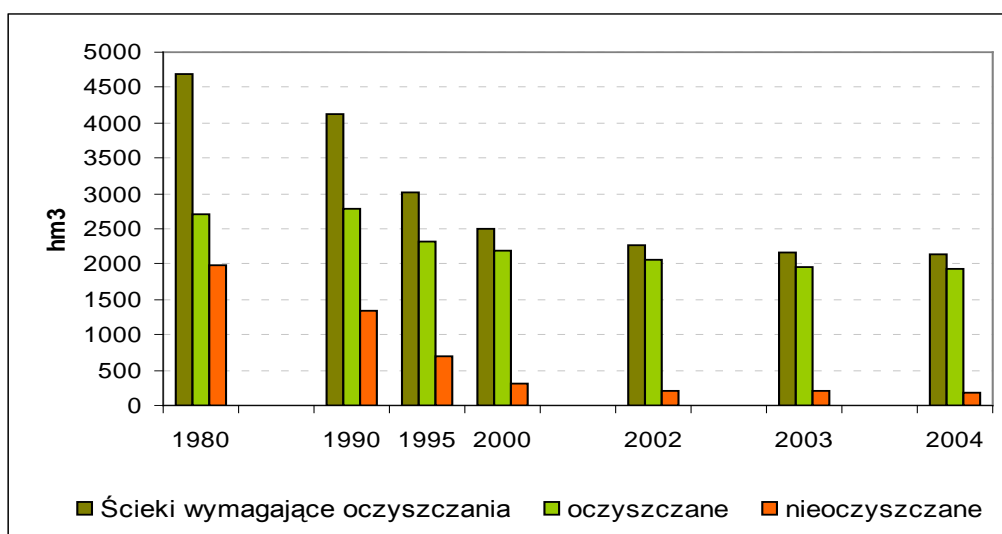




Ryc. 1. Ilość ścieków przemysłowych i komunalnych odprowadzanych do wód lub ziemi w latach 1980 – 2004 (opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)

W ostatnich latach (2000 – 2004) zmniejszenie ilości wytwarzanych ścieków przemysłowych związane jest przede wszystkim ze zmianą technologii produkcji na bardziej wodooszczędne i dostosowane do wymagań Najlepszych Dostępnych Technologii (BAT) dla poszczególnych gałęzi przemysłu. Natomiast wcześniej obserwowany (1980 – 2000) wyraźny spadek ilości wytwarzanych ścieków przemysłowych związany był przede wszystkim ze spadkiem produkcji w poszczególnych zakładach przemysłowych i zmniejszeniem zapotrzebowania na wodę.

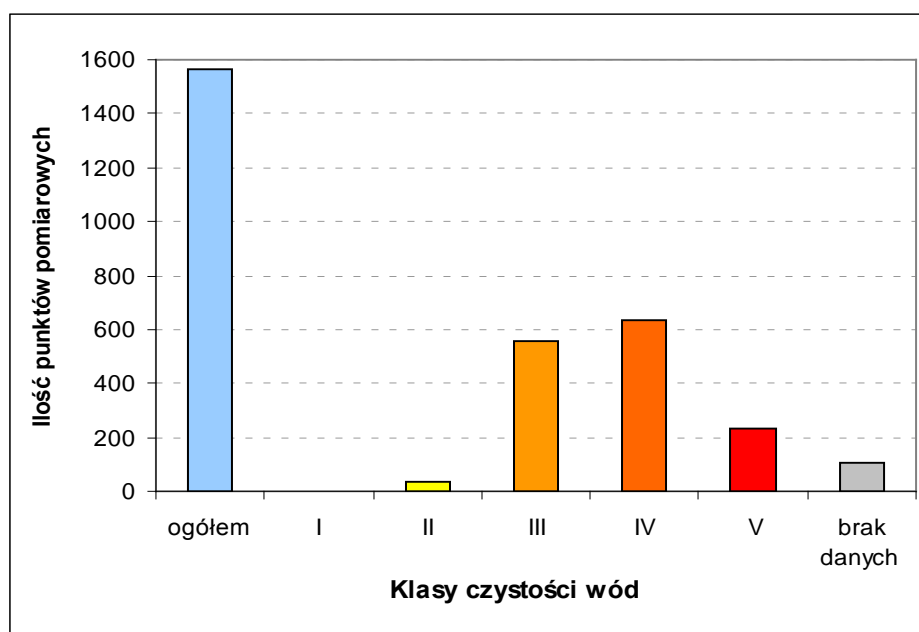
Zadawalająca jest także sytuacja wyraźne mniejszych ilości wytwarzanych ścieków wymagających oczyszczenia, w porównaniu z ogólną ilością wytwarzanych ścieków komunalnych oraz prawie dziesięciokrotnie mniejsza ilość ścieków przemysłowych i komunalnych nieulegających żadnemu procesowi oczyszczenia (ryc. 2).



Ryc. 2. Ilość ścieków przemysłowych i komunalnych oraz sposoby ich oczyszczenia (opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)

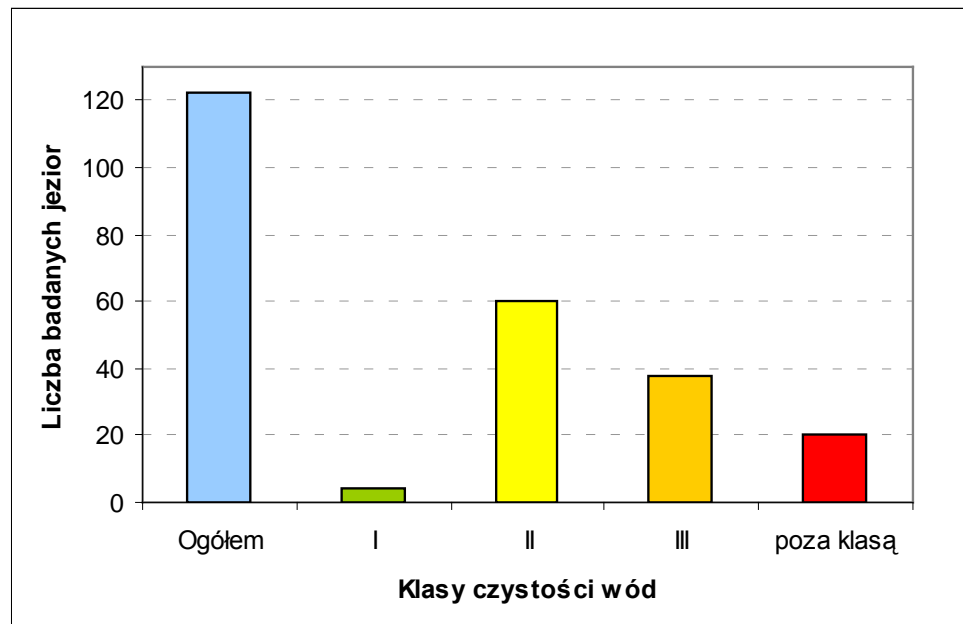
Ograniczenie ilości powstających ścieków, zwiększający się udział ścieków oczyszczanych oraz zwiększenie skuteczności ich oczyszczania wpływa korzystnie na jakość wód powierzchniowych będących niejednokrotnie bezpośrednim odbiornikiem oczyszczonych ścieków komunalnych. Jak podaje Tyszka i in. [1998] corocznie do rzek i jezior, a nawet do zbiorników wód podziemnych trafiają ogromne ilości substancji szkodliwych działających na naturalne fizyczne i chemiczne cechy wody, powodując zachwianie równowagi biologicznej w biocenozach zasiedlających ekosystemy wodne oraz pośrednio na organizmy lądowe korzystające z wody. Autorzy ci oraz Chełmiński [2002] podkreślają, że główną przyczyną pogorszenia jakości wód jest wprowadzanie do naturalnych zbiorników wodnych niedostatecznie oczyszczonych ścieków komunalnych i przemysłowych zawierających często bardzo trwale, trudno degradowalne substancje. Chełmiński [2002] stwierdza ponadto, że dostawa ścieków do rzek odbywa się punktowo, dlatego też kontrola dopływu tego rodzaju zanieczyszczeń jest prostsza niż w przypadku źródeł obszarowych.

Spośród ponad 1500 przebadanych w 2004 roku punktów pomiarów monitoringowych rzek żaden nie znalazł się w I klasie czystości. Natomiast aż 234 sklasyfikowano do V klasy czystości, w odniesieniu do ówczesnie obowiązującego Rozporządzenia Ministra Środowiska [2005]. Na taki stan rzeczy w głównej mierze wpływa dopływ do rzek ścieków komunalnych nieoczyszczonych lub oczyszczanych w stopniu niezadawalającym (ryc. 3)



Ryc. 3. Jakość wód w rzekach Polskich w roku 2004  
(opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)

Podobna sytuacja dotyczy także jakości wód Polskich jezior, które podobnie jak wody płynące mogą być bezpośrednim odbiornikiem ścieków komunalnych (oczyszczanych i nieoczyszczonych). Ze 122 punktów monitoringowych poddanych badaniom w roku 2004, aż 20 znalazło się w grupie wód pozaklasowych (ryc. 4).



Ryc. 4. Jakość wód jezior w Polsce w roku 2004  
(opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)

Jest to sytuacja niepokojąca, szczególnie ze względu na intensywny rozwój turystyki i agroturystyki na terenie kraju. Dlatego też skuteczniejsze oczyszczanie ścieków komunalnych przed ich wprowadzeniem do odbiornika powinno być sprawą priorytetową [RMŚ 2006]. Ponadto należy dążyć do całkowitego skanalizowania obszaru kraju, co w zasadniczy sposób pomoże wyeliminować problem punktowego, niekontrolowanego zrzutu ścieków nieczyszczonych do odbiorników naturalnych (jezior i rzek).

### 2.1.1. Charakterystyka ścieków powstających podczas procesów powierzchniowej obróbki metali

Czynnikiem decydującym o ładunku metali ciężkich docierających do oczyszczalni jest udział w ścieku komunalnym ścieku przemysłowego oraz jego skład chemiczny [Tyszka i in., 1998, Krzywy 1999]. Jak już wcześniej wspomniano sferą produkcji przemysłowej mającą znaczący wpływ na obciążenie ścieków komunalnych substancjami szkodliwymi, a zwłaszcza metalami ciężkimi są procesy powierzchniowej obróbki metali. Stefanowicz i in. [1996] podkreślają, że najczęściej chemicznie podczyszczane ścieki pogalwaniczne wprowadzane do systemu kanalizacji zbiorczej mają istotny wpływ na zawartość metali

ciężkich (głównie miedzi, cynku, chromu i niklu) w ściekach, a w konsekwencji także w osadach ściekowych powstających po oczyszczeniu ścieków komunalnych z ich udziałem.

Spełnianie norm prawnych odnośnie warunków, jakim powinny odpowiadać ścieki odprowadzane do miejskiej sieci kanalizacyjnej [RMŚ, 2006] wymaga zarówno prowadzenia racjonalnej gospodarki wodą na terenie galwanizerni, jak i stosowania nowoczesnej i skutecznej technologii podczyszczania ścieków. Zarówno Kieszkowski [1980] jak i Stefanowicz [1996] do podstawowych zasad racjonalnej gospodarki wodno – ściekowej w galwanizerni zaliczają między innymi przestrzeganie dokładnego rozdziału ścieków na odpowiednie rodzaje, ponieważ uważają to za główny warunek skutecznego ich unieszkodliwiania. Kieszkowski [1980] podzielił powstające na terenie galwanizerni ścieki na dwie podstawowe grupy. Pierwszą z nich stanowi kilka rodzajów ścieków, wymagających szczególnie efektywnego oczyszczenia, do których autor zaliczył ścieki:

- rozcieńczone stanowiące wody po płukaniu z płuczek przepływowych;
- o większym stężeniu, obejmujące m.in. wody po płukaniu z płuczek bezprzepływowych, roztwory po regeneracji wymienniczy jonowych, wody z mycia podłóg w halach produkcyjnych;
- stężone stanowiące wylewane okresowo, zużyte kąpiele i roztwory stężone, jak również zrzuty awaryjne na skutek występujących nieszczelności, bądź pęknięcia wanień.

Drugim wprowadzonym przez tego autora [Kieszkowski, 1980] podziałem, jest klasyfikacja ścieków galwanicznych ze względu na rodzaj zanieczyszczeń wchodzących w ich skład, w których wyróżniono ścieki:

- cyjankowe zawierające oprócz prostych cyjanków również kompleksowe cyjanki takich metali jak: Zn, Cu, Cd, Ni, Cr;
- chromowe zawierające jony Cr VI ;
- kwaśne zawierające kwasy mineralne :  $H_2SO_4$ , HCl,  $HNO_3$ ,  $H_3PO_4$ , HF i ścieki alkaliczne zawierające m. in. ług sodowy, węglan sodowy;
- kwaśne z operacji przygotowania powierzchni (odtłuszczanie, trawienie, dekapowanie), nakładania powłok, polerowania i wyblyszczania. Dlatego też ścieki te mogą zawierać podwyższone koncentracje metali ciężkich takich jak: Fe, Ni, Cu, Zn, Cr, Al.

Jak podaje Kieszkowski [1980] szkodliwy wpływ zawartych w ściekach metali na pracę i efektywność oczyszczania ścieków w oczyszczalniach oraz na środowisko wodne odbiornika, polega przede wszystkim na ich toksyczności. Dalej autor stwierdza, że obecność ponadnormatywnych koncentracji metali może wpływać także na zmianę ilości rozpuszczonego tlenu oraz na właściwości organoleptyczne ścieków. Ponadto Kieszkowski [1980] uważa, iż miedź i chrom odprowadzane wraz ze ściekami galwanicznymi do kanalizacji miejskiej oddziałują szkodliwie na pracę oczyszczalni biologicznych, hamując lub nawet uniemożliwiając biochemiczny rozkład substancji organicznych zawartych w ściekach. Także Leszczyńska [1999] oraz Słaba i Długoński [2002] stwierdzają, że wysokie stężenie tych metali w ściekach ma negatywny wpływ na procesy zachodzące w biologicznych oczyszczalniach ścieków, przede wszystkim poprzez toksyczny efekt jaki wywierają na organizmy tworzące osad czynny. Potwierdzają to także badania Stasinakisa i in.[2003], w których autorzy stwierdzają, że nadmiar jonów miedzi i chromu w ściekach poddawanych procesom oczyszczania metodą osadu czynnego obniża aktywność metaboliczną mikroorganizmów tworzących osad, osłabiając proces nityfikacji oraz zmniejsza skuteczność usuwania biogenów ze ścieków.

## **2.2. KOMUNALNE OCZYSZCZALNIE ŚCIEKÓW**

W Krajowym Programie Oczyszczania Ścieków Komunalnych [KPOŚK, 2003], który stanowi jeden z elementów Polityki Ekologicznej Państwa, jakim jest przede wszystkim poprawa jakości wód powierzchniowych podkreślono, że głównym celem odprowadzania i oczyszczania ścieków jest całkowita realizacja systemów kanalizacji zbiorczej i oczyszczalni ścieków na terenach o skoncentrowanej zabudowie. W dokumencie tym akcent położono także na konieczność osiągnięcia standardów jakości ścieków odprowadzanych do środowiska wodnego z oczyszczalni ścieków zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [2006] w sprawie warunków jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, jako jeden z podstawowych kroków w ochronie wód powierzchniowych przed zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego.

Program ten [KPOŚK 2003] zobowiązuje także eksploatatorów oczyszczalni ścieków do „zapewnienia 75% redukcji całkowitego ładunku azotu i fosforu w ściekach komunalnych z całego terytorium państwa w celu ochrony wód powierzchniowych, w tym wód morskich przed eutrofizacją” (art. 45 ust. 4 pkt.2 Ustawy z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne).

Na podstawie analiz zawartych w KPOŚK [2003] dotyczących wyposażenia aglomeracji w systemy kanalizacji zbiorczej i oczyszczalnie ścieków oraz zagospodarowania osadów ściekowych, przekazanych przez gminy stwierdzono, że: wszystkie duże aglomeracje kraju ( $RLM \geq 15\ 000$ ) wyposażono w systemy kanalizacji zbiorczej. Są to przede wszystkim systemy mieszane, w których występują zarówno sieci kanalizacji ogólnospławnych jak i sieci kanalizacji sanitarnych. Stwierdzono także, iż w aglomeracjach o średniej wielkości ( $RLM < 15\ 000$ ) przeważają systemy kanalizacji sanitarnej łączonej. Autorzy programu [KPOŚK 2003] podają także, iż w 162 aglomeracjach o RLM wynoszącej  $2000 \div 15\ 000$  (na ogólną liczbę 936 aglomeracji w tej grupie wielkości) brak jest systemów kanalizacji zbiorczej.

Analiza wykazała również, że w aglomeracjach istnieją 683 oczyszczalnie ścieków, których odpływy spełniają wymagania wspomnianego wcześniej RMŚ [2006] odnośnie jakości ścieków, przy czym w 377 oczyszczalniach wprowadzono już rozwiązania docelowe zapewniające pełną lub częściową obsługę aglomeracji do 2015r. Natomiast 306 oczyszczalni będzie wymagało rozbudowy lub w najbliższym czasie będzie konieczna budowa dodatkowych oczyszczalni ścieków. W części ankietowanych oczyszczalni modernizacji wymaga jedynie gospodarka osadowa, a wystarczająca redukcja ładunków zanieczyszczeń biodegradowalnych jest już dzisiaj osiągnięta.

Karvelas i in. [2003] uważają, że głównym zadaniem dobrze funkcjonującej oczyszczalni ścieków jest uzyskanie jak najlepszej jakości odprowadzanych, po procesie oczyszczania ścieków do odbiornika poprzez czuwanie nad prawidłowością przebiegu procesu oczyszczania ścieków komunalnych. Jednak bardzo często zdarza się, że w nawet najlepiej działającej mechaniczno – biologicznej oczyszczalni ścieków duży ładunek metali ciężkich wraz z dopływającymi ściekami powoduje silne zanieczyszczenie produktu ubocznego oczyszczania ścieków, jakim są osady ściekowe. W konsekwencji ich wysoka koncentracja w osadach niejednokrotnie uniemożliwia przyrodnicze ich zagospodarowanie.

### **2.2.1. Sposoby oczyszczania ścieków komunalnych**

Wielu autorów uważa, że ponieważ podstawowym celem oczyszczania ścieków jest usunięcie z nich jak największej ilości substancji zanieczyszczających, oddzielanych przede wszystkim w postaci osadów ściekowych, nie ma możliwości zapobiegania powstawaniu tego rodzaju odpadów [Imhoff , Imhoff 1996, Dymaczewski, i in., 1997, Krzywy 1999, Tyszka i in. 1998].

Oczyszczalnie ścieków wykorzystują jeden lub więcej stopni oczyszczania ścieków: wstępne-mechaniczne, biologiczne lub chemiczne. Każdy kolejny stopień zapewnia wyższy poziom oczyszczenia ścieków, ale równocześnie większą produkcję osadów ściekowych. Według danych statystycznych [GUS 2005] w Polsce w 2004 r. działały 2763 komunalne oczyszczalnie ścieków, w których oczyszczano ponad 1,6 tys. hm<sup>3</sup> ścieków. Obsługiwały one 22538,6 tys. ludności, tj. 59% ludności kraju. Ogółem oczyszczalnie ścieków komunalnych wytwarzały ponad 476 tys. Mg osadów w przeliczeniu na suchą masę.

Ze względu na specyfikę niniejszej pracy w podrozdziale tym bardziej szczegółowo przedstawiono jedynie metodę mechaniczno – biologicznego oczyszczania ścieków z wykorzystaniem procesu osadu czynnego.

Jak podaje Krzywy [1999] oczyszczanie mechaniczne, stosowane jest najczęściej jako pierwszy stopień oczyszczania ścieków, opierający się na procesach: cedzenia, rozdrabniania, sedymentacji i flotacji. W celu przeprowadzenia procesu mechanicznego oczyszczania ścieków wykorzystuje się takie urządzenia jak kraty, sita, rozdrabniarki, piaskowniki, osadniki i odtłuszczacze [Tyszka i in. 1998]. Autorzy ci podkreślają zgodnie, że efektem tego sposobu oczyszczania ścieków jest usunięcie ze ścieków zanieczyszczeń unoszonych i włączonych np. papierów, resztek żywności, piasku i innych cząstek mineralnych, zawieszin łatwoopadających oraz tłuszczu i olejów.

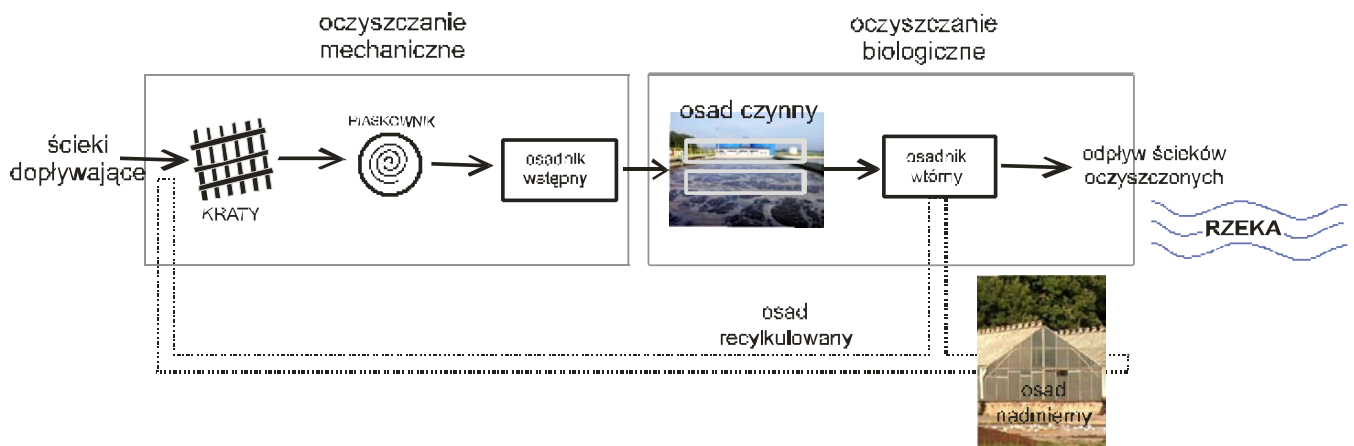
Oczyszczanie biologiczne zazwyczaj przyjmowane jest jako drugi etap oczyszczania ścieków. Po etapie oczyszczania mechanicznego z ciał stałych i zawieszin łatwoopadających ścieki kierowane są do komór sztucznie napowietrzanych (przy użyciu aeratorów) z osadem czynnym. Jak podaje Barbusiński i Kościelak [1997] oraz Tyszka i in. [1998] metoda wykorzystująca mikrobiologiczny osad czynny jest jedną z najbardziej uniwersalnych i powszechnie stosowanych biologicznych sposobów oczyszczania ścieków. Ścieki dopływające systemem kanalizacyjnym do oczyszczalni ścieków stają się pożywką dla mikroorganizmów, które przy zapewnieniu im odpowiednich warunków temperatury, pH, zawartości tlenu intensywnie się rozmnażają [Imhoff, Imhoff 1996; Dymaczewski, i in., 1997]. Imhoff i Imhoff [1996] stwierdzili ponadto, że różnica między naturalnymi procesami samooczyszczania się wód a procesem oczyszczania ścieków zachodzącym w oczyszczalniach polega głównie na przyspieszeniu tych procesów w warunkach sztucznych przede wszystkim poprzez znaczne zagęszczenie biomasy. Tyszka i in. [1998] dodaje ponadto, że różnica między tymi dwoma sposobami oczyszczania polega na tym, iż organizmy biorące udział w oczyszczaniu ścieków przy użyciu osadu czynnego stale unoszą się w wodzie, a nadmierna biomasa organizmów wyprodukowana na materii ściekowej, o

której wspominają Imhoff i Imhoff [1996] jest usuwana i ewentualnie poddawana dalszym przemianom. Jednak w ostatnich latach, jak podkreśla Tyszka i in. [1998] wiele uwagi poświęca się także metodom pośrednim oczyszczania ścieków, do których autorzy ci zaliczają oczyszczanie na poletkach filtracyjnych i w filtrach gruntowych z zastosowaniem roślin np. turzyc (*Carex*), trzciny (*Phragmites australis*), pałki wodnej (*Typha latifolia*), szczególnie korzystne dla małych oczyszczalni ścieków.

Generalnie biologiczne oczyszczanie ścieków polega na wykorzystaniu przez mikroorganizmy osadu czynnego związków organicznych i nieorganicznych zawartych w ściekach surowych do zaspokojenia swoich potrzeb życiowych, przy sztucznym doprowadzaniu tlenu niezbędnego do prawidłowego funkcjonowania i metabolizmu mikroorganizmów [Dymaczewski i in., 1997; Tyszka i in., 1998; Krzywy 1999]. Z kolei Barbusiński i Kościelak [1997] dzielą proces biologicznego oczyszczania ścieków na dwa podstawowe etapy. Według nich etap I obejmuje przekształcenie na drodze biochemicznej rozpuszczonej materii organicznej w materiał komórkowy oraz przyłączenie cząstek koloidalnych przez przyrastającą biomasę. Drugim scharakteryzowanym przez tych autorów etapem biologicznego oczyszczania ścieków jest oddzielenie powstałej biomasy od oczyszczonych ścieków.

Wykorzystanie osadu czynnego jest najbardziej rozpowszechnioną metodą oczyszczania ścieków komunalnych, której podstawą jest zdolność mikroorganizmów do degradowania zanieczyszczeń znajdujących się w ścieku dopływającym do oczyszczalni. Jednak jak podkreśla Principi i in. [2006] biologiczne oczyszczanie ścieków komunalnych nie jest metodą efektywną, zwłaszcza w przypadku, gdy ścieki surowe (nieoczyszczone) są obciążone metalami ciężkimi. Autorzy ci argumentują, że ma to związek przede wszystkim z toksycznym efektem jaki mogą wywierać metale ciężkie na biomasę wchodzącą w skład osadu czynnego. Dodają także, że wysokie koncentracje metali ciężkich wpływają na zahamowanie wzrostu i rozwoju poszczególnych komórek mikroorganizmów, obniżając tym samym efektywność oczyszczania ścieków, zwłaszcza w zakresie procesów nityfikacyjnych.





Ryc. 5. Schemat oczyszczania ścieków metodą mechaniczno - biologiczną z wykorzystaniem osadu czynnego [opracowanie własne na podstawie danych literaturowych]

Według Eikelboom'a i van Buijsen'a [1999] najważniejszym elementem procesu oczyszczania metodą osadu czynnego są jego kłaczkki, w których odnaleźć można następujące składniki:

- żywe drobnoustroje, głównie bakterie;
- martwe komórki;
- nierozłożone wielkie organiczne cząstki gromadzone w kłaczkach;
- części nieorganiczne, np. piasek ze ścieków. Ilość tych substancji może wynosić od 10 do 50% ogólnej masy kłaczków.

Podobnie uważają także Barbusiński i Kościelniak [1997], którzy twierdzą, że powstające w wyniku biologicznej flokulacji zooglealne skupiska mikroorganizmów (kłaczkki) odgrywają główną rolę w procesie osadu czynnego, gdyż ich właściwości fizyczne mają istotny wpływ na transport substratu do wnętrza skupisk, flokulację mikroorganizmów oraz efektywność oddzielania biomasy osadu w osadnikach. Ponadto autorzy ci dodają, że właściwości fizyczne kłaczków osadu czynnego mają duże znaczenie dla zagęszczania i odwadniania osadu nadmiernego podczas jego unieszkodliwiania. Skupiska tego rodzaju kłaczków składają się, z oprócz wcześniej wymienionych mikroorganizmów, także z pozakomórkowych biopolimerów oraz z cząstek stałych adsorbowanych ze ścieków. Tyszka i in. [1998] podają, że kłaczkki osadu czynnego utrzymują skupisko mikroorganizmów oraz chronią bakterie osadu przed ich konsumentami.

Przyjmuje się, że najbardziej istotnym składnikiem osadu czynnego są bakterie, od których aktywności, co wyraźnie podkreśla Tyszka i in. [1998], zależy efektywność oczyszczania ścieków komunalnych. Decydujące znaczenie w kwestii składu i stanu populacji osadu odgrywa rodzaj i ilość dopływających do oczyszczalni ścieków. Jak twierdzi Tyszka i in. [1998] oraz Eikelboom i von Buijsen [1999] najczęściej w próbce osadu czynnego analizowanej pod mikroskopem spotkać można: pierwotniaki, wrotki i nicienie. Eikelboom i van Buijsen [1999] twierdzą, że wśród pierwotniaków najczęściej spotykane są *Sarcodina* (formy amebowe), *Flagellata* i *Ciliata*. Autorzy ci uważają, iż w normalnych warunkach dominacja jednej z grup związana jest z wiekiem osadu. Formy amebowe dominują podczas rozruchu oczyszczalni lub gdy reaktor powraca do normalnego stanu pracy po dłuższej awarii lub zachwianiu przebiegu procesu spowodowanym nagłym zwiększonym obciążeniem hydraulicznym lub zrzutem toksycznych ścieków przemysłowych. Wiciowce z kolei przeważają w populacji mikroorganizmów, jeżeli komora osadu czynnego pracuje z wysokim obciążeniem (krótki wiek osadu). Z kolei Tyszka i in. [1998] dzielą mikroorganizmy osadu czynnego na trzy grupy ze względu na funkcję, jaką dany organizm pełni w osadzie. Do pierwszej grupy zaliczają mikroorganizmy wytwarzające śluzowatą substancję umożliwiającą powstanie kłaczków osadu czynnego (najczęściej przewaga bakterii z gatunku *Zooglea ramigera*). Podkreślają jednak, że zachwianie warunków w komorze osadu czynnego (zwłaszcza tlenowych) może spowodować nadmierny rozwój bakterii nitkowatych, które powodują rozluźnienie struktury kłaczków osadu czynnego a nawet, na co także zwraca uwagę Eikelboom i van Buijsen [1999] ich nadmiar może doprowadzić do zjawiska pęcznienia osadu, co znacznie obniża efektywność oczyszczania ścieków. Drugą grupę tworzą bakterie heterotroficzne, którym Tyszka i in. [1998] przypisują ogromną rolę w procesie oczyszczania ścieków komunalnych, ze względu na umiejętność enzymatycznego rozkładu związków organicznych, wykorzystywaniu dostępnych źródeł węgla, azotu i fosforu oraz syntezy biomasy komórek. Trzecią grupę organizmów tworzących osad czynny, według Tyszki i in. [1998] tworzą jednokomórkowe pierwotniaki (*Protozoa*), do których podobnie jak Eikelboom i von Buijsen [1999] oraz Dymaczewski i in. [1997] zaliczają wiciowce (*Flagellata*) i orzęski (*Ciliata*) oraz korzenionózki (*Rhizopoda*). Ponadto Tyszka i in. [1998] w skład osadu czynnego zaliczają także sporadycznie występujące wrotki, nicienie, skąposzczety, wioślarki i widłonogi.

Dymaczewski i in. [1997] podaje, że efektywność pracy procesu osadu czynnego oraz jego skład zależy od szeregu czynników:

- podatności ścieków na oczyszczanie biologiczne;
- wieku osadu i obciążenie osadu ładunkiem BZT;
- wahań w stężeniu substancji utrudniających proces (najczęściej pochodzenia przemysłowego);
- hydraulicznego czasu przetrzymania;
- warunków procesu takich jak: stężenie tlenu, pH, stężenie osadu czynnego, obecność azotu i fosforu, obecność substancji szkodliwych (metali ciężkich);
- pracy osadnika wtórnego.

Natomiast Eikelboom i van Buijsen [1999] uzupełniają te czynniki przede wszystkim o stan zdrowotny osadu czynnego, wyrażony najczęściej ilością organizmów nitkowatych i prędkością poboru tlenu przez mikroorganizmy. Według tych autorów czynnik ten ma podstawowe znaczenie w efektywności oczyszczania ścieków komunalnych.

Według Chipasa [2003] akumulacja oraz transport metali ciężkich w systemie oczyszczania ścieków związane jest z czterema głównymi mechanizmami:

- biosorpcją, która jak podaje Hughes i Poole [1989] jest sumą pasywnych oddziaływań komórek mikroorganizmów tworzących osad czynny z jonami metali ciężkich;
- bioakumulacją, która jest aktywnym oddziaływaniem między komórkami mikroorganizmów a jonami metali ciężkich wnikającymi do wnętrza komórek organizmów tworzących osad czynny;
- sorpcją kłaczków osadu czynnego oraz
- rozpuszczalnością metali ciężkich obecnych w ściekach dopływających.

Pobieranie metali ciężkich przez osad czynny oraz ich transport wewnątrz systemu biologicznego oczyszczania ścieków ściśle zależy od tych fizycznych, chemicznych oraz biologicznych czynników [Chipasa 2003], które wzajemnie się przenikają i uzupełniają.

## **2.3 WPŁYW METALI CIĘŻKICH NA FUNKCJONOWANIE OSADU CZYNNEGO**

W małych miejscowościach i miastach, obsługiwanych przez średniej wielkości oczyszczalnie ścieków ( $Q_{\text{dmax}} = 1500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) typowe jest wspólne oczyszczanie ścieków bytowo - gospodarczych i przemysłowych. Jak wiadomo metale ciężkie są substancjami powszechnie spotykanymi w ściekach komunalnych, zwłaszcza jeśli w ich składzie znajdują się podczyszczone ścieki przemysłowe z galwanizerni czy zakładów wykorzystujących procesy powierzchniowej obróbki metali [Lester i in. 1979; Chua i in. 1999]. Równie dobrze udokumentowane w literaturze jest to, że wysokie koncentracje metali ciężkich są toksyczne dla organizmów żywych, zwłaszcza organizmów wodnych oraz dla mikroorganizmów tworzących osad czynny wykorzystywany przy biologicznym oczyszczaniu ścieków [Dilek i in. 1998, Chua i in. 1999].

Dlatego też Stasinakis i in. [2003] uznają, że takie łączenie różnych pod względem chemicznym ścieków powoduje większe prawdopodobieństwo zanieczyszczenia wód powierzchniowych, poprzez występowanie zwiększonej ilości metali ciężkich w ściekach oczyszczonych. Autorzy ci, podobnie jak Dilek i in. [1998] czy Chua i in. [1999] uważają, że podczas wspólnego oczyszczania ścieków zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia nadmiernych koncentracji metali ciężkich w osadzie czynnym, co w konsekwencji prowadzi do ograniczenia możliwości wykorzystania powstających podczas procesu oczyszczania osadów ściekowych.

Niektóre pierwiastki z dużej grupy metali ciężkich (Hg, Cd, Ag, Pb, Cr) wywierają silnie toksyczny efekt na komórki organizmów żywych bez żadnego udziału w naturalnych przemianach fizjologicznych, a toksyczność metali ciężkich, jak podają Słaba i Długoński [2002] może być spowodowana:

- blokowaniem grup funkcyjnych enzymów;
- wypieraniem z komórek mikroorganizmów metali niezbędnych dla prawidłowego funkcjonowania ich metabolizmu.

Natomiast Skłodowska [2000] dodaje, że szkodliwy wpływ tych substancji to także wywoływanie zmian w metabolizmie (głównie deformacja białek) mikroorganizmów. Ponadto Morgan i Lackey [1958] sugerują, że główną przyczyną negatywnego wpływu tych substancji na mikroorganizmy osadu czynnego jest blokowanie systemu enzymów czy też

interakcje z którymś istotnym czynnikiem odpowiadającym za prawidłowy przebieg metabolizmu w komórkach bakterii.

Toksyczność metali ciężkich w odniesieniu do mikroorganizmów osadu czynnego jest w literaturze dobrze rozpoznana [Nies 1999; Ehrlich 1997; Lester i in. 1979; Chipasa 2001; Słaba, Długoński 2002]. W świetle przeprowadzonych licznych badań ich obecność w dużej koncentracji w ściekach stwarza nie tylko znaczne zagrożenie dla jakości wód powierzchniowych, ale wpływa także na zmniejszenie mikrobiologicznej aktywności mikrofauny.

Jak podkreśla Yetis i Gokcay [1989] potencjalna toksyczność metali ciężkich w osadzie czynnym zależy przede wszystkim od dwóch głównych czynników: od rodzaju i formy występowania metalu oraz od jego koncentracji. Także Słaba i Długoński [2002] stwierdzają, że oddziaływanie metali ciężkich na drobnoustroje zależy od stężenia konkretnych metali, gdyż według nich biosorpcja metali zwiększa się wraz ze wzrostem stężenia, po czym stabilizuje się i dalszy wzrost stężenia metali nie zwiększa ich biosorpcji. Potwierdzają to także badania Chipasa [2001] oraz Malika i Ahmada [2002], którzy podkreślają, iż istotnymi czynnikami zwiększającymi toksyczne działanie metali ciężkich jest pH, jakość i ilość mikroorganizmów tworzących kłaczkę osadu czynnego oraz ładunek metali wnoszony wraz z wpływającym ściekiem surowym. Surittanonta i Sherrad [1981], Dilek i Yetis [1992] oraz Karvelas i in. [2003] stwierdzają także, iż rozpuszczalność formy jonowej w jakiej dany metal występuje w momencie zrzutu do kanalizacji ogólnospławnej może dodatkowo wpływać na toksyczność metali ciężkich w odniesieniu do mikroorganizmów osadu czynnego, jednak już w nieco mniejszym stopniu.

W przeprowadzonych badaniach Dilek i in. [1998] stwierdzili, że relatywnie niskie koncentracje poszczególnych metali ciężkich w ściekach surowych mogą niekiedy wpływać stymulująco na biologiczny system oczyszczania ścieków. Z kolei Stasinakis i in. [2001; 2003] twierdzą, że wzrost zawartości metali ciężkich w ścieku dopływającym do biologiczno – mechanicznych oczyszczalni może częściowo obniżać wydajność i efektywność prowadzonego procesu oczyszczania. Teorię tą potwierdzają badania wielu autorów, którzy stwierdzili, że zwiększone ilości metali ciężkich w ściekach wpływają hamująco na zachodzące w osadzie czynnym procesy metaboliczne, zwłaszcza na nityfikację i denityfikację [Braam, Klapwijk 1981; Waara 1992; Chipasa 2001; Nowak i in. 2001; Leszczyńska 1999]. Ponadto Madoni i in. [1995] stwierdzili, że wysokie koncentracje substancji szkodliwych, jakimi są metale ciężkie znacznie obniżają, prowadzony przez mikroorganizmy, tlenowy rozkład substancji organicznych.

Mimo bardzo powszechnego występowania metali ciężkich w środowisku oraz ich udokumentowanej toksyczności, liczne drobnoustroje są zdolne do życia, rozrodu i wzrostu w specyficznych warunkach podwyższonej koncentracji tych pierwiastków. Według Słabej i Długońskiego [2002] jest to możliwe dzięki wytworzeniu w mikroorganizmach odporności na związki metali. Według tych autorów tolerancja na metale ciężkie jest uzależniona przede wszystkim od aktywności biochemicznej i zmian w budowie komórek mikroorganizmów. Zestawienie tabelaryczne (tab.2) przedstawia różną zdolność przystosowywania się mikroorganizmów osadu czynnego do specyficznych warunków podwyższonej koncentracji metali ciężkich w ściekach oczyszczanych, przejawiającą się różnorodnym poziomem tolerancji w odniesieniu do konkretnych metali ciężkich (tab.2), odmiennie wpływających na metabolizm komórek mikroorganizmów tworzących osad czynny.

**Tabela. 2.** Przystosowanie mikroorganizmów osadu czynnego do warunków podwyższonej koncentracji metali ciężkich [opracowanie własne na podstawie danych literaturowych].

	Metal	Dilek, Yetis [1992]	Madoni i in. [1996]	Leszczyńska [1999]	Cardinaletti i in. [1990]	Shuttleworth, Unz [1988]
Cr	nie wpływa istotnie na zmianę w mikroflorze osadu czynnego [mg .dm-3]	25	26,2			
	poziom toksyczny dla bakterii osadu czynnego [mg .dm-3]	50	68,8			
Zn	nie wpływa istotnie na zmianę w mikroflorze osadu czynnego [mg .dm-3]		0,57		0,6 – 1,2	
	poziom toksyczny dla bakterii osadu czynnego [mg .dm-3]		> 10	>5,6		
Cu	nie wpływa istotnie na zmianę w mikroflorze osadu czynnego [mg .dm-3]	do 10				
	poziom toksyczny dla bakterii osadu czynnego [mg .dm-3]		3,1			63,5
Ni	nie wpływa istotnie na zmianę w mikroflorze osadu czynnego [mg .dm-3]					
	poziom toksyczny dla bakterii osadu czynnego [mg .dm-3]			0,1-0,7		

Skład i stan ścieków przemysłowych (będących integralną częścią ścieków komunalnych) doprowadzanych miejską kanalizacją do oczyszczalni jest mało przewidywalny, uzależniony głównie od ich źródła. Jak podaje Tsai i in. [2005] efekt jaki metale ciężkie wywierają na mikroorganizmy osadu czynnego jest zjawiskiem bardzo złożonym i trudnym do scharakteryzowania. Uwarunkowane jest to przede wszystkim różnorodnością występujących w osadzie czynnym mikroorganizmów. Wielu autorów stwierdziło ponadto, że pomimo iż wpływ poszczególnych metali ciężkich na mikroorganizmy nie jest dobrze rozpoznany, to bezsprzecznym jest fakt że obecność metali ciężkich może powodować zmiany w strukturze osadu czynnego poprzez modyfikację ilości, jakości oraz różnorodności gatunków w nim występujących [Dilek, Gokcey 1996, Leszczyńska 1999, Tsai i in., 2005]. Tsai i in. [2005] podkreślają także, że niektóre z bakterii, grzybów czy pierwotniaków wchodzących w skład osadu czynnego wykazują dużą tolerancję na podwyższone zawartości metali ciężkich w ściekach, inne z kolei charakteryzują się znaczną wrażliwością na obecność tych toksycznych substancji. Potwierdza to także Macaskie [1990], który opisuje grupę mikroorganizmów mających zdolność do usuwania metali ciężkich, bez wyszczególniania ich wrażliwości na te specyficzne substancje toksyczne. Lester i in. [1979] oraz Tsai i in. [2005] podkreślają, że ciekawym zjawiskiem jest fakt, że takie same koncentracje metali ciężkich mogą być toksyczne dla jednych mikroorganizmów, a jednocześnie są silnym stymulatorem rozwoju innych grup mikroorganizmów osadu czynnego. Jak stwierdzili Madoni i in. [1996] ten sam metal z jednej strony może powodować ponad 50% śmiertelność jednego z gatunku mikroorganizmów występujących w osadzie czynnym, z drugiej jednak może nie oddziaływać lub wpływać w niewielkim stopniu na pozostałe mikroorganizmy tworzące zwarty system osadu czynnego.

Stasinakis i in. [2003] podkreślają, że obecność różnego rodzaju metali ciężkich w osadzie czynnym prowadzi niejednokrotnie do całkowitego rozerwania kłaczków osadowych, spadku ilości i różnorodności gatunków protozoa oraz zaniku wrotków. Taka sytuacja uniemożliwia przeprowadzenie prawidłowego procesu oczyszczania, ze względu na zmianę składu mikrobiologicznego osadu czynnego oraz jego fizyczny rozpad.

Rodzaj, jakość, występowanie i aktywność mikroorganizmów w osadzie czynnym ma kluczowe znaczenie dla całego procesu biologicznego oczyszczania ścieków. W odniesieniu do usuwania metali ciężkich przy użyciu osadu czynnego biosorpcja ma najistotniejsze znaczenie. Zjawisko to, polegające na wiązaniu metali ciężkich poprzez wbudowywanie ich w żywe komórki mikroorganizmów, bądź unieruchamianie w biomacie jest głównym czynnikiem powodującym znaczną redukcję zawartości metali ciężkich w ściekach [Volesky,

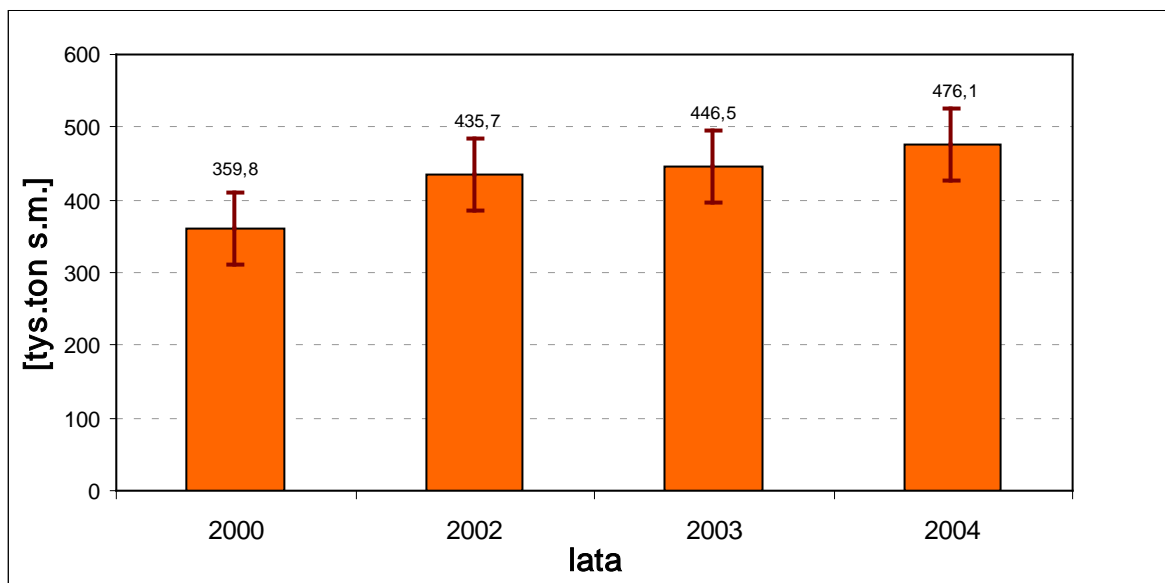
Holan 1995; Valix i in. 2001]. Dodatkowo, Bitton i Freihofer [1978] twierdzili, że to właśnie mikrobiologiczne wiązanie metali ciężkich w postaci biopolimerów powoduje znaczne obniżenie toksyczności tych mikroelementów w oczyszczanych ściekach.

Zrozumienie interakcji pomiędzy koncentracją metali ciężkich a mikroorganizmami cieszy się w ostatnich latach ogromnym powodzeniem wśród naukowców, szczególnie ze względu na nowe możliwości w oczyszczaniu ścieków wysoko obciążonych metalami ciężkimi oraz szeroko pojętym oczyszczaniu i dbaniu o środowisko [Valix i in. 2001]. Już w niewielkich koncentracjach metale ciężkie mogą powodować morfologiczne zmiany u mikroorganizmów, a w konsekwencji mogą nawet spowodować zniszczenie ich komórek [Avakayan, 1994]. W naturalnych warunkach mikroorganizmy nie są przystosowane do obecności metali ciężkich, jednak niejednokrotnie poprzez szereg mutacji mogą się przystosować do specyficznych warunków podwyższonej koncentracji tych toksycznych substancji [Valix i in. 2001]. Takie przystosowanie mikroorganizmów może wspomóc efektywność oczyszczania ścieków, a także przyczynić się do lepszego oczyszczania środowiska – przede wszystkim wodnego. Lester i in. [1983] uważają, że podczas biologicznego procesu oczyszczania ścieków komunalnych powstaje stosunkowo duża ilość nadmiernego osadu ściekowego (około 1% ilości oczyszczanych ścieków), a w momencie gdy znaczna część metali ciężkich obecnych w ścieku surowym dopływającym do oczyszczalni ścieków zostanie zakumulowana w osadzie nadmiernym powstaje problem groźnego dla środowiska odpadu.

## **2.4. ILOŚĆ WYTWARZANYCH KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH**

Ilość osadów powstających w oczyszczalniach ścieków zależy od składu ścieków, sposobu i stopnia ich oczyszczania oraz od stopnia rozkładu substancji organicznych w procesach stabilizacji osadu, a także od stopnia uwodnienia. Na ryc. 6. przedstawiono ilość wytworzonych osadów ściekowych w komunalnych oczyszczalniach ścieków w okresie czterech lat (2000 – 2004) [GUS 2005].





Ryc.6. Ilość wytwarzanych osadów ściekowych na terenie kraju w latach 2000 – 2004  
[opracowanie własne na podstawie GUS 2005]

W okresie 2000-2004 odnotowano sukcesywny wzrost ilości wytwarzanych osadów w oczyszczalniach ścieków komunalnych o ok.116 tys. ton (ryc. 6), co bezpośrednio związane jest ze zwiększaniem się długości sieci kanalizacyjnej w kraju i sukcesywnie rosnącą liczbą ludności obsługiwanej przez oczyszczalnie ścieków [GUS 2005].

Jak można łatwo przewidzieć, w następnych latach produkcja osadów ściekowych nie będzie ulegała zmniejszeniu. Przewidywany wzrost ilości osadów ściekowych bezpośrednio związany jest przede wszystkim ze wzrostem ilości oczyszczanych ścieków oraz zwiększeniem się liczby mieszkańców objętych całkowitym systemem kanalizacji oraz zmianą komfortu życia codziennego, generującego coraz większą ilość zużytej wody i ścieków.

## **2.5. SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH**

Wielu autorów podaje, że właściwości osadów ściekowych zależą od rodzaju oczyszczanych ścieków, technologii ich oczyszczania oraz sposobu stabilizacji [Outwater 1994; Imhoff, Imhoff 1996; Kalembasa, Kalembasa 1997; Sadecka, Jędrzak 2004].

Bień [2002a] wymienia kilka podstawowych cech charakteryzujących osady ściekowe, do których zalicza między innymi:

- wysokie uwodnienie zmieniające się od ponad 99% w przypadku osadów surowych do 55 –80% dla osadów odwodnionych oraz poniżej 10% dla osadów poddanych procesowi technicznego suszenia;
- wysoką zawartość związków organicznych, podatnych na biologiczny rozkład (od 45 – 55% s.m. w osadach surowych do 75% s.m. w osadach ustabilizowanych);
- wysoka zawartość azotu (2 – 7%) przy jednocześnie stosunkowo niskiej koncentracji fosforu i potasu;
- bardzo zróżnicowaną zawartość metali ciężkich.

Autor ten podkreśla także, iż najwyższe koncentracje metali ciężkich najczęściej stwierdza się w przypadku osadów pochodzących z dużych komunalnych oczyszczalni ścieków zlokalizowanych na terenach uprzemysłowionych. Z kolei Dymaczewski i in. [1997] oraz Baran [2004], a także Oleszczuk [2006] uzupełniają tę listę właściwości charakterystycznych dla osadów ściekowych o zawartość organicznych substancji niebezpiecznych (WWA, PCB, węglowodory). Baran [2004] postuluje nawet o wprowadzenie uregulowań prawnych dotyczących ilości WWA w osadach ściekowych jako jednego z kryteriów wyznaczających ich przydatność do zagospodarowania. Ponadto Dymaczewski i in. [1997] zwracają uwagę na zróżnicowany stopień zagrożenia sanitarnego, który według tych autorów najwyższy jest w przypadku osadów surowych wstępnych. Natomiast stwierdzają oni iż najmniejsze zagrożenie sanitarne stwarzają osady ustabilizowane i higienizowane.

### **2.5.1. Zawartość makroelementów w komunalnych osadach ściekowych**

Wielu autorów podkreśla, iż o glebotwórczej i nawozowej wartości komunalnych osadów ściekowych decyduje przede wszystkim znaczna zawartość w nich substancji organicznej, azotu, fosforu i pierwiastków śladowych decydujących o prawidłowym rozwoju roślin i zwierząt [Mazur 1996; Urbaniak 1997; Baran i in. 1999a; Czekala 1999; Gambuś 1999; Johansson i in. 1999; Krzywy 1999; Boruszko i in. 2000;].

Jak podkreśla Urbaniak [1997] zawartość azotu w komunalnym osadzie ściekowym zależy w dużej mierze od sposobu i stopnia stabilizacji, natomiast Bień [2002a] i Krzywy [1999] stwierdzają, że skład chemiczny komunalnych osadów ściekowych uwarunkowany jest w dużej mierze ilością i składem dopływających do oczyszczalni ścieków, a przede wszystkim ilością i rodzajem zrzucanych do wspólnej kanalizacji ścieków przemysłowych.

W tabeli 3 przedstawiono zawartość głównych makroskładników zawartych w osadach ściekowych pochodzących z różnych mechaniczno – biologicznych oczyszczalni ścieków.

**Tabela 3.** Średnie zawartości makroskładników komunalnych osadach ściekowych pochodzących z różnych oczyszczalni ścieków [opracowanie własne na podstawie danych literaturowych].

Makroskładnik [% s.m.]	Maćkowiak i in. [2004]	Kalembasa i, Kuziemska [1993]	Krzywy i in. [2004]	Gondek i Filipek – Mazur [2005]
Azot (N)	3,9	4,2	5,82	4,1
Fosfor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3,2	1,2	1,32	2,02
Potas (K <sub>2</sub> O)	0,40	0,23	1,52	0,39
Wapń	3,5	3,02	1,83	4,5
Magnez	0,8	0,35	0,46	0,53

Analizując dane zestawione w tabeli można stwierdzić, że skład chemiczny poszczególnych osadów ściekowych pod względem zawartości w nich makroskładników jest zróżnicowany. Wskazuje to przede wszystkim na konieczność wykonywania badań każdej partii osadów przeznaczonych do wykorzystania na cele rolne jak i rekultywacyjne. Ponadto w analizowanych komunalnych osadach ściekowych zarówno zawartość azotu (od 3,9 do 5,82%) jak i fosforu (od 1,2 do 3,2) kształtuje się na wysokim poziomie. Z kolei koncentracja potasu jest bardzo niska (od 0,23 do 1,52%), co powoduje, że przy wykorzystaniu osadów ściekowych zwłaszcza na cele rolne, należy uwzględnić wzbogacenie stosowanych osadów w potas w formie mineralnych nawozów potasowych. Jak podaje Urbaniak [1997] oraz Bień [2002a] niewielkie ilości potasu są charakterystyczną właściwością komunalnych osadów ściekowych, co wynikać może przede wszystkim z dużej rozpuszczalności soli potasowych.

Bień [2002 a,b] stwierdza także na ogół bardzo dużą zawartość wapnia i niewielką ilość magnezu w komunalnych osadach ściekowych, choć jednocześnie podkreśla, że w znacznej mierze koncentracja tych makroskładników zależy od rodzaju doprowadzanych ścieków przemysłowych. Według tego autora w niektórych przypadkach zawartość wapnia w komunalnych osadach ściekowych może osiągnąć powyżej 10% s.m. (średnio 2 – 4%), magnezu natomiast stwierdza się w osadach niewiele, zazwyczaj od 0,1 do 1,8% s.m. Ma to również potwierdzenie w prezentowanej tabeli (tab. 3), gdzie średnia zawartość wapnia kształtuje się na poziomie 3%, a magnezu wynosi 0,5%.

Podsumowując można stwierdzić, że zawartość azotu w osadach surowych jest często wyższa, a w stabilizowanych podobna do zawartości tego składnika w gnojowicy oraz zawsze wyższa niż w oborniku. Zawartość fosforu jest podobna, lub wyższa niż w innych typowych nawozach organicznych. Natomiast koncentracja potasu zawsze kształtuje się na niższym

poziomie. Zawartość mikroelementów jest znacznie wyższa w porównaniu do ich zawartości w gnojowicy czy oborniku oraz znacznie wyższa od koncentracji tych elementów w kompostach sporządzonych z masy zielonej. Potwierdzają to badania prowadzone m. in. przez Siutę [1996] oraz Urbaniaka i Mokrzycką [1996].

## 2.5.2. Zawartość substancji szkodliwych w komunalnych osadach ściekowych

Osady ściekowe zawierają nie tylko substancje organiczne i biogeny, ale także takie zanieczyszczenia, jak metale ciężkie, syntetyczne substancje organiczne oraz czynniki chorobotwórcze. Podobnie jak w przypadku składników nawozowych, co podkreślają Urbaniak [1997], Krzywy [1999], Bień [2002a] oraz Krzywy i in. [2004] koncentracje mikroelementów, z których większość jest metalami ciężkimi zależy od składu i ilości dopływających do oczyszczalni ścieków przemysłowych. W tabeli 4 zestawiono najczęściej stwierdzane zawartości metali ciężkich w osadach z polskich oczyszczalni ścieków.

**Tabela 4.** Zawartości metali ciężkich w osadach ściekowych  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  s.m. pochodzących z różnych oczyszczalni ścieków [opracowanie własne na podstawie danych literaturowych]

Metal [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	Maćkowiak i in. [2004]	Kalembasa i Kuziemska [1993]	Krzywy i in. [2004]	Gondek i Filipek – Mazur [2005]
Kadm	2,9	8,0	1,7	2,73
Chrom	197	145,0	-	59,95
Miedź	131	200,0	213	121,5
Ołów	73,5	134,0	33,2	40,15
Rtęć	2,86	-	-	0,31
Nikiel	28,8	43,0	27,7	35,8
Cynk	1295	1504	456	1155

Analizując dane zestawione w tabeli 4 stwierdzono, że pod względem zawartości metali ciężkich skład chemiczny osadów ściekowych pochodzących z różnych oczyszczalni ścieków jest bardzo zróżnicowany. Zazwyczaj stężenie tych metali w komunalnych osadach ściekowych układa się następująco  $\text{Zn}>\text{Cr}>\text{Pb}>\text{Cu}>\text{Ni}>\text{Cd}>\text{Hg}$ . Układ ten, co potwierdza Krzywy [1999] jest uszeregowany odwrotnie w porównaniu ze wzrastającym szeregiem toksyczności w stosunku do środowiska, zwłaszcza w odniesieniu do ekosystemów wodnych.

Osady ściekowe mogą też stanowić zagrożenie sanitarne dla środowiska naturalnego oraz dla zdrowia i życia ludzi ze względu na obecność w nich organizmów patogennych. Należy jednak podkreślić, że właściwości sanitarne osadów są mniej rozpoznane niż chemiczne. Osady ściekowe zawierają znaczne ilości bakterii, wirusów, pierwotniaków i jaj

helmintów. Jak podaje Krzywy [1999] jest to spowodowane głównie zanieczyszczeniem ścieków fekaliami i dlatego autor ten zalicza osady ściekowe do grupy substancji budzących szczególne zastrzeżenia higieniczno – sanitarne, których stosowanie powinno podlegać ciągłej kontroli.

Według Kalisz i in. [1999] znacznym obciążeniem sanitarnym charakteryzują się zwłaszcza osady ściekowe pochodzące z małych oczyszczalni ścieków, które zawierają najczęściej ponadnormatywne zawartości bakterii chorobotwórczych z rodziny Enterobacteriaceae (*Salmonella*), grzybów, szczególnie tych zaliczanych do tzw. dermatofitów oraz znaczne ilości jaj pasożytów przewodu pokarmowego ludzi i zwierząt. Z kolei Bień [2002 a,b] uważa że najbardziej bogatymi pod względem gatunkowym są osady ściekowe pochodzące z miejskich oczyszczalni ścieków, gdyż mogą one zawierać nie tylko organizmy patogenne pochodzące od osób chorych lub nosicieli, ale również ze składowisk, rzeźni, przemysłu czy handlu. Autor ten dokumentuje także, iż krajowe osady ściekowe zawierają dość znaczne ilości jaj helmintów we wszystkich rodzajach osadów – wstępnych, wtórnych i przefermentowanych. Stwierdza ponadto, że dominującym rodzajem w osadach ściekowych są jaja *Ascaris sp.*, natomiast w mniejszym stopniu występują jaja *Toxacara sp.* i *Trichuris sp.* Do podobnych wniosków doszli także Kalisz i in. [1999], stwierdzając dodatkowo, że osady z małych oczyszczalni ścieków po przeprowadzeniu tlenowej stabilizacji charakteryzuje brak bakterii z rodzaju *Salmonella*.

Bień [2002 b] podkreśla także, że klasyczne procesy przeróbki osadów (stabilizacja) nie niszczą całkowicie chorobotwórczych organizmów, lecz redukują ich liczebność i żywotność. Z kolei Marcinkowski [2003] uważa, że stosowane w warunkach krajowych procesy stabilizacji osadów pozwalają na uzyskanie zadowalającego efektu likwidacji organizmów patogennych, pozwalające na zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych na cele rolne i rekultywacyjne.

## **2.6. PROBLEMY I OGRANICZENIA W ZAGOSPODAROWANIU KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH**

Istnieją liczne ograniczenia w możliwościach rolniczego wykorzystania ustabilizowanych osadów ściekowych. Według Barana [1997], Urbaniaka [1997] oraz Krzywego i in. [2004], ograniczeniem w wykorzystaniu komunalnych osadów ściekowych staje się między innymi ich dostępność oraz właściwości fizyczne (konsystencja, uciążliwość zapachowa, uwilgotnienie). Kalisz i Kaźmierczuk [1990] oraz Furczak i Wielgoszcz [2001] za równie często spotykany czynnik ograniczający rolnicze zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych podają ich zły stan sanitarny, powodowany obecnością jaj helmintów, wirusów i bakterii. Jednak najczęstszą przyczyną ograniczeń w wykorzystaniu tych cennych zasobów składników nawozowych w rolnictwie, i nie tylko jest zawartość w osadach ściekowych metali ciężkich [Krzywy; Wołoszyk 1996; Gambuś 1999; Johansson i in. 1999].

Podobne stanowisko prezentują także Kalembasa i Kalembasa [1997], według których kierunek wykorzystania osadów ściekowych uzależniony jest właśnie od koncentracji w nich metali ciężkich oraz od stopnia ich biologicznego skażenia.

Metale ciężkie w osadach ściekowych mogą występować w formie nieorganicznej lub w kompleksach organicznych. Może to mieć istotny wpływ na ich reakcje chemiczne w glebie, a przy powtarzającym się ich stosowaniu może dochodzić do zjawiska ich kumulacji. Aczkolwiek, część z metali, w tym śladowe ilości metali ciężkich są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania organizmów roślinnych i zwierzęcych. Należy jednak pamiętać, że w wyższych stężeniach substancje te mogą być toksyczne i stanowić mogą zagrożenie dla roślin, zwierząt i ludzi [Gworek i in. 1999].

Do najbardziej niebezpiecznych metali Kabata – Pendias i Pendias [1999] zaliczają kadm, który podlega stałej kumulacji w organizmach zwierząt i ludzi. Poza kadmem do metali niebezpiecznych autorzy ci kwalifikują również rtęć, ołów, chrom i nikiel, przede wszystkim dlatego, że trzy pierwsze metale charakteryzuje duża podatność na biokumulację [Kabata – Pendias, Pendias, 1999]. Ponadto McGrath [1994] oraz Mc Grath i in. [1995] uważają, iż wysoka koncentracja metali ciężkich w komunalnych osadach ściekowych wykorzystywanych w rolnictwie do nawożenia gleb może skutkować ograniczeniem mineralizacji związków węgla w glebie. Renella i in. [2002] dodaje, że gleby zawierające wysokie koncentracje metali ciężkich (Cu, Zn, Ni, Cd) będące efektem stosowania zanieczyszczonych osadów ściekowych mogą charakteryzować się znacznie mniejszą biomasa mikroorganizmów oraz mogą mieć zmienioną aktywność mikrobiologiczną.

Jak podkreśla Baran i in. [1999a] oraz Oleszczuk [2006] i Biernacka, Pawłowska [1999] przydatność osadów do przyrodniczego wykorzystania może być bardzo ograniczona także przez obecność w nich niepożądanych substancji organicznych, najczęściej pochodzenia przemysłowego, które łatwo ulegają kumulacji w środowisku. Najczęściej jako niepożądane substancje organiczne Baran [2004] oraz Johansson i in. [1999] wymieniają wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne – WWA, polichlorowane bifenyle – PCB, i policykliczne węglowodory PAH. Potwierdzają to także badania Wild'a i in. [1991] i Alcock'a i in. [1996]. Urbaniak [1997] stwierdza, że substancje te trafiają do komunalnych kanalizacji zazwyczaj bezpośrednio ze zrzutem ścieków przemysłowych, bądź pośrednio zostają wprowadzane od ludności ze ściekami bytowymi. Dlatego też w ostatnich latach większą uwagę zaczęto zwracać na wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne – WWA [Kirk, Lester 1990; Maliszewska - Kordybach 1991; Biernacka, Pawłowska 1994; Janoszka 1995; Bodzek 1996; Urbaniak 1997] o potwierdzonych właściwościach kancerogennych i mutagennych zawartych w komunalnych osadach ściekowych, a zwłaszcza w tych wykorzystywanych w rolnictwie, bądź do rekultywacji gruntów na cele rolne.

Warunkiem zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w rolnictwie, do rekultywacji gruntów, produkcji kompostów czy pasz jest spełnienie wymogów dotyczących m.in. dopuszczalnego obciążenia metalami ciężkimi [RMS 2002]. Obowiązujące w tym zakresie wartości dopuszczalne nie są trudne do spełnienia i znaczna część osadów ściekowych powstających w komunalnych oczyszczalniach ścieków charakteryzuje się poziomem zawartości metali znacznie niższym od dopuszczalnych [Bojanowska i in. 2000], nawet przy najostrejszych wymaganiach stawianych osadom wykorzystywanym w rolnictwie. Mimo to należy pamiętać, że zawartość tych składników w osadach zmienia się w szerokim zakresie i wymaga analizy chemicznej każdej partii osadów przeznaczonych do przyrodniczego wykorzystania.

Po przeprowadzeniu badań chemicznych, które potwierdzą możliwość wykorzystania danej partii osadów ściekowych do zagospodarowania, należy jeszcze uwzględnić ograniczenia w przyrodniczym użytkowaniu osadów ściekowych na rozważanych terenach. Dokładnie regulują to zapisy Ustawy o odpadach [2001], które stanowią iż osady nie powinny być stosowane:

- na obszarach Parków Narodowych i Rezerwatów przyrody;
- na wewnętrznych terenach ochrony pośredniej stref ujęć wody;
- w pasie gruntu o szerokości 50 m bezpośrednio przylegającego do brzegów jezior i cieków;
- na terenach zalewowych, czasowo podtapianych i bagiennych;
- na terenach czasowo zamrożonych i pokrytych śniegiem;
- na gruntach o dużej przepuszczalności (piaski lekkie, piaski słabogliniaste, piaski gliniaste lekkie), w których poziom wód gruntowych występuje 1,5m od powierzchni terenu;
- na gruntach rolnych o spadku przekraczającym 10%;
- na obszarach ochronnych zbiorników wód podziemnych;
- na obszarach objętymi formami ochrony przyrody, jeżeli osady zostały wytworzone poza tymi terenami;
- w odległości mniejszej niż 100 m od publicznych ujęć wody, domów mieszkalnych i zakładów produkcji żywności;
- na plantacjach warzyw i owoców, które bezpośrednio stykają się z ziemią;
- na gruntach wykorzystywanych jako pastwiska i łąki;
- na gruntach wykorzystywanych do uprawy roślin pod osłonami.

Ze względu na zmienny stopień zagrożenia dla środowiska naturalnego skład, sposób dozowania i wielkość dawek osadów przeznaczonych do przyrodniczego zagospodarowania muszą podlegać ścisłej kontroli [Ustawa o odpadach 2001; RMŚ 2002].

## **2.7. SPOSOBY ZAGOSPODAROWANIA KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH**

Zgodnie z Ustawą o odpadach [2001] komunalne osady ściekowe mogą być wykorzystane, jeśli są ustabilizowane (poddane procesom stabilizacji biochemicznej tlenowej lub beztlenowej) oraz odpowiednio przygotowane do celu i sposobu ich stosowania. Przygotowanie to polegać ma przede wszystkim na poddaniu osadów ściekowych obróbce biologicznej, chemicznej, termicznej lub innemu procesowi, którego celem jest obniżenie podatności komunalnego osadu ściekowego na zagniwanie i eliminacja zagrożenia dla środowiska lub zdrowia ludzi. Najbardziej rozpowszechnioną metodą zagospodarowywania komunalnych osadów ściekowych jest ich wykorzystywanie przyrodnicze (odzysk). Według

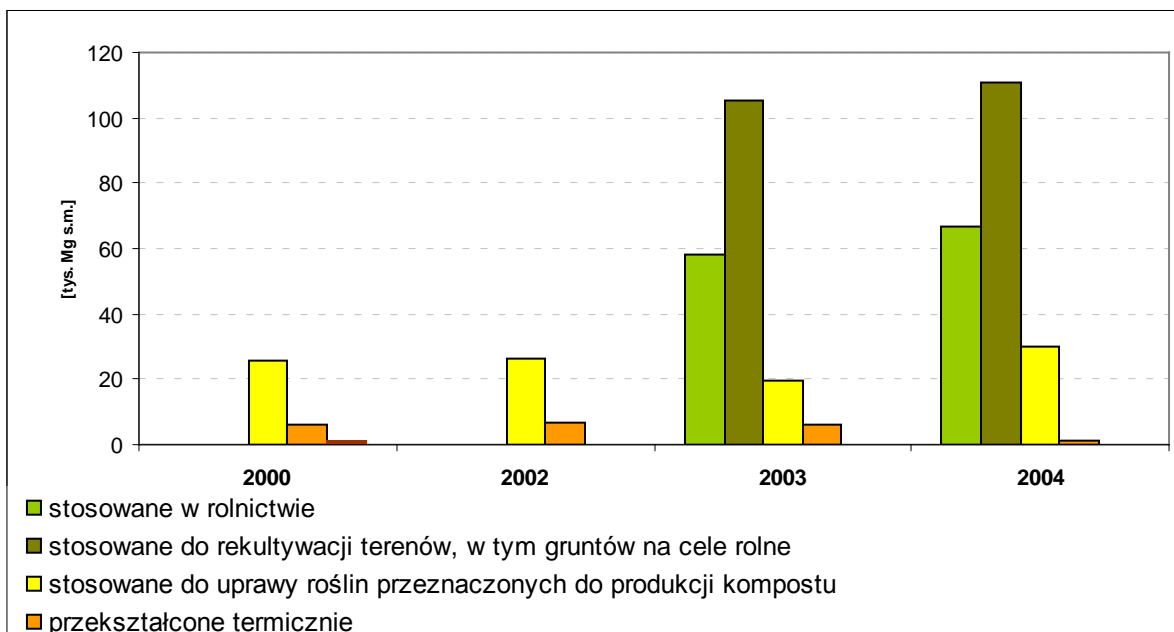


ustawodawcy [Ustawa o odpadach, 2001], przez odzysk rozumie się wszelkie działania niestwarzające zagrożenia dla życia, zdrowia ludzi lub dla środowiska polegające na wykorzystaniu osadów w całości lub w części, bądź też na odzyskaniu z nich substancji, materiałów lub energii i ich wykorzystanie. Dalej ustawodawca precyzuje, że zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych polega na ich stosowaniu:

- w rolnictwie, rozumianym jako uprawa wszystkich płodów rolnych wprowadzanych do obrotu handlowego, włączając w to uprawy przeznaczone do produkcji pasz;
- do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne;
- do dostosowania gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu;
- do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu;
- do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.

Ponadto Ustawa o odpadach [2001] stanowi, że przed zastosowaniem komunalne osady ściekowe oraz grunty, na których mają one być stosowane, powinny być poddane badaniom chemicznym. Dodatkowo w RMŚ [2002] w sprawie komunalnych osadów ściekowych ustawodawca określa warunki, jakie muszą być spełnione przy wykorzystywaniu osadów ściekowych, dawki tych osadów, które można stosować na gruntach oraz zakres, częstotliwość i metody referencyjne badań osadów oraz gruntów, na których osady mają być stosowane.

Analizując dane statystyczne [GUS 2005] można stwierdzić, że struktura udziału różnych form zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych wyraźnie zmienia się, szczególnie w ostatnich latach. Coraz częściej składowanie osadów zastąpione zostaje stosowaniem ich w rolnictwie, bądź wykorzystywaniem na cele rekultywacyjne (ryc.7).



Ryc. 7. Sposoby zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych wytwarzanych w Polsce w latach 2000 – 2004 (opracowanie własne na podstawie GUS 2005)

Po przeprowadzeniu analiz danych udostępnianych przez GUS [2005], stwierdzono, że w roku 2004 na terenie kraju około 32% osadów wytworzonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków było wykorzystywanych w rolnictwie, 53 % powstałych osadów stosowano do rekultywacji terenów, natomiast około 14% stosowano do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu. Jak wynika z powyższego wykresu jedynie nieco ponad 1% wytworzonych komunalnych osadów ściekowych poddano przekształcaniu (ryc.7). Porównanie danych zawartych w roczniku statystycznym GUS [2005] z uzyskanymi w połowie lat dziewięćdziesiątych wykazuje, że w tym czasie nastąpił dwukrotny wzrost ilości osadów wykorzystywanych w rolnictwie i do celów rekultywacji gruntów na cele rolne, a także coraz częściej komunalne osady ściekowe wykorzystywane są do produkcji kompostów i preparatów nawozowo-osadowych.

### 2.7.1. Stosowanie osadów ściekowych w rolnictwie i do rekultywacji terenów na cele rolne

Jak podaje Mazur i Wojtas [1993], a także Siuta [1999c] większość gleb w naszym kraju cechuje niska żyzność, zatem poprawa ich właściwości fizyko – chemicznych poprzez stosowanie osadów ściekowych, spełniających narzucone Ustawą o odpadach [2001] i RMŚ [2002] kryteria, jest najbardziej racjonalnym sposobem zagospodarowywania tych specyficznych odpadów. Zostało to potwierdzone badaniami przeprowadzonymi przez wielu autorów [Roszyk i in. 1987; Ciećko i in. 1996; Kalembasa, Kuziemska 1999, Siuta 1999a,

Kiryłuk 2003]. Wyniki tych prac potwierdzają przede wszystkim pozytywne oddziaływanie osadów ściekowych na żyzność gleby i plonowanie roślin. Jednoznacznie wskazują one, iż osady ściekowe jako odpady zasobne w substancje organiczną oraz mineralne składniki nawozowe, mogą wpływać nie tylko na właściwości chemiczne, fizykochemiczne gleby ale także mają wyraźny dodatni wpływ na plonowanie roślin. Oprócz tego, co podkreślają Roszyk i in. [1987] oraz Kalebasa i Kuziemska [1999] stosowanie osadów ściekowych wyraźnie poprawia aktywność mikrobiologiczną gleby. Potwierdza to także Johansson i in. [1999] stwierdzając, że o nawozowej przydatności osadów ściekowych decyduje ich zdolność do podnoszenia aktywności mikrobiologicznej w glebie oraz podnoszenie żyzności gleby i poprawa jej właściwości, szczególnie podczas długiego stosowania osadów ściekowych jako nawozu organicznego. Autorzy ci dodają, iż zwłaszcza skład i wielkość populacji mikroorganizmów glebowych jest bardzo wrażliwym indykátorem zmian zachodzących w glebie, zwłaszcza w odniesieniu do mikroflory i wpływu jej funkcjonowania na żyzność gleb. Wysuwają oni nawet postulat, że biomasa mikroorganizmów glebowych jest lepszym wskaźnikiem zmian zachodzących w glebie po zastosowaniu osadów ściekowych niż ogólna zawartość w niej węgla i azotu. Jednak wiele badań wskazuje, że wpływ stosowania komunalnych osadów ściekowych na żyzność i właściwości gleby jest niejednoznaczny. Po zastosowaniu osadów jako nawozu organicznego stwierdzono zarówno wzrost [Fliessbach i in. 1994; Johansson i in. 1999; Boyle, Poul 1989] jak i spadek liczebności mikroorganizmów glebowych na obszarach nawożonych [Chander, Brookes 1993]. Stosowanie osadów ściekowych powoduje także kilka bardzo pozytywnych efektów w nawożonej glebie. Johansson i in. [1999] stwierdza, że stosowanie komunalnych osadów ściekowych powoduje zwiększenie przyswajalności przez rośliny substancji odżywczych, wzrost zawartości materii organicznej, co jednocześnie powoduje poprawę stosunków wodnych w glebie oraz pozytywnie wpływa na poprawę struktury gleby.

Istnieje jednak kilka cech ograniczających dawkę nawozową osadów stosowanych jako nawóz do gleb. Zazwyczaj dawka ta jest ograniczona ze względu na:

- zawartość azotu w osadach;
- zawartość metali ciężkich w osadach;
- koncentracje metali ciężkich w glebach;
- obecność organizmów patogennych;
- konsystencję osadu.

Dirkzwager i in. [1997] zwracają szczególną uwagę na fakt, że zagospodarowywanie komunalnych osadów ściekowych w rolnictwie, jako bezpośrednia ich aplikacja do gleby może powodować wprowadzenie i dystrybucję zanieczyszczeń do środowiska naturalnego. Substancje zanieczyszczające, szczególnie gdy wprowadzane zostają w dużych koncentracjach, mogą powodować zmniejszenie plonów roślin oraz mogą mieć szkodliwe oddziaływanie na zdrowie ludzi i zwierząt. Wprowadzanie do gleby zanieczyszczonych metalami ciężkimi osadów może spowodować ich wymywanie do wód gruntowych i spływy powierzchniowe, zagrażające jakości wód powierzchniowych. Biernacka i Pawłowska [1999] twierdzą, że pobieranie metali ciężkich z osadów ściekowych stosowanych na glebach jest różne w zależności od formy ich występowania. Za najszybciej przechodzące do roztworu glebowego i pobierane przez rośliny autorki te uznają formy metali rozpuszczalne w wodzie, wymienne i związane z węglanami. Także frakcje związane z fazą stałą osadów, głównie z tlenkami żelaza i manganu oraz z substancją organiczną, są łatwo dostępne dla roślin, choć jak podaje Biernacka i Pawłowska [1999] ich uwalnianie zachodzi wolniej.

Aby ustabilizowany komunalny osad ściekowy zastosować w rolnictwie lub do rekultywacji gruntów na cele rolne muszą być spełnione kryteria sanitarne oraz chemiczne regulowane prawem [RMŚ 2002]. Zawartość metali ciężkich nie może przekroczyć wartości limitowanych RMŚ [2002], które wynoszą odpowiednio (w  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Pb – 500, Cd – 10, Hg – 5, Ni – 100, Zn – 2 500, Cu – 800, Cr – 500. Komunalny osad ściekowy może być wykorzystany w rolnictwie jeśli w 100g próby przeznaczonej do badań nie wyizolowano bakterii z rodzaju *Salmonella*, a łączna liczba żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxacara sp.*, w 1 kg s.m. osadu równa jest zeru. Natomiast przy stosowaniu osadów do rekultywacji gruntów na cele rolne zawartość żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxacara sp.*, w 1 kg s.m. osadu nie może przekroczyć 300 sztuk.

Wielu autorów wyróżnia trzy podstawowe grupy komunalnych osadów ściekowych: płynne, maziste, ziemiste i suche [Biernacka i Pawłowska, 1999; Johansson i in., 1999; Bień 2002a; Krzywy i in. 2004]. W przypadku stosowania komunalnych osadów ściekowych w rolnictwie lub do rekultywacji na cele rolne najbardziej pożądana jest ziemista, sypka konsystencja, która pozwala na równomierne rozprowadzenie i łatwe wymieszanie osadów z ziemią. Konsystencja płynna także umożliwia bezpośrednie wykorzystanie komunalnych osadów ściekowych w rolnictwie. Jednak niejednokrotnie ich bezpośrednia aplikacja do gruntu, przy takim stanie skupienia osadów, może przysporzyć wiele trudności wynikających przede wszystkim z ograniczonej dostępności do specjalistycznego sprzętu aplikującego. Oprócz tego w przypadku stosowania płynnych osadów zwiększa się znacznie uciążliwość

odorowa dla mieszkańców. Konsystencja mazista oraz sucha zbrylona sprawiają największe trudności w technice aplikacji osadów na grunty uprawne, a przede wszystkim uniemożliwia pełne wykorzystanie nawozowych właściwości tych specyficznych odpadów [Bień 2002a].

Czekała [2000] w swoich badaniach potwierdza wysoką skuteczność stosowania osadów ściekowych w rolnictwie. Autor podkreśla, że coroczne nawożenie gleb osadem ściekowym zwiększało pobieranie azotu oraz plon roślin. Autor wskazuje także, iż osady ściekowe mają bardzo korzystny wpływ na akumulację związków próchnicznych w glebie nie powodując jednocześnie większego zróżnicowania w ich rozpuszczalności oraz jakości. Podobne wyniki uzyskali także Krzywy i in. [2000], stwierdzając, że komposty wytworzone z komunalnych osadów ściekowych są doskonałym nawozem organicznym wyraźnie wpływającym na podwyższenie plonu uprawianych na nich roślin. Dodatkowo autorzy ci podkreślają, że osad ściekowy spełniający przewidziane prawem wartości dopuszczalne w odniesieniu do zawartości metali ciężkich, nie powodują zagrożenia dla roślin na nich uprawianych. Krzywy i in. [2000] dowodzą, że przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych nie następuje zwiększenie koncentracji metali ciężkich w roślinie, zwłaszcza dotyczy to kadmu, niklu i ołowiu.

### **2.7.2. Stosowanie osadów ściekowych do rekultywacji na cele nierolne**

Ze względu na zawartość metali ciężkich, mikrozanieczyszczeń organicznych oraz patogenów wykorzystanie komunalnych osadów ściekowych jako nawozu do produkcji rolnej czy też do rekultywacji gruntów na cele rolne jest możliwe tylko w ograniczonym stopniu [Siuta 1999c, Baran 2004]. Realnym natomiast jest wykorzystanie osadów do rekultywacji terenów zdegradowanych, biologicznego utrwalania powierzchni, poprawienia retencji wodnej (użytkowanie melioracyjne) oraz ewentualnie jako nawóz do produkcji roślin nieprzeznaczonych do bezpośredniego spożycia.

Wprowadzenie do wierzchniej warstwy gruntu bezglebowego odpowiedniej ilości osadu ściekowego, o znanym składzie fizyko – chemicznym, powoduje nadanie mu właściwości gleby. Tak utworzony grunt zawiera wszelkie składniki niezbędne do życia roślin, mikroflory oraz mikrofauny glebowej. Staje się więc glebą, która znacznie różni się od podłoża bezglebowego przede wszystkim odpowiednią zawartością substancji organicznej oraz makropierwiastków (zwłaszcza azotu). A należy pamiętać, jak podaje Siuta [1999c] rekultywacja polega na nadaniu lub przywróceniu zdegradowanym i zdewastowanym gruntom rolnym, leśnym lub gruntom bezglebowym wartości użytkowych lub przyrodniczych przez właściwe ukształtowanie rzeźby terenu, poprawienie właściwości fizycznych i

chemicznych gleb, uregulowanie stosunków wodnych, odtworzenie gleb czy umocnienie skarp.

Rekultywacyjne użytkowanie osadów ściekowych nie jest obarczone tak restrykcyjnymi normami jak rolnicze wykorzystanie tych odpadów. Szczególnie zauważalne jest to w dopuszczalnych zawartościach metali ciężkich, które limitują rekultywacyjne wykorzystanie osadów. Jednak przede wszystkim dotyczy to wskaźników obecności chorobotwórczych organizmów. Wynika to głównie z tego, że w co najmniej pierwszych dwóch okresach wegetacyjnych na terenach rekultywowanych nie uprawia się roślin jadalnych, a jak podaje Siuta [1999 c,d] po tak długim okresie czasu następuje sanitacja gleby. Za dawkę rekultywacyjną osadów ściekowych przyjmuje się taką ich ilość, która stworzy możliwość zazielenienia powierzchni poddanej rekultywacji [Siuta 1999 c].

Zatem osady kierowane do rekultywacji powinny:

- spełniać normy na zawartość metali ciężkich;
- być ustabilizowane, czyli mieć zmniejszoną zagniwalność;
- być zhygienizowane - zawartość żywych jaj pasożytów może wynosić do 300 na kg s.m. i brak bakterii *Salmonella*;
- być odwodnione do stopnia wymaganego przez metodę transportu i aplikacji;
- być w stanie, który utrudni migrację metali ciężkich z otrzymanej mieszaniny.

Rekultywacyjne użytkowanie osadów ściekowych będzie dominowało w Polsce nad użytkowaniem rolniczym do czasu obniżenia zawartości metali ciężkich w osadach ściekowych do poziomu zapewniającego odpowiednią jakość roślin jadalnych i paszowych. [Siuta 1999 c, Kiryluk 2003, Zarzycki, Wielgosiński 2003].

Zakończenie składowania odpadów na terenie do tego przeznaczonym wymusza konieczność dokładnego zagospodarowania terenu składowiska i jego rekultywację [Ustawa o odpadach, 2001]. Kiryluk [2003] podaje, że rekultywacja składowiska odpadów komunalnych oznacza wykonanie zabiegów technicznych i biologicznych, które będą minimalizowały zanieczyszczenie wód podziemnych i powierzchniowych, zanieczyszczenie środowiska glebowego oraz emisję szkodliwych gazów i areozoli bakteryjnych. Według tego samego autora, dość dobrze zostały rozpoznane i opracowane metody oraz technologie pokrywania składowisk warstwą gruntu, a jak dodaje Siuta i in. [1988] oraz Baran i in. [1999a] wykorzystanie do użyźniania okrywy glebowej składowisk komunalnych osadów ściekowych jest procesem bardzo pozytywnym. Jak podaje Biernacka, Pawłowska [1999], Czekała [1999]

oraz Krzywy i in. [2003] wykorzystanie tych specyficznych rodzajów odpadów pozwala na wzbogacenie gleby w składniki pokarmowe i równoczesną utylizację osadów. Dlatego też Siuta i in. [1999d], Biernacka Pawłowska [1999] oraz Czeakała [2000] podkreślają, że zagospodarowywanie osadów ściekowych spełniających uwarunkowane prawem normy [RMS, 2002] w procesie rekultywacji składowisk komunalnych można uznać za ekologiczną metodę ich unieszkodliwiania.

### **2.7.3. Stosowanie komunalnych osadów ściekowych do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu oraz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.**

Dymaczewski i in. [1997] oraz Siuta [1999 a,b] definiują kompostowanie osadów ściekowych jako proces zapewniający stabilizację związków organicznych, naturalną dezynfekcję, redukcję masy i uwodnienia osadów oraz produkcję stabilnego produktu końcowego, który może być wykorzystany w rolnictwie. Dirkzwager i in. [1997] dodaje ponadto, że proces kompostowania osadów ściekowych prowadzi do powstania produktu końcowego, który może być także zastosowany do poprawienia niektórych mechanicznych właściwości gleby, na której jest on wykorzystywany.

Siuta [1999a] podaje, że komposty (z odpadów z pielęgnacji zieleni jak i te wytworzone z osadów ściekowych) jako cenny nawóz organiczny mogą z powodzeniem zastąpić obornik czy inne nawozy organiczne, szczególnie w rejonach podmiejskich, gdzie występuje niedobór składników pokarmowych w glebach na skutek ich antropogenicznych przekształceń. Autor ten dodaje, iż komposty wykazują także przydatność w zakładaniu i konserwacji zieleni miejskiej. Wynika to głównie z faktu, że kompost wprowadzony do gruntu prowadzi do podwyższenia zawartości węgla organicznego w glebie [Drozd i in. 1999], zwiększa jej aktywność biologiczną oraz poprawia strukturę gleby [Krzywy i in. 1999; Siuta 1999 a,b; Krzywy i in. 2000], wpływając na intensyfikację życia biologicznego gleby oraz procesów glebotwórczych. Dodatkowo Siuta [1999 a] podaje, że przy piaszczystych podłożach komposty zwiększają ich pojemność wodną, zaś przy glebach ciężkich ułatwiają przepływ wody i powietrza, a tym samym zmniejszają ich podatność na erozję. Gleba staje się lżejsza i pulchniejsza, co umożliwia głębsze ukorzenie roślin.

Niezmiernie istotnym faktem jest to, że wprowadzanie do gleb substancji pokarmowych zawartych w kompoście (azotu, fosforu, potasu) - nawet przy jednoczesnym stosowaniu nawozów sztucznych - stanowi naturalną rezerwę tych składników, uruchamianą

w momentach występowania ich deficytu w glebie [Baran i in. 1999b; Siuta 1999 a,b; Gambuś, Wieczorek 1999; Krzywy i in. 2000].

Stosowanie osadów ściekowych w rolnictwie oraz w zabiegach rekultywacyjnych, jest zjawiskiem powszechnym. Podstawowym argumentem ponownego wykorzystania tych kłopotliwych odpadów jest przede wszystkim stosunkowo wysoka zawartość w nich składników nawozowych oraz substancji organicznej wyraźnie poprawiającej strukturę gleb i korzystnie wpływającej na powietrzno – wodne właściwości gleb [Koomen i in., 1990] . jednak te wartościowe surowce pochodzenia naturalnego jakim są osady ściekowe, mogą zawierać ponadnormatywne koncentracje szkodliwych substancji, które przedostają się do środowiska po wielu latach stosowania osadów ściekowych. Taka sytuacja może spowodować akumulacje toksycznych elementów, zwłaszcza metali ciężkich do poziomu, w którym następuje zanieczyszczenie gleb [McGrath 1987]. Jak podkreśla autor stosowanie osadów ściekowych zawsze poprzedzone powinno być cyklicznymi badaniami fizyko – chemicznymi każdej przeznaczonej do aplikacji partii osadów. Jest to szczególnie ważne, ponieważ wiele przeprowadzonych badań wskazuje na silne obniżenie się ilości i różnorodności mikroorganizmów glebowych narażonych na podwyższone dawki metali ciężkich wprowadzanych wraz z osadem ściekowym do gleby .[McGrath 1987; Koomen i in. 1990; Siuta 1999].

#### **2.7.4. Jakość kompostów z osadów ściekowych**

Bardzo często wykorzystanie powstających na terenach oczyszczalni ścieków osadów napotyka na szereg problemów. Wynika to m.in. z ich mazistej konsystencji, dużej odorowości czy też zawartości drobnoustrojów chorobotwórczych. Ostatecznie najczęściej spotykanym ograniczeniem w przyrodniczym wykorzystaniu osadów ściekowych jest ponadnormatywna zawartość w nich metali ciężkich [Mazur 1996; Gambuś i Wieczorek 1999; Siuta 1999 b; Krzywy i in. 2000]

Jednak jak podaje Mazur [1996] czy Gambuś i Wieczorek [1999] właściwości fizykochemiczne osadów ściekowych można korygować poprzez ich kompostowanie z dodatkami organicznymi (słoma, trociny, kora, odpady z pielęgnacji terenów zieleni), co znacznie zwiększa możliwość wykorzystania. Dodatek materiałów organicznych, jak podaje Jędrzak [1998] powinien się kształtować w proporcjach objętościowych ok. 1:3. Wykorzystanie dodatku strukturotwórczego do procesu kompostowania osadów ściekowych umożliwi prawidłowy jego przebieg, gdyż jak podaje Siuta [1999a] kompostowanie samego osadu nie wytwarza temperatury niezbędnej do zniszczenia organizmów chorobotwórczych,



ani też nie powoduje obniżenia koncentracji metali ciężkich w końcowym produkcie. Natomiast dodatek do masy kompostowej substancji organicznej w postaci słomy, trociny, kory czy odpadów z pielęgnacji terenów zieleni wyraźnie wpływa na zmniejszenie w powstających z osadów kompostach koncentracji metali ciężkich, a także ułatwia osiągnięcie temperatury wymaganej do higienizacji kompostu [Siuta 1997; Siuta 1999b].

Komunalne osady ściekowe wraz z masą organiczną mogą być przetwarzane w systemach tradycyjnych (pryzmowych) lub też, szczególnie przy dużych oczyszczalniach ścieków stosuje się przetwarzane agrotechnicznie osadów, przy użyciu wielu sprzętów mechanicznych i rozwiązań technologicznych (kompostowanie osadów komunalnych metodą bioreaktorów).

Najczęściej jednak stosowaną metodą kompostowania jest metoda pryzmowa. Metoda ta polega na usypywaniu pryzm z osadów zmieszanych z materiałem strukturotwórczym oraz okresowym przewracaniu ich celem napowietrzania [Siuta 1999b].

Przebieg procesu kompostowania zależy od kilku parametrów tj.: liczby i rodzaju mikroorganizmów, stężenia tlenu, uziarnienia, zawartości wody, temperatury i odczynu. Wszystkie te parametry są współzależne i muszą być kontrolowane podczas przebiegu procesu dla zapewnienia jego efektywności i dobrej jakości produktu. Powinno się to odbywać zazwyczaj poprzez pomiar temperatury, wilgotności oraz przestrzeganie terminów przesywania materiału w pryzmie.

Zazwyczaj procesowi kompostowania poddaje się odwodnione osady ściekowe do 18-25 % s.m., które następnie miesza się ze środkiem strukturotwórczym, np. trocinami, wiórami bądź innymi odpadami, aż do uzyskania 40-50% s.m. mieszaniny. Stąd bardzo korzystne jest połączenie dwóch odpadów w procesie kompostowania np. osadów i organicznej frakcji odpadów komunalnych lub odpadów z pielęgnacji terenów zieleni miejskiej będącej źródłem węgla i azotu, poprawiając tym samym stosunek C:N, który powinien wynosić ok. 30:1 [Dymaczewski i in. 1997; Siuta 1999a,b].

Każdy odbiorca ma inne wymagania dotyczące jakości kompostu w zależności od celu jego zastosowania. Jak podkreśla Jędrzak [2001] wykorzystanie kompostu do nawożenia upraw wymaga produktu o wysokiej jakości, który nie ujawnia szkodliwego oddziaływania na zdrowie ludzi i zwierząt oraz na środowisko, czyli takiego kompostu w którym jest wysoka zawartość N, P, K oraz substancji organicznej oraz niewielka koncentracja metali ciężkich i organizmów patogennych. Jednocześnie autor zwraca uwagę, że kompostom przeznaczonym na cele nierolnicze (np. do rekultywacji zamkniętych składowisk odpadów komunalnych) stawia się o wiele mniej rygorystyczne wymagania.

Związane jest to głównie z tym, że zagospodarowanie kompostów na cele nierolne nie powoduje bezpośredniego zagrożenia przedostania się substancji szkodliwych (głównie metali ciężkich) do łańcucha pokarmowego i środowiska [Jędrzak 2001].

W związku z tym, jak podaje Barth [2002] najważniejszym czynnikiem wpływającym na możliwość sprzedaży kompostu jest jego niezmienna i przewidywalna jakość, potwierdzona przez niezależne instytucje kontrolne.

Podstawowymi substancjami odżywczymi w kompostach są azot, fosfor, potas, magnez i wapń. Wartość nawozową kompostu charakteryzuje się, podając ich całkowitą zawartość w produkcie oraz udział form rozpuszczalnych i dostępnych dla roślin. Wysoka temperatura procesu kompostowania zapewnia z kolei bezpieczeństwo kompostu pod względem sanitarnym, który musi spełniać również wymagania pod względem zawartości metali ciężkich

Dobry kompost powinien mieć ciemny kolor i ziemisty zapach. Powinien być materiałem jednorodnym, o jednolitej wielkości cząstek i wilgotności mniejszej niż 50 %. Optymalna wilgotność powinna mieścić się w zakresie od 25-35 %. Wyższa wilgotność powoduje liczne problemy techniczne; ogranicza możliwość workowania, utrudnia mieszanie z innymi materiałami i rozrzucanie oraz zwiększa koszty transportu. pH kompostu powinno mieścić się pomiędzy 6,0 i 7,8. Zawartość substancji organicznych w kompoście zależy od składu kompostowanych odpadów. Ilość substancji organicznych, wyrażona jako straty przy prażeniu, powinna być > 20 % s.m. Jeżeli zawartość substancji organicznej jest zbyt wysoka istnieje podejrzenie, że albo kompost jest niedojrzały albo ilość substancji organicznej w kompostowanych odpadach była bardzo wysoka. Kompost nie powinien zawierać tworzyw sztucznych, metali i materiałów twardych, w tym szczególnie kawałków szkła, które mogą prowadzić do skaleczeń. Kompost uznany za bezpieczny i akceptowany na rynku musi charakteryzować się niską zawartością metali ciężkich i toksycznych związków organicznych, niskim stężeniem soli rozpuszczalnych (mniej niż 25 mS/cm), brakiem czynników chorobotwórczych dla ludzi i zwierząt i nie powinien zawierać nasion chwastów. Bardzo ważny jest stopień przekompostowania odpadów (dojrzałość kompostu) oraz brak właściwości fitotoksycznych.

W zależności od stopnia przekompostowania rozróżnia się następujące rodzaje kompostu:

- kompost świeży; materiał wyjałowiony we wstępnym procesie kompostowania i pozbawiony większych składników poprzez przesianie. Komposty świeże charakteryzują się wysoką zawartością substancji organicznych. Mogą one szkodliwie oddziaływać na systemy korzeniowe roślin. Składowane w pryzmach ulegają dalszemu przekształcaniu, co może prowadzić do procesów gnilnych ze względu na niedobór tlenu. Iloraz węgla i azotu w świeżym kompoście waha się od 25/1 - 30/1. Wartość ilorazu C/N jest miarą dojrzałości kompostu. Im jest on mniejszy, tym bardziej dojrzały jest kompost.
- kompost dojrzały; kompost uzyskany ze świeżego kompostu przez dalsze jego kompostowanie aż do stanu, który nie jest szkodliwy dla systemu korzeniowego roślin. Wartości ilorazu C/N są znacznie mniejsze i z reguły nie przekraczają 15/1.

O wartości nawozowej kompostów decydują również mikroelementy, które w masie kompostowej dokładnie zhomogenizowanej, są rozmieszczone równomiernie i nie powodują miejscowego przedawkowania, wpływającego szkodliwie na rośliny. Obecność w glebach większości metali ciężkich (tj., B, Zn, Cu i Ni), w małych ilościach, jest niezbędną dla prawidłowego wzrostu roślin. Jednak, w wyższych stężeniach, mogą one działać hamująco na ich wzrost. Niepożądane są również podwyższone ilości innych pierwiastków śladowych w glebach (tj.: As, Cd, Pb i Hg), głównie z powodu ich szkodliwego oddziaływania na organizmy glebowe oraz zwierzęta i ludzi, którzy mogą spożywać zanieczyszczone rośliny lub mieć kontakt z glebą. Jak podaje Bilitewski i in. [1994] wpływ metali ciężkich na rośliny uprawiane na polach nawożonych kompostem zależy nie tylko od ich stężenia w glebach, ale też od własności gruntu takich, jak: pH, zawartość substancji organicznej i zdolność wymienna kationów. Różna jest też wrażliwość roślin na metale ciężkie obecne w glebach.

Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących przydatność nawozową kompostów jest zawartość w nich metali ciężkich [Siuta 1997; Siuta 1999c; Filipek – Mazur, Gondek 2003; Wang i in. 2005a]. Wang i in. [2005a] dodaje, że bardzo często wysoka koncentracja metali ciężkich w osadach ściekowych wykorzystanych do kompostowania może powodować zanieczyszczenie środowiska glebowego, już po ich nawozowym zastosowaniu, co zwiększa ryzyko ogólnego zanieczyszczenia środowiska.

Jak podaje Rutkowska i in. [1999] w kompostach najczęściej stwierdza się największą, spośród metali ciężkich, zawartość cynku a najmniejsze ilości dotyczyły kadmu. Ponadto

autorka podaje, że koncentracja metali ciężkich w kompostach wzrasta w szeregu: Cd<Ni<Cu<Pb<Zn, wykazując o wiele większą zmienność niż w przypadku makroskładników.

Należy pamiętać, iż komposty są substancjami o bardzo zróżnicowanym składzie chemicznym, i jak podaje Rutkowska i in. [1999] podlegającym okresowym, sezonowym wahaniom. Dlatego kontrola ich jakości przy każdorazowym ustalaniu dawek i częstotliwości wykorzystania jest niezbędna, aby móc przeciwdziałać ewentualnym zanieczyszczeniom środowiska naturalnego.

W polskim prawodawstwie brak jest standardów ustawowych określających klasy kompostu dopuszczalne zawartości w kompoście metali ciężkich, zanieczyszczeń organicznych, zanieczyszczeń fizycznych itd. Istnieją natomiast dobrowolne systemy jakości, propagowane przez stowarzyszenia producentów i/lub końcowych odbiorców kompostu. Dobrze rozwinięte są natomiast uzupełniające normy ustawowe, czyli akty prawne regulujące zasady gospodarowania odpadami ulegającymi biodegradacji:

- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach [Dz. U. Nr 62, poz. 628] - wymusza zgodny z zasadami ochrony środowiska odzysk odpadów ulegających biodegradacji, jeżeli nie udało się zapobiec ich powstaniu (art. 5), gromadzenie i zbieranie odpadów w sposób selektywny (art. 10).
- Akty prawne regulujące zasady projektowania, budowy i eksploatacji instalacji oraz uzyskiwania pozwoleń - lokalizacja zakładów w trybie przepisów o zagospodarowaniu przestrzennym (Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym [Dz.U. Nr 80 poz. 717]),
- Decyzje administracyjne w zakresie gospodarki odpadami (pozwolenia zintegrowane, zezwolenie na prowadzenie działalności w zakresie odzysku lub unieszkodliwiania, plany gospodarki odpadami);
- Akty prawne regulujące zasady nawożenia oraz ochronę środowiska glebowego i wodnego - regulują ograniczenia stosowania i maksymalne dawki kompostów (ustawa nawozach i nawożeniu z dnia 26 lipca 2000 (Dz. U. Nr 89, poz. 991) z rozporządzeniami wykonawczymi, ustawa z dnia 3 lutego 1995 r., o ochronie gruntów rolnych i leśnych (Dz.U. Nr 16, poz. 78, z późn. zm.), rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [Dz.U. Nr 165, poz. 1359]).

W oczyszczalniach ścieków, gdzie przeróbka osadów obejmuje proces fermentacji i odwadniania, kompostowanie może być zastosowane jako proces końcowego uszlachetniania osadów, pozwalający na uzyskanie materiału o wysokich cechach jakościowych, który może być wykorzystany przyrodniczo (przy założeniu, że spełnia on wymagania dotyczące zawartości metali ciężkich), bądź sprzedany potencjalnym odbiorcom. Kompostowanie osadów, pozwala na uzyskanie produktu dojrzałego, zhumifikowanego, całkowicie stabilnego, o zapachu ziemi i luźnej strukturze ułatwiającej stosowanie do nawożenia, dłuższego magazynowania bądź dogodnego transportu.

## **2.8. SKŁADOWANIE KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH**

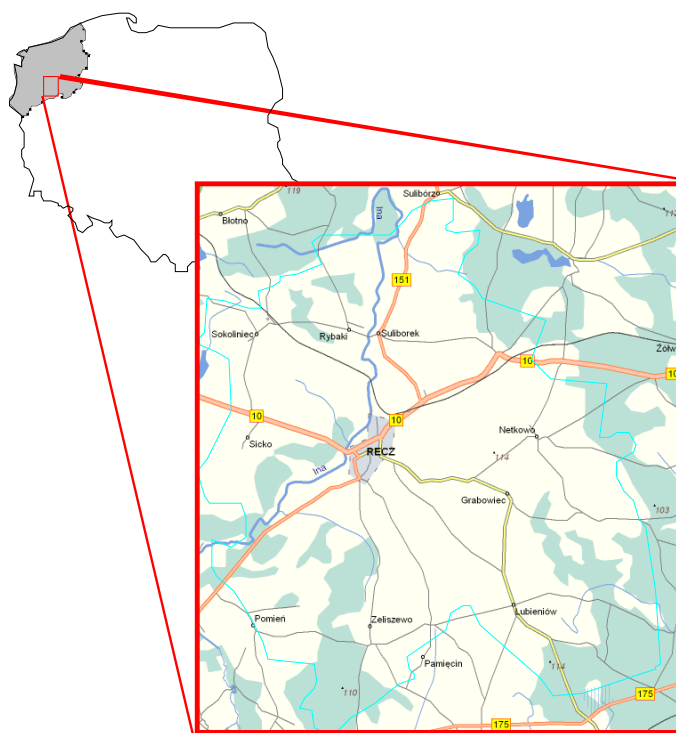
Nadal w Polsce najczęstszą formą zagospodarowywania wytwarzanych osadów ściekowych jest ich składowanie na terenach oczyszczalni (ponad 34% ) [GUS 2005]. Zgodnie z Ustawą o odpadach [2001] do składowania mogą być kierowane tylko te osady ściekowe, których unieszkodliwienie w inny sposób było niemożliwe z przyczyn technologicznych lub nieuzasadnione z przyczyn ekologicznych bądź ekonomicznych. Ponadto określono szereg zakazów dotyczących składowania tych specyficznych odpadów, m.in. nie wolno składować odpadów występujących w postaci ciekłej, w tym odpadów zawierających wodę w ilości powyżej 95% masy całkowitej (z wyłączeniem szlamów). Należy pamiętać także, iż osady kierowane na składowiska muszą zostać poddane procesom stabilizacji i odwodnienia. Dodatkowo składowanie łączy się z uiszczeniem opłaty za korzystanie ze środowiska, której wysokość zależy od rodzaju odpadu i od stanu uregulowań formalno – prawnych obiektu, na którym składowane są komunalne osady ściekowe.

## 3. CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

### 3.1. CHARAKTERYSTYKA GMINY RECZ

Informacje zawarte w niniejszym rozdziale pochodzą z Gminnego Programu Ochrony Środowiska [2003], Gminnego planu gospodarki odpadami [2003] oraz informacji uzyskanych w Urzędzie Stanu Cywilnego MiG Recz.

Gmina Recz zajmuje powierzchnię 180,35 km<sup>2</sup>, z czego powierzchnia miasta Recz to ok. 12 km<sup>2</sup>. Teren gminy zamieszkuje 6019 osoby (według danych UMiG na dzień 31.12.2003r.), co daje średnią gęstość zaludnienia 33,4 osoby/ km<sup>2</sup>. Gmina podzielona jest administracyjnie na 15 sołectw (Pomień, Żeliszewo, Rajsko, Pamięcin, Jarostowo, Sicko, Sokoliniec, Rybaki, Suliborek, Sulibórz, Słutowo, Wielgoszcz, Grabowiec, Nętkowo, Lubieniów) i 24 miejscowości. Siedzibą władz samorządowych jest jedyne miasto w obrębie Gminy – Recz.



Ryc.8. Położenie gminy Recz (opracowanie własne na podstawie [mapa.szukacz.pl](http://mapa.szukacz.pl))

Według podziału administracyjnego Polski gmina Recz leży w północnej części powiatu choszczeńskiego w południowo – wschodniej części województwa zachodniopomorskiego (ryc. 8.). Gmina Recz sąsiaduje z gminami: Choszczno i Drawno w

Powiecie Choszczeńskim, Kalisz Pomorski w Powiecie Drawskim, Dobrzany i Suchań w Powiecie Stargardzkim.

Gmina Recz pod względem użytkowania terenu jest obszarem rolniczym. Teren gminy jest w większości równinny, lekko pofałdowany. Dobre warunki klimatyczne i glebowe sprawiły, iż przeważający obszar gminy ma charakter rolniczy – z przewagą gruntów ornych i dominującymi glebami znajdującymi się w III i IV klasie bonitacyjnej gleb.

Gospodarka wodno – ściekowa na terenie Gminy Recz jest częściowo uregulowana. Wszystkie miejscowości na obszarze gminy (z wyjątkiem miejscowości Wielgoszcz) zaopatrywane są w wodę z miejskiej sieci wodociągowej. Istniejący na terenie gminy system kanalizacji ma charakter sieci ogólnospławnej, nie istnieje rozdzielczy system kanalizacji: sanitarny i deszczowy, wyposażony w separatory. Długość sieci kanalizacyjno - sanitarnej (ogólnospławnej) na terenie gminy Recz wynosi 34,0 km. Systemem tym objętych jest ok. 69% ludności zamieszkującej gminę Recz. Zbiorną sieć kanalizacji sanitarnej posiadają następujące miejscowości: Recz, Rybaki, Lubieniów, Nętkowo, Grabowiec. W pozostałych miejscowościach nie ma kanalizacji lub jest fragmentaryczna.

Ścieki wytwarzane na terenie gminy Recz (bytowo-gospodarcze, deszczowe, przemysłowe) oczyszczane są w trzech mechaniczno – biologicznych oczyszczalniach ścieków funkcjonujących na terenie gminy. Oczyszczalnie zlokalizowane są: w Reczu o dobowej przepustowości ok. 700 m<sup>3</sup>/d, Rybakach – ok. 20 m<sup>3</sup>/d i Lubieniowie – ok. 40 m<sup>3</sup>/d. Ze względu na specyfikę pracy w dalszej części rozdziału omówiono jedynie Miejską Oczyszczalnię Ścieków w Reczu.

### **3.2. OPIS KOMUNALNEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU**

Informacje zawarte w niniejszym podrozdziale pochodzą z: Pozwolenia Wodno – prawnego [2005] dla Komunalnej Oczyszczalni Ścieków w Reczu oraz „Instrukcji eksploatacji oczyszczalni w Reczu [1994].

Wyraźna intensyfikacja budowy oczyszczalni ścieków w naszym kraju przypada na połowę lat 90 – tych ubiegłego wieku. Podstawy projektowe tych oczyszczalni były stosunkowo proste i zakładały wzrost zużycia wody proporcjonalny do wzrostu poziomu życia mieszkańców. Jednak rosnące koszty związane z korzystaniem z wód i dość intensywnie rozwijająca się edukacja ekologiczna w zakresie ochrony zasobów środowiska spowodowały znaczne ograniczenia w ilości zużywanej wody, a tym samym zmniejszyły ilość dopływających do oczyszczalni ścieków. Mimo wszystko wraz ze stale malejącą ilością doprowadzanych ścieków wzrastało jednocześnie obciążenie ich ładunkiem zanieczyszczeń.

Miejska oczyszczalnia ścieków w Reczu należy do typu średnich oczyszczalni ( $Q_{\text{dmax}} = 1500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ), zaprojektowanych dla miejscowości poniżej 10 tys. mieszkańców. Zaprojektowana w latach 1984 – 1990 (projekt techniczny pochodzi z roku 1990) oczyszczalnia została oddana do użytku w lipcu 1994.

Miejska Oczyszczalnia Ścieków w Reczu zlokalizowana jest na terenie Obszaru Chronionego Krajobrazu „Drawno”, w południowo – zachodniej części miasta, ok. 200 m od drogi powiatowej Choszczno – Recz, na działkach nr 432/5 oraz 432/9 stanowiących własność gminy Recz. Aktualnie oczyszczalnia obsługuje 4 tys. mieszkańców gminy. Ścieki doprowadzone są siecią kanalizacji grawitacyjno – tłocznej z terenu miasta Recz oraz wsi Rybaki, Lubieniów, Nętkowo i Grabowiec. Obecnie szacuje się, że do oczyszczalni dopływa około  $700 \text{ m}^3$  ścieków na dobę czyli około 256 tys.  $\text{m}^3$  ścieków rocznie, co jest znacznie mniejszym obciążeniem niż zakładał projekt techniczny. Jednak liczba ta w krótkim czasie powinna ulec zmianie, gdyż do końca 2007 roku planuje się podłączenie do ogólnego systemu kanalizacyjnego pozostałych nieskanalizowanych miejscowości gminy (Sicko, Sokoliniec, Suliborek, Wielgoszcz i Słutowo). Po ukończeniu inwestycji planowane jest doprowadzanie ścieków docelowo w ilości  $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . Od roku 2004 użytkownikiem miejskiej oczyszczalni ścieków jest Zakład Usługowo – Handlowy „Komunalnik” Sp. z o.o.

Kilkukrotne analizy ścieków surowych potwierdzają, iż skład tych ścieków jest typowy dla ścieków bytowo – gospodarczych miejskich (z ok. 10% udziałem ścieków przemysłowych). Ścieki bytowo gospodarcze pochodzą przede wszystkim z gospodarstw domowych (zabudowa jedno – i wielorodzinna) oraz jednostek użytku publicznego (szkoła podstawowa, gimnazjum, restauracje i bary, Urząd Miejski, sklepy). Niewielki dodatek ścieków przemysłowych stanowią przede wszystkim okresowe zrzuty podczyszczonych ścieków technologicznych z miejscowych galwanizerni. Ścieki przemysłowe to głównie ścieki pogalwaniczne alkaliczno – kwaśne z procesów cynkowania i niklowania oraz ścieki chromowe z procesów chromowania wyrobów stalowych. Ścieki przed wprowadzeniem do ogólnej sieci kanalizacyjnej poddawane są neutralizacji w zbiornikach stalowych (komory reakcji) osobnej dla ścieków alkaliczno – kwaśnych i ścieków chromowych. W celu ograniczenia metali ciężkich z galwanizerni stosowane są płuczki odzyskowe. Po zneutralizowaniu ścieki spuszczone są do odstania na dwa przyzakładowe polećka osadowe [Pozwolenie wodno – prawne, 2005]. Następnie okresowo następuje spust wód nadosadowych do systemu kanalizacji miejskiej. Osady powstałe w wyniku neutralizacji ścieków galwanicznych są unieszkodliwiane i usuwane przez specjalistyczną firmę zewnętrzną, posiadającą zezwolenie na usuwanie odpadów niebezpiecznych.



### 3.2.1 Parametry techniczne

Powstające na terenie miasta i gminy Recz ścieki komunalne kierowane są do głównej przepompowni zlokalizowanej przy ulicy Chyżej, oddalonej ok. 100 m. od terenu oczyszczalni. Następnie ścieki, systemem kanalizacyjnym doprowadzane są do oczyszczalni gdzie dodatkowo funkcjonuje punkt zlewny przyjmujący ścieki dostarczane wozami asenizacyjnymi z nieskanalizowanych terenów gminy. Połączone ścieki z ogólnospławnej kanalizacji i punktu zlewnego przepływają do komory ssawnej przepompowni głównej, skąd pompowane są rurociągiem tłocznym o długości 457m do oczyszczalni. Zarówno punkt zlewny jak i wylot do komory ssawnej przepompowni wyposażone są w automatyczną kratę koszową umożliwiającą oddzielenie większych części pływających. Skratki poddawane są procesom higienizacji wapnem palonym i składowane w specjalnie wydzielonej komorze poletka odwadniającego na terenie oczyszczalni, a następnie usuwane na składowisko odpadów komunalnych [„Instrukcja eksploatacji oczyszczalni w Reczu, 1994].

### 3.2.2. Przebieg procesu oczyszczania ścieków

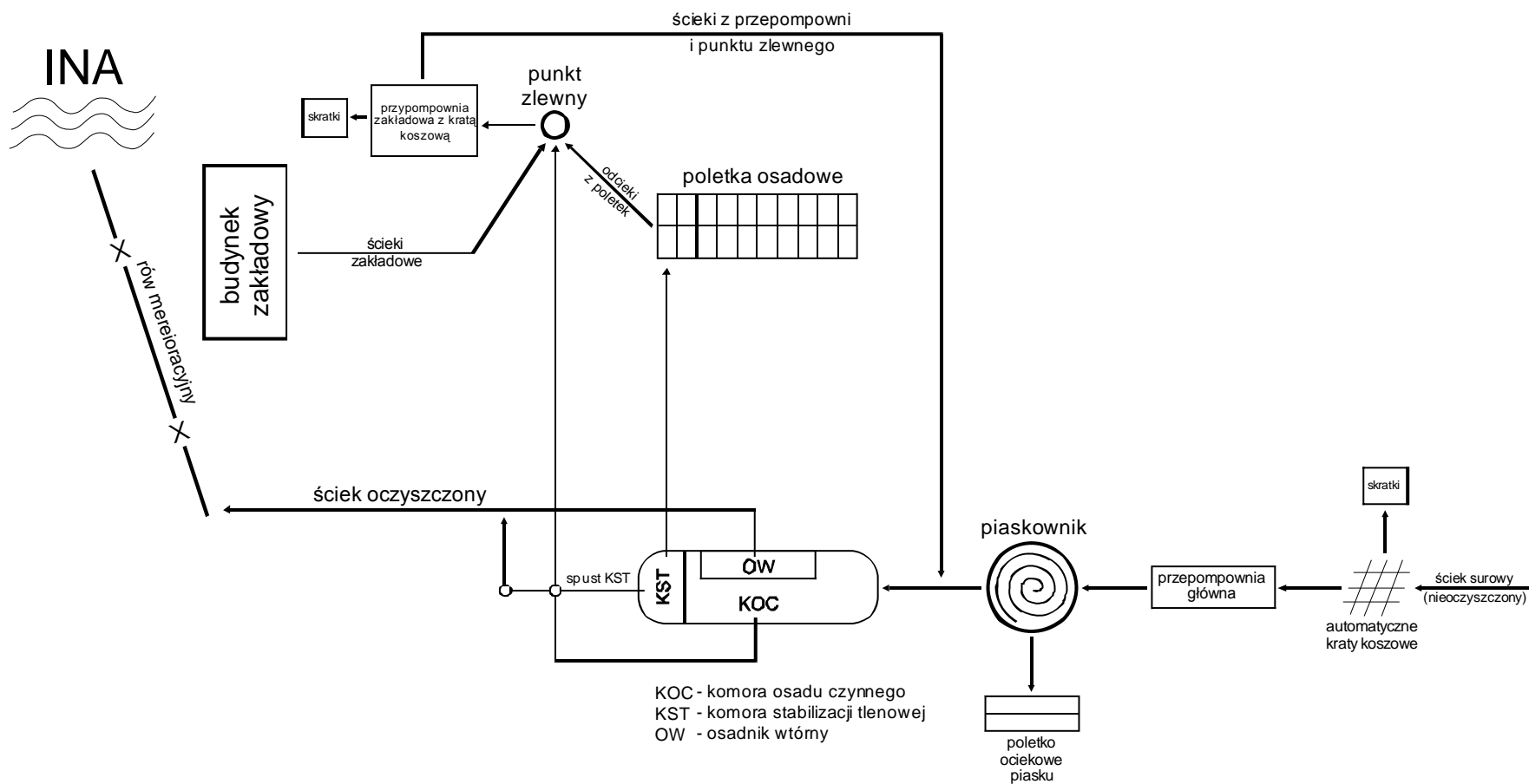
Pierwszym urządzeniem, do którego trafiają ścieki jest piaskownik wielopierścieniowy typu Blunka, w którym zatrzymywane są przede wszystkim zawiesiny mineralne (piasek) i większe cząstki organiczne (obierki warzyw, skorupki). Z piaskownika ścieki te spływają grawitacyjnie do rowu biologicznego, w którym następuje pełne biologiczne oczyszczanie ścieków metodą osadu czynnego.

Proces osadu czynnego jest biologiczną, tlenową metodą oczyszczania ścieków polegającą na rozkładaniu zanieczyszczeń organicznych przez mikroorganizmy zawarte w osadzie czynnym. Najczęściej spotykanymi mikroorganizmami w osadzie czynnym są bakterie, grzyby, pierwotniaki i wrotki. Największą grupą organizmów odpowiedzialną za rozkład materii organicznej ścieków są bakterie. Gatunek dominujący zależy od charakterystyki dopływających ścieków, warunków panujących w komorze osadu czynnego i sposobu prowadzenia procesu [Dymaczewski i inni 1997, Eikelboem, von Buijsen 1999]. Tlen niezbędny w tym procesie dostarczany jest przy pomocy kilku aeratorów, które mają również za zadanie wprowadzenie ścieków, znajdujących się w rowie cyrkulacyjnym, w obieg. Na jednym z prostych odcinków rowu cyrkulacyjnego wydzielony jest osadnik wtórny poprzez pogłębienie komory i oddzielenie części sedymentacyjnej od części przepływowej specjalnym rusztem. W osadniku następuje sklarowanie oczyszczonych ścieków i oddzielenie ich od osadu czynnego. Ścieki oczyszczone poprzez przelewy pilaste kierowane są do koryta

zbiorczego, a następnie rurociągiem o średnicy 0,5 m odprowadzane są do rowu melioracyjnego o długości 380 m, który łączy się z odbiornikiem - rzeką Iną. Rów melioracyjny wpada do rzeki Iny na 102,5 km jej biegu. Poniżej zrzutu ścieków z miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu w odległości do 10 km nie znajduje się żadne inne źródło zanieczyszczeń wód [„Instrukcja eksploatacji oczyszczalni w Reczu, 1994].

Osad czynny z osadnika wtórnego trafia z powrotem do obiegu (recyrkulacja), natomiast nadmiar tego osadu powstały w wyniku metabolizmu przetwarzany jest do wydzielonej komory stabilizacji osadu czynnego zespolonej z rowem biologicznym. Tu osad nadmierny jest zagęszczany i tlenowo stabilizowany. Zagęszczony i ustabilizowany osad przepompowywany jest na poletka odwadniające. Odcieki z poletek i ścieki sanitarne z terenu oczyszczalni zbierane są w przepompowni wewnątrzzakładowej i przepompowywane do obiegu ściekowego (ryc.9.).

Celem przeróbki osadów powstających w procesie oczyszczania ścieków jest ich unieszkodliwianie w aspekcie sanitarnym, zmniejszenie ich objętości oraz końcowe ich usunięcie. Do odwadniania osadów służą poletka osadowe z zadaszeniem typu szklarniowego o zdrenowanym dnie. Poletka podzielono na 30 kwater (po 15 z obu stron) o powierzchni 49m<sup>2</sup> każda. Poletka wyposażone są w mnichy umożliwiające zagęszczanie wstępne osadów do uwodnienia 95%, po czym następuje odwodnienie i odparowanie. Obecnie wykorzystywanych jest 28 kwater, z czego 26 służy odwadnianiu osadów natomiast dwie skrajne wykorzystywane są do składowania skratek z krat koszowych. Roczna warstwa zalewowa poletek wynosi 5m<sup>2</sup>. Dla powstających w tej oczyszczalni osadów ściekowych w projekcie technicznym przewidziano kompostowanie osadów ściekowych wraz ze słomą na poletkach odwadniających. Zakładano, iż powstały kompost i część osadów wykorzystywane będą w rolnictwie. Obecnie jednak osady ściekowe są jedynie odwadniane i magazynowane w lagunach odwadniających. Dotąd nie prowadzono zagospodarowywania ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych, co skutkuje znacznym ich nagromadzeniem w latach 1994-2004 i koniecznością szybkiego opracowania metod ich zagospodarowania oraz możliwości ich wykorzystania.



Ryc. 9. Blokowy schemat technologiczny Miejskiej Oczyszczalni ścieków w Reczu (opracowanie własne na podstawie „Instrukcji eksploatacji oczyszczalni ścieków w Reczu” [1994])

## **4. MATERIAŁ I METODY**

Niniejsze badania przeprowadzono w celu określenia wpływu zrzutów ścieków pogalwanicznych na właściwości fizykochemiczne komunalnych osadów ściekowych. Pobrano po dwie serie prób ścieków surowych oraz osadu czynnego z komory recyrkulatora oraz jedną serię ścieków oczyszczonych, powstających w Komunalnej Oczyszczalni Ścieków w Reczu. Przeprowadzono także analizy ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych składowanych na poletkach odwadniających na terenie oczyszczalni ścieków w Reczu w celu określenia możliwości ich wykorzystania. Podjęto także próbę uzdatnienia wytworzonych osadów ściekowych przez ich kompostowanie z dodatkami organicznymi (siano, zrębki drzewne, trociny, trawa). Przeprowadzono również analizę właściwości fizyko – chemicznych wykorzystanych do kompostowania dodatków organicznych i osadów ściekowych oraz powstałych kompostów. Oceniono także intensywność i kierunek przemian termicznych podczas pilotażowego kompostowania.

### **4.1. METODYKA PRAC TERENOWYCH**

#### **4.1.1. Pobór próbek ścieków surowych (nieoczyszczonych) i oczyszczonych**

Głównym celem badań ścieków surowych było określenie częstotliwości zrzutu ścieków pogalwanicznych do miejskiej sieci kanalizacyjnej oraz ocena koncentracji metali ciężkich w ściekach surowych i ściekach oczyszczonych. Ocenie poddano także sprawność oczyszczania ścieków komunalnych metodą osadu czynnego w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu.

Próbki ścieków surowych (nieoczyszczonych) pobierano w dwóch seriach badań. Pierwszą serię próbek pobierano w okresie od 5 marca 2005 r. do 26 maja 2005 r. Łącznie podczas trwania tej serii badań pobrano 82 próbki ścieków surowych (nieoczyszczonych). Podczas trwania drugiej letnio – jesiennej serii badań próbki pobierano w okresie od 17 sierpnia 2005 roku do 10 października 2005 r. Łącznie pobrano 55 próbek ścieków surowych (nieoczyszczonych). Próbki ścieków surowych (nieoczyszczonych) o objętości 1 dm<sup>3</sup> pobierano do pojemników z tworzywa sztucznego z tą samą częstotliwością - raz dziennie, i o tej samej porze (8.<sup>00</sup>) w wyznaczonym przez WIOŚ miejscu za drugą kratą wstępnego oczyszczania mechanicznego ścieków, przy piaskowniku (I - ryc.10)

Próbki ścieków oczyszczonych o objętości  $1\text{dm}^3$ , pobierano tylko raz w tygodniu (piątek) o stałej porze dnia (8.<sup>00</sup>) w wyznaczonej przez WIOŚ jako miejsce poboru próbek ścieków oczyszczonych, pierwszej studziencie osadowej, do której odprowadzane są 2 korytami oczyszczone ścieki z rowu technologicznego (II - ryc.10). Podczas ośmiotygodniowego okresu badań (od 17. 08.2005 do 30.09.2005 r.) pobrano łącznie osiem jednostkowych próbek ścieków oczyszczonych.

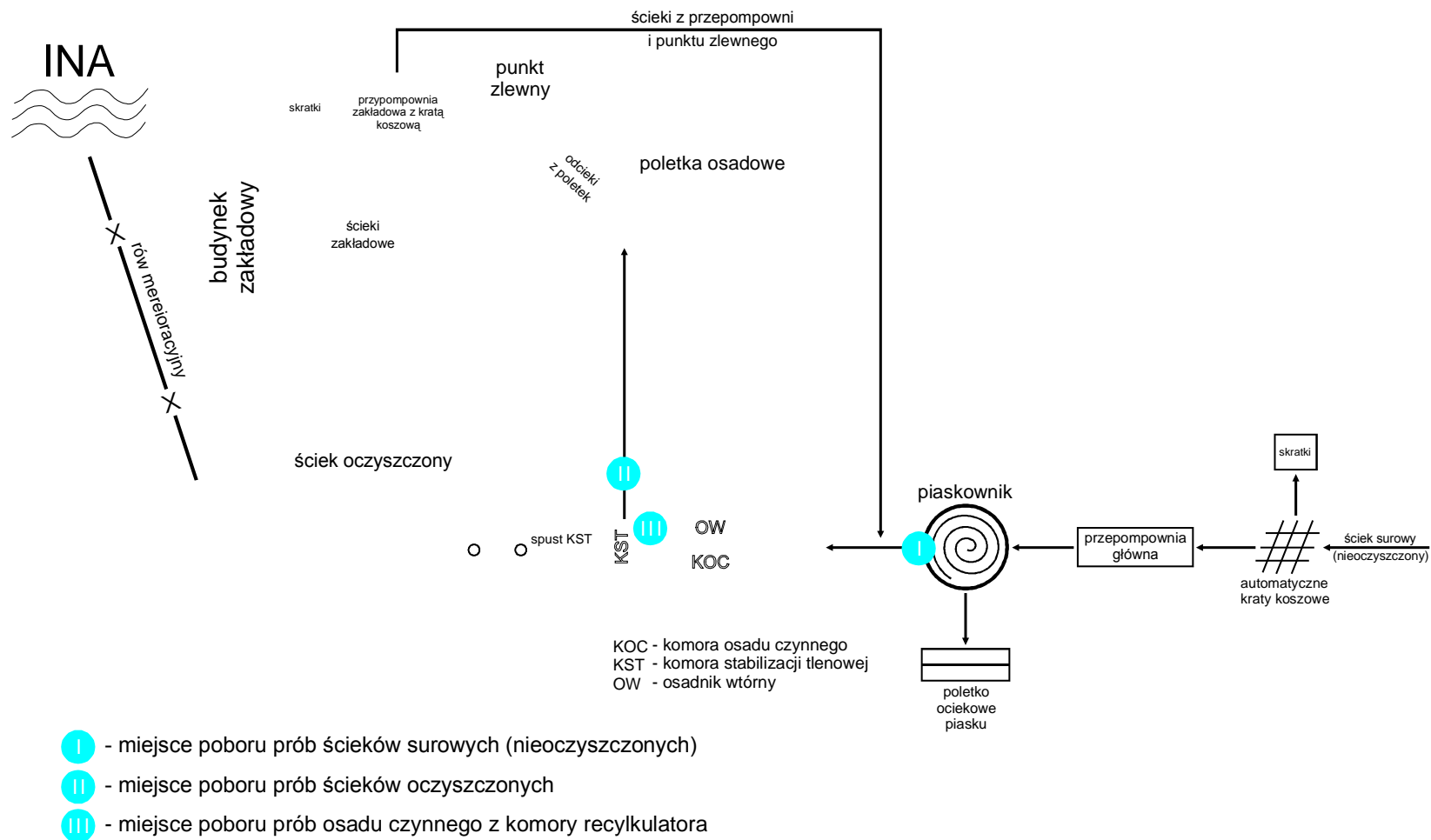
#### **4.1.2. Pobór próbek osadu czynnego**

Próbki osadu czynnego pobierano w dwóch seriach ( w roku 2004 i 2005) każdego dnia o tej samej porze (8.<sup>00</sup>) z recyrkulatora komory osadu czynnego w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (III - ryc.10).

- Pierwsza seria badań trwała od 9 lutego 2004 r do dnia 21 maja 2004 r. W trakcie jej trwania pobrano 87 próbek osadu.
- Drugą serię badań rozpoczęto 1 sierpnia 2005 r., a zakończono 10 października 2005r. Podczas jej trwania pobrano 71 jednostkowych próbek osadu czynnego. Łącznie w ciągu dwóch lat pobrano 158 próbek.

Druga seria badań osadu czynnego pokrywała się czasowo z okresem poboru próbek ścieków surowych (nieoczyszczonych) i oczyszczonych, co pozwoliło na określenie zrzutu podczyszczonych ścieków galwanicznych oraz stopnia kumulacji metali ciężkich w osadzie czynnym.

Próbki osadu czynnego, podobnie jak ścieków surowych (nieoczyszczonych) i ścieków oczyszczonych pobierano w ilości  $1\text{dm}^3$  do pojemników z tworzywa sztucznego. Długość ciągu pomiarowego była uzależniona od przewidywanego odstępu między zrzutami ścieków podczyszczonych z lokalnej galwanizerni.

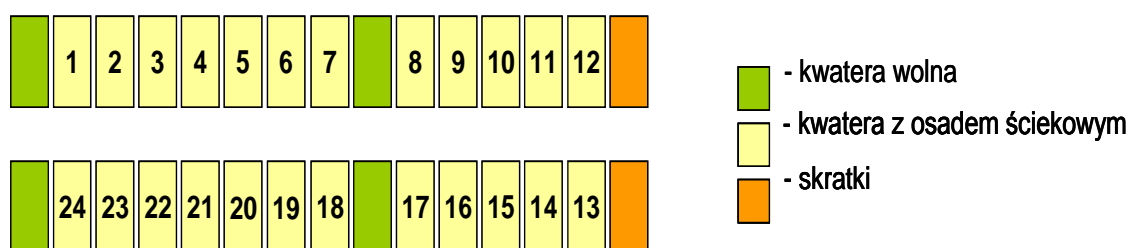


Ryc. 10. Miejsca poboru próbek na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (opracowanie własne na podstawie „Instrukcji eksploatacji oczyszczalni w Reczu, 1994)

### 4.1.3. Badania ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych

Do badań pobrano 24 zbiorcze próbki ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu składowanych w latach 1994 – 2003 w 24 kwaterach odwadniających. Kilka próbek jednostkowych z każdej kwatery odwadniającej pobierano łaską glebową Egnera z głębokości 0 - 20 cm, a następnie formowano z nich próbkę zbiorczą o ogólnej masie 1 kg.

Schemat lokalizacji i numeracja kwater osadowych, z których pobrano próbki przedstawiono na ryc. 11.



Ryc.11. Lokalizacja kwater osadowych, z których pobrano próbki ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych z terenu Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu zgromadzonych w latach 1994-2003

### 4.1.4. Kompost z osadu ściekowego

#### 4.1.4.1. Przygotowanie pryzm kompostowych

Podczas badań założono dwie pilotażowe pryzmy kompostowe, które różniły się przede wszystkim rodzajem i udziałem materiału strukturotwórczego, ilością użytego osadu ściekowego oraz jego uwilgotnieniem, uzależnionym od długości okresu składowania.

#### 4.1.4.2. Skład masy kompostowej

Pierwsze pilotażowe doświadczenie kompostowe założono 15 listopada 2004 r., na jednej z 24 kwater odwadniających, osłoniętej szklanymi ścianami i dachem, co w znacznym stopniu ograniczyło wpływ warunków atmosferycznych na przebieg procesu kompostowania (przede wszystkim dopływ wód opadowych). Do odwodnionych i ustabilizowanych osadów ściekowych, składowanych w kwatery odwadniającej dodano odpady organiczne (trociny i zrębki drzewne pochodzące z pielęgnacji terenów zieleni miasta Recz oraz opadłe liście z sezonu jesiennego 2004 r.). Dla uproszczenia w dalszej części pracy tak przygotowana masa

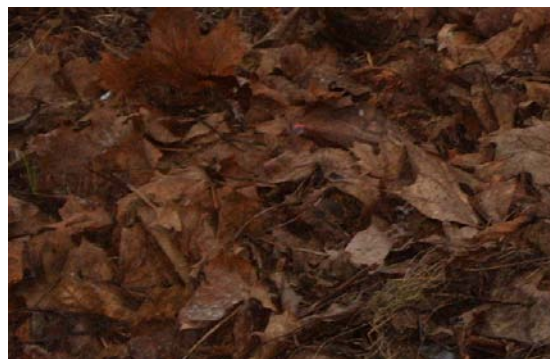
kompostowa będzie nazywana „pryzmą jesienną”, ze względu na czas jej założenia (jesień) i przeważający w niej udział opadłych jesienią 2004 roku liści drzew.

Przed rozpoczęciem procesu kompostowania odpady organiczne z pielęgnacji terenów zieleni poddano procesom wstępnej obróbki. Rozdrobnieniu przy użyciu spalinowego rębaka ciągnikowego podlegały przede wszystkim grube gałęzie drzew i krzewów, które doprowadzono do postaci zrębków, co w znacznym stopniu miało przyspieszyć ich rozkład. W przypadku opadłych jesienią 2004 roku liści drzew zastosowano jedynie rozdrobnienie ręczne, gdyż były one już częściowo rozłożone. Udział osadu i dodatku strukturotwórczego w masie kompostowej kształtował się jak 1:1 (V/V). Tak przygotowaną masę kompostową dokładnie ręcznie wymieszano. Dodatkowo pryzmę jesienną dwukrotnie przerzucono podczas trwania procesu kompostowania, w celu lepszego wymieszania użytych materiałów oraz zapewnienia odpowiedniego natlenienia pryzmy. Pryzma ta nie była dodatkowo podlewana, ze względu na wysokie początkowe uwodnienie wykorzystanych do kompostowania osadów ściekowych. Okres trwania kompostowania to około 8 miesięcy.

Osady ściekowe wykorzystane do założenia pierwszego doświadczenia kompostowego charakteryzowały się bardzo dobrymi cechami fizycznymi: były ziemiste, niezbrylone, bez zapachu. Grupę odpadów organicznych stanowiących dodatek strukturotwórczy tworzyły przede wszystkim gałązki krzewów z jesiennych cięć pielęgnacyjnych żywopłotów, wśród których przeważały: ligustr pospolity (*Ligustrum vulgare* L.), śnieguliczka biała (*Symphoricarpos albus* L.) i bez czarny (*Sambucus nigra* L.).



Zrębki drzewne pozyskane z rozdrobnienia gałęzi drzew i krzewów



Opadłe liście drzew z jesieni 2004

Ryc. 12. Materiały użyte do ukształtowania pierwszej pryzmy kompostowej (jesień 2004)  
[fot. E. Dusza]



Duży udział w grupie odpadów organicznych użytych do kompostowania miały także opadłe jesienne liście drzew, zwłaszcza z gatunków: lipa drobnolistna (*Tilia cordata* L.), lipa szerokolistna (*Tilia platyphyllos* L.), klon zwyczajny (*Acer platanoides* L.) oraz topola biała (*Populus alba* L.) i topola osika (*Populus tremula* L.). Dominującym odpadem organicznym w tej grupie były zdecydowanie opadłe liście klonu zwyczajnego (*Acer platanoides* L.) (ryc.12.).

Drugą pryzmę pilotażowego doświadczenia kompostowego założono 24 maja 2005 roku. Dla uproszczenia w dalszej części pracy tak uformowana pryzma kompostowa będzie nazywana „pryzmą wiosenną”, ze względu na czas jej założenia (wiosna) i użycie do jej uformowania głównie świeżych, zielonych odpadów organicznych. Do jej ukształtowania wykorzystano ustabilizowany i odwodniony osad ściekowy oraz:

- suchą trawę wraz z kwiatostanami (dalej nazywane sianem) pozyskaną podczas zabiegów pielęgnacyjnych na terenach miasta Recz, gdzie gospodarka zielenią prowadzona jest sporadycznie;
- drobne gałązki pochodzące z cięć pielęgnacyjnych żywopłotów, w których przeważały: ligustr pospolity (*Ligustrum vulgare* L.), forsycja pośrednia (*Forsythia intermedia* Thunb.), śnieguliczka biała (*Symphoricarpos albus* L.) oraz bez czarny (*Sambucus nigra* L.);
- ścinki pędów traw z trawników intensywnie pielęgnowanych na obszarze miasta Recz;
- pozostałości opadłych jesiennych liści drzew (wilgotne, częściowo rozłożone), w których dominowały liście klonu zwyczajnego (*Acer platanoides*) (ryc. 13.).



Odpady z pielęgnacji terenów zieleni  
(gałęzie i gałązki drzew i krzewów)



Zrębki drzewne  
(rozdrobione gałęzie drzew i krzewów)



Trawa z terenów sporadycznie koszonych oraz trawa z trawników intensywnie koszonych

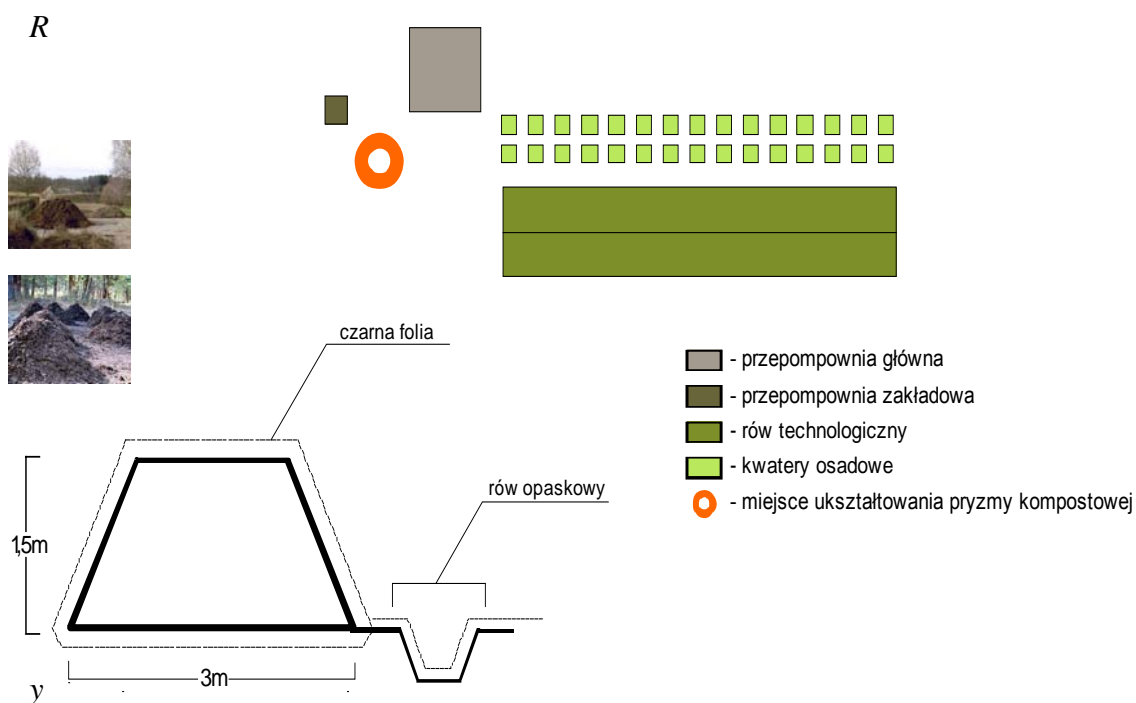


Pozostałości jesiennych liści zgromadzonych na terenie oczyszczalni

Ryc. 13. Materiały organiczne wykorzystane do uformowania drugiej „wiosennej” pryzmy kompostowej (wiosna 2005)[fot. E.Dusza]

Podobnie jak w przypadku „pryzmy jesiennej”, odpady organiczne pochodzące z pielęgnacji terenów zieleni miasta Recz wykorzystane do ukształtowania „pryzmy wiosennej” poddano obróbce wstępnej. Polegała ona przede wszystkim na rozdrobnieniu grubszych gałązek krzewów, przy użyciu spalinowego rębaka ciągnikowego.

Pryzmę tą ukształtowano na terenie otwartym, przy kwaterach odwadniających, na obszarze Miejskiej Oczyszczalni Ścieków (ryc.14.).



Ryc. 14. Miejsce ukształtowania „pryzmy wiosennej” na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu

Miejsce kompostowania oczyszczono, a następnie wykopano rów opaskowy i całe podłoże wyłożono czarną folią ogrodniczą, aby jak najskuteczniej zapobiec migracji ewentualnie pojawiających się odcieków z pryzmy w głąb profilu glebowego. Na tak przygotowanym placu, do ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych dodawano partiami odpady organiczne (siano, ścinki traw, drobne gałązki pochodzące z cięć

pielęgnacyjnych żywopłotów, pozostałości opadłych jesiennych liści drzew), systematycznie wszystko mieszając. Udział osadu i dodatku strukturotwórczego kształtował się jak 1:1. Następnie masę przeznaczoną do kompostowania uformowano w pryzmę o kształcie trapezu o szerokości 3 m, wysokości 1,5 m i długości ok. 4 m. Podstawę pryzmy stanowiła ziemia wymieszana z rozdrobnionymi gałązkami drzew i krzewów. Pryzmę tą okryto dodatkowo jeszcze czarną folią ogrodniczą w celu zintensyfikowania przemian termicznych, utrzymania niewielkiej zmiany wilgotności, ograniczenia parowania oraz minimalnego dostępu wody opadowej do kompostowanych osadów. Okres trwania kompostowania wyniósł około 7 miesięcy.

W okresie kompostowania pryzmę przerzucono dwukrotnie. Przerzucenie odpadów spowodowało lepsze wymieszanie poszczególnych warstw odpadów organicznych i osadów. Zabieg ten przeprowadzono, w celu prawidłowego natlenienia pryzmy. Nie stosowano podlewania pryzmy, gdyż przez cały okres pilotażowego kompostowania wilgotność w jej wnętrzu utrzymywała się na poziomie około 55%, co pozwoliło na zachowanie prawidłowych warunków wilgotnościowych umożliwiających właściwy rozwój mikroflory. Sprzyjało temu przede wszystkim użycie dobrze uwodnionych osadów ściekowych oraz panujące w tym okresie warunki atmosferyczne (duża ilość opadów).

## **4.2. ZAKRES I METODY ANALIZ CHEMICZNYCH PRÓBEK**

### **4.2.1. Analizy ścieków surowych (nieoczyszczonych), ścieków oczyszczonych oraz osadu czynnego**

#### **4.2.1.1. Przygotowanie próbek**

Pobrane próbki ścieków surowych i oczyszczonych oraz wszystkie próbki osadu czynnego pobrane z komory recykulatora Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu poddawano mineralizacji na mokro w układzie otwartym, z udziałem mieszaniny stężonych kwasów: azotowego i nadchlorowego, przy zachowaniu stosunku między nimi jak 3:1 (V/V).

Zastosowana metodyka badań ścieków surowych (nieoczyszczonych) i ścieków oczyszczonych jest zgodna z metodyką referencyjną analizy próbek ścieków określoną w Ustawie z dnia 7 czerwca 2001 roku o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz. U. Nr 72, poz. 747 z późn. zmian.).

Wszystkie zastosowane metody analityczne w odniesieniu do osadu czynnego były zgodne z zalecanymi metodami referencyjnymi określonymi w RMS [2002] w sprawie komunalnych osadów ściekowych.

#### 4.2.1.2. Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek

We wcześniej przygotowanych mineralizatach próbek ścieków surowych, oczyszczonych oraz osadu czynnego przeprowadzono szereg analiz chemicznych, których specyfikację przedstawiono w tabeli 5.

**Tabela 5.** Zakres i metodyka analiz chemicznych próbek ścieków surowych, oczyszczonych i osadu czynnego pobranych z terenu Miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu.

	Analizowany materiał	Zakres analiz	Metoda analiz
1.	Ściek surowy (nieoczyszczony)	Koncentracja metali ciężkich (Zn, Cu, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, Hg);	metoda spektrometrii absorpcji atomowej na spektrofotometrze Solaar Unicam 929. Rtęć oznaczono metodą bezpośredniego spalania w tlenie z wykorzystaniem automatycznego „Analizatora rtęci AMA 254”.
2.	Ściek oczyszczony		
3.	osad czynny z komory recykulatora		
4.	osad czynny z komory recykulatora	Wilgotność i zawartość suchej masy	metoda wagosuszarkowa przy użyciu miernika firmy „RADWAG” z bezpośrednim odczytem wilgotności. (n=3, x)

#### 4.2.2. Ustabilizowane i odwodnione osady ściekowe

##### 4.2.2.1. Przygotowanie próbek osadów ściekowych

W celu uzyskania jednolitych próbek ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych wykorzystywanych do dalszych analiz, wcześniej pobrane próbki świeżego materiału suszono i mielono w młynku laboratoryjnym, a następnie przesiewano przez sito o  $\varnothing$  1 mm. W ten sposób uzyskano jednolity, rozdrobniony materiał.

Z tak przygotowanych próbek do oceny zawartości makroskładników ogółem – K, Mg, Na, Ca, S oraz koncentracji metali ciężkich pobrano 1 g, a następnie zmineralizowano je w piecu mikrofalowym wykorzystując metodę mineralizacji mikrofalowej (zamkniętej), z zastosowaniem mieszaniny stężonych kwasów  $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ , przy zachowaniu stosunku między nimi jak 3:1 (V/V) z dodatkiem nadtlenu wodoru (30%). Piec mikrofalowy nastawiono na 55 minutowy program przebiegający w czterech fazach.

Do oceny zawartości ogólnych form azotu i fosforu wykorzystano metodę mineralizacji na mokro w kwasie siarkowym jak do materiału roślinnego. W tym celu, przy użyciu wagi analitycznej naważono 1 g powietrznie suchego materiału, który przeniesiono ilościowo do kolby Kiejdahla o pojemności 250 cm<sup>3</sup>. Następnie dodano 10 cm<sup>3</sup> stężonego kwasu siarkowego. Tak przygotowaną próbę ogrzewano w elektrycznym urządzeniu grzewczym, początkowo słabo do momentu ukazania się białych dymów, dalej energicznie aż

do momentu uzyskania jednolitej, oleistej, płynnej masy. Po lekkim ochłodzeniu prób dodano 5 cm<sup>3</sup> 30% wody utlenionej. Po zakończeniu gwałtownej reakcji ponownie próby ogrzewano, do całkowitego rozłożenia substancji organicznej i uzyskania bezbarwnego roztworu. Następnie w celu oddzielenia krzemionki bezbarwny roztwór przesączono przez sącdek ilościowy. W uzyskanym mineralizacje wykonano odpowiednie oznaczenia według metodyki zaprezentowanej w tabeli 6.

#### 4.2.2.2. Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek osadów ściekowych

Przeprowadzone analizy chemiczne pozwoliły na ustalenie charakterystyki składu chemicznego powstających na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu osadów ściekowych zwłaszcza po kątem ich właściwości nawozowych oraz zawartości w nich metali ciężkich. Szczegółowy zakres analiz oraz zastosowaną metodykę badań przedstawiono w tabeli 6.

**Tabela 6.** Zakres analiz i metodyka badań próbek ustabilizowanego osadu ściekowego

Analizowany materiał	Zakres analiz	Metoda analiz
Ustabilizowany, odwodniony osad ściekowy	<b>Świeże próbki osadu ściekowego</b>	
	Odczyn (wartość pH)	potencjometrycznie przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem kombinowanej elektrody szklanej.
	przewodnictwo elektryczne właściwe	konduktometrycznie przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem elektrody grafitowej.
	wilgotność	oznaczano metodą wagosuszkową przy użyciu miernika firmy „RADWAG” z bezpośrednim odczytem wilgotności w świeżych próbach
	<b>Powietrznie suche próbki osadu ściekowego</b>	
	fosfor i siarka	oznaczono kolorymetrycznie przy użyciu spektrofotometru kolorymetrycznego „Marcel Media Eko” mierzono kolejno ekstynkcje badanych prób, po wcześniejszym zmierzeniu ekstynkcji roztworów wzorcowych
	potas i sód	oznaczono przy użyciu metody emisyjnej na spektrofotometrze absorpcji atomowej „ UNICAM” – Solaar 929
	wapń i magnez	oznaczono z wykorzystaniem metody absorpcji atomowej przy użyciu, spektrofotometru absorpcji atomowej „ UNICAM” – Solaar 929
	ogólna forma azotu	metoda destylacyjna przy użyciu destylatora „Vapodest 30” firmy „Gerhardt”
	Koncentracja metali ciężkich (Zn, Cu, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, Hg);	metoda spektrometrii absorpcji atomowej na spektrofotometrze Solaar Unicam 929. Rtęć oznaczono metodą bezpośredniego spalania w tlenie z wykorzystaniem automatycznego „Analizatora rtęci AMA 254”.

W każdej z wyżej wymienionych metod oprócz analiz właściwych, każdorazowo wykonywano próby ślepe odczynnikowe w celu późniejszego porównania wyników. Uzyskane wyniki porównywano z dostępnymi materiałami odniesienia.

### 4.2.3. Badania kompostu z osadów ściekowych

#### 4.2.3.1. Analiza organicznych materiałów strukturotwórczych wykorzystanych jako dodatki w procesie kompostowania

Zarówno w przypadku przyzmy „jesiennej” jak i „wiosennej” przed rozpoczęciem właściwego procesu kompostowania odpady organiczne pochodzące z pielęgnacji terenów zieleni miasta Recz, które stanowiły dodatek strukturotwórczy w zakładanych przyzmach, poddano analizie właściwości fizyko-chemicznych pod kątem możliwości ich przetwarzania na drodze kompostowania. W tabeli 7 podano rodzaje odpadów wykorzystanych do produkcji kompostu osadowego z zaznaczenia źródła azotu i węgla.

**Tabela 7.** Zestawienie rodzajowe materiałów organicznych objętych analizą chemiczną, pod kątem możliwości ich wykorzystania do produkcji kompostów (ocena źródła podstawowych składników)

Rodzaj	Źródło (C lub N)
Opadłe liście drzew z jesieni 2004 roku: lipa drobnolistna ( <i>Tilia cordata L.</i> ), lipa szerokolistna ( <i>Tilia platyphyllos L.</i> ), klon zwyczajny ( <i>Acer platanoides L.</i> ) oraz topola biała ( <i>Populus alba L.</i> ) i topola osika ( <i>Populus tremula L.</i> )	C
Gałęzie drzew i krzewów z jesiennej pielęgnacji ligustr pospolity ( <i>Ligustrum vulgare L.</i> ), śnieguliczka biała ( <i>Symphoricarpos albus L.</i> ), bez czarny ( <i>Sambucus nigra L.</i> )	C
Gałązki drzew i krzewów z wiosennej pielęgnacji ligustr pospolity ( <i>Ligustrum vulgare L.</i> ), forsycja pośrednia ( <i>Forsythia intermedia Thunb.</i> ), śnieguliczka biała ( <i>Symphoricarpos albus L.</i> ), bez czarny ( <i>Sambucus nigra L.</i> )	C/N
Trawa wraz z kwiatostanami z terenów sporadycznie koszonych	C
Trawa z trawników intensywnie koszonych	N
Trociny i zrębki drewniane z przycinanych gałęzi drzew	C

#### 4.2.3.2. Zakres i metodyka analizy chemicznej próbek organicznych materiałów strukturotwórczych

Świeże materiały organiczne wykorzystane w procesie kompostowania, zarówno „jesiennej” jak i „wiosennej” przyzmy zostały wcześniej wysuszone i zmielone w młynku laboratoryjnym, a następnie przesiane przez sito o  $\varnothing$  1mm. W ten sposób uzyskano jednolity, powietrznie suchy i rozdrobniony materiał. Do dalszym analiz chemicznych pobrano próbki o



masie 1g. Zakres analiz chemicznych próbek organicznych materiałów strukturotwórczych przedstawiono w tabeli 8.

**Tabela 8.** Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek organicznych materiałów strukturotwórczych

Analizowany materiał	Zakres analiz	Metoda analiz
Materiały organiczne wykorzystane w procesie kompostowania	<b>Świeże próbki materiałów strukturotwórczych</b>	
	wilgotność	oznaczano metodą wagosuszarkową przy użyciu miernika firmy „RADWAG” z bezpośrednim odczytem wilgotności w świeżych próbach
	odczyn (wartość pH)	oznaczano metodą potencjometryczną przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem kombinowanej elektrody szklanej.
	przewodnictwo elektryczne właściwe	oznaczano metodą konduktometryczną przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem elektrody grafitowej.
	zawartość substancji organicznej	metodą suchego spalania w 450 °C w piecu muflowym
	<b>Powietrznie suche próbki osadu ściekowego</b>	
	ogólna forma azotu	metoda destylacyjna przy użyciu destylatora „Vapodest 30” firmy „Gerhardt”
Koncentracja metali ciężkich (Zn, Cu, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, Hg);	metoda spektrometrii absorpcji atomowej na spektrofotometrze Solaar Unicam 929. Rtęć oznaczono metodą bezpośredniego spalania w tlenie z wykorzystaniem automatycznego „Analizatora rtęci AMA 254”.	

#### 4.2.3.3. Analiza przebiegu procesu kompostowania

Osady ściekowe z dodatkiem odpadów „jesiennych” kompostowano w czasie około ośmiu miesięcy (od listopada 2004 roku do lipca 2005 roku). Okres obejmujący badania szczegółowe pokrywał się z czasem trwania całego procesu kompostowania. Z kolei osady ściekowe wraz z „wiosennymi” odpadami organicznymi kompostowano w czasie siedmiu miesięcy (od maja do grudnia 2005 roku) i podobnie jak w przypadku pryzmy „jesiennej” okres obejmujący badanie szczegółowe był zbieżny z czasem trwania całego procesu kompostowania. Przeprowadzone analizy chemiczne świeżych próbek masy kompostowej i kompostów oraz zastosowane metody badań przedstawiono w tabeli 9.

**Tabela 9.** Zakres i metodyka badań pobranych świeżych próbek masy kompostowej i kompostów

Analizowany materiał	Zakres analiz	Metoda analiz
Świeże próbki masy kompostowej i kompostów	temperatura	oceniano bezpośrednio w przyzmię przy pomocy czujnika temperaturowego z wydłużoną sondą, z dokładnością do 0,1 części °C, (n=3, x)
	wilgotność	oznaczano metodą wagosuszarkową przy użyciu miernika firmy „RADWAG” z bezpośrednim odczytem wilgotności w świeżych próbach
	Odczyn (wartość pH)	oznaczano metodą potencjometryczną przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem kombinowanej elektrody szklanej.
	przewodnictwo elektryczne właściwe	oznaczano metodą konduktometryczną przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem elektrody grafitowej.

Powyższe parametry badano w warunkach laboratoryjnych z częstotliwością raz na miesiąc. Jedynie pomiary temperatury wykonywano bezpośrednio w przyzmię, z większą częstotliwością. Pomiar temperatury początkowo prowadzono codziennie, następnie wydłużono okres między pomiarami jednostkowymi (raz na tydzień). Pomiar ten prowadzono do czasu wyrównania temperatury kompostowanych odpadów z temperaturą otoczenia. Równocześnie z pomiarami temperatury wewnątrz przyzmy kompostowej dokonywano pomiarów temperatury powietrza, przy użyciu tego samego czujnika temperaturowego.

#### **4.2.3.4. Analiza kompostowanego materiału i kompostów**

W celu uzyskania jednolitych prób materiału kompostowego i kompostu z osadu ściekowego powstającego na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu wykorzystywanych do dalszych analiz, wcześniej pobrane próbki świeżego materiału suszono powietrznie i mielono w młynku laboratoryjnym, a następnie przesiewano przez sito o  $\varnothing$  1mm. W ten sposób uzyskano jednolity, rozdrobniony materiał o średnicy cząstek mniejszej niż 1mm.

Pobrano 1g tak przygotowanego materiału, a próbki zmineralizowano w piecu mikrofalowym z zastosowaniem mieszaniny stężonych kwasów  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ , przy zachowaniu stosunku między nimi jak 3:1 (V/V) z dodatkiem nadtlenu wodoru (30%). W uzyskanych mineralizatach wykonano odpowiednie oznaczenia zgodnie z tabelą 10.



#### 4.2.3.5. Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek kompostowanej masy i kompostu z osadów ściekowych

Przeprowadzone analizy chemiczne pozwoliły na ocenę zmiany składu chemicznego masy kompostowej i samego kompostu wytworzonego z osadów ściekowych z dodatkiem materiałów strukturotwórczych. Szczegółowy zakres analiz oraz zastosowaną metodykę badań przedstawiono w tabeli 10.

**Tabela 10.** Zakres i metodyka badań pobranych świeżych i powietrznie suchych prób masy kompostowej i kompostów

Analizowany materiał	Zakres analiz	Metoda analiz
Kompostowana masa i kompost z osadu ściekowego	<b>Świeże próbki masy kompostowej i kompostów</b>	
	Odczyn (wartość pH)	oznaczano metodą potencjometryczną przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem kombinowanej elektrody szklanej.
	przewodnictwo elektryczne właściwe	oznaczano metodą konduktometryczną przy pomocy miernika wielopomiarowego firmy „ELMETRON” z użyciem elektrody grafitowej.
	wilgotność	oznaczano metodą wagosuszarkową przy użyciu miernika firmy „RADWAG” z bezpośrednim odczytem wilgotności w świeżych próbach
	<b>Powietrznie suche próbki osadu ściekowego</b>	
	Azot, węgiel, siarka	Metodą z wykorzystaniem wielofunkcyjnego analizatora CHNS
	Koncentracja metali ciężkich (Zn, Cu, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, Hg);	metoda spektrometrii absorpcji atomowej na spektrofotometrze Solaar Unicam 929. Rtęć oznaczono metodą bezpośredniego spalania w tlenie z wykorzystaniem automatycznego „Analizatora rtęci AMA 254”.

### 4.3. BADANIA KAMERALNE

#### 4.3.1. Analiza wyników badań i obserwacji

Na podstawie uzyskanych wyników pomiaru stężeń metali w osadzie czynnym ( $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ), po uwzględnieniu zawartości w nich wody (określonej na podstawie pomiaru z wykorzystaniem wagosuszarki) obliczono poziom koncentracji badanych metali w odwodnionym osadzie nadmiernym.

### 4.3.2. Opracowanie statystyczne i graficzne wyników

Wszystkie uzyskane wyniki poddano obróbce przy użyciu programu statystycznego „STATISTICA” 6.0 oraz przy użyciu arkusza kalkulacyjnego EXEL 2000.

Wyniki zawartości makro – i mikroskładników w odpadach wykorzystanych jako komponenty masy kompostowej oraz w uzyskanych kompostach wyrażono w postaci średniej arytmetycznej, wartości maksymalnej i minimalnej, odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności V (%).

Na podstawie zawartości metali ciężkich w ustabilizowanym i odwodnionym osadzie ściekowym oraz wartości granicznych według RMŚ [2006] obliczono dawkę możliwą do zastosowania przy wykorzystaniu osadów ściekowych do rekultywacji gruntów na cele nierolne oraz przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z decyzji administracyjnych, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostów, do uprawy roślin nie przeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.

Przy opracowywaniu graficznym wykresów i schematów wykorzystano programy: EXEL 2000, „STATISTICA” 6.0 oraz CorelDRAW 12.

## 5. WYNIKI I DYSKUSJA

W rozdziale tym omówiono wyniki badań dotyczące zmienności koncentracji metali ciężkich w ściekach surowych, w osadzie czynnym oraz w ściekach oczyszczonych pochodzących z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, zlokalizowanej jak na rycinie 15. Przeanalizowano skuteczność oczyszczania ścieków w warunkach podwyższonych koncentracji metali ciężkich w ściekach dopływających. Zbadano także fizyko – chemiczne właściwości powstających, nadmiernych osadów ściekowych oraz na tej podstawie oceniono możliwość ich zagospodarowania. Omówiono również wyniki badań dotyczące właściwości oraz możliwości wykorzystania kompostów wytworzonych z osadów ściekowych, z dodatkiem materiałów organicznych (odpadów z pielęgnacji terenów zieleni).



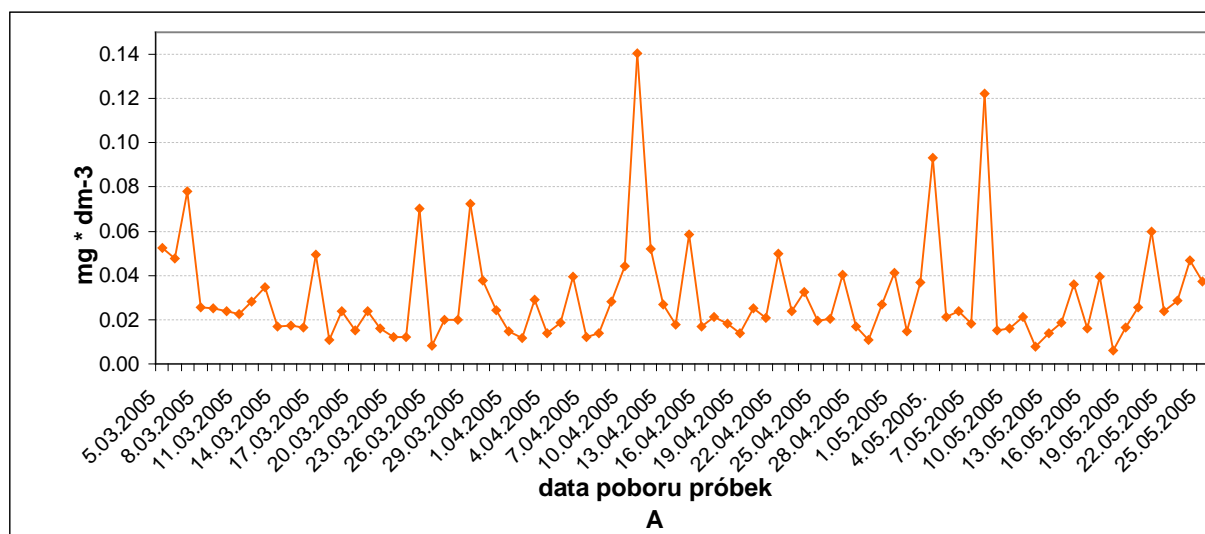
*Ryc. 15. Lokalizacja Miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu  
[opracowanie własne na podstawie [www.zumi.pl](http://www.zumi.pl)]*

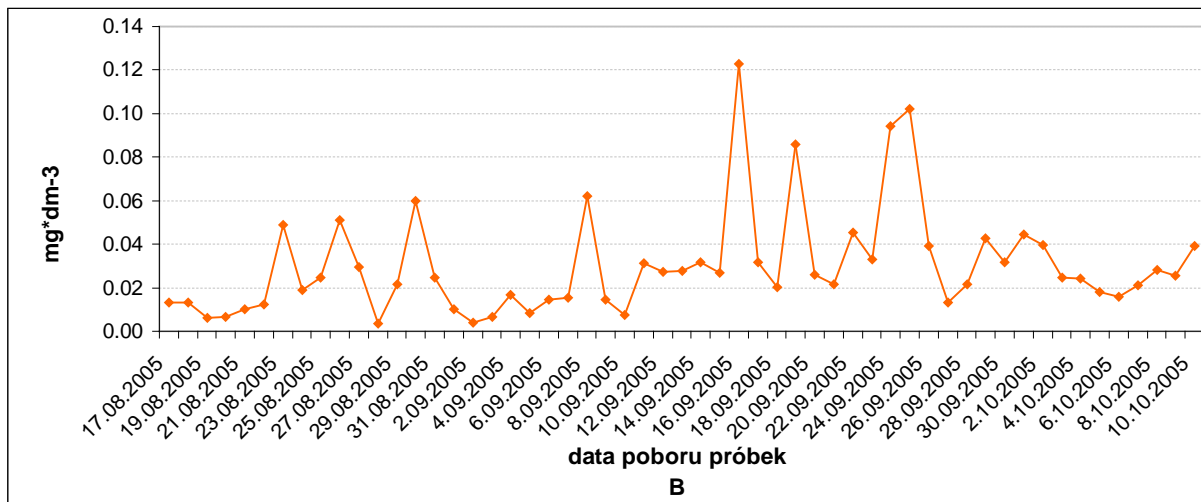
## 5.1. ZMIENNOŚĆ KONCENTRACJI METALI CIĘŻKICH W ŚCIEKACH SUROWYCH, DOPLŹYWAJĄCYCH DO MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU

Głównym celem przeprowadzonych w okresach od 5 marca do 24 maja 2005 r. oraz od 17 sierpnia do 10 października 2005 r. dwóch serii badań była analiza zmienności koncentracji metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd) w ściekach surowych dopływających do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu oraz określenie czy na tej podstawie możliwe jest zdefiniowanie częstotliwości zrzutu ścieków pogalwanicznych do miejskiej sieci kanalizacyjnej.

**MIEDŹ.** W porównywanych seriach badań surowych ścieków komunalnych stężenie miedzi było wyraźnie zróżnicowane (współczynniki zmienności wynosiły 77 i 81%, tab. 11) i mieściło się odpowiednio (ryc. 16, tab. 11) w granicach 0,006 - 0,14, średnio 0,03 mg · dm<sup>-3</sup> (I seria) i 0,004-0,12, średnio 0,03 mg · dm<sup>-3</sup> (II seria).

Stężenia miedzi w ściekach surowych utrzymywały się w większości badanych próbek na niskim poziomie (w I serii na poziomie 0,006-0,03 mg · dm<sup>-3</sup> oraz w II serii 0,004-0,03 mg · dm<sup>-3</sup>). Wyższą koncentrację miedzi (0,04 – 0,14 mg · dm<sup>-3</sup>) w I serii pomiarów odnotowano dziewiętnastokrotnie, a w drugiej serii czternastokrotnie. Natomiast trzy istotne zwwyżki stężeń tego pierwiastka (powyżej 0,08 mg · dm<sup>-3</sup>) stwierdzone w każdej serii miały charakter krótkotrwały. Wskazuje to na możliwość dopływu miedzi z okresowymi zrzutami ścieków z lokalnych galwanizerni.





Ryc. 16. Zmiany w stężeniach miedzi w ściekach surowych w porównywanych okresach:  
A -5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005

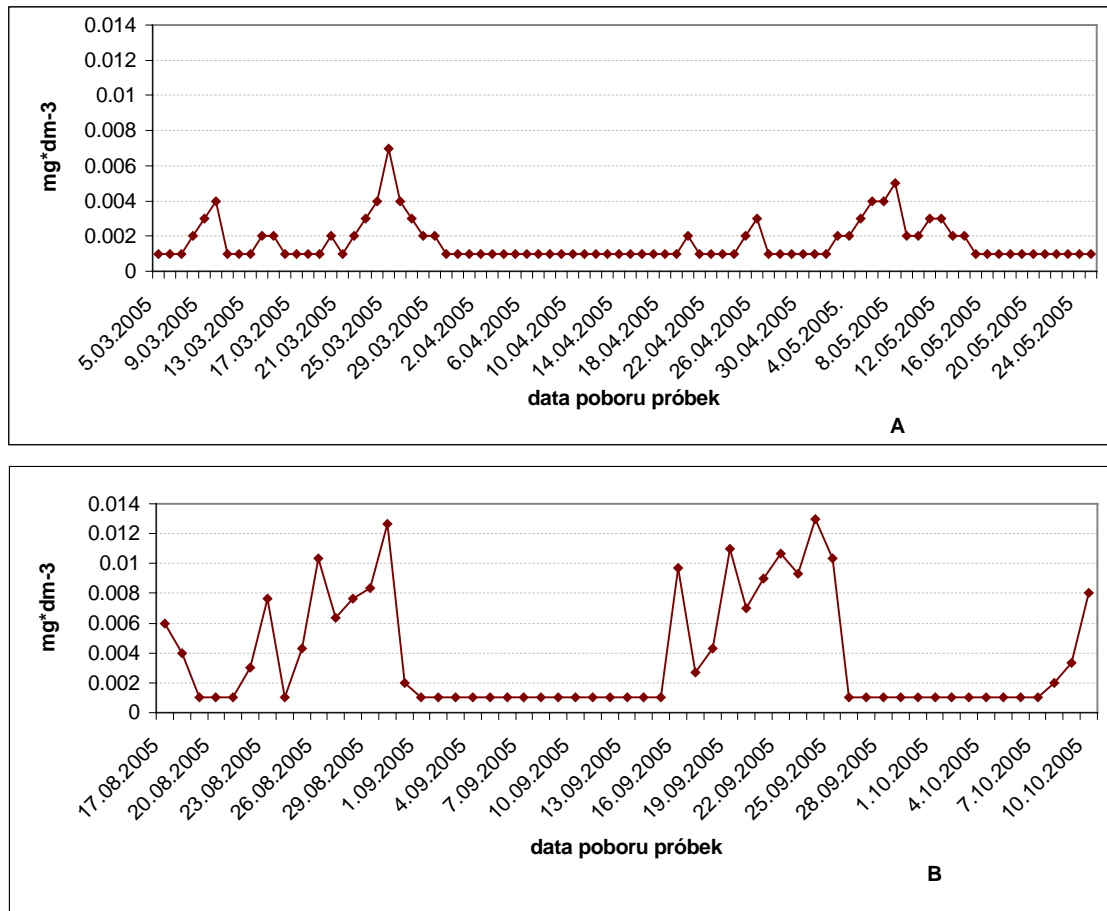
Mimo obserwowanych wyraźnych wahań koncentracji miedzi w czasie poboru próbek ścieków surowych dopływających do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (współczynnik zmienności w obu seriach kształtował się na poziomie zbliżonym do 80%), zarówno w I jak i w II serii badań nie odnotowano przekroczeń dopuszczalnych prawem zawartości tego metalu w ściekach komunalnych ( $0,5 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) wprowadzanych do urządzeń kanalizacyjnych [RMS 2006]. Nawet maksymalne koncentracje miedzi w ściekach surowych ( $0,14 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$  w I serii oraz  $0,12 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$  w II serii) są przeszło trzykrotnie niższe od wartości limitowanej (ryc. 16, tab. 11).

**CHROM.** Mimo, że chrom uważa się za metal najbardziej związany z procesami powierzchniowej obróbki metali, w porównywanych okresach stężenia chromu w ściekach surowych utrzymywały się w większości badanych próbek z I serii na bardzo niskim poziomie  $0,001-0,002 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  oraz  $0,001-0,003 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w II serii badań. Badania stężenia chromu w ściekach surowych prowadzone były na wejściu do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu i w związku z tym niskie wartości stężeń chromu mogą wynikać z rozcieńczenia ścieku przemysłowego – bytowo-gospodarczym.

W porównywanych seriach badań ścieków surowych stężenie chromu było wyższe i bardziej zróżnicowane w II niż w I serii badań (od  $0,001 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  –  $0,007 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , średnio  $0,002 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w I serii i  $0,001-0,013$ , średnio  $0,004 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w II serii), co potwierdzają współczynniki zmienności, które wynosiły odpowiednio 68 i 102 % (ryc. 17 A,B, tab. 11). Podobnie jak w przypadku miedzi, takie wahania w koncentracji chromu między poszczególnymi próbkami wskazują na możliwość dopływu tego pierwiastka z okresowymi zrzutami ścieków z lokalnych galwanizerni

Ścieki powstające podczas procesów powierzchniowej obróbki metali w galwanizerniach są skutecznie podczyszczane, zanim trafią do ogólnospławnej kanalizacji.

Maalhaes i in. [2005] podkreślają, że procesy podczyszczania należy podzielić na kilka podstawowych kroków i pamiętać, że ich skuteczność zależy przede wszystkim od warunków fizyko – chemicznych panujących w danym momencie. Autorzy ci dodają także, iż ścieki pogalwaniczne charakteryzują się dużą zmiennością składu, dlatego niezmiernie ważna jest nieustanna kontrola podczyszczanych ścieków. Podobne stanowisko prezentuje Stefanowicz [1996], podkreślając jednocześnie, że im wyższy poziom strącenia metali ciężkich tym mniejsze zagrożenie dla środowiska wodnego odbiorników ścieków komunalnych, których dodatkiem jest podczyszczony ściek przemysłowy. Dotyczy to zwłaszcza chromu – metalu towarzyszącemu procesom galwanicznym, jednocześnie metalu uznawanego za najbardziej toksyczny dla ekosystemów wodnych (Kabata – Pendias, Pendias 1999).

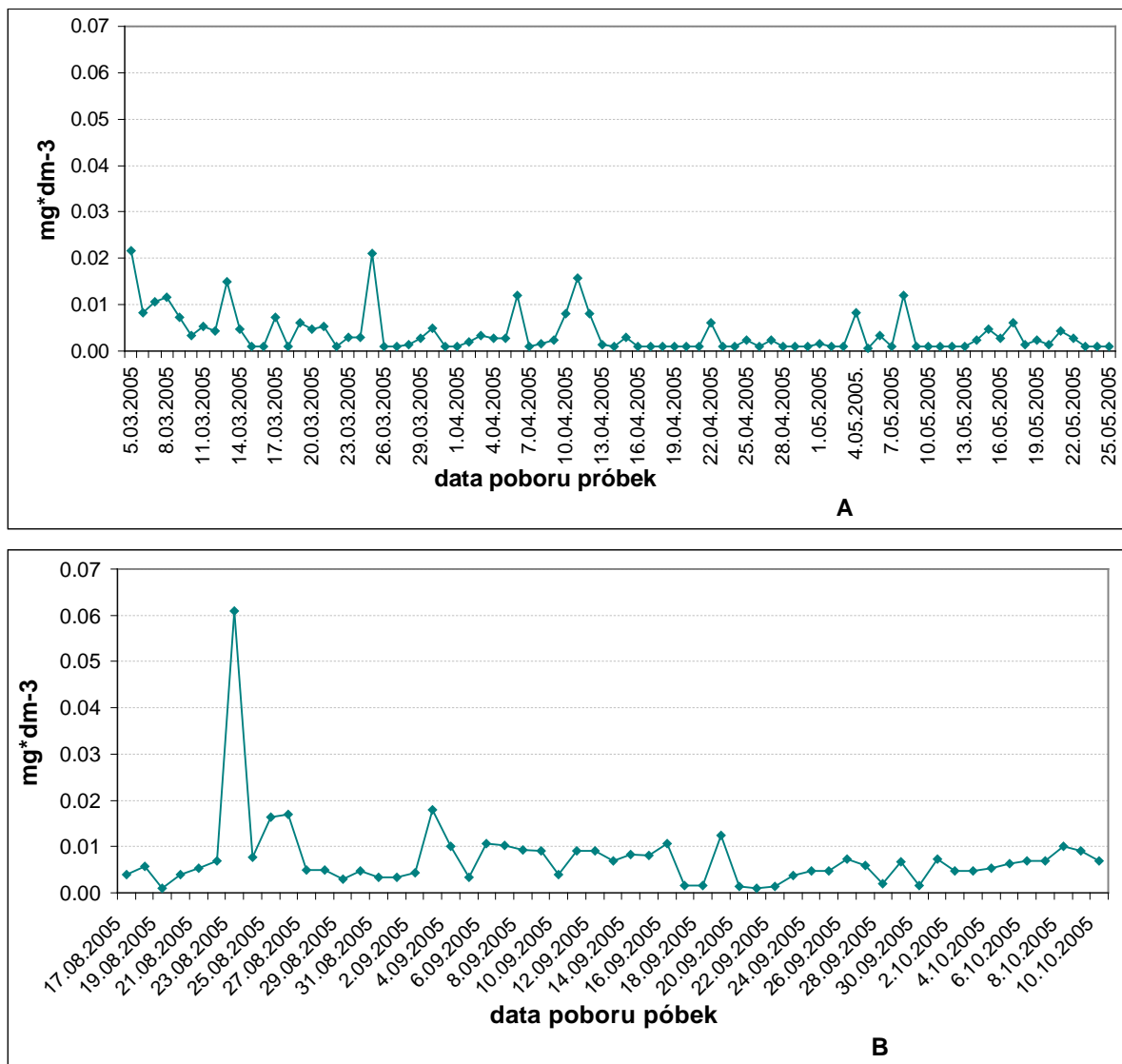


Ryc. 17. Zmiany w stężeniach chromu w ściekach surowych w porównywanych okresach:  
 A -5.03.-24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005

Stwierdzone w ściekach surowych dopływających do miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu maksymalne koncentracje chromu (odpowiednio  $0,007 \text{ mg Cr dm}^{-3}$  w I serii oraz  $0,013 \text{ mg Cr dm}^{-3}$  w II serii badań ) są wielokrotnie niższe (odpowiednio 71 i 38 razy) od definiowanej prawem [RMŚ 2006] najwyższej dopuszczalnej wartości ( $0,5 \text{ mg Cr dm}^{-3}$ ) dla ścieków przemysłowych wprowadzanych do systemu kanalizacji komunalnej. Stwierdzone koncentracje są także znacznie niższe od najniższego stężenia chromu ( $0,01 \text{ mg Cr dm}^{-3}$ ) odnotowanego przez Bode [1998] w ściekach pogalwanicznych.

Brak zgodności w terminach zrzutu ustalonych na podstawie wzrostu stężenia miedzi i chromu wynika z faktu odrębnego powstawania i magazynowania ścieków z poszczególnych oddziałów galwanizerni.

**NIKIEL.** Koncentracja niklu w ściekach surowych mieściła się odpowiednio w granicach 0,001 - 0,022, średnio 0,004 mg · dm<sup>-3</sup> w I okresie badań i 0,001-0,061, średnio 0,007 mg · dm<sup>-3</sup> w drugim (ryc. 18A,B tab. 11) Stężenia tego pierwiastka w ściekach surowych wykazywały bardzo silne zróżnicowanie w obu seriach badań co potwierdzają współczynniki zmienności (I seria – 116%; V – II seria – 111%). Nikiel, podobnie jak chrom i miedź, jest pierwiastkiem ściśle związanym z procesami galwanotechnicznymi. Wahania w wielkości stężeń niklu między poszczególnymi próbkami wskazują więc na możliwość dopływu tego pierwiastka z okresowymi zrzutami ścieków z lokalnych galwanizerni.



Ryc. 18. Zmiany w stężeniach niklu w ściekach surowych w porównywanym okresie:  
A - 5.03.- 24.05.2005 oraz B - 17.08-10.10.2005

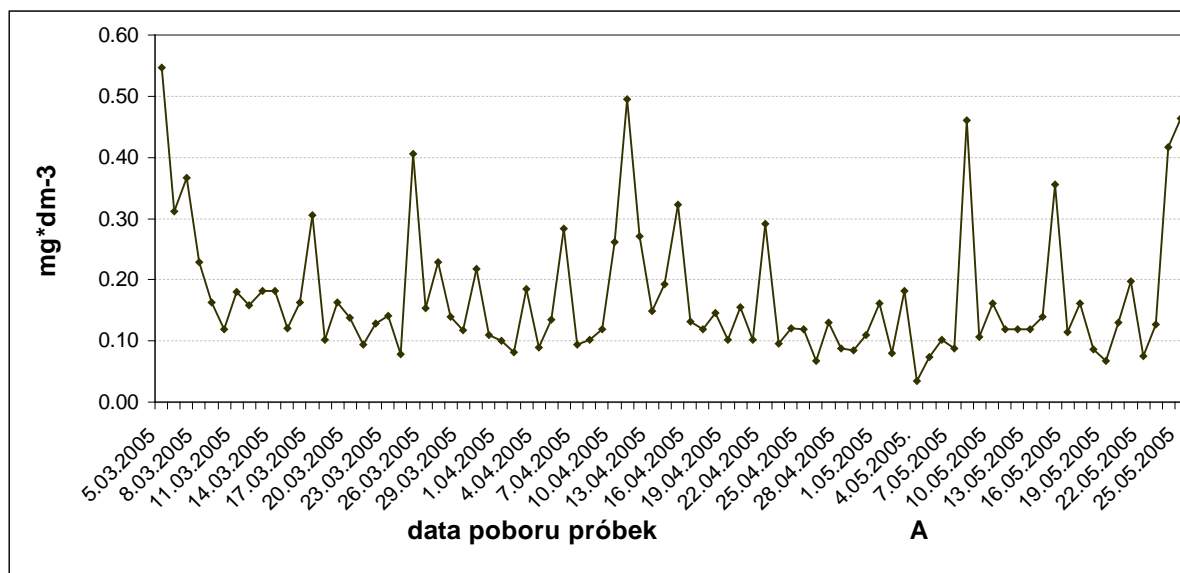
W porównywanym okresie badań w większości próbek stężenia niklu w obu seriach utrzymywały się jednak na bardzo niskim poziomie 0,001-0,01 mg · dm<sup>-3</sup> i tylko odpowiednio sześciokrotnie i pięciokrotnie stwierdzono wyższe koncentracje tego pierwiastka (ryc. 18 A i B, tab. 11).

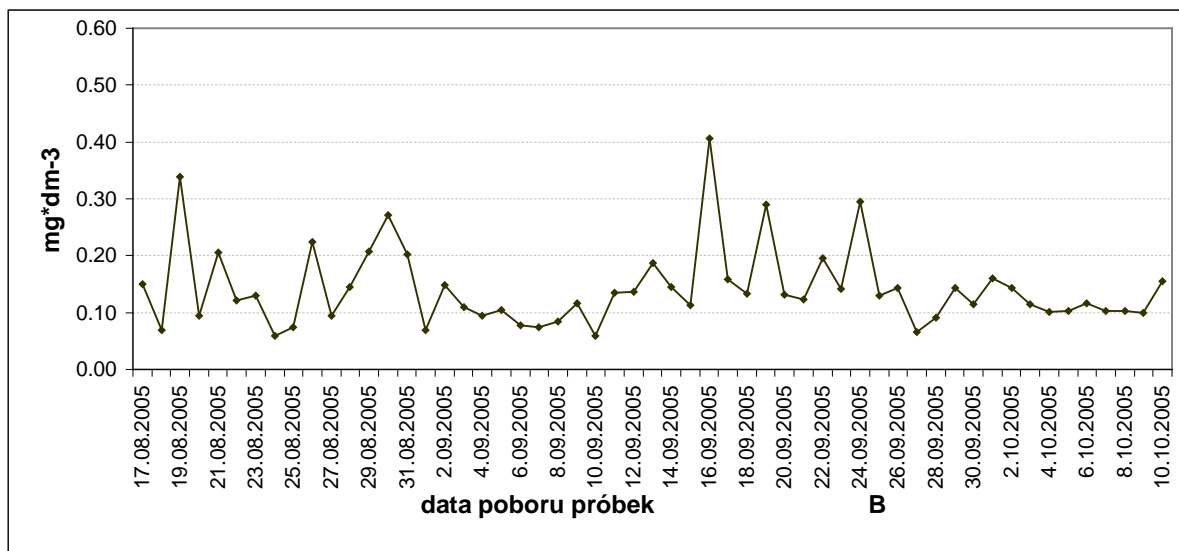


Zarówno średnie (0,004 i 0,007 mg Ni·dm<sup>-3</sup>) jak i maksymalne (0,022 i 0,061 mg Ni·dm<sup>-3</sup>) stężenia niklu stwierdzone w badanych okresach były wielokrotnie niższe (odpowiednio 125 i 71 oraz 23 i 8 razy) od definiowanej prawem [RMŚ 2006] najwyższej dopuszczalnej wartości (0,5 mg Ni · dm<sup>-3</sup>) dla ścieków przemysłowych wprowadzanych do systemu kanalizacji komunalnej.

**CYNK.** Metalem występującym w najwyższym stężeniu w ściekach dopływających był cynk. Podobne wyniki uzyskali Malik i Ahmad [1995] oraz Chua [1998], stwierdzając że pierwiastkiem najczęściej występującym w wysokich koncentracjach jest cynk. Koncentracje cynku w ściekach surowych z I serii badań mieściły się w granicach 0,035- 0,547, średnio 0,172 mg dm<sup>-3</sup>. W ściekach surowych analizowanych podczas II serii badań stwierdzono niższe stężenia tego pierwiastka ( 0,059-0,406, średnio 0,142 mg ·dm<sup>-3</sup>, ryc. 19 A,B, tab.11).

Nawet maksymalne wartości stężeń cynku były znacznie mniejsze (odpowiednio 12 i 14 razy) od dopuszczalnej prawem koncentracji tego pierwiastka (2 mg Zn·dm<sup>-3</sup>, RMŚ 2006) w ściekach wprowadzanych do urządzeń kanalizacyjnych. Podobnie jak w przypadku Cu, Cr i Ni, także cynk charakteryzował się dużą zmiennością stężeń w próbkach obu serii badań. W II serii próbek odnotowano jednak mniejsze zróżnicowanie w stężeniach cynku pomiędzy codziennie pobieranymi próbkami niż w drugiej (współczynniki zmienności wynosiły odpowiednio 62,6 oraz 49,6%, tab. 11).





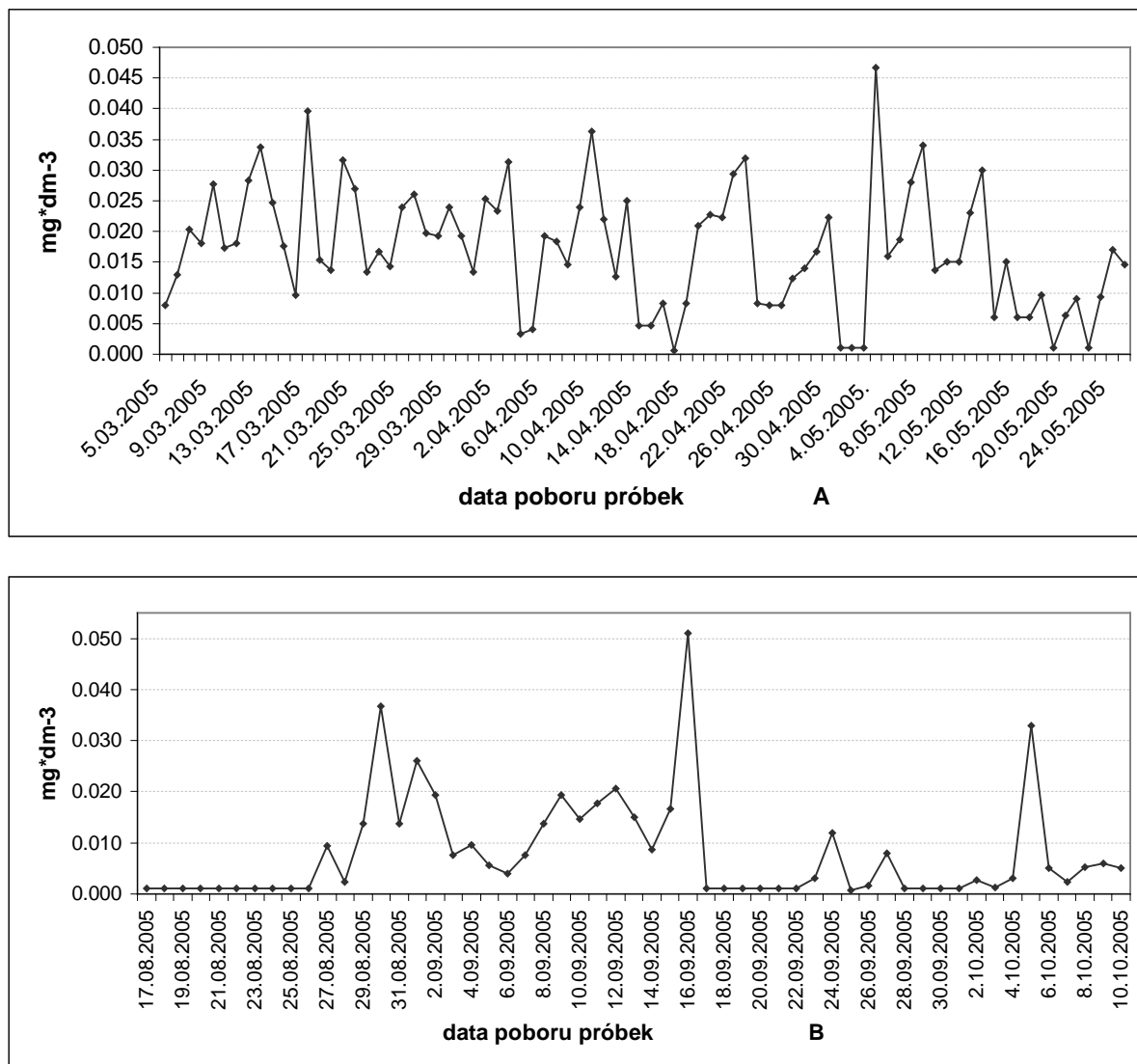
Ryc. 19. Zmiany w stężeniach cynku w ściekach surowych w porównywanych okresach:  
A -5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005

Jak podkreśla Bode [1998] cynk jest pierwiastkiem nieodłącznie związanym ze ściekami przemysłu galwanicznego i występuje zawsze w najwyższych koncentracjach. Bardzo często notowane są też przekroczenia norm dopuszczalnej koncentracji cynku zarówno w podczyszczonych ściekach przemysłowych, jak i w ściekach komunalnych z ich dodatkiem. Jednocześnie Chander i inni [2001] uważają, że nie zawsze stężenia metali ciężkich w ściekach surowych są wyznacznikiem zanieczyszczenia, a najważniejszym aspektem potencjalnego zagrożenia środowiska naturalnego jest ich kumulacja w procesie biologicznego oczyszczania ścieków.

**OLÓW.** W porównywanych seriach próbek surowych ścieków komunalnych stężenia ołowiu mieściły się odpowiednio (ryc. 20 A, B tab. 11) w granicach 0,001 - 0,047, średnio 0,017 mg · dm<sup>-3</sup> (I seria) i 0,001-0,051, średnio 0,008 mg · dm<sup>-3</sup> (II seria) i były znacznie silniej zróżnicowane w II serii (współczynniki zmienności wynosiły odpowiednio 58 % w I serii i 128 % w II serii (tab. 11).

Przy zbliżonym zakresie koncentracji ołowiu, pierwsza seria badań charakteryzowała się dwukrotnie wyższym średnim stężeniem tego pierwiastka. W II okresie badań w znacznej części badanych próbek koncentracja ołowiu utrzymywała się na bardzo niskim poziomie (0,001 – 0,003 mg · dm<sup>-3</sup>). Obserwowane wahania w koncentracji ołowiu wskazują, podobnie jak w przypadku Cu, Cr i Ni, na możliwość dopływu tego pierwiastka z okresowymi zrzutami ścieków z lokalnych galwanizerni. W próbkach ścieków surowych dopływających do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, zarówno w I jak i w II serii badań nie odnotowano przekroczeń dopuszczalnych prawem [RMS 2006] stężeń tego metalu w ściekach komunalnych (0,5 mg Pb · dm<sup>-3</sup>) wprowadzanych do urządzeń kanalizacyjnych (ryc. 21A,B;

tab. 11) . Zarówno w I jak i w II serii przeprowadzonych badań maksymalne stężenia ołowiu w ściekach surowych ( $0,047 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  – I seria oraz  $0,051 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  – II seria) były dziesięciokrotnie niższe od wartości limitowanej  $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  [RMŚ 2006].



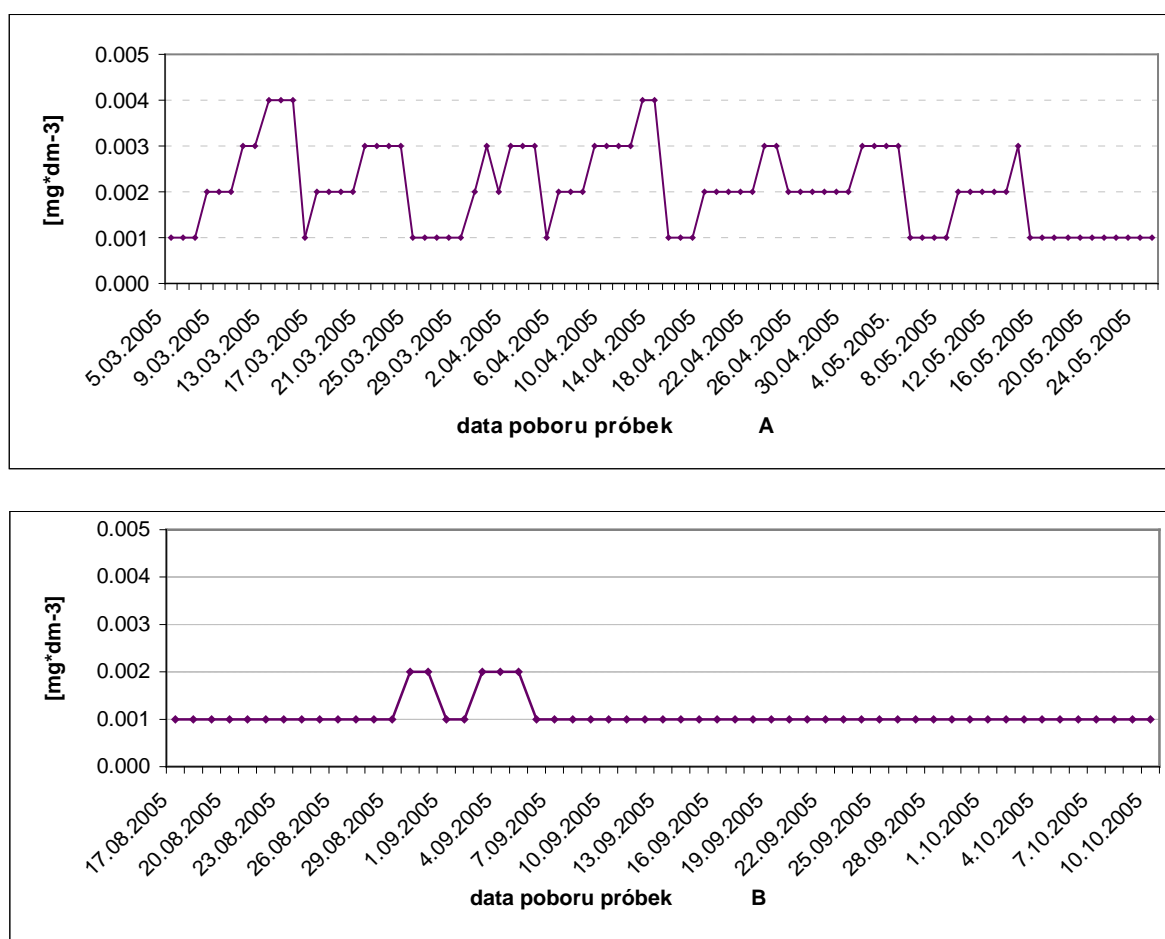
Ryc. 20. Zmiany w stężeniach ołowiu w ściekach surowych w porównywanym okresie:  
A -5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005

Koncentracja ołowiu w ściekach surowych docierających do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu jest nie tylko konsekwencją zrzutu ścieków przemysłowych zanieczyszczonych tym metalem. Bardzo istotnym źródłem ołowiu w ściekach na terenach miejskich jest także kanalizacja burzowa i zanieczyszczenia pochodzące z motoryzacji [Some i in. 2003]. Brak na terenie gminy Recz separatorów rozdzielających ścieki komunalne od burzowych powoduje, że ołów w ściekach surowych pochodzi z tych dwóch źródeł.

**KADM.** Pierwiastkiem występującym w najmniejszych stężeniach w ściekach surowych był kadm (0,001-0,004, średnio 0,002 mg · dm<sup>-3</sup> w I serii oraz 0,001 - 0,002, średnio 0,001 mg · dm<sup>-3</sup> w II serii, ryc. 21 A, B tab. 11). W przypadku kadmu odnotowano znacznie mniejsze zróżnicowanie w stężeniach pomiędzy codziennie pobieranymi próbkami ścieków surowych niż przy pozostałych metalach (współczynniki zmienności wynosiły odpowiednio 45,3% w I serii i 26,6 % w II serii, tab. 11).

Średnie stężenie kadmu w serii I było dwukrotnie wyższe niż w serii II bowiem siedmiokrotnie przez okres od 1 do 3 dni utrzymywała się w ściekach surowych podwyższona koncentracja tego pierwiastka ( 0,003-0,004 mg · dm<sup>-3</sup>, ryc.21A)

W serii II, poza dwoma przypadkami kiedy przez okres 2 i 3 dni stężenia kadmu w ściekach surowych wynosiły 0,002 mg · dm<sup>-3</sup>, koncentracje tego pierwiastka utrzymywały się na poziomie 0,001 mg · dm<sup>-3</sup> ( ryc.21 B).



Ryc. 21. Zmiany w stężeniach kadmu w ściekach surowych w porównywanych okresach: A -5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005

Kadm to pierwiastek, którego zawartość w wodach kształtuje się głównie pod wpływem czynników antropogenicznych [Kabata – Pendias, Pendias 1999]. Autorzy ci równocześnie podkreślają, że mimo bardzo niskich stwierdzanych zawartości tego pierwiastka w wodach powierzchniowych (średnio 0,01 mg · dm<sup>-3</sup>), jego toksyczność jest

bardzo duża, szczególnie ze względu na pobieranie go przez roślinność wodną jak i organizmy zwierzęce proporcjonalnie do występowania.

Podstawowe parametry statystyczne koncentracji badanych metali ciężkich ogółem zestawione zostały w tabeli 11.

Analizując wyniki zestawione w tabeli 11 można stwierdzić, iż istnieje wyraźna różnica w średniej koncentracji metali ciężkich pomiędzy prezentowanymi seriami badań. Średnie stężenia Zn, Pb i Cd były wyższe w I serii, natomiast Cr i Ni w II serii próbek, a miedzi utrzymywały się na tym samym poziomie. Poziom koncentracji badanych metali ciężkich w próbkach ścieków surowych pobieranych w obu okresach można uszeregować, uwzględniając ich średnie stężenia, następująco: Cd < Cr < Ni < Pb < Cu < Zn.

Stwierdzona w okresie objętym badaniami wyraźna zmienność w stężeniach analizowanych metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd) w próbkach ścieków surowych z I i II serii jednoznacznie wskazuje na okresowy dopływ zanieczyszczonych metalami ciężkimi ścieków podczyszczonych pochodzących z lokalnych galwanizerni do surowych ścieków bytowo – gospodarczych (tab.11, ryc. 16-21, załącznik 1 i 2).

**Tabela 11.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w próbkach ścieków surowych [mg · dm<sup>-3</sup>]

	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd
<b>I Seria badań (n=82)</b>						
<b>x</b>	0,030	0,002	0,004	0,172	0,017	0,002
<b>min</b>	0,006	0,001	0,001	0,035	0,001	0,001
<b>max</b>	0,141	0,007	0,022	0,547	0,047	0,004
<b>S</b>	0,023	0,001	0,004	0,108	0,010	0,001
<b>V [%]</b>	77,14	68,46	116,00	62,64	58,84	45,28
<b>II Seria badań (n=55)</b>						
<b>x</b>	0,030	0,004	0,007	0,142	0,008	0,001
<b>min</b>	0,004	0,001	0,001	0,059	0,001	0,001
<b>max</b>	0,123	0,013	0,061	0,406	0,051	0,002
<b>S</b>	0,025	0,004	0,008	0,070	0,010	0,000
<b>V [%]</b>	81,20	102,70	111,64	49,59	128,16	26,60

Bardzo podobne ciągi występowania oraz poziomy stężeń metali ciężkich w surowych ściekach komunalnych z dodatkiem ścieków przemysłowych odnotowali Chipasa [2003] oraz Karvelas i in. [2003]. Jednocześnie autorzy ci nie stwierdzili, podobnie jak w przypadku ścieków surowych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, przekroczeń wartości limitowanych prawem dla poszczególnych metali [Chipasa 2003; Karvelas i in. 2003].

Zmienność koncentracji Cu, Cr, Ni, Zn oraz Pb w ściekach surowych była o wiele wyższa niż w przypadku Cd. Nieco odmienne wyniki otrzymał w swoich badaniach Chipasa [2003], stwierdzając, że spośród badanych metali największą zmiennością charakteryzowała się miedź i cynk, natomiast o wiele niższe zróżnicowanie prezentowały ołów i kadm. Autor

ten potwierdza fakt, iż zazwyczaj miedź i cynk obserwowane są w wyższych stężeniach w ściekach surowych niż inne analizowane pierwiastki.

Bardzo charakterystyczne jest także występowanie minimum i maksimum koncentracji poszczególnych metali ciężkich w tym samym czasie. Potwierdza to tezę [Chipasa 2003] o wspólnym źródle występowania tych pierwiastków. Podwyższona koncentracja metali w ściekach dopływających do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków (zwłaszcza niklu, chromu i miedzi) świadczy o stałym dopływie podczyszczonych ścieków galwanicznych z lokalnych zakładów produkcyjnych zajmujących się powierzchniową obróbką metali. Konsekwencją tego, jest nadmierne stężenie metali ciężkich w osadzie czynnym, zmniejszenie efektywności oczyszczania ścieków komunalnych i w rezultacie wysokie obciążenie metalami ciężkimi ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych, często uniemożliwiające jakiegokolwiek przewidziane prawem ich zagospodarowanie.

Bode [1998], a także Magalhaes i in. [2004] dowodzą, że metalami najsilniej związanymi z procesami powierzchniowej obróbki metali są cynk, miedź, nikiel i chrom. Jednocześnie Magalhaes i in. [2004] podkreślają, że zawartość tych czterech metali może niejednokrotnie wpływać na środowisko wodne, a tak że na sam proces oczyszczania ścieków. Dlatego tak ważna jest kontrola zawartości tych potencjalnie szkodliwych pierwiastków w ściekach podczyszczonych odprowadzanych do systemu kanalizacji miejskiej.

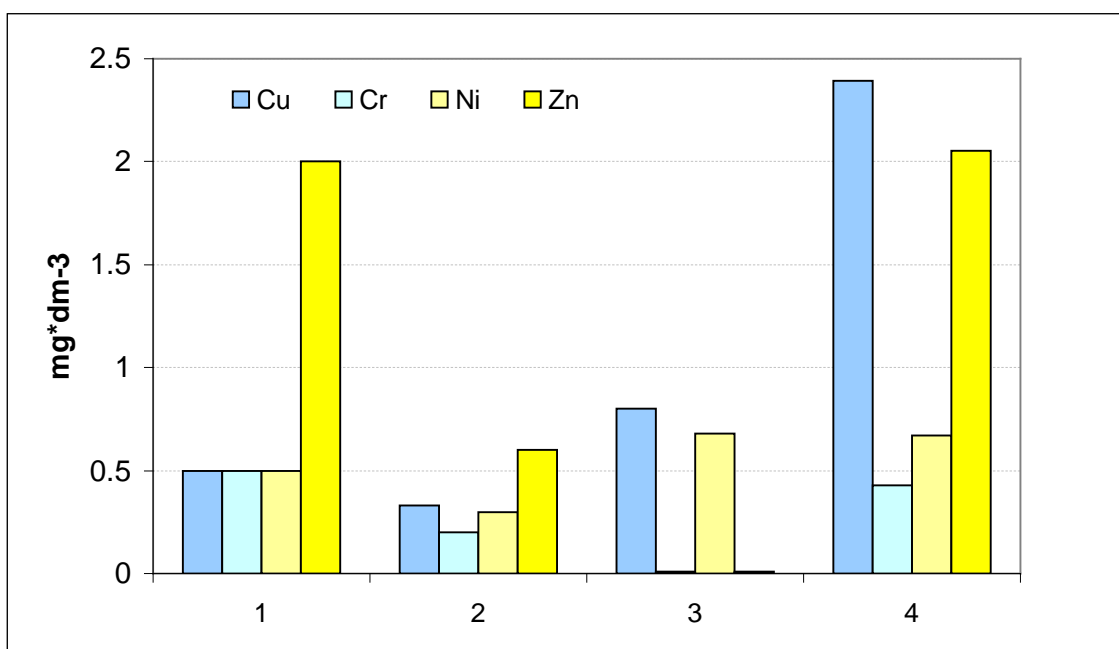
Podstawowym zadaniem każdej oczyszczalni ścieków jest jak najskuteczniejsze usuwanie zanieczyszczeń ze ścieków doprowadzanych zbiorczym systemem kanalizacyjnym, tak, aby produkt finalny, jakim są ścieki oczyszczone był bezpieczny dla środowiska naturalnego [Santarsiero i in., 1998]. Ścieki surowe dopływające do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, zawierają metale ciężkie, co związane jest przede wszystkim z działalnością lokalnych galwanizerni. Dlatego też oczyszczalnia ta powinna posiadać wysoką sprawność redukcji metali ciężkich, które znajdują się w dopływających ściekach, stanowiących największe zagrożenie dla ekosystemów wodnych, które są bezpośrednim odbiornikiem ścieków oczyszczonych [Santarsiero i in., 1998].

Obecnie, przedsiębiorstwa zobligowane są do prowadzenia racjonalnej gospodarki wodno – ściekowej oraz do przeprowadzenia wstępnego oczyszczania ścieków przemysłowych przed wprowadzeniem ich do zbiorczej kanalizacji miejskiej [RMS 2006]. W galwanizerniach najczęściej następuje rozdział poszczególnych ścieków technologicznych, dzięki czemu procesy podczyszczania, jak podaje Kieszkowski [1980] i Stefanowicz [1996], mogą być skuteczniejsze. Według Kieszkowskiego [1980] szczególnie efektywnego podczyszczania wymagają ścieki: rozcieńczone, po płukaniu z płuczek przepływowych, oraz

ścieki średnio stężone, które powstają po regeneracji wymiennicy jonowych czy przy myciu podłóg w halach produkcyjnych. Najbardziej niebezpieczne są ścieki stężone stanowiące okresowo wylewane zużyte kąpiele i roztwory stężone.

Wyniki badań ścieków podczyszczonych z lokalnych galwanizerni okresowo wykonywane przez akredytowane laboratorium Zakładu Wodociągów i Kanalizacji, Miejskiego Przedsiębiorstwa Gospodarki Komunalnej w Stargardzie Szczecińskim [2004, 2005] porównano z wartościami dopuszczalnymi [RMS 2006]. Z porównania tego wynika, że stężenia metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn) w ściekach, pobranych ze studzienki kanalizacyjnej usytuowanej w bezpośrednim sąsiedztwie poletek osadowych, wprowadzanych do systemu kanalizacji miejskiej kształtowały się na bardzo zróżnicowanym poziomie (ryc.22).

W odniesieniu do wartości limitowanych przy wprowadzaniu ścieków surowych do kanalizacji miejskiej, najwyższa stwierdzona wartość koncentracji miedzi ( $2,39 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) w ściekach poprodukcyjnych przekracza ponad czterokrotnie ustaloną prawem wartość limitowaną dla tego pierwiastka ( $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , [RMS 2006]). Koncentracja miedzi jaka została stwierdzona w podczyszczonych ściekach z lokalnych galwanizerni (ryc. 22) trafiających w konsekwencji do systemu kanalizacji miejskiej, jest także trzykrotnie wyższa od podawanych przez Bode [1998] stężeń tego pierwiastka w ściekach pogalwanicznych z uprzemysłowionego terenu Niemiec ( $0,8 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).



Ryc. 22. Porównanie stwierdzonych koncentracji metali ciężkich w ściekach surowych pobranych na terenie galwanizerni w Reczu z wartością dopuszczalną [RMS 2006].

(opracowanie własne na podstawie wyników ZWiK w Stargardzie Szczecińskim)

Objaśnienia:

- 1.- wartość dopuszczalna [RMS 2006];
- 2.- podczyszczony ściek surowy z dnia 18.08.2004r.;
- 3.- podczyszczony ściek surowy z dnia 29.03.2005r.,
- 4.- podczyszczony ściek surowy z dnia 4.05.2005r.

Z kolei Chua [1998] stwierdza, że pomimo, iż miedź jest pierwiastkiem związanym z procesami powierzchniowej obróbki metali, w ściekach surowych występuje zazwyczaj w niskich koncentracjach (poniżej  $0,02 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) i rzadko zdarza się sytuacja przekroczenia zawartości limitowanych tego pierwiastka w ściekach surowych, co potwierdzają wyniki badań własnych. Potwierdzałoby to fakt, że badane w przedmiocie niniejszej pracy ścieki surowe są już rozcieńczone po zmieszaniu w systemie kanalizacyjnym ze ściekiem bytowo-gospodarczym i deszczowym. Wynika to głównie z procesu rozcieńczenia zachodzącego w ściekach surowych, gdyż zazwyczaj podczyszczony ściek przemysłowy jest jedynie niewielkim dodatkiem (do 10%) do ogólnej ilości ścieków oczyszczanych w komunalnych oczyszczalniach [Chua 1998, Jackowska, Piotrowski 1996]. Taka sytuacja ma miejsce w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, gdzie mimo znacznych koncentracji tego pierwiastka, wpływającego do sieci kanalizacyjnej ( $2,39 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) wraz z podczyszczonymi ściekami technologicznymi na skutek efektu rozcieńczenia do oczyszczalni dopływają ścieki o prawie osiemdziesięciokrotnie mniejszym stężeniu miedzi (średnio  $0,03 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Dodatkowo De Silóniz i in. [2002] w swoich badaniach podkreślają, że koncentracja miedzi w granicach  $0,2\text{-}0,5 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$  nie wywiera istotnego wpływu na skład ilościowy i morfologiczny mikroorganizmów osadu czynnego, co związane jest z możliwością ich przystosowania do nowych warunków. Zawartość miedzi w ściekach surowych dopływających do miejskiej oczyszczalni ścieków na poziomie poniżej  $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (średnio  $0,03 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ), nie powinna powodować istotnych zmian w efektywności oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego, szczególnie przy stałym dopływie ścieków surowych o takim poziomie stężenia miedzi.

Sytuację przekroczenia wartości limitowanych prawem w próbkach pobieranych ze studzienki kanalizacyjnej [RMS 2006] stwierdzono także w przypadku cynku i chromu. Stężenie chromu w ściekach, pobranych ze studzienki kanalizacyjnej usytuowanej w bezpośrednim sąsiedztwie poletek osadowych, wprowadzanych do systemu kanalizacji miejskiej wynosiło  $0,67 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  i było o  $0,17 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  wyższe od wartości dopuszczalnej ( $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Podobnie jak w przypadku miedzi, również chrom ulega znacznemu rozcieńczeniu podczas przepływu ścieków surowych do Oczyszczalni. Jego stężenie w ściekach dopływającym jest ponad dwadzieścia razy niższe ( $0,03 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) niż stężenie w podczyszczonym ścieku technologicznym (ryc. 22).

Jak podkreśla Bode [1998] cynk jest pierwiastkiem nieodłącznie związanym ze ściekami przemysłu galwanicznego. Autor ten dodaje także, że pierwiastek ten występuje zawsze w najwyższych koncentracjach, i bardzo często notowane są przekroczenia norm prawnych koncentracji cynku zarówno w podczyszczonych ściekach przemysłowych, jak i w ściekach komunalnych z ich dodatkiem. Analizując zawartość tego pierwiastka w ściekach,



pobranych ze studzienki kanalizacyjnej usytuowanej w bezpośrednim sąsiedztwie poletek osadowych, wprowadzanych do systemu kanalizacji miejskiej stwierdzono, że przekroczenie dopuszczalnej ( $2,0 \text{ mg Zn} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) wartości [RMŚ 2006] było minimalne i wynosiło blisko  $0,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (ryc. 22).

W swoich badaniach Sorme i in. [2003] stwierdzili, że ponad 4% ogólnej ilości metali ciężkich trafiających do komunalnych oczyszczalni ścieków wprowadzanych jest wraz z podczyszczonymi ściekami przemysłowymi. Sytuacja ta ulega pogorszeniu, gdy na terenie objętym kanalizacją nie ma separatorów, które oddzielałyby wody burzowe od ścieków bytowo – gospodarczych. Z taką sytuacją mamy do czynienia w obszarze objętym badaniami. Wówczas zawartość metali ciężkich wzrasta, ale zmienia się jednocześnie udział poszczególnych metali w ściekach komunalnych. Sorme i in. [2003] podkreślają również, że należy pamiętać, iż zawartość metali ciężkich ściśle związane jest ze źródłem ich występowania (potencjalnym i rzeczywistym). Gdy w ściekach komunalnych znajdują się podczyszczone ścieki galwaniczne, należy spodziewać się podwyższonych ilości Cr, Cu i Ni, a także Zn. Natomiast, gdy większość stanowią ścieki burzowe, w dopływie dominować będzie Pb i Cd.

W przeprowadzonych badaniach w ściekach komunalnych dopływających do oczyszczalni stwierdzono występowanie zmiennych koncentracji Cu, Cr, Ni, Zn, co może sugerować, iż pochodzą one ze wspólnego źródła, jakim mogą być lokalne galwanizernie.

Jak podkreślają Chander i in. [2001] nie zawsze stężenia metali ciężkich w ściekach surowych są wyznacznikiem zanieczyszczenia. Autorzy ci twierdzą, że najważniejszym aspektem potencjalnego zagrożenia środowiska naturalnego jest kumulacja metali ciężkich w procesie biologicznego oczyszczania ścieków.

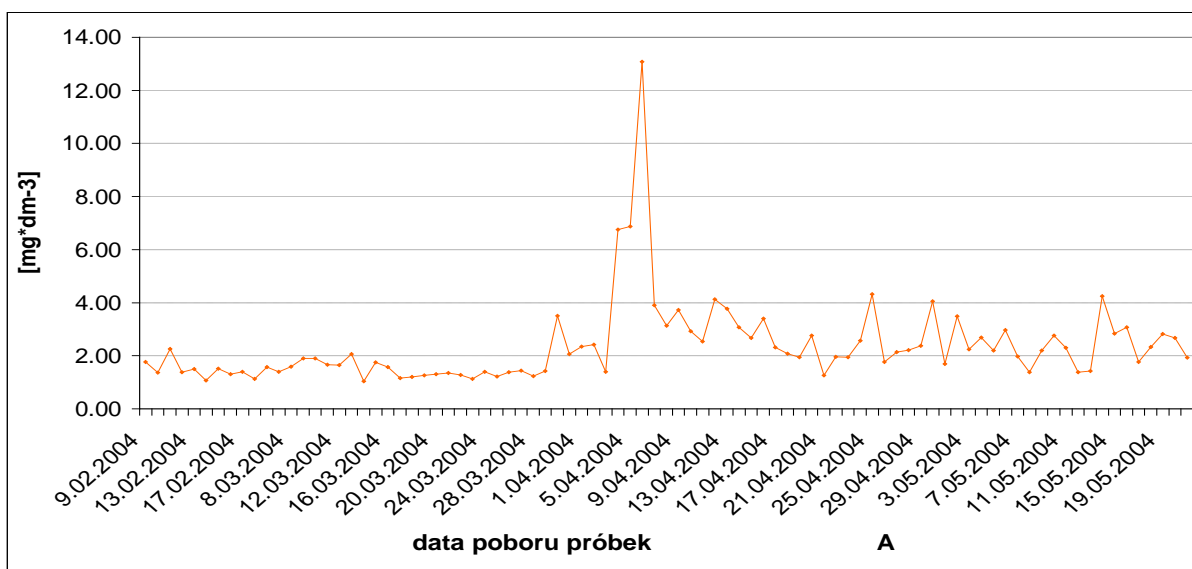
## **5.2. ZMIENNOŚĆ KONCENTRACJI METALI CIĘŻKICH W OSADZIE CZYNNYM Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU**

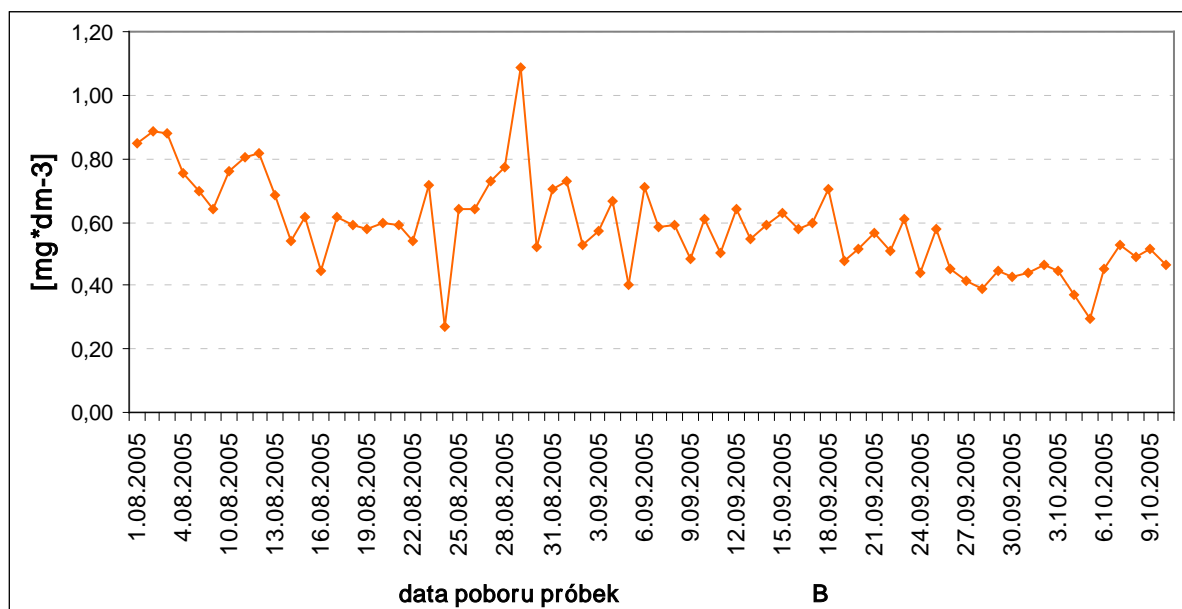
Proces oczyszczania ścieków przy wykorzystaniu metody osadu czynnego stał się najpopularniejszym sposobem usuwania zanieczyszczeń ze ścieków komunalnych, jednocześnie efekt jaki metale ciężkie mogą wywierać na jego funkcjonowanie nabrał w ostatnich latach większego znaczenia [Chang i in. 2001, Tsai i in. 2005]. Biologiczny osad czynny jest zdolny do wiązania i usuwania jonów metali ciężkich ze ścieków surowych. Efektywność usuwania metali ciężkich podczas biologicznego oczyszczania ścieków Tsai i in. [2005] oceniają na ponad 50% , co w konsekwencji powoduje nadmierną ich akumulację w osadzie czynnym., a przy wyższych ich stężeniach obniżenie skuteczności oczyszczania ścieków komunalnych z domieszką ścieków przemysłowych.

Po stwierdzeniu jesienią 2003 roku wysokiej koncentracji metali ciężkich w osadzie składowanym na poletkach odwadniających Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu w roku 2004 rozpoczęto systematyczne badania osadu czynnego, które kontynuowano w roku 2005. Próbkę osadu czynnego z komory recykulatora pobierano w dwóch okresach od 9.02 –do 21.05 2004r (I seria) oraz 1.08 -9.10 2005 r.(II seria). Wyniki tych badań zaprezentowane zostały na rysunkach 23-27, w tabeli 12 oraz załączniku 3 i 4.

**MIEDŹ.** W porównywanych seriach próbek osadu czynnego stężenie miedzi było wyraźnie zróżnicowane i wyższe, w I niż w II serii (współczynniki zmienności wynosiły odpowiednio 68% i 25%, tab. 12). Stężenie miedzi w obu seriach mieściło się odpowiednio (ryc. 23A, B, tab. 12) w granicach 1,04 – 13,09, średnio 2,36 mg · dm<sup>-3</sup> (I seria ) i 0,27-1,09 , średnio 0,59 mg · dm<sup>-3</sup> (II seria).

Pierwsza seria próbek osadu czynnego charakteryzowała się czterokrotnie wyższym średnim stężeniem miedzi w porównaniu z II seria. W większości badanych próbek w tym okresie stężenie Cu utrzymywało się na poziomie 1,0 – 3,0 mg · dm<sup>-3</sup>. Jedynie w czasie od 5.04.do 8.04. 2004 stwierdzono bardzo wysoki wzrost zawartości tego pierwiastka (z 1,40 do 13,09 mg · dm<sup>-3</sup>). Przypuszczalnie nastąpił wówczas zrzut z lokalnych galwanizerni dużej ilości ścieków słabiej podczyszczonych do systemu kanalizacji miejskiej, co po kilku dniach uwidoczniło się w osadzie czynnym. W roku 2005 (II seria badań) nie obserwowano już takiej sytuacji, a stężenie miedzi w większość próbek utrzymywało się w granicach 0,45 – 0,80 mg Cu · dm<sup>-3</sup>. Podkreślić należy, że najwyższe stwierdzone w tym czasie stężenie miedzi (1,09 mg Cu · dm<sup>-3</sup>) w osadzie czynnym było zbliżone do najmniejszej koncentracji tego pierwiastka odnotowanej w roku 2004 (1,04 mg Cu · dm<sup>-3</sup>). Potwierdza to skuteczność zastosowanego podczyszczania ścieków technologicznych w lokalnych galwanizerniach.

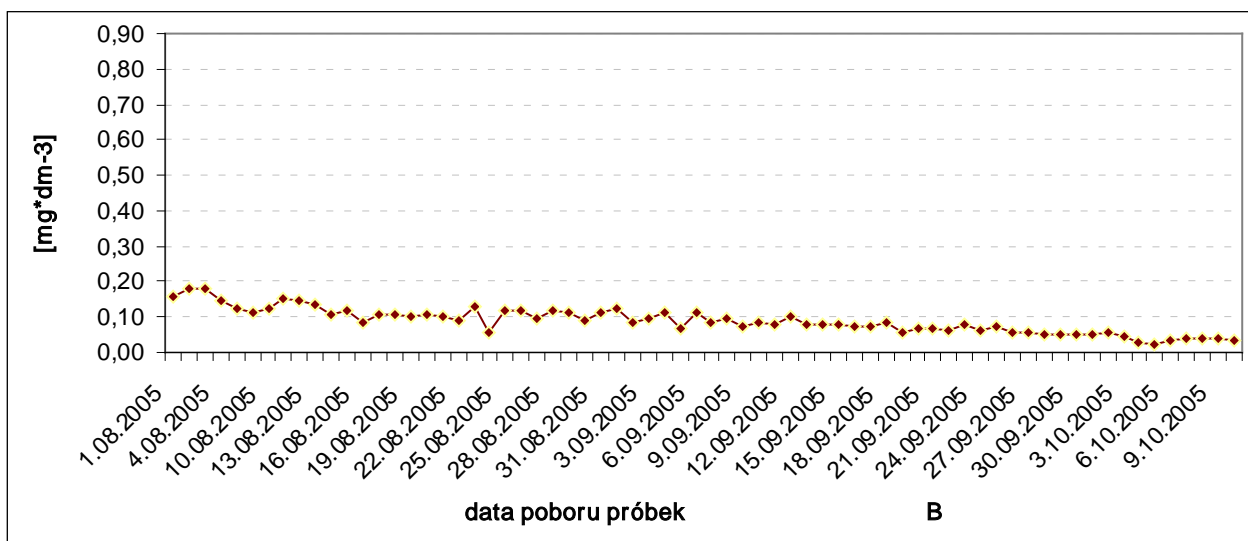
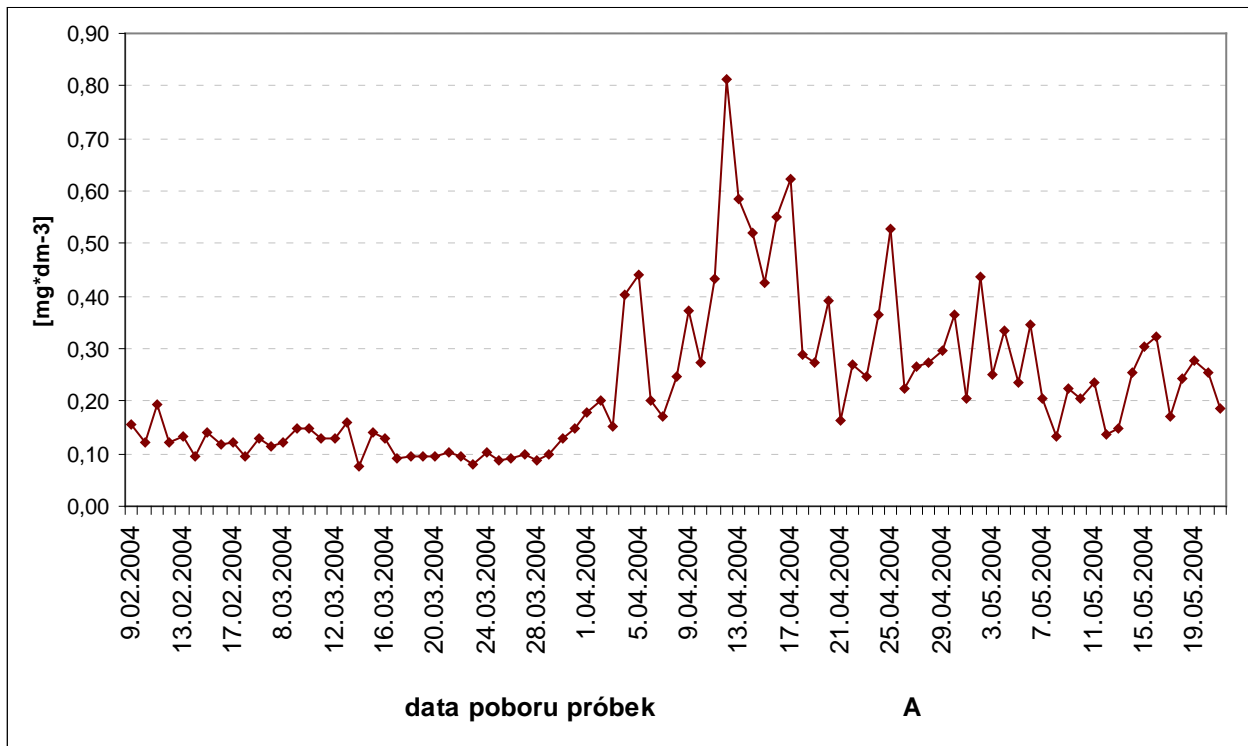




Ryc. 23. Zmiany w stężeniach miedzi w osadzie czynnym w porównywanych okresach:  
A -9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005

Według Chua i in. [1999] oraz Chipasa [2003] stężenie miedzi powyżej  $1,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  powoduje zatrzymanie rozwoju mikroorganizmów w osadzie czynnym, obniżając jednocześnie efektywność oczyszczania ścieków. Stwierdzone w roku 2004 średnie stężenie miedzi ( $2,36 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) w osadzie czynnym Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (w I serii badań) ponad dwukrotnie przekracza ten poziom tolerancji dla mikroorganizmów. Przy takim stężeniu mogą wystąpić istotne zaburzenia w prawidłowym funkcjonowaniu osadu czynnego. Natomiast podczas drugiej serii badań (2005r) stężenia miedzi, były znacznie niższe i poza wartością maksymalną ( $1,09 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) nie stwarzały zagrożenia dla mikroflory osadu czynnego

**CHROM.** Zmiany w stężeniach chromu w osadzie czynnym w porównywanych okresach przedstawiono na rycinie 24. Podobnie jak w ściekach surowych stężenie chromu w osadzie czynnym pobranym z komory recykulatora Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, zarówno w 2004 jak 2005 roku, kształtowało się na stosunkowo niskim poziomie ( $0,08-0,81 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , średnio  $0,23 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w I serii oraz  $0,02- 0,18, \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  średnio  $0,09$  w II serii), wykazując wyraźne zróżnicowanie (odpowiednio współczynniki zmienności wynosiły 63% i 40%). Koncentracja tego pierwiastka w początkowym okresie badań podczas I serii utrzymywała się na poziomie  $0,08-0,20 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , a następnie, po 5.04.2004 r., wyraźnie wzrosła w większości próbek do poziomu powyżej  $0,20 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , maksymalnie do  $0,81 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Ten wzrost wskazuje, iż w tym okresie wystąpiły zrzuty ścieków pogalwanicznych z lokalnych galwanizerni.



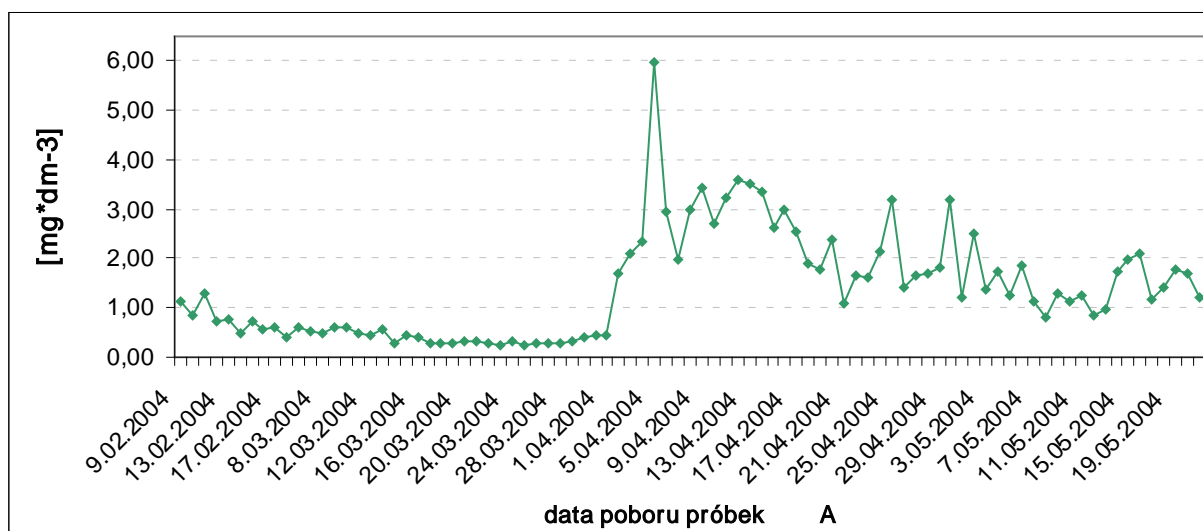
Ryc. 24. Zmiany w stężeniach chromu w osadzie czynnym w porównywanych okresach:  
 A -9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005

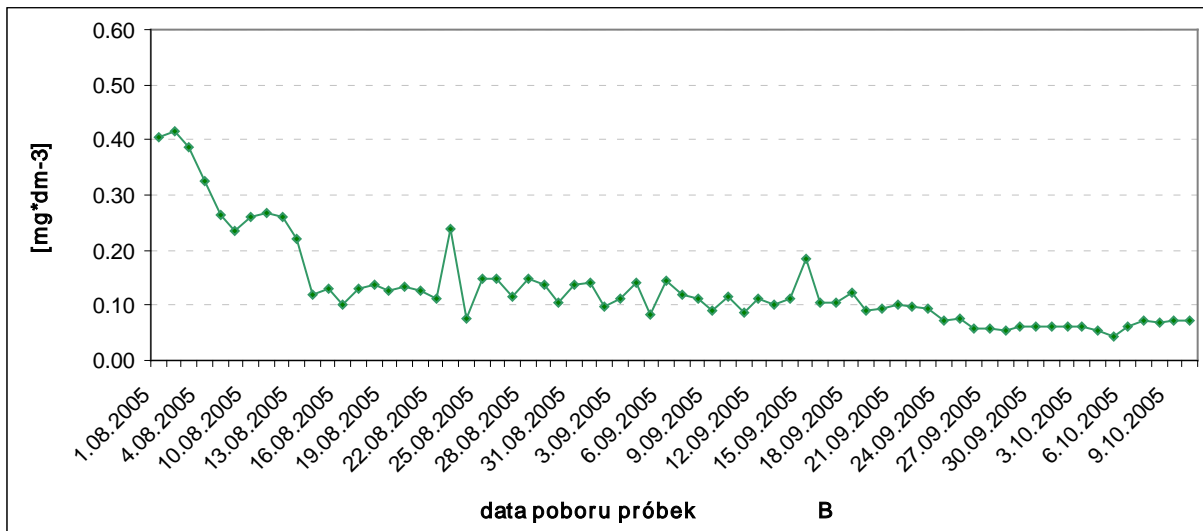
Zarówno średnie jak i maksymalne stężenia chromu były wyraźnie wyższe w próbkach osadu czynnego pobranych w roku 2004 niż w roku 2005 (odpowiednio wartości te wynosiły w I serii 0,23 i 0,81 mg Cr · dm<sup>-3</sup> oraz w II serii 0,09 i 0,18 mg Cr · dm<sup>-3</sup>, tj. były odpowiednio 2,5 i 4,5 krotnie wyższe).

Chua i in. [1999] stwierdzili, że aktywność mikroorganizmów osadu czynnego oraz efektywność oczyszczania ścieków wyraźnie malała przy stężeniach chromu około 10 mg · dm<sup>-3</sup>. Zarówno w próbkach osadu czynnego pobranych w roku 2004 jak i w roku 2005 nie stwierdzono tak wysokich koncentracji tego metalu, co wskazuje, iż chrom nie zakłócał prawidłowej pracy oczyszczalni.

**NIKIEL.** Zróżnicowanie stężenia niklu w osadzie czynnym w obu okresach badań przedstawiono na ryc. 25. Stężenia niklu w osadzie czynnym w porównywanych okresach były silnie zróżnicowane (odpowiednio współczynniki zmienności wynosiły 77% oraz 62,5%) i mieściły się w granicach od 0,24 do 5,99 mg · dm<sup>-3</sup> w I serii oraz od 0,04 do 0,42 mg·dm<sup>-3</sup> w II serii. Średnie stężenie tego pierwiastka w I serii wynosiło 1,4 mg · dm<sup>-3</sup> i było ponad dziesięciokrotnie wyższe niż w drugiej serii (0,13 mg · dm<sup>-3</sup>) (tab.12, ryc. 25 A, B).

Podobnie jak w przypadku miedzi i chromu, także koncentracja niklu w początkowym okresie (9.02 – 4.04. 2004) badań I serii była niska. W większości badanych próbek stężenie Ni utrzymywało się w tym czasie na poziomie 0,2-0,8 mg · dm<sup>-3</sup>. Następnie, w połowie trwania okresu obserwacji (po 5.04.2004r.), stężenie niklu gwałtownie wzrosło osiągając maksymalną wartość 5,99 mg · dm<sup>-3</sup>, przy czym większość próbek w tym czasie zawierała od 1,0 do 3,0 mg Ni · dm<sup>-3</sup>. Jednak nawet najwyższe stwierdzone stężenie niklu (5,99 mg · dm<sup>-3</sup>) nie powodowało zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania i rozwoju mikroorganizmów osadu czynnego, gdyż jak podaje Chua [1999] dopiero koncentracja niklu na poziomie 10 mg · dm<sup>-3</sup> powoduje zakłócenia w rozwoju mikroorganizmów obniżając efektywność oczyszczania ścieków.





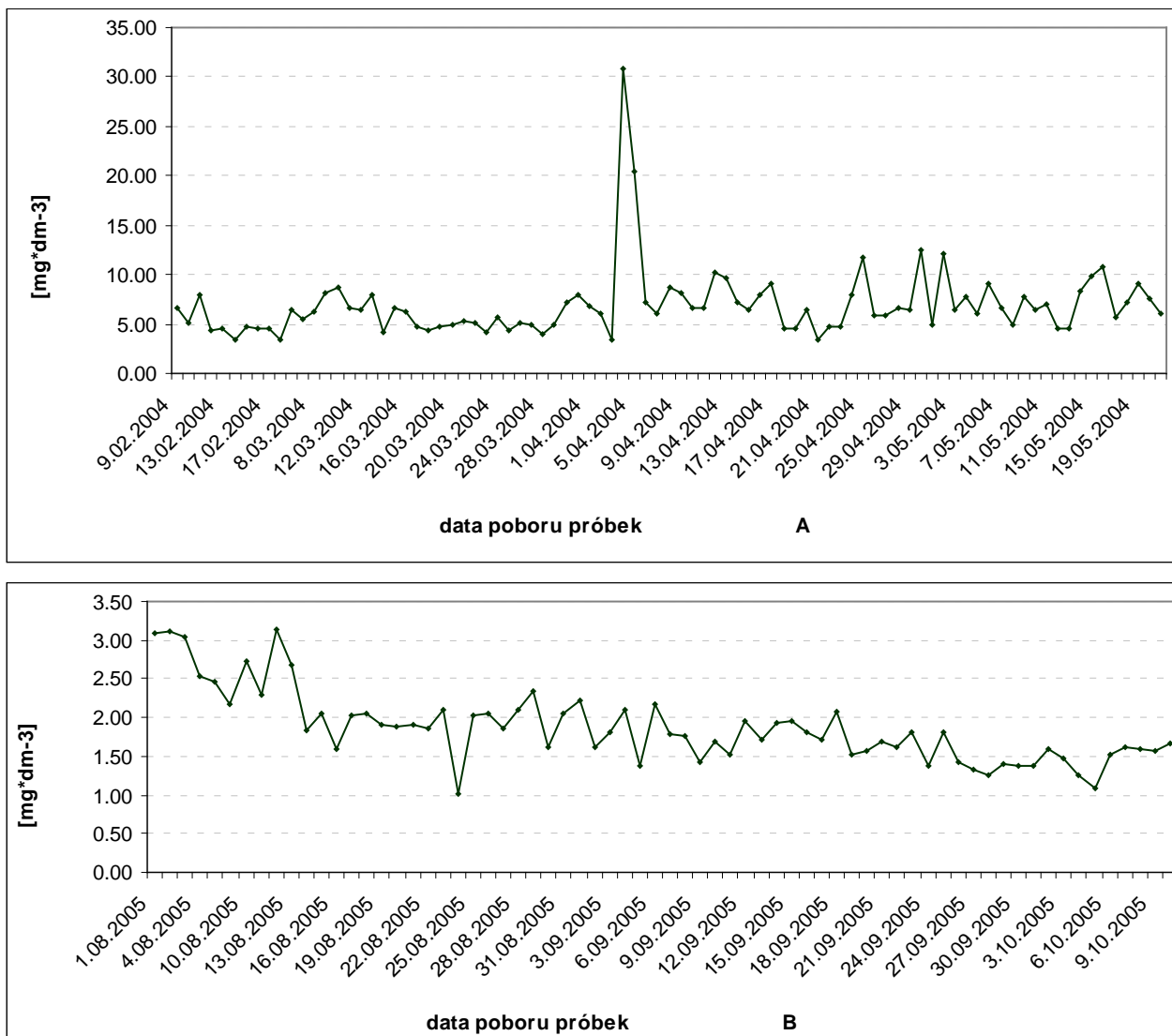
Ryc. 25. Zmiany w stężeniach niklu w osadzie czynnym w porównywanym okresie:  
A -9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005

Odmienne kształtowały się stężenia niklu w próbkach z II serii badań (ryc. 25 B). Początkowo (od 1.08 do 14.08 2005r) koncentracja Ni była wyższa (0,22 - 0,42 mg · dm<sup>-3</sup>), a następnie uległa obniżeniu i w większości próbek utrzymywała się na niskim poziomie (od 0,05 do 0,15 mg · dm<sup>-3</sup>).

**CYNK.** Podobnie jak w ściekach surowych, pierwiastkiem występującym w najwyższych stężeniach w osadzie czynnym w obu seriach badań okazał się cynk (3,33-30,87, średnio 6,89 mg · dm<sup>-3</sup> w I serii oraz 1,01-3,13, średnio 1,87 mg · dm<sup>-3</sup> w II serii). Większość próbek I serii pomiarów mieściła się w zakresie od 3,5 do 7,0 mg · dm<sup>-3</sup>, natomiast w II serii zakres ten był o wiele niższy, a większość stężeń próbek przyjmowało wartości 1,5 – 2,0 mg · dm<sup>-3</sup>.

W pierwszej serii badań stężenia cynku charakteryzowały się dwukrotnie większą zmiennością (V= 52%, tab. 14) niż w drugiej (V=25%), a średnia jego koncentracja wynosząca 6,89 mg · dm<sup>-3</sup> była blisko cztery razy wyższa niż w serii II (1,87 mg · dm<sup>-3</sup>, tab. 12, ryc. 26 A, B).

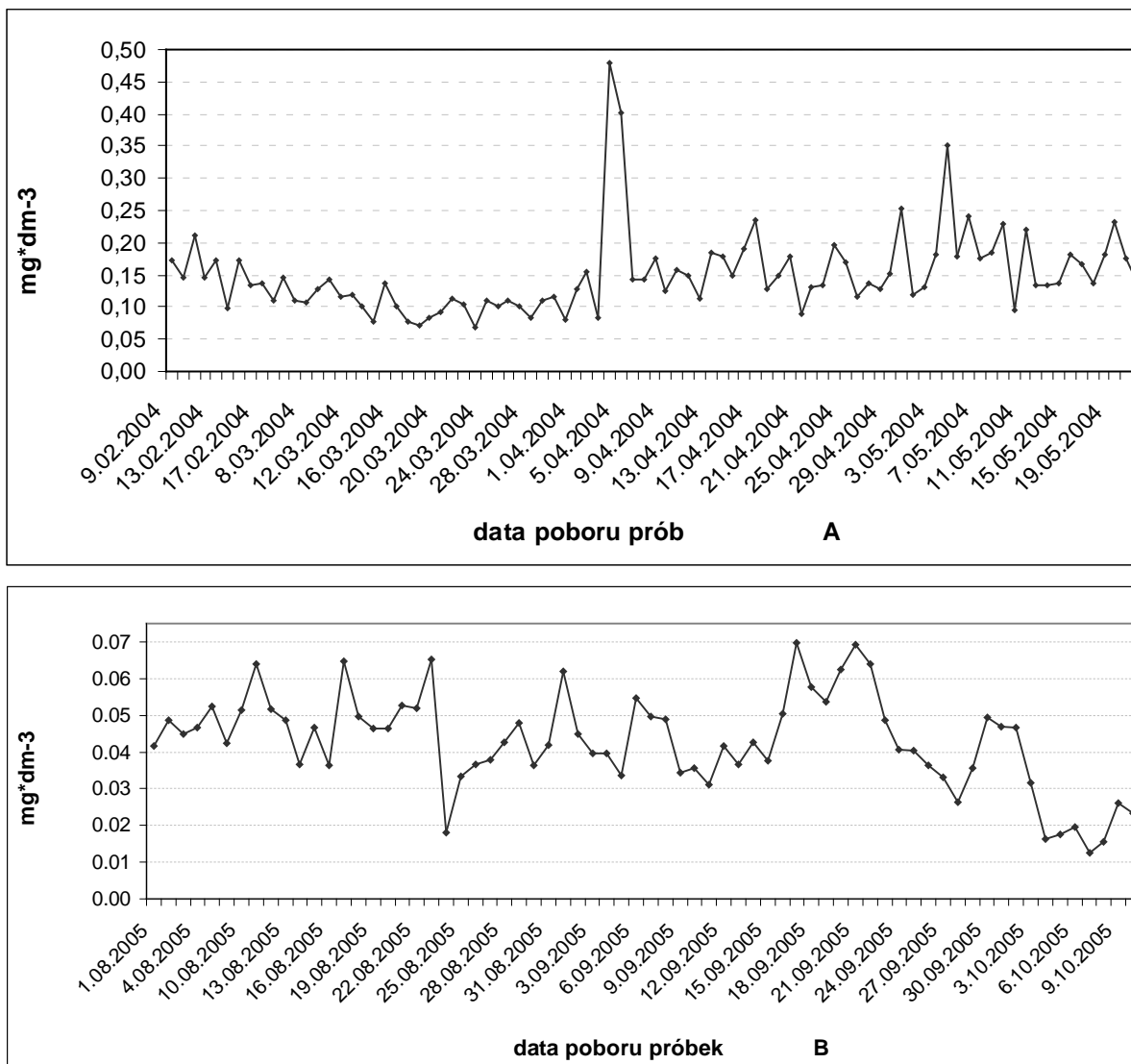
Podkreślić należy, że najwyższe stwierdzone w roku 2005 w osadzie czynnym stężenie cynku ( 3,13 mg Zn · dm<sup>-3</sup>) było niższe od najmniejszej koncentracji tego pierwiastka odnotowanej w roku 2004 ( 3,33 mg Zn · dm<sup>-3</sup>).



Ryc. 26. Zmiany w stężeniach cynku w osadzie czynnym w porównywanych okresach:  
A -9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005

Bardzo charakterystyczny, pokrywający się ze wzrostem koncentracji miedzi, chromu i niklu, był gwałtowny wzrost stężenia cynku w I serii badań po 5.04.2004 (osiągający maksimum –  $30,87 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Potwierdza to możliwość wystąpienia jednorazowego, wysoko obciążonego metalami ciężkimi zrzutu ścieków pogalwanicznych z lokalnych galwanizerni.

**OLÓW.** Stężenie ołowiu w próbkach osadu czynnego w porównywanych okresach było znacznie mniej zróżnicowane (współczynniki zmienności wynosiły odpowiednio 31 i 43 %, tab. 12) niż pozostałych metali ciężkich i kształtowało się na stosunkowo niskim poziomie (odpowiednio w granicach  $0,07 - 0,48 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w I serii próbek) i  $0,01-0,07$  w II serii (ryc. 27 A, B tab. 12) W większości próbek osadu czynnego z I serii, zwłaszcza pobranych w okresie do 5.04.2004 r, stężenie ołowiu było mniejsze od  $0,15 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ .



Ryc. 27. Zmiany w stężeniach ołowiu w osadzie czynnym w porównywanych okresach:  
 A -9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005

Okresowe zrzuty ścieków pogalwanicznych do kanalizacji miejskiej potwierdza kilkakrotne wystąpienie wyraźnie wyższych koncentracji ołowiu po 5.04.2004r. ( $0,25\text{--}0,48\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Średnie stężenie ołowiu w próbkach osadu czynnego było w roku 2004 blisko czterokrotnie wyższe niż w roku 2005 (odpowiednio średnie wynosiły  $0,15$  i  $0,04\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ), a minimalna koncentracja ołowiu ( $0,07\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) stwierdzona w roku 2004 była równa maksymalnej w roku 2005.

**KADM.** Stężenie kadmu w porównywanych okresach, podobnie jak w przypadku ścieków surowych, było bardzo niskie ale silniej zróżnicowane (odpowiednio współczynniki zmienności wynosiły 87 i 83 %) i kształtowało się na poziomie  $0,001\text{--}0,03\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , średnio  $0,01\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w I serii próbek oraz  $0,001\text{--}0,009\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , średnio  $0,001\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w II serii (tab. 12). Średnie stężenie kadmu w I serii badań było dziesięć razy wyższe ( $0,01\text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) niż w serii II.



Tsai i in. [2005] stwierdzili podczas swoich badań, że skuteczność usuwania kadmu ze ścieków była bardzo wysoka i średnio osiągała poziom 98%. Autorzy ci dowodzą, że zawartość kadmu średnio na poziomie  $2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , nie powoduje zmian w procesie oczyszczania ścieków. Wyraźne zmiany, szczególnie w procesie nityfikacji (inhibicja procesu) zauważono dopiero, gdy koncentracja kadmu w ściekach kształtowała się na poziomie  $5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Wraz ze wzrostem stężenia tego pierwiastka w ściekach komunalnych obniżała się efektywność usuwania z nich fosforu. Natomiast Chua i in. [1999] stwierdzili, że dopiero stężenia kadmu ponad  $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  mogą powodować istotne zmiany w funkcjonowaniu osadu czynnego. W badanym osadzie czynnym z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu stwierdzono o wiele niższe koncentracje kadmu (odpowiednio średnie stężenia wynosiły  $0,01 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  – w 2004 r oraz  $0,001 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w roku 2005). Tak niskie koncentracje tego pierwiastka w osadzie czynnym nie wywierały więc istotnego wpływu na zmiany efektywności oczyszczania ścieków oraz nie wpływały na zmianę ilości i jakości osadu czynnego.

Podstawowe parametry statystyczne koncentracji analizowanych metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd) w próbkach osadu czynnego, pobranego z komory recykulatora Miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu zestawione zostały w tabeli 12.

**Tabela 12.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji [ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ] metali ciężkich w próbkach osadu czynnego

	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd
<b>I Seria badań (n = 87)</b>						
<b>x</b>	2,36	0,23	1,40	6,89	0,15	0,010
<b>min</b>	1,04	0,08	0,24	3,33	0,07	0,001
<b>max</b>	13,09	0,81	5,99	30,87	0,48	0,030
<b>S</b>	1,60	0,14	1,08	3,60	0,07	0,008
<b>V [%]</b>	67,66	62,84	77,23	52,20	43,44	87,06
<b>II Seria badań (n = 71)</b>						
<b>x</b>	0,59	0,09	0,13	1,87	0,04	0,001
<b>min</b>	0,27	0,02	0,04	1,01	0,01	0,001
<b>max</b>	1,09	0,18	0,42	3,13	0,07	0,009
<b>S</b>	0,15	0,04	0,08	0,47	0,01	0,001
<b>V [%]</b>	24,98	40,30	62,55	25,15	30,62	83,07

Podobnie jak w przypadku ścieków surowych, także w próbkach osadu czynnego pierwiastkiem występującym w najwyższym stężeniu był cynk, natomiast w najniższym kadm.

Karvelas i in. [2003] podkreśla, że stężenia metali ciężkich w osadzie czynnym wykazują zazwyczaj bardzo duże zróżnicowanie, głównie ze względu na nieregularny dopływ tych substancji wraz ze ściekiem surowym. Duże zróżnicowanie stężeń badanych metali

potwierdzają przeprowadzane badania (tab.13) na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (współczynniki zmienności stężeń metali w porównywanych seriach wynosiły odpowiednio 43 -87 % oraz 25-83%).

Stężenia poszczególnych analizowanych metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd) w osadzie czynnym były o wiele wyższe niż w ściekach surowych. Największy poziom akumulacji wykazały nikiel, miedź i chrom których stężenie w osadzie czynnym było około 20 razy wyższe niż w ściekach surowych. W przypadku cynku stężenie tego pierwiastka w osadzie było około 13 razy wyższe, a ołowiu jedynie pięć razy. Akumulacji nie stwierdzono w przypadku kadmu, prawdopodobnie ze względu na jego niską zawartość w ściekach dopływających (średnio  $0,001 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

Pomimo, iż miedź uznawana jest za niezbędny do życia większości organizmów mikroelement [Chua 1998, Jackowska, Piotrowski 1996; Cereceda 1996], De Silóniz i inni [2002] podkreślają, że pozytywny wpływ na rozwój komórek pierwiastek ten może wywierać jedynie w niskich koncentracjach. Podwyższone stężenia miedzi (powyżej  $0,5 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) mogą powodować stres, a nawet prowadzić do zahamowania wzrostu i rozwoju organizmów, zwłaszcza organizmów wodnych i mikroorganizmów osadu czynnego. Dlatego też istotne jest aby ścieki przemysłowe charakteryzowały się jakością, nie powodującą zagrożenia dla środowiska wodnego.

Według Chua i in. [1999], Nies [1999] oraz Chipsa [2003] stężenie miedzi powyżej  $1,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  powoduje zatrzymanie rozwoju mikroorganizmów w osadzie czynnym, obniżając jednocześnie efektywność oczyszczania ścieków. Obserwowane średnie stężenia miedzi w osadzie czynnym Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (średnio  $2,36 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$  w I serii badań) o ponad dwa razy przekraczało ten poziom tolerancji dla mikroorganizmów. Sytuacja taka może powodować istotne zaburzenia w prawidłowym funkcjonowaniu osadu czynnego. Natomiast stwierdzone podczas drugiej serii badań (2005r) stężenia miedzi, były znacznie niższe (poza wartością maksymalną –  $1,09 \text{ mg Cu} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) i zgodnie z progiem tolerancji podawanym przez Chua i in. [1999], Nies [1999] oraz Chipsa [2003] nie powinny stwarzać zagrożenia dla mikroflory osadu czynnego.

Jak twierdzi Leszczyńska [1999] miedź jest jednym z głównych pierwiastków działających inhibicyjnie na proces nityfikacji. Autorka ta podkreśla, że w niektórych przypadkach przy stężeniu miedzi wynoszącym  $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  stwierdzano całkowite zahamowanie wzrostu bakterii z rodzaju *Nitrosomonas*. W osadzie czynnym pobranym z komory recykulatora Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu w pierwszym okresie badań (2004r) średnie stężenie miedzi było prawie pięć razy wyższe od poziomu tego pierwiastka powodującego zakłócenia w prawidłowym funkcjonowaniu osadu czynnego.

Zakłócenia w prawidłowym funkcjonowaniu oczyszczalni mogą wynikać także z nadmiernych koncentracji chromu w ściekach. Chua i in. [1999] stwierdzili, że aktywność mikroorganizmów osadu czynnego oraz efektywność oczyszczania ścieków wyraźnie malała przy stężeniach chromu około  $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Podczas trwania obu serii badań nie stwierdzono tak wysokich koncentracji tego metalu, które mogłyby zakłócać prawidłową pracę oczyszczalni. Maksymalne stężenia tego pierwiastka stwierdzone w obu seriach badań są wielokrotnie niższe od wartości podanej przez Chua i in. [1999], co wskazuje iż pierwiastek ten nie miał wpływu na prawidłowość przebiegu procesu oczyszczania ścieków.

Kolejnym pierwiastkiem mogącym negatywnie wpływać na funkcjonowanie osadu czynnego i efektywność oczyszczania ścieków jest nikiel. Jednak nawet najwyższe stwierdzone podczas badań stężenie niklu ( $5,99 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) nie powodowało zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania i rozwoju mikroorganizmów osadu czynnego, gdyż jak podaje Chua [1999] dopiero koncentracja niklu wyższa od  $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  zakłóca rozwój mikroorganizmów i obniża efektywność oczyszczania ścieków. Jednak pozostaje to w sprzeczności z Leszczyńską [1999] która dowodzi, że już przy wielokrotnie niższej koncentracji niklu ( $0,25 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) obserwowano znaczne obniżenia intensywności procesu nityfikacji w osadzie czynnym, nawet do całkowitego zahamowania wzrostu bakterii odpowiedzialnych za prawidłowy przebieg tego procesu. Dodatkowo autorka podkreśla, że osad czynny pod ciągłym wpływem Ni obecnego w ściekach surowych w stężeniach  $0,1 - 0,7 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  wykazywał znaczne obniżenie (do zaledwie 30%) skuteczności procesu nityfikacji.

Jak podaje Leszczyńska [1999] także cynk, podobnie jak miedź i nikiel, jest pierwiastkiem, którego nadmierna ilość jest toksyczna dla osadu czynnego i powoduje wyraźne obniżenie efektywności oczyszczania ścieków. Najniższe stwierdzone przez tą autorkę stężenie cynku wywołujące toksyczność wyrażoną  $EC_{50}$  wyniosło  $5,6 \text{ mg Zn} \cdot \text{dm}^{-3}$ , co oznacza, że nadmierne stężenie tego metalu po zrzucie ścieków przemysłowych do Oczyszczalni Ścieków w Reczu mogło być toksyczne dla osadu czynnego.

Nies [1999] stwierdził ponadto, że za poziom wywołujący efekt toksyczny wśród mikroorganizmów osadu czynnego można uznać stężenie cynku oscylujące w granicach  $1-2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . W przypadku badanego osadu czynnego z komory recyklatora Miejskiej Oczyszczalni w Reczu, można uznać, iż cynk był pierwiastkiem silnie toksycznym, gdyż jego stężenie w I i II serii badań było odpowiednio sześciokrotnie i prawie dwukrotnie wyższe niż próg tolerancji mikroflory osadu czynnego.

Jak już wcześniej wspomniano, skuteczność usuwania metali ciężkich ze ścieków komunalnych przy wykorzystaniu osadu czynnego jest wysoka, szczególnie kadmu [Tsai i in. 2005]. Autorzy ci dowodzą dodatkowo, że zawartość kadmu średnio na poziomie  $2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , nie powoduje zmian w procesie oczyszczania ścieków, dopiero, gdy koncentracja kadmu w

ściekach wzrasta do poziomu około  $5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  zauważalne są wyraźne zmiany w funkcjonowaniu osadu. Podobne wnioski wyciągnęli Chua i in. [1999] stwierdzając, że dopiero wysokie stężenia kadmu (powyżej  $10 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) mogą powodować istotne zmiany w funkcjonowaniu osadu czynnego.

W badanym osadzie czynnym z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu stwierdzono o wiele niższe koncentracje kadmu (średnio  $0,01 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  – w I serii badań oraz  $0,001 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w II serii ) od wartości przytaczanych przez Chua i in. [1999] oraz Tsai i in. [2005]. Tak niskie zawartości tego pierwiastka w osadzie czynnym nie wywierały istotnego wpływu na zmiany efektywności oczyszczania ścieków oraz nie wpływały na zmianę ilości i jakości osadu czynnego.

Stwierdzone minimalne i maksymalne koncentracje wszystkich analizowanych metali ciężkich (miedzi, chromu, niklu i cynku) w pierwszej serii badań wystąpiły w tym samym czasie. Ten fakt, potwierdzony istotnymi wartościami współczynników korelacji między wszystkimi badanymi metalami w ściekach surowych i w osadzie czynnym (tab. 13), świadczy o tym, że metale te pochodzą z jednego źródła. Na podstawie krzywych przedstawiających dynamikę stężeń metali w osadzie (Ryc. 23 - 27) można stwierdzić, że wzrost koncentracji metali ma charakter okresowy i z pewnością powiązany jest ze zrzutem ścieków przemysłowych.

**Tabela 13.** Wartości istotnych ( $p < 0,05$ ) współczynników korelacji liniowej Pearsona między stężeniem analizowanych metali w osadzie czynnym a ściekiem surowym.

Zmienna	Zn	Cu	Ni	Cr
Zn	-	0,66	0,76	0,83
Cu	0,66	-	0,75	0,70
Ni	0,76	0,75	-	0,97
Cr	0,83	0,70	0,97	-

Zarówno wykonane analizy chemiczne osadu jak i ocena działalności przemysłowej na obszarze objętym systemem kanalizacyjnym potwierdzają, że źródłem zanieczyszczenia osadów powstających w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu są ścieki pogalwaniczne. Prawdopodobną przyczyną transportu systemem kanalizacyjnym dużych ładunków metali jest nieskuteczne ich usuwanie ze ścieków pogalwanicznych mimo wielu opracowanych i sprawdzonych rozwiązań w tym zakresie [Stefanowicz i in. 1996, Józwiak, Gorzka 1998].

### 5.3. ZMIENNOŚĆ KONCENTRACJI METALI CIĘŻKICH W ŚCIEKACH OCZYSZCZONYCH Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU

Do analizy zmian w koncentracji metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd) wykorzystano ogółem 8 próbek ścieków oczyszczonych pobieranych raz w tygodniu w okresie od 17.08 do 30.09.2005 r (tab. 14).

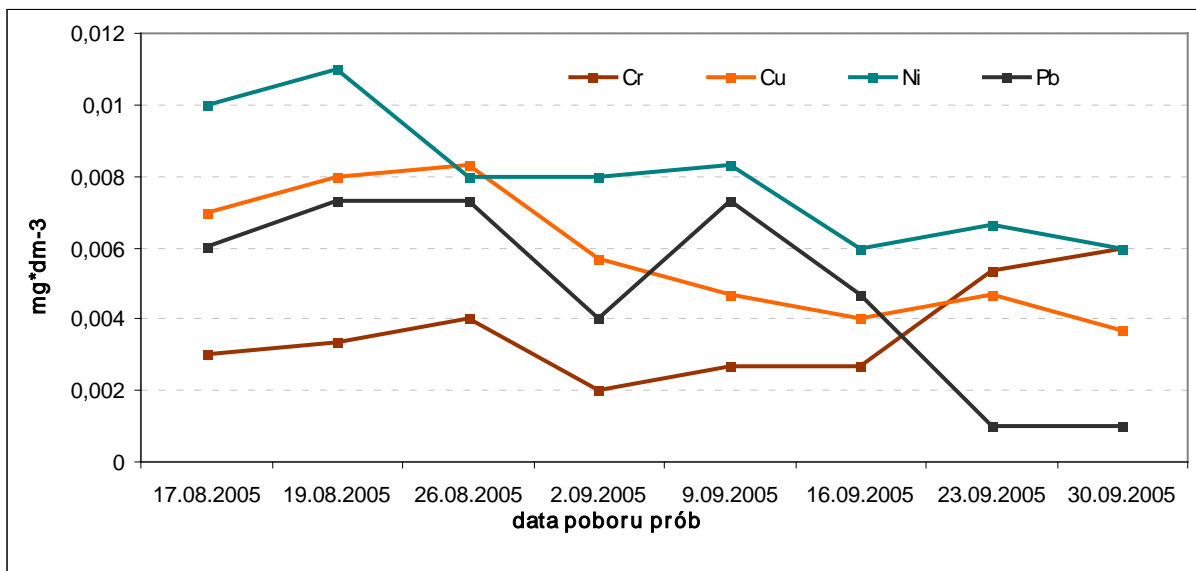
Stężenia poszczególnych analizowanych metali ciężkich kształtowały się na bardzo niskim poziomie, co wskazuje na skuteczność oczyszczania ścieków surowych zanieczyszczonych ściekami pogalwanicznymi. W tabeli 14 przedstawiono podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w ściekach oczyszczonych, pochodzącym z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu.

**Tabela 14.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w próbach ścieków oczyszczonych [ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ]

	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb
x	0,006	0,004	0,008	0,097	0,005
min	0,004	0,002	0,006	0,051	0,001
max	0,008	0,006	0,011	0,161	0,007
S	0,002	0,001	0,002	0,038	0,003
V [%]	33,8	39,9	22,6	39,4	61,0

*Objaśnienia: koncentracja kadmu w ściekach oczyszczonych, poniżej poziomu oznaczalności –  $0,001 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  sprzętu (Analizator Absorpcji Atomowej „Solaar 929”)*

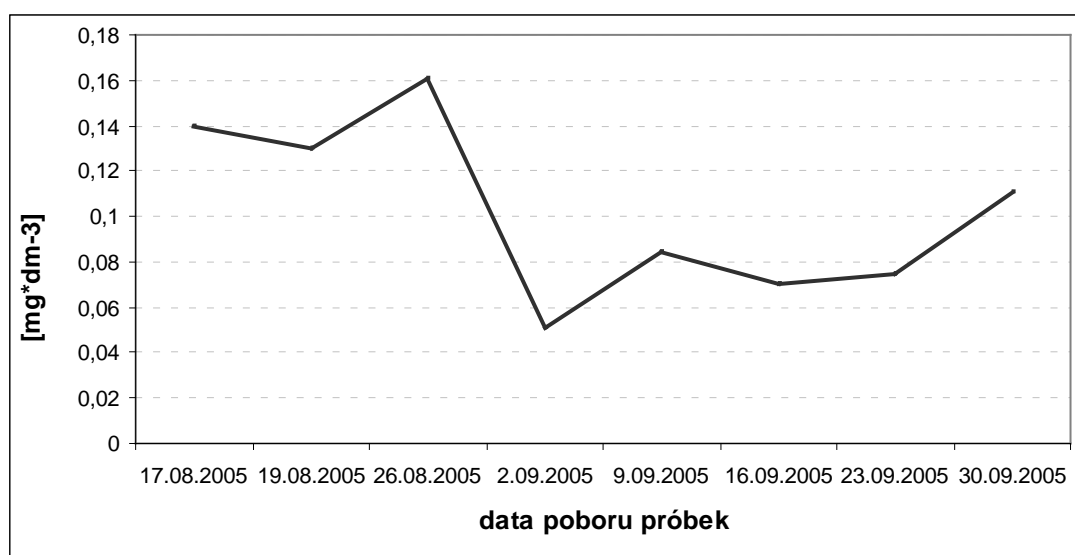
Średnie stężenia Cu, Cr, Ni i Pb w ściekach oczyszczonych mieściły się w granicach  $0,004 - 0,008 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (ryc. 28, tab. 14). Natomiast stężenia kadmu w ściekach oczyszczanych metodą osadu czynnego w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, przyjmowały wartości poniżej poziomu oznaczalności ( $0,001 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) sprzętu (Analizator Absorpcji Atomowej „Solaar 929”).



Ryc. 28 . Zmiany w stężeniach Cu, Cr, Ni i Pb w ściekach oczyszczonych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu

Metalem występującym w najwyższym stężeniu w oczyszczonych ściekach komunalnych okazał się cynk, którego zawartość kształtowała się na poziomie 0,051 – 0,161 mg · dm<sup>-3</sup>, średnio 0,097 mg · dm<sup>-3</sup> (ryc. 29, tab. 14).

Koncentracja metali ciężkich w ściekach oczyszczonych charakteryzowała się mniejszą zmiennością (V od 23 do 61%) niż w przypadku osadu czynnego (25-87%), a zwłaszcza w przypadku ścieków surowych (27-128% ).



Ryc. 29 . Zmiany w stężeniu cynku w ściekach oczyszczonych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu

W czasie badań ścieków oczyszczonych pochodzących z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu ( 17.08-30.09.2005 r) nie zostały przekroczone najwyższe przewidziane prawem dopuszczalne wartości wskaźników zanieczyszczeń jakie powinny być przestrzegane przy wprowadzaniu ścieków komunalnych do wód lub do ziemi [RMS 2006] w odniesieniu

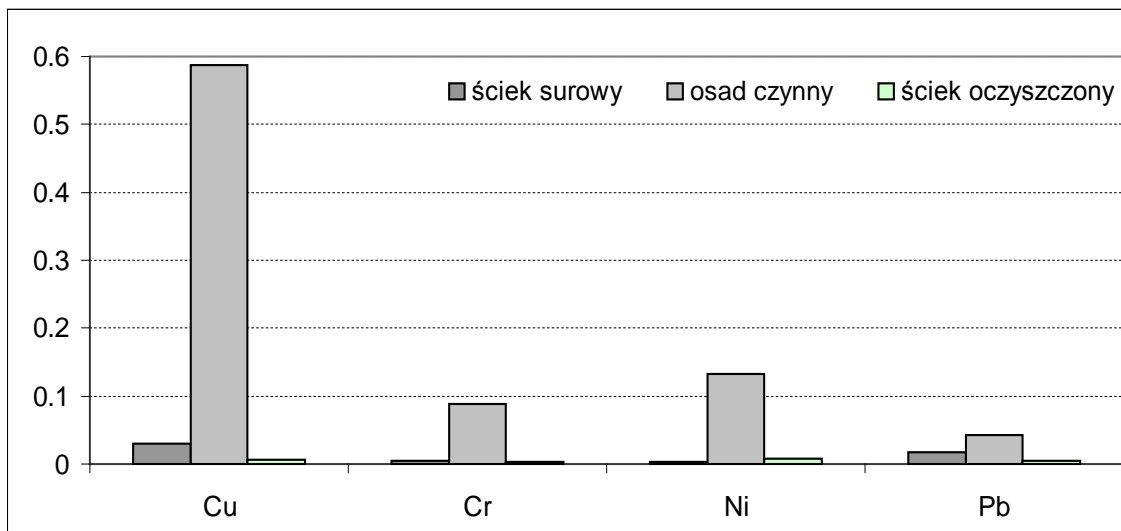
do wszystkich analizowanych metali ciężkich. Średnie wartości metali ciężkich były od kilkudziesięciu do ponad stu razy niższe (od 20 razy dla cynku do ponad 125 razy dla chromu) niż przewiduje to prawo, nie stwarzając tym samym zagrożenie dla odbiornika ścieków oczyszczonych, którym jest rzeka Ina.

Usuwanie metali ciężkich ze ścieków ściśle związane jest z początkową ich zawartością w ściekach surowych dopływających do oczyszczalni. Ponadto, co potwierdza Chipasa [2003], efektywność usuwania metali ciężkich jest proporcjonalna do ich początkowych ilości.

#### **5.4. EFEKTYWNOŚĆ OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW W MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU**

Efektywność oczyszczania ścieków w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, wykorzystującej metodę osadu czynnego oceniano na podstawie zmienności koncentracji poszczególnych analizowanych metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd) w ściekach surowych, osadzie czynnym i ściekach oczyszczonych. Do analiz wykorzystano średnie zawartości poszczególnych metali stwierdzone podczas trwania II serii badań (17.08-10.10.2005), próbek ścieków surowych i osadu czynnego oraz średnie ich koncentracje w ściekach oczyszczonych, ze względu na jednakowy czas poboru próbek.

Su i in. [1995] stwierdzili, że im wyższa koncentracja metali ciężkich w ściekach surowych (ponad  $0,5 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) tym wyższa i znacznie szybsza jest ich sorpcja przez mikroorganizmy osadu czynnego. Potwierdza to Leszczyńska [1999] wskazując, że osad czynny wystawiony na stały dopływ metali ciężkich wraz ze ściekami surowymi, uodparnia się na ich toksyczne działanie. Mikroorganizmy zachowują wysoki poziom tolerancji na te szkodliwe substancje, co skutkuje utrzymaniem efektywności oczyszczania ścieków na wysokim poziomie – 70%.



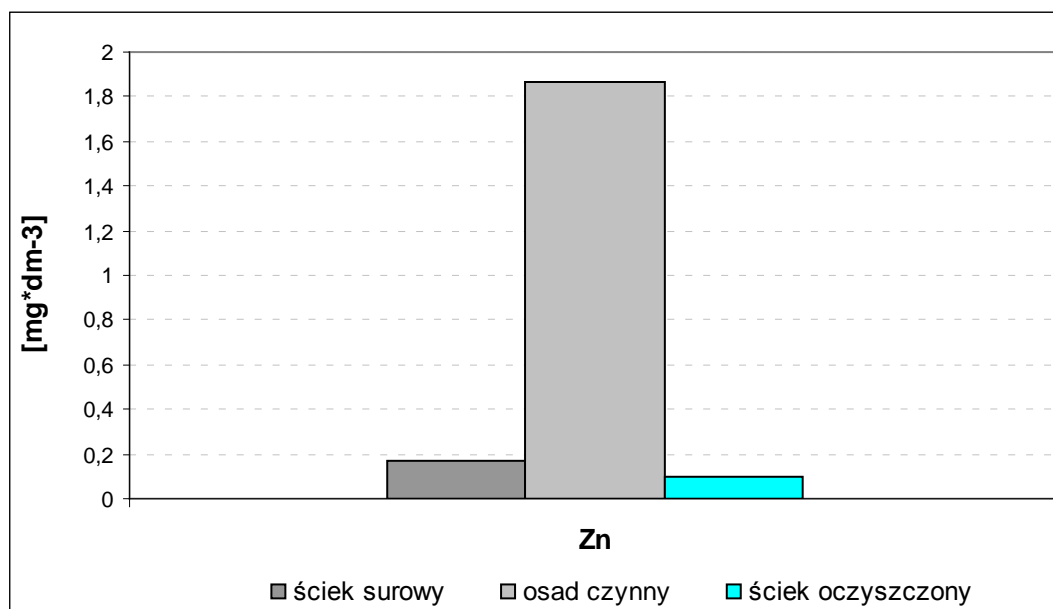
Ryc. 30 Koncentracja Cu, Cr, Ni i Pb [ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ] w ściekach surowych, osadzie czynnym i ściekach oczyszczonych

Wyniki analiz ścieków surowych (tab. 11), osadu czynnego (tab.12) i ścieków oczyszczonych (tab. 14) posłużyły do obliczeń stopnia redukcji metali ciężkich w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu. Zmiany koncentracji Cu, Cr, Ni, Zn i Pb w ściekach surowych, osadzie czynnym i ściekach oczyszczonych ilustrują ryciny 30 i 31, a efektywność usuwania Cu, Pb i Zn ze ścieków surowych rycina 32. Na rycinach nie umieszczono kadmu ponieważ pierwiastek ten nie wykazywał zmian w koncentracjach, a jego stężenie utrzymywało się na jednakowym poziomie w ściekach surowych i osadzie czynnym (średnio  $0,001 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

Największą redukcję (80 i 75%) osiągnięto w przypadku miedzi oraz ołowiu (ryc. 32). Zawartość miedzi w ściekach oczyszczonych była pięć razy niższa niż w ściekach surowych i aż 98 razy niższa niż koncentracja tego pierwiastka w osadzie czynnym, co świadczy o bardzo efektywnym usuwaniu miedzi przez mikroorganizmy osadu czynnego (ryc. 30). W przypadku ołowiu średnie stężenie w ściekach oczyszczonych ( $0,005 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) było pięć razy niższe niż koncentracja tego pierwiastka w osadzie czynnym i blisko dwukrotnie mniejsze w porównaniu z zawartością ołowiu w ściekach surowych (ryc.30, tab. 14). Potwierdza to skuteczność metody osadu czynnego w usuwaniu miedzi i ołowiu ze ścieków, przytaczane przez Su [1995]. Nieco niższy, choć równie istotny stopień usuwania metalu ze ścieków odnotowano w przypadku cynku, gdzie efektywność jego usuwania wynosiła ponad 41% (ryc. 31 i 32). Natomiast w przypadku chromu i niklu nie odnotowano żadnej redukcji zanieczyszczeń (ryc. 30) i średnie stężenie tych pierwiastków w ściekach surowych i oczyszczonych utrzymywało się na tym samym bądź zbliżonym poziomie (dla chromu  $0,004 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ , dla niklu  $0,007$  i  $0,008 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Mała efektywność usuwania niklu i chromu ze ścieków surowych, jak podaje Su i in. [1995] wynikać może z bardzo słabej



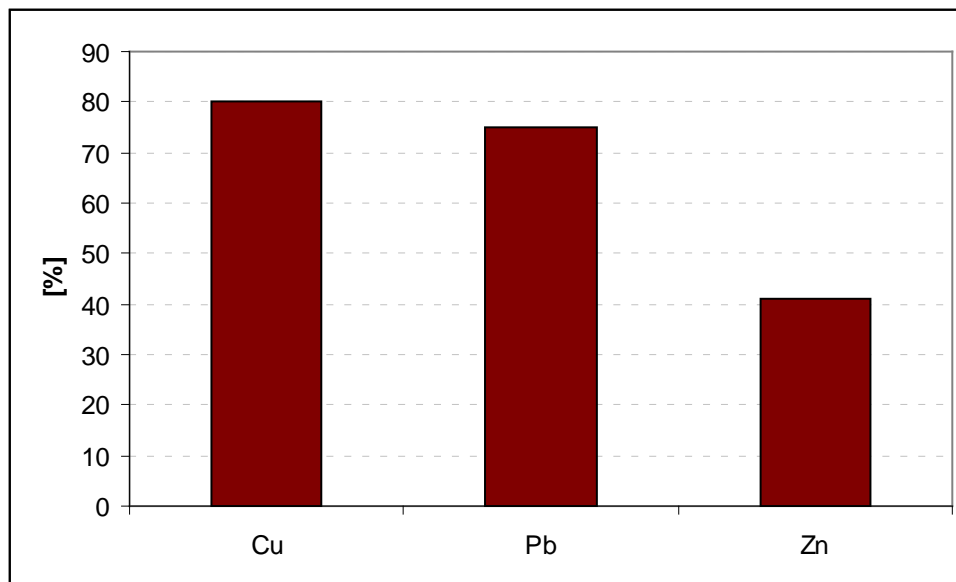
sorpcji tych metali przez mikroorganizmy osadu czynnego. Autorzy ci podają, że efektywność oczyszczania ścieków komunalnych metodą osadu czynnego w odniesieniu do niklu, kształtuje się zazwyczaj na poziomie około 20%.



Ryc. 31. Koncentracja cynku w ściekach surowych, osadzie czynnym i ściekach oczyszczonych

Efektywność redukcji metali ciężkich ze ścieków surowych przedstawia się następująco:  $Zn < Pb < Cu$  (ryc. 32) i nie koresponduje z ich koncentracjami ( $Cd < Cr < Ni < Pb < Cu < Zn$ ) w ściekach surowych, w których w największej koncentracji występował cynk, natomiast efektywność jego usuwania kształtowała się na najniższym poziomie (około 40%).

Związek pomiędzy stężeniem metali ciężkich dopływających do oczyszczalni ścieków oraz stopniem ich redukcji podczas procesów biologicznego oczyszczania ścieków pokrywa się tylko częściowo z obserwacjami prowadzonymi przez Chipasę [2003], który stwierdził, że skuteczność usuwania metali ciężkich ze ścieków surowych jest proporcjonalna do ich początkowej zawartości w ściekach dopływającym do oczyszczalni.



Ryc. 32. Efektywność usuwania metali ciężkich ze ścieków w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu

Jak podaje Su i in. [1995] przy wykorzystaniu metody biologicznie czynnego osadu najszybciej ze ścieków usuwany był cynk (maksimum osiągnięto już po 4 godzinach procesu oczyszczania), następnie kadm i nikiel (maksimum po 8 godzinach). Autorzy ci dowodzą również, że cynk jest metalem, który był najszybciej usuwany ze ścieków surowych (efektywność procesu szacują na 80%), podczas gdy kadm i nikiel usuwane były na poziomie około 40%. Nieco odmienna sytuacja była w przypadku Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, gdzie najwyższym stopniem usuwania ze ścieków charakteryzowała się miedź i ołów, a znacznie niższą cynk (ryc. 32). Wynikać to może z wysokich koncentracji tego metalu w ściekach surowych, negatywnie wpływających na funkcjonowanie osadu czynnego i jego zdolność do akumulacji.

Jak podaje Unz i Shuttleworth [1996] możliwości biomasy osadu czynnego w zakresie pobierania ze ścieków surowych metali ciężkich zależy głównie od fizycznych, chemicznych i biologicznych właściwości samych mikroorganizmów tworzących osad, a Valix i in. [2001] dodaje, że mikroflora osadu czynnego często wykazuje możliwości przystosowania się do wyższych stężeń w ściekach surowych poprzez mutacje komórek. Jednak nie zawsze przystosowanie osadu czynnego koresponduje z jego możliwościami redukcji zanieczyszczeń ze ścieków surowych.

Su i in. [1995] podkreślają, że biologiczne usuwanie metali ciężkich ze ścieków surowych z wykorzystaniem osadu czynnego zachodzi głównie poprzez sorpcję tych metali przez mikroorganizmy tworzące kłaczkę. Ponadto autorzy ci dowodzą, że sorpcja biologiczna poboru metali ciężkich, zachodząca w osadzie czynnym, przyjmuje zazwyczaj następującą sekwencję: Zn>Cd>Ni. Taki model pobierania metali ciężkich przez osad czynny stwierdzili także Brown i Lester [1982] dodając, że zazwyczaj efektywność usuwania miedzi ze ścieków

jest tak samo wysoka jak w przypadku cynku (70-80%), podczas gdy usuwanie pozostałych metali kształtuje się na poziomie od 25% (Ni) do 40% (Cr i Pb).

Porównując wielkość akumulacji metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd) w osadzie czynnym z początkową ich koncentracją w ściekach surowych stwierdzono, że absorpcja metali ciężkich przez mikroorganizmy była dość zróżnicowana. Największy stopień akumulacji stwierdzono w przypadku niklu, miedzi i chromu, których stężenia w osadzie czynnym były odpowiednio 19, 20 i 22 razy wyższe niż ich koncentracja w ściekach surowych. Jednak mimo wysokiej akumulacji niklu i chromu w badanym osadzie czynnym, nie odnotowano redukcji tych pierwiastków w ściekach oczyszczonych. Cynk jest pierwiastkiem występującym w najwyższych stężeniach w ściekach surowych oraz osadzie czynnym. Jednak jego akumulacja w osadzie czynnym była wyraźnie mniejsza niż Ni, Cu i Cr. W najmniejszym stopniu przez osad czynny kumulowany był ołów. Jego koncentracja była jedynie pięć razy wyższa niż w ściekach surowych.

Podczas badań stwierdzono, że koncentracja metali ciężkich w ściekach oczyszczonych, osadzie czynnym, a zwłaszcza w przypadku ścieków surowych charakteryzowała się dużą zmiennością. Dlatego też można stwierdzić, że dopływ metali ciężkich wraz ze ściekami surowymi do oczyszczalni ścieków jest bardzo mało przewidywalny, bez względu na częstotliwość prowadzonych obserwacji. Podobne wyniki zmienności koncentracji metali ciężkich otrzymali Oliver i Cosgrove [1974], analizując stężenia pierwiastków co godzinę ( $V = 78\%$ ).

Według Chipasy [2003] usuwanie metali ciężkich ze ścieków surowych następuje zarówno podczas wstępnego ich oczyszczania (gdy metale ciężkie osadzane są na drobnych cząsteczkach mineralnych) jak i podczas biologicznego usuwania zanieczyszczeń przez mikroorganizmy w procesie biosorpcji. Autor ten jest zdania, iż oczyszczanie ścieków metodą osadu czynnego zaprojektowane jest głównie po to, aby usuwać ze ścieków materię organiczną, a redukcja stężeń metali ciężkich jest sprawą drugorzędną. To jednak nie ulega wątpliwości, że efektywność usuwania tych substancji jest wysoka, co potwierdza Chipasa [2003] i Tsai i in. [2005] oraz powyżej przedstawione rezultaty badań.

## **5.5. WŁAŚCIWOŚCI ODWODNIONYCH I USTABILIZOWANYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU**

Osady ściekowe różnią się znacznie między sobą, co w głównej mierze spowodowane jest zróżnicowaniem dopływających do oczyszczalni ścieków, przebiegiem procesu oczyszczania, a także dynamicznym charakterem samego procesu ich rozkładu [Bojanowska i in., 1982; De Sioniz i in. 2002]. Jak podają Gambuś i Wieczorek [2003] zróżnicowanie to

jest konsekwencją czasowej zmienności oczyszczanych ścieków, a także różnorodnością stosowanych technologii ich oczyszczania, stabilizacji i odwadniania. Tezę tą potwierdzają wyniki badań przeprowadzonych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu.

Badania odwodnionych i ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych rozpoczęto w 2003 r pobierając próbki z 24 kwater odwadniających zlokalizowanych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu. Osady poddane analizie laboratoryjnej składowane były w kwaterach od momentu uruchomienia oczyszczalni (1994 r.) do roku 2003. Przeprowadzone badania miały na celu porównanie akumulacji metali ciężkich we wcześniej zgromadzonych (1994-2003) i obecnie składowanych (w roku 2005) osadach ściekowych.

Składowane w latach 1994-2003 na poszczególnych kwaterach odwadniających ustabilizowane i odwodnione osady ściekowe, których ilość oszacowano na około 265 Mg s.m., charakteryzowały się bardzo dobrymi właściwościami. Były bowiem sypkie, ziemiste i prawie zupełnie bezzapachowe, o uwilgotnieniu od 40 do 80% (tab. 15, załącznik 6). Właściwości te w kontekście opisywanych w literaturze [Bień 2002] znacząco odbiegają od najczęściej przytaczanych cech osadów ściekowych: mazistość, odór, zbrylenie podczas wysychania. Ich odczyn kształtuje się od lekko kwaśnego do obojętnego (pH od 5,6 do 7,0) i jest typowy dla osadów ściekowych powstających podczas biologicznego oczyszczania ścieków komunalnych [Sebastian, Szpadt 1999, Krzywy i in. 2000, Kalisz i in. 2000], a przewodnictwo elektryczne właściwe kształtuje się w dość szerokim zakresie wartości od 0,1 do 4,1, średnio  $2,25 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  i wykazuje znaczną zmienność ( $V=56\%$ ). Oceniając w oparciu o wskazania przewodnictwa, zasolenie zawiesin wodnych badanych osadów ściekowych (tab. 15), można stwierdzić, że większość próbek charakteryzuje się zasoleniem na poziomie toksycznym dla znacznej części roślin uprawnych ( $1 \text{ gNaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

Składowane osady charakteryzowały się zawartością substancji organicznej od 40,0 do 59,7, średnio 53,5 % (tab. 15) i wykazują niewielką zmienność między poszczególnymi próbkami ( $V=9\%$ ).

**Tabela. 15.** Podstawowe parametry statystyczne niektórych właściwości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu w latach 1994-2003

n = 24	pH (H <sub>2</sub> O)	Przewodnictwo [mS·cm <sup>-1</sup> ]	Zasolenie [gNaCl·dm <sup>-3</sup> ]	Zawartość suchej masy [%]	Wilgotność [%]	Zawartość substancji organicznej [%]
x	6,3	2,25	1,4	39,8	60,2	53,5
Min	5,6	0,1	0,7	21,0	39,6	40,0
Max	7,0	4,3	2,4	60,4	79,0	59,7
S	0,5	1,25	0,4	10,3	10,3	4,6
V [%]	7,3	55,7	31,5	25,95	17,1	8,6

Osady powstające w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu charakteryzują się wysoką zawartością wapnia, azotu, siarki i fosforu (średnio od 1,5 do 4,7%, tab. 17, załącznik 5). Znacznie mniej stwierdzono w badanych osadach ściekowych magnezu, potasu, a zwłaszcza sodu (odpowiednio średnio 0,30, 0,18% i 0,06 %). Średnia stwierdzona zawartość poszczególnych makroskładników nie wykazywała istotnej zmienności między poszczególnymi próbkami, a obliczone dla tych składników współczynniki zmienności kształtowały się w zakresie od 20 %- N do 34 %- Na.

**Tabela. 17.** Zawartość składników nawozowych w ustabilizowanych i odwodnionych osadach ściekowych zgromadzonych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu w latach 1994-2003

n=24	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	S	Mg	Na	Ca
	[%]						
x	2,7	4,7	0,18	2,8	0,3	0,06	1,5
Min	1,3	1,9	0,08	1,8	0,2	0,02	0,9
Max	3,7	6,1	0,24	4,8	0,5	0,11	2,3
S	0,5	1,0	0,04	0,9	0,07	0,02	0,4
V [%]	19,8	21,8	21,9	31,6	22,0	33,9	23,96

Charakterystyka właściwości osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków w Reczu nie odbiega znacząco od innych osadów ściekowych powstających w komunalnych oczyszczalniach ścieków naszego kraju, wykorzystujących metodę osadu czynnego. Średnia wilgotność odwodnionych osadów (60%, tab. 15) mieści się w granicach uwilgotnienia podawanych przez Bojanowską i in. [1982] (45 – 60%) oraz Wanga i in. [2005b] (60 – 70%). Także zakres wartości pH od 5,6 do 7,0 stwierdzony w komunalnych osadach ściekowych z Recza jest zbliżony do wartości pH podawanych przez Kalisz i in. [2000] i wskazuje, że osady te charakteryzują się odczynem typowym dla osadów z małych i średnich oczyszczalni ścieków. Autorzy ci po przebadaniu osadów z kilku oczyszczalni stwierdzili, że pH komunalnych osadów ściekowych kształtuje się w granicach od 5,9 do 7,5 (tab. 17).

**Tabela. 17.** Charakterystyka osadów ściekowych z Koźienic, Piotrkowa Trybunalskiego i Puław [za Piotrkowską i Dudką, 1987]

Nazwa oczyszczalni	pH	Substancja organiczna	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	Mg	Na	Ca
		zawartość [%]						
Koźienice	6,4	60,8	2,9	1,7	0,41	0,32	0,2	3,4
Piotrków Trybunalski	6,8	30,9	1,5	2,95	0,53	0,17	0,19	2,3
Puławy	6,0	22,5	0,9	3,95	0,11	0,13	0,14	2,2

Porównując skład chemiczny osadów ściekowych powstających w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu z właściwościami osadów z innych oczyszczalni w kraju, których charakterystykę podaje Piotrkowska i Dudka [1987], zauważamy podobieństwo, szczególnie w zakresie pH i zawartości substancji organicznej, azotu ogólnego oraz magnezu, do osadów z oczyszczalni ścieków Kozienice (tab. 17). Natomiast zawartość fosforu w osadach powstających na terenie Recza była o wiele wyższa, a wapnia, potasu i sodu niższa niż w osadach z Kozienic. Stwierdzona w osadach powstających na terenie Recza zawartość azotu i fosforu jest także porównywalna z ilością tych składników w kompostach wytworzonych na bazie odpadów z pielęgnacji zieleni [Zabłocki, Kokot 2002] czy też w kompostach produkowanych z dodatkiem osadów ściekowych [Czekala 2000; Krzywy i in. 2000; Kiryluk 2003, Baran 2004; Krzywy i in. 2004, Oleszczuk 2006]. Potwierdza to wysoką wartość nawozową tych odwodnionych i ustabilizowanych osadów ściekowych.

Analizując charakterystykę podstawowych właściwości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych z Recza ogólnie można stwierdzić, że zawartość składników nawozowych jest zbliżona do wartości N, P, K i mikroelementów podawanych przez Bojanowską i in. [1982], Piotrkowską i Dudkę [1987] oraz Merringtona i in. [2003], co oznacza, że osady te są bardzo dobrym materiałem nawozowym i nie odbiegają swoim składem chemicznym od typowych komunalnych osadów ściekowych.

Jak wcześniej wspomniano osady ściekowe powstające w komunalnych oczyszczalniach ścieków zawierają niezbędne do prawidłowego rozwoju roślin i funkcjonowania gleby makroelementy takie jak: N, P, K, Ca, Mg oraz mikroelementy i dlatego najwłaściwszym ich wykorzystaniem powinno być ich zastosowanie w rolnictwie jako nawozów [Wang i in. 2005b, Siuta 1999d]. Jednak należy pamiętać, że bardzo często jedną z najpoważniejszych przeszkód w tego rodzaju zastosowaniu osadów ściekowych jest wysoka w nich zawartość metali ciężkich, które mogą powodować zanieczyszczenie środowiska (zwłaszcza glebowego) już po ich zastosowaniu.

### **5.5.1 Zawartość metali ciężkich**

Najistotniejszymi obciążeniami dla agrotechnicznego wykorzystania osadów ściekowych jest obecność i ilość patogenów oraz metali ciężkich. Wyeliminowanie skażeń biologicznych drogą pasteryzacji, kompostowania, suszenia na gorąco czy wapnowania jest stosunkowo proste [Siuta 1999b, Gambuś, Wieczorek 1999]. Natomiast usunięcie metali ciężkich z osadów ściekowych – bardzo trudne i nieopłacalne [Jenkins i in. 1981].

We wszystkich przebadanych próbkach odwodnionych i ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu stwierdzono

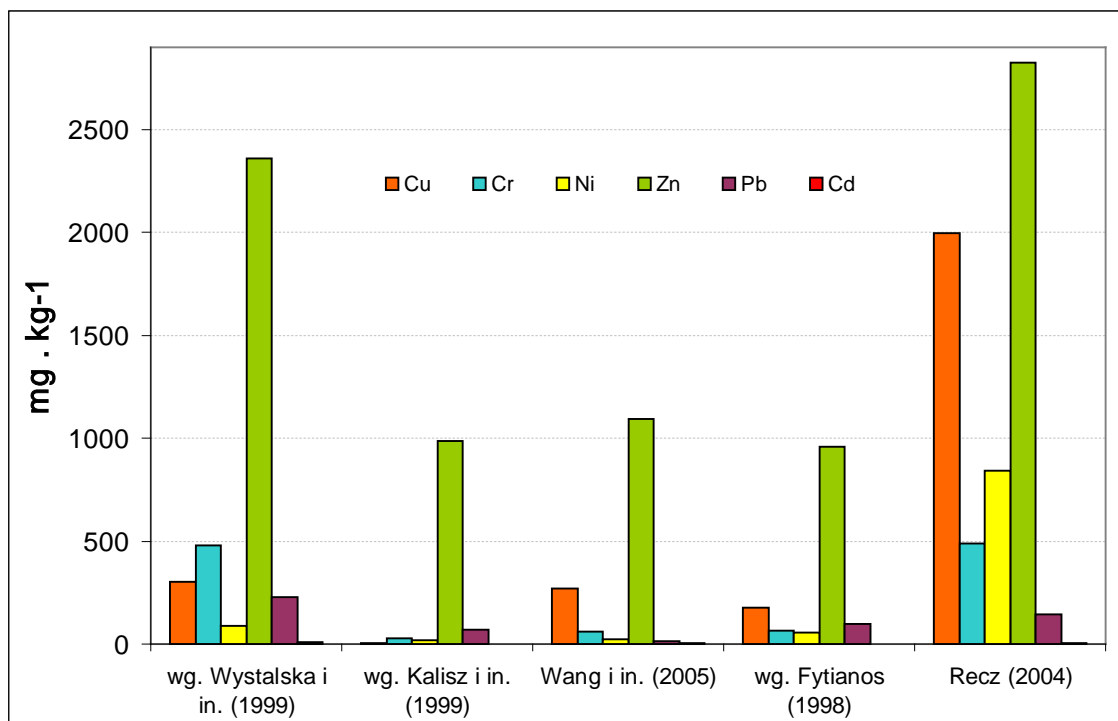
wysoką lub bardzo wysoką zawartość badanych metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd, tab. 18, załącznik 7).

**Tabela 18.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w próbkach ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu w latach 1994-2003

	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd	Hg
	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (n=24)						
<b>x</b>	1996	487	844	2828	144	2,5	1,8
<b>Min</b>	607	66	360	1323	77	0,1	0,7
<b>Max</b>	3985	1197	2139	4805	199	6,1	3,6
<b>S</b>	920	305	424	842	41	1,2	0,6
<b>V [%]</b>	46	63	50	30	29	48	33

Jak wynika z danych zawartych w tabeli 18 badane próbki ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych w latach 1994-2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu zawierały największe ilości miedzi i cynku (średnio  $1996 \text{ mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$  oraz  $2828 \text{ mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), mniejsze chromu i niklu, a zwłaszcza ołowiu (odpowiednio średnie wynosiły 487, 844 i  $144 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Kadm i rtęć występowały w badanych próbkach osadów w stężeniach wielokrotnie niższych (odpowiednio  $2,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  i  $1,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) od pozostałych metali. Zmienność w zawartości badanych metali w osadach mieściła się w granicach od 29-33% (dla Pb, Zn i Hg) do 63% (dla Cr).

Pod względem zawartości metali ciężkich osady powstające na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu wyraźnie różnią się od typowych osadów wytwarzanych w biologiczno – mechanicznych oczyszczalniach o podobnym dobowym obciążeniu ( $800 - 1000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) i porównywalnym udziale ścieku przemysłowego (10 – 15%) [Fytianos i n.1998, Kalisz i in. 1999, Wystalska i in. 1999, Borowski 2000, Wang i in. 2005]. Stwierdzone w niniejszych badaniach koncentracje metali ciężkich, a w szczególności miedzi, chromu, cynku i niklu kilka a nawet kilkunastokrotnie przekraczają wartości notowane w innych średniej wielkości oczyszczalniach ścieków (ryc. 33).



Ryc. 33. Koncentracja metali ciężkich w osadach ściekowych pochodzących z różnych, średniej wielkości oczyszczalni ścieków

We wszystkich porównywanych oczyszczalniach w największych koncentracjach występował cynk. Średnia koncentracja tego metalu stwierdzona w osadach pochodzących z Recza ( $2827,6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) porównywalna była jedynie ze stwierdzoną przez Wystalską i in. [1999] zawartością tego pierwiastka w osadach z biologiczno – mechanicznej oczyszczalni ścieków ( $2358 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Szczególnie wyraźne różnice między stwierdzonymi koncentracjami metali ciężkich, a danymi literaturowymi (ryc. 33) widać w przypadku miedzi i niklu. Średnia zawartość tych pierwiastków (odpowiednio  $1996$  i  $844 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) była co najmniej kilkukrotnie wyższa od stwierdzanych koncentracji Cu i Ni w osadach z średniej wielkości biologiczno – mechanicznych oczyszczalni ścieków w kraju i zagranicą.

Także średnia zawartość chromu ( $487 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) w osadach ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu była o wiele wyższa niż koncentracja tego pierwiastka w komunalnych osadach ściekowych pochodzących ze średnich wielkości oczyszczalni ścieków. Fytianos i in. [1998], Wang i in [2005a] oraz Kalisz i in. [1999] podają, że stwierdzone przez nich koncentracje tego pierwiastka nie przekraczały  $70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  w przebadanych przez nich osadach ściekowych. Jedynie Wystalska i in. [1999] podają koncentrację chromu zbliżoną do poziomu stwierdzonego podczas badań komunalnych osadów ściekowych w Reczu. Związane jest to z dopływem do oczyszczalni podczyszczonych ścieków przemysłowych z lokalnych galwanizerni, w których chrom jest jednym z głównych składników. Podobną sytuację zaobserwował Gambuś [1999], stwierdzając w osadach z regionu krakowskiego bardzo wysokie stężenia chromu (powyżej



600 mg · kg<sup>-1</sup>), co związane było z mieszaniem ścieków bytowo – gospodarczych ze ściekami z galwanizerni, zawierającymi bardzo duże ilości cynku i chromu.

Maksymalne wartości koncentracji chromu, niklu, miedzi i cynku (odpowiednio 1197, 2139, 3985 i 4805 mg · kg<sup>-1</sup>) stwierdzone w próbkach ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu w latach 1994-2003, potwierdzają tezę, że nadmierna zawartość tych metali związana jest z działalnością lokalnych galwanizerni, z których niedostatecznie podczyszczone ścieki technologiczne trafiały do zbiorczego systemu kanalizacji i dalej do oczyszczalni ścieków. W konsekwencji powodowało to ponadnormatywne obciążenia metalami ciężkimi osadów ściekowych, które pierwotnie miały być wykorzystywane przyrodniczo na cele rolne.

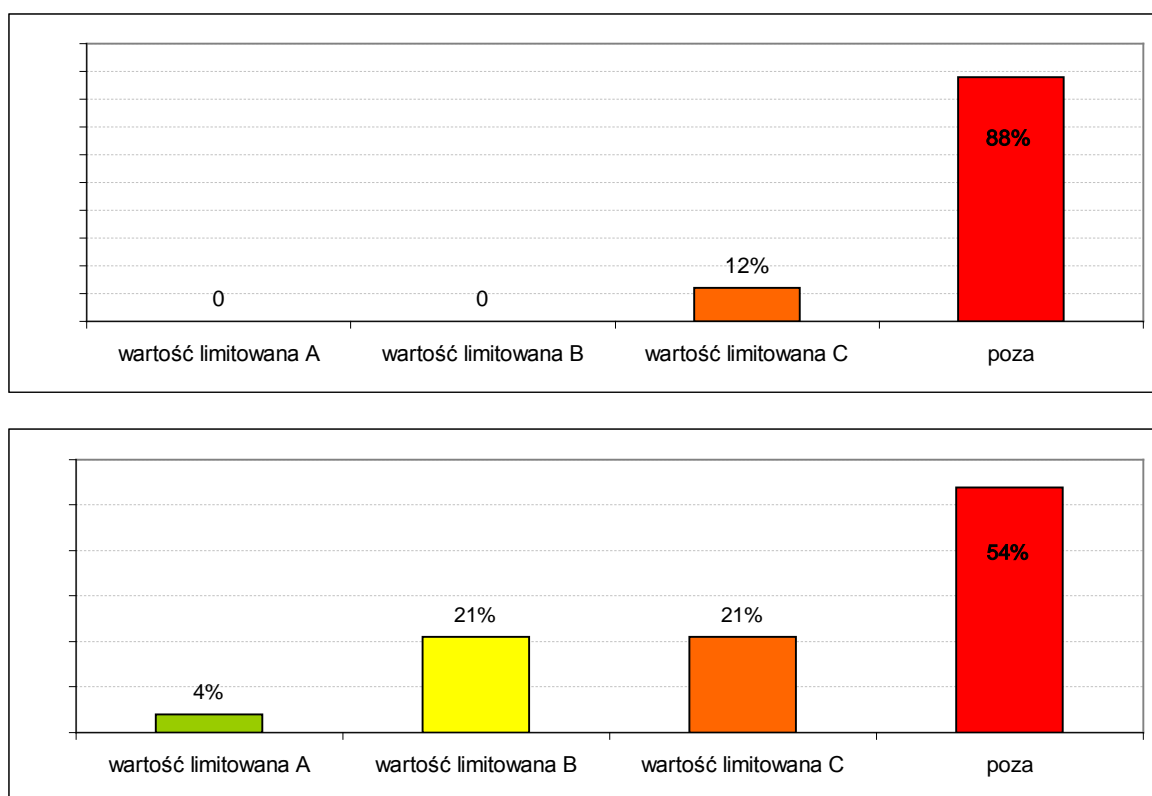
## **5.6. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ODWODNIONYCH I USTABILIZOWANYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU**

Jak już wcześniej wspomniano ustabilizowane i odwodnione osady ściekowe zgromadzone w latach 1994-2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, ze względu na wysoką zawartość w nich niklu, chromu i miedzi, wyraźnie różnią się od typowych osadów ściekowych powstających w biologiczno – mechanicznych oczyszczalniach o podobnym dobowym obciążeniu [Fytianos i in. 1998, Wang i in. 2005a,b, Kalisz i in. 1999]. Dlatego też możliwości ich wykorzystania są ograniczone. Na rycinach 34 i 35 przedstawiono, po porównaniu stwierdzonych koncentracji niklu, miedzi, chromu i cynku z wartościami dopuszczalnymi dla różnych form stosowania komunalnych osadów ściekowych, określonych zapisami RMŚ [2002], jaki procent z ogólnej ilości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych w latach 1994-2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, odpowiada określonym sposobom ich wykorzystania.

W przebadanych 24 partiach osadów ściekowych składowanych na kwaterach odwadniających na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu metalem najsilniej ograniczającym przewidziane prawem ich wykorzystanie okazał się nikiel, bowiem aż 88% ogólnej ilości zgromadzonych osadów ściekowych nie nadaje się do jakiegokolwiek użytkowania ze względu na ponadnormatywne zawartości tego pierwiastka (ryc. 34). Nawet koncentracja niklu (360 mg · kg<sup>-1</sup>) w partii najmniej zanieczyszczonej aż trzykrotnie przekraczała wartość limitowaną przy stosowaniu osadów ściekowych w rolnictwie (100 mg Ni · kg<sup>-1</sup>) [RMŚ 2002]. Uwzględniając zawartość tego pierwiastka w badanych partiach osadów stwierdzono, że jedynie 12% ogólnej ilości składowanych osadów można by zagospodarować przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o

warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do produkcji roślin nie przeznaczonych do spożycia i produkcji pasz z wykorzystaniem osadu ściekowego [RMS 2002].

W dużej liczbie partii odnotowano także przekroczenia dopuszczalnej zawartości miedzi. Średnia koncentracja tego pierwiastka w badanych osadach ściekowych ( $1996 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) była ponad dziewięć razy wyższa od średnich wartości miedzi stwierdzonych przez Krzywego i in. [2000] w komunalnych osadach ściekowych, natomiast blisko czterokrotnie niższa od koncentracji tego pierwiastka ( $7764 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) w osadach ściekowych z biologicznego oczyszczania ścieków komunalnych z dużym udziałem (40%) ścieków przemysłowych [ Wang i in. 2005a].



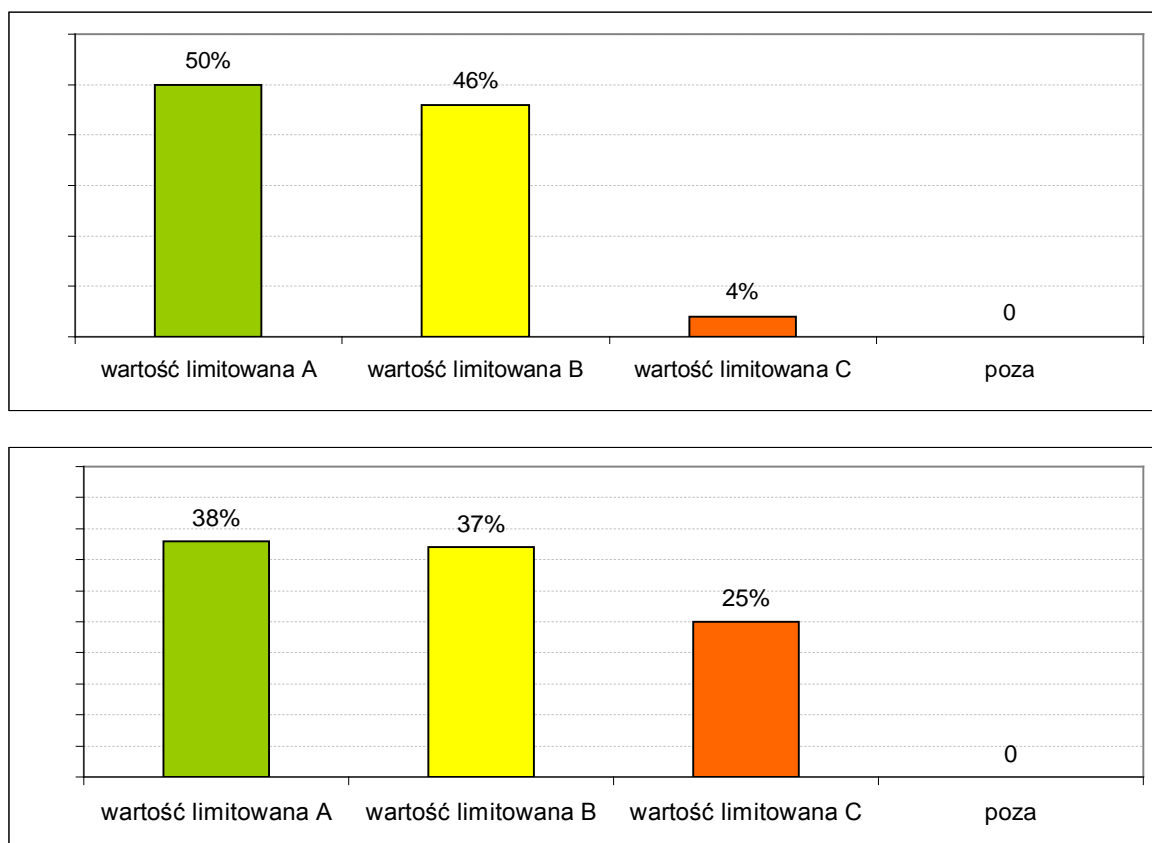
Ryc. 34. Procent ogólnej ilości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych w latach 1994-2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, odpowiadający określonym sposobom ich wykorzystania obliczony na podstawie porównania koncentracji niklu, miedzi w osadach z wartościami limitowanymi [RMS 2002].

*Objaśnienia: Wartość limitowana A – przy wykorzystaniu osadów ściekowych w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne; B – przy wykorzystaniu osadów ściekowych do rekultywacji gruntów na cele nierolne; C – przy wykorzystaniu osadów ściekowych przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z decyzji administracyjnych, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostów, do uprawy roślin nie przeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.*

W przypadku miedzi stwierdzono wyraźne przekroczenia dopuszczalnych koncentracji metali ciężkich w osadach ściekowych wykorzystywanych na cele rolne ( $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) [RMŚ 2002]. Najwyższa odnotowana koncentracja miedzi pięciokrotnie przekraczała przewidziany prawem limit przy zastosowaniu osadów na cele rolne i była prawie dwukrotnie wyższa od wartości ( $2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) umożliwiającej zastosowanie osadów przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do produkcji roślin nie przeznaczonych do spożycia i produkcji pasz [RMŚ 2002], co znacznie ogranicza jakiegokolwiek wykorzystanie tych osadów ze względu na ponadnormatywną zawartość tego pierwiastka.

Tylko jedna partia spośród 24 reprezentatywnych dla nich próbek osadów zanieczyszczona jest miedzią (minimalna stwierdzona podczas badań wartość –  $607 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) w stopniu pozwalającym na stosowanie ich w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne [RMŚ 2002]. Ze względu na ponadnormatywne zawartości tego pierwiastka ponad 50% wytworzonych na terenie miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu osadów ściekowych nie nadaje się do żadnego przewidzianego prawem wykorzystania (ryc.34).

W połowie przebadanych partii osadów ściekowych chrom osiągał poziom koncentracji poniżej  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  pozwalający na wykorzystanie osadów ściekowych w rolnictwie i rekultywacji na cele rolne [RMŚ 2002]. W pozostałych partiach osadów zawartość chromu ( $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) mieściła się w zakresie umożliwiającym ich zagospodarowanie do rekultywacji na cele nierolne i tylko w jednej koncentracja tego pierwiastka ( $1197 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) przekroczyła tą wartość co pozwala wykorzystać te osady przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z decyzji administracyjnych, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostów lub do uprawy roślin nie przeznaczonych do spożycia i produkcji pasz (ryc. 35).



*Ryc. 35. Procent ogólnej ilości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych w latach 1994-2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, odpowiadający określonym sposobom ich wykorzystania obliczony na podstawie porównania koncentracji chromu i cynku w osadach z wartościami limitowanymi [RMS 2002] (objaśnienia jak na ryc. 34).*

Uregulowania prawne w odniesieniu do cynku nie są tak rygorystyczne jak w przypadku innych pierwiastków, głównie ze względu na mniejsze jego oddziaływanie toksyczne (Kabata – Pendias, Pendias 1999). Minimalna koncentracja cynku w badanych osadach ( $1323 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) jest prawie dwukrotnie niższa od wartości limitowanej ( $2500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) przy wykorzystaniu osadów w rolnictwie oraz do rekultywacji na cele rolne [RMS 2002]. Natomiast najwyższa stwierdzona zawartość cynku w osadach ściekowych w Reczu ( $4805 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) nie przekracza dopuszczalnej prawem zawartości tego pierwiastka ( $5000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do produkcji roślin nie przeznaczonych do spożycia i produkcji pasz z wykorzystaniem osadu ściekowego [RMS 2002]. W związku z tym, po przeprowadzonych badaniach można stwierdzić, że cynk nie ogranicza wykorzystania deponowanych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu osadów ściekowych, gdyż 38% osadów nadaje się do zagospodarowania na cele rolne a 37% można wykorzystać do rekultywacji na cele nierolne. Natomiast pozostałe 25% ogólnej ilości osadów zdeponowanych na terenie

Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu można użyć przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z lokalnych planów gospodarki odpadami lub zagospodarowania przestrzennego (ryc. 35).

Pozostałe limitowane metale ciężkie – rtęć, ołów i kadm, nie przekraczają koncentracji granicznych określonych Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r w sprawie komunalnych osadów ściekowych [RMŚ 2002] i w całości mogłyby być wykorzystane na cele rolne.

Podsumowując, należy podkreślić, że spośród badanych metali, możliwości zagospodarowania osadów ściekowych z Komunalnej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, w największym stopniu ograniczała nadmierna koncentracja niklu. Ponadnormatywne koncentracje tego pierwiastka eliminują możliwość zagospodarowania blisko 90% przebadanych partii osadów. Uogólniając należy uznać, że przy tak wysokich jak stwierdzone w niniejszych badaniach koncentracjach metali i tak silnym ich zróżnicowaniu (tab. 18) stosowanie tych osadów niesłoby ze sobą duże ryzyko zanieczyszczenia środowiska, a w wielu przypadkach byłoby także niezgodne z prawem [RMŚ 2002].

Zgodnie z zapisami Gminnego Planu Gospodarki Odpadami dla gminy Recz (2004) składowane dotychczas na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu osady ściekowe przewidziano do wykorzystania w rekultywacji zamkniętego składowiska odpadów komunalnych w sąsiedztwie miejscowości Pomień. Zaplanowano wykorzystanie tych osadów do utworzenia, na czaszy kwater, warstwy glebotwórczej posadowionej na naturalnym materiale izolacyjnym (glinie), a następnie wprowadzenie roślinności trawiastej z możliwością przeprowadzenia rekultywacji obiektu składowiska odpadów docelowo w kierunku leśnym.

Jak podkreśla Siuta [1999c] chcąc zastosować dawkę rekultywacyjną osadów ściekowych (przekształcając grunt bezglebowy w glebę), przewidzianą na poziomie  $200 \text{ Mg s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$  [RMŚ 2002], trzeba ją ograniczyć do wielkości nie powodującej przekroczenia dopuszczalnego ładunku metali ciężkich.

Maksymalna dawka osadów ściekowych wykorzystywanych przy dostosowywaniu gruntów do potrzeb wynikających z Gminnego Planu Gospodarki Odpadami Gminy Recz (2004), musi zostać ograniczona do poziomu nie powodującego przekroczenia ładunku metali ciężkich ( $\text{g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ ), który według wytycznych zawartych RMŚ [2002] wynosi dla:

- ołowiu (Pb) – 1000;
- kadmu (Cd) – 20;
- chromu (Cr) – 1000;
- miedzi (Cu) – 1600;
- niklu (Ni) - 200 ;
- rtęci (Hg) - 10 ;
- cynku (Zn) – 5000;

W wyselekcjonowanych partiach komunalnych osadów ściekowych z Oczyszczalni Ścieków w Reczu, spełniających przewidziane prawem normy przy wykorzystaniu osadów przy dostosowywaniu gruntów do potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami głównym składnikiem limitującym dawkę osadów jest nikiel (tab. 19).

**Tabela 19.** Średnia zawartość metali ciężkich ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.) w wyselekcjonowanych partiach osadów ściekowych z Oczyszczalni Ścieków w Reczu, przeznaczonych do utworzenia warstwy glebotwórczej na rekultywowanym składowisku, w odniesieniu do wartości limitowanych

Średnia zawartość metali ciężkich					
Cd	Cr	Pb	Ni	Zn	Cu
1,55	116,3	86,5	413,3	1811,3	829,7
Wartości limitowane					
50	2500	1500	500	5000	2000

Przyjmując, że

- komunalne osady ściekowe zostaną zastosowane w dawce jednorazowej;
- ilość niklu wprowadzonego do gleby wraz z osadami ściekowym nie może przekroczyć 2000 g/ha/10 lat (średniorocznie w okresie 10 lat 200 g/ha);
- średnia zawartość niklu w 1 mg s.m. osadu kształtuje się na poziomie 413 g;
- zawartość suchej masy w tych osadach wynosi 32%;

stwierdzono, iż na planowanym do zrehabilitowania składowisku odpadów komunalnych w Reczu można zastosować 4,84 Mg osadów na hektar. Biorąc pod uwagę wielkość rekultywowanego terenu (4 ha), łączne wykorzystanie osadów ściekowych nie może przekroczyć 19,36 Mg s.m. Uwzględniając uwodnienie badanych partii osadów, w stanie świeżym można będzie zastosować nieco ponad 60 Mg osadów na rekultywowanej powierzchni, co stanowi objętość około 70 m<sup>3</sup> (tab. 20).

**Tabela 20.** Dopuszczalna dawka osadów ściekowych wykorzystywanych przy dostosowywaniu gruntów do potrzeb wynikających z Gminnego Planu Gospodarki Odpadami Gminy Recz,

Dawka osadów wyrażona w:	Mg · ha <sup>-1</sup> lub m <sup>3</sup> · ha <sup>-1</sup>	Łącznie na rekultywowanym obszarze (4 ha)
suchej masie	4,84	19,36
świeżej masie	15,13	60,52
objętości	17,6	70,4

Wykorzystanie takiej ilości odwodnionych, ustabilizowanych osadów ściekowych gwarantuje, że nie zostanie przekroczony dopuszczalny limit ładunku niklu (a tym samym innych metali ciężkich) wprowadzanego do gleby. Każde zwiększenie dawki osadu będzie się wiązać z zagrożeniem środowiska zanieczyszczeniem metalami ciężkimi i będzie niezgodne z przepisami prawa.

Rekultywując grunt ma się na względzie nadanie mu cech właściwych glebie, umożliwiających prawidłowy rozwój roślin wykorzystywanych w dalszych etapach rekultywacji terenów zdegradowanych. Ukształtowanie warstwy próchnicotwórczej ma tu więc decydujące znaczenie [Siuta 1999c]. Do utworzenia warstwy rekultywacyjnej umożliwiającej prawidłowy rozwój darni (o miąższości co najmniej 5 cm) należy nanieść ok. 500 m<sup>3</sup> osadów ściekowych. Obliczona dopuszczalna dawka komunalnych osadów ściekowych, jaka może być wykorzystana na terenie rekultywowanego składowiska (19,36 Mg s.m. czyli ok. 70 m<sup>3</sup>) pozwoli na utworzenie, na 1 ha, warstwy glebotwórczej o miąższości zaledwie 0,2 cm. W związku z tym, możliwa do wykorzystania dawka komunalnego osadu ściekowego zmagazynowanego na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu jest niewystarczająca do utworzenia warstwy glebotwórczej, która zapewniłaby prawidłowy rozwój darni na rekultywowanej powierzchni. Po dokonanych obliczeniach stwierdzono, że możliwa do wykorzystania na cele rekultywacyjne dawka wyselekcjonowanych osadów ściekowych (około 5 Mg s.m.) stanowi niecałe 2% ogólnej ilości składowanych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu komunalnych osadów Ściekowych, których ilość szacowana jest na 265 Mg s.m.

Z uwagi na znaczne obciążenie zgromadzonych osadów metalami ciężkimi, porównano zawartość metali ciężkich w partiach osadów ściekowych składowanych w latach 1994- 2003 na kwaterach odwadniających w Oczyszczalni Ścieków w Reczu oraz osadach tam powstających w roku 2005. Stwierdzono, że koncentracje badanych metali ciężkich w osadach z roku 2005 wynosiły (w mg · kg<sup>-1</sup>): Cu – 247,5 , Cr – 59,6 , Ni – 104,8 ; Zn – 360,0 , Pb – 16,8 , Cd – 0,35 oraz Hg – 0,44 i kształtowały się na wyraźnie niższym poziomie w porównaniu ze średnimi zawartościami tych pierwiastków w osadach wcześniej deponowanych.

Koncentracje Cu Cr Ni Zn w osadach ściekowych z 2005 r. były 7 - 8 razy niższe niż w osadach dotychczas składowanych w kwaterach odwadniających. Także średnia zawartość metali uznawanych za najbardziej toksyczne [Kabata – Pendias, Pendias 1999] czyli kadmu i rtęci była odpowiednio 7 i 4 razy niższa od ilości tych metali stwierdzonych w osadach wcześniej deponowanych .

Jednak mimo tak optymistycznych ocen, nadal wytwarzane na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu osady ściekowe nie mogą być bezpośrednio wykorzystane w rolnictwie, jak zakłada to pozwolenie wodno – prawne [2005]. Spowodowane jest to głównie ponadnormatywną zawartością niklu [RMS 2002]. Jednak notowane w 2005 roku przekroczenie wartości limitowanej ( $100 \text{ mg Ni} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) jest to minimalne, co powoduje, że po uprzednim rozcieńczeniu osadów strukturotwórczymi dodatkami organicznymi, można będzie je wykorzystać w rolnictwie. Rozcieńczenie takie może odbywać się na drodze kompostowania wytwarzanych po roku 2003 osadów z odpadami z pielęgnacji zieleni Miasta Recz. Ponadto kilkukrotnie niższe stężenia metali ciężkich w wytwarzanych osadach, gwarantują, że powstający kompost będzie charakteryzował się bardzo dobrymi właściwościami fizyko – chemicznymi, umożliwiającymi szersze wykorzystanie i zagospodarowywanie powstających osadów. Znaczne zmniejszenie ilości metali ciężkich dopływających do oczyszczalni, umożliwi zastosowanie powstających w 2005 r. osadów do celów rekultywacyjnych, bez uprzedniego ich przygotowania. Jednakże nawet takie użytkowanie, z uwagi na stwierdzoną dużą zmienność koncentracji metali ciężkich, musi być poprzedzone szczegółowymi badaniami każdej partii osadów ściekowych przeznaczonych do wykorzystania.

Wyraźna poprawa właściwości komunalnych osadów ściekowych powstających na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, zwłaszcza zawartości w nich metali ciężkich, związana była ze skuteczniejszym podczyszczaniem ścieków przemysłowych z lokalnych galwanizerni, które trafiają do zbiorczego systemu kanalizacji miejskiej. Poprawa jakości ścieków przemysłowych nastąpiła po rozpoczęciu niniejszych badań, gdyż wprowadzony system monitoringu dopływających do oczyszczalni ścieków ułatwiał kontrolę jakości ścieków, także służbom państwowym [WIOŚ Szczecin].



## **5.7. KOMPOSTOWANIE USTABILIZOWANYCH I ODWODNIONYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH**

Na podstawie wyników badań osadów ściekowych składowanych w latach 1994 - 2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, które wykazały silnie ograniczone możliwości bezpośredniego ich stosowania, podjęto próbę uzdatnienia osadów na drodze kompostowania. Głównym celem przeprowadzenia procesu kompostowania było obniżenie ponadnormatywnych zawartości metali ciężkich (zwłaszcza Ni, Cu, Zn), przez dodatek materiałów strukturotwórczych (odpadów organicznych). Kompostowanie prowadzono przez okres 7 i 8 miesięcy w dwóch pryzmach kompostowych.

### **5.7.1. Charakterystyka odpadów organicznych wykorzystanych do kompostowania**

W strukturze odpadów organicznych pozyskanych z terenu gminy Recz wykorzystanych do procesów kompostowania jako materiał strukturotwórczy dominowały:

- w pryzmie „jesiennej” - zrębki gałęzi i gałązek pozyskanych podczas jesiennej pielęgnacji zieleni miejskiej, opadłe jesienne liście drzew, zwłaszcza z gatunków: lipa drobnolistna (*Tilia cordata* L.), lipa szerokolistna (*Tilia platyphyllos* L.), klon zwyczajny (*Acer platanoides* L.) oraz topola biała (*Populus alba* L.) i topola osika (*Populus tremula* L.). Dominującym odpadem organicznym w tej grupie były opadłe liście kolonu zwyczajnego (*Acer platanoides* L.) (fot.14.). Ponadto w masie kompostowej odnaleźć można było gałązki krzewów z jesiennych cięć pielęgnacyjnych żywopłotów, wśród których przeważały: ligustr pospolity (*Ligustrum vulgare* L.), śnieguliczka biała (*Symphoricarpos albus* L.) i bez czarny (*Sambucus nigra* L.).
- w pryzmie „wiosennej” – dominowała sucha trawa wraz z kwiatostanami (dalej nazywane sianem) pozyskana podczas zabiegów pielęgnacyjnych na terenach miasta Recz, oraz drobne gałązki pochodzące z cięć pielęgnacyjnych żywopłotów, w których przeważały: ligustr pospolity (*Ligustrum vulgare* L.), forsycja pośrednia (*Forsythia intermedia* Thunb.), śnieguliczka biała (*Symphoricarpos albus* L.) oraz bez czarny (*Sambucus nigra* L.). Dodatkowo do pryzmy były także zielone ścinki pędów traw z trawników intensywnie pielęgnowanych na obszarze miasta Recz;

Dodatki do kompostów przebadano pod względem zawartości w nich metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Pb, Zn, Cd, Hg). Stwierdzono, że dodatki organiczne wykorzystane w procesie

kompostowania zawierały bardzo małe ilości metali ciężkich (tab. 21). Koncentracja miedzi wahała się w granicach od 6,2 do 11,2 mg · kg<sup>-1</sup>, niklu 19,7– 23, 5 mg · kg<sup>-1</sup>, ołowiu 6,2 – 11,8 mg · kg<sup>-1</sup>. Najwyższe wartości stwierdzono w przypadku cynku, którego zawartość mieściła się w przedziale od 21,2 do 30,6 mg · kg<sup>-1</sup>. Stwierdzona zawartość pozostałych badanych pierwiastków (Cr, Cd i Hg) była bardzo niska i osiągnęła wartość jedynie 0,001 mg · kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 21.** Koncentracja metali ciężkich w przebadanych dodatkach organicznych

Rodzaj odpadów organicznych	Źródło podstawowego składnika (C lub N)	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd	Hg
		mg · kg <sup>-1</sup>						
Gałęzie drzew i gałązki krzewów	C	11,2	0,001	23,5	30,6	11,8	0,001	0,001
Opadłe liście	C	6,3		22,9	24,1	7,9		
Siano/trawa	C/N	6,2		22,1	21,2	6,2		
Ścinki żywopłotów	C/N	10,9		21,7	22,4	6,9		
Zrąbki drzewne	C	7,3		19,7	21,3	7,1		

Podobnie niskie zawartości metali ciężkich stwierdzili Siuta i in. [2000] w odpadach z pielęgnacji zieleni miasta Warszawy (Cu 5,4 – 11,7 mg · kg<sup>-1</sup>, Pb 3,6 – 9,6 mg · kg<sup>-1</sup>). Jedynie stwierdzona przez tych autorów koncentracja cynku była dwukrotnie wyższa od stwierdzonej w dodatkach z pielęgnacji zieleni miasta Recz (średnio 63,0 mg · kg<sup>-1</sup>).

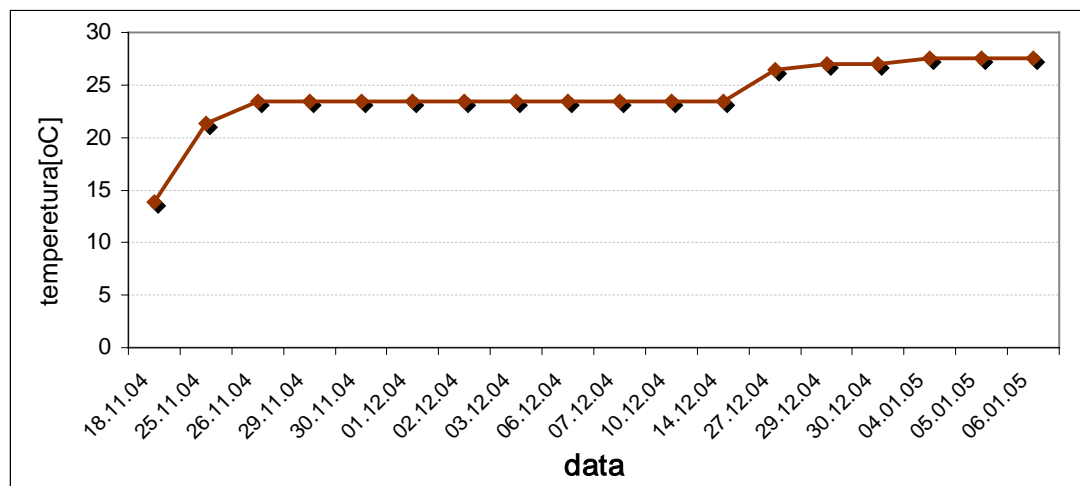
Na obszarze miasta Recz mamy do czynienia ze zróżnicowaniem gatunkowym drzew i krzewów, z których przeważająca część należy do roślin liściastych dostarczających dostarczających w sezonach wegetacyjnych biomasę wymagającą zagospodarowania. W skład tej biomasy wchodzi przede wszystkim opadłe liście drzew i krzewów oraz gałęzie i gałązki z cięć pielęgnacyjnych. Jak podaje Kiepas - Kokot, Zabłocki [2003] włączenie do kompostowanej masy odpadów organicznych pochodzących z pielęgnacji zieleni może korzystnie wpływać na kształtowanie się stosunku C:N w kompostowanej masie.

### 5.7.2. Ocena intensywności przebiegu procesu kompostowania na podstawie zmian termicznych w pryzmach kompostowych

Intensywność przebiegu procesu kompostowania była bardzo podobna w obu pryzmach - „jesiennej” i „wiosennej” (ryc. 31, 32). Zarówno w jednej jak i drugiej pryzmie kompostowej, wymieszane odpady organiczne wraz z osadem ściekowym nie osiągnęły podawanej przez Siutę [1999] temperatury uznawanej za konieczną przy prawidłowej sanitacji osadów (70°C), nie przekraczając w całym okresie kompostowania, w obu przypadkach temperatury 30°C.

### 5.7.2.1. Zmiany termiczne w „Przynie jesiennej”

Średniodobowe temperatury w przynie, w okresie objętym badaniami, kształtowały się w zakresie 13,9 – 27,5°C. Najniższą temperaturę (13,9 °C) odnotowano w dniu założenia przyny, przy średniodobowej temperaturze powietrza w tym okresie na poziomie 18 °C. Najwyższą temperaturę jednostkową (w rdzeniu przyny 27,5°C) stwierdzono po ok. dwóch miesiącach trwania procesu kompostowania przyny „jesiennej” przy notowanych w tym czasie niskich temperaturach powietrza. Taka temperatura (27,5°C) utrzymywała się do końca trwania procesu kompostowania (ryc. 36).



Ryc. 36. Zmiany termiczne w przynie „jesiennej” w okresie objętym pomiarami

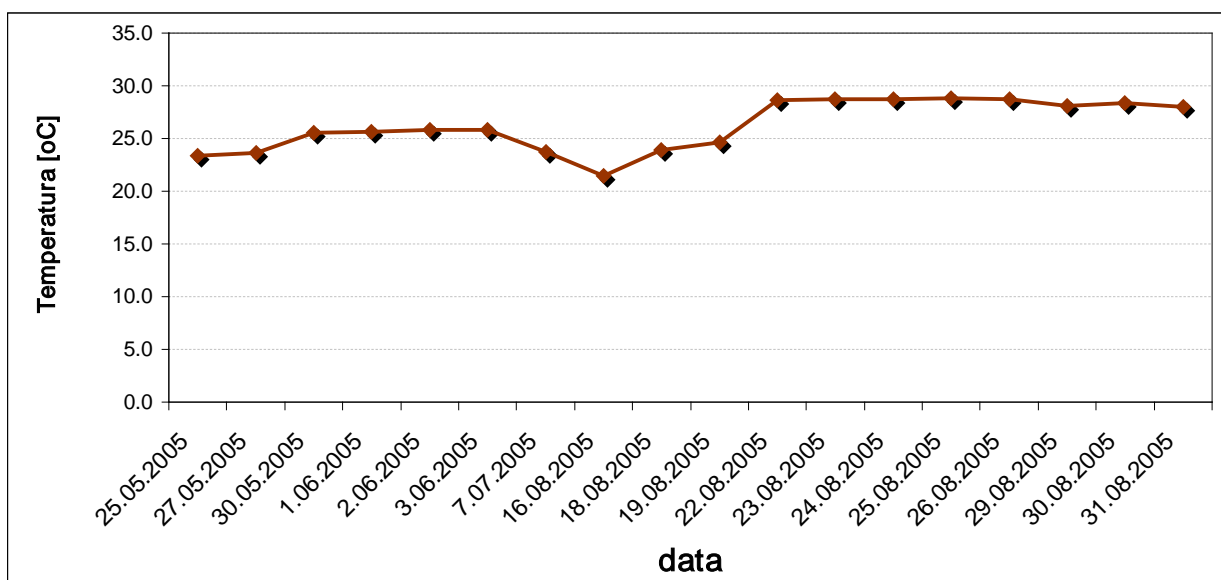
W całym cyklu kompostowania przyny „jesiennej” nie udało się jednoznacznie wyróżnić trzech, często przytaczanych przez wielu autorów (Krzywy 1999; Siuta i in. 2000, Gondek, Filipek-Mazur 2002) typowych faz biochemicznych charakterystycznych dla procesu kompostowania. Dynamikę zmian termicznych zachodzących w przynie „jesiennej” ująć można jedynie w dwóch etapach:

- Etap wzrostu temperatury – bardzo charakterystyczny wzrost temperatury w rdzeniu przyny zaraz po zmieszaniu odpadów „jesiennych”. W przeciągu pierwszych 9 dni trwania procesu kompostowania temperatura rdzenia przyny wzrosła o ponad 9 °C (od 13,9 do 23,4 °C).
- Etap stabilizacji – w miarę postępu procesu kompostowania zmniejszało się zróżnicowanie temperatur w przynie. W okresie tym nie stwierdzano wyraźnych wahań temperatury, która kształtowała się w zakresie 23 – 27°C. Etap ten trwał aż do momentu zakończenia trwania procesu kompostowania.

Mało wyraźna, choć stopniowa zwyżka temperatury jaką obserwowano w początkowym okresie (ryc. 36) nie jest typowa dla zazwyczaj krótko trwającej, ale bardzo intensywnej gorącej fazy kompostowania. Trend wzrostowy temperatury wskazuje jednak na prawidłowy kierunek przemian termicznych przyzmy.

### 5.7.2.2. Zmiany termiczne w „Pryzmie wiosennej”

W porównaniu do przyzmy „jesiennej” intensywność przebiegu procesów rozkładu oceniana na podstawie dynamiki temperatury w przyzmy „wiosennej” była znacznie większa. Na rycinie 37 przedstawiono zaobserwowane podczas kompostowania zmiany temperatury przyzmy „wiosennej”.



Ryc. 37. Zmiany termiczne w przyzmy „wiosennej” w okresie objętym pomiarami

Średniodobowe temperatury wewnątrz przyzmy kształtowały się w dość wąskim zakresie i wynosiły od 21,5 – 28,8 °C. Najniższą temperaturę jednostkową w rdzeniu przyzmy zanotowano w dniu jej przerzucenia (21°C). Najwyższą temperaturę jednostkową odnotowano po czterech miesiącach od założenia przyzmy kompostowej i wynosiła ona 28,8 °C (ryc. 37).

W całym cyklu kompostowania przyzmy „wiosennej” (mimo korzystniejszych warunków termicznych otoczenia), podobnie jak było to w przypadku przyzmy „jesiennej” nie możemy wyróżnić trzech podstawowych faz biochemicznych zazwyczaj towarzyszących temu procesowi [Siuta 1999d].

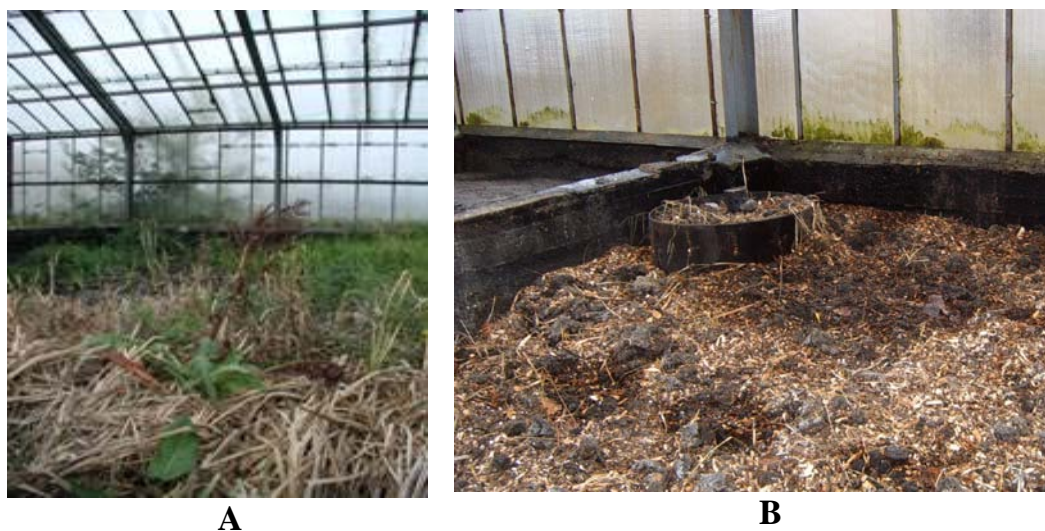
Dynamika zmian temperatury w masie kompostowej uznawana jest przez Fanga i Wonga [1999] oraz Siutę [1999b] za wskaźnik biochemicznych przemian substancji organicznej. Autorzy ci podają, że w warunkach korzystnie dobranego składu chemicznego oraz odpowiedniego rozdrobnienia surowców, wilgotności i napowietrzenia masy

kompostowej temperatura może bardzo szybko osiągnąć poziom 60 – 75°C. Jednak, jak podkreśla Siuta [1999b], warunkiem niezbędnym do powstawania wysokiej temperatury w kompostowanej masie jest jej zasobność w łatwo rozkładające się węglowodany. Autor ten Siuta [1999b,c] podaje także, że tak wysokich temperatur nie można uzyskać podczas trwania procesu kompostowania osadów ściekowych, co zostało potwierdzone niniejszymi badaniami. W kompostach z komunalnych osadów ściekowych powstających na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu udało się uzyskać maksymalne temperatury wynoszącą 27 °C dla pryzmy „jesiennej” oraz prawie 29 °C dla pryzmy „wiosennej”. Potwierdza to, iż w osadach ściekowych nie ma wystarczającej ilości łatwo rozkładających się węglowodanów, które umożliwiłyby gwałtowny wzrost temperatury pryzmy, a tym samym zapewniły jej higienizację. Jediną możliwością intensyfikacji procesu kompostowania poprzez uzyskanie wyższej temperatury rdzenia pryzmy jest dodanie do niewielkiej ilości osadu ściekowego bardzo dużej ilości wysokokalorycznej i łatwo rozkładającej się substancji organicznej [Siuta 1999b]. Na podstawie badań własnych Sebastiań i Szpadt [1999] wskazuje, że w kompostach z osadów ściekowych, niezależnie od wykorzystanego dodatku, mikrobiologiczne procesy przemian miały charakter mezofilny, a temperatury w pryzmach nie przekraczały 25 °C . Autor ten podkreśla także, że podczas trwania całego procesu kompostowania z wykorzystaniem osadów ściekowych nie dochodziło do tak zwanej fazy grzania pryzm, co potwierdzają także Fang i Wong [1999] oraz Siuta [1999b]. Ponadto Wasiak i Mamełka [1999] podkreślają, że niskie temperatury (nie przekraczające 50 °C) w pryzmach kompostowych mogą być także konsekwencją mniejszej intensywności procesów mineralizacji substancji organicznej, np. na skutek wyższego zapiaszczenia odpadów.



### 5.7.3. Właściwości kompostowanej masy

Pryzmę kompostową „jesienną” założono w listopadzie 2004 r, na jednej z 24 kwater odwadniających na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (ryc. 38). Składowane tam osady ściekowe wymieszano z odpadami organicznymi, w skład których wchodziły przede wszystkim: trociny i zrębki drzewne pochodzące z pielęgnacji terenów zieleni miasta Recz oraz opadłe liście z sezonu jesiennego 2004 r. Udział osadu i dodatku strukturotwórczego w masie kompostowej kształtował się jak 1:1 (V/V).



Ryc. 38. Osady ściekowe w kwaterze odwadniającej przed (A) i po (B) zmieszaniu z dodatkami organicznymi [fot. E. Dusza]

Pryzmę kompostową „wiosenną” ukształtowano w maju 2005 r., na terenie otwartym, przy kwaterach odwadniających, na obszarze Miejskiej Oczyszczalni Ścieków (ryc.39). Udział osadu i dodatku strukturotwórczego (siana, drobnych gałązek drzew i krzewów, ścinki traw, opadłe liście drzew) kształtował się jak 1:1.



Ryc. 39. Osad ściekowy użyty do uformowania przyzmy wiosennej (A) oraz mieszanie osadu ściekowego z dodatkami organicznymi (B) [fot. E. Dusza].

Głównym celem stosowania kompostu jest utrzymanie lub zwiększenie zawartości próchnicy w glebie. Zawartość próchnicy warunkuje aktywność biologiczną gleby i jej agrotechniczną sprawność. Dostarczanie makroskładników pokarmowych jest istotne, ale nie najważniejsze, chyba, że nawożenie gleby sprowadza się wyłącznie do stosowania kompostu (Wasiak, Mamełka 1999).

Według Siuty [1999b] oraz Wasiak i Mamełki [1999] zawartość azotu w suchej masie kompostu wynosi przeważnie 1,0 – 1,5 %. Zawartość fosforu, potasu, wapnia i magnezu w kompostach zależy od wielu czynników, toteż występują bardzo duże rozpiętości w zawartości tych składników. Odmienność składu mineralnego poszczególnych surowców roślinnych jest głównym powodem zróżnicowanego chemizmu kompostu.

Podczas kompostowania pryzmy „jesiennej” jej uwilgotnienie uległo zmniejszeniu z 58,7% do 50,7 % (tab. 22). Także odczyn badanych próbek masy kompostowej był stabilny i wykonane pomiary pH mieściły się w granicach od 6,88 do 7,26 (tab. 22). Zawartość substancji organicznej wzrosła w trakcie kompostowania o blisko 12% (z 33,2% na początku do 44,8% na końcu procesu kompostowania).

**Tabela 22.** Zmienność podstawowych właściwości chemicznych kompostu „jesiennego”

data poboru próby	wilgotność [%]	substancja organiczna [%]	pH
20.11.2004	58,7	33,2	7,26
6.01.2005	57,5	34,5	6,89
18.03.2005	55,2	40,1	6,98
25.05.2005	54,4	42,5	6,88
15.09.2005	50,7	44,8	7,05

W porównaniu z pryzma „jesienną”, pryzma kompostowa „wiosenna” charakteryzowała się większym uwilgotnieniem, które zmniejszyło się w trakcie kompostowania z 78,8% w dniu założenia pryzmy do 57 % w ostatnim dniu badań masy kompostowej (tab. 23), wyższą zawartością substancji organicznej, której ilość wzrosła podczas trwania całego okresu kompostowania o blisko 8% (z 39,6 do 48,5%) oraz odczynem w zakresie od lekko kwaśnego do lekko zasadowego (pH 6,45 – 7,12, tab. 23).

**Tabela. 23.** Zmienność podstawowych właściwości chemicznych kompostu „wiosennego”

data poboru próby	wilgotność [%]	substancja organiczna [%]	pH
25.05.2005	78,8	39,6	6,78
26.06.2005	70,8	40,6	6,45
10.08.2005	72,6	41,9	6,89
21.09.2005	72,7	42,1	7,01
7.12.2005	61,4	44,25	6,99
25.03.2006	65,7	44,8	7,04
8.08.2006	68,03	45,51	7,03
10.10.2006	56,97	48,50	7,12

Według danych literaturowych [Siuta 1999a, b; Wasiak, Mamełka 1999] odpowiednie pH masy kompostowej odgrywa podwójną rolę: z jednej strony zapewnia właściwe warunki środowiskowe dla rozwoju mikroorganizmów, z drugiej natomiast zabezpiecza przed stratą azotu z przyzmy kompostowej. W związku z tym zalecane optimum wartości pH środowiska powinno być utrzymane w granicach 6,5 – 7,5 tj. blisko odczynu obojętnego [Gambuś 1999; Siuta 1999b]. Takie zalecane wartości osiągnięto w obydwu założonych przyzmach, co wskazuje na prawidłowy przebieg całego procesu. Uzyskane wartości pH w przyzmach gwarantowały także optymalny rozwój mikroflory bakteryjnej, zapewniającej tlenowy rozkład osadów i odpadów organicznych.

Optymalna zawartość substancji organicznej w kompostach wynosi 40 – 50% [Siuta 1999, Wasiak, Mamełka 1999]. W kompostach bardzo dojrzałych (silnie zmineralizowanych) substancja organiczna może stanowić około 30%, a w kompostach młodych z masy roślinnej lub torfu – nawet ponad 60% (Siuta, 1999b; Gambuś 1999, Wasiak, Mamełka 1999). Stwierdzona podczas badań kompostowanej masy zawartość substancji organicznej mieści się w zalecanym przez Siutę [1999b] optimum, co potwierdza prawidłowy kierunek zmian wskazując na sukcesywne zmniejszanie się udziału części organicznych kosztem wzrostu części mineralnych w kompoście [Siuta 1999b]. Zawartość substancji organicznej w kompostach wytworzonych z komunalnych osadów ściekowych z oczyszczalni w Reczu utrzymuje się na poziomie (około 45%) charakterystycznym dla kompostów z komunalnych osadów ściekowych z dodatkiem substancji organicznej [Jaroszyńska i in. 1999; Urbaniak, Mokrzycka – Wieteska 1999; Gambuś, Wiczorek 1999].



### 5.7.3.1. Wartość nawozowa kompostów

Wartość nawozowa kompostów wytworzonych z komunalnych osadów ściekowych i dodatków organicznych była wysoka. Porównując oba wyprodukowane komposty, należy stwierdzić, że lepszymi wartościami nawozowymi charakteryzował się kompost „wiosenny” (tab. 24). Średnia zawartość azotu w kompoście z przyzmy „wiosennej” (3,95%) była wyraźnie wyższa niż w masie kompostowej z przyzmy „jesiennej” (2,4%), a minimalna koncentracja azotu (3,1%) była równa maksymalnej zawartości tego składnika jaką stwierdzono w kompoście z przyzmy „jesiennej”. Warto podkreślić, że przyzma „wiosenna” charakteryzowała się także mniejszym zróżnicowaniem koncentracji azotu w próbkach niż przyzma „jesienna” (współczynniki zmienności wynosiły odpowiednio 14 i 26%(tab. 25).

Także średnia koncentracja fosforu była wyższa (2,5%) w kompoście „wiosennym” niż „jesiennym” (1,9%, tab. 24). Natomiast większą zmienność tego makroskładnika odnotowano w kompoście „wiosennym”( V = 23%) niż „jesiennym” (V = 17%).

**Tabela. 24.** Wartość nawozowa uzyskanych kompostów z osadów ściekowych

	N	P	K
	[%]		
I kompost „jesienny” (n=5)			
x	2,40	1,9	0,5
min	1,7	1,5	0,4
max	3,1	2,3	0,6
S	0,6	0,3	0,1
V [%]	26,4	16,6	20,7
II kompost „wiosenny” (n=8)			
x	3,95	2,5	0,6
min	3,1	1,65	0,5
max	4,7	3,3	0,8
S	0,6	0,6	0,1
V [%]	14,1	22,6	13,8

Podczas trwania obserwacji nie stwierdzono natomiast istotnych różnic w zawartości potasu w dojrzałych kompostach uzyskanych z komunalnych osadów ściekowych składowanych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Recz. Średnia koncentracja potasu kształtowała się na zbliżonym poziomie i wynosiła odpowiednio: 0,5 % dla kompostu „jesiennego” oraz 0,6 % dla kompostu „wiosennego”. Podobnie jak w przypadku N, większą

zmienność zawartości tego składnika w próbkach stwierdzono w kompoście „jesiennym” ( $V=21\%$ ) niż w kompoście „wiosennym” ( $V=14\%$ ).

Uzyskane w dwóch przyzmacz kompostowych dojrzałe komposty „jesienny” i „wiosenny” charakteryzowały się bardzo dobrymi właściwościami nawozowymi. Średnia zawartość azotu w obu kompostach (2,4 i 3,95%) była znacznie wyższa od zawartości tego składnika w oborniku (średnio 1,5%) podawanych przez Filipek – Mazur [1999] oraz Krzywego i in. [2000]. Wartości te były także wyższe od średnich koncentracji tego pierwiastka w kompostach z osadów ściekowych z dostatkami słomy i zrębek drzewnych, w których zawartość azotu kształtowała się średnio na poziomie 2,12 % [Hryńczuk, Weber 1999]. Także w przypadku fosforu, komposty z osadów ściekowych z Recza w których średnia zawartość tego pierwiastka wynosiła odpowiednio 1,9 % w kompoście „jesiennym” oraz 2,5% „wiosenny” były trzy a nawet czterokrotnie zasobniejsze w fosfor niż komposty z osadów ściekowych wraz z organicznymi dodatkami strukturotwórczymi opisywane przez różnych autorów [Filipek – Mazur, 1999, Krzywy i in. 2000, Hryńczuk, Weber 1999]. Uzyskane wartości zawartości fosforu w dojrzałych kompostach z Recza są także pięć i siedmiokrotnie wyższe od koncentracji tego pierwiastka w oborniku – 0,35% [Filipek – Mazur 1999]. Potwierdza to bardzo wysoką wartość nawozową kompostów wytworzonych z komunalnych osadów ściekowych deponowanych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu.

Komposty z osadów ściekowych generalnie zawierają mniej potasu, co związane jest z niską jego koncentracją w samym osadzie ściekowym użytym jako materiał wyjściowy. Po przebadaniu obu kompostów potwierdzono, że nie są one zasobne w potas bowiem zawierały odpowiednio średnio 0,5 i 0,6% K. Mimo, że średnia koncentracja tego makroskładnika jest ponad siedem razy wyższa od zawartości K (0,08 %) podawanej przez Filipek – Mazur [1999] dla kompostów z osadów ściekowych, to jednocześnie jest aż dwa razy niższa od koncentracji potasu w oborniku [Gorlach, Gambuś 1999, Krzywy i in. 2000].

### **5.7.3.2. Obciążenie kompostów metalami ciężkimi**

Koncentracja metali ciężkich w kompostowanej masie nie jest bezpośrednio związana z przebiegiem procesu kompostowania, jest natomiast konsekwencją wysokiego obciążenia metalami ciężkimi ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych użytych do kompostowania.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że kompost „wiosenny” z osadów ściekowych i dodatków organicznych, w skład których wchodziły: siano, trawa i zrębki gałązek drzew i krzewów z zabiegów pielęgnacyjnych przeprowadzonych na terenie miasta Recz charakteryzował się wyższymi średnimi zawartościami Cu, Cr, Zn i Hg.

Natomiast koncentracja Pb była wyższa w kompoście „jesiennym”, a Ni i Cd kształtowała się na zbliżonym poziomie w obu kompostach (tab.24).

Podobnie jak w przypadku ścieków surowych, osadu czynnego i ścieków oczyszczonych stężenia metali ciężkich w wytworzonych kompostach można uszeregować następująco:  $Hg < Cd < Pb < Cr < Ni < Cu < Zn$ . W najwyższych koncentracjach w kompostach występował cynk i miedź (odpowiednio średnio 1745 i 1501,6  $mg \cdot kg^{-1}$  w kompoście „jesiennym” oraz 1772,3 i 1760,6  $mg \cdot kg^{-1}$  w kompoście „wiosennym”). Maksymalne stężenia Zn (2354,5  $mg \cdot kg^{-1}$ ) stwierdzono w kompoście „jesiennym”, a miedzi (2458,0  $mg \cdot kg^{-1}$ ) w kompoście wiosennym. Natomiast kadm i rtęć to pierwiastki, które w uzyskanych kompostach występowały w najniższych stężeniach (odpowiednio w kompoście „jesiennym” średnio 2,0 i 1,0  $mg \cdot kg^{-1}$  oraz „wiosennym” średnio 1,9 i 1,4  $mg \cdot kg^{-1}$ , tab. 25).

**Tabela. 25.** Koncentracja metali ciężkich w uzyskanych kompostach z osadów ściekowych

	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd	Hg
<b>I kompost „jesienny” (n=5) [<math>mg \cdot kg^{-1}</math>]</b>							
<b>x</b>	1501,6	221,8	864,2	1745,3	87,2	2,0	0,96
<b>min</b>	1416,0	123,6	820,6	1126,5	67,7	1,89	0,87
<b>max</b>	1653,7	352,8	935,2	2354,5	102,3	2,21	1,02
<b>S</b>	94,2	86,1	43,4	522,6	14,0	0,13	0,06
<b>V [%]</b>	6,3	38,8	5,0	29,9	16,1	6,6	5,76
<b>II kompost „wiosenny” (n=8) [<math>mg \cdot kg^{-1}</math>]</b>							
<b>x</b>	1760,6	262,5	864,4	1772,3	77,7	1,9	1,5
<b>min</b>	1302,4	192,3	541,6	1305,0	60,4	1,9	1,3
<b>max</b>	2458,0	357,2	1282,0	2124,0	91,7	2,0	1,9
<b>S</b>	408,4	48,8	247,5	312,6	10,9	0,04	0,2
<b>V [%]</b>	23,2	18,6	28,6	17,6	14,0	2,3	13,0

Wszystkie badane metale ciężkie, w obu uzyskanych z osadów ściekowych kompostach występowały w wyższych stężeniach niż w kompostach uzyskanych przez innych badaczy. Zarówno średnia zawartość cynku w kompoście: „jesiennym” (1745  $mg \cdot kg^{-1}$ ) jak i „wiosennym” (1772  $mg \cdot kg^{-1}$ ) jest wyższa od stężenia tego pierwiastka w kompostach powstałych z osadów ściekowych z dodatkiem słomy jako materiału strukturotwórczego z oczyszczalni ścieków komunalnych w Opolu. Podawana przez Hryńczuka i Webera [1999] zawartość cynku w tego rodzaju kompostach wynosiła powyżej 1000  $mg \cdot kg^{-1}$ , nie przekraczając wartości 1500  $mg \cdot kg^{-1}$ . Koncentracja cynku jest kilkunastokrotnie wyższa od stwierdzonych przez Filipek – Mazur [1999] zawartości tego pierwiastka w kompostach z osadów ściekowych z dodatkiem słomy i zrębków drzewnych (156 i 113  $mg \cdot kg^{-1}$ ). Odmienne wyniki od wspomnianej autorki uzyskali Hryńczuk i Weber [1999] przy kompostowaniu osadu ściekowego ze słomą. Autorzy ci stwierdzili, że

zawartość cynku w dojrzałych kompostach wynosiła  $1170 \text{ mg Zn} \cdot \text{kg}^{-1}$ , co potwierdza fakt, że końcowa zawartość metali ciężkich w kompostach ściśle uzależniona jest od początkowej ich zawartości w osadach i dodatkach wykorzystywanych do formowania pryzm.

Wysokie zawartości miedzi w kompostach (średnio  $1502 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  w kompoście „jesiennym” oraz  $1760 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  w kompoście „wiosennym”) były kilkakrotnie, a nawet kilkunastokrotnie wyższe od wartości podawanych w literaturze dla kompostów z osadów ściekowych z dodatkiem materiału strukturotwórczego [Gomez 1998, Filipek – Mazur 1999, Hryńczuk, Weber 1999, Krzywy i in. 2000]. Najwyższe stwierdzone przez tych autorów stężenie miedzi w kompostach ( $513 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) było trzykrotnie niższe od średnich stężeń miedzi w kompostach z osadów ściekowych składowanych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu.

Metale ciężkie są nieodłącznym elementem każdego komunalnego osadu ściekowego [Gomez 1998; Fang i Wong 1999; Krzywy i in. 1999,]. Najczęstszym sposobem uszlachetnienia tych cennych źródeł substancji nawozowych jest ich kompostowanie z różnego rodzaju dodatkami organicznymi: słoma, trociny, zrębki drzewne, liście drzew itp. [Filipiak – Mazur 1999, Krzywy i in. 1999, Krzywy i in. 2000].

Zgromadzone w latach 1994-2003 w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu ustabilizowane i odwodnione osady ściekowe zawierały ponadnormatywne ilości metali ciężkich ograniczające możliwości ich wykorzystania. W celu obniżenia zbyt wysokiej koncentracji tych metali kompostowano osady ściekowe z dodatkiem organicznych substancji strukturotwórczych.

W tabeli 26 przedstawiono zmiany koncentracji metali ciężkich w dojrzałych kompostach w porównaniu z materiałem wyjściowym, jakim był ustabilizowany i odwodniony osad ściekowy.

**Tabela. 26.** Zmiany koncentracji metali ciężkich w dojrzałych kompostach w porównaniu z materiałem wyjściowym – stałym osadem ściekowym.

	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd	Hg
ustabilizowany i odwodniony osad ściekowy użyty do kompostowania [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	1995,5	487,1	844,0	2827,6	143,8	2,5	2,0
kompost jesienny dojrzały [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	1653,7	352,8	864,2	2354,5	98,25	2,0	1,0
zmiana koncentracji [%]	<b>-18</b>	<b>-28</b>	<b>+2,4</b>	<b>-17</b>	<b>-32</b>	<b>-20</b>	<b>-50</b>
kompost wiosenny dojrzały [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	1317,2	258,7	568,8	2036,0	66,3	1,9	1,4
zmiana koncentracji [%]	<b>-34</b>	<b>-47</b>	<b>-33</b>	<b>-28</b>	<b>-54</b>	<b>-24</b>	<b>-30</b>

Jak wynika z przeprowadzonych analiz zawartość metali ciężkich w uzyskanych kompostach uległa wyraźnemu obniżeniu w porównaniu z ich zawartością w użytym do kompostowania ustabilizowanym i odwodnionym osadzie ściekowym. Największą redukcję zawartości (50%) w dojrzałym kompoście „jesiennym” uzyskano w przypadku rtęci, niższą (28 i 32 %) dla chromu i ołowiu, a najniższą (17 -20 %) dla cynku, miedzi i kadmu. Jedynie w przypadku niklu odnotowano wzrost koncentracji o 2,4% (z 844 mg · kg<sup>-1</sup> do 864 mg · kg<sup>-1</sup>).

Natomiast większą redukcję w zawartości metali stwierdzono w kompoście „wiosennym”. W przypadku chromu i ołowiu była ona największa i wynosiła 47 i 54 %. Dla Zn, Hg, Ni i Cu kształtowała się od 28 do 34 %, a dla Cd była nieznacznie mniejsza (24%).

Wzrost zawartości niklu w kompoście „jesiennym” w porównaniu z koncentracją tego pierwiastka w użytych do kompostowania osadach ściekowych, mógł być spowodowany niejednorodnością materiału pobranego do analiz chemicznych. Gomez [1998] oraz Fang i Wong [1999] obserwowali w swoich badaniach, podobny wzrost koncentracji niklu i miedzi pod koniec trwania procesu kompostowania. Autorzy ci stwierdzili, iż zjawisko to związane jest z zagęszczaniem materiałów podczas procesu kompostowania (utrata wagi przymy), które występuje na skutek mineralizacji frakcji organicznej w nich zawartej. Potwierdzają oni także to, że aby zapobiegać zjawisku kumulacji metali ciężkich podczas procesu kompostowania, należy dodawać do masy kompostowej (zwłaszcza gdy składa się ona z osadów ściekowych) wapno, gdyż zapobiega to przemianom metali i pomaga związać je w kompleksy organiczne, niedostępne dla roślin.

Przeprowadzone w niniejszej pracy badania nad rozcieńczeniem ponadnormatywnych zawartości metali ciężkich w komunalnym osadzie ściekowym poprzez jego kompostowanie z organicznym materiałem strukturotwórczym nie przyniosły pożądanego efektu obniżenia tych szkodliwych substancji w uzyskanych kompostach.

Ograniczenie nadmiernie wysokich koncentracji metali ciężkich w osadach ściekowych i kompostach powstałych na ich bazie można uzyskać jedynie poprzez zwiększenie skuteczności podczyszczania ścieków pogalwanicznych, bądź zmniejszenie ich udziału w ogólnej ilości ścieków komunalnych dopływających do Oczyszczalni Ścieków w Reczu.

## 6. WNIOSKI

1. W okresie objętym badaniami stwierdzono wyraźną zmienność ( $V = 50 - 128 \%$ ) w stężeniach analizowanych metali ciężkich (Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, ) w ściekach surowych docierających do Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu. Zmiany koncentracji metali ciężkich w ściekach surowych są konsekwencją okresowych zrzutów ścieków technologicznych z lokalnych galwanizerni do sieci kanalizacji miejskiej.
2. Średnie stężenia Zn, Pb i Cd były wyższe w I serii badań ścieków surowych, natomiast Cr i Ni w II serii próbek, a miedzi utrzymywały się na tym samym poziomie. Poziom koncentracji badanych metali ciężkich w próbkach ścieków surowych pobieranych w obu okresach można uszeregować, uwzględniając ich średnie stężenia, następująco:  $Cd < Cr < Ni < Pb < Cu < Zn$ .
3. Koncentracja metali ciężkich, a zwłaszcza Cu, Cr, Ni, Zn w osadzie czynnym jest znacznie wyższa niż w ściekach surowych (dla Zn - 13 razy oraz dla Ni, Cu i Cr 19-22 razy), co w dużym stopniu wpływa na ograniczenie efektywności oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego.
4. Maksymalne stężenia Cu ( $13,09 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) i Ni ( $5,99 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) stwierdzone w osadzie czynnym przekraczały próg toksyczności dla mikroorganizmów wynoszący odpowiednio dla Cu  $1,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  oraz Ni od  $0,25$  do  $0,7 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ .
5. W efekcie procesu oczyszczania ścieków surowych metodą osadu czynnego ścieki oczyszczone nie zawierają metali ciężkich w ponadnormatywnych stężeniach [RMŚ 2006], nie powodując tym samym zagrożenia dla wód odbiornika (rzeki Iny). Nawet maksymalne koncentracje metali ciężkich w ściekach oczyszczonych były kilkadziesiąt razy niższe niż przewiduje to prawo.
6. Redukcja zawartości metali ciężkich w ściekach oczyszczonych w porównaniu z ich stężeniami w ściekach surowych kształtowała się następująco:  $Cd < Pb < Cr < Cu < Zn$ .

7. Konsekwencją wysokich stężeń metali ciężkich w osadzie czynnym jest bardzo duże zanieczyszczenie tymi pierwiastkami ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych, co bardzo ogranicza możliwości ich wykorzystania.
8. Ze względu na ponadnormatywne zawartości Ni oraz Cu, odpowiednio 88% oraz 54% powstałych na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych nie może być wykorzystane w żaden, przewidziany prawem sposób [RMŚ 2002].
9. Z ogólnej ilości (265 Mg s.m.) składowanych w latach 1994- 2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych na cele rekultywacyjne można przeznaczyć około 5 Mg s.m. (tj. niecałe 2% ) wyselekcjonowanych partii osadów ściekowych, w których zawartość metali ciężkich nie przekracza dopuszczalnych norm
10. Uzyskane z odwodnionych i ustabilizowanych osadów ściekowych komposty („jesienny” i „wiosenny”) charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami i zawartością makroskładników, co powoduje iż mogły by one być doskonałym materiałem nawozowym. Możliwości ich zagospodarowania ogranicza jednak nadmierna koncentracja metali ciężkich.
11. Podjęte próby redukcji nadmiernych ilości metali ciężkich w osadach ściekowych na drodze ich kompostowania z odpadami organicznymi pochodzącymi z pielęgnacji terenów zieleni wykazały, że mimo obniżenia zawartości metali ciężkich (o blisko 20 do 50 %) w uzyskanych kompostach nie ograniczono jednak koncentracji metali do poziomu umożliwiającego ich rolnicze wykorzystanie. W porównaniu z zawartością metali ciężkich w osadach ściekowych większą redukcję ich zawartości stwierdzono w kompoście „wiosennym” niż „jesiennym”.

## 7. SPIS LITERATURY

1. Ahmed M., S., 1999: Bacteriological evaluation of composting system in sludge system. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 40. nr 7. s. 165 – 170.
2. Alcock R.E., Bacon J., Bardget R.D., Beck A.J., Haygarth P.M., Lee R.G.M., Parker C.A., Jones K.C., 1996: Persistence and fate of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sewage sludge – amended agricultural soils. *Environ. Pollut.* Nr 93, s. 83 – 92.
3. Andersson T.H, Domasch K.H., 1989: Ratio of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soils Biol. Biochem.* Nr 21, s. 471 – 479.
4. Atkinson B.W., Bux F., Kasan H.C., 1998: Activated sludge remediation of metal – plating effluents. *Water Sci.* vol 24, nr 4.s. 355 – 359.
5. Avakyan Z.A., 1994: The toxicity of heavy metals to microorganism. *Qatar University Science Journal* nr 14, s. 3 – 65.
6. Baran S., 2004: Osady Ściekowe w Gospodarce Rolno – Środowiskowej. *Zesz. Probl. Post Nauk Roln.* 499, Warszawa s. 121 – 132.
7. Baran S., Bielińska E.J., Wiśniewski J., 1999a: Wpływ osadu ściekowego i wermikompostu z tego osadu na aktywność enzymatyczną gleby piaszczystej. *Ann. UMCS, sec. E*, 54, s. 145 – 151.
8. Baran S., Martyń W., Wójcikowska – Kapusta A., 1999b: Zawartość różnych form kadmu w kompostach wytworzonych z odpadów komunalnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. Z.* 467, s. 499 – 504.
9. Baran S: 1997: Przyrodnicze wykorzystanie osadów ściekowych. *Ekoprofit* 6(11), s. 13 – 16.
10. Barbusiński K., Kościelak 1997: Preparowanie kłaczków osadu czynnego do badań struktury wewnętrznej. *Biotechnolog.* 1(36)/9: 37 – 44.
11. Barth J., 2002; BioNet - Biological waste treatment in Europe - technical and market developments. Internet address: <http://www.bionet.net>.
12. Bernacka J., Pawłowska L, 1994: Zagospodarowanie i wykorzystanie osadów z miejskich oczyszczalni ścieków, IOŚ, Warszawa.
13. Bernacka J., Pawłowska L., 1999: Substancje szkodliwe i ich obecność w osadach z miejskich oczyszczalni ścieków, *Ochr. Środ. i Zas. Natur.* Nr 16, s. 25 – 35.
14. Bernacka J., Pawłowska L., Krobski A 2003: Przeróbka osadów w kraju i ich jakość w świetle wymagań określonych w projekcie Dyrektywy Osadowej, *Ochr. Środ. i Zas. Natur.* Nr 25/26, s. 87 – 104.



15. Bień J. B., 2002a: Osady ściekowe teoria i praktyka. Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
16. Bień J.B., Bień J.D., Matysiak B.M., 1998a: Metody zagospodarowania i unieszkodliwiania osadów ściekowych, Przegląd Komunalny nr 5 (80), s. 20 – 24.
17. Bień J.B., Bień J.D., 1998b: Unieszkodliwianie osadów ściekowych za pomocą metod termicznych, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. Osady ściekowe w praktyce, Częstochowa
18. Bień J.B., Sanitsky M., Bień J.D., Białczak W., 2002b: Termiczne metody utylizacji osadów ściekowych Leksykon Techniki Komunalnej zeszyt III, s. 28 – 37.
19. Bilitewski B., Härdtle G., Marek K., 1994: Abfall-Wirtschaft. Spring-Verlag, Berlin.
20. Bitton G., Freihofer V1978: Influence of extracellular polysaccharides on the toxicity of copper and cadmium . Microbial. Ecol. Nr 4 , s. 119 – 125.
21. Bode H., 1998: Control of heavy metals emission from metal plating industry in a German river basin. Wat. Sci. Tech. Vol. 38, Nr 4 – 5, s. 121 – 129.
22. Bodzek D., 1996: Występowanie i oznaczanie w osadach ściekowych wybranych toksycznych mikrozanieczyszczeń organicznych, konferencja Politechniki Częstochowskiej: Wykorzystanie osadów ściekowych - Techniczne i prawne uwarunkowania, s. 49 – 59, Częstochowa.
23. Bojanowska I., Downar D., Siedlecka E., Ropel E. 2000. Ocena skuteczności miejskiej oczyszczalni ścieków w Kartuzach. Ochrona Środowiska, 3 (78), s. 21-24.
24. Bojanowska I., Kochany J., Olech B., 1982: Metale ciężkie a rolnicze zagospodarowanie osadów ściekowych. Człowiek i Środowisko Nr 6/1, s. 205 – 218.
25. Boruszko D., Dąbrowski W., Magrel L., 2000: Bilans ścieków i osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków województwa podlaskiego. Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych, Białystok.
26. Boyle M., Poul E.A, 1989: Nitrogen transformations in soils previously amended with sewage sludge. Soil Sci. Soc. Am. J. nr 53, s. 740 – 744.
27. Braam F., Klapwijk A., 1981: Effect of copper on nitrification in activated sludge. Water Research, 5: 1093 – 1098.
28. Brown M.J., Lester J. N., 1982: Role of biological extracellular polymers in metal uptake in pure bacterial culture and activated sludge i. Effect of metal concentration. Water Research nr 16, s. 1539 – 1545.
29. Cardinaletti M., Zitelli A., Ghirardini A., Avezzu F., 1990: Population dynamics of the microfauna in a activated sludge plant treating domestic and industrial effluents. Inquinamento 32: 62 – 68.

30. Cereceda – Martin M., Serrano S., Guinea A., 1996: A comparative study of ciliated protozoa communities in activated – sludge plants. FEMS Microbiology Ecology nr 21. s. 267 – 276.
31. Chander K., Brookes P.C., 1993: Residual effect of zinc, cooper and nickel in sewage sludge on microbial biomass in a sandy loam. Soil Biol. Biochem. Nr 25, s. 1231 – 1229.
32. Chander K., Dyckmans J., Joergnsen R.G., Mayer B., Raubuch M., 2001: Different sources of heavy metals ond their long – term effects on soil microbial properties. Biol. Fertil. Soil nr 34, s. 241 – 247.
33. Chang G.R., Liu J.C., Lee D.J., 2001: Co – Conditioning and dewatering of chemical sludge and waste activated sludge. Wat. Res. Vol. 35. nr 3. s. 786 – 794.
34. Chełmiński Z., 2002: Źródła zanieczyszczeń ścików komunalnych i sposoby zagospodarowania osadów.. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 477, s. 58 – 65.
35. Chipasa K. B., 2001: Accumulation and fate of selected heavy metals in a biological wastewater treatment system. Waste Management Nr 23, s. 135 – 143.
36. Chipasa K. B., 2003: Accumulation and fate of selected heavy metals in a biological wastewater treatment system. Waste Mangement nr 23. s. 135 – 143.
37. Chua E., Yu P. H. F., Sin S. N., Cheung M. W. I., 1999: Sub – lethal effect of heavy metals on activated sludge microorganism. Chemosphere Vol. 39, Nr 15, s. 2681 – 2692.
38. Ciećko Z., Wyszkowski M., Szagała., 1996: Wpływ 4 – letniego stosowania nawozów mineralnych, nawozów azotowych N – NO<sub>3</sub> i N – NH<sub>4</sub> w glebach.
39. Czekala J., 1999: Osady ściekowe źródłem materii organicznej i składników pokarmowych. Fol. Univ. Stetiensis, 200, Agricultura 77, s. 33 – 38.
40. Czekala J., 2000: Wpływ osadów ściekowych na wybrane właściwości chemicznych gleby , Zeszt. Probl. Post Nauk Roln. 499, Warszawa s. 141 – 152.
41. De Silóniz M., Balsalbbre L., Alba C., Valderrama M.J., Peinado J.M., 2002: Feasibility of copper uptake by the yeast *Pichia Guilliermondii* isolated from sewage sludge. Research in Microbiology nr 153, s. 173 – 180.
42. Dilek F.B, Gokcay C.F., Yetis U., 1998: Combined effect of Ni and Cr on activeted sludge. Water Research 32, s. 303 – 312.
43. Dilek F.B., Gokcay C.F., 1996: Microbiology of activated sludge treating wastewater containing Ni (II) and Cr (VI). Water Science and Technol. 34. s. 183 – 191.
44. Dilek F.B., Yetis U., 1992: Effects of heavy metals on activated sludge process. Water Sci. Technol. 26. s. 801 – 813.

45. Dirkzwager A.H., Duvoort L.E., van de Berg J.J., 1997: Production, treatment and disposal of sewage sludge in the Netherlands. *Europ. Water. Pollution Control*. Vo. 7, nr 2. s.29 – 41.
46. Drozd J., Jamroz E., Licznar M., Licznar S.E., Weber J., 1999; Wpływ stosowania kompostów z odpadów miejskich na kształtowanie poziomów metali ciężkich w glebie i na ich pobieranie przez rośliny. *Mat. I Konf. nauk.-tech. .Kompostowanie i użytkowanie kompostu.*, Wyd. Ekoinżynieria, Lublin, ss. 247-256.
47. Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J., Sozański M., 1997: Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków, PZLiTS o/Poznań i LEM s.c.Kraków, Poznań.
48. Ehrlich H.L., 1997: Microbes and metals. *Microbiol. Biotechnol.*, 48: 687 – 692.
49. Eikelboom D. H., von Buijsen H.J.J: 1999: Podręcznik mikroskopowego badania osadu czynnego. Wyd. Seidel – Przywecki Sp z o.o., Szczecin.
50. Fang M., Wong J.W.C., 1999: Effect of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting. *Environmental Pollution* Nr 106, s. 83 – 89.
51. Filipek – Mazur B., Gondek K., 2003: Wartość nawozowa kompostu z odpadów zielonych Krakowa. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* Nr 494, s. 113 – 121.
52. Fliessbach A., Martens R., Reber H.H., 1994: Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metals contaminated sewage sludge. *Soil Biol. Biochem* 26, s. 1201 – 1205.
53. Furczak J, Wielgoszcz E., 2001: Aktywność mikrobiologiczna, stan sanitarny i niektóre właściwości chemiczne osadu ściekowego poddanego dwuletniej transformacji roślinnej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 477, s. 38 – 42.
54. Fytianos K., Charantoni E., Voudrias E., 1998: Leaching of heavy metals from municipal sewage sludge. *Environ. Internat.* 24 (4): 467 – 475.
55. Gambuś F., 1999: Skład chemiczny i wartość nawozowa osadów ściekowych z wybranych oczyszczalni ścieków regionu krakowskiego. W *Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych III Konferencja Naukowo – Techniczna*, 9 – 11 czerwiec Świnoujście, s. 67 – 77.
56. Gambuś F., Wieczorek J., 1999: Skład chemiczny i wartość nawozowa kompostów i wermikompostów z osadów ściekowych nadmiernie zanieczyszczonych metalami ciężkimi. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. Z.* 467, s. 513 – 520.
57. Gminny Plan Gospodarki Odpadami dla Gminy Recz, 2003. (dokument nie publikowany, manuskrypt).
58. Gminny Program Ochrony Środowiska, 2003. (dokument nie publikowany, manuskrypt).

59. Gomez A., 1998: The evaluation of compost quality. Trends in Analytical Chemistry vol. 17, Nr 5, s. 310 – 314.
60. Gondek K., Filipek – Mazur B., 2002: Kompost z odpadów roślinnych cennym nawozem organicznym. Aura Nr 8, s. 30 – 34.
61. Gondek K., Filipek – Mazur B., 2005: Studies on the effect of sewage sludge on plants and soil part II: contents of chromium and copper in soil fertilized with sewage sludge. Chemia I Inż. Środ. 12(1 – 2): 49 – 59.
62. Gorlach E., Gambuś F., 1999: Wpływ osadów ściekowych na zawartość metali ciężkich w glebie i roślinach oraz ich przemieszczanie się w profilu glebowym. Zesz. Prob.. Post. Nauk Roln. Z. 467, s. 505 – 511.
63. GUS, 2005: Ochrona Środowiska 2005. Informacje i opracowania statystyczne Główny Urząd Statystyczny. Warszawa.
64. Gworek B., Maciaszek D., Pienkowska U., Polubiec E., 1999: Zastosowanie techniki mikrofalowej do oznaczania metali ciężkich w osadach ściekowych. Ochr. Środ. I Zas. Natur. Nr 17, s. 69 – 79.
65. Hryńczuk B., Weber R., 1999: Wartość nawozowa kompostów z osadu ściekowego, słomy i węgla brunatnego. Materiały z I konferencji „Kompostowanie i użytkowanie kompostu”, Puławy – Warszawa, 16 – 18.06.1999. s. 35 – 40.
66. Huges M.N., Poole R.K., 1989: Metals and Microorganisms. Chapman & Hall, Londyn.
67. Hughes i Poole [1989]
68. Imhoff K., Imhoff R.K., 1996: Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków. Poradnik. Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz 1996.
69. Instrukcja eksploatacji oczyszczalni w Reczu, 1994. (dokument nie publikowany, manuskrypt)
70. Jackowska I., Piotrowski J., 1996: Bilans miedzi wprowadzanej do środowiska naturalnego z oczyszczalni ścieków. Miedź i molibden w środowisku – problemy ekologiczne i metodyczne. Zesz. Nauk. Komit. „Człowiek i Środowisko, 14: 251 – 253.
71. Jakobsen S.T., 1994: Aerobic decomposition of organic waste 2. Value of compost as fertilizer. Resources, Conservation and Recycling Nr 13, s. 57 – 71.
72. Janoszka B. 1995: Występowanie i oznaczanie WWA i ich pochodnych w wybranych osadach ściekowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice.
73. Jaroszyńska J., Mamelka D., Jaroszyńska i in. 1999, Wolska D., Skalmowski K., 1999: Właściwości technologiczne odpadów komunalnych oraz jakość kompostów z kompostowni DANO w Warszawie. W Kompostowanie i użytkowanie kompostu I

Konferencja Naukowo – Techniczna Puławy – Warszawa 16-18.06.1999  
Wydawnictwo Ekoinżynieria Lublin s. 75 – 80.

74. Jędrzak A., 1998; Nawożenie gruntów osadami ściekowymi. Przegląd komunalny. Nr 5, ss. 58-63.
75. Jędrzak A., 2001; Biologiczne przetwarzanie odpadów. Przegląd komunalny. Nr 6, s. 89-92.
76. Jenkins D., Richard M.G., Digger G.T., 1986: Manual of the causes and control of activated sludge bulking and forming. Water Research Commision, Pretoria.
77. Johansson M., Stenberg B., Torstensson L., 1999: Microbiological and chemical changes in two arable soils after long – term sludge amendments. Biol. Fertil. Soils nr 30, s. 160 – 167.
78. Józwiak A., Gorzka Z., 1998, Regeneracja kąpieli odmiedziowujących metodą wymiany jonowej. Ochrona Środowiska 1(68), s. 27-30.
79. Kabata – Pendias A., Pendias H., 1999: Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
80. Kalembasa S., Kalembasa D., 1997: Wybrane chemiczne i biologiczne metody przeróbki osadów ściekowych. Biotechnolog. 1(36)/97: 45 – 55.
81. Kalembasa S., Kuziemska B., 1993: Wpływ pochodzenia i terminu stosowania osadów ściekowych na plon wybranych roślin uprawianych na glebie średniej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 409: 33 – 41.
82. Kalembasa S., Kuziemska B., 1999: Wpływ dawki i terminu stosowania osadów na plon siana oraz wartość współczynników wykorzystania azotu i fosforu z osadów. Fol. Univ. Stetiensis 200, Agricultura 77, s. 121 – 124.
83. Kalisz L. Kaźmierczuk M., 1990: Analiza aktualnego stanu sanitarnego osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków pod kątem ich dalszej utylizacji. „Katalog zunifikowanych obiektów i rozwiązań w systemie UNIKLAR”, Suplement, CTBK, Warszawa.
84. Kalisz L., Kaźmierczuk M., Sałbut J., 1999: Charakterystyka sanitarna osadów z małych oczyszczalni ścieków. W: Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych. III Konf. Nauk. – Techn., Świnoujście: 79 – 83.
85. Kalisz L., Sałbut J., Kaźmierczuk M., 2000: Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych Nr 19, s. 15 – 25.
86. Karvelas M., Katsoyiannis A., Samara C., 2003: Occurence and fate of heavy metals in wastewater treatment process. Chemosphere Nr 53, s. 1201 – 1210.
87. Kiepas – Kokot A., Zabłocki Z. 2003: Charakterystyka odpadów organicznych powstających na terenie Elektrowni “Dolna Odra” w Nowym Czarnowie pod kątem

- ich przydatności do produkcji kompostu. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. Z. 494, s. 157 – 166.
- 88.** Kieszkowski M., 1980: Gospodarka wodna i ściekowa w galwanizernii. W „Poradnik Galwanotechnika”. PWN Warszawa.
- 89.** Kingston H.M., Haswell S.J., 1997: Microwave – Enhanced Chemistry Fundamentals, Sample preparation and application. American Chemical Society, Washington D.C.
- 90.** Kirk P.W.W, Lester J.N., 1990: The fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during sewage sludge digestion, Environmental Technology, t.12, nr1, s. 13 – 20.
- 91.** Kiryluk A., 2003: Ocena przydatności mieszanek traw i osadu ściekowego do biologicznej rekultywacji wysypiska odpadów komunalnych. III Międzynarodowa konferencja Naukowo - Techniczna Rekultywacja terenów zdegradowanych, 10 - 11 kwietnia 2003 r. Elektrownia Dolna Odra, Akademia Rolnicza w Szczecinie.
- 92.** Koomen I., McGrath S.P., Giller K., 1990: Mycorrhizal infection of clover is delayed in soils contaminated with heavy metals from past sewage sludge applications. Soil Biol. Biochem. Nr 22, s. 871 – 873.
- 93.** KPOŚK, 2003: Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych, Materiał Inf. Ministerstwa Środowiska. Warszawa.
- 94.** Krzywy E., 1999: Przyrodnicze zagospodarowanie ścieków i osadów. Wyd. AR Szczecin. Szczecin.
- 95.** Krzywy E., Iżewska A., Jeżowski S., 2003: Wpływ komunalnego osadu ściekowego na zmiany niektórych wskaźników żyzności gleby. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. Z. 494, s. 215 – 223.
- 96.** Krzywy E., Iżewska A., Wołoszyk Cz., 2004: Ocena składu chemicznego i wartości nawozowej osadu ściekowego oraz kompostów wyprodukowanych z komunalnego osadu ściekowego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 499:165 – 171.
- 97.** Krzywy E., Wołoszyk Cz., 1996: Charakterystyka chemiczna i możliwości wykorzystania do produkcji kompostów z osadów ściekowych z miejskich oczyszczalni ścieków. Zesz. Nauk. AR Szczecin 172, Rolnictwo 62, s. 256 – 271.
- 98.** Krzywy E., Wołoszyk Cz., Iżewska A., 2000: Ocena przydatności do nawożenia kompostów z osadów ściekowych z oczyszczalni komunalnych. Cz. I Płonowanie rekultywacyjne mieszanki traw w uprawie polowej. Folia Univ. Agric. Stetin. Nr 211 (Agricultura 84), s. 199 – 204.
- 99.** Lester J.N., Perry R., Daad A.H., 1979: The influence of heavy metals in a mixed population in sewage. Water Research. 13. s. 1055 – 1063.

100. Lester J.N., Sterrit R. M., Kirk P.W.W., 1983: Significance and behaviour of heavy metals in wastewater treatment process II. Sludge Treatment and Disposal Sci. Total Environ. Nr 30, s. 45 – 83.
101. Leszczyńska M., 1999, Wpływ aktywności metabolicznej osadu czynnego na jego podatność na inhibicję. *Archiwum Ochrony Środowiska*. Vol. 25, No. 2, pp. 113-120.
102. Macaskie L.E., 1990: An immobilized cell bioprocess for the removal of heavy metals from aqueous flows. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* nr 49, s. 357 – 379.
103. Maćkowiak Cz., Fotyma M., Igras J., 2004; Skład chemiczny osadów ściekowych i odpadów przemysłu spożywczego o znaczeniu nawozowym. VII Konferencja Naukowo – Techniczna Woda-ścieki-odpady w środowisku - Biologiczne przetwarzanie stałych odpadów organicznych. Zielona Góra, 9-10 wrzesień 2004 r.
104. Madoni P., Davoli D., Gorbi G., Vescoli L., 1996: Toxic effect of heavy metals on the activated sludge Protozoan community. *Water Research* Nr 30, s. 135 – 141.
105. Madonii P., Davoli D., Gorbi G., Vescovi L., 1995: Toxic effect of heavy metals on the activated sludge protozoan community. *Water Research*. Vol. 30, nr 1. s. 135 – 141.
106. Magalhaes J., Silna J. E., Castro F.P., Labrincha J. A., 2005: Physical and chemical characterisation of metal finishing industrial wastes. *Journal of Environmental Management* Nr 75, s. 157 – 166.
107. Malik A., Ahmad M., 2000: Seasonal variation in bacterial flora of the wastewater and soil in the vicinity of industrial area. *Environ. Monitor. And Asses.* 73. s. 263 – 273.
108. Maliszewska – Korczyk B. 1991: Biodegradacja wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w glebach narażonych uprzednio na wpływ tych związków. *Arch. Ochr. Środ.* 2, s. 139 – 149.
109. Marcinkowski T. 2003, Wpływ stabilizacji osadów wtórnych wodorotlenkiem wapnia na ich skład biologiczny. *Ochrona Środowiska*. R. 25, Nr 2, s. 49-55.
110. Mazur T., 1996: Rozważania o wartości nawozowej osadów ściekowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk. Rol.* 437, s. 17 – 22.
111. Mazur T., 1999: Rozważania o wartości nawozowej osadów ściekowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* Nr 473, s. 13 – 22.
112. Mazur T., Wojtas A., 1993: Charakterystyka chemiczno – rolnicza osadów ściekowych miasta Olsztyna. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 409, s. 9 – 12.
113. McGrath S.P., 1994: Effect of heavy metals from sewage sludge on soils microbes in agricultural ecosystems. W: Ross S.M. (ed) *Toxic metals in soil plant systems*. Wiley, Chichester, s. 247 – 274.

- 114.** McGrath S.P., Chaudri A.M., Giller K. E., 1995: Long – term effects of metals in sewage sludge on soils, microorganism and plants. *Journal of Indian Microbiol.* Nr 45, s. 1829 – 1837.
- 115.** Merrington G., Olivier I., Smernik R.J., McLaughlin , 2003: The influence of sewage sludge properties on sludge – borne metal availability. *Advances in Environmental. And Asses.* 75. s. 293 – 305.
- 116.** Morgan G.B., Lackey J.B., 1958: BOD determinations in wastes containing chelated copper and chromium. *Sewage Ind. Wastes* 30: 283 – 286.
- 117.** Nastaj S., 1999: Wykorzystanie kompostów i innych materiałów organicznych w procesie utylizacji osadów ściekowych. *Mat. Konf.Nauk.Tech. nt.: Kompostowanie i użytkowanie kompostu.* Puławy-Warszawa, s. 211 – 214.
- 118.** Nies D.H., 1999: Microbial heavy – metal resistance. *Microbiol. Biotechnol.* 51. s. 730 – 750.
- 119.** Nowak A., Przybulewska K., Stopa K., Szczykała K., 2001: Wpływ metali ciężkich (Cu, Cd, Pb, Hg) na wybrane elementy cyklu przemian azotowych. *Folia Univ. Agric. Stetin* Nr 221, *Agricultura* (88), s. 159 – 164.
- 120.** Ochrona Środowiska 2005. Informacje i opracowania statystyczne GUS. Warszawa.
- 121.** Oleszczuk P., 2006: kompostowanie jako metoda optymalizacji właściwości osadu ściekowego pod kątem utylizacji rolniczej na przykładzie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). *Ochrona powietrza i problemy Odpadów.* nr 4, s. 135 - 140.
- 122.** Oliver B.G., Cosgrove E.G., 1974: The efficiency of heavy metals removal by the conventional activated sludge treatment plant. *Water Res.* Nr 8, s. 869 – 874.
- 123.** Operat wodno – prawny dla Komunalnej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, 2005.
- 124.** Outwater A. B., 1994; *Reuse of Sludge and Minor Wastewater Residuals.* CRC Press, Inc.
- 125.** Piotrowska M, Dudka A., 1987: Właściwości osadów ściekowych z wybranych średnich oczyszczalni ścieków. *Materiały z I konferencji „Kompostowanie i użytkowanie kompostu ;* Puławy – Warszawa, 16 – 18. 06.1999. s. 36 -42.
- 126.** Pozwolenie wodno – prawne dla Komunalnej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, 2005. (dokument nie publikowany, manuskrypt).
- 127.** Prawo wodne 2001: Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r., *Prawo wodne.* (Dz. U. Nr 115, poz. 1229 z późn. zm.).
- 128.** Principi P., Willa F., Bernasconi M., Zanardini E., 2006: Metal toxicity in municipal wastewater activated sludge investigated by multivariate analysis and in situ hybridization. *Water Research* nr 40 , s. 99 – 106.



- 129.**Renella G., Chaudri P., C., Brookes P.C., 2002: Fresh additions of heavy metals do not model long – term effects on microbial biomass and activity. *Soil Biol. Biochem.* Nr 34, s. 121 – 124.
- 130.** RMŚ, 2002: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. *Dziennik Ustaw* z 2002 r. Nr 134 poz. 1140 z dnia 27 sierpnia 2002 r.
- 131.** RMŚ, 2005: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 lutego 2004 w sprawie klasyfikacji dla prezentowania stanu wód powierzchniowych i podziemnych, sposobu prowadzenia monitoringu oraz sposobu interpretacji wyników i prezentacji stanu tych wód (Dz.U. Nr 32, poz. 284).
- 132.** RMŚ, 2006: Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 w sprawie warunków jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. 06. 137. 984 z dnia 31 lipca 2006).
- 133.** Roszyk E., Roszyk S., Spiak Z, 1987: Wartość nawozowa osadów ściekowych z niektórych południowo – zachodniej Polski. Cz. II. Doświadczenia wegetacyjne. *Rocz. Gleb.* 38, 4, s. 137 – 144.
- 134.** Rutkowska B., Szulc W., Łabętowicz J., Ożarowski G: 1999: Ocena składu chemicznego kompostu „DANO” z punktu widzenia kryteriów rolniczych. *Zesz. Probl. Post. Nuk Rol.* 467, s. 385 – 389.
- 135.** Sadecka Z., Jędrzak A., 2004. Surowce do biologicznego przetwarzania odpadów. VII Konferencja Naukowo . Techniczna .Woda-ścieki-odpady w środowisku – Biologiczne przetwarzanie stałych odpadów organicznych.. Zielona Góra, 9-10 wrzesień 2004 r.
- 136.** Santarsiero A., Veschetii E., Donatii G., Ottavianii M., 1998: Heavy metal distribution in wastewater from a treatment plant. *Microchrm. J.* 59. s. 219 – 227.
- 137.** Sebastian M., Szpadt R., 1999: Zmienność właściwości fizyczno – chemicznych osadów ściekowych. W *Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych III Konferencja Naukowo – Techniczna*, 9 – 11 czerwiec Świnoujście, s. 83 – 90.
- 138.** Shuttleworth K.L., Unz R.F., 1988: Growth of filamentous bacteria in the presence of heavy metals. *Wat. Sci. Technol.* 20: 485 – 487.
- 139.** Siuta i in. [1988]
- 140.** Siuta J, 1996: Rekultywacyjne użytkowanie osadów ściekowych , Konferencja Politechniki Częstochowskiej: Wykorzystanie osadów ściekowych – Techniczne i prawne uwarunkowania, s. 209 – 219, Częstochowa.

- 141.** Siuta J., Wasiak G., Chłopecki K., 1988: Przyrodnicze zagospodarowania osadów ściekowych. PWN. Warszawa.
- 142.** Siuta J., 1997: Zasoby i przyrodnicze użytkowanie odpadów organicznych. AURA nr 2 s. 21-25.
- 143.** Siuta J., 1999a: Zasoby surowców do produkcji kompostów. Ochr. Środ. I Zasobów Nat. nr 17, s. 137 – 155.
- 144.** Siuta J., 1999b: Kompostowanie i wartość użytkowa kompostów. W Kompostowanie i użytkowanie kompostu I Konferencja Naukowo – Techniczna Puławy – Warszawa 16-18.06.1999 Wydawnictwo Ekoinżynieria Lublin s. 7 – 20.
- 145.** Siuta J., 1999c: Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych. W Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych III Konferencja Naukowo – Techniczna, 9 – 11 czerwiec Świnoujście, s. 21 – 36.
- 146.** Siuta J., 1999d: Sposoby przyrodniczego użytkowania osadów ściekowych. W Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych III Konferencja Naukowo – Techniczna, 9 – 11 czerwiec Świnoujście, s. 7 – 20.
- 147.** Siuta J., Wasiak G., Mamełka D., 2000: Zasoby zieleni miejskiej oraz jakość kompostu z tych odpadów. Ochr. Środ. I Zasobów Nat. nr 20, s. 111 – 123.
- 148.** Skłodowska A., 2000: Biologiczne metody ługowania metali ciężkich – biohydrometalurgia. Post. Mikrobiol. Nr 39, s. 73 – 89.
- 149.** Słaba M., Długoński J., 2002, Mikrobiologiczne usuwanie i odzyskiwanie metali ciężkich. Post. Mikrobiol. 41,2,167-183.
- 150.** Sorme L., 2003: Capacity to influence Sources of heavy metals to wastewater treatment sludge. Environmental Management Vol. 31, Nr 3, s. 412 – 428.
- 151.** stałych odpadów organicznych. Zielona Góra, 9-10 wrzesień 2004 r.
- 152.** Stasinakis A. S., Thomaidis N.S., Lekkas T.D., 2001: Toxicity of organic compounds to activated sludge. Ecotoxicol. Environ. Saf. 49, s. 275 – 280.
- 153.** Stasinakis A. S., Thomaidis N.S., Mamais D., Papanikolaou E.C., Tsakon A., Lekkas T.D., 2003 : Effect of chromium (VI) addition on the activated sludge process, Water Research 37, s. 2140 – 2148.
- 154.** Stefanowicz T., Napieralska-Zagozda S., Osińska M., 1996: Próby usuwania metali ze ścieków pogalwanicznych z użyciem elektrokoagulantu Hydrostar. Archiwum Ochrony Środowiska. 3-4, s. 83-96.
- 155.** Su M., Cha D.K., Andersen P.R., 1995: Influence of selector technology on heavy metal removal by activated sludge: Secondary effect of selector technology. Water Research Vol. 29, Nr 3, s. 971 – 976.

- 156.**Surittanonta S., Sherrad J.H., 1981: Activated sludge nickel toxicity studies. *J. Water Pollut. Control Fed.* 53: 1314 – 1322.
- 157.**Tsai Y.P., You S.J., Pai T., Y., Chen K., W., 2005: Effect of cadmium on composition and diversity of bacterial communities in activated sludge. *Inter. Biodeter. & Biodegrad.* 55. s. 285 – 291.
- 158.**Tyszka M., Starzyk K., Międzybrodzki J., 1998: Rola biocenozy w oczyszczaniu ścieków metodą osadu czynnego. *Aura* 2 (98): 10 – 12.
- 159.**Unz R. F., Shuttleworth K. L., 1996: Microbial mobilization and immobilization of heavy metals. *Biotechnology* Nr 7, s. 307 – 310.
- 160.**Urbaniak M., 1997: Przerób i wykorzystanie osadów ze ścieków komunalnych, Wyd. Ekoinżynieria, Lublin – Łódź.
- 161.**Urbaniak M., Mokrzycka – Witeska B., 1999: Wpływ niektórych środków chemicznych, wspomagających oczyszczanie ścieków na wartość nawozową kompostowanych osadów. W *Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych III Konferencja Naukowo – Techniczna*, 9 – 11 czerwiec Świnoujście, s. 119 – 123.
- 162.**Urbaniak M., Mokrzycka B., 1996: Badania nad kompostowaniem osadów ściekowych jako element gospodarki osadowej dużej oczyszczalni. *Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej*, nr 756, s. 91 – 102.
- 163.**Ustawa o nawozach i nawożeniu z dnia 26 lipca 2000 [Dz. U. Nr 89, poz. 991]
- 164.**Ustawa o odpadach, 2001.: Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Dziennik Ustaw* z dnia 20 czerwca 2001 r. Nr 62 poz. 628
- 165.**Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r., o ochronie gruntów rolnych i leśnych [Dz.U. Nr 16, poz. 78, z późn. zm.];
- 166.**Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 roku o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz. U. Nr 72, poz. 747 z późn. zmian.).
- 167.**Valix M., Tang J.Y., Malik R., 2001: Heavy metals tolerance of fungi. *Minerals Engineering* Vol. 14, Nr 5, s. 499 – 505.
- 168.**Volesky B., Holan Z., S., 1995: Biosorption of heavy metals. *Biotechnolog. Prog.* Nr 11, s. 235 – 250.
- 169.**Waara K.O., 1992: Effect of copper, cadmium, lead and zinc on nitrate reduction in a synthetic water medium and lake water from northern Sweden. *Water Research* Nr 26, s. 355 – 364.
- 170.**Wang Ch., Hu X., Chen M., Wu Y., 2005: Total concentration and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants. *Jurnal of Hazardous Materials B* 119, s. 245 – 249.

- 171.** Wang J.Y., Zhang D.S., Stabnikowa O., Tay J.H., 2005: Evaluation of electrokinetic removal of heavy metals from sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*, B124: 139 – 146.
- 172.** Wasiak G., Mamełka D., 1999: Kompostowanie frakcji organicznej wyselekcjonowanej z odpadów komunalnych w Warszawie. Materiały z I konferencji „Kompostowanie i użytkowanie kompostu”. Puławy – Warszawa, 16 – 18. 06.1999. s. 21 - 30.
- 173.** Wild S.R., Obbard J.P., Munn C.I., Berrow M.L., Jonnes K.C., 1991: The long – term persistence of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) in an agricultural soils amended with metal – contaminated sewage sludges. *Sci. Total Environ.* 101: 235 – 253.
- 174.** Wystalska K., Matysiak B., Jabłońska A., Bień J.D.: 1999: Możliwości przyrodniczego wykorzystania osadów z oczyszczalni ścieków. W *Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych III Konferencja Naukowo – Techniczna*, 9 – 11 czerwiec Świnoujście, s. 105 – 112.
- 175.** Yetis U., Gokcay C.F., 1989: Effect of nickel II on activated sludge. *Water Research* Nr 23, s. 1003 – 1007.
- 176.** Zarzycki R., Wielgoński G., 2003: Osady ściekowe. Najważniejsze problemy zagospodarowania. *Techniczne problemy zarządzania środowiskiem w Łodzi* pod redakcją R. Zarzyckiego. PAN oddział w Łodzi Komisja Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej: 139-165.

## 8. SPIS TABEL

- Tabela 1.** Koncentracja metali ciężkich w ściekach w  $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  różnych gałęzi przemysłu [Chełmiński 2002 za Henry, Heinke 1989]
- Tabela 2.** Przystosowanie mikroorganizmów osadu czynnego do warunków podwyższonej koncentracji metali ciężkich
- Tabela 3.** Średnie zawartości makroskładników komunalnych osadach ściekowych pochodzących z różnych oczyszczalni ścieków
- Tabela 4.** Zawartości metali ciężkich w osadach ściekowych  $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  s.m. pochodzących z różnych oczyszczalni ścieków
- Tabela 5.** Zakres i metodyka analiz chemicznych próbek ściekach surowych, oczyszczonych i osadu czynnego pobranych z terenu Miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu.
- Tabela 6.** Zakres analiz i metodyka badań próbek ustabilizowanego osadu ściekowego
- Tabela 7.** Zestawienie rodzajowe materiałów organicznych objętych analizą chemiczną, pod kątem możliwości ich wykorzystania do produkcji kompostów (ocena źródła podstawowych składników)
- Tabela 8.** Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek organicznych materiałów strukturotwórczych
- Tabela 9.** Zakres i metodyka badań pobranych świeżych próbek masy kompostowej i kompostów
- Tabela 10.** Zakres i metodyka badań pobranych świeżych i powietrznie suchych prób masy kompostowej i kompostów
- Tabela 11.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w próbach ścieków surowych [ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ];
- Tabela 12.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji [ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ] metali ciężkich w próbach osadu czynnego
- Tabela 13.** Wartości istotnych ( $p < 0,05$ ) współczynników korelacji liniowej Pearsona między stężeniem analizowanych metali w osadzie czynnym a ściekiem surowym
- Tabela 14.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w próbach ścieków oczyszczonych [ $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ]
- Tabela 15.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w próbach ustabilizowanego i odwodnionego osadu ściekowego
- Tabela 16.** Średnia zawartość składników nawozowych w komunalnych osadach ściekowych powstających na terenie miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu.
- Tabela 17.** Charakterystyka osadów ściekowych z Kozienic, Piotrkowa Trybunalskiego i Puław [za Piotrkowska i Dudka, 1987]

**Tabela 18.** Podstawowe parametry statystyczne koncentracji metali ciężkich w próbkach ustabilizowanego i odwodnionego osadu nadmiernego [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

**Tabela 19.** Średnia zawartość metali ciężkich ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.) w wyselekcjonowanych partiach osadów ściekowych z Oczyszczalni Ścieków w Reczu, przeznaczonych do utworzenia warstwy glebotwórczej na rekultywowanym składowisku, w odniesieniu do wartości limitowanych

**Tabela 20.** Dopuszczalna dawka osadów ściekowych wykorzystywanych przy dostosowywaniu gruntów do potrzeb wynikających z Gminnego Planu Gospodarki Odpadami Gminy Recz,

**Tabela 21.** Koncentracja metali ciężkich w przebadanych dodatkach organicznych

**Tabela 22.** Zmienność podstawowych właściwości chemicznych kompostu „jesiennego”

**Tabela 23.** Zmienność podstawowych właściwości chemicznych kompostu „wiosennego”

**Tabela 24.** Wartość nawozowa uzyskanych kompostów z osadów ściekowych

**Tabela 25.** Koncentracja metali ciężkich w uzyskanych kompostach z osadów ściekowych

**Tabela 26** Zmiany koncentracji metali ciężkich w dojrzałych kompostach w porównaniu z materiałem wyjściowym – stałym osadem ściekowym.

## 9. SPIS RYCIN

- Ryc.1.** Ilość ścieków przemysłowych i komunalnych odprowadzanych do wód lub ziemi w latach 1980 – 2004 (opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)
- Ryc.2.** Ilość ścieków przemysłowych i komunalnych oraz sposoby ich oczyszczania (opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)
- Ryc.3.** Jakość wód w rzekach Polskich w roku 2004 (opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)
- Ryc.4.** Jakość wód jezior w Polsce w roku 2004 (opracowanie własne na podstawie danych GUS 2005)
- Ryc.5.** Schemat oczyszczania ścieków metodą biologiczną z wykorzystaniem osadu czynnego [opracowanie własne na podstawie danych literaturowych]
- Ryc.6.** Ilość wytwarzanych osadów ściekowych na terenie kraju w latach 2000 – 2004 [opracowanie własne na podstawie GUS 2005]
- Ryc.7.** Sposoby zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych wytwarzanych w Polsce w latach 2000 – 2004 (opracowanie własne na podstawie GUS 2005)
- Ryc.8.** Położenie gminy Recz (opracowanie własne)
- Ryc.9.** Blokowy schemat technologiczny Miejskiej Oczyszczalni ścieków w Reczu (opracowanie własne na podstawie „Instrukcji eksploatacji oczyszczalni ścieków w Reczu” [1994])
- Ryc.10.** Miejsca poboru próbek na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu (opracowanie własne na podstawie „Instrukcji eksploatacji oczyszczalni w Reczu, 1994)
- Ryc.11.** Schemat poboru próbek ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych z terenu Miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu
- Ryc.12.** Materiały użyte do ukształtowania pierwszej pryzmy kompostowej (jesień 2004)[fot. E. Dusza]
- Ryc.13.** Materiały organiczne wykorzystane do uformowania drugiej”wiosennej” pryzmy kompostowej (wiosna 2005)[fot. E.Dusza]
- Ryc.14.** Miejsce ukształtowania „pryzmy wiosennej” na terenie Miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu
- Ryc.15.** Lokalizacja Miejskiej oczyszczalni ścieków w Reczu [opracowanie własne na podstawie [www.zumi.pl](http://www.zumi.pl)]
- Ryc.16.** Zmiany w stężeniach miedzi w ściekach surowych w porównywanych okresach: A - 5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005

- Ryc.17.** Porównanie stwierdzonych koncentracji metali ciężkich w ściekach surowych pobranych na terenie galwanizerni w Reczu z wartością dopuszczalną [RMS 2006].  
Objaśnienia: 1.- wartość dopuszczalna [RMS 2006]; 2.- podczyszczony ściek surowy z dnia 18.08.2004r.; 3- podczyszczony ściek surowy z dnia 29.03.2005r., 4.- podczyszczony ściek surowy z dnia 4.05.2005r. (opracowanie własne na podstawie wyników ZWiK w Stargardzie Szczecińskim)
- Ryc.18.** Zmiany w stężeniach chromu w ściekach surowych w porównywanych okresach: A - 5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005
- Ryc.19.** Zmiany w stężeniach niklu w ściekach surowych w porównywanych okresach: A - 5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005
- Ryc.20.** Zmiany w stężeniach cynku w ściekach surowych w porównywanych okresach: A - 5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005
- Ryc.21.** Zmiany w stężeniach ołowiu w ściekach surowych w porównywanych okresach: A - 5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005
- Ryc.22.** Zmiany w stężeniach kadmu w ściekach surowych w porównywanych okresach: A - 5.03.- 24.05.2005 oraz B -17.08-10.10.2005
- Ryc.23.** Zmiany w stężeniach miedzi w osadzie czynnym w porównywanych okresach: A - 9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005
- Ryc.24.** Zmiany w stężeniach chromu w osadzie czynnym w porównywanych okresach: A - 9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005
- Ryc.25.** Zmiany w stężeniach niklu w osadzie czynnym w porównywanych okresach: A - 9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005
- Ryc.26.** Zmiany w stężeniach cynku w osadzie czynnym w porównywanych okresach: A - 9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005
- Ryc.27.** Zmiany w stężeniach ołowiu w osadzie czynnym w porównywanych okresach: A - 9.02. - 21.05.2004 oraz B -1.08-10.10.2005
- Ryc.28.** Zmiany w stężeniach Cu, Cr, Ni w ściekach oczyszczonych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu
- Ryc.29.** Zmiany w stężeniu cynku w ściekach oczyszczonych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu
- Ryc.30.** Koncentracja Cu, Cr, Ni i Pb w ściekach surowych, osadzie czynnym i ściekach oczyszczonych
- Ryc.31.** Koncentracja cynku w ściekach surowych, osadzie czynnym i ściekach oczyszczonych
- Ryc.32.** Efektywność usuwania metali ciężkich ze ścieków w Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu



- Ryc.33.** Koncentracja metali ciężkich w osadach ściekowych pochodzących z różnych, średniej wielkości oczyszczalni ścieków
- Ryc.34.** Procent ogólnej ilości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych w latach 1994-2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, odpowiadający określonym sposobom ich wykorzystania obliczony na podstawie porównania koncentracji niklu, miedzi w osadach z wartościami limitowanymi [RMS 2002].  
Objaśnienia: Wartość limitowana A – przy wykorzystaniu osadów ściekowych w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne; B – przy wykorzystaniu osadów ściekowych do rekultywacji gruntów na cele nierolne; C – przy wykorzystaniu osadów ściekowych przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z decyzji administracyjnych, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostów, do uprawy roślin nie przeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.
- Ryc.35.** Procent ogólnej ilości ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych zgromadzonych w latach 1994-2003 na terenie Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Reczu, odpowiadający określonym sposobom ich wykorzystania obliczony na podstawie porównania koncentracji chromu i cynku w osadach z wartościami limitowanymi [RMS 2002]. Zawartości chromu i cynku [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] w osadach w odniesieniu do koncentracji limitowanych Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. Nr 02.134.1140) (Objaśnienia jak na ryc. 34).
- Ryc.36.** Zmiany termiczne w pryzmie „jesiennej”
- Ryc.37.** Zmiany termiczne w pryzmie "wiosennej”
- Ryc.38.** Osady ściekowe w kwaterze odwadniającej przed (A) i po (B) zmieszaniu z dodatkami organicznymi [fot. E. Dusza]
- Ryc.39.** Osad ściekowy użyty do uformowania pryzmy wiosennej (A) oraz mieszanie osadu ściekowego z dodatkami organicznymi (B) [fot. E. Dusza].

## 10. ZAŁĄCZNIKI

### ZAŁĄCZNIK 1

Zawartość [mg · dm<sup>-3</sup>] metali ciężkich w próbkach ścieków surowych pobieranych w okresie 5.03.2005 – 25.05.2005 r. (Seria I)

Data poboru próbek	Metale ciężkie					
	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd
5.03.2005	0,05	0,001	0,022	0,55	0,008	0,001
6.03.2005	0,05	0,001	0,008	0,31	0,013	0,001
7.03.2005	0,08	0,001	0,011	0,37	0,020	0,001
8.03.2005	0,03	0,002	0,012	0,23	0,018	0,002
9.03.2005	0,03	0,003	0,007	0,16	0,028	0,002
10.03.2005	0,02	0,004	0,003	0,12	0,017	0,002
11.03.2005	0,02	0,001	0,005	0,18	0,018	0,003
12.03.2005	0,03	0,001	0,004	0,16	0,028	0,003
13.03.2005	0,03	0,001	0,015	0,18	0,034	0,004
14.03.2005	0,02	0,002	0,005	0,18	0,025	0,004
15.03.2005	0,02	0,002	0,001	0,12	0,018	0,004
16.03.2005	0,02	0,001	0,001	0,16	0,010	0,001
17.03.2005	0,05	0,001	0,007	0,31	0,040	0,002
18.03.2005	0,01	0,001	0,001	0,10	0,015	0,002
19.03.2005	0,02	0,001	0,006	0,16	0,014	0,002
20.03.2005	0,02	0,002	0,005	0,14	0,032	0,002
21.03.2005	0,02	0,001	0,005	0,09	0,027	0,003
22.03.2005	0,02	0,002	0,001	0,13	0,013	0,003
23.03.2005	0,01	0,003	0,003	0,14	0,017	0,003
24.03.2005	0,01	0,004	0,003	0,08	0,014	0,003
25.03.2005	0,07	0,007	0,021	0,41	0,024	0,001
26.03.2005	0,01	0,004	0,001	0,15	0,026	0,001
27.03.2005	0,02	0,003	0,001	0,23	0,020	0,001
28.03.2005	0,02	0,002	0,001	0,14	0,019	0,001
29.03.2005	0,07	0,002	0,003	0,12	0,024	0,001
30.03.2005	0,04	0,001	0,005	0,22	0,019	0,002
31.03.2005	0,02	0,001	0,001	0,11	0,013	0,003
1.04.2005	0,01	0,001	0,001	0,10	0,025	0,002
2.04.2005	0,01	0,001	0,002	0,08	0,023	0,003
3.04.2005	0,03	0,001	0,003	0,19	0,031	0,003
4.04.2005	0,01	0,001	0,003	0,09	0,003	0,003
5.04.2005	0,02	0,001	0,003	0,13	0,004	0,001
6.04.2005	0,04	0,001	0,012	0,28	0,019	0,002
7.04.2005	0,01	0,001	0,001	0,09	0,018	0,002
8.04.2005	0,01	0,001	0,002	0,10	0,015	0,002
9.04.2005	0,03	0,001	0,002	0,12	0,024	0,003
10.04.2005	0,04	0,001	0,008	0,26	0,036	0,003
11.04.2005	0,14	0,001	0,016	0,50	0,022	0,003
12.04.2005	0,05	0,001	0,008	0,27	0,013	0,003
13.04.2005	0,03	0,001	0,001	0,15	0,025	0,004
14.04.2005	0,02	0,001	0,001	0,19	0,005	0,004

15.04.2005	0,06	0,001	0,003	0,32	0,005	0,001
16.04.2005	0,02	0,001	0,001	0,13	0,008	0,001
17.04.2005	0,02	0,001	0,001	0,12	0,001	0,001
18.04.2005	0,02	0,001	0,001	0,15	0,008	0,002
19.04.2005	0,01	0,001	0,001	0,10	0,021	0,002
20.04.2005	0,03	0,002	0,001	0,16	0,023	0,002
21.04.2005	0,02	0,001	0,001	0,10	0,022	0,002
22.04.2005	0,05	0,001	0,006	0,29	0,029	0,002
23.04.2005	0,02	0,001	0,001	0,10	0,032	0,003
24.04.2005	0,03	0,001	0,001	0,12	0,008	0,003
25.04.2005	0,02	0,002	0,002	0,12	0,008	0,002
26.04.2005	0,02	0,003	0,001	0,07	0,008	0,002
27.04.2005	0,04	0,001	0,002	0,13	0,012	0,002
28.04.2005	0,02	0,001	0,001	0,09	0,014	0,002
29.04.2005	0,01	0,001	0,001	0,08	0,017	0,002
30.04.2005	0,03	0,001	0,001	0,11	0,022	0,002
1.05.2005	0,04	0,001	0,002	0,16	0,001	0,003
2.05.2005	0,01	0,001	0,001	0,08	0,001	0,003
3.05.2005	0,04	0,002	0,001	0,18	0,001	0,003
4.05.2005	0,09	0,002	0,008	0,04	0,047	0,003
5.05.2005	0,02	0,003	0,001	0,07	0,016	0,001
6.05.2005	0,02	0,004	0,003	0,10	0,019	0,001
7.05.2005	0,02	0,004	0,001	0,09	0,028	0,001
8.05.2005	0,12	0,005	0,012	0,46	0,034	0,001
9.05.2005	0,02	0,002	0,001	0,11	0,014	0,002
10.05.2005	0,02	0,002	0,001	0,16	0,015	0,002
11.05.2005	0,02	0,003	0,001	0,12	0,015	0,002
12.05.2005	0,01	0,003	0,001	0,12	0,023	0,002
13.05.2005	0,01	0,002	0,001	0,12	0,030	0,002
14.05.2005	0,02	0,002	0,002	0,14	0,006	0,003
15.05.2005	0,04	0,001	0,005	0,36	0,015	0,001
16.05.2005	0,02	0,001	0,003	0,12	0,006	0,001
17.05.2005	0,04	0,001	0,006	0,16	0,006	0,001
18.05.2005	0,01	0,001	0,001	0,09	0,010	0,001
19.05.2005	0,02	0,001	0,002	0,07	0,001	0,001
20.05.2005	0,03	0,001	0,001	0,13	0,006	0,001
21.05.2005	0,06	0,001	0,004	0,20	0,009	0,001
22.05.2005	0,02	0,001	0,003	0,08	0,001	0,001
23.05.2005	0,03	0,001	0,001	0,13	0,009	0,001
24.05.2005	0,05	0,001	0,001	0,42	0,017	0,001
25.05.2005	0,04	0,001	0,001	0,46	0,015	0,001
x	<b>0,030</b>	<b>0,002</b>	<b>0,004</b>	<b>0,172</b>	<b>0,017</b>	<b>0,002</b>
min	<b>0,006</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,035</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
max	<b>0,141</b>	<b>0,007</b>	<b>0,022</b>	<b>0,547</b>	<b>0,047</b>	<b>0,004</b>
S	<b>0,023</b>	<b>0,001</b>	<b>0,004</b>	<b>0,108</b>	<b>0,010</b>	<b>0,001</b>
V [%]	<b>77,14</b>	<b>68,46</b>	<b>116,00</b>	<b>62,64</b>	<b>58,03</b>	<b>45,28</b>

## ZAŁĄCZNIK 2

Zawartość [mg · dm<sup>-3</sup>] metali ciężkich w próbkach ścieków surowych pobieranych w okresie  
17.08.2005 – 10.10..2005 r. (Seria II)

Data poboru próbek	Metale ciężkie					
	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd
17.08.2005	0,013	0,006	0,004	0,150	0,001	0,001
18.08.2005	0,013	0,004	0,006	0,068	0,001	0,001
19.08.2005	0,006	0,001	0,001	0,338	0,001	0,001
20.08.2005	0,007	0,001	0,004	0,095	0,001	0,001
21.08.2005	0,010	0,001	0,005	0,205	0,001	0,001
22.08.2005	0,012	0,003	0,007	0,122	0,001	0,001
23.08.2005	0,049	0,008	0,061	0,130	0,001	0,001
24.08.2005	0,019	0,001	0,008	0,059	0,001	0,001
25.08.2005	0,025	0,004	0,016	0,074	0,001	0,001
26.08.2005	0,051	0,010	0,017	0,224	0,001	0,001
27.08.2005	0,029	0,006	0,005	0,094	0,009	0,001
28.08.2005	0,004	0,008	0,005	0,145	0,002	0,001
29.08.2005	0,022	0,008	0,003	0,207	0,014	0,001
30.08.2005	0,060	0,013	0,005	0,271	0,037	0,002
31.08.2005	0,025	0,002	0,003	0,203	0,014	0,002
1.09.2005	0,010	0,001	0,003	0,068	0,026	0,001
2.09.2005	0,004	0,001	0,004	0,148	0,019	0,001
3.09.2005	0,007	0,001	0,018	0,110	0,008	0,002
4.09.2005	0,017	0,001	0,010	0,094	0,010	0,002
5.09.2005	0,008	0,001	0,003	0,104	0,006	0,002
6.09.2005	0,015	0,001	0,011	0,077	0,004	0,001
7.09.2005	0,015	0,001	0,010	0,074	0,008	0,001
8.09.2005	0,062	0,001	0,009	0,084	0,014	0,001
9.09.2005	0,015	0,001	0,009	0,117	0,019	0,001
10.09.2005	0,008	0,001	0,004	0,059	0,015	0,001
11.09.2005	0,031	0,001	0,009	0,135	0,018	0,001
12.09.2005	0,027	0,001	0,009	0,137	0,021	0,001
13.09.2005	0,028	0,001	0,007	0,187	0,015	0,001
14.09.2005	0,032	0,001	0,008	0,144	0,009	0,001
15.09.2005	0,027	0,001	0,008	0,113	0,017	0,001
16.09.2005	0,123	0,010	0,011	0,406	0,051	0,001
17.09.2005	0,032	0,003	0,002	0,159	0,001	0,001
18.09.2005	0,020	0,004	0,002	0,133	0,001	0,001
19.09.2005	0,086	0,011	0,012	0,290	0,001	0,001
20.09.2005	0,026	0,007	0,001	0,132	0,001	0,001
21.09.2005	0,022	0,009	0,001	0,123	0,001	0,001
22.09.2005	0,045	0,011	0,001	0,195	0,001	0,001
23.09.2005	0,033	0,009	0,004	0,142	0,003	0,001
24.09.2005	0,094	0,013	0,005	0,296	0,012	0,001
25.09.2005	0,102	0,010	0,005	0,130	0,001	0,001
26.09.2005	0,039	0,001	0,007	0,143	0,002	0,001
27.09.2005	0,013	0,001	0,006	0,065	0,008	0,001
28.09.2005	0,022	0,001	0,002	0,091	0,001	0,001
29.09.2005	0,043	0,001	0,007	0,143	0,001	0,001
30.09.2005	0,032	0,001	0,002	0,114	0,001	0,001
1.10.2005	0,045	0,001	0,007	0,161	0,001	0,001

<b>2.10.2005</b>	0,040	0,001	0,005	0,144	0,003	0,001
<b>3.10.2005</b>	0,025	0,001	0,005	0,115	0,001	0,001
<b>4.10.2005</b>	0,024	0,001	0,005	0,100	0,003	0,001
<b>5.10.2005</b>	0,018	0,001	0,006	0,103	0,033	0,001
<b>6.10.2005</b>	0,016	0,001	0,007	0,116	0,005	0,001
<b>7.10.2005</b>	0,021	0,001	0,007	0,103	0,002	0,001
<b>8.10.2005</b>	0,028	0,002	0,010	0,103	0,005	0,001
<b>9.10.2005</b>	0,025	0,003	0,009	0,100	0,006	0,001
<b>10.10.2005</b>	0,039	0,008	0,007	0,155	0,005	0,001
<b>x</b>	<b>0,030</b>	<b>0,002</b>	<b>0,004</b>	<b>0,172</b>	<b>0,017</b>	<b>0,002</b>
<b>min</b>	<b>0,006</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,035</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>
<b>max</b>	<b>0,141</b>	<b>0,007</b>	<b>0,022</b>	<b>0,547</b>	<b>0,047</b>	<b>0,004</b>
<b>S</b>	<b>0,023</b>	<b>0,001</b>	<b>0,004</b>	<b>0,108</b>	<b>0,010</b>	<b>0,001</b>
<b>V [%]</b>	<b>77,14</b>	<b>68,46</b>	<b>116,00</b>	<b>62,64</b>	<b>58,03</b>	<b>45,28</b>

## ZAŁĄCZNIK 3

Zawartość [mg · dm<sup>-3</sup>] metali ciężkich w próbkach osadu czynnego pobieranych w okresie  
9.02.2004 – 21.05.2004 r. (Seria I)

Data poboru próbki	Metale ciężkie					
	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd
9.02.2004	1,77	0,16	1,13	6,65	0,17	0,001
10.02.2004	1,36	0,12	0,84	5,16	0,15	0,001
11.02.2004	2,26	0,19	1,31	8,03	0,21	0,002
12.02.2004	1,38	0,12	0,74	4,39	0,15	0,001
13.02.2004	1,49	0,13	0,76	4,61	0,17	0,001
14.02.2004	1,07	0,10	0,48	3,33	0,10	0,001
15.02.2004	1,51	0,14	0,71	4,73	0,17	0,001
16.02.2004	1,30	0,12	0,58	4,61	0,14	0,001
17.02.2004	1,39	0,12	0,59	4,47	0,14	0,001
18.02.2004	1,13	0,10	0,42	3,49	0,11	0,001
19.02.2004	1,57	0,13	0,62	6,50	0,15	0,001
20.02.2004	1,39	0,11	0,54	5,55	0,11	0,001
8.03.2004	1,59	0,12	0,47	6,19	0,11	0,001
9.03.2004	1,90	0,15	0,60	8,10	0,13	0,001
10.03.2004	1,90	0,15	0,59	8,62	0,14	0,001
11.03.2004	1,67	0,13	0,47	6,67	0,12	0,001
12.03.2004	1,65	0,13	0,44	6,47	0,12	0,001
13.03.2004	2,06	0,16	0,57	8,04	0,10	0,001
14.03.2004	1,04	0,08	0,29	4,17	0,08	0,001
15.03.2004	1,75	0,14	0,44	6,67	0,14	0,001
16.03.2004	1,57	0,13	0,41	6,25	0,10	0,001
17.03.2004	1,16	0,09	0,28	4,81	0,08	0,001
18.03.2004	1,20	0,09	0,28	4,33	0,07	0,001
19.03.2004	1,26	0,10	0,29	4,74	0,08	0,001
20.03.2004	1,30	0,09	0,30	4,95	0,09	0,001
21.03.2004	1,34	0,10	0,31	5,34	0,11	0,001
22.03.2004	1,27	0,09	0,29	5,13	0,10	0,001
23.03.2004	1,12	0,08	0,24	4,21	0,07	0,001
24.03.2004	1,40	0,10	0,31	5,59	0,11	0,002
25.03.2004	1,22	0,09	0,25	4,41	0,10	0,001
26.03.2004	1,38	0,09	0,29	5,11	0,11	0,003
27.03.2004	1,44	0,10	0,30	5,00	0,10	0,008
28.03.2004	1,23	0,09	0,27	3,94	0,08	0,033
29.03.2004	1,42	0,10	0,32	5,01	0,11	0,010
30.03.2004	3,51	0,13	0,38	7,26	0,12	0,012
31.03.2004	2,07	0,15	0,45	7,88	0,08	0,020
1.04.2004	2,34	0,18	0,45	6,83	0,13	0,010
2.04.2004	2,42	0,20	1,71	6,05	0,15	0,008
3.04.2004	1,40	0,15	2,09	3,50	0,08	0,004
4.04.2004	6,76	0,40	2,34	30,87	0,48	0,001
5.04.2004	6,87	0,44	5,99	20,41	0,40	0,003
6.04.2004	13,09	0,20	2,96	7,15	0,14	0,014
7.04.2004	3,90	0,17	1,96	6,07	0,14	0,011
8.04.2004	3,13	0,25	2,99	8,79	0,18	0,017
9.04.2004	3,72	0,37	3,43	8,06	0,13	0,017
10.04.2004	2,92	0,27	2,71	6,65	0,16	0,015

11.04.2004	2,55	0,43	3,21	6,68	0,15	0,012
12.04.2004	4,13	0,81	3,57	10,18	0,11	0,030
13.04.2004	3,77	0,59	3,52	9,57	0,19	0,019
14.04.2004	3,07	0,52	3,33	7,10	0,18	0,018
15.04.2004	2,68	0,43	2,63	6,36	0,15	0,012
16.04.2004	3,40	0,55	3,00	7,86	0,19	0,019
17.04.2004	2,31	0,62	2,55	9,13	0,23	0,023
18.04.2004	2,08	0,29	1,88	4,61	0,13	0,010
19.04.2004	1,94	0,27	1,76	4,56	0,15	0,008
20.04.2004	2,76	0,39	2,38	6,49	0,18	0,017
21.04.2004	1,26	0,16	1,08	3,34	0,09	0,007
22.04.2004	1,96	0,27	1,65	4,69	0,13	0,011
23.04.2004	1,94	0,25	1,60	4,69	0,14	0,011
24.04.2004	2,57	0,36	2,12	7,90	0,20	0,015
25.04.2004	4,32	0,53	3,18	11,67	0,17	0,029
26.04.2004	1,76	0,22	1,40	5,83	0,11	0,009
27.04.2004	2,14	0,27	1,67	5,86	0,14	0,012
28.04.2004	2,21	0,27	1,70	6,56	0,13	0,012
29.04.2004	2,38	0,30	1,81	6,48	0,15	0,014
30.04.2004	4,05	0,37	3,18	12,54	0,25	0,028
1.05.2004	1,70	0,21	1,22	4,86	0,12	0,010
2.05.2004	3,48	0,44	2,49	12,05	0,13	0,024
3.05.2004	2,24	0,25	1,38	6,48	0,18	0,014
4.05.2004	2,68	0,34	1,73	7,70	0,35	0,019
5.05.2004	2,20	0,23	1,27	6,01	0,18	0,012
6.05.2004	2,97	0,34	1,87	9,08	0,24	0,021
7.05.2004	1,97	0,21	1,14	6,58	0,18	0,013
8.05.2004	1,38	0,13	0,80	4,93	0,19	0,011
9.05.2004	2,20	0,23	1,29	7,79	0,23	0,016
10.05.2004	2,76	0,21	1,14	6,39	0,10	0,016
11.05.2004	2,30	0,24	1,27	6,92	0,22	0,015
12.05.2004	1,38	0,14	0,83	4,48	0,13	0,006
13.05.2004	1,42	0,15	0,98	4,49	0,13	0,007
14.05.2004	4,24	0,25	1,73	8,36	0,14	0,013
15.05.2004	2,84	0,31	1,99	9,90	0,18	0,016
16.05.2004	3,08	0,32	2,12	10,87	0,17	0,016
17.05.2004	1,77	0,17	1,16	5,73	0,14	0,008
18.05.2004	2,33	0,24	1,43	7,21	0,18	0,009
19.05.2004	2,82	0,28	1,80	9,16	0,23	0,013
20.05.2004	2,67	0,25	1,70	7,52	0,17	0,012
21.05.2004	1,93	0,19	1,21	5,96	0,14	0,004
x	2,359	0,228	1,402	6,889	0,150	0,009
min	1,035	0,076	0,243	3,333	0,069	0,001
max	13,087	0,814	5,989	30,873	0,480	0,033
S	1,596	0,143	1,083	3,596	0,065	0,008
V [%]	67,66	62,84	77,23	52,20	43,44	87,06

## ZAŁĄCZNIK 4

Zawartość [mg · dm<sup>-3</sup>] metali ciężkich w próbkach osadu czynnego pobieranych w okresie  
1.08.2005 – 10.10.2005 r. (Seria II)

Data poboru próbek	Metale ciężkie					
	Cu	Cr	Ni	Zn	Pb	Cd
1.08.2005	0,847	0,160	0,406	3,090	0,042	0,001
2.08.2005	0,889	0,180	0,415	3,120	0,049	0,001
3.08.2005	0,879	0,180	0,386	3,050	0,045	0,003
4.08.2005	0,754	0,147	0,324	2,540	0,047	0,002
8.08.2005	0,694	0,125	0,265	2,450	0,052	0,003
9.08.2005	0,639	0,111	0,233	2,170	0,042	0,002
10.08.2005	0,760	0,125	0,260	2,730	0,051	0,001
11.08.2005	0,807	0,151	0,269	2,290	0,064	0,004
12.08.2005	0,818	0,147	0,260	3,130	0,052	0,001
13.08.2005	0,686	0,133	0,220	2,690	0,049	0,002
14.08.2005	0,538	0,109	0,121	1,845	0,037	0,001
15.08.2005	0,617	0,119	0,130	2,052	0,047	0,001
16.08.2005	0,448	0,083	0,100	1,585	0,036	0,001
17.08.2005	0,613	0,107	0,130	2,038	0,065	0,001
18.08.2005	0,591	0,106	0,138	2,057	0,050	0,001
19.08.2005	0,578	0,102	0,128	1,918	0,046	0,001
20.08.2005	0,599	0,106	0,132	1,890	0,046	0,001
21.08.2005	0,589	0,100	0,126	1,912	0,053	0,001
22.08.2005	0,539	0,093	0,112	1,869	0,052	0,001
23.08.2005	0,719	0,131	0,237	2,090	0,065	0,002
24.08.2005	0,272	0,055	0,076	1,012	0,018	0,001
25.08.2005	0,640	0,117	0,149	2,023	0,033	0,001
26.08.2005	0,644	0,117	0,147	2,058	0,037	0,001
27.08.2005	0,732	0,096	0,116	1,867	0,038	0,001
28.08.2005	0,773	0,117	0,148	2,096	0,043	0,001
29.08.2005	1,089	0,113	0,138	2,342	0,048	0,001
30.08.2005	0,524	0,090	0,103	1,621	0,036	0,001
31.08.2005	0,701	0,114	0,137	2,063	0,042	0,002
1.09.2005	0,731	0,122	0,142	2,209	0,062	0,002
2.09.2005	0,528	0,084	0,099	1,611	0,045	0,002
3.09.2005	0,574	0,098	0,114	1,809	0,040	0,001
4.09.2005	0,669	0,112	0,140	2,109	0,040	0,001
5.09.2005	0,400	0,069	0,084	1,376	0,034	0,001
6.09.2005	0,709	0,111	0,144	2,182	0,055	0,001
7.09.2005	0,582	0,087	0,118	1,792	0,050	0,001
8.09.2005	0,590	0,093	0,112	1,767	0,049	0,001
9.09.2005	0,481	0,071	0,091	1,414	0,034	0,001
10.09.2005	0,608	0,084	0,114	1,684	0,036	0,002
11.09.2005	0,503	0,079	0,087	1,516	0,031	0,001
12.09.2005	0,644	0,099	0,113	1,947	0,042	0,002
13.09.2005	0,546	0,076	0,102	1,704	0,037	0,001
14.09.2005	0,592	0,080	0,113	1,927	0,043	0,001
15.09.2005	0,628	0,082	0,184	1,953	0,038	0,001
16.09.2005	0,580	0,073	0,103	1,804	0,050	0,001
17.09.2006	0,595	0,073	0,104	1,706	0,070	0,001
18.09.2005	0,706	0,086	0,122	2,078	0,058	0,001



<b>19.09.2005</b>	0,476	0,056	0,091	1,521	0,054	0,001
<b>20.09.2005</b>	0,515	0,067	0,094	1,573	0,062	0,001
<b>21.09.2005</b>	0,566	0,070	0,103	1,692	0,069	0,001
<b>22.09.2005</b>	0,511	0,062	0,096	1,609	0,064	0,001
<b>23.09.2005</b>	0,611	0,081	0,094	1,800	0,049	0,001
<b>24.09.2005</b>	0,439	0,062	0,072	1,367	0,041	0,001
<b>25.09.2005</b>	0,576	0,074	0,078	1,803	0,040	0,001
<b>26.09.2005</b>	0,454	0,058	0,058	1,419	0,036	0,001
<b>27.09.2005</b>	0,412	0,055	0,057	1,325	0,033	0,001
<b>28.09.2005</b>	0,388	0,048	0,054	1,258	0,026	0,001
<b>29.09.2005</b>	0,445	0,049	0,060	1,407	0,036	0,001
<b>30.09.2005</b>	0,428	0,051	0,062	1,377	0,049	0,009
<b>1.10.2005</b>	0,439	0,052	0,062	1,384	0,047	0,002
<b>2.10.2005</b>	0,465	0,057	0,063	1,583	0,047	0,002
<b>3.10.2005</b>	0,445	0,047	0,063	1,464	0,032	0,001
<b>4.10.2005</b>	0,369	0,030	0,056	1,246	0,016	0,001
<b>5.10.2005</b>	0,296	0,021	0,044	1,077	0,018	0,001
<b>6.10.2005</b>	0,451	0,034	0,062	1,513	0,020	0,001
<b>7.10.2005</b>	0,530	0,041	0,071	1,613	0,013	0,001
<b>8.10.2005</b>	0,491	0,042	0,069	1,598	0,016	0,001
<b>9.10.2005</b>	0,514	0,042	0,074	1,561	0,026	0,001
<b>10.10.2005</b>	0,463	0,037	0,073	1,667	0,023	0,001
<b>x</b>	<b>0,587</b>	<b>0,089</b>	<b>0,133</b>	<b>1,868</b>	<b>0,043</b>	<b>0,001</b>
<b>min</b>	<b>0,272</b>	<b>0,021</b>	<b>0,044</b>	<b>1,012</b>	<b>0,013</b>	<b>0,001</b>
<b>max</b>	<b>1,089</b>	<b>0,180</b>	<b>0,415</b>	<b>3,130</b>	<b>0,070</b>	<b>0,009</b>
<b>S</b>	<b>0,147</b>	<b>0,036</b>	<b>0,083</b>	<b>0,470</b>	<b>0,013</b>	<b>0,001</b>
<b>V [%]</b>	<b>24,98</b>	<b>40,3</b>	<b>62,55</b>	<b>25,15</b>	<b>30,62</b>	<b>83,07</b>

## ZAŁĄCZNIK 5

Zawartość makroskładników w ustabilizowanych i odwodnionych osadach ściekowych z  
Miejskiej Oczyszczalni w Reczu składowanych w kwaterach odwadniających w  
latach 1994 – 2003

Nr kwatery	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C	S	Mg	Na
	[%]						
1	3,67	5,35	0,19	28,54	2,41	0,25	0,04
2	3,67	5,34	0,17	25,81	4,77	0,36	0,07
3	4,39	4,12	0,18	29,54	3,62	0,39	0,09
4	2,60	3,98	0,16	21,52	1,93	0,28	0,05
5	3,27	5,19	0,12	24,35	2,26	0,24	0,04
6	3,53	5,73	0,24	26,68	3,27	0,43	0,08
7	3,41	5,41	0,17	27,53	2,51	0,33	0,07
8	3,17	4,02	0,19	23,66	3,41	0,32	0,08
9	2,95	4,23	0,17	25,40	3,63	0,36	0,07
10	3,62	3,98	0,24	25,56	3,96	0,42	0,09
11	3,85	5,12	0,23	27,55	3,67	0,46	0,11
12	1,70	1,86	0,11	24,89	3,12	0,28	0,05
13	2,68	5,06	0,22	21,64	2,05	0,49	0,07
14	3,13	4,73	0,20	24,17	4,41	0,29	0,05
15	3,22	4,22	0,20	25,55	2,87	0,29	0,06
16	3,44	4,58	0,23	27,00	2,22	0,36	0,08
17	1,03	2,69	0,08	11,79	3,31	0,21	0,02
18	2,70	4,2	0,19	23,78	2,04	0,31	0,04
19	2,94	4,32	0,17	24,23	1,93	0,30	0,05
20	3,43	6,11	0,19	26,86	1,83	0,28	0,06
21	3,32	5,63	0,21	27,16	1,89	0,31	0,06
22	3,21	5,85	0,20	25,29	2,25	0,33	0,05
23	2,99	5,25	0,15	25,31	1,83	0,24	0,04
24	3,61	6,14	0,20	27,77	2,03	0,26	0,05
x	3,15	4,71	0,18	25,07	2,80	0,325	0,06
min	1,03	1,9	0,1	11,79	1,8	0,2	0,017
max	4,39	6,1	0,2	29,54	4,8	0,5	0,111
S	0,69	1,03	0,04	3,44	0,89	0,07	0,02
V [%]	21,82	21,81	21,94	13,74	31,60	22,02	33,85

## ZAŁĄCZNIK 6

Podstawowe właściwości ustabilizowanych i odwodnionych osadach ściekowych z Miejskiej  
Oczyszczalni w Reczu składowanych w kwaterach  
odwadniających w latach 1994 – 2003

Nr kwatery	Wilgotność [%]	Zawartość suchej masy [%]	Zawartość substancji org. [%]	pH w H <sub>2</sub> O	przewodnictwo elektryczne [μS/cm]	Zasolenie [gNaCl/dm <sup>3</sup> ]
1	50,50	49,50	57,00	6,57	0,178	0,97
2	51,70	48,30	56,37	5,93	3,890	2,13
3	76,80	23,20	56,62	6,96	2,980	1,63
4	50,60	49,40	53,54	6,40	2,090	1,14
5	60,20	39,80	51,84	6,28	2,540	1,39
6	52,70	47,30	55,76	6,70	2,940	1,61
7	71,20	28,80	59,65	7,03	2,010	1,10
8	52,90	47,10	53,31	5,84	4,310	2,40
9	71,90	28,10	51,17	6,56	2,130	1,17
10	55,80	44,20	53,54	6,40	3,780	2,07
11	79,00	21,00	55,66	6,98	3,220	1,76
12	70,60	29,40	44,82	6,91	0,168	0,92
13	68,30	31,70	45,54	6,44	2,250	1,23
14	69,50	30,50	50,98	5,95	3,120	1,71
15	40,00	60,00	55,65	5,87	2,770	1,52
16	59,70	40,30	54,91	6,66	0,176	0,96
17	39,60	60,40	40,01	6,50	2,070	1,13
18	58,20	41,80	52,41	5,68	2,320	1,27
19	58,70	41,30	54,54	5,74	2,560	1,40
20	67,90	32,10	57,44	6,10	0,150	0,82
21	61,60	38,40	55,09	6,07	0,123	0,67
22	59,40	40,60	57,07	5,59	3,420	1,87
23	57,00	43,00	51,55	5,80	2,040	1,12
24	62,00	38,00	59,17	5,69	2,690	1,47
x	<b>60,2</b>	<b>39,8</b>	<b>53,5</b>	<b>6,3</b>	<b>2,2</b>	<b>1,4</b>
min	<b>39,6</b>	<b>21,0</b>	<b>40,0</b>	<b>5,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,7</b>
max	<b>79,0</b>	<b>60,4</b>	<b>59,7</b>	<b>7,0</b>	<b>4,3</b>	<b>2,4</b>
S	<b>10,3</b>	<b>10,3</b>	<b>4,6</b>	<b>0,5</b>	<b>1,3</b>	<b>0,4</b>
V [%]	<b>17,1</b>	<b>25,95</b>	<b>8,6</b>	<b>7,3</b>	<b>55,7</b>	<b>31,5</b>

## ZAŁĄCZNIK 7

Koncentracja metali ciężkich [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] w ustabilizowanych i odwodnionych osadach ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni w Reczu składowanych w kwaterach odwadniających w latach 1994 – 2003

Nr kwatery	Ni	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	Hg
1	1054	2763	3552	835	185,90	2,40	1,45
2	2139	3985	4805	1197	197,85	3,30	1,73
3	531	1212	2228	230	105,95	1,95	0,99
4	510	1120	1907	241	96,25	2,85	0,71
5	1412	3357	3963	998	185,55	3,05	1,70
6	1103	2456	3245	632	150,50	4,00	1,42
7	560	1374	2565	282	105,10	2,05	1,53
8	522	1010	2090	201	98,20	1,30	1,21
9	546	1260	2292	235	112,60	2,00	1,99
10	360	913	2029	129	85,60	1,45	1,06
11	396	969	2082	154	96,90	2,30	1,81
12	484	607	1323	66	76,90	0,90	2,07
13	581	1376	2456	248	107,85	1,45	1,60
14	1137	2562	3116	677	167,15	1,90	1,89
15	1556	3330	3705	893	198,70	2,30	1,81
16	700	1770	2527	450	170,85	6,05	2,09
17	512	915	1416	181	104,30	0,05	1,52
18	726	2141	3011	410	167,50	3,00	3,61
19	869	2472	2803	590	163,35	2,40	1,78
20	839	2433	2993	575	195,30	3,30	1,78
21	1240	3012	3736	806	178,65	3,85	2,58
22	818	2372	3355	609	171,70	3,10	2,36
23	904	2254	3538	545	145,25	2,40	2,52
24	757	2230	3126	506	183,80	2,15	1,93
<b>x</b>	<b>844</b>	<b>1995,5</b>	<b>2827,6</b>	<b>487,1</b>	<b>143,8</b>	<b>2,48</b>	<b>1,8</b>
<b>min</b>	<b>360,0</b>	<b>607,0</b>	<b>1323,0</b>	<b>66,0</b>	<b>76,9</b>	<b>0,1</b>	<b>0,7</b>
<b>max</b>	<b>2139,0</b>	<b>3985,0</b>	<b>4805,0</b>	<b>1197,0</b>	<b>198,7</b>	<b>6,1</b>	<b>3,6</b>
<b>S</b>	<b>423,97</b>	<b>920,43</b>	<b>841,72</b>	<b>304,69</b>	<b>41,24</b>	<b>1,19</b>	<b>0,60</b>
<b>V [%]</b>	<b>50,23</b>	<b>46,12</b>	<b>29,77</b>	<b>62,55</b>	<b>28,68</b>	<b>47,97</b>	<b>33,11</b>

## SPIS TREŚCI

<b>1. WSTĘP</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PRZEGLĄD LITERATURY</b> .....	<b>3</b>
2.1 STAN I SKŁAD ŚCIEKÓW KOMUNALNYCH.....	3
2.1.1. Charakterystyka ścieków powstających podczas procesów powierzchniowej obróbki metali .....	10
2.2. KOMUNALNE OCZYSZCZALNIE ŚCIEKÓW .....	12
2.2.1. Sposoby oczyszczania ścieków komunalnych .....	13
2.3 WPŁYW METALI CIĘŻKICH NA FUNKCJONOWANIE OSADU CZYNNEGO ..	19
2.4. ILOŚĆ WYTWARZANYCH KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH .....	23
2.5. SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH.....	24
2.5.1. Zawartość makroelementów w komunalnych osadach ściekowych .....	25
2.5.2. Zawartość substancji szkodliwych w komunalnych osadach ściekowych.....	27
2.6. PROBLEMY I OGRANICZENIA W ZAGOSPODAROWANIU KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH.....	29
2.7. SPOSOBY ZAGOSPODAROWANIA KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH .....	31
2.7.1. Stosowanie osadów ściekowych w rolnictwie i do rekultywacji terenów na cele rolne.....	33
2.7.2. Stosowanie osadów ściekowych do rekultywacji na cele nierolne .....	36
2.7.3. Stosowanie komunalnych osadów ściekowych do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu oraz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.....	38
2.7.4. Jakość kompostów z osadów ściekowych.....	39
2.8. SKŁADOWANIE KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH .....	44
<b>3. CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ</b> .....	<b>45</b>
3.1. CHARAKTERYSTYKA GMINY RECZ .....	45
3.2. OPIS KOMUNALNEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU.....	46
3.2.1 Parametry techniczne .....	48
3.2.2. Przebieg procesu oczyszczania ścieków .....	48
<b>4. MATERIAŁ I METODY</b> .....	<b>51</b>
4.1. METODYKA PRAC TERENOWYCH.....	51
4.1.1. Pobór próbek ścieków surowych (nieoczyszczonych) i oczyszczonych .....	51
4.1.2. Pobór próbek osadu czynnego.....	52
4.1.3. Badania ustabilizowanych i odwodnionych osadów ściekowych.....	54
4.1.4. Kompost z osadu ściekowego .....	54
4.1.4.1. Przygotowanie pryzm kompostowych .....	54
4.1.4.2. Skład masy kompostowej.....	54
4.2. ZAKRES I METODY ANALIZ CHEMICZNYCH PRÓBEK.....	58
4.2.1. Analizy ścieków surowych (nieoczyszczonych), ścieków oczyszczonych oraz osadu czynnego .....	58
4.2.1.1. Przygotowanie próbek.....	58
4.2.1.2. Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek.....	59
4.2.2. Ustabilizowane i odwodnione osady ściekowe.....	59
4.2.2.1. Przygotowanie próbek osadów ściekowych.....	59
4.2.2.2. Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek osadów ściekowych .....	60
4.2.3. Badania kompostu z osadów ściekowych .....	61
4.2.3.1. Analiza organicznych materiałów strukturotwórczych wykorzystanych jako dodatki w procesie kompostowania .....	61
4.2.3.2. Zakres i metodyka analizy chemicznej próbek organicznych materiałów strukturotwórczych.....	61
4.2.3.3. Analiza przebiegu procesu kompostowania .....	62

4.2.3.4. Analiza kompostowanego materiału i kompostów .....	63
4.2.3.5. Zakres i metodyka analizy chemicznej badanych próbek kompostowanej masy i kompostu z osadów ściekowych.....	64
4.3. BADANIA KAMERALNE .....	64
4.3.1. Analiza wyników badań i obserwacji.....	64
4.3.2. Opracowanie statystyczne i graficzne wyników .....	65
<b>5. WYNIKI I DYSKUSJA .....</b>	<b>66</b>
5.1. ZMIENNOŚĆ KONCENTRACJI METALI CIĘŻKICH W ŚCIEKACH SUROWYCH, DOPLÝWAJĄCYCH DO MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU.....	67
5.2. ZMIENNOŚĆ KONCENTRACJI METALI CIĘŻKICH W OSADZIE CZYNNYM Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU .....	80
5.3. ZMIENNOŚĆ KONCENTRACJI METALI CIĘŻKICH W ŚCIEKACH OCZYSZCZONYCH Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU.....	92
5.4. EFEKTYWNOŚĆ OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW W MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU.....	94
5.5. WŁAŚCIWOŚCI ODWODNIONYCH I USTABILIZOWANYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU .....	98
5.5.1 Zawartość metali ciężkich.....	101
5.6. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ODWODNIONYCH I USTABILIZOWANYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH Z MIEJSKIEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RECZU.....	104
5.7. KOMPOSTOWANIE USTABILIZOWANYCH I ODWODNIONYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH .....	112
5.7.1. Charakterystyka odpadów organicznych wykorzystanych do kompostowania... ..	112
5.7.2. Ocena intensywności przebiegu procesu kompostowania na podstawie zmian termicznych w pryzmach kompostowych .....	113
5.7.2.1. Zmiany termiczne w „Pryzmie jesiennej” .....	114
5.7.2.2. Zmiany termiczne w „Pryzmie wiosennej” .....	115
5.7.3. Właściwości kompostowanej masy.....	117
5.7.3.1. Wartość nawozowa kompostów .....	120
5.7.3.2. Obciążenie kompostów metalami ciężkimi.....	121
<b>6. WNIOSKI .....</b>	<b>125</b>
<b>7. SPIS LITERATURY .....</b>	<b>127</b>
<b>8. SPIS TABEL .....</b>	<b>140</b>
<b>9. SPIS RYCN .....</b>	<b>142</b>
<b>10. ZAŁĄCZNIKI .....</b>	<b>145</b>
ZAŁĄCZNIK 1 Zawartość [mg · dm <sup>-3</sup> ] metali ciężkich w próbkach ścieków surowych pobieranych w okresie 5.03.2005 – 25.05.2005 r. (Seria I) .....	145
ZAŁĄCZNIK 2 Zawartość [mg · dm <sup>-3</sup> ] metali ciężkich w próbkach ścieków surowych pobieranych w okresie 17.08.2005 – 10.10.2005 r. (Seria II).....	147
ZAŁĄCZNIK 3 Zawartość [mg · dm <sup>-3</sup> ] metali ciężkich w próbkach osadu czynnego pobieranych w okresie 9.02.2004 – 21.05.2004 r. (Seria I) .....	149
ZAŁĄCZNIK 4 Zawartość [mg · dm <sup>-3</sup> ] metali ciężkich w próbkach osadu czynnego pobieranych w okresie 1.08.2005 – 10.10.2005 r. (Seria II).....	151
ZAŁĄCZNIK 5 Zawartość makroskładników w ustabilizowanych i odwodnionych osadach ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni w Reczu składowanych w kwaterach odwadniających w latach 1994 – 2003 .....	153
ZAŁĄCZNIK 6 Podstawowe właściwości ustabilizowanych i odwodnionych osadach ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni w Reczu składowanych w kwaterach.....	154
odwadniających w latach 1994 – 2003 .....	154
ZAŁĄCZNIK 7 Koncentracja metali ciężkich [mg · kg <sup>-1</sup> ] w ustabilizowanych i odwodnionych osadach ściekowych z Miejskiej Oczyszczalni w Reczu składowanych w kwaterach odwadniających w latach 1994 – 2003 .....	155

*Serdeczne podziękowania za poświęcony czas  
i wyrozumiałość składam*

***Panu prof. dr hab Zdzisławowi Zabłockiemu***

*Dziękuję Panu Zbigniewowi Ligusowi  
Burmistrzowi Miasta i Gminy Ręcz za umożliwienie  
realizacji niniejszej pracy dzięki przyznanemu  
stypendium..*

*Serdeczne wyrazy wdzięczności składam także*

***Pani Małgorzacie Kłoczko***

*oraz*

***Panu Andrzejowi Hejzie***

*za okazana pomoc przy tworzeniu tej rozprawy  
doktorskiej.*