

Andrzej Jędrzak\*

## 5. ZBIORNIKI ACIDOTROFICZNE

### *Streszczenie*

*Zbiorniki acidotroficzne stanowią około 50% zbiorników „pojezierza antropogenicznego”. W latach 1986-1988 przebadano wody 15 zbiorników tej grupy, w profilu pionowym, podczas stagnacji letniej i cyrkulacji wiosennej.*

*Na podstawie dynamiki (termiki) wód w ciągu roku wyróżniono trzy zbiorniki meromiktyczne, pozostałe (12 zbiorników) zaliczono do typu holomiktycznego, z podziałem na di- i polimiktyczne.*

*W zbiornikach meromiktycznych stwierdzono obecność, w profilu pionowym, dwóch podstawowych warstw: mikso- i monimolimnionu. Wyróżniono dwa typy chemiczne wód: siarczanowy wapniowo-magnezowy i siarczanowo-żelazowy.*

*Przedstawiono zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym oraz skład jonowy wód 15 zbiorników badanych w latach 1986-87.*

*Dyskutowano nad przyczyną zakwaszenia wód badanych zbiorników, wyróżniono trzy etapy przebiegu tych procesów. Znaczną rolę w tych procesach przypisano związkowi żelaza.*

### 5.1. Wstęp

Na podstawie badań fizyczno-chemicznych cech powierzchniowych prób wody zbiorników pojezierza antropogenicznego, przeprowadzonych w latach 1986-1988 wyróżniono grupę zbiorników o bardzo niskim odczynie wody (poniżej 4,0 pH) którą nazwano acidotroficznymi (Solski i inni 1988). Stanowią one około 50% zbiorników pojezierza antropogenicznego i jako najmłodsze występują głównie w rejonie Łęknicy. Przyczyny zakwaszenia ich wód są znane (Matejczuk 1986, Solski i inni

---

\*prof. dr hab. inż. Andrzej JĘDRZAK - Politechnika Zielonogórska

1988), przypuszcza się, że każdy zbiornik pojezierza antropogenicznego w swoim rozwoju onogenicznym przechodzi etap acidyfikacji. Wody tych zbiorników uległy alkalizacji lub znajdują się na drodze naturalnego procesu ich zobojętnienia.

W celu bliższego poznania tych procesów wybrano 15 zbiorników, w których prześledzono zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym podczas stagnacji letnich i cyrkulacji wiosennej. Stwierdzono występowanie trzech zbiorników meromiktycznych, zaś w grupie holomiktycznej, di- i-polimiktyczne.

Meromiksja jest zjawiskiem stosunkowo rzadkim, jednakże dość szeroko rozpowszechnionym na naszym globie (Hutchinson 1957, Walker 1974). Znanym do niedawna, prawdopodobnie jedynym w kraju jeziorem typu meromiktycznego, było jez. Wądołek (Passowicz 1938), które po wycięciu otaczającego go lasu przekształciło się w typ holomiktyczny (Marek 1976). Występowanie zjawiska meromiksji na pojezierzu antropogenicznym stwierdził w latach osiemdziesiątych Matejczuk (1986).

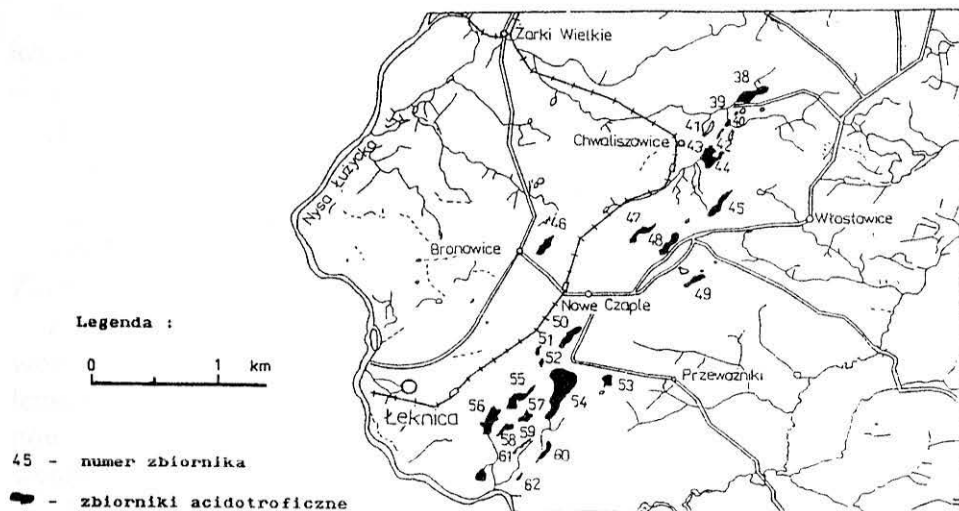
Zbiorniki meromiktyczne przedstawiają szczególnie etap rozwoju najgłębszych i naturalnie osłoniętych przed wiatrami zbiorników acidotroficznymi, których geneza wiąże się między innymi z występowaniem w ich wodach dużych ilości żelaza.

## 5.2. Metody

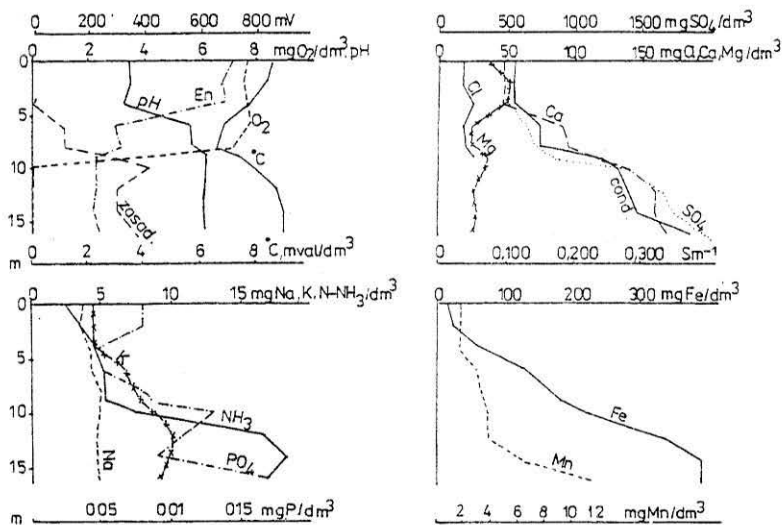
W latach 1986-1988 podczas stagnacji letnich (lipiec, sierpień) i cyrkulacji wiosennej (marzec) przeprowadzono badania 15-tu wybranych zbiorników z grupy acidotroficznymi (rys.1).

Głębokości maksymalne tych zbiorników wahały się od 5 do 24 m. Próby wody pobrano z miejsca najgłębszego: z powierzchni (0,4 m), 1 m, 3 m i następnie co 2 m i 1 m nad dnem. Zakres oznaczeń w tak pobranych próbach obejmował od 20 do 32 wskaźników fizyczno-chemicznych, które wykonano w sposób opisany przez Hermanowicza i innych (1976). Sód, potas i wapń oznaczono metodą fotometrii płomieniowej.

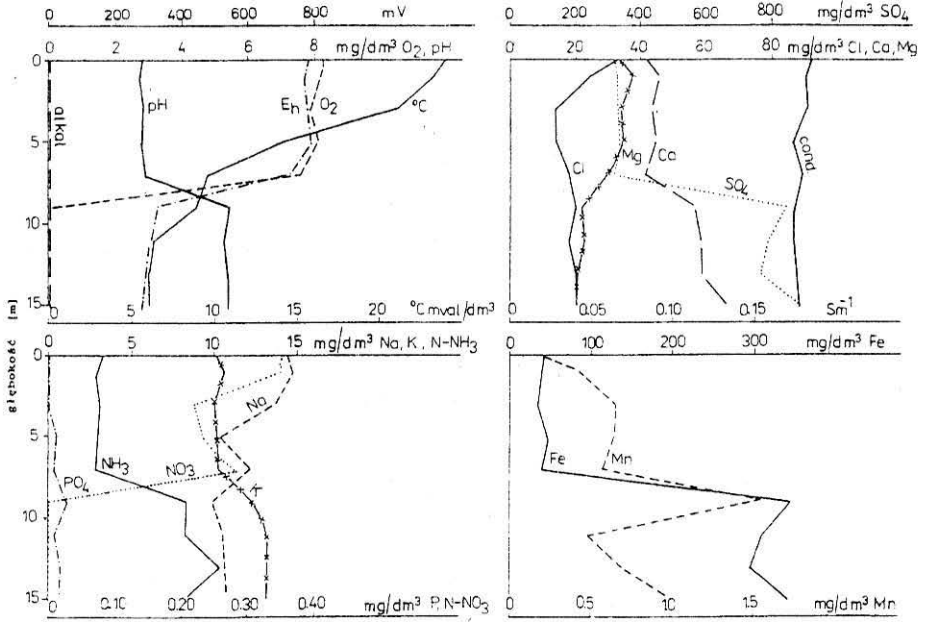
Do klasyfikacji składu jonowego badanych wód wykorzystano diagramy liniowe Pipera w modyfikacji Monitiona (Bagińska, Macioszczyk 1986).



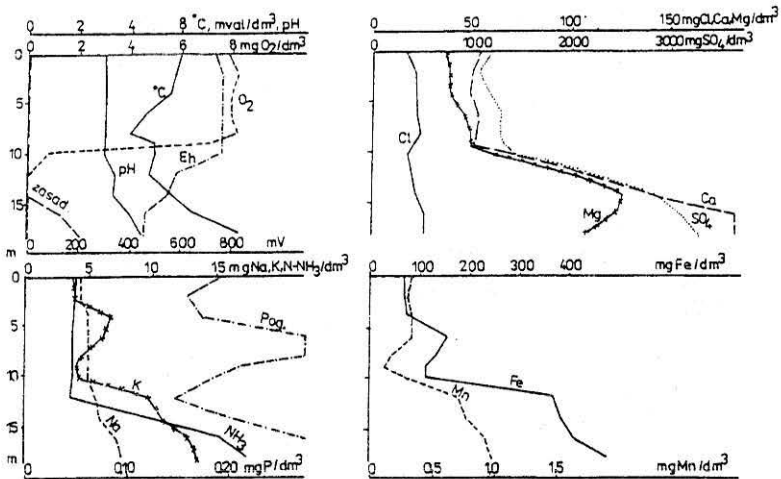
Rys. 1. Pojezierze antropogeniczne



Rys. 2. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym zbiornika nr 38 (sierpień 1986)



Rys. 3. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym zbiornika nr 48 (sierpień 1986)



Rys. 4. Zmiany kilku wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym zbiornika nr 54 (sierpień 1987)

### 5.3. Wyniki badań

Analiza wyników badań 15-tu zbiorników z punktu widzenia dynamiki ich wód w cyklu rocznym wykazała obecność dwóch zasadniczych typów:

- zbiorniki meromiktyczne (nr nr 38, 48, 54),
- zbiorniki holomiktyczne:
  - dimiktyczne (nr nr 25, 43, 45, 46, 49, 50, 53, 55, 56, 62),
  - polimiktyczne (nr nr 47, 60).

#### Zbiorniki meromiktyczne

Zmiany kilkunastu ważniejszych wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu trzech zbiorników (nr nr 38, 48, 54) podczas stagnacji letnich przykładowo przedstawiono na rys. 2-4. Miąższość miksolimnionów i monimolimnionów oraz warstw przejściowych w tych zbiornikach wynosiła w metrach:

Zbiornik nr	miksolimnion	warstwa przejściowa	monimolimnion
38	8 (0-8)	3 (8-11)	7 (11-18)
48	7 (0-7)	2 (7-9)	6 (9-15)
54	9 (0-9)	4 (9-13)	11(13-24)

Wyróżnione warstwy wyznaczono przykładowo dla zbiornika 54, na tle zmian 6 wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym podczas stagnacji letnich i cyrkulacji wiosennej (rys. 5a i 5b).

Wody miksolimnionu pozbawione były zasadowości, charakteryzował je niski odczyn od 2,8 pH (rys. 3) do 3,1 pH (rys. 4a), dobre natlenienie oraz wysokie wartości potencjału redoks (rys. 2-4).

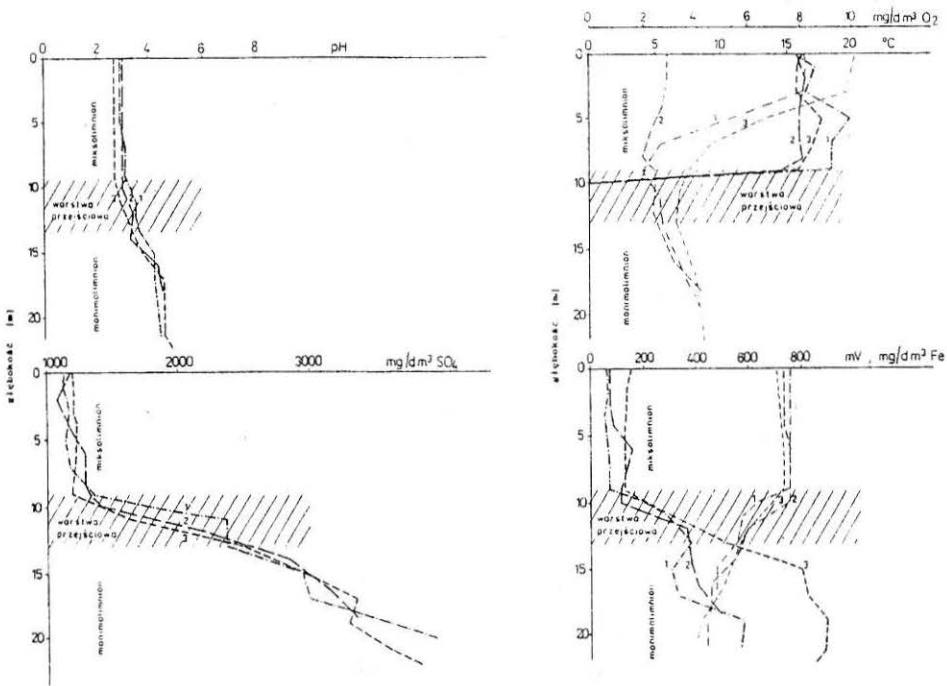
W warstwie przejściowej odczyn wody ulegał nieznacznemu (zbiornik nr 54) lub gwałtownemu wzrostowi do 5,8 pH (zbiornik nr 38) i 5,4 pH (zbiornik nr 48). Wzrosło zasolenie wód, zmalała natomiast zawartość tlenu i potencjał redoks.

Monimolimnion cechował przede wszystkim brak tlenu, pojawienie się bardzo dużych ilości żelaza (do powyżej 900 mg/dm<sup>3</sup> Fe og., zb. nr 38) i siarczanów (ok. 4000 mg/dm<sup>3</sup> SO<sub>4</sub>, zb. nr 54) oraz wysokich stężeń amo-



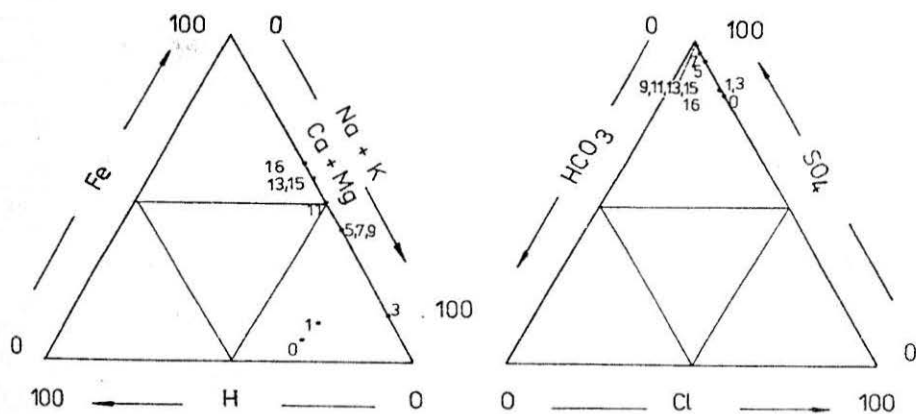
niaku (ok.  $18 \text{ mg/dm}^3 \text{ N-NH}_4$ , zb. nr 54), wapnia (powyżej  $250 \text{ mg/dm}^3 \text{ Ca}$  zb. nr 54) i manganu ( $2,3 \text{ mg/dm}^3 \text{ Mn}$ , zb. nr 54).

Analiza składu jonowego wód badanych zbiorników wykazała występowanie znacznego zróżnicowania składu chemicznego w profilu pionowym. Wody zbiornika nr 38 były bogate w siarczany (powyżej 82%). Wody miksolimnionu tego zbiornika charakteryzował znaczny udział wapnia i magnezu (69-71%). W monimolimnionie stężenia żelaza sięgały 63% udziału kationów.

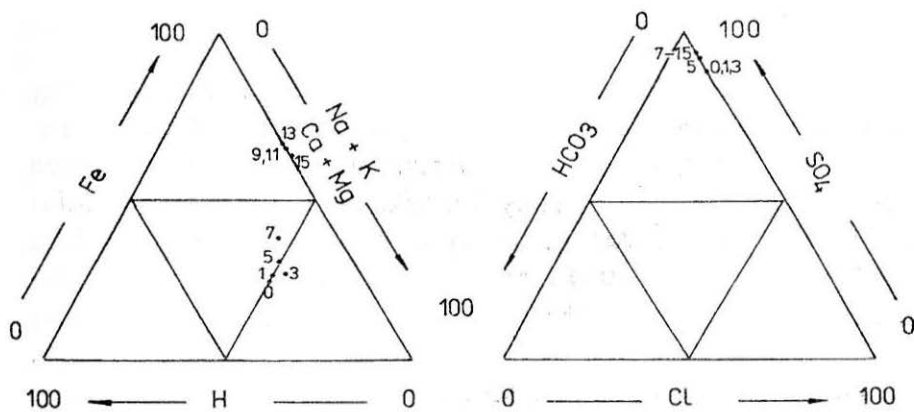


Rys. 5. Miąższość mikro- i monimolimnionu oraz warstw przejściowych na ile zmian kilku wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 54 (sierpień 1987)

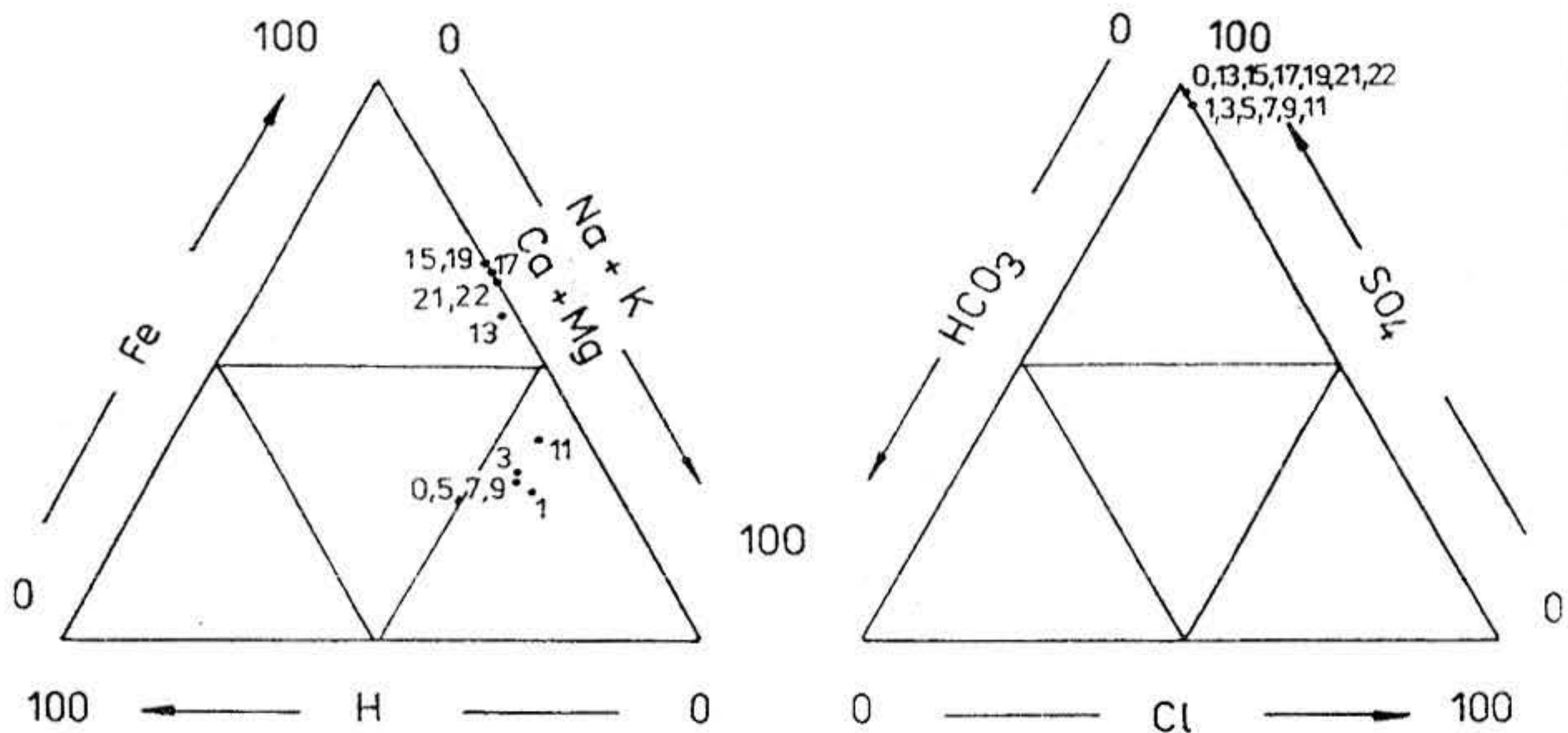
Na podkreślenie zasługuje znaczący udział jonu wodorowego (21-32%) w powierzchniowej (0-3 m) warstwie wody (rys. 6).



Rys. 6. Skład jonowy wód zbiornika nr 38



Rys. 7. Skład jonowy wód zbiornika nr 48



Rys. 8. Skład jonowy wód zbiornika nr 54

W wodach zbiornika nr 48 dominującym anionem były siarczany (powyżej 83%). W miksolimnionie znaczny udział stanowił wapń i magnez (powyżej 50%), natomiast w monimolimnionie przeważał kation żelazowy (62 - 69%) (rys. 7). Wody zbiornika nr 54 były w całym profilu pionowym wybitnie siarczanowe (powyżej 95%). Wody miksolimnionu tego zbiornika charakteryzowała przewaga wapnia i magnezu nad żelazem, podczas gdy w monimolimnionie dominował już kation żelazowy (rys. 8).

Uwzględniając stratyfikację pionową oraz dwie zasadnicze warstwy badanych zbiorników, wyróżniono następujące typy wód:



Nr zbiornika	Warstwa	Udział jonów % mval			Typ wody
		SO <sub>4</sub>	Fe	Ca+Mg	
54	miksolimn.	95	50	50	siarczan. wapn.-magn.
54	monimolimn.	95	62-69	-	siarczan. żelazowy
48	miksolimn.	83	-	50	siarczan. wapn.-magn.
48	monimolimn.	83	62-69	-	siarczan. żelazowy
38	miksolimn.	82	-	60-71	siarczan. wapn.-magn.
38	minimolimn.	82	63	-	siarczan. żelazowy

Podkreślić należy, że przejście wód zbiornika nr 54 z podtypu wapniowo-magnezowego w żelazowy było stopniowe i łagodne.

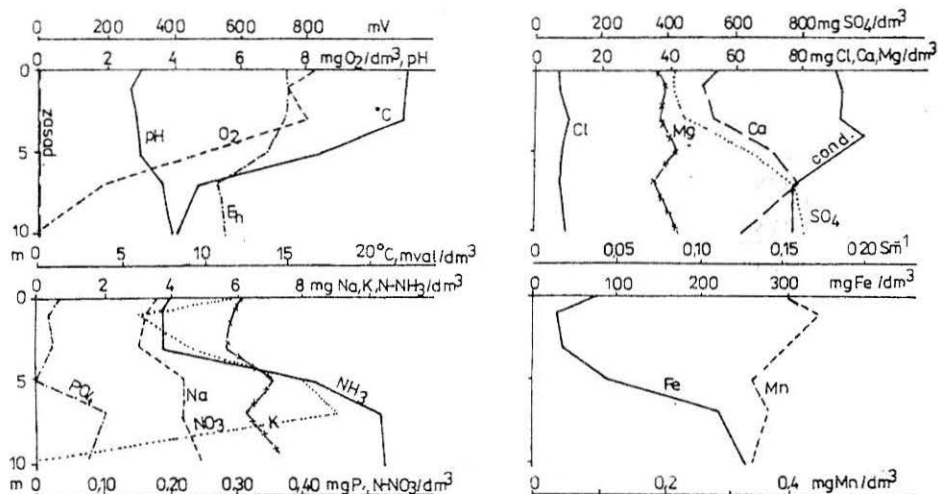
### Zbiorniki holomiktyczne

W obrębie tego typu wyróżniono dwa podtypy: dimiktyczne (10 zbiorników) i polimiktyczne (2 zbiorniki).

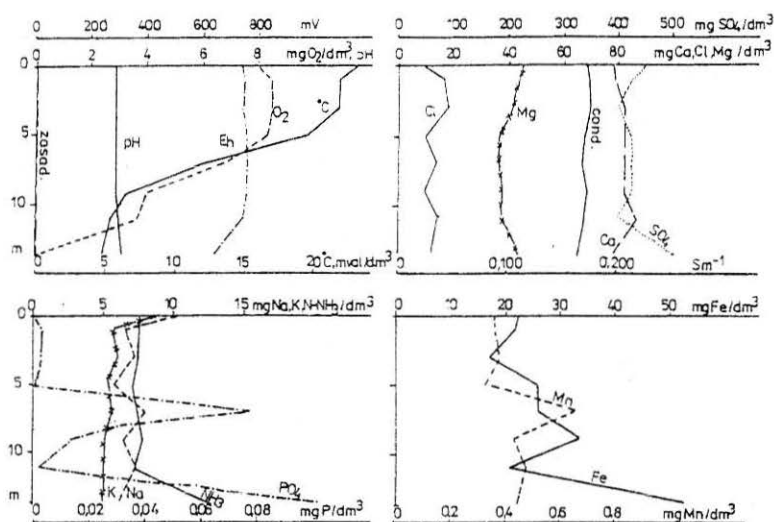
Zbiorniki dimiktyczne charakteryzowało występowanie dwóch okresów stagnacyjnych i cyrkulacyjnych. Zmiany kilkunastu ważniejszych wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym podczas stagnacji ilustrują rys. 9-18. Głębokość maksymalna tych zbiorników wahała się od 7 do 15 m. Epilimnion sięgał najczęściej głębokości 5 i 7 m, grubość warstwy metalimnicznej wynosiła od 2 do 4 m, miąższość hypolimnionu 6 zbiorników wahała się od 2 do 5 m. Pozostałe 4 zbiorniki pozabawione były warstwy podskokowej (hypolimnionu).

Są to zbiorniki stosunkowo płytkie. O pojawieniu się stratyfikacji podczas okresów stagnacyjnych zadecydowało głębokie usytuowanie misy w stosunku do otaczającego terenu, przylegające lasy oraz inne cechy, wyrażone wysokimi wartościami głębokości względnej.

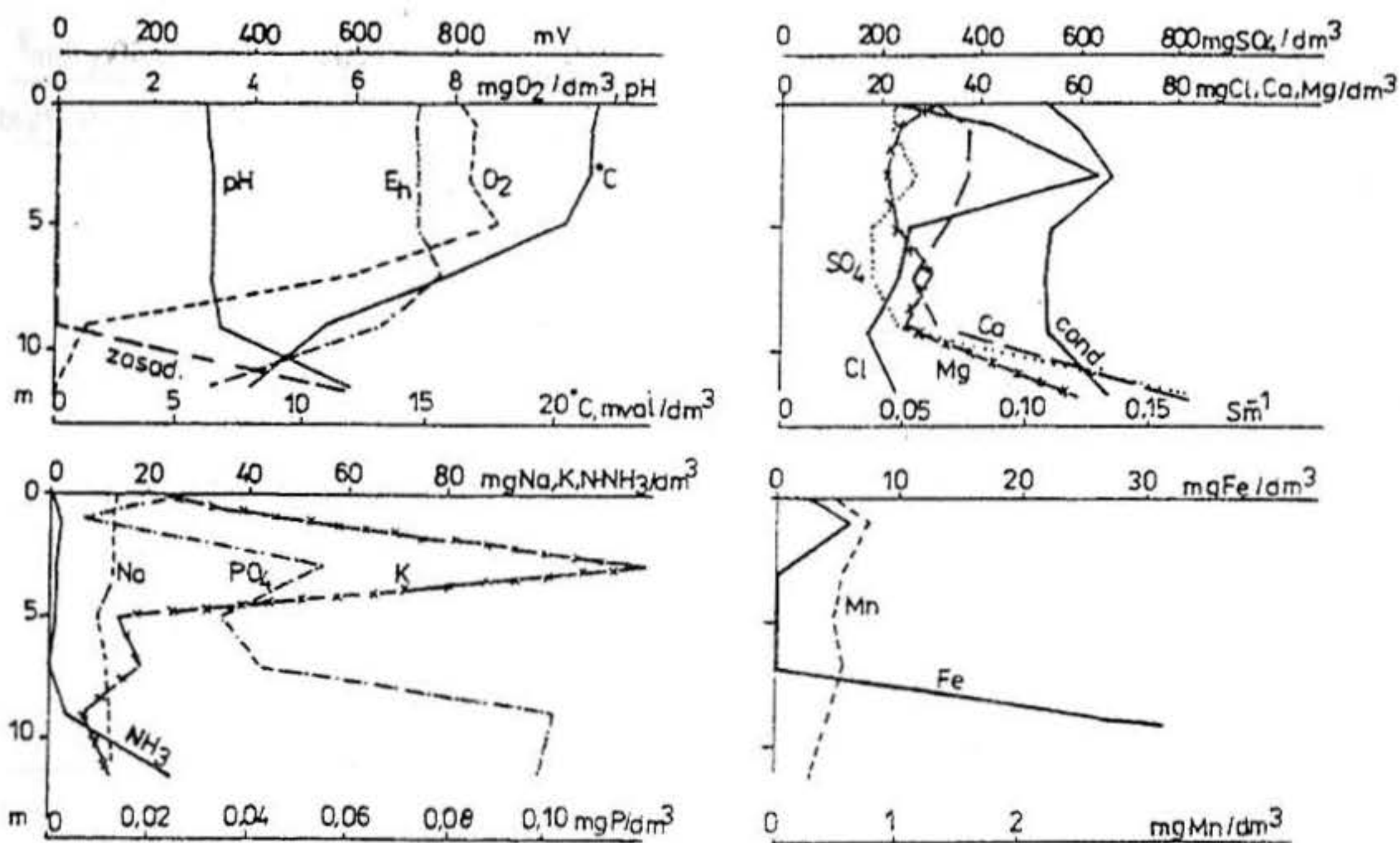
Odczyn powierzchniowej warstwy wody badanych zbiorników wahał się od 2,6 pH (zb. nr 62) do 3,6 pH (zb. 46). Przy dnie wartości odczynu w przypadku trzech zbiorników (nr nr 25, 45 i 50) wyraźnie wzrastały do 5,5-6,3 pH, w pozostałych zbiornikach wzrost był nieznaczny, osiągając maksymalną wartość - 3,6 pH.



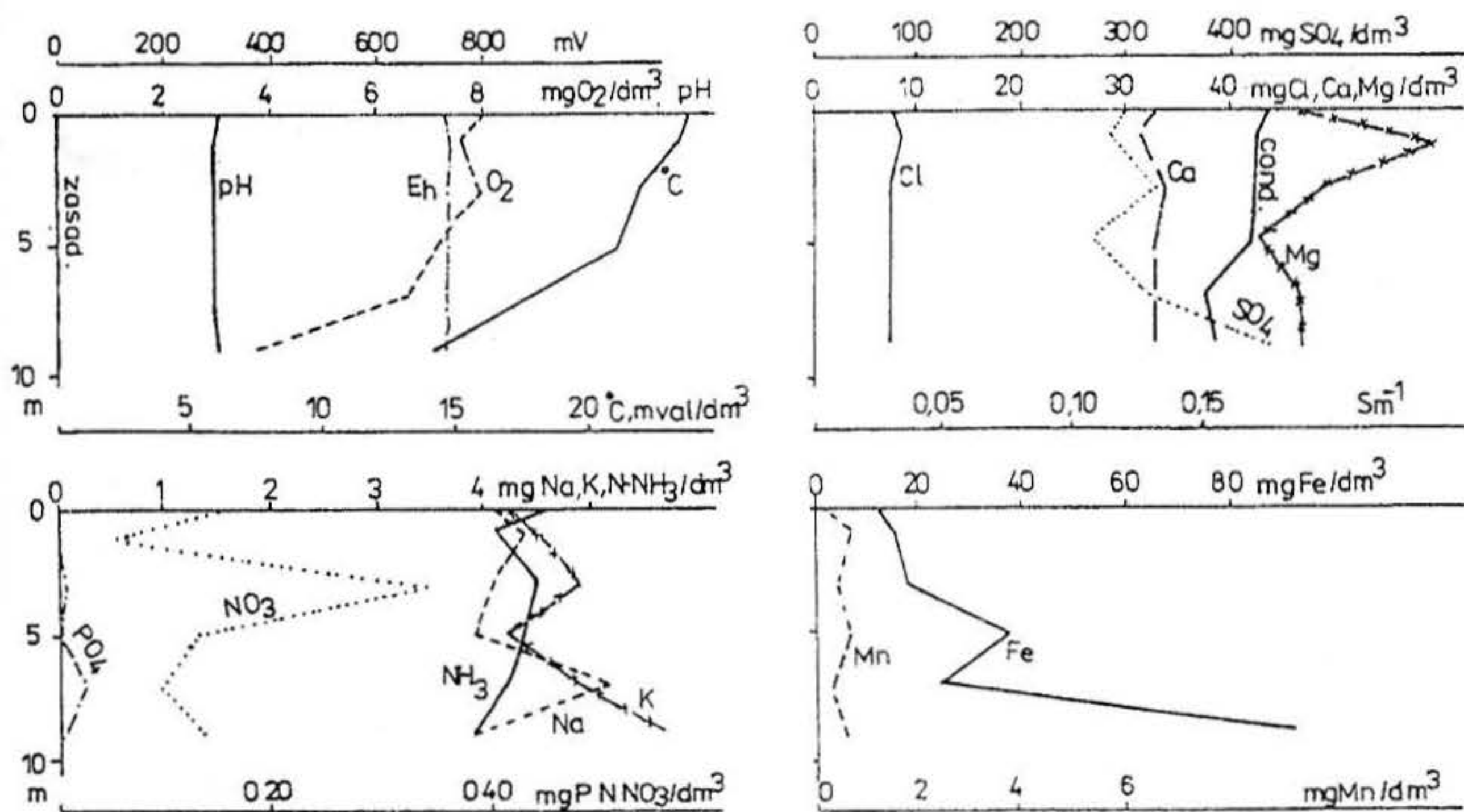
Rys. 9. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym zbiornika nr 25 (sierpień 1986)



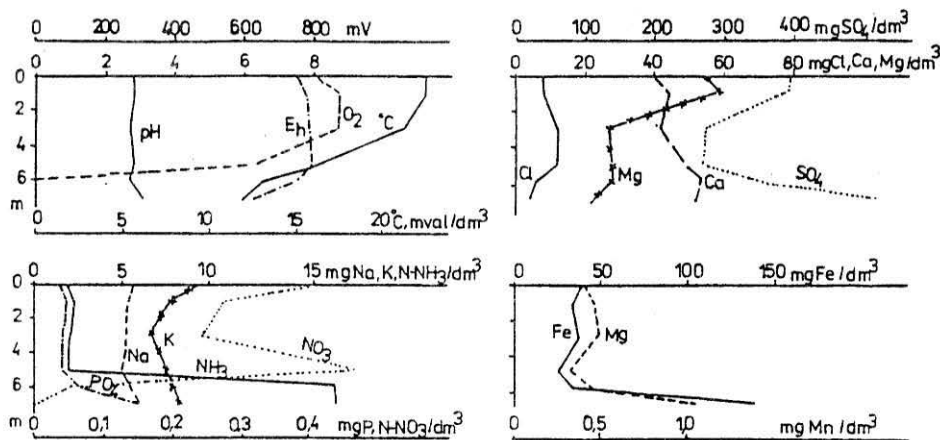
Rys. 10. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym zbiornika nr 43 (sierpień 1986)



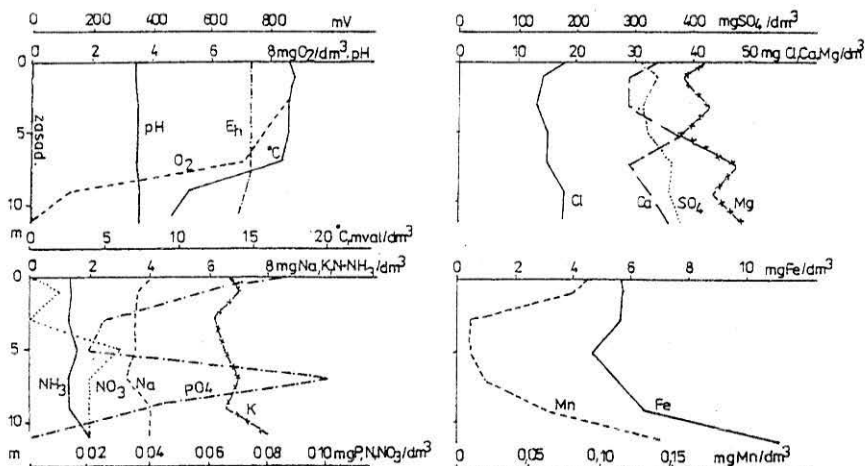
Rys. 11. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym zbiornika nr 45 (sierpień 1986)



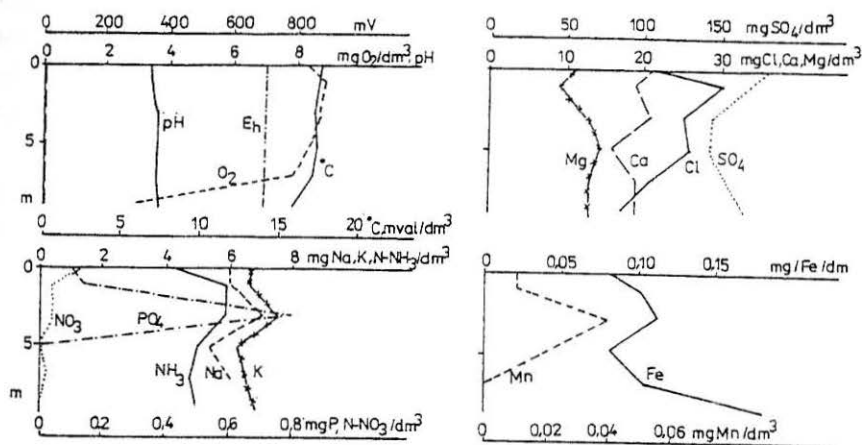
Rys. 12. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 46 (sierpień 1986)



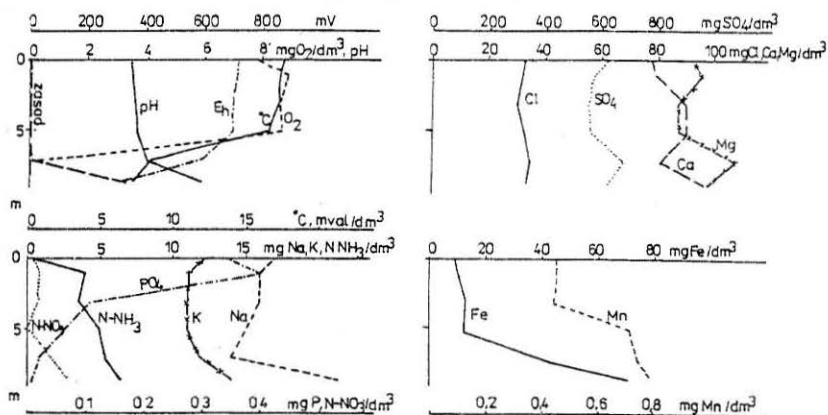
Rys. 13. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 49 (sierpień 1986)



Rys. 14. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 50 (sierpień 1987)

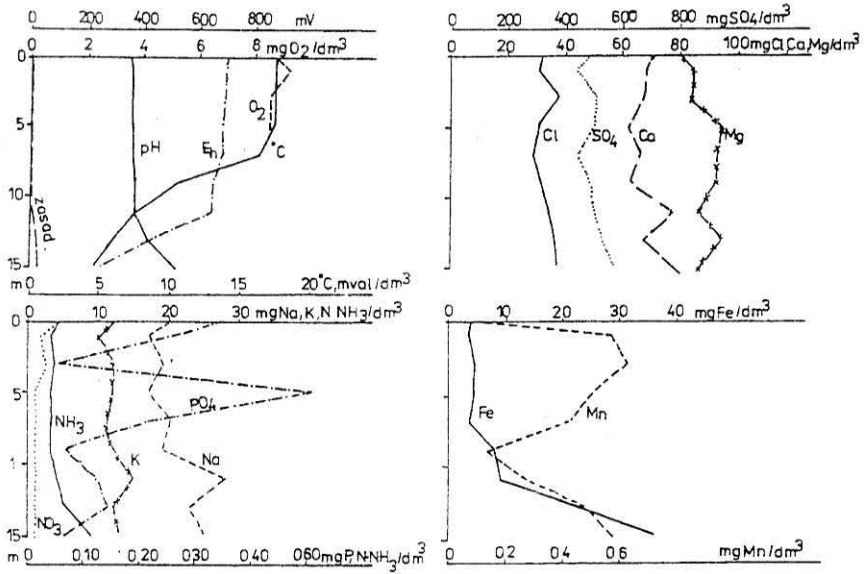


Rys. 15. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 53 (sierpień 1987)

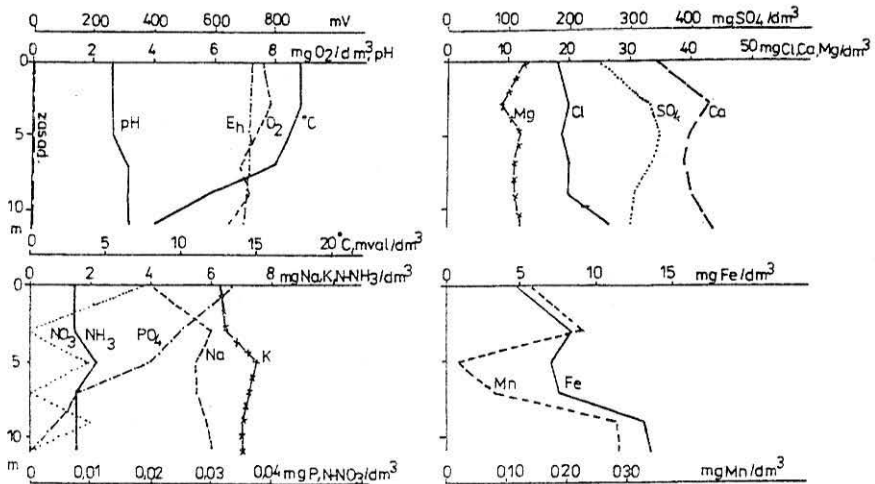


Rys. 16. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 55 (sierpień 1987)





Rys. 17. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 56 (sierpień 1987)



Rys. 18. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych w profilu pionowym zbiornika nr 62 (sierpień 1987)

Zbiorniki różniły się pod względem jakościowych i ilościowych zmian w profilu pionowym wskaźników fizyczno-chemicznych (rys. 9-18). Nie dostrzeżono występowania określonych zależności lub prawidłowości, związanych z wiekiem i rozwojem tych zbiorników. Można jedynie mówić o pewnych tendencjach, a mianowicie alkalizacji przydennych warstw wody zbiorników starszych (nr nr 25, 45, 56) w wyniku naturalnych procesów zobojętniania wód, z wyjątkiem zbiornika nr 43.

Brak tlenu w przydennej warstwie wody pięciu zbiorników, który doprowadził występowania procesów redukcyjnych, dotyczył głównie zbiorników starszych i równocześnie najgłębszych.

Wody zbiorników grupy dimiktycznej wykazały mniejszy stopień zmineralizowania od wód zbiorników meromiktycznych. W obrębie tej grupy nie stwierdzono wpływu czynnika czasu na stopień zasolenia ich wód, o czym świadczą wielkości stężeń siarczanów wapnia i magnezu oraz żelaza (tabela I).

Analiza składu jonowego wód zbiorników dimiktycznych przeprowadzona metodą Monitiona, potwierdza pogląd, że rozwój każdego zbiornika przebiega w sposób dla niego typowy (rys. 19-23). Najmłodszy zbiornik spośród grupy dimiktycznej (zb. nr 62) wykazał duże podobieństwo przebiegu zmian składu jonowego wód (w profilu pionowym) w porównaniu do zbiorników meromiktycznych (rys. 6-8). Tymczasem zbiornik nr 53 starszy od zbiornika nr 62 o trzy lata okazał mniejszy stopień zmineralizowania wód spośród zbiorników podgrupy dimiktycznej (tabela I).

Zbiorniki polimiktyczne cechuje możliwość wielokrotnego pełnego mieszania wód w profilu pionowym, pod wpływem wiatrów, podczas stagnacji letniej. W tej podgrupie zbiorników znalazły się dwa zbiorniki nr nr 47 i 60, których głębokości maksymalne wynosiły 6 m i 4 m. Przebieg zmian kilkunastu fizyczno-chemicznych wskaźników wody w profilu pionowym podczas stagnacji letniej wykreślono tylko dla zbiornika głębszego (nr 47), co przedstawia rys. 24.

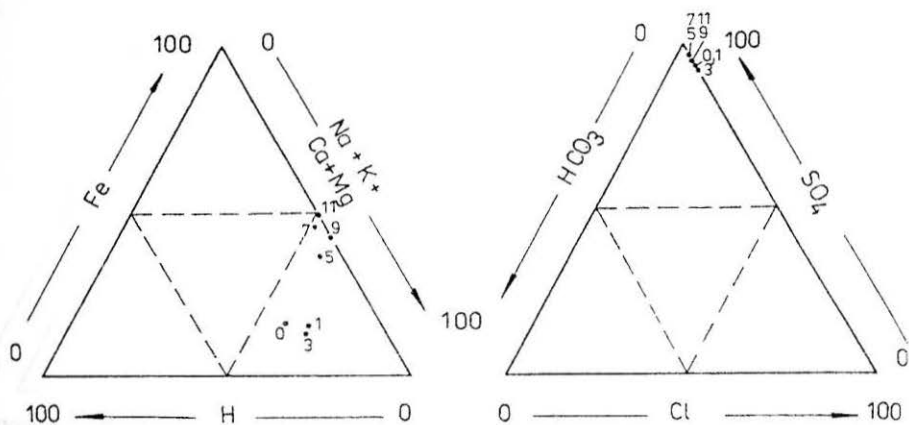
Stwierdzono, że mieszanie się wód w zbiorniku nr 47 bywa w pewnych okresach (bezwietrznych) ograniczone i wówczas może dojść do okresowego uwarstwienia termicznego i chemicznego wody. Zakres zmian składu chemicznego wód zbiorników polimiktycznych mieścił się w granicach zmian dla wód zbiorników dimiktycznych (tab. I). Wody zbiorników nr nr 47 i 60 należą do typu wód siarczanowych magnezowo-wapniowych (rys. 25).

Tabela I

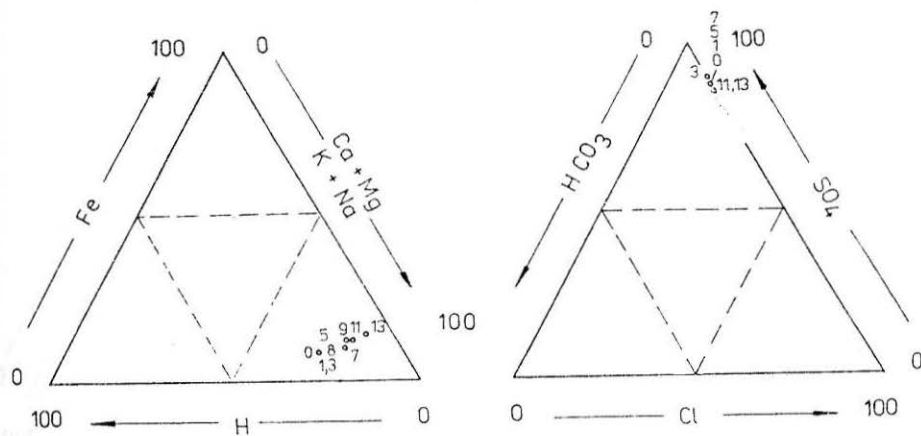
II skatunki fizyčno-chemiczne powierzczeniowych i przydeimnych warstw wody I5 zbiorników uclitrofiycznych

Nr čłq- Rok	Wiek	Wiek maks. sta- wia	Termin pobru wody	pH	Potencjal redoks.		Tlen rozpuszcz.	Sole amonyowe.	Złazo og.	Magnez	Siarczany.	Potas.	Sól.											
					mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>																		
mg Na/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>											
pow.	duo.	pow.	duo.	pow.	duo.	pow.	duo.	pow.	duo.	pow.	duo.	pow.	duo.											
54	24	1973	18	VII. 1988	2,70	4,85	706	403	8,3	0,0	4,3	7,7	151	858	98	132	200	1191	3850	2,2	8,0	3,9	7,0	
48	16	1948	43	VII. 1988	2,60	6,04	746	234	8,4	0,0	1,8	4,3	47	240	33	36	26	33	420	5,0	4,2	4,2	4,2	
38	8	1945	46	VII. 1988	2,60	6,60	656	212	7,9	0,0	2,2	3,5	14	619	45	93	43	98	388	1820	3,0	4,2	4,2	4,9
Zbiorniki macromikryczne																								
62	12	1970	21	VII. 1988	2,60	2,85	694	727	8,0	6,3	1,6	1,3	48	49	33	27	16	31	343	340	3,1	2,5	2,9	
50	12	1968	23	VII. 1988	3,05	3,05	576	716	8,4	2,5	0,26	0,32	13	17	30	32	29	41	271	283	3,0	4,0	2,3	1,6
53	10	1967	24	VII. 1988	2,95	3,10	625	665	8,8	2,7	4,8	6,2	3,51	15	10	26	23	147	145	4,0	3,0	2,9	2,9	
46	10	1964	27	VIII. 1987	3,50	3,60	740	630	9,0	0,0	0,3	5,9	8,4	30	23	25	63	117	408	6,0	7,3	4,0	5,0	
49	7	1956	35	VIII. 1987	2,70	2,90	720	710	8,6	6,3	2,3	5,0	15	28	33	42	10	16	308	384	7,5	9,0	4,0	5,5
55	9	1955	36	VIII. 1988	3,30	3,50	666	697	8,0	1,3	2,3	2,0	20	19	50	55	58	53	476	485	7,0	7,0	8,5	8,5
56	16	1955	36	VII. 1988	2,85	2,85	716	311	7,9	0,0	3,5	5,1	35	202	63	77	22	22	399	603	8,1	13,5	13,5	15,2
25	12	1952	39	VIII. 1987	3,10	3,50	720	290	8,2	0,0	4,1	10,0	17,2	148	33	90	7	24	274	630	8,0	11,0	5,5	7,0
45	13	1945	46	VIII. 1987	3,00	5,80	730	290	9,0	0,0	1,3	25,0	3,7	91	29	68	7	20	196	461	8,0	10,0	7,0	7,0
43	14	1943	48	VII. 1988	2,75	3,30	711	639	8,6	0,0	0,55	0,81	27	39	70	75	41	36	462	393	7,0	8,3	4,5	5,6
b) podmikryczne																								
60	5	1970	21	VIII. 1987	3,20	3,20	685	72	7,2	0,2	1,9	4,2	16,7	24	40	40	16	18	226	232	7,0	7,6	4,0	4,0
47	6	1950	41	VIII. 1987	2,70	2,70	755	740	8,3	8,0	4,0	6,6	55	6753	48	10	10	16	512	549	5,7	5,5	3,0	3,5

A

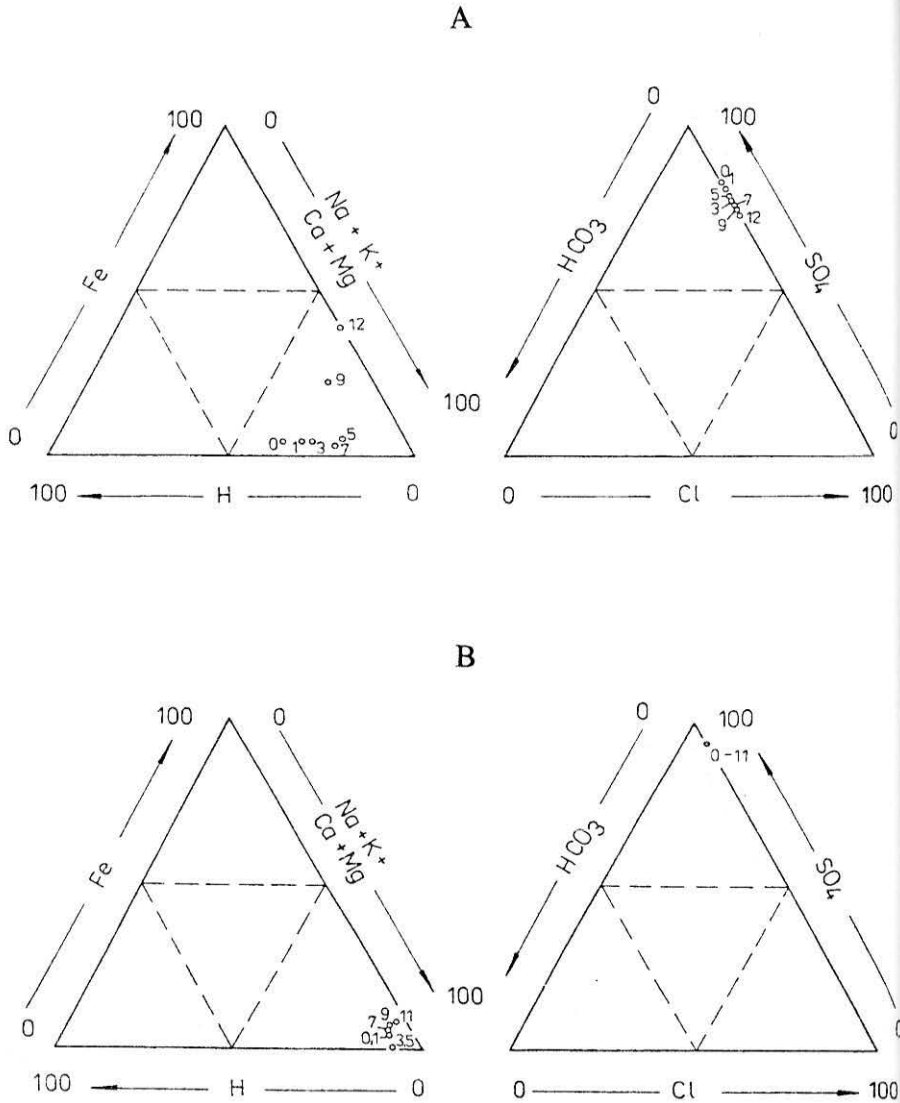


B



Rys. 19. Skład jonowy wód w profilu pionowym zbiorników:

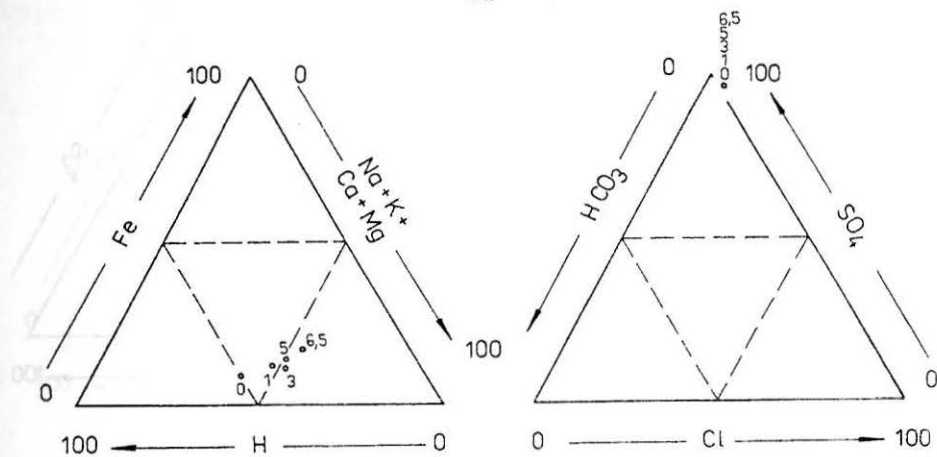
A - nr 25, B - nr 43



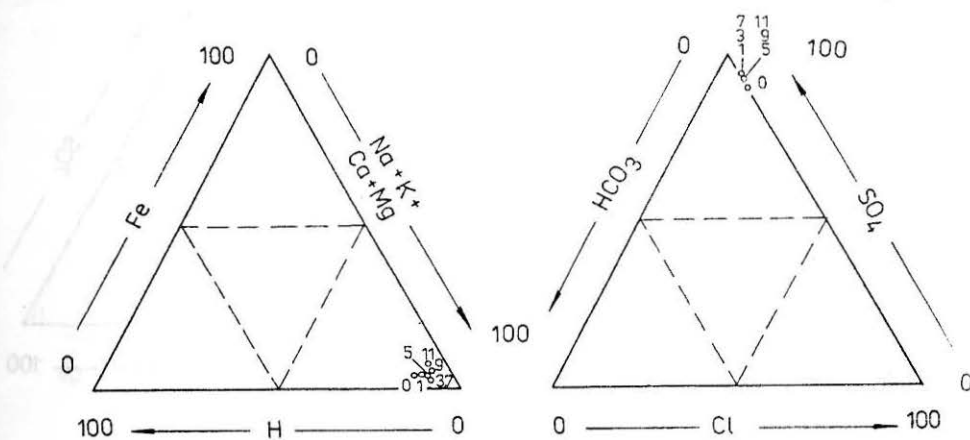
*Rys. 20. Skład jonowy wód w profilu pionowym zbiorników:  
A - nr 45, B - nr 46*



A

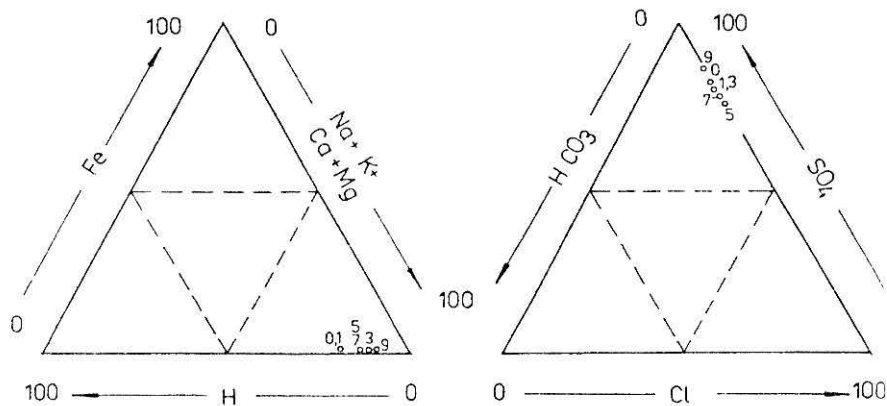


B

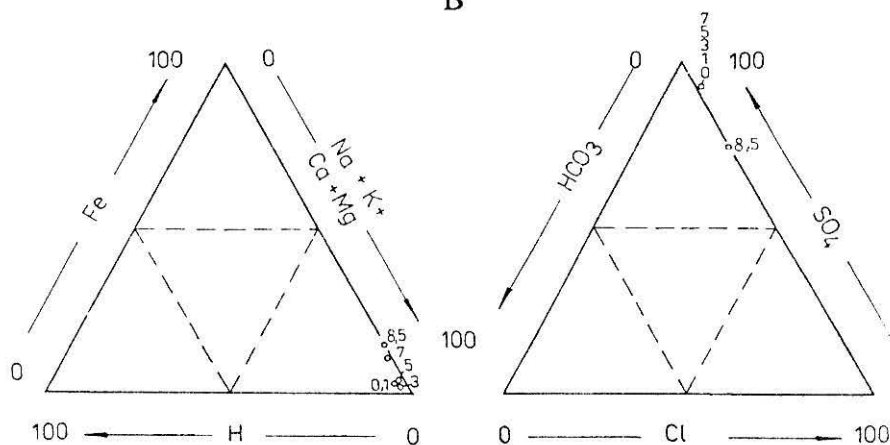


Rys. 21. Skład jonowy wód w profilu pionowym zbiorników:  
A - nr 49, B - nr 50

A

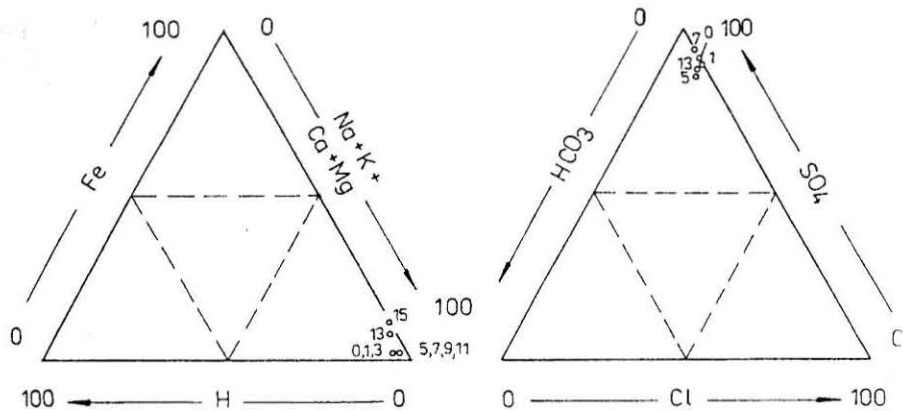


B

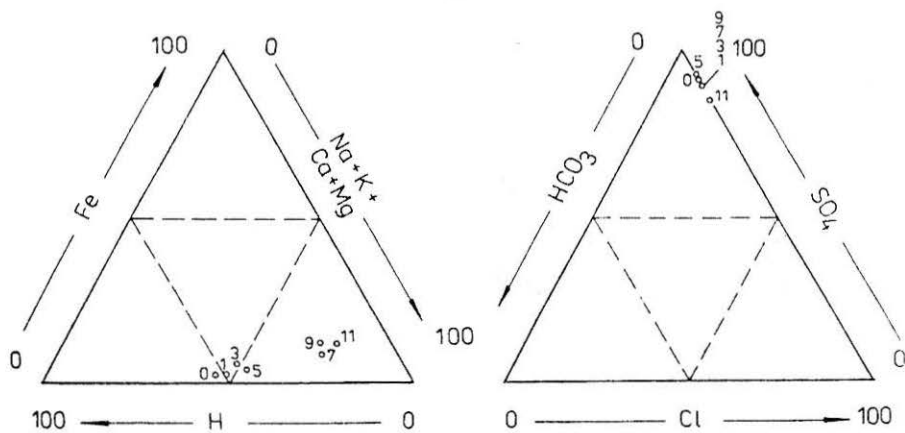


Rys. 22. Skład jonowy wód w profilu pionowym zbiorników:  
A - nr 53, B - nr 55

A

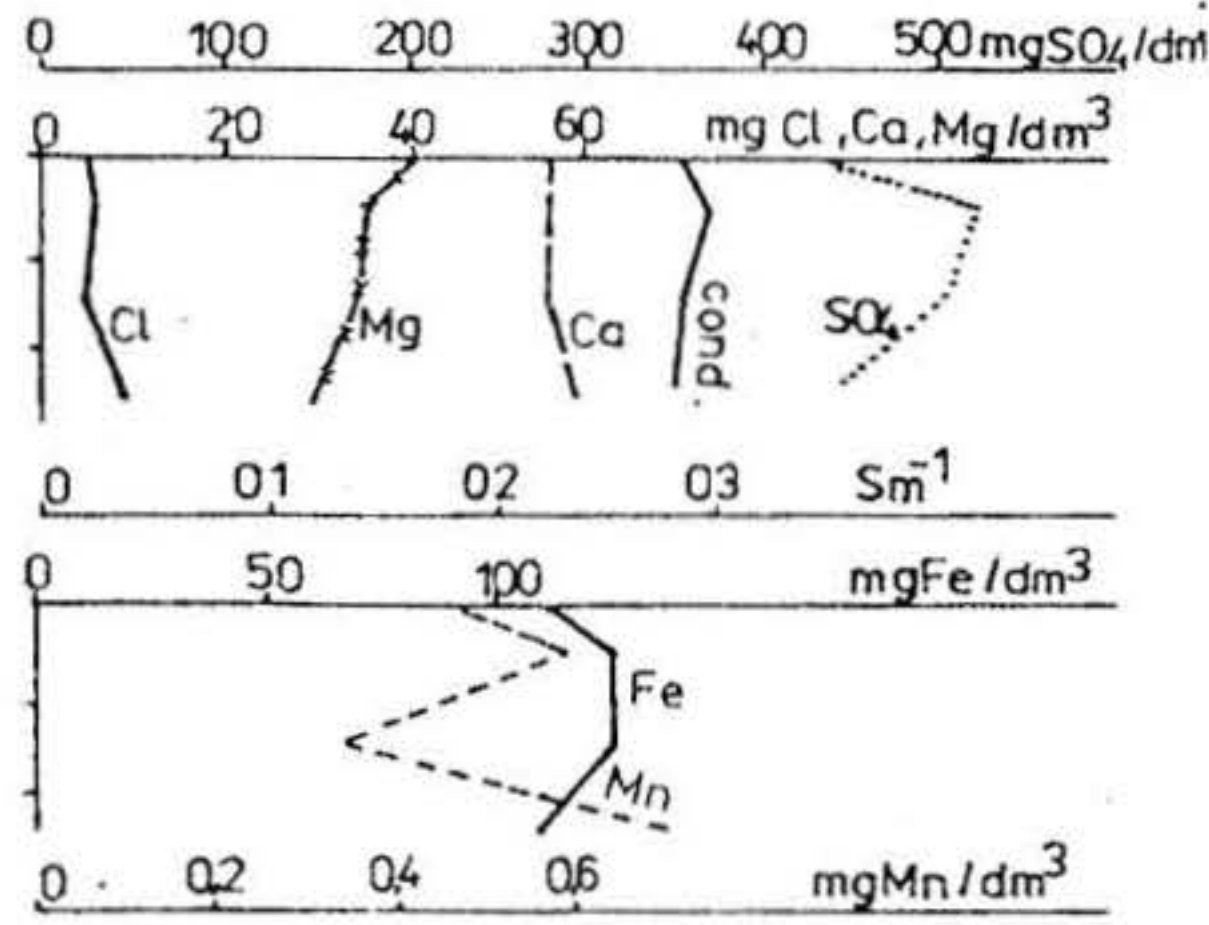
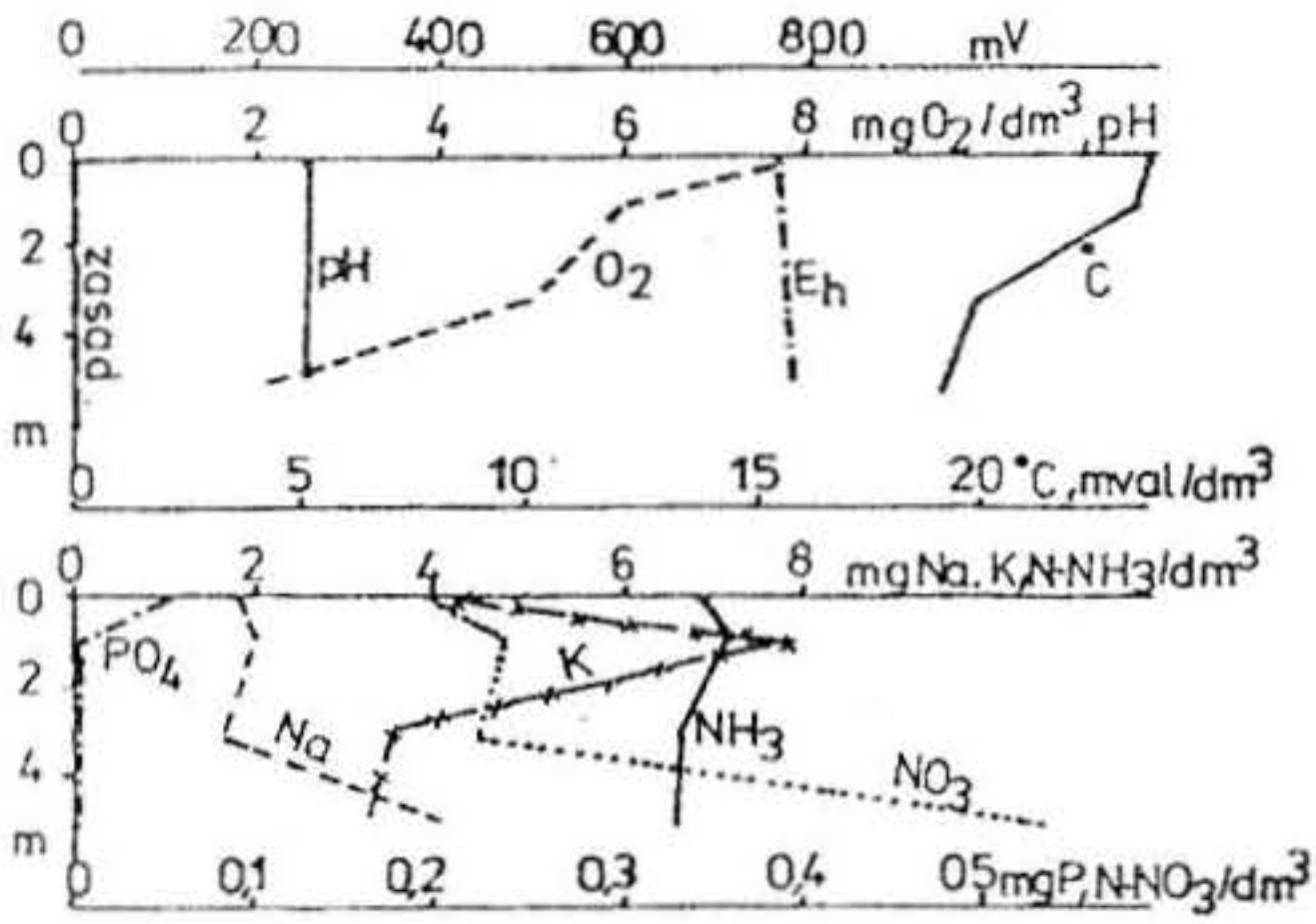


B

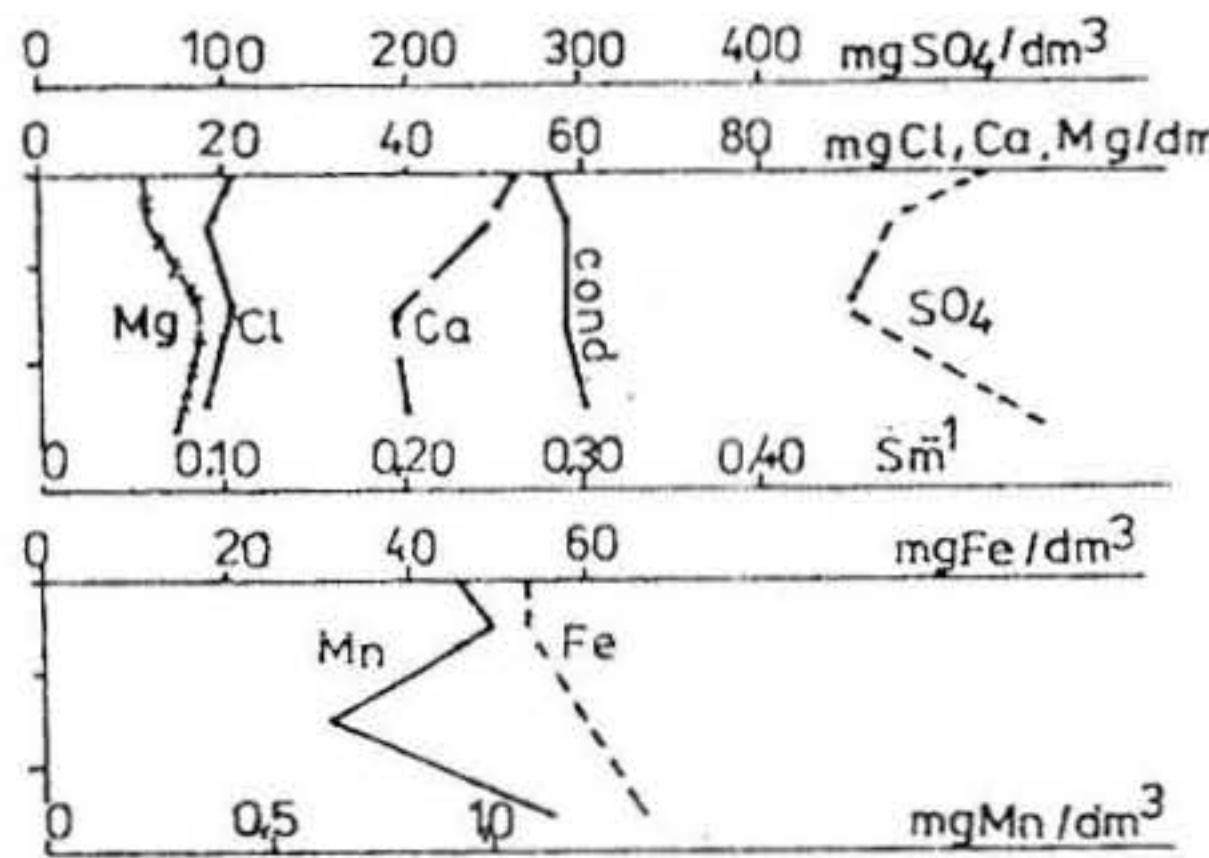
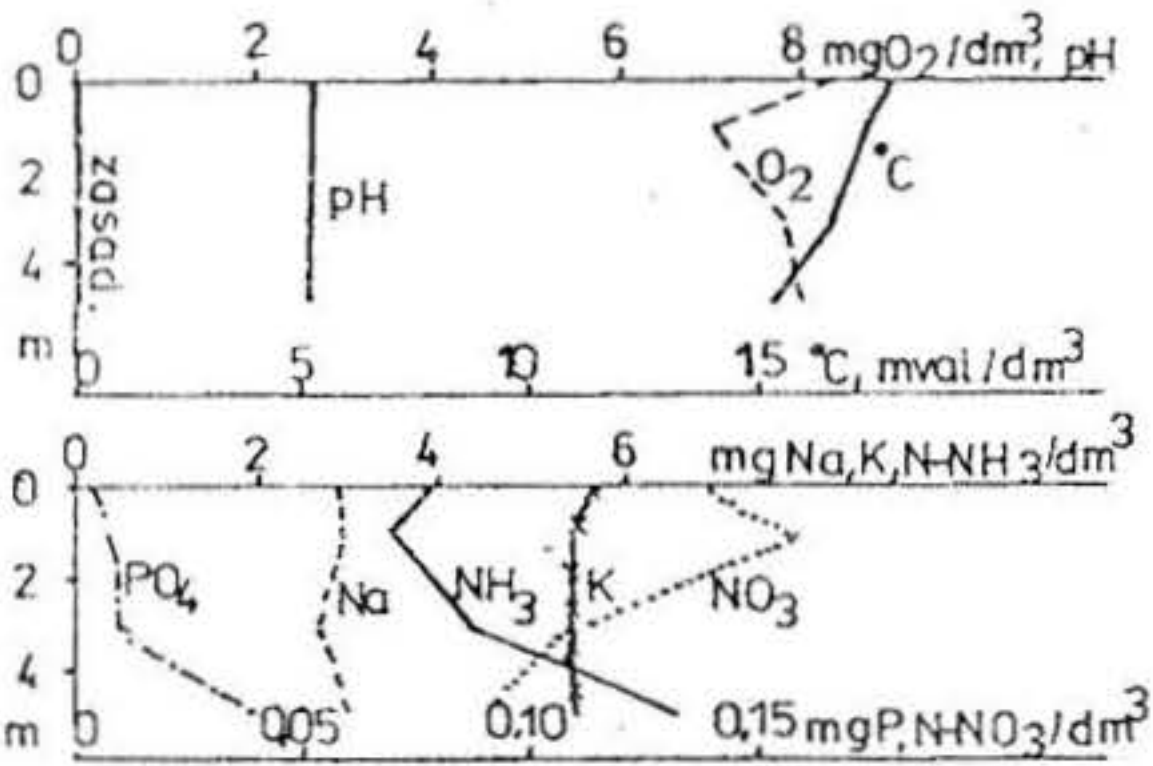


Rys. 23. Skład jonowy wód w profilu pionowym zbiorników:  
A - nr 56, B - nr 62

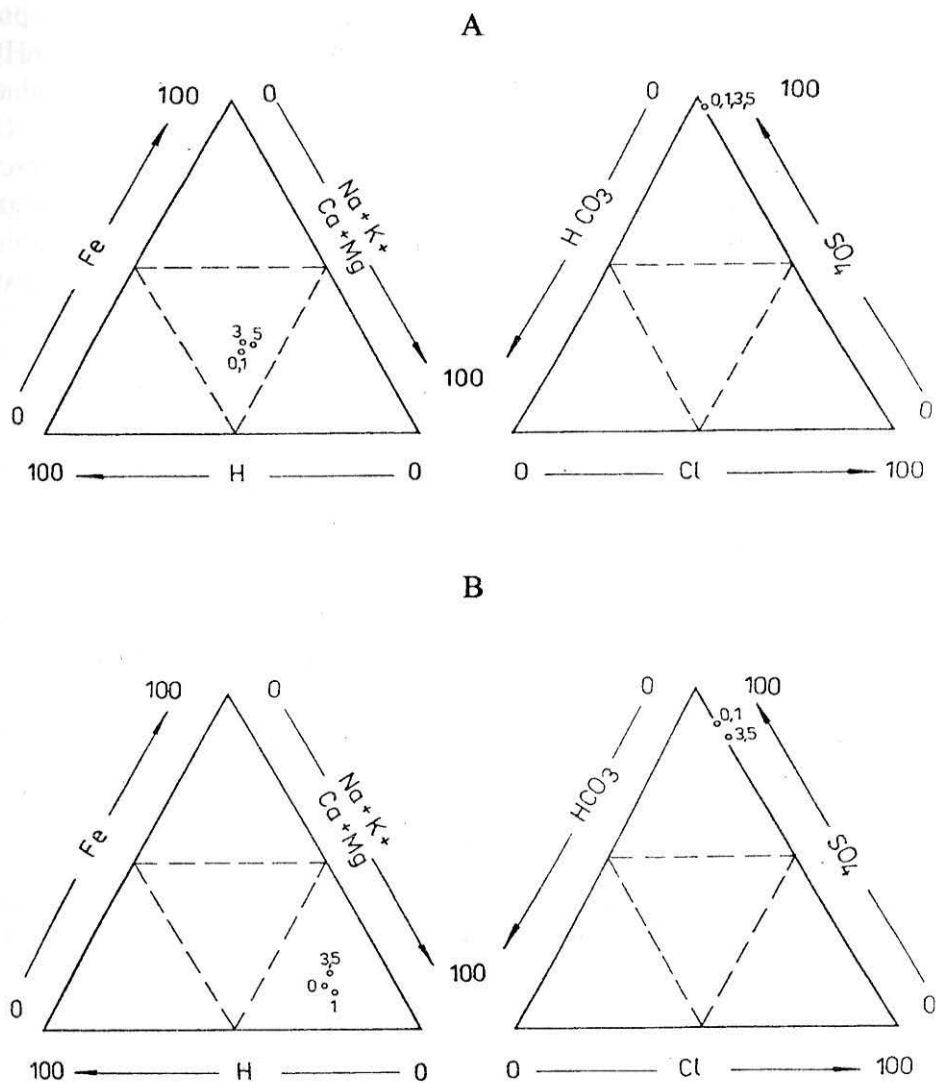
A



B



Rys. 24. Zmiany kilkunastu wskaźników fizyczno-chemicznych wody w profilu pionowym zbiornika nr 47 (A - sierpień 1986r., B - sierpień 1987 r.)



Rys. 25. Skład jonowy wód w profilu pionowym zbiorników:  
A - nr 47, B - nr 60



## 5.4. Dyskusja

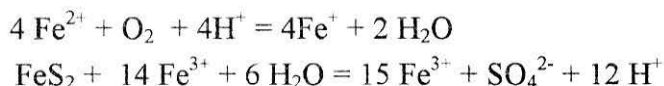
Zbiorniki acidotroficzne charakteryzowały się tym, że wody powierzchniowe wykazywały wysoki stopień zakwaszenia (poniżej 4,0 pH), potencjał redoks wyższy niż 600 mV, obecność kwasowości mineralnej oraz brak zasadowości ogólnej.

Przyczyną zakwaszenia wód tej grupy zbiorników był towarzyszący pokładom węgla piryt ( $\text{FeS}_2$ ), który wydobyty na powierzchnię ulegał w gruntach nasypowych i w dnie zbiornika złożonym procesom utleniania. Zdaniem Bakera i Wildshirea (1970) oraz Walsh i Mitchella (1970) procesy te obejmują etapy:

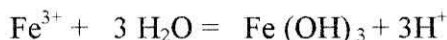
a) utlenianie

- chemiczne:  $2 \text{FeS}_2 + 7 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2 \text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$
- biologiczne:  $2 \text{FeS}_2 + 7,5 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2 \text{Fe}^{3+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$

b) tzw. cykliczną degradację



c) hydrolizę (wytrącanie) związków żelaza trójwartościowego



Utlenianiem pirytu tlenem rozpuszczonym w wodzie interesowano się już od ponad 100 lat, proponując wiele rozwiązań (reakcji chemicznych). Różnią się one w drobnych szczegółach, natomiast przebieg podstawowych reakcji jest podobny (Lowson 1982) i może być zapisany następująco:



Reakcje utleniania mogą przebiegać zarówno drogą chemiczną jak też biologiczną. Przyjmuje się, że utlenienie pirytu przy udziale bakterii (*Thiobacillus ferrooxidans*) przyspiesza proces od 5 do 10 razy w porównaniu z utlenianiem chemicznym (Ljalikova 1961). Udział bakte-

rii w utlenianiu pirytu prowadzi do powstania  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  i energii w postaci elektronów, wykorzystanych przez bakterie acidofilne (Tuttle i inni 1969, Dugan i inni 1980). Stężenie jonów wodorowych tych wód może obniżyć się do około 2,3 pH a w wyjątkowych przypadkach może osiągnąć wartość 1,8 pH (Dugan 1972).

Badania fizyczno-chemiczne wód zbiorników acidotroficznych w profilu pionowym wykazały, że najniższe wartości odczynu (2,6 - 3,9 pH) utrzymywały się w warstwie powierzchniowej. W miarę wzrostu głębokości, stężenie jonów wodorowych rosło, zwłaszcza w przydennych warstwach wody, pozbawionych tlenu.

Zjawisko to wystąpiło szczególnie wyraźnie i ostro w zbiornikach meromiktycznych, charakteryzujących się obecnością przy dnie nienaruszonej warstwy wody (monimolimnionu). Według Dicksona (1980) przyczyną zubożenia głębiej leżących warstw wody pozbawionych tlenu, są przede wszystkim procesy redukcyjne, prowadzące do wykorzystania jonów wodorowych.

W przypadku zbiorników nr nr 38, 48 i 54 nie wyklucza się oddziaływania na zbiorniki również wód podziemnych typu wodorowęglanowego wapniowo-magnezowego, tym bardziej, że proces zubożenia wód badanych zbiorników wystąpił najpierw w ich głębinach.

Przebieg krzywych odczynu wód w profilu pionowym zbiornika nr 54, wskazujący na znacznie mniejszy stopień zróżnicowania składu chemicznego w porównaniu ze zbiornikami nr nr 38 i 48 (starszymi) dowodzi oddziaływania na naturalne procesy zubożniania wód również czynnika czasu.

Meromiksja jest zjawiskiem występującym w wielu miejscach naszego globu i równocześnie rzadkim. Huttchinson (1957) w zależności od genezy wyróżnił wśród jezior meromiktycznych trzy grupy: „ectogenicrenogenic and biogenic meromixis”. W niespełna 20 lat później Walker i Likens (1975) zaproponowali inny podział, który zawierał dwie zasadnicze klasy jezior: A-ektogeniczną meromiksję i B-endogeniczną meromiksję a w ich obrębie pięć typów (I-V). Z kolei Dickman i Hartman (1979) wprowadzili do typu IV (klasa B) uzupełnienie, wyróżniając w nim dwie kategorie:

- a) bogate w żelazo i mangan
- b) bogate w węglany i wodorowęglany.

Powyższa poprawka jest o tyle istotna, że wody zbiorników meromiktycznych pojezierza antropogenicznego są wyjątkowo bogate w sole żelaza, które miały wpływ na wytworzenie się warstwy monimolimnicznej.

Meromiksja badanych zbiorników (nr nr 38, 48, 54) ma złożoną genezę, powstawaniu monolimnionu sprzyjała morfometria ich wyrobisk (wysokie wartości głębokości względnej: 0,0788 - 0,0553) i otaczający teren (piętrzące się hałdy, głębokie usytuowanie misy, przylegające lasy). Była to zarówno meromiksja ekto- jak i endogeniczna. Według Kjensmo (1962, 1967, 1968) ważną rolę w przekształcaniu jeziora holomiktycznego w meromiktyczne może odegrać żelazo. Do czynników, które zadecydowały o pojawieniu się meromiksji w 4 norweskich, słodkich jeziorach Kjensmo (1967) zalicza:

- dopływ do zlewni odpowiednich ilości żelaza,
- beztlenowe (redukcyjne) warunki w przydennych warstwach wody, sprzyjające uwalnianiu żelaza z osadów dennych,
- długo utrzymująca się pokrywa lodowa, wysokie wartości głębokości względnej

oraz otoczenie nie sprzyjające mieszanii się wód w jeziorze.

Stężenia żelaza w wodach tych jezior wahały się w szerokim przedziale od 3,28 do 340 mg/dm<sup>3</sup> Fe (Kjensmo 1967) i były niższe od stężeń w wodach badanych zbiorników meromiktycznych (nr nr 38, 48, 54).

Geneza i rozwój zbiorników meromiktycznych pojezierza antropogenicznego różnią się od jezior norweskich, opisanych przez Kjensmo (1962, 1967, 1968), chociaż nie brak pewnych podobieństw, jak np. roli żelaza w procesie tworzenia monimolimnionu.

Zbiorniki meromiktyczne nr nr 38, 48, i 54 mimo wykształconego monimolimnionu są tworamami o dużej dynamice w profilu pionowym wody, sięgającym dna zbiornika, o czym świadczy między innymi zmienność stężeń żelaza w poszczególnych okresach badawczych (rys. 5a).

Wody mikso- i monimolimnionu tych zbiorników pozostają pod stałym wpływem wód gruntowych i podziemnych oraz osadów dennych.

Szczególne rolę w przebiegu procesów fizyczno-chemicznych i biologicznych w zbiornikach nr nr 38, 48 i 54 należy przypisać zwią-

kom żelaza (Kjensmo 1967, 1968) oraz siarce (Carignan 1988, Forsberg i Morling 1988). Występowanie dużych ilości siarki w zbiornikach nr nr 38, 48 i 54 było przyczyną jak wiadomo, pojawienia się kwasu siarkowego i związanych z tym następstw:

- zakwaszenie wód w stopniu wysoce ograniczającym rozwój życia biologicznego,
- powstanie warunków sprzyjających wietrzeniu skał,
- nagromadzenie soli kwasu siarkowego w przydennych warstwach wody do kilku g/dm<sup>3</sup>, prowadzące do utworzenia monimolimnionu,
- pojawienie się w badanych zbiornikach wód siarczanowych wapniowo-magnezowych i siarczanowo-żelazowych, różniących się znacznie od sąsiadujących z nimi wód naturalnych, typu wodorowęglanowego wapniowo-magnezowego.

### Literatura

- [1] **Bagińska B., Macioszczyk A.:** *Graficzne metody odwzorowania i klasyfikacji chemizmu wód podziemnych na podstawie trójkątów Fereta i układów trójkątno-rombowych.* Przegląd Geologiczny nr 11, 1986.
- [2] **Baker R.A., Wildshire A.G.:** *Microbial factor in acid mine drainage formation; a pilot plant study.* Environmental Science and Technology, 4/5, 401-407, 1970.
- [3] **Carignan R.:** *Seasonal dynamice of sulfate hydrogen sulfide near the sediment-water interface of an oligotrophic acid lake.* Verh. Internat. Verein. Limnol. 23, 106-115, 1988.
- [4] **Dickman M.D., Hartman J.S.:** *A rationale for the subclassification of biogenic meromictic lakes.* Int. Revue ges. Hydrobiol., 64, 2, 186-192, 1979.
- [5] **Dicson W.:** *Properties of acidified waters.* In: Drablos D., Tollan A. (Eds.) Ecological impact of acid precipitation, 75-83, SNSF-project, 1980.
- [6] **Dugan P.R.:** *Biochemical ecology of water pollution.* Plenum Press. New York - London, 1-159, 1972.

- [7] **Dugan P.R., Macmillan C.B., Pfister R.M.:** *Aerobic heterotrophic bacteria indigenous to pH 2,8 acid mine water: Microscopic examination of acid streamers.* J. Bacteriol, 101, 973-981. Predominant slime producing bacteria and streamers. 101, 982-988, 1980.
- [8] **Forsberg C., Morling G.:** *Examples of changes in water chemistry during lake acidi- and „deacidification”,* Verh. Internat. Verein. Limnol. 23, 193-199, 1988.
- [9] **Hermanowicz W., Dożańska W., Dojlido J., Koziorowski B.:** *Fizyczno-chemiczne badania wody i ścieków.* Wyd. Arkady, Warszawa 1976.
- [10] **Hutchinson G.E.:** *A treatise on limnology.* Vol. I, New York, John Wiley and Sons, Inc. 1-912, 1957.
- [11] **Kjensmo J.:** *Some extreme features of iron metabolism in lakes.* Schweiz, Z. Hydrol. 24, 244-252, 1962.
- [12] **Kjensmo J.:** *The development and some main features of „iron-meromictic” soft water lakes.* Arch. Hydrobiol. Suppl. 32, 137-312, 1967.
- [13] **Kjensmo J.:** *Iron as the primary factor rendering lakes meromictic and related problems.* Mitt. Internat. Verein. Limnol. 14, 83-93, 1968.
- [14] **Ljalikowa N.N.:** *Rol bakterij okisleniji sulfidnych miednonikielewych rud Kolskiego półostrowa.* Mikrobiologia, 30, 1, 135-140, 1961.
- [15] **Lowson R.T.:** *Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen.* Chemical Reviews, Vol. 82, No. 5, 468-497, 1982.
- [16] **Marek J.:** *Chemizm jezior o wodach żółtych ze szczególnym uwzględnieniem form fosforu i żelaza.* Zeszyt Nauk. AR we Wrocławiu, Zootechnika XXV, nr 140, 163-180, 1976.
- [17] **Matejczuk W.:** *Charakterystyka ekologiczna zbiorników wodnych w wyrobiskach poeksploatacyjnych węgla brunatnego.* Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wrocław (rozprawa doktorska), 1986.
- [18] **Passowicz K.:** *Ein meromiktischer See in Suwałki-Gebiet.* (Polen) Arch. Hydrobiol. Ryb., XI, 210-214, 1983.



- [19] **Solski A., Jędrzak A., Matejczuk W.:** *Skład chemiczny wód zbiorników „pojezierza antropogenicznego” w rejonie Tuplice-Łęknica.* Zeszyt Nauk. WSI Zielona Góra nr 64, Inżynieria Środowiska nr 4, 65-76, 1988.
- [20] **Tuttle J.H., Dugan P.R., Randles C.J.:** *Microbiological sulfate reduction and its potential utility as a water pollution abatement procedure.* Appl. Microbiol. 17, 297-302, 1969.
- [21] **Walker K.F., Likens G.E.:** *Meromixis and reconsidered typology of lake circulation patterns.* Verh. Internat. Verein. Limnol. 198, 442-458. 1975.
- [22] **Walsch F., Mitschell R.:** *A ph-dependent succession of iron bacteria.* Environmental Science and Technology, 6/19, 809-912, 1972.
- [23] **Walker K.T.:** *The stability of meromictic lakes in central Washington.* Limnol. Oceanogr., 19, 209-222, 1974.