

Krystyna Choma-Moryl

## Ocena wpływu ujemnych temperatur na plastyczność i pęcznienie wybranych gruntów spoistych

### Evaluation of the influence of below-zero temperatures on plasticity and swelling of some cohesive soils

**Streszczenie:** W wybranych gruntach spoistych Dolnego Śląska, o zróżnicowanej zawartości frakcji ilowej, oznaczono granice konsystencji i wskaźniki pęcznienia dla próbek w stanie naturalnym i po trzykrotnym cyklu zamrażania-odmrażania. Zmiany plastyczności analizowano w oparciu o granicę płynności, granicę plastyczności oraz wskaźnik plastyczności. W gruntach zamrażanych stwierdzono wyraźne zmniejszenie się wilgotności granicy płynności oraz wskaźnika plastyczności. Zmiany te są szczególnie widoczne w gruntach zwięzłe i bardzo spoistych, które zawierają powyżej 20% frakcji ilowej. Wskaźnik pęcznienia wyraźnie wzrasta w mrożonych gruntach bardzo spoistych ( $f_l$  powyżej 30%). Zmniejszenie się plastyczności i wzrost wskaźnika pęcznienia w badanych gruntach spoistych świadczy o osłabieniu wiązań strukturalnych i powstawaniu gruntów „słabych”.

**Słowa kluczowe:** grunty spoiste, cykliczne mrożenie-odmrażanie, granice konsystencji, wskaźnik pęcznienia

**Abstract:** Atterberg limits and swell indices were established for some chosen cohesive soils with various amounts of clay fraction from Lower Silesia both for samples in their natural state and after three cycles of freezing-thawing. Changes of the plasticity of soils were analyzed in terms of liquid limit, plastic limit and plasticity index. The soils subjected to temperature treatment showed significantly lower moisture contents at their liquid and plastic limits. It was particularly noticeable for the cohesive soils containing over 20% of clay fraction. Swell index increases considerably in the temperature-treated soils containing over 30% of clay fraction. The decrease of plasticity and increase of swell index for the investigated cohesive soils indicate weakening of structural bonding and formation of “weak” soils.

**Key words:** cohesive soils, freeze-thaw, Atterberg limits, swell indices

## Wprowadzenie

Właściwości gruntów spoistych są determinowane w dużym stopniu przez ich współdziałanie z wodą. W zależności od ilości wody w gruntach spoistych występują zmiany ścisłości i wytrzymałości na ścinanie. Zmienne oddziaływanie wody powoduje między innymi procesy pęcznienia i skurczu badane w skali laboratoryjnej oraz ekspansywność rozpatrywaną w całym masywie gruntowym. Woda w znaczący sposób wpływa na ocenę gruntów spoistych jako podłoża budowlanego lub materiału, z którego wykonywane są budowle ziemne. Rola wody w kształtowaniu się właściwości gruntów spoistych wynika z obecności w tych gruntach minerałów ilastych. Minerale ilaste są glinokrzemianami warstwowymi lub wstęgowymi o zróżnicowanym składzie chemicznym zbudowanymi z warstw atomów występujących w koordynacji tetraedrycznej i oktaedrycznej. Warstwy te łączą się ze sobą w pakiety. Specyficzną cechą minerałów ilastych jest ich zdolność do pęcznienia i uplastyczniania się pod wpływem wody.

Występowanie w gruntach spoistych różnych rodzajów wody powoduje ich różne reakcje na ujemne temperatury. Słabo związana woda decydująca o plastyczności gruntów ma własności zbliżone do wody wolnej, w związku z tym temperatura jej zamarzania wynosi 0°C.

W naszej strefie klimatycznej ujemne temperatury oddziałują na podłoże grunto-  
we przeważnie cyklicznie, przy czym długość i ilość cykli jest corocznie zróżnicowana.

Wieloletnie badania prowadzone przez autorkę nad wpływem procesów zamarzania-odmarzania na niektóre właściwości fizyczne gruntów uwzględniały zarówno mrożenie cykliczne, jak jednokrotne, przy czym czas mrożenia trwał od kilku dni do trzech miesięcy. Temperatura zamrażania wynosiła -20°C. Szczegółowa analiza wpływu przemarzania-odmarzania na właściwości fizyczne gruntów w różnych wariantach czasowych przedstawiona jest w pracach Kumora (1983, 1985, 1989), Koszela-Marek, Choma-Moryl (1995). Wszystkie badania, jak również dane z literatury wskazują, że przemarzanie powoduje obniżenie się wartości granicy płynności i granicy plastyczności, natomiast wzrost wskaźnika pęcznienia  $E_p$ .

W gruntach mało spoistych, na przykład lessach, zmiany struktury wiążą się z powstałymi w gruncie pęknięciami i szczelinami wywołanymi przez mikrosoczewki lodu. Tworzą one przestrzennie rozwiniętą sieć, powodującą powstawanie w gruncie mikroagregatów o zróżnicowanych wymiarach (Skarżyńska, 1985).

W gruntach bardzo spoistych zmiany mikrostruktury wiążą się ze specyfiką zamarzania wody, którą stanowi głównie woda związana. W przebudowie mikrostruktury gruntów bardzo spoistych duże znaczenie mają zmiany objętości wody i lodu na granicy faz, temperatura zamarzania, migracja molekuł wody z różnych poziomów energetycznego wiązania w trakcie i po zakończeniu procesu krystalizacji wody związanej (Skarżyńska, 1969). Problem przemarzania gruntów bardzo spoistych jest o wiele bardziej skomplikowany niż gruntów makroporowatych. W efekcie przemarzania tych gruntów następują zmiany w ich mikrostrukturze. Zaczodzą one wieloetapowo i w różny sposób, w zależności od tego czy mrożenie-odmarzanie przebiega w jednym czy wielu cyklach (Kumor, 1989).

## Wyniki badań

W niniejszej pracy przedstawiono wpływ procesu przemarzania i odmrażania różnych gruntów spoistych z terenu Dolnego Śląska. Zamrażanie próbek o objętości 1 dm<sup>3</sup> odbywało się w temperaturze -20°C i trwało 5 dni. Następnie próbki były rozmrażane do temperatury pokojowej 18–20°C. W ten sposób wykonano trzy cykle zamrażania i odmrażania, po których wyznaczano granice płynności, granice plastyczności i wskaźnik pęcznienia. Te same właściwości zostały oznaczone dla gruntów nie mrożonych. Do badań wykorzystano lessy i piaski gliniaste z rejonu Trzebnicy, gliny lodowcowe z wykopów z terenu Wrocławia oraz ility formacji poznańskiej z Pogalewa Małego i Strzelina.

Dotychczasowe badania wpływu mrożenia-odmarzania na wilgotność granicy płynności i granicy plastyczności prowadzone przez autorkę i innych badaczy wykazują jednoznacznie obniżanie się wartości tych granic w efekcie mrożenia. Zmniejszenie wartości granicy płynności po przemrożeniu waha się od 2–3% do kilkudziesięciu procent. Kumor (1989) przedstawił, że w bentonicie granica płynności w wyniku jednego cyklu mrożenia-odmarzania zmniejsza się z 294% dla gruntu nie mrożonego do 258% po przemrożeniu. Według tego autora dla gruntów kaolinitowych (kaolinit z Siedlec) i iłów pliocenkich (poznańskich) proces mrożenia-odmarzania nie wpływa w istotny sposób na wartość granicy płynności i plastyczności.

Natomiast wieloletnie badania prowadzone przez autorkę, głównie na gruntach naturalnych o różnej zawartości frakcji iłowej i różnym składzie mineralnym, wykazywały zawsze zmniejszenie się wartości granicy płynności po przemrożeniu. Bez względu na to czy mrożenie-odmarzanie było jednokrotne i trwało od kilku dni do maksymalnie 3 miesięcy, czy też był to proces cykliczny (wielokrotne zamrażanie i odmrażanie gruntu), zawsze stwierdzano zmniejszenie się wartości granicy płynności. Największe zmiany zaobserwowano przy cyklicznym zamrażaniu-odmrażaniu. Przy czym najwyraźniejsze różnice stwierdzono po 1–3 cyklach, następne cykle wydają się nie mieć już takiego znaczenia.

Jak wynika z tabeli 1, granica płynności w efekcie trzykrotnego cyklu zamrażania-odmrażania ulega największemu obniżeniu – nawet o 7–9% – dla gruntów bardzo spoistych o zawartości frakcji iłowej powyżej 60–70%. W gruntach zwięzłych spoistych i średnio spoistych zmniejszenie się wielkości granicy płynności nie jest tak wielkie i wynosi kilka procent. Najmniejszą zmianę odnotowano dla lessów (o zawartości frakcji iłowej kilku procent), wynosi ona 1–2% i mieści się w błędzie oznaczenia, ale w każdym przypadku jest to też zmniejszenie się wilgotności granicy płynności.

Zmniejszenie się wartości granicy płynności po przemrożeniu gruntów spoistych świadczy o pojawieniu się wody wolnej, która nie może być związana z powierzchnią cząstek ilastych. Następuje tu prawdopodobnie powstawanie „włóknistych” słabych gruntów, w których zachodzi częściowy rozpad systemu agregatów, tworzenie się nowych agregatów i nowej mikrostruktury.

Wpływ mrożenia-odmrażania na wielkość wilgotności granicy plastyczności nie jest zbyt duży w badanych gruntach. Generalnie różnice między tą wartością dla gruntów nie mrożonych i mrożonych wynoszą kilka procent (tab. 1). Podobnie jak w przypadku granicy płynności najwyraźniej widać wpływ mrożenia w gruntach bardzo spoistych. W ich przypadku wielkość granicy plastyczności obniża się o 2–3%. W pozostałych rodzajach gruntów spadek ten wynosi 0–2% i nie można określić jednoznacznego związku z zawartością frakcji ilowej czy też składem mineralnym. Wydaje się, że pewien wpływ na takie wyniki ma zmienna zawartość frakcji piaszczystej i pyłowej w gruntach mało-, średnio- i zwięzłe spoistych.

Proces pęcznienia polega na wzroście objętości gruntu na skutek oddziaływania wody na minerały ilaste. Jest on badany laboratoryjnie. Analiza procesu pęcznienia i czynników determinujących jego charakter przedstawiana jest w bardzo wielu

Tabela 1. Wartości granicy płynności ( $W_L$  %), granicy plastyczności ( $W_p$  %), wskaźnika plastyczności ( $I_p$  %) i wskaźnika pęcznienia ( $\varepsilon_p$  %) dla gruntów naturalnych (nat.) i cyklicznie mrożonych (mroź.)

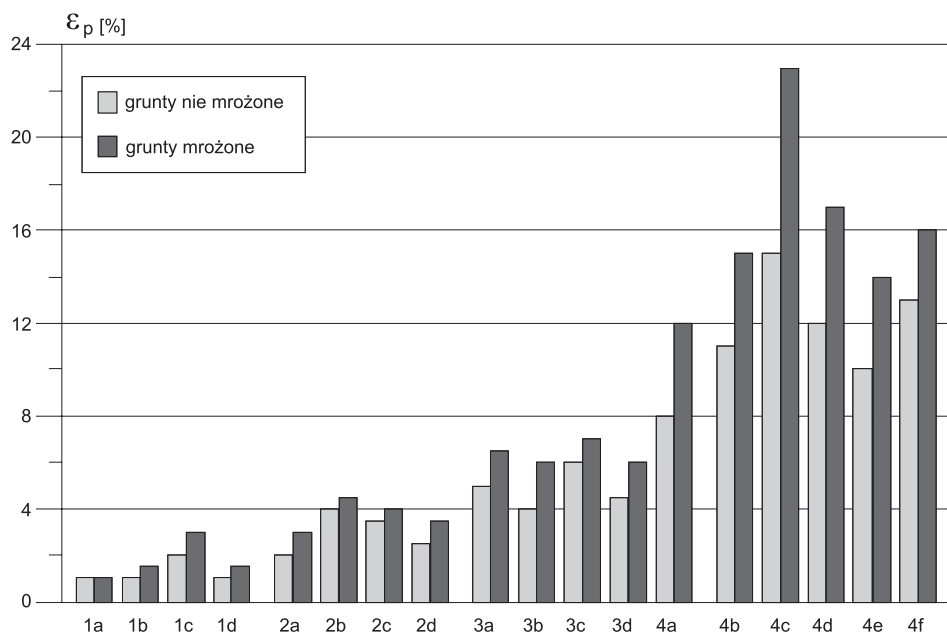
Table 1. Value of liquid limit ( $W_L$  %), plastic limit ( $W_p$  %), plasticity index ( $I_p$  %) and swell index ( $\varepsilon_p$  %) of unfrozen (nat.) and frozen (mroź.) soils

Rodzaj i symbol próbki gruntu	$f_i$ %	$W_L$ %		$W_p$ %		$I_p$ %		$\varepsilon_p$ %	
		nat.	mroź.	nat.	mroź.	nat.	mroź.	nat.	mroź.
1. Grunty mało spoiste									
1a. less	8	26 ± 1,1	25 ± 1,3	17 ± 1,6	17 ± 1,5	9	8	1,0 ± 0,3	1,0 ± 0,2
1b. less	9	25 ± 1,2	23 ± 0,9	19 ± 1,5	19 ± 1,2	6	4	1,0 ± 0,4	1,5 ± 0,1
1c. less	6	28 ± 0,9	27 ± 1,1	20 ± 1,1	19 ± 1,1	8	8	2,0 ± 0,5	3,0 ± 0,3
1d. piasek gliniasty	8	26 ± 1,2	25 ± 1,0	21 ± 1,3	20 ± 1,5	5	5	1,0 ± 0,3	1,5 ± 0,2
2. Grunty średnio spoiste									
2a. glina	15	29 ± 0,8	27 ± 0,9	16 ± 0,9	15 ± 1,0	13	12	2,0 ± 0,5	3,0 ± 0,4
2b. glina	18	28 ± 0,6	25 ± 0,5	13 ± 0,5	12 ± 0,9	15	13	4,0 ± 0,7	4,5 ± 0,5
2c. glina pylasta	13	32 ± 0,9	29 ± 1,2	17 ± 0,7	15 ± 0,7	15	14	3,5 ± 0,2	4,0 ± 0,4
2d. glina piaszczysta	14	26 ± 1,1	23 ± 1,0	13 ± 1,1	12 ± 0,8	13	11	2,5 ± 0,4	3,5 ± 0,6
3. Grunty spoiste zwięzłe									
3a. glina zwięzła	28	38 ± 1,3	36 ± 0,9	15 ± 1,1	13 ± 1,2	23	23	5,0 ± 0,9	6,5 ± 1,0
3b. glina zwięzła	24	41 ± 1,1	37 ± 1,5	18 ± 1,0	17 ± 1,5	23	20	4,0 ± 1,1	6,0 ± 1,1
3c. glina pylasta zwięzła	26	40 ± 0,9	37 ± 1,6	15 ± 1,2	13 ± 1,0	25	24	6,0 ± 0,7	7,0 ± 0,9
3d. glina piaszczysta zwięzła	25	39 ± 0,7	36 ± 1,1	18 ± 0,8	17 ± 0,9	21	19	4,5 ± 1,0	6,0 ± 0,8
4. Grunty bardzo spoiste									
4a. il	35	39 ± 0,3	34 ± 0,9	17 ± 1,1	14 ± 1,6	22	20	8,0 ± 1,7	12,0 ± 1,5
4b. il	43	58 ± 0,9	51 ± 1,0	16 ± 0,7	13 ± 1,2	32	38	11,0 ± 1,6	15,0 ± 1,7
4c. il	68	74 ± 0,5	67 ± 0,8	21 ± 1,4	19 ± 0,9	53	48	15,0 ± 1,5	23,0 ± 1,3
4d. il	73	79 ± 0,7	70 ± 1,2	26 ± 0,6	23 ± 1,0	53	47	12,0 ± 1,4	17,0 ± 1,2
4e. il pylasty	35	58 ± 0,8	51 ± 0,7	19 ± 0,7	17 ± 0,8	39	34	10,0 ± 1,7	14,0 ± 1,5
4f. il piaszczysty	39	62 ± 1,1	56 ± 1,4	21 ± 1,1	19 ± 1,1	41	37	13,0 ± 1,6	16,0 ± 1,7

pracach (m.in. Chen, 1988; Garbulewski, 1990; Grabowska-Olszewska, 1998). Natomiast problem pęcznienia gruntów podlegających procesom zamrażania-odmrażania nie ma zbyt bogatej literatury. Pęcznienie mrozowe i transformacje mikrostruktury ilów w czasie mrożenia i odmrażania omawia Kumor (1989).

Dotychczasowe wyniki badań pozwalają stwierdzić, że proces zamrażania-odmrażania powoduje wzrost wartości wskaźnika pęcznienia  $\epsilon_p$ . Największy wzrost tego wskaźnika stwierdzono w gruntach bardzo spoistych, w niektórych przypadkach wynosi on 5–8% (tab. 1, ryc. 1). W przypadku gruntów mało spoistych trudno jest oszacować wpływ mrożenia-odmrażania na wielkość pęcznienia, gdyż wskaźnik pęcznienia w tych gruntach nie przekracza 1–2% i po mrożeniu w zasadzie nie ulega zmianie.

Niewielkie są również zmiany wskaźnika pęcznienia w gruntach średnio i zwięźlo spoistych. Wynoszą one 1–3%, ale zawsze wykazują wzrost w stosunku do próbek nie mrożonych. Największy wzrost pęcznienia w gruntach bardzo spoistych wynika przede wszystkim z faktu, że grunty te pęcznią w największym stopniu. Zawierają bowiem największe ilości minerałów ilastych, często z grupy smektytu. Ponadto, jak zwraca uwagę Kumor (1989), w ilach następują największe zmiany mikrostruktury w efekcie oddziaływania ujemnych temperatur. Zmiany te polegają na osłabieniu wiązań strukturalnych, rozpadzie większych mikroagregatów i pojawianiu się wody wolnej.



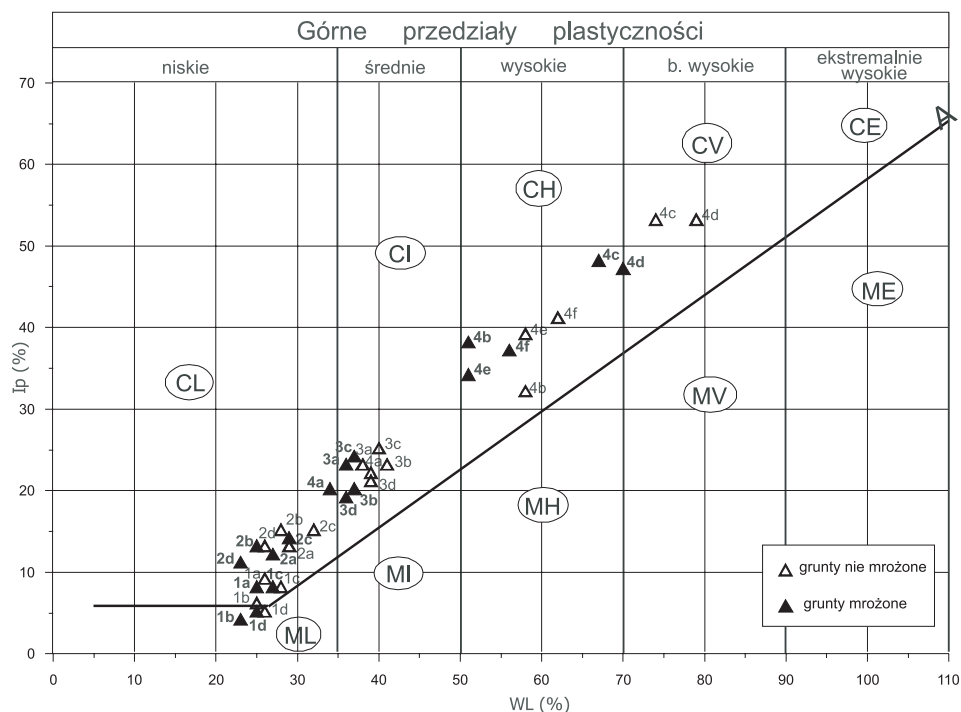
Ryc. 1. Porównanie wielkości wskaźnika pęcznienia gruntów nie mrożonych i po trzykrotnym cyklu przemrażania-odmrażania

Fig. 1. Swell indices of soils in their natural state and after three cycles of freezing-thawing

## Podsumowanie i wnioski

Efektym cyklicznego procesu mrożenia-odmrażania gruntów spoistych jest obniżenie się ich plastyczności i wzrost pęcznienia. Grunty przemrożone prędzej przechodzą w stan płynny, gdyż mają zdecydowanie niższe wartości granicy płynności, co jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym z punktu widzenia praktyki inżynierskiej. Ocena zmian plastyczności gruntów w wyniku cyklicznego mrożenia-odmrażania zostanie w niniejszej pracy przedstawiona w oparciu o uproszczony nomogram Casagrande'a (ryc. 2).

Wykres ten przedstawiający zależność między wskaźnikiem plastyczności a granicą płynności został opracowany przez Casagrande'a w 1948 r. do klasyfikacji gruntów spoistych. Modyfikacje tego nomogramu zaproponowane przez Heada (1992; za: Grabowską-Olszewską, 1998) wprowadzają podział gruntów na pięć grup plastyczności: niską (L), średnią (I), wysoką (H), bardzo wysoką (V) i ekstremalnie wysoką (E). Ponieważ nomogram Casagrande'a stanowi podstawę klasyfikacji gruntów drobnoziarnistych (obejmujących frakcje pyłową i ilową) w wielu krajach, również w normie ISO-14688, należy zwrócić uwagę na zmiany plastyczności gruntów występujących w strefach klimatycznych, w których okresowo wy-



Ryc. 2. Plastyczność gruntów naturalnych i po trzykrotnym cyklu przemrażania-odmrażania  
Fig. 2. Plasticity of soils in their natural state and after three cycles of freezing-thawing

stępują temperatury ujemne. Uproszczona wersja nomogramu Casagrande'a z modyfikacjami Head'a (1992) jest przedstawiona na rycinie 2. Zaznaczona jest na nim linia A dzieląca grunty na ropy i pyły.

Przedstawienie na tym wykresie uzyskanych wyników badań granicy płynności i wskaźnika plastyczności gruntów przemrożonych obrazuje przemieszczanie ich w stronę pól o niższej plastyczności. Nawet jeżeli wskaźnik plastyczności po przemrożeniu nie ulega zbyt dużej zmianie, to już samo obniżenie wartości granicy płynności powoduje przesunięcie danego gruntu w stronę gruntów o niższej plastyczności. Oczywiście przeważnie przesunięcia te będą odbywały się w obrębie pól o danej plastyczności, jednak należy liczyć się z sytuacją, w której przemrożone grunty będą przemieszczały się w stronę niższych plastyczności. Na podstawie uzyskanych wyników jest to wyraźnie widoczne w łąkach zawierających powyżej 30% frakcji ilowej. Próbkę oznaczoną symbolami 4c i 4d przemieszczają się z obszaru bardzo wysokiej plastyczności na pole wysokiej plastyczności, a próbka 4a z plastyczności średniej przesuwa się na pole plastyczności niskiej. Obniżenie się plastyczności gruntów jest niekorzystne zarówno w aspekcie wykorzystywania ich jako podłoża budowlanego, jak i materiału do wykonywania budowli ziemnych. W tym ostatnim przypadku często dodatkowo dochodzi problem wzrostu przepuszczalności gruntów przemrożonych (Bowders, McClelland, 1994; Othman i in., 1994). Według tych autorów trzykrotny cykl zamrażania-odmrażania powoduje największy wzrost przepuszczalności we wszystkich rodzajach gruntów spoistych, zarówno naturalnych, jak i wzorcowych. Ma to szczególne znaczenie przy budowie uszczelnień składowisk odpadów czy wałów przeciwpowodziowych

## Literatura

- Chen F.H., 1988. Foundations on expansive soils. Elsevier, Amsterdam.
- Bowders J.J., McClelland S., 1994. The effects of freeze-thaw cycles on the permeability of three compacted soils. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142.
- Grabowska-Olszewska B. (red.), 1998. Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. Wyd. Nauk. PWN Warszawa.
- Garbulewski K., 1990. Ocena pęcznienia gruntów. IX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Kraków.
- Koszela-Marek E., Choma-Moryl K., 1996. The effect of freezing on some physical properties of the Poznań clays from the Wrocław area (SW Poland) *Studia Geotechn. et Mech.* XVIII, 3-4.
- Kumor M.K., 1983. Granice konsystencji wybranych próbek ropy płoceńskiego w cyklicznym procesie zamrażania. *Arch. Hydrotech.* XXX, 3.
- Kumor M.K., 1985. Zmiany wytrzymałości i struktury ropy płoceńskiego pod wpływem zamrażania. *Arch. Hydrotech.* XXXII, 3/4.
- Kumor M.K., 1989. Zmiany mikrostruktury ropy monomineralnych i ropy płoceńskiego pod wpływem cyklicznego zamrażania i odmrażania. *Rozprawy 34, Akad. Techn.-Roln. Bydgoszcz.*

- Othman M.A., Benson C.H., Chamberlain E.J., Zimmie T.F., 1994. Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity of compacted clays caused by freeze-thaw. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142.
- Skarżyńska K.M., 1969. Wpływ procesu zamarzania na niektóre właściwości fizyko-mechaniczne gruntów spoistych. Zesz. Nauk. WSR, Rozprawy 18, Kraków.
- Skarżyńska K.M., 1985. Formation of soil structure under repeated freezing-thawing conditions. Fourth Intern. Sym. on Ground Freezing, Sapporo.