

PRZYRODNICZE METODY UNIESZKODLIWIANIA OSADÓW  
Z OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW KOMUNALNYCH  
Z UWZGLĘDNIENIEM EROZJI CHEMICZNEJ

*Julian Paluch<sup>1</sup>, Krzysztof Pulikowski<sup>1</sup>, Lidia Wardecka<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Akademia Rolnicza  
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław  
e-mail: paluch@miks.ar.wroc.pl

<sup>2</sup>Institut Ochrony Środowiska, Oddział we Wrocławiu  
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 39b, 51-618 Wrocław

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu nawożenia gleb osadami wstępnymi ( $150 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s.m.}$ ) na skład roztworu glebowego i wód gruntowych. Ilość wód wsiąkających wzrastała wraz ze wzrostem głębokości umieszczenia powierzchni przechwytyjących wodę. Stosowanie osadów wstępnych z komunalnych oczyszczalni ścieków może spowodować zanieczyszczenie wód gruntowych azotanami, bowiem stężenia tej formy azotu w roztworze glebowym wzrastają nawet do  $43,7 \text{ g N-NO}_3 \text{ m}^{-3}$ . Wyższe stężenia azotanów występują w wodach zstępujących niż wstępujących. Skład chemiczny roztworu glebowego wskazuje, że wody przemieszczające się ku powierzchni terenu zawierają mniej składników zanieczyszczeń niż wody wsiąkające z powierzchni terenu w kierunku wód gruntowych. Badane metale ciężkie wykazują niekiedy odmienne właściwości. Jedne z nich stosunkowo łatwo przechodzą do roztworu glebowego inne są trwale związane w kompleksie sorpcyjnym gleby.

**Słowa kluczowe:** osad, roztwór glebowy, woda gruntowa, zanieczyszczenie

WSTĘP

W ostatniej dekadzie znacząco wzrosła ilość zagrodowych, osiedlowych, wiejskich, gminnych i miejskich oczyszczalni ścieków komunalnych [2]. W każdej z nich powstają osady ściekowe różniące się między sobą składem chemicznym oraz właściwościami biologicznymi i fizycznymi [9]. W mechanicznej części oczyszczalni ścieków powstają osady wstępne o bardzo zróżnicowanym składzie. Zatrzymywane są w niej zanieczyszczenia, które najczęściej ulegają koagulacji, aglomeracji, sedymentacji i flotacji. Wśród różnej wielkości cząstek organicznych oraz mineralnych (piasku drobnego, pyłu i iłu) nie brakuje substancji

biogennych, metali ciężkich, wirusów, bakterii i jaj pasożytów przewodu pokarmowego między innymi człowieka. Zanieczyszczenia te w postaci osadów płynnych poddawane są różnego rodzaju procesom: stabilizacji tlenowej, fermentacji, odwadnianiu, suszeniu, kondycjonowaniu. Następnie są one składowane na składowiskach lub wysypiskach odpadów stałych, bądź kierowane do przyrodniczej rekultywacji wyrobisk lub składowisk odpadów przemysłowych. Po odpowiednim ich „uzdatnieniu” mogą być wykorzystywane do nawożenia niektórych upraw na użytkach rolnych i plantacjach leśnych.

Przyrodnicze stosowanie komunalnych osadów ściekowych może stanowić zagrożenie sanitarne, jak również powodować zanieczyszczenie chemiczne i biologiczne gleb, wód powierzchniowych i podziemnych, a nawet roślin rozwijających się na terenach nawożonych tymi osadami. Obecność metali ciężkich i substancji biogennych w środowisku glebowo-wodnym jest powszechna. W środowisku glebowym mogą one stanowić zagrożenie dla wód dopiero po ich przejściu z fazy stałej gleby do roztworu glebowego – wody glebowej. Przechodzenie substancji rozpuszczalnych z fazy stałej gleby do roztworu glebowego jest początkiem erozji chemicznej gleb. Proces ten może być niebezpieczny, nie tylko dla środowiska wodnego, na terenie gdzie są stosowane osady, zwłaszcza wstępne, pochodzące z oczyszczalni ścieków komunalnych.

W latach 1999-2000 przeprowadzone zostały badania nad przemieszczaniem się w wodzie glebowej na głębokości 5 cm, 25 cm i 50 cm od powierzchni terenu (w strefie aeracji profilu glebowego) zanieczyszczeń, między innymi chemicznych, zawartych we wstępnych osadach ściekowych miasta Wrocławia.

#### OBIEKT I METODA BADAŃ

Do badań terenowych stosowany był osad ziemisty zawierający 36% suchej masy organicznej (s.m.org.). Na powierzchni prowadzonego doświadczenia terenowego zastosowano 150 Mg/ha suchej masy osadu. W suchej masie osadu użytego do badań znajdowało się: 14,6 g·kg<sup>-1</sup> azotu Kjeldahla, 3,9 g·kg<sup>-1</sup> fosforu ogólnego, 25,7 g·kg<sup>-1</sup> żelaza, 1800 mg·kg<sup>-1</sup> cynku, 450 mg·kg<sup>-1</sup> miedzi, 207 mg·kg<sup>-1</sup> chromu ogólnego, 145 mg·kg<sup>-1</sup> niklu, 36,3 mg·kg<sup>-1</sup> ołowiu, 16,8 mg·kg<sup>-1</sup> kadmu. Odczyn osadu pH w H<sub>2</sub>O wynosił 7,9, a pH w KCl 7,7 [9, 11].

Badania przeprowadzono na terenie Stacji doświadczalnej w Szewcach. Osad ściekowy pochodzący z terenu pól irygowanych m. Wrocławia rozłożony został równomiernie na powierzchni zadarnionej. Ekstraktory grawitacyjne (o powierzchni chwytniej 1000 cm<sup>2</sup>) umieszczono w odpowiednio przygotowanym wykopie z dokładnie dopasowaną powierzchnią ekstraktora do dna wykopu. Ściany boczne osłonięto odpowiednio przygotowanym „rękawem foliowym” aż do powierzchni terenu w celu wyeliminowania możliwości dopływu bocznego

(„leja depresji”) do powierzchni zbierającej wodę zstępującą i wstępującą ku powierzchni terenu. Roztwór glebowy w strefie aeracji profilu glebowego przemieszcza się pod wpływem sił ciężkości (grawitacji) do wód gruntowych, ale może się też przemieszczać w kierunku przeciwnym. Ekstraktory mierzyły równocześnie ilości roztworu glebowego przemieszczającego się w dół i ku powierzchni terenu. Zastosowano pięć powtórzeń dla każdej z rozpatrywanych głębokości – 5 cm, 25 cm i 50 cm od powierzchni terenu. Pomiary wykonywano po każdym cyklu opadowym w latach hydrologicznych 1998/99 i 1999/2000. Próbkę roztworu glebowego zgromadzonego w pojemnikach ekstraktora pobierano za pomocą pompy próżniowej. Po wydobyciu zatrzymanej wody w na powierzchnię terenu, na każdym stanowisku badawczym, mierzono jej objętość, a następnie pobierano próbki wody glebowej do analiz laboratoryjnych. W roztworze glebowym oznaczano prawie wszystkie, możliwe do oznaczenia, składniki i wskaźniki charakteryzujące jego właściwości [4,5,7]. Analizie poddane zostały tylko te składniki wody glebowej, które równocześnie zostały oznaczone w stałej fazie gleby.

Przed zastosowaniem osadów i po ich wprowadzeniu na powierzchnię badawczą przeanalizowano skład chemiczny i mechaniczny gleby oraz skład fizyczno-chemiczny wody opadowej, roztworu glebowego i wody gruntowej. Analizy składu mechanicznego gleb wykonywano metodą Cassagrande’a w modyfikacji Prószyńskiego. W częściach ziemistych ( $< 1,0$  mm) oznaczano zawartość jonów wymiennych i kwasowość hydrolityczną ( $Hh$ ), obliczono sumę zasadowych kationów wymiennych ( $S$ ), stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego tymi kationami ( $Vh$ ) oraz pojemność sorpcyjną ( $Th$ ). Zawartość azotu Kjeldahla oraz fosforu ogólnego oznaczono spektrofotometrycznie po uprzedniej mineralizacji kwasami. Metale ciężkie oznaczono metodą absorpcyjnej spektroskopii atomowej (ASA), natomiast Ca, Mg, K i Na metodą emisyjnej fotometrii płomieniowej.

Erozję mechaniczną można było ocenić jedynie w oparciu o zmiany zawartości frakcji pylastej i ilastej w próbkach glebowych pobranych z identycznych głębokości przed i po wprowadzeniu osadów ściekowych. Przemieszczanie substancji rozpuszczonych lub rozpuszczalnych w wodzie glebowej (erozja chemiczna) określono w oparciu o zmiany składu chemicznego roztworu glebowego przemieszczającego się w głąb profilu glebowego i ku powierzchni terenu na głębokościach przyjętych do badań [3,10].

#### WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 przedstawione zostały zmiany zawartości składników chemicznych w glebie przed (X/1999 r.) i po (XI/2000 r.) zastosowaniu  $150 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  s.m. osadów ściekowych o określonym składzie chemicznym. W ciągu jednego roku hydrologicznego nastąpiły zmiany składu chemicznego gleby na rozpatrywanych głębokościach strefy aeracji profilu glebowego. Z danych przedstawionych w tej tabeli wynika, że

przed zastosowaniem osadów ściekowych zawartości składników w glebie były z reguły mniejsze niż po zastosowaniu osadów ściekowych. Sam fakt znajdowania

**Tabela 1.** Skład i właściwości gleb przed i po zastosowaniu osadów wstępnych ze ścieków miejskich  
**Table 1.** Soil composition and characteristics before and after applying preliminary sediments

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Październik 1999 October 1999				Listopad 2000 November 2000			
		Głębokości – Depth (cm)				Głębokości – Depth (cm)			
		0-5	5-25	25-50	>50	0-5	5-25	25-50	>50
Węgiel organiczny Organic carbon	g C·kg <sup>-1</sup> s.m	13,9	7,3	5,6	3,5	15,9	11,3	7,5	5,4
Azot Kjeldahla TKN	g N·kg <sup>-1</sup> s.m	1,5	1,0	0,6	0,5	0,8	1,2	0,7	0,5
Stosunek C/N C/N ratio	–	9	8	9	7	21	10	11	10
Fosfor ogólny Total phosphorus	g P·kg <sup>-1</sup> s.m	0,6	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,2	0,3
Żelazo ogólne Total iron	g Fe·kg <sup>-1</sup> s.m	7,0	4,9	6,1	4,1	16,2	7,5	5,6	4,9
Cynk Zinc	mg Zn·kg <sup>-1</sup> s.m	102	188	51	33	347	324	58	37
Miedź Copper	mg Cu·kg <sup>-1</sup> s.m	64	20	11	7	38	52	11	9
Ołów Lead	mg Pb·kg <sup>-1</sup> s.m	20	14	11	11	13	22	8	15
Nikiel Nickel	mg Ni·kg <sup>-1</sup> s.m	24	13	12	11	29	29	9	12
Kadm Cadmium	mg Cd·kg <sup>-1</sup> s.m	4	1	1	1	4	5	1	1
Chrom ogólny Total chromium	mg Cr·kg <sup>-1</sup> s.m	38	16	11	7	50	46	22	17
Kwas. hydrolit. Hh Hydrolytic acidity	me·(100g) <sup>-1</sup>	1,94	1,05	0,72	1,36	1,72	1,12	0,60	1,31
Wapń (Ca <sup>++</sup> ) Calcium	me·(100g) <sup>-1</sup>	2,24	4,00	3,40	2,00	8,03	8,10	6,24	4,16
Magnez (Mg <sup>++</sup> ) Magnesium	me·(100g) <sup>-1</sup>	0,32	0,28	0,15	0,21	0,78	0,63	0,28	0,20
Sód (Na <sup>+</sup> ) Sodium	me·(100g) <sup>-1</sup>	0,09	0,11	0,10	0,09	0,13	0,14	0,17	0,11
Potas (K <sup>+</sup> ) Potassium	me·(100g) <sup>-1</sup>	0,17	0,15	0,08	0,09	0,15	0,12	0,09	0,08
S <sup>1)</sup>	me·(100g) <sup>-1</sup>	2,82	4,54	3,73	2,39	9,09	8,99	6,78	4,55
Th <sup>2)</sup>	me·(100g) <sup>-1</sup>	4,76	5,59	4,45	3,75	10,81	10,11	7,38	5,86
Vh <sup>3)</sup>	%	59	81	84	64	84	89	92	78

1) – S – suma kationów zasadowych – total exchangeable cations, 2) – Th – pojemność sorpcyjna gleby – soil sorptive capacity, 3) – Vh – stopień nasycenia gleby kationami zasadowymi – ratio of soil saturation with alkaline cations.

się w glebie składników zanieczyszczeń pochodzących z osadów ściekowych jest oczywisty i nie może budzić większych obaw. Zagrożenie tymi składnikami powstaje wówczas, gdy przechodzą one z fazy stałej gleby do roztworu glebowego i przemieszczane są do wód gruntowych.

Po wprowadzeniu osadów ściekowych na powierzchnię doświadczalną nastąpiło wyraźne zwiększenie zawartości węgla organicznego, żelaza ogólnego, cynku, niklu, chromu ogólnego, wapnia, magnezu i sodu. Wzrósł stopień wysycenia gleby kationami zasadowymi (*Vh*), suma kationów zasadowych (*S*) i pojemność sorpcyjna gleby (*Th*), najczęściej do głębokości 25 cm od powierzchni terenu. Natomiast zmniejszeniu uległy stężenia azotu Kjeldahla, miedzi oraz kwasowość hydrolityczna (*Hh*). Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu tych zmian na stężenia składników rozpuszczonych lub rozpuszczalnych w roztworze glebowym, w wodach wsiąkających (zstępujących) i przemieszczających się ku powierzchni terenu (nie tylko podsiąkających), na głębokości 5 cm, 25 cm i 50 cm oraz w wodach gruntowych świadczące o natężeniu erozji chemicznej gleb nawożonych osadami ściekowymi.

Ilości wody glebowej na rozpatrywanych głębokościach profilu glebowego na tle wskaźników opadów atmosferycznych i głębokości zalegania poziomów wód gruntowych przed zastosowaniem osadów ściekowych (1998/1999) i po ich wprowadzeniu (1999/2000) zestawiono w tabeli 2. Roztwór glebowy wsiąkający z powierzchni terenu w kierunku wód gruntowych oznaczono literą G, a przemieszczający się ku powierzchni terenu – literą D. Cyfry lub liczby przy tych literach oznaczają głębokość (cm) z jakiej pobrano roztwór [8]. Z danych zamieszczonych w tabeli 2 wynika, że opady atmosferyczne w roku hydrologicznym 1998/99 były o około 100 mm niższe niż w roku 1999/2000, zaś przeciętna głębokość zalegania poziomów wód gruntowych układała się odwrotnie. W roku o wyższych sumach opadów wody gruntowe zalegały głębiej. Wynika to z zapasów wody na początku roku hydrologicznego w każdym z rozpatrywanych lat. Na każdej z rozpatrywanych głębokości, niezależnie od kierunku przemieszczającej się wody, ilości roztworu glebowego w półroczu letnim były wielokrotnie mniejsze niż w zimowym. Objętości wód wsiąkających wzrastały wraz z głębokością umieszczenia powierzchni pomiarowej, zaś największa ilość wód podsiąkających ku powierzchni pojawiała się na głębokości 25 cm od powierzchni terenu. Ten rozkład ilości przemieszczającej się wody wskazuje, że spulchnienie gleby od powierzchni terenu sprzyjało przenikaniu wody opadowej do głębszych warstw profilu glebowego. Występowały mniejsze straty wody opadowej niż na powierzchni gleby dzięki mniejszej głębokości występowania i zalegania warstwy nieprzepuszczalnej – powierzchni zatrzymującej i przechwytyjącej wsiąkające wody opadowe.

**Tabela 2.** Średnie miesięczne i okresowe ilości roztworu glebowego (mm) w roku hydrologicznym 1998/1999 i 1999/2000 na tle miesięcznych sum wskaźników opadów atmosferycznych i głębokości zalegania poziomów wód gruntowych

**Table 2.** Average monthly and periodic amount of soil solution in years 1998/1999 and 1999/2000 compared with precipitation figures and ground water depth.

Miesiąc lub okres Month or period	Suma opadów Total rainfall (mm)	Głębokości wód grunto- wych Ground water depth (cm)	Roztwór glebowy wsiąkający (G), podsiąkający (D) na głębokościach 5 cm, 25 cm i 50 cm od powierzchni terenu Infiltration soil solution (G), capillary rise (D) at depth of 5 cm, 25 cm, 50 cm							
			G <sub>5</sub>		D <sub>5</sub>		G <sub>25</sub>		D <sub>25</sub>	
			G <sub>50</sub>		D <sub>50</sub>					
1998/1999										
XI	10,8	98	0,0	0,0	0,7	0,3	5,0	0,0		
XII	25,9	64-80	1,2	0,0	5,8	20,5	9,8	7,4		
I	9,0	91-100	0,0	0,0	0,2	4,0	3,0	4,0		
II	51,0	67-83	2,5	0,0	13,8	38,6	24,7	19,4		
III	57,5	37-66	12,5	19,4	24,9	30,9	29,4	23,5		
IV	28,0	81-89	1,2	0,0	2,4	7,3	13,8	6,2		
XI-IV	182,1	37-100	17,4	19,4	47,6	101,5	85,7	60,6		
V	45,5	107-130	1,1	0,0	0,0	0,5	5,3	0,6		
VI	0,0	134	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
VII	84,5	145-151	4,7	0,0	0,9	0,0	4,9	0,0		
VIII	22,5	177	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0		
IX	16,5	200-205	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
X	23,8	210	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
V-X	192,8	107-210	5,9	0,2	0,9	0,5	10,2	0,6		
XI-X	374,9	37-210	23,3	19,7	48,6	102,0	95,9	61,2		
1999/2000										
XI	27,5	225-235	1,1	0,0	5,4	0,0	4,0	0,0		
XII	14,5	238-239	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,2		
I	37,0	228-240	1,1	0,0	9,2	0,0	8,2	0,0		
II	52,3	116-163	1,7	0,0	9,3	18,1	13,1	5,1		
III	73,3	71-109	1,4	0,0	14,9	33,6	19,0	11,5		
IV	10,8	73-102	0,1	0,0	1,4	12,7	5,6	5,1		
XI-IV	215,3	71-240	5,3	0,0	40,2	64,3	50,9	21,8		
V	48,5	132	0,9	0,0	3,4	0,0	2,7	0,0		
VI	36,5	145-164	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
VII	110,5	163-169	6,9	0,0	12,2	0,0	9,3	0,0		
VIII	34,0	178	0,6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0		
IX	25,1	199	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
X	6,6	219	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
V-X	261,2	132-219	8,4	0,0	15,6	0,0	12,0	0,0		
XI-X	476,5	71-240	13,7	0,0	55,8	64,3	62,9	21,8		

Z rosnącymi ilościami przemieszczających się wód w strefie aeracji profilu glebowego można było oczekiwać większego nasilenia erozji chemicznej i mechanicznej gleby oraz wzrostu tempa przemieszczania zanieczyszczeń z powierzchniowych warstw gleby do wód gruntowych [6,7,11]. Takie zjawisko mogłoby być prawdziwe wówczas, gdyby w strefie aeracji występował jednokierunkowy, zstępujący (G), ruch wody glebowej. Tabela ta wykazuje, że w strefie areacji woda przemieszczała się także z dołu (D) ku powierzchni terenu. Świadczą o tym wielkości „D” zestawione w omawianej tabeli oraz skład chemiczny wód wsiąkających i poruszających się w kierunku przeciwnym.

Na uwagę zasługuje ilość roztworu glebowego na tle opadów atmosferycznych i głębokości zalegania wód gruntowych w rejonie obiektu doświadczalnego. Nawet 110,5 mm opadu w lipcu 2000 r. nie spowodowało wystąpienia wód wstępujących na każdej z rozpatrywanych powierzchni pomiarowych założonych na przyjętych głębokościach.

#### **Skład roztworu glebowego na rozpatrywanych głębokościach profilu glebowego**

W tabel 3 i 4 zestawiono średnie roczne stężenia składników chemicznych dostarczanych na powierzchnie doświadczalne w wodach opadowych ( $G_0$ ), w roztworze glebowym wsiąkającym w głąb profilu glebowego ( $G_x$ ) i podsiąkających ( $D_x$ ) oraz w wodach gruntowych (WG) przed użyciem osadów ściekowych i po ich zastosowaniu. Przeprowadzone badania wykazały, że nie wszystkie pierwiastki zawarte w glebie i w osadach ściekowych, użytych do badań terenowych, ulegają dyslokacji w jednakowym stopniu, wraz z przemieszczającą się wodą strefie aeracji profilu glebowego. Wyniki badań wskazują, że w największym stopniu do roztworu glebowego przenikał wapń, magnez, sód, potas i azot azotanowy, w znacznie mniejszym stopniu żelazo ogólne, ołów, kadm i chrom. Wprowadzenie osadów ściekowych na powierzchnie doświadczalne spowodowało wielokrotny wzrost średnich rocznych stężeń wapnia, magnezu, sodu, potasu i azotu azotanowego, natomiast nastąpił nieznaczny wzrost stężeń ołowiu, kadmu. Nawożenie osadem ściekowym nie spowodowało wzrostu, wręcz nastąpiło obniżenie stężeń fosforu ogólnego, żelaza ogólnego, miedzi, niklu, chromu, manganu. Wyjątkiem są wody wsiąkające na głębokości 5 cm ( $G_5$ ) gdzie stężenia azotu amonowego, chromu i cynku wyraźnie wzrosły. Uwzględniając kierunki przemieszczania się roztworu glebowego w strefie aeracji można zauważyć przewagę przemieszczania się składników rozpuszczonych w wodach wsiąkających do wód gruntowych nad ich ruchem w kierunku przeciwnym. Na podstawie tylko różnicy stężeń rozpatrywanych pierwiastków nie można jednoznacznie oszacować wielkości i tempa zanieczyszczenia wód gruntowych zanieczyszczeniami zawartymi w stosowanych do badań osadach ściekowych pochodzących z osadników wstępnych znajdujących się na terenie pól irygowanych miasta Wrocławia.

**Tabela 3.** Skład roztworu glebowego przed zastosowaniem osadów wstępnych  
**Table 3.** Soil solution composition before application of preliminary sediments

Parametr – Parameter	Jednostka Unit	Punkt i głębokość poboru roztworu glebowego Soil solution sampling point and depth							
		G <sub>0</sub> <sup>*</sup>	G <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>	G <sub>25</sub>	D <sub>25</sub>	G <sub>50</sub>	D <sub>50</sub>	WG <sup>1)</sup>
Azot Kjeldahla TKN	g N·m <sup>-3</sup>	3,8	2,9	4,0	4,8	3,9	3,4	4,7	3,0
Azot amonowy Ammonium nitrogen	g N·m <sup>-3</sup>	2,4	2,9	4,0	4,8	3,9	3,4	4,7	1,2
Azot azotanowy Nitrate nitrogen	g Nm <sup>-3</sup>	1,4	0,8	2,9	2,0	1,7	1,4	1,1	0,4
Azot azotynowy Nitrite nitrogen	g N·m <sup>-3</sup>	0,30	0,02	0,11	0,07	0,02	0,04	0,07	0,008
Fosfor ogólny Total phosphorus	g N·m <sup>-3</sup>	0,3	0,7	0,5	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1
Żelazo ogólne Total iron	g Fe·m <sup>-3</sup>	0,4	1,6	3,7	2,3	1,1	1,5	2,7	2,5
Cynk Zinc	g Zn·m <sup>-3</sup>	–	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4
Miedź Copper	g Cu·m <sup>-3</sup>	0,07	0,07	0,10	0,07	0,04	0,04	0,07	0,05
Ołów Lead	g Pb·m <sup>-3</sup>	0,05	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Nikiel Nickel	g Ni·m <sup>-3</sup>	0,10	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Kadm Cadmium	g Cd·m <sup>-3</sup>	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Chrom ogólny Total chromium	g Cr·m <sup>-3</sup>	0,03	0,10	0,05	0,03	0,02	0,02	0,06	0,03
Mangan Manganese	g Mn·m <sup>-3</sup>	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	5,9
Wapń (Ca <sup>++</sup> ) Calcium	g Ca·m <sup>-3</sup>	3,2	23	45	62	73	63	63	90
Magnez (Mg <sup>++</sup> ) Magnesium	g Mg·m <sup>-3</sup>	0,6	2,3	3,8	3,5	11,6	3,3	11,6	6,9
Sód (Na <sup>+</sup> ) Sodium	g Na·m <sup>-3</sup>	1,1	3,6	2,6	3,3	5,6	4,3	4,3	5,2
Potas (K <sup>+</sup> ) Potassium	g K·m <sup>-3</sup>	1,1	4,5	1,8	1,5	1,6	2,0	1,7	3,3

1) – WG – wody gruntowe – ground water.

\* objaśnienia symboli G i D jak w tabeli 2; G<sub>0</sub> – wody opadowe (na powierzchni terenu) na głębokości 0 cm; G<sub>0</sub> – rainwater on land surface – depth = 0,00 cm.



**Tabela 4.** Skład roztworu glebowego po zastosowaniu osadów wstępnych  
**Table 4.** Soil solution composition after application of preliminary sediments

Parametr – Parameter	Jednostka Unit	Punkt i głębokość poboru roztworu glebowego Soil solution sampling point and depth						
		G <sub>0</sub> *	G <sub>5</sub>	G <sub>25</sub>	D <sub>25</sub>	G <sub>50</sub>	D <sub>50</sub>	WG <sup>1)</sup>
Azot Kjeldahla TKN	g N·m <sup>-3</sup>	3,4	18,9	2,4	2,2	2,7	2,6	2,5
Azot amonowy Ammonium nitrogen	g N·m <sup>-3</sup>	1,1	15,1	0,5	0,4	0,50	0,70	0,70
Azot azotanowy Nitrate nitrogen	g Nm <sup>-3</sup>	0,8	43,7	42,3	17,2	29,5	7,6	4,9
Azot azotynowy Nitrite nitrogen	g N·m <sup>-3</sup>	0,02	0,20	0,1	0,05	0,08	0,02	0,02
Fosfor ogólny Total phosphorus	g N·m <sup>-3</sup>	0,2	0,54	0,2	0,13	0,18	0,21	0,20
Żelazo ogólne Total iron	g Fe·m <sup>-3</sup>	0,9	1,2	1,2	0,6	1,6	1,4	3,5
Cynk Zinc	g Zn·m <sup>-3</sup>	0,10	21,1	0,20	0,10	0,04	0,10	0,30
Miedź Copper	g Cu·m <sup>-3</sup>	0,03	0,10	0,10	0,04	0,04	0,04	0,05
Ołów Lead	g Pb·m <sup>-3</sup>	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Nikiel Nickel	g Ni·m <sup>-3</sup>	0,1	0,8	0,10	0,1	0,1	0,1	0,1
Kadm Cadmium	g Cd·m <sup>-3</sup>	0,03	0,15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Chrom ogólny Total chromium	g Cr·m <sup>-3</sup>	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,08	0,05
Mangan Manganese	g Mn·m <sup>-3</sup>	0,10	1,70	0,10	0,10	0,20	0,10	1,6
Wapń (Ca <sup>++</sup> ) Calcium	g Ca·m <sup>-3</sup>	1,9	364	404	423	442	358	88
Magnez (Mg <sup>++</sup> ) Magnesium	g Mg·m <sup>-3</sup>	0,3	36,7	22,8	27,0	27,5	24,2	10,3
Sód (Na <sup>+</sup> ) Sodium	g Na·m <sup>-3</sup>	1,2	15,9	20,9	26,2	27,6	22,6	9,5
Potas (K <sup>+</sup> ) Potassium	g K·m <sup>-3</sup>	0,8	29,4	5,8	2,7	4,8	2,3	3,2

1) – WG – wody gruntowe – ground water.

\* objaśnienia symboli G i D jak w tabeli 2; G<sub>0</sub> – wody opadowe (na powierzchni terenu) na głębokości 0 cm; G<sub>0</sub> – rainwater on land surface – depth = 0,00 cm.

## DYSKUSJA

Badania dynamiki roztworu glebowego w warunkach polowych są utrudnione, ale może przybliżać uzyskiwane wyniki do wartości rzeczywistych. Dotychczas przyjmowano, że woda w glebie przemieszcza się tylko w głąb profilu glebowego, natomiast ruch w przeciwnym kierunku przypisywano podsiąkowi kapilarnemu, związanemu ze zmianami położenia poziomów wód gruntowych. Przeprowadzone badania przemieszczania się wody w strefie aeracji profilu glebowego wykazały, że ruch ten zachodzi we wszystkich kierunkach, zależnie od występujących gradientów mogących wywołać ruch wody w glebie. Na głębokości 25 cm od powierzchni terenu ( $G_{25}$ ) pomierzono mniejsze objętości wód wsiąkających niż przemieszczających się ku powierzchni terenu ( $D_{25}$ ) zarówno bez osadów ściekowych, jak i po ich zastosowaniu. Na głębokości 50 cm od powierzchni terenu przeważały wody zstępujące nad wstępującymi. Zjawisko zaobserwowane i pomierzone w terenie przez Palucha [7]. Wyniki te potwierdziły również badania przeprowadzone przez Wardecką [11]. Ocena erozji chemicznej wierzchnich warstw profilu glebowego do wód gruntowych nie jest możliwa bez pomiaru faktycznej ilości i składu chemicznego wody glebowej na określonych poziomach profilu glebowego w warunkach naturalnych. W dostępnej literaturze nie było podejmowanych prób dokonania ocen tempa zanieczyszczania wód gruntowych składnikami pochodzącymi z miejskich osadów ściekowych [1,4,12].

Przeprowadzone badania wykazały, że nie wszystkie składniki zanieczyszczeń zawarte w osadach wstępnych ze ścieków komunalnych wykazują taką samą lub podobną dynamikę w środowisku glebowym. Jedne z nich bardzo łatwo przechodzą z fazy stałej osadów lub gleby do roztworu glebowego, inne nie ulegają tym procesom. W osadach ściekowych użytych do badań polowych oznaczono tylko azot metodą Kjeldahla, ponieważ nie stwierdzono występowania azotu azotanowego. W wodach glebowych w pierwszym (1998/99) roku badań stężenia azotu azotanowego zmieniały się w granicach od  $0,8 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  do  $2,9 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ , po wprowadzeniu osadów ściekowych zmieniały się one średnio w roku od  $7,6 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  ( $D_{50}$ ) do  $43,7 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  ( $G_5$ ). W wodach gruntowych stężenie azotu azotanowego wzrosło z  $0,4 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  do  $4,9 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Różnica stężeń średnich azotanów w wodach wsiąkających (G) i wstępujących (D) (bez  $G_5$  i  $D_5$  ponieważ w roku 2000  $D_5 = 0,00$ ) wynosiła  $G_{\text{sr.}} - D_{\text{sr.}} = 35,9 - 12,4 = 23,5 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Wskazuje to na możliwości zanieczyszczenia wód gruntowych azotanami pochodzącymi z osadów ściekowych. Intensywniejsze przemieszczanie azotanów wystąpiło w półroczu letnim (od  $7,6 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  do  $43,7 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) niż zimowym (od  $7,6 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  do  $24,1 \text{ gN-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ )

Stężenie azotu amonowego po wprowadzeniu osadów wzrosło tylko na głębokości 5 cm ( $G_5$ ) z  $2,9 \text{ gN-NH}_4 \cdot \text{m}^{-3}$  w pierwszym roku badań do  $15,1 \text{ gN-}$

$\text{NH}_4 \cdot \text{m}^{-3}$  w drugim. W pozostałych wariantach doświadczenia po zastosowaniu osadów stężenia azotu amonowego były mniejsze. Wskazuje to, że zagrożenie czystości wód gruntowych azotem amonowym pochodzącym z osadów ściekowych jest mało prawdopodobne

Po zastosowaniu osadów ściekowych stwierdzono niewielkie obniżenie średnich stężeń fosforu z  $0,38 \text{ gP} \cdot \text{m}^{-3}$  do  $0,24 \text{ gP} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Z danych przedstawionych tabelach 3 i 4 wynika, że nawet przy stosunkowo niskich opadach atmosferycznych następowało intensywne wymywanie wapnia, magnezu, sodu i potasu z osadów do roztworu glebowego i przemieszczanie ich do wód gruntowych. Na głębokości 5 cm ( $G_5$ ) w roztworze glebowym wielokrotnie wzrosły stężenia cynku i manganu. W pozostałych wariantach doświadczenia wyraźniejszych różnic nie udało się zaobserwować. Stężenia pozostałych metali ciężkich w roztworze glebowym zmieniały się w niewielkich granicach.

Przeprowadzona analiza zmian składu roztworu glebowego, na przyjętych głębokościach strefy aeracji profilu glebowego wykazała, że przenikanie zanieczyszczeń z osadów ściekowych do wód gruntowych zależy od właściwości rozpatrywanej substancji. Metale alkaliczne i azot azotanowy stosunkowo łatwo przechodzą z fazy stałej gleby i osadów ściekowych do roztworu glebowego. Pozostałe z rozpatrywanych składników występowały w mniejszych ilościach i nie ulegały tak intensywnemu ługowaniu z gleby i z osadów ściekowych jak metale alkaliczne i azotany.

Pozostaje problem bilansowania poszczególnych składników zanieczyszczeń na określonych głębokościach strefy aeracji profilu glebowego. Przemieszczanie się wody w różnych kierunkach, zwłaszcza przeciwnie w kierunku pionowym (ruch zstępujący i wstępujący bez uwzględniania jonów kompleksowych) może powodować trudności w bilansowaniu składników zanieczyszczeń. Powstaje też pytanie na ile zanieczyszczenia te pozwalają tworzyć trwałe związki kompleksowe.

#### WNIOSKI

1. Ilość wód wsiąkających wzrastała wraz ze wzrostem głębokości umieszczenia powierzchni przechwytyjących wodę. Tylko na głębokości 25 cm ilości wód wsiąkających były mniejsze od przemieszczających się w kierunku przeciwnym. Znacznie mniej wody przemieszczało się w półroczu letnim niż zimowym.

2. W surowych osadach ściekowych azot występuje głównie w formie organicznej i amonowej. Stosowanie osadów wstępnych z komunalnych oczyszczalni ścieków może spowodować nadmierne zanieczyszczenie wód podziemnych i gruntowych azotanami, bowiem stężenia tej formy azotu w roztworze glebowym wzrastają średnio nawet do  $43,7 \text{ g N-NO}_3 \text{ m}^{-3}$  ( $193,5 \text{ g NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$ ). Wyższe stężenia azotanów występują w wodach zstępujących niż wstępujących. Po zastosowaniu osadów ściekowych stężenia azotu amonowego w roztworze glebowym zmalało.

3. Skład chemiczny roztworu glebowego wskazuje, że wody przemieszczające się ku powierzchni terenu zawierają mniej składników zanieczyszczeń niż wody wsiąkające z powierzchni terenu w kierunku wód gruntowych. Z osadów ściekowych do roztworu glebowego przenikało szczególnie dużo: azotanów, wapnia, magnezu, sodu i potasu.

4. Badane metale ciężkie w roztworze glebowym wykazują niekiedy odmienne właściwości. Jedne z nich stosunkowo łatwo przechodzą do roztworu glebowego inne są trwale związane w kompleksie sorpcyjnym gleby i ich stężenia, po dodaniu osadów ściekowych, mogą ulegać nawet obniżeniu. Sugeruje to, że każdy pierwiastek lub związek chemiczny powinien być poddawany oddzielnej analizie.

#### PIŚMIENNICTWO

1. **Cebula J.:** Możliwości rolniczego unieszkodliwiania osadów z miejskich oczyszczalni ścieków. *Gospodarka Wodna*, nr 6/1987, 135, 1987.
2. **Kuczewski K., Paluch J.:** Oczyszczanie ścieków bytowo-gospodarczych na terenach wiejskich w oczyszczalniach roślinno-glebowych, *Wyd. AR we Wrocławiu*, 114, 1997.
3. **Lipski C., Michalczewski M., Ryczek M., Kopacz M., Kostuch R., Twardy S.:** Czynniki wpływające na erozję mechaniczną i chemiczną oraz depozycję materiału dennego w korytach rzecznych wybranych zlewni górskich w Karpatach Zachodnich, *AR w Krakowie (grant KBN nr 1031/PO6/2001/20)*, 157, 2004.
4. **Paluch J.:** Oczyszczanie ścieków miejskich w środowisku glebowym. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, 41, 151, 1984.
5. **Paluch J.:** Pobór próbek wody glebowej ze strefy aeracji w warunkach naturalnych i wielkości stężeń niektórych jej składników, *Człowiek i Środowisko*, 10(2), 251-267, 1986.
6. **Paluch J.:** Związki między wahaniami poziomów wód gruntowych i stężeń niektórych składników rozpuszczonych w wodach zaskórnych, *Gosp. Wodna*, 6/1994, 131-135, 1994.
7. **Paluch J.:** Przemieszczanie się wody i składników zanieczyszczeń w strefie aeracji profilu glebowego. *Przegląd Nauk. Wydz. Mel. i Inż. Środ. SGGW w Warszawie, Sesja II, zeszyt 11*, 171-181, 1997.
8. **Paluch J.:** Porównanie składu jonowego wodnych wyciągów glebowych i roztworu glebowego uzyskiwanego bezpośrednio w terenie za pomocą ekstraktorów różnej konstrukcji. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 475, 467-478, 2001.
9. **Szczyński K., Wardecka L.:** Ocena techniczno-eksploatacyjna urządzeń do mechanicznego zagęszczania i odwadniania osadów ściekowych stosowanych w komunalnych oczyszczalniach ścieków, *IOŚ Oddział Wrocław, Wrocław – Warszawa*, 111, 2001.
10. **Szyc J.:** Odcieki ze składowisk komunalnych, monografia, *IOŚ Warszawa*, 93, 2003.
11. **Wardecka L.:** Dynamika roztworu glebowego w warunkach naturalnych (maszynopis rozprawy doktorskiej zrealizowanej w ramach grantu KBN nr 6 P06H 01420) *AR we Wrocławiu*, 160, 2002.
12. **Wierzbicki J.:** Rolnicze wykorzystanie ścieków. *PWN Wrocław*, 164, 1956.

---

**NATURAL METHODS OF MUNICIPAL PLANT SLUDGES UTILIZATION  
WITH CONSIDERATION OF CHEMICAL EROSION***Julian Paluch<sup>1</sup>, Krzysztof Pulikowski<sup>1</sup>, Lidia Wardecka<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Environmental Development and Protection, Agricultural University  
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław  
e-mail: paluch@miks.ar.wroc.pl

<sup>2</sup>Institute of Environmental Protection Division Wrocław  
ul. Wyrbrzeże Wyspiańskiego 39b, 51-618 Wrocław

**Abstract.** The results of research on the influence of soil fertilization with preliminary sediments ( $150 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ d.m.}$ ) on the soil solution composition and underground water are presented in this work. The quality of infiltrating waters was increasing together with increasing depth. The usage of preliminary sediments coming from the sewage treatment might cause underground water pollution with nitrate because the concentration of this nitrogen form in the soil solution increases even up to  $43.7 \text{ g N-NO}_3 \text{ m}^{-3}$ . Higher nitrate concentration is to be seen in infiltration water than in capillary rise. The chemical composition of the soil solution shows that waters which head for the ground surface contain less pollution components than waters which infiltrate from the surface to underground waters. The investigated heavy metals sometimes show different properties – some of them enter easily into the soil solution, while others are permanently bound in the exchangeable soil sorption complex.

**Key words:** sludge, soil solution, ground water, contaminant