

**Zmiany ciśnienia porowego
w warunkach stałego wzrostu obciążenia
i ich wpływ na konsolidację CL
na przykładzie wybranych gruntów spoistych
z centralnej Polski.**

**Pore pressure changes
during consolidation tests with constant rate
of loading
and their influence on CL consolidation
on the example of selected cohesive soils
from central Poland.**



Piotr Stajszczak

Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o.
ul. Wałbrzyska 14/16, 02-739 Warszawa

Paweł Dobak

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii
ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

Założenia rozwiązania modelowego:

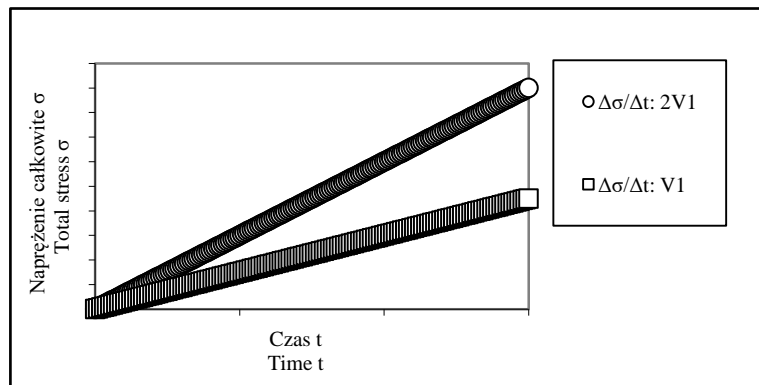
Badania typu CL:

Stała prędkość wzrostu obciążenia

Constant rate of loading **CRL**

Prędkość obciążania dobiera się empirycznie i powinna być:

- proporcjonalna do przepuszczalności badanego gruntu
- umożliwiać uzyskiwanie fazy ustalonej badania CRL przy obciążeniach spodziewanych w warunkach terenowych



„Klasyczne” parametry uzyskiwane z badań CRL

moduł
ściśliwości
jednoosiowej

$$M_0 = \frac{\Delta\sigma' \cdot H}{\Delta h} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon}$$

współczynnik
konsolidacji

$$c_v = \frac{\Delta\sigma \cdot H^2}{\Delta t \cdot 2u_b}$$

współczynnik
przepuszczalności

$$k = \frac{\gamma_w \cdot c_v}{M_0}$$

Założenia rozwiązania modelowego:

umowny czas konsolidacji $t_{(T=1)}$

może być traktowany jako

ekwiwalent współczynnika konsolidacji c_v

W nawiązaniu do zależności:

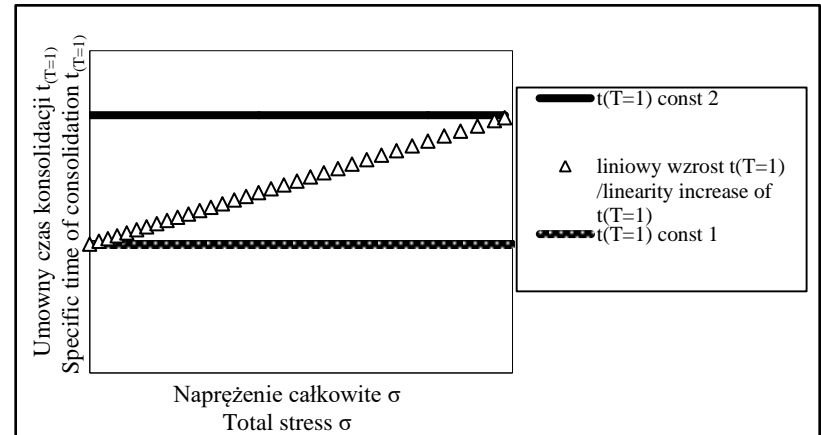
$$t_{(T=1)} = \frac{H^2}{c_v} = \frac{H^2 \cdot \gamma_w}{k \cdot M_0}$$

- wartość $t_{(T=1)}$ wyrażana jest w jednostkach czasu
- zależy od

- długości drogi drenażu H_i
- współczynnika konsolidacji c_v .
- współczynnika przepuszczalności k
- modułu ścisłości jednoosiowej M_0
- ciężaru objętościowego fazy ciekłej γ_w

Parametr $t_{(T=1)}$ opisuje zmiany cech filtracyjno-konsolidacyjnych ośrodka gruntowego w trakcie wzrost obciążenia konsolidowanego gruntu

W warunkach drenażu w badaniach typu CL grunty spoiste uzyskują wartości $t_{(T=1)}$ rzędu od kilku do kilkudziesięciu minut co odpowiada osiągnięciu około 90% zaawansowania w konsolidacji w klasycznym rozwiązaniu Terzaghi'ego.



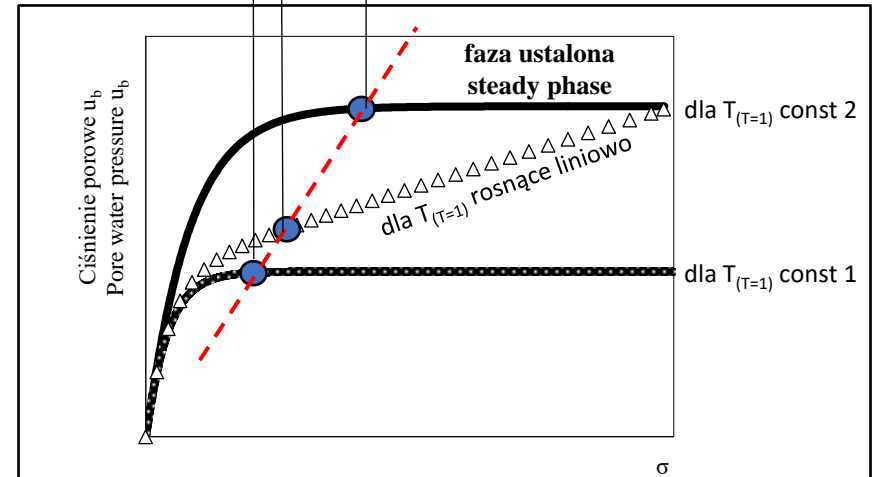
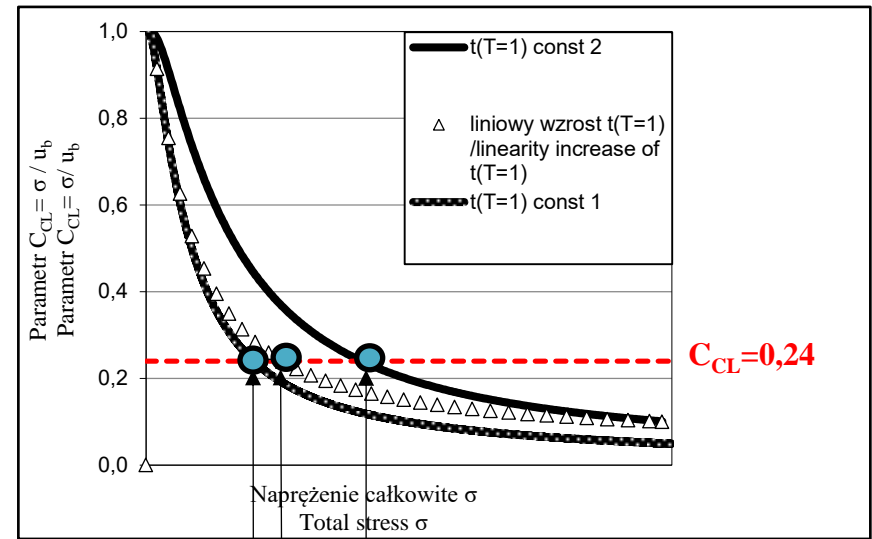
Założenia rozwiązania modelowego:

Dyskretyzacyjna aplikacja rozwiązania Terzaghi'ego do warunków stałego wzrostu obciążenia CRL (Dobak, 1999,2008) pokazuje sposoby osiągnięcia **fazy ustalonej (miarodajnej)** procesu konsolidacji CL wyrażone:

- wartością **0,24** bezwymiarowego parametru ciśnienia wody w porach

$$C_{CL} = \frac{u_b}{\sigma}$$

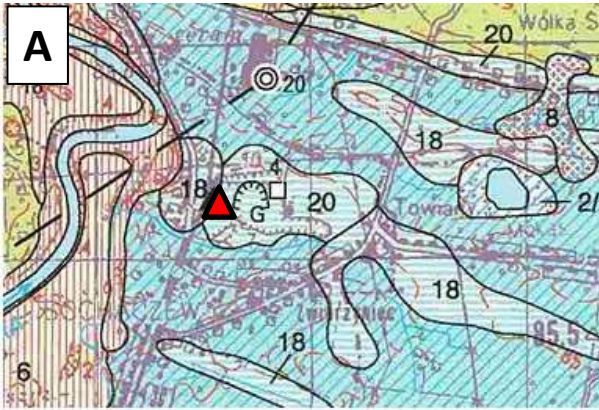
- różnym charakterem zmian ciśnienia porowego w zależności od przyjętego modelu stałej lub zmiennej wartości parametru $t_{(T=1)}$



Badane grunty

Badaniom poddano:

- 1) nieskonsolidowane łyły zastoiskowe (warwowe) występujące wzdłuż krawędzi tarasu błońskiego w nieprzerwanym powierzchniowo kompleksie od Plecewic do miejscowości Kampinos (woj. mazowieckie) (Haisig & Wilanowski, 2008);
- 2) skonsolidowane gliny lodowcowe zlodowacenia odry (Sarnacka, 1979) występujące na powierzchni wysoczyzny warszawskiej m.in. w rejonie „Fortu Służew” (Ursynów).



500 m



500 m

Objaśnienia wybranych wydzieleni/symboli zawarte na zamieszczonych fragmentach SMGP w skali 1:50 000:

A-Arkusz Kampinos (521) Haisig J., Wilanowski S. 2008

18-Piaski zastoiskowe, stadiał górny zlodowacenia Wisły (Plejstocen)

20-łyły zastoiskowe, stadiał górny zlodowacenia Wisły (Plejstocen)

G-Glinianki

B-Arkusz Warszawa Wschód (524) Sarnacka Z. 1979.

${}^p Q_{p3}^2$ -Piaski kemów stadiał mazowieckiego-podlaskiego (Plejstocen)

${}^{fg} Q_{p3}^2$ -Piaski wodnolodowcowe górne stadiał mazowiecko-podlaskiego (Plejstocen)

$g/p1$ -Gliny zwałowe na piaskach wodnolodowcowych dolnych stadiał mazowiecko-podlaskiego (Plejstocen)

${}^g Q_{p3}^2$ -Gliny zwałowe stadiał mazowiecko-podlaskiego (Plejstocen)

$p1/g$ -Piaski wodnolodowcowe dolne na glinach zwałowych stadiał maksymalnego (Plejstocen)

im/g -łyły, mułki i piaski zastoiskowe na glinach zwałowych stadiał maksymalnego (Plejstocen)

${}^{im} Q_{p3}^2$ -łyły, mułki i piaski zastoiskowe stadiał mazowiecko-podlaskiego (Plejstocen)

${}^g Q_{p3}^1$ -Gliny zwałowe stadiał maksymalnego (Plejstocen)

 Miejsce pobrania próbek do badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne

Cel badań:

1) ocena wpływu

- **właściwości fizycznych**, składu mineralnego i granulometrycznego
- oraz **cech strukturalnych** (naturalnych i zmienionych)
w gruntach spoistych

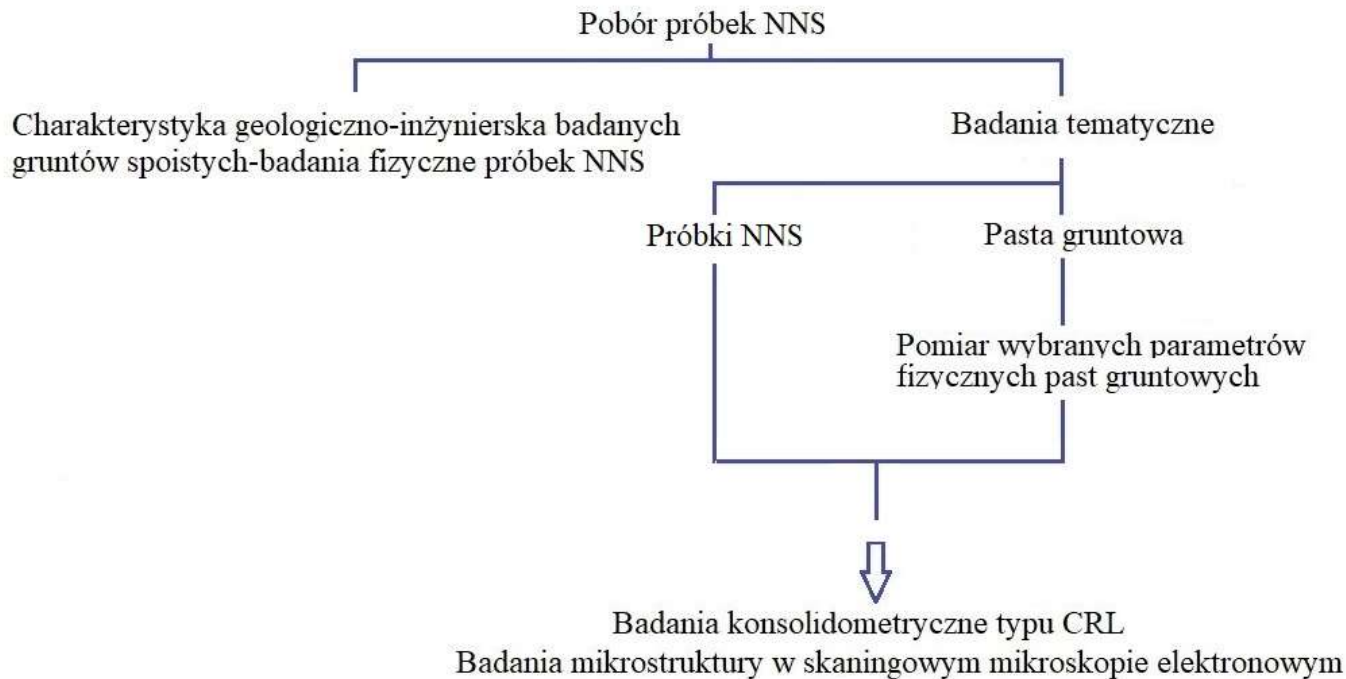
na **charakter zmian ciśnienia porowego** w trakcie stałego wzrostu obciążania

2) analiza **zgodności** przebiegu **konsolidacji CL** w realizowanych, doświadczalnych programach badawczych **z** istniejącymi rozwiązaniami **teoretycznymi**

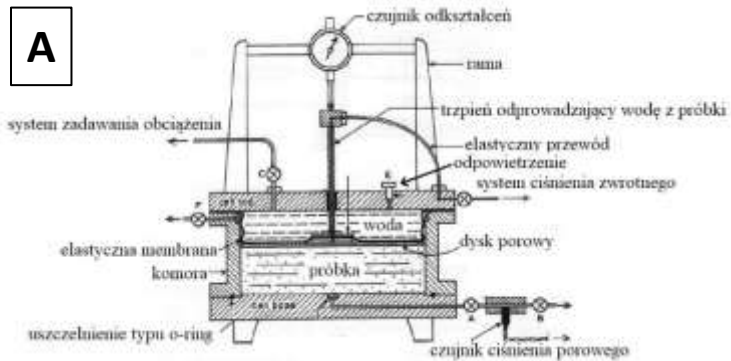
3) określenie zmian parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych w zależności od

- genezy i struktury gruntu
- warunków prowadzenia badań CL (prędkości obciążenia)

Program badań



Aparatura badawcza



Objaśnienia symboli:

- 1-komora Bardena Rowe'a,
- 2-czujnik ciśnienia porowego,
- 3-interfejs do badań gruntów zanieczyszczonych,
- 4-kontrolery ciśnienia i objętości

Aparatura zastosowana do wykonania badań konsolidacji CL oraz mikrostruktury:

A- Schemat komory Rowe'a wg Head, 1986;

B- stanowisko do badań konsolidacji CL, Wydział Geologii UW;

C- mikroskop skaningowy Jeol JSM 6380 LA, Wydział Geologii UW

Skład mineralny badanych gruntów

Lokalizacja		Gлина lodowcowa-Warszawa (Ursynów)	Иł zastoiskowy- Plecewice
Skład mineralny	Beidelit	17,6	14,9
	Illit	10,6	41,6
	Kaolinit	3,2	7,7
	Węglany	5,6	11,0
	Kwarc i inne	63,0	23,8

Wyniki badań składu mineralnego gliny lodowcowej z rejonu Warszawy oraz ілу zastoiskowego z rejonu Plecewic.

Parametry fizyczne badanych gruntów

Lokalizacja	Gлина lodowcowa-Warszawa (Ursynów)		Ił zastoiskowy-Plecewice	
	Próbki NNS*	Pasty gruntowe*	Próbki NNS**	Pasty gruntowe
w [%]	15,3-18,9	36,8-39,7	27,7-32,4	65,8-72,6
w _p [%]	15,1-18,0*		25,7-28,5	
w _L [%]	40,3-46,2*		70,2-79,6	
I _L [-]	-0,06-0,11	0,74-0,85	0,01-0,13	0,81-0,95
ρ _s [Mg/m ³]	2,66*		2,67-2,72	
ρ [Mg/m ³]	2,10-2,16	1,83-1,86	1,88-1,92	1,60-1,64
n[-]	0,30-0,33	0,49-0,51	0,44-0,48	0,63-0,66
e [-]	0,43-0,50	0,96-1,04	0,78-0,91	1,72-1,92
Sr [-]	0,97-1,00	1,00	0,94-1,00	1,00
f _i [%]	31-44		72-84	
f _π [%]	22-38		15-27	
f _p [%]	27-39		0-1	

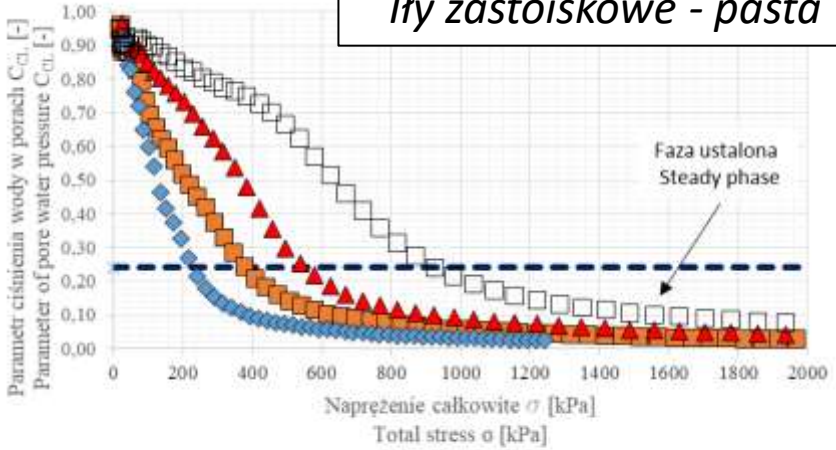
Parametry fizyczne iłu zastoiskowego z rejonu Plecewic oraz gliny lodowcowej z rejonu Fort Służew (Warszawa).

Objaśnienia: w – wilgotność, w_p-granica plastyczności, w_L-granica płynności, I_L-stopień plastyczności, ρ_s-gęstość właściwa, ρ-gęstość objętościowa, n-porowatość, e-wskaźnik porowatości, S_r-stopień wilgotności, f_i-frakcja iłowa, f_π-frakcja pyłowa, f_p-frakcja piaskowa.

Badania konsolidacyjne

zmiany parametru C_{CL}

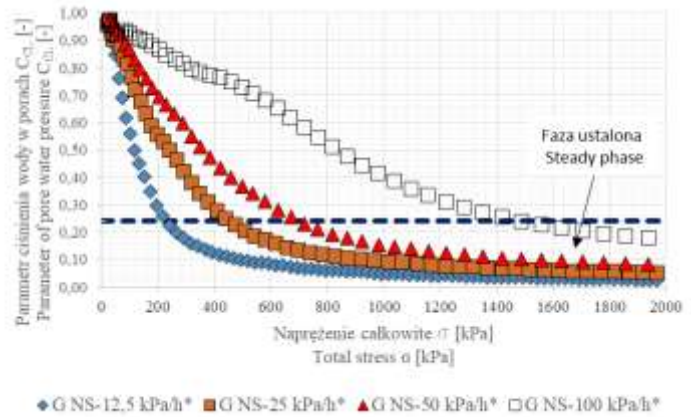
Iły zastoiskowe - pasta



■ PL NS-25 kPa/h ▲ PL NS-50 kPa/h ◆ PL NS-12,5 kPa/h □ PL NS-100 kPa/h

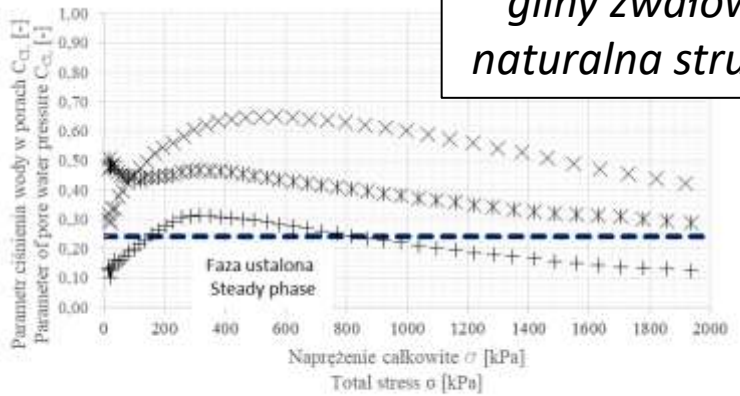
Wartości parametru ciśnienia wody w porach w badaniach CRL iłów zastoiskowych z Plecówic oraz glin lodowcowych z Warszawy:
-wg. P. Stajszczyk i in., 2020.

gliny zwałowe - pasta



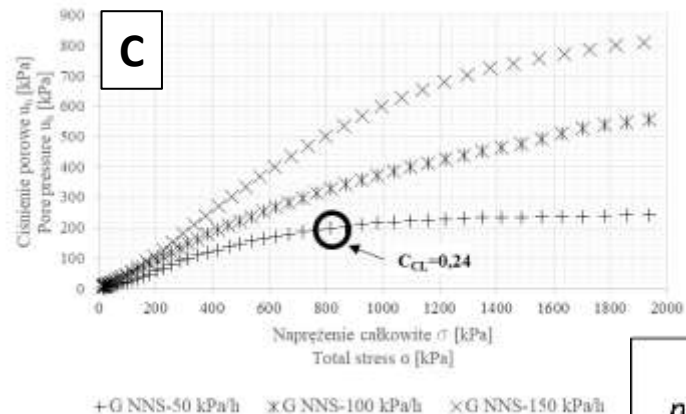
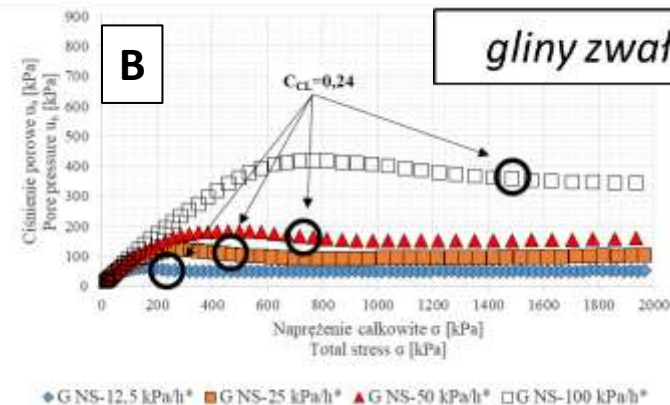
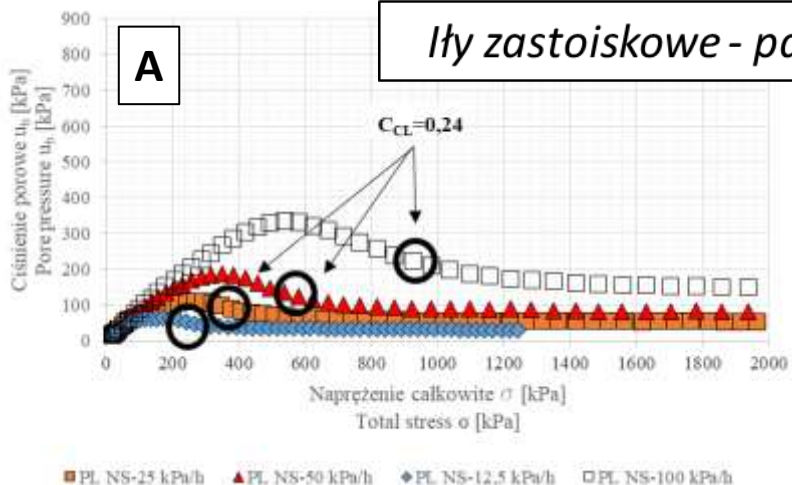
◆ G NS-12,5 kPa/h* ■ G NS-25 kPa/h* ▲ G NS-50 kPa/h* □ G NS-100 kPa/h*

gliny zwałowe - naturalna struktura



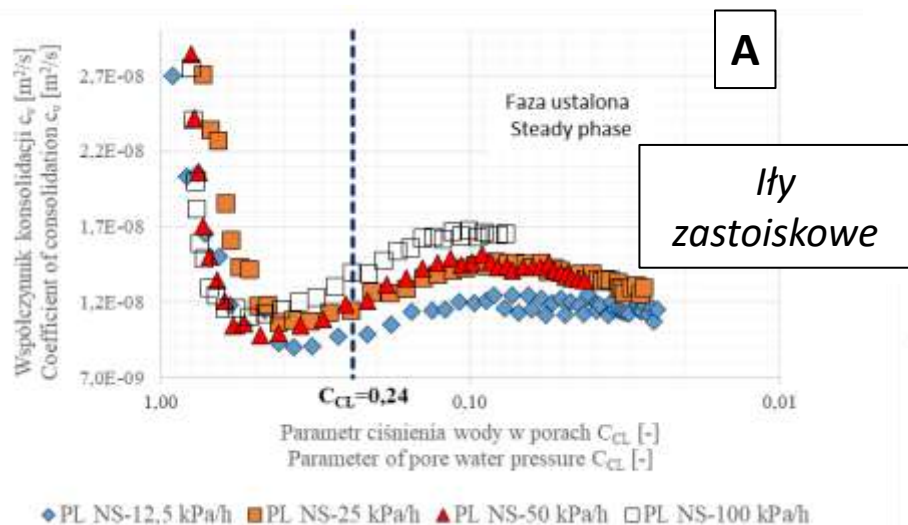
+ G NNS-50 kPa/h ✕ G NNS-100 kPa/h ✕ G NNS-150 kPa/h

Badania konsolidacyjne – zmiany ciśnienia porowego

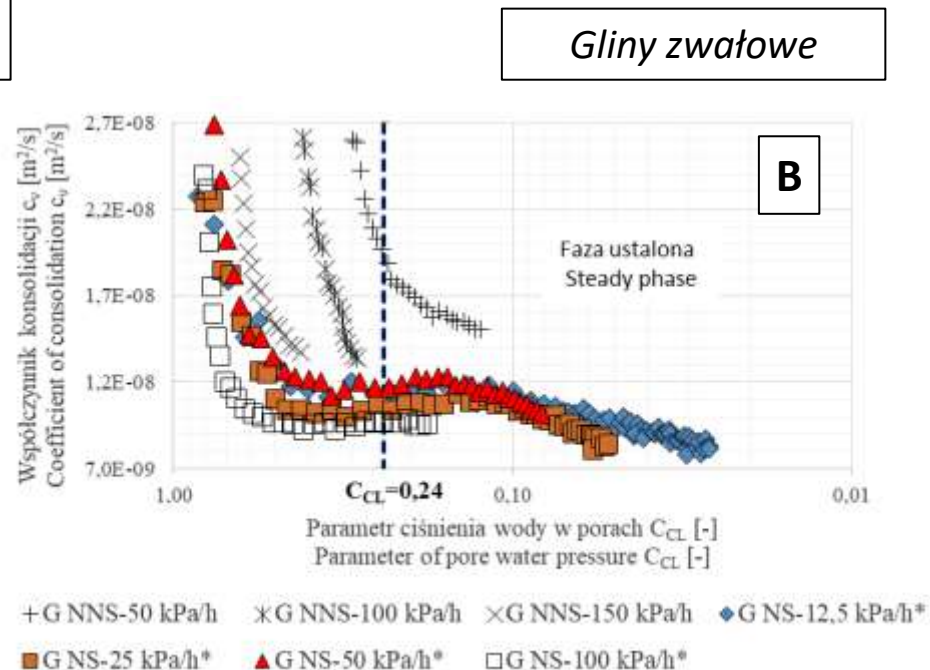


Wartości ciśnienia porowego w badaniach CRL
iłłów zastoiskowych z Plecewic (A)
oraz glin lodowcowych z Warszawy (B i C):
NS-pasta gruntowa, NNS-próbka o naturalnej
strukturze. *-wg. P. Stajszczak i in., 2020.

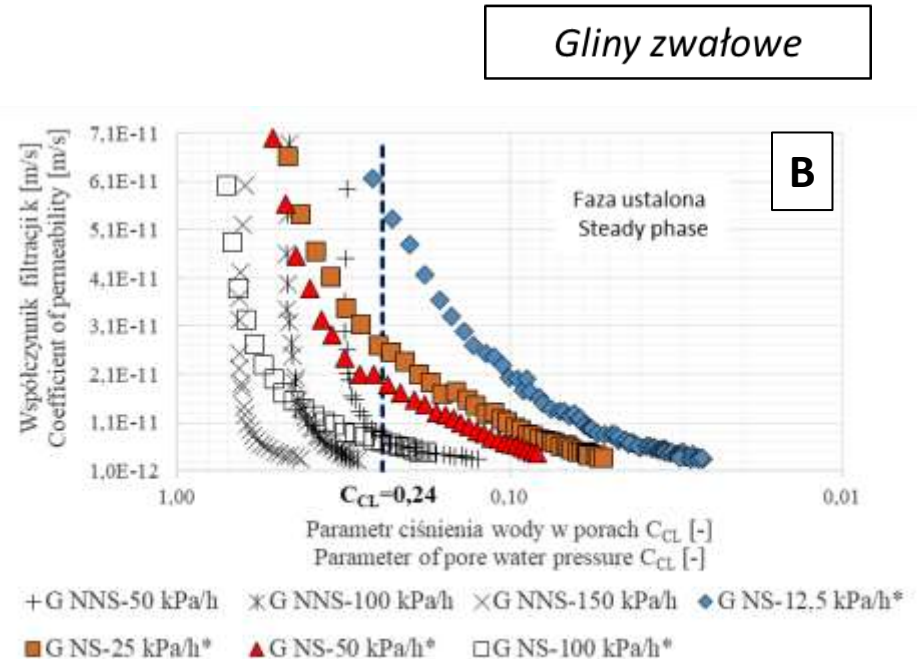
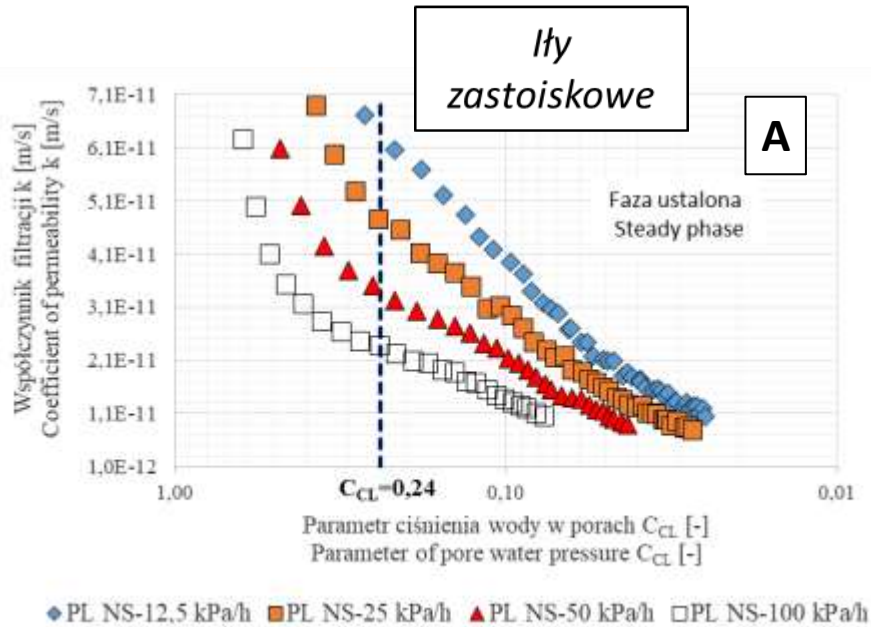
Zmiany współczynnika konsolidacji



Wartości współczynnika konsolidacji w badaniach CRL iltów zastoiskowych z Plecewic (A) oraz glin lodowcowych z Warszawy (B): NS-pasta gruntowa, NNS-próbka o naturalnej strukturze. *-wg. P. Stajszczak i in., 2020.

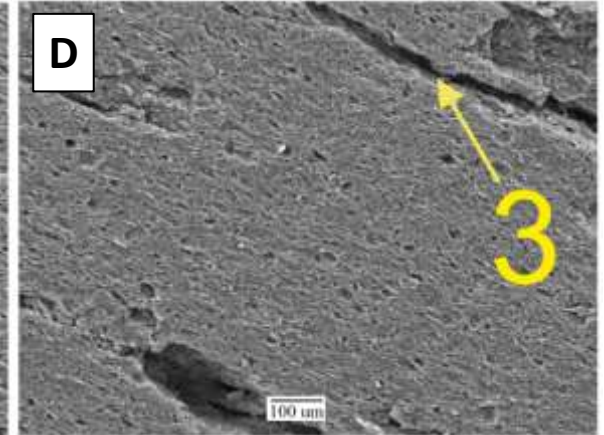
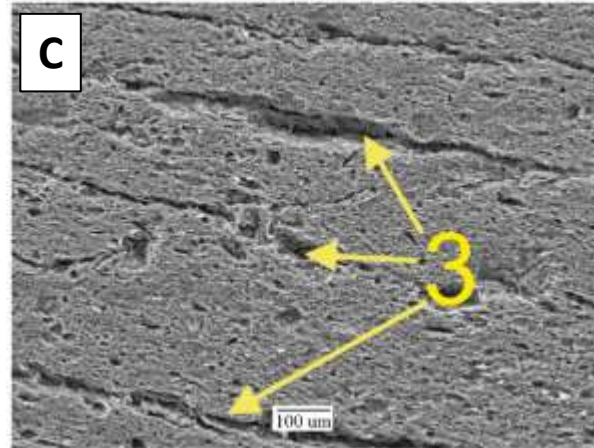
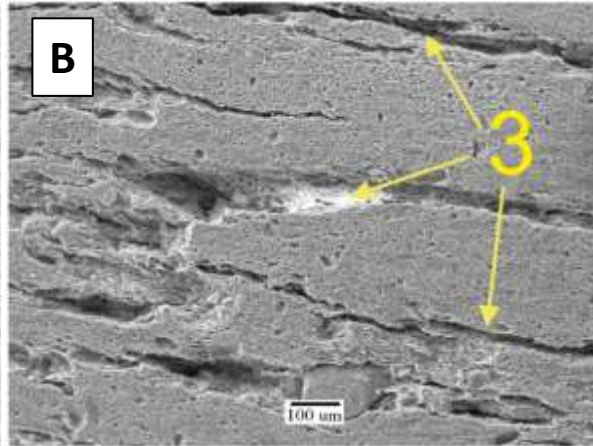
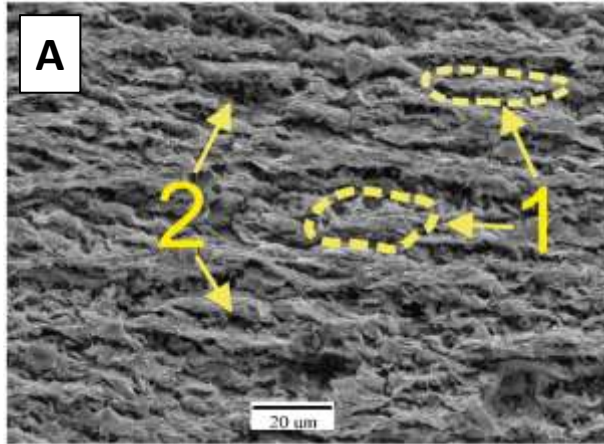


Zmiany współczynnika filtracji



Wartości współczynnika filtracji w badaniach CRL łął zastoiskowych z Plewewic (A) oraz glin lodowcowych z Warszawy (B): NS-pasta gruntowa, NNS-próbka o naturalnej strukturze. *-wg. P. Stajszczak i in., 2020.

Badania mikrostruktur w SEM



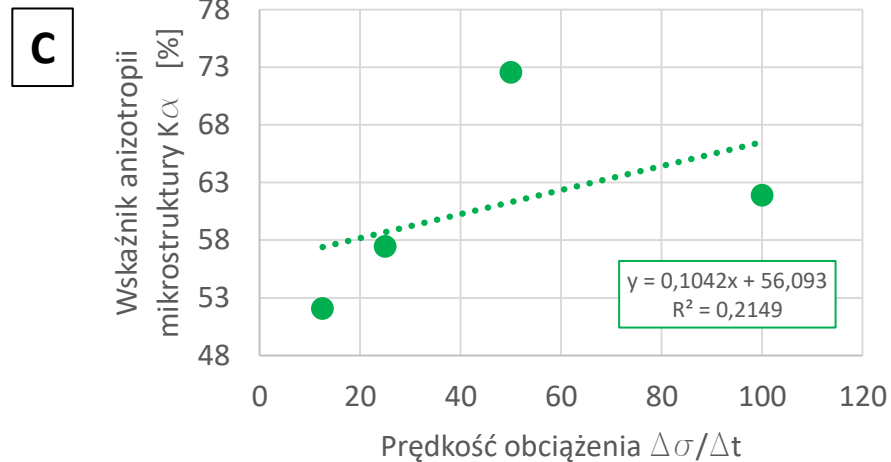
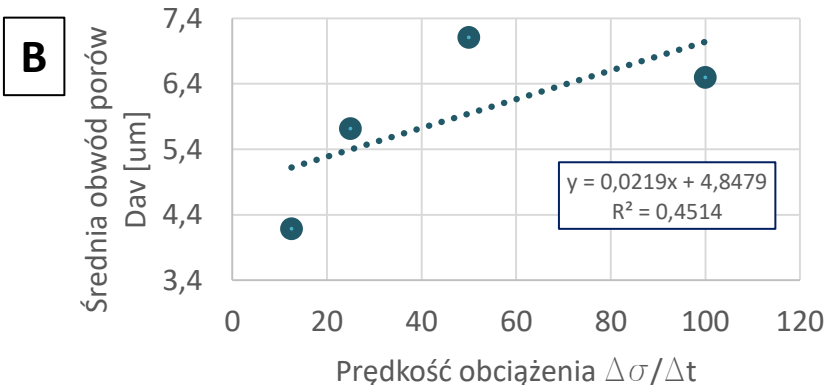
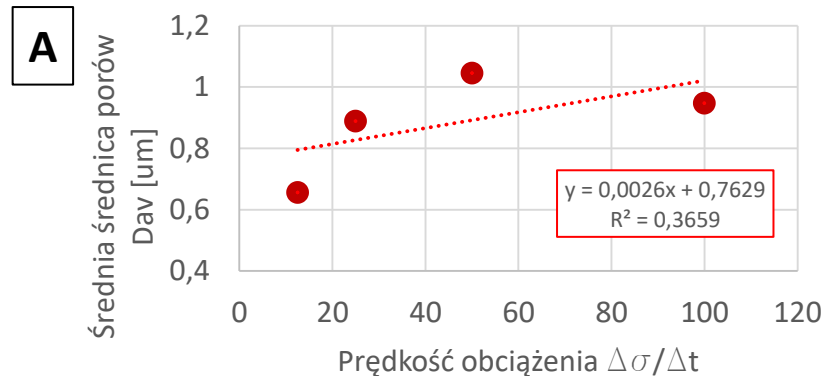
*Mikrostruktura pasty gruntowej iłu
zastoiskowego z rejonu Plecewicz:*

*A-próbka przed badaniem CRL,
B-próbka po badaniu CRL 12,5 kPa/h,
C-próbka po badaniu CRL 50 kPa/h,
D-próbka po badaniu CRL 100 kPa/h.*

Objaśnienia:

1-mikroagregaty minerałów ilastych,
2- pory,
3-drogi filtracji.

Badania mikrostruktur w SEM



Zależność pomiędzy prędkością obciążenia a wybranymi parametrami mikrostruktury wyznaczonymi w programie STIMAN dla pasty itów zastoiiskowych rejonu Plecewicz.

WNIOSKI

1. Porównanie **dystrybucji ciśnienia porowego** w trakcie badań CRL z rozwiązaniami modelowymi konsolidacji CL pozwala **identyfikować** przebudowę struktury gruntu.

Narzędziami do tych ocen mogą być zależności:

- bezwymiarowego parametru ciśnienia wody w porach $C_{CL} - \sigma$
- wartości ciśnienia porowego $u_b - \sigma$

2. Analiza **zmian** bezwymiarowego parametru ciśnienia wody w porach C_{CL} wskazuje na możliwość

- **opóźnionej mobilizacji** fazy ciekłej w twardoplastycznych gruntach o naturalnej strukturze
- **kontrakcji** ciśnienia porowego przy nadmiernej prędkości obciążania
- **rozdzielenia faz:** nieustalonej i ustalonej przy wartości $C_{CL} = 0,24$

3. Stwierdzono **odrębność** zachowań gruntu

- o naturalnej strukturze, twardoplastycznego, początkowo trójfazowego;
- miękkooplastycznego materiału (pasty) pozbawionego geologicznie kształtowanych więzi strukturalnych.

4. Charakterystyczną oznaką zmian strukturalnych podczas obciążania pozbawionego naturalnych więzi materiału gruntowego było po osiągnięciu u_{bmax} zmniejszenie wartości ciśnienia porowego i później jego powtórna stabilizacja. Efekty te, odrębne od modelowych założeń wskazują na kształtowanie się w gruncie pod wpływem rosnącego ciśnienia porowego **nowych, uprzywilejowanych dróg filtracji**. Ich obecność potwierdzają obrazy mikrostrukturalne.

5. Wytwarzanie się uprzywilejowanych dróg filtracji jest oprócz stanu naprężenia w fazie stałej i ciekłej zależne od **składu mineralnego i granulometrycznego** gruntów. Wartości współczynników filtracji i konsolidacji past gruntowych sporządzonych z iłów zastoiskowych z Plecewic były ok 1,1-2,3 razy wyższe od wyników badań past gruntowych glin lodowcowych zlodowacenia odry w Warszawie.

6. Kryterium **optymalnego doboru prędkości obciążenia** w badaniach CL jest jak najszybsze uzyskiwanie fazy ustalonej badania oraz unikanie dławienia przepływu na skutek zbyt wysokich wartości ciśnienia porowego. W badanych rodzajach gruntów zaleca się stosowanie prędkości obciążenia 12,5 – 25 kPa/h w pastach, a w gruntach o naturalnej strukturze nie więcej niż 50 kPa/h.

7. Prezentowane badania laboratoryjne **rekomendują metodę CRL**, jako wiarygodne narzędzie do oceny parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych ośrodka gruntowego na potrzeby dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich. Istotną zaletą badań konsolidometrycznych jest monitoring zmian ciśnienia porowego w trakcie badań. Pozwala to na **określenie charakteru i miarodajności czynnika filtracyjnego jako kluczowego w praktycznych aplikacjach teorii konsolidacji.**

DZIĘKUJEMY ZA UWAGĘ

Literatura:

1. ASTM D 4186-89 Standard test method for one dimensional consolidation properties of soils using controlled strain loading.
2. Dobak P. 1999-Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN Kraków.
3. Dobak P. 2008-Evaluation of consolidation parameters in CL tests; theoretical and practical aspects. Geological Quarterly, 52 (4): 397-410.
4. Dobak P., Szczepański T., Kowalczyk S. 2015-Load velocity influence on changes of soil consolidation and permeability parameters in CL-type tests. Geological Quarterly, 59 (2): 382-390.
5. Duncan J.M. 1993-Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement. Journ. Of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 9, pp.1333-1359.
6. Grabowska-Olszewska B. 1998 – Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. PWN, Warszawa.
7. Haisig J., Wilanowski S. 2008-Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, Arkusz Kampinos (521). PIG-PIB. Warszawa.
8. Head K.H. 1986-Manual of Soil Laboratory Testing. Pentch Press. London.
9. Janbu N., Tokheim O., Senneset K. 1980- Consolidation tests with continuous loading. Norwegian Geotechnical Institute. Publ. No. 9, Oslo.
10. Kaczyński R. 2017-Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski. Wydanie 1. Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa.
11. Kościówko H., Wyrwicki R. 1996 – Metodyka badań kopaliny ilastych. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
12. Kowalczyk S. 2007-Zmiany właściwości filtracyjnych w procesie konsolidacji zielonych ilów beidelitowych z Rowu Kleszczowa. Praca doktorska. Wydz. Geologii UW.
Warszawa.

13. Lindner L. 1992-Czwartorzęd. Wydawnictwo PAE. Warszawa.
14. Nash D.F.T., Sills G.C., Davison L.R., 1992 – One dimensional consolidation testing of soft clay from Bothkennar. Geotechnique vol 42 No 2
15. PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.
16. PN_EN ISO 14688-1 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
17. PN_EN ISO 14688-2 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
18. PN-EN ISO 17892-5. Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 5: Badanie edometryczne gruntów.
19. Rowe P.W, Barden L. 1966- A new consolidation cell. Geotechnique. Vol. 16, No. 2, pp. 162-170.
20. Sarnacka Z. 1979- Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000. Arkusz Warszawa Wschód (524). Wydawnictwa Geologiczne. Warszawa.
22. Sergejev J.M, Grabowska-Olszewska B., Osipov V.I., Sokolov V.N., Rau E.I., 1980- The classification of microstructures of clay soils. Journal of Microscopy, vol. 120. 237-260.
23. Sokolov V.N. 1990- Engineering-geological classification of clay microstructures. Proc. 6th, Inter. IAEG Congress, 1. 753-760.
24. Stajszczak P., 2018-Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ilów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia. Prz. Geol., 66: 558-568.
25. Stajszczak P., 2019-Wpływ zanieczyszczenia paliwami ropopochodnymi na zmiany parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych i strukturalnych w gruntach spoistych. Praca doktorska. Wyd. Geol. UW.
26. Stajszczak P., Dobak P., Gendek K., 2020 - Zmiany właściwości konsolidacyjnych, filtracyjnych i mikrostrukturalnych glin lodowcowych w przebiegu badań konsolidacji z ciągłym wzrostem obciążenia. Prz. Geol., vol.68, nr 11: 843-852.

27. Stajszczak P., 2021-Zmiany właściwości filtracyjnych mieszanki gruntu il-piasek na skutek zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi w aspekcie mineralnych barier izolacyjnych. *Prz. Geol.*, vol. 69, nr 1: 33-42.
28. Trzciniński J. 1998-Mikrostruktury a właściwości geologiczno-inżynierskie glin lodowcowych. Praca doktorska. Wydz. Geol. UW. Warszawa.
29. Vu Cao Minh 1977-Nowa metoda badań konsolidacji gruntów. *Arch. Hydrotech.*, 24 (2):253-265.
30. Woźniak H. 2001-Zastosowanie konsolidometru hydraulicznego Rowe'a do badań odkształceń objętościowych gruntów nasypowych w wyniku zawodnienia. *Geologia*.
31. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie . Tom 27. Zeszyt 2-4.
31. Wissa A.E.Z, Christian J.T., Davis E.H., Heiberg S. 1971-Consolidation at constant rate of strain. *Proc. ASCE*, vol. 197, No. SM2.
32. Zawrzykraj P., Rydelek P., Bąkowska A. 2017- Geo-engineering properties of Eemian peats from Radzymin (central Poland) in the light of static cone penetration and dilatometer tests. *Engineering Geology*, 226, 290-300.

