

doc. dr inż. Regina Taylor  
mgr inż. Halina Florczyk  
doc. dr hab. inż. Lucyna Jakubowska

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej

## ODPŁYW SUBSTANCJI BIOGENNYCH Z ROLNICZYCH ZLEWNI RZECZNYCH

*Praca stanowi syntezę wyników badań nad wpływem zanieczyszczeń obszarowych na jakość wód powierzchniowych. Badaniami objęto 9 zlewni rzecznych, w których wyodrębniono 21 zlewni cząstkowych o różnym stopniu rolniczego wykorzystania (18,6—100% użytków rolnych w tym 11,2—91,5% gruntów ornych) przeprowadzając dwuletni cykl badawczy.*

*Wyznaczono wskaźniki jednostkowego odpływu substancji biogennej oraz określono zależność pomiędzy procentowym udziałem użytków rolnych w zlewni a wielkością wskaźników jednostkowego odpływu tych substancji*

Substancje biogenne przenoszone rzekami z terenów rolniczych do zbiorników wodnych uważa się za jeden z głównych czynników nasilających proces eutrofizacji. Stąd, w literaturze fachowej pojawia się coraz więcej publikacji na temat ich odpływu ze zlewni rolniczych.

Podejmowane dotychczas prace badawcze, dotyczące tego zagadnienia miały głównie na celu określenie wielkości odpływu związków biogennej ze zlewni, wykorzystywanych rolniczo.

Z danych opublikowanych w literaturze światowej wynika, że wielkości te zawierały się w szerokich przedziałach nawet w przypadku zlewni o podobnej charakterystyce (tabela 1).

Procesy przenoszenia i przemian substancji biogennej w glebie i wodzie, uzależnione są od tak wielu różnorodnych czynników, różnie oddziaływujących w różnych warunkach, że utrudnia to lub wręcz uniemożliwia skonstruowanie ogólnie obowiązującego modelu matematycznego.

Prognozowanie wielkości rolniczych zanieczyszczeń obszarowych, odbywa się więc głównie w oparciu o modele regresyjne jednostkowego odpływu tych zanieczyszczeń.

Celem pracy było wyznaczenie współczynników jednostkowego odpływu związków biogennej ze zlewni rzecznych o różnej charakterystyce fizjograficznej i różnym zagospodarowaniu oraz określenie strat, poprzez porównanie wielkości ładunków związków biogennej, odpływających ze zlewni z ilością stosowaną w formie nawozów.

Badania, na wynikach których oparto pracę, wykonano w latach 1977—79 w specjalistycznych zakładach Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Gdańsku [21], Wrocławiu [8] i Warszawie [10].

### Zakres i metodyka pracy

Badania przeprowadzono w 9 zlewniach rzecznych, w których wyodrębniono 21 zlewni cząstkowych. Przy wyborze zlewni kierowano się następującymi kryteriami: zróżnicowany sto-

pień wykorzystania rolniczego, wyraźnie określony dział wodny, brak dużych zbiorników na biegu badanego odcinka rzeki, brak istotnych źródeł zanieczyszczenia punktowego. Ogólną lokalizację zlewni przedstawiono na rys. 1, a ich charakterystykę w tabelach 2 i 3.

Badania przeprowadzono w dwóch pełnych cyklach rocznych. Próbkę wody rzecznej pobierano co dwa tygodnie z przekrojów zamykających wybrane zlewnie, oznaczając w nich podstawowe formy azotu, fosforu oraz potasu. W przekrojach: I, III-2 i IV-1 pobierano próbki codziennie, badając w nich zawartość fosforu fosforanowego i azotu azotanowego.

Raz w sezonie przeprowadzano analizy rozszerzone celem scharakteryzowania składu jonowego i stanu czystości wód. Oznaczenia analityczne wykonano w oparciu o metodykę Standard-Methods (1971).

Dane hydrologiczne były przygotowane przez specjalistyczne zakłady odpowiednich Oddziałów IMGW.

Dane dotyczące zużycia nawozów mineralnych w gminach, gromadach lub gospodarstwach uspołeczniionych uzyskano w specjalistycznych instytucjach terenowych. Zużycie w obrębie zlewni, obliczono proporcjonalnie do powierzchni zlewni, stosując mnożniki wyznaczone na podstawie planimetrowania map. Ilość biogenów, odprowadzanych do zlewni z nawozami naturalnymi obliczono drogą pośrednią, w oparciu o dane dotyczące pogłowia zwierząt hodowlanych na badanym terenie oraz przeliczniki cytowane w literaturze.

Ładunki substancji biogennej odpływające rzekami z obszaru zlewni, ustalono na podstawie zależności pomiędzy wielkością prowadzonych ładunków chwilowych a towarzyszącymi im wielkościami przepływu. Roczny ładunek stanowiący podstawę do wyznaczenia wielkości jednostkowego wskaźnika odpływu danej substancji, ustalono w oparciu o znajomość codziennych wielkości przepływu w badanych przekrojach. Na ich podstawie, z równań okre-

Tabela 1

## JEDNOSTKOWY ODPLYW SUBSTANCJI BIOGENNYCH ZE ZLEWNI O RÓŻNEJ CHARAKTERYSTYCE

Kraj	Charakterystyka zlewni	Odptyw jednostkowy kg/ha rok		
		N	P	K
Polska (Stolarski, Skrodzki 1966)	Teren podgórski	3,3—4,7	0,06—0,50	1,8—11,2
Polska Nizina Szczecińska (Borowiec, Skrzyżczyński, 1978)	55% gr. ornych, gleby ciężkie 48% gr. ornych, gleby śr. ciężkie 30% gr. ornych 50% łąsy, gleby lekkie	7,1—16,3 5,5—12,2 3,9—6,0	0,20—0,44 0,18—0,22 0,09—0,18	25,7—33,2 12,5—16,6 9,1—15,8
Polsku rzeki Pomorza (Wilamski, Sliwa, 1978)	gr. orne 55—75% (gleby lekkie) łąsy 15—32%	1,0—1,3	3,09—0,11	
Polska zlewnie górskie (Florczyk, 1978)	gr. orne 18—25%, łąsy 43—45%	7,1—23,3	0,11—0,33	
	gr. orne 1,4—3,2%, łąsy 30—75%	16,6—23,6	0,27—0,44	
	łąsy 95%	10,9—30,2	0,28—0,40	
ZSRR (Kutrin, 1975)	Zdrenowane pola	1,4—8,0	0,00—3	0,3—6,0
NRD (SRWO, 1976)	Łąki ekstens. eksploatowane	3,63	0,36	
	Zlewnie leśno-łąkowe	3,86	0,33	
	Łąki iglasty	5,05	0,21	
	Biota przejściowe Pastwiska intens. eksploat. (170 kg/ha NK)	11,83	0,73	
RFN (Schmidt, 1976)	Zlewnie rolnicze	10,2—17,3	0,33—0,64	
RFN (Bernardt, Clausen, Nusch, 1973)	Zlewnie leśne	1,5—16,0	0,19—0,63	
Finlandia (Kauppi, 1978; Kohonen, 1976)	51% gr. ornych, 28 % łąsy 91% łąsy	14,5—29,2	0,5—0,85	
Holandia (Kalenbrander, 1971)	Zlewnie rolnicze Zlewnie niezagospodarowane	1,8—5,6 1,79—1,8	0,06—0,10 0,04—0,06	
Dania (Brink, 1974; Edens, Soldberg 1977)	Gleby gliniaste, zlewnie rolnicze zużycie NPK 300 kg/ha	pow. 20	śr. 0,065	
	Gleby piaszczyste, zlewnie rolnicze zużycie NPK 300 kg/ha	do 50		
Szwajcaria (Gächter, Furrer, 1972)	Zlewnie rolnicze	13—15	0,35—1,0	
USA (Loehr, 1972)	Tereny leśne	16—21	0,35—0,69	0,46—1,68
	Tereny intensyw. wykorz. roln.	8,4	0,64	
	Tereny słabo zagosp. roln.	16,5	0,74	
USA (Wuhrman, 1966)	Łąki nawożone (tereny przedalpejskie)	19,4	1,02	
	Tereny intensyw. wykorz. roln.	ponad 80	ponad 2	
	Tereny słabo zagosp. roln.	0,59	0,023	
	Tereny leśne, pod skał. wulk.	1,43—3,57	0,26—1,07	
	Tereny leśne, pod skał. osad.		0,026—1,07	
	Tereny leśne + pastwiska, pod skał. wulk.		0,067—0,145	
	Tereny leśne + pastwiska, pod skał. osadowych		0,081—0,160	
(Stangenberg, 1971)	Tereny rolniczo-leśne, pod skał. wulk.		0,205—0,370	
	Tereny rolnicze, podłoże skał osadowych		0,059—0,50	
	Młoda morena (skały)		0,11—1,13	
	Stara morena		0,006	
	Piękoscie		0,021	
Obszary starodoluwialne (ubogie w wapień)		0,040		
Obszary młododoluwialne		0,377		
			0,036	

lających zależności pomiędzy ładunkiem chwilowym rozpatrywanych zanieczyszczeń a wielkością przepływu, odtworzono wielkości ładunków dobowych. Suma dobowych ładunków dla rocznego cyklu badań określa wielkość rocznego ładunku analizowanych substancji.

Zależności pomiędzy ładunkiem a przepływem określano stosując model regresyjny AREQ [25], będący zmodyfikowaną wersją modelu RLQ [4]. W modelu tym przyjmuje się, że zależność pomiędzy ładunkiem i przepływem jest opisana wzorem:

$$L = a + b \cdot Q^{\text{cmax}} + \varepsilon$$

w którym  $\varepsilon$  określa wpływ przypadkowych czynników,  $c_{\text{max}}$  jest tą wartością wykładnika (z ciągu 15 wykładników zadanych), dla którego współczynnik korelacji jest największy, zaś współczynniki prostej regresji  $a$  i  $b$  wyznaczone są przy pomocy metody najmniejszych kwadratów.

Dla ładunków prognozowanych w ten sposób, oblicza się górną granicę przedziału ufności przy zadanym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Granicę tę liczy się klasyczną metodą, dodając do prognozowanej wartości ładunku iloczyn odpowiedniego kwantyla rozkładu Studenta i pierwiastka z wariancji.

Mając wielkości codziennych przepływów  $x_1, \dots, x_n$  oraz znaną zależność między ładunkiem i przepływem wyznaczoną na podstawie wyżej podanego wzoru, oblicza się całkowity ładunek roczny

$$\text{CRL} = g \cdot \sum_{m=1}^M L(x_m)$$

w którym  $g = 0,0864$  (gdy CRL wyrażamy w tonach, a natężenie przepływu w  $\text{m}^3/\text{s}$ , a  $M$  jest ilością dni w roku). Dla określonego ładunku rocznego wyznacza się również górną granicę przedziału ufności na poziomie  $\alpha = 0,05$ .



Rys. 1 Ogólna lokalizacja badanych zlewni

## GEOGRAFICZNO—FIZYCZNE CECHY BADANYCH ZLEWNI

Rzeka	Symbol zlewni cząstk.	Powierzchnia km <sup>2</sup>	Polozenie geograficzne	Śr. wys. n.p.m. m	Domin. spadek terenu ‰	Dominujący typ gleb	Warunki infiltracji
Wietcisa	I	236	Pomorze Środkowe (Poj. Kaszubskie i Starogardzkie)	155	5—7	Piaszczysto-gliniaste, bielcowe i brunatne	dobrze
Radunia	II—1	210	Pomorze Środkowe (Poj. Kaszubskie)	200	5—7	Piaski gliniaste, bielcowe i brunatne wylugowane	dobrze
	II—2	328					
	II—R* (1,2)	118					
Wda	III—1	940	Pomorze Środkowe (Pojezierze Kaszubskie, Bory Tucholskie)	120	3—4	Piaski gliniaste, bielcowe	b. dobrze
	III—2	1386					
	III—R* (1,2)	446					
Pomorka	IV—1	4	Pojezierze Wielkopolskie (Pojezierze Gnieźnieńskie)	105	0,5—1	Piaski gliniaste, mocne, brunatne, mady	średnie
	IV—2	72					
Notec Wschodnia	V—1	189	Pojezierze Wielkopolskie (Pojezierze Kujawskie)	124	0,5—1	Piaski gliniaste mocne, pseudobielcowe, czarna ziemia	średnie
	V—2	306					
Kanal Rogalin—Gopło	VI—1	28	Pojezierze Wielkopolskie (Poj. Kujawskie)	103	0,5—1	Czarne ziemie, bielcowe i pseudobielcowe	średnio słabe
	VI—2	59					
Ciek spod Kuśnierza	VII—1	33	Pojezierze Wielkopolskie (Poj. Kujawskie)	103	0,2—1	Bielcowe, pseudobielcowe, czarna ziemia	średnie
	VII—2	43					
Sucha	VIII—1	23	Nizina Środkowo-Mazowiecka	128	0,5	Płowe, czarne ziemie, brunatne	różnicowane zle
	VIII—2	14					
	VIII—3	59					
Piaseczna	IX—1	3,3	Pogórze Zach—Sudeckie (Pogórze Kaczawskie)	255	1,4	Brunatne i bielcowe	zle
	IX—2	1,6		233	1,7		
	IX—3	4,5		270	2,2		
	IX—4	5,3		243	7,6		
	IX—5	11		235	3,1		

\*R<sub>(1,2)</sub> — Zlewnia różnicowa, względem przekrojów 1 i 2.

Tabela 3

## ZAGOSPODAROWANIE BADANYCH ZLEWNI

Rzeka	Symbol zlewni	% powierzchni			Dominujące uprawy	Śr. zużycie nawozów min. NPK kg/ha rok	Hodowla szt/km <sup>2</sup> zlewni	
		użytki rolne	w tym grunty orne	Lasy			Bydło	Trzoda
Wietcisa	I	70,6	59,0	17,2	żyto, ziemniaki	150	35	127
Radunia	II—1	71,0	56,0	14,3	żyto, ziemniaki	166	21	60
	II—2	64,7	49,4	23,4	"	147	12	35
	II—R* (1,2)	54,0	39,0	40,0	"	113	16	46
Wda	III—1	30,0	22,5	55,0	żyto, ziemniaki	40	13	29
	III—2	26,0	19,0	58,0	"	34	10	22
	III—R* (1,2)	18,6	11,2	68,6	"	20	6	13
Pomorka	IV—1	98,0	96,0	0	pszenica, roślin. przemysłowe	300	36	84
	IV—2	93,5	86,2	4,5	"	270	39	126
Notec Wschodnia	V—1	80,4	69,4	10,5	4 zboża, roślin. przemysłowe ziemniaki	188	50	114
	V—2	81,0	69,3	11,1	"	193	50	98
Kanal Rogalin—Gopło	VI—1	95,9	91,3	0,9	4 zboża, roślin. przemysłowe	230	77	65
	VI—2	95,2	91,5	1,4	"	250	115	105
Ciek spod Kuśnierza	VII—1	83,2	75,3	13,1	4 zboża, roślin. przemysłowe	240	62	162
	VII—2	84,8	77,3	11,5	"	220	61	154
Sucha	VIII—1	81,0	60,0	19,0	żyto, ziemniaki	93	60	90
	VIII—2	100,0	70,0	0	"	106	55	90
	VIII—3	79,0	60,0	3,0	"	97	63	91
Piaseczna	IX—1	64,5	51,1	33,9	pszenica, rośliny przemysłowe	270	0	0
	IX—2	91,1	74,5	5,0	"	270	0	0
	IX—3	82,3	69,4	6,4	"	270	154	0
	IX—4	74,5	59,0	23,0	"	270	0	0
	IX—5	77,7	63,1	13,9	"	270	150	98

\*R<sub>(1,2)</sub> — Zlewnia różnicowa, względem przekrojów 1 i 2.

O miarodajności uzyskanych ładunków świadczą wysokie wartości współczynników korelacji dla poszczególnych linii regresji; 70% współczynników korelacji miało wartość większą od 0,8, a tylko 25% było niższych od 0,7. Z uwagi na sztucznie regulowany przepływ w rzece Raduni i brak związku pomiędzy ładunkiem biogenów i natężeniem przepływu, roczny

ładunek dla tej rzeki liczono na podstawie średnich ładunków chwilowych. Związek pomiędzy stopniem rolniczego wykorzystania zlewni a ilością zanieczyszczeń odpływających z jej terenu, analizowano wyznaczając proste regresji metodą najmniejszych kwadratów wg równania:

$$\log y = a \log x + \log b$$

gdzie

y — wartość jednostkowego odpływu kg/ha rok

x — % powierzchni zlewni wykorzystywanej na użytki rolne

a, b — stałe równania  $y = bx^a$

## Omówienie wyników badań i dyskusja

Na podstawie wyników analizy fizyczno-chemicznej, badane rzeki należy zaliczyć do czystych i nieznacznie zanieczyszczonych. Maksymalne wartości wskaźników zanieczyszczenia związkami organicznymi, tylko sporadycznie przekraczały obowiązujące w Polsce normatywy dla I, a czasem II klasy czystości (BZT<sub>5</sub> do 10,4 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>, zapotrzebowanie tlenu metodą nadmanganianową do 29 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>, zapotrzebowanie tlenu metodą dwuchromianową do 90,0 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>). Wartości średnie w większości badanych przekrojów mieściły się w granicach norm dla I klasy. Szczególną czystością odznaczały się wody Więcisy i Raduni, najwyższe stwierdzone wartości omawianych wskaźników kwalifikowały te rzeki do I klasy. Nasylenie tlenem wód wszystkich badanych rzek, przez cały okres badań było wysokie; średnia wartość rozpuszczonego tlenu wahała się od 8,6 do 11,6 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>. Obciążenie związkami biogennymi było silnie zróżnicowane zarówno w poszczególnych przekrojach rzecznych jak i w czasie. Stężenia azotu całkowitego z dwuletniego cyklu badań wahały się w bardzo szerokim zakresie od 0,24 do 20,37 mg/dm<sup>3</sup>, fosforu całkowitego od 0,013 do 7,00 mg/dm<sup>3</sup> i potasu 0,2 do 22,0 mg/dm<sup>3</sup> (tabela 4). Porównując skład wody w kolejnych cyklach rocznych zauważa się, że w większości przekrojów stężenie azotu amonowego i organicznego, związków fosforu oraz wskaźników charakteryzujących zawartość związków organicznych, osiągnęły wyższy poziom w drugim roku badań. Wiązało się to przypuszczalnie z in-

sywniejszymi procesami erozji gleby w okresie topnienia wyjątkowo grubej pokrywy śnieżnej w marcu 1979 r.

Intensywność procesów wymywania zanieczyszczeń z obszaru zlewni jest ściśle związana z warunkami hydrologicznymi na jej terenie. Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 5, ilość substancji biogennych odprowadzanych z określonych zlewni, była zależna od wielkości odpływu wody. W znacznej większości przypadków, wzrost rocznego odpływu wody powodował większy odpływ biogenów. Prawidłowość tę ilustruje rys. 2, przedstawiający proste regresji miesięcznego, jednostkowego odpływu azotu azotanowego i fosforu fosforanowego, w zależności od odpływu wody — ustalone dla rzek: Więcisy, Wdy i Pomorki [22]. Na podstawie tych wyników stwierdzono, że np. w marcu 1979 r. w okresie wielkiej fali roztopowej ze zlewni IV-1 odpłynęło 2,3 razy więcej wody niż w ciągu wszystkich pozostałych miesięcy sezonu badawczego 1978/79. W tym czasie również, przeniesiony ładunek azotu azotanowego był 2,3 razy większy, zaś fosforu fosforanowego — 2,3 razy większy od ładunku odpływającego w ciągu reszty roku. Większy z reguły odpływ jednostkowy wszystkich składników w II roku badań był związany ze zwiększonym odpływem wody w czasie roztopów wiosennych.

Straty azotu i fosforu, w stosunku do ilości tych składników zastosowanych w nawozach, zawierały się w granicach odpowiednio 1,02—36,95% i 0,19—3,35% (tabela 6).

Największe straty azotu zanotowano w intensywnie nawożonych zlewniach: Pomorki, Kanał Rogalin—Gopło (rzeki dorzecza Górnej Noteci) i rzeki Piasecznej (tabela 3), gdzie stężenia azotu azotanowego osiągały okresowo bardzo wysokie wartości. Procent fosforu traconego z odpływem był średnio dziesięciokrotnie mniejszy.

Tabela 4

ZANIECZYSZCZENIE RZEK ZWIĄZKAMI BIOGENNYMI

Zlewnia		N całk. mg/dm <sup>3</sup>			P całk. mg/dm <sup>3</sup>			K mg/dm <sup>3</sup>		
		min.	maks.	śred.	min.	maks.	śred.	min.	maks.	śred.
Więcisa	I	0,39	4,69	0,82	0,065	0,157	0,112	1,0	3,6	1,9
Radunia	II—2	0,30	1,30	0,53	0,040	0,109	0,066	0,3	2,2	1,0
	II—1	0,30	1,57	0,58	0,052	0,266	0,076	0,3	2,5	1,2
Wda	III—1	0,24	1,45	0,56	0,060	0,164	0,111	0,2	2,5	0,9
	III—2	0,24	1,51	0,49	0,073	0,174	0,110	0,2	2,5	0,9
Pomorka	IV—1	0,50	16,29	7,09	0,022	0,336	0,083	0,6	9,8	2,9
	IV—2	0,47	18,67	5,61	0,078	0,608	0,202	3,6	33,0	11,6
Noteć Wsch.	V—1	1,09	4,77	1,90	0,082	0,780	0,264	4,0	10,5	6,2
	V—2	0,98	3,13	1,90	0,053	0,887	0,180	3,5	10,2	5,5
Kanał Rogalin— Gopło	VI—1	3,71	14,91	7,57	0,320	7,000	1,679	5,3	21,5	10,7
	VI—2	1,38	20,73	9,07	0,299	5,733	1,712	7,1	33,5	15,9
Ciek spod Kuśn.	VII—1	1,42	6,52	3,38	0,129	1,907	0,458	5,5	19,5	9,6
	VII—2	1,28	8,06	3,12	0,120	1,013	0,300	3,4	14,5	8,6
Sucha	VIII—1	0,80	11,4	3,10	0,210	1,540	0,070	1,0	5,3	1,9
	VIII—2	0,65	12,57	4,93	0,050	2,600	0,130	0,5	3,6	1,9
	VIII—3	0,36	18,27	3,61	0,020	2,110	0,100	0,4	4,0	2,2
Piaseczna	IX—1	1,01	7,04	3,24	0,013	0,253	0,104	0,4	11,1	2,6
	IX—2	1,18	7,47	3,79	0,025	0,267	0,093	0,8	7,5	2,5
	IX—3	2,85	14,68	8,37	0,127	1,667	0,711	1,7	51,7	21,4
	IX—4	0,92	12,34	4,21	0,036	0,224	0,108	0,9	31,5	9,3
	IX—5	3,23	14,26	7,01	0,120	1,100	0,450	6,7	41,1	17,8

Tabela 5

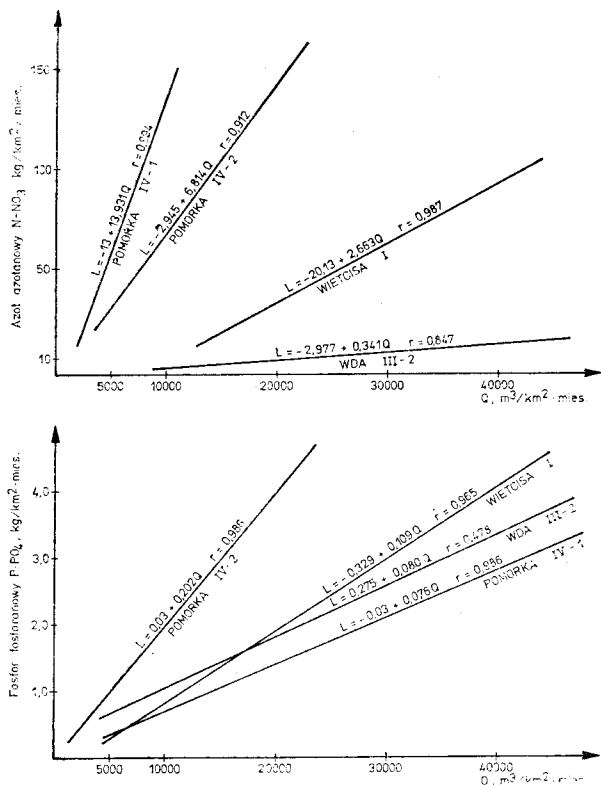
## JEDNOSTKOWY ODPIŁYW SUBSTANCJI BIOGENNYCH Z BADANYCH ZLEWNI W ZESTAWIENIU Z ODPIŁYWEM WODY

Rzeka	Symbol zlewni cząstk.	Rok 1977/78										Rok 1978/79										
		Odpiływ m <sup>3</sup> /ha					Współczynnik jednostkowy odpływu kg/ha r.					Odpiływ m <sup>3</sup> /ha					Współczynnik jednostkowy odpływu kg/ha r.					
		P	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N	P	P-PO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N	P	P-PO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N	P	P-PO <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N	
Wietcisa	I	1890	0,20	0,11	0,34	0,54	1,19	3,14	2234	0,21	0,16	1,02	1,36	2,63	6,44							
Radunia	II-1	3877	0,26	0,13	0,37	0,59	2,07	1,85	4092	0,25	0,16	0,58	0,72	1,85	6,73							
	II-2	3274	0,25	0,14	0,49	0,61	1,93	1,95	3527	0,27	0,18	0,66	0,77	1,91	6,26							
	II-R	2200	0,23	0,15	0,69	0,65	1,63	2,12	2502	0,31	0,20	0,80	0,87	2,10	5,44							
Wda	III-1	1777	0,17	0,14	0,20	0,41	0,94	2,16	1615	0,16	0,13	0,26	0,44	0,91	2,15							
	III-2	1825	0,18	0,14	0,17	0,40	0,89	2,37	1670	0,16	0,13	0,23	0,38	0,82	2,21							
	III-R	1952	0,23	0,13	0,06	0,33	0,48	2,78	1800	0,20	0,15	0,06	0,38	0,55	2,50							
Pomorka	IV-1	1168	0,10	0,07	19,52	0,26	20,18	4,65	3554	0,85	0,69	49,68	1,81	52,15	13,93							
	IV-2	682	0,09	0,06	4,84	0,29	5,42	0,81	1530	0,43	0,33	13,63	1,44	15,48	11,21							
Notec Wschodnia	V-1	950	0,15	0,05	0,33	0,12	1,71	5,41	1540	0,13	0,08	0,45	0,13	1,68	9,66							
	V-2	1000	0,13	0,04	0,44	0,19	2,01	5,66	1460	0,09	0,06	0,62	0,23	1,71	9,19							
Kanał Rogalin-Gopio	VI-1	920	0,77	0,41	4,44	0,40	6,04	8,38	1300	0,71	0,49	5,59	0,39	6,93	11,30							
	VI-2	899	0,85	0,39	6,23	0,58	7,83	10,73	1382	0,85	0,51	7,61	0,70	9,32	13,61							
Ciek spod Kuźnierza	VII-1	903	0,24	0,14	1,71	0,16	3,05	8,40	1240	0,25	0,18	2,16	0,24	3,30	10,43							
	VII-2	910	0,23	0,11	1,74	0,12	3,01	8,49	1250	0,23	0,15	1,64	0,15	2,99	10,79							
Sucha	VIII-1	2937	0,09	0,05	0,46	0,22	1,01	0,62	2988	0,04	0,01	0,57	0,18	1,05	0,63							
	VIII-2	3187	0,17	0,08	1,18	0,14	1,67	0,67	3000	0,07	0,04	1,30	0,11	1,66	0,77							
	VIII-3	2364	0,11	0,05	0,50	0,15	0,97	0,51	2320	0,05	0,02	0,57	0,13	0,95	0,57							
Piaseczna	IX-1	660	0,06	0,02	1,96	0,19	2,64	1,67	810	0,07	0,02	2,44	0,21	3,16	1,89							
	IX-2	3800	0,24	0,09	13,28	0,90	16,73	10,33	4480	0,28	0,10	14,70	0,93	18,41	11,07							
	IX-3	1270	0,67	0,41	6,93	2,71	11,39	24,90	1450	0,76	0,47	7,72	2,92	12,68	26,33							
	IX-4	1700	0,16	0,08	5,52	0,36	7,20	16,58	2000	0,18	0,09	6,15	0,40	7,99	21,90							
	IX-5	1380	0,42	0,20	6,59	0,76	9,00	18,92	1540	0,44	0,21	6,94	0,77	9,42	19,10							

Zwraca uwagę fakt, że duże straty tego składnika miały miejsce zarówno w zlewniach typowo rolniczych (Kanał Rogalin—Gopio, Piaseczna), jak i w lesnej zlewni rzeki Wdy. Prawdopodobnie w tej ostatniej zlewni, której nawożenie było małe, większą rolę odgrywały związki biogenne, wprowadzane z opadami atmosferycznymi.

Uzyskane wartości strat nie przekraczają wartości szacunkowych, przyjmowanych dla Europy [11].

Analizując wpływ stopnia rolniczego wykorzystania zlewni na ilość zanieczyszczeń wymywanych w cyklu hydrologicznym, sprawdzono zależność jednostkowego ładunku i średniego rocznego stężenia substancji biogennych w ba-

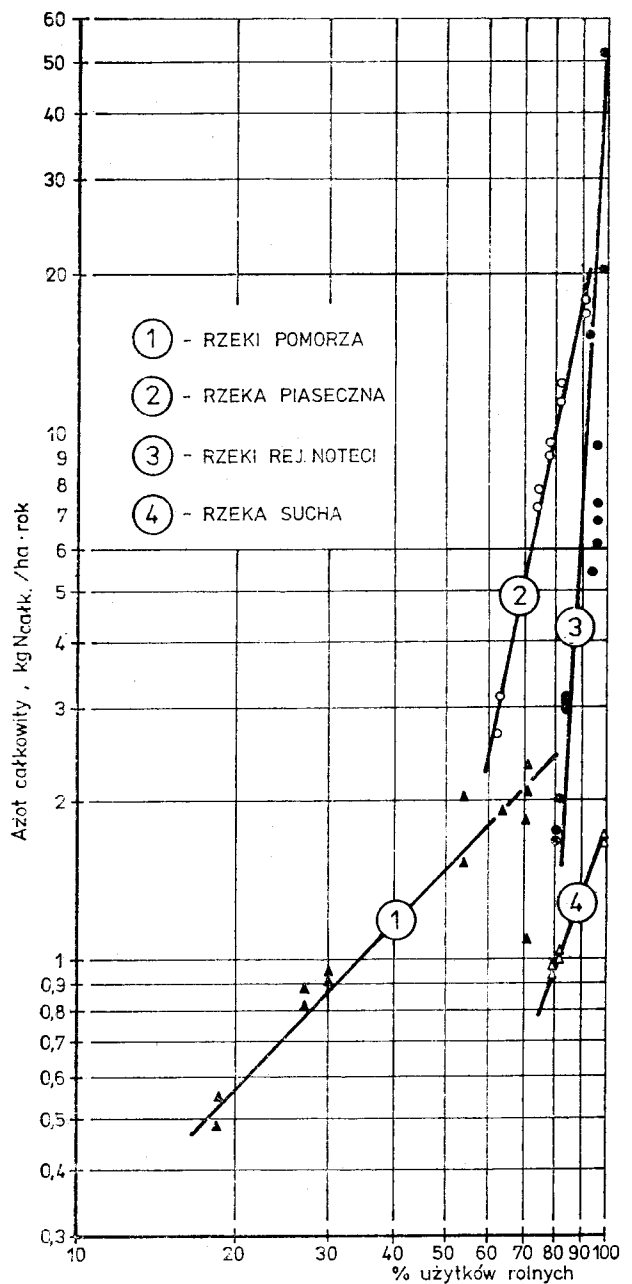


Rys. 2 Związek pomiędzy miesięcznym odpływem azotu azotanowego (N-NO<sub>3</sub>) i fosforu fosforanowego (P-PO<sub>4</sub>) a odpływem wody z badanych zlewni

danych przekrojach rzecznych od procentowego udziału użytków rolnych w zlewni i od ilości biogenów wprowadzanych na teren zlewni z nawozami mineralnymi i organicznymi. Najściślejszy związek, lecz tylko w zakresie zlewni o podobnym charakterze fizjograficznym, stwierdzono pomiędzy procentem użytków rolnych w zlewni a wielkością jednostkowego odpływu azotu azotanowego i całkowitego. Gorszą nieco korelację uzyskano dla związków fosforowych i potasowych.

Tabela 6  
STRATY ROCZNE FOSFORU I AZOTU Z ODPLYWEM W STOSUNKU DO ILOŚCI NAWOZÓW MINERALNYCH I ORGANICZNYCH WPROWADZANYCH DO ZLEWNI

Rzeka	Symbol zlewni	1977—78		1978—79	
		Pog. %	Nog. %	Pog. %	Nog. %
Więcisa	I	0,70	1,30	0,70	1,83
Radunia	II—1	0,98	2,68	0,96	2,38
	II—2	1,16	3,11	1,28	3,09
Wda	III—1	2,48	4,49	2,35	4,36
	III—2	3,36	5,78	3,06	5,52
Pomorka	IV—1	0,20	14,27	2,02	38,95
	IV—2	0,19	3,85	1,04	11,67
Notec Wschodnia	V—1	0,53	1,45	0,45	1,95
	V—2	0,46	1,77	0,33	2,23
Kanał Rogalin — Gopło	VI—1	1,97	4,17	1,82	5,14
	VI—2	2,26	5,43	2,25	6,69
Ciek spod Kuźnierza	VII—1	0,58	1,34	0,61	2,63
	VII—2	0,56	2,01	0,56	2,17
Sucha	VIII—1	0,44	1,09	0,18	1,12
	VIII—2	0,69	1,54	0,26	1,45
	VIII—3	0,53	1,06	0,23	1,02
Piaseczna	IX—1	0,26	2,69	0,32	3,28
	IX—2	1,19	4,17	1,26	4,60
	IX—3	2,08	6,32	2,37	6,77
	IX—4	0,70	7,44	0,76	8,25
	IX—5	2,00	4,16	2,09	4,37



Rys. 3 Związek między procentowym udziałem użytków rolnych a jednostkowym odpływem całkowitego azotu ze zlewni

Rysunek 3 przedstawia przykładowo proste regresji dla azotu całkowitego w układzie: spływ jednostkowy azotu — procent użytków rolnych. Z otrzymanego układu punktów, uzyskanych po naniesieniu danych dla wszystkich badanych zlewni, wyodrębnić można wartości odpowiadające grupom zlewni zlokalizowanych w tych samych regionach fizjograficznych Polski, układające się wzdłuż prostych z większym lub mniejszym rozproszeniem. I tak, oddzielne linie regresji daje się wykreślić dla rzeki Pomorza Środkowego, rejonu Noteci, rzeki Suchej i Piasecznej.

W tabeli 7 zestawiono równania regresji i współczynniki korelacji dla omawianej zależności. Adekwatność równań do opisu tej zależności w przypadku składników azotowych jest

Tabela 7  
RÓWNANIA REGRESJI I WSPÓLCZYNNIKI KORELACJI DLA ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY PROCENTEM UŻYTKÓW ROLNYCH A JEDNOSTKOWYM ODPLYWEM BIOGENÓW Z RÓŻNYCH TYPOW ZLEWNI

Składnik	Zlewnie	Równanie regresji	Wsp. Korelacji R
Azot całkowity	Pomorze Śr.	$\log y=0,74 \log x-1,12$	0,921
	Rejon Noteci	$\log y=11,05 \log x-20,80$	0,871
	Rzeki Suchej	$\log y=2,22 \log x-4,22$	0,972
	Rzeki Piasecznej	$\log y=5,10 \log x-8,72$	0,989
Fosfor całkowity	Pomorze Śr.	$\log y=0,35 \log x-1,14$	0,774
	Rejon Noteci	$\log y=3,59 \log x-7,55$	0,320
	Rzeki Suchej	$\log y=2,08 \log x-4,12$	0,470
	Rzeki Piasecznej	$\log y=6,60 \log x-13,00$	0,934
Potas	Pomorze Śr.	$\log y=0,59 \log x-0,51$	0,522
	Rejon Noteci	$\log y=0,81 \log x-0,63$	0,185
	Rzeki Suchej	$\log y=0,96 \log x-1,07$	0,787
	Rzeki Piasecznej	$\log y=4,54 \log x-7,53$	0,540

y — jednostkowy odpływ (Kg/ha rok)

x — % użytków rolnych w zlewni

bardzo wyraźnie widoczna (wartość współczynnika korelacji: 0,828—0,978). Współczynniki korelacji uzyskane dla fosforu ogólnego wynosiły od 0,320 do 0,904, a dla potasu były najniższe i wahały się w granicach od 0,185 do 0,787.

Analiza wartości współczynników regresji dla wyodrębnionych grup zlewni wskazuje, że rzeki Pomorza Środkowego i rzeka Sucha różnią się od pozostałych; ich linie regresji charakteryzuje mniejsze nachylenie w związku z czym bezwzględna wartość odpływu substancji biogennych, jak i przyrost ładunków wraz ze wzrostem procentu użytków rolnych są dla nich mniejsze.

Różnorodność i wielokierunkowość działania czynników warunkujących wielkość odpływu obszarowych zanieczyszczeń rolniczych z wodami rzek, uniemożliwia jednak znalezienie statystycznego związku między przebiegiem funkcji a charakterystyką fizjograficzną zlewni. Otrzymaną zależność zatem można wykorzystać do prognozowania ładunków związków biogennych, w zależności od stopnia rolniczego wykorzystania zlewni o podobnym charakterze. Zlewnie o innych cechach fizjograficznych wymagają eksperymentalnego wyznaczenia parametrów równania.

## Wnioski

Przeprowadzone badania i studia upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Dla badanych zlewni stwierdzono dodatnią korelację pomiędzy procentowym udziałem użytków rolnych w zlewni lub ilością biogenów, doprowadzanych z nawozami, a jednostkowym odpływem tych substancji.

Zależność tę opisuje równanie

$$y = bx^a$$

przy czym wartości stałych równania są różne dla zlewni o odmiennych parametrach morfometrycznych, różnych gleb i podłożu oraz sposobie użytkowania a także o odmiennych innych cechach indywidualnych.

2. Jednostkowe wskaźniki odpływu substancji biogennych ustalone w ramach niniejszej

pracy, mogą być przyjmowane za podstawę prognozowania jakości wód w zlewniach o zbliżonej charakterystyce, a zwłaszcza do sporządzenia bilansu związków biogennych, dopływających do jezior i istniejących i nowo projektowanych zbiorników wodnych, stanowiącego podstawę technicznych koncepcji ochrony tych wód przed postępującym procesem eutrofizacji, intensyfikowanym działalnością człowieka.

## LITERATURA

1. H. BERNHARDT, J. CLASEN, E. A. NUSH 1973: Vergleichende Untersuchungen Zur Ermittlung der Eutrophierungsvorgänge und ihrer Ursachen an Riveris und Wahnbachtalsperre. Vom Wasser 40, 245—303.
2. S. BORONIEC, T. SKRZYCZYŃSKI: Migracja składników mineralnych z gleb niziny Szczecińskiej. Szczecińskie Towarzystwo Naukowe, Wydział Nauk Przyrodniczo-Rolniczych t. XLVII z. 1.
3. N. BRINK, 1974: Influence of the increased use of fertilizer on the pollution of water bodies. Lantbrukshögskolan. Wattervald 15, 30.
4. M. CZAPLIŃSKI, R. KRASNODEBSKI, 1978: Program AREL na m-c w języku FORTRAN 1900 do modelu RLQ. IMGW — Wrocław, maszynopis.
5. P. J. DILLON, W. B. KIRCHNER, 1975: The effects of geology and land use on the export of phosphorus from watersheds. Water Research, 9, 135—148.
6. J. J. EDENS, S. O. SOLDBERG 1977: Nutrient discharge from 90 km<sup>2</sup> water-shed. Progress in Watertechnology 8, 4/5 : 85—89.
7. H. FLORCZYK, 1978: Określenie wielkości wpływu substancji biogennych, ze zlewni o różnej charakterystyce i sposobie zagospodarowania. Opracowanie wykonane w ramach tematu PR-7. 01.04.02. IMGW, Warszawa, maszynopis.
8. H. FLORCZYK, 1979: Współczynnik jednostkowego odpływu zanieczyszczeń obszarowych ze zlewni o różnej charakterystyce zagospodarowania. IMGW W-wa, maszynopis.
9. O. J. GÄCHTER, FURRER, 1972: Der Beitrag der Landwirtschaft zur Eutrofierung der Gewässer in der Schweiz. Schweiz. Z. Hydrol. 34,1 : 41-70.
10. L. JAKUBOWSKA, 1979: Badania nad wpływem zanieczyszczeń obszarowych na jakość wód zlewni Suhej. IMGW, Warszawa, maszynopis.
11. JANUSZKIEWICZ i in. 1974: Wpływ nawożenia rolniczego na wodę rzeki Wisły. Opracowanie syntetyczne. IMGW, Oddział Morski — Gdynia, maszynopis.
12. L. KAUPPI, 1978: Effect of drainage basin characteristics on the diffuse load of phosphorus and nitrogen. Publications of the Water Research Institute, National Board of Water, Finland, 30: 21 41.
13. T. KOHONEN, 1976: Durch Bodenauswaschung in Gewässer gelangende Stoffe und dabei wirksame Faktoren. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 17, 144—159.
14. G. J. KOLENBRANDER, 1971: Contribution of agriculture to eutrophication of surface waters with nitrogen and phosphorus in the Netherlands. Report 10 Institute for soil Fertility, Haven.
15. I. M. KUTRIN, 1975: O mieroprijatiach po predotraszczeniju zagraznienija wodnych obiektow mineralnymi udobreniami. Gidrotech. Melli Nr 5, 107—108.
16. R. C. LOEHR, 1972: Agricultural runoff-characteristics control. J. Sanit. Engin. Div. 98, 909—925.
17. G. SCHMIDT, 1976: Sterben Gewässer und Seen durch die Schuld der Landwirtschaft. Forum Umwelt, 4, 127—131.

18. M. STANGENBERG, 1971: Phosphorus problems in the secondary pollution of lakes. *Lacustrine Climatology, Proceeding of the International Congress, Como.*
19. H. STOLARSKI, M. SKRODZKI, 1966: Odplyw oraz chemizm wód rzecznych i drenarskich w terenie pagórkowatym. *Wiadomości IMUZ t. VI, 23, 153—161.*
20. **Swobodnyj otczot po temie I. A-2.04. SRWO** Stran-czlenow SEW. 1976, Budapeszt.
21. R. TAYLOR, M. BALCERSKA, W. DYDUCH, K. KOWALEWSKA, 1979: Wplyw rolniczych zanieczyszczeń obszarowych na jakość wody rzek Pomorki, Więcisy, Raduni i Wdy. IMGW, Warszawa, maszynopis.
22. R. TAYLOR, 1980: Wplyw rolniczych zanieczyszczeń obszarowych na jakość wód powierzchniowych dla potrzeb skonstruowania modelu matematycznego. IMGW, Warszawa, maszynopis.
23. J. WILAMSKI, Z. ŚLIWA, 1978: Splyw składników nawozowych roślin ze zlewni rzek Pomorza Zachodniego. *Materiały Badawcze IMGW Seria: Gospodarka Wodna i Ochrona Wód, Warszawa.*
24. K. WUHRMAN, 1966. Eutrophication. Seminar presented at the University of Texas, Austin.
25. M. ZIĘBA, M. CZAPLIŃSKI, 1979: PROGRAM AREQ w języku FORTRAN 1900 do prognozy stanu zanieczyszczenia wód w danym przekroju rzeki. IMGW — Wrocław, maszynopis.